

---

# 2023년 대학부설 과학영재교육원 사사과정 연구성과 발표대회

---

- 물리 -



한국과학창의재단  
Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity



# contents

## 물리A

01. 단진자와 이중 진자를 통한 주기 운동의 이해	3
02. 날개 없는 선풍기의 림 구조 최적화 설계	23
03. 던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트 개발	35
04. 수열합성에 의한 ZnO nano-rods의 성장과 광학적 특성 분석	49
05. 자전거 구동에 의한 비접촉형 발전기 제작과 활용	71
06. 테라헤르츠파 비파괴 이미징 기법을 이용한 광합성 정도에 따른 하와이 무궁화 변화 관찰	87
07. 음원 사이의 파동의 간섭 분석	93
08. 반도체에서 전압에 따른 전류의 세기	105
09. 교육용 스텔링 엔진의 PV 다이어그램 측정 및 분석	135
10. 우리주변의 블루라이트 탐구	149
11. 레이저를 활용한 회전모터 내 리사주 도형 형성 실험과 분석	159
12. 나노입자를 이용한 광결정 제작	173

## 물리B

01. 중학생의 자전거 헬멧 착용에 대한 인식 및 헬멧 모형을 이용한 충격력 비교	189
02. 무선 충전의 효율 개선 방법 연구	209
03. 도플러 효과를 이용한 자동차의 속도 측정	225
04. 회로 변수에 따른 전자기 펄스(EMP)의 세기 변화	237
05. 구(球)형 집광 모듈의 제작과 온수기로서의 효율	255
06. ZnS 형광체를 이용한 고효율 발광 특성에 관한 연구	271
07. 재사용 가능한 산염기 구별 빌베리 염색 천 개발 및 산도 정량 분석이 가능한 빌베리 태양전지 개발	281
08. 맴돌이 전류를 이용한 자기브레이크	295
09. 부메랑 종이비행기의 곡예 원리 탐구	305
10. 최대 에너지 효율의 수평축 윈드 터빈 제작	317
11. 태양광 패널의 온도 변화에 따른 효율과 바람을 활용한 효율 개선 방법 탐구	349
12. 코일을 통과하는 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기	367
13. 열 증착법으로 제조한 구리 박막의 저항 탐구	379



# 물리A

01. 단진자와 이중 진자를 통한 주기 운동의 이해 .....	3
02. 날개 없는 선풍기의 림 구조 최적화 설계 .....	23
03. 던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트 개발 .....	35
04. 수열합성에 의한 ZnO nano-rods의 성장과 광학적 특성 분석 .....	49
05. 자전거 구동에 의한 비접촉형 발전기 제작과 활용 .....	71
06. 테라헤르츠파 비파괴 이미징 기법을 이용한 광합성 정도에 따른 하와이 무궁화 변화 관찰 .....	87
07. 음원 사이의 파동의 간섭 분석 .....	93
08. 반도체에서 전압에 따른 전류의 세기 .....	105
09. 교육용 스텔링 엔진의 PV 다이어그램 측정 및 분석 .....	135
10. 우리주변의 블루라이트 탐구 .....	149
11. 레이저를 활용한 회전모터 내 리사주 도형 형성 실험과 분석 .....	159
12. 나노입자를 이용한 광결정 제작 .....	173



물리A

## 01\_단진자와 이중 진자를 통한 주기 운동의 이해



# 단진자와 이중 진자를 통한 주기 운동의 이해

유지인 (대전문정중학교 3학년)

이준서 (대전노은중학교 2학년)

최지웅 (대전노은중학교 2학년)

지도교수 : 신창섭 (충남대학교 물리학과)

자연에 발견되는 많은 안정적인 시스템의 물체는 한정된 공간에서 주기적인 운동을 한다. 따라서 물체의 주기 운동을 단순화된 물리법칙을 통해 분석하는 과정은 자연 현상의 이해에 매우 중요한 한 걸음이라 할 수 있다. 우리는 이 논문을 통해 진자(pendulum) 운동을 분석하여 주기 운동의 다양한 가능성을 살펴보았다. 우선 단진자(simple pendulum) 운동의 주기(period)가 진자의 길이나 진폭에 따라 어떻게 바뀔 수 있는지를 실험을 통해 살펴보고, 물리법칙을 통한 주기 공식과 비교 분석하였다. 이어서 컴퓨터를 활용한 이중 진자(double pendulum)의 주기 운동 분석 실험을 수행하였다. 이중 진자의 운동 방정식을 구현한 시뮬레이션을 통해 이중 진자의 왕복 주기가 시간에 따라 어떻게 바뀌는지, 그리고 초기 조건에 얼마나 민감한지를 단진자 운동과 비교 분석하였다. 이를 통해 단진자 운동은 초기 조건으로 쉽게 그 운동을 예측할 수 있지만, 이중 진자 운동은 단진자와 다르게 초기 조건으로 예측하기 매우 어려운 카오스(Chaos)적 현상을 보임을 확인할 수 있었다.

## I. 서론

자연 현상은 매우 복잡하고 이를 이해하기 위한 과학자의 노력은 끝이 없다. 하지만 이러한 복잡한 현상을 최대한 단순화하여 분석함으로써 뉴턴의 운동 법칙 등 위대한 물리법칙이 탄생할 수 있었다. 자연에 존재하는 다양하고 복잡한 시스템은 크게 안정적인 시스템과 불안정한 시스템으로 나눌 수 있을 것이다. 불안정한 시스템은 불안정하다는 특성에 의해서 길게 유지되기 어려워 미래에 어떻게 될지 예측하기가 매우 어렵지만, 안정적인 시스템은 한정된 공간에서 물체가 반복적으로 움직이고 따라서 어느 정도 예측 가능한 주기적인 운동을 보여주곤 한다. 봄, 여름, 가을, 겨울의 주기적인 계절 변화를 이끄는 지구의 공전이나, 그네 타기, 안정적인 상태에서 나오는 뇌파, 다양한 물체의 진동 운동 등 세부적으로는 예측하기 어렵지만 큰 틀에서 예측 가능해 보이는 주기 운동이 주변에 많이 있다.

비록 실제 자연 현상은 대단히 복잡하지만, 물리법칙을 통해 이러한 주기 현상을 좀 더 잘 이해해볼 수 있지 않을까? 이러한 질문은 주기 운동을 하는 가장 단순한 시스템에 대한 관심으로 이어졌고 그 대상으로 진자(pendulum)가 선택되었다. 진자란 일정한 길이를 가진 축의 끝에 달린 물체가 중력 등 외부의 힘에 의해서 주기적으로 움직이는 물체, 혹은 진동하는 추이다. 이 중 가장 단순한 형태인 고정점에 대해 하나의 진동수가 운동하는 경우인 단진자(simple pendulum) 운동에 대한 공부를

통해, 진자 운동의 주기  $T$ 는 진자의 길이  $l$ 과 중력 가속도  $g=9.8\text{m/s}^2$ 에 대하여  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 로 진자의 초기 조건인 진폭에 상관없이 같음을 알게 되었다. 즉 진자의 길이만 같으면, 진자를 운동시키는 누구에게나 같은 주기를 가지게 되므로 이를 바탕으로 시간도 정확히 측정할 수 있으니 그 결과가 매우 흥미로워 보였다.

하지만 좀 더 공부를 해보니, 진자 운동의 주기는 그렇게 단순하지가 않고 초기 진자의 진폭에도 살짝 의존하며, 이중 진자(double pendulum)와 같이 진자 추 끝에 또 다른 진자가 매달려 있는 시스템의 경우에는 훨씬 더 복잡하고 다양한 주기 운동이 생길 수 있음을 알게 되었다. 따라서 진자 운동을 직접 실험해보고 운동을 결정하는 물리법칙을 통해 진자 운동을 예측해봄으로써 주기 운동의 다양성을 이해하고, 물리법칙의 작동 방식도 이해하고자 본 연구를 수행하였다.

이러한 큰 목표를 바탕으로 **연구의 주제**를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 단진자 운동의 주기를 다양한 초기 조건에 대해 실제 측정하고 이를 뉴턴 운동 법칙을 통해 계산된 이론값과 비교하여 초기 조건에 따라 주기가 어떻게 바뀌는지를 이해한다.
- 2) 이중 진자 운동에 대한 물리법칙을 통해 얻어지는 시뮬레이션을 활용하여 다양한 초기 조건에 따라 이중 진자 운동이 어떻게 이뤄지는지를 확인하고 이를 통해 주기 운동을 단진자의 경우와 비교한다.

연구를 수행하는 과정에서, 운동 방정식을 푸는데 필요한 수학 지식의 한계를 해결하기 위해서 컴퓨터 프로그램을 많이 활용하였다. 이의 도움을 받아 연구는 크게 단진자 운동의 주기 측정에 대한 실제 실험과 물리법칙을 바탕으로 만들어진 시뮬레이션을 통한 가상 실험으로 이뤄졌다.

## II. 이론적 배경

### 1) 뉴턴 운동 법칙

본 연구에 필요한 이론은 가장 기본적인 뉴턴 운동 법칙이다. 뉴턴 운동 법칙은 뉴턴이 물체의 움직임을 결정하는 요소를 힘, 질량, 가속도를 활용하여 3가지의 법칙으로 정리한 것으로 각 법칙은 다음과 같다. [1]

**제1법칙 (관성의 법칙)** 힘이 가해지지 않는 한 모든 물체는 등속도 운동을 한다.

**제2법칙 (가속도의 법칙)** 물체의 가속도  $\vec{a}$ 는 물체에 작용하는 힘  $\vec{F}$ 에 비례하고 물체의 질량  $m$ 에 반비례한다.  $\vec{F}=m\vec{a}$

**제3법칙 (작용과 반작용의 법칙)** 두 물체가 서로에게 작용하는 힘은 항상 크기는

같은 방향은 정반대이다.  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$

이러한 운동 법칙을 이해하기 위해 필요한 기본적인 개념에 대해서 먼저 살펴보자. 우선 방정식에 등장한 화살표 모양의 물리량  $\vec{a}$ 은 벡터(vector)를 의미하는데, 벡터란 아래의 그림과 같이 크기와 방향을 가지는 물리량이다.

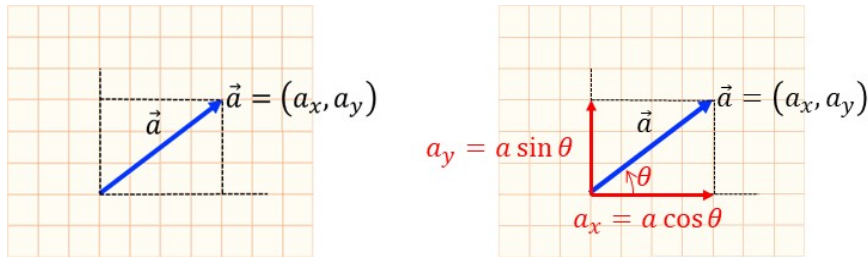


그림 2 벡터의 표현: (왼쪽) 크기와 방향을 가진 벡터의 표현, (오른쪽) 벡터의 각 좌표 축 방향으로의 성분의 표현

벡터  $\vec{a}$ 를 표현할 수 있는 좌표를 도입하여 각 성분으로  $a_x, a_y$ 를 나타낼 수 있고 각 성분 벡터의 합은 원래 벡터가 된다. 이러한 벡터를 활용하면 작용하는 힘, 물체의 위치, 속도, 가속도 등을 각각 크기와 방향으로 혹은 성분으로 표현할 수 있다.

속도(velocity)는 단위 시간당 변화한 위치를 의미하며 특정 시간 구간 동안 변화된 위치를 나타내는 평균 속도와 이 시간 간격을 매우 작게 잡음으로써 얻어지는 주어진 시간에서의 순간적인 위치 변화율을 의미하는 순간속도가 있다. 순간속도의 경우 아래 그림과 같이 시간에 대한 위치의 그래프에서 주어진 시간에서의 접선의 기울기로 이해할 수 있다.

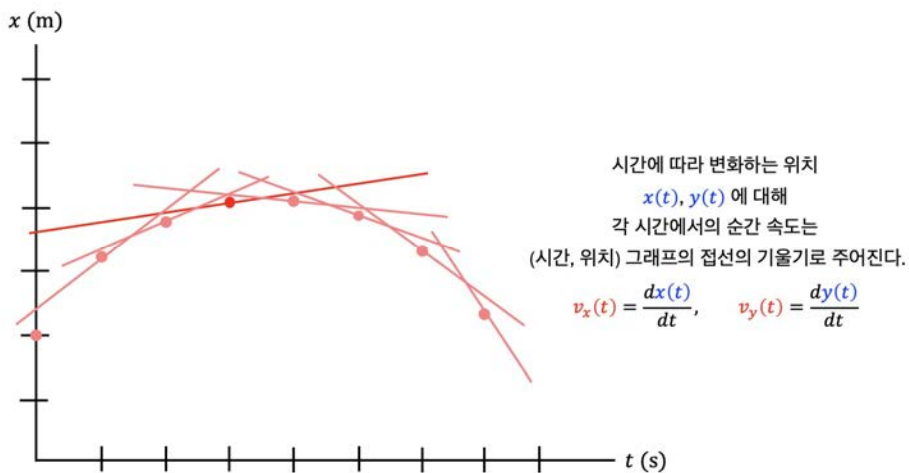


그림 3 시간에 대한 위치 그래프에서 각 시간마다 주어지는 순간 속도를 표현한 그래프. 각 점에서의 접선의 기울기가 그 시간에서의 순간 속도이다.

가속도(acceleration) 또한 단위 시간당 변화한 속도를 의미하여 이는 시간에 따른

속도의 그래프에서 기울기로 주어진다. 물체에 주어진 힘은 이중 가속도의 변화를 준다. 이를 그림으로 표현하면 다음과 같다.

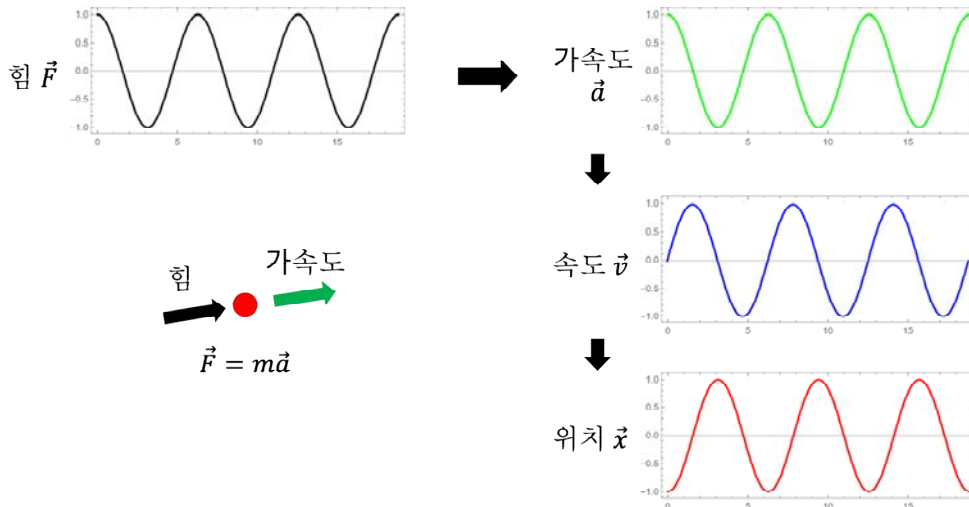


그림 4 힘에 의해 가속도가 발생하고, 이를 통해 속도, 위치가 변화하는 모습을 표현한 그림

특정 방향으로 작용하는 힘의 각 성분은 가속도의 각 성분에 영향을 준다.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \Leftrightarrow \quad F_x = ma_x, \quad F_y = ma_y$$

이렇게 생긴 가속도에 의해서 물체의 속도가, 속도에 의해 위치가 변하게 된다.

## 2) 단진자 운동

진자 운동이란 어떤 한 점과 물체(진동추) 사이에 일정한 거리를 유지하도록 하여 중력에 의해 연직면 내에서 진동하는 운동을 뜻한다. [2]

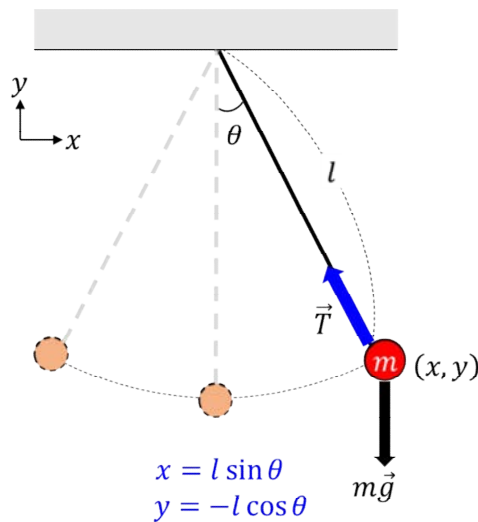


그림 5 단진자 운동과 진동추에 작용하는 힘의 표현

가장 단순한 진자운동은 위의 그림과 같은 단진자(simple pendulum) 운동으로, 이는 물체와 일정한 거리에 있는 한 점은 고정되어 있고, 진동추에 작용하는 중력에 의해 왕복운동을 하는 시스템이다. 물체에는 중력 외에도 고정점과의 거리를 유지하게 해주는 막대에 의한 장력(tension)  $T$ 가 작용하여 물체가 움직이는 반대 방향으로 힘이 작용하게 하여 항상 다시 원점으로 돌아오도록 해준다.

단진자 진동추에 작용하는 알짜힘을  $x, y$ 성분으로 나눠서 적용하면 다음과 같다.

$$F_x = -T \sin \theta, F_y = T \cos \theta - mg$$

여기에서  $m$ 은 물체의 질량이고  $l$ 은 진자 막대의 길이이다. 그림과 같이 진동추의 각도  $\theta$ 를 물체의 위치로 표현하면  $\sin \theta = \frac{x}{l}$ ,  $\cos \theta = -\frac{y}{l}$  이고 이를  $ma_x = F_x$ ,  $ma_y = F_y$ 에 대입하면 다음과 같은 물체의 위치  $x, y$ 에 대한 운동 방정식을 얻는다.

#### 단진자 운동 방정식

$$ma_x = -\frac{T}{l}x, ma_y = -\frac{T}{l}y - mg, x^2 + y^2 = l^2$$

세번째 식  $x^2 + y^2 = l^2$ 은 진자의 막대 길이가 항상 일정하다는 조건에 대한 방정식이다. 물체에 작용하는 장력의 크기  $T$ 는 상수가 아니고 시간에 따라 바뀌게 된다.  $T$ 의 값을 모르더라도 문제를 풀 수 있는 방법 또한 존재한다. 물체의 운동 방향이 항상 막대의 방향과 수직해야 하므로 각도  $\theta$ 가 바뀌는 운동만 고려하면 되기 때문이다. 우선 다음과 같은 힘의 다이어그램을 그릴 수 있다.

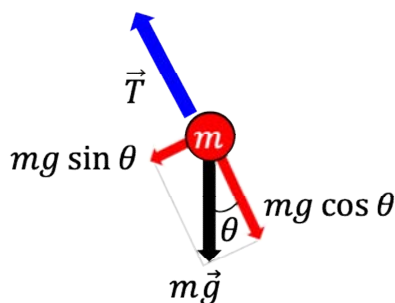


그림 6 단진자 운동의 진동추가 받는 힘의 성분 표시

여기에서 각도  $\theta$  방향으로의 힘만 고려하여  $\theta$ 의 가속도  $a_\theta$  방향으로 작용하는 힘  $mg \sin \theta$  만 고려하면  $mla_\theta = -mg \sin \theta$  이 된다.  $\theta$ 가 충분히 작을 때  $\sin \theta \approx \theta$ 로 다룰

수 있어서 이를 대입하면  $a_\theta = -\frac{g}{l}\theta$  가 된다. 이 방정식을 통해 구해진 단진자의 진동 주기는  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 로 진자의 길이에 의존하고 초기 진폭에는 의존하지 않는다. 하지만 이는 근사적인 값이므로 실제 진폭에 대해서 어느 정도 바뀔 수 있는지를 확인해보고자 한다.

### 3) 이중 진자 운동

이중 진자(double pendulum)는 단진자의 진동추에 또 다른 단진자를 달아서 두 개의 진동추가 중력에 의해서 진동 운동을 하는 시스템이다. [3] 이중 진자 또한 뉴턴 운동 법칙에 따라 운동 방정식을 세울 수 있다.

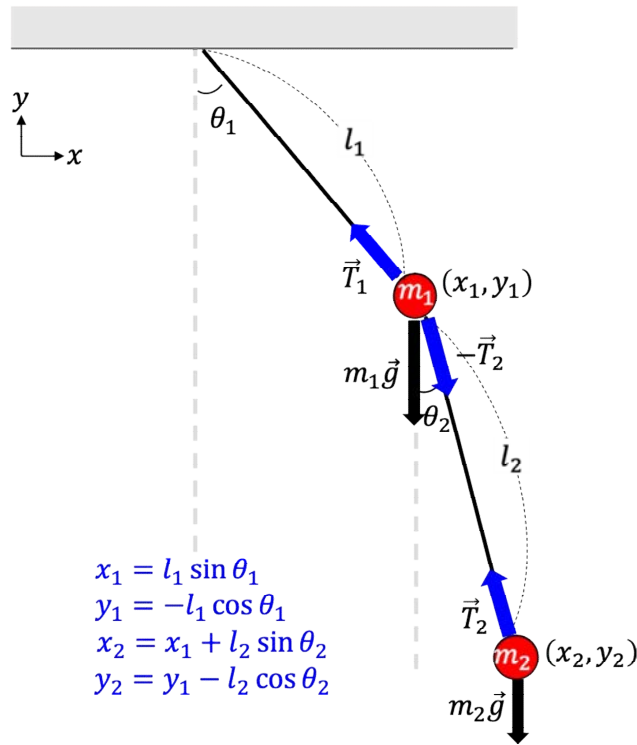


그림 7 이중 진자 운동과 두 개의 진동추가 각각 받는 힘의 표현

위 그림과 같이 질량이 각각  $m_1, m_2$ 인 두 진동추와 각 고정점으로부터의 거리를  $l_1, l_2$ 라 놓고, 각 막대가 1번, 2번 진동추를 당기는 힘의 크기를 각각  $T_1, T_2$ 라 하자. 그러면 1번, 2번 진동추에 작용하는 알짜힘  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ 이 성분별로 다음과 같다.

$$F_{1x} = -T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2, \quad F_{1y} = T_1 \cos \theta_1 - m_1 g - T_2 \cos \theta_2$$

$$F_{2x} = -T_2 \sin \theta_2, \quad F_{2y} = T_2 \cos \theta_2 - m_2 g$$

여기에  $\sin\theta_1 = \frac{x_1}{l_1}$ ,  $\cos\theta_1 = -\frac{y_1}{l_1}$ ,  $\sin\theta_2 = \frac{x_2 - x_1}{l_2}$ ,  $\cos\theta_2 = -\frac{y_2 - y_1}{l_2}$  와, 1번, 2번 진동 추에 작용하는 힘과 가속도의 관계  $m_1\vec{a}_1 = \vec{F}_1$  ( $m_1a_{1x} = F_{1x}$ ,  $m_1a_{1y} = F_{1y}$ ),  $m_2\vec{a}_2 = \vec{F}_2$  ( $m_2a_{2x} = F_{2x}$ ,  $m_2a_{2y} = F_{2y}$ )에 대입하면 이중 진자 운동 방정식을 얻게 된다.

### 이중 진자 운동 방정식

$$ma_{1x} = -\frac{T_1}{l_1}x_1 + \frac{T_2}{l_2}(x_2 - x_1), \quad ma_{1y} = -\frac{T_1}{l_1}y_1 - m_1g + \frac{T_2}{l_2}(y_2 - y_1)$$

$$m_2a_{2x} = -\frac{T_2}{l_2}(x_2 - x_1), \quad m_2a_{2y} = -\frac{T_2}{l_2}(y_2 - y_1) - m_2g$$

$$x_1^2 + y_1^2 = l_1^2, \quad (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = l_2^2$$

세 번째 줄의 식  $x_1^2 + y_1^2 = l_1^2$ ,  $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = l_2^2$  는 그림에서처럼 1번 진자의 길이와 2번 진자의 길이가 각각 일정하다는 조건에 대한 방정식이다. 이러한 방정식에 따라 단진자와 이중 진자 운동은 결정된다.

우리는 실제 실험과 컴퓨터 실험을 통해 단진자와 이중 진자 운동의 주기가 어떻게 되는지 살펴보고 그 의미를 분석하고자 한다.

### Ⅲ. 연구방법

이번 연구는 크게 3가지의 단계로 수행했다.

(1) 단진자 주기를 실제 실험을 통해 측정하기, (2) 단진자 운동 방정식을 컴퓨터를 통해 풀고 단진자 주기의 이론값과 비교하기 (3) 이중 진자 운동 방정식을 컴퓨터를 통해 풀고 시뮬레이션을 통해 이중 진자 운동의 특성 파악하기  
각 단계에 따른 실험 방법을 설명해보자.

#### 1) 단진자 운동 주기 측정 실험

단진자는 고정점과 진동추 사이의 거리가 일정해야 하므로 정확하게 위해서는 길이가 바뀌지 않는 막대로 진동추를 연결하는 것이 필요하지만, 막대대신 실을 사용하더라도 운동하는 동안 실의 길이가 바뀌지 않음으로 단진자 운동에 활용할 수 있다.

단진자의 길이와 진동추의 초기 진폭에 따른 주기를 측정하는 실험을 수행하여 그 값이 근사적인 이론값인  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$  에 얼마나 가까운지, 그리고 각도에 따라 생긴 차

이가 이론값과 일치하는지를 확인하고자 한다.

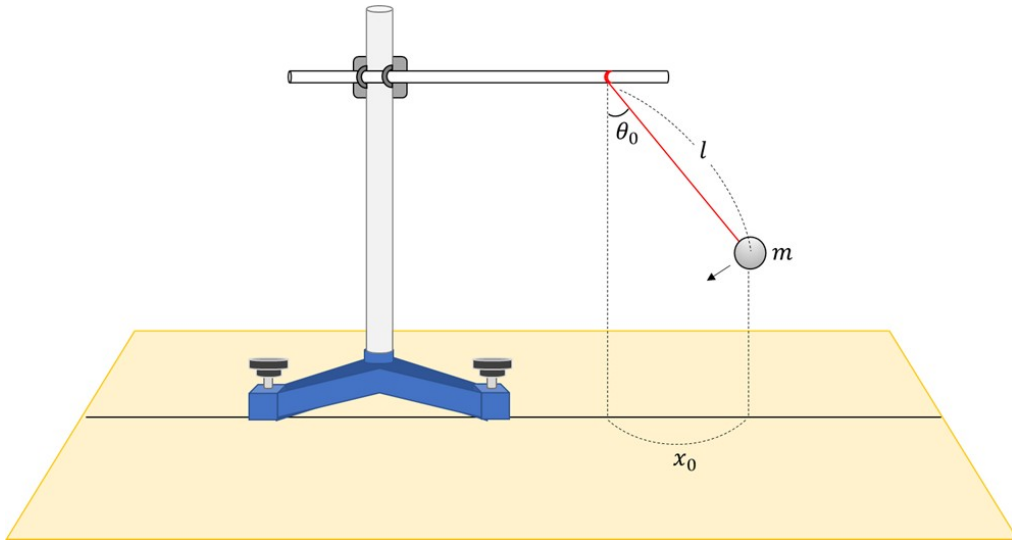


그림 8 단진자 주기 운동의 실험 설계: 초기 진폭은  $x_0 = l \sin \theta_0$  으로 주어진다.

실험은 위의 그림과 같이 진자와 고정점 사이를 연결하는 막대와, 실. 그리고 진동추로 이루어져 있다. 진자의 고정점을 최대한 잘 고정하여 바닥에 좌표를 두어 위치를 측정할 수 있도록 했다. 진자의 크기까지 고려한 진자의 길이  $l$ 을 세 가지 경우로 준비했고 각 경우에 따라 진자의 초기 진폭  $x_0$ 를 아래 표와 같이 변화시키면서 실험했다.

$l(\text{cm})$	37	27	17
$x_0(\text{cm})$	22	16.3	10.8
	17	12.7	8.4
	12	9.1	6.3

표 2 실험에 사용된 단진자 실의 길이와 진자 추를 포함한 진자 중심으로부터 고정점까지의 거리  $l$ 과 초기 진폭  $x_0$

주기의 측정은 진동을 시작 한 후 10번 왕복 운동하는데 걸린 시간을 10으로 나누는 것으로 측정했다. 한번 진동할 때 걸리는 시간은 시간이 매우 짧아서 매번 왕복할 때마다 주기를 측정하는 것은 오차가 크고, 반대로 10번의 진동 후에는 진자의 고정점이 흔들리거나 진동면이 회전하는 일이 발생하여 주기 측정에 대한 정확도가 떨어지므로 그 이후의 운동에 대해서는 측정하지 않았다.

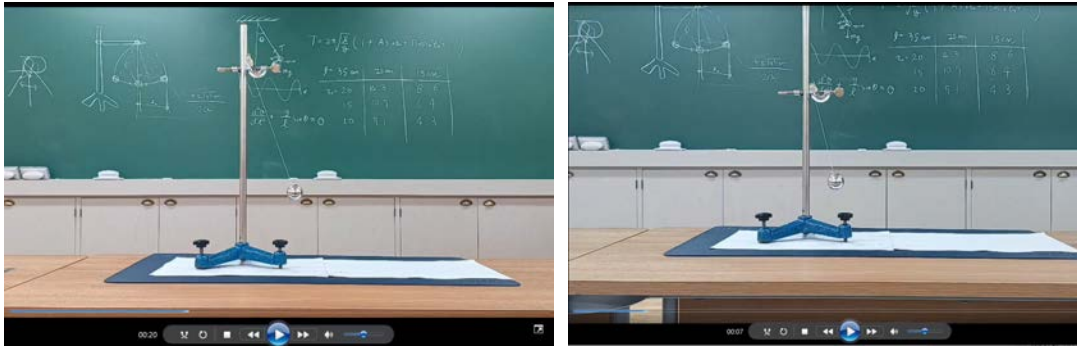


그림 9 단진자 주기 운동을 촬영하여 10번 왕복하는 시간을 측정하고 주기를 계산함

10번 왕복 시간을 측정하는 방법은 위의 그림처럼 주기 운동을 동영상으로 녹화한 후 왕복에 걸린 시간을 영상의 시간을 활용하여 측정했고 이를 10으로 나눠서 각 단진자의 주기를 측정하였다.

## 2) 컴퓨터를 활용한 단진자 운동 주기 이론값 예측

비록 운동 방정식 자체는 쉽게 쓸 수 있었지만 이것을 푸는 것은 중학교 수준에서 해결할 수 없을 정도로 매우 어렵다. 따라서 이론값은 컴퓨터를 활용하여 구하기로 했다. 이때 활용한 프로그램은 매스메티카(Mathematica)로 울프럼 리서치에서 만든 수학 문제 해결 소프트웨어다.

그림 10 수학 연산을 수행해주는 컴퓨터 프로그램인 매스메티카에 대한 정보 (wolfram.com/mathematica)

이 프로그램에 위에서 얻은 단진자 운동 방정식을 대입하여 운동이 주기적으로 어떻

계 이뤄지는지를 살펴보고 우리가 직접 측정 한 주기와 일치하는지를 확인했다.

```

[단진자 운동 방정식]
singledeqs = {Subscript[m, 1] - x1'[t] == (A1[t] / Subscript[l, 1]) x1[t],
  Subscript[m, 1] - y1'[t] == (A1[t] / Subscript[l, 1]) y1[t] - Subscript[m, 1] g};
singleeqns = {x1[t]^2 + y1[t]^2 == Subscript[l, 1]^2};
[단진자 모델파라미터 (중력가속도, 입자의 질량)]
singleparams = {g -> 9.81, Subscript[m, 1] -> 1};
[단진자 초기조건(진자길이, 초기 진폭)]
singleics1 = {x1[0] == Subscript[l, 1] * (20 / 35), y1[0] == -Subscript[l, 1] * Sqrt[1 - (20 / 35)^2], x1'[0] == 0, y1'[0] == 0};
singleics2 = {x1[0] == Subscript[l, 1] * (15 / 35), y1[0] == -Subscript[l, 1] * Sqrt[1 - (15 / 35)^2], x1'[0] == 0, y1'[0] == 0};
singleics3 = {x1[0] == Subscript[l, 1] * (10 / 35), y1[0] == -Subscript[l, 1] * Sqrt[1 - (10 / 35)^2], x1'[0] == 0, y1'[0] == 0};
lengthA = (Subscript[l, 1] - 0.35); lengthB = (Subscript[l, 1] - 0.25); lengthC = (Subscript[l, 1] - 0.15);
[단진자 방정식 풀기 (초기조건37cm 1,2,3)]
singleoldpA1 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics1} /. singleparams /. LengthA, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
singleoldpA2 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics2} /. singleparams /. LengthA, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
singleoldpA3 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics3} /. singleparams /. LengthA, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
[단진자 방정식 풀기 (초기조건27cm 1,2,3)]
singleoldpB1 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics1} /. singleparams /. LengthB, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
singleoldpB2 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics2} /. singleparams /. LengthB, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
singleoldpB3 = First@NSolve[{singledeqs, singleeqns, singleics3} /. singleparams /. LengthB, {x1, y1, A1}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];

```

그림 11 매스메티카로 단진자 운동 방정식을 푸는 과정

이번 연구에서는 매스메티카의 활용 방법 자체보다 이를 통해서 다양한 초기 조건을 대입해서 얻은 결과에 초점을 맞춰서 결과 분석을 하였다.

### 3) 컴퓨터를 활용한 이중 진자 운동 시뮬레이션 실험 수행

이중 진자 운동의 경우 쉽게 휘어질 수 있는 실로 실험하기가 어렵다는 단점이 있고 또한 두 진자의 움직임에 대한 방정식은 그렇게 복잡하지 않지만 몇 번의 주기가 지나면 그 운동이 초기 조건에 매우 민감하게 즉 아주 다르게 나타날 수 있다는 카오스적인 성격이 있음을 알 수 있으므로 [3], 이를 좀 더 정밀하게 구현할 수 있는 프로그램을 활용하여 이중 진자의 주기 운동이 단진자와 얼마나 다르고, 카오스적인 현상이 어떻게 나타날 수 있는지를 단진자와 비교해보고, 초기조건을 약간 바꾼 운동과 비교를 해봄으로써 그 결과를 살펴보도록 한다. 기본적으로는 위에서 구한 이중 진자 운동 방정식을 대입하여 그림을 그려보는 방법을 택했다.



그림 12 이중 진자에서 두 번째 진자에 LED를 달아 오랜 시간 관찰하여 기록한 경로를 나타낸 이미지 (출처 [3])

```

(이중진자 운동 방정식)
deqs = {Subscript[m, 1] * x1''[t] == (x1[t] / Subscript[l, 1]) x1'[t] - (x2[t] / Subscript[l, 2]) (x2[t] - x1[t]),
Subscript[m, 1] * y1''[t] == (x1[t] / Subscript[l, 1]) y1'[t] - (x2[t] / Subscript[l, 2]) (y2[t] - y1[t]) - Subscript[m, 2] #,
Subscript[m, 2] * x2''[t] == (x2[t] / Subscript[l, 2]) (x2[t] - x1[t]),
Subscript[m, 2] * y2''[t] == (x2[t] / Subscript[l, 2]) (y2[t] - y1[t]) - Subscript[m, 2] #};
aeqns = {x1[t]^2 + y1[t]^2 == Subscript[l, 1]^2, (x2[t] - x1[t])^2 + (y2[t] - y1[t])^2 == Subscript[l, 2]^2};
(이중진자 모델파라미터 (중력가속도, 입자의 질량, 진자의 길이))
params = {g == 9.81, Subscript[m, 1] == 1, Subscript[m, 2] == 1, Subscript[l, 1] == 1, Subscript[l, 2] == 1};
(이중진자 초기조건1)
ics1 = {x1[0] == Sin[Pi/2 - Pi/10], y1[0] == Cos[Pi/2 - Pi/10], x1'[0] == 0, y1'[0] == 0,
x2[0] == Sin[Pi/2 - Pi/10] + Sin[Pi/2 - Pi/10], y2[0] == Cos[Pi/2 - Pi/10] - Cos[Pi/2 - Pi/10], x2'[0] == 0, y2'[0] == 0};
(이중진자 초기조건2)
ics2 = {x1[0] == Sin[Pi/2 - Pi/10 + 0.01], y1[0] == Cos[Pi/2 - Pi/10 - 0.01], x1'[0] == 0, y1'[0] == 0,
x2[0] == Sin[Pi/2 - Pi/10 + 0.01] + Sin[Pi/2 - Pi/10], y2[0] == Cos[Pi/2 - Pi/10 + 0.01] - Cos[Pi/2 - Pi/10], x2'[0] == 0, y2'[0] == 0};
(이중진자 방정식 풀기 (초기조건1))
solDp1 = First[NDSolve[deqs, aeqns, ics1] /. params, {x1, y1, x2, y2, x1, x2}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];
(이중진자 방정식 풀기 (초기조건2))
solDp2 = First[NDSolve[deqs, aeqns, ics2] /. params, {x1, y1, x2, y2, x1, x2}, {t, 0, 100}, Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "IndexGoal" -> 0}}];

```

그림 13 매스메티카로 이중진자 운동 방정식을 푸는 과정

#### IV. 연구결과

##### 1) 단진자 운동 주기 측정 실험 결과와 2) 이론값과의 비교 분석

표1과 같이 서로 다른 진자 길이와 초기 진폭에 따라 10번 주기운동을 한 후 측정된 시간을 10으로 나눠서 얻은 주기 값은 다음의 표와 같다.

$l(\text{cm})$	37	27	17
$x_0(\text{cm})$	22	16.3	10.8
	(1.262초)	(1.081초)	(0.867초)
(주기 실험값)	17	12.7	8.4
	(1.246초)	(1.066초)	(0.849초)
	12	9.1	6.3
	(1.233초)	(1.055초)	(0.838초)

표 3 표1에서 제시된 실험 조건에 따른 단진자 운동의 주기 운동 실험값

실험 결과 주어진 진폭에 대해 초기 진폭이 증가할수록 주기가 길어짐을 확인했다. 하지만 바뀐 주기의 정도는 충분히 큰 각도가 변화했음에도 1%~5% 정도로 작은 변화를 보여준다. 이를 이론값과 비교해보자. 우선 [2]로부터 단진자 운동의 주기는 진자의 길이  $l$ 과 초기 각도  $\theta_0$ 에 대해 다음과 같이 주어짐을 확인할 수 있었다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{16} \theta_0^2 + \frac{11}{3072} \theta_0^4 + \frac{173}{737280} \theta_0^6 + \dots \right)$$

$\theta_0$ 의 값이 클수록 ... 부분이 중요해진다. 주기 식 자체는 매우 복잡하므로 그래프로

나타내보자. 이는 아래 그림과 같다. 우리는  $l=37\text{cm}$ ,  $27\text{cm}$ ,  $17\text{cm}$ 의 경우에 대해 초기 진폭  $x_0$ 에 따라서 주기  $T$ 가 어떻게 주어지는지를 그래프로 나타내었고, 우리가 실험한 진폭  $x_0$ 의 값에 대한 이론값은 각 경우에 대해 점선으로 표시하였다.

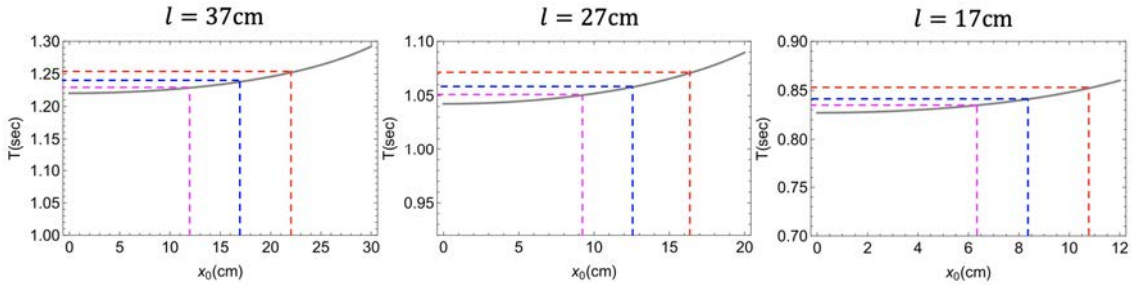


그림 14 단진자의 길이와 초기 진폭에 따른 주기의 이론값(검은 실선). 실험을 수행한 초기 진폭에 대한 이론값은 큰 순서대로 빨강, 파랑, 보라색 점선으로 표시되었다.

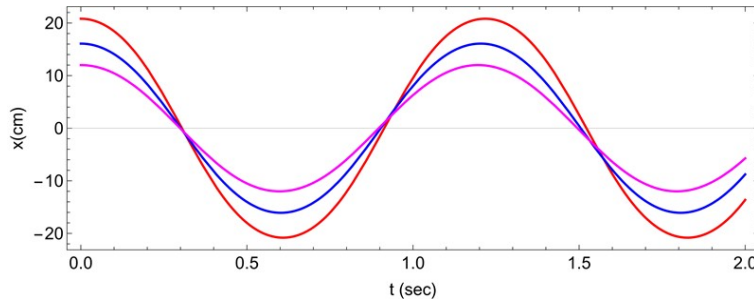


그림 15  $l=17\text{cm}$ 의 경우 초기 위치가  $x_0 = 22\text{cm}$  (빨강),  $17\text{cm}$  (파랑),  $12\text{cm}$  (보라)일 때 시간에 대해 진동추의 위치  $x$ 값의 변화를 나타낸 그래프

그리고 실제 이론값을 표로 나타내면 다음과 같다.

$l(\text{cm})$	37	27	17
$x_0(\text{cm})$	22	16.3	10.8
(주기 이론값)	(1.253초)	(1.070초)	(0.852초)
	17	12.7	8.4
	(1.238초)	(1.058초)	(0.842초)
	12	9.1	6.3
	(1.229초)	(1.051초)	(0.837초)

표 4 표1에서 제시된 실험 조건에 따른 단진자 운동의 주기 운동 이론값

전반적으로 실험값이 이론값에 비해서 약간 크긴 하지만 경향성에 대해서 매우 일치하는 모습을 보여주고 있다. 실험값이 이론값보다 크게 측정되는 이유는 다양한 요소가 있을 수 있다. 우선 고정점이 움직임에 따라서 흔들리는 가능성, 진자의 크

기가 영이 아니라 유한하고 회전하기 때문에 생기는 이론적인 오차, 또한 주기 운동의 회전면이 조금씩 이동하기 때문에 발생하는 오차 요소 등 많은 부분에서 오차의 가능성이 있었다. 그럼에도 불구하고 모두  $2\pi\sqrt{l/g}$  범위에서 1%~5% 이내로 큰 차이가 없었으며, 초기 진폭이 증가함에 따라 주기도 증가하는 경향을 공통적으로 보여주는 부분에서 이론을 통해 실험 결과를 잘 예측할 수 있음을 확인했다.

## 2) 컴퓨터를 활용한 이중 진자 운동의 카오스 현상 분석

이중 진자 운동은 컴퓨터를 활용하여 그 형태를 분석하였다. 너무 복잡하지 않기 위하여 두 진자의 질량을 같게 두고  $m_1 = m_2$ , 두 진자의 길이 또한 같게 두었다.  $l_1 = l_2$ . 이러한 조건을 바탕으로 진자의 초기 위치만을 바꾸면서 실험을 하고 이를 같은 길이를 가진 단진자와 비교 분석하였다.

우선 시뮬레이션을 통해 이중 진자 위치의 초기 값에 따라서 운동의 형태가 어떻게 되는지를 살펴보자.

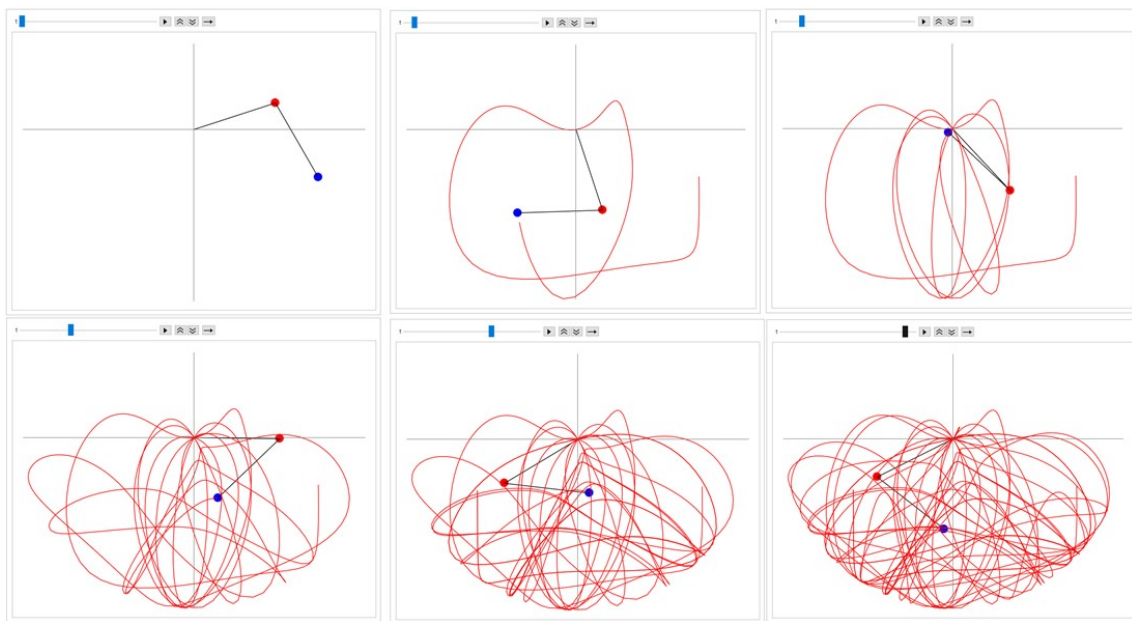


그림 16 매스메티카 시뮬레이션을 통한 시간에 따른 이중 진자 운동의 예시 (시간순서: 왼쪽  $\rightarrow$ 오른쪽, 위 $\rightarrow$ 아래)

위 그림을 통해 알 수 있듯이 이중 진자의 운동은 시간이 지남에 따라 매우 예측하기 어려운 다양한 경로로 이동함을 확인할 수 있다. 이러한 운동을 카오스(Chaos)적이라 할 수 있을 것이다. 하지만 카오스적이라고 말할 수 있으려면 단순히 복잡한 움직임을 보여주는 것 말고도, 초기 조건에 매우 민감한 특성을 보여줘야 한다.

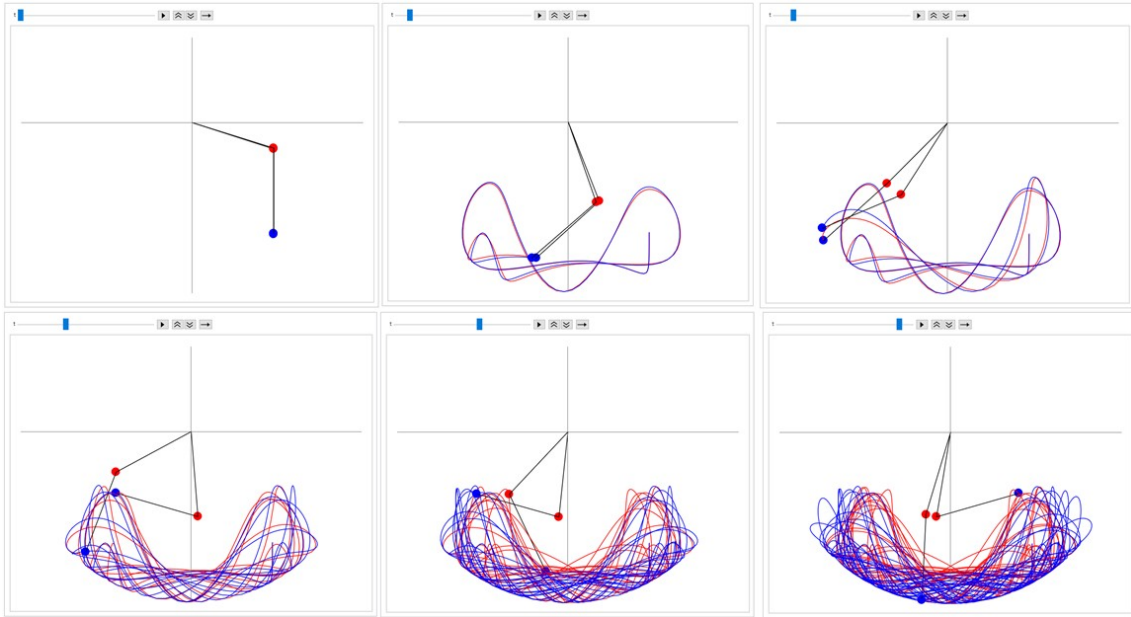


그림 17 초기조건이 거의 유사한 이중 진자 A(빨간색 실선)와 이중 진자 B(파란색 실선)가 시간에 따라 운동하는 모습. 시간이 흐름에 따라 두 이중 진자는 확연히 구분되며 매우 다른 움직임을 보여줌을 확인할 수 있다.

위 그림은 이중 진자 A와 이중 진자 B의 초기 위치를 거의 구분할 수 없을 정도로 유사하게 두었을 때 시간이 지나도 A와 B의 차이가 여전히 작은지 아니면 아주 큰 차이가 생기는지를 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 이중 진자 A의 첫 번째 진자와 두 번째 진자 모두 시간이 지남에 따라 이중 진자 B와 완전히 다른 위치에 있음을 확인할 수 있다.

이중 진자 운동을 좀 더 단순하게 이해하기 위하여 우리는 이중 진자의 첫 번째 진자(빨간색)의  $x$ 방향 위치가 시간에 대해 어떻게 변화하는지, 즉 어떤 식으로 진동하는지를 살펴보았다. 또한 아래 그림처럼 이를 같은 길이와 초기 조건을 가지는 단진자 운동과 비교를 해봄으로써 두 진자의 주기 운동을 비교해보았다.

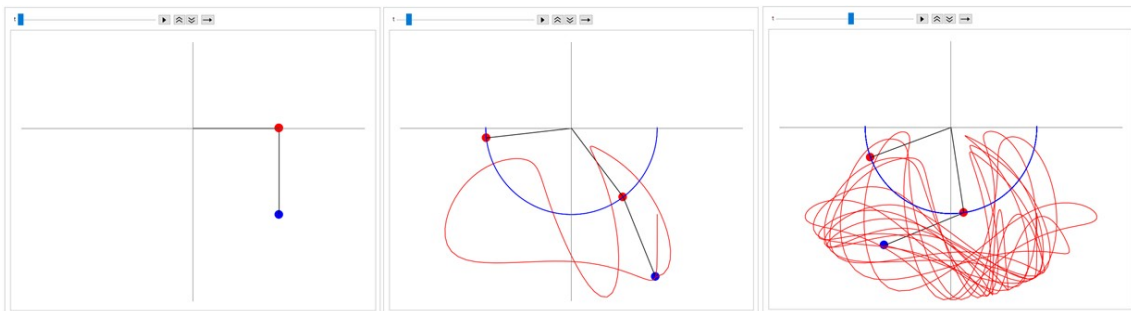


그림 18 이중 진자의 첫 번째 진동추(빨간 점)와 같은 위치에서 출발하는 단진자의 진동추(빨간 점)의 운동을 이중 진자 운동과 같이 보여주는 시뮬레이션

이중 진자의 첫 번째 진자의 위치  $x$ 와 같은 초기 조건을 가진 단진자의 위치  $x$ 의 시간에 대한 변화를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

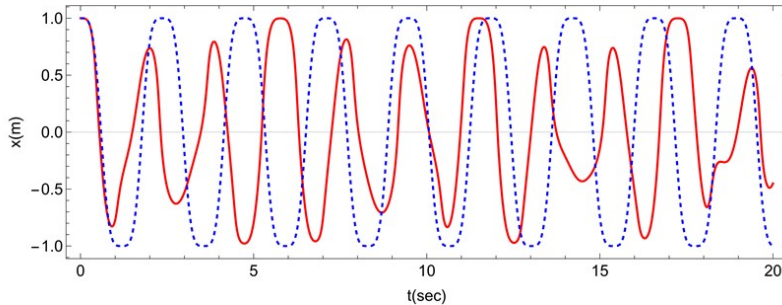


그림 19 이중 진자 중 첫 번째 진동추의 시간에 대한 위치  $x$ 의 변화(빨간 실선)와, 같은 초기조건을 가진 단진자의 진동추의 시간에 대한 위치  $x$ 의 변화(파란 점선)를 나타낸 그림

위 그림처럼 초기에 두 진자 운동의 진동추는 같은 위치에서 출발하지만 이중 진자는 곧 바로 두 번째 진동추로부터 받는 힘에 의해서 단진자와는 다르게 매우 불규칙적인 주기 운동을 함을 알 수 있다.

이제 이중 진자의 운동이 초기 조건에 얼마나 민감할 수 있는지를 살펴보자.

단진자와 이중 진자 각각에 대하여 초기 진동추의 위치를 1%만큼 이동시켜 출발시킨 경우, 시간이 지남에 따라 진동추의 위치가 얼마나 차이가 나는지를 그래프를 통해 확인해 보았다.

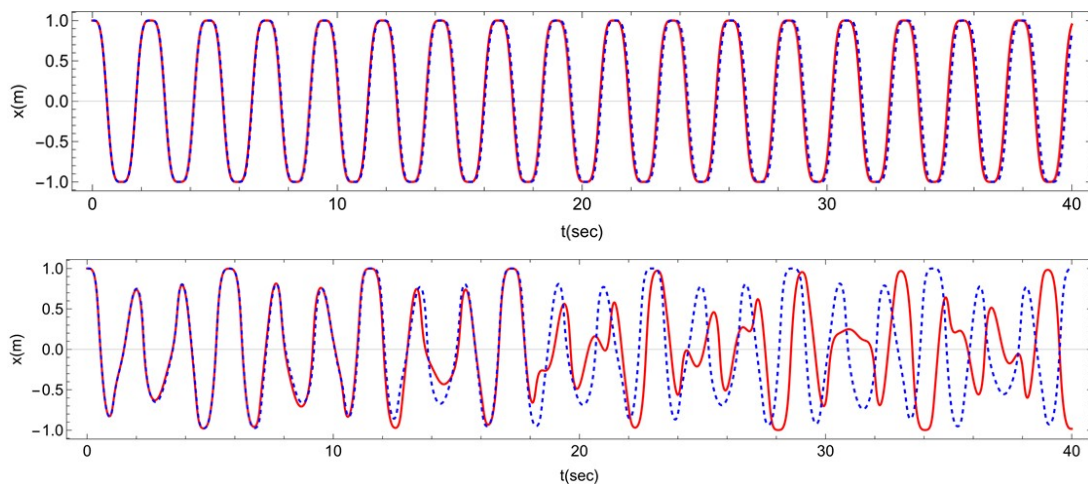


그림 20 진동추의 초기 위치가 1% 만큼 다른, 진자 A (빨간 실선)와 진자 B (파란 점선)의 시간에 대한 각 진동추의 위치 변화를 나타낸 그림. 두 그림 중 위의 그림은 단진자 운동의 경우이고, 아래 그림은 이중 진자 운동에 해당한다.

단진자의 경우 우리가 직접 실험을 했던 것처럼 운동이 초기 진폭에 민감하지 않고 일정한 주기 운동을 함을 위 그림을 통해 확인할 수 있다. 즉 초기의 1% 만큼의 위치 차이가 계속 유지되면서 두 진동추는 오랜 시간동안 거의 동일한 형태의 운동을 하고 있다.

반면에 이중 진자 운동의 경우, 두 번째 그림처럼 시간이 20초 정도가 지나자 진자 A의 진동추와 진자 B의 진동추의 위치는 확연하게 다름을 알 수 있다. 이는 이중 진자 운동의 경우 초기 진폭에 차이가 거의 없더라도 시간이 지나고 나면 예측하기 어려울 정도로 두 진동추의 위치가 달라짐을 의미하며, 이는 이중 진자의 운동이 복잡할 뿐만 아니라 초기 조건에 매우 민감함을 의미한다. 이러한 초기 조건의 민감성이 바로 카오스적 현상이다. 이중 진자와 같이 단순한 시스템에서도 이런 카오스적인 주기 운동이 발생한다는 것은 매우 흥미로운 일이다.

## V. 결론 및 제언

우리는 자연 현상에서 흔히 나타날 수 있는 주기 운동의 가장 단순한 형태인 진자 운동을 분석하여 주기 운동의 특성을 살펴보았다.

단진자 운동의 경우 왕복 주기는 초기 진폭이 증가함에 따라 증가함을 확인했지만 그 정도는 1%~5% 정도로 매우 작게 주어짐을 실험을 통해, 그리고 이론을 통해 확인할 수 있었다. 물론 진폭이 더 커질수록 주기는 증가하겠지만 진자의 주기 운동은 초기 진폭에 매우 둔감함을 확인할 수 있었다. 반면 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한 이중 진자는 완전히 다른 모습을 보여주는데, 특히 초기 조건을 1%만 바꾸더라도 10번 정도의 불규칙적인 왕복 운동 후에는 완전히 다른 운동 형태를 보여주면서, 이중 진자의 운동을 정확히 예측하는 것이 얼마나 어려운지 잘 보여주었다. 한편 이렇게 진행 방식이 매우 다른 단진자 운동과 이중 진자 운동이 뉴턴 운동 법칙으로 쉽게 나타날 수 있다는 것이 흥미롭게 느껴졌다. 이는  $F=ma$  라는 단순한 방정식에서 생각보다 더 단순한 현상이 나올 수 있을 뿐만 아니라, 생각보다 훨씬 복잡한 현상도 나올 수 있음을 의미하여 자연 현상의 다양성과 연결되지 않을까 한다.

이중 진자 운동뿐만 아니라 삼중 진자 등 카오스적인 운동을 보여주는 시스템을 어떻게 하면 더 잘 이해할 수 있을지 생각하는 것은 흥미로운 질문이라 생각한다. 초기 조건에 얼마나 민감할 수 있는지, 그리고 이는 진동추의 무게와 각 진자의 길이와는 어떻게 연관이 될 수 있는지 등, 다양한 경우에 대해서 더 체계적으로 실험을 수행한다면 자연 현상을 더 깊게 이해할 수 있는 계기가 될 것이다. 또한 이러한

카오스적인 주기 운동이 진자뿐만 아니라 뇌파와 같은 주기적인 현상에 대해서도 적용될 수 있는지 의문이 생겼다.

마지막으로 실험을 하면서 시뮬레이션의 유용함을 알게 되었고, 매스메티카 뿐만 아니라 다양한 프로그램을 잘 활용하여 풀기 어려운 방정식을 좀 더 효율적으로 다룰 수 있도록 하는 것이 중요함을 배울 수 있었다.

## VI. 참고문헌

뉴턴 운동 법칙과, 진자 운동에 대한 기본적인 사항은 이미 잘 정립이 된 영역이기 때문에 쉽게 접근할 수 있는 영문 위키피디아를 참고하였습니다.

[1] 위키피디아 뉴턴 운동 방정식 [https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s\\_laws\\_of\\_motion](https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_laws_of_motion)

[2] 위키피디아 단진자 운동 [https://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum\\_\(mechanics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum_(mechanics))

[3] 위키피디아 이중 진자 운동 [https://en.wikipedia.org/wiki/Double\\_pendulum](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_pendulum)



물리A

## 02\_날개 없는 선풍기의 림 구조 최적화 설계



# 날개 없는 선풍기의 림 구조 최적화 설계

소원 (아름중학교 2학년)

윤성훈 (새롬중학교 2학년)

이충민 (용남중학교 2학년)

지도교수 : 손광효 (공주대학교 물리교육과)

첨단과학기술의 발전으로 인간의 생활은 상당 부분 편리해졌다. 특히 집 안에서 사용하는 세탁기나, 텔레비전, 선풍기와 같은 가전제품들의 발전은 우리의 일상에 직접적인 영향을 주었다. 최근 지구 온난화로 여름이 길어지면서 선풍기 등 냉방 기구에 대한 수요가 늘어나기 시작했다. 이에 따라 휴대용 선풍기나 날개 없는 선풍기 등 크기와 구조 등이 발전한 선풍기가 등장하게 되었다. 이 중 날개 없는 선풍기는 날개를 제거함으로써 안전성을 확보하였으나, 바람의 세기가 약하고 모터의 소음이 크다는 단점이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 날개 없는 선풍기의 효율을 높일 방안들을 모색하였다. 림 구조의 변형을 통해 효율을 증가시키고자 하여, 공기 주입기의 출력은 고정하고, 선풍기의 노즐을 다양한 형태로 만들어 효율적으로 바람이 나오게끔 최적화 설계를 진행하였다. 본 연구를 통해 모터 출력을 높이지 않더라도 림의 구조 최적화로 바람의 세기를 강화할 수 있음을 확인하였다.

## I. 서론 (또는 연구의 필요성 및 목적)

과학 기술의 발전은 인류에게 많은 변화를 가져왔다. 그 중에 집 안에서 사용하는 세탁기나, 텔레비전, 선풍기와 같은 가전제품들의 발전은 사람들의 일상을 보다 편리하게 바꾸었다. 특히 더운 여름에 많이 사용하는 선풍기의 경우 휴대용 선풍기나 날개 없는 선풍기와 같이 크기와 구조에 있어 많은 발전이 이루어지고 있다. 날개가 있는 기존 선풍기의 경우 선풍기 날 회전으로 인해서 사고가 일어날 가능성이 존재한다. (이재현, 2020) 특히 어린 아이들의 손가락이 철제 안전망 사이로 들어가게 되면 안전사고가 일어날 수 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 지난 2010년, 다이슨에서 날개 없는 선풍기를 특허로 출원하였고, 2016년부터 정식으로 유통되기 시작하였다. 날개 없는 선풍기는 공기를 흡입해 림 내부로 흘러보내 림 전체에 공기가 흐르도록 한다. 흘러간 공기는 림 외부의 코안다 면(림의 안쪽 원주)을 타고 흘러 전방으로 일정한 바람을 내보낸다. (U.S. Patent No.0082561A1. 2012) 이러한 날개 없는 선풍기는 어린아이의 안전사고를 예방할 수 있으며 기존 선풍기의 날개로부터 발생하는 소음이 더 이상 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 날개 없는 선풍기는 바람을 일으키기 위해 기존 선풍기에 비해 높은 출력과 회전수를 가지는 모터를 사용해 특정 출력 이상에서 고주파 소음이 발생하며, 고출력의



그림 1. 기존 선풍기와 날개 없는 선풍기

능성이 존재한다. (이재현, 2020) 특히 어린 아이들의 손가락이 철제 안전망 사이로 들어가게 되면 안전사고가 일어날 수 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 지난 2010년, 다이슨에서 날개 없는 선풍기를 특허로 출원하였고, 2016년부터 정식으로 유통되기 시작하였다. 날개 없는 선풍기는 공기를 흡입해 림 내부로 흘러보내 림 전체에 공기가 흐르도록 한다. 흘러간 공기는 림 외부의 코안다 면(림의 안쪽 원주)을 타고 흘러 전방으로 일정한 바람을 내보낸다. (U.S. Patent No.0082561A1. 2012) 이러한 날개 없는 선풍기는 어린아이의 안전사고를 예방할 수 있으며 기존 선풍기의 날개로부터 발생하는 소음이 더 이상 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 날개 없는 선풍기는 바람을 일으키기 위해 기존 선풍기에 비해 높은 출력과 회전수를 가지는 모터를 사용해 특정 출력 이상에서 고주파 소음이 발생하며, 고출력의

모터를 사용함에도 불구하고 풍량이 기존 선풍기보다 적다는 단점 또한 존재한다. (정시영, 2017) 또한, 이 날개 없는 선풍기를 소형화 하여서 휴대용으로 만들 수 있지 않을까? 하는 의문이 생겼다. 따라서 본 연구에서는 휴대용으로 개발하는 과정 중에 한 단계로 날개 없는 선풍기의 효율을 높이는 방안을 모색하였다. 효율을 높이는 방법으로는 더 강력한 출력을 내는 모터를 사용하는 방법이 있으나, 모터의 출력이 높아질 경우 그에 따른 소음 문제를 해결할 수 없다. 소음이 더욱 강해지지는 않으면서 선풍기의 효율을 높이는 방법으로써 바람이 나오는 림의 구조를 바꾸는 방법을 제안하였다. 날개 없는 선풍기의 효율을 높이기 위해 다양한 모양의 림의 구조를 디자인하였으며, 3D 프린터로 직접 림을 제작하였다. 풍속계를 이용하여 제작된 선풍기들에서 나오는 바람의 세기를 측정하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 같은 공기 주입기의 바람으로 공기가 가장 잘 흐르는 림의 구조를 찾아보고자 한다.



그림 2. 날개 없는 선풍기의 내부 구조 (정시영 2017)

## II. 이론적 배경

날개 없는 선풍기의 원리는 그림3 에 나타나있는 것과 같이 다섯 단계로 이루어져 있다.(Jafari 2015) 처음에는 공기 주입기 주변의 공기를 흡입구로 흡입한다. 다음으로는 임펠러의 회전으로 흡입된 공기가 임펠러를 지나 고리모형의 팬 내부로 공기를 내보낸다. 림 내부로 들어온 공기는 림의 노즐을 통하여 빠져나가면서 뒤쪽의 공기들을 함께 빨아드린다. 노즐에서 나오는 공기와 뒤쪽 공기가 합해져서 팬(림) 앞쪽으로 나와 기존 앞에 있는 공기와 합쳐져서 흐른다. 노즐을 통해 공기가 분출되면서 코안다 효과가 발생한다. 따라서 공기의 속도가 증가함으로 압력이 감소하여 상대적으로 높은 압력을 가지는 뒤쪽 공기가 앞쪽으로 흐르게 된다.



그림 3. 날개 없는 선풍기의 작동 원리 (Jafari 2015)

날개 없는 선풍기에 적용된 주요 현상과 이론으로는 코안다 효과와 베르누이 원리가 있다. 유체는 벽면이 없을 때 모든 방향의 압력을 받으며 직선으로 진행한다. 반면에, 벽면 근처를 지날 때에는 벽면 쪽에서 작용하던 압력이 사라지게 되면서 상대적으로 저압상태인 벽면방향으로 끌어당기는 힘이 생긴다. 이에 따라 유체의 점성에 의해 벽면을 따라 유체가 흐르게 되는데 이를 코안다 효과라 한다. 즉, 유체가 벽면 근처를 지날 때에 유체가 벽면을 따라 흐르는 현상을 일컫는다. 이러

한 효과를 이용하여 날개 없는 선풍기는 공기가 나가는 방향을 저압상태로 만들어 이 때 주입된 공기보다 많은 유량을 내보낸다. (Lasse, 2014)

$$P = \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy$$

유체가 어떤 영역을 통과하는 동안 속력이 변하거나 지표면으로부터의 고도가 변하게 되면, 유체의 압력 또한 이런 변화에 따라 같이 변하게 된다. 이는 베르누이 방정식으로 설명된다. 베르누이 원리는 공기와 같이 움직이는 유체는 공기의 압력을 바꾼다는 것이다. 만약 공기가 물체의 표면마다 다르게 흐른다면, 상대적으로 느리게 움직이는 쪽의 압력이 높고, 빠르게 움직이는 면에서는 압력이 낮아진다.(Serway 2008) 이때 유체의 압력은 속력이 증가하거나 고도가 높아질수록 낮아지며 이러한 관계는 위와 같은 공식에 의해 결정된다. 그림 4는 유체가 물체의 면을 따라 흐르는 코안다 효과와 유체의 흐르는 속력에 따른 압력의 변화를 나타낸다.

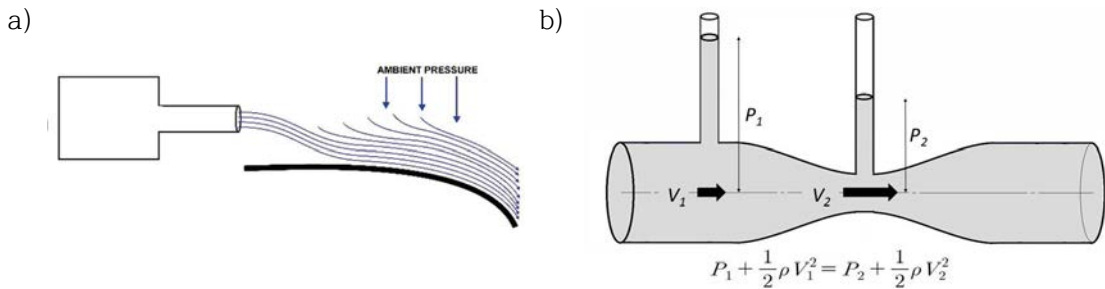


그림3 날개 없는 선풍기에 사용되는 공기역학적 현상과 이론 a) 코안다 효과, b) 베르누이의 원리

날개 없는 선풍기는 코안다 효과에 의해 림 내부 벽을 타고 흐르는 공기는 유속이 빨라지며, 이로 인해 발생하는 압력 차이가 고리를 통과하는 공기 흐름을 만들어낸다. 이러한 공기의 흐름은 베르누이 방정식의 에너지 보존 법칙으로 설명된다. 따라서, 날개 없는 선풍기의 최적화를 위해서는 코안다 효과가 잘 발생할 수 있는 림의 크기와 림의 단면 모양으로 설계해야한다.

### III. 연구 방법

날개 없는 선풍기의 공기주입기와 다양한 림 구조의 기본 형상은 3D 프린터 캐드 프로그램인 Tinkercad 를 통하여 설계하였다.(tinkercad.com) 틸커캐드는 무료 온라인 3D 모델링 프로그램으로 웹 브라우저에서 실행이 된다. 틸커캐드는 단순화된 구조적 솔리드 형상 방법을 사용하여 모델을 구성한다. 솔리드와 구멍을 기본 모양으로 디자인 할 수 있으며, 솔리드와 구멍을 결합하여 다양한 모양으로 생성할 수가 있다. 틸커캐드의 파일 형식은 3D 용 STL 및 OBJ 형식을 가져올 수 있으며, 3D 프린터에 사용할 수 있는 STL 또는 OBJ 형식으로 모델을 내보낼 수 있다. 틸커캐드의 장점은 누구나 쉽게 웹 브라우저에 접속하여 자유롭게 3D 모델링을 할 수 있으며, 3D 프린터들이 사용하는 파일 형식들을 다양하게 제공함으로써 프린터 선택이 용이하다. 그림 5

턴커카드를 통하여 설계 중인 공기 주입기와 림 구조 등의 브라우저 캡처화면이다.



그림 5. 턴커카드를 이용하여 공기 주입기 및 림 구조 설계

턴커카드를 이용하여 림의 단면적 모양을 만들고, 단면적 모양의 기둥을 이어서 림 형태로 만들었다. 림 형태로 만들 때, 컴퓨터의 능력과 턴커카드 프로그램, 3D WOX 1의 일치도를 고려하여 기둥의 개수 조절 과정이 필요하다. 기둥이 40 ~ 60 개 정도면 림 형태가 출력하는데 이상이 없었고, 설계 모양과 실물의 일치도에도 문제가 없었다. 그림 6은 프로그램과 실물의 일치도 조사를 위한 기둥 개수를 다양화한 턴커카드를 설계한 모습이다.



그림 6. 직사각형 모양의 단면을 갖는 기둥 형태를 이어서 림 구조로 최적화 과정

최적화된 기둥 개수에 맞추어 다양한 단면의 모양을 고려하였다. 가장 기본 모양인 사각형의 단면을 가지는 림과 육각형림, 타원형림을 설계 하였다. 최초 설계시 사각형 림으로 바람이 나오는 틈이 직선인 림과 틈이 기울어진 림을 비교하였으나, 틈이 직선인 림에서는 바람이 나오지 않았다. 그림은 다양한 모양의 단면을 가지는 림을 설계한 단면 모양이다. 그림 7에서 가장 왼쪽에 나오는 직선의 틈 모양의 송출구에서는 바람이 나오지 않는다.

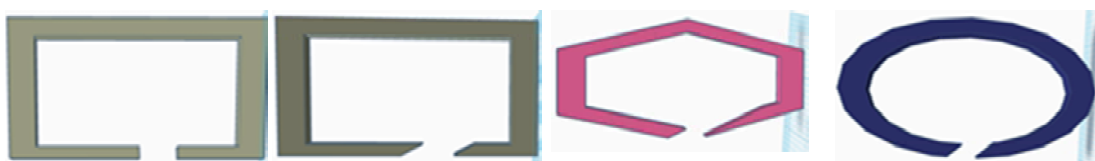


그림 7. 다양한 모양으로 설계한 림의 단면 모양들, 사각형, 육각형, 타원 설계된 림의 모양에 따라서 기둥 형태로 만들어 이어서 림을 설계 하였다. 그림 8에

서 사각형, 육각형, 삼각형, 타원형 단면의 림 설계를 볼 수 있다.

설계된 형상은 3D 프린터(Sindoh 3DWOX 1)를 이용하여 제작하였다. 틸커카드를 설계되어 STL 파일로 내보내진 파일을 프린터 전용 프로그램(3DWOX Desktop)을 통하여 G-code로 변환되고, 변환된 파일을 프린터로 보내 출력할 수 있다.

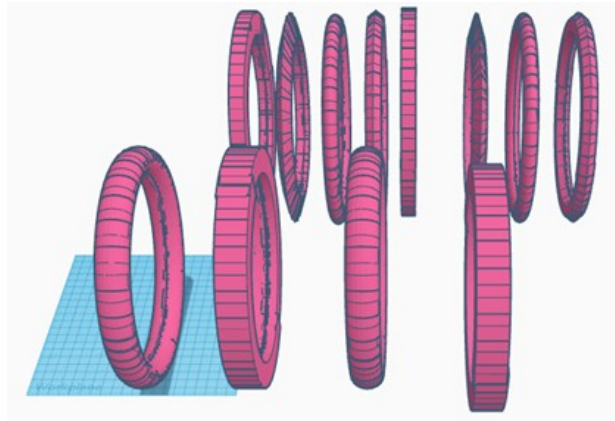


그림 8. 다양한 모양으로 설계한 단면 기둥들을 최적화한 개수로 림 설계 하였다.

그림 9는 3DWOX desktop을 통하여 변환한 공기 주입기와 림 구조의 파일 모습이다.

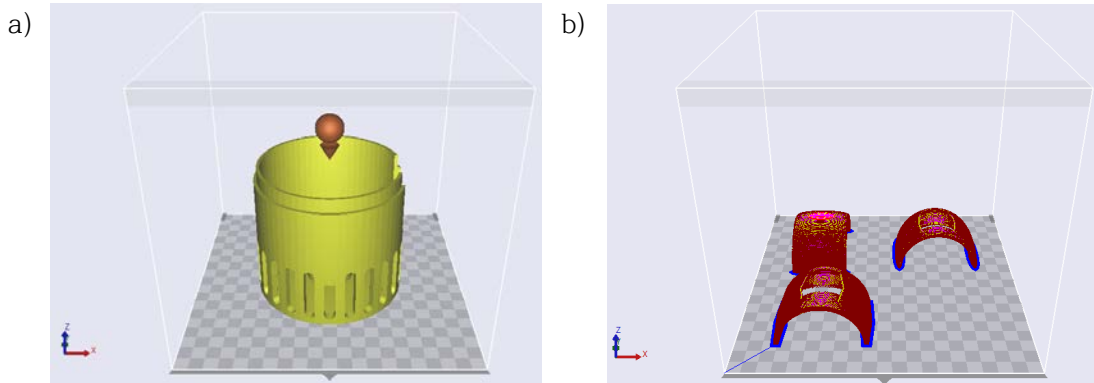


그림 9. 3DWOX desktop을 이용한 프린터 파일 변환 a) 틸커카드에서 내보낸 공기주입기의 STL 파일, b) 변환된 림 구조의 G-code 파일

그림 10은 3D 프린터에서 림구조를 출력하는 모습이다.

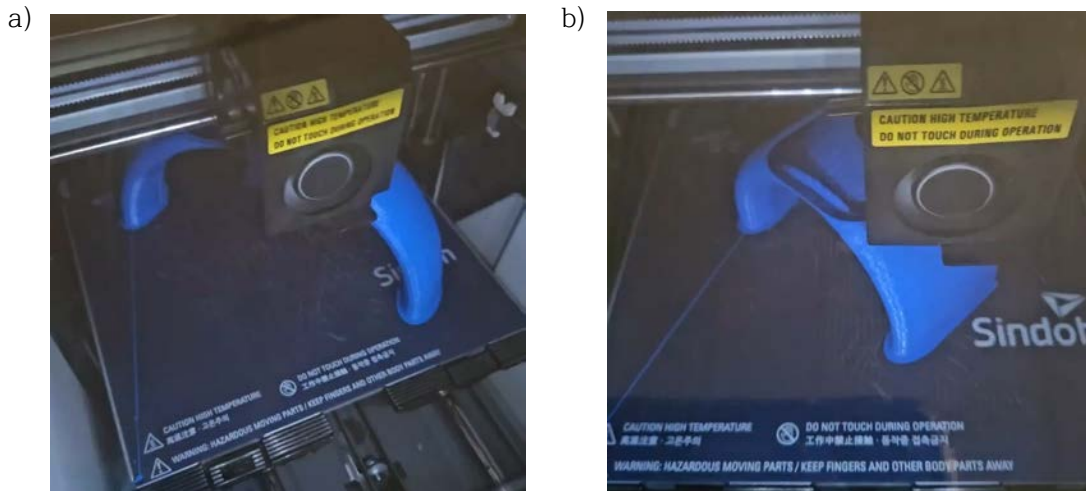


그림 3D WOX 1 프린터기로 림 구조를 출력하는 모습. a) 지름이 20 cm 인 타원구조의 림 출력 b) 지름이 7 cm 인 최적화 구조의 림 출력.

림의 구조에 따른 날개 없는 선풍기의 효율을 확인하기 위해서 풍속계를 이용해 바람의 속력을 측정하였다. 선풍기로부터 풍속계까지의 거리는 30 cm 이고, 풍속계 측정 날개의 중심이 선풍기의 중심에 위치하도록 설치하였다. 그림은 본 연구에서 사용한 풍속계의 모습과 휴대용 선풍기의 풍속 측정을 위해 풍속계와 선풍기가 설치된 모습이다.



그림 11. 선풍기의 효율 측정. a) 선풍기에서 나오는 바람의 속력을 측정한 풍속계 b) 공기주입기에 모터 대신 사용한 휴대용 선풍기와 풍속계를 설치한 모습.

날개 없는 선풍기 구조에 따른 풍속 변화를 확인하기 위하여 공기 주입기에 모터 대신 사용할 휴대용 선풍기의 풍속을 확인하였다. 풍속계와 선풍기 사이의 거리는 30 cm 로 하였으며, 선풍기의 단 수가 올라감에 따라서 풍속도 올라간다. 그림 12. 는 선풍기 단수별 풍속을 나타낸다.

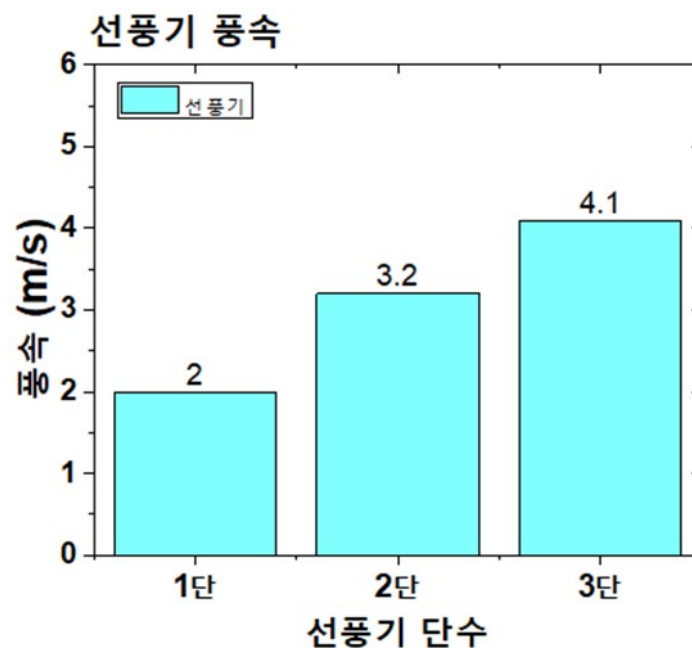


그림 12. 선풍기 단수별 풍속

선풍기를 공기 주입기에 설치한 후 공기 주입기 출구에서의 풍속을 측정하였다. 그림 13에서는 공기 주입기에 휴대용 선풍기가 설치된 모습과 공기주입기 출구 풍속을 나타낸다.

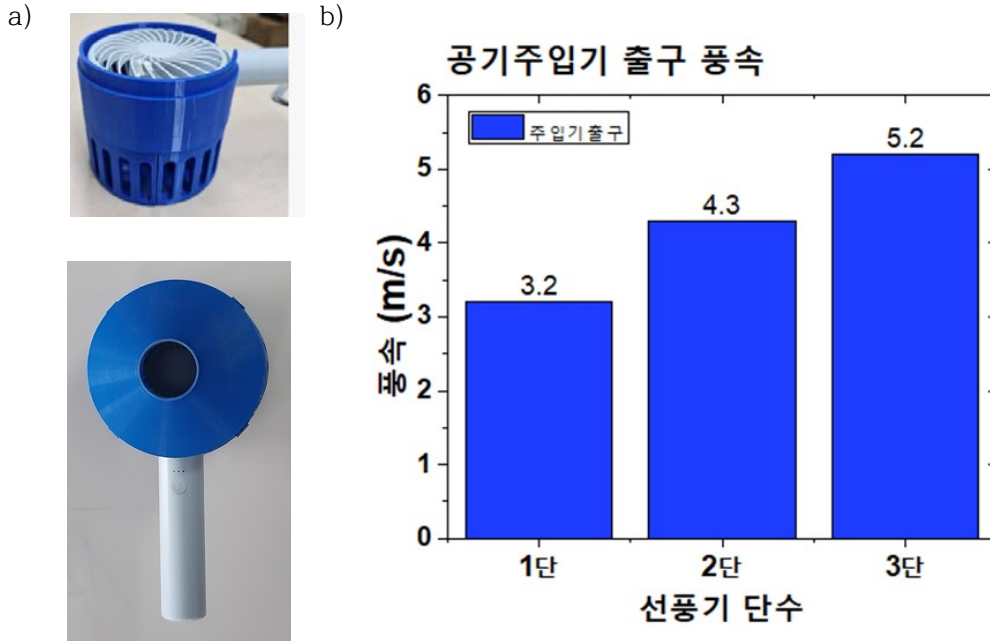


그림 13. 공기주입기에서 풍속. a) 공기주입기에 휴대용 선풍기가 설치된 모습 b) 공기주입기 출구에서의 풍속  
 날개 없는 선풍기의 노즐 형상 최적 설계 논문 (정시영 2017)에서 최적화 설계된 모양의 시뮬레이션 결과를 찾을 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 3D 프린터를 통해 실제 선풍기 림으로 재현하였다.

그림 14는 최적화 논문에서 제시한 구조 모양과 틸커카드를 이용하여 설계한 모양과 3D 프린터를 이용한 최적화 구조 제작한 모습을 보인다.

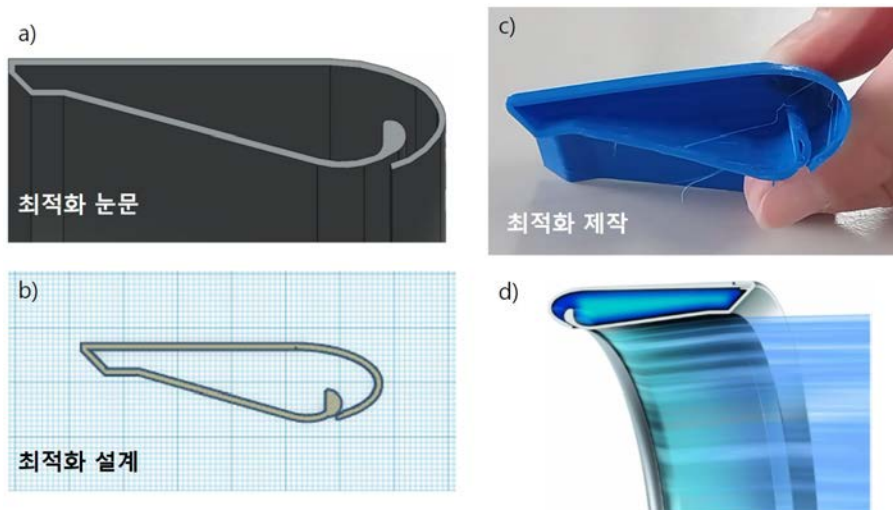


그림 14. 최적화 설계된 림의 단면. a) 최적 설계 논문에서 제시한 구조 b) 틸커카드를 설계. c) 3D 프린터를 이용하여 최적 설계 구조 제작 d) 최적설계된 구조의 코안다 효과 예상도 (정시영 2017)

#### IV. 연구 결과

가장 먼저 림의 크기에 따른 효율 차이를 비교함으로 크기를 최적화하였다. 림의 지름은 공기주입기 출구의 지름 (3.5 cm)보다 약 6배가 큰 (3D 프린터로 출력할 수 있는 최대 크기) 인 20 cm 와 두 배가 큰 7 cm 지름을 제작하여 풍속을 비교하였다. 그림 15는 지름 크기에 따른 풍속을 보여준다.

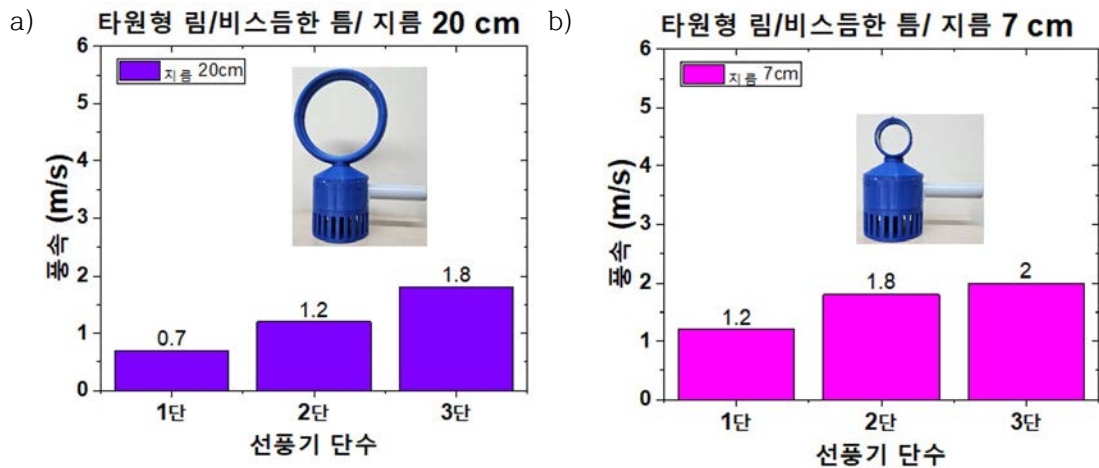


그림 15. 림의 크기에 따른 풍속 a) 지름 20 cm의 단수별 풍속 b) 지름 7 cm의 단수별 풍속

단면 모양이 사각형, 육각형, 삼각형, 타원형에서는 유의미한 결과를 찾을 수 없었다. 시뮬레이션을 통해 얻은 최적 구조를 실제 모형으로 만들어, 풍속을 측정하였다. 그림 16은 최적화된 림 크기인 7 cm의 지름에 비스듬한 틈을 가지는 최적화 구조로 측정된 결과를 나타낸다.

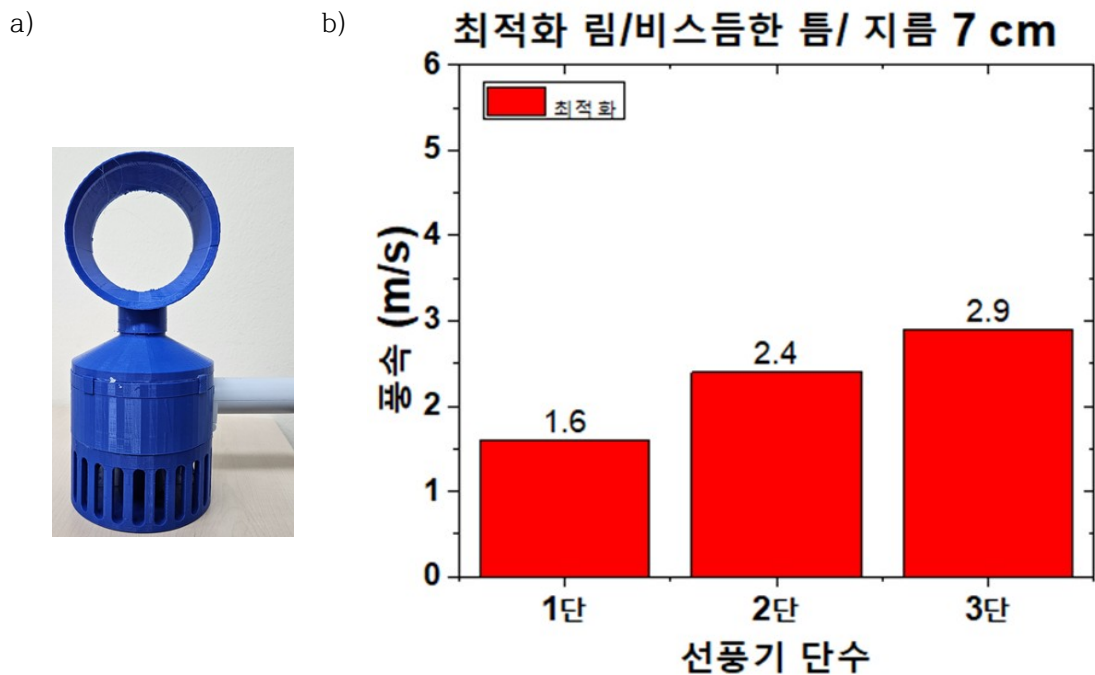


그림 16. 최적화 구조의 날개 없는 선풍기. a) 완성된 최적화 선풍기 b) 최적화 된 선풍기로 측정된 풍속

그림 17에서는 본 연구에서 제작한 결과들을 종합하여 나타낸다.

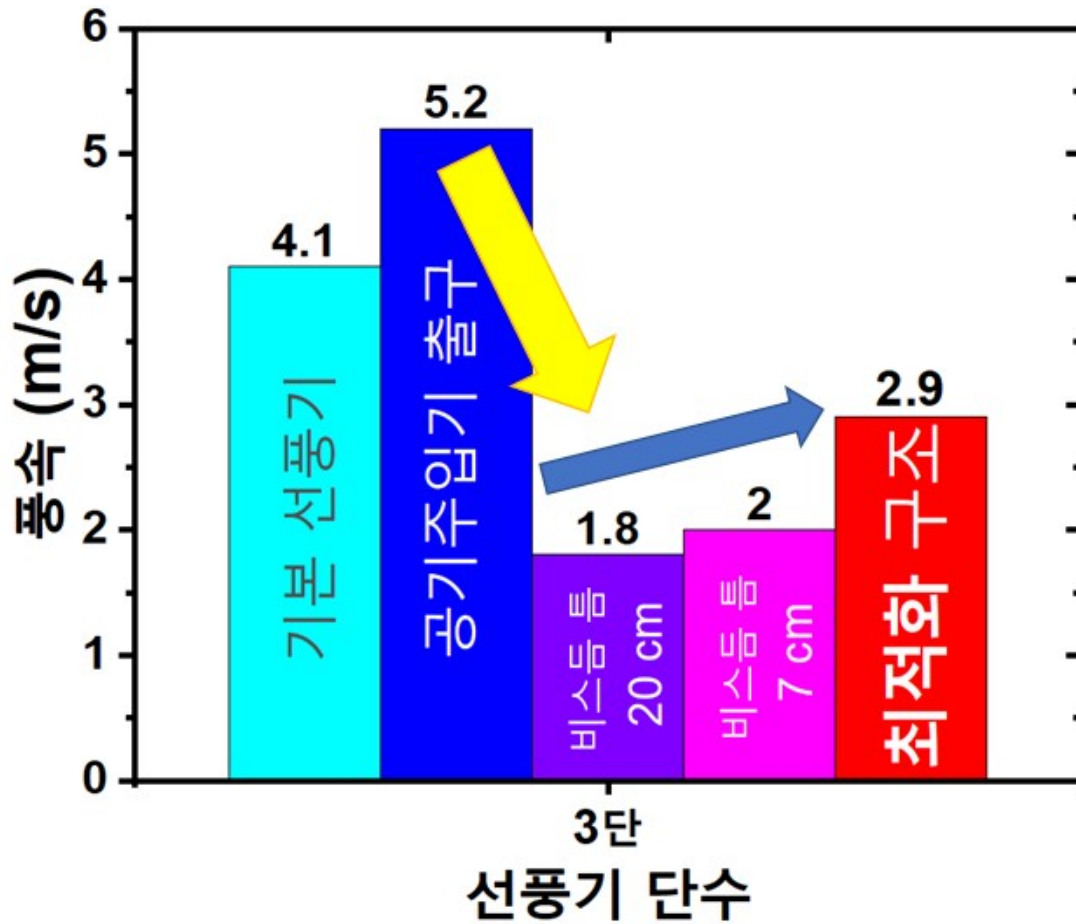


그림 17. 본 연구에 사용된 휴대용 선풍기와 제작된 선풍기의 풍속 변화

휴대용 선풍기보다 3D 프린터로 제작한 날개 없는 선풍기가 풍속이 낮은 이유는 3D 프린터의 노즐이 두꺼워서 계단형으로 출력이 됨으로 코안다 효과를 보기 어렵기 때문이다. 그림 18은 최적화로 설계된 림의 안쪽면을 보인다. 출력 표면이 매끄럽지 못하다.



그림 18. 최적화 설계되어 3D 프린터로 출력한 림의 안 쪽 면

## V. 결론 및 제언

본 연구에서는 날개 없는 선풍기의 림의 단면을 다양하게 제작하여 최적화 과정을 수행하였다. 림의 구조는 틱커캐드로 설계되었으며 3D WOX 1 프린터를 이용해 실제 선풍기 림을 제작하였다. 선풍기의 성능은 풍속계로 확인하였다. 공기주입기의 출력구의 2배 크기에서 바람의 세기가 더 강해지며, 시뮬레이션 결과의 논문을 토대로 실제 선풍기로 제작한 선풍기의 풍속이 높아지는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 날개 없는 선풍기에 소음을 증가시킬 수 있는 고출력, 고회전의 고성능 모터를 사용하지 않더라도 림의 구조를 최적화 함으로서 선풍기의 풍량과 풍속을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 실험 결과에서는 기존 선풍기의 바람 세기에는 미치지 못하였지만, 휴대용 날개 없는 선풍기를 제작할 수 있는 가능성을 제기 하게 되었다.

## VI. 참고문헌

- 이재현, 이관형. (2020). 물체 감지 동작 제어 선풍기 개발. 한국정보기술학회. *Proceedings of KIIT Conference*, 553-556
- 정시영, 이종수, 윤재현. (2017). 실험계획법을 이용한 날개 없는 선풍기의 노즐 형상 최적 설계. *대한기계학회 논문집 A권*, 41(8), 711-719.
- Gammackm, P. D., 2011, "Fan Assembly," U.S. Patent No. 2012/0082561A1
- Jafari, H., Afshin, H., Farhanieh, B. and Bozorgasareh, H., 2015, "Numerical Aerodynamic Evaluation and Noise Investigation of a Bladeless Fan," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 1, pp. 133~142.
- Lasse, C. H. and Simon, H. T., 2014, "Flow Characteristics of the Dyson Air Multiplier," *Computational Fluid Dynamics using Ansys Fluent*, ver. 14.5.7.
- tinkercad.com

물리A

03\_던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용  
에어매트 개발



# 던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트 개발

권희준 (풍천중학교 2학년)

김려민 (경안중학교 2학년)

김현서 (경덕중학교 2학년)

이상현 (길주중학교 2학년)

지도교수 : 윤석수 (국립안동대학교 스마트센서공학과)

## 초록

대피하거나 구조를 기다릴 수 없는 화재 등 긴급한 재난상황에서 최후의 수단으로 고층에서 뛰어내려야 되는 경우 사용하기 위해, 높은 곳에서 바닥으로 던지면 바닥에 닿은 후 개스가 자동으로 채워지는 셀프 인명구조용 에어매트를 개발하고자 하였다. 자동차용 에어백의 인플레이터가 9 V 건전지 전원으로 동작된다는 것을 확인하였으며 가속도센서를 이용하여 자유낙하 후 바닥과 충돌한 이벤트를 감지할 수 있다는 것도 실험을 통해 확인하였다. 자동차용 에어백과 인플레이터를 이용하고, 자유낙하 후 바닥과 충돌할 시 에어백이 작동하도록 하는 제어모듈을 9 V 건전지, 아두이노 보드, 아두이노용 가속도센서 및 릴레이 스위치를 이용하여 개발하였으며, 제어프로그램도 개발하여 아두이노 보드에 업로드 하였다. 자동차용 에어백과 인플레이터 그리고 프로그램이 업로드 된 제어모듈을 박스에 넣어 셀프 인명구조용 에어매트 시작품을 구성하였다. 시작품을 야외 높은 곳에서 떨어뜨리는 실험을 통해 자유낙하 후 바닥에 떨어졌을 때 인플레이터가 동작하여 에어백이 자동으로 펼쳐지면서 개스로 채워진다는 것을 확인할 수 있었다.

## I. 서론

### 1. 동기 및 목적

본 사사과정을 시작하면서 주제를 정하기 위해 학생 각자가 수행하고 싶은 주제와 그 동기를 하나씩 제출하였다. 제출된 주제들에 대해 발표와 토론을 거쳐 그중에서 하나를 선정하였다. 우리들 중 한명이 건물에 화재가 발생하여 화염과 연기로 인해 대피 또는 구조를 기다릴 수 없는 긴급 재난 상황에서 어쩔 수 없이 최후의 수단으로 높은 곳에서 그냥 뛰어내리는 안타까운 장면을 뉴스 등에서 보면서, 탈출해야 하는 사람이 던져서 바닥에 닿으면 자동으로 공기가 채워지며 펼쳐지는 에어매트가 비치되어 있으면 좋겠다는 생각을 했다고 하였다. 화재나 건물붕괴 등의 재난 상황에서 공기매트만 깔려있어도 뛰어내려 생명을 구할 수 있는데 119소방차까지 도달할 시간이 없어 에어매트가 없는 바닥으로 그냥 뛰어내려야 하는 경우가 얼마

든지 발생할 수 있다며 모두 그 필요성에 대해 공감을 하였다. 이 공감대를 바탕으로 본 사사과정의 목적을 “던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트 개발”로 정하였다.

## 2. 사전 탐구

우리는 주제를 정한 후 제일 먼저 인명구조용으로 평소에 접해있던 에어백(공기 주머니)을 사건이 발생했을 때 빠르게 채우는 제품들과 그 제품들이 적용하고 있는 기술들에 대해 검색하였다. 이 검색을 통해 비행기 구명조끼와 충돌 시 충격을 완화하기 위해 입는 에어백 등에서 사용하는 압축개스를 담은 실린더 용기의 마개를 사건이 발생했을 때 열리게 하여 에어백을 채우는 방식[1,2]과 자동차용 에어백에서 사용하는 것으로 충돌이 발생했을 때 고체 질소화합물(구아니딘 질산염,  $CH_6N_4O_3$ )과 필라멘트 코일이 들어있는 인플레이터(팽창기)에 전류가 흘러 필라멘트의 온도가 올라가면 폭발적으로 화합물이 분리되는 반응을 발생시켜 이때 발생하는 질소 개스로 에어백을 채우는 방식[3]이 존재한다는 것을 알 수 있었다.



그림 1. 에어백 팽창 방식 비교[1,3]

## II. 가설설정 및 방법

### 1. 가설설정

우리가 개발하고자 하는 것은 높은 곳에서 던지면 자유낙하 후 바닥과 충돌 시 자동으로 에어백이 빠르게 개스로 채워지면서 펼쳐지는 매트이다. 사전 조사를 통해 에어백을 팽창시키는 방법으로 압축개스를 담은 실린더를 이용하는 것과 고체 질소화합물과 필라멘트로 구성된 인플레이터를 이용하는 두 가지 방식이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 두 가지 방식 중에서 어떤 것이 우리 목적에 적합한지 토론을 하였다. 토론을 통해 작은 부피로 큰 에어백을 채울 수 있으며 전자식으로 제어할 수 있는 장점을 지닌 자동차 에어백에서 사용하는 인플레이터 방식을 채택하기로 하였다. 이 방식에서 에어백이 자유낙하 후 바닥과 충돌했을 때 인플레이터에 전류가 흐르도록 제어하는 장치가 필요하다. 자유낙하 후 충돌했다는 것을 감지하는 것은 가속도센서로 가능하며, 가속도센서 값을 측정하고 그 값이 특정 조건을 만족할 때 인플레이터에 전류가 흐르도록 스위치를 작동하게 하는 것은 아두이노 보드에 프로그램을 작성하여 업로드하는 것으로 가능하다는 것을 지도교수의 도움

으로 알 수 있었다. 이러한 검토내용들을 바탕으로 우리는 다음과 같은 가설을 설정할 수 있었다.

**가설:** 그림 2과 같이 에어백과 인플레이터로 구성하고, 자유낙하 후 바닥과 충돌했을 때 인플레이터가 폭발하도록 제어하는 모듈을 가속도센서, 아두이노 보드, 릴레이스위치, 그리고 업로드한 프로그램으로 제작하면, 낙하 후 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트를 개발할 수 있다.

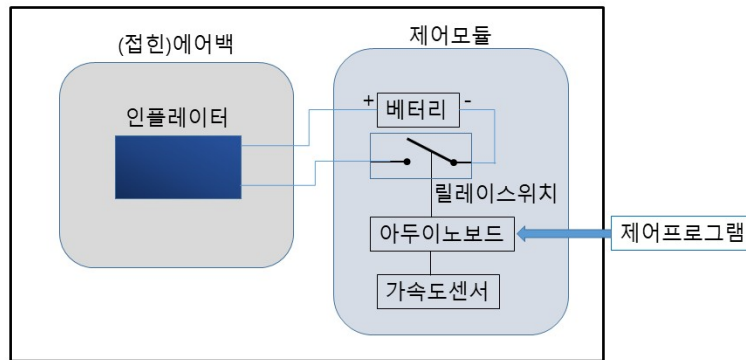


그림 2. 셀프 인명구조용 에어매트의 개발 개념도.

## 2. 준비물

앞에서 수립한 가설에 따라 개발을 진행하기 위해 에어백과 인플레이터가 필요하다. 그런데 실물 크기의 셀프 구조용 에어매트와 이 크기에 맞는 인플레이터를 본 사사과정의 예산과 기간 내에서 제작하는 것은 불가능하다. 그래서 우리는 자동차용 에어백 모듈을 구입하여 이 모듈에 있는 에어백과 인플레이터를 사용하여 소형으로 시작품을 제작하기로 하였다. 그림 3은 우리가 구입한 자동차용 사이드 에어백 모듈에서 분리한 에어백과 인플레이터를 보여준다.






그림 3. 자동차용 에어백 모듈에서 분리한 에어백과 인플레이터 사진

제어모듈에 사용할 부품으로 구입한 것은 표 1과 같다. 아두이노 보드는 UNO

R3, 가속도센서는 CX 3-Axis Sensor, 릴레이 스위치는 PP-A004 모델들을 구입하여 준비하였다.

표 1. 제어모듈 제작용 준비물

제품명	모델명	기능 및 사진
아두이노 보드	UNO R3	마이크로컨트롤러와 AD, DA 변환기 등을 갖추고 있어서 프로그램을 업로드 할 수 있고 외부에서의 신호를 읽거나 외부로 신호를 발생할 수 있음. 
가속도 센서모듈	CX 3-Axis Sensor	보쉬의 BMA150 MEMS 3축 가속도센서를 갖추고 있으며 아두이노 보드와 연결 및 통신이 가능. 아두이노 보드에 프로그램을 업로드하여 이 모듈이 부착된 물체의 가속도 값을 측정할 수 있음. 
릴레이 스위치	PP-A004	제어신호에 따라 두 접점을 전자석 방식으로 이을 수도 끊을 수도 있는 스위치로 사용할 수 있음. 아두이노 보드와 연결하여 동작 가능. 

### 3. 개발과정

본 사사과정의 개발목표를 달성하기 위한 과정을 토의를 거쳐서 다음과 같이 결정하였다.

#### (1) 가설 검증

- (1.1) 자동차용 에어백이 9 V의 건전지 전원으로 동작시킬 수 있는지 확인.
- (1.2) 가속도센서로 에어백이 자유낙하 후 바닥과 충돌했다는 것을 감지할 수 있는지 확인.

(2) 제어모듈 제작: 아두이노 보드, 가속도센서, 릴레이스위치 등으로 에어백의 동작신호를 제어할 수 있는 모듈 설계 및 제작.

(3) 제어프로그램 개발 및 업로드: 아두이노 보드에 에어백의 동작신호를 제어하는 프로그램의 알고리즘을 개발하고 코딩한 후 업로드.

(4) 시작품 구성 및 예비실험: 에어백, 인플레이터, 제어모듈로 시작품을 구성하고 인플레이터와 제어모듈은 연결하지 않고 시작품을 던졌을 때 제어모듈이 제대로 동작하는지 예비실험.

(5) 시작품 시연 실험: 인플레이터와 제어모듈을 연결한 시작품을 높은 곳에서 자유낙하 시켜 바닥과 충돌 시 자동으로 개스가 채워지면서 펼쳐지는지 확인하는 실험

## III. 결과 및 고찰

### 1. 가설검증

#### (1) 자동차 에어백 인플레이터 동작 조건확인

우리가 세운 가설로 시작품을 개발하는 것이 가능한지 확인하기 위해 제일 먼저

구매한 자동차용 에어백의 인플레이터가 9 V 건전지로도 터지는지 확인하였다. 만약 건전지로 동작이 되지 않는다면 가설을 수정해야 하기 때문이다. 이 실험을 위해 그림 4와 같이 에어백 인플레이터에 9 V 건전지 전원을 스위치를 거쳐서 연결하였다. 에어백이 터질 때 매우 큰 반동과 소리 그리고 열과 개스가 발생하기에 에어백을 단단하게 고정하고 창문을 모두 열고 멀리 보호물 뒤에서 관찰하는 등의 안전 조치를 하고 실험하였다. 처음에 사용한 9 V 건전지 제품을 사용하였을 때는 스위치를 켜도 에어백이 동작하지 않았으며 실험 후 건전지를 확인한 결과 에너지는 소모되었다는 것을 확인하였다. 건전지의 에너지 용량이 부족한 것으로 판단하여 건전지를 9 V DURACELL 제품으로 바꾼 후 스위치를 켜었을 때 즉시 에어백이 터졌다. 그림 5는 에어백이 터진 직후의 모습을 동영상에서 캡처한 사진이다. 이 결과로부터 9 V DURACELL 건전지를 연결하는 것만으로 인플레이터를 동작시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

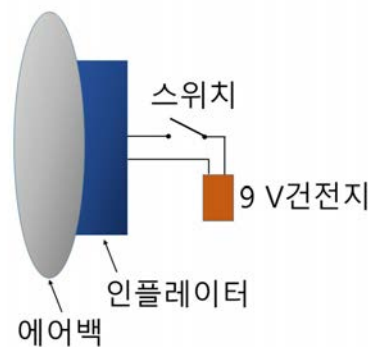


그림 4. 자동차용 에어백 인플레이터 동작 조건 확인 실험구성



그림 5. 9 V 건전지 전원으로 자동차용 에어백이 터진 직후 에어백의 모습(동영상 캡처 사진)

- (2) 가속도센서로 에어백이 자유낙하 후 바닥과 충돌한 이벤트 감지 가능성 확인  
우리가 세운 가설로 시작품을 개발하는 것이 가능한지 확인하기 위해 두 번째

로 실시한 실험은 그림 6과 같이 구매한 자동차용 에어백을 접어 인플레이터를 감싼 후 무선 가속도센서를 부착하였다. 이때 사용한 무선 가속도센서는 안동대학교 스마트센서공학과에 있는 9축 관성센서(LPMS-B2 모델)를 사용하였다. 이 센서의 크기는 39 mm x 30mm x 8 mm, 질량은 12 g 이었다.

바닥에 놓여 있는 인플레이터를 감싼 에어백을 높이 들어서 자유낙하 시킨 후 바닥과 충돌하는 과정 동안 노트북으로 무선 가속도센서의 측정신호를 0.01초 간격으로 받아 저장한 후 시간에 따라 가속도센서가 측정한 가속도 값의 크기를 그래프로 그린 것이 그림 7이다. 이 결과를 보면 에어백이 바닥에 가만히 놓여 있을 때 에어백에 부착된 가속도센서가 측정한 가속도의 크기는 1 g 즉  $9.8 \text{ m/s}^2$  값을 나타낸다. 이어서 에어백을 들어 올리는 동안 가속도의 크기는 1 g 근처에서 약간의 변동을 보인다. 들어 올린 에어백을 던진 후 에어백이 자유낙하하는 동안 가속도의 크기는 0 g에 가까운 값을 보였다. 그리고 에어백이 바닥과 충돌 하면 3 g 이상의 큰 가속도가 발생하였다. 이 실험을 여러 자세에서 여러 높이에서 반복한 결과 에어백이 자유낙하하는 동안 가속도의 크기는 0 g에 가까운 값을 보이며 에어백이 바닥과 충돌 하면 그 값은 높이에 따라 다르지만 수 g의 큰 가속도가 측정된다는 것은 변함이 없었다. 이 결과로부터 가속도센서를 이용하면 자유낙하 후 바닥과 충돌한 이벤트가 발생했다는 것을 감지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

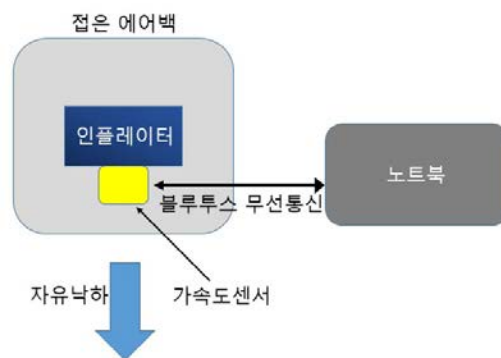


그림 6. 인플레이터를 감싼 에어백이 자유낙하 하는 동안 에어백에 부착된 가속도센서로 가속도 크기의 변화를 측정하기 위한 실험장치 구성

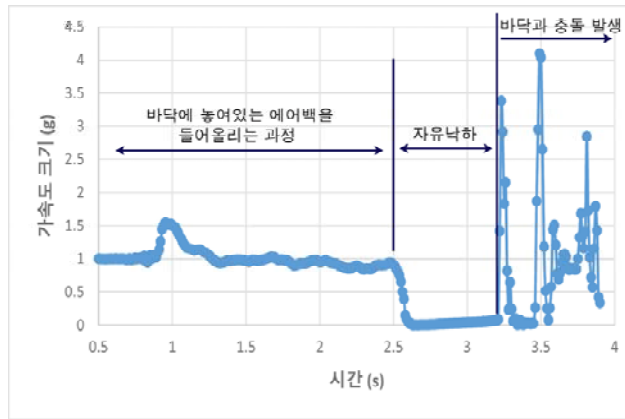


그림 7. 에어백이 자유낙하 하는 동안 가속도 센서로 측정된 가속도의 크기 변화

## 2. 제어모듈 개발

가설검증 실험을 통해 9 V 건전지로 에어백 인플레이터를 동작시키는 것이 가능하며 가속도센서를 이용하면 자유낙하 후 바닥과 충돌한 이벤트 발생을 감지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 다음 단계로 아두이노 보드, 가속도센서, 릴레이 스위치로 구성된 프로그래밍이 가능한 제어모듈을 개발하였다. 그림 8은 개발한 제어모듈의 구성도를 보여준다. 아두이노 보드는 가속도센서와 연결되어 가속도 값을 측정하며 릴레이 스위치와도 연결되어 이 스위치를 ON 또는 OFF 상태로 제어할 수 있다. 이 스위치가 ON 되면 9 V 배터리의 전원이 인플레이터에 연결되어 인플레이터가 동작하게 된다. 9 V의 또 다른 전원은 ON/OFF 스위치를 거쳐 아두이노 보드에 연결되어 있다. 이 스위치가 ON 되면 아두이노 보드에 전원이 가해진다. 긴급상황에서 셀프 구조용 에어백을 던지기 전에 이 스위치를 ON 하면 된다. 그림 9는 실제 제작한 제어모듈의 사진이다.

## 3. 제어프로그램 개발

그림 9의 제어모듈을 제작하면서 동시에 아두이노 보드에 업로드 할 제어프로그램을 개발하였다. 먼저 그림 10과 같은 순서도의 제어프로그램의 알고리즘을 개발하였다. 시작 스위치가 ON 되면 먼저 아두이노 보드와 가속도센서를 세팅하고 가속도센서로부터 가속도의 크기(a) 값을 연속해서 측정한다. 연속측정하는 가운데 가속도 크기가 0.5 g 보다 적은 이벤트가 발생한 후 가속도의 크기가 4 g보다 큰 이벤트가 발생하는 경우 릴레이 스위치를 ON하는 신호를 아두이노 보드가 발생하여 인플레이터가 폭발하도록 하는 순서의 알고리즘을 개발하였다. 여기서 가속도 크기 0.5 g는 자유낙하 하기 시작했을 시 가속도의 값의 아래쪽 문턱 값이며 4 g는 2미터 높이 이상에서 떨어뜨렸을 경우 바닥과 충돌했을 시 가속도 값의 위쪽 문턱 값이며 이 둘은 여러 번 낙하하는 실험을 통해 결정하였다.

그림 10의 순서도에 따른 제어프로그램은 아두이노의 통합개발환경 스캐치 프로

그램을 이용하여 코딩하였다(작성한 제어프로그램의 소스코드는 본 논문의 부록으로 수록). 작성한 프로그램을 시리얼통신으로 아두이노 보드에 업로드 하였다.

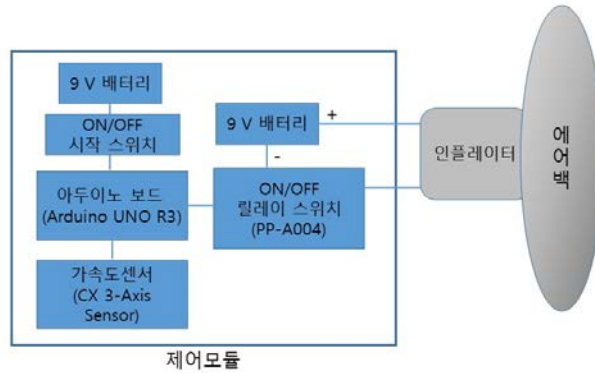


그림 8. 에어백 인플레이터 제어모듈의 구성도



그림 9. 개발한 에어백 인플레이터 제어모듈 실물사진

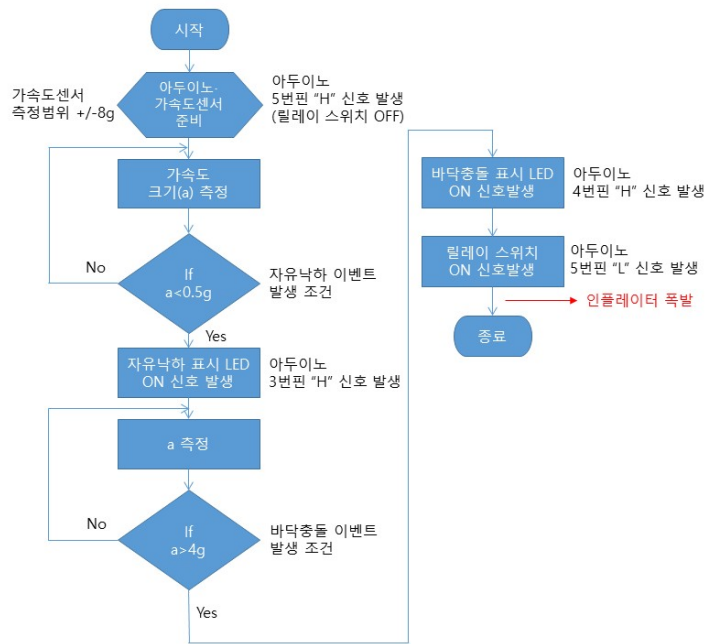


그림 10. 인플레이터 제어프로그램 순서도

#### 4. 시작품 구성 및 예비실험

개발목표인 셀프 인명구조용 에어매트 시작품은 그림 11(a)과 같이 하드 종이박스 속에 인플레이터를 감싸게 말아서 접은 에어백과 제어모듈을 넣고 시작 스위치는 외부로 노출시켜 구성하였다. 그림 11(b)는 박스에 넣기 전 시작품의 모습을 보여주는 사진이며 그림 11(c)는 말기 전의 에어백과 인플레이터 그리고 제어모듈의 내부 모습을 보여주는 사진이다.

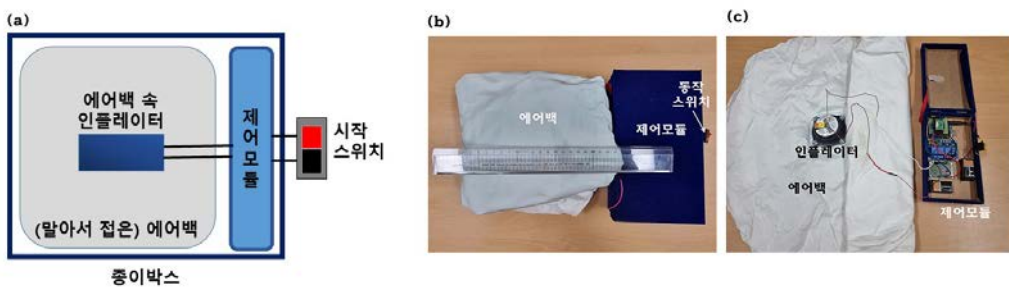


그림 11. 셀프 인명구조용 에어매트 시작품 (a) 구성도 (b) 박스에 넣기 전 모습 (c) 말기 전의 에어백과 인플레이터 그리고 제어모듈의 내부 모습

시작품을 구성한 후 예비실험으로 인플레이터와 제어모듈을 연결하지 않은 상태에서 여러 높이에서 자유낙하 시키는 실험을 하여, 기준으로 설정한 2미터 이하의 높이에서 떨어뜨렸을 때는 자유낙하 LED만 켜지는 것과 2미터 이상의 높이에서

자유낙하 시에는 자유낙하 확인 LED와 바닥과 충돌 확인 LED 모두가 켜진다는 것을 확인하였다. 아울러 자유낙하 하지 않고 그냥 충격만 가했을 경우는 두 LED 모두 켜지지 않았다. 이로부터 제어프로그램이 잘 동작하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 시작품 시연실험

시작품이 잘 동작하는지 시연하는 실험을 하기 위해 약 6미터 높이의 야외 운동장 담장 위에서 시작 스위치를 ON한 후 자유낙하 시키는 실험을 하였다. 이 과정을 영상으로 고속촬영하였으며 기록된 영상을 연속으로 캡처한 사진이 그림 12이다. 이 결과를 보면 시작품은 자유낙하 하는 동안에는 에어백이 펼쳐지지 않으며 바닥과 충돌한 직후 인플레이터가 폭발하면서 에어백이 자동으로 팽창하면서 펼쳐진다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 우리가 목표로 한 “던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트”의 시작품을 개발하는 데 성공하였다.



그림 12. 셀프 인명구조용 에어매트 시작품 동작 시험실험 결과(동영상을 연속 캡처한 사진. 왼쪽부터 시작)

## IV. 결론 및 제언

우리는 “던지면 자동으로 펼쳐지는 셀프 인명구조용 에어매트”의 시작품을 개발하는 데 성공하였다. 물론 이 시작품을 실제 우리가 목적으로 하는 곳에 사용하기 위해서는 더 많은 개발이 필요하다. 우선 셀프 인명구조용 에어매트의 실제 사이즈를 결정해야 하며 그 사이즈의 에어매트를 채우기 위한 맞춤형 인플레이터도 개발해야 한다. 그리고 큰 부피의 에어매트를 가득 채우기 위해 많은 양의 질소화합물을 폭발시킬 때 발생할 위험요소도 제거해야 한다. 우리가 목적으로 하는 에어백은 자동차 에어백처럼 매우 순간적으로 폭발해야 할 필요가 없으므로, 이점을 이용하여 여러 개의 작은 인플레이터가 연쇄적으로 동작하도록 하면 될 것으로 보인다. 에어매트의 사이즈에 맞는 인플레이터도 작은 인플레이터의 개수를 조정하면 해결 될 것으로 생각된다.

아울러 우리가 개발한 개념을 활용하면 키보드 사고를 방지하는 에어조끼를 개

발하는 것도 가능할 것으로 보인다. 인플레이터와 제어모듈로 구성하는 컨셉은 그대로 유지하고 제어프로그램만 수정하여 키보드를 탄 사람이 사고로 몸이 공중에 뜨는 이벤트가 발생하면 인플레이터가 즉시 동작하여 바닥에 떨어지기 전에 에어조끼가 부풀어 오르도록 하면 가능할 것으로 생각된다.

## V. 참고문헌

- [1] <https://thaistart.tistory.com/18318710>
- [2] <http://www.safeware.co.kr/kr/sub/tech/airBag.php>
- [3] <https://blog.naver.com/1012rnjsdydgn/222604007372>



물리A

04\_수열합성에 의한 ZnO nano-rods의 성장과  
광학적 특성 분석



# 수열합성에 의한 ZnO nano-rods의 성장과 광학적 특성 분석

## Growth and optical properties of ZnO nano-rods by hydrothermal synthesis

강성용(남원한빛중학교2학년)

김민진(전주서곡중학교2학년)

이건희(화산중학교2학년)

정예준(원광중학교2학년)

허윤호(전주오송중학교2학년)

지도교수 : 김희대 (전북대학교 반도체과학기술학과)

### 초록

본 연구에서는 ZnO nano-rods를 성장시켜 광학적 특성과 박막질의 온도 의존성을 조사했다. 광학적 특성은 광-발광(Photo-luminescence, PL) 측정으로 확인했으며, seeding 공정 단계에서 진행한 열처리 과정에서 온도 의존성을 확인했다. 또한 ZnO nano-rods 증착, 성장 시에 solution의 농도를 달리하여(0.05~0.3M) 농도별 결과 추이를 조사했다. nano-rods의 성장은 수열합성법을 따랐으며, Si 기판에 seed 층을 코팅, 열처리 이후 120°C의 온도로 설정한 수열합성 용기에 넣어 진행하였다. 325nm의 He-Cd 레이저를 사용하여 380nm 파장의 강한 emission이 발생하는 PL peak 측정을 통해 전구체 농도 변화에 따라 발광 특성의 세기가 비례적으로 증가하는 관계를 보임을 확인할 수 있었다.

### I. 서론

현대 사회의 디지털화에서 반도체는 그야말로 현시대 4차 산업 혁명의 핵심이라고 할 수 있다. IoT(Internet of Things), 빅 데이터, 그리고 인공지능은 물론, 자동차, 로봇과 같은 분야에서부터 광학, 센서, 항공 우주 분야에 이르기까지 반도체는 이들의 주요 구성요소이자 기본 토대가 되고 있다. 이렇게 현대 사회의 과학 기술 발전에서

핵심이 되는 반도체란, 전기적인 전도성을 조절할 수 있는 물질을 일컫는다. 반도체로 지목되는 여러 물질 중 산화아연(Zinc oxide, ZnO) II-VI족 화합물 반도체로, 3.37eV의 넓은 에너지 밴드 갭(Energy band gap)을 가져 높은 효율의 광화학 소자로써 응용이 기대되는 유망한 물질이다. 이 밖에도 뛰어난 열전 특성과 높은 생체 안전성, 높은 비표면적과 낮은 제조비용에 더하여 나노 결정 성장이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 이러한 우수한 특성을 가지기 때문에 LED나 태양전지, 투명전극, 가스 센서 등의 광전자 소자 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 해당 반도체의 광학적 특성을 분석하고, 열처리 온도에 따른 박막질을 조사한다. 또한 ZnO 박막을 증착, 성장시키는 데에 사용하는 solution의 몰 농도에 변화를 주는 것으로 농도별 광학적 특성과 박막질 변동을 확인한다. 이와 같은 성질을 분석하는 데에 사용하는 ZnO 박막은 수열합성법(hydrothermal method)을 이용한다. 해당 기법은 제조 공정이 간단하고 비교적 낮은 온도에서 성장시킬 수 있으면서도 좋은 품질의 박막을 형성할 수 있기 때문이다.



그림 1. 태양전지, LED, 가스 센서

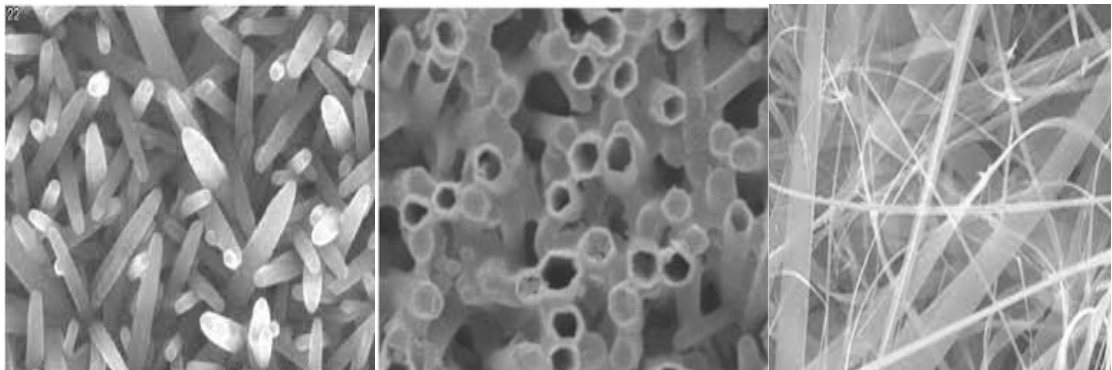


그림 2. nano-rod, nano-tube, nano-belt의 SEM image

## II. 이론적 배경

본 연구를 진행하는 데에 앞서 기본적으로 숙지해야 하는 이론적 배경에는 반도체라는 물질이었다. 앞서 언급한대로 반도체는 현대 사회에 있어서 아주 익숙하게 들어왔던 것이었다. 도대체 그 반도체는 무엇이고, 도체 및 부도체와는 어떻게 구분되는가가 첫 번째 의문이면서 본 연구를 진행하는 데에 알아야 할 사항이었다.

우선 도체는 흔히 ‘전기가 통하는’ 물질이고, 부도체는 ‘전기가 통하지 않는’ 물질이라고 한다. 그렇다면 반도체는 무엇일까. 반도체는 ‘전기적 특성을 조절할 수 있는’ 물질이라고 할 수 있다. 그리고 전기적 특성을 조절하는 것은 doping과 같은 반도체 공학 기법이 적용되는데, 이를 알기 위해 먼저 ‘에너지 밴드(Energy band)’를 알아야 한다. 그리고 에너지 밴드를 이해하기 위해서는 에너지 준위와 파울리 배타원리를 먼저 짚고 넘어가야 한다. 에너지 준위는 원자핵의 주위를 회전하고 있는 전자가 가질 수 있는 에너지 레벨(Energy level)이라고 할 수 있다. 이어서 파울리 배타원리는 동일한 원자 내에 있는 두 전자가 같은 순간에 같은 상태에 있을 수 없다는 이론이다.

이 두 가지 개념을 숙지했으면 비로소 에너지 밴드를 논할 수 있다. 불연속적인 값으로 나타나는 원자 내 ‘전자의 에너지’가 다른 원자가 인접하게 될 때 파울리 배타원리에 따라 전자의 에너지 준위가 분리된다.

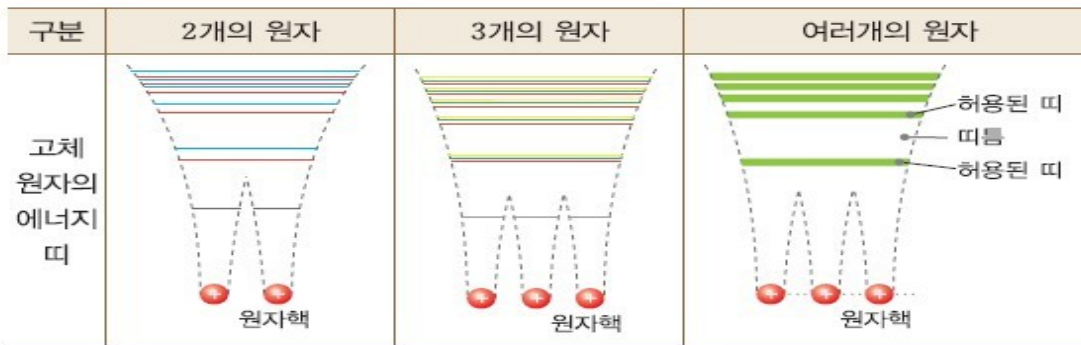


그림 3. 전자의 에너지 준위 분리

원자들을 여러 개 접근시켜 동일한 간격으로 배열하면 전자의 개수만큼 에너지가 분리된다. 이렇게 나누어진 에너지는 촘촘히 모여 있어 마치 띠처럼 영역을 형성하게 되는데, 이 때 형성된 띠와 같은 영역을 에너지 밴드라고 한다. 또한 원자 간의 거리가 일정 거리 이내로 가까워지면 전자가 존재할 수 없는 에너지 간격이 형성된다. 이 간격을 에너지 밴드 갭(Energy band gap)이라고 한다. 그리고 절대온도 0K에서 전자들은 가장 낮은 에너지 상태에 존재하는데, 이 때 전자의 최대 에너지의 크기를 페르미 준위(Fermi level)라고 한다.

에너지 밴드에서 아래쪽 밴드에 있는 전자가 에너지를 얻어 위쪽의 에너지 밴드로 이동하면 아래쪽 밴드의 전자가 있던 자리에는 정공(hole)이라 불리는 빈 에너지 상

태가 생긴다. 여기서 아래의 에너지 밴드에서 전자가 에너지를 얻어 올라올 수 있는 위쪽의 에너지 밴드를 전도대(conduction band)라고 부르고, 아래쪽 에너지 밴드를 가전자대(valence band)라고 한다. 그리고 전도대의 최소 에너지 값과 가전자대의 최대 에너지 차이를 에너지 갭(energy gap)이라고 한다.

도체는 페르미 준위가 전자의 에너지가 허용된 밴드의 중간에 위치하거나, 가전자대와 전도대가 겹쳐지면(overlap) 전기장을 가했을 때 전자가 바로 위의 에너지 준위로 쉽게 이동하여 전도가 쉽게 일어난다. 즉, 전기가 잘 흐른다. 이에 반해 부도체는 페르미 준위가 가전자대의 가장 높은 위치에 있고 가전자대와 전도대의 차이, 즉 에너지 갭이 3eV 이상이어서 전자가 전도대로 쉽게 올라가지 못한다. 즉, 전기가 잘 흐르지 않는다.

반면 반도체는 페르미 준위가 가전자대의 가장 높은 위치에 있지만 에너지 갭이 0.1eV~3eV 정도로 경미하여 상온에서 가전자대의 전자가 열에너지를 얻어 전도대로 올라갈 수 있게 된다. 쉽게 말해 반도체는 밴드 갭의 길이가 도체보다 크고 부도체보다 작다. [그림 4.]에서 도체, 부도체, 반도체 사이의 차이에 대해 명확히 그림으로 구분 가능하다. 하지만 이러한 표현은 조금 모호한 구석이 있기 때문에, 반도체를

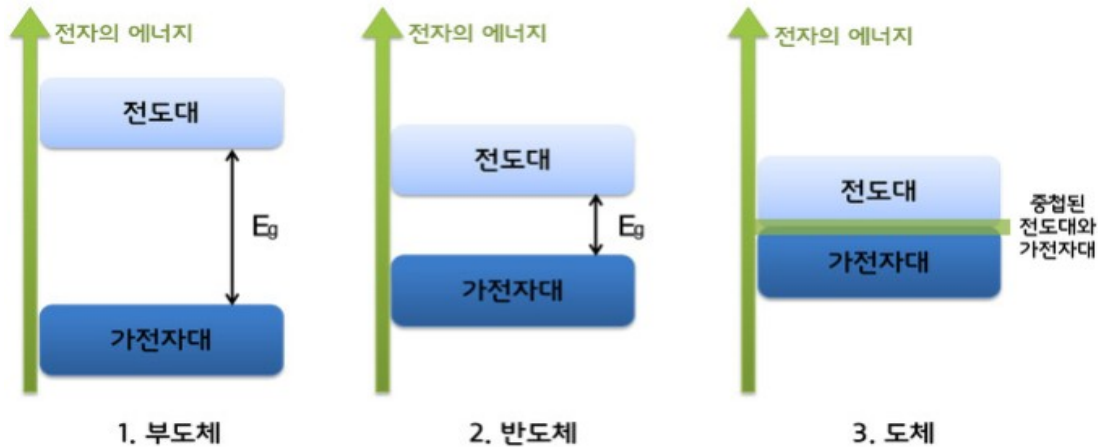


그림 4. 부도체, 반도체, 도체 내의 전자의 에너지 및 밴드 갭의 모식도

정의하는 가장 정확한 표현은 전기적 특성을 조절할 수 있는 물질이라고 할 수 있다. 그렇다면 이를 조절할 수 있는 방법은 무엇인가. 이에 대한 답으로는 doping이라는 기법을 말할 수 있다.

특정한 물질의 에너지 갭은 물질과 결정 구조가 정해지면 일정한 값이 되지만 이는 상수가 아닌 온도에 대한 함수가 된다. 이 때 불순물을 첨가하여 그 값을 바꿀 수 있다. 이를 doping이라고 한다. 이 doping을 하는 데에 있어서 어떤 물질을 사용할 것인가, doping 농도는 어느 정도로 할 것인가 등의 조건을 조정하여 반도체의 전기적 특성을 조절한다.

에너지 밴드, 에너지 준위, 에너지 밴드 갭을 알았다면 이제 전자의 여기와 측정에서 거론되는 광-발광을 알아야 한다. 그리고 이를 위해서는 전자 에너지의 불연속성을 설명하는 양자 상태와 원자 모형에서의 전자 궤도, 그리고 정상 상태 에너지 준위에서 이루어지는 양자 도약을 살펴보아야 한다.

양자 역학을 논할 때의 '양자' 상태란, 불연속적인 것을 말한다. 전자의 에너지는 이 불연속적인 에너지라고 할 수 있는데, 해당 개념을 가장 쉽게 이해하는 데엔 계단 모형을 이용한 설명이 가장 용이하다.

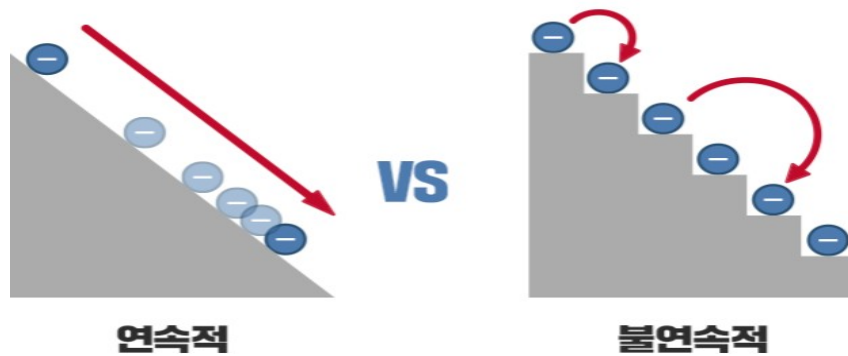


그림 5. 전자 에너지의 불연속성

[그림 5.]에서 에너지 흐름에 중요한 전자를 공에 비유한다면 전자는 비탈길을 미끄러지는 듯한 움직임처럼 연속적인 운동을 하지 않는다. 계단처럼 각각 불연속적으로 정해진 위치에 존재한다.

비유를 통해 불연속성을 이해했다면 이제 전자의 실제 운동을 살펴봐야 한다. 원자 내에서 전자는 원자핵을 중심으로 그 주위를 맴도는 운동을 한다. 이때의 전자는 음극(-), 원자핵은 양극(+)의 전하를 가진다. 각각의 전하만 두고 생각한다면 전자는 원자핵으로 이끌려 가야 한다. 하지만 전자는 가지는 에너지에 따라 일정한 궤도를 따라 움직이게 된다.

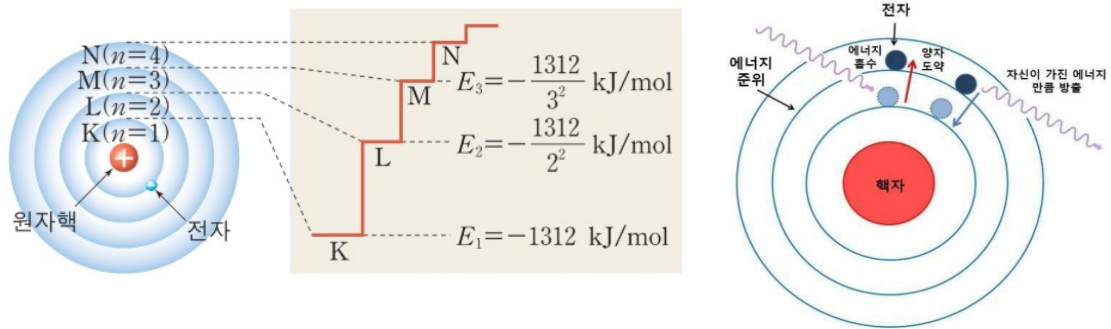


그림 6. 원자 모형에서의 전자 궤도와 정상 상태 에너지 준위에서의 양자 도약

원자핵으로부터 가장 가까이에 있는 궤도는 가진 에너지가 가장 낮은 상태이며 이를 정상상태라고 한다. 원자핵으로부터 먼 궤도일수록 에너지 준위가 높는데, 이 궤도의 분포가 바로 불연속적인 분포를 보인다. 즉, 전자는 해당 에너지 준위(궤도)에 따르는 불연속적인 에너지 상태를 가진다. 그리고 외부로부터 어떤 에너지를 받아 상위 단계의 에너지 상태(궤도)로 도약하는 것을 양자 도약이라고 한다. 여기서 전자가 외부로부터 에너지를 받아 상위 단계로 양자 도약한 상태를 들뜬 상태라고 한다. 이 때 전자가 들뜬 상태가 될 때 에너지를 흡수 하였듯이, 하위 단계의 에너지 상태로 내려갈 때엔 에너지를 방출한다. 여기서 방출하는 에너지는 보통 빛의 형태로 방출된다. 이러한 발광은 전자가 여기(양자 도약)될 때 흡수한 에너지에 따라 1) 빛에 의해 여기하는 광-발광(Photo - luminences), 2) 전계에 의해 여기하는 전계 발광(Electric - luminences), 3) 열에 의해 여기하는 열-발광(Thermal - luminences), 4) 화학 반응에 의한 화학 발광(Chemical - luminences), 5) 생물이 스스로 빛을 발하는 생물 발광(Bio - luminences, ex : 반딧불이)의 다섯 가지로 나뉜다.

본 연구에서는 빛을 흡수/방출하는 광-발광(Photo-luminences, PL)을 통해 광학적 특성을 분석한다. 이 때 발생하는 빛은 그 물질의 에너지 밴드 갭, 불순물의 종류 및 농도, 결성 상태에 의해 다르게 나타나기 때문에 해당 데이터를 분석하여 물질의 결함 수준(defect level), 불순물 농도, 박막질 등을 확인할 수 있다 [그림 7.].

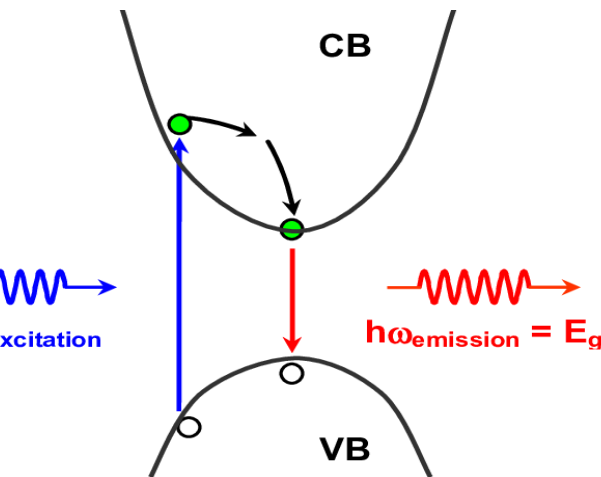
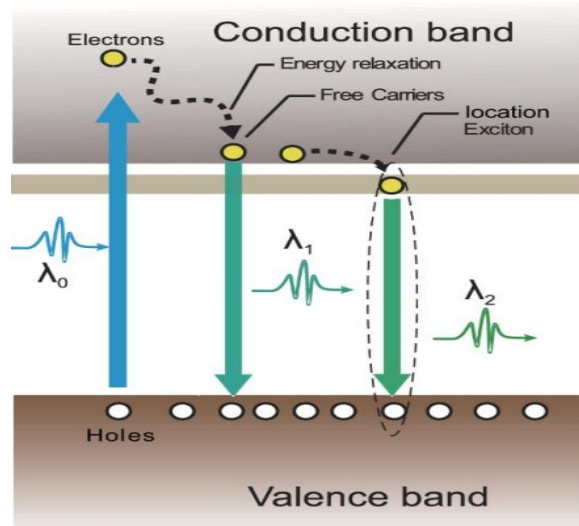


그림 7. 광-발광(Photo-luminescence) 모식도

이 광-발광 현상이 일어나는 것은 크게 네 단계로 나누어 설명할 수 있다. 1) 가전자대에 있던 전자가 빛 에너지를 흡수하면 2) 전자가 들뜬 상태가 되어 전도대로 올라가는 과정에서 전자-정공쌍이 형성된다. 이로 인해 가전자대에는 정공이, 전도대에는 전자가 위치한다. 3) 전도대로 들뜬 상태가 된 전자들은 불안정하므로 다시 원래의 가전자대로 돌아간다. 4) 전도대의 전자가 가전자대의 정공을 만나 재결합하면서 빛 에너지가 발생한다.

본 연구에서는 이처럼 빛을 이용한 광-발광 현상을 통해 반도체 물질의 에너지 밴드 구조 내에서 전자가 어떻게 움직이고 빛이 어떻게 생성되는지 알아본다. 또한 이를 통해 1차원 반도체 물질인 ZnO nano-rods의 발광 특성이 전구체 물 농도에 따라 향상되는지 조사한다.

### III. 연구 방법

본 연구에서는 수산화암모니아( $\text{NH}_4\text{OH}$ )와 아세트산 아연( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )를 포함하는 수용액을 사용하여 ZnO nano-rod 증착을 위한 새로운 solution 방법을 제시한다. 이 성장 방법은 공정이 간단하고 비교적 저온( $100^\circ\text{C}$ )에서 증착하며, 비용과 위험성이 낮고, 금속 촉매를 사용할 필요가 없는 장점을 보인다. 이러한 이유로 채택한 해당 방법은 다음과 같은 순서에 따라 진행된다.

먼저 기판은 n-type 실리콘 wafer를 사용한다. 이 Si wafer를 diamond pencil를 사용하여 적당한 규격으로 dicing 한다. 이후 준비된 해당 기판을 세척하는데, 아세톤 용액을 사용하는 것을 첫 번째 단계로 적용한다. 아세톤 용액에 기판을 충분히 잠기게 담근다. 이후 기판과 아세톤 용액이 담긴 비커를 초음파 세척기에 넣고 5분 간 음파 처리(sonication)를 해준다. 음파 처리 후  $\text{N}_2$  gun으로 blowing하여 건조시킨다.

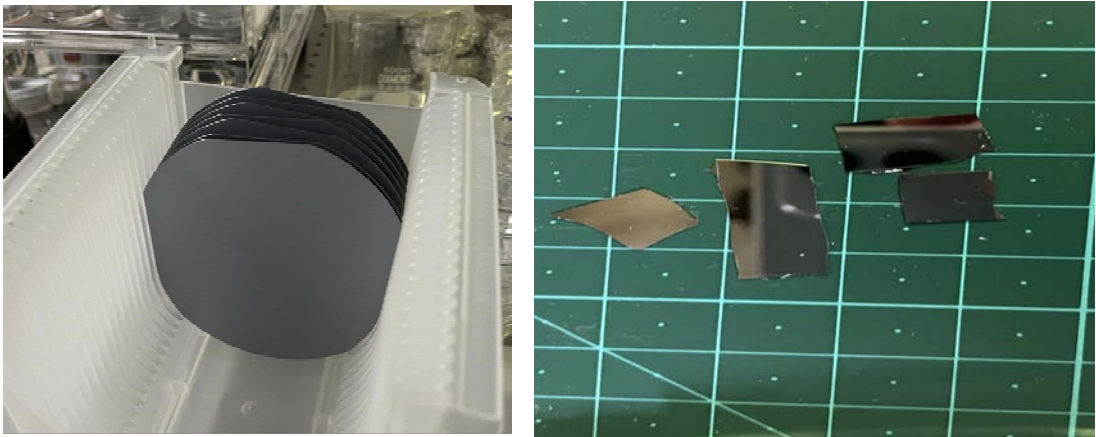


그림 8. N-type Si wafer와 dicing을 마쳐 준비가 끝난 기판

기판이 준비되면 다음으로 solution을 준비한다. Zinc acetate dihydrate를 약포지를 세팅한 전자저울을 이용하여  $0.219\text{g}$ 을 계량한다. 계량한 해당 물질을 에탄올  $200\text{ml}$ 에 넣는다.(이 비율로 weighing을 한 solution의 몰 농도는 약  $0.05\text{M}$ 이다.) 이후 본 solution을  $60^\circ\text{C}$ 에서 5분 동안  $500\text{rpm}$ 으로 조건을 맞춰 stirring한다. 그 다음으로 앞서 사용한 기기에서 20분간 음파 처리한다.

만들어진 seed solution을 스포이드를 사용하여 기판 위에 뿌린다. 그 후 20초 동안 대기한 뒤 에탄올로 rinse 하고  $\text{N}_2$  gun으로 blowing한다. 이 과정을 총 5회 반복하여 seeding 처리를 한다. seeding 처리된 기판은  $300^\circ\text{C}$ 에서 20분 동안 annealing한다.



그림 9. solution weighing 과정. 약포지가 세팅된 전자저울을 이용한 계량, Hot plate stirrer를 이용한 stirring 및 sonication.

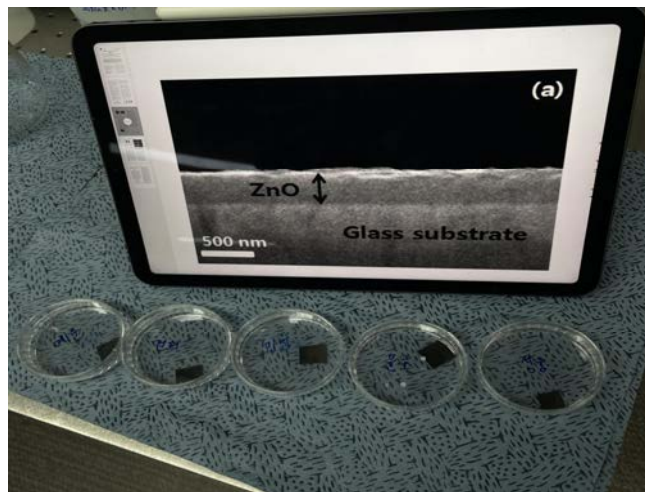


그림 10. 증착 된 ZnO 박막

annealing까지 마치면 ZnO 박막 증착이 완료된다. 이제 해당 기판에 수열합성을 통해 ZnO nano-rod를 성장시킨다. 이를 위해선 수열합성에 사용할 solution이 필요하다. 수열합성에 사용할 solution은 다음과 같이 weighing하여 사용한다. 먼저, 앞서 사용했던 Zinc acetate dihydrate를 약포지가 세팅된 전자저울에 계량한다. 0.219g으로 계량이 완료되면 DI water 200ml에 넣어준다. (해당 비율로 만들어진 solution의 몰 농도는 약 0.05M이다.) 만들어진 용액을 hot plate stirrer를 사용하여 20분 동안 stirring 해준다. Weighing한 solution을 수열합성 용기에 담는다. sample을 holder에 고정한 뒤 solution이 담긴 용기에 넣어준다. 그 상태로 이를 오븐에 넣어 120°C에서 1시간 동안 annealing을 해준다. annealing이 완료되면 sample을 꺼내 에탄올로 rinse 후 blowing 해준다.



그림 11. 수열 합성 용기와 annealing 시 사용할 오븐

#### IV. 연구 결과

nano-rod를 성장시킨 sample은 이후 PL 측정을 통해 발광 특성과 같은 광학적 특성을 분석하였다. 또한 열처리 유무에 따라 결함 수준에 변동이 생기는데, 이는 광학 현미경을 사용하여 결함이 줄어드는 것을 확인하였다.

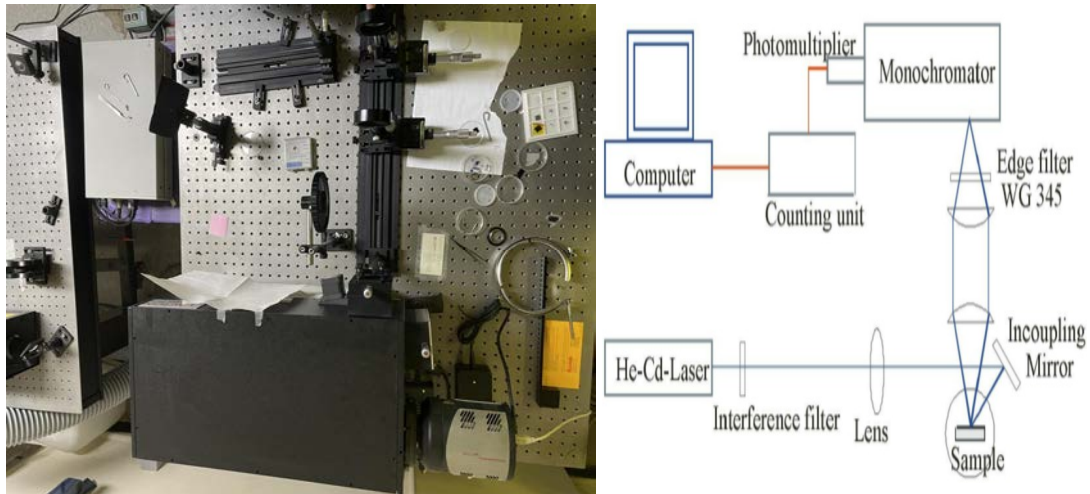


그림 12-a. sample을 holder에 올려놓아 세팅이 완료된 PL 측정 및 모식도  
 광학 특성은 PL 측정을 통해 살핀 후 분석하게 된다. 이때 PL 측정에서 사용되는 레이저는 325nm 파장의 He-Cd 레이저이다. ZnO의 에너지 밴드갭보다 큰 에너지를 주는 325nm 파장의 레이저를 excitation source로 사용하여, 물 농도에 따라 다르게 성장된 ZnO 나노로드에서 나오는 광학적 신호를 측정 비교한다.

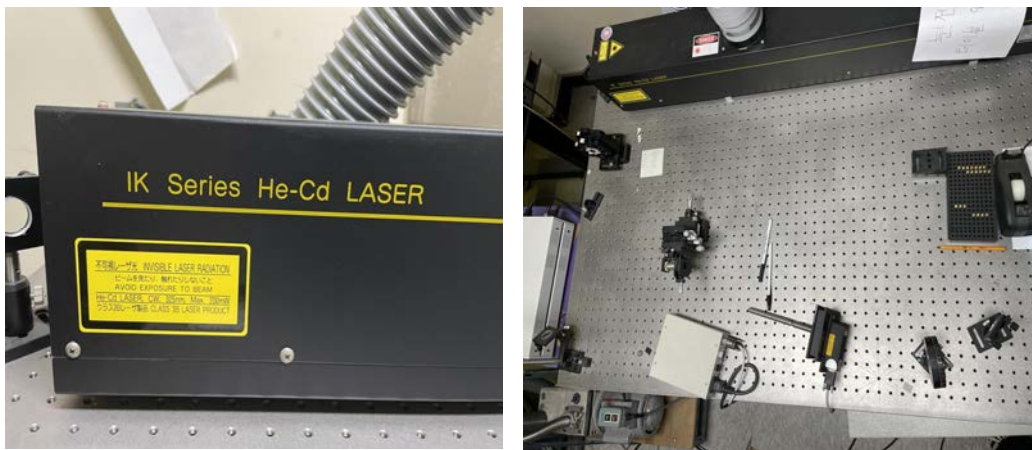


그림 12-b. 325nm He-Cd PL 레이저 및 광학 테이블 세팅

수열합성을 통한 ZnO nano-rod는 열처리 후 발광 특성이 향상되었다. 이는 물질 내 결함이 줄어들었기 때문이며, 이러한 박막질의 향상은 물 농도에도 영향을 받았다. solution의 물 농도별 특성 변화를 확인한 결과, 물 농도가 증가함에 따라 박막질이 향상되는 것을 확인했다.

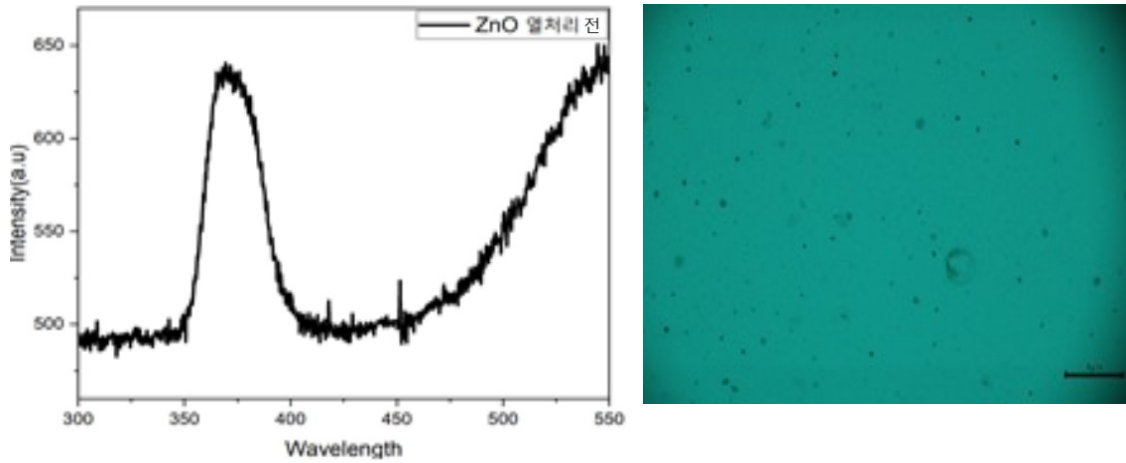


그림 13-a. 열처리 전 PL 측정 data 및 광학 현미경 측정 사진  
 [그림 13-a]에서처럼 열처리 전에 측정된 결과에서는 비교적 박막의 결함이 많고 이로 인해 PL data에서 noise가 높게 측정되었다.

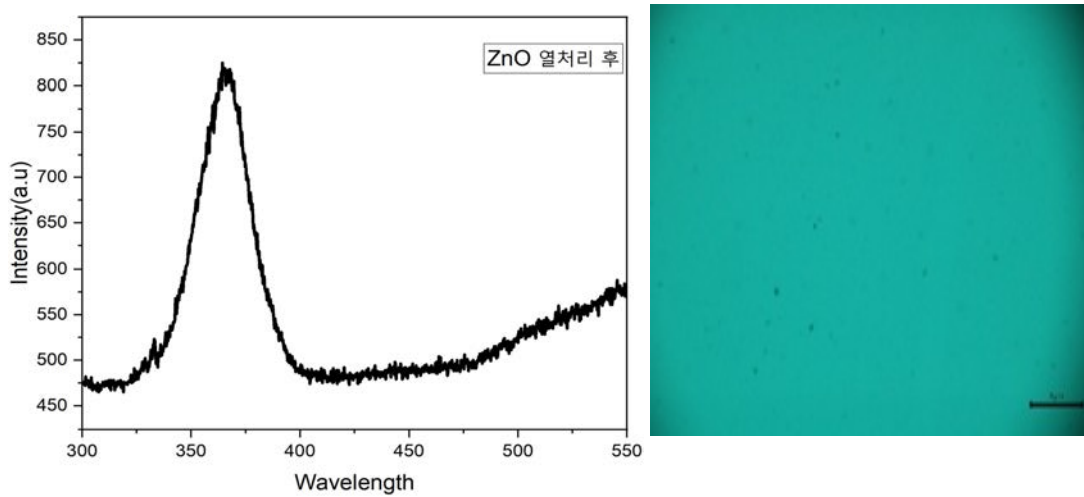


그림 13-b. 열처리 후 PL 측정 data 및 광학 현미경 측정 사진

[그림 13-b]에 보이는 것처럼 열처리 후, 열처리를 하지 않은 sample에 비해 박막의 결함이 현저히 줄어들고 이에 따라 PL data에서도 noise가 줄어든 것으로 나타난다.

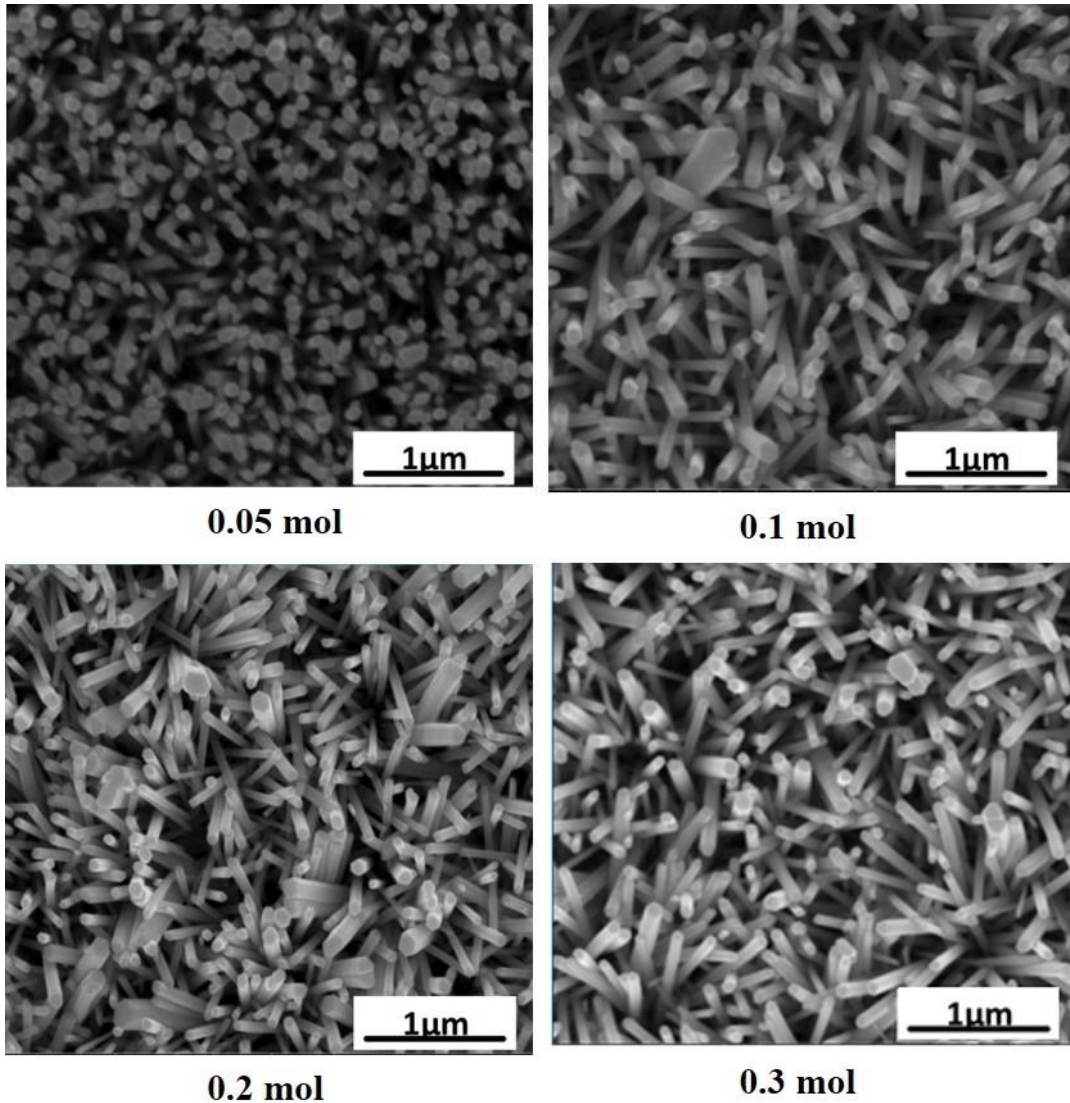


그림 14. 몰 농도에 따른 FESEM 이미지 변화. 몰 농도 증가에 따른 ZnO 나노로드의 밀도 증가와 나노로드의 모양과 길이 변화를 관측할 수 있음

이와 더불어 수열합성에 사용된 solution의 몰 농도에 variation을 주어 농도별 특성 변화 추이를 조사했다. 기본 비율에 따른 농도인 0.05M부터 0.1~0.3M까지 총 네 가지로 나누어 실험을 진행했다. 몰 농도를 변수로 하여 [그림 14.]에서는 몰 농도 변화에 따라 성장된 ZnO 나노로드의 단위면적당 밀도의 변화를 확인 할 수 있다. 합성을 진행할 때, 몰 농도가 증가됨에 따라 ZnO 나노로드의 밀도 역시 증가함을 확인할 수 있었고, 추가적으로 나노로드의 모양이 선명해지고, 나노로드의 길이도 명확하게 길어지면서 보다 균형잡힌 모양의 완벽한 나노로드가 성장됨을 [그림 14.]에서 인할 수 있었다. 이에 따라 [그림 15.]에서 볼 수 있듯이, 각 몰 농도에 따라 PL data

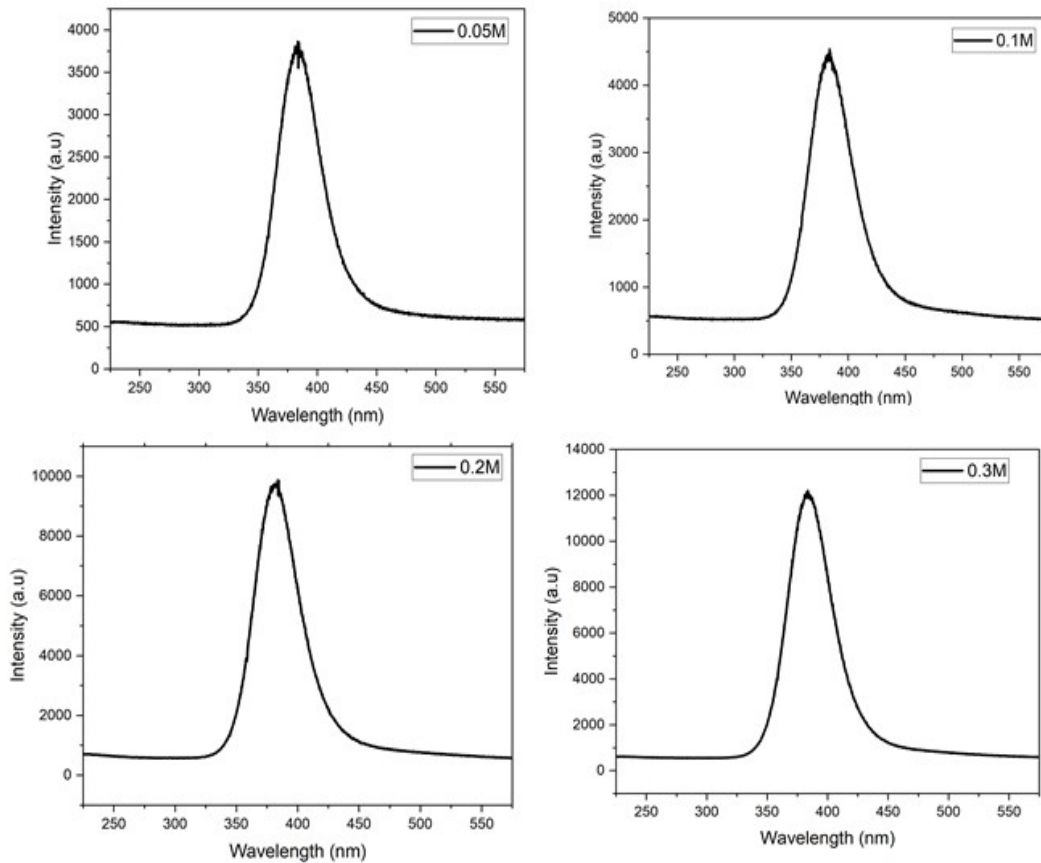


그림 15. 몰 농도에 따른 PL intensity 및 FWHM 변화

에도 명확한 차이를 보였다. PL peak 중심 파장은 380nm에서 농도에 상관없이 모두 일관적이게 측정이 되었고, 이 결과는 성장된 ZnO 나노로드의 PL peak의 파장은 밴드갭 사이에서 전자의 이동에 따른 엑시톤의 생성과 생성 후 소멸 과정에서 ZnO 밴드갭 내에 near band edge emission의 결과로 가장 안정적인 상태의 엑시톤에서 방출이 실험적으로 관측되는 것으로 알려져 있다. 일정한 PL peak의 중심 파장 영역과는 달리 각 농도별로 PL intensity는 명확하게 다르게 측정되었다. 0.05M에서는 약 380nm의 파장에서 약 4,000 카운팅의 intensity가 측정되었으며 농도가 높아짐에 따라 intensity가 점차적으로 향상되며, 0.3M에서는 약 13,000 카운팅의 intensity 값을 나타내었다. 몰 농도에 따라 ZnO 나노로드에서의 특성 변화를 보이는 것은 이 뿐만이 아니다. 표1은 이러한 결과를 정리한 지표이다. 몰 농도에 따라 intensity, 적분면적 및 FWHM(Full Width Half Maximum, 반폭치)을 결과의 변동 추이를 한 눈에 볼 수 있다. 몰 농도가 높아짐에 따라 intensity가 높아지며 FWHM이 낮아지는데, 이와 같은 양상은 해당 파장 잡음이 줄어들면서 특정되는 파장에서의 신호만이 높아진다는 것을 알 수 있다. 향후, LED와 같은 응용에 사용되기 위해서는 색의 강도 뿐만 아니라 색의 순도 역시 중요하다. 이를 위하여 FWHM 은 가능한 줄이면서, 광학

적 특성이 향상되는 ZnO 나노로드를 확보할 수 있는 방법에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다.

이번 측정에서 몰농도에 따른 성장된 ZnO 나노로드의 밀도 증가와 성장된 나노로드의 가로 세로 비율이 증가하여 나노로드의 길이 역시 증가하고, 밀도 증가에 따라 PL intensity가 증가하는 결과들을 보이기 때문에, 추가적으로 보다 높은 몰 농도에서의 ZnO 나노로드의 성장과 여기서 ZnO 나노로드의 밀도, 모양 및 광학적 신호 값의 변화를 추가적으로 측정하여, 최적 조건 (더 이상의 몰 농도의 증가가 ZnO 나노로드의 밀도 증가 및 그에 따른 광학적 신호의 향상에 영향을 미치지 않는)을 관측하기 위한 추가적인 관측이 필요할 것으로 판단된다.

몰 농도	intensity	적분 면적	FWHM
0.05M	3,863	353,844.90	47.88nm
0.1M	4,538	388,581.99	48.32nm
0.2M	9,867	666,601.82	44.37nm
0.3M	12,199	773,416.81	43.92nm

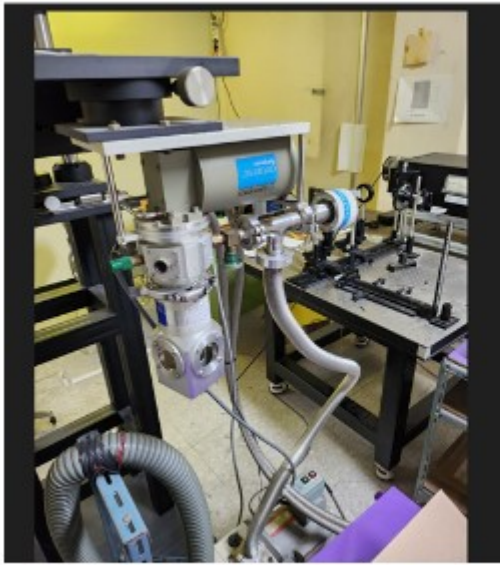
표1. 몰 농도에 따른 각 특성 변동 추이

## V. 결론

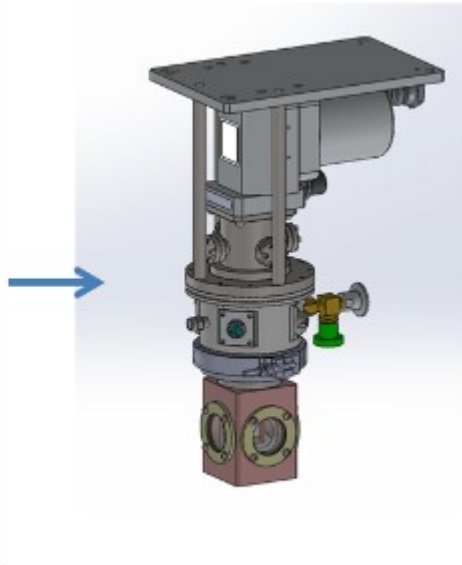
본 연구에서는 ZnO seed 박막을 증착, 이후 수열합성법을 통하여 ZnO nano-rod를 성장시켰다. 이어서 해당 nano-rods로부터 열처리 공정을 거치는 것으로 발광 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 ZnO nano-rod는 Zincacetate dihydrate와 에탄올 및 DI water를 배합하여 만든 solution을 사용하여 증착, 성장시켰다. 발광 특성은 325nm He-Cd laser를 사용한 PL(Photo-luminences) 실험을 통해 측정하여 특성의 변화를 나타낼 수 있었다. 이러한 결과를 보이는 것은 물질 내 결함이 줄어든 것과 더불어 몰 농도가 증가함에 따라 박막질이 향상되는 것 또한 원인이라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과로부터 ZnO nano-rod의 UV 방출과 같은 특성 및 품질은 열처리 온도와 몰 농도에 의존한다는 것을 확인할 수 있었다.

## VI. 제언

ZnO는 합성방법 및 성장조건에 따라 비교적 손쉽게 rod(wire), tube, belt 및 sheet 등 다양한 모양의 나노결정을 형성시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 다양한 미세결정을 한 방향으로 배향 성장 시킬 경우 박막보다 비표면적을 증가시킬 수 있으며, 신뢰성 있는 일정한 물성을 얻을 수 있고, 결정학적 방향에 따른 우수한 물성도 이용이 가능하다. 따라서 ZnO 나노로드는 다양한 분야에 응용할 수 있는 유망한 특성을 가지는 물질이다. 이처럼 ZnO 나노로드 는 UV 레이저 작용을 포함하는 전자 및 광전자 소자를 조정하는 데 사용될 수 있기 때문에 매우 흥미로우며 향후 응용 가능성이 무궁무진하다. 또한 나노로드의 전자 상태에 대한 지식은 이러한 응용 분야의 기본 물리학을 이해하는 데 중요하다. ZnO 나노로드를 성장시키는 방법은 금속유기화학기상증착법(MOCVD), 펄스레이저증착법, 무선주파수 마그네트론 스퍼터링법, 양극산화알루미늄 막 등 여러 가지가 있다. 최근 ZnO 나노로드 생산을 위한 음극 전착, 열분해 및 복합제 사용과 같은 용액 방법이 보고되고 있다. 여기서는 암모니아 수산화 ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )와 아세트산 아연( $\text{CH}_3\text{COO}$ )( $2\text{H}_2\text{O}$ )를 포함하는 수용액을 사용하는 ZnO 나노로드 증착을 위한 새로운 솔루션 방법을 보고 한다. 이 성장 방법은 간단한 장비 사용, 저온 증착( $100^\circ\text{C}$ ), 저비용, 덜 위험하고 금속 촉매를 사용할 필요가 없다는 등 다른 방법에 비해 몇 가지 장점을 보여주었다. 유사한 결정 특성으로 인해 ZnO 나노로드는 갈륨질화물(Gallium Nitride)을 이용한 반도체 소자 제조 과정에서 사용되는 기판에서 결정 기판 위에 방향성을 가진 결정막이 자라는 방향으로 성장할 것으로 예상된다. 또한 갈륨질화물(Gallium Nitride)을 이용한 반도체 소자 제조 과정에서 사용되는 기판에서 결정 기판 위에서 ZnO를 성장시키는 것은 일반 접합보다 더 높은 캐리어 주입 효율을 제공하는 것으로 알려져 있고, 나노접합을 사용하여 n type-ZnO/p type-GaN 이종 구조를 제조하는 새로운 접근 방식을 제공한다. 이 성장법을 이용하면 마이크로미터 길이의 고차 배열의 나노로드를 1시간 이내에 생산할 수 있다. 그러나 저온 성장으로 인해 획득된 ZnO 나노로드는 격자 결함과 표면 결함으로 인해 결정 품질이 낮은 문제점이 존재한다. 가열 냉각 후 처리는 비방사성 관련 결함을 감소시켜 ZnO 나노로드의 결정질 및 광학적 품질을 향상시키는 효과적인 방법이다. 본 논문에서는 갈륨질화물(Gallium Nitride)을 이용한 반도체 소자 제조 과정에서 사용되는 결정 기판에서 성장하고 다른 주변(산소 및 질소)에서 가열 냉각된 ZnO 나노로드의 광발광을 관측하여 광학적 특성 분석하고, 결과는 가열 후 냉각 환



Cryostat 전체 높이 : 384mm



Cryostat 전체 높이 : 486mm  
313 Cryo Cooler 적용



Lakeshore 325\_New model

그림 16. 온도 변화에 따른 광학적 PL 신호의 변화를 관측하기 위한 저온 cryostat 및 온도 controller

경과 광발광 측정 온도 모두가 ZnO 나노로드의 발광 거동에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주었다. 성장한 ZnO 나노로드를 질소 주변에서 가열 후 냉각함으로써 UV 방출을 크게 향상시킬 수 있고, 이러한 실험 결과로부터 UV 향상 효과와 ZnO 필름의 발광 온도 의존성이 논의되었다. 이런 선행 연구 결과들을 바탕으로 이번에 연구된 ZnO 나노로드의 광학적 발광 측정 결과에서 향후 온도 의존성에 대한 연구가 필요할 것으로 예측된다. 이번 결과에서 얻은 물 농도 변화에 따른 광학적 특성의 변화와 더불어 온도 변화에 따른 발광 신호의 변화를 관측하여 향후 ZnO 나노로드를 사용하여 LED 제작과 같은 응용 분야에 활용할 기틀을 마련할 수 있을 것으로 기대된다. ZnO 나노로드의 물농도에 따른 광학적 특성의 변화와 온도에 따른 변화를 바탕으로 향후

실제 성장된 나노로드를 사용하여 [그림 17.]에서와 같이 공정 과정을 거쳐서 LED를 제작하여 실제 electroluminescence 측정을 통하여 나오는 광학적 신호의 효율성을 확인하여 보는 연구를 진행할 예정이다.

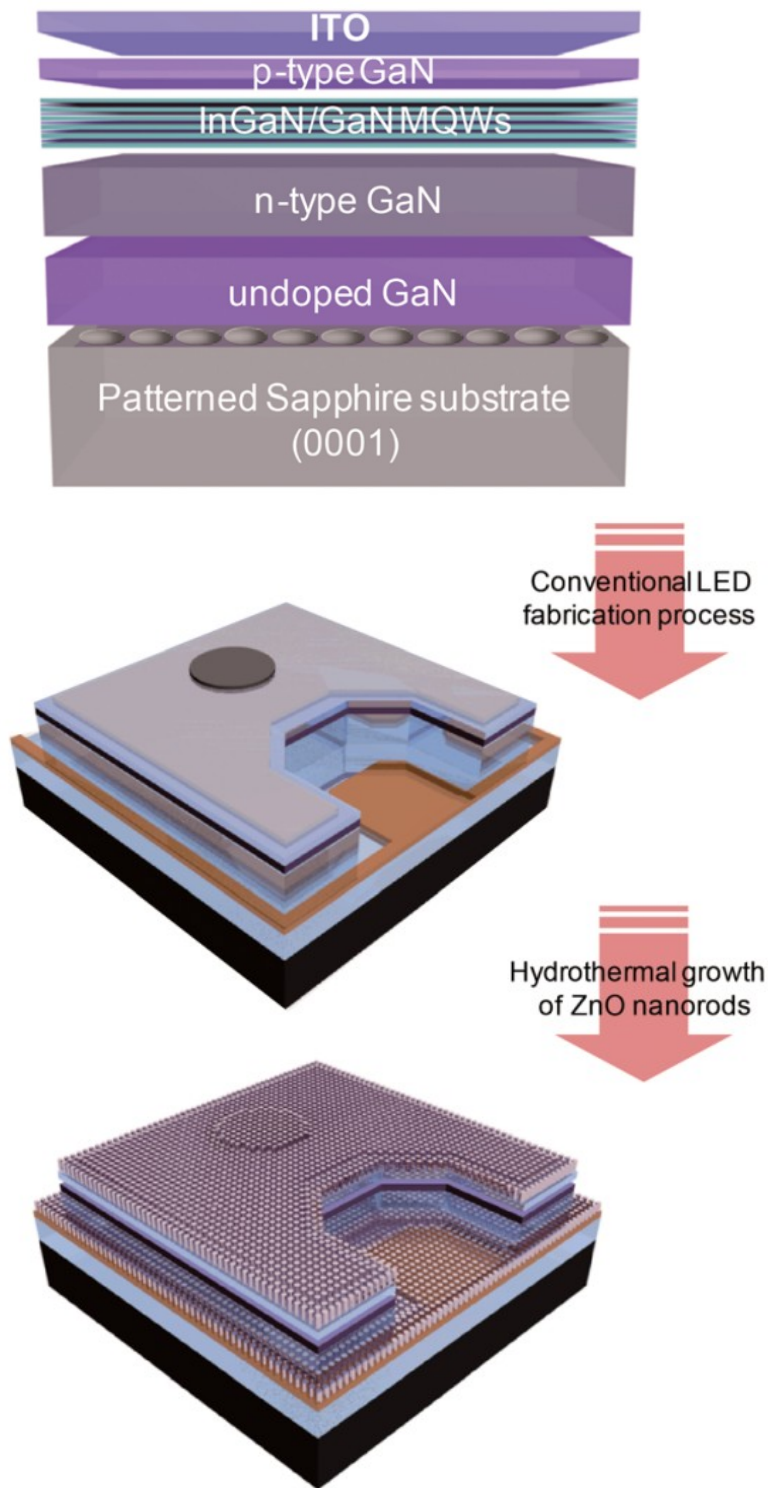


그림 17. ZnO 나노로드를 활용한 LED 구조 fabrication 과정

## VI. 참고 문헌

- [1] Kazuki Bando, Taiki Sawabe, and Koji Asaka, Room-Temperature Excitonic Lasing from ZnO Single Nanobelts, *Journal of Luminescence*, 2004, 108, 1, 385
- [2] ZHAI Xiao-Hui, LONG Hui-Jin, DONG Jiang-Zhou, and CAO Ya-An, Doping Mechanism of N-TiO<sub>2</sub>/ZnO Composite Nanotube Arrays and Their Photocatalytic Activity, *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2010, 26, 3, 663
- [3] Aleksandra B. Djuriscic, and Yu Hang Leung, Optical Properties of ZnO Nanostructures, *Small*, 2006, 2, 8, 927
- [4] F. Fang, A. M. C. Ng, X. Y. Chen, A. B. Djuriscic, and W. K. Chan, Ce-doped ZnO nanorods by electrodeposition, *Conference paper of 2010 INEC*, 2010
- [5] Aleksandra B. Djuriscic, Xinyi Chen, Yu Hang Leung, and Alan Man Ching Ng, ZnO nanostructures: growth, properties and applications, *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22, 6526
- [6] Aleksandra B. Djuriscic, Alan Man Ching Ng, and Xinyi Chen, ZnO nanostructures for optoelectronics: material properties and device applications, *Progress in Quantum Electronics*, 2010, 34, 4, 191
- [7] 삼성전자 뉴스룸, 2013, [반도체 용어 사전] 부도체  
<https://news.samsungsemiconductor.com/kr/%EB%B0%98%EB%8F%84%EC%B2%B4-%EC%9A%A9%EC%96%B4-%EC%82%AC%EC%A0%84-%EB%B6%80%EB%8F%84%EC%B2%B4/>
- [8] 삼성전자 뉴스룸, 2019, 알아두면 쓸모있는 양자역학 이야기- 에너지의 불연속과 양자 도약
- [9] 대한민국특허청(KR), 2013, 양자점을 이용한 가변 파장을 가지는 식물 생장용 발광 장치  
<https://patentimages.storage.googleapis.com/ac/50/96/3b7a4605d8fbd0/KR101730965><https://news.samsungdisplay.com/18963>
- [10] Sk hynix 뉴스룸, 2023, 전자의 파동성과 입자성을 검증하기 위한 이중 슬릿 실험  
<https://news.skhyunix.co.kr/post/thirds-eyes-kimbeomjun-2>
- [11] 김경범, 김창일, 정영훈, 이영진, 백종후, 2010, 『수열합성에 의한 c축 배향 ZnO 나노로드 배열의 성장과 구조, 광학적 특성』
- [12] 문대화, 하준석, 2013, 『저온수열합성방법에 의해 성장한 ZnO 나노로드의 전구체 물농도 변화에 따른 특성 연구』, 전남대학교, 응용화학공학부
- [13] Jörg Schörmann, Cubic AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> structures for device application, Paderborn Univ. Thesis/Dissertation, 2008



물리A

05\_자전거 구동에 의한 비접촉형 발전기 제작과  
활용



# 자전거의 구동에 의한 비접촉형 발전기 제작과 활용

권하람(대야초등학교)  
김한결(냉천초등학교)  
양선우(호암초등학교)  
장익찬(가고파초등학교)

지도교수 : 김성화(경남대학교 MSC교육부)

본 연구는 자전거 구동시 비퀴의 회전에 접촉형 발전기의 문제점을 파악하였다. 문제점을 해결을 위하여 비접촉형 발전기를 구상하고 활용방안을 알아보았다. 기존의 자전거의 구조에 변형 없이 탈부착이 가능한 형태의 발전기를 제작하였는데 전자기유도현상의 자기속변화를 높이기 위하여 코일에 철볼트를 활용한 코어를 삽입하여 출력전압의 증가를 확인하였다. 정류형다이오드, 축전기 정전압레귤레이터를 활용하여 휴대폰 충전이 요구하는 5V의 전압을 유지할 수 있었고 휴대폰 충전은 물론 보조배터리의 충전 가능성이 있음을 알게 되었다. 탈부착이 가능한 점을 고려하여 다양하게 활용 될 수 있을 것으로 보인다.

## I. 서론

### 1. 연구동기

이동 및 수송의 목적을 둔 자전거는 회전하는 바퀴에 많은 에너지를 지니고 있다. 이동을 목적을 달성한 후 정지를 하면 그 순간 에너지가 소멸된다. 이동 중 바퀴의 회전이 가지고 있는 에너지를 활용하는 방법은 많은 연구가 되고 있고 실제 다양한 제품들이 생산 및 판매되고 있다. 그 중 전자기유도현상(페러데이 법칙)을 이용한 발전기도 있다.

이에 본 연구는 전자기유도현상의 기본 원리를 활용하여 발전기를 직접 제작하면서 기존 연구(2022 사사과정)의 문제점을 보완하여 휴대폰이나 보조배터리를 충전이 가능함을 확인하였다.

그림 1은 2022년도 사사과정에서 제작된 발전기로 바퀴에 직접 접촉하여 회전하도록 한 것이다. 접촉에 의한 회전의 여러 문제점을 파악하여 비접촉식으로 발전기를 제작 연구하였다.



그림 1. 접촉에 의해 회전하는 발전기

## II. 이론적 배경

### 1. 전자기 유도<sup>1)</sup>

전자기유도 현상으로 발생하는 유도전압의 크기는  $\Delta V = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$  로 즉, 코일의 감은 횟수와 시간에 대한 자기선속(자기력선수)에 비례한다. 자기선속의 변화량은 코일 내부를 통과하는 것으로 자석 또는 코일의 이동이나 회전으로 발생시킬 수 있다. 그림 2는 자석의 움직임으로 발생하는 전자기유도현상을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 그림 3과 같이 코일은 고정시키고 자석의 움직임으로 자기선속의 변화량을 발생 시키도록 하였다. 이는 코일의 움직임으로 발생할 수 있는 전선의 꼬임을 방지하기 위한 것이다.

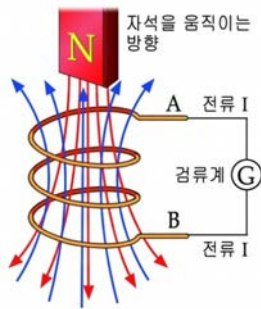


그림 2. 자석의 운동과 유도전류발생

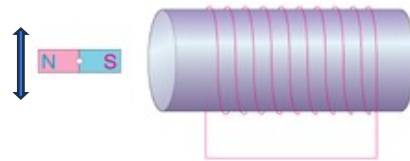


그림 3. 고정된 코일에 대한 자석의 이동

## III. 연구방법 및 과정

### 1. 기존 연구에 대한 문제점 분석

#### 1) 접촉식 발전기의 문제점

기존 사사연구에서 제작된 접촉식발전기의 문제점을 분석하여 다른 과 같은 문제점을 발견하였다.

첫째, 소음이 많이 발생하였다. 부득이 하게 바퀴와의 접촉을 하면서 바퀴의 회전으로 회전하는 방식이라 소음은 불가피하였다. 더구나 바퀴의 표면이 거칠수록 소음이 더운 크게 생긴다.

둘째, 소음과 진동으로 발전기와 자전거의 결합 상태가 느슨해지는 상화이 자주 발생하여 자주 수리를 해야한다.

셋째, 접촉으로 회전을 하다보니 마찰에 의한 열이 과도하게 발생하는 것이다. 이는 열의 발생으로 균열이나 형태의 변형을 줄 수 있는 소지가 있다.

이외에 비포장 도로에서 운행할 때 파손의 위험도 고려 될 수 있다.

위와 같은 문제점을 보완하기 위하여 접촉 보다는 비접촉식의 발전 방법이 어느정도 보완을 할 수 있을 것으로 판단하여 비접촉식 발전기로 제작하기로 하였다.

## 2. 자석 고정장치 제작

### 1) 바퀴살에 자석 부착

자전거 운행 과정에서 기본적으로 뒷바퀴가 회전한다. 바퀴에 자석을 부착하고 고정된 코일을 지나치면서 전자기유도현상을 발생하도록 하였다. 그림 4와 같이 아크릴판과 3D프린터 출력물을 활용하여 바퀴살에 자석을 고정하는 것이다. 한 세트에 네오디뮴 자석(직경 30mm, 두께 3mm) 6개를 결합하여 대칭적으로 총 4개를 부착하였다. 3D프린터를 활용하여 바퀴살에 잘 고정할 수 있도록 하였다.



그림 4.. 바퀴살에 자석 고정장치 부착

### 2) 수정변경

자석 고정장치가 바퀴 회전시 자전거의 프레임과의 충돌이 발생하였다. 이에 고정장치의 두께를 줄여야해서 1세트에 5개의 자석을 사용하였고 총 2세트로 변경하였다. 또한 바퀴 회전 시 원심력에 의하여 자석고정장치가 빠지는 것을 방지 하기 위하여 케이블타이로 고정하였다.

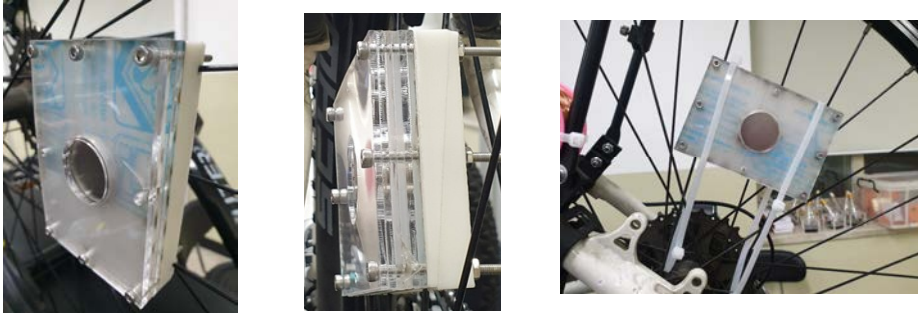


그림 5. 자석 고정장치 및 케이블타이 연결

## 2. 코일의 제작

### 1) 미싱보빈 사용

재질이 철인 미싱용 보빈을 활용하여 코일을 제작하였다. 그림 6은 미싱용 보빈과 드릴을 이용하여 보빈에 코일을 감는 모습이다.



그림 6. 미싱용 쇠(철)보빈 및 보빈에 코일을 감는 모습

### 2) 3D프린터로 보빈 제작

앞서 미싱용보빈으로 제작한 코일은 내부 직경이 작아 코일 내부로 통과하는 자기선속의 양이 상당히 적으므로 유도전압이 약할 것으로 판단되었다. 이에 적당한 기성 보빈을 찾기 보다는 3D프린터를 이용하여 적당한 보빈을 만들기로 하였다. 그림 7은 보빈의 직접 제작을 위하여 AUTOCAD를 활용하여 설계한 것이다.

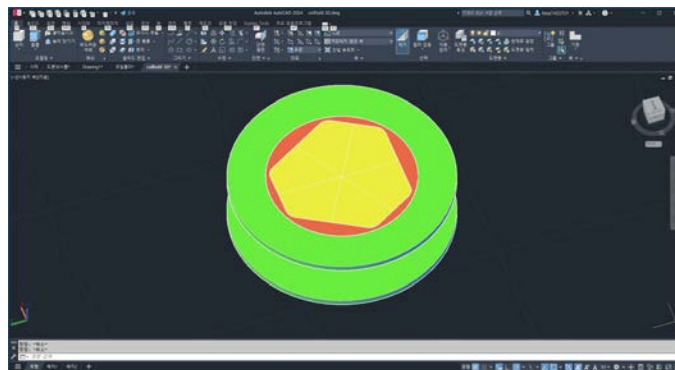


그림 7. 미싱용 쇠(철)보빈 및 보빈에 코일을 감는 모습

그림 8은 제작된 보빈에 코일을 감고 자전거에 고정한 모습이다. 권선 카운터기를 활용하여 직경 0.2mm의 에나멜선을 총 2000번을 감았다.



그림 8. 제작된 보빈과 에너지 코일 권선수 2000회 및 자전거에 고정

### 3) 보빈 내부 코어 삽입

자석이 코일 내부를 직접 통과한다면 코일 내부의 자기전속의 변화량은 상당히 많아지며 높은 유도전압을 기대할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 코일 내부를 통과하는 것이 아니라 옆으로 지나치는 구조이다. 이때 자석의 자기전속이 코일에 영향을 줄 수 있지만 그 변화량은 미미하게 나타난다. 따라서 발생하는 유도전압도 기대에 못 미치게 된다. 이에 코일의 중심에 철로 이루어진 코어를 제작하여 코일 내부를 통과하는 자기전속을 증폭을 시키고자 하였다. 그림 9는 철로 된 볼트를 활용하여 코어를 제작한 것이다. 그림 10과 같이 자전거에 고정된 코일에 코어를 삽입한 모습이다.



그림 9. 철볼트를 활용한 코어 제작



그림 10. 철로 된 코어를 삽입한 코일

### III. 실험 결과

#### 1. 유도전압 발생

##### 1) 코어 유무에 따른 유도전압

직경 0.2mm의 에나멜선을 2000번 감은코일의 유도전압을 측정하였다. 바퀴의 회전속도는 비슷하게 하였다. 그림은 그림 11과 그림 12는 코어가 없을 때와 있을 때의 유도전압을 나타낸 것이다. 코어가 없을 때 최대전압이 3.36V 였고, 코어가 있을 때 최대전압이 7.62V 였다. 코어의 유무가 2배의 유도전압의 차이를 나타내었고 코어가 자기선속을 증폭한다는 것을 확인할 수 있었다. 이후 실험은 코어를 삽입된 상황에서 진행하였다.

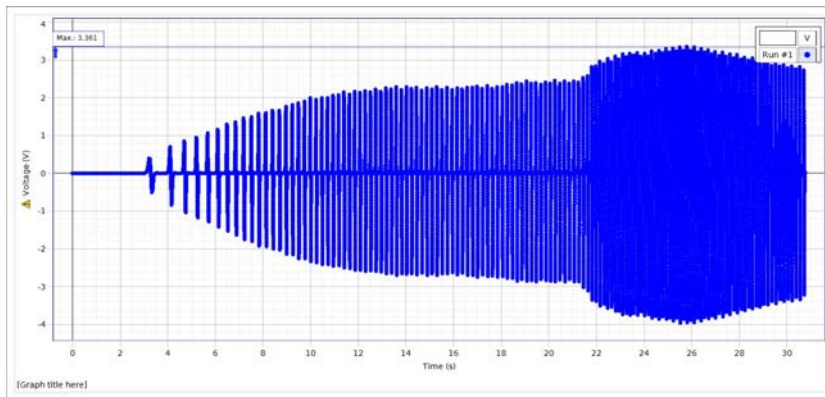


그림 11. 코어가 없을 때의 유도전압(최대전압:3.36V)

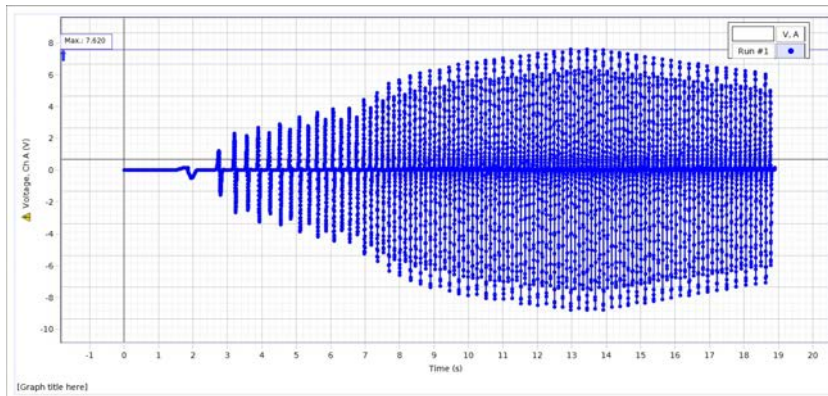


그림 12. 코어가 있을 때의 유도전압(최대전압:7.62V)

##### 2) 발전기 및 정류소자들의 연결에 따른 출력 전압측정

앞서 코어가 삽입된 경우 유도전압이 높게 나타남을 확인하였다. 7~8V 이상의 전압이 발생됨으로서 휴대폰이나 보조배터리의 충전이 가능성이 있음을 전제하여 직류 전원을 만들기 위한 정류 소자들을 조합하여 출력 전압을 측정하였다.

##### (1) 발전기에 의한 출력 전압

자전거 구동에 의한 발전만으로서의 출력전압을 측정하였다. 그림 13과 같이 발광 LED가 반

짜이는 것을 확인하였는데 발광다이오드는 한쪽 방향으로만의 전류에 의해 발광함으로 반짜이는 것이다. 그림 14는 출력전압을 측정한 것으로 전류의 방향이 바뀌는 교류전원임을 확인 할 수 있다.

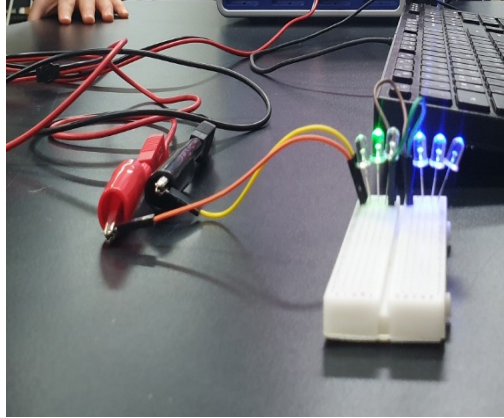


그림 13. 발전기에 의한 LED발광

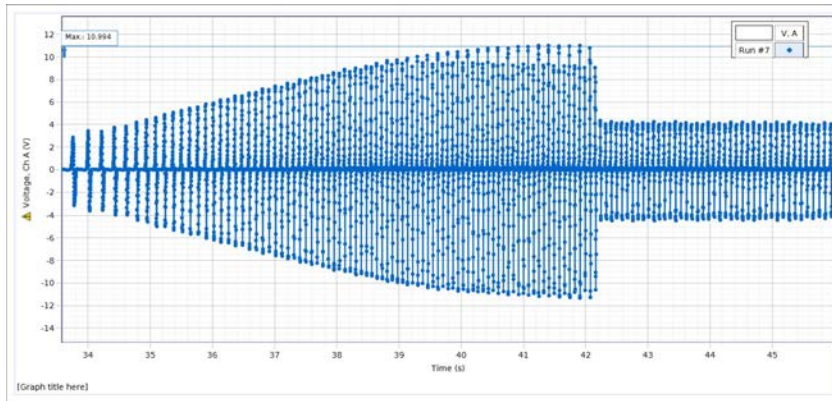


그림 14. 발전기의 생산된 전압

## (2) 발전기와 정류다이오드

자전거 구동으로 생산된 교류형태의 전압을 정류다이오드를 거치도록 하여 출력된 전압을 측정하였다. 그림 15는 발전기와 정류다이오드를 연결 모습을 나타낸 것이다. 그림 16은 정류다이오드를 거친 출력전압을 나타낸 것이다.

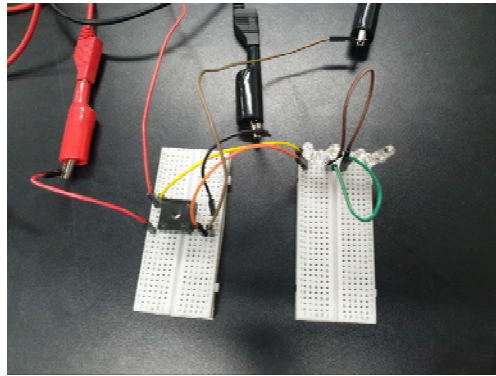
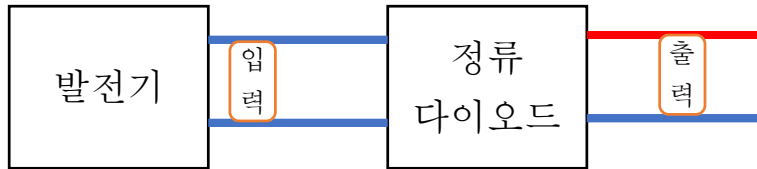


그림 15 정류다이오드를 연결 모습

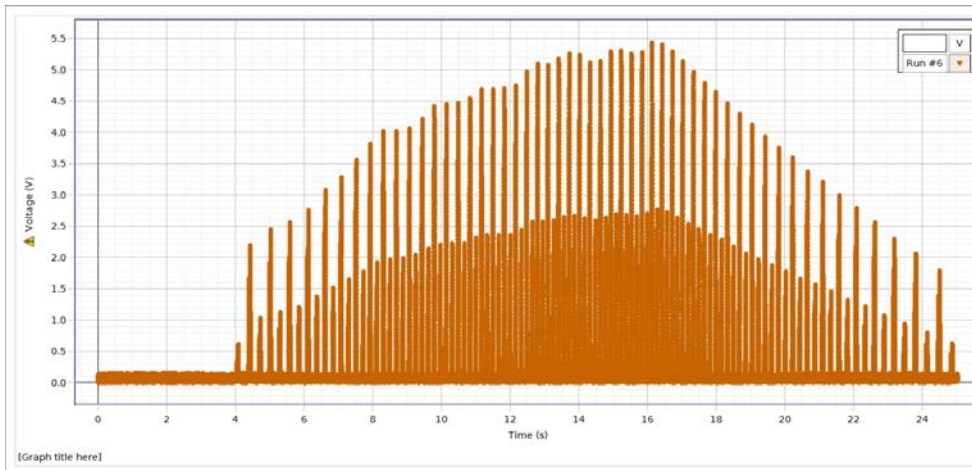


그림 16. 정류다이오드를 거친 출력전압

### (3) 발전기와 정류다이오드 그리고 축전기

발전기에 의하여 생산된 전압을 정류다이오드에 축전기가 연결된 상태에서의 출력전압을 측정하여왔다. 그림 17는 정류다이오드에 축전기가 연결 모습을 나타낸 것이며, 그림 18은 그에 따른 출력전압이다. 전압이 0으로 떨어지지않고 일정 전압을 유지하고 있다.

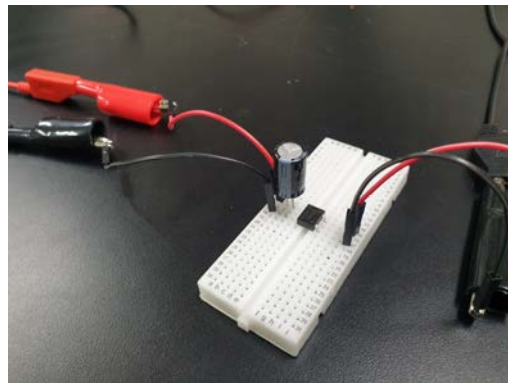


그림 17 정류다이오드와 축전기의 연결 모습

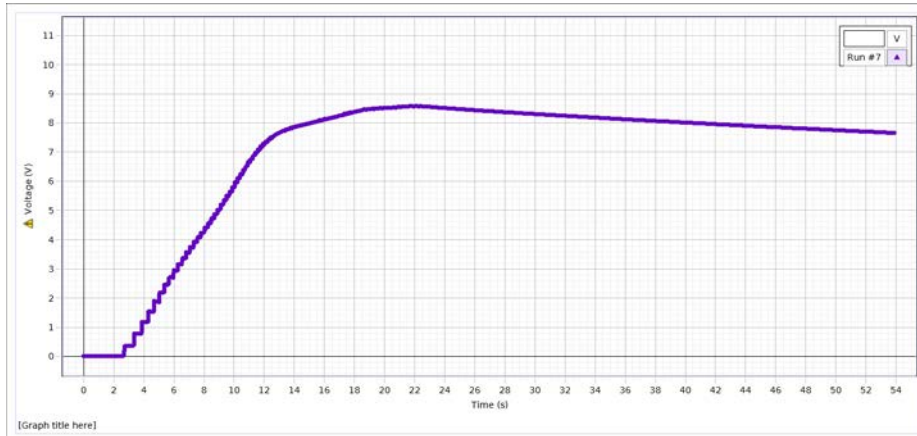


그림 18. 정류다이오드에 축전기를 연결했을 때의 출력전압

(4) 발전기와 정류다이오드, 축전기 그리고 정전압레귤레이터

정류다이오드에 축전기를 통과한 전압이 정전압레귤레이터(5V)를 거쳐 출력된 전압을 측정한 것이다. 그림 19는 정류다이오드, 축전기 그리고 정전압레귤레이터를 연결한 모습이다. 그림 20은 최종 출력전압을 나타낸 거승로 레귤레이터의 설정 전압이 5V로 최대전압이 5V로 나타남을 볼 수 있다.

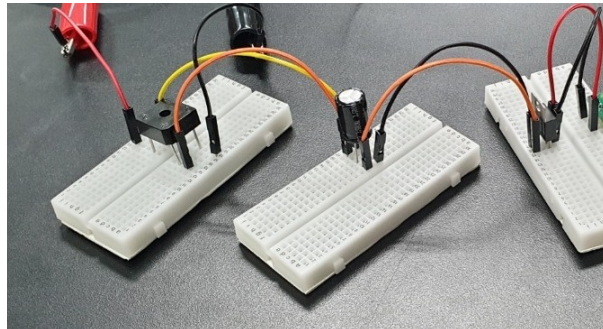
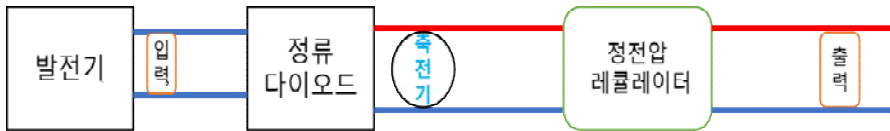


그림 19 정류다이오드와 축전기 그리고 정전압레귤레이터의 연결

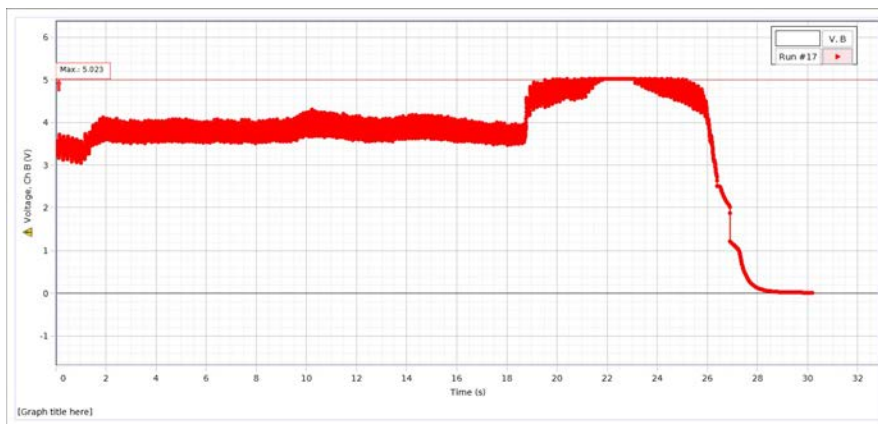


그림 20. 정류다이오드, 축전기, 정전압레귤레이터의 연결에 의한 출력 전압

## 2. 출력전압의 활용

### 1) 발광다이오드(LED)

발전기만으로 생산된 전기에너지(전압)로 충분히 LED를 밝힐 수 있었다. 앞선 그림 13을 통하여 확인하였다.

### 2) 휴대폰 충전여부 확인

휴대폰의 입력전압은 5V이다. 7~8V 이상으로 생산되는 발전기의 전압을 정류다이오드, 축전기, 정전압레귤레이터를 거쳐 출력전압이 5V로 유지됨을 확인하였다. 그림 21과 같이 USB충전 충전케이블을 이용하여 휴대폰 충전 가능 여부를 확인하였는데 그림 22이 나타났듯이 충전이 시작됨을 확인 할 수 있었다.

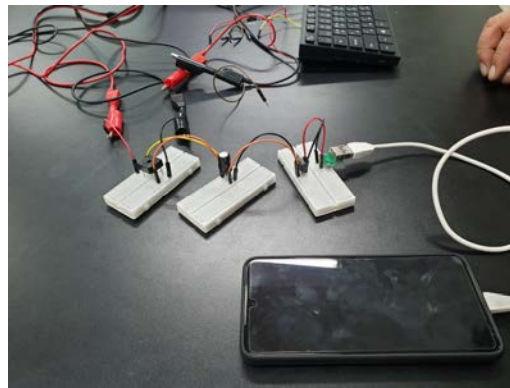


그림 21 휴대폰과의 연결

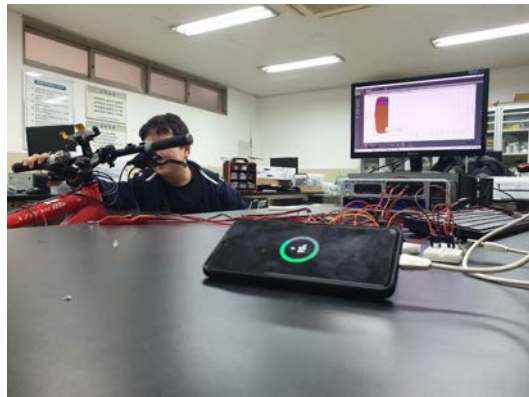


그림 22. 휴대폰 충전 가능 확인

## IV. 결론 및 제언

본 연구는 기존 연구로 진행된 접촉에 의해 작동하는 발전기의 문제점을 파악하여 비접촉형의 발전기를 제작하고 제작된 발전기의 출력전압을 분석하여 활용성 에 대하여 알아보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

### 1. 결론

비접촉형의 발전기로 전기 생산이 가능하고, 발전기로 생산하는 전기의 양을 자전거 구동 속도로 조절할 수 있었다.

생산된 전기에너지를 정류장치와 정전압소자를 통하여 휴대폰과 보조배터리를 충전할 수 있음을 확인하였다.

특히, 자전거 구조를 변화시키지 않고 복잡한 재료나 과정이 없이 간단한 연결로 일명 “발전기 키트”를 제작이 충분한 가능성을 볼 수 있음에 의의가 있다고 할 수 있다.

### 2. 발전방안

휴대폰 충전이 가능하고, 5V의 정전압 유지가 가능하기 때문에 자전거 운행 중에도 휴대폰은 물론 보조배터리 충전도 가능하다. 단지 전압은 5V 유지는 충분하나 전류량이 미미해서 충전에 많은 시간이 소요 될 것으로 예상된다. 이러한 점을 고려할 때 전류량을 높여 줘야 하는데, 코일의 권선수가 증가하면 전압을 높일 수 있지만, 반대로 저항은 증가하게 된다. 이에 적절한 굵기의 에나멜선과 권선수의 조합이 요구됨으로 지속적인 연구가 필요하다.

## V. 참고문헌

- 1) John W. Jewett, Jr., Raymond A Serway, “대학물리학”, (주)도서출판 북스힐, 2020.
- 2) 공준형 외 6, “반사·굴절 광학계를 이용한 빛 에너지 수렴장치의 제작과 활용”, 창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*), Vol. 14 (2016), 경남대학교 과학영재교육원.
- 3) 배성문 외 6, “자전거의 동력을 전력으로 전환 시키는 장치의 제작과 활용”, 창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*), Vol. 20(2022), 경남대학교 과학영재교육원
- 4) 전통화석에너지고갈은 언제?,  
2015.09.13. ; <http://tv.naver.com/v/527170/list/48917>
- 5) 전동기와 발전기의 작동 원리,  
2016.02.29 ; <http://tv.naver.com/v/767208>
- 6) 로켓보이, 신재생에너지, 풍력발전기로부터 전기를 얻어내다(풍력발전의 원리와 장,단점),  
2015. 6 , <https://blog.naver.com/sbbattery/220385576820>



물리A

06\_테라헤르츠파 비파괴 이미징 기법을 이용한  
광합성 정도에 따른 하와이 무궁화 변화 관찰



# 테라헤르츠파 비파괴 이미징 기법을 이용한 광합성 정도에 따른 하와이 무궁화 변화 관찰

강해솔 (서강중학교 2학년)  
김강민 (금호중앙중학교 2학년)  
나준성 (고려중학교 2학년)  
박지겸(광덕중학교 2학년)  
안효서 (동아여자중학교 2학년)

지도교수 : 이중욱 (전남대학교 물리학과)

## 초록(300-500자)

본 연구에서 우리는 테라헤르츠파를 활용해 하와이무궁화를 비파괴 방식으로 관찰했고, 하와이무궁화의 광합성 정도에 따른 변화들에 대해 관찰했다.

본 연구에서는 하와이무궁화를 테라헤르츠파 이미징 시스템의 샘플 마운트에 손상이 가지 않은 상태로 고정해서 관찰했으며, 광합성을 하지 못한 상태의 하와이무궁화를 관찰하는 것을 시작으로 그 이후부터는 광합성을 할 수 있는 환경을 만들어 3시간마다 테라헤르츠파 이미징시스템과 카메라를 이용해 관찰했다.

실험 결과, 광합성을 하면서 점점 하와이무궁화의 수분함량이 감소함을 알 수 있었다. 또한, 광합성 시간에 따른 하와이무궁화의 색을 RGB 분석한 결과, 시간이 지남에 따라 모든 색상의 수치가 감소함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 기존의 연속적인 실험이 불가능한 파괴적 실험 방법의 한계를 극복하고, 테라헤르츠파를 통해 식물의 상태를 확인하거나, 비파괴적으로 실험하는 등 스마트팜 분야에서의 높은 활용 가능성을 제시했다는 점에서 의의가 있다고 할 수 있다.

## I. 서론 (또는 연구의 필요성 및 목적)

우리는 사사교육을 받으면서 선행된 실험과 테라헤르츠파에 관하여 공부했다. 선행된 실험들에 대해서도 공부하며 현재 식물학계에서 이뤄지는 실험들은 대부분 식물의 잎을 잘라내어 관찰하는 파괴적 방식으로 실험을 하고 있다는 것을 알게 되었다. 그 후에 이 탐구를 하며 식물의 잎을 잘라내지 않는 비파괴 형식으로 식물의 잎을 관찰한 실험에 대해서도 공부하게 되었다. 우리는 비파괴 검사에 대해 공부하며 ‘비파괴 검사로 살아있는 꽃(하와이 무궁화)을 관찰해보면 더 좋지 않을까?’ 라는 궁금증이 생겼고, 탐구해 보기로 했다. 광합성 정도에 따라 하와이 무궁화의 상태 변화를 비파괴로 관찰하여 유의미한 정보를 알게 된다면 스마트팜 분야에서 좀 더 효율적인 생산에 기여할 수 있으리라 기대한다.

## II. 이론적 배경

테라헤르츠파는 적외선과 마이크로파 사이에 영역대에 위치하는 전자기파로 투과성은 높지만, X-Ray 보다 에너지가 작아 샘플의 손상을 최소화 하면서 관찰하는데 용이하다. 또한 플라스틱이나 부도체 등의 물질은 통과할 수 있지만, 물에 대부분 흡수된다. 그러므로 물을 가지고 있는 샘플을 관찰한다면 샘플의 손상은 최소화하며 수분의 양, 수분의 변화량을 관찰하는데 매우 적합하다. 방출된 레이저의 세기와 샘플을 지나 안테나에 도달한 레이저의 세기의 차를 구하면 샘플에서 흡수된 레이저의 세기를 알 수 있고, 이는 샘플이 가지고 있는 수분량에 비례한다. 이 측정을 샘플에 레이저가 도달하는 위치를 이차원으로 이동하면서 반복하고 이를 이미지화 하면 구하고자 하는 수분량을 물질을 파괴하지 않고 시각적으로 구현할 수 있다.

## III. 연구 방법

● 연구재료 : 하와이 무궁화 - 하와이 무궁화는 밤낮에 따라 색이 달라지는 특성이 있다.

● 실험가설 : 밤과 낮의 가장 큰 차이는 빛의 세기이다. 낮에는 태양으로부터 오는 빛을 위주로 광합성을 하고 밤에는 광합성을 멈추고 호흡을 하게 된다. 그리고, 광합성은 물을 소비하는 화학반응이므로 꽃의 수분함량이 줄어들 것으로 가정한다. 또한, 하와이 무궁화는 밤낮으로 색이 변하므로 색변화와 수분함량이 연관될 가능성에 대해서도 생각해보았고, 그래서 광합성 정도와 꽃의 수분함량, 꽃의 색 사이에 상관관계가 있을 것이라고 가설을 세웠다.

● 측정도구 :

테라헤르츠파 이미징 시스템 - 고정된 레이저에서 XY축으로 이동가능한 스테이지에 꽃잎을 고정하고 이동시키며 샘플의 각 위치별로 투과한 테라헤르츠파의 세기를 측정한다.

식물용 LED조명- 빛으로 광합성을 하게 한다.

카메라 - 테라헤르츠파 이미징 촬영을 하는 동시에 광합성을 함에 따라 겉보기 변화가 있는지 촬영한다.

● 실험 방법

1. 빛을 차단하고 충분히 수분을 공급한 하와이 무궁화를 준비한다.
2. 하와이 무궁화를 테라헤르츠파 이미징 시스템의 샘플 마운트에 손상이 가지 않은 상태로 고정한다.
3. 식물용 LED조명을 하와이 무궁화 주변에 설치하여 광합성을 할 수 있는 환경을 만들어 준다.
4. 일반적인 이미지를 촬영할 수 있는 카메라를 하와이 무궁화를 촬영할 수 있게 설치한다.
4. 테라헤르츠파 이미지 시스템으로 하와이 무궁화를 촬영한다.
5. 카메라로 하와이 무궁화를 관찰한다.
6. 위과정을 3시간 단위로 반복한다.

#### IV. 연구 결과

하와이무궁화 꽃잎의 중앙 부분을 중심으로 가로세로 5mm 크기를 각각 80등분하여 위치별로 테라헤르츠파를 투과해 테라헤르츠파의 세기를 측정했다. 그 결과 첫 번째로는 파장에 관계없이 시간이 지날수록 수분이 감소함을 알 수 있었고, 두 번째로는 꽃잎의 안쪽은 최대 500nA, 꽃잎의 중앙은 최대 800nA, 꽃잎의 바깥쪽은 최대 2500nA가 측정되었다는 것을 통해 꽃잎의 안쪽에서, 중앙, 바깥쪽으로 갈수록 수분의 함량이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그리고, 테라헤르츠파의 세기를 그래프로 나타내어 분석해보니 시간이 지남에 따라 꽃잎 중앙부분과 끝부분의 수분함량의 변화가 큰 것을 볼 수 있었다. 또한, 하와이무궁화의 광합성 전후 사진을 rgb 분석하였는데, 그 결과 빨강(r), 초록(g), 파랑(b) 수치가 모두 감소하여 색이 진해진 것을 볼 수 있었다. 더하여, 하와이무궁화의 겉보기와 관련해 광합성 후 꽃잎 표면을 보면, 꽃잎 표면에 주름이 생긴 것을 볼 수 있었다. 이는 꽃잎의 수분함량이 줄어 꽃잎이 수축했기 때문이다.

#### V. 결론 및 제언

##### 1. 탐구결과가 주는 의미와 활용방안

지금까지 식물에 관한 실험은 보통 잎이나 꽃과 같은 각 부분을 분리해 촬영하거나 화학적으로 분석했다. 이러한 파괴검사는 변화를 측정할 때 하나의 샘플로 연속적인 실험이 불가능하다. 하지만 테라헤르츠파 레이저를 이용한 비파괴 검사는 식물에 손상을 주지 않으면서 연속적으로 관찰이 가능하다. 또한, 이 연구가 변인을 조작하며 비파괴검사로 식물의 상태가 어떻게 변화하는지 그 관계를 활발하게 연구할 수 있는 가능성을 보여줬다. 그 점을 통해 이 검사가 식물에게 적절한 환경변화를 주며 생산성을 강화할 수 있는 방법을 연구하기 위한 좋은 소재가 되길 기대한다. (ex 스마트팜, 식물의 광합성 총 시간 및 시간 간격조절, 수분 공급량 조절 등.)

##### 2. 탐구한계

이번 실험에서는 광합성에 따른 꽃의 상태변화를 크게 수분과 색, 두가지 측면에서 관찰했다. 그리고 우리는 광합성에 따른 수분변화와 꽃의 색변화가 동시에 일어나는 것을 알 수 있었다. 다만, 수분변화와 색변화가 유의미하게 관련있는지는 의문이다. 이를 확인하기 위해서는 동일한 실험을 여러번 하고, 광합성에 따라 변화한 꽃을 화학적으로 정량분석하여 비파괴 검사와 파괴검사를 비교해볼 필요가 있다고 생각한다.

##### 3. 탐구결과를 바탕으로 더 해보고 싶은 연구

우리가 이번에 실험했던 하와이 무궁화 말고도 다른 식물을 이용해서도 같은 실험을 해보고 싶다.

또한 광합성 뿐만 아니라 습도, 물을 주는 정도 등도 조작변인으로 설정하여 식물에게 영향을 주는 여러 환경적 요인들을 변경하며 실험을 진행해보고 싶다.

## VI. 참고문헌

김무건 외 11명. 2021년. 테라헤르츠 이미징 기술 및 그 응용 분야. 한국전자통신연구원 97p-105p.

이의수 외 8명. (2018년). 산업용 테라헤르츠 비파괴 검사 기술, 한국전자통신연구원, 59p-69p

백문철 (M.C. Paek)외 4명. (2009년). 밀리미터파와 테라헤르츠-파의 발생기술. 한국전자통신연구원 120p-129p

물리A

## 07\_음원 사이의 파동의 간섭 분석



# 음원 사이의 파동의 간섭 분석

권혁진 (매산중학교 2학년)

김운환 (안산중학교 2학년)

박지율 (왕의중학교 2학년)

조성원 (매산중학교 2학년)

최선우(여도중학교 2학년)

지도교수 : 지영래 (순천대학교 물리교육학과)

윤지영(순천영재교육원)

## 초록

노이즈캔슬링 기술은 일상생활에서 다양하게 사용되고 있다. 본 연구는 노이즈캔슬링에 사용되는 물리학 개념에 대한 이해를 목적으로 수행되었다. 파동의 상쇄간섭을 관찰하고 상쇄간섭이 일어나는 조건을 탐구하는 것을 목표로 하여 연구를 진행하였다. 두개의 스피커 사이의 거리를 달리하고 음파의 위상을 변화시키며 음파의 세기를 측정하여 파동의 간섭을 연구했다. 연구결과, 양쪽에서 같은 진동수와 위상을 가지는 음파를 재생시키는 것과 달리, 양쪽에서 서로 반전된 음파를 재생시키면 음파의 마루와 골 끼리 중첩되어 데시벨이 작아지는 파동의 상쇄간섭이 관찰되었다. 이 연구에서는 음파를 이용해 파동을 연구했지만 음파가 아닌 다른 종류의 파동을 이용한 파동의 간섭도 연구해보고 싶다.

## I. 서론 (또는 연구의 필요성 및 목적)

우리가 사용하는 이어폰의 노이즈캔슬링은 주변의 소리를 차단해주어 이어폰의 소리만 들을수 있게 해준다. 노이즈캔슬링은 크게 패시브노이즈캔슬링(PNC)과 액티브노이즈캔슬링(ANC)으로 구분된다. 패시브노이즈캔슬링(PNC)은 단순히 물리적으로 귀를 막아 소음을 차단시킨다. 이에 비해 우리가 소위 노이즈캔슬링이라 말하는 액티브노이즈캔슬링(ANC)은 파동의 간섭을 이용해 주변 소음을 상쇄시키는 기술이 적용된다. 액티브 노이즈캔슬링 기술을 이해하기 위해 음파의 상쇄간섭을 분석하였다.

## II. 이론적 배경

### 가. 파동<sup>1)</sup>

파동(wave)은 어떤 한 곳의 에너지가 흔들림을 통해 다른 곳으로 전달되어 나가는 것을 말한다.

### 나. 파동의 간섭<sup>2)</sup>

둘 또는 그 이상의 파동이 서로 만났을 때 중첩의 원리에 따라서 합쳐진 파의 진폭이 변하는 현상이다.

#### 1) 상쇄간섭<sup>3)</sup>

마루와 골, 혹은 골과 마루가 만나며 파동이 서로 상쇄되면서 진폭이 줄어든다.

#### 2) 보강간섭<sup>4)</sup>

여러 파동이 겹쳐져서 중첩이 일어날 때, 마루와 마루가 더 해지거나 골과 골이 더해지면 더욱 큰 변위를 일으키는 파동이 만들어진다.

## III. 연구방법

준비물: 스테레오 타입 스피커 2대(BZ-MS2000, 5W), 데시벨 측정기 1개, 컴퓨터 1대, Adobe Audition 2023, 1m 자

### 가. 스피커 S2와 데시벨 측정기 사이의 거리 변화에 따른 소리의 세기 관찰

- 1) 컴퓨터로 'Adobe Audition 2023' 프로그램을 실행시키고, 스테레오 타입 스피커 2대를 10cm 간격으로 앞쪽 면이 마주 보게 설치한다.
- 2) 스테레오 타입 스피커의 사이 거리의 중간 지점인 5cm에 데시벨 측정기의 측정 센서 부분을 위치하도록 설치한다.

- 
- 1) 파동 [Wave] (위키피디아) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%8C%8C%EB%8F%99>
  - 2) 간섭 [wave interference] (두산백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=1055827&cid=40942&categoryId=32235>
  - 3) 상쇄간섭 [constructive interference] (물리학백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://reading.jnei.go.kr/r/newReading/main/main.jsp>
  - 4) 보강간섭 [destructive interference] (물리학백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://reading.jnei.go.kr/r/newReading/main/main.jsp>

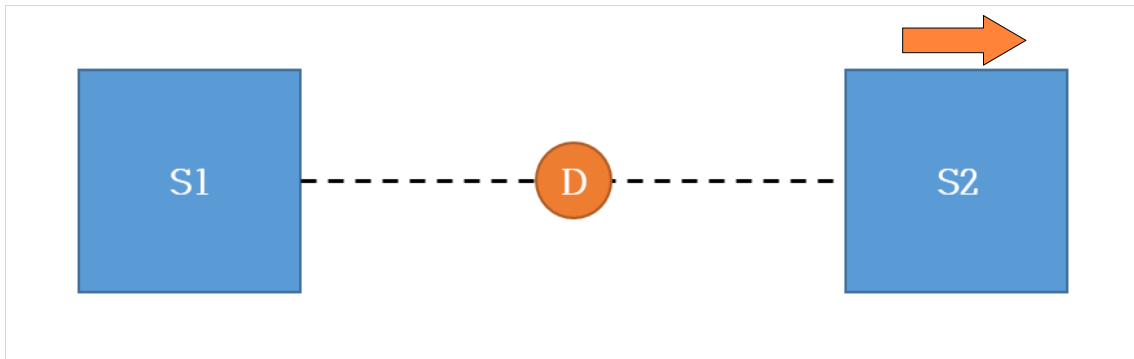


그림 1 실험 (가)에서 스피커와 데시벨 측정기의 위치

- 3) 'Adobe Audition 2023'에서 스피커 S1, S2 모두 진동수 500Hz의 동일한 위상의 사인 모양 파동을 생성하고, 컴퓨터 음량은 80, 스피커의 음량은 최대, 파동의 지속시간은 10초로 설정한다.
- 4) 'Adobe Audition 2023'에서 스피커 S2의 파동은 고정시키고, 스피커 S1의 파동의 위상을 반전시킨다.
- 5) 스피커 S2의 위치와 데시벨 측정기의 위치를 각각 S2와 D에 고정시키고 스피커 S1의 위치를 스피커 S2와 멀어지는 방향으로 5cm씩 이동시키며 데시벨의 크기를 측정한다.
- 6) D와 스피커 S1 사이의 거리가 45cm가 될 때까지 5번의 과정을 반복한다.
- 7) 5~6번 과정을 5회 반복한다.
- 8) 위상을 반전시키지 않고, 위상이 반전되지 않은 경우도 같은 방법으로 실험한다.

#### 나. 두 스피커 사이의 거리 변화에 따른 소리의 세기 관찰

- 1) 컴퓨터로 'Adobe Audition 2023' 프로그램을 실행시키고, 스테레오 타입 스피커 2대를 10cm 간격으로 앞쪽 면이 마주 보게 설치한다.
- 2) 스테레오 타입 스피커의 사이 거리의 중간 지점인 5cm에 데시벨 측정기의 측정 센서 부분을 위치하도록 설치한다.

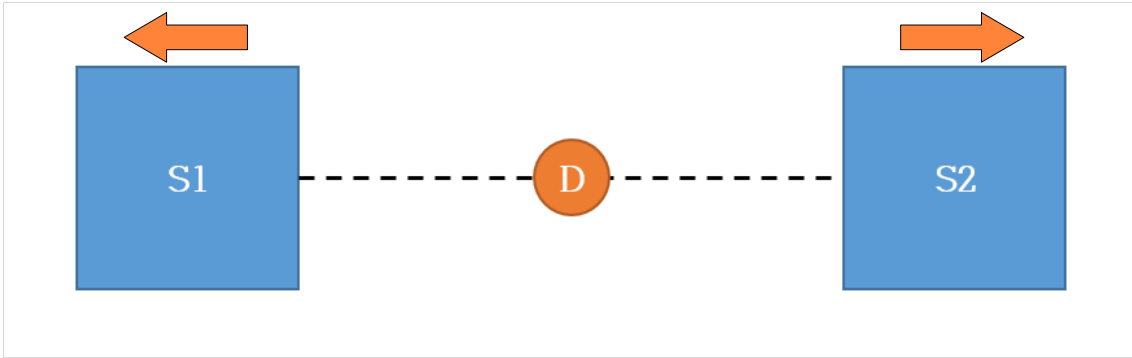


그림 2 실험 (나)에서 스피커와 데시벨 측정기의 위치

- 3) 'Adobe Audition 2023'에서 스피커 S1, S2 모두 진동수 500Hz의 동일한 위상의 사인 모양 파동을 생성하고, 컴퓨터 음량은 80, 스피커의 음량은 최대, 파동의 지속 시간은 10초로 설정한다.
- 4) 'Adobe Audition 2023'에서 스피커 S2의 파동은 고정시키고, 스피커 S1의 파동의 위상을 반전시킨다.
- 5) 데시벨 측정기의 위치를 고정시키고 스피커 S1, S2의 위치를 각각 서로 멀어지는 방향으로 2.5cm씩 이동시키며 데시벨의 크기를 측정한다.
- 6) 스피커 S1와 스피커 S2 사이의 거리가 45cm가 될 때까지 5번의 과정을 반복한다.
- 7) 5~6번 과정을 5회 반복한다.
- 8) 위상을 반전시키지 않고, 위상이 반전되지 않은 경우도 같은 방법으로 실험한다.

#### IV. 연구결과

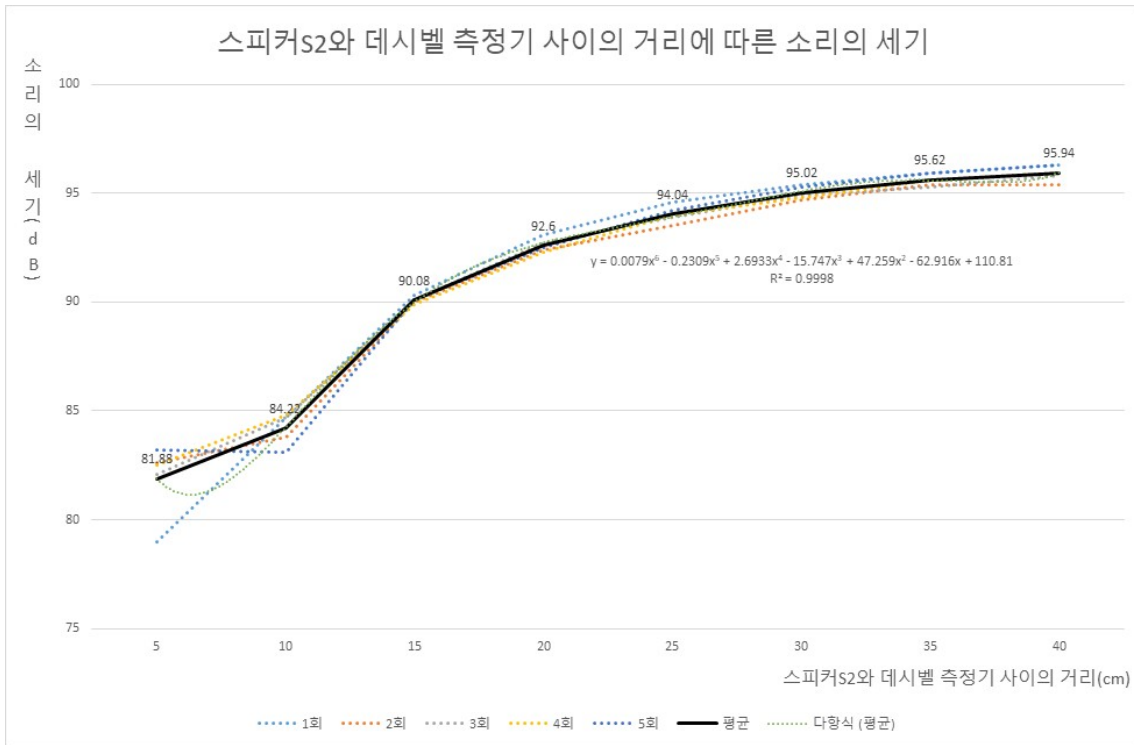
가. 스피커 S2와 데시벨 측정기 사이의 거리 변화와 소리의 세기의 관계는 어떻게 되는가?

1) 음파의 위상이 반대인 경우

표 1. 스피커 S2와 데시벨 측정기 사이의 거리에 따른 소리의 세기

(단위: dB)

스피커S2와 측정기 사이의거리(cm)	5	10	15	20	25	30	35	40
횟수								
1회	79	84.7	90.3	93.1	94.6	95.4	95.9	96.3
2회	82.6	83.8	90	92.4	93.5	94.7	95.4	95.4
3회	82.1	84.7	90.1	92.7	93.9	94.9	95.3	95.8
4회	82.5	84.8	89.9	92.3	94	94.8	95.6	95.9
5회	83.2	83.1	90.1	92.5	94.2	95.3	95.9	96.3
평균	81.88	84.22	90.08	92.6	94.04	95.02	95.62	95.94



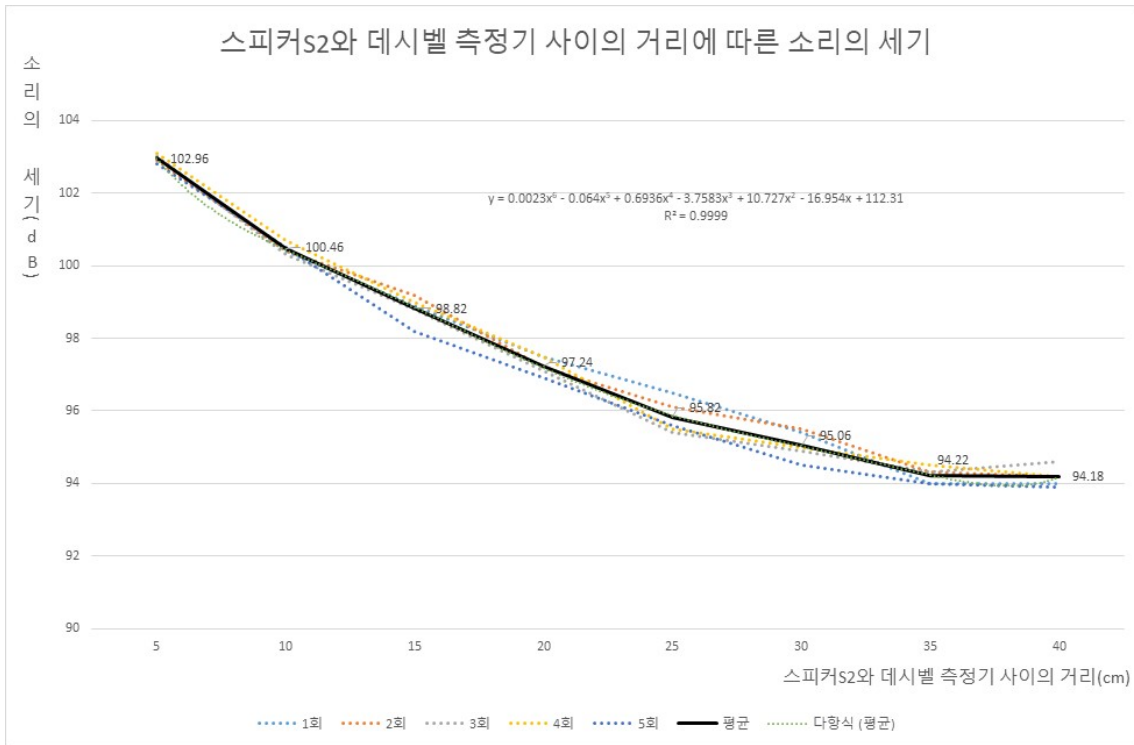
그래프와 표를 통해 스피커S2와 데시벨 측정기 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 커지는 것을 알 수 있다. 둘 사이의 거리가 5cm일 때는 평균적으로 소리의 세기가 81.88dB, 둘 사이의 거리가 10cm일 때는 84.22dB, 둘 사이의 거리가 15cm일 때는 90.08dB, 둘 사이의 거리가 20cm일 때는 92.6dB, 둘 사이의 거리가 25cm일 때는 94.04dB, 둘 사이의 거리가 30cm일 때는 95.02dB, 둘 사이의 거리가 35cm일 때는 95.62dB, 둘 사이의 거리가 40cm일 때는 95.94dB로 측정되었다.

2) 음파의 위상이 같은 경우

표 2. 스피커S2와 데시벨 측정기 사이의 거리 따른 소리의 세기

(단위: dB)

스피커S2와 측정기 사이의거리(cm)	5	10	15	20	25	30	35	40
횟수								
1회	103	100.4	98.9	97.5	96.5	95.4	94	94
2회	102.9	100.4	99.2	97.2	96.1	95.5	94.3	94.2
3회	103	100.3	98.8	97.1	95.4	94.9	94.3	94.6
4회	103.1	100.7	99	97.5	95.5	95	94.5	94.2
5회	102.8	100.5	98.2	96.9	95.6	94.5	94	93.9
평균	102.96	100.46	98.82	97.24	95.82	95.06	94.22	94.18



그래프와 표를 통해 스피커S2와 데시벨 측정기 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 작아지는 것을 알 수 있다. 둘 사이의 거리가 5cm일 때는 평균적으로 소리의 크기가 102.96dB, 둘 사이의 거리가 10cm일 때는 100.46dB, 둘 사이의 거리가 15cm일 때는 98.82dB, 둘 사이의 거리가 20cm일 때는 97.24dB, 둘 사이의 거리가 25cm일 때는 95.82dB, 둘 사이의 거리가 30cm일 때는 95.06dB, 둘 사이의 거리가 35cm일 때는 94.22dB, 둘 사이의 거리가 40cm일 때는 94.18dB로 측정되었다.

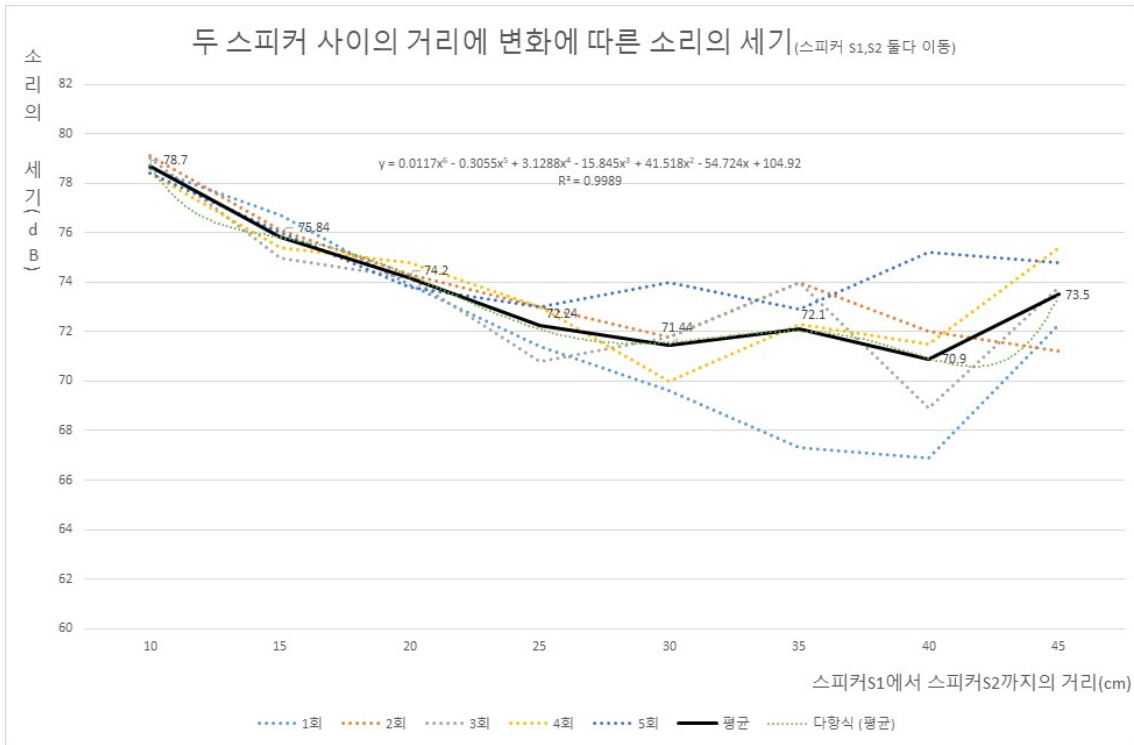
나. 두 스피커 사이의 거리 변화와 소리의 세기의 관계는 어떻게 되는가?

1) 음파의 위상이 반대인 경우

표 3. 두 스피커 사이의 거리 변화에 따른 소리의 세기

(단위: dB)

횟수	두 스피커 사이의 거리(cm)		10	15	20	25	30	35	40	45
	1회			78.6	76.7	73.9	71.4	69.6	67.3	66.9
2회			79.1	76.1	74.3	73	71.8	74	72	71.2
3회			79	75	74.2	70.8	71.8	74	68.9	73.8
4회			78.4	75.4	74.8	73	70	72.3	71.5	75.4
5회			78.4	76	73.8	73	74	72.9	75.2	74.8
평균			78.7	75.84	74.2	72.24	71.44	72.1	70.9	73.5



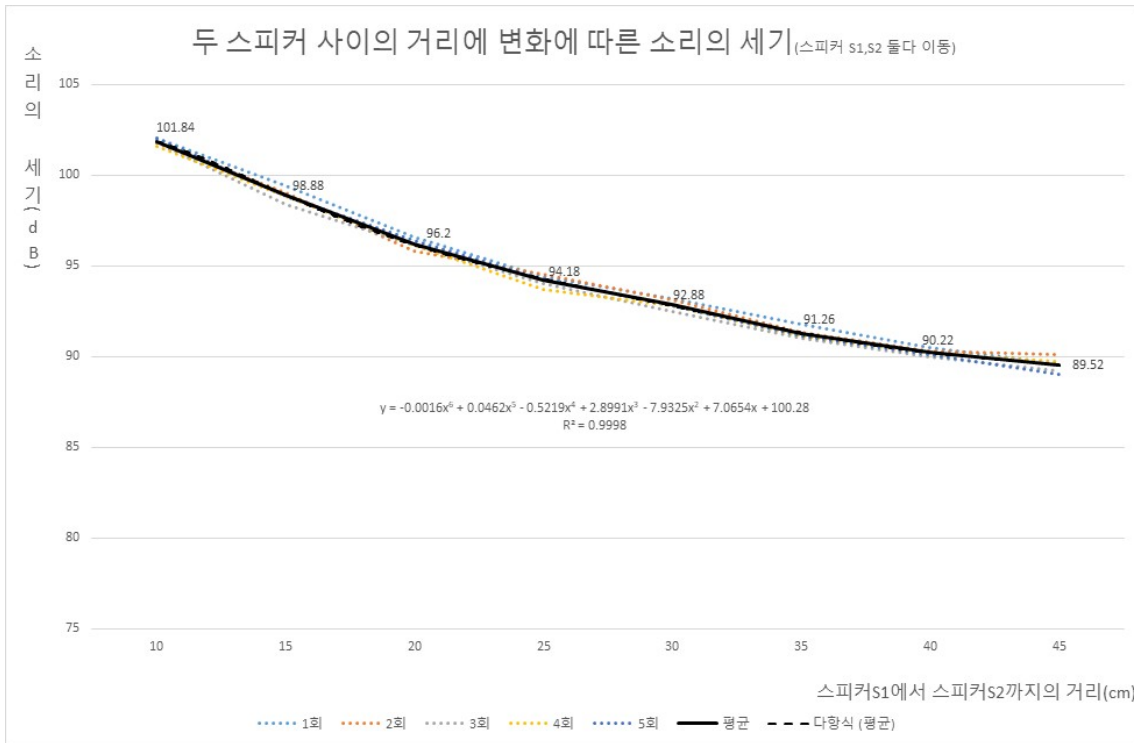
그래프와 표를 통해 두 스피커 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 초반에는 감소하다가 증가하는 것을 알 수 있다. 둘 사이의 거리가 10cm일 때는 평균적으로 소리의 크기가 78.7dB, 둘 사이의 거리가 15cm일 때는 75.84dB, 둘 사이의 거리가 20cm일 때는 74.2dB, 둘 사이의 거리가 25cm일 때는 72.24dB, 둘 사이의 거리가 30cm일 때는 71.44dB, 둘 사이의 거리가 35cm일 때는 72.1dB, 둘 사이의 거리가 40cm일 때는 70.9dB, 둘 사이의 거리가 45cm일 때는 73.5dB로 측정되었다.

2) 음파의 위상이 같은 경우

표 4. 두 스피커 사이의 거리 변화에 따른 소리의 세기

(단위: dB)

횟수	두 스피커 사이의 거리(cm)		10	15	20	25	30	35	40	45
	10	15	102	99.4	96.6	94.4	93.2	91.8	90.5	89.6
1회	102	99.4	96.6	94.4	93.2	91.8	90.5	89.6		
2회	101.8	99	95.8	94.5	93.1	91.3	90.3	90.1		
3회	101.8	98.4	96.1	94	92.5	91	90	89.2		
4회	101.6	98.8	96.1	93.7	92.8	91.1	90.2	89.7		
5회	102	98.8	96.4	94.3	92.8	91.1	90.1	89		
평균	101.84	98.88	96.2	94.18	92.88	91.26	90.22	89.52		



그래프와 표를 통해 두 스피커 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 작아지는 것을 알 수 있다. 둘 사이의 거리가 10cm일 때는 평균적으로 소리의 크기가 101.84dB, 둘 사이의 거리가 15cm일 때는 98.88dB, 둘 사이의 거리가 20cm일 때는 96.2dB, 둘 사이의 거리가 25cm일 때는 94.18dB, 둘 사이의 거리가 30cm일 때는 92.88dB, 둘 사이의 거리가 35cm일 때는 91.26dB, 둘 사이의 거리가 40cm일 때는 90.22dB, 둘 사이의 거리가 45cm일 때는 89.52dB로 측정되었다.

## V. 결론 및 제언

위 실험은 액티브 노이즈캔슬링 기술을 이해하기 위해 음파의 간섭을 분석하여 음파의 상쇄간섭이 일어나는 조건을 분석하였다.

실험(가)에서는 스피커S1과 데시벨 측정기의 위치를 고정하고 스피커S2의 위치를 이동시키며 소리의 세기를 측정하였고, 실험(나)에서는 데시벨 측정기를 중앙에 고정시키고 두 스피커 사이의 간격을 넓혀가며 소리의 세기를 측정하였다.

그 결과, 실험 (가)에서 두 스피커에서 발생하는 음파의 위상을 반대로 설정 했을 때는 스피커와 데시벨 측정기 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 커졌고, 위상을 같게 설정했을 때는 소리의 세기가 점점 줄어들었다.

실험 (나)에서 두 스피커에서 발생하는 음파를 반대로 설정 했을 때는 두 스피커 사이의 거리가 늘어남에 따라 소리의 세기가 40cm까지는 줄어들다가 그 후에는 소리가 다시 커졌고, 위상을 같게 설정했을 때는 소리의 세기가 계속해서 줄어들었다. 이를 통해 도출한 연구 결론은 다음과 같다.

실험 (가)에서 음파의 위상을 반대로 설정했을 때는 거리가 멀어져도 소리의 세기가 줄어드는 것이 아니라 오히려 커지는 것을 관찰 할 수 있었다. 이를 통해 스피커와 데시벨 측정기 사이의 거리가 5~15cm사이에서 음파의 마루와 골끼리 중첩되어 데시벨이 작아지는 파동의 상쇄간섭이 일어난다는 것을 알 수 있었다. 음파의 위상을 같게 했을 때 5~10cm 사이에서는 100dB이상의 값이 측정되었다. 하지만 스피커와 데시벨 측정기 사이의 거리가 멀어질수록 소리의 세기가 약해지는 것으로 측정이 되었는데 이는 거리가 멀어짐에 따라 소리의 에너지가 감소하여 소리의 세기가 약해지는 것으로 예상된다.

실험 (나)에서 음파의 위상을 반대로 설정했을 때는 스피커 사이의 거리가 5~40cm 까지 소리의 세기가 점점 줄어드는 것으로 보아 반전된 위상의 두 파동이 서서히 겹쳐지다가 거리가 40cm일 때 완전히 겹쳐져 상쇄간섭이 가장 많이 일어난 것으로 예상된다. 음파의 위상을 같게 했을 때는 (가)에서 음파의 위상을 같게 했을 때와 같이 거리가 멀어질수록 소리의 세기가 점점 약하게 측정되었다. 이러한 현상은 두 음파가 상쇄되며 소리의 세기가 약해지는 것이 아니라 두 스피커 사이의 거리가 멀어짐에 따라 소리의 에너지가 감소하여 소리의 세기가 점점 약하게 측정되는 것으로 예상된다.

따라서 실험 (가)와 (나)를 통해서 상쇄간섭이 일어남을 예상해 볼 수 있었다. 그러나 본 연구는 500Hz 파동으로만 실험을 진행하여 다양한 위상에서의 간섭을 관찰하지 못했다. 여러 주파수로 실험을 하면 더 다양한 실험 결과를 얻을 수 있었을 것 같고 스피커 사이의 거리 변수를 더 다양하게 하여 측정했다면 더 자세히 분석할 수 있었을 것 같다.

## VI. 참고문헌

파동 [Wave] (위키피디아) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%8C%8C%EB%8F%99>

간섭 [wave interference] (두산백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=1055827&cid=40942&categoryId=32235>

상쇄간섭 [constructive interference] (물리학백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://reading.jnei.go.kr/r/newReading/main/main.jsp>

보강간섭 [destructive interference] (물리학백과) (n.d.). Retrieved August 10, 2023, from <https://reading.jnei.go.kr/r/newReading/main/main.jsp>



물리A

## 08\_반도체에서 전압에 따른 전류의 세기



# 반도체에서 전압과 전류의 세기의 관계

박지우 (센텀중학교 2학년)

조예환 (중앙중학교 2학년)

조재휘 (해강중학교 2학년)

최은혁 (부흥중학교 2학년)

하영준 (남일중학교 3학년)

지도교수 : 김지나 (부산대학교 물리교육과)

## S. 초록

본 연구는 도체 저항일때 성립하는 전압과 전류의 세기가 비례하게 증가한다는 옴의 법칙이 과연 반도체에서도 동일하게 적용할까? 라는 의문점을 계기로 진행되었다.

첫 번째 실험에서는 P-N 접합 다이오드 1N4001 에서의 전압이 증가함에 따른 전류의 세기를 측정하여, IV 곡선을 그림으로서 반도체에서 성립하는 전압-전류 사이의 관계를 이해할 수 있었다.

두번째 실험에서는 발광 다이오드의 발광색에 따른 전압-전류 사이의 관계에 대해 실험하였다. 붉은색, 노란색, 초록색, 파란색 빛을 내는 발광다이오드를 각각 첫 번째 실험과 동일하게 전압에 따라 전류의 세기가 어떻게 변화하는지 측정하고, IV 곡선으로 나타내었다.

세번째 실험과 네번째 실험에서는 태양전지를 이용하였다.

먼저 세번째 실험에서는 발전중인 태양전지와 발전중이지 않은 태양전지의 전압-전류 사이의 관계를 측정하여 각각 비교하였고, 네번째 실험에서는 태양전지 두개를 직렬로 연결했을 때와 병렬로 연결했을때 두가지 경우에서의 전압-전류 사이의 관계를 측정해 비교하였다.

위와 같은 4 가지 실험을 통해 반도체에서 성립하는 전압과 전류 사이의 특성을 이해함으로써 반도체가 지니는 도체와 절연체로서의 이중성을 바탕으로한 활용 가능한 여러 사례들을 모색해볼 수 있었다.

## I. 서론

최근 LK-99라고 하는 상온에서 초전도체의 성질을 가지는 물질을 우리나라 연구팀이 발견하였다고 하여 사회적으로 큰 이슈가 되었다<sup>1</sup>. 더 많은 검증을 거쳐야 하겠지만, 지금까지는 상온에서 초전도체가 아닌 것으로 확인되고 있다. 아직은 상용화하기 어려운 초전도체에 비해, 반도체는 자동차, 컴퓨터, 휴대폰 그리고 우리의 생활 거의 모든 곳에서 쓰이고 있다. 반도체에서 옴의 법칙이 어떻게 적용되는지 궁금해 졌다. 그래서 반도체에서는 전압에 따른 전류의 세기가 어떻게 변하는지가 궁금하여 이 연구를 시행하였다. 이 연구를 통해 반도체의 작동 원리와 반도체의 전압에 따른 전류의 세기 변화에 대해 알 수 있었다. 이번 실험을 통해 알게된 반도체의 특성을 바탕으로, 순간적으로 강한 전류를 흘려보내거나 필요 전류량을 생산하는데 필요한 전압의 크기가 다른 물질에 비해 상대적으로 낮음을 활용하여 에너지 효율을 높이는데 사용하는등 여러 분야에서 활용이 가능할 것이다.

## II.이론적 배경

### 1.에너지 띠의 정의

온도가 0K일 때 고체의 전자들은 가장 낮은 에너지 상태에 채워진다. 그러나 파울리 배타 원리에 따라 전자가 하나의 에너지 준위에 모두 모여 있을 수 없으므로, 전자는 낮은 에너지 준위 부터 차례대로 채워진다. 아래 그림1과 같이 전자가 채워진 에너지띠 중에서 에너지가 가장 높은 에너지띠를 원자가 띠라고 한다. 원자가 띠보다 에너지가 높고, 전자가 채워지지 않은 에너지띠를 전도띠라고 한다. 그리고 원자가 띠의 가장 높은 에너지 준위와 전도띠의 가장 낮은 에너지 준위의 에너지 차이를 띠 간격이라고 한다.

---

<sup>1</sup> 상온상압 초전도체(LK-99) 개발을 위한 고찰, J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol., 2023, vol.33, no.2, pp. 61-70



그림 1: 원자가 띠와 전도띠

## 2. 도체에서의 에너지 띠 구조

도체는 띠 간격이 없는 물질로, 도체의 에너지띠는 그림 2와 같이 원자가 띠가 일부만 차 있거나 원자가 띠와 전도띠가 서로 겹쳐져 있다. 이렇게 일부만 채워진 에너지띠의 전자들은 약간의 에너지만 흡수해도 전자들이 쉽게 빈 에너지 준위로 전이할 수 있다. 따라서 도체는 작은 전압을 걸어 주어도 전자가 도체 안에서 자유롭게 이동할 수 있으므로, 전류가 잘 흐르고 전기 전도도가 크다.

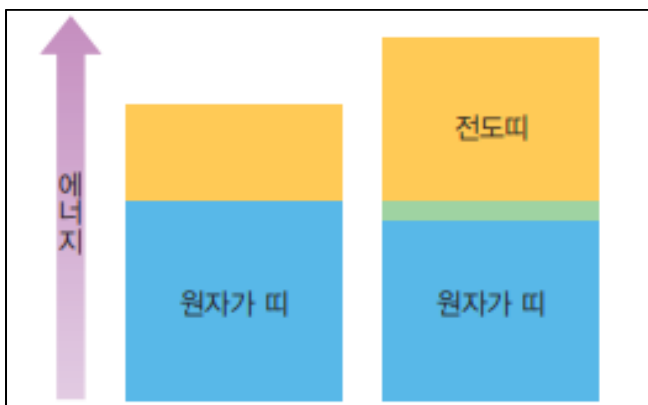


그림 2: 도체의 에너지 띠 구조

## 3. 절연체에서의 에너지 띠 구조

절연체의 에너지띠는 그림 3과같이 원자가 띠가 전자로 모두 채워져 있고 띠 간격이 매우 크다. 절연체에 전류가 흐르기 위해서는 원자가 띠의 전자가 띠 간격보다 큰 에너지를 얻어야 하지만, 띠 간격이 매우 커서 전자가 쉽게 전도띠로 전이할 수 없다. 따라서

절연체는 전압을 걸어 주어도 전류가 거의 흐르지 않으므로, 절연체의 전기 전도도는 매우 작다.



그림 3: 절연체의 에너지 띠 구조

#### 4. 반도체에서의 에너지 띠 구조

그림 4와 같이 반도체의 에너지 띠는 절연체처럼 원자가 띠가 전자로 모두 채워져 있지만, 띠 간격이 절연체보다 훨씬 작다. 아주 적은 수의 전자가 열에너지를 얻어 원자가 띠에서 전도띠로 전이하여 자유 전자가 된다. 반도체는 온도가 증가함에 따라 자유 전자의 수가 증가하므로, 전기 전도도도 커진다. 전자가 전도띠로 전이하면 원자가 띠에는 전자의 빈 자리가 남는데, 이를 양공이라고 한다. 반도체에 전압을 걸어 주면 원자가 띠의 전자가 빈 자리를 차례대로 채우면서 움직일 수 있기 때문에 양공은 마치 양전하와 같이 이동한다. 이렇게 반도체는 전도띠의 전자와 원자가 띠의 양공이 모두 전하 나르개 역할을 한다. 따라서 반도체는 전압을 가하면 약한 전류가 흐를 수 있으므로, 전기 전도도는 절연체보다 크다.

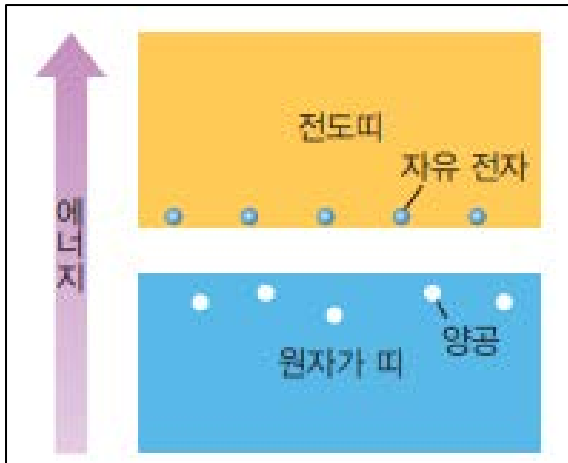


그림 4: 반도체의 에너지 띠 구조

5. 순수 반도체의 정의 및 에너지 띠 구조

반도체를 이루는 저마늄(Ge)이나 규소(Si) 원자는 원자가 전자가 4개로, 그림 5와 같이 인접한 원자들과 공유 결합을 하여 결정을 이룬다. 어떤 불순물도 섞이지 않고 저마늄이나 규소만으로 이루어진 순수한 반도체는 낮은 온도에 서는 전하 나르개 역할을 하는 자유 전자나 양공의 개수가 매우 적어 절연체에 가깝다. 따라서 반도체 소자에 반도체를 사용하기 위해서는 전기 전도성을 더 좋게 할 필요가 있다

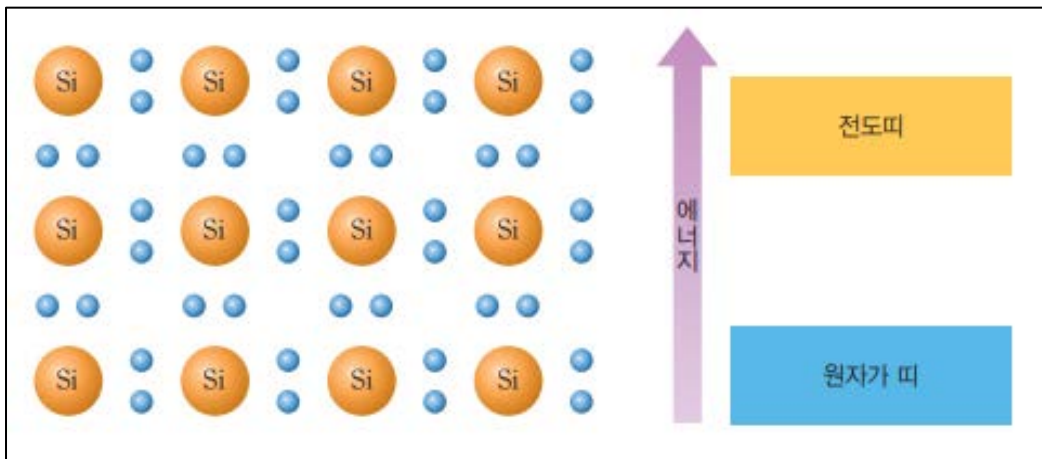


그림 5:순수 반도체의 에너지 띠 구조

6. p형 반도체의 정의 및 에너지 띠 구조

순수한 반도체에 특정한 불순물을 조금 섞으면 전기 전도성이 크게 좋아지는데, 이와 같은 과정을 도핑이라고 한다.

p형 반도체는 순수한 반도체 결정에 양공이 더 많이 생기도록 도핑하여 전기 전도성을 높인 것이다. 그림 6과 같이 규소(Si) 결정에 원자가 전자가 3개인 붕소(B)를 소량 첨가하면, 원자가 띠 바로 위에 에너지 준위가 생긴다. 이때 원자가 띠의 전자가 쉽게 이 에너지 준위로 들떠서 원자가 띠에 양공이 생긴다. 즉 붕소 원자가 이웃한 규소 원자와 공유 결합을 하면 개의 양공이 남게 되는데, 이 양공이 p형 반도체의 주된 전하 나르개 역할을 한다.

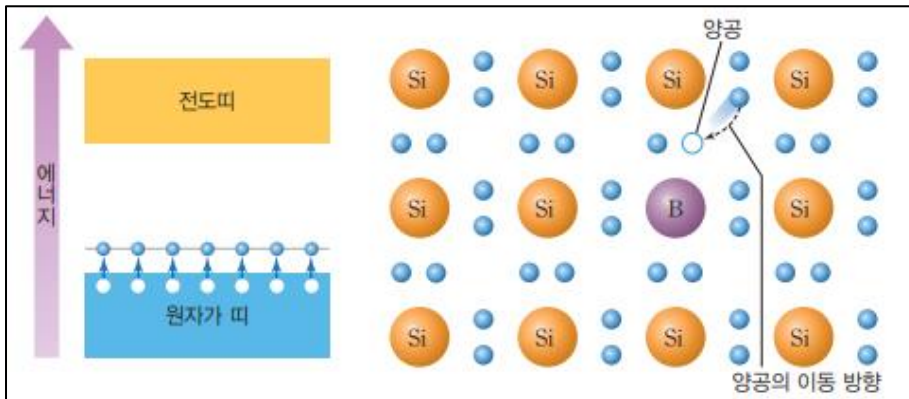


그림 6: p형 반도체의 에너지 띠 구조

### 7. n형 반도체의 정의 및 에너지 띠 구조

n형 반도체는 순수한 반도체 결정에 자유 전자가 더 많이 생기도록 도핑하여 전기 전도도를 높인 것이다. 그림 7의 (나)와 같이 규소 결정에 원자가 전자가 5개인 안티모니(Sb)를 소량 첨가하면, 4개의 전자는 주변의 규소 원자와 공유 결합을 하고 남은 1개의 전자는 안티모니 이온에 약하게 결합된다. 약하게 결합된 전자의 에너지 준위는 전도띠 바로 아래에 생기므로, 전자가 열에너지를 받아 쉽게 전도띠로 들뜬다. 이렇게 들뜬 전자가 n형 반도체의 주된 전하 나르개 역할을 한다.

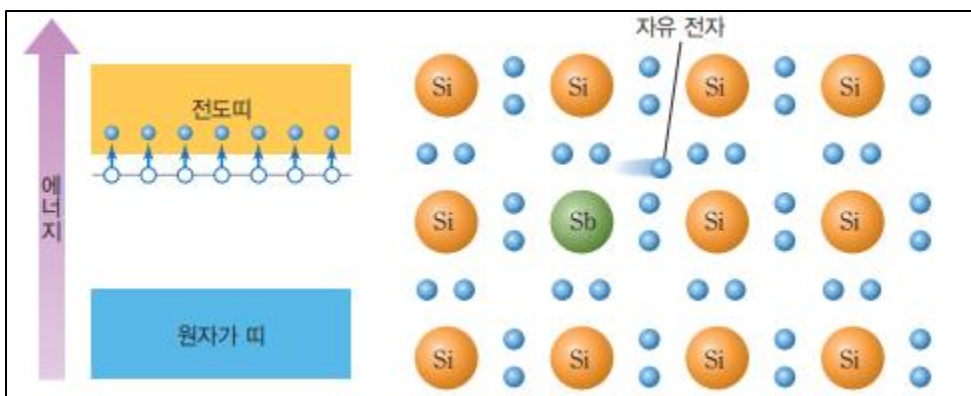


그림 7: n형 반도체의 에너지 띠 구조

## 8. p-n 접합 다이오드의 정의 및 성질

p형 반도체나 n형 반도체는 각각 따로 있을 때는 도체와 절연체 사이의 전기 전도도를 띤 물질에 불과하다. 그러나 그림 8과 같이 이들을 접합하여 만든 p-n 접합다이오드는 전류를 제어하고 조절하는 기능을 한다. p-n 접합 다이오드는 전류를 한쪽 방향으로만 흐르게 하는 특성이 있는데, 이것을 정류 작용이라고 한다. p형 반도체와 n형 반도체를 접합하면 양공과 자유 전자가 접합면을 넘어 확산한다. 이때 접합면 근처에는 고정된 양전하와 음전하를 띤 부분이 생기는데, 이것이 자유 전자와 양공에 전기력을 작용하여 이들이 더 이상 확산되는 것을 막는 장벽과 같은 역할을 한다. 그림 9의 (가)와 같이 다이오드에 순방향으로 전압을 걸어 주면 접합면 근처의 전하를 띤 영역이 줄어들어서 자유 전자와 양공의 확산이 크게 증가한다. 이때 접합면 근처에서 자유 전자와 양공이 공존하면서 자유 전자가 양공을 채우므로, 다이오드의 양 끝에서 자유 전자와 양공을 계속 공급할 수 있게 된다. 따라서 전류가 계속 흐를 수 있다. 그림 9의 (나)와 같이 다이오드에 역방향으로 전압을 걸어 주면 p형 반도체에서 양공이, n형 반도체에서 자유 전자가 빠져나오면서 접합면 근처의 전하를 띤 영역이 넓어진다. 그러다 다이오드에 걸어 준 전압과 접합면 근처의 전하로부터 받는 전기력이 평형을 이루면 자유 전자와 양공의 이동이 멈춘다. 따라서 전류가 거의 흐르지 않는다.

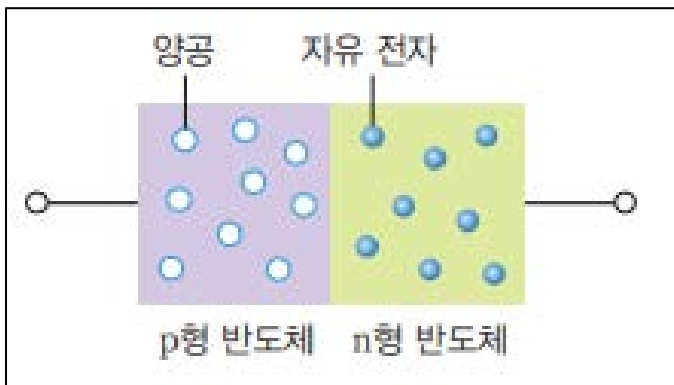


그림 8: p-n 접합 다이오드 구조

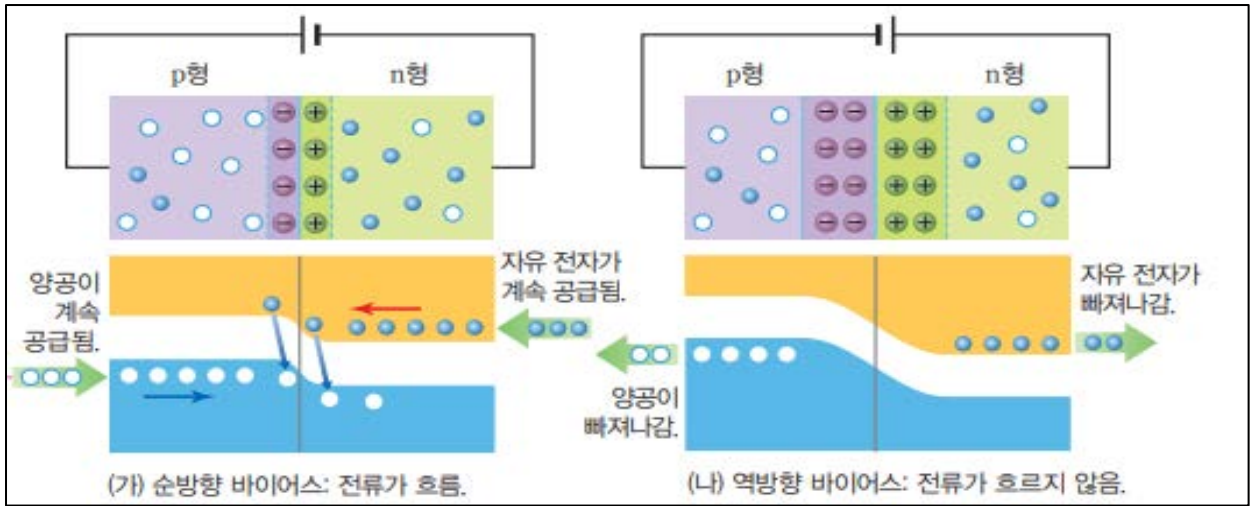


그림 9: 정류작용의 원리

9. p-n 접합다이오드 예시: 발광 다이오드 및 광 다이오드

한편 다이오드에 순방향으로 전압이 걸릴 때 전도 띠의 자유 전자와 원자가 띠의 양공이 재결합하여 전류가 흐른다는 사실을 이용하면 빛을 내거나 감지하는 반도체 소자를 만들 수 있다. 전류가 흐를 때 빛을 내는 발광 다이오드도 그 중 하나이다. 적절한 성질의 반도체를 이용하면 그림 10과 같이 다이오드 내부에서 자유 전자와 양공이 재결합할 때 띠 간격만큼의 에너지를 가진 빛이 방출되도록 할 수 있다. 반대로 빛을 전기 신호로 변환하는 반도체 소자도 있다. 다이오드에 빛을 비추면, 접합면 부근에서 빛이 흡수되면서 원자가 띠의 전자가 전도띠로 전이하여 양공과 자유 전자가 생긴다. 이들이 접합면 부근의 전하에 의해 전기력을 받아 각각 분리되면서 전류가 발생한다. 광 다이오드는 이러한 원리를 이용하여 빛을 전기 신호로 변환한다.

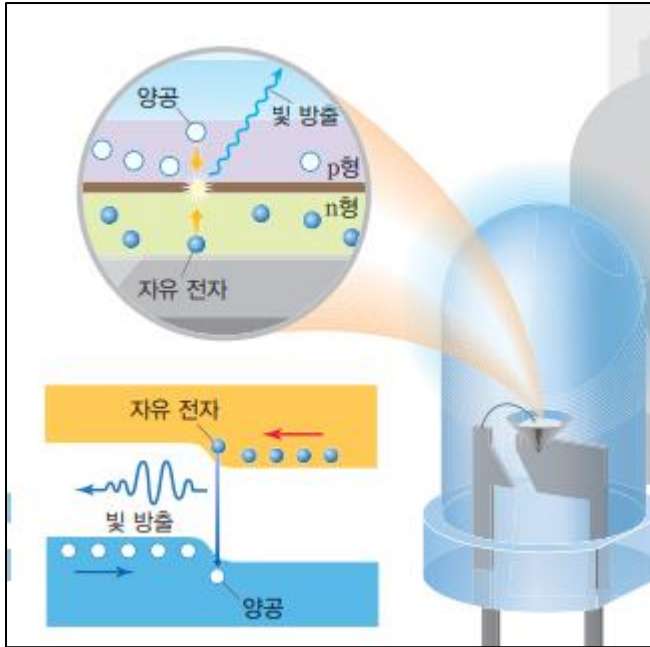


그림 10: 발광 다이오드의 구조

### Ⅲ. 연구방법

#### 실험 1: 반도체에서 전압-전류의 세기 관계 측정하기

- 실험 목적: 반도체에서의 전압-전류 관계가 비례관계인지 확인하기

- 준비물: p-n접합 반도체(규격:1N4001) 1개, 전압 측정용 멀티미터 1개, 전류 측정용 멀티미터 1개, 전선 5개, 직류전원장치 1개, 브레드보드 1개

- 실험과정:

① 직류전원장치와 브레드보드를 연결하고 전류 측정용 멀티미터와 전압 측정용 멀티미터를 각각 직렬, 병렬로 연결한다.

② 반도체를 브레드보드에 꽂고 전선에 연결한다.

③ 전압을 25mV씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전류의 세기가 20mA에 근접한 값이 나올때까지 반복한다. 단 25mV씩 증가시켰을 때 전류의 세기가 20mA를 초과할 경우 전류가 20mA가 될 때의 전압의 크기를 적는다.

### 실험 2: 서로 다른 빛을 내는 발광 다이오드들의 전압-전류 관계 측정하기

- 실험 목적: 발광 다이오드가 내는 빛의 파장이 전압-전류 관계에 어떠한 영향을 주는지 확인하기

- 준비물: 각각 붉은색, 노란색, 초록색, 파란색 빛을 내는 발광 다이오드 1개(총 4개), 전압 측정용 멀티미터 1개, 전류 측정용 멀티미터 1개, 전선 5개, 직류전원장치 1개, 브레드보드 1개

- 실험과정:

① 직류 전원 장치와 브레드보드를 연결하고 전류 측정용 멀티미터와 전압 측정용 멀티미터를 각각 직렬, 병렬로 연결한다.

② 각각의 발광 다이오드를 브레드보드에 꽂고 전선에 연결한다.

③ 전압을 0.5V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정하고 전류의 세기가 20mA에 근접한 값이 나올때까지 반복한다. 단 0.5V씩 증가시켰을 때 전류의 세기가 20mA를 초과할 경우 전류가 20mA가 될 때의 전압의 크기를 적는다.

④ 실험을 각각의 다이오드에 대해 반복한다.

### 실험 3: 태양전지를 발전하지 않을 때, 발전할 때의 전압에 따른 전류의 세기 측정하기

- 실험 목적: 태양광 전지판도 반도체의 일종이므로 발전하지 않도록 하여 저항으로만 사용할 수 있는지 알아보고 태양광 전지판을 발전하게 하면 전압에 대한 전류의 세기에 어떤 영향을 줄지 알아보기

- 준비물: 태양광 전지판 1개, 전압 측정용 멀티미터 1개, 전류 측정용 멀티미터 1개, 전선 5개, 직류전원장치 1개, 가림막 1개, 형광등 1개, 백열전구 1개

- 실험 과정:

① 직류 전원 장치와 태양광 전지판을 연결하고 전류 측정용 멀티미터와 전압 측정용 멀티미터를 각각 직렬, 병렬로 연결한다.

② 태양광 전지판을 가림막으로 빛을 차단한다.

③ 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

④ 형광등을 태양광 전지판으로부터 약 50cm 떨어진 지점에 두고 형광등으로 태양광 전지판이 발전하도록 한다.

⑤ 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

⑥ 형광등보다 빛의 세기가 더 큰 백열전구를 태양광 전지판으로부터 약 23.5cm 떨어진 지점에 두고 형광등으로 태양광 전지판이 발전하도록 한다.

⑦ 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

#### 실험 4: 태양전지를 직렬과 병렬로 연결할 때 전압에 대한 전류의 세기 측정하기

- 실험 목적: 반도체를 직렬과 병렬로 연결하였을 때 전압에 대한 전류의 세기에 어떤 영향을 주는지 확인하기

- 준비물: 태양광 전지판 2개, 전압 측정용 멀티미터 1개, 전류 측정용 멀티미터 1개, 전선 7개, 직류전원장치 1개

- 실험 과정:

① 직류전원장치와 태양광 전지판을 연결하고 전류 측정용 멀티미터와 전압 측정용 멀티미터를 각각 직렬, 병렬로 연결한다.

② 형광등보다 빛의 세기가 더 큰 백열전구를 태양광 전지판으로부터 약 23.5cm 떨어진 지점에 두고 형광등으로 태양광 전지판이 발전하도록 한다.

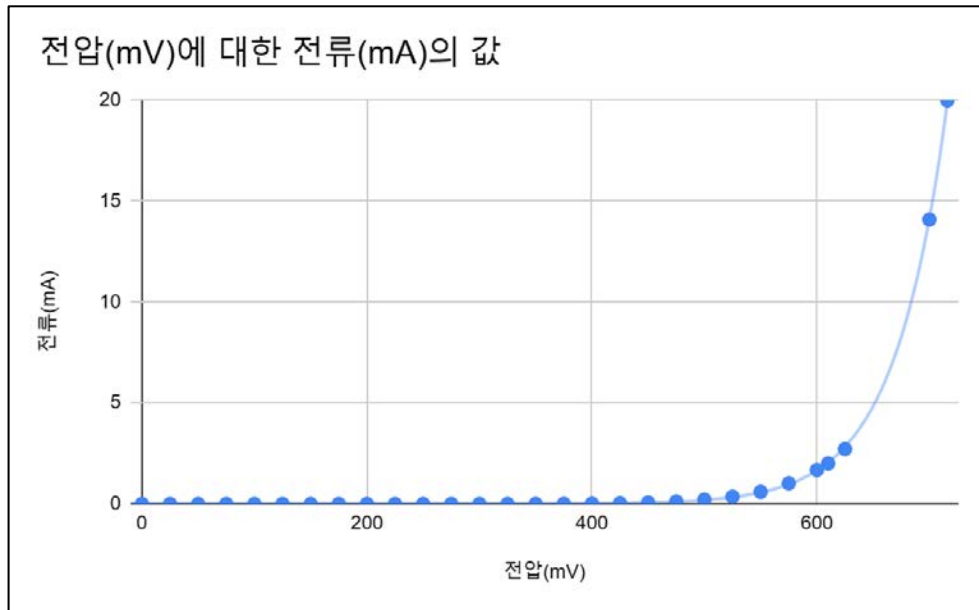
③ 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

④ 태양광 전지판 2개를 직렬로 연결하고 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

⑤ 태양광 전지판 2개를 병렬로 연결하고 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류의 세기를 측정한다. 전압이 2V가 될 때까지 반복한다.

### III. 연구결과

실험1 :반도체에서 전압의 크기에 따른 전류의 세기



그래프2 : 다이오드(규격:1N4001)에서 전압에 대한 전류의 세기 그래프

전압(mV)	전류의 세기(mA)
~275	0
275	0.001
300	0.001
325	0.002
350	0.005
375	0.008
400	0.018
425	0.035
450	0.067
475	0.116
500	0.208
525	0.358
550	0.595
575	1.018
600	1.678
610	2
625	2.72
700	14.09
716	19.99

표2 : 다이오드(규격:1N4001) 에서의 전압에 대한 전류의 세기 표

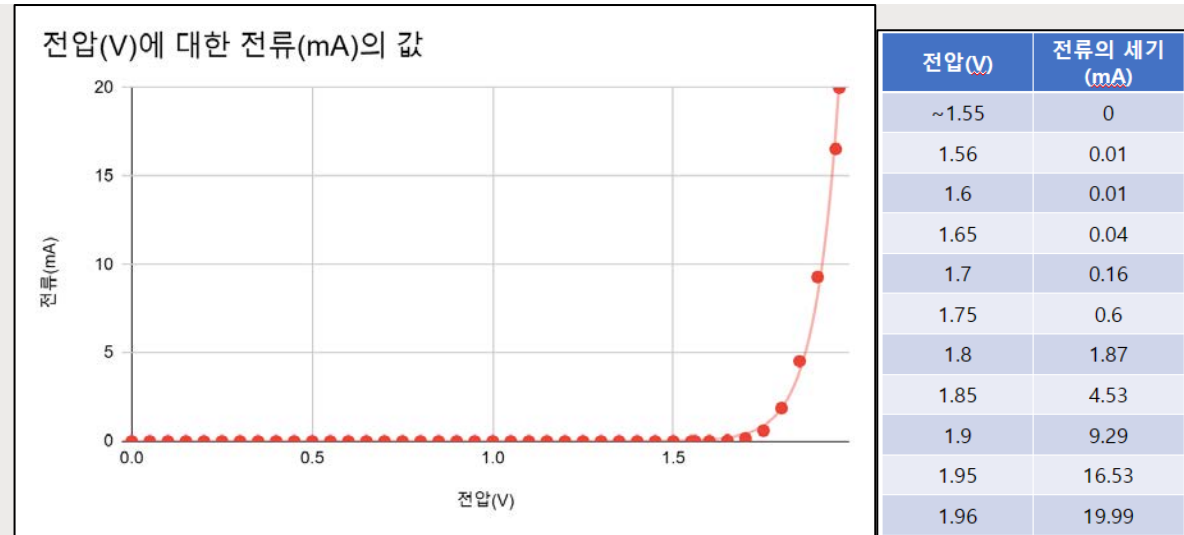
전압이 0mV부터 약 275mV까지는 전압이 증가해도 전류가 흐르지않는다.

전압이 약 275mV보다 클 때는 전압이 증가하면 전류의 세기가 증가한다.

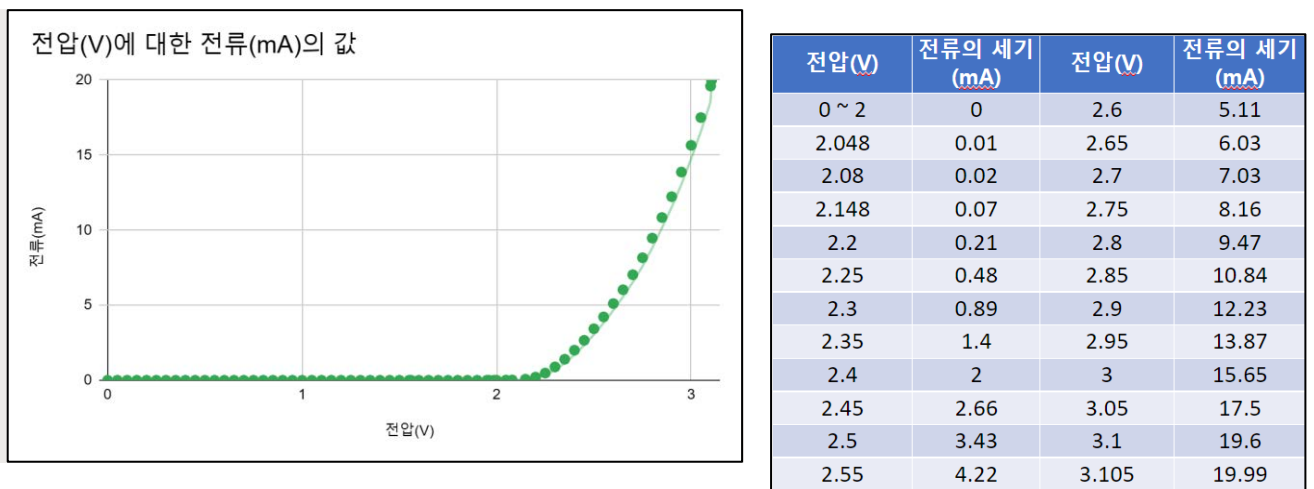
전압이 높아질수록 전류의 세기가 증가하는 정도가 커진다.

다이오드(규격:1N4001)에서는 일반적인 도체 저항과 달리 저항이 일정해도 전압과 전류의 세기가 비례하지 않는다.

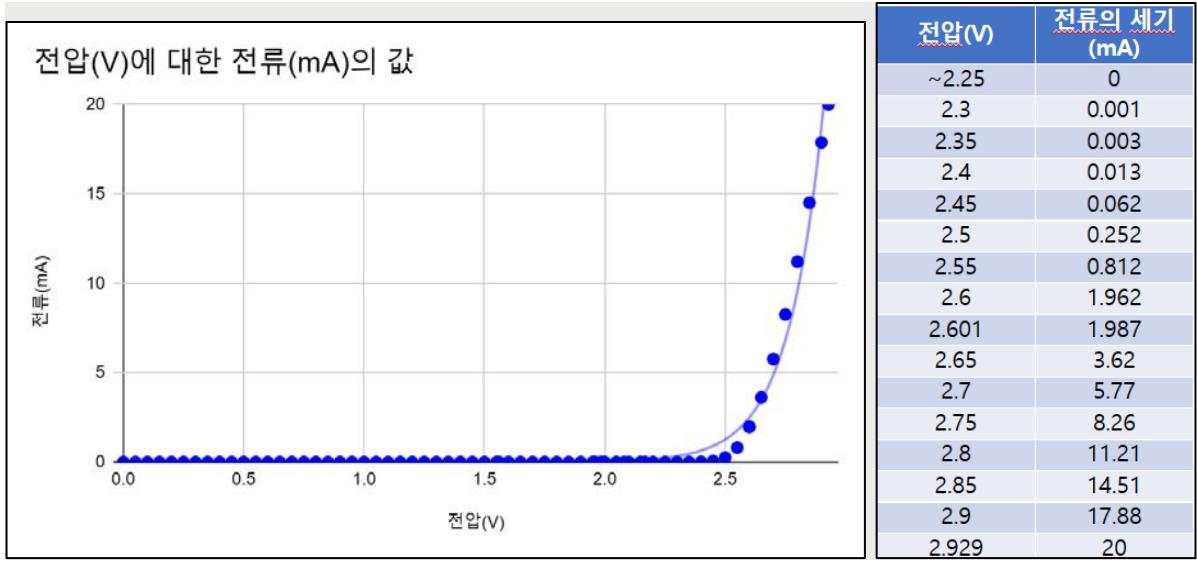
## 실험2 :발광 다이오드 색에 따른 전압과 전류의 세기의 관계



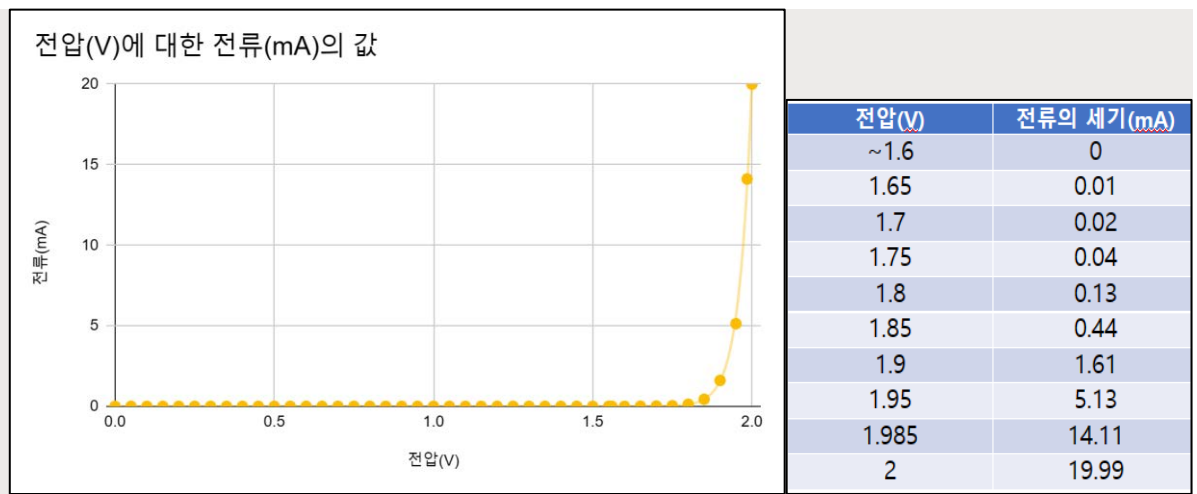
그래프3, 표3 : 빨간색 발광다이오드에서 전압에 따른 전류의 세기 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



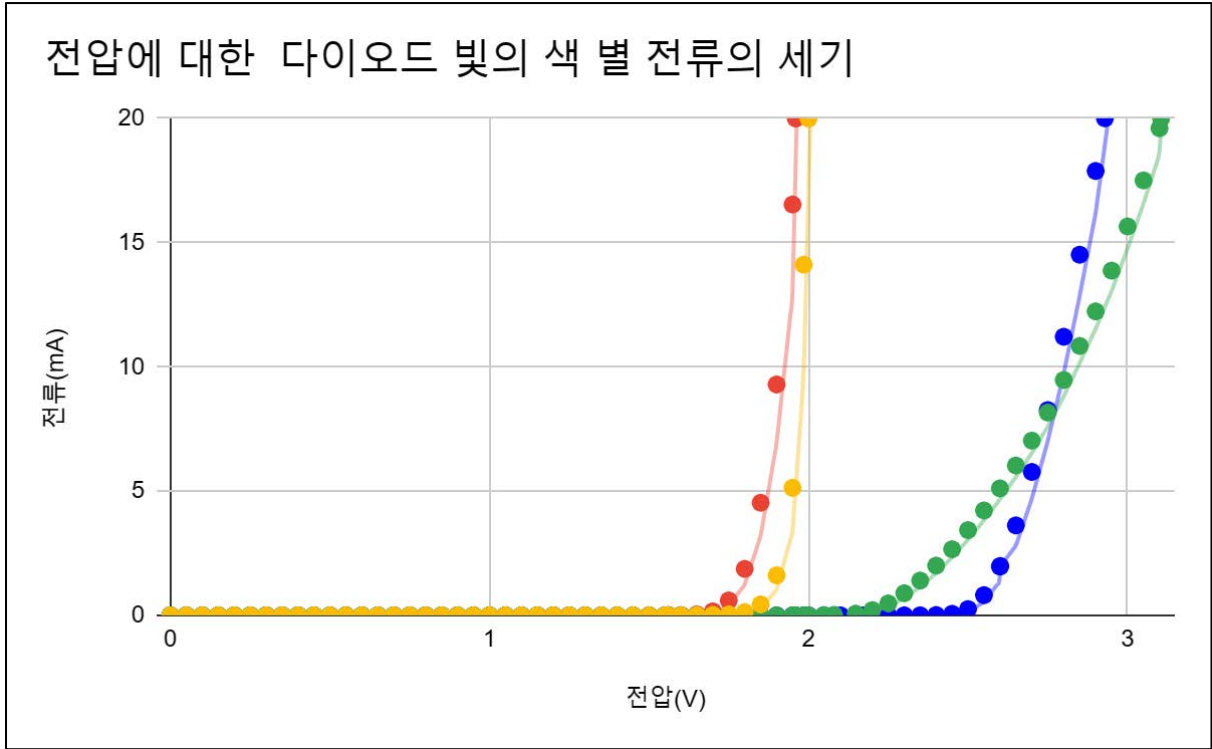
그래프4, 표4 : 초록색 발광다이오드에서 전압에 따른 전류의 세기 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



그래프5, 표5 : 파란색 발광다이오드에서 전압에 따른 전류의 세기 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



그래프6, 표6 : 노란색 발광다이오드에서 전압에 따른 전류의 세기 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)

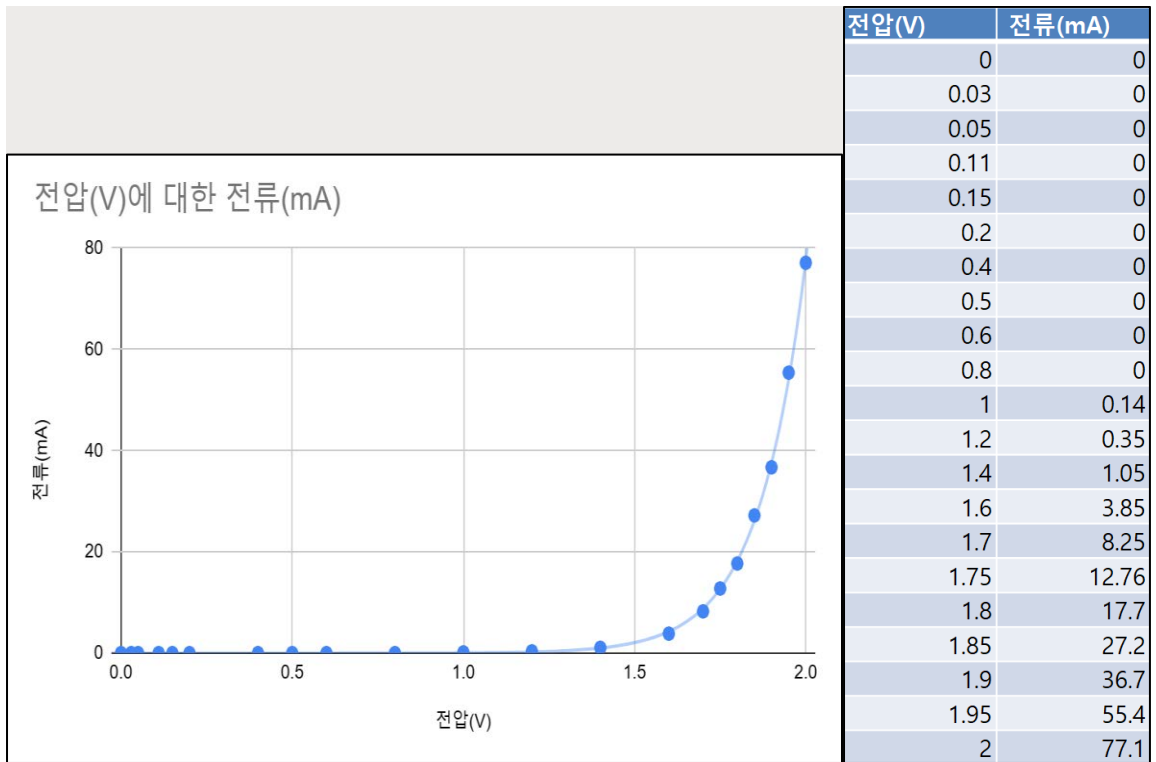


그래프3+4+5+6 : 빨간색, 노란색, 초록색, 파란색 빛을 내는 발광 다이오드에서 전압에 대한 전류의 세기 그래프

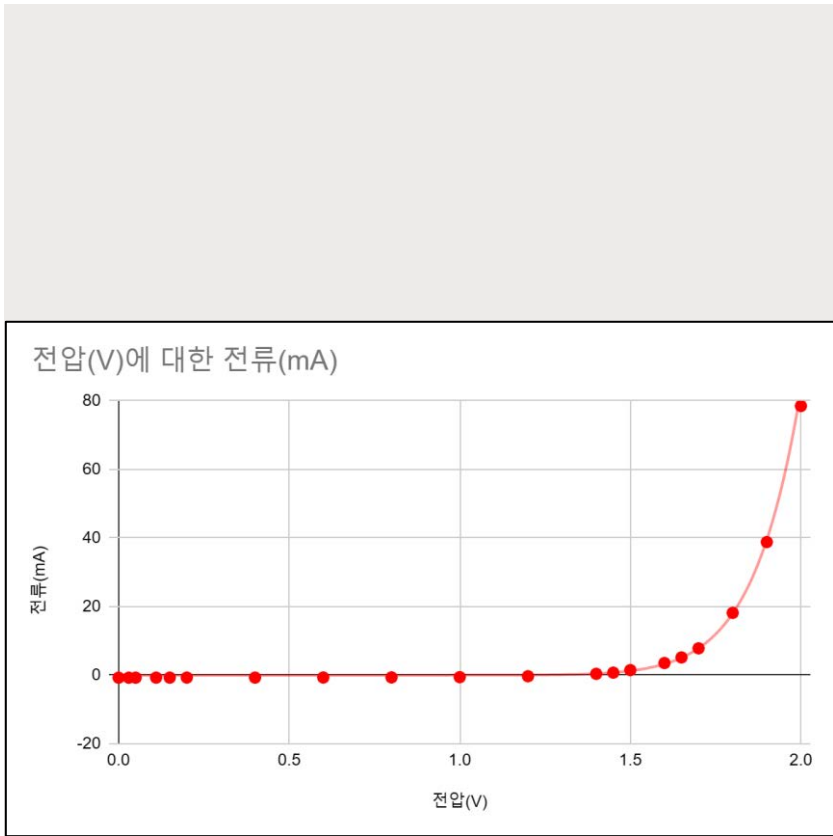
모든 발광다이오드가 다이오드(규격:1N4001)처럼 일정 전압까지는 전압이 증가해도 전류가 흐르지않고 이 전압보다 전압이 클 때는 전압이 증가하면 전류의 세기가 증가하며 전압이 높아질수록 전류의 세기가 증가하는 정도가 커진다.

빨간색 발광 다이오드는 전압이 약 1.55V, 초록색 발광 다이오드는 약 2.048V, 파란색 발광 다이오드는 약 2.3V, 노란색 발광 다이오드는 1.65V부터 전류가 흐르기 시작한다. 전압의 증가에 따라 전류가 흐르기 시작하는 전압이 빨간색, 노란색, 초록색, 파란색 발광 다이오드 순으로 낮다. 즉 파장이 길수록 전류가 흐르기 시작하는 전압이 낮아진다.

실험 3 : 태양 전지의 전압에 대한 전류의 세기

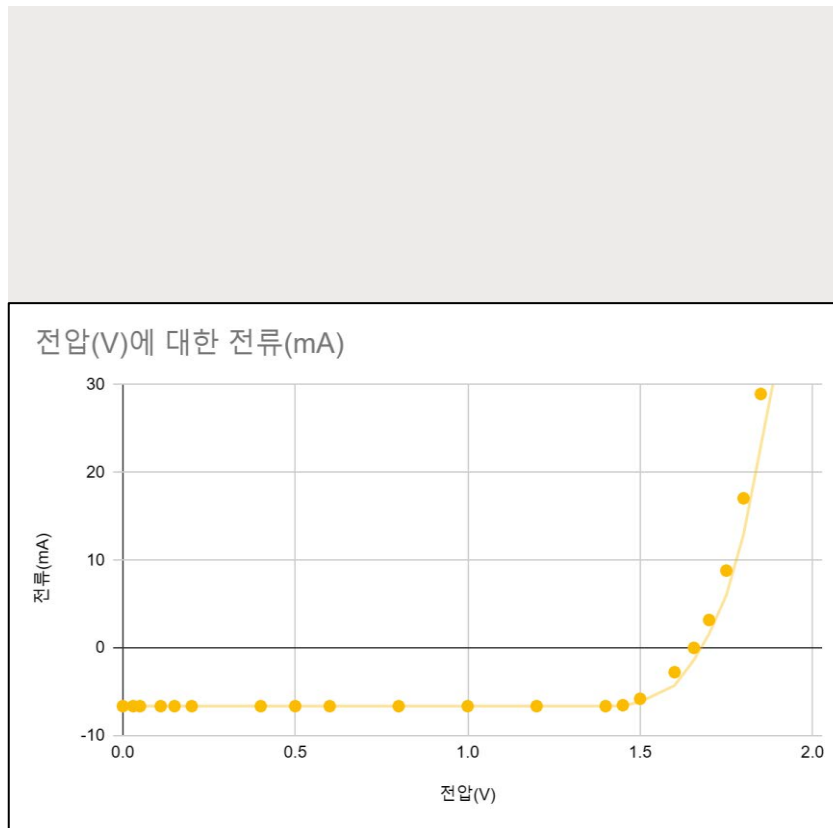


그래프7, 표7: 태양광 전지판을 가렸을 때 전압에 따른 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)

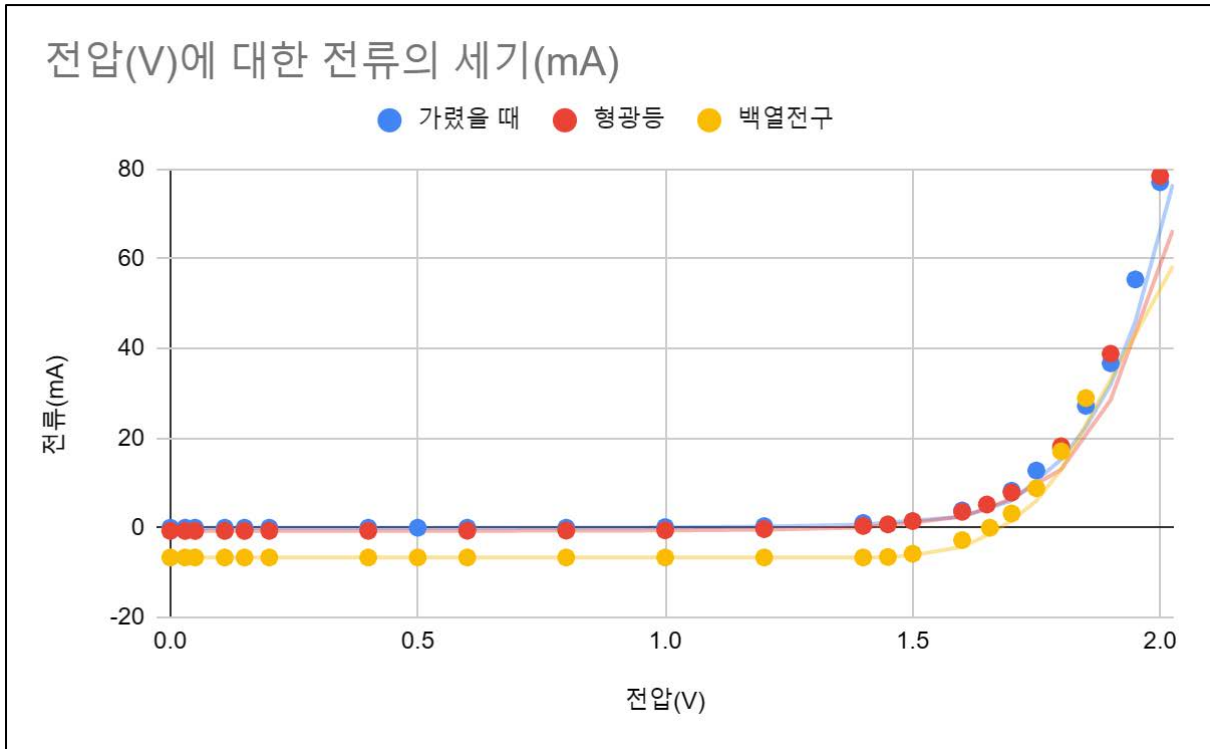


전압(V)	전류(mA)
0	-0.72
0.03	-0.72
0.05	-0.72
0.11	-0.71
0.15	-0.71
0.2	-0.7
0.4	-0.7
0.6	-0.67
0.8	-0.64
1	-0.57
1.2	-0.3045
1.4	0.4
1.45	0.75
1.5	1.49
1.6	3.55
1.65	5.18
1.7	7.84
1.8	18.18
1.9	38.82
2	78.5

그래프8, 표8: 태양광 전지판에 형광등을 비추었을 때 전압에 따른 전류의 세기그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



전압(V)	전류(mA)
0	-6.64
0.03	-6.64
0.05	-6.64
0.11	-6.64
0.15	-6.64
0.2	-6.64
0.4	-6.64
0.5	-6.64
0.6	-6.64
0.8	-6.64
1	-6.64
1.2	-6.64
1.4	-6.64
1.45	-6.53
1.5	-5.8
1.6	-2.77
1.656	0
1.7	3.18
1.75	8.81
1.8	17.05
1.85	28.94

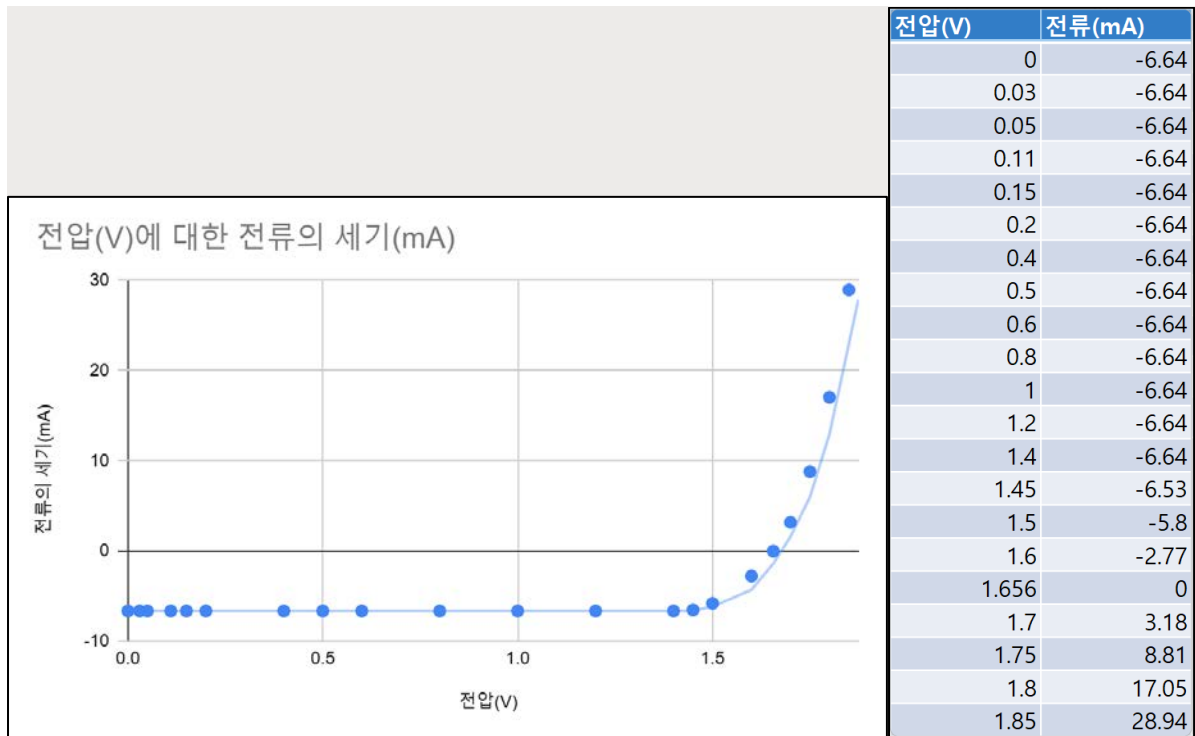


그래프 7+8+9: 태양광 전지판을 가렸을 때, 형광등을 비췌었을 때, 백열전구를 비췌었을 때 전압에 대한 전류의 세기 그래프

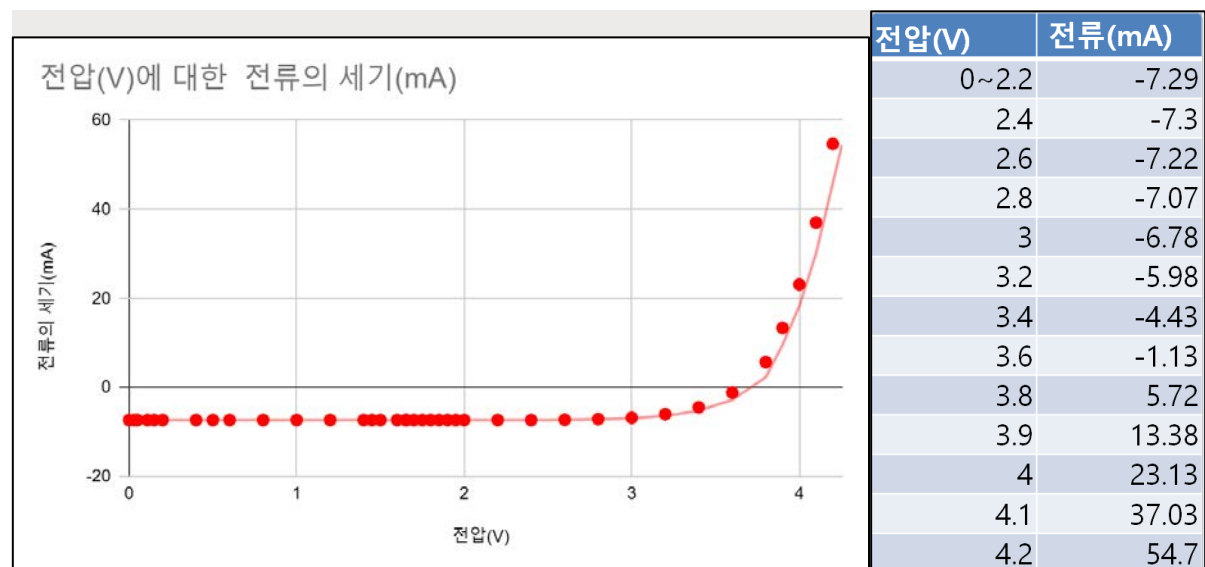
그래프7, 그래프8, 그래프9에서, 태양광 전지판이 다이오드(규격:1N4001)처럼 전압의 일정 값까진 거의 전류의 세기가 변하지 않고, 그 후 급격하게 증가한다.

태양광 전지판을 가렸을 때, 형광등을 비췌었을 때, 백열전구를 비췌었을 때 순으로 같은 전압일 때 전류의 세기가 크다. 세 그래프가 전류의 세기가 증가하기 시작하는 전압(약 1.5V)과 이 전압 이후에 전압에 대한 전류의 세기가 증가하는 정도가 거의 일치하다. 태양광 전지판에 형광등과 백열전구를 비췌었을 때 전압이 증가해도 전류의 세기가 증가하지 않는 전압에서 전류의 세기는 음수이다. 즉, 직류 전원 장치에 의해 흐르는 전류의 방향과 반대인 방향으로 태양광 전지판에 의한 전류가 흐른다. 또한 태양광 전지판에 강한 빛을 비출수록 태양광 전지판에 의한 전류가 세져서 전압에 대한 전류의 세기가 낮아진다.

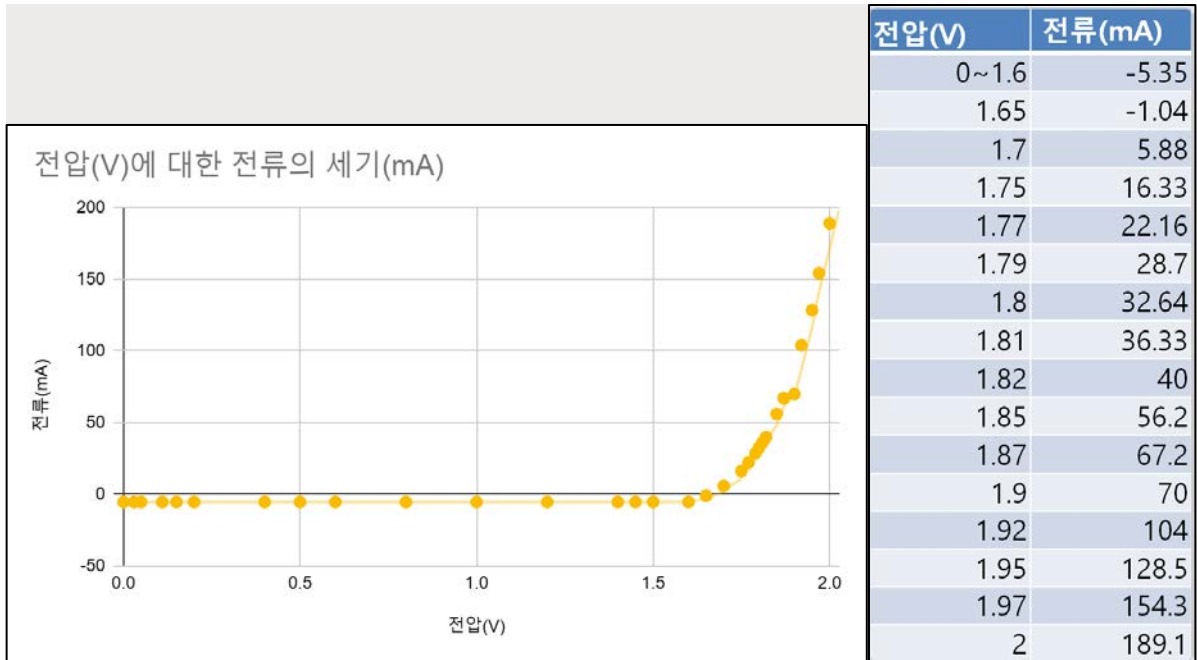
실험 4: 태양전지를 직렬과 병렬로 연결할 때 전압에 대한 전류의 세기 측정하기



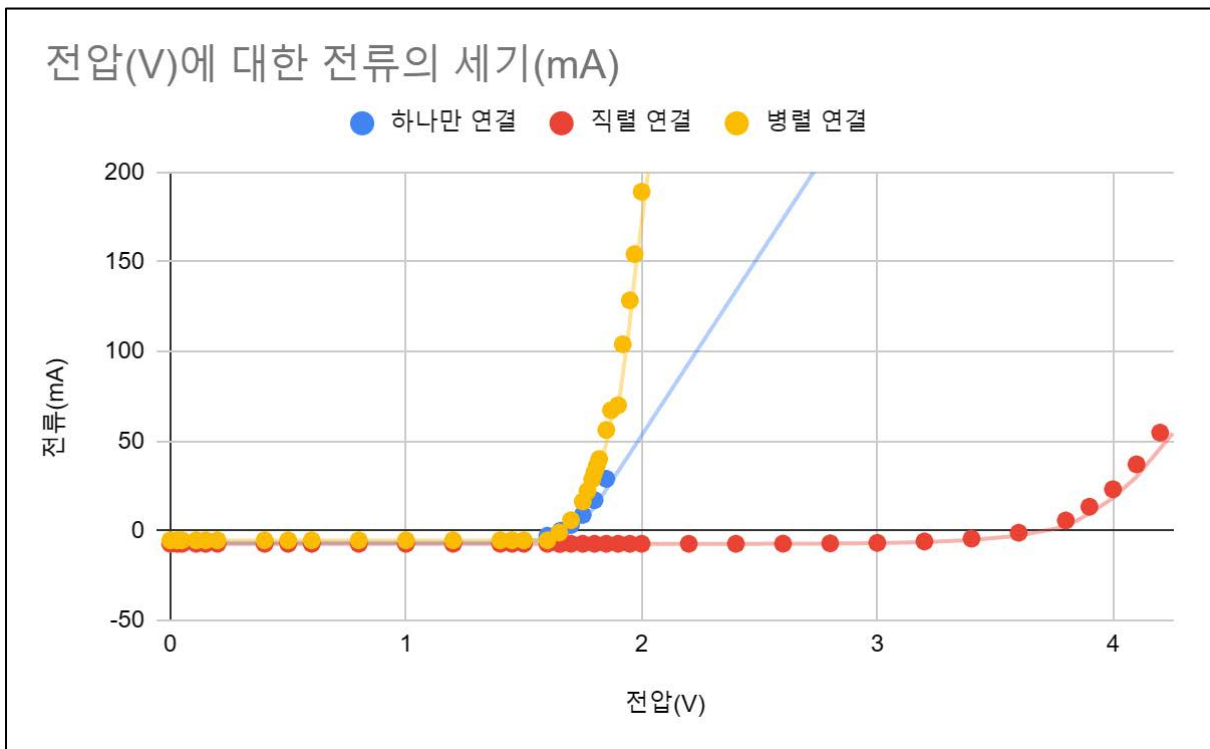
그래프10, 표10: 태양광 전지판을 하나만 연결했을 때 전압에 대한 전류의 세기  
그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



그래프11, 표11: 태양광 전지판을 두 개를 직렬로 연결했을 때 전압에 대한 전류의 세기  
그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



그래프12, 표12: 태양광 전지판을 두 개를 병렬로 연결했을 때 전압에 대한 전류의 세기  
 그래프(왼쪽), 표(오른쪽)



그래프 10+11+12: 태양전지를 하나만 연결 했을 때, 두 개를 직렬로 연결 했을 때, 두 개를 병렬로 연결했을 때 전압에 대한 전류의 세기 그래프

태양광 전지판을 직렬, 병렬로 연결해도 일반적인 반도체처럼 일정 전압보다 낮은 전압일 땐 전류의 세기가 변하지 않고 전압이 커질수록 전류의 세기가 증가하는 정도가 커진다.

태양전지를 하나만 연결할 때와 두 개를 병렬로 연결할 때 전류의 세기가 처음으로 증가하는 전압 (약 1.65V) 거의 일치하고 태양전지 두 개를 직렬로 연결할 때 전류의 세기가 처음으로 증가하는 전압은 하나만 연결할 때보다 크다. 태양전지를 병렬로 연결했을 때, 하나만 연결했을 때, 직렬로 연결했을 때 순으로 전압에 대한 전류의 세기가 증가하는 정도가 크다.

## IV. 결론

첫번째 실험결과를 통해서 도체와 달리 반도체에서는 저항이 일정할 때 전압과 전류의 세기가 비례한다는 옴의 법칙이 성립하지 않다는 것을 알 수 있었다.

더군다나 전압이 무릎 전압보다 작을 때는 전류가 거의 흐르지 않다가 무릎 전압 이상의 전압을 가해주면 전류가 흐르기 시작하고, 또한 전압의 증가에 따른 전류의 세기 그래프의 기울기가 점점 증가함을 알 수 있었다. (이때 반도체에서 전류가 본격적으로 흐르기 시작하는 시점을 ‘무릎 전압’ 또는 ‘문턱 전압’ 이라고 한다.)

또한 전압이 높아질수록 전압의 증가에 따른 전류의 세기가 증가하는 정도가 점점 증가함을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과를 통하여 알게된 반도체에 무릎전압보다 낮은 전압이 걸리면 전류가 거의 흐르지 않고, 무릎전압과 같거나 보다 높은 전압이 가해지면 전류가 흐른다는 반도체의 특성을 통해 반도체는 가해주는 전압의 크기에 따라 도체와 절연체의 이중적인 성질을 가질 수 있다는 점을 알 수 있었다.

두번째 실험결과에 따르면 발광하는 빛이 색에 따라 발광 다이오드의 문턱 전압이 달라지고, 빨간색, 노란색, 초록색, 파란색 순으로 문턱 전압이 낮다. 즉, 파장이 긴 붉은색 계열의 빛을 내는 발광 다이오드로 갈수록 문턱 전압이 낮아진다는 것 또한 알 수 있었다.

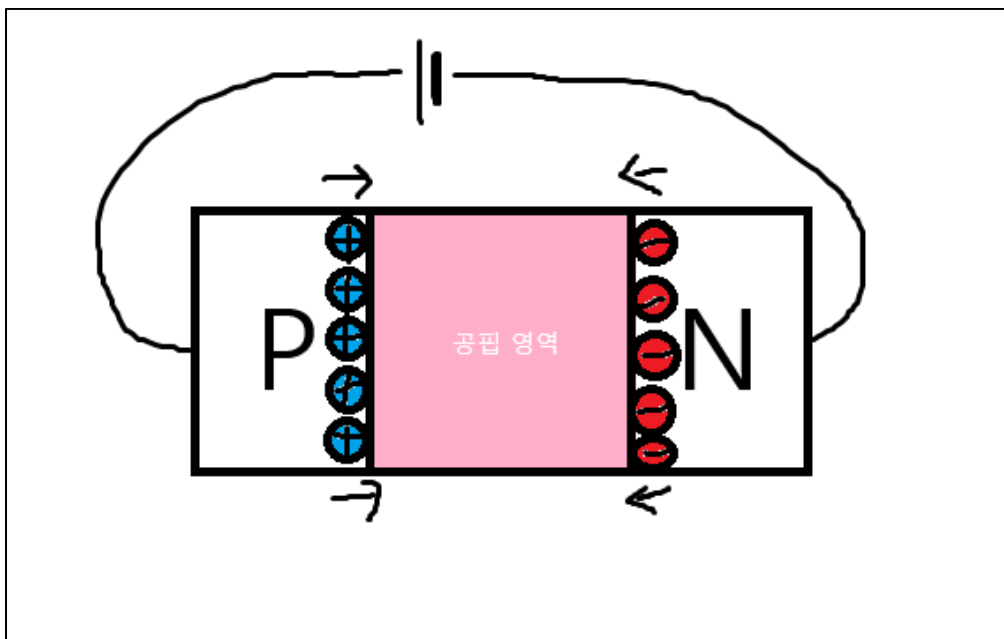
세번째 실험결과에 따르면 발전 중인 태양전지 발전하지 않는 태양 전지는 일반적인 반도체와 크게 다른 점은 없었지만, 발전 중인 태양 전지 그래프는 발전 중이지 않는 태양전지의 전압에 대한 전류 그래프가 전압축 기준으로 옴의 방향으로 평행이동 한 것과 같다. 즉, 발전 중이지 않는 태양전지와 발전 중인 태양전지는 문턱전압과 직류 전원 장치에 의한 전압의 증가에 따라 전류의 세기가 증가하는 정도는 거의 일치하지만 발전 중이지 않는 태양전지가 발전 중인 태양전지보다 어느 전압에서도 전체 전류의 세기가 더 크다. 태양전지가 더 강한 빛을 받으면 더 센 전류를 흐르게 하여 직류 전원 장치에 의한 전압이 같을 때 전체 전류의 세기는 약해진다.

네번째 실험결과에 따르면 반도체 두 개를 병렬로 연결하면 반도체 하나만 연결했을 때와 문턱전압이 같지만 두 개를 병렬로 연결했을 때가 하나만 연결했을 때보다 전압의 증가에 따라 전류의 세기가 증가하는 정도가 더 크다. 따라서 태양전지에 의해 역방향으로 흐르는 전류 등의 외부 요인이 없다면 같은 전압일 때 반도체를 한 개만 연결할 때보다 두 개를 병렬로 연결할 때가 전류의 세기가 더 크다. 반도체 두 개를 직렬로 연결하면 반도체 하나만 연결했을 때보다 문턱전압은 더 높고 전압의 증가에 따라 전류의 세기가 증가하는 정도가 더 작다. 따라서 태양전지에 의해 역방향으로 흐르는 전류 등의 외부 요인이 없다면 같은 전압일 때 반도체를 한 개만 연결할 때보다 두 개를 직렬로 연결할 때가 전류의 세기가 더 작다.

## V. 실험 결과에 대한 의문점과 이유 분석

### 1. 반도체에 무릎전압이 존재하는 이유

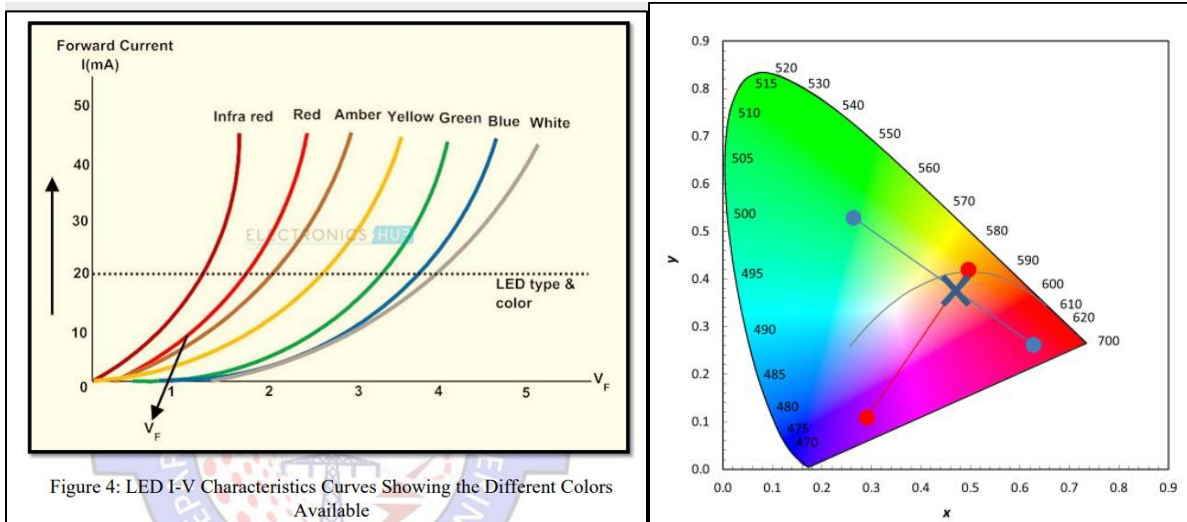
P-N반도체의 P형 반도체에 양극(+)을, N형 반도체에는 음극(-)을 연결한 본 실험과 같이 순방향으로 반도체를 연결하여 가해주는 전압을 점점 높여주면 전자 분포가 많은 N형 반도체에서 P형 반도체쪽으로 전자가 이동하려고 하고, 또한 양공이 많은 P형 반도체에서는 양공이 N형 반도체 쪽으로 이동하려고 한다.



이로 인해 공핍 영역의 폭이 줄어들게 되고, 전위 장벽 또한 낮아져 저항이 낮아짐으로서 전류의 흐름이 용이해지게 된다. 이러한 전류의 흐름이 본격적으로 발생하기 시작하는 시점의 전압을 '무릎 전압' 또는 '문턱 전압' 이라고 한다.

2. 왜 발광 다이오드가 내는 빛의 색에 따라 무릎전압과 이 전압 이후 전압에 따라 전류가 증가하는 정도가 다른가?

발광 다이오드는 발광 파장, 즉 발생하는 빛의 색에 따라 무릎 전압이 발생하는 시점이 달라진다고 한다.



빨간색 LED의 경우에는 600~700, 노란색 LED는 570~580, 초록색 LED는 500~560, 파란색 LED는 470~485으로 방출되는 파장의 길이가 길수록 발생하기 시작하는 시점이 더 빨라진다고 한다. 이때 실험 결과에서의 P-N 접합 LED에서의 파장이 큰 순으로 나열해보면 실제로 파장이 클수록 무릎 전압이 작다는 것을 실제로 확인할 수 있었다. (단위 :  $\lambda$ /ycoord)

이러한 현상은 빛의 에너지와 파장 사이의 관계를 통해 설명이 가능하다.

다음은 빛의 에너지와 파장, 진동수에 대한 관계식이다.

$$E = h\nu = h\left(\frac{c}{\lambda}\right) = \frac{hc}{\lambda}$$

$h$ 는 플랑크 상수( $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$ )이고,  $c$ 는 빛의 속도이며,  $\nu$ 는 빛의 진동수,  $\lambda$ 는 빛의 파장이다.

$E = hc/\lambda$  라는 식을 통해 빛의 에너지는 파장과 반비례 관계에 있다는 점을 알 수 있고, 파장이 짧은 빛을 방출하기 위해선 더 많은 에너지가 필요하다는 점을 알 수 있다. 발광 다이오드가 발광하는 원리는 발광 다이오드의 전기에너지를 빛에너지로 전환하여 빛으로 방출한다. 따라서 파장이 더 짧은 빛을 내는 발광다이오드일수록 더 많은 전기에너지가 필요하고 문턱전압이 높아진다.

### 3. 왜 반도체를 직렬 또는 병렬로 연결하면 전류가 증가하기 시작하는 전압과 이 전압 이후 전압에 따라 전류가 증가하는 정도가 달라지는가?

반도체를 직렬 연결하면 문턱 전압이 높아지고 문턱 전압 이후 전압에 따라 전류가 증가하는 정도가 완만해진다. 또한 병렬 연결을 하면 문턱 전압은 낮아지지 않지만 문턱 전압보다 큰 전압에서 전압의 증가에 따라 전류가 증가하는 정도가 급격해진다. 원자가 띠와 전도띠 사이는 불연속적인 띠틈을 가지고 있으므로 전류는 얼마나 많은 전자가 충분한 에너지를 가지고 띠 간격을 뛰어넘을 수 있는냐로 결정된다. 따라서 반도체를 직렬 연결했을 때는 전자가 뛰어넘어야 할 띠 간격이 커지므로 더 큰 전압이 필요하므로 문턱 전압이 높아지고, 저항의 길이가 길어지는 것과 같으므로 저항도 높아져서 전압의 증가에 따라 전류의 세기가 증가하는 정도는 낮아진다. 하지만 반도체를 병렬로 연결했을 때는 띠 간격은 같으므로 문턱 전압은 변하지 않지만 저항의 단면적이 넓어지는 것과 같아서 흐르는 전자가 많아질 것이고 저항도 낮아지므로 전압에 대한 전류의 세기는 높아진다.

## 참고 문헌

- [LED Color Characteristics] - United States Department of Energy, DOE (실험 결과에 대한 의문점과 이유 분석)

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/led-color-characteristics-factsheet.pdf>

- [Light Emitting Diodes] - University of Anbar College of Engineering Dept. of Electrical Engineering (실험 결과에 대한 의문점과 이유 분석)

( <https://www.uoanbar.edu.iq/eStoreImages/Bank/6071.pdf> )

물리A

09\_교육용 스텔링 엔진의 PV 다이어그램 측정 및  
분석



# 교육용 스텔링 엔진의 PV 다이어그램 측정 및 분석

손은성 (동도중학교 3학년)

김태유 (월서중학교 3학년)

지도교수 : 주영구 (경북대학교 물리교육학과)

## 초록

스텔링 엔진은 환경 친화적이고 활용도가 높으며, 엔진의 효율 역시 높은 편으로 연구가치가 있다. 정상적으로 작동하고 높은 효율을 가지는 스텔링엔진을 분석하기 위해 시중에 널리 장난감으로 판매되고 있는 스텔링 엔진에 압력 센서와 홀 센서를 장치하여 PV 다이어그램을 측정하였다. 사전에 압력 센서의 전압 변화량과 실제 압력 변화 사이의 관계를 측정하고 이를 이용해 스텔링 엔진의 압력을 측정하는 데 이용하였다. 또한 홀 센서를 통해 시간에 따른 피스톤의 위치와 부피 값을 측정하고 PV 다이어그램을 그려 보았다. 측정된 PV 다이어그램에서 엔진 출력을 구해보고, 등적과정이 이상적으로 일어났을 때와 아닐 때의 차이를 이론적으로 알아보았다.

## I. 서론

교육용 스텔링 엔진은 인터넷에서 쉽게 구할 수 있으며, 교육과학 탐구 주제로 스텔링 엔진을 제작하려는 시도를 자주 보았는데 실제로 제작에 있어서 많은 실패 사례를 보았기 때문에 왜 제작이 그렇게 어려운지 관심이 생겼다. 스텔링엔진은 작은 온도차에서도 작동하므로 태양열, 지열, 화석연료, 차가운 대기 등 다양한 조건을 활용할 수 있다. 또, 폐쇄형 사이클로 작동유체를 외부로 배출하지 않고 재사용하므로 친환경적이고, 폭발행정도 없어 내연기관보다 비교적 소음이 적은 편이다. 이러한 장점들로 앞으로의 다양한 활용이 기대되며, 스텔링 엔진의 원리를 이해하고 실제 작동하는 스텔링엔진의 PV 다이어그램을 직접 측정해보고 분석을 통해 실제 교육용 스텔링 엔진 제작에 있어 개선할 점을 연구하고자 하였다.

## II. 이론적 배경

스텔링엔진은 밀폐된 공간 내부의 유체의 팽창 및 수축으로 외부의 열에너지를 기계 에너지로 전환하는 기관이다. 외부에서 연소시켜 발생시킨 열을 이용하는 외연기관이며, 알파, 베타, 감마형의 3종류로 분류된다. 이 연구에서는 감마형 스텔링엔진을 사용하였으며, 그 구조와 원리는 다음과 같다[1]. 스텔링 엔진은 그림 1에 나온 것과 같이 크게 A, B, C, D 네 부분으로 나누어지고 각 역할은 다음과 같다.

A 부분은 파워 피스톤(power piston)이고 파워 실린더 내부의 부피를 변화시켜 유체를 압축, 팽창시킬 수 있다. B 부분은 디스플레이서 피스톤(displacer piston)이고 디스플레이서 실린더 내부의 부피는 변화시키지 않지만 유체를 가열부와 냉각부로 이동시킨다. 이는 또한 열에너지를 일부 저장하여 다음 사이클 때 재사용할 수 있도록 해주는 재생기의 역할을 한다. C 부분은 플라이휠(flywheel)이고 회전축에 부착된 바퀴의 관성으로 엔진의 운동을 안정시키고 운동에너지 형태로 남은 에너지를 저장한다. D 부분은 공기 배관(air plumbing) 이고 공기배관으로 A와 B를 연결시켜 유체가 그 사이로 이동할 수 있게 한다.

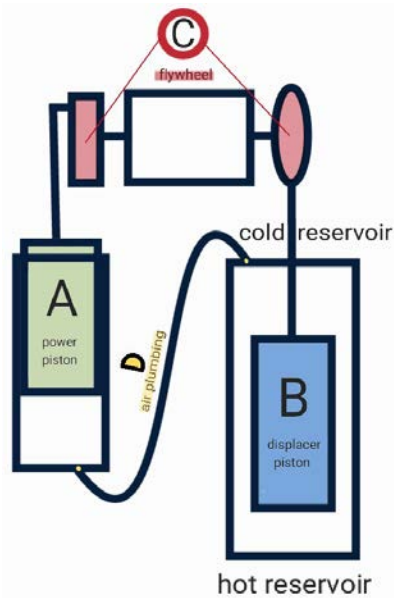


그림 1. 스텔링 엔진 개념도

스털링 엔진은 4개의 행정 또는 4개의 과정으로 진행된다. 첫 번째 과정은 가열부에서 열에너지를 작동유체가 흡수하면 부피가 일정하므로 압력이 증가해 파워 피스톤이 팽창한다. 이때, 흡수한 열이 모두 부피를 증가시키는 일을 하는 등온 팽창이 일어난다. 이에 동력이 발생해 운동에너지 형태로 회전축에 저장된다. 두 번째 과정은 발생한 동력에 따라 회전축이 회전하며 연결된 디스플레이서 피스톤이 가열부로 이동한다. 그러면, 작동유체는 냉각부로 이동해 열을 방출하면서 일정한 부피에서 온도가 내려가며 등적 냉각하게 된다. 세 번째 과정에서는 냉각부에서 열에너지를 작동유체가 방출하면 부피가 일정하므로 압력이 감소해 파워 피스톤이 수축한다. 이때, 방출한 열에 의해 부피가 감소하고 온도는 일정한 등온 압축한다. 네 번째 과정에서는 파워 피스톤이 압축되며 연결된 디스플레이서 피스톤이 다시 냉각부로 이동하고, 작동유체가 가열부에 인접하게 되며 열을 흡수하면서 일정한 부피에서 온도가 증가하며 등적 가열한다. 이와 같이 기체가 열을 흡수 방출하며 수축, 팽창 할 뿐만 아니라 회전축에 다음 행정을 위한 에너지가 저장되므로 위와 같은 4행정을 반복하며 순환한다.

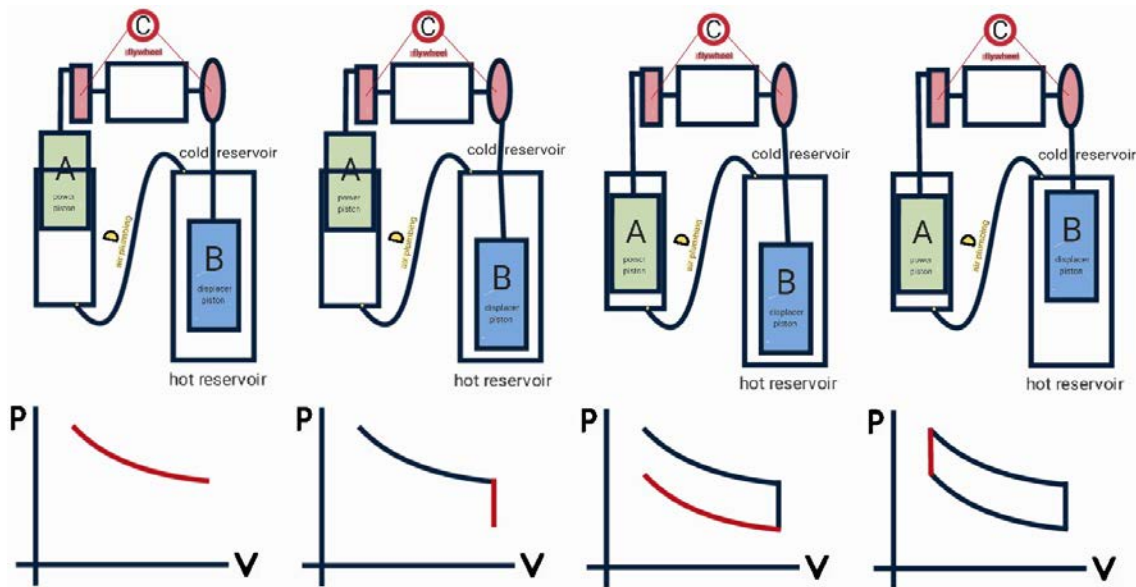


그림 2. 스티링 엔진 4 행정 설명도[1]

### III. 연구방법

#### 1) 압력 센서 캘리브레이션

압력 센서(MPS20N0040D)는 아두이노와 그림 3-(a)와 같이 연결하여 압력을 측정한다[2]. 압력 센서의 전압 변화와 실제 압력 변화 사이의 관계를 알기 위해서 센서의 캘리브레이션을 해야 하는데 이 실험에서는 주사기와 압력 센서를 실리콘 고무 호스로 연결하고 주사기의 부피를 변화시킴으로써 압력 변화를 주고 그때 센서값을 기록하여 수행하였다. 아두이노의 아날로그 입력에 연결하는 신호를 전압계에 병렬 연결하여 직접 센서 전압을 재는 방법도 측정값을 확인하는데 사용하였다.

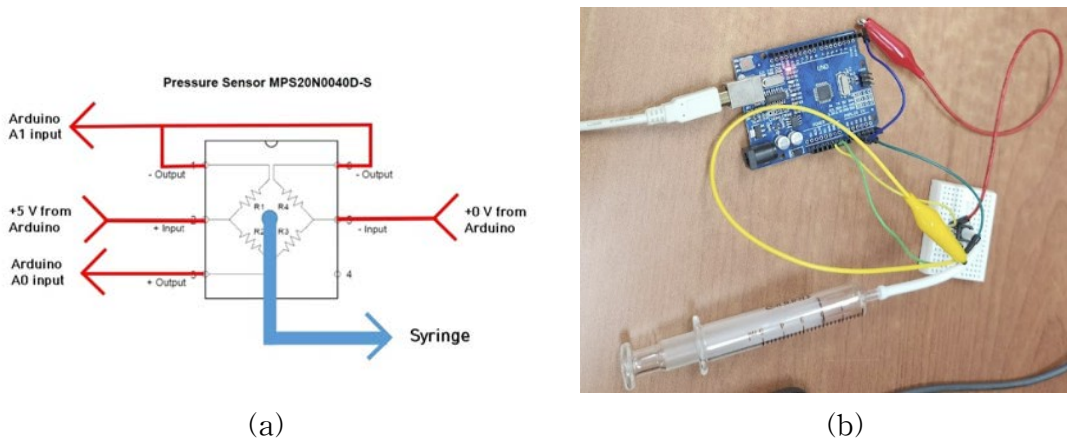


그림 3. 압력 센서와 아두이노 연결도 및 주사기를 사용한 캘리브레이션 모습

시리얼 모니터는 아두이노 1.8.10 버전에서 제공하므로 이를 이용해 그림 4와 같이 프로그램한다. delay(T) 함수는 측정 후 T msec만큼 기다림을 뜻하고, i<k에서 i 측정이 k번 만큼 반복한다. 위 사진의 경우 10\*400= 4000, 총 약 4초 동안

10msec마다 400번 측정한다는 뜻이다. 시리얼 모니터를 키고, 프로그램을 업로드한다. 가변저항과 고무호스의 연결이 느슨한 경우 공기의 출입에 의해 값이 영향을 받으므로 빠르게 주사기의 부피를 변화시켜 시리얼 모니터에서 피크를 찾는다. 이때, 엑셀에 값을 옮겨 그래프를 그리면 좀 더 쉽게 찾을 수 있다. 4번 진행하여 각 부피 변화에 따른 전압값의 평균값을 구한다. 아날로그값을 디지털값으로 변환하는 과정에서 5V를 1024단계로 나눴으므로 아두이노 숫자 값 1이 약 5 mV를 의미한다. 이후 이 값을 엑셀에 옮겨 엑셀을 통해 정리하고 계산하였다.

```

ReadAnalogVoltage | 아두이노 1.8.10
파일 편집 스케치 툴 도움말
ReadAnalogVoltage

int j=0;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {

  if(j == 0) {
    for(int i=0; i<400; i++)
    {
      // read the input on analog pin 0:
      int sensorValue0 = analogRead(A0);
      int sensorValue1 = analogRead(A1);
      // print out the value you read:
      Serial.println(sensorValue0-sensorValue1);
      delay(10); // delay in between reads for stability
    }
    j=j+1;
  }
}

업로드 완료
스케치는 프로그램 저장 공간 1970 바이트(6%)를 사용, 최대 32256 바이트.
기억 변수는 총적 메모리 190바이트(9%)를 사용, 1856바이트의 지역변수가 남음. 최
27

```

그림 4. 아두이노 압력 센서 측정 프로그램

ini v (초기 부피)와 fin v (나중 부피)를 기록해 두고, 연결했던 고무 호스의 부피 0.2 mL를 더해 real ini v (실제 초기 부피)와 real fin v (실제 나중 부피)를 구한다. 이후, ini p (초기 압력)을 대기압인 1로 설정하고, (real ini v)\*(ini p) = (real fin v)\*(fin p)을 이용하여 fin p(나중 압력)를 구했다. 주사기에서 체적이 변할 때 압력과 체적의 곱이 일정하다는 보일의 법칙을 적용하였다. fin p - ini p = Δp (압력변화량)을 구했다. 아두이노에서 측정된 전압값 \* 5를 하여 fin mv(나중 전압값의 평균) - ini mv (초기 전압) = Δmv (전압변화량)을 구해 각각 y, x축으로 사용하여 전압변화량에 따른 압력변화량의 그래프를 그리고, 추세선을 통해 그 식을 확인한다. 계산을 위한 엑셀 파일을 그림 5에서 보이고 있으며, 압력 센서의 전압과 압력 사이의 관계 그래프는 그림 6에 나타내었다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ini v	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
2	fin v	1	1.2	1.4	2.4	2.6	2.8	3	3.2
3	real ini v	2	2	2	2	2	2	2	2
4	real fin v	1.2	1.4	1.6	2.6	2.8	3	3.2	3.4
5	ini p	1	1	1	1	1	1	1	1
6	fin p	1.66666666	1.42857142	1.25	0.76923076	0.71428571	0.66666666	0.625	0.58823529
7	Δp	0.66666666	0.42857142	0.25	-0.23076923	-0.28571428	-0.33333333	-0.375	-0.41176470
8	ini mv(oltage)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
9	fin mv(oltage)	97.6	72.65	44.3	-31	-40	-51.5	-60.1	-64
10	Δmv(oltage)	94.8	69.85	41.5	-33.8	-42.8	-54.3	-62.9	-66.8

그림 5. 압력 센서 캘리브레이션용 엑셀 파일

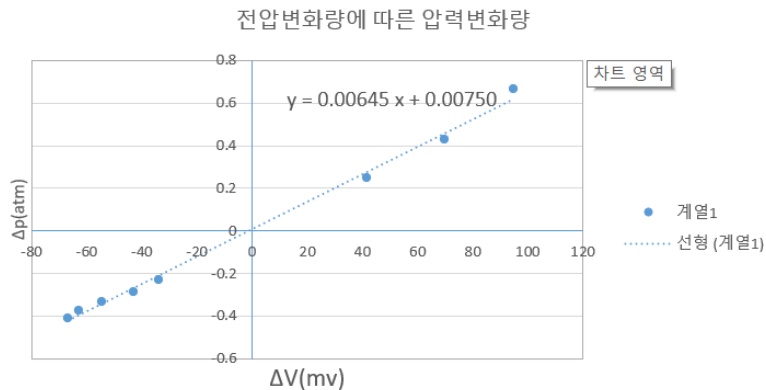
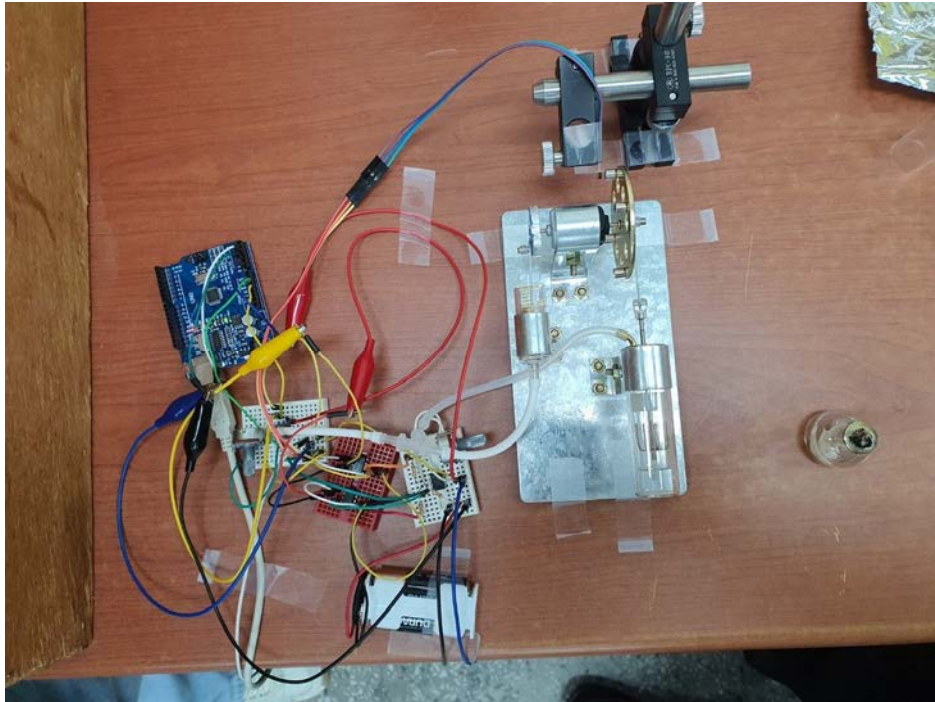


그림 6. 압력 센서 측정 전압과 압력 변화 관계

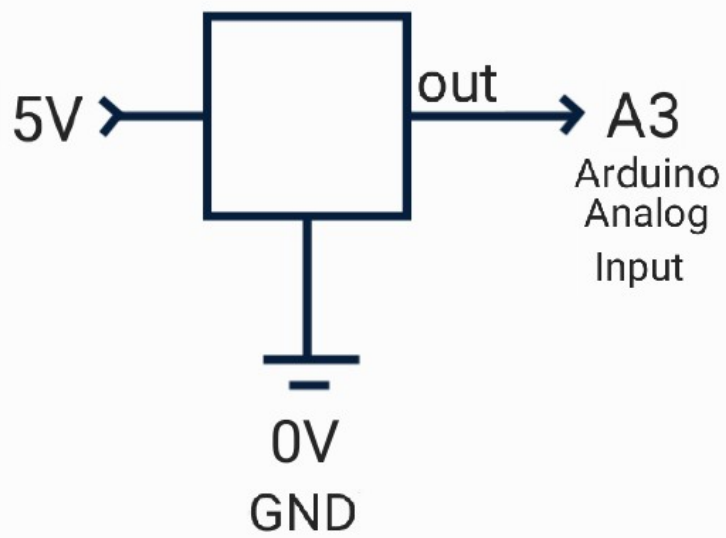
## 2) 스텔링 엔진의 압력 및 위치 측정

전체적인 실험 장치의 설치는 그림 7-(a)에 나온 것과 같다. 스텔링 엔진의 밀폐된 내부압력의 측정을 위해 파워 피스톤과 디스플레이서 피스톤을 연결하는 공기배관을 T자형 호스로 바꾸고 호스를 휘스톤 브릿지 압력 감지 센서와 연결한다. 스텔링 엔진의 시간에 따른 내부 부피 변화를 확인을 위해 플라이 휠에 약 90도를 간격으로 자석 4개의 방향을 번갈아 가며 반대로 부착해 자기장의 방향이 번갈아 가며 변하고, 플라이 휠 가장자리(원주)로부터 거리를 일부 조정하여 각 자석마다 자기장 값의 차이를 만든다. 플라이 휠 뒤쪽에 거치대에 홀센서(WSH1 3 5) [3]를 테이프에 부착한 후 세워두고, 홀 센서가 자석의 자기장 값을 감지해 아두이노에 보낼 수 있도록 그림 7-(b)처럼 아두이노와 연결한다. 또한 압력 센서와 홀센서 값을 동시에 측정하고, 더 짧은 시간 간격으로 데이터를 측정하기 위해 delay(5)로 그림 7-(c)와 같이 수정했다.



(a)

## Hall Sensor WSH135



(b)

ReadAnalogVoltage2 | 아두이노 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)

파일 편집 스케치 툴 도움말



```
ReadAnalogVoltage2
Attach the center pin of a potentiometer to pin A0, and the ou

This example code is in the public domain.

http://www.arduino.cc/en/Tutorial/ReadAnalogVoltage
*/

int j=0;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}

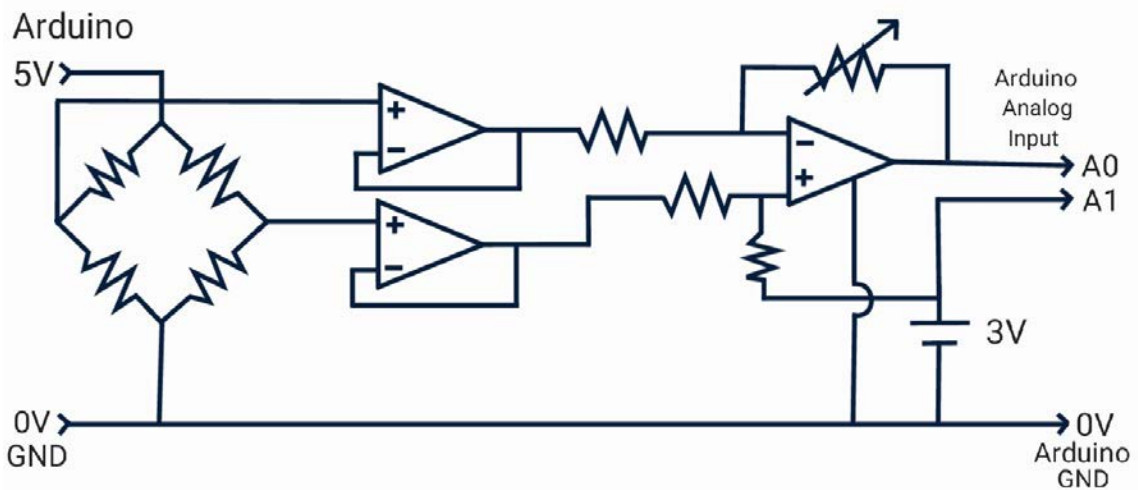
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {

  if(j == 0) {
    for(int i=0; i<400; i++)
    {
      // read the input on analog pin 0:
      int sensorValue0 = analogRead(A0);
      int sensorValue1 = analogRead(A1);
      int sensorValue3 = analogRead(A3);
      // print out the value you read:
      Serial.print(sensorValue0-sensorValue1);
      Serial.print(" ");
      Serial.println(sensorValue3);
      delay(5);      // delay in between reads for stability
    }
    j=j+1;
  }
}
```

(c)

Hall sensor value  
1) 900 : P\_max V\_min  
2) 660:  
3) 335: P\_min, V\_max  
4) 535:

(d)



(e)

그림 7. 실험에 사용된 (a) 장치 셋업, (b) 홀 센서 회로도, (c) 아두이노 프로그램, (d) 위치에 따른 홀 센서 측정 값 및 (e) 전체 회로도

반지름과 길이를 측정해 호스의 부피를 계산하고 (1.0 mL), 디스플레이서 실린더는 부피 값에 변화가 없으므로 전체 실린더에서 디스플레이서 피스톤의 부피를 빼 계산하면 7.4 mL이고, 파워 피스톤은 부피가 최소일 때와 최대일 때 각각의 길이와 반지름을 측정해 부피를 구하면 최대 2.5 mL이고, 최소 0.5 mL이다. 그리고, 각 자석이 홀센서를 지나는 시점마다 피스톤 지지대에 가려져 길이를 제대로 알 수 없는 상태의 부피를 구하기 위해 파워 피스톤 실린더의 끝을 기준으로 피스톤 끝까지를 mm단위로 측정해 바깥으로 나가면 +, 안쪽으로 들어오면 -라 표기한다. 회전 방향 순으로 +7.6 mm, +3.3 mm, -9.0 mm, -1.7 mm 이고, 파워 실린더의 눈금을 측정해보면 길이로 8.1 mm당 1 mL이므로, 최대 부피일 때 10.9 mL(=2.5 mL+8.4 mL) 이므로, 이를 기준으로 다음 위치까지의 mm 단위의 위치 변화량을 8.1로 나눈 만큼 더해준다. 그러면 각 부피는 회전 방향 순으로 10.9 mL, 10.4 mL, 9.8 mL, 8.9 mL로 최소 부피일 때  $((-9.0 - 7.6) / 8.1 = -2.04)$  (10.9 - 2.0 = 8.9)의 값이 (0.5+8.4=8.9 mL) 동일해지므로 어느 정도 정확함을 알 수 있다. 그리고 아두이노 프로그램을 업로드하고, 플라이휠을 부피가 최대일 때부터 천천히 회전시켜 그림 7-(d)와 같이 각 부피 값일 때의 홀센서 값을 확인한다.

압력 센서 측정값이 너무 작아서 잡음에 묻히기 쉽기 때문에 휘스톤 브릿지 압력 센서 바로 다음에 증폭기를 설치했다. 증폭기는 LM741 OP AMP(Operational Amplifier) 사용하여 차동 증폭기[4]를 구성했다. 이때, 센서 출력 전압을 차동 증폭기 입력에 그대로 전달 해주기 위해 버퍼 회로(buffer 또는 voltage follower)[5]를 설치하며 아두이노 아날로그 입력 포트의 측정값 1이 약 5 mV를 의미하므로 실제 전압과 아두이노의 숫자 값이 동일해졌고 노이즈도 감쇄시켜준다.

장치 셋업이 완성되면 알코올램프를 이용하여 스텔링 엔진을 작동시키고, 아두이

노의 시리얼 모니터를 켜둔 상태로 프로그램을 업로드한다. 마지막으로, 시리얼 모니터의 값을 Ctrl A, Ctrl C 하여 메모장에 Ctrl V 하고 이를 저장한다. 이후, 엑셀>파일>열기>저장한 메모장 파일>다음(N)>위의 구분기호 - 공백(S) > 마침(F) 을 통해 값을 엑셀에 불러온다. 불러온 값 앞에 1씩 증가하는 수평축을 추가해 다음과 같이 각각의 그래프를 그린다. 이때 수평축은 시간 스텝을 나타내는 것으로 1 스텝은 프로그램에서 시간 증가량인 5 ms 에 해당한다.

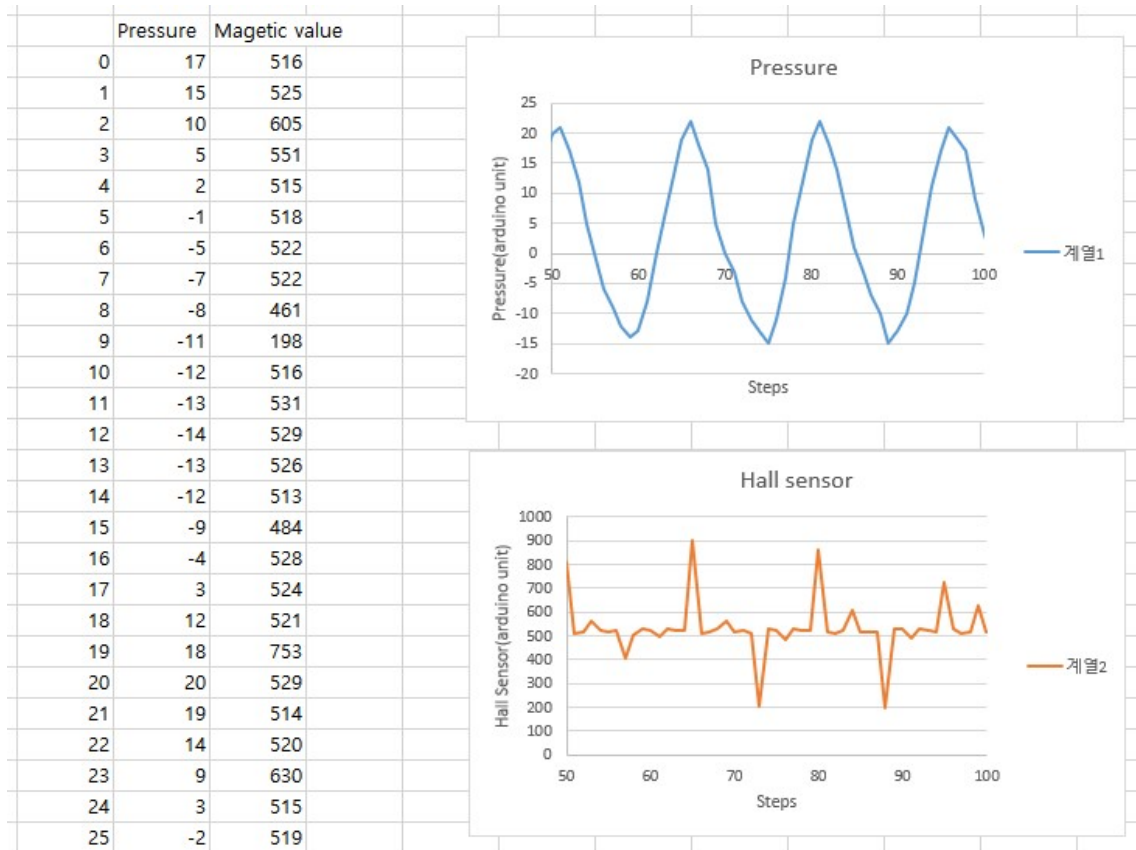


그림 8. 일정 시간 간격(5 ms)으로 아두이노가 측정해낸 압력 센서 값과 홀 센서 측정 값

#### IV. 연구결과

그림 8에서 최솟값과 최댓값 사이 부분만 자세히 확인해보며 홀 센서의 한 주기, 즉 스텔링엔진의 한 주기 동안의 전압값을 (0일 때를 대기압 기준으로 하며, 측정값이 변화량 값과 같게 함) 그림 6에서 구한 캘리브레이션의 추세선 식을 사용하여 실제 압력 값으로 변환시키고, 그때의 홀 센서값을 통해 실제 부피 값으로 변환시킨다. 홀 센서는 그림 8에서와 같이 홀 센서 그래프의 피크 위치를 통해 파워 피스톤의 4 개 위치를 추정할 수 있다. 4개 위치 사이에서는 플라이휠의 각속도가 일정

해 그림10의  $\angle AOH = \theta$ 가 시간에 따라 일정하게 변화한다고 가정하여 구한다. 그림 10에서  $\overline{AB} = \ell = 24mm$ ,  $\overline{AO} = r = 13mm$ 이라하면  $\overline{AH} = r\sin\theta, \overline{OH} = r\cos\theta$ ,  $\overline{BH} = \sqrt{\ell^2 - r^2\sin^2\theta} = \overline{BH} + \overline{OH} = \sqrt{\ell^2 - r^2\sin^2\theta} + r\cos\theta$ 이다.  $\theta = 0^\circ$  일 때  $\overline{BO} = 37mm$ 으로 부피가 8.9ml, 최소이고,  $\theta = 180^\circ$  일 때  $\overline{BO} = 11mm$ 으로 부피가 10.9ml, 최대이다. 따라서  $\overline{BO}$ 가 26mm커지니 부피가 2ml줄을 이용해 그림 11와 같은 PV 다이어그램을 얻어낸다.

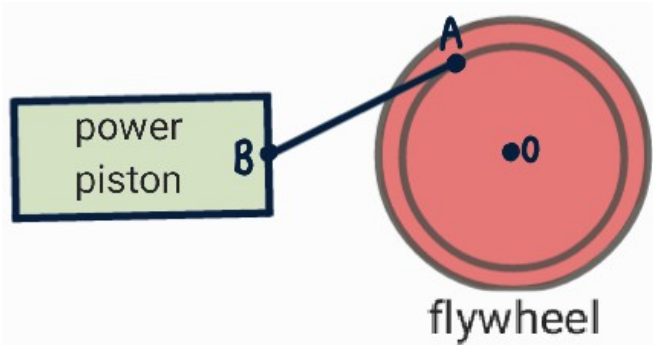


그림 9. 파워피스톤과 플라이휠의 연결 형태

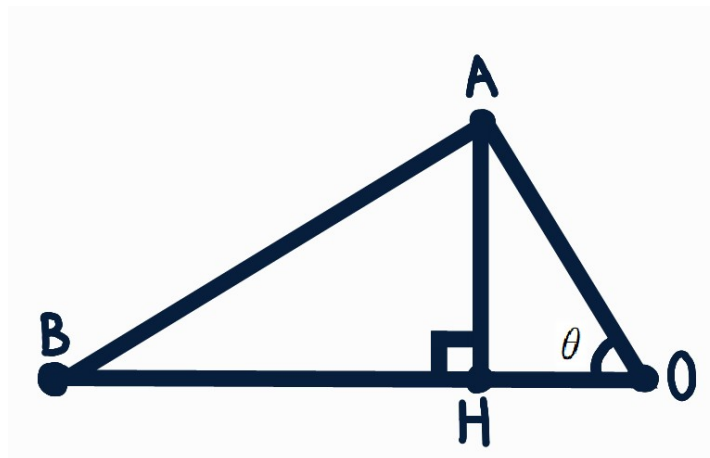


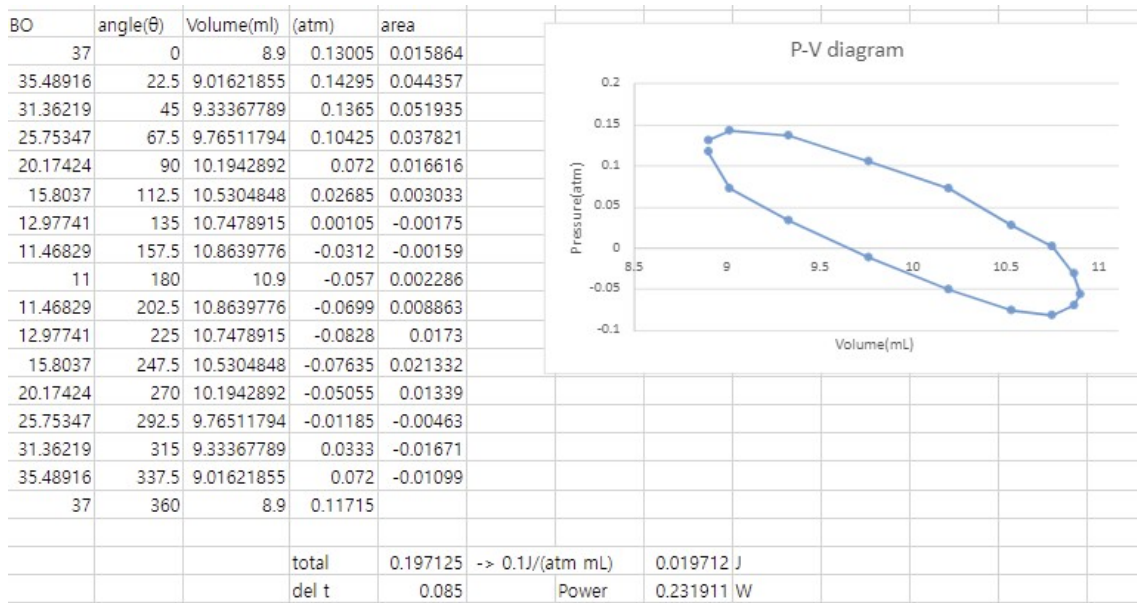
그림 10. 수식계산의 편리를 위한 연결 모식도

=8.9+(37-A5)\*2/26

A	B	C	D	E
BO	angle( $\theta$ )	Volume(ml)	(atm)	area
37	0	8.9	0.13005	0.015864
35.48916	22.5	9.01621855	0.14295	0.044357

그림 11. 엑셀에서 각 위치의 체적을 구하는 공식

그림 121. 측정된 스텔링 엔진의 PV 다이어그램



PV 다이어그램에서 사이클을 이루는 폐곡선 사이의 면적은 스텔링 엔진이 해준 일의 양이 된다. 그래프 면적은 그림 13과 같이 엑셀에서 미분 사각형이나 사다리꼴의 면적을 더하는 적분 방식을 이용해 계산할 수 있다. 측정된 PV 다이어그램으로 둘러싸인 면적을 구하면 0.197125 이고, 단위가 atm mL이고 1 atm mL은 0.1 J 이므로 결국 한 주기 동안 약 0.197125 J의 일을 하였고, 총 17개의 시간 스텝이고 한 스텝 당 0.0050 s(아두이노 기준)이라 생각해보면 총 시간은 0.0050\*17 =0.085 s이므로 스텔링 엔진은 0.197125 J/0.085 s= 0.231911W의 일률(Power)을 보이고 있다.

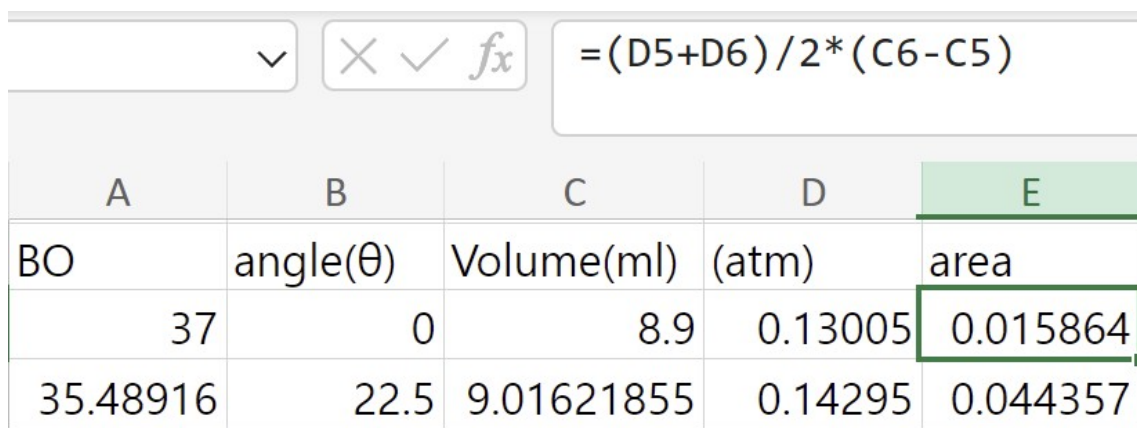


그림 13. 엑셀에서 PV 다이어그램의 면적을 계산하는 공식

## V. 결론 및 제언

이상적으로 등적 냉각과 등적 가열이 일어나나 실제 스텔링엔진에서 그 일부만 일어난다. 스텔링엔진의 효율을 높이기 위해서는 등적 작용이 더 잘되도록 실링이 더 잘되게 하고,, 가열부와 냉각부의 온도차를 증가시키거나 재생기의 소재를 변형시켜 열을 더 저장하는 방법이 있을 것이다. 또한, 앞으로 플라이휠의 질량에 따른 에너지 저장능력과 속도를 고려하여 가장 이상적인 플라이휠의 형태를 찾아봐야 할 것이다.

## VI. 참고문헌

- [1] [https://a1384-240719.cluster8.canvas-user-content.com/courses/1384~1159/files/1384~240719/course%20files/apb11o/labs/L209/L28\\_stirling.htm](https://a1384-240719.cluster8.canvas-user-content.com/courses/1384~1159/files/1384~240719/course%20files/apb11o/labs/L209/L28_stirling.htm)
- [2] [https://softroboticstoolkit.com/files/sorotoolkit/files/mps20n0040d-s\\_datasheet.pdf](https://softroboticstoolkit.com/files/sorotoolkit/files/mps20n0040d-s_datasheet.pdf)
- [3] [http://diwellshop.cafe24.com/web/DATASHEET/01\\_subtitle/1\\_Sensor/2\\_HallSensor/4\\_LinearIC/WSH135.pdf](http://diwellshop.cafe24.com/web/DATASHEET/01_subtitle/1_Sensor/2_HallSensor/4_LinearIC/WSH135.pdf)
- [4] [https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_5.html](https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_5.html)
- [5] <https://ultimateelectronicsbook.com/op-amp-voltage-buffer/>

물리A

## 10\_우리주변의 블루라이트 탐구



# 우리 주변의 블루라이트 탐구

나윤성 (홍천중학교 2학년)  
박건우 (남춘천중학교 3학년)  
임성재 (강원중학교 2학년)  
홍진원 (남춘천중학교 2학년)

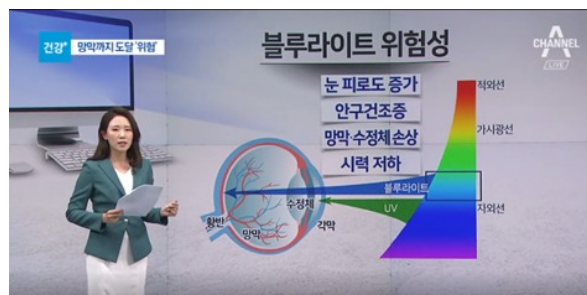
지도교수 : 홍성주 (강원대학교 과학교육학부)

## 초록

본 연구에서는 일상생활에서 쉽게 찾아볼 수 있는 다양한 광원들의 가시광선 영역대의 스펙트럼을 조사하여 블루라이트 특성을 확인한다. 그 후, 블루라이트를 줄이기 위한 방법들을 조사하여 그 효과를 확인한다.

## I. 서론

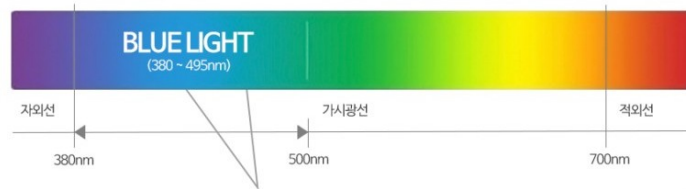
현대에 들어서 눈 건강의 필요성이 중요해졌다. 핸드폰 등의 디스플레이에서 나오는 빛이 눈 건강에 좋지 않다는 뉴스 기사들이 있고, 그 중 블루라이트는 눈 건강을 해치는 주범이라고 여럿 보도했다. 그 소식을 접한 뒤로 우리는 블루라이트에 대해 호기심이 생겨 블루라이트에 대해 찾아보았고, 여러 유명 대학에서도 블루라이트의 악영향에 대해 서술해 놓은 논문을 발견했다. 그리하여 우리는 일상생활에서 나오는 빛을 분석하고, 블루라이트가 눈에 들어오는 것을 효과적으로 막을 방법을 찾고자 이 실험을 계획했다.



## II. 이론적 배경

### 1. 가시광선

가시광선은 인간이 눈으로 볼 수 있는 빛의 한 부분으로 파장의 영역대는 (380—750 nm)이고, 그 중 블루라이트는 약 500 nm이하의 파장을 가진 파란색 계열의 빛이다.



## 2. 분광기

분광기란 빛의 파장에 따라 분석하고 측정하는 기기이다. 빛은 여러 파장을 가지고 있는데 분광기는 그 빛을 파장별로 분리해 파장에 따른 특성을 측정하고 분석할 수 있다.

## 3. 블루라이트의 영향에 대한 선행 연구

블루라이트는 다른 가시광선과 다르게 각막을 통과, 망막에 침투해서 단백질을 변형시키고 끝내 세포를 죽게 한다. 하버드 연구진들은 밝기가 거의 같은 블루라이트와 초록색 빛을 같은 시간 노출시킨 결과 블루라이트가 멜라토민 분비를 약 2배 억제했고 일주기 리듬을 두 배 더 많이 변경시켰다.

## Ⅲ. 연구 방법

### 1. 실험 도구

다양한 광원: 햇빛, LED, 핸드폰

분광기: 아래 그림의 HCPS-320 모델을 사용함. 해당 분광기는 계열 분광 조도계이고, 측정 범위는 380—780 nm이다. 기기의 흰 원 부분은 빛을 흡수하고 기기 안에서 빛을 분석하여 화면에서 스펙트럼으로 보여진다.



필름: 선글라스 렌즈, 기기의 블루라이트 차단 기능, 블루라이트 차단 안경 3종



안경 1



안경 2

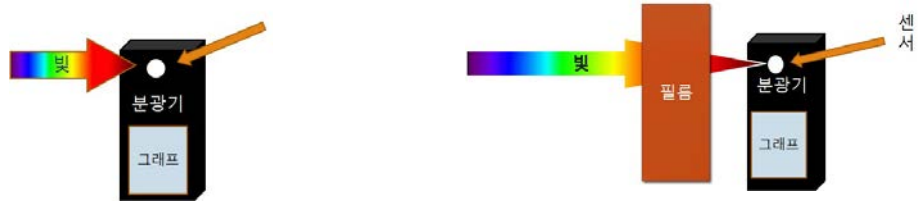


안경 3

## 2. 실험 방법

- ㄱ. 실생활에서 사용하는 여러 가지 광원에서 나오는 빛의 블루라이트 세기 측정
- ㄴ. 여러 가지 광원에서 나오는 빛에 블루라이트를 막아줄 필름을 설치
- ㄷ. 필름을 투과해 나온 빛의 블루라이트 세기와 설치 전의 블루라이트 세기 비교

실험 모식도

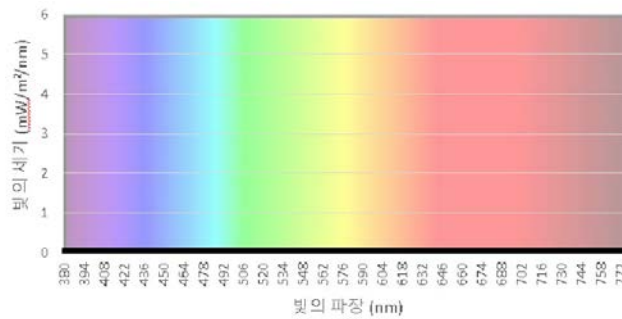


#### IV. 연구 결과

##### 1. 실험 결과

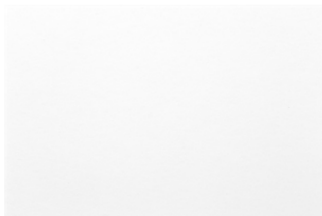
###### 실험1. 분광기 특성 평가

빛이 들어오지 않는 완전한 암막 환경에서의 분광기 특성 평가를 진행함. 실제로 암막 환경인지 측정해 본 결과 다음 그래프처럼 빛의 세기 값이 완전히 0인 것을 볼 수 있음. (검정선)

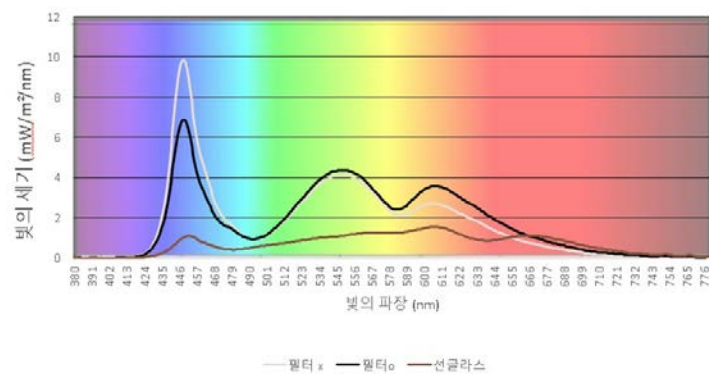


###### 실험2. 핸드폰 디스플레이 분광 특성 평가

###### ㄱ. 핸드폰의 흰색 화면(S사 제품)



측정 화면

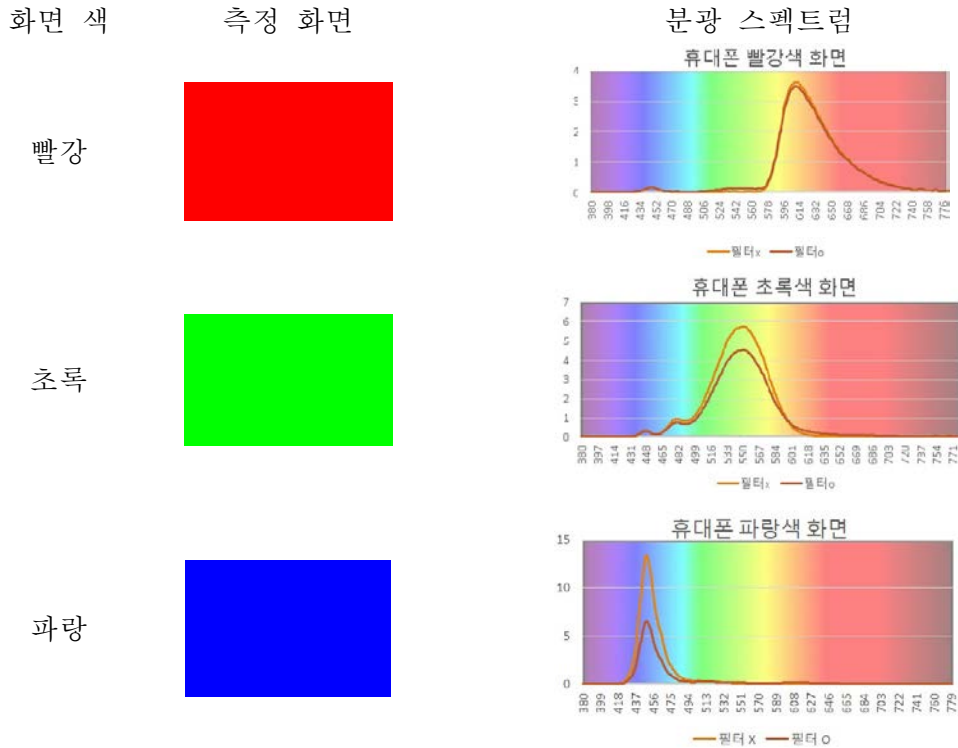


분광 스펙트럼 (흰색화면, 흰색화면+자체필터, 흰색화면+선글라스)

먼저 S사 제품의 흰색 화면을 분광기에 필터를 대지 않고, 제품 내 자체 필터를

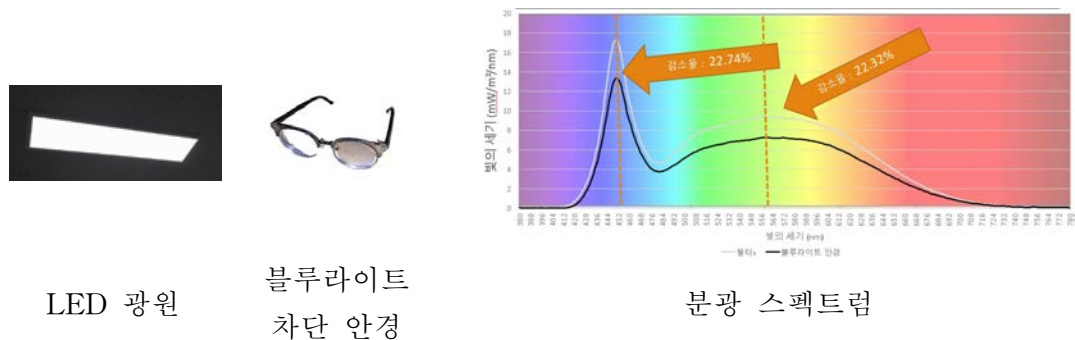
대고, 선글라스를 대고 분광기로 측정해 본 결과 역시 모든 수치 중 블루라이트 계열인 420—480 nm대가 가장 높게 나왔고 제품 자체 필터를 사용했을 때 다른 색 계열들은 감소치가 낮게 나왔는데 블루라이트 계열은 감소치가 높게 나왔고 선글라스를 사용했을 때는 일정 색 계열들만 줄어드는 것이 아닌 전체적으로 비슷한 값으로 감소했던 것을 알 수 있다.

#### 나. 핸드폰의 색상별 화면(S사 제품)



제품 내장 필터의 효과를 더 확실하게 알기 위해 흰색 화면만이 아닌 빛의 삼원색인 빨간색, 초록색, 파란색의 화면을 비교해본 결과, 역시 빨간색, 초록색은 감소량이 크지 않은 반면에 파란색은 감소량이 큰 것을 볼 수 있다.

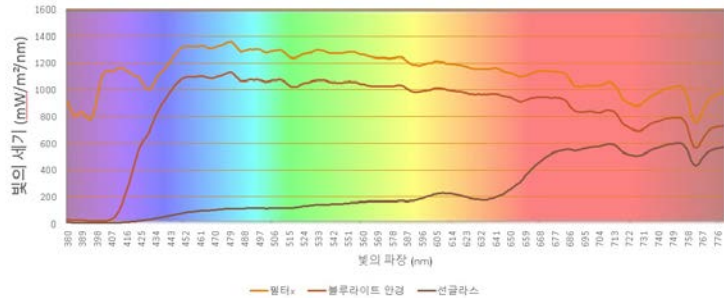
#### 실험 3. LED 광원 (+ 블루라이트 안경)



LED등의 결과 역시 블루라이트 계열인 420—480 nm대의 감소량이 다른 색 계열

보다 큰 것을 볼 수 있다.

#### 실험 4. 햇빛 (+ 블루라이트 안경)



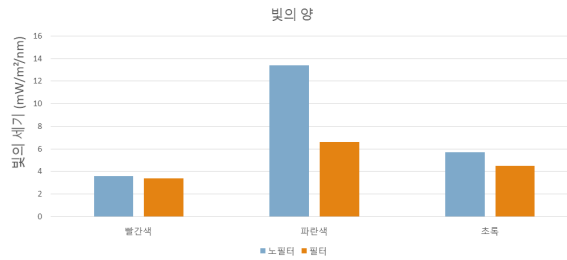
촬영 당시 사진

분광 스펙트럼

가장 쉽게 접할 수 있는 광원인 햇빛의 경우, 블루라이트 안경을 필터로 사용했을 때 블루라이트 계열인 420—480 nm대만 크게 줄어든 것을 볼 수 있고, 선글라스를 필터로 사용했을 때 한 가지 계열이 아닌 전체적으로 모든 계열이 줄어든 것을 볼 수 있다.

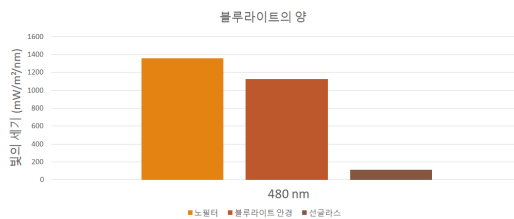
### 2. 실험 결과 분석

#### 분석1. 핸드폰 화면 색상별 빛의 감소량 측정실험



핸드폰 자체의 블루라이트 필터를 사용하였을 때 블루라이트 영역의 파장에서 빛이 많이 감소하는 것을 볼 수 있다.

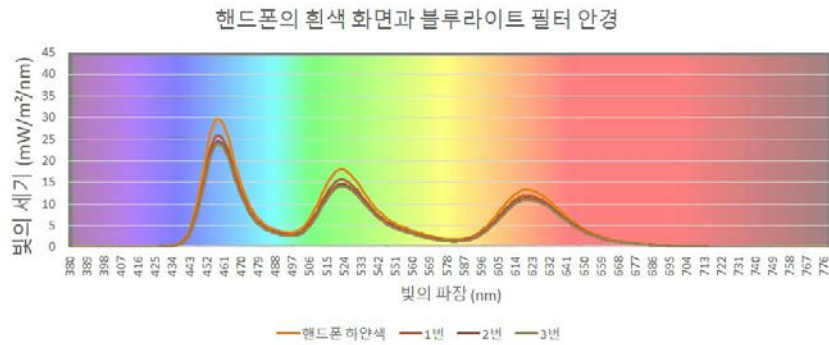
#### 분석 2. 필터별 차단율 실험.



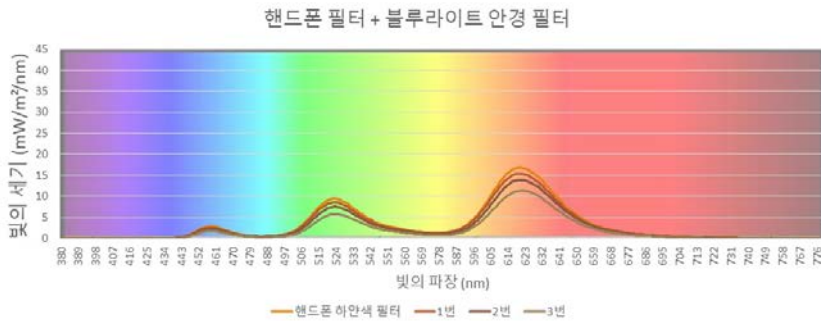
햇빛에서 나오는 블루라이트를 필터링 해 보았을 때는 블루라이트 차단 안경의 효과가 가장 적었고, 햇빛에서는 선글라스가 가장 효과적이었다.

#### 분석 3. 광원별 세 안경의 차단율 측정실험.

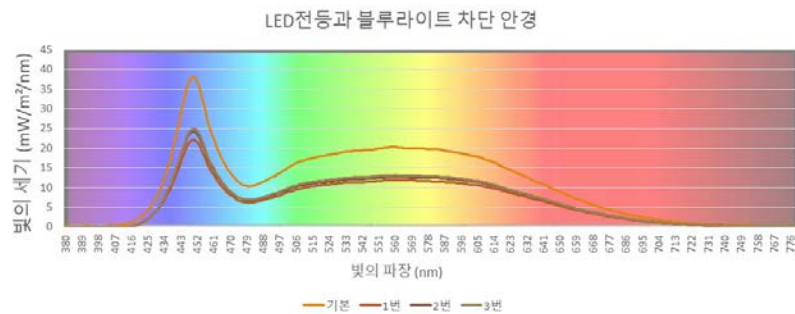
핸드폰 흰색 화면: 핸드폰의 흰색 화면을 블루라이트 안경을 사용해 필터링 할 경우 1번 안경은 13%, 2번 안경은 18%, 3번 안경은 19%의 차단율을 보였다.



핸드폰 화면+화면 필터: 핸드폰 필터를 블루라이트 안경으로 필터링한 경우, 1번 안경은 9%, 2번 안경은 18%, 3번 안경은 32%의 차단율을 보였다.

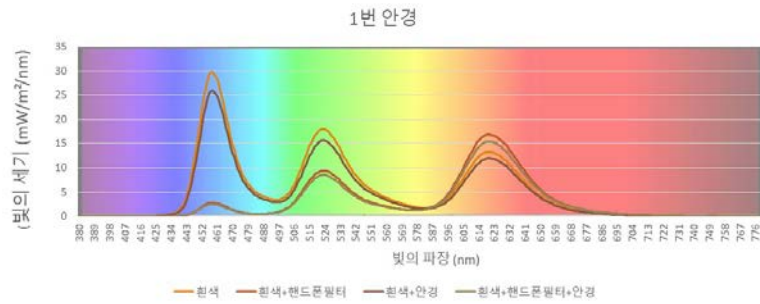


LED 전등: 블루라이트 차단 안경으로 필터링한 경우, 1번 안경은 42%, 2번 안경은 36%, 3번 안경은 34%의 차단율이 나타났다.

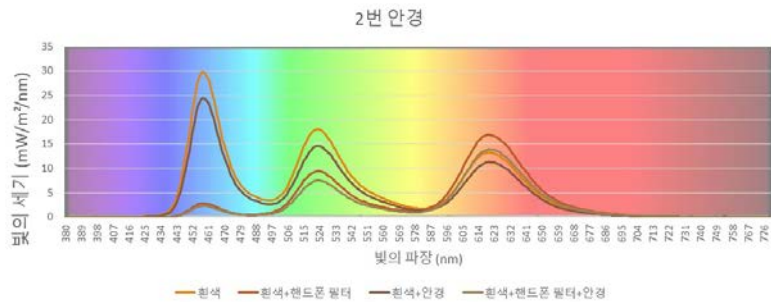


분석 4. 안경별 차단율 비교 실험.

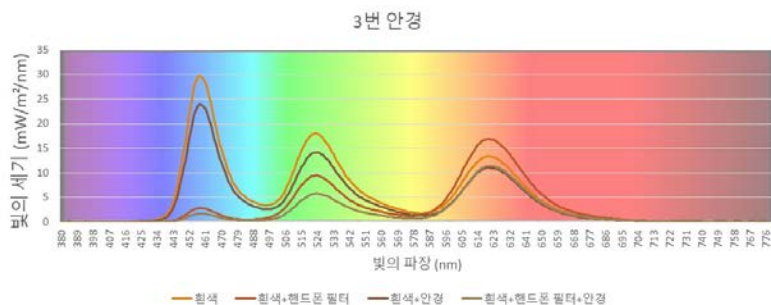
1번 안경: 블루라이트 부분에 해당하는 파장 461 nm에서 핸드폰 필터만의 빛 차단율은 90%, 블루라이트 안경만의 빛 차단율은 12%, 핸드폰 필터와 블루라이트 필터 안경을 함께 사용하였을 때는 91%의 차단율을 보였다.



2번 안경: 빛의 파장 461 nm에서 핸드폰 필터만의 빛 차단율은 90%, 블루라이트 차단 안경만의 빛 차단율은 17%, 핸드폰 필터와 블루라이트 안경을 같이 사용했을 때는 92% 차단율이 나타났다.



3번 안경: 461 nm의 빛을 측정한 결과 핸드폰 필터만의 빛 차단율은 90%, 블루라이트 차단 안경만의 빛 차단율은 19%로 두 가지를 함께 사용하였을 때는 94%의 차단율이 나타났다.



블루라이트 안경을 사용해 실험을 진행하며 블루라이트의 특정 파장만 차단되는 것이 아닌 모든 파장의 빛이 거의 같은 비율로 안경에 흡수되었다. 각각 세 개의 안경의 블루라이트 차단율에는 큰 차이가 없었고, 블루라이트 안경보다 핸드폰 자체 차단 필터의 차단율이 훨씬 높았다. 주변에서 찾을 수 있는 블루라이트 필터로는 선글라스, 블루라이트 차단 안경, 디스플레이 자체 필터(편하게 보기 모드)가 있다. 하지만 블루라이트 차단 안경의 경우 효과가 미미했고, 디스플레이 자체 차단 필터가 더 높은 블루라이트 차단율을 보였다. 때문에 블루라이트 안경만 사용하는 것보다 블루라이트 안경과 자체 필터를 함께 사용할 때 차단율이 훨씬 높아졌다.

## V. 결론 및 제언

실생활에서 블루라이트를 피하기란 거의 불가능하다. 따라서 가급적 디스플레이 보기를 줄이는 것이 좋다. 또 시중에 나와 있는 블루라이트 필터 안경들은 자외선을 막는 기능은 있었으나 디스플레이에서 나오는 블루라이트 효과적으로 막기는 어려웠다. 가급적 디스플레이를 볼 때는, 기기에 내장되어있는 블루라이트 차단 기능을 사용하는 것이 가장 효과적인 방법이다,

## VI. 참고문헌

<https://www.dongascience.com/news.php?idx=36792>

<https://www.hidoc.co.kr/healthstory/news/C0000428738>

Blue light - filtering intraocular lenses: Review of potential benefits and side effects - ScienceDirect

[https://search.zum.com/search.zum?method=image&option=accu&qm=f\\_typing&rd=1&query=%EA%B0%80%EC%8B%9C%EA%B4%91%EC%84%A0+](https://search.zum.com/search.zum?method=image&option=accu&qm=f_typing&rd=1&query=%EA%B0%80%EC%8B%9C%EA%B4%91%EC%84%A0+)

<https://post.naver.com/viewer/postView.nhn?volumeNo=13688844&memberNo=6267494>

물리A

11\_레이저를 활용한 회전모터 내 리사주 도형  
형성 실험과 분석



# 레이저를 활용한 회전모터 내 리사주 도형

## 형성 실험과 분석

김석현 (이현중학교 2학년)

김성현 (연무중학교 2학년)

김형우 (수내중학교 2학년)

서동희 (성북중학교 2학년)

지도교수 : 이경화 (아주대학교 다산학부대학)

### 초록

리사주 도형과 관련된 미술을 보고 리사주 도형에 관심이 생겨 리사주 도형에 대한 탐구를 진행하게 되었다. 리사주 도형은 두 개의 파동이 주기적이고 독립적인 주파수로 진행될 때 생성되는 곡선의 형태를 말한다. 먼저 리사주 도형의 1차원적인 운동인 단조화 운동을 탐구해 보았고, 이후 python이라는 프로그래밍 언어로 시뮬레이션을 만들어 리사주 도형의 주파수 비와 위상차를 변화시켜 가며 리사주 도형의 특징을 살펴보고 나아가 코드를 수정하여 3차원 리사주 도형 또한 구현해 보았다. 이후 회전하는 거울면과 목소리에 의해 떨리는 거울면을 이용하여 리사주 도형을 구현하고 관찰했다. 이를 통해 리사주 도형은 현실에서 다양한 방법으로 구현할 수 있고, 두 개의 정현파가 만나는 경우가 존재하는 분야에서 이용이 가능할 것이라고 결론을 내렸다.

## I. 서론

### 1.1 연구 배경

'pendulum painting'이라는 미술 기법이 있다. 이 기법이 그리는 곡선의 형태에 어떤 패턴이 있음을 눈치챈다. 이 패턴을 알기 위해 이 곡선이 어떤 곡선인지 알아보았는데, 그 곡선이 리사주 도형이었다. 이를 동기로 리사주 도형에 대한 탐구와 여러 가지 방법으로 구현하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

### 1.2 연구의 필요성 및 목적

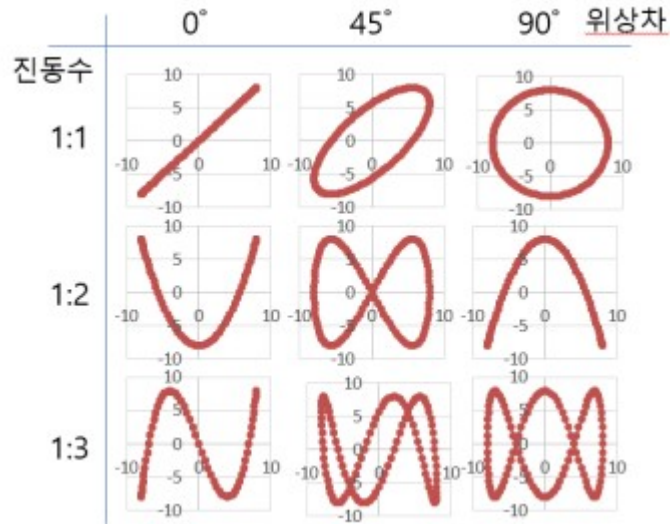
리사주 도형의 생성 원리를 보다 더 깊게 이해하고, 이를 바탕으로 리사주 도형을 실제로 구현해 보면서 리사주의 생성 원리를 자세히 분석해 본다. Python을 통해 리사주 도형의 3차원 개형을 확인해 보고 고차원 리사주 도형의 구현을 시도해 본다.

연구 범위 : 리사주 도형의 개념, 리사주 도형의 생성 원리, 리사주 도형의 프로그램적 구현, 리사주 도형의 실제적 구현

## II. 이론 및 연구 방법

리사주 도형은 두 개의 서로 독립적인 주파수로 진행되는 파동에서 생성되는 곡선의 형태를 말한다. 이때, 두 파동은 서로 수직인 방향으로 진행되는 횡파로 정의된다. 리사주 도형의 형태에 영향을 미치는 값은 두 파동의 진폭, 주파수 차이, 위상차 등이 있다. 특히 오실로스코프를 사용하여 두 개의 서로 다른 주파수를 갖는 신호를 수평축과 수직축에 대응시켜 그려낼 때 리사주 도형이 생성된다.

리사주가 고안한 실험 장치는 두 소리굽쇠에서 발생하는 진동의 모양을 거울 반사를 이용해 스크린에 나타나도록 설계되어 있다. 아래 도형은 삼각함수로 그린 리사주 도형이다. 진동수(a, b)의 비와 위상각(c)을 달리하고, 진폭(A, B)은 같게 한 그래프이다.  $x = A \cos(at + c)$ ,  $y = B \cos(bt)$

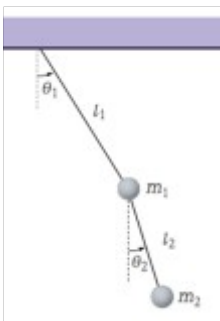


### 하모노그래프(hamonograph)

음계를 도형으로 표현하기 위한 장치로 스코틀랜드 수학자 위그 블래번이 고안했다. 하모노 장치는 소리의 진동수에 따라 단진자가 움직이는 모양을 도형으로 나타내는 것. 각각의 단진자는 펜과 연결되어 있어서 단진자가 움직이는 대로 그림을 그린다. 음계에 따라 진동수의 비와 단진자 길이, 진동수를 달리한다. 진동수의 비에 따라 단진자의 길이를 조절하면 리사주 도형이 얻어진다. 진동수를 1:1로 같은 음이면 진동수의 주기에 따라 직선, 타원, 원이 그려진다. 또한 하모노그래프 장치는 맥놀이 현상도 표현할 수 있다. 맥놀이 현상은 진동수가 조금 다른 음과의 진폭이 주기적으로 변하는 현상을 말한다.

### 펜듈럼 페인팅(pendulumpainting)

단진자의 추 끝에 또 하나의 단진자를 매달아 이중진자(double pendulum)를 만들어. 이 이중진자의 두 번째 질량이 그리는 궤적을 보면 아주 아름다운 도형이 그려진다.



이 추들의 운동 방정식을 푸는 것은 매우 복잡하고 어려울 것이나, 이 추(m2)가 그리는 궤적은 어떤 주기성을 가지는 패턴을 보여준다.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 3.1 연구 수행을 위한 실험

모터를 이용한 리사주 도형 형성 및 연구를 위해, 리사주 도형의 1차원 적인 운동인 단조화 운동 및 간단한 탐구활동 통해 연구 기반을 다졌다.

##### 1) 단조화 운동 탐구

###### 1. 단진동

준비물: 용수철, 무게추, 스탠드, 모션센서

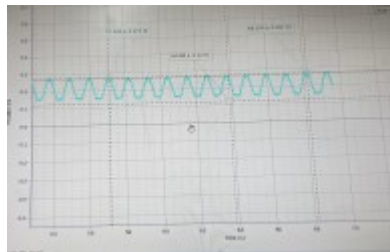
i) 스탠드에 용수철을 걸고 무게추를 용수철 끝에 연결한다.

ii) 용수철을 당겨 단진동 운동을 일으킨 뒤 그 밑에 모션센서를 놔두고 움직임을 기록한다.

iii) 컴퓨터에 표현된 값들이 이루는 개형을 관찰한다.



[단진동]



[단진동 그래프]

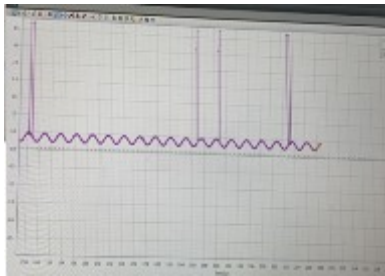
###### 2. 단진자

준비물: 실, 무게추, 스탠드, 모션센서

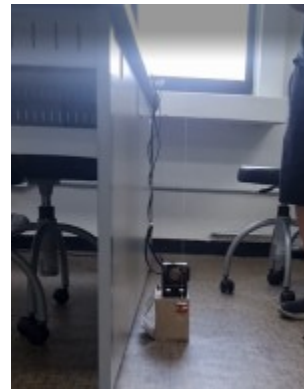
i) 스탠드에 실을 걸고 무게추를 실 끝에 연결한다.

ii) 실을 당겨 단진자 운동을 일으킨 뒤 그 밑에 모션센서를 놔두고 움직임을 기록한다.

iii) 컴퓨터에 표현된 값들의 이루는 개형을 관찰한다.



단진자



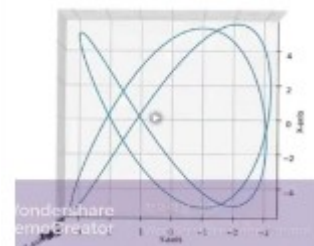
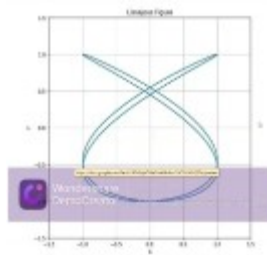
단진자

## 2) Python을 통한 리사주 도형 탐구

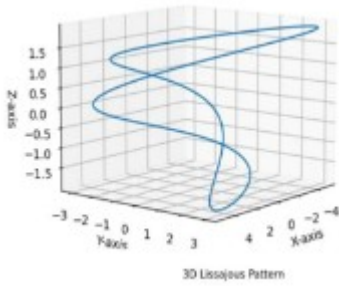
리사주 도형 연구에 앞서 Python이라는 프로그래밍 언어를 사용하여 리사주 도형을 만들어 보았다. X축과 y축에 주파수 비가 3:2인 사인파를 합성시켜 시간에 따라 위상차를 변화시켜 가며 모양을 관찰했다. x축과 y축에 대한 사인파를 합성시켜 보고 z축을 추가해 3차원으로 리사주 도형을 구현해 보았다.

```
def lissajous(a, b, delta, t):  
    x = np.sin(a*t + delta)  
    y = np.sin(b*t)  
    return x, y
```

[주요 코드 - 2차원]



xy, yz, zx 평면에서 보았을 때 각각 x축, y축, z축에 대한 주파수 차이로 생기는 2차원 리사주 도형을 관찰할 수 있었다.



```
def lissajous_3d(A, B, C, a, b, c, delta, beta, t):
    x = A * np.sin(a * t + delta)
    y = B * np.sin(b * t)
    z = C * np.sin(c * t + beta)
```

[수정한 코드 - 3차원]

위 왼쪽에서 소개한 코드에 z축에 대한 사인함수를 추가해 오른쪽 세 함수를 합성시켰다. 재현해 본 코드에선 주파수 비를 3:2:1로 설정하였다.

### 3) 사람의 목소리를 이용한 리사주 도형 탐구

사람의 성대에서 나오는 목소리도 두 파동이 서로 수직으로 만나 생성되는 리사주 도형의 모습을 띠기 때문에 사람의 목소리를 이용해 레이저 빛의 진동을 관찰하면 리사주 도형을 관찰할 수 있다. 이를 위해 플라스틱 컵에 고무풍선을 씌우고 그 위에 거울을 붙인 뒤 거울에 레이저를 비춰 벽에 레이저가 비치도록 하였다. 컵에 대고 소리를 내어 진동을 일으켜 레이저 빛의 움직임을 관찰한 결과 리사주 도형이 나타남을 알 수 있다.

준비물: 거울, 풍선, 컵, 관, 테이프, 레이저 포인터



[완성된 모습]

- i) 플라스틱 컵의 밑부분을 자른다.
- ii) 풍선의 밑부분을 자른 후, 컵의 윗부분에 팽팽하게 씌운다.

iii) 투명판을 컵 옆에다 테이프로 고정한 후 판의 윗부분을 잘라 레이저 포인터가 풍선을 비출 수 있도록 각도를 맞춘 뒤 고정한다.

iv) 레이저 포인터가 비추어지는 곳에 거울을 붙인다.

v) 앞서 절연테이프로 감쌌던 밑부분에 크게 소리를 내며 레이저의 움직임을 관찰한다.



결과는 위의 도형과 같다. 우리가 생각했던 도형은 나오지 않았지만, 음파의 진동으로 레이저 포인터 빛의 여러 가지 모양을 볼 수 있었다. 리사주 도형이 나오지 않았던 이유를 생각해 보면 일단 우리가 내는 일차 소리와 반사되어 나오는 소리는 서로 수직이지 않은 것 같다. 입사각과 반사각은 항상 같으므로 45도로 입사되지 않는 한 두 파동은 수직이 되지 않아 원하는 패턴을 구하는 데는 한계가 있다. 원하는 리사주 도형을 보려면 좀 더 노력해야 할 것이다.

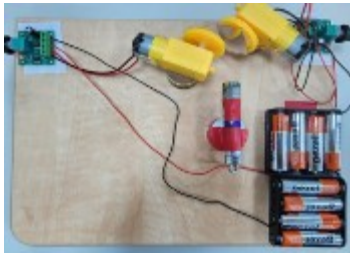
#### 4) 모터를 이용한 리사주 도형 형성 및 연구

모터에 부착된 거울면이 기울어진 상태로 회전하면 레이저의 입사각이 계속 바뀌게 되며 판 위에 레이저가 비추어지는 점이 바뀌게 되고 판의 회전 속도에 따라 입사각이 바뀌는 속도도 달라지는 현상을 이용하여 리사주 도형을 구현해 보았다.

##### 1차 본연구

준비물: 나무판, 모터 2개, 가변저항 2개, 건전지 서류끼우개 2개, 레이저포인터, 거

울 2개, 연결선



완성된 모습



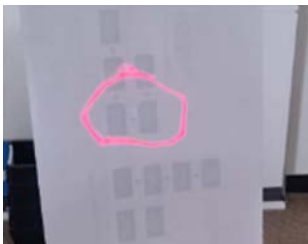
못에 보이는 무늬



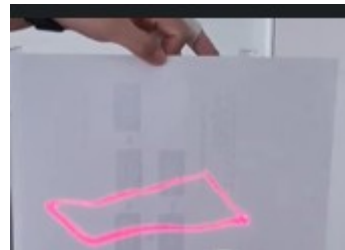
i) 모터와 가변저항, 건전지홀더를 연결선을 이용해 2개의 회로를 만든다.

ii) 모터에 거울을 달고 레이저포인터와 거울면의 각도를 조절하여 나무 판에 고정한다.

iii) 두 모터에 연결된 가변저항을 조절해 가며 레이저 포인터의 상의 자취를 관찰한다.



얻은 도형 1



얻은 도형 2

우리가 얻은 도형은 위와 같다. 보다시피 다양한 무늬를 얻을 수 없었다. 그 이유 중 하나는 모터의 회전 속도가 너무나 느렸다. 가변저항을 조절하여도 일정 속도 이상은 나오지 않았다. 전원이 너무 약한 것 같다. 그래서 좀 더 강한 모터가 필요하여 2차 실험을 구상하였다.

## 2차 본연구

1차 연구를 진행하였을 때 모터의 각속도가 충분하지 않았던 문제점이 있었기 때문에 각속도가 빠른 손 선풍기를 이용하여 재실험했다. 선풍기의 모터에 거울을 부착해 회전하게 하였고, 이에 레이저가 반사되면 하나의 파동과 같아지기에 이를

이용해 두 모터에 거울을 부착하고, 두 거울에 레이저가 모두 반사되도록 고정한 뒤 레이저의 움직임을 관찰하니 회전하는 리사주 도형의 모양이 나타나는 것을 알 수 있었다. 우리가 앞서 이론적 배경에서 보았던 리사주 도형과는 다른 개형이 나타났고, 이를 우리는 거울이 진동이 아닌 회전을 하였고, 각 선풍기가 진동과 회전을 모두 했기에 그런 것으로 추정한다.

준비물: 손 선풍기 2개, 거울 2개, 레이저포인터

I) 손 선풍기에 거울을 달고 레이저포인터와 거울면의 각도를 조절하여 나무 판에 고정한다.

ii) 두 선풍기의 세기의 조절로 진동수를 바꿔가며 레이저포인터의 자취를 관찰한다.



[선풍기를 두 대 돌렸을 때]



[선풍기를 하나만 돌렸을 때]

### 3.2 선행(기존)연구와의 차이점

선행(기존)연구에서는 하모노그래프를 이용하여 리사주 도형을 구현했으나

본 연구에서는 선풍기의 모터를 이용하여 리사주 도형을 구현했다.

하모노그래프는 두 파동의 주파수나 위상차의 변화를 연속적으로 보여줄 수 없는 반면, 모터를 사용하면 가변저항기 등을 연결하여 속도를 변화시켜 두 파동의 위상차나 주파수비를 바꿀 수 있다.

#### IV. 연구 결과

단조화 운동은 리사주 도형을 생성시키는 두 파동과 같아 리사주 도형을 이루는 기본적인 요소가 된다.

리사주 도형의 3차원적 구현에서 각각의 평면에서 관찰한 모양은 2차원에서 보이는 리사주 도형의 개형을 갖추며, 입체적으로 바라보았을 때 3 파동의 움직임을 다 관찰할 수 있다.

리사주 도형의 실제적인 구현에서 회전 모터를 사용했기에, 앞서 이론과 프로그래밍으로 관찰한 모형과는 다른 모양의 궤적이 나오는 것을 알 수 있다.

#### V. 결론 및 제언

리사주 도형은 회전하거나 진동하는 거울들 이외에도 오실로스코프나 진자와 같이  $x, y$  방향으로 일정하게 진동하는 것으로 만들 수 있다. 또한 리사주 도형은 단순히 탐구의 대상만이 아니라 소리의 속도 측정과 같이 실용적인 분야에서도 활용할 수 있다.

다음에 소리와 같이 여러 개의 일정한 주기를 가지는 파동이 결합된 운동의 공통점을 찾아보는 연구도 진행해 볼 수 있다. 이외에도 기존 리사주 도형보다 한 차원 높은 3차원 리사주 도형을 더 깊게 연구해 보는 실험 또한 진행해 볼 수 있다.

## VI. 참고문헌

1. 강미선, 안효정, 염혜지 and 김경대. (2008). 리사주 도형을 이용하여 공기 중에서 진행되는 소리의 속력 측정하기. 현장과학교육, 2(1), 46-51.
2. <https://m.blog.naver.com/jintaeky/220557291697> (harmonograph)
3. <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=3575580&cid=58944&categoryId=58970>
4. <https://news.samsungdisplay.com/26034> (pendulum painting)
5. [https://www.youtube.com/watch?v=QXf95\\_EKS6E](https://www.youtube.com/watch?v=QXf95_EKS6E) (이중진자가 그리는 곡선)



물리A

## 12\_나노입자를 이용한 광결정 제작



# 나노입자를 이용한 광결정 제작

김성현 (길음중학교 3학년)

김준아 (개원중학교 2학년)

조성용 (목운중학교 2학년)

최아영 (문래중학교 3학년)

지도교수 : 조두희 (연세대학교 물리학과)

초록 : 카멜레온, 모르포 나비 등은 색소 없이도 특정 색을 반사할 수 있는 구조를 지니고 있다. 이처럼 미세 구조체의 규칙적인 배열을 통해 구조색을 반사하는 구조를 광결정이라 한다. 나노 기술의 발전에 따라 생명체의 나노 구조를 모방한 생체모방 기술이 발달하게 되었고, 광결정의 구조색 변화를 이용하는 디스플레이, 센서 등의 연구가 활발히 진행 중이다. 많은 연구팀들이 다양한 광결정 제조방법을 보고하고 있으며, 지금까지 제안된 방법들은 크게 자기조립을 이용한 방법과 식각공정을 적용한 방법으로 나누어 볼 수 있다. 그중 자기조립 방식은 단순한 공정과 대면적화가 가능하지만 많은 결함을 포함하게 된다는 단점이 있다. 본 연구에서는 자기조립 방식의 일종인 썬기 방식과 모서리 패터닝방식을 통해 균일하게 광결정을 구현하는 효과적인 방법을 제시하였다. 또한, 구현한 광결정이 보는 각도에 따라 반사되는 색이 어떻게 달라질지 계산하고 실험 결과와 비교해 보았다.

## I. 서론

평소에 카멜레온이 몸의 색을 바꾸는 방법이 궁금했다. 이를 조사해보니 몸의 표면에 물리적인 구조를 바꾸어 빛의 간섭을 이용해 색을 바꾼다는 것을 알게 되었다. 이러한 원리를 통해 구조를 이용하면 색깔을 만들 수 있는지 궁금했다.

구조색은 색소 없이, 물리적 구조만으로 빛의 간섭을 통해 나타나는 색이다. 예를 들어, 카멜레온은 몸에 여러 가지 색깔의 색소가 있는 것이 아니라 비접촉형 격자 구조로 이루어진 피부층을 이용해 몸의 색을 바꾼다. 피부층이 미세한 격자구조로 만들어졌기 때문에 격자 간격을 변화시킴에 따라 피부가 반사하는 빛의 파장이 달라지는 것이다. 이러한 구조를 모방하여 빛을 내지 않고도 색을 구현하는 디스플레이를 만들거나, 미세한 변화를 감지하는 센서를 만드는 등의 생체모방 기술 연구가 활발히 진행 중이다.

구조색을 보여주는 구조를 광결정이라고 하는데, 광결정을 만들기 위해서는 가시광선의 파장 정도인 수백 나노미터 크기의 미세 격자구조를 만들어야 한다. 이러한 구조를 만드는 방법 중 한 가지는 매우 작은 크기의 입자들이 들어있는 현탁액을 이용하는 것이다. 현탁액 속 입자가 표면장력과 모세관 현상에 의해 서로 뭉쳐져 결정구조를 이루게 되는데, 이를 자기조립 방식이라고 한다. 자기조립 방식은 식각공정과 같은 다른 제작 방법들에 비해 복잡한 공정과 장비들이 필요하지 않으며 간단하게 제작할 수 있다는 장점이 있지만, 결함이 많고 균일하게 만들기 어려워 새

로운 방법들이 연구되고 있다.

본 연구에서는 스티로폼 나노입자를 이용하여 자기조립 방식으로 균일하고 넓은 광결정을 만드는 방법을 제시하였다. 또한, 나노입자의 크기를 조절하여 광결정이 반사하는 빛의 색깔을 조절하였고, 빛이 입사하는 각도에 따라서 구조색이 어떻게 변화하는지 탐구했다.

## II. 이론적 배경

### 1) 광결정

광결정이란 공간적으로 반복되는 미세한 구조체의 규칙적 배열에 의해 특정 파장만 반사되는 구조로, 이러한 광결정에 의해 발현되는 색상을 구조색이라고 한다. 광결정은 굴절률이 다른 물질을 겹쳐서 쌓거나, 동일면 혹은 공간상에 규칙적으로 배열시킴으로써 발현시킬 수 있다. 예를 들어, 모르포 나비의 날개에는 푸른색을 띠 수 있는 색소가 전혀 없지만, 나비의 날개는 푸른색을 띤다. 그 이유는 날개 표면에 규칙적인 단백질 기둥으로 구성된 나노 구조물이 푸른색 빛만을 선택적으로 반사하기 때문이다.

이러한 광결정을 제조하는 방법에는 크게 식각공정과 자기 조립을 이용한 방법이 있다. 간단히 말해서, 이러한 방법은 결함이 적고, 굴절률 차이가 적은 구조를 만들어 낼 수 있지만 제조 단가가 비싸고 공정시간이 오래 걸리기 때문에 효율적이라고 할 수 없다. 반면에 자기 조립적 방법을 이용하면 짧은 시간과 돈이 든다는 장점이 있지만 결함이 존재하고, 균일한 광결정을 만드는 데 어렵다는 문제가 있다. 따라서 자기 조립적 방법을 이용하여 양질의 구조를 만들어 내는 방법이 활발히 연구되고 있다.

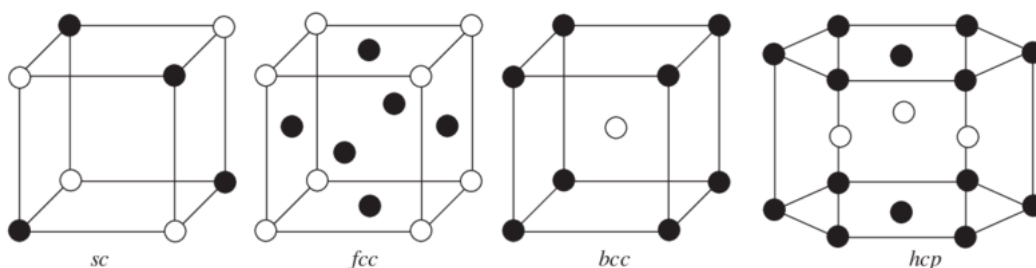
구조색의 특징은 정보 디스플레이 측면에서 유용하게 쓰일 수 있다. 구조색을 이용한 반사형 디스플레이는 자체 광원의 빛을 이용하여 색을 구현하는 발광형 디스플레이와는 달리 외부에서 조사된 빛을 이용해 특정 파장의 빛만 반사시키는 방법으로서 컬러 필터 없이도 색상을 구현할 수 있기 때문에 공간이 밝아도 선명하게 볼 수 있는 우수한 초저전력 디스플레이 구현이 가능하다.

### 2) 고체의 결정구조

일반적으로 물질의 상태는 고체, 액체, 기체 3가지로 나뉜다. 이들의 차이점은 단지 분자의 배열 상태뿐이다. 그러나, 단순히 배열의 변화만으로 물질의 성질이 크게 바뀐다. 즉, 배열은 물질의 특성에 지대한 영향을 미친다. 고체도 마찬가지이다. 고체는 규칙성의 유무에 따라 결정성 고체와 비결정성고체로 나뉜다. 결정성 고체의 경우에는 반복의 단위만 잘 파악하면 성질을 일반화할 수 있어 연구에 유용하게 이

용될 수 있다. 본 연구에서는 결정구조는 구조색이 나타나게 하는 데 중요한 역할을 한다.

고체의 결정구조에는 대표적으로 4가지가 있는데, 단순입방구조(sc), 면심입방구조(fcc), 체심입방구조(bcc), 육방밀집구조(hcp)가 있다. 단순입방구조의 경우에는 정육면체의 결정구조에 8개의 꼭짓점에 원자가 1개씩 걸려있고, 면심입방구조는 6개의 면에 원자가 1개씩 있고, 각 꼭짓점에도 원자가 1개씩 있다. 체심입방구조는 8개의 꼭짓점에 원자가 1개씩 있고 몸체의 중앙에 원자 1개가 있다. 마지막으로 육방밀집구조는 육각기둥 모양 단위구조에서 육각기둥 12개 꼭짓점에 원자가 1개씩 있고, 가운데에 원자 3개가 있다.



[그림 1] 고체의 대표적 결정구조 4가지

[출처 : <https://arxiv.org/abs/1601.00832>]

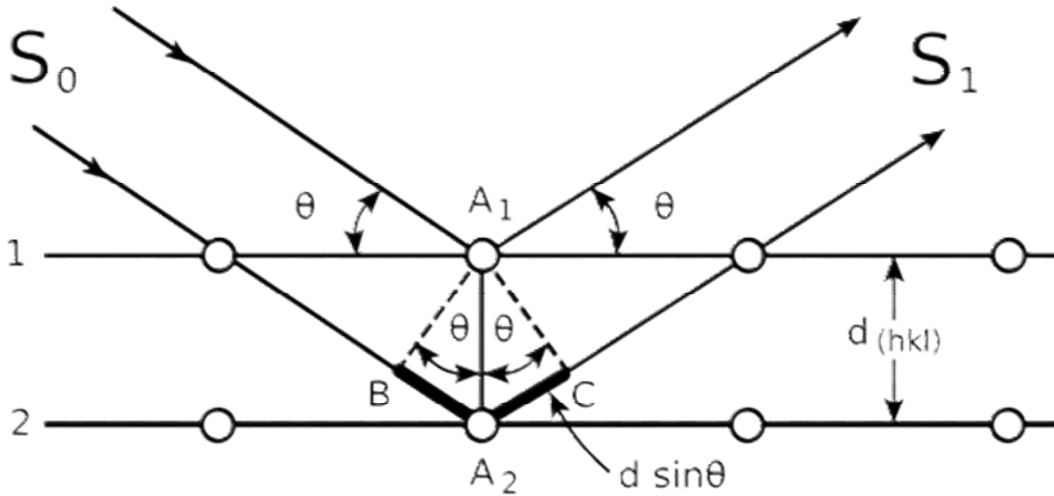
채움률이란 단위 격자에 입자가 채워져 있는 비율을 뜻하고 (단위 격자 내부 원자의 부피)/(단위 격자의 부피)로 계산할 수 있다. 본 실험에서는 모세관 현상을 통해 입자들이 결정을 이루게 되는데, 이때 채움률이 가장 높은 구조로 결정을 이루게 된다. 각각의 채움률을 살펴보면 단순입방구조는 52%, 체심입방구조는 68%, 면심입방구조는 74%, 육방밀집구조는 74%이므로 면심입방구조와 육방밀집구조로 결정이 쌓일 것을 알 수 있다.

### 3) 브래그 법칙

브래그의 법칙은 빛의 회절, 반사에 관한 물리 법칙이다. 일정한 구조를 가진 물질에 빛을 다양한 각도에서 비추주면, 어느 각도에서는 강한 빛의 반사가 일어나지만 다른 각도에서는 반사가 거의 일어나지 않는 것을 관측할 수 있다. 이것은 물질을 구성하는 입자에 의해 반사된 파장들의 경로 차가 생겨 보강간섭, 또는 상쇄간섭이 일어나 빛의 세기가 강해지거나 약해지기 때문이다. 브래그 법칙을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$2d\sin(\theta) = n\lambda$$

(d: 결정격자 간격,  $\theta$ : 결정격자에 대한 X선 입사각, n: 빛 파장 배수,  $\lambda$ : X선 파장)



[그림 2] 브래그 법칙 도식

[출처 : <https://www.pngwing.com/ko/free-png-tvoew/>]

결정구조를 가진 물질에 같은 파장의 빛을 비추다면 어느 층에 빛이 들어가느냐에 따라서 다른 층에 들어간 빛과 파장 차이, 즉 경로차가 생기게 된다. 그 경로차에 따라서 보강간섭, 상쇄간섭이 일어나게 되는데 보강간섭이 일어나면 빛이 강하게 나와서 밝게 보이고, 상쇄간섭이 일어나면 빛이 상쇄되어 약하고 어둡게 보인다. 브래그 법칙을 이용하면 결정층에 빛이 들어갔을 때 어떤 빛(밝은지, 어두운지)이 나올지 계산으로 예측할 수 있다.

#### 4) 모세관 현상

모세관 현상은 액체 속에 모세관을 넣었을 때 관 안에 있는 액체의 표면과 관 밖에 있는 액체의 표면의 높이가 달라지는 현상을 말한다. 모세관 현상은 액체와 액체, 액체와 관 사이의 인력의 차이로 발생한다. 관을 액체 속에 넣으면 액체와 액체 사이에도 인력이 작용하고, 액체와 관 사이에도 인력이 작용한다. 액체 분자 사이의 힘보다 액체와 관 사이에 작용하는 힘이 더 강하면 관 쪽에 붙어있는 액체가 관을 따라서 위로 올라가 액체 분자 막을 형성한다. 위로 올라간 액체의 가운데 있는 액체 분자를 끌어당기면서 위로 올려 액체의 관 속 표면이 바깥쪽 표면에 비해 위로 올라가게 된다. 이때 이 액체는 관과 액체 사이의 인력만큼의 무게의 물기둥 높이만큼 올라간다.

$$h = 2\gamma \cos \theta / \rho g r$$

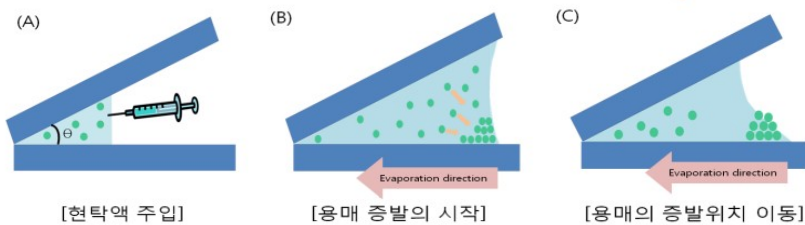
( $\gamma$ : 액체 - 기체 계면의 표면장력,  $\theta$ : 액체와 고체 사이의 접촉각,  
 $\rho$ : 액체의 밀도,  $g$ : 중력가속도,  $r$ : 모세관의 반지름)

식에 따르면 표면장력이 클수록, 액체의 밀도가 작을수록, 모세관의 반지름이 작을수록 모세관 현상이 잘 일어난다.

본 실험에서는 모세관 현상을 통해 입자가 일정한 결정구조를 이루도록 설계했다. 유리를 이용해 좁은 통로를 만들어 입자가 포함된 현탁액을 주입하면 모세관 현상에 의해서 현탁액 속 입자들이 반대편으로 이동하고 입자 간의 간격이 최소화되는 일정한 결정구조를 이루게 된다. 현탁액을 주입한 후 일정한 시간이 지나면 현탁액 속 물은 증발하게 되고 결정구조를 이룬 입자만 남게 되므로 결정구조를 만들 수 있다.

### III. 연구방법

- 1) 모세관 현상을 이용한 자가조립 방식의 나노입자 광결정 제작  
 -썰기 방식



[그림 3] 썰기 방식 제작원리

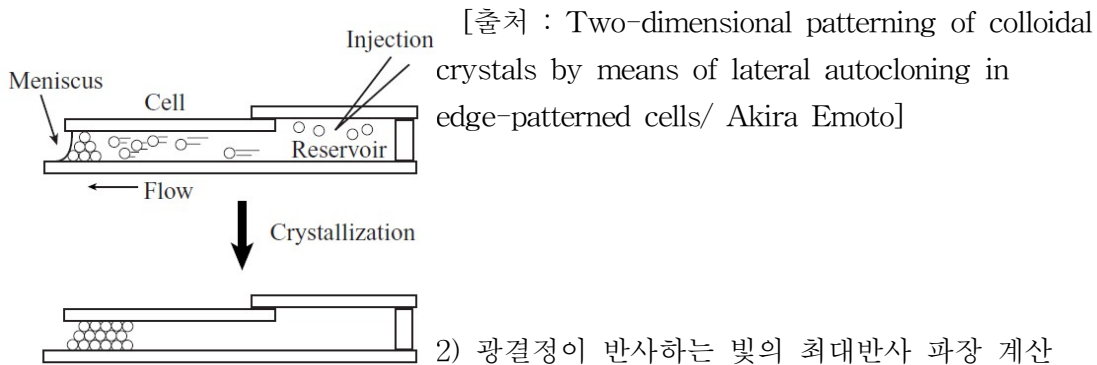
[출처 : 3차원 광자결정 제작과 광학적 특성 분석 / 유나리]

썰기 모양으로 유리 2개를 붙인 후 받침대를 놓으면 유리 사이에 특정 형태의 공간이 형성된다. 현탁액을 유리 사이에 넣으면 바깥쪽부터 용매가 증발한다. 용매가 증발한 위치에 입자가 쌓여 결정이 형성된다.

#### -모서리 패턴방식

현탁액을 유리 끝에 넣으면 현탁액이 모세관 현상에 의해 흐르면서 메니스커스라는 곡선을 형성한다. 메니스커스 부근 용액이 증발하면서 유리 끝에 나노입자가 쌓이게 된다. 나노입자들은 채움률이 가장 높은 방식인 면심입방구조(fcc)와 육방밀집구조(hcp)의 방식으로 쌓이게 된다. 이 방법의 경우 두 유리 사이 간격, 습도, 온도 등이 결정의 형성에 영향을 끼친다.

[그림 4 : 모서리 패턴방식 제작원리]



$$\lambda_{\max} = (8/3)^{1/2} D (n_{\text{sphere}}^2 V_{\text{sphere}} + n_{\text{void}}^2 V_{\text{void}} - \sin^2 \phi)^{1/2}$$

$D$ : 나노입자의 지름

$n_{\text{sphere}}$ : 나노입자의 굴절률

$V_{\text{sphere}}$ : 나노입자가 차지하는 부피 비율

$n_{\text{void}}$ : 입자 사이 공간의 굴절률

$V_{\text{void}}$ : 입자 사이 공간이 차지하는 부피 비율

$\phi$ : 입사각

굴절률이 다른 구조체가 주기적으로 반복될 때 최대반사 파장은 브래그 법칙에 의해 위 식과 같이 결정된다. 이 식에서  $D$ 와  $\phi$ 를 제외한 문자들은 모두 상수이므로 ( $n_{\text{sphere}}=1.6$ ,  $V_{\text{sphere}}=0.74$ ,  $n_{\text{void}}=1.0$ ,  $V_{\text{void}}=0.26$ ,  $\phi=0^\circ$ ) 입사각  $\phi$ 를  $0^\circ$ 로 고정하면  $D$ 에 따라 최대반사 파장의 값이 결정된다. 이 식에 따르면 200nm의 나노입자는 파란색, 240nm의 나노입자는 초록색, 269nm의 나노입자는 빨간색을 띤다. 나노입자의 지름인  $D$ 를 고정하고  $0^\circ \sim 90^\circ$ 에서  $\phi$ 를 크게 하면  $\sin \phi$ 도 커지므로  $\lambda_{\max}$ 는 작아진다. 이와 같은 식을 통해 광결정에서 반사되는 빛의 파장을 구했다. 빨간색, 초록색, 파란색을 내기 위해 200 nm, 240 nm, 269 nm로 나노입자의 크기를 결정했다.

#### IV. 연구결과

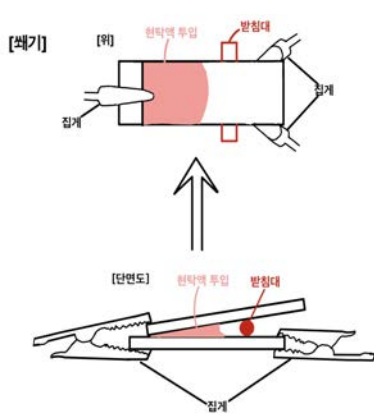
##### 1) 자가조립 방식의 광결정 제작

-썩기 방식

두 유리를 썩기 형태로 고정하여, 그 사이에 현탁액을 주입하여 용매를 증발시키는 방식이다. 나노입자가 침전되어 결정화되는 것을 예상하였다. 실험 절차는 다음과 같다.

1. 슬라이드 글라스 2개를 집게, 받침대, 글루건을 이용해 썩기 모양으로 고정한다. (단, 각도는 약  $10^\circ$ 로 한다.)

2. 과정 1을 2번 더 반복한다.
3. 만들어진 3개의 프레임에 각각 200nm 현탁액, 240nm 현탁액, 그리고, 200nm 입자와 240nm를 섞은 용액을 주입한다.
4. 용매가 모두 증발할 때까지 기다린다.



[그림 5] 썩기 방식 모식도

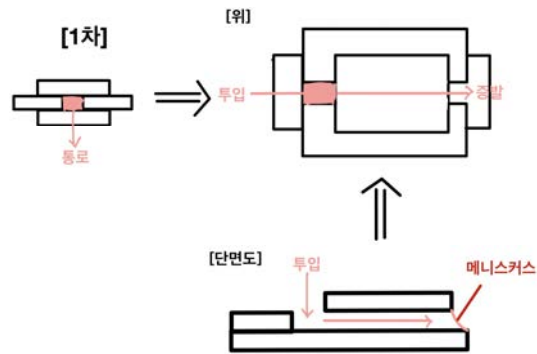
[그림 6] 썩기 방식 현탁액 주입 직후/증발 후

위의 절차대로 실험한 결과, 실험실 환경의 온도와 습도가 유지되지 않아서 증발 속도에 차이가 생겨 광결정이 일정하게 형성되지 않았다. 이 문제를 해결하기 위해 모서리 패턴방식을 사용했다. 한편, 두 종류의 현탁액을 넣으면 두 색이 섞여서 나타날 것이라고 예상했으나, 실험 결과 두 입자의 크기가 달라 구조가 형성되지 않아 구조색이 잘 나타나지 않았다.

#### - 1차 모서리 패턴방식

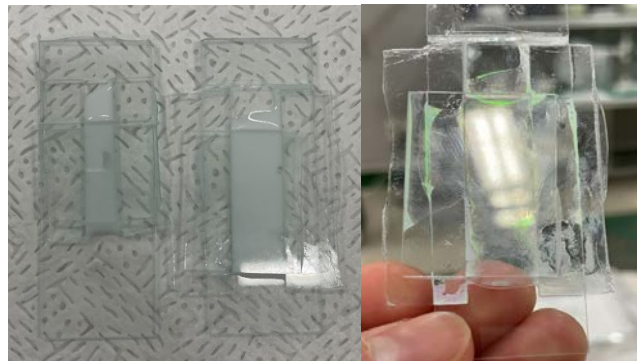
썩기 방식에서는 용매가 증발하면서 입자들이 결정구조를 이룬다. 용매가 증발하면서 표면적이 줄어들어 입자들이 결정구조를 이루는 속도가 달라 결정구조가 일정하지 않다. 이를 보완하여 용매가 증발하는 속도를 일정하게 하였다. 유리를 이용해서 1mm의 틈을 만들고, 직사각형의 주입구에 현탁액을 넣어서 모세관 현상에 의해 틈 안으로 흘러갈 수 있게 설계하였다. 유리를 고정하기 위해서 순간접착제를 사용했다. 앞선 제작 방법에서 언급한 원리대로 용매가 증발하여 나노입자들이 규칙적으로 배열되어 결정화가 될 것을 예상했다. 실험 절차는 다음과 같다.

1. 슬라이드 글라스 3개를 각각 다음의 도면으로 자른다.
2. 잘린 조각들을 순간접착제로 붙여서 다음의 모양을 만든다.
3. 현탁액을 틈에 넣어 가득 채운다.
4. 물이 증발할 때까지 기다린다.



[그림 7] 1차 모서리 패터닝방식 모식도

위의 절차대로 실험한 결과, 240nm의 나노입자가 순간접착제로 고정된 유리 사이의 틈으로 새어나가서 유리의 틈에서 구조색이 형성되었다. 또한, 순간접착제가 굳어 유리 표면이 울퉁불퉁해져 표면이 불균일한 부분에서도 구조색이 형성되는 것을 볼 수 있었다. 나노입자가 결정화되기에는 1mm의 틈이 너무 크다는 점을 알게 되었고 유리 사이에 현탁액을 넣는 방식을 시도해보기로 했다.



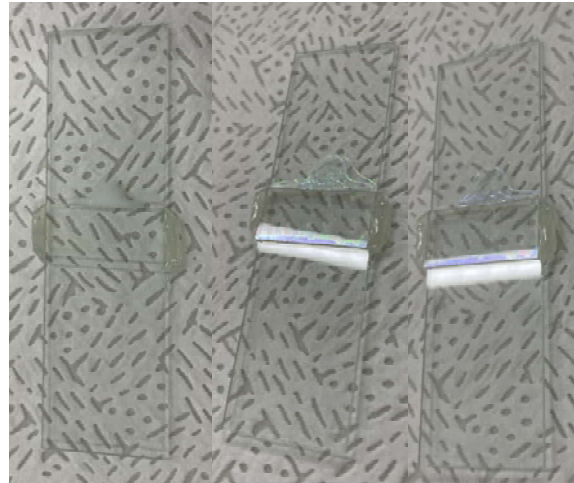
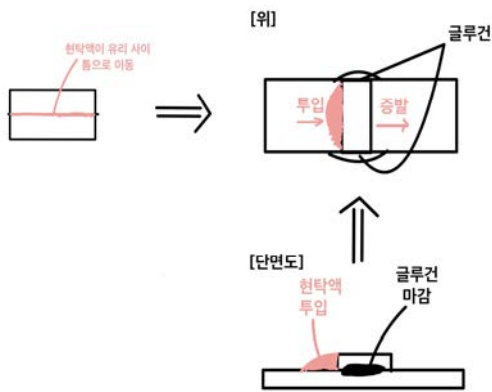
[그림 8] 1차 모서리 패터닝 현탁액 주입 직후/증발 후

- 2차 모서리 패터닝방식

첫 번째 방법에서 순간접착제가 유리 사이를 완전히 막지 못하여 현탁액이 밖으로 새어 나갔다. 그렇기 때문에 빠져나간 현탁액이 유리 사이에서 결정을 생성했다. 이를 토대로 통로를 만들지 않고 유리를 서로 붙여서 현탁액을 흘리는 방식을 고안해냈다. 실험 절차는 다음과 같다.

1. 유리 2개를 붙인다.
2. 현탁액이 새지 않도록 양 옆을 글루건으로 막는다.
3. 200nm 현탁액을 유리 사이로 넣는다.
4. 현탁액의 물이 증발하면 현탁액을 추가로 여러 차례 넣는다.
5. 완전히 마른뒤 240nm 현탁액을 추가로 넣는다.
6. 현탁액의 물이 증발하면 현탁액을 추가로 여러 차례 넣는다.

[2차]



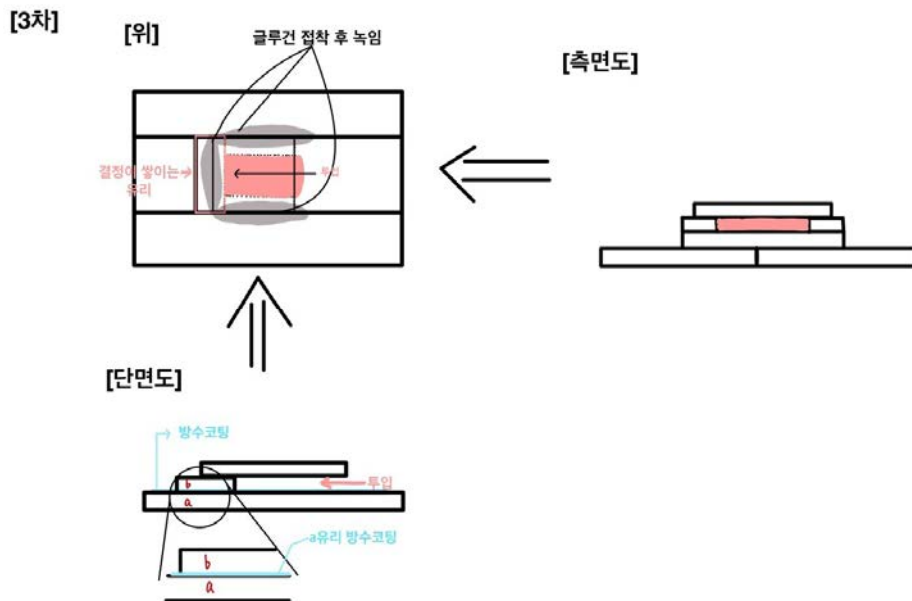
[그림 9] 2차 모서리 패턴방식 모식도

[그림 10] 2차 모서리 패턴방식

실험 결과 첫 번째 방법과 다르게 현탁액이 옆으로 새지 않았으며, 입자들이 규칙적으로 배열되어 구조색이 뚜렷하게 나타났다. 하지만 투입구 부분에서 증발이 많이 일어나 손실이 많고, 투입구 부분에 생긴 결정 때문에 입구가 막혀 추가적인 투입이 되지 않았다.

- 3차 모서리 패턴방식

2차 모서리 패턴방식에서 진행할 때 현탁액을 입구에 투입했을 때 바로 유리 밑으로 들어가지 않은 현탁액들이 입구 쪽에서 증발하면서 결정구조를 만들었다. 이에 따라 결정에 의해 입구가 막히며 현탁액들이 추가로 들어가지 않았고, 실패하였다. 이를 토대로 현탁액이 입구에서 증발되지 않고 바로 유리 밑으로 들어갈 수 있는 구조를 고안하였다. 실험과정은 다음과 같다.



[그림 11] 3차 모서리 패턴방식 모식도

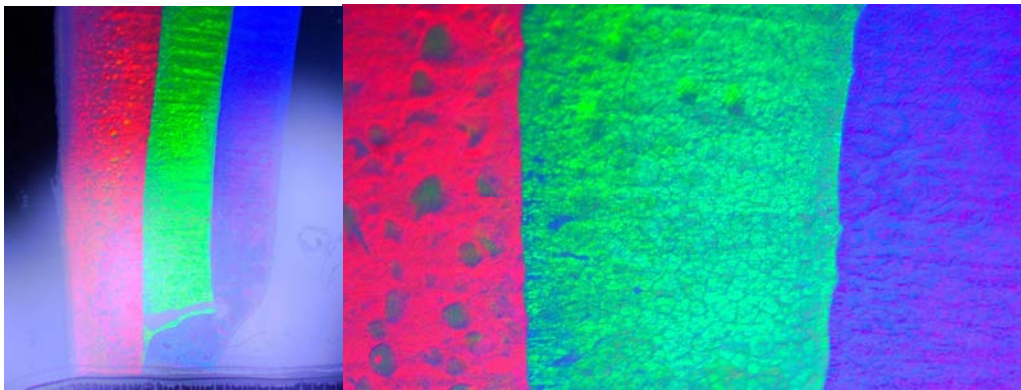
1. 바닥에 까는 유리(a유리)를 방수코팅한다.
2. 유리를 잘라서 위의 모식도 모양으로 만든다.
3. 글루건으로 표시된 부분을 붙인 다음 굳힌다.
4. 유리 구조물을 핫플레이트 위에 올리고 글루건이 녹을 때까지 가열한다.
5. 글루건이 다 녹으면 핫플레이트를 끄고 글루건을 다시 굳힌다.
6. 현탁액을 투입하고 증발시킨다.



[그림 12] 3차 모서리 패턴방식 실험 사진

실험 결과 2차처럼 입구에서 현탁액이 증발하여 입구를 막는 일은 없었다. 또한, 글루건을 녹임으로써 광결정 나노입자들이 옆으로 새지 않았다. 오직 유리를 통해 현탁액이 증발했으며, 방수코팅으로 b 유리에만 결정과 구조색이 생겼다.

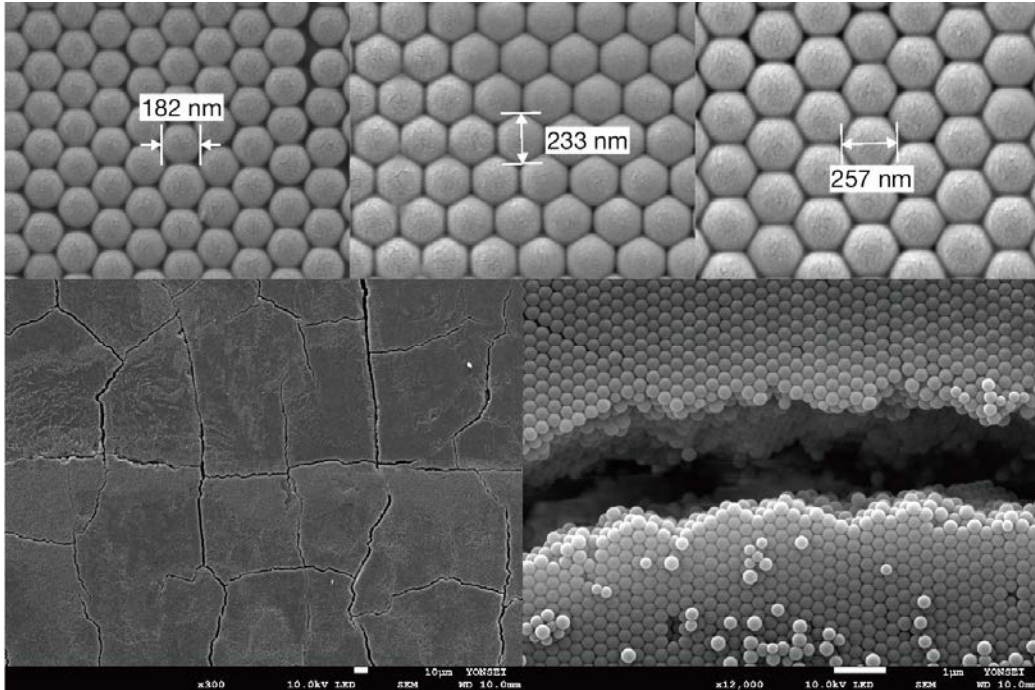
- 2) 광학, 전자 현미경을 이용한 광결정 구조 확인
  - 광학 현미경을 통한 광결정 구조 확인



[그림 13] 광학 현미경으로 확인한 광결정

위 두 사진은 3차 모서리 패턴방식으로 형성된 광결정을 광학 현미경을 이용하여 확대한 것이다. 위 사진을 통해서 크게 두 가지 사실을 알 수 있다. 첫째, 폴리스티렌 나노입자가 결정화되어 쌓여있는 것을 관찰할 수 있으며, 크기가 서로 다른 입자들은 광결정의 최대 반사 파장의 식에서 구한 파장의 색을 띠는 것을 확인할 수 있다. 둘째, 결정화된 입자들 사이에 균열이 생기며, 군데군데 구멍이 뚫려있는 것을 확인할 수 있다.

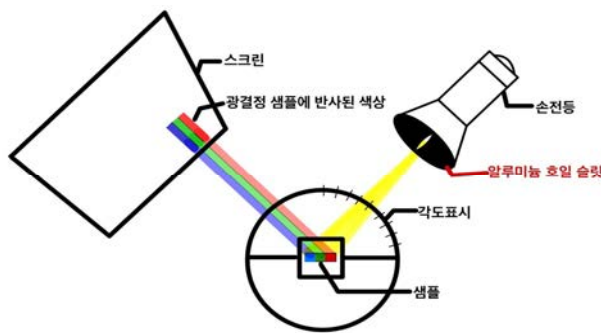
-전자 현미경을 통한 광결정 구조 확인



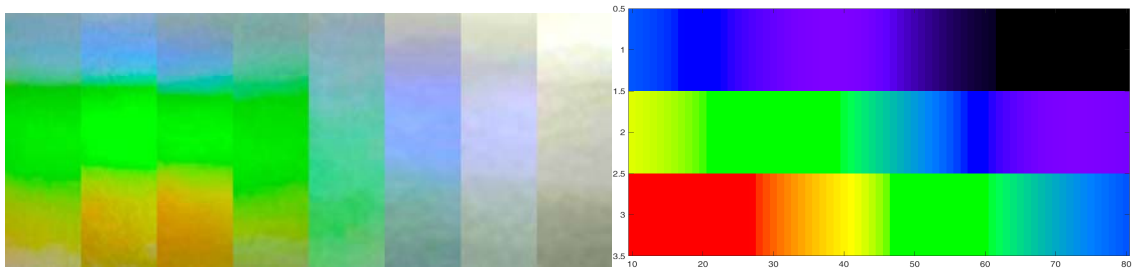
[그림 14] 전자 현미경으로 관찰한 광결정

나노입자의 정확한 배열을 확인하기 위해 전자 현미경 SEM을 사용하였다. 작은 균열이 있지만 전체적으로는 균일한 구조를 이룬 모습이다. 또한, 실제 사용한 나노입자의 크기를 확인할 수 있었다. 파란색 빛을 반사하는 나노입자의 크기는 실제로 182nm, 초록색 빛을 반사하는 입자는 실제로 233nm, 빨간색 빛을 반사하는 입자는 257nm로 확인되었다.

3) 빛의 입사각에 따른 광결정의 색변화 확인



[그림 15] 광결정의 색 변화 실험 모식도 및 사진



[그림 17] 광결정의 색 변화 실험결과

광결정을 관찰하며 광결정을 보는 각도에 따라 색이 달라진다는 것을 발견했다. 광결정을 광원에 등지고 보면 원래 색의 보였지만, 광원을 바라보고 보면 기존 색의 보색이 보였다. 이를 더 자세히 알아보기 위해 각도에 따라 광결정의 색이 어떻게 변하는지 실험해 보았다. 손전등에 은박지로 만든 슬릿을 덮어 10° 간격으로 각도를 변화하여 반사되는 구조색의 변화를 관찰하였다. 그 결과, 10° ~80° 사이 각을 각각 수식에 대입하여 계산했을 때 실제 색과 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

## V. 결론 및 제언

광결정은 빛의 반사만으로 색을 나타낼 수 있는 입자 구조이다. 본 실험에서는 췌기 방식과 모서리 패턴방식으로 광결정을 구현하였다. 췌기 방식의 경우 입자 증발 속도가 일정하지 않아 균일한 광결정이 형성되지 않았고, 이를 보완한 모서리 패턴 방식은 비교적 광결정 구조가 균일하게 형성되었다. 나노입자의 정확한 배열을 확인하기 위해 전자 현미경 SEM을 사용하여 관찰해보았다. 그 결과 전체적으로 균일하게 배열된 결정과 실제 입자의 크기를 확인할 수 있었다. 광결정은 보는 각도에 따라 색이 다르게 나타났다. 이를 확인하기 위한 실험에서 10° ~80° 사이 각을 수식에 대입하여 계산했을 때와 실제 색이 비슷하다는 것을 관찰했다.

이러한 특성을 디스플레이, 습도 센서, 감압 센서 등에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다. 디스플레이의 경우 전자기기의 발광 없이 자연광을 반사해 색을 나타냄으로써 눈의 피로도를 감소하고 에너지를 절약할 수 있다. 또한, 광결정을 센서에 적용할 수 있다. 습도 센서에는 광결정 사이의 매질이 달라져 색이 변하는 것이 적용되었고, 감압 센서에는 압력에 따라 입자 사이의 거리가 달라져 색이 변하는 것이 적용되었다.

## VI. 참고문헌

유나리, 3차원 광자결정 제작과 광학적 특성분석, 한양대학교 (2013)

Akira Emoto, Tadayoshi Kamei, Tatsutoshi Shioda, et. al, Two-dimensional patterning of colloidal crystals by means of lateral autocloning in edge-patterned cells, Journal of applied physics **105**, 123506 (2009)

# 물리B

01. 중학생의 자전거 헬멧 착용에 대한 인식 및 헬멧 모형을 이용한 충격력 비교 ...	189
02. 무선 충전의 효율 개선 방법 연구 .....	209
03. 도플러 효과를 이용한 자동차의 속도 측정 .....	225
04. 회로 변수에 따른 전자기 펄스(EMP)의 세기 변화 .....	237
05. 구(球)형 집광 모듈의 제작과 온수기로서의 효율 .....	255
06. ZnS 형광체를 이용한 고효율 발광 특성에 관한 연구 .....	271
07. 재사용 가능한 산염기 구별 빌베리 염색 천 개발 및 산도 정량 분석이 가능한 빌베리 태양전지 개발 .....	281
08. 맴돌이 전류를 이용한 자기브레이크 .....	295
09. 부메랑 종이비행기의 곡예 원리 탐구 .....	305
10. 최대 에너지 효율의 수평축 윈드 터빈 제작 .....	317
11. 태양광 패널의 온도 변화에 따른 효율과 바람을 활용한 효율 개선 방법 탐구 ...	349
12. 코일을 통과하는 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기 .....	367
13. 열 증착법으로 제조한 구리 박막의 저항 탐구 .....	379



물리B

01\_중학생의 자전거 헬멧 착용에 대한 인식 및  
헬멧 모형을 이용한 충격력 비교



# 중학생의 자전거 헬멧 착용에 대한 인식 및 헬멧 모형을 이용한 충격력 비교

이주천 (봉명중학교 3학년)

홍라규 (한솔중학교 3학년)

지도교수 : 이인선 (충북대학교 물리교육과)

## 초록

최근 자전거 사용자들의 수가 많아지면서 그에 따라 교통사고 빈도가 급증하고 있다. 차와 자전거를 탄 사람이 충돌하는 경우는 큰 부상으로 이어지는 경우가 많은데, 이러한 사고에서는 두부 외상의 비율이 상대적으로 높다. 헬멧을 착용하면 두부 손상을 약 85%까지 보호할 수 있다는 연구결과가 있으며, 이처럼 헬멧 착용은 두부의 안전성 측면에서 중요한 도구이다. 그러나 이 연구에서 중학생 386명을 대상으로 실시한 자전거 헬멧에 관한 설문조사에서 다수의 학생들이 실제로 자전거를 탈 때 헬멧을 착용하고 있지 않는다고 응답하였다. 그리고 헬멧을 착용하지 않는 여러 이유들 중 헬멧을 착용하여도 안전하지 않을 것 같다는 항목에 높은 응답률을 보였다. 이에 연구자들은 중학생들의 헬멧 착용에 대한 인식을 개선하고 헬멧 착용률을 높이고자, 헬멧을 착용이 두부의 안전성을 높일 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다. 이 연구에서는 3D 프린터를 이용하여 헬멧 모형을 제작하였으며, 헬멧 모형의 구조와 헬멧 모형의 내부에 부착하는 완충재의 종류에 따른 충격력을 비교하는 실험을 수행하였다. 연구 결과, 구멍이 없는 구조물과 폴리스티렌을 완충재로 사용한 경우가 가장 충격력이 작게 작용하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과가 자전거를 이용하여 통학하는 중학생들의 헬멧에 착용에 대한 인식을 개선하고 헬멧 착용률을 높이는 데 기여하기를 기대해 본다.

## I. 서론

현재 개인용 자전거는 물론 개인형 이동장치(Personal Mobility) 시스템이 새롭게 등장하며 이를 이용하는 이용자들도 점점 증가하고 있다. 이에 따라 안전사고 빈도도 계속해서 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 안전사고 피해를 줄이는 가장 효과적인 방법이 바로 헬멧(helmet) 착용이다. 그러나 중학생들을 대상으로 실시한 헬멧 착용 빈도에 관한 설문조사에서, 대부분의 중학생들이 헬멧을 착용하지 않고 있다는 놀라운 결과가 나타났다. 그 이유를 파악해보니 70% 정도의 학생들은 불편해서 착용하지 않았고 나머지 학생들도 대부분 헬멧을 착용해도 안전할 것 같지 않다는 의견이었다. 따라서 헬멧을 착용해도 안전할 것 같지 않다는 의견에 초점을

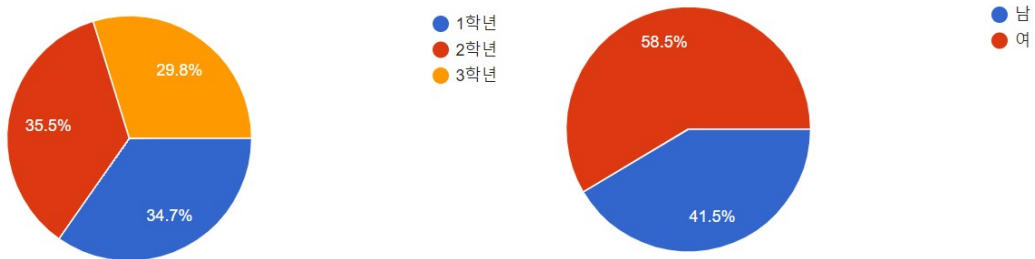
두어, 우리는 실제로 헬멧을 착용하면 헬멧 착용자가 받는 충격이 착용하지 않았을 때보다 감소되는지 실험을 통해 확인하여 헬멧을 착용하면 훨씬 안전하다는 것을 알리고 학생들의 헬멧 착용률을 높이기 위해 이 연구를 시작하게 되었다. 중학생을 대상으로 자전거 헬멧 착용에 대한 인식을 조사한 결과는 다음과 같다.

청주시 소재 중학교에 재학 중인 학생을 대상으로 ‘헬멧에 대한 인식’에 관한 설문조사를 2023년 6월에 2주간 실시하였으며, 구글 설문지를 이용하여 온라인 설문으로 진행하였다. 설문 문항은 총 8문항이었으나, 이 중 2개 문항은 내용 중복으로 제외하고 최종 6개 문항(그림 1)에 대한 설문조사 결과를 분석하였다.

- <설문 문항>
- ① 중학생이 된 이후 자전거를 탄 경험이 있나요?
  - ② 자전거 탑승 시 헬멧을 착용해야 한다고 생각하나요?
  - ③ 자전거를 탈 때 헬멧을 얼마나 자주 착용하나요?
  - ④ 자전거를 탈 때 헬멧을 착용한다면 그 이유를 적어주세요.
  - ⑤ 자전거를 탈 때 헬멧을 착용하지 않는다면 그 이유를 적어주세요.
  - ⑥ 도로교통법 제 32조에 따른 헬멧 착용 의무화에 대해 알고 있나요?.

**그림 1. 설문 문항**

먼저 설문조사에 참여한 중학생은 386명이었으며, 일부 문항은 386명이 모두 응답하지 않은 경우가 있어 문항마다 최종적인 응답 학생 수는 차이가 있다. 설문조사에 응답한 학생 중 1학년은 134명(34.7%), 2학년은 137명(35.5%), 3학년이 115명(29.8%)으로, 3개 학년이 고르게 설문에 참여하였다 (그림 2a). 이들 중 남학생은 226명(28.5%)이었고, 여학생이 160명(41.5%) 참여하여 남학생의 응답 비율이 조금 더 높았다 (그림 2b).



**a. 학년별 학생 분포**

**b. 성별 분포**

**그림 2. 설문 응답학생의 기초 정보**

중학생들의 응답 결과를 살펴보면, ‘중학생이 된 이후 자전거를 탄 경험이 있나요?’라는 질문에 대해 자전거를 탄 경험이 있는 학생들이 그렇지 않은 학생들보다 약 100명 정도 더 많게 응답하여 자전거 타본 경험이 있거나 현재 자전거를 이용하여 통학하는 학생들의 비율이 63%로 높게 나타났다 (그림 3).

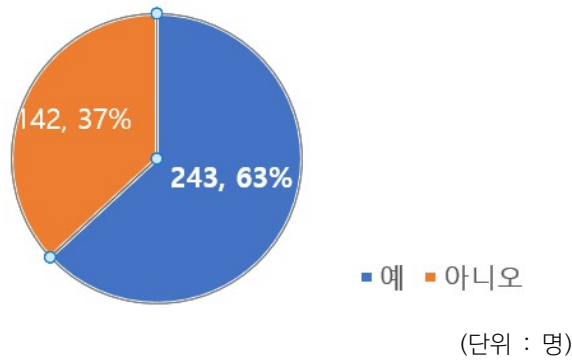


그림 3. 자전거 탑승 유무

‘자전거 탑승 시 헬멧을 착용해야 한다고 생각하나요?’ 문항에서는 약 80%의 학생들이 자전거를 탈 때 헬멧을 착용해야 한다고 응답하여 설문조사에 참여한 중학생들이 헬멧 착용에 대한 중요성을 인식하고 있다는 것을 확인하였다 (그림 4).

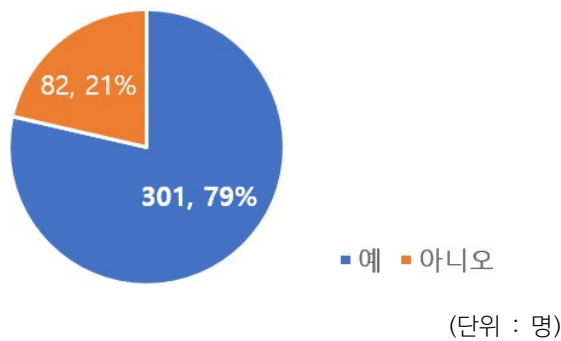
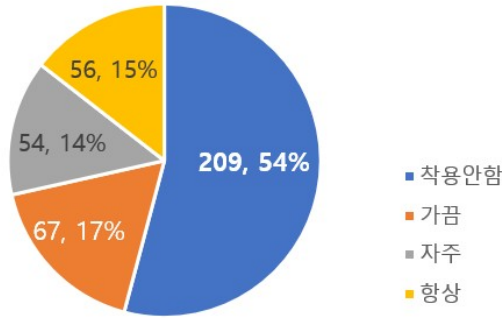


그림 4. 헬멧 착용에 대한 인식

‘자전거를 탈 때 헬멧을 얼마나 자주 착용하나요?’에 대한 문항에서는 50% 이상의 학생들이 자전거를 탈 때 헬멧을 착용하지 않는다고 응답하였다 (그림 5). 이어서 ‘가끔(17%)’, ‘항상(15%)’, ‘자주(14%)’ 순으로 응답 학생 수가 많았고, 세 항목의 답변 비율은 비슷하게 나타났다. 이러한 결과를 통해 자전거를 탈 때 10명 중 5명은 헬멧을 착용하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

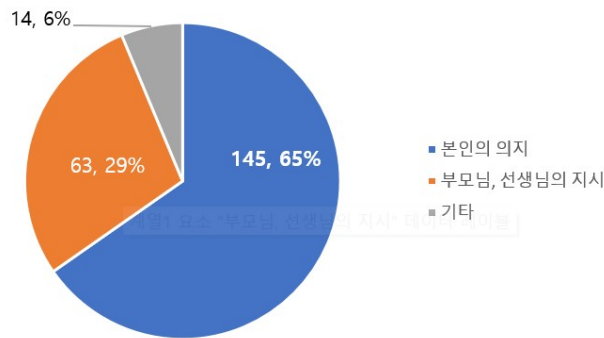


(단위 : 명)

\* 가끔(10번 탑승 중 1~4번), 자주(10번 탑승 중 5~8번), 항상(10번 탑승 중 9~10번)

그림 5. 헬멧 착용 빈도

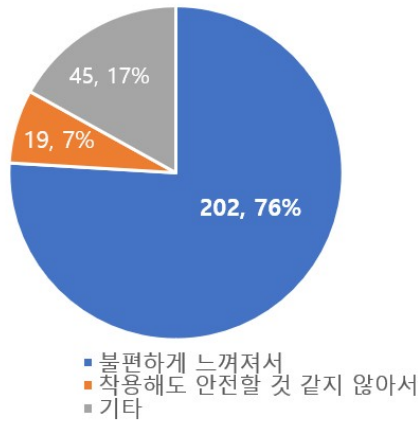
‘자전거를 탈 때 헬멧을 착용한다면 그 이유를 적어주세요.’ 문항에서는 응답자의 60% 이상의 학생들이 스스로 자신의 안전을 위해 헬멧을 착용한다는 것을 알 수 있다 (그림 6). 그 외에 30% 학생들은 부모님과 선생님의 지시로 헬멧을 착용하고 있다는 것을 확인하였다 (그림 6).



(단위 : 명)

그림 6. 헬멧을 착용하는 이유

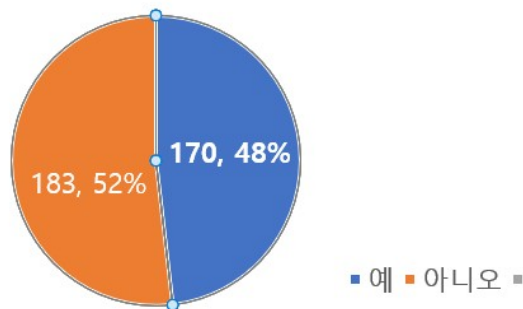
‘자전거를 탈 때 헬멧을 착용하지 않는다면 그 이유를 적어주세요.’ 문항에서는 학생들이 응답한 헬멧을 착용하지 않는 이유 중 대부분은 헬멧이 불편하게 느껴지기 때문이었고, 또 착용해도 안전할 것 같지 않다는 의견도 45명(17%)으로 높은 편으로 나타났다 (그림 7).



(단위 : 명)

그림 7. 헬멧을 착용하지 않는 이유

마지막 문항인 ‘도로교통법 제 32조에 따른 헬멧 착용 의무화에 대해 알고 있나요?’ 문항에서는 헬멧 착용 의무화에 대해 알고 있는 학생이 52%이었고, 알고 있지 않은 학생의 비율이 48%로, 응답 중학생의 절반 가까이가 헬멧 착용 의무화에 대해 모르는 것으로 나타났다 (그림 8).



(단위 : 명)

그림 8. 헬멧 착용 의무화를 알고 있는지에 대한 유무

현재 자전거를 자주 타는 학생들이 대부분이고 그들 중 실제로 헬멧을 착용하지 않는 비율이 50%를 넘는다. 설문조사 결과를 통해 다수의 학생이 헬멧을 착용해야 한다는 것을 생각하고는 있었지만 정작 실제로 착용하지는 않는다는 것을 알 수 있었다. 더 나아가 중학생들이 헬멧을 착용하지 않는 이유에는 헬멧을 착용하면 불편하다는 의견이 다수 있었고 그 외에도 헬멧을 착용해도 안전할 것 같지 않다는 의견의 응답자 수도 45명으로 적지 않다. 따라서 자전거를 이용하여 통학하는 중학생들의 헬멧에 착용에 대한 인식을 개선하고 헬멧 착용률을 높이기 위해 헬멧 모형을 이용한 충격력 비교 실험을 수행하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 운동량과 충격량

운동량( $P$ )은 운동하는 물체의 운동 효과를 나타내는 양으로, 물체의 질량( $m$ )과 속도( $v$ )의 곱으로 나타낼 수 있다. 운동량의 크기는 물체의 질량이 클수록, 물체의 운동 속도가 빠를수록 크고, 운동량의 방향은 속도의 방향과 같다.

$$P = mv \text{ [단위: kg} \cdot \text{m/s]}$$

충격량( $I$ )은 물체가 받는 충격의 정도를 나타내는 양으로, 물체의 작용한 힘( $F$ )이 클수록, 그 힘이 작용한 시간( $\Delta t$ )이 길수록 충격량이 크다. 또 충격량의 방향은 물체에 작용한 힘(충격력)의 방향과 같다.

$$I = F\Delta t \text{ [단위: N} \cdot \text{s]}$$

물체가 힘을 받으면 속도가 변하므로 운동량이 변하고, 운동량의 변화량은 충격량과 같다. 따라서 힘이 클수록, 힘이 작용한 시간이 길수록 충격량이 커지므로 운동량의 변화량도 커진다. 그리고 운동 방향으로 물체가 받은 충격량만큼 운동량이 증가하고, 운동 방향과 반대 방향으로 물체가 받은 충격량만큼 운동량이 감소한다.

$$I = F\Delta t = m\Delta v = mv - mv_0 = \Delta P$$

### 2. 우리나라 자전거 손상 환자의 피해 특징

자전거 사고는 찰과상, 타박상 같은 경미한 손상과 두부 외상, 복부 장기 손상 등 종류와 중증도가 다양한 손상을 유발하는데, 김보인 외(2009)의 연구에 의하면, 자전거 손상의 22~47%가 두부 외상이라고 보고하고 있다. 2009년에 진행된 자전거 손상 환자의 역학적 특징 분석에서 손상 부위는 사지 부위가 46.7%로 가장 많았고 두부가 32.4%, 안면부가 14%, 척추가 10.3%, 흉부/복부는 8.5%/3.6%로 나타났다고 하였다 (김보인 외, 2009). 또 전체 환자들 중 헬멧을 착용한 환자는 사망자는 없었으며, 미착용군의 사망률은 0.6%으로 헬멧을 착용함으로써 두부 손상을 약 85%, 뇌 손상을 약 88%가량 예방할 수 있다는 것을 확인하였다 (김보인 외, 2009).

### 3. 두부 손상 보호를 위한 승객용 헬멧 개발

임정구 등(2010)은 충격 흡수 능력이 우수하며 연소 시 독성 가스를 유발하지 않고, 피부 접촉 시 알레르기 반응이 없는 실리콘 폼을 이용하여 실리콘 헬멧을 제작하였고, Snell의 헬멧 검사 방법 중 헬멧 충격능 검사(Impact management test) 방법을 이용하여 낙하 높이를 다르게 하며 헬멧이 충돌 시 헬멧 안의 두부 모형에 전해지는 가속도의 변화를 측정하였다. 그 결과 얇은 헬멧은 헬멧 내부의 밀도가 고르지 않았고 충격에 대한 흡수 능력도 충분하지 않았다. 또 두꺼운 헬멧의 경우에도 충격 흡수 능력이 만족스럽지는 않았지만, 일부분에서는 자전거 헬멧과 유사한 정도의 흡수 능력을 보였다고 보고하였다 (임정구 등, 2010).

### Ⅲ. 연구 방법 및 결과

먼저, 달걀 보호 구조물 낙하 실험을 통해 운동량과 충격량, 충격력의 관계를 이해하였고, 3D 프린터를 사용한 구조물을 제작하여 헬멧 모형의 구조와 완충재의 종류에 따른 충격력을 비교하는 실험을 수행하였다.

#### 1. 예비 실험: 달걀 보호 구조물 낙하 실험

##### (1) 구조물의 종류에 따른 충격력 비교

구조물의 종류에 따른 충격력 비교 실험은 모두 3회 실시하였다.

**1차 실험**에서는 나무젓가락과 빨대를 이용하여 3종의 구조물(나무젓가락만 이용, 나무젓가락과 빨대를 함께 이용, 빨대만 이용)을 제작한 후 어떤 종류의 구조물이 달걀을 가장 잘 보호하는지에 대해 비교해보았다 (그림 9). 동일한 높이에서 떨어뜨렸을 때 3종의 구조물 모두 달걀을 보호하지 못했다. 그러한 이유로는 나무젓가락이 달걀에 직접 맞닿아 있었던 것과 달걀을 너무 단단히 고정해서 충격이 달걀에 직접적으로 전달되었을 것, 또 외골격이 부서지지 않아서 오히려 충격흡수 시간 단축에 영향을 주었을 것이라 생각하였다.



그림 9. (1차 실험) 달걀 보호 구조물 제작 과정

이러한 결과를 반영하여 달걀이 충격을 받는 시간을 늘려 충격력을 줄일 수 있는 구조, 즉 속이 빈 빨대를 이용하여 완충효과를 증가시킬 수 있는 구조물을 다시 제

작하였다. 또 부서지기 쉬운 소재로 외골격을 만들어 외골격이 충격을 흡수할 수 있도록 만들었다. 충격을 받는 시간이 비교적 짧은 나무젓가락보다 충격을 받는 시간이 긴 빨대를 주로 사용하였다. 달걀과 접하는 부분을 중심으로 빨대를 최대한 효율적으로 적게 사용하는 방안에 대해 고안한 결과, 최소 2겹을 쌓고 겉에는 작은 빨대들을 붙여야 완충효과를 증가시킨다는 것을 알 수 있었다. 그러나 실험은 실패하였고 (그림 10), 실패한 이유를 여전히 딱딱한 나무젓가락이 받은 충격력이 달걀에 전달되었기 때문인 것으로 생각하였다.



그림 10. (1차 실험) 낙하 결과

2차 실험에서는 첫 번째 실험의 결과를 반영하여 충격을 받는 시간을 좀 더 늘리고 충격력을 줄일 수 있는 방법을 고민하여 구조물을 제작하였다 (그림 11). 먼저 빨대를 이용하여 마름모 모양의 육면체를 제작하였고 육면체 안에 달걀을 넣고 고무줄로 고정시켰다. 이후 육면체 바깥부분을 빨대로 감싸는 형태로 제작하여 글루건으로 고정시킨 후 감싼 빨대의 겉부분에 충격흡수를 위한 14 cm × 6.5 cm × 6.5 cm 크기의 나무젓가락 외골격을 제작하였다. 그러나 두 번째 실험에서도 달걀을 보호하지는 못했다 (그림 12).

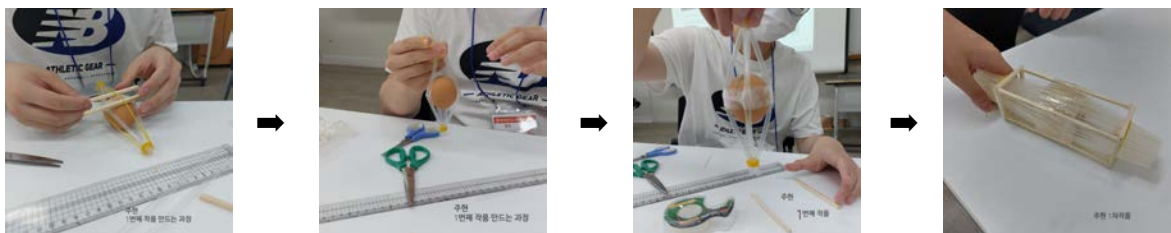


그림 11. (2차 실험) 달걀 보호 구조물 제작 과정



그림 12. (2차 실험) 낙하 결과

3차 실험에서는 빨대 20개를 테이프로 이어 붙인 후 달걀을 세로로 이어붙인 빨대 중간에 놓고 빨대를 동그랗게 말아 달걀을 감았다. 그리고 다시 빨대 10개로 이어붙인 후 앞에서 만든 구조물에 수직방향으로 감은 후 만든 구조물의 양 끝을 각각 10개의 고무줄로 막았다. 마지막으로 수직방향의 빨대 곁에 2 cm의 빨대를 8개 붙여서 달걀 보호 구조물을 완성하였다 (그림 13).



그림 13. (3차 실험) 달걀 보호 구조물 제작 과정

그림 13의 과정을 통해 제작된 구조물은 충격을 받는 시간이 비교적 짧은 나무젓가락보다 충격을 받는 시간이 긴 빨대를 주로 사용하였고, 달걀과 접하는 부분을 중심으로 빨대를 최대한 효율적으로 적게 사용하는 방안으로 고안하였다. 최소 2겹을 쌓고, 곁에는 작은 빨대들을 붙여 완충효과를 증가시켰다. 3차시도 끝에 달걀을 보호하는 데 성공하였다 (그림 14). 결론적으로 충격량은 충격력과 충격을 받는 시간의 곱이기 때문에 충격량이 일정할 때 충격을 받는 시간이 늘어나면 받는 충격의 양은 감소된다. 빨대는 공기층이 존재하기 때문에 충격을 받을 때 시간이 늘어나면서 받는 충격력의 크기를 감소시킬 수 있다. 위 실험에서도 결론적으로 달걀을 빨대로 많이 감쌀수록 덜 깨지는 것을 파악하였다.



그림 14. (3차 실험) 낙하 결과

## (2) 완충재의 종류에 따른 충격력 비교

완충 작용을 하는 재료 중 가장 충격을 잘 흡수하는 재료를 찾고 충격을 잘 흡수하는 재료들의 특징을 파악하기 위해 실험을 진행하였다. 준비물로는 빨대, 폴리스티렌, 솜, 스펀지, 우드락, 테이프, 달걀, 가위를 사용하였고, 여러 가지 완충 작용을 지닌 재료들 중 빨대, 폴리스티렌, 면, 스펀지, 우드락을 선택한 이유는 헬멧을 제작할 때 실제로 사용하기 적절하기 때문이다. 예를 들어, 에어캡 같은 재료들도 완충 작용을 지니고 있지만 실제로 헬멧을 제작하기에는 현실성이 부족하기에 배제하였

다. 여기서 현실성이 부족하다는 뜻은 에어캡 일회용이고 양이 적을 때에는 완충 효과가 없기 때문이라는 의미이다.

**[실험과정]**

- 1) 빨대, 폴리스티렌, 솜, 스펀지, 우드락을 10 cm x 10 cm로 제작한다(빨대는 테이프로 이어 붙인다).
- 2) 제작한 5가지 재료들로 각각 달걀을 감싼 후 테이프로 고정시킨다(테이프의 양은 같게 한다).
- 3) 지면에서 1 m부터 3 m까지 50 cm 간격으로 각각 5번씩 떨어뜨린다.
- 4) 달걀의 깨짐 유무를 기록한다.

**표 1. 완충재의 종류에 따른 달걀의 깨짐 유무**

완충재종류 낙하높이	면	스펀지	빨대	우드락	폴리스티렌
1.0 m	×	○	○	○	○
1.5 m	×	×	○	○	○
2.0 m	×	×	×	×	○
2.5 m	×	×	×	×	○
3.0 m	×	×	×	×	○

(○: 깨지지 않음, ×: 깨짐)

완충재의 종류에 따른 달걀의 깨짐 유무를 알아보기 위한 실험을 수행한 결과(표 1), 면으로 감싼 달걀은 모든 높이에서 깨졌고 스펀지로 감싼 달걀은 바닥으로부터 1.5 m 높이부터 깨졌다. 우드락과 빨대로 감싼 달걀은 2 m부터 깨졌는데 둘 다 완전히 깨지지 않았고 실금이 생긴 정도였다. 그리고 폴리스티렌으로 감싼 달걀은 모든 높이에서 깨지지 않았다. 따라서 달걀 낙하 실험을 통해 폴리스티렌이 충격을 흡수하는 데에 가장 적합하다는 결론을 도출할 수 있었다. 또한 면이나 스펀지가 다른 재료들에 비해 낮은 높이에서도 잘 깨지는 이유를 생각해보았는데 양이 많을 경우에는 충격 흡수가 뛰어나지만 두께가 얇은 상태에서는 충격을 받았을 때 충격력이 내부에 직접적으로 전달되기 때문에 잘 깨졌을 것이라고 생각하였다.

**2. 본 실험: 헬멧 모형의 종류와 완충재의 재질에 따른 충격력 비교**

**(1) 헬멧 모형의 종류(구멍 유무)에 따른 충격력 비교**

헬멧은 주로 두 개의 분류로 나뉘는데 유아용 헬멧과 성인용 헬멧으로 나뉜다. 유아용 헬멧은 통풍을 위한 구멍이 없어 짧은 시간동안 착용하기에 적합하고 성인용 헬멧은 통풍을 위한 구멍이 있어 장시간 동안 많은 땀 배출에 적합하다. 하지만 우리는 ‘성인용 헬멧에 있는 구멍들에 의해 헬멧 착용자가 받는 충격력이 더 커지거나 작아지지 않을까?’ 라는 생각이 들었고 구멍이 있는 헬멧을 착용한 착용자가 받는 충격력이 더 클 것이라는 가설을 세우고 실험을 진행하였다. 따라서 이번 실험은 헬멧에 있는 구멍이 착용자가 받는 충격력을 변하게 만드는 변수가 되는지 확인하는 것을 목표로 둔다.

준비물은 스탠드, 줄 자, 접시저울(낙하할 때 받는 힘이 일정한지 확인하는 용도), 3D 모델링 모형, 달걀, 얇은 판(바닥에 부딪치는 면을 고르게 만들기 위해 저울의 접시 위에 깔아놓는다.), 도르래와 실(낙하할 때 바닥에 부딪치는 면을 일정하게 하기 위해 실에 매달아서 낙하시킨다. 단, 실에 작용하는 장력은 고려하지 않는다.)을 사용하여 진행하였다. 실험과정은 다음과 같다.

#### [실험과정]

- 1) 3D 프린팅 프로그램인 ‘턴커캐드’를 이용하여 프로그램 내에 실제 사이즈 크기의 달걀을 모델링한다.
- 2) 모델링한 달걀과 1:2 크기 비율의 모형을 생성한다.
- 3) 만든 모형의 무게중심에 달걀이 들어갈 공간을 제작한다.
- 4) 3에서 만든 모형의 밑면의 중심을 기준으로 1cm씩 간격을 두어 반지름이 0.4cm 구멍을 6개 뚫는다.
- 5) 과정 3)에서 만든 모형과 과정 4)에서 만든 구멍이 없는 헬멧 모형(그림 15)을 프린트한다.
- 6) 달걀을 두 개의 모형에 각각 고정시킨 후 90cm 높이에서 낙하시킨다.
- 7) 달걀의 깨진 정도를 파악한다.



그림 15. 3D 프린터로 제작한 구멍이 없는 헬멧 모형

실험결과, 구멍을 뚫지 않은 모형에 넣은 달걀은 약 5개의 1~2 cm 실금이 생겼다 (그림 16a). 반면 구멍을 뚫은 모형에 넣은 달걀은 지면과 닿은 부분의 겉면이 완전히 깨져있었다 (그림 16b).



a. 구멍을 뚫지 않은 모형

b. 구멍을 뚫은 모형

그림 16. 헬멧의 구멍의 유무에 따른 달걀의 깨짐 유무

결론적으로 우리가 세운 가설대로 구멍이 없는 헬멧이 충격을 더 많이 흡수하였고 헬멧의 구멍은 헬멧 착용자가 받는 충격력을 변하게 만드는 변수가 될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 다만 헬멧의 구조를 달걀 모양에 맞추어 제작하다 보니 달걀이 헬멧과 충돌함에 따라 달걀의 특정 부위 위주로 충격력이 작용함에 따라 구멍이 있는지와 없는지를 파악할 수 없기에 반구 모양의 헬멧을 다시 제작하여 다음 실험을 진행하였다.

## (2) 헬멧 모형의 종류(구멍의 모양) 따른 충격력 비교

이번에는 반구형 헬멧을 이용하고, 구멍의 형태에 따른 달걀의 깨짐 정도를 파악하는 실험을 진행하여 어떤 형태의 구멍이 달걀을 가장 잘 보호할 수 있는지에 대하여 파악하였다. 3D 프린터로 제작한 헬멧의 다양한 모형 (그림 17) 및 실험과정은 다음과 같다.



구멍 없음



원형



사각형



삼각형

그림 17. 3D 프린터로 제작한 모형

### [실험과정]

- 1) 3D 모델링 프로그램에 반지름이 5 cm인 반구를 디자인한다.
- 2) 두께를 0.5 cm로 유지하여 내부에 달걀이 들어갈 빈 구멍을 만든다.
- 3) 과정 2)에서 만든 모형에 삼각형, 사각형, 원형으로 구멍을 뚫은 구조를 각각 디자인 한다.
- 4) 달걀을 각각의 모형에 밴드를 이용하여 고정시켜 낙하시킨다. 이는 실제 헬멧 구조에서 머리를 고정시키는 머리끈에서 착안하였다.

5) 구멍이 없는 구조에 넣은 달걀을 5 cm 높이부터 깨지는 높이까지 낙하 시킨 후 그 높이를 기록하고 나머지 구조들에 넣은 달걀들을 차례로 구멍이 없는 구조에 넣은 달걀이 처음으로 깨진 높이에서 떨어트려 깨짐의 유무를 확인한 후, 깨지지 않았을 경우 5 cm 간격으로 높이를 늘리며 실험을 계속 진행한다.

※ 삶은 달걀이 아닌 날달걀을 특별히 사용한 이유는 금간 정도와 내부의 액체가 밖으로 흘러나온 정도에 따라 달걀이 받은 충격력에 의한 피해를 눈으로 볼 수 있기에 사용하였다.

다음 표 2는 그림 17의 헬멧 모형을 이용하여 실험을 진행한 결과이다.

표 2. 헬멧 모형에 뚫은 구멍의 모양에 따른 실험 결과

헬멧 모형의 구조 낙하높이	구멍이 없음	원형으로 뚫은 구조	사각형으로 뚫은 구조	삼각형으로 뚫은 구조	헬멧 모형 사용 안함
5 m	(5a)	(5b)	(5c)	(5d)	(5e)
10 m	(10a)	(10b)	(10c)	(10d)	-
12.5 m	(12.5a)	(12.5b)	(12.5c)	(12.5d)	-

헬멧 모형 없이 얇고 달걀을 떨어뜨렸을 때, 즉 먼저 비교를 위해 헬멧 모형에 넣지 않은 달걀을 5 cm 높이에서 낙하한 결과 표 2(5e)와 같이 달걀이 깨진 후 내부의 액체가 쏟아져 나왔다.

두 번째로 구멍을 뚫지 않은 모형에 넣은 달걀을 5 cm 높이에 낙하시킨 결과 외형의 변화가 생기지 않았다 (표 2 (5a)). 마찬가지로 10 cm 높이에서 낙하시켰을 때도 외형의 변화가 없었다 (표 2 (10a)). 하지만 12.5 cm 높이에서 낙하시켰을 때에는 달걀에 실금이 나타났다 (표 2 (12.5a)). 그러나 내부의 달걀의 흰자가 흘러나오지 않음을 볼 수 있다.

사각형 구멍의 헬멧 모형을 이용하여 5 cm 높이에서 낙하시켰을 때에는 외형의 변화가 없었다 (표 2 (5c)). 10 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 살짝 금이 생겼으나 삼각형 구멍 구조와 비교했을 때는 금이 크게 생기지는 않았고 내부의 액체도 흐르지 않았다 (표 2 (12.5c)).

삼각형 구멍의 헬멧 모형을 이용하여 5 cm 높이에서 낙하시킨 결과는 외형의 변화가 없었고 10 cm 높이에서 낙하시켰을 때에는 달걀 껍데기의 일부가 부서질 정도로 금이 생겼지만 내부의 액체는 나오지 않았다 (표 2 (10d)). 12.5 cm 높이에서 낙하시켰을 때에는 금이 많이 발생하였고 내부의 액체도 많이 흘렀다 (표 2 (12.5d)).

원형 구멍의 헬멧 모형을 이용하여 5 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 외형의 변화가 없었고 (표 2 (5b)), 10 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 1 cm 정도의 실금이 생겼다 (표 2 (10b)). 그리고 내부의 액체는 흐르지 않았다. 12.5 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 금이 10 cm 높이에서 낙하시켰을 때보다 길게 생겼고 내부의 액체도 밖으로 흘렀다 (표 2 (12.5b)).

표 3. 헬멧 모형에 뚫은 구멍의 모양에 따른 달걀의 깨짐 유무

낙하높이 \ 3D모형의 구조	구멍이 없음		원형으로 뚫은 구조		사각형으로 뚫은 구조		삼각형으로 뚫은 구조		헬멧 모형 사용 안함	
	금	액체	금	액체	금	액체	금	액체	금	액체
5 m	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
10 m	○	×	○	×	○	×	○	×	○	○
12.5 m	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○

(○: 깨지지 않음, ×: 깨짐)

낙하 후 달걀에 금이 생긴 정도와 내부의 액체가 흐른 정도를 비교해보면 표 3과

같이 ‘구멍 없음 - 원형 구멍 - 사각형 구멍 - 삼각형 구멍 - 모형 사용 안함’ 순으로 달걀이 덜 깨진 것을 실험을 통해 확인하였다.

### (3) 헬멧 모형의 내부에 부착한 완충재의 종류에 따른 충격력 비교

지금까지 진행한 실험들에서 더 나아가 우리는 헬멧 모형에 여러 가지 완충재를 부착하여 실제 헬멧의 기능을 표현한 후 실험을 진행하여 헬멧의 안정성을 파악해 보았다. 우리는 예비 실험에서 사용한 3종류의 소재(면, 빨대, 스펀지)와 에어캡을 완충재로 사용하여 실험을 진행하였다. 우드락과 폴리스티렌은 돔 형태인 헬멧 모형의 구조에 부착하기 힘든 점을 감안하여 제외하고 에어캡을 추가하였다. 4가지 완충재를 구멍이 없는 헬멧 모형에 부착하여 달걀을 넣어 낙하시킨 후 달걀의 깨지는 정도가 어떠한지 파악하였다. 실험 과정은 다음과 같다.

#### [실험과정]

- 1) 면, 빨대, 스펀지, 에어캡과 구멍이 없는 헬멧 모형 (그림 18)을 준비한다.
  - 2) 구멍이 없는 헬멧 모형의 내부에 4가지 완충재를 붙인다 (단, 붙이는 질량은 똑같이 한다).
  - 3) 각각 5 cm 높이부터 달걀을 넣은 헬멧 모형을 낙하시키고 달걀이 깨질 때까지 5 cm 간격으로 높이를 늘리며 실험을 진행한다.
- ※ 완충재인 면, 빨대, 스펀지, 에어캡 비교를 위해서 구멍을 터트린 에어캡도 추가하여 실험을 진행하였다.



그림 18. 헬멧 모형에 완충재를 부착한 모습

실험 결과는 표 4와 같다. 먼저, 모든 구조들에 넣은 달걀들을 5 cm 높이에서 낙하시켰을 때 달걀의 외형의 변화는 없었다. 구멍을 터트린 에어캡을 붙인 구조에 넣은 달걀은 10 cm에서 낙하시켰을 때 약간의 실금이 생겼다. 그리고 15 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 내부의 액체가 밖으로 조금 흐른 상태였다.

에어캡을 붙인 헬멧 모형에 넣은 달걀을 낙하시킨 결과 30 cm 높이 미만까지는 외형의 변화가 없다가 30 cm 높이에서는 아주 약간의 실금이 생겼다. 40 cm 높이에서 낙하시켰을 때는 실금이 커져 구멍이 생겼고 내부의 액체도 밖으로 흘러나왔다.

면을 붙인 헬멧 모형에 넣은 달걀을 낙하시킨 결과 40cm 높이에서는 실금과 함께 내부의 액체가 흘러나왔다.

스펀지를 붙인 헬멧 모형에 넣은 달걀을 낙하시킨 결과, 60 cm 높이에서는 실금이 아주 조금 생겼고 65 cm 높이에서는 내부의 액체가 살짝 흘렀으며 70 cm 높이에서는 완전히 산산조각 나서 내부의 액체가 완전히 밖으로 분출된 상태였다. 사진 상으로는 달걀의 윗부분이 완전히 없어졌는데 내부의 액체가 밖으로 분출되는 과정에서 같이 부서진 것으로 파악된다.

표 4. 모형의 내부에 부착한 완충재의 종류에 따른 실험 결과

완충재의 종류 낙하높이	구멍을 터트린 에어캡	구멍을 터트리지 않은 에어캡	면	스펀지	빨대
5 cm	변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음
10 cm		변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음
15 cm		변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음
...					
30 cm	-		변화 없음	변화 없음	변화 없음
40 cm	-			변화 없음	변화 없음
...					
70 cm	-	-	-		

마지막으로 빨대를 붙인 구조에 넣은 달걀을 낙하시킨 결과, 지금까지 가장 높은 곳까지 깨지지 않고 유지된 스펀지를 붙인 구조가 깨진 높이인 70 cm 높이에서 이 구조를 낙하시켰을 때 실금도 보이지 않았다. 70 cm 높이보다 더 높은 높이에서 낙

하시키려고 시도하였으나 낙하하는 과정에서 충돌되는 바닥면의 일정함이 점점 유지되는 것이 힘든 관계상, 5가지 완충재 중에서 가장 완충이 좋다고 판단만하고 더 높은 높이에서 실험은 진행하지 않았다.

완충재의 완충 효과 정도로 판단하였을 때에는, 구멍을 터트린 에어캡 < 에어캡 < 면 < 스펀지 < 빨대 순으로 충격 완화 효과가 높았다. 즉 헬멧 모형에 부착한 완충재 중 빨대에서 달같이 받는 충격력이 가장 작게 나타났다.

#### IV. 결론 및 제언

앞선 ‘청소년 대상으로 자전거 헬멧 인식에 관한 설문조사’를 통해 청소년들이 자전거를 탈 때 헬멧을 착용해야한다고 생각하지만 실제로 헬멧을 착용하는 학생들은 극히 드물다는 결과를 설문조사를 통해 확인하였다. 그리고 착용하지 않는 이유를 확인한 후 우리는 헬멧을 착용하여도 안전할 것 같지 않다는 인식을 가진 학생들에게 집중하였다.

우리는 크게 두 가지 측면, 즉 헬멧에 부착된 완충재의 종류와 헬멧의 구멍 형태의 차이에 따른 충격력 비교 실험을 통해 헬멧이 안전하다는 것을 입증하였다.

첫째, 달같이 같은 높이에서 낙하할 때(속도 일정)의 질량이 같기 때문에 운동량의 변화도 같아서 달같이 받는 충격량의 크기는 모두 같지만 완충 작용에 의해 충격을 받는 시간이 달라져서 받는 충격력이 달라진다. 여러 가지 완충재 중 실험을 통해 실제로 자전거 헬멧에 쓰이고 있는 폴리스티렌이 가장 완충 작용이 뛰어나다는 것을 파악하였고 더 나아가 3D 모델링을 통해 헬멧 모형을 제작한 후 완충재들을 내부에 붙여 낙하 실험을 한 결과에서도 폴리스티렌의 완충 작용이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 이 실험을 통해 우리는 폴리스티렌 소재가 실제로 헬멧 제작에 쓰일 수 있고 실용성 있는 재료임을 다시 한 번 확인하였다.

둘째, 헬멧의 형태 부분의 안전성을 확인하였다. 먼저 헬멧에 필수적인 통풍을 위한 구멍이 항상 제작되어지는데 우리는 이 구멍이 착용자가 받는 충격력을 변하게 만드는 요인이 아닌지 확인해보기 위해 실험을 하였고 그 결과 헬멧에 구멍이 있을 때가 없는 경우보다 착용자가 받는 충격력은 더 커진다는 것을 알게 되었다. 이로써 자전거 헬멧에는 통풍을 위한 구멍이 필수적이지만 이 때문에 착용자들의 안전이 더 위험하지는 않을까라는 생각이 들었고 구멍 형태에 따라 받는 충격이 달라지는지에 대해서도 실험을 통해 알아보았다. 그 결과 여러 형태의 구멍들 중 실제로 자전거 헬멧에 주로 사용되는 원형 구멍이 가장 충격력을 덜 받게 한다는 것을 알게 되었다. 이로써 구멍이 없는 유아용 헬멧이 착용자의 안전에는 가장 효과적이겠지만 장시간 이용하는 성인용 착용자들에게는 불가피하게 필수적인 통풍을 위한 구멍이 현재는 안전에 최적으로 설계되어 있다는 것을 알 수 있었다.

지금까지 진행되어 온 여러 헬멧에 관한 연구들을 살펴보면 헬멧을 착용하였을

때 두부 손상을 최대 85%까지 줄일 수 있다고 하였는데 많은 사람들은 이런 사실에 대해 접해봤음에도 불구하고 헬멧을 착용하지 않고 있다. 많은 사람들이 다시 한번 우리의 연구를 통해 헬멧을 착용하지 않았을 때보다 헬멧을 착용하였을 때 훨씬 안전하다는 것을 진심으로 깨닫는다면 이 또한 더할 나위 없을 것이라고 생각한다. 헬멧을 착용하는 것이 안전사고 대비에 우리가 할 수 있는 최우선의 방법이므로 사람들이 헬멧을 믿고 그저 착용해주기를 바란다.

## V. 참고문헌

- 김보인, 정진희, & 정구영. (2009). 우리나라 자전거 손상 환자의 역학적 특징: 전국 55 개 병원 응급실 환자를 대상으로. *대한외상학회지*, 22(2), 128-133.
- 임정구, & 권기선. (2010). 두부 손상 보호를 위한 승객용 헬멧 개발 연구. *한국항공운항학회지*, 18(1), 58-64.

물리B

## 02\_무선 충전의 효율 개선 방법 연구



# 무선 충전의 효율 개선 방법 연구

지정현 ( 군산기계공업고등학교 1학년 )

지도교수 : 오혜민 ( 군산대학교 물리학과 )

## 초록

기술 발전으로 무선 제품이 일상생활에서 더 많이 사용되고 있는데, 특히 핸드폰, 청소기, 이어폰 등이 무선 충전을 통해 편리하게 사용되고 있다. 이러한 무선 제품들은 무선 충전 패드를 통해 간편하게 충전이 가능하며, 이는 편리성을 뛰어나다. 그러나 무선 충전기 사용 시 충전기의 위치 조절이나 거리 문제로 어려움이 있을 수 있어, 이를 극복하고 효율을 향상시키기 위하여 무선충전기의 원리중 하나인 전자기유도법칙을 이해하고 무선충전기의 수신부 코일의 감는 횟수, 두께, 직경을 조절하여 송신부와 수신부의 충전거리를 측정해보았다. 수신부의 코일의 감는 횟수와 두께, 직경이 증가할수록 유도기전력이 발생하는 거리가 멀어지더라도 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

## I. 서론 (또는 연구의 필요성 및 목적)

기술의 발전으로 우리 일상생활에서는 유선 제품뿐만 아니라 무선 제품들도 더 많이 사용되고 있다. 특히 핸드폰은 무선 충전기를 통해 간편하게 충전할 수 있는 필수 아이템 중 하나로 자리 잡았으며, 무선 청소기를 사용하여 청소를 할 수 있고, 최근에는 줄 없는 이어폰과 헤드셋도 개발되어 많은 이들이 무선으로 충전하며 음악을 즐길 수 있게 되었다.

일반적으로는 충전을 위해 장치와 충전기를 유선으로 연결해야 하는 경우가 많았지만, 무선 제품들은 무선 충전 패드 위에 올려두기만 하면 간편하게 충전이 가능해진다. 이러한 무선 제품들은 편리성을 높이기 위해 개발되었다. 그러나 무선 충전기를 사용할 때 충전기의 위치를 정확히 맞추거나 거리가 멀어지면 충전이 어려워지는 등의 문제점이 있다. 따라서 우리는 무선 충전기의 작동 원리를 이해하고, 무선 충전기의 효율을 향상시키기 위해 무선 충전기를 제작하고 다양한 변수에 따라 효율성을 평가하고자 한다.



그림.1 무선충전 제품들

## II. 이론적 배경

### 1. 무선 충전기의 원리

무선 충전이란 선을 이용하지 않고 전자기 또는 음파를 이용하여 대기를 통해 신호를 전달하는 시스템을 말한다. 즉, 선을 사용하지 않고 전기에너지를 자기장 혹은 전자기파 형태로 변형하여 전력을 전달하는 기술을 의미한다. 무선 전력 전송은 크게 3가지 방식이 있다. 근거리에는 자기유도방식, 중거리에는 자기공진 방식 원거리에는 마이크로 방식을 이용한다.

### 1) 자기유도방식

전자기 유도를 이용하여 전력을 전송하는 방법인 자기 유도 방식

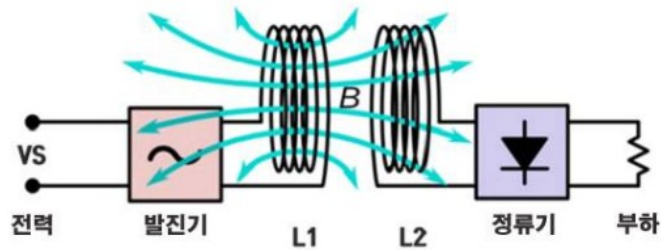


그림.2 자기유도방식

### 2) 자기공진방식

공명현상을 이용하여 전력을 전송하는 공진 유도 방식

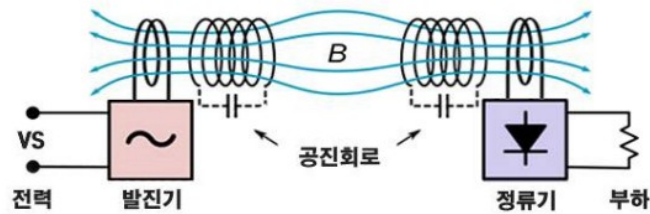


그림.3 자기공진방식

### 3) 마이크로 방식(전자기파 방식: RF)

안테나를 이용해 전파에 전력을 담아 전력을 전송해주는 RF 방식

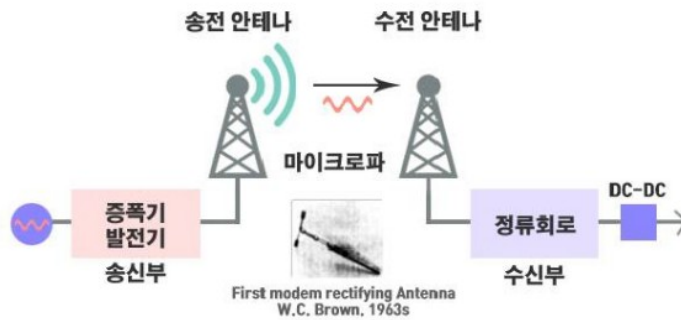


그림.4 마이크로 방식

이 세 가지 방법 중, 무선 충전 방식으로 사용하는 전자기 유도 방식을 주목했다. 본 연구에서는 자기장의 변화에 따라 유도 기전력이 발생하는 전자기유도 현상을 이용하여 무선 충전기의 효율이 우수함을 알아보고자 연구를 진행하였다.

## 2. 전자기유도 현상

자기장의 변화로 인해 전류가 발생하는 현상으로, 전자기 유도현상의 핵심 원리는 패러데이의 전자기유도 법칙이다. 이 법칙은 영국의 과학자 마이클 패러데이에 의해 발견되었으며, 자석의 자기장이 변화하면 그 주변의 회로에 전류가 유도된다.

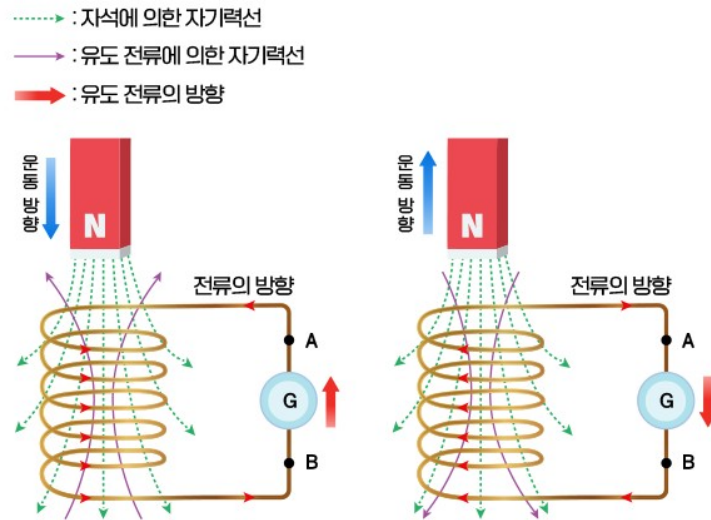


그림.5 전자기 유도현상

코일 주위에서 자석의 N극이 코일 쪽으로 다가올 때, 코일 내부를 통과하는 자기력선의 증가로 인해 코일 내부에서 전자기적 관성이 작용한다. 이 관성은 코일 내부를 침범하려는 자기력선의 증가를 막기 위해 코일에 반대 방향으로 전류를 유도한다. 이때, 코일을 통해 흐르는 전류의 방향은 B→G→A이다. 이것은 전원이 연결되지 않은 상태에서도 전자기적 관성에 의해 전류가 발생하는 전자기 유도현상을 나타낸다.

그리고 자석의 N극이 코일에서 멀어질 때, 코일 내부를 통과하는 자기력선의 감소로 인해 코일 내부에서 다시 전자기적 관성이 작용한다. 이번에는 감소하는 자기력선을 막기 위해 코일에 A→G→B 방향으로 전류가 유도된다. 이것은 이미 코일 내부에 들어온 자석의 자기력선을 현재의 관성에 따라 지키려는 현상을 나타낸다.

요약하면, 자석의 N극이 코일 쪽으로 다가오면 코일 내부에서는 증가하는 자기력선을 막기 위해 B→G→A 방향으로 전류가 유도되고, 자석의 N극이 멀어지면 A→G→B 방향으로 전류가 유도된다. 이러한 전자기적 관성에 의한 전류 유도로 인해 코일에서는 전자기 유도현상이 일어나게 된다.

### 1) 전자기 유도법칙

마이클 패러데이 (Michael Faraday)는 1831년 자기력선속의 변화에 의해 전압이 발생하는 현상을 발견하였고, 이를 유도 기전력(induced electromotive force)이라 명명하였다. 전자기 유도에 의한 기전력의 크기는 단위 시간당 자기 선속의 변화율과 코일의 감긴 횟수에 비례하며, 이는 다음과 같다.

$$V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \frac{\Delta (BA \cos \theta)}{\Delta t}$$

이때 코일의 감은 수(N), 자기장이 지나는 코일의 단면적(A)는 일정하며, 코일을 지나는 자기장의 세기(B)와 코일의 단면적방향(코일축방향)과 자기장의 방향과의 사잇각( $\theta$ )가 함께 변화하게 된다. 따라서 위에 식은 다음과 같게 된다.

$$V = -NA \frac{\Delta (B \cos \theta)}{\Delta t}$$

이때 코일과 코일의 간격에 따라 유도기전력의 크기는 변화하게 된다.

### 3. 스마트폰 무선 충전

스마트폰은 무선 충전기에 감긴 코일과 스마트폰 내부에 있는 코일을 사용함.

- ◆ 무선 충전기의 코일은 자석과 유사한 역할을 수행한다. 충전기 코일에 전류를 공급하면 코일은 자석처럼 특정 극성을 형성하게 되며, 전류의 흐름 방향을 반대로 전환하면 이 코일의 극성은 계속 N극과 S극으로 바뀌게 된다.

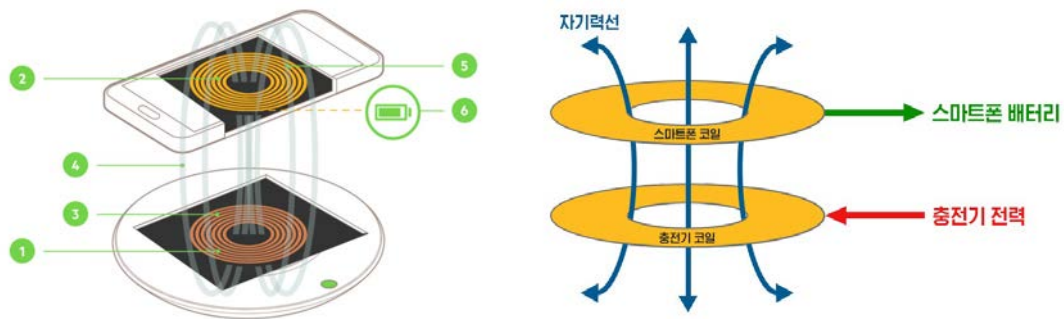


그림.6 스마트폰 무선 충전 구조

- ◆ 충전기의 코일, 즉 자석이 극성을 바꾸는 과정으로 스마트폰의 코일은 자기장을 방어하기 위해 자체적으로 극성을 생성하며, 이를 통해 유도된 전류를 생성한다. 발생한 전류는 스마트폰에 내장된 배터리로 흐르게 되어 무선으로 충전됨.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 1. 연구 방법 및 이론

본 실험에서는 외부로부터 전력을 받아 공급해주는 무선 충전기 역할의 송신부와 송신부로부터 형성된 자기장을 통하여 전력을 받아 충전하는 핸드폰 역할의 수신부로 구분하여 실험을 진행하였다.

실험에서는 송신부 코일에 전원부를 연결하여 전력이 공급되면 시간에 따라 변화하는 전류가 흐르고 송신부 코일 근처에는 시간에 따라 변화하는 자기장이 형성된다. 이에 따라 수신부 코일에서는 자속 변화를 억제하기 위해 유도 기전력을 형성하기 때문에 [그림 7]과 같이 LED의 불빛이 켜지는 것을 확인할 수 있다. 송신부 코일 내에 흐르는 전류의 변화량만큼 수신부 코일에 전류가 형성된다. 수신부 코일에 전류가 흐르게 되면 수신부 코일에 있는 LED(발광다이오드)에 전류가 유도되며 이때 수신부 코일에 흐르는 전류는 유도 전류라고 한다.

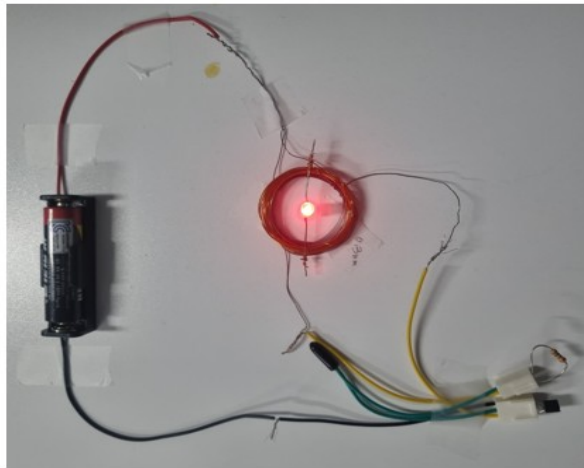


그림.7 전자기유도현상에 의해 구동된 LED

#### 2. 표준 무선 충전기 제작

본 연구에서는 [그림 7]과 같이 전력공급원을 연결하여 전류가 흐르는 송신부 코일로부터 자기장이 형성되고 송신부 코일 자기장 내 수신부 코일이 있으면 전자기 유도 현상으로 인하여 유도 전류 따른 거리 변화량을 알아보기 위한 것이며 이를 알아보기 위하여 [그림 7]과 같은 표준 무선 충전기를 제작하였다.

표준 무선 충전기는 송신부 코일과 수신부 코일에 따라 제작하는 방법이 다르며 표준 무선 충전기를 바탕으로 수신부 코일에만 변수를 적용한다.

## 1) 준비물

2 mm 에나멜선, 직경 20 mm 원통, UL 전선 케이블, 엔드 캡, 1.5V 알칼리성 건전지 (AA건전지), LED(소형 발광 다이오드), 버니어 캘리퍼스(0.05mm), 탄소 필름 저항기, 트랜지스터 (2N2222-PNP)

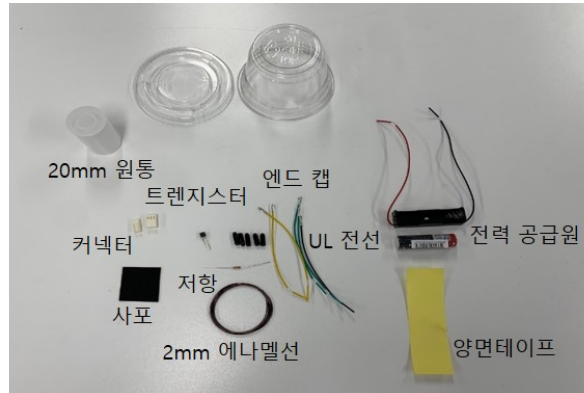


그림.8 무선충전기 준비물

## 2) 송신부

- (1) 두께 2mm 에나멜선을 40mm 정도 여유를 준다.
- (2) 직경 20mm 원형 통에 두께 2mm 에나멜선을 12회 감는다
- (3) 12회 감은 에나멜선 20mm 정도의 꼬리를 만든다.
- (4) 코일의 끝단의 선을 사포로 긁어낸다.
- (5) 회로를 연결한다. [ 아래 4) 회로 연결 방법 참조]

## 3) 수신부

- (1) 두께 2mm 에나멜선을 40mm 정도 여유를 준다.
  - (2) 직경 20mm 원형 통에 두께 2mm 에나멜선을 15회 감고 40mm 여유를 준다.
  - (3) 코일의 끝단의 선을 사포로 긁어낸다.
  - (4) LED(발광 다이오드) 다리를 수직이 되도록 피고 코일 양쪽으로 있는 40mm 여유 에나멜선을 수직인 LED 단자에 연결한다.
- ※ 이때 +. - 방향은 상관없다.

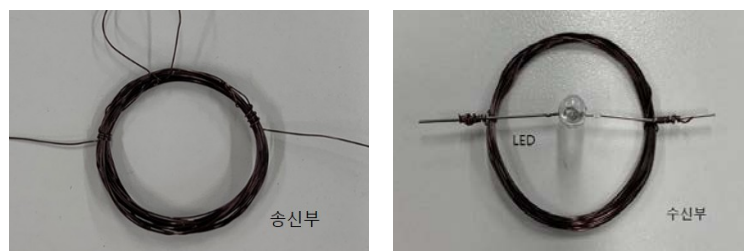


그림.9 무선 충전기의 송신부와 수신부

#### 4) 회로 연결 방법

앞선 과정에서 만든 송신부 코일을 [그림 10]의 회로도처럼 전력 공급원에 UL 전선을 이용해서 트랜지스터, 저항기에 연결하여 제작한다. 수신부는 [그림11]과 같이 수신 코일에 발광다이오드를 연결하여 제작한다.

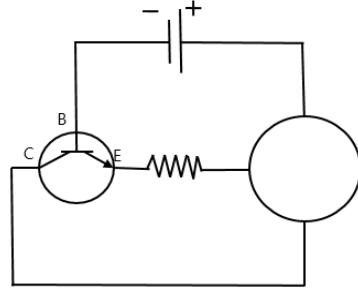


그림.10 송신부 코일 회로도

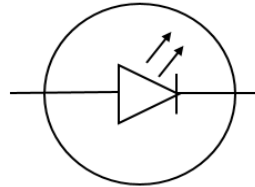


그림.11 수신부 코일

#### 5) 측정 방법

본 연구에서의 측정 방법과 측정 기준은 다음과 같다.

- (1) 송신부에서의 수신부 거리에 따른 유도 전류 변화량은 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. [그림 12.]
- (2) 송신부 기준으로 LED가 꺼지는 거리를 버니어 캘리퍼스 눈금으로 측정한다.
- (3) 측정을 진행할 때 수신부가 송신부의 중앙에 있는지 확인하고 기울어지지 않게 한다.
- (4) 측정은 LED가 꺼지기 시작하는 지점에서 측정한다.



그림.12 완성된 무선 충전기를 이용하여 측정한 과정

#### ◆ 구체적인 측정 방법

- (1) 소등상태에서 송신부 코일 쪽으로 버니어 캘리퍼스를 직각으로 놓는다.
- (2) 수신부를 송신부 중앙을 기준으로 하고 상하 방향으로 움직이며 LED의 밝기를 이용하여 측정한다.
- (3) 각 수신부 코일의 변수를 통해 LED 가 켜지는 최대 거리를 측정한다.

#### 5) 변수 설정

변수 설정 범위는 다음과 같이 하며 수신부에만 변수 값을 적용 적용하여 실험을 진행하였다.

감은 횟수(N)	5, 10, 15
에나멜선 두께( $\emptyset$ )	0.2mm, 0.3mm
코일 직경( $\emptyset$ )	20mm, 60mm

\* 수신부 코일의 감은 횟수에 대한 변수는 5회, 10회, 15회 이며, 두께는 2mm, 3mm 그리고 직경은 20mm, 60mm 이다.

### IV. 실험 결과

#### 1. LED 밝기에 따른 유도 기전력 정성적 분석

송신부의 변화하는 자기장에 의해 형성되는 수신부의 유도 기전력에 대한 정성적 분석으로는 [그림 13]과 같이 송신부로부터 각 거리에 LED의 밝기가 감소함에 따라서 형성되는 유도 기전력이 거리에 따라 감소하는 것을 알 수 있었다. 송신부의 자속 변화 영향력에 대한 거리가 증가할수록 감소하고 수신부가 감지할 수 있는 최대한의 거리를 측정하였다.

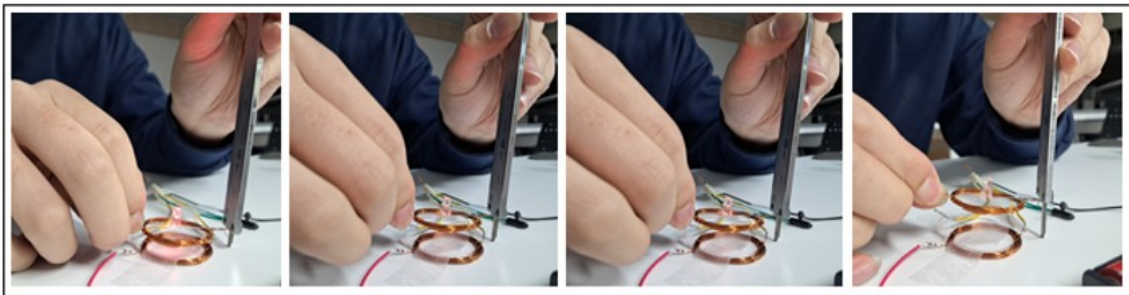


그림.13 표준무선 충전기

<표 1> 표준 무선 측정기의 각 변수값

	코일 직경(Ø)	에나멜선 두께(Ø)	감은 횟수 (N)
송신부	20mm	3mm	24회
수신부	20mm	3mm	15회

[그림 13]는 위 표처럼 표준 무선 측정기이다. [그림 14], [그림 15]는 표준 무선 충전기에서 변수값을 변화시켜 변수 무선 충전기를 제작 후 측정한 것이다. 표준 무선 충전기와 변수 무선 충전기를 LED 밝기에 따른 유도 기전력으로 분석하고, 자속 변화에 의해 LED가 켜질 정도의 유도 기전력이 형성되는 최대 거리를 측정하였다.

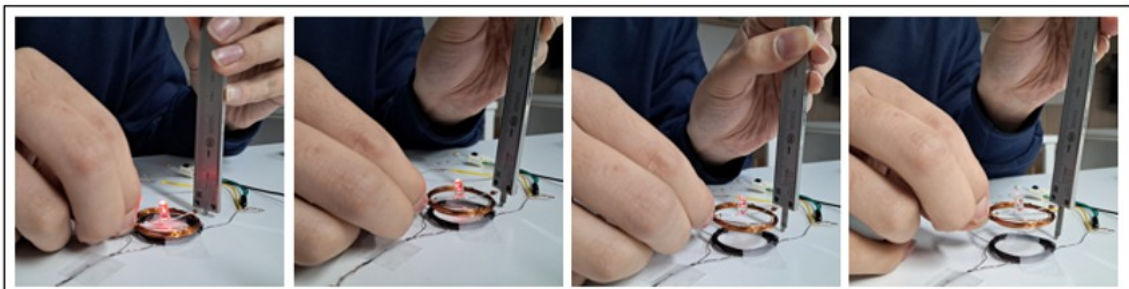


그림.14 두께 변수 무선충전기

<표 2> 수신부 코일의 에나멜선 두께에 따른 측정변수 값

	코일 직경(Ø)	에나멜선 두께(Ø)	감은 횟수 (N)
송신부	20mm	3mm	24회
수신부	20mm	2mm	15회

[그림 14]는 에나멜선의 두께에 따른 변수 무선 충전기로써 기존의 표준 무선 충전기에서 수신부의 에나멜선의 두께가 3mm에서 2mm로 감소했다는 것이다. 수신부의 에나멜선 두께를 감소시킨 이유는 무선 충전을 하고자 하는 핸드폰 안에 있는 코일의 직경이 모두 동일하지 않고 기종마다 작게 차이가 나기 때문에 두께에 대한 변수를 적용하였다.

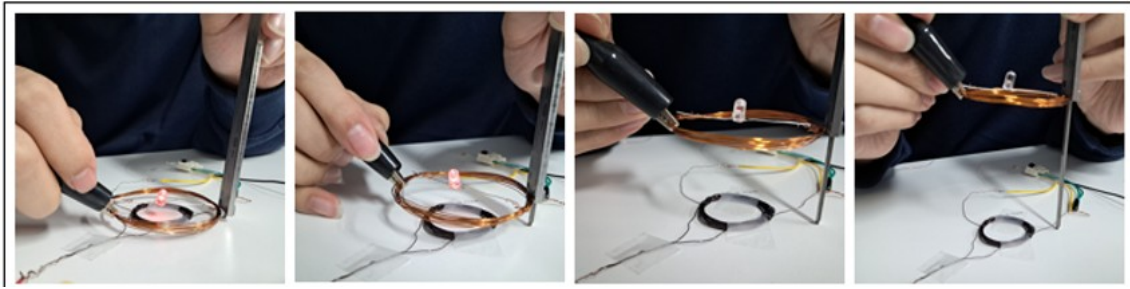


그림.15 직경 변수 무선충전기

<표 3> 수신부 코일의 직경에 따른 측정변수 값

	코일 직경(Ø)	에나멜선 두께(Ø)	감은 횟수 (N)
송신부	20mm	3mm	24회
수신부	60mm	3mm	15회

[그림 15]는 직경에 따른 변수 무선 충전기로서 표준 무선 충전기의 직경에서 수신부 코일의 직경을 60mm로 늘렸다. 수신부의 직경을 늘린 이유는 무선 충전을 하고자 하는 핸드폰 안에 있는 코일의 적정 직경을 알아보기 위해 변수를 적용하여 실험을 하였다.

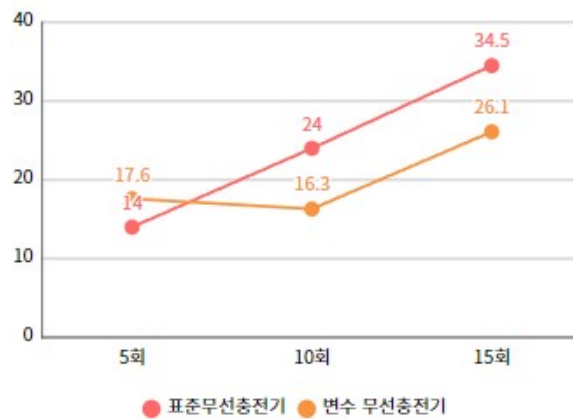


그림.16 감은 횟수 변수 따른 충전거리

[그림 16]은 [그림 10], [그림 11]을 감은 횟수를 5회 10회 15회 나눠 LED가 꺼지기 시작하는 거리를 측정한 것이다. [그림 16]의 그래프를 보면 표준 무선 충전기의 상승하는 그래프였지만 [그림 11]의 변수가 적용된 그래프는 표준 그래프와 다르게 일정한 상승세를 보이지 않았다.

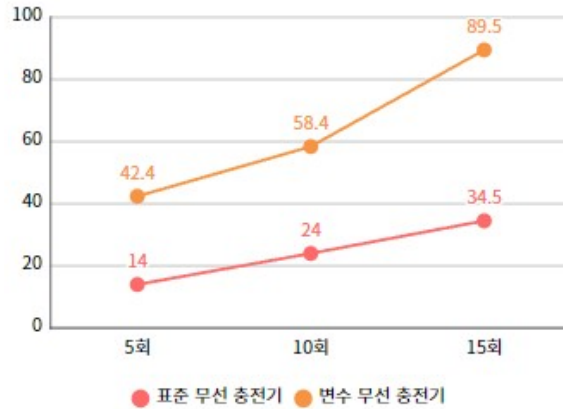


그림.17 코일 직경 변수에 따른 충전거리

[그림 17]은 [그림 12]의 코일의 직경에 따른 변수 그래프를 감은 횟수를 5회 10회 15회 나눠 측정 한 것이다. [그림 16]과 다르게 [그림 17]에서는 그래프가 표준 무선 충전기의 상승세와 비슷하였지만 기울기의 형태가 일치한 것은 아니었다.

## 2. LED 밝기에 따른 유도 기전력 원인분석

[그림 10]의 표준 무선 충전기를 바탕으로 [그림 13], [그림 14]와 결과를 도출하였고. 그로 바탕으로 LED 밝기에 따른 유도 기전력의 문제점과 원인을 분석하였다. [그림 13]에서 [그림 11]의 감은 횟수에 대한 변수를 주었을 때 10회 감았을 때보다 5회 감았을 때 최소 밝기 거리가 1.3mm 정도 더 길었다. 다양한 요인들이 있었지만 수신부 제작 과정에서 여러 문제점이 존재하였으나 측정하는 도중 문제점이 존재하였다.

### (1) 제작 과정의 문제점

제작 과정에서의 문제점으로는 동일한 원통에 감는다고 하더라도 겹치거나 벌어지는 부분에 의해 코일의 직경이 일정할 수 없고, 코일의 감은 횟수를 조절하는 과정에서 코일의 직경은 원형에서 타원의 형태로 변화한다. 또한 LED 단자와 에나멜선을 접촉시킬 때 에나멜선을 충분히 사포로 긁어내지 않으면 저항값이 차이가 날 수밖에 없다.

### (2) 측정 과정에서의 문제점

측정 과정의 문제점으로는 아무리 버니어 캘리퍼스를 사용하여 정밀히 측정하였다 하더라도, 측정할 때마다 수신부의 각도를 정확히 90도로 할 수 없고 수신부 코일의 중앙에 일치하도록 할 수 없다.

## V. 결론 및 제언

본 연구에서는 무선충전기의 원리를 이해하고 그 중에서 전자기유도방식을 이용하여 무선충전기를 제작하였다. 본 실험을 통해서 전자기 유도방식에 대한 법칙을 이해하고 관련식을 이용하여 변수를 설정하였다. 무선충전기의 송신부와 수신부를 제작 후, 수신부의 코일의 감은 횟수, 두께, 직경이 증가함에 따라 송신부와 수신부의 수직방향으로 충전 가능한 거리가 증가함을 확인 할 수 있었다. 이는 각각의 변수가 증가함에 따라 유도기전력이 형성되는 최대거리가 증가하였기 때문이다. 본 실험을 통해서 코일에 유도되는 기전력을 이해하고, 무선충전기의 효율을 향상시키기 위한 변수를 설정함에 따라 각 제품에 맞는 무선충전기를 제작 할 수 있을 것으로 생각하였다.

## VI. 참고문헌

1. <https://news.samsungdisplay.com/26867/> 패러데이의 발견에 의해 가능해진 스마트폰 무선 충전?! '패러데이 전자기유도 법칙' 알아보기
2. <https://blog.naver.com/gitacademy01/221644767111/> 스마트폰 충전을 편리하게 해주는 무선 충전의 원리
3. <http://www.ssunews.net/news/articleView.html?idxno=7353/> 전자 기타-라디오 수리공의 열정
4. <https://steemit.com/busy/@uchaanp/5ethsu/무선충전의 종류, 원리>
5. <https://www.edunet.net/nedu/contsvc/무선 충전기>



물리B

### 03\_도플러 효과를 이용한 자동차의 속도 측정



# 도플러 효과를 이용한 자동차의 속도 측정

권승휘 (북주여자중학교 3학년)

신지환 (경덕중학교 3학년)

유용석 (안동중학교 3학년)

이강산 (안동중학교 3학년)

정영현 (상주중학교 2학년)

지도교수 : 김동영 (국립안동대학교 스마트센서공학과)

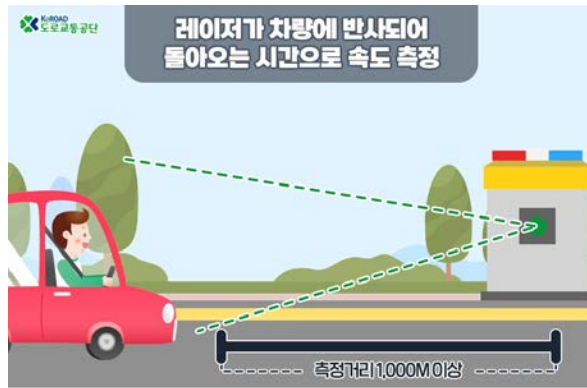
**초록** : 도플러 효과는 다가오는 앰블런스와 멀어지는 앰블런스에서 들리는 소리의 진동수가 달라지는 특성을 설명한다. 이러한 도플러 현상은 달리는 자동차에서 되돌아오는 전자기파의 진동수를 감지하여 자동차의 과속 단속 장치에도 이용된다. 우리는 24GHz의 전자기파를 사용하는 도플러 레이더 센서를 아두이노(우노)에 연결하여 속도 측정 장치를 만들었다. 속도 측정 장치의 성능을 검증하기 위하여 기준으로 사용한 초음파 센서의 속도 측정값과 비교 분석하였다. 이러한 도플러 레이더 센서는 고속 자동차의 속도 및 추적이 용이한 근거리에서 사용하는 것이 유리하며, 물체의 움직임을 감지하는 장치에도 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

**주요용어** : 도플러효과, 속도, 아두이노, 도플러 센서, 움직임 감지

## I. 서론

자동차를 타고 도로를 달리다 보면, 종종 과속 단속 장비가 있다는 내비게이션 안내를 듣게 된다. 이 과속 단속 장비는 달리는 차의 속도를 측정하여 과속, 신호위반으로 인해 발생하는 교통사고를 예방하기 위해 설치되어 있다. 이러한 과속 단속 장비는 여러 가지 종류만 있으며, 종류마다 속도를 측정하는 원리도 다르다. [그림 1]에서 보인 과속 단속 장비 중 하나인 이동식 과속 단속 카메라는 1초에 400여개에 달하는 레이저빔을 차량에 발사하고, 속력이 일정한 레이저가 차량에 반사되어 돌아오는 시간을 측정하여 차량의 속도를 측정한다[1].

도플러 효과는 속력에 따라 파동의 진동수가 변하며, 진동수 변화를 활용해서 자동차의 속도를 측정할 수 있지 않을까? 라는 생각이 들었다. 더 나아가, 직접 만든 장치는 얼마나 정확하게 속도를 측정할까? 라는 호기심이 생겼다. 이러한 호기심을 바탕으로 이번 탐구에서 도플러 효과를 이용해서 자동차의 속도를 측정하는 것을 목표로 속도를 측정하는 도플러 레이더 센서를 아두이노 보드에 연결하여 속도 측정하는 장치를 만들고, 제작한 속도 측정 장치의 성능을 검증하고, 새로운 응용 방법을 찾아보는 탐구 활동을 진행하였다.



[그림 1] 이동식 과속 단속 카메라

도플러 효과는 속력에 따라 파동의 진동수가 변하며, 진동수 변화를 활용해서 자동차의 속력을 측정할 수 있지 않을까? 라는 생각이 들었다. 더 나아가, 직접 만든 장치는 얼마나 정확하게 속력을 측정할까? 라는 호기심이 생겼다. 이러한 호기심을 바탕으로 이번 탐구에서 도플러 효과를 이용해서 자동차의 속력을 측정하는 것을 목표로 속력을 측정하는 도플러 레이더 센서를 아두이노 보드에 연결하여 속도 측정하는 장치를 만들고, 제작한 속도 측정 장치의 성능을 검증하고, 새로운 응용 방법을 찾아보는 탐구 활동을 진행하였다.

## II. 이론적 배경

### 2.1 속력

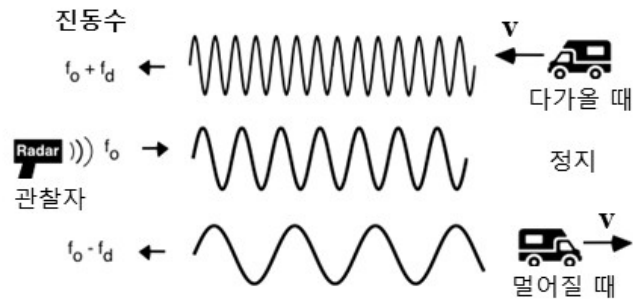
속력은 움직이는 물체의 빠르기를 나타내는 물리량으로 거리를 시간으로 나누는 값으로 정의한다. 움직이는 물체가 시간  $t$  초 동안 거리  $s$  를 이동하는 경우, 속력  $v$  는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

속력의 단위는 m/s 또는 km/h를 사용한다.

### 2.2 도플러 효과

도플러 효과란 속력이  $v_0$  이고 진동수가  $f_0$  인 파동을 발생하는 파원의 속력  $v$  에 따라 진동수가 다르게 관측되는 현상이다[3].



[그림 2] 도플러 효과

[그림2]와 같이 일상적인 예로 앰블런스가 진동수가  $f_0$ 인 사이렌을 켜고 달려가는 상황에서 관찰자인 '나'는 이 사이렌 소리를 정지 상태에서 가만히 듣고 있다. 앰블런스가 속력  $v$ 로 가까이 다가오면 진동수가  $f_0 + f_d$ 로 증가하여 높은 소리가 들리다가 관찰자를 지나 멀어져 가면 진동수가  $f_0 - f_d$ 로 낮아져 소리가 낮아진다.

$$f_0 \pm f_d = \left( \frac{v_0}{v_0 \mp v} \right) f_0 \quad (+: \text{멀어질 때}, -: \text{다가올 때}) \quad (2)$$

여기서  $v_s$ 는 파원에서 발생한 파동의 속력이다.

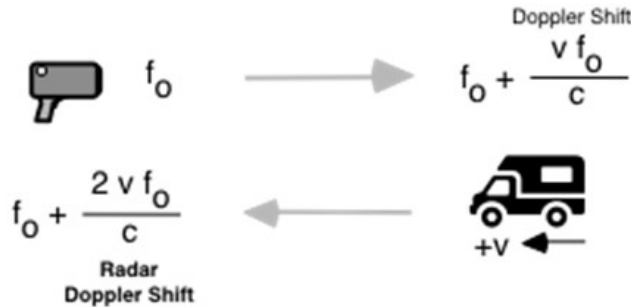
파동의 일종인 소리는 높은 소리는 진동수가 높고, 낮은 소리는 진동수가 낮으므로 '나'는 앰블런스가 가까이 올 때 소리의 진동수는 실제보다  $f_d$ 만큼 높아진 것같이 느끼고 '멀어져 갈 때는 실제보다  $f_d$ 만큼 낮아진 것처럼 느껴진다. 하지만 이는 상대적인 효과이며 실제 앰블런스를 운전하고 있는 운전자의 입장에서는 항상 동일한 진동수로 관측된다. 이와 같이 파동의 진동수가 움직이는 물체의 속력에 따라 달라지는 도플러 효과는 자동차의 속력 측정에 이용된다.

### 2.3 도플러 레이더를 이용한 속력 측정

도플러 레이더를 이용한 속도 측정 장치는 마이크로파 대역의 전자기파를 움직이고 있는 물체에 발사하고, 그 물체에서 반사되어 돌아오는 전자기파를 수신하여 물체의 속력을 알아내는 장치이다. 이러한 도플러 레이더는 자동차의 과속 단속에 이용되고 있다.

자동차의 속력을 측정하는 도플러 레이더는 파동의 하나인 전자기파를 사용한다. 전자기파의 속력은 빛의 속력  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 이며, 빛의 속력은 자동차의 속력보다 매우 크다. [그림3]에서 보인 것과 같이 도플러 레이더에 따른 진동수 변화  $f_d$ 는 다음과 같다[4,5].

$$f_d = \frac{2f_0}{c}v \quad (3)$$



[그림 3] 도플러 레이더

도플러 효과에 의한 진동수 변화는 자동차의 속력에 선형적으로 비례한다. 이러한 빛을 사용하는 레이더는 [그림3]에서 보인 것과 같이 전자기파를 물체에 보내고, 반사되는 빛의 진동수 변화를 측정하여 물체의 속도 측정에 사용한다. 따라서 도플러 효과에 의한 진동수 변화로부터 얻은 자동차의 속력은 다음과 같다.

$$v = \frac{c}{2f_0}f_d \quad (4)$$

따라서 도플러 효과에 의한 진동수 변화  $f_d$ 를 측정하여 자동차의 속도  $v$ 를 측정할 수 있다. 우리는 이러한 도플러 효과를 이용한 도플러 레이더 센서를 제작하여 자동차의 속력을 측정하였다.



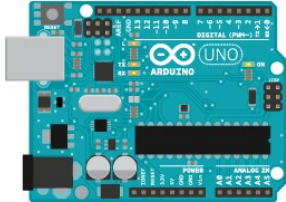
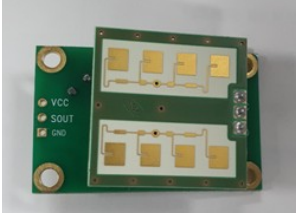
### Ⅲ. 연구 방법

마이크로파 대역의 전자기파를 사용하는 도플러 레이더 센서는 전자기파를 송수신하는 안테나를 이용하였다. 우리는 진동수가  $f_0=24\text{GHz}$ 인 전자기파를 움직이고 있는 장난감 자동차에 발사하고 자동차에서 반사되어 돌아오는 전자기파의 진동수 변화  $f_d$ 를 측정하여 자동차의 속도  $v$ 를 알아내는 장치를 제작하였다. 전자기파를 송수신하는 안테나 구동 및 도플러 효과에 의한 진동수 변화  $f_d$ 는 아두이노(우노)를 이용하여 측정하였다. 도플러 레이더 센서로 측정한 속력이 얼마나 정밀한지 검증하기 위하여 초음파 센서로 측정한 속도 결과와 비교 분석하였으며, 실제 자동차의 속력을 측정에 활용하여 보았다.

### 3.1. 도플러 레이더 장치 구성

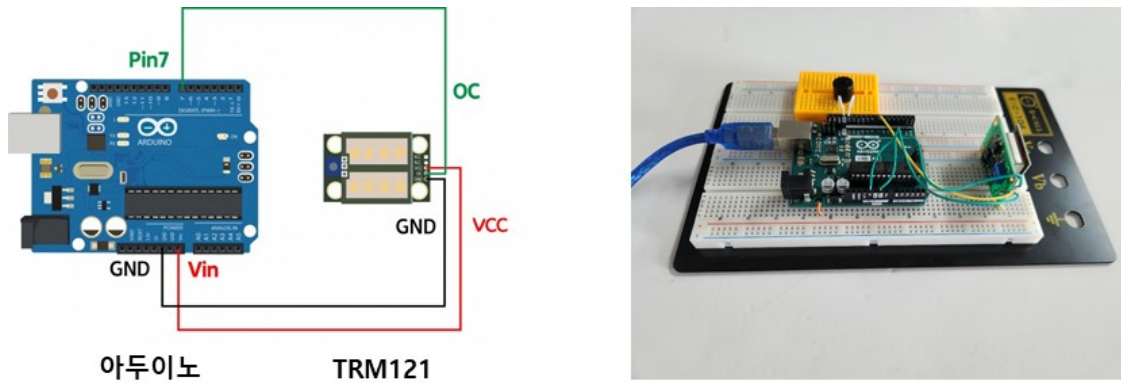
측정 장치는 아두이노로 도플러 효과를 이용하여 속력을 측정할 수 있는 측정 장치와 초음파 센서로 속력을 측정하는 측정 장치로 측정을 한 뒤 값들을 노트북을 사용하여 값들을 분석하였다.

[표 1] 도플러 레이더 장치 구성

장치	용도	사진
노트북	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 측정 자동화</li> <li>- 아두이노 실행</li> <li>- 측정 속도 표시</li> </ul>	
초음파 속도 측정기	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 초음파를 사용한 자동차의 속도 측정</li> <li>- 초당 10번 속도 측정</li> </ul>	
아두이노 보드	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 안테나 구동</li> <li>- 도플러 주파수 변화 측정</li> <li>- 속력으로 변환</li> </ul>	
도플러 레이더 센서	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 모델명: TRM121</li> <li>- 24GHz 안테나</li> <li>- 증폭기 내장</li> </ul>	

### 3.2. 도플러 레이더 속도 측정 장치

아두이노는 오픈 소스를 기반으로 하나의 단일 보드에 마이크로컨트롤러를 장착하여 새로운 센서 시스템을 구현하게 하는 개발 도구 및 환경을 말한다. 이러한 아두이노와 도플러 레이더 센서를 사용하여 도플러 레이더 속도 장치를 제작하였다. 도플러 레이더 센서(TRM121)는 디지털 신호를 받기 위하여 아두이노 보드의 Pin7에 연결하였으며, TRM121에 전원을 공급하기 위하여 아두이노 보드의 GND, Vin을 TRM121의 GND와 VCC에 각각 연결하였으며, 도플러 레이더 센서와 아두이노 보드를 브레드 보드위에 [그림 4]과 같이 제작하였다[6].



[그림 4] 도플러 속도 측정기 회로도 및 속도 측정 장치

브레드 보드에 고정된 도플러 레이더 센서에서 마이크로파를 송신하여 움직이는 물체에서 되돌아오는 마이크로파를 수신한다. 이때 수신된 마이크로파는 도플러 효과에 의하여 주파수가 변환되며, 도플러 레이더 센서는 송신과 수신 전자기파를 합하여 두 전자기파의 합성에 의한 맥놀이 파동의 주기(T)를  $\mu\text{s}$  단위로 아두이노 보드로 보낸다. 그러므로 아두이노 보드에서는 주기를 도플러 효과의 주파수 변화로 변환한다.

$$f_d = \frac{1}{T} \quad (5)$$

도플러 효과의 주파수 변화를 식(4)에 대입하여 다음과 같이 자동차의 속력을 m/s 단위의 값으로 변환하여 표시하게 하였다.

$$v = \frac{f_d \times 10^6}{158.4} \text{ [m/s]} \quad (6)$$

여기서  $f_0=24\text{GHz}$ 인 전자기파의 속력은  $c=3 \times 10^8\text{m/s}$ 이며, 주파수는 MHz단위 이므로  $10^6$ 을 곱하였다. 아두이노에서 도플러 효과를 이용한 속도 측정을 위한 아두이노 소스 코드는 다음과 같다[7]. 아두이노 소스 코드를 실행하여 PASCO 스마트 카트(자동차)의 속력을 측정하였으며, 측정된 속력을 비교하기 위하여 초음파 센서로 측정된 속력을 비교 분석하였다.

아두이노 소스 코드	비고
<pre>double v; int Sigpin = 7 ;  void setup () {   Serial.begin ( 9600 );   pinMode (Sigpin , INPUT); } void loop () {   unsigned long T;   double f;   char s [ 20 ];   while (digitalRead (Sigpin));   while ( ! digitalRead (Sigpin));   T = pulseIn ( Sigpin, HIGH)     + pulseIn ( Sigpin, LOW);   f = 1/(double)T;   v = ((f * 1e6 ) /158.4 );   sprintf (s, "% 3d m/s" , v);   delay ( 50 ); }</pre>	<p>속도 변수 지정 아두이노 디지털 신호 입력 핀(7) 지정</p> <p>도플러효과 주기 변수 지정 도플러 주파수 변수 지정 출력 길이 지정</p> <p>주기 측정(<math>\mu</math>s)</p> <p>도플러 주파수 계산(MHz) 속력 계산 [m/s] 모니터로 출력 지연시간 50ms</p>

코드] 도플러 효과를 이용한 속력 측정 아두이노 코드

### 3.3. 도플러 레이더 속력 측정 실험

#### 3.3.1 속력 측정 장치

도플러 효과를 이용한 속력을 측정하는 장치와 초음파 센서로 속력을 재는 장치의 측정한 속력이 정확한지를 알아보기 위하여 동시에 실험을 진행하였다. 센서가 오작동하지 않으면서 속력을 측정하기 위해서 직선 도로를 따라 움직일 수 있는 PASCO 스마트 카트[그림5]를 측정 대상으로 사용을 하여 실험을 진행 하였다. 측정 장치는 아두이노로 도플러 효과를 이용하여 속력을 측정할 수 있는 측정 장치와 초음파 센서로 속력을 측정하는 측정 장치로 측정을 한 뒤 값들을 노트북을 사용하여 값들을 분석하였다.



[그림 5] 속력 실험 장치

### 3.3.2 실험 과정

- 1) 도플러 속력 측정기와 초음파 속력 측정기의 정확도 검사
  - 도플러 속력 측정기와 초음파 속력 측정기를 노트북에 연결한다.
  - 아두이노 실험 프로그램을 이용하여 초음파 속력 측정기의 값을 m/s 단위의 속력으로 변환시킨 후 그래프로 출력한다.
  - 초음파 속력 측정기와 마찬가지로 도플러 속력 측정기의 값을 그래프로 변환시킨다.
  - 엑셀 프로그램을 활용하여 측정된 그래프들의 값들의 절댓값을 같게 한 후 그래프들을 서로 비교 및 분석해 본다.
- 2) 도플러 효과를 이용한 자동차의 속력 측정
  - 도플러 속력 측정기의 측정 방향을 자동차가 다가오는 방향으로 둔다.
  - 차가 다가올 때와 멀어질 때의 속력을 측정한 후 컴퓨터로 분석한다.

## IV. 연구 결과

### 4.1. 도플러 효과 체험하기

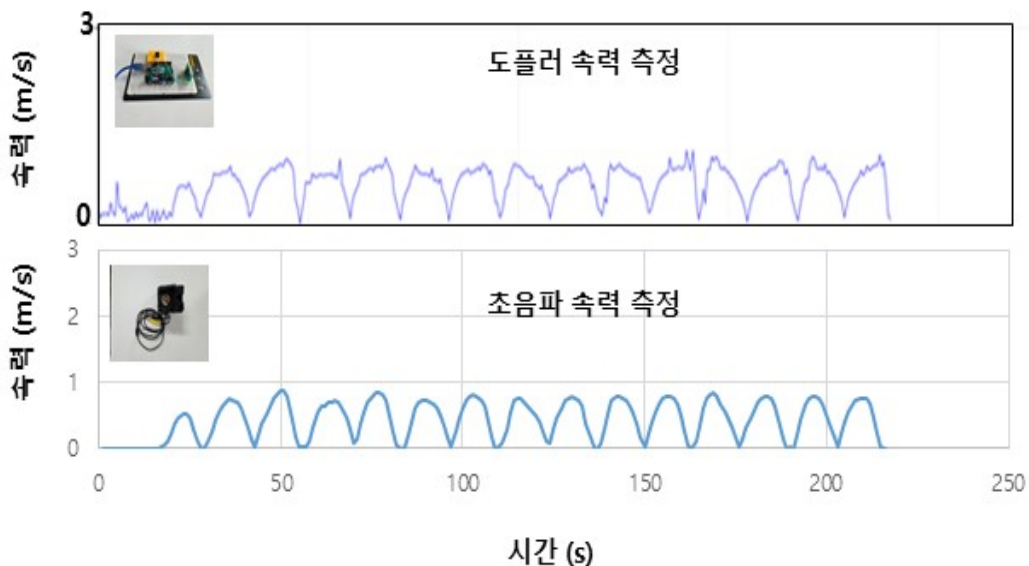
도플러 효과를 체험하기 위해 버저를 이용한 도플러 효과 전자 키트를 사용하였다. [그림6]과 같이 줄을 잡고 돌렸을 때 가까이 왔을 땐 소리가 높게 들리고 멀리 갔을 땐 소리가 낮게 들리는 도플러효과를 확인할 수 있었다.



[그림 6] 도플러효과 실험 장치

#### 4.2. 도플러 효과를 이용한 속도 측정

도플러 효과인  $v = c \frac{f' - f_0}{2f_0}$ 가 정확한지 알기 위해 카트를 이용하여 시중 제품과 비교 하였습니다. 시중에 나와 있는 속도 측정 장치의 값을 컴퓨터로 넘겨 보낸 뒤 절댓값으로 만들고 그래프로 나타내었고, 속도 측정 아두이노에  $v = c \frac{f' - f_0}{2f_0}$ 라는 식으로 계산을 하였더니, 속도 측정기와 아두이노로 속도를 측정한 결과 위와 같은 그래프를 도출해내게 되었다. 속도 측정기로 측정된 속력과 아두이노로 측정한 속력이 대부분 비슷하게 나왔고 이것으로 도플러 효과를 이용하여 속력을 측정할 수 있다는 것을 알게 되었다.



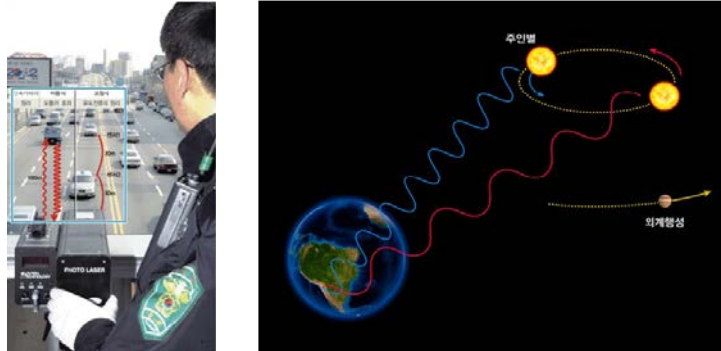
[그림 7] 도플러효과에 의한 속도 측정 결과

도플러 센서로 만든 그래프를 보면 살짝 튀는 값이 생긴다. 그 이유는 도플러 센서에서 나온 전자기파가 퍼지는 각이 넓어 측정 범위가 커지고, 측정 각도 범위에 있는 다른 외부 요인들도 같이 측정되어 자동차에 의한 측정값보다 큰 값이 나오는 것이다. 그리고 멀리 있는 물체를 대상으로 속력을 측정할 때 대상이 멀수록 오차와 튀는 값이 증가하는 것을 알 수 있었는데 더 멀수록 전자기파의 퍼지는 범위가 더 늘어나면서 외부의 다른 요인이 많이 증가하여 오차가 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 오차를 줄이려면 전자기파가 퍼지는 각을 줄여 범위를 좁혀 외부 요인에 영향을 받지 않게 하면 측정하고자 하는 대상의 속력을 측정할 때 오차를 줄일 수 있다.

#### 4.3. 도플러 효과를 이용한 움직임 감지

위 실험에서 사용한 아두이노에 소리를 내는 버저를 추가로 설치하였더니, 움직임이 감지되었을 때 버저가 울리는 것을 확인할 수 있었다. 도플러 효과를 응용하

면 [그림8]과 같이 과속 단속이나 별의 움직임을 알 수 있고, 토네이도의 징후를 미리 파악할 수도 있으며, 적의 잠수함을 탐지하는 데에도 이용할 수 있다.



[그림 8] 도플러 효과의 응용: 과속 단속 및 별의 운동 방향

## V. 결론 및 제언

24GHz의 전자기파를 사용하는 도플러 레이더 센서(TRM121)를 아두이노 우노 보드에 연결하여 자동차의 속도 측정 장치를 만들었다. 속도 측정 장치의 성능을 검증하기 위하여 기준으로 사용한 초음파 센서의 속도 측정값과 비교 분석하였으며, 두 가지 센서의 속도 측정값은 일치하였다. 이러한 도플러 레이더 센서는 고속 자동차의 속도 및 추적이 용이한 근거리에서 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었으며, 움직임 감지용으로도 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

## VI. 참고문헌

- [1] <https://naver.me/xYTzCY98>
- [2] 중3 과학 교과서, 비상, p.101
- [3] [https://ko.wikipedia.org/wiki/도플러\\_효과](https://ko.wikipedia.org/wiki/도플러_효과)
- [4] <https://copradar.com/chapts/chapt3/ch3d1.html>
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_radar)
- [6] [http://makeshare.org/bbs/board.php?bo\\_table=sensor\\_use&wr\\_id=389](http://makeshare.org/bbs/board.php?bo_table=sensor_use&wr_id=389)
- [7] [https://blog.naver.com/no1\\_devicemart/222096586492](https://blog.naver.com/no1_devicemart/222096586492)

물리B

## 04\_회로 변수에 따른 전자기 펄스(EMP)의 세기 변화



# 회로 변수에 따른 전자기펄스(EMP)의 변화

고신우 (제주대학교 사범대학 부설중학교 1학년)

부현웅 (한라중학교 1학년)

오민규 (한라중학교 1학년)

최우진 (귀일중학교 1학년)

지도교수 : 박정우 (제주대학교 초등교육과)

## 초록

본 논문에서는 전자기 펄스가 특정 회로 변수에 의하여 변화하는 양상을 탐구하였다. 코일을 이용한 전자 회로에서 코일의 감는 수, 직경 그리고 전원의 전압에 따라 변하는 전자기 펄스의 세기를 전자기파 측정기를 이용해 측정하였다. 그리고 전자기파 측정값을 그래프로 나타내어 실험 결과가 이론적 계산과 부합하는지 탐구해 보았다. 전압에 대한 실험은 선형 그래프, 감은 수에 대한 실험은 지수함수 그래프, 직경에 대한 실험은 이차함수와 유사한 그래프가 되었다. 그러나 감은 수에 대한 2번째 실험은 우리가 예상한 개형인 선형 그래프와 다른 부분들이 있어 실험 때 넣었던 철심을 근거로 들어 자화 곡선과 자체 유도를 이용하여 분석해 보기도 하였고, 코일의 자체 유도를 미분 방정식과 맥스웰 방정식 등을 이용하여 검토하고 분석해 보았다. 결과적으로 전자기펄스(EMP)를 만들 때 여러 가지 회로 요인에 대하여 나타나는 변화의 양상을 살펴보고, 그 원리와 이유를 살펴보았다.

## I. 서론

학교 과학동아리 프로젝트에서 전자석 실험을 진행하던 중 매우 가깝지만 연결되지 않은 스위치에서 스파크가 튀는 것을 관찰했다. 또한 전자석에서 매우 큰 전자기장이 관측되는 것을 볼 수 있었다. 또한 전자기학을 공부하던 중에 전자기펄스(Electromagnetic Pulse, 이하 EMP)에 대해 알게 되었고, 생소한 개념이어서 조사를 진행했다. 조사한 결과, EMP는 펄스 형태로 방출되는 전자기파이며, 컴퓨터 같은 전자기기를 마비시킬 수 있다는 것을 알았다. EMP에는 핵 EMP와 비핵 EMP의 2가지가 있다. 이때 핵 EMP를 실험실 상황에서 재현하기 어렵기 때문에 우리는 비핵 EMP를 집중적으로 찾아보았다. 비핵 EMP는 대규모 코일에 전류를 흘린 뒤, 코일을 폭약으로 파괴하는 방법과 대규모 코일에 매우 강한 전류를 순간적으로 흘리는 방법이 있다. 두 방법 중에서 우리가 쉽게 접할 수 있는 것은 코일에 순간적인 전류를 흘리는 방법이기 때문에 우리는 이 방법을 사용하기로 했다. 전류의 세기가 크면 안전상의 위험도 있을 수 있으므로 우리는 측정될 수 있는 아주 작은 수준으로 실험을 진행했다. 그리고 EMP의 영향을 줄 것으로 예상되는 전압과 코일의 감

는 수, 코일의 직경이 실제로 영향을 줄 수 있을지 궁금하여 실험을 계획하였고, 실험에 옮기게 되었다.

이 실험의 목적은 비핵 EMP에서 코일의 여러 변수에 따른 비례관계를 알아보는 것이며, 연구 문제는 다음과 같다.

- 1) 전압과 전자기파의 크기는 비례하는가?
- 2) 코일을 감은 수와 전자기파의 크기는 비례하는가?
- 3) 코일의 직경과 전자기파의 크기는 비례하는가?

## II. 이론적 배경

### 1. 핵 EMP

#### 1) 핵 EMP의 정의

핵 EMP는 핵폭발의 감마선이 원자에 부딪혀 발생한다. 콤프턴 효과에 따르면 질량이 큰 원자핵은 속도가 거의 변하지 않지만, 질량이 작은 전자는 큰 속도로 튕겨 나간다. 따라서 전자기 폭풍이 일어나고, 전자기펄스가 발생한다. 이렇게 생성된 전자기파가 전자 회로 내부에 영향을 주어 순간적으로 회로에 과전류가 흐르고, 이 과전류가 회로를 태우게 만든다.

#### 2) 콤프턴 효과

광자가 입자와 충돌을 하여 광자가 에너지를 잃고 입자가 에너지를 얻는 현상이다. 이때 광자는 다음과 같이 파장이 줄어들며 에너지를 잃고, 입자는 그만큼의 에너지를 얻어 움직이게 된다. 운동에너지는 질량과 속도의 제곱에 비례하기 때문에 질량이 클수록 속도가 줄어들게 된다 (김진승, 2006).

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

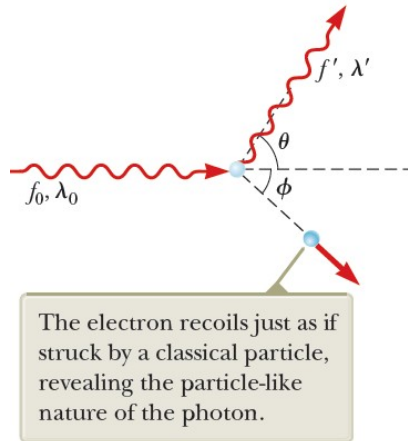


Fig. 1. 콤프턴 효과

### 3) 맥스웰-앙페르 법칙

앙페르 법칙이 축전기에서 성립하지 않다는 문제가 있어 맥스웰이 전기장의 변화가 자기장을 생성한다고 해석한 것이 맥스웰-앙페르 법칙이다. 맥스웰 앙페르 법칙을 쓰면 다음과 같다.

$$\oint B(V) \cdot dl(V) = \mu I + \mu\epsilon \int \frac{\partial E(V)}{\partial t} \cdot dA(V) \quad (2)$$

식을 보면 전기장의 시간에 따른 변화 즉  $\frac{\partial E}{\partial t}$ 가 자기장을 생성한다는 것을 알 수 있다.

## 2. 비핵 EMP

핵 EMP가 콤프턴 효과를 이용하는 것과 달리 비핵 EMP는 코일을 포함한 전자 회로에서 순간적으로 강한 자기장이 송출되고, 이 자기장이 다른 전자 회로를 만나 전자기 유도로 인하여 전기장으로 변하면 그 전기장이 전자 회로에 강한 전압으로 흐르면서 전자 회로를 태우거나 녹이는 것이다 (김중훈 외, 2016; 정성빈 외, 2023). 이때 순간적인 자기장 펄스를 방출하는 데 필요한 것이 스파크 갭이다.

## 1) 전자기유도

자기장의 변화로 전기장을 생성하는 현상이다. 이는 패러데이의 법칙과 렌츠의 법칙으로 설명할 수 있다. 전자기유도로 생성되는 전류를 유도 전류라고 하며, 이에 따라 생기는 기전력을 유도기전력이라고 한다. 여기서 유도기전력의 크기를 나타내는 공식이 패러데이 법칙이다. 패러데이 법칙은 다음과 같다.

$$V = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

$V$ 는 유도기전력이며  $N$ 은 코일을 감은 횟수이다.  $\Delta\Phi$ 는 자기 선속의 변화이다. 그리고  $\Delta t$ 는 시간의 변화를 나타낸다. 이를 통해 유도기전력의 크기는  $N\Delta\Phi/\Delta t$ 이며 방향은 자기 선속의 변화에 반대 방향이라고 할 수 있다.

렌츠의 법칙은 유도 전류의 방향을 정하는 법칙이다. 유도 전류의 방향은 자기 선속의 방향의 반대이다. 방법은 다음과 같다.

- i) 자기 선속의 변화를 막는 자기장을 엄지손가락으로 하고
- ii) 나머지 네 손가락이 유도 전류의 방향이 된다.

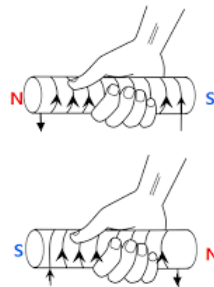


Fig. 2. 렌츠의 법칙

## 2) 자체 유도

코일에 흐르는 전류의 세기가 변할 때, 그 코일 자체에 의해 유도 전류가 발생하는 현상이다. 방향은 전류의 변화를 방해하는 방향이다. 전압이  $V$ 로 연결된 회로에서 코일에 작용하는 전압은

$$V = -L \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

이다. 방향이 전류의 반대 방향이므로 '-' 부호를 붙였다.

### 3) 스파크 갭

스파크 갭은 일종의 스위치로, 일반적으로는 공기, 가스와 같은 부도체를 사이에 두고 매우 얇은 끝을 가진 도선을 위치시키는 형태이다. 이때 스파크가 가스를 뛰어넘기 전 도선의 양쪽 끝의 전위차가 매우 커지면 기체가 이온화 상태, 즉 플라스마 상태가 되며 저항이 매우 작은 일종의 필라멘트를 생성한다. (이때 가스가 플라스마 상태가 되는 데 필요한 전압을 항복 전압이라 하며, 공기의 항복 전압은 해수면에서 약 30kV/cm이다) 이렇게 생성이 된 필라멘트를 이용하여 빠르게 전하들이 이동하고, 이를 이용해 일정 시간을 두고 주기적으로 스위치를 클릭하는 효과를 볼 수 있다. 실험에서 스파크 갭은 실제로 스위치를 여러 번 클릭하는 것으로 대체하였다(최순호 외, 2014).

만약 전류의 세기가 일정하다면 솔레노이드와 유사하여 외부 자기장이 0에 수렴한다. 전자기파는 전기장과 자기장에 의해서 생기고 전기장과 자기장의 비는 광속이므로 전기장을 E, 자기장을 B, 광속을 c라 할 때  $\vec{E} = c\vec{B}$ 이다. 그러므로 자기장이 0에 가까워지면 전기장도 0이 되어 전자기파가 발생하지 않는다. 이에 대한 식은

$$B = \frac{\mu_0 R I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{r^2}} d}{r^2} d\theta \quad (5)$$

여기서  $1 - \frac{\sin^2 \theta}{r^2} d$ 을 t로 치환하면 적분 구간이 0~0이 되어 자기장은 0이 된다. 즉 전자기파가 생기려면 전류가 일정하지 않고 변해야 한다. 이 전류를 변하게 하는 것이 스파크 갭이다.

### 3. 자기장 계산

#### 1) 자기 쌍극자

자기 쌍극자는 이 연구의 실험을 설명하는 식으로 자기 쌍극자에 의한 자기장은 다음과 같다.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{4d^3} (2 \cos \theta \hat{R} + \sin \theta \hat{\theta}) \quad (6)$$

$\theta$ 가 90°인 경우, 자기장은 다음과 같다.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{4d^3} \hat{\theta} \quad (7)$$

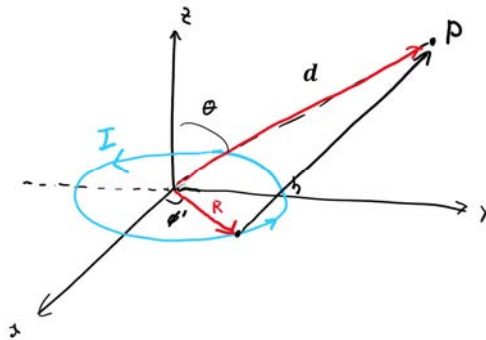


Fig. 3. 자기 쌍극자

또, 실제 실험에서는 전류가 시간에 따라 변하므로 전류를 시간의 함수로 바꾸면 된다. 즉 자기장은 다음과 같다.

$$B(t) = \frac{\mu_0 R^2 N}{4d^3} I(t) \quad (8)$$

여기서 N은 코일의 감은 수 이다. 이 식을 통해 알 수 있는 사실은 자기장의 세기는 반지름의 제곱에 비례하고 전류와 감은 수에 비례한다(김진승, 2006).

#### 4. 맥스웰 방정식

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 3번째 식에 자기 쌍극자의 자기장을 대입하면

$$-\frac{\mu_0 R^2 N}{4d^3} \frac{dI}{dt} \hat{\theta} = \nabla \times \vec{E} \quad (10)$$

즉 전류의 변화가 전기장을 만들어 낸다. 그리고 맥스웰 방정식에 의해 전기장은 자기장을 만들어 낸다. 즉 전기장이 자기장을 만들고 자기장은 전기장을 만들면서 전자기파가 생긴다. 이 말은 전자기파를 측정할 때, 전기장과 자기장 중 한 가지만 정해서 측정할 수 있다는 것이다 (김세윤, 2020).

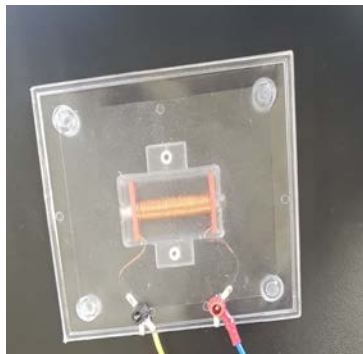
### III. 연구 방법

#### 1. 실험준비물

자기장 측정기(TRI FIELD EMP meter model TF2, 측정범위 : Magnetic : 100mG) [사진 1], 코일[사진 2], 에나멜선, 도선, 15cm 자, 전원 공급 장치[사진 3], 전압계



a. 자기장 측정기



b. 코일



c. 직류 전원 공급장치

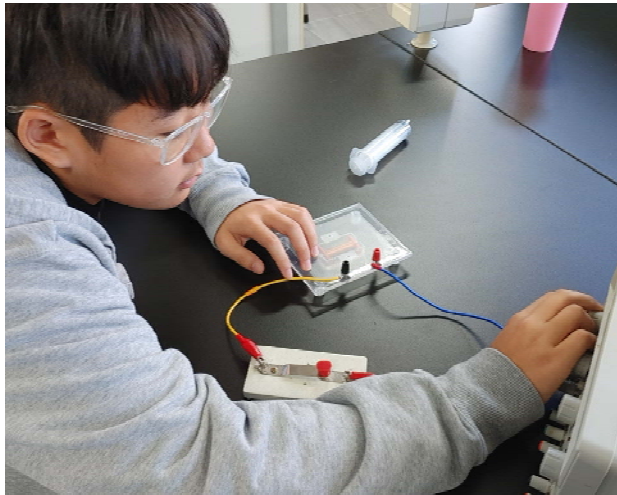
Fig. 4. 실험 준비물

#### 2. 실험방법

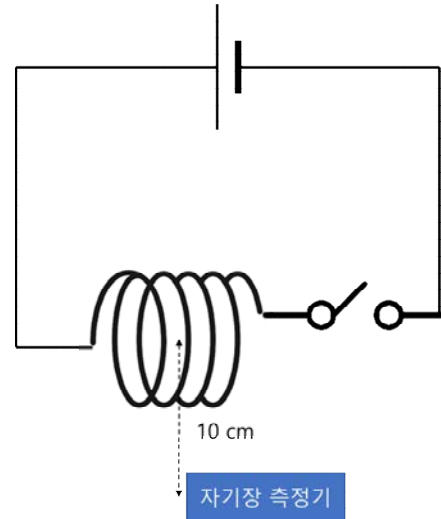
##### 1) 탐구 문제 ① : 전압에 따른 EMP의 세기 변화

- (1) 코일과 자기장 측정기의 거리를 10 cm로 놓는다.
- (2) 코일과 전원 공급 장치를 연결하고, 자기장을 측정한다.
- (3) (2)의 과정을 전압 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V, 2.5 V, 3.0 V로 전압당 10번씩 측정한다.

(4) 각 전압에서 측정된 10개의 자기장 값의 평균과 표준편차를 내고, 표로 정리한다.



a. 실험 장면

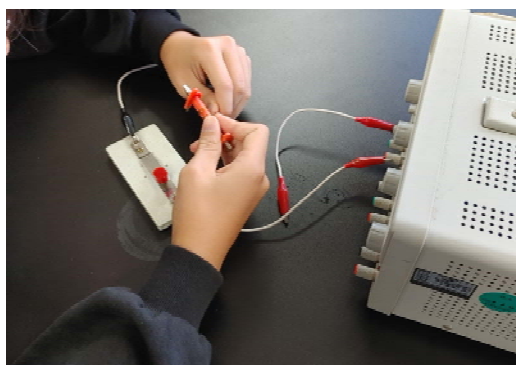


b. 실험 모식도

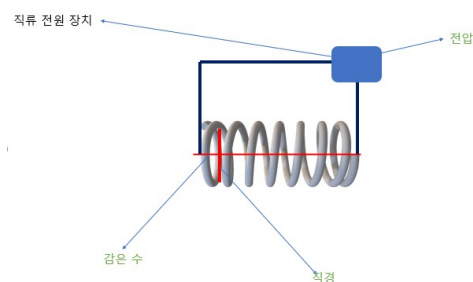
Fig. 5. 탐구 문제 1의 실험 장면 및 모식도

2) 탐구 문제②: 코일을 감는 횟수에 따른 EMP의 세기 변화

- (1) 에나멜선을 90번 감고, 전원 공급 장치에 연결한다.
- (2) 코일과 측정기의 거리를 5cm로 놓고, 자기장을 측정한다.
- (3) 2의 과정을 10번 반복한다.
- (4) 1차, 2차, ... ,10차까지의 결과의 평균과 표준편차를 내고, 표로 정리한다.
- (5) 코일의 감는 수를 10번씩 줄여가면서 1~4의 과정을 9번 반복한다.



a. 실험 장면

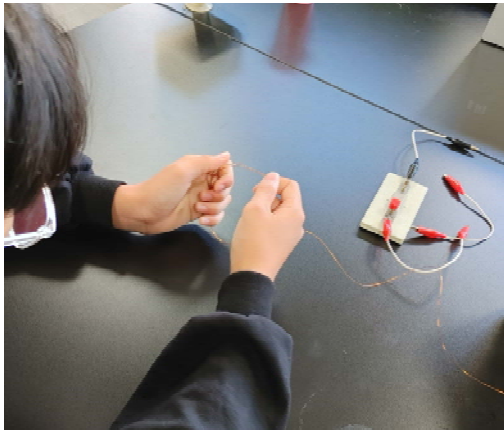


b. 실험 모식도

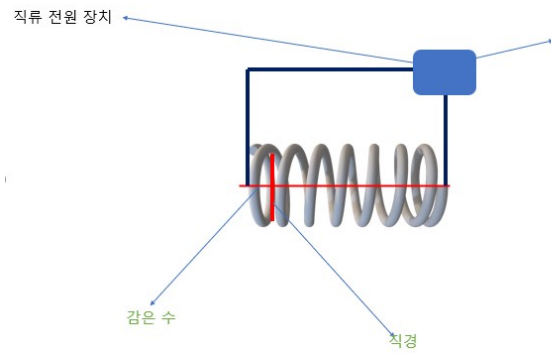
Fig. 6. 탐구 문제 2의 실험 장면 및 모식도

3) 탐구 문제③ : (코일의 직경에 따른 EMP의 세기 변화)

- (1) 직경 1cm의 코일을 에나멜선을 30번 감아서 제작한다.
- (2) 코일에 전원 공급 장치를 연결한다.
- (3) 코일과 측정기의 거리를 5 cm로 놓고, 자기장을 측정한다.
- (4) 2~3의 과정을 10번 반복한다.
- (5) 1차, 2차, ... ,10차까지의 결과의 평균과 표준편차를 내고, 표로 정리한다.
- (6) 코일의 직경을 각각 2 cm씩 늘려가면서 3~5의 과정을 4번 반복한다.



a. 실험 장면



b. 실험 모식도

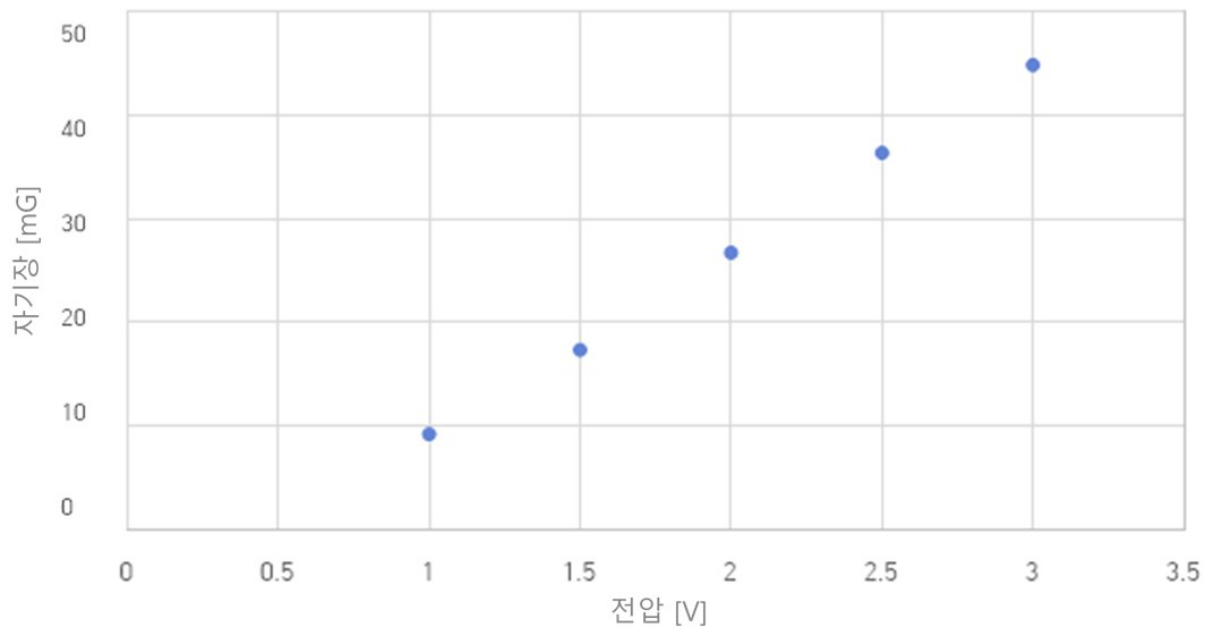
Fig. 7. 탐구 문제 3의 실험 장면 및 모식도

#### IV. 연구 결과

##### 1. 코일에서 나오는 자기장은 전압에 비례하는가?

전압 \ 차수	1.0 V	1.5 V	2.0 V	2.5 V	3.0 V
1차	6.6	18.7	29.1	33.7	45.1
2차	10.1	15.5	30.2	35.5	45.6
3차	7.9	17.3	24.6	38.3	42.1
4차	9.1	17.2	27.4	36.2	44.7
5차	10.4	19.4	28.4	36.9	45.9
6차	10.8	17.2	24.1	38.5	44.9
7차	8.5	18.3	24.6	34.0	46.5
8차	9.6	18.4	26.3	33.9	44.6
9차	9.8	15.5	25.7	37.6	43.4
10차	10.1	16.4	26.9	38.8	45.1
평균	9.29	17.39	26.73	36.34	44.79
표준편차	1.23	1.26	1.95	1.89	1.19

(단위 : mG)

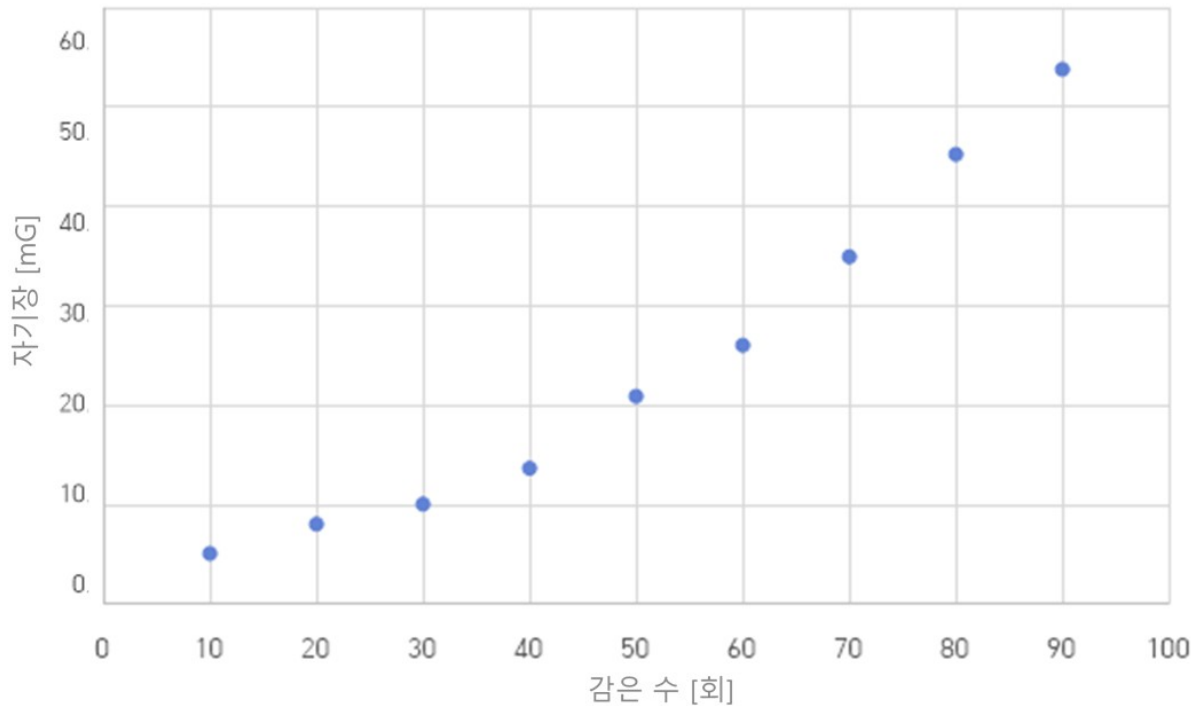


전압의 세기를 1V에서 3V까지 0.5V씩 증가시켰다. 이때 자기장의 세기는 선형적으로 증가하였으나 원점을 지나지 않았다. 이는 시간에 따른 전류의 변화가 자기장의 세기와 비례한다는 이론적 예측과 유사하다.

2. 코일에서 나오는 자기장은 코일의 감은 수에 비례하는가?

차수 \ 감은수	90번	80번	70번	60번	50번	40번	30번	20번	10번
1차	51.6	48.7	37.8	24.7	20	14.9	10.6	9.5	4.7
2차	53	44.8	34.3	23.8	20.3	12.6	10.9	7.3	5.8
3차	52.8	44	34.9	29.6	21.4	11.7	9	8.3	4.3
4차	53	46.3	34	24.3	22	16.9	9.4	8	4.9
5차	55.2	43.5	34.3	27.1	20.3	14.8	9.3	7.7	5.7
6차	51.9	42.5	35.3	27.7	20.7	14.1	10.6	7.1	4.9
7차	56.6	44.4	37.6	23.9	20.3	11.9	10.2	8.2	4.5
8차	53.6	46.8	35.1	27.3	21.9	12.4	10.5	7.8	4.9
9차	55.8	45.5	33.8	25.6	21.7	13.9	10.3	8.4	5.4
10차	55	46.5	32.8	26.9	20.9	13.9	10.2	8.6	6.2
평균	53.85	45.30	34.99	26.09	20.95	13.71	10.10	8.09	5.13
표준편차	1.61	1.74	1.52	1.83	0.71	1.53	0.61	0.65	0.59

(단위 : mG)

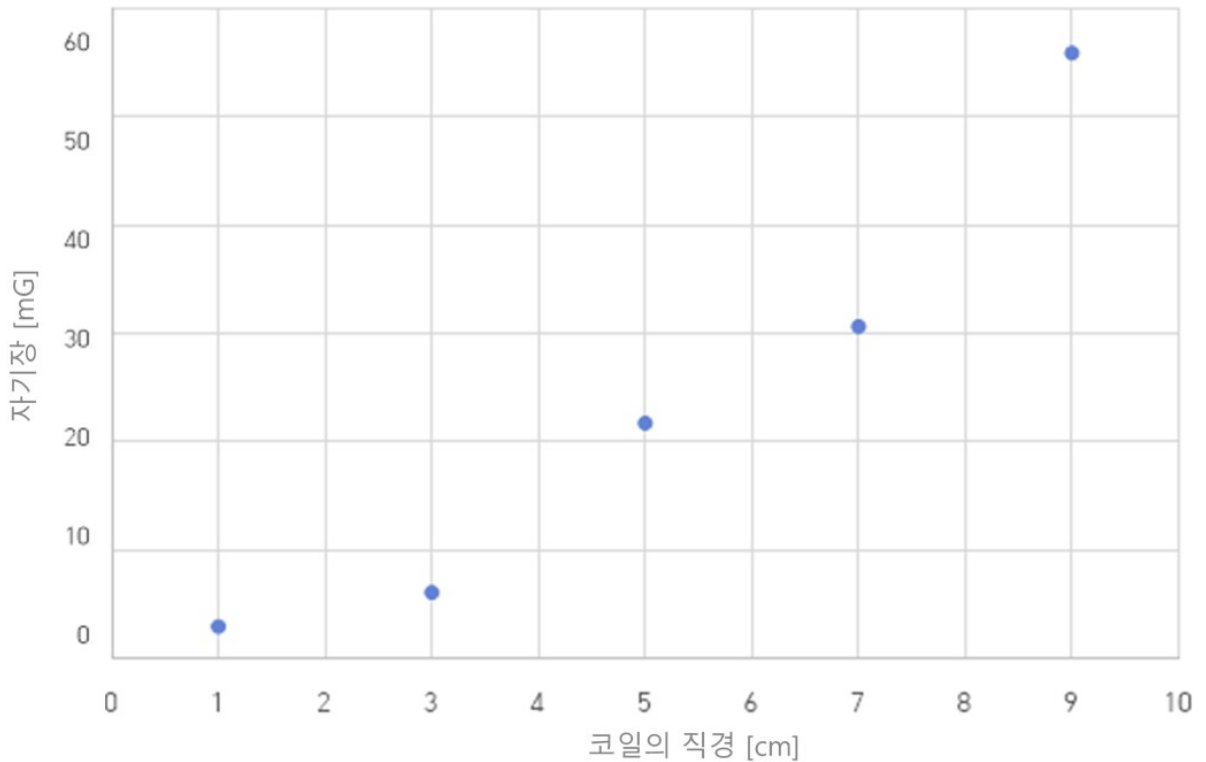


코일의 감은 수를 10회에서부터 90회까지 늘렸을 때, 자기장의 세기는 이차함수와 유사하게 증가한다. 이는 자기 쌍극자를 이용한 예측 방식과는 어긋나지만, 실험 과정에서 철심에 코일을 감았으므로 강자성체에 의해 자기장이 증폭된 것 같다.

3. 코일에서 나오는 자기장은 코일의 직경에 비례하는가?

차수	직경				
	1 cm	3 cm	5 cm	7 cm	9 cm
1차	2.7	5.3	24.1	38.2	54.2
2차	2.7	5.8	22.8	36	58.6
3차	3	5.1	21.5	29.7	56.9
4차	2.7	5.9	20	28.2	47.2
5차	3.7	6.6	20.5	32.7	51.2
6차	3.2	7.4	23	24.9	50.8
7차	3	6.2	20.5	25.9	60.3
8차	3	6.4	21.4	29.2	61.2
9차	3.2	6.2	22.9	33.8	56.5
10차	2.9	6.5	20.8	28	61.8
평균	3.01	6.14	21.75	30.66	55.87
표준편차	0.29	0.63	1.30	4.14	4.67

(단위 : mG)



직경 실험에서 직경을 1 cm에서 9 cm까지 늘여 가면서 자기장을 측정하였는데 이는 이차함수와 유사한 형태로 그려졌다. 자기 쌍극자 식에서 자기장은 반지름의 제곱에 비례했으므로 이는 실험 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.

## V. 결론 및 제언

감은 수에 따른 자기장의 세기 변화 실험에서는 지수 함수와 비슷한 형태로 결과가 나왔다. 또 이론적인 계산에서 자기장은 직경의 제곱에 비례하는 이차함수이다. 실제 실험에서도 그래프는 이와 비슷한 형태로 그려졌다. 마지막으로 시간에 따른 전류의 변화는 자기장에 비례하므로 전압 역시 자기장과 비슷한 그래프로 그려졌다. 이 실험을 통해 우리는 전자기파의 세기는 일정한 전류가 아닌 전류의 변화와 감은 수에 비례하고 직경의 제곱에 비례한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 실제 실험에서는 이와 유사한 형태의 그래프가 그려졌다.

그러나 실험 결과가 예측과 맞지 않는 부분도 많았다. 특히 탐구 문제 2번에서 감은 수와 전자기파의 세기가 비례할 것이라 예상하였지만 예상보다 자기장의 세기가 더 증가하였는데, 이 실험 결과가 그렇다. 이 실험 결과를 해석하고자 본 연구에서는 철심의 자화에 대한 효과와 자체 유도에 의한 효과와 두 가지를 추가로 검토하였다.

우선 자화 곡선을 이용하여 설명해 보고자 하였다.

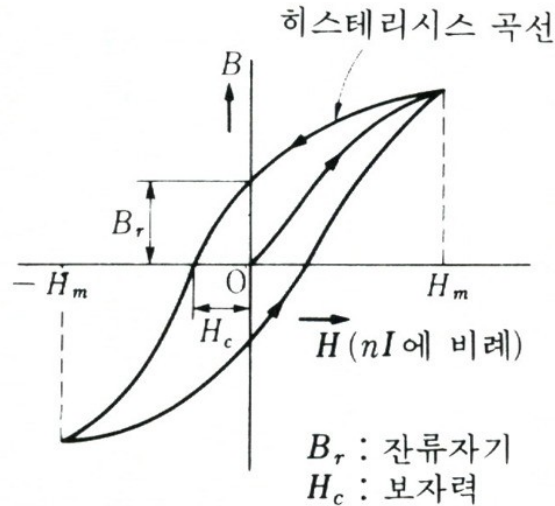


Fig. 8. 강자성체 자화 곡선 (Chikazumi, 1997)

본 실험에서는 코일 중심에 철심이 있어 자기장의 크기에 영향을 주었다. 자화 곡선을 보면 자기장이 처음에는 가파르게 증가하다가 나중에 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 코일에 의한 자기장이 약한 경우에는 철심의 자기장이 코일에 의한 자기장 비례하지만, 코일에 의한 자기장이 센 경우에는 외부 자기장의 증가보다 덜 증가할 수 있음을 보여준다. 전압의 변화에 따라 전자기파가 선형으로 증가한 [탐구 문제 1]의 결과에 따르면 우리의 실험환경에서 철심의 자기장은 외부 자기장

에 선형으로 비례한 것으로 보이며, 따라서 자화 곡선이 선형, 즉 자기장이 약한 구간에서 실험이 수행되었을 것으로 판단하였다, 즉 철심의 자화는 탐구 문제 2의 예상과 실험 결과가 다른 이유를 설명하는 데는 적절치 못함을 확인하였다.

다음으로 자체 유도를 사용하여 실험 결과를 해석해 보았다. 본 보고서의 기본적인 실험적 모식도는 Fig. 8. 에도 있고, 이 계산에서도 이 그림을 참고할 것이다. 먼저 전압 강하를 적용하면

$$V - L \frac{dI}{dt} - IR = 0 \quad (8)$$

이고, 식을 이항하면

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L}I = \frac{V}{L} \quad (9)$$

이 된다. 식 (9)는 제1계 비동차 선형 미분 방정식이다. 이 방정식의 해  $I$ 는 다음과 같다.

$$I = e^{-\int \frac{R}{L} dt} \left[ \frac{V}{L} \int e^{\int \frac{R}{L} dt} + c \right] \quad (10)$$

이고, 적분값을 계산하면

$$I = e^{-\frac{R}{L}t} \left( \frac{V}{R} e^{\frac{R}{L}t} + c \right) \quad (11)$$

이다. 시간이 0일 때, 전류가 0이라고 가정하면 상수  $c$ 는  $-V/R$ 이 되기 때문에 전류값은 다음과 같다.

$$I = \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \frac{V}{R} \quad (12)$$

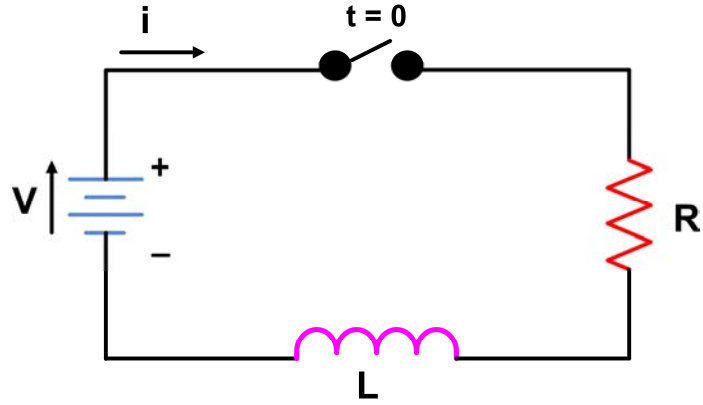


Fig. 9. RL 회로의 모식도

이 전류값을 시간에 대해 미분하면,

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (13)$$

이고, 이 식을 식 (10)에 대입하면

$$E(t) \propto \frac{\mu_0 R^2 N}{4d^3} \frac{V}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (14)$$

여기서 자체 유도 계수는 감은 수에 비례하고, 자유 공간에서 B는 E에 비례하므로 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$B(t) \propto R^2 V e^{-\frac{R}{kN}t} \quad (15)$$

여기서 시간  $t$ 는 펄스 형태의 실험이므로 0에 근접하므로 상수 취급할 수 있다. 그래서 감은 수를 변수로 놓으면 저항이 매우 작아  $\frac{Rt}{k} \ll 1$ 인 상황이므로 이 구간에 서  $N$ 에 따라 자기장의 값이 증가한다. 이는 Fig. 10.에서 확인할 수 있다. 그러므로 우리 실험에서는 자기장 값이 큰 구간을 측정하였기에 탐구 결과 2와 같은 실험 결과가 나왔을 것이다.

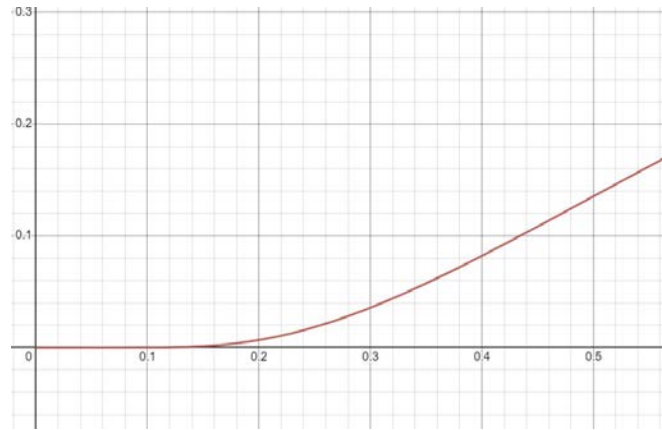


Fig. 10. 감은 수에 따른 자기장의 세기

지금까지 실험 결과를 해석하기 위한 여러 가지 가설을 제시하고 이를 분석해 보았다. 그 결과 자체 유도를 고려하여 미분 방정식을 풀어보고 전자기펄스에 맞게 조정하여 실험과 예측이 맞지 않은 부분을 설명하였다. 따라서 회로 변수에 따른 EMP의 세기 변화에 대해서는 다음과 같이 정리할 수 있다. 전자기펄스의 세기는 코일의 직경의 제곱에 비례하고 전압에 비례하며 감은 수에 대해서는 Fig. 10과 같이 증가하며, 이것은 식 (15)를 통해 얻은 결과이다.

이렇듯 본 탐구에서는 전자기펄스가 여러 회로 요인에 대하여 갖는 비례관계를 알아보았다. 비록 이론적인 계산 과정에서 많은 근사 과정이 있었지만, 실험 결과와 대부분 일치하였고, 설명할 수 있었다. 이는 전자기펄스의 세기를 조절하여 원하는 양의 전자기펄스를 내는 데 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

## VI. 참고문헌

- 김세윤 (2020). **전자기학** (3판). 서울: 퍼스트북
- 김종훈, 김지성, 안승영, 김정호. (2016). 무선 전력 전송 시스템에서의 전자파 연구 동향. **한국전자파학회지**, 27(1), 54-65
- 김진승 (역) (2006). **기초 전자기학** (4판). 서울: 진샘미디어
- 정성빈, 윤재복 and 이기림. (2023). EMP 기술표준 동향 및 군용 RF 안테나 유입 EMP 신호 분석. **한국기계기술학회지**, 25(5), 763-769.
- 최순호, 허창수, 이태우 and 방정주 (2014). 시뮬레이션을 통한 스파크갭의 SF6, N2 압력 특성 분석. **전기전자재료학회논문지**, 27(3), 172-177.
- Chikazumi, S. (1997). *Physics of ferromagnetism* (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press.

물리B

05\_구(球)형 집광 모듈의 제작과 온수기로서의  
효율



# 구(球)형 집광 모듈의 제작과 온수기로서의 효율

권지예 (제일여자중학교 2학년)  
권태현 (마산서중학교 2학년)  
김린하 (무학여자중학교 2학년)  
김민서 (가야중학교 3학년)  
김태은 (삼성자중학교 2학년)  
천우진 (중앙중학교 2학년)

지도교수 : 김성화 (경남대학교 MSC교육부)

투명 아크릴 구(球)를 활용하여 물이 채워짐으로서 볼록렌즈의 역할을 한다. 구형의 볼록렌즈의 구조상 투과한 빛이 한 점에 모이게 되며 높은 에너지 밀도를 형성하게 된다. 모인 에너지를 물이 순화하면서 다시 열을 다시 흡수 하게 됨으로서 전체적인 열의 흡수율을 높일 수 있다. 이러한 조건으로 구형의 집광모듈을 제작하여 물의 온도변화를 측정하였고 그 효율을 알아 보았다. 몇번의 실험 결과 높은 효율로 계산되었으며, 신뢰성이 어느 정도 확보가 될 수 있다면 태양의 광학적 성질을 이용한 태양광 온수기로서의 가치를 충분히 가질 수 있을 것으로 보인다.

## I. 서론

### 1. 연구동기

현재 인류가 당면한 과제 중 가장 심각하다고 할 수 있는 것 중의 하나가 기후변화이다. 기후변화의 큰 요인은 인간의 에너지 사용량이 과도하게 많아지고 이에 따른 환경오염의 원인이 되는 화석연료의 사용량이 좀처럼 줄지 않는 것이다. 이에 인류는 친환경에너지 자원에 대한 관심과 연구에 많은 노력을 기울이고 있다. 친환경에너지 자원의 대표적인 것이 태양, 풍력, 수력, 수소 등이 있다. 그 중 태양에너지는 청정하면서 거의 무한에너지를 인식되고 있다. 태양에너지는 태양광과 태양열을 이용을 한다.

본 연구는 태양광을 활용하여 광학적인 성질을 이용한 수렴장치와 이를 통한 간단한 온수기를 제작하고 그 효율성에 대하여 알아보았다. <그림 1>과 같이 태양광과 태양열로 활용한 예이다.



(a)



(b)

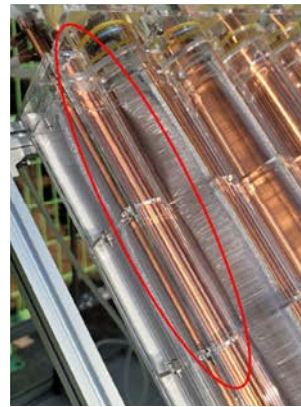
<그림 1> 태양광 발전기(a)와 태양열 온수기(b)

## 2. 연구목적 및 방향

기존 사사연구(2022년도 사사과정)에서 진행된 투명 원통형 아크릴관을 활용한 온수기는 물이 채워진 아크릴관의 볼록렌즈 역할로 투과된 빛이 한 초점에 모인다. 원통형의 구조상 투과된 빛이 라인(Line)으로 나타나게 된다<그림 2>.<sup>9)</sup> 모인 빛이 라인 형태로 이루게 된다. 아크릴관에서의 1차 흡수와 투과된 빛의 2차 흡수를 통하여 에너지의 흡수율을 높일 수 있는 상황이다. 2차 흡수과정에서 투과된 빛이 모이는 초점위치에 구리관을 배치하고 물에게 열이 전달되는 상황인데 수렴된 빛이 구리관의 온도를 높이고 구리관 내부로 통과하는 물과의 온도차가 클수록 열전달률은 증가한다. 하지만 라인형태로 나타나는 수렴된 빛은 그 집중도에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 투과된 빛의 수렴과정에서 라인형태로 분산되는 점을 보완하여 라인이 아닌 점(Point)으로 집중도를 최대화하고자 하였다. 이를 위해 1차 집광장치를 원통형이 아닌 구(球)형 집광모듈을 만들고 수렴되는 지점의 온도를 물의 온도차를 최대로 증가시켜 열전달률을 높이고자 하였다.



(a)



(b)

<그림 2> 원통형 투명 아크릴관을 통한 집광장치(a)와 투과된 빛의 수렴(a)

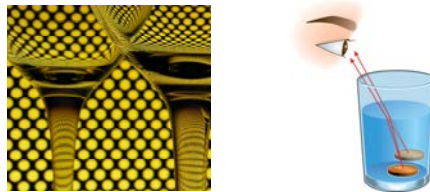
## II. 이론적 배경

### 1. 빛의 성질

#### 1) 빛의 성질<sup>4),5),12)</sup>

직진과 반사, 그리고 굴절을 빛의 대표적인 성질로 얘기한다. 빛이 균일한 매질 내에서 곧게 뻗어가는 성질을 직진이라고 한다. 그림자가 생기는 것이 직진성에 의한 것으로 볼 수 있다. 반사는 빛이 다른 매질에 닿을 때 반사되어 나오는 것이다. 굴절은 빛이 다른 두 물질의 경계면에서 진행속력이 달라짐으로써 빛의 경로가 달라지는 현상이다.

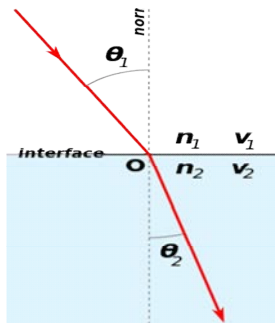
본 연구에서는 빛의 직진성 특히, 태양광이 지구로 입사할 때 평행하게 진행됨을 활용하였다. 또한 굴절의 성질을 이용하여 투과된 빛이 수렴될 수 있도록 모듈을 제작하였다.



<그림3> 굴절현상의 예

#### 2) 굴절(스넬의 법칙)<sup>4)</sup>

진행 중인 광선이 한 매질에서 다른 매질과의 경계면에 닿으면 일부는 반사되고, 나머지는 두 번째 매질 속으로 투과된다. 투과되는 광선은 경계면에서 경로가 바뀌게 되는데 이를 굴절(refraction)되었다고 한다. 굴절은 빛의 속력의 차이에 의하여 나타나는 현상으로 속력의 비인 굴절률을 구하기 위하여 식(1)과 같이 스넬의 법칙을 활용한다. <그림 4>는 매질에 따른 빛의 굴절되는 상황으로 속도, 파장, 굴절률의 관계를 보여주고 있다.

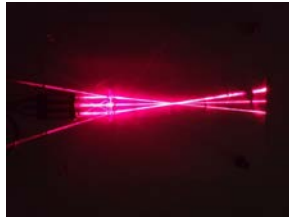


$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

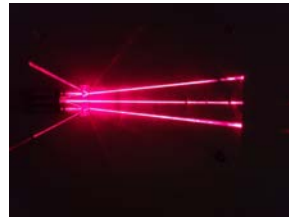
$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta_2 \text{ ---- 식(1)}$$

<그림 4> 빛의 굴절과 스넬의 법칙

<그림 5>는 볼록렌즈와 오목렌즈에 평행한 레이저광을 투과시켜 빛의 경로를 나타낸 것이다. 투과된 빛이 한 점에 모이는 수렴형과 퍼지는 발산형의 대표적인 광학계이다.<sup>8)</sup>



a. 볼록렌즈



b. 오목렌즈

<그림5> 볼록렌즈와 오목렌즈의 평행광 투과

### 3) 태양광의 성질의 활용<sup>8)</sup>

투명 아크릴관에 물을 채웠을 때와 그렇지 않았을 경우 평행광을 투과시키면 <그림 6>과 같은 빛의 경로를 달라진다. 물을 채우면 볼록렌즈의 역할을 하면서 초점거리에 빛이 모이고 물이 순환되는 구리관을 초점에 배치함으로써 재흡수의 효과를 기대할 수 있다. 이러한 현상이 나타나기 위해서 태양광이 지구에 평행하게 입사되고 매질에 따른 속도의 변화로 나타나는 굴절의 성질 이용되었다.



a

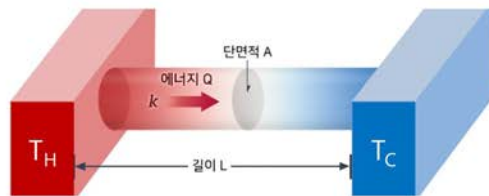
b

<그림 6> 원형 투명 아크릴의 단면

(a: 물이 채워지지 않았을 때, b: 물이 채워졌을 때)

### 4) 열전도율<sup>4)</sup>

높은 온도에서 낮은 온도로 전달되는 에너지를 Q라고 할 때 시간당 전달되는 에너지의 양은 <그림 7>과 식 (2)와 같다.



$$P = \frac{Q}{t} = \frac{KA(T_H - T_C)}{L} \quad \text{-----식 (2)}$$

<그림 7> 열전도율

열전도율은 열전도도(K)와 접촉 면적(A), 그리고 온도차( $T_H - T_C$ )에 비례하고 간격(L)에 반비례한다.

본 연구에서는 물이 채워진 투명 아크릴관이 볼록렌즈 역할을 하면서 투과된 빛이 초점 위치에 배치된 구리관에 모이면서 높은 온도가 형성되고 구리관을 순화하는 물과의 온도차가 커지게 된다. 이로 인해 온도차에 따른 열전도율의 증가를 기대하게 된다.

### 5) 태양상수<sup>7)</sup>

지구 대기권 밖에서 1cm<sup>2</sup>의 면적에 1분 동안 수직으로 가해진 태양에너지의 총 열량으로 다음과 같다.

$$\text{태양상수} \Rightarrow 1.96 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$$

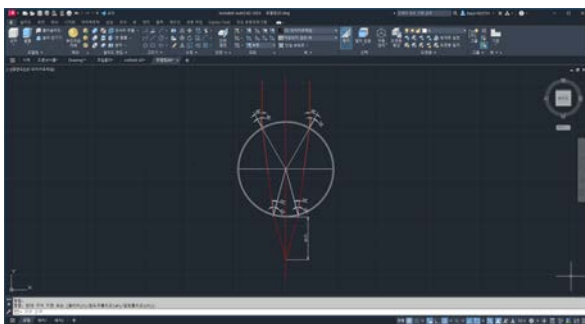
본 실험에서는 물에 공급되는 전체열량을 계산하여 1분 동안 단위면적 1cm<sup>2</sup>에 대한 것으로 환산하여 공급되는 에너지와 흡수 활용되는 에너지의 비를 구하였다.

## III. 연구방법

### 1. 투명 아크릴 구(球)의 초점 거리 작도

본 실험에서는 선행연구과정<sup>8)</sup>에서 사용된 원통형 아크릴관을 대체하여 아크릴구를 활용하였다. 이는 보다 투과된 빛이 한 점(Point)으로 모이게 하여 보다 에너지집중도를 높이기 위한 것이다. 스넬의 법칙을 활용하여 아크릴구에 물(굴절률 : 1.33)을 채워 평행광을 입사했을 때 투과 후 빛이 모이는 초점을 AUTOCAD프로그램을 이용하여 작도하고 초점거리를 예측하였다. 선행연구과정<sup>8)</sup>을 참고하여 아크릴의 굴절률은 1.49로 활용하였다.

<그림 9>는 스넬의 법칙을 통해 초점거리를 작도한 것으로 그 결과 약 4.5cm로 파악되었다. <그림 10>은 물을 채운 아크릴 구를 직접 태양광을 입사시켜 초점 거리를 파악한 것으로 작도한 것과 비슷하게 나타났으며, 본 연구에서는 4.5cm로 결정하였다.



<그림 9> AUTOCAD를 이용한 작도

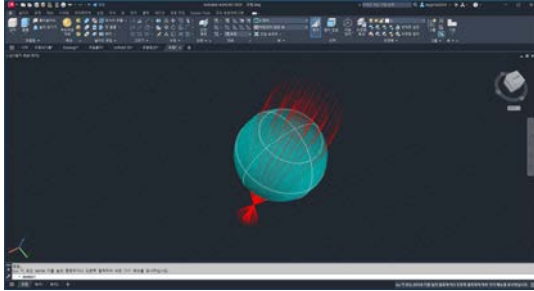


<그림 10> 평행광 레이저를 이용한 초점거리 측정

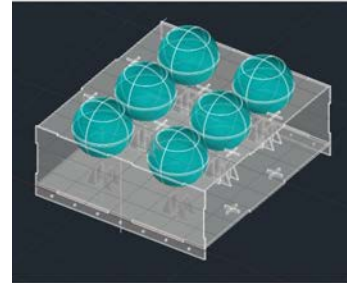
### 2. 집광모듈 설계

초점거리를 4.5cm로 결정한 후 빛이 투과된 후 초점거리에 수렴되는 상황을 입체적으로 형상화하였다<그림 11>. 이를 토대로 전체 아크릴구가 6개를 활용한 집광모듈을 설계하였다.

<그림 12>



<그림 11> 투과된 빛의 초점위치에서의 수렴



<그림 11> 6개의 아크릴구를 활용한 집광모듈

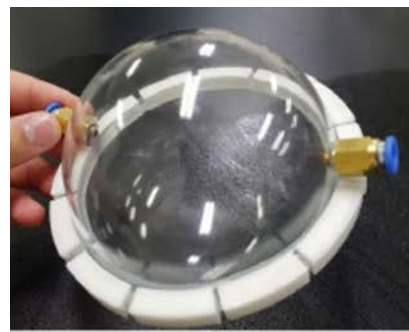
### 3. 제작

#### 1) 투명 아크릴 집광구 제작

반구 형태의 아크릴반구(半球)를 결합하여 구형으로 제작하였다. 단순히 반구를 맞붙이게 되면 누수가 발생할 수 있으므로 실리콘패드를 준비하고 두 반구를 잡아줄 수 있는 클램프를 3D 프린터로 제작하여 집광구를 완성하였다. <그림 12>는 아크릴반구, 실리콘패드 클램프이며, <그림 13> 완성된 집광구이다.



<그림 12>아크릴반구, 실리콘패드, 클램프



<그림 13> 완성된 집광구

#### 2) 집광모듈의 조립

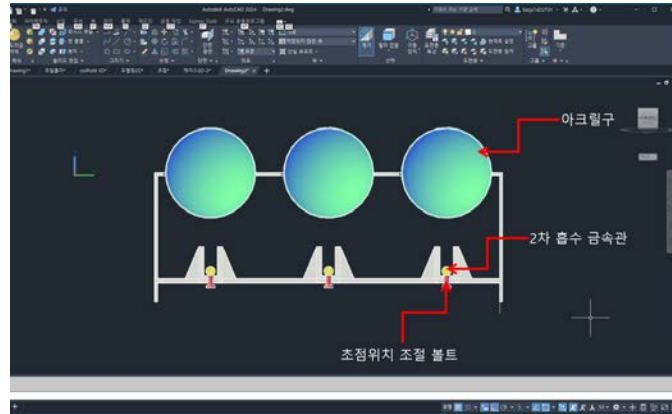
<그림 14>와 같이 6개의 집광구가 결합될 수 있도록 케이스를 조립하여 만들고 <그림 15>와 같이 각 집광구에 대한 초점위치에 2차 흡수가 될 수 있는 금속관을 배치하고 각각의 집광구와 2차흡수 금속관들이 전체적으로 물이 순환 될 수 있도록 실리콘관을 연결하였다. 금속관은 높이 조절이 가능하도록 하여 최적의 초점위치에 배치되도록 하였다<그림 16>.



<그림 14> 케이스 제작



<그림 15> 초점위치 금속관 배치



<그림 15> 집광모듈 단면

#### IV. 실험 및 결과

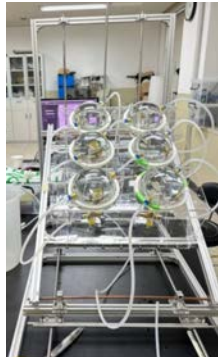
##### 1. 집광모듈의 태양광 입사 및 물의 온도변화 측정

완성된 집광모듈의 물순환이 원활한지를 점검하였다. 특히, 집광구에 물을 채우는 과정에서 기포가 채워지는 것을 최소화하면서 조심스레 물을 순화시켰으며, 원활한 순환을 확인하였다<그림 16>.

집광모듈을 <그림 17>과 같이 고도조절 거치대에 결합하여 태양광에 노출하여 물의 온도변화를 측정하였다.



<그림 16> 집광구들간의 물 순환 확인

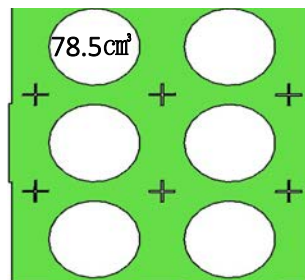


<그림 17> 고도조절 거치대 결합 및 태양광 노출에 대한 물의 온도변화 측정

## 2. 집광모듈의 태양광 노출에 대한 물의 온도변화

### 1) 투명집광구의 1차 흡수와 초점위치에서의 2차 흡수

태양광이 입사되는 면적은 <그림 18>과 같이 집광구 1개의 면적이  $78.5\text{cm}^2$ 이다. 6개의 집광구이므로 총 입사면적은  $78.5\text{cm}^2 \times 6 = 471.3\text{cm}^2$  이다. 태양광이 입사되어 집광구를 투과하고 다시 초점거리의 금속관에 모이는 것과 물이 전체적으로 순환되면서 에너지를 흡수하는 상황을 <그림 19>와 같이 나타내었다. 물의 변화가 나타나면  $Q = c_w m \Delta T$ 의 관계식으로 총 흡수되는 열량을 구할 수 있다.  $Q$ 는 전체열량,  $c_w$ 는 물의 비열,  $m$ 은 전체 물의 질량,  $\Delta T$ 는 물의 온도 변화량이다.



$$Q = c m \Delta T$$

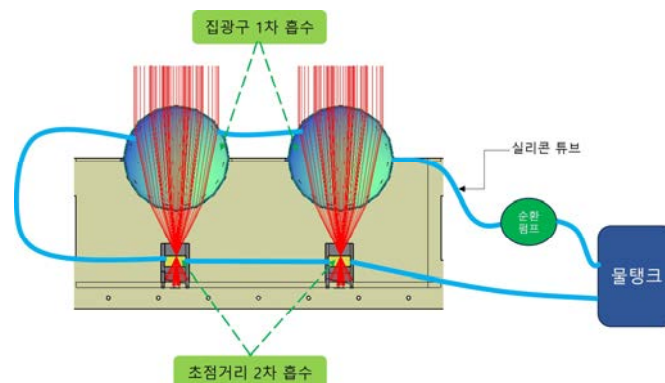
$Q$ : 전체열량

$c$ : 물의 비열

$m$ : 물의 질량

$\Delta T$ : 물의 온도변화량

<그림 18> 태양광 입사 면적 및 전체 열량에 대한 관계식

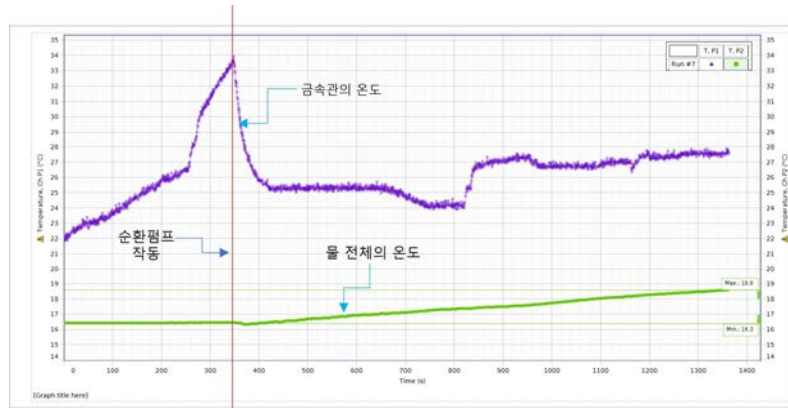


<그림 19> 집광구에서 1차흡수와 초점위치에서의 2차 흡수

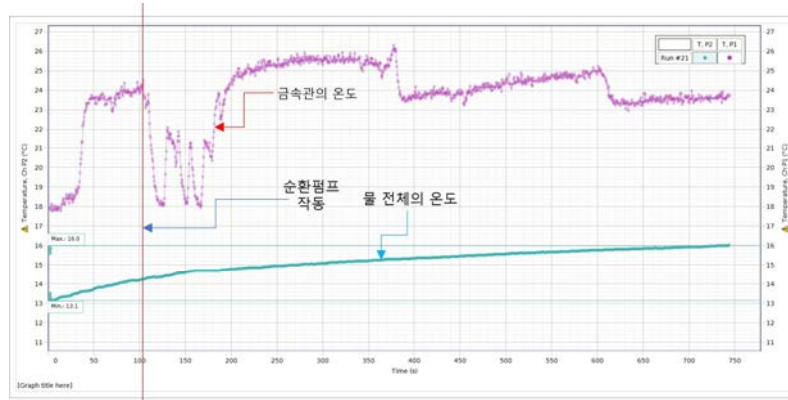
## 2) 물의 온도변화

<그림 20>은 몇 번의 실험을 통하여 물의 온도 변화 그래프이다. 초점위치에서의 금속관의 온도변화도 동시에 측정하였다. 태양광이 입사되었을 때 초점위치의 금속관의 온도가 상승하는 구간이 나타나는데 이 순간에는 물순환 펌프를 작동하지 않는 구간이다. 그리고 금속관의 온도가 상승하다가 급격히 하강하는 구간이 발생하는데 이때 펌프를 작동하여 물순환을 이루어지고 있는 상황이다. 반면에 물의 온도는 상승하게 되는 것을 확인할 수 있다. 전체 채워진 물의 양은 총 3500cc(3500g) 이다.

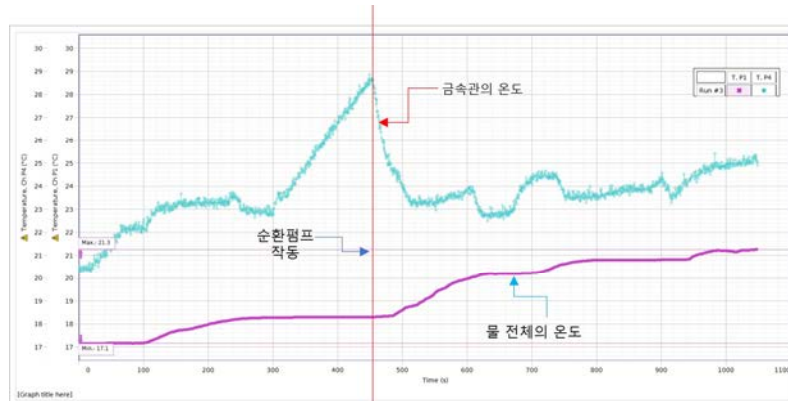
실험1  
(#1)



실험2  
(#2)



실험3  
(#3)



<그림 20> 태양광 입사에 따른 초점위치 금속관과 물의 온도변화

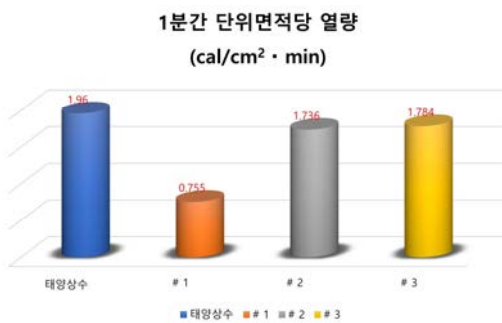
<표 1>은 위 실험 결과를 토대로 전체적인 물의 온도변화와 흡수된 열량, 그리고 1분간 단위면적 1cm<sup>2</sup>당 흡수한 열량을 계산하여 정리한 것이다.

<표 1> 집광모듈에 의한 물의 온도변화와 1분간 단위면적당 흡수한 열량

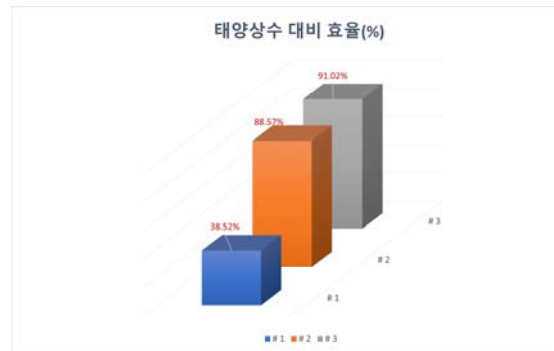
실험	물의 양 (g)	시간 (s)	입사면적 (cm <sup>2</sup> )	처음온도 (°C)	나중온도 (°C)	총열량 (cal)	1분간 단위면적당 열량 (cal/cm <sup>2</sup> · min)
# 1	3500	1358	471.3	16.3	18.6	8050	0.755
# 2	3500	744	471.3	13.1	16.0	10150	1.736
# 3	3500	1049	471.3	17.1	21.3	14700	1.784

### 3) 효율

단위 면적당 1분간 흡수된 열량을 정리한 <표 1>을 토대로 <그림 21>과 같이 태양상수와 비교하였다. <그림 22>에서 볼 수 있듯이 태양상수 대비 효율 실험1(#1)에서는 38.58 %, 실험1(#2)에서는 88.57 %, 그리고 실험3(#3)에서는 무려 91.02 %로 나타났다.



<그림 21> 1분간 단위면적당 에너지양



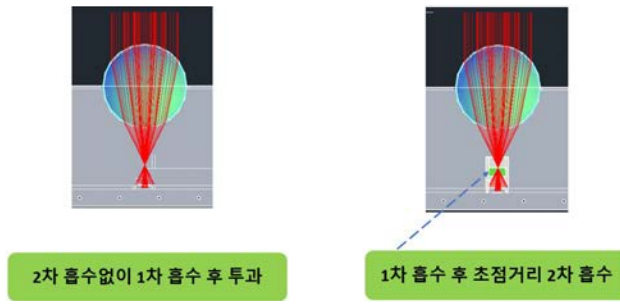
<그림 22> 태양상수 대비 효율

### 3. 집광구의 1차 흡수와 1차 포함 2차 흡수를 진행한 것과의 비교

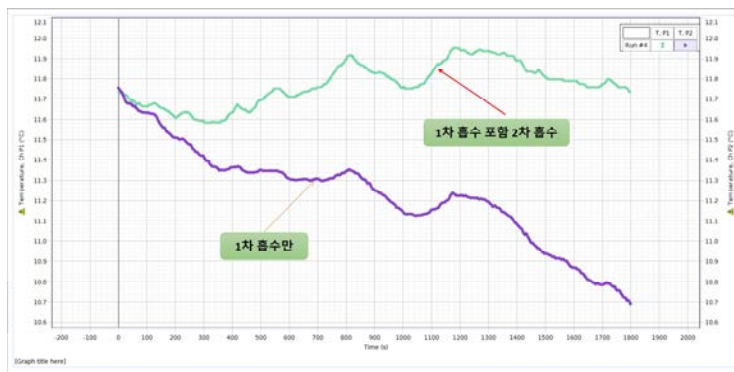
<그림 23>과 같이 집광구의 1차 흡수만의 경우와 1차포함 2차 흡수의 경우를 동시에 진행했을 때를 비교 실험 하였다. <그림 24>는 각각의 경우를 단면으로 나타낸 것이다. 실험이 진행되는 동안 기온 낮았으며, 바람도 상당히 부는 상황이었다. 그 결과 <그림 25>와 같이 실험 당시의 날씨를 감안 한다면 1차 흡수만을 진행한 경우 날씨에 따라 물의 온도가 계속 낮아지는 것을 알 수 있다. 반면에 1차 흡수 포함하여 2차 흡수를 진행한 경우 추운 날씨에도 높은 열에너지의 흡수가 진행됨을 확인할 수 있다.



<그림 22> 태양상수 대비 효율



<그림 22> 태양상수 대비 효율



<그림 22> 태양상수 대비 효율

## V. 결론 및 제언

본 연구는 태양광의 광학적 성질을 이용하여 온수기의 제작에 있어 흡수율을 증대하기 투과하는 빛에너지를 재흡수를 통해 효율을 높이고자 하였다. 특히, 투명 아크릴 구(球)를 활용하여 물이 채워짐으로서 볼록렌즈의 역할을 하는데 구형의 볼록렌즈의 구조상 투과한 빛이 한점에 모이게 하여 높은 집중률과 높은 열전달을 기대할 수 있다. 이러한 기대하의 집광모듈을 제작, 온수기로 활용하여 물의 온도변화를 측정하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

### 1. 결론

첫째, 투명아크릴구에 물을 채워 볼록렌즈의 역할과 투과된 빛이 초점에 수렴될 때 높은 밀도의 에너지가 모이는 것을 확인할 수 있었다. .

둘째, 태양광의 광학적 성질을 통한 2차 흡수에 대한 효율을 높일 수 있음을 충분히 기대할 수 있었다. 구(球)형 집광모듈의 효율성을 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

셋째, 실험 결과 기대 이상의 높은 효율이 나타났다. 빛이 한 점에 모이면 상당히

높은 에너지가 집중되고 고온의 열이 발생한다. 이로 인해 순환되는 물로 전달되는 열의 전달률이 높았을 것으로 분석된다. 효율성 계산과정에서 집광면적을 집광구 6개의 면적으로 계산되어진 부분이 있는데 입사면적을 모듈케이스 전체로 봐야 할 수도 있다. 하지만 이러한 계산과정을 보정 한다고 해도 실험 당시의 날씨 등을 살펴볼 때, 효율성에 대한 의미가 있는 것으로 보인다.

## 2. 제언

계절이나 날씨의 영향으로 태양광을 적게 받거나 찬바람이 불 때 모듈에서 얻어 에너지가 물 순환 과정에서 외부로 방출될 수도 있다. 외부 환경에 따라 물 순환을 제어한다면 복잡한 단열을 하지 않더라도 방출되는 열을 막을 수 있을 것으로 보인다.

매시간 태양의 고도가 변하기 때문에 집광구를 투과된 빛이 수렴되는 초점 위치도 변하게 된다. 이러한 상황에서 2차 에너지 흡수가 원활하지 않게 된다. 태양의 위도에 따라 집광모듈의 각도를 자동으로 조절한다면 지속적인 2차 흡수가 유지되고 효율의 상승에 도움 될 것으로 보인다.

실험 결과 기대 이상의 효율이 계산되었다. 계산과정에서의 오류 또는 예상치 못한 조건이 있을 수 있다. 측정 과정에서 많은 데이터 수집이 필요하다. 이는 연구의 신뢰성을 높일 수 있는 기본적인 조건이다. 여건상 적은 횟수의 실험으로 결과에 대한 신뢰도를 높이기에는 무리가 있다. 계절과 월별로 실험을 진행하여 많은 데이터를 수집한다면 집광모듈의 온수기로서의 효율성에 대한 신뢰도를 상당히 높일 수 있을 것으로 기대된다.

## VI. 참고문헌

- 1) 기하광학 / 이 원진 [외 저].수문사, 2000
- 2) 빛의 반사에 관한 고등학생들의 개념조사 =A Survey on High School Students' Conception of Reflection in a Mirror /도 진경, 경남대학교 교육대학원,2010
- 3) 물리학/ 물리학교재연구회 역, 광림사, 1999
- 4) 대학물리학/ 대학물리학편집위원, (주)도서출판 북스 힐, 2020.
- 5) 공준형 외 6, “반사·굴절 광학계를 이용한 빛 에너지 수렴장치의 제작과 활용”, 창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*), Vol. 14 (2016), 경남대학교 과학 영재교육원.
- 6) 김찬형 외 3 “광섬유를 활용한 친환경 조명장치의 제작과 활용”창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*),Vol 16. (2018), 경남대학교 과학영재교육원.
- 7) 김승현 외 3 “태양광의 복합적인 활용에 의한 온수장치의 제작과 효율에 관한 연구” 창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*). Vol 17. (2019), 경남대학교 과학영재교육원.
- 8) 구동은 외 4 “광학기반 다초점 태양열 온수기의 제작과 물 순환 제어에 따른 효율”창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*), Vol. 19 (2021), 경남대학교 과학영재교육원.
- 9) 김정현 외 3 “광학기반 밀폐형 집열 온수기의 제작과 자동 순환 제어에 따른 효율” 창의와 사사(*Journal of Creativity and Mentorship*), Vol 20. (2022), 경남대학교 과학영재교육원.
- 10) <http://www.geogebra.org/>
- 11) <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1066058&cid=40942&categoryId=32236>
- 12) <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1066065&cid=40942&categoryId=32238>
- 13) <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=786327&cid=42431&categoryId=42431>
- 14) [http://physica.gsnu.ac.kr/physedu/modexp/n\\_measure/main.htm](http://physica.gsnu.ac.kr/physedu/modexp/n_measure/main.htm)



물리B

06\_ZnS 형광체를 이용한 고효율 발광 특성에  
관한 연구



# ZnS 형광체를 이용한 고효율 발광 특성에 관한 연구

강운곤 (월계중학교 3학년)

김희석 (운리중학교 3학년)

박정우 (수완하나중학교 3학년)

지도교수 : 김하술 (전남대학교 물리학과)

## 초록

최근 에너지 절감형 디스플레이에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 반도체의 기본 성질을 이해하고, 쉬운방법으로 발광하는 소자를 만들어 보는 것이다. 이 논문의 목적은 전도성 투명 탄성 기판을 제작하여 효율적인 반도체를 제작하는 것이다. 결과는 ZnS와 PDMS의 배합비가 7:3 이었을 때 가장 높은 효율을 내었다. 또 ZnS:(Cu,Al)과 ZnS:(Cu)의 비율을 바꿔가면서 측정했을 때 ZnS:(Cu,Al)의 빛의 세기기가 더 강하게 나왔다. 또한 배합 비율과 입력 주파수에 따른 CIE 좌표계에서 발광 소자의 좌표값이 다르게 나타나는 것이 관측 되었다.

## I. 서론

요즘 사회는 4차 산업혁명 기술들을 통한 발전으로 다양한 편리함을 추구하게 되었다. 하지만 4차 산업혁명 기술들로 인해 탄소배출이 높아져서 지구온난화는 가속화되었다. 그래서 탄소 중립을 위한 에너지 사용의 고효율성이 대두되고 있다. 에너지 사용의 고효율성으로 인해서, 높은 전력 효율을 가지는 디스플레이 소자 연구는 갈수록 중요해지고 있다. 그래서 우리 연구팀은 이를 파악해서, 현재 우리 사회에 필요성을 충족시키는 발광 소자에 대해서 연구하게 되었다. 일반적으로 발광 소자는 일반적으로 ZnS(황화아연)를 이용하여 제조되고 있다. ZnS를 소재로 한 고효율의 EL(Electronic Luminance) 소자를 만들어 활용하면 EL 디스플레이는 전력 소비는 더 적으면서 더 밝고 선명한 이미지를 표현할 수 있다. 따라서 이번 연구에서는 ZnS와 PDMS(유기규소화합물)를 배합한 후 기판을 제작하여 발광 특성을 분석하고자 한다.

## II. 이론적 배경

도체란 다른 말로 전도체이며, 전기나 열에 대한 저항이 매우 작아 전기나 열을 잘 전달하는 물체이다. 반도체는 원자가 전자가 4개인 Si(실리콘)에 무엇을 도핑(인위적으로 불순물을 첨가, doping)하는지에 따라 p형 반도체와 n형 반도체로 분류할 수 있다. p형 반도체는 붕소(B), 갈륨(Ga), 알루미늄(Al)과 같이 원자가 전자가 3개인 물질을 첨가하면 상대적으로 양공(hole)의 수가 많아져서 형성되고, n형 반도체는 인(P), 납(Pb), 비소(As), 안티몬(Sb)과 같이 원자가 전자가 5개인 물질을 첨가하

면 상대적으로 전자의 수가 많아져서 만들어진다. 부도체는 다른 말로 절연체이며, 전기나 열이 통하기 어려운 물질이다.

공유결합이란 두 원자가 안정적인 전자 배치를 이루기 위해 전자쌍을 공유하는 결합이며 (비금속) + (비금속), (비금속) + (준금속) 사이에서 이루어진다. 이들은 분자 내 원자 사이의 결합이 강하며, 상온에서 고체, 액체 또는 기체의 형태로 존재하며 전기전도도가 매우 낮다. 또한 공유한 전자쌍을 포함할 때 옥텟 규칙(듀엣 규칙)을 만족시킨다.

초전도체란 특정 온도 아래에서 전기저항이 사라지는 물질로, 현재 많은 관심을 받고 있다. 상온 초전도체가 개발되면 전력 전송, 에너지 저장 분야에서 천문학적인 효율과 이득을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

국제 조명 위원회(CIE)가 제정한 측색 시스템으로 빛의 3원색에 의해 만들어지는 이론상의 모델이다. 주로 과학기술상의 목적으로 사용되며, 빛의 3원색인 R(적)/G(녹)/B(청)를 X/Y/Z의 양으로 나타낸다. 이 중에서 X와 Y를 각각 X축, Y축으로 하여 도표로 만든 것이 색도도이다. X,Y,Z 색 공간(혹은 CIE 1931 색 공간)은 인간의 색채 인지에 대한 연구를 바탕으로 수학적으로 정의된 최초의 색 공간 가운데 하나이다.

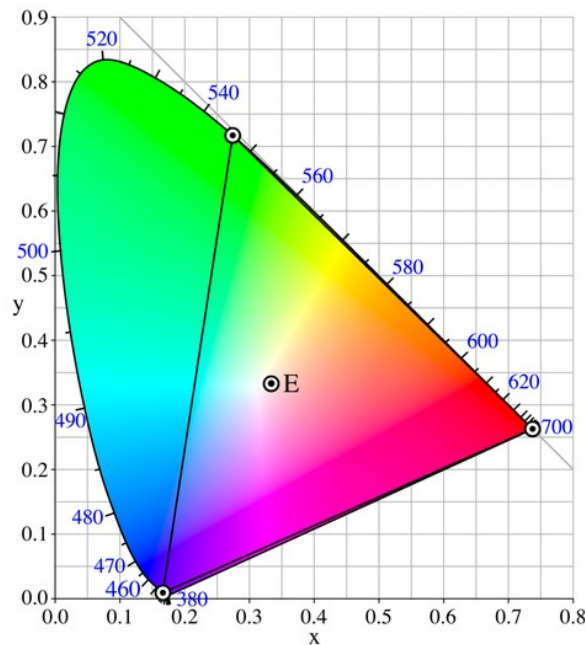


그림1 CIE 1931 색 공간의 색도분포표 외곽의 곡선 모양 경계선은 단색광에 해당하며, 각각의 단색광의 파장이 나노미터로 표시되어 있다. 여기에 표시된 색깔은 현재 보고 있는 색 표시 장치의 색 공간에 따라 조금씩 다르다는 것에 주의해야한다. 현재까지 만들어진 어떤 장비도 이 도표에 해당하는 모든 색을 정확하게 표현할 수는 없다. 출처: [https://ko.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_%EC%83%89\\_%EA%B3%B5%EA%B0%84](https://ko.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_%EC%83%89_%EA%B3%B5%EA%B0%84)







파장(nm)	색깔	
380~420	보라	
420~450	남빛	
450~490	파랑	
490~570	초록	
570~590	노랑	
590~630	주황	
630~750	빨강	

표1 색깔에 따른 파장의 길이 주파수와 파장은 서로 역수 관계 즉, 반비례 관계에 있다.

인간의 눈으로 볼 수 있는 광선으로, 파장 범위는 380 ~ 780nm이다. 380nm 이하의 파장을 자외선, 780nm 이상의 파장을 적외선으로 분류한다.

전파, 광, 음의 발생점과 이것을 관측하는 관측점의 어느 한 지점 또는 양쪽 지점이 이동함에 따라 전파 거리가 변화될 경우, 측정되는 주파수가 변화하는 현상. 발생점과 관측점이 가까워질 때는 주파수가 높아지고, 멀어질 때는 주파수가 낮아진다. 적색편이는 물체가 내는 빛의 파장이 늘어나 보이는 현상이다. 이는 일반적으로 전자기파의 가시광선 영역에서, 파장이 길수록 즉, 진동수가 작을수록 붉게 보이기 때문에, 물체의 스펙트럼이 붉은색 쪽으로 치우치기 때문이다. 청색편이는 별이 가까워질 때 나오는 빛의 파장이 짧아지는 도플러 효과에 의해 파장에서 빛의 중심이 짧은 청색 방향으로 약간 이동하는 효과이다.

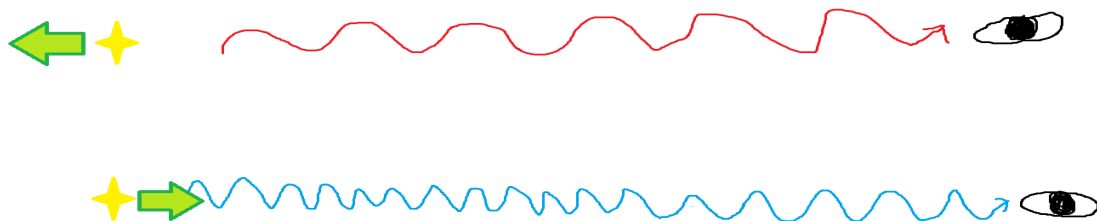


그림2 도플러 효과에 의한 적색편이와 청색편이.

### III. 연구 방법

#### 실험 1 : 청색편이와 적색편이 관찰하기

실험 준비물로는 아두이노 보드, 액체 질소(-200℃), LED, 장갑이 있다.

1. 아두이노 보드를 코딩하여 2.5V로 고정한다.
2. 아두이노 보드 output에 LED와 연결한 후 색을 관찰한다.
3. 장갑을 착용하고 LED를 액체 질소 안에 넣는다.
4. 액체 질소에 들어간 LED가 청색편이 효과를 보이는지 확인한다.
5. LED를 액체 질소 밖으로 꺼냈을 때 적색편이가 보이는지 확인한다.

아래 그림3 (a)와 \과 같이 에너지 밴드갭은 전도대의 최소 에너지 값과 가전자대의 최대 에너지의 차이이다.

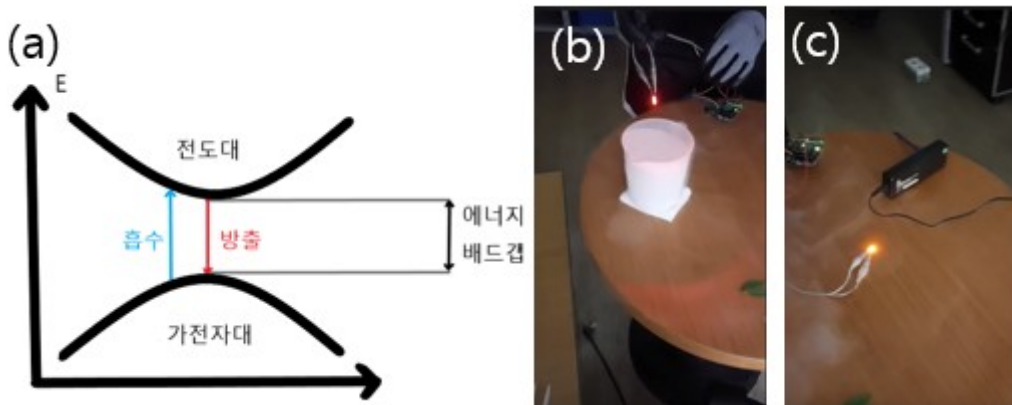


그림3 (a) 가전자대와 전도대 사이 에너지차이는 에너지 밴드갭 이라고 불린다. 반도체의 밴드갭에 해당되는 파장을 관측 하게된다. 실험1을 수행하는 모습. 그림 (b)는 액화 질소에 LED 소자를 액화 질소에 넣기 전에 찍은 사진, 빨강 계통의 빛을 보여 주고 있다. (c)는 액화 질소에 넣은 후 바로 빼어 내었을 때 촬영한 것으로, 반도체의 온도에 따라서 발광되는 파장이 (b)보다 짧은 쪽으로 이동 하였음을 알수 있다.

그림 위 실험에서 청색편이가 나타난 이유는 온도가 내려갈 때, 반도체 소자의 에너지 밴드갭이 줄어들어 더 작 밴드갭이 형성 되기 때문에 파장이 짧아진 것이 관측 되었다. 반대로 온도가 올라갈 때 에너지 밴드갭이 줄어들어 적색 편이나 나타 났다. 즉 온도에 따라서 반도체 소자의 발광색깔이 다름을 알 수 있었으며, 이는 소자의 온도에 따라서 발광색의 적색 편이와 또는 청색 편이가 관측 되었다.

## 실험 2 : 모의 반도체 만들기

실험 준비물로는 흰색의 ZnS 혼합물, 초록색의 ZnS 혼합물, PDMS, 경화제, 도전성 유리, 스포이드, 티스푼, 전자저울, 장갑, 전자 오븐, 에탄올, 아세톤, 멀티미터, 플라스틱 트레이, 슬라이스 유리, 교류전압기가 있다.

실험 과정은

1. 전자저울에 플라스틱 트레이를 올리고 영점을 맞춘다.
2. 도전성 유리를 에탄올과 아세톤으로 세척한다.
3. 멀티미터로 도전성 유리의 전극을 확인한다.
4. 전자저울로 ZnS Cu 혼합물, PDMS, 경화제 각각의 무게를 잰 다음, 플라스틱 숟가락으로 걸쭉해질 때까지, 약 10분간 젓는다.
5. 전류가 흐르는 도전성 유리의 윗면 절반에 과정 1 - 4의 혼합물을 올린 후, 슬라이스 유리로 얇게 펴내고 그 위에 다른 도전성 유리의 전류가 흐르는 면이 닿도록 놓는다.
6. 전자 오븐의 온도를 설정하고 그 위에 과정 1 - 5의 결과물을 일정 시간 올려놓는다.
7. 교류전압기의 전선 두 개에 과정 1 - 6의 결과물을 연결하여 전류를 흐르게 한 후, 색이 잘 들어오는지 확인한다.  
와 같다.

이와 같은 과정으로

- 1, 흰색의 ZnS 혼합물 : PDMS : 경화제 비율을 27 : 9 : 1
- 2, 흰색의 ZnS 혼합물 : 초록색의 ZnS 혼합물 : PDMS : 경화제의 비율을  
15 : 45 : 18 : 2 (첫번째 샘플)  
15 : 15 : 9 : 1 (두번째 샘플)  
45 : 15 : 18 : 2 (세번째 샘플)
3. 초록색의 ZnS 혼합물 : PDMS : 경화제의 비율을 27 : 9 : 1  
로 하여 각각 실험한다.[3]



(그림4) 실험2를 수행하는 모습.

#### IV. 연구 결과

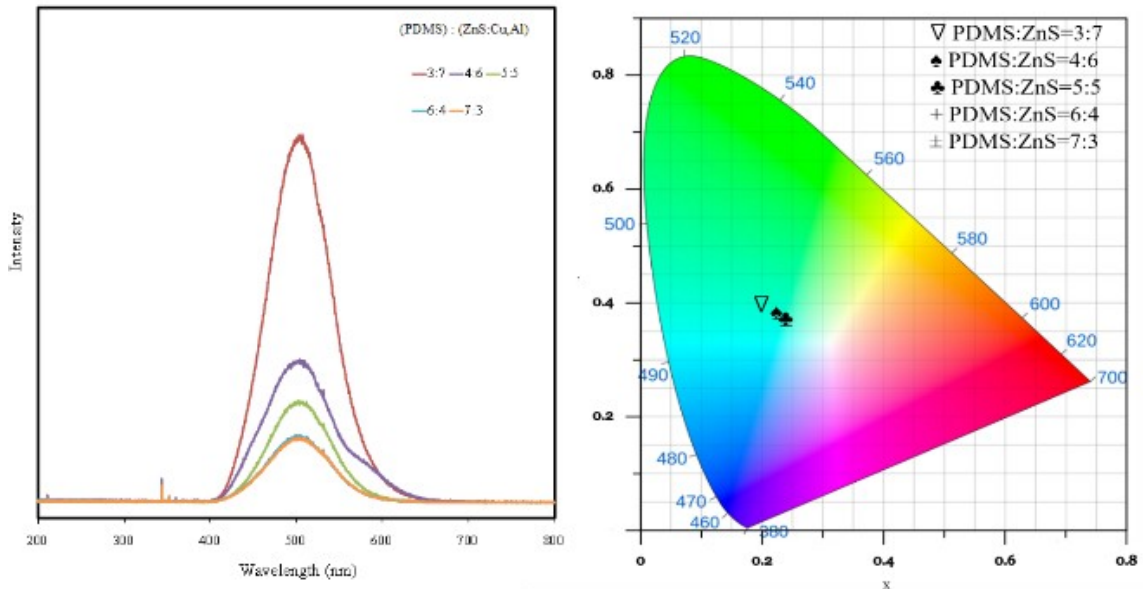


그림 5 (a) PDMS와 ZnS의 배합비에 따른 밝기 그래프(좌), (b) PDMS와 ZnS의 배합비에 따른 색좌표 그래프(우).

1. 200V와 400Hz에서 전도성 투명 탄성 기관의 ZnS 와 PDMS의 비율을 7:3으로 하였을 때 내구성이 적당하였으며 밝기도 나머지에 비해 가장 밝았다(ZnS:PDMS이 6:4 이었을 때보다 약 2.425배 밝음). 또한 PDMS의 배합비가 올라갈수록 색좌표가 오른쪽으로 이동했다.

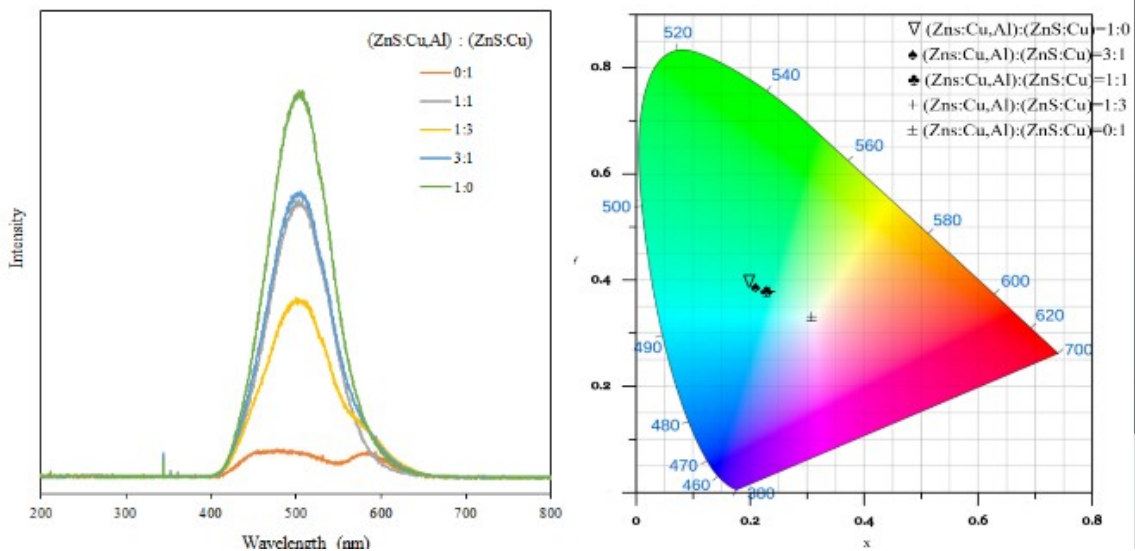
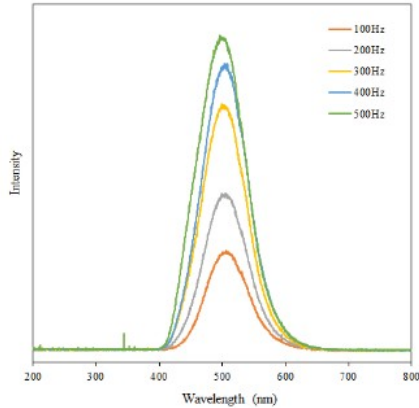


그림6 (a) ZnS:(Cu,Al)과 ZnS:(Cu)의 비율에 따른 빛의 세기 (좌), (b) ZnS:(Cu,Al)과 ZnS:(Cu)의 비율에 따른 색좌표(우).

2. 200V와 400Hz에서 전도성 투명 탄성 기판(ZnS:PDMS = 7:3)에 ZnS(:Cu,Al)과 ZnS(:Cu)의 비율을 바꾸어 가면서 빛에 세기를 관찰 하였을 때 ZnS(:Cu,Al)의 빛의 세기기가 더 강하게 나왔으며 530nm~550nm에서 최대값을 형성 하였다. 또한 ZnS(:Cu)의 배합비가 올라갈수록 색좌표가 오른쪽으로 이동 하였다.



3. 200V에서 전도성 투명 탄성 기판(ZnS:PDMS = 7:3)에 진동수 변화를 주었을 때 진동수 변화와 상관없이 그래프의 최대값이 나온 위치는 거의 일치하였다. 그래프의 최대값이 나타나는 파장의 변화가 거의 없었으나, 100 Hz에서 500 Hz로 교류 진동수를 인가하였을 때, 최대 밝기의 변화가 밝아지는 것으로 나타났다. 이는 인가된 AC 교류의 전압 크기가 커짐에 따라서 반도체 소자의 내부의 급격한 전기장의 변화에 따라서 전자의 가속 에너지 변화에 따라서 나타나는 것으로 판단된다.

그림7 진동수에 따른 빛의 세기.

## V. 결론 및 제언

구리 (Cu )와 알루미늄 (Al)이 도핑된 ZnS (황화아연)과 PDMS (유기규소화합물)을 이용하여 전도성 투명 탄성 기판을 제작하고 광원이나 디스플레이에 응용하기 위한 특성에 대해 분석하였다. 그결과 ZnS(:Cu)보다 ZnS(:Cu,Al)의 빛의 세기가 9.025배 크게 나타났으며, 초록 - 파랑 빛을 냈다. 또 ZnS(:Cu, Al)와 PDMS의 배합 비율은 7 : 3일 때 빛의 세기가 가장 크게 나타났으며 주파수가 높아질수록 빛의 세기가 커졌다. ZnS(:Cu, Al)의 EL(Electronic Luminance) spectrum을 측정 한 결과 530nm, 550nm 사이에서 최대값을 형성 하였다. 우리에게 추후 시간이 더 주어진다면, ML(mechanical luminance)로 실험을 진행하고 싶다. 효율성과 내구도를 동시에 고려한 기판 제작도 해 보고 싶다.

## VI. 참고문헌

- [1] Agbo, P. E., P. A. Nwofe, and L. O. Odo. "ANALYSIS ON ENERGY BANDGAP OF ZINC SULPHIDE (ZnS) THIN FILMS GROWN BY SOLUTION GROWTH TECHNIQUE." Chalcogenide Letters 14.8 (2017).
- [2] Wen, Li, et al. "Enhancing light emission in flexible AC electroluminescent devices by tetrapod-like zinc oxide whiskers." Optics Express 24.20 (2016): 23419-23428
- [3] Kim, Taehun, and Ha Sul Kim. "Color Change in Mixed Zinc Sulfide Composite Displays due to a Biased AC Electric Field." (2023): 658-663.



물리B

07\_재사용 가능한 산염기 구별 빌베리 염색 천  
개발 및 산도 정량 분석이 가능한 빌베리 태양전지 개발



# 재사용 가능한 산/염기 구별 빌베리 염색 천 개발 및 산도 정량 분석이 가능한 빌베리 태양전지 개발

김미송 (내곡초등학교 6학년)  
김승제 (대우초등학교 6학년)  
박시윤 (갈전초등학교 6학년)  
정윤성 (장재초등학교 6학년)  
정재석 (풍화초등학교 6학년)

지도교수 : 공재민 (경상국립대학교 물리학과)

초록: 안토시아닌은 색을 띠는 대부분의 과일에 포함되어 있는 색소 분자이다. 본 연구에서는 빌베리의 안토시아닌을 염료로 면 보자기(천)에 염색하여 지속 가능한, 재활용 가능한 산/염기 구분 방법을 제안하였다. 빌베리가 염색된 천은 처음에 보라색을 띠었고, 산과 반응했을 때 붉은색을, 염기와 반응했을 때 녹색을 띠게 되었다. 또한, 산 또는 염기와 반응이 완료된 염색천은 반대로 염기 또는 산에 노출시키면 붉은색 천은 녹색으로, 녹색 천은 붉은색으로 색이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 가역(reversible) 반응은 최소 10번 이상 반복 가능하였고, 천에서 색이 완전히 빠지기 전까지 지속적인 사용이 가능함을 확인할 수 있었다. 빌베리를 천이 아닌 염료감응형 태양전지에 염색하였을 경우, 태양전지의 전압이 산성/염기성에 따라 크게 변하는 것도 관찰되었다. 초기 염색된 태양전지는 200 mV 정도의 전압을 나타내었지만, 산(pH 2)에 노출된 태양전지는 300 mV, 염기(pH 12)에 노출된 태양전지는 100 mV로 태양전지의 전압이 pH에 따라 크게 변화하였다. 이러한 변화 관계는 전압 = 350 - 20 pH의 1차식을 따르고 있기 때문에, 향후 미지 물질의 정량적 pH 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## I. 서론

현대인이라면 한번쯤은 “지속 가능한 발전 (Sustainable development)”이란 말을 들어봤을 것이다. “지속 가능한 발전”이란 인류가 지구의 환경과 사회의 안정을 우선적으로 도모하면서 경제 성장을 해 나가는 것을 의미하며, 우리 인류 후세 뿐 아니라 지구에 살고 있는 여러 동물들에 대해서도 책임 있는 행동을 요구하는 일종의 전지구적 운동(movement)이자 암묵적 약속이다. 현재, 지구의 온도는 산업화 이전 대비 크게 상승해 폭염, 한파 등의 자연 재해는 물론 새로운 질병이나 바이러스의 출몰에도 직간접적인 원인이 되고 있다. 올해 11월 두바이에서 열린 제28차 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국 총회(COP28)에서 전 세계 200여 개 국가 정상들은 지구 온난화의 가속화를 막기 위한 다양한 방안들을 논의하고, 화석연료 사용 제한, 재생에너지 확대 및 탄소중립을 위한 여러 기준들을 결정하였다. 더불어 이산화탄소를 흡수하고 산소를 배출하는 숲을 조성하고, 종이나 일회용 플라스틱 사용을 줄이는 것 역시 탄소배출량을 줄이고 지구에서 공존하는 다른 생물들에 대한 생존권

을 배려하는 책임 있는 행동으로 지속 가능한 발전에 기여할 수 있을 것이다. 경상국립대학교 과학영재교육원 물리 사사과정을 통해, 우리는 일상생활에서 일회용 제품의 사용을 줄이고 친환경적인 방법으로 탄소배출량을 줄일 수 있는 방법들을 고민하였다. 본 연구에서 우리는 일회용 종이의 사용을 줄이고 주변에서 쉽게 구할 수 있는 친환경적인 재료를 이용해서 기존에 사용 중인 일회용 리트머스 종이를 대체해 보기로 하였다. 우리는 기존의 종이 대신 빨아서 여러 번 사용할 수 있는 (지속가능한) 면 보자기(천)에 친환경적인 빌베리를 염색하여 리트머스 종이를 대신하였다. 빌베리에 포함된 안토시아닌은 산에서는 붉은색, 염기에서는 녹색을 띠게 된다. 빌베리로 염색된 천은 보라색을 띠었고, 산성도가 높은 물질과 만날 때 더욱 붉은 색을 띠고, 염기성이 높은 물질과 만났을 때 더 진한 녹색을 띠었다. 흥미로운 점은 산 또는 염기와 반응해 색이 변한 천도 반대로 염기 또는 산을 뿌려주면 역으로 색이 해당 물질의 산성도/염기도에 따라 색이 변한다는 것이다. 최소 10번 이상 재사용이 가능하였고, 염색 천의 색이 완전히 빠지기 전까지 계속 사용할 수 있는 것을 확인하였다. 더욱 흥미로운 점은 산/염기에 따라 색이 변한 안토시아닌은 염료감응형 태양전지에서 크게 다른 전압을 보였다. 중성의 안토시아닌(보라색)의 경우 200 mV의 전압을 보인 반면, 산과 반응한 안토시아닌(붉은색)의 경우 300 mV의 높은 전압을 나타내었고, 염기와 반응한 안토시아닌(녹색)의 경우 100 mV 정도의 낮은 전압을 보였다. 그리고 이를 표로 그려봤을 때 pH와 전압의 선형적인 관계(전압 = 350 - 20 pH)를 도출할 수 있었다. 결론적으로, 우리는 친환경적인 빌베리 추출물의 천 염색을 통해 재사용 가능한 산 염기 구분 방식을 제안하였고, 빌베리 추출물의 태양전지 염색을 통해 좀 더 정확히 pH를 예측할 수 있는 수식을 도출하였다.

## II. 이론적 배경

### 1) 안토시아닌

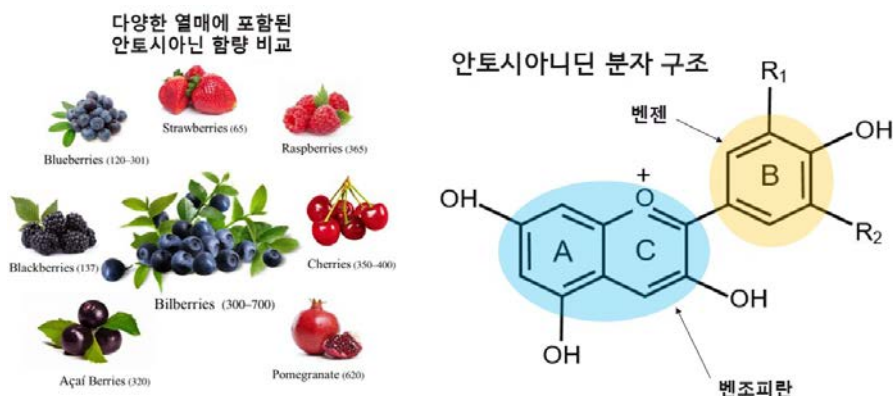


그림 1. 안토시아닌이 포함된 열매들(왼쪽)과 안토시아닌 기본 분자구조 (오른쪽).

안토시아닌은 다양한 열매에 포함되어 있는 만큼 다양한 종류의 형태가 있다. 이리

한 안토시아닌들은 기본적으로 벤조피란과 벤젠고리를 포함한 단순한 분자구조를 띠고 있다(그림 1).[1] 안토시아닌 분자들이 색을 띠는 기본적인 원인이 바로 이 공명구조를 가지고 있는 벤조피란이나 벤젠고리에 기인한다. 이러한 기본 구조에서 다양한 곁가지(-R1, -R2, -OH 등)이 붙거나 변하면서 다양한 안토시아닌으로 표현되며 과일마다 다양한 색을 띠게 된다. 과일의 색은 각 과일이 가지고 있는 안토시아닌의 구조에 따라 달라지지만, 산/염기 정도에 따라서도 변화할 수 있다. 이는 과일이 익을수록 검붉은 색을 띠는 것으로 이해해 볼 수 있다. 우리는 경험적으로 덜 익은 과일의 색이 붉고, 이들의 맛이 시다는 것을 알고 있다. 이는 덜익은 과일이 산성을 더 많이 띠고 있고, 이에 따라 과일 내의 안토시아닌이 산성과 반응해서 붉은 색을 띠게 될 수 있다는 것을 추측해 볼 수 있다.

산성은 띠는 것은 그 물질이 수소이온( $H^+$ )을 얼마나 더 많이 내 놓느냐 또는 거꾸로 말해 수산이온( $OH^-$ )을 덜 내놓느냐에 따라 결정된다. 소위 산도는 pH로 표현을 하는데, 이를 간단히 수식으로 표현하면, 아래와 같다.

$$pH = -\log[H^+] \quad (\text{식 1})$$

여기서 pH는 산성의 정도를 표현하며, 숫자가 작을수록 높은 산도를 나타내고, 숫자가 커질수록 낮은 산도(또는 높은 염기도)을 나타낸다. 식 1의  $[H^+]$ 는 수소이온의 몰농도(molarity)를 나타내고, log는 10을 밑으로 하는 로그함수이다. 로그함수의 특성은 밑의 크기의 제곱 수 1만큼 커졌을 때 1씩 커지고, 제곱 수 1만큼 작아지면 1씩 작아진다. 예를 들어, 100은  $10^2$ 으로 표현되고 10의 지수가 2이므로  $\log 100$ 은 2가 된다. 그리고  $1/100$ 을 지수형태로 표현하면  $10^{-2}$ 이므로  $\log 10^{-2}$ 은 -2이 된다. 위 식에서 log 앞에 -가 붙었으므로, pH는 2가 된다. 따라서 위 식을 해석하면, 수소이온의 농도가 높을수록 pH는 낮아지고, 수소이온 농도가 낮을수록 pH는 높아지게 된다.

수소이온 농도가 높은 환경에 안토시아닌 분자들이 놓이게 되면 수소이온들이 안토시아닌 분자에 붙어 공명구조의 전자구조를 변경시킨다. 그리고 수소이온의 농도가 낮은 환경에서는 반대로 가지고 있던 수소이온들을 내놓거나 수산이온 등과 같은 전자를 공여하거나 공유할 수 있는 이온들과 반응하여 공명 구조의 전자구조를 변경시킨다. 간단하게 설명하자면, 전자를 뺏는 수소이온들이 안토시아닌 분자에 붙으면, 공명구조의 전자를 뺏기거나 수소이온들과 공유해야 하게 되고, 이 뺏긴 에너지만큼 더 큰 에너지(빛 에너지 등)가 들어와야 분자가 반응을 할 수 있게 된다. 반대로 주변에 수소이온 농도가 낮아 안토시아닌에 붙었던 수소이온이 떨어져 나가거나 수산이온과 같이 전자를 주거나 공유할 수 있는 분자들이 붙으면 공명구조는 그만큼 더 에너지를 얻게 되어 더 낮은 에너지가 들어와도 분자가 반응할 수 있게 된다. 물질이 색을 띠는 것은 그 물질에 흡수하지 못한 색을 반대로 우리 눈이 검출하는 것이다. 그래서 물질이 높은 에너지의 빛을 흡수하게 되면, 낮은 에너지의

색을 띠게 되고, 낮은 에너지의 빛을 흡수하게 되면, 높은 에너지의 색을 띠게 된다. 다시 말해, 예를 들어, 수소이온에 안토시아닌 분자의 공명구조가 변하여 외부의 높은 에너지에만 반응하게 되면, 녹색(550 nm)과 같은 높은 에너지를 흡수하여 낮은 에너지 빛인 붉은색(650 nm)을 띠게 된다. 반대로 안토시아닌 분자에 수소이온이 떨어져나가거나 수산화 이온이 붙어 공명구조에 변화가 생기면, 낮은 에너지에도 안토시아닌이 반응할 수 있게 된다. 따라서 낮은 에너지인 붉은색을 흡수하게 되어 안토시아닌 분자는 높은 에너지 색인 녹색을 띠게 된다.

## 2) 염료감응형 태양전지

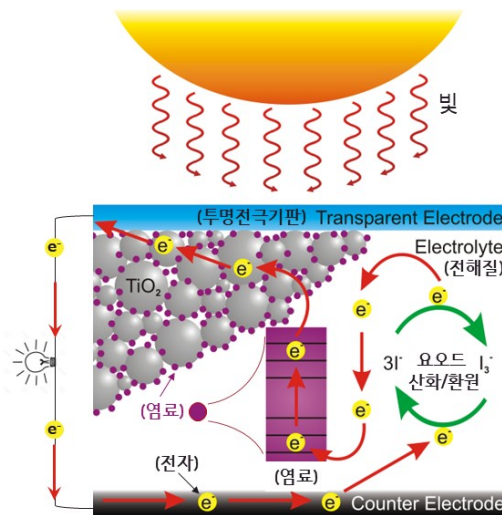


그림 2. 염료감응형 태양전지 구조 및 전기 변환 원리 모식도[2]

염료감응형 태양전지는 염료를 통해 빛을 흡수, 그 흡수된 빛을 전기로 변환하는 장치이다. 그림 2는 염료감응형 태양전지의 구조와 작동원리를 보여주고 있다. 빛이 투명전극(음극)을 통해 태양전지 내부로 들어가게 되면, 티타늄산화물 표면의 염료가 그 빛을 흡수하고, 흡수된 빛은 전기로 변환된다. 이 과정에서 전자는 티타늄산화물을 통해 음극으로 전달되고, 음극에 전달된 전자는 외부 도선을 따라 양극으로 이동된다. 이동된 전자는 요오드 이온으로 전달되고, 전자를 받은 요오드 이온은 받은 전자를 염료에 전달함으로써 전류 순환의 과정을 완료하게 된다. 빛을 흡수한 염료에서 발생한 전자의 순환과정을 통해 우리는 전구에 불을 켜거나 휴대폰을 충전할 수 있게 된다.

일반적으로 염료감응형 태양전지는 크게 광활성층, 음극, 양극, 그리고 전해질로 이루어져 있다. 기본적으로 광활성층은 빛을 흡수하는 물질로 이루어져 있다. 보통 가시광선 영역 대의 빛을 흡수할 수 있는 염료 물질을 사용한다. 음극은 보통 두 층을 포함하는데, 빛을 태양전지 내부로 받아들이는 투명전극과 빛을 흡수한 염료에서 발생한 높은 에너지 상태의 전자를 넘겨받는 산화물로 이루어진다. 이에 반해,

양극층은 회로를 통해 전달된 전자를 요오드 전해질로 넘겨주는 역할을 한다. 요오드 전해질은 양극층에서 전자를 받아 다시 염료에 전달하는 역할을 하게 되고, 이로써 염료는 빼앗겼던 전자를 되찾아 중성이 되고, 전자 순환의 사이클을 완성하게 된다. 빛이 태양전지에 조사되는 동안 이러한 순환 과정은 계속 되고 이를 통해 발생한 전자의 흐름(전류)을 우리는 전기에너지로 활용한다.

### III. 연구방법

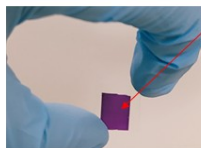
팀별 분업 및 협업을 통해 연구를 진행하였다. 염료준비 및 pH테스트 팀은 빌베리 용액 준비 및 염색 테스트 등을 진행하였다(그림 3).



그림 3. 준비된 빌베리 용액 (왼쪽), 빌베리가 염색된 천에 산/염기를 테스트한 결과(오른쪽)

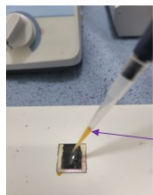
태양전지 제작 팀은 준비된 용액 등을 활용하여 태양전지 제작 및 분석을 실시하였다. 아래 사진은 태양전지 제작의 전반적인 모습을 보여준다(그림4).

#### 음극 (TiO<sub>2</sub> 투명전극)



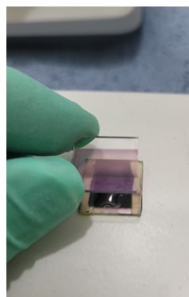
안토시아닌이 염색된 TiO<sub>2</sub>

#### 양극 (탄소전극)



요오드 전해액 도포

결합



고정



측정

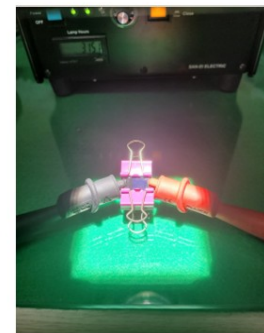


그림 4. 태양전지 제작 및 평가 과정

#### IV. 실험과정

##### 1) 빌베리 용액 준비

Jarrow사의 빌베리(Bilberry, 36 g)를 아이허브(iHurb)를 통해 인터넷 구매하였다. 캡슐 하나에 들어있는 빌베리 가루의 평균 무게는 280 mg이며, 캡슐 당 빌베리 함량은 80 mg이다. 80 mg의 빌베리 가루 중 약 25%(20 mg)에 안토시아니딘 성분이 포함되어 있다. 비이커를 준비한 후 각 비이커에 자석 바와 두 캡슐 분량의 가루(560 mg)를 투입한다. 비이커에 5 mL의 초순수 물을 각각 넣고 10분간 스티러를 통해 혼합한다. 가루가 녹는 동안 용액의 온도는 50도로 유지한다. 빌베리 가루를 녹인 용액은 거름종이에 걸러 녹은 부분만 수집한다. 거름종이에 걸러진 용액은 뚜껑이 있는 유리병에 담아 사용 전까지 데시케이터에 보관한다.

##### 2) 면 보자기 염색

준비된 빌베리 용액을 면 보자기에 염색한다. 염색 전 면 보자기를 깨끗한 물에 3회 이상 헹구준다. 이 과정을 통해 면 보자기에 묻어있는 불순물이나 면 보자기 후처리 과정에서 묻어 있을 수 있는 화학약품들이 제거된다. 헹굼 과정 이후 물기를 제거한 후 준비된 빌베리 용액에 담근다. 충분한 염색이 될 수 있도록, 천을 30분 이상 담근다. 이후 천을 꺼내 흐르는 물에 3번 헹구준다. 3회 헹굼 이후 더 이상 빌베리가 나오지 않으면 물기를 제거한 후 건조시켜준다.

##### 3) 산/염기 테스트

시중에 파는 식초를 희석하여, pH 2부터 pH 6의 산성용액을 준비한다. 그리고 pH 13짜리 KOH 수용액을 희석하여, pH 13부터 pH 8까지의 염기성 용액을 준비한다. 준비된 산, 염기 수용액을 빌베리가 염색된 천에 떨어뜨려 색변화를 관찰한다.

##### 4) 티타늄산화물층 형성 및 염색

매우 작은 크기의 티타늄산화물 ( $\text{TiO}_2$ ) 가루(평균 직경: 200 nm, 머리카락 두께의 1/500 수준)가 포함된 티타늄산화물 반죽(Greatcell Solar®,  $\text{TiO}_2$  paste, 10 g)을 Merck사로부터 구매하였다. 반죽 내 티타늄산화물 가루는 공개되지 않은 용매 및 유기물에 분산/혼합이 되어 있으며, 반죽의 점도는 물감 정도이다. 음극부로 사용될 투명전극(Indium Tin Oxide, ITO) 기판의 가장자리 세 면을 투명 테이프로 고정한 후, 점성을 가진 티타늄산화물 반죽을 기판 위에 펴 바른다. 모서리 부분이 평평한 금속판의 한 변 또는 칼날의 모서리 한 변을 반죽이 펴 발라진 기판 위에 밀착한 후 서서히 밀어내면, 테이프 두께(65  $\mu\text{m}$ )만큼의 반죽층을 형성할 수 있다. 테이프 제거 후, 얇은 반죽층이 형성된 투명전극 기판을 hot plate를 이용해 500도에서 30분 간 구워준다. 가열 온도를 변경해 가며, 티타늄산화물 반죽층의 색깔 변화 등을 관찰한다.

가열 후,  $\text{TiO}_2$  층이 형성된 기판을 얻을 수 있고, 이 기판을 앞서 준비한 빌베리 용

액에 담귀 염색을 실시한다. 기판을 준비된 용액에 5분 담근 후, 꺼내 에탄올 또는 초순수 물로 헹궈준다. 헹군 기판은 압축 질소를 불어 건조시킨다. 질소로 건조시킨 기판을 hot plate 위에서 온도를 변경해 가며 열처리 해준다. 열처리가 끝난 기판들은 글러브 박스에 보관한다.

### 5) 탄소전극층 형성

양극부로 사용될 투명전극 기판 표면에 RGO(reduced graphene oxide)를 스핀코터로 코팅한 후, 100도로 가열된 핫플레이트에 건조하였다. 외부 도선과의 연결을 원활하게하기 위해 RGO 기판의 가장자리 한 쪽을 플라스틱 등으로 굽어 투명전극을 노출시켜준다. 준비된 기판들은 글러브 박스에 보관한다.

### 6) 전해질 도포 및 태양전지 조립

요오드가 포함된 전해질(Iodine-Potassium iodide solution, Lugol solution, 100 mL)을 Merck사로부터 구매를 했다. 위 전해질을 앞서 준비한 GRO층(양극부)에 충분히 도포를 한다. 도포 후 1분간 대기한다. 한편, 빌베리로 염색된 TiO<sub>2</sub> 기판(음극부)을 데시케이터로부터 꺼내 기판의 가장자리 양쪽 면에 테이프를 붙인다. 이는 향후 양극과 음극을 접합할 때 테이프 두께만큼의 간격을 유지시켜 준다. 전해질이 도포된 양극부를 음극부와 맞게 접합한다. 접합 시 노출시킨 투명전극부가 보이도록 계단 형태로 어긋나게 양쪽 전극을 맞게 해준다. 접합 후, 집계를 이용해 고정한다.

### 7) 태양전지 성능 평가

Solar simulator (AM1.5G)를 이용해 100mW/cm<sup>2</sup>의 세기의 빛을 조립한 태양전지에 조사해 준다. 빛을 받아 형성된 개방 전압(Open-circuit voltage)과 단락 전류(Short-circuit current)는 멀티미터를 이용해 측정한다.

## V. 연구결과

### 1) 산, 염기에 따른 빌베리 염색 천의 색변화

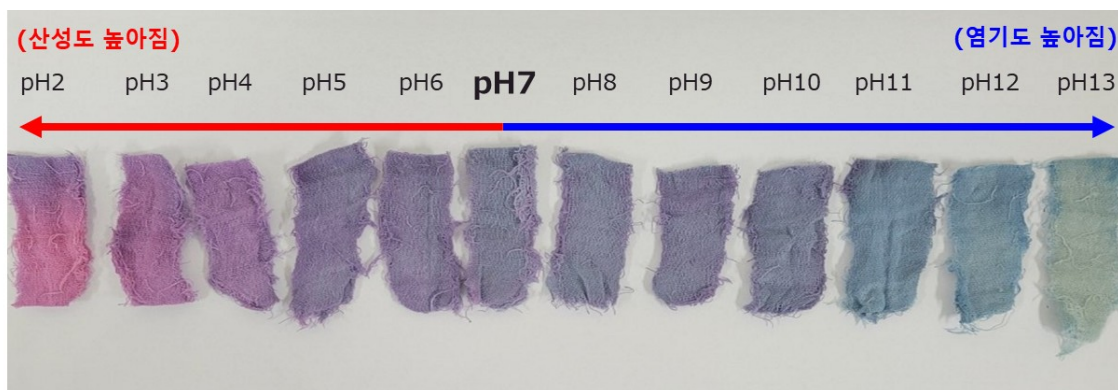


그림 5. 빌베리로 염색된 천의 색 변화

그림 5은 빌베리로 염색된 천의 색변화를 보여준다. 앞서 준비한 산(pH2-6), 염기 (pH 8-13)시약을 준비된 염색 천에 떨어뜨려주면, 산성도가 높아질수록 (pH가 낮아질수록) 붉은 색을 띠고, 염기도가 높아질수록 (pH가 높아질수록) 녹색을 띠는 것을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 안토시아닌 분자의 공명구조가 수소이온 또는 수산화이온과 반응하여 내부 전자구조가 변화했기 때문이다. 앞서 설명한 바와 같이, 물질이 색을 띠는 것은 그 물질이 흡수하지 못한 빛을 거꾸로 우리가 본다는 말이다. 다시 말해, 빨간색을 띠는 것은 빨간빛이 아닌 다른 색을 흡수하고 있고, 녹색을 띠는 것은 녹색이 아닌 다른 빛을 흡수하고 있다는 것이다. 특히, 보색을 흡수하게 되면 그 반대의 색이 우리 눈에 더 선명하게 보인다. (참고로, 빨간색 빛과 녹색 빛은 보색 관계이다.) 빛의 색은 에너지가 높아질수록 파장이 짧아지고 빨간색 빛보다 녹색 빛이 짧은 파장을 가지고 있다. 따라서 우리 눈에 빨간색으로 보이는 것은 보색에 해당하는 녹색 빛(높은 에너지)을 상대적으로 많이 흡수하고 있다는 말이고, 우리 눈에 녹색으로 보이는 것은 반대로 빨간 빛(낮은 에너지)을 상대적으로 많이 흡수하고 있다고 볼 수 있다. 안토시아닌 분자가 색을 띠는 것은 분자 내 공명구조를 가진 벤젠고리 등이 외부의 에너지(빛)을 흡수하기 때문이다. 공명 구조 내 자유롭게 움직일 수 있는 전자가 많으면 낮은 에너지를, 공명 구조 내 자유로운 전자가 적어지면 높은 에너지를 흡수하게 된다. 식초를 떨어뜨린 것과 같은, 양전하인 수소이온이 안토시아닌 분자 주변에 많아지게 되면, 수소이온이 분자에 붙어 안토시아닌 공명구조의 전자를 자유롭게 못하게 구속하게 되어 공명구조가 더 높은 에너지의 빛만을 흡수하게 만든다. 반대로 KOH 수용액을 떨어뜨린 것과 같이, 음전하인 수산화이온이 안토시아닌 분자 주변에 많아지게 되면, 안토시아닌 분자는 전자를 더 받거나 공명구조 내 전자의 자유도가 더 증가하게 되어 낮은 에너지의 빛을 흡수할 수 있게 된다. 결과적으로 주변 환경(수소이온 및 수산화이온 농도)의 변화에 따라 안토시아닌 공명구조의 전자구조가 변화하여, 다른 색을 띠게 된다.

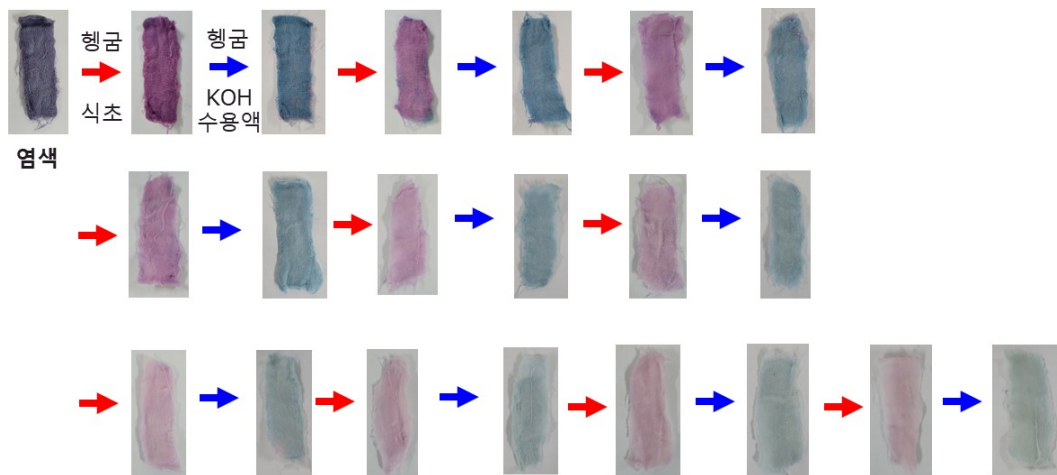


그림 6. 산/염기에 반응하는 염색 천

더욱 흥미로운 점은 염색 천이 산/염기에 가역적으로 반응한다는 점이다(그림 6). 빌베리로 염색된 천에 식초를 떨어뜨리면 염색 천은 붉은 색으로 변하게 된다. 이 붉은색 천을 헹군 후, KOH 수용액을 떨어뜨리면, 붉은색 염색 천은 녹색으로 변하게 된다. 다시 이 천을 물에 헹군 후, 식초를 떨어뜨리면, 다시 붉은 색을 색이 변하게 된다. 이러한 가역 반응은 10회 이상의 연속 테스트에서도 계속 발현되었다. 또한, 이러한 가역 반응은 빌베리가 염색천에서 완전히 빠질 때 까지 계속된다는 것을 관찰할 수 있었다. 현재는 10회 이상의 테스트와 헹굼에서 천에서 빌베리 염색이 빠지는 현상이 관찰이 되고 있다. 만일 천에 빌베리를 반영구적으로 염색하는 방법만 찾는다면, 상용 리트머스를 대체할 수 있는 재활용 가능한 산/염기 분별법을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

## 2) 산, 염기에 따른 태양전지의 전압 변화

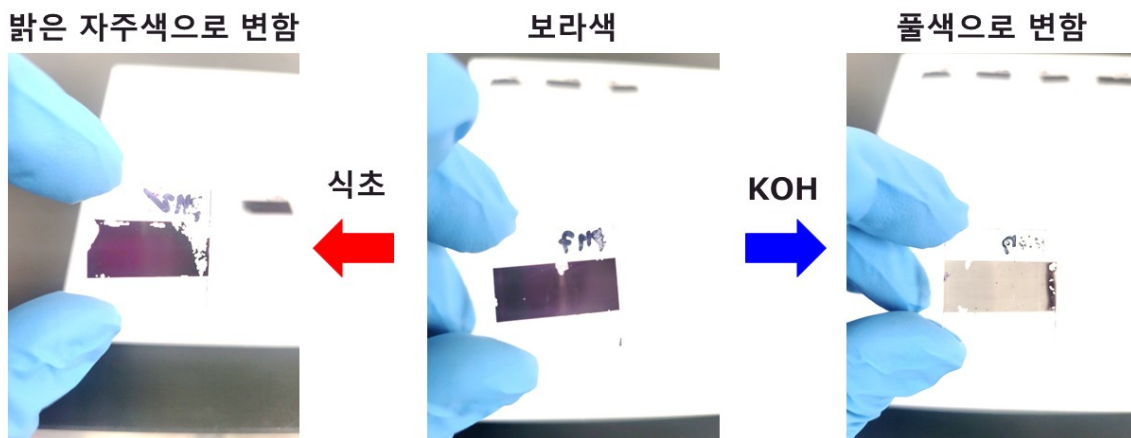


그림 7. 빌베리로 염색된 태양전지의 색변화

빌베리를 태양전지의 음극 ( $\text{TiO}_2$ )에 염색하면, 위 그림의 가운데 사진처럼 진한 보라색을 띤다(그림 7). 이에 식초를 처리해주면, 왼쪽 그림처럼 밝은 자주색으로 색이 변한다. 반대로 KOH 수용액을 처리해주면, 오른쪽 그림처럼 플색으로 변하는 것을 관찰할 수 있다. 앞서 천에 염색된 빌베리처럼 태양전지의 음극에 염색된 안토시아닌도 산과 염기에 의해서 색이 변한다는 것을 확인할 수 있었다(그림 7). 이렇게 산과 염기를 처리한 음극을 가지고 태양전지를 제작해보았다. 대조군으로 산, 염기를 처리하지 않은 것도 태양전지로 만들어 결과를 비교해 보았다.

그림 8은 산, 염기 처리에 따른 태양전지의 전압의 변화를 보여준다. 그림에서 중성으로 표시된 것은 산 또는 염기를 처리하지 않은 태양전지이고, 식초라고 표시된 것은 pH 2의 산성용액에 해당한다. 그리고 KOH라고 표시된 것은 pH 13에 해당하는 염기성 용액이다. 그래프에서 보는 바와 같이 pH가 낮아지면, 전압이 올라가고, pH가 높아지면 전압이 떨어지는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

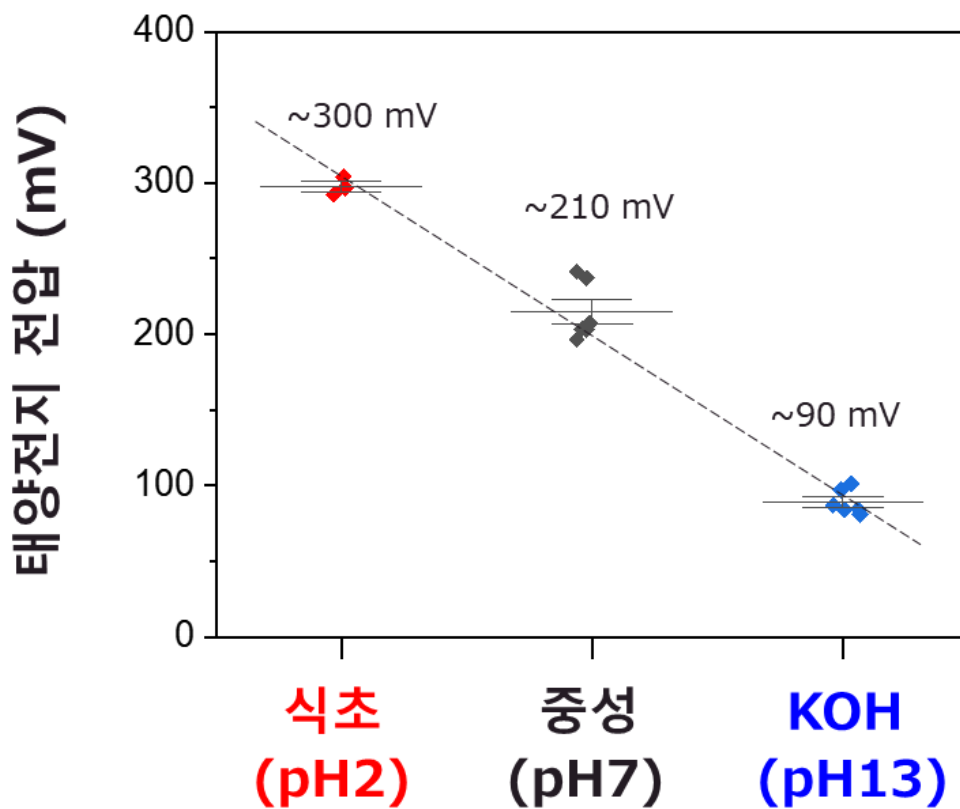


그림 8. 산성도에 따라 변하는 태양전지의 전압

흥미로운 점은 이러한 변화가 선형성을 띤다는 것이다. 이를 식으로 간단하게 표현해보면, 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{태양전지전압} = 350 - 20 \text{ pH} \quad (\text{식 } 2)$$

식 2에 식 1의 관계를 대입해주면, 식 3을 도출할 수 있다.

$$\text{태양전지전압} = 350 + 20\log[\text{H}^+] \quad (\text{식 } 3)$$

식 2와 식 3을 통해, 임의의 물질의 pH 또는 수소이온 농도를 정량적으로 예측해볼 수 있다.

예를 들어 임의의 물질에 노출된 태양전지의 전압이 250 mV라고 한다면, 위 식 2에 의해 pH는 약 5가 되고, 이의 수소이온 농도  $[\text{H}^+]$ 는 식 3을 이용해 약 0.00001 M (10 ppb)정도라는 것을 예측해볼 수 있다.

## VI. 결론 및 제언

본 연구에서는 친환경적인 빌베리를 먼 보자기(천)에 염색하여 지속 가능한, 재활용 가능한 산/염기 검출기법을 제안하였다. 기존 리트머스 종이와는 달리 빌베리 염색 천의 경우, 산, 염기 테스트 후 빨아서 다시 사용이 가능하였고, 실험결과 최소 10회 이상 재사용이 가능하였다. 빌베리가 완전히 천에서 빠지지 않는 한 반복 사용이 가능하다는 것을 확인하였다.

더불어 빌베리를 태양전지의 음극에 염색을 하여 산, 염기도에 따른 pH의 변화를 정량적으로 관찰하였다. 빌베리 태양전지는 pH 2에서 300 mV, 중성에서 200 mV, 그리고 염기성인 pH 13에서 100 mV를 나타내었다. 이를 통해, pH와 태양전지 전압과의 관계를 추론하였고, pH와 태양전지 전압과의 관계가 선형적인 관계를 가지고 있음을 밝혔다. 이 관계를 통해, 궁극적으로 검출되는 전압을 통해, 미지의 물질의 수소이온 농도를 예측할 수 있는 정량적인 기법을 개발할 수 있었다.

앞으로 빌베리를 천에 염색하는 방법을 연구하여, 반영구적으로 재사용 가능한 산, 염기 테스트기를 개발할 것이다. 또한, pH 테스트 범위를 좁히고, 다양한 종류의 산과 염기를 이용해 빌베리 태양전지의 전압을 통한 정확한 pH 예측이 가능할 수 있도록 연구해 나가 지속 가능한 발전에 기여할 수 있도록 하겠다.

## VII. 참고문헌

[1] Khoo H. E., Azlan A., Tang S. T., & Lim S. M. Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research* 61, 1361779 (2017).

[2] <https://ko.wikipedia.org/wiki/>



물리B

## 08\_맴돌이 전류를 이용한 자기브레이크



# 멤돌이전류를 이용한 자기브레이크

문지우 (무안행복중학교 2학년)

정서운 (무안행복중학교 2학년)

장승준 (오룡중학교 2학년)

정재현 (목포영화중학교 2학년)

채한나 (진도중학교 2학년)

지도교수 : 임태현 (국립목포대학교 반도체응용물리학과)

## 초록

현대사회 도시속에서 만들어지는 미세먼지중 자동차에서 만들어지는 미세먼지가 많은 양을 차지하고 있다. 특히 자동차 브레이크에서 만들어지는 미세먼지가 자동차 배기구에서 나오는 미세먼지보다 많음을 알 수 있었다. 브레이크에서 만들어지는 미세먼지를 줄이기 위하여 현재 마찰에 의해 멈추는 브레이크를 접촉이 이루어지지 않고 멈출 수 있는 자기 브레이크로 실험을 진행하였다. 실험결과 멤돌이 전류를 제어함으로 브레이크를 대신해서 멈출 수 있음을 확인하였다. 자석과 금속판의 사이간격, 금속판의 재질, 자석의 배치등에 따라 저항력이 달라지고 멤돌이 전류를 효과적으로 이용하였을 때 저항력을 충분히 낼수 있었다. 이 자기브레이크를 사용하였을때 물질이 직접 접촉하지 않으므로 마찰에 의한 분진이 생성되지 않고 효과적으로 제동력을 확보 할 수 있을 것이다.

## I. 서론

현대 사회에서는 겨울철에 미세먼지로 부터 벗어나 살 수 없다. 미세먼지란 우리 눈에 보이지 않을 정도로 아주 작은 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 먼지들을 통칭해서 말한다. 미세먼지는 우리가 숨을 쉴 때 우리의 폐속으로 들어와서 폐의 기능을 떨어뜨리는 주요한 원인이 된다. 특히 대도시의 미세먼지는 70%이상이 자동차에서 발생한다. 자동차에서 발생하는 미세먼지 중 자동차가 멈추면서 만들어내는 미세먼지가 자동차 배기구에서 배출되는 미세먼지보다 2배 이상 많은 것으로 발표되었다. 현재 국내에서는 배기가스에 대한 규제가 이뤄지고 있지만 브레이크와 타이어 마모로 인한 미세먼지 배출은 측정조차 이뤄지지 않고, 이에 대한 대책이 없는 상황이다. 이석환 한국기계연구원은 브레이크 마모로 인한 미세먼지가 실제 차량 운행과 유사한 조건에서 속도와 제동력을 바꿔가며 브레이크 마모로 발생하는 미세먼지 양을 측정했을 때, 브레이크 마모로 자동차 1대 당 미세먼지(PM10)가 km당 2.65mg이, 초미세먼지가(PM2.5)가 km당 2.2mg 발생하는 것으로 분석했다. 반면 매연저감장치(DPF)를 장착한 디젤차의 배기구에서는 km당 1.13mg의 미세먼지가, 직접분사식 가솔린(GDI) 차량 배기구에서는 km당 1.19mg의 미세먼지가 발생했다. 이처럼 브레이크에서 나오는 미세먼지가 2배 이상 많은 것이다.[1] 브레이크에서 만들어지는 미세먼지를 줄이기 위한 해결방안으로 직접 접촉 마찰에 의해 멈추는 브레이크를 접촉이 이루어지지 않고 멈출 수 있는 자기 브레이크라는 주제로 연구를 진행하게 되었다.

## II. 자기력이 생기는 이유

### 1. 맴돌이 전류

금속판이 자기장 속으로 들어감에 따라 변하는 자기선속이 금속판에 기전력을 유도하는데, 이는 금속판 내의 자유 전자들을 움직여 소용돌이치는 맴돌이 전류를 일으키게 한다. 렌츠의 법칙에 따라 맴돌이 전류는 전류를 발생시키게끔 하는 변화를 방해하는 자기장이 발생하는 방향으로 흐른다. 이런 이유로 맴돌이 전류는 자극에 반발하는 유효 자극을 금속판에 발생하게 된다. 이 상황에서 금속판의 운동을 방해하는 반발력이 생긴다

유도되는 맴돌이 전류는 금속판이 자기장 밖에서 자기장 안으로 들어갈 때 반시계 방향이 되는데, 이것은 금속판을 통과하는 외부 자기선속이 변하기 때문이다. 따라서 렌츠의 법칙에 의해 유도 전류는 금속판 바깥 방향의 자기장을 만들어야만 한다. 금속판이 자기장을 벗어날때는 그 반대가 되며, 맴돌이 전류는 시계 방향이다. 유도되는 맴돌이 전류는 금속판이 자기장 안으로 들어가거나 나올 때 항상 자기적 저항력  $F_B$ 를 만들기 때문에, 금속판은 결국 정지하게 된다.

금속판에 가는 긴 틈을 내면, 맴돌이 전류와 이에 해당하는 저항력은 크게 감소한다. 금속판의 틈들이 큰 전류 고리의 형성을 만들지 못하도록 한다는 점을 인식하면, 이러한 감소를 이해할 수 있다.[2]

### 2. 유도 기전력(맴돌이 전류 발생원인)

기전력은 회로를 통과하는 자기선속이 시간에 따라 변할 때 회로에 유도되었다. 일반적으로 이 기전력은 회로를 통과하는 자기선속의 시간 변화율에 정비례한다. 이것을 패러데이의 유도법칙이라 한다. 만약 회로가 같은 넓이를 가진  $N$ 개의 고리로 묶여진 코일이고,  $\phi_b$ 가 고리 하나를 통과하는 자기선속이라면, 기전력은 모든 고리에 의해 유도된다. 고리가 한 다발로 묶여 있으므로 각각의 기전력은 더해지고, 따라서 코일의 전체 유도 기전력은 다음과 같이 주어진다.[3]

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

위의 식에서 유도 기전력과 자기선속의 변화가 서로 반대 부호라는 것을 보여주고 있다. 이 특성에 관해 렌츠의 법칙이라는 매우 실제적인 물리적 해석이 따른다. 이것은 닫힌 회로에서 유도 전류는 닫힌 회로로 둘러싸인 부분을 통과하는 자기선속 변화를 방해하는 방향으로 자기장을 발생시킨다. 유도 전류는 회로를 통과하는 원래의 자기선속을 변하지 않게 하려고 한다.

균일한 자기장에 놓인 두 평행 레일 위를 오른쪽으로 움직이는 도체 막대의 예시로 막대의 움직임에 따라 닫힌 회로의 넓이가 늘어나게되면, 닫힌 회로로 둘러싸인 부분을 통과하는 자기선속은 시간에 대해 증가한다. 유도 전류는 외부 자기선속의 변화를 방해하는 자기장이 발생하는 방향으로 향해야 함을 렌츠의 법칙은 말해주고

있다. 외부 자기장에 의한 자기선속이 증가하기 때문에, 유도 전류는 이 변화를 막으려면 반대방향의 자기장을 만들어야 한다. 따라서 막대가 오른쪽으로 움직이면 유도 전류는 반시계 방향으로 향해야 한다. 만약에 막대가 반대로 움직이면, 닫힌 회로로 둘러싸인 부분을 통과하는 외부 자기선속은 시간에 따라 감소하게 된다. 외부 자기장에 의한 자기선속이 감소하기 때문에, 유도 전류는 이 변화를 막으려면 반대방향의 자기장을 만들어야 한다. 이것으로 보면 유도 전류는 닫힌 회로로 둘러싸인 부분을 통과하는 원래의 자기선속을 유지하려고 하는 성질을 가지고 있다. 이 상황을 에너지의 보존법칙으로 살펴보면, 만약 막대가 받는 자기력의 방향이 자속이 증가하는 방향으로 전류가 흐른다. 이 경우, 힘은 막대를 가속시켜 속도를 증가시킬 것이고 따라서 닫힌 회로로 둘러싸인 부분은 더 빠르게 늘어날 것이다. 그 결과 유도 전류는 증가할 것이다. 그로 인해 자기력도 증가할 것이고, 그러면 또 유도 전류가 증가하는 과정이 계속 반복될 되게된다. 그 효과는 에너지의 공급 없이 계가 에너지를 얻게 되는것이다. 이 반응은 분명히 모든 경험과 모순되고 에너지 보존의 법칙에 위배된다. 따라서 전류는 반시계 방향이어야 한다고 볼 수 밖에 없다.[4]

### III. 실험설계

#### I. 맴돌이 전류 형성 선행연구

자기력이 형성되는 과정(그림 1)과 같이 금속판이 자기장을 통과하게 만들어 자기력에 의해 감쇠진동하는 과정을 살펴보았다. 금속판은 그림2와 같이 1mm 두께의 알루미늄판을 형태에 따라 3가지를 사용하였다. 각각의 금속판을 이용하여 자기장의 세기 및 금속판의 형태에 따른 자기력의 크기를 측정하였다. 자기력의 크기는 저항력의 크기로 금속판 및 자기장의 세기별 감쇠 진동중의 정지 시간을 이용하여 비교하였다.

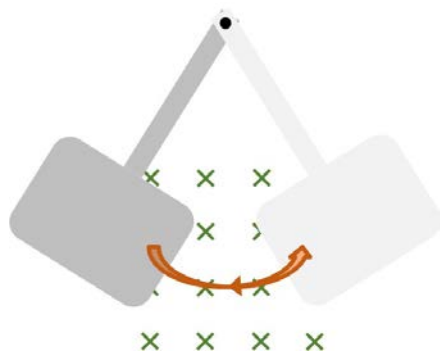


그림 1 감쇠진동 정지시간 측정



그림 2 금속판의 형태

## II. 맴돌이 전류를 이용한 자기브레이크

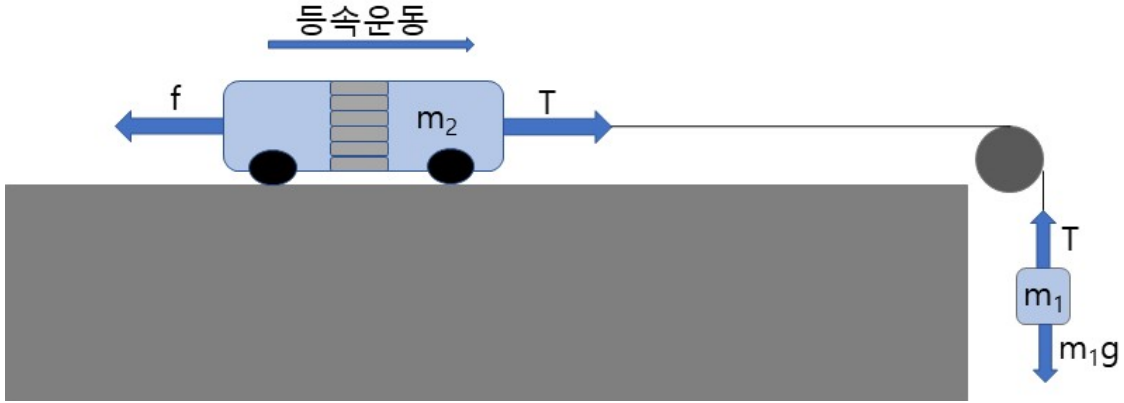


그림 3 자기브레이크 실험설계

그림 3은 마찰이 거의 없는 도르래에 질량  $m_1$  추와  $m_2$  인 물체가 질량을 무시할 수 있는 줄에 연결되어 있다. 질량  $m_2$ 인 물체는 맴돌이 전류에 의해 등속운동을 하게되며  $m_1$ 은 중력에 의해 장력( $T$ )을 만들어낸다. 두 중력에 의해 두 물체가 함께 힘을 받고 있다. 맴돌이전류에 의한 저항력( $f$ )이 작용하는 등속운동으로 물체의 운동을 분석할 수 있다.

추의 운동에서 위 방향을 양(+)으로 정하고 추에 대해 대한 성분별로 뉴턴의 제2법칙을 적용한다.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= T - m_1g = m_1a = 0\end{aligned}$$

이 물체가 아래방향으로 등속운동을 하고 줄에 걸리는 장력이  $T = m_1g$  임을 알 수 있다. 추에서 가속도는 오직  $y$ 성분만 있으므로  $a_y$ 를  $a$ 로 대치하였으며 등속운동하므로 가속도는 0이다.

그림3 추의 운동에서 아래 방향을  $+x$ 의 방향으로 선택하는 것이 편리하다.

카트의 운동에 대해 성분별로 뉴턴의 제2법칙을 적용한다.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= T - f = m_2a = 0 \\ \sum F_y &= n - m_2g = 0\end{aligned}$$

위의  $\sum F_x$ 에서 두 물체는 같은 크기의 속도를 가지므로  $a_x$ 을  $a$ 로 치환한다.

추의 식에서  $y$ 축의 식을  $T$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$T = f$$

카트의 운동의 식에서  $x$ 축의 식에 저항력( $f$ )에 대한 정리한 후 위의 식을 대입하여 정리한다.

$$f = T = m_1g$$

이것을 통하여 저항력의 크기는 추 $m_1$ 에 걸리는 중력의 크기와 같음을 알 수 있다.

## IV. 실험결과

### I. 맴돌이 전류 형성 선행연구

자기력이 형성되는 과정을 알아보기 위한 실험에서 금속판이 자기장을 통과하게 만들어 자기력에 의해 감쇠진동하는 과정을 살펴보았다. 1mm 두께의 알루미늄판을 형태에 따라 3가지를 사용하여 측정을 하였을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 4는 파스코캡스톤을 이용 감쇠진동의 시간을 측정하는 모습이다.

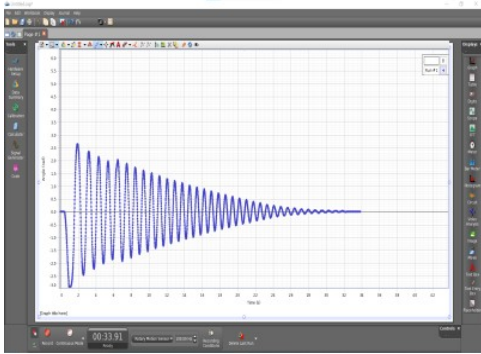


그림 4 감쇠진동측정

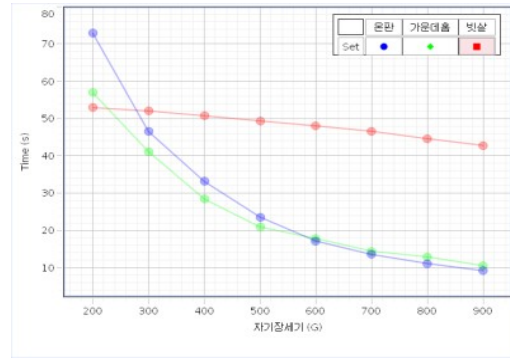


그림 5 자기장세기 대 진동시간

그림 5는 판의 형태 및 자기장세기별 감쇠진동의 시간을 측정한 결과이다. 맴돌이 전류가 형성되기 좋은 판은 온판형태와 가운데홈이 있는 판이 맴돌이 전류가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었고 자기장이 세질수록 온판의 감쇠진동시간이 더 짧아지는 것을 확인하였다. 이것을 통하여 자기장의 세기와 맴돌이 전류가 형성되기 쉬운 온판형태가 가장 이상적인 것을 확인할 수 있다.

### II. 맴돌이 전류를 이용한 자기브레이크

#### 1. 자석의 개수에 따른 저항력의 크기

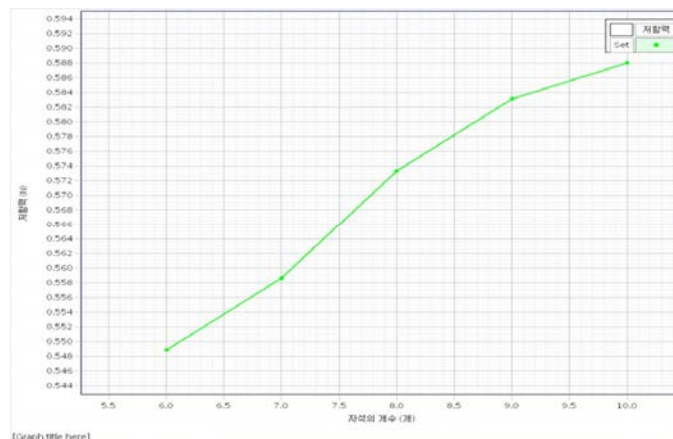


그림 6 자석의 개수 대 저항력

그림 6은 자석의 개수 대 저항력의 크기를 측정한 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개부터 10개까지 자석을 한 개씩 증가시켰으며 알루미늄판(3mm)을 사용하였다. 자석을 6개일 때 종단속도 0.360m/s를 기준으로 측정하였다. 개수가 증가함에 따라 저항력이 선형으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 2. 금속판의 두께에 따른 저항력의 크기

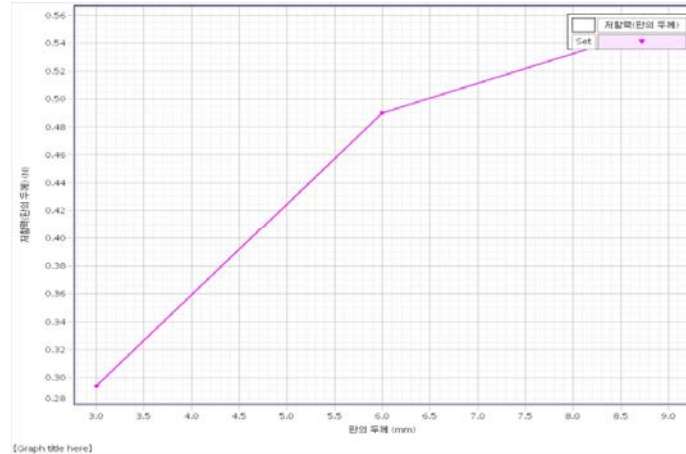


그림 7 금속판 두께 대 저항력

그림 7은 금속판 두께 대 저항력의 크기를 측정된 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개를 사용하였으며 3mm 알루미늄판을 1장부터 3장까지 겹쳐가면서 측정하였다. 1장(3mm)을 사용하였을 때 종단속도 0.230m/s를 기준으로 측정하였고, 1장(3mm)보다 2장(6mm)에서 저항력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 3장(9mm)을 겹쳤을 때는 저항력의 크기가 크게 증가하지 않는 것을 볼 수 있었다. 제일 아래 있는 판에서 자기장의 세기가 크지 않아 맴돌이 전류가 많이 형성이 되지 않는다. 하지만 2장(6mm)보다 3장(9mm)일 때 저항력이 더 큼을 볼 수 있었다. 자기브레이크를 제작함에 있어 적당한 두께의 판을 사용하는 것이 효과적일 것이다.

## 3. 금속판의 재질에 따른 저항력의 크기

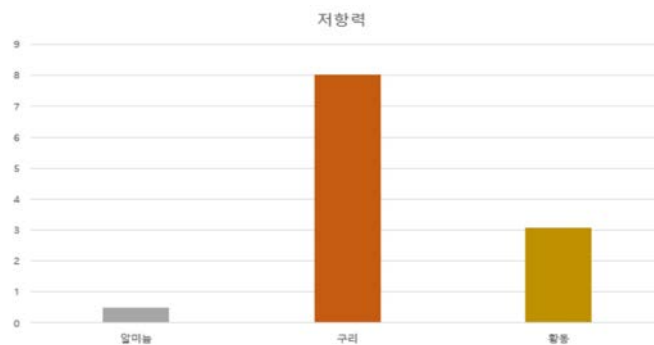


그림 8 금속판 재질 대 저항력

그림 8은 금속판의 재질 대 저항력의 크기를 측정된 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개를 사용했으며 알루미늄판의 종단속도 0.315m/s를 기준으로 측정하였다. 금속판중에 저항력이 가장 큰 것은 구리인 것을 확인하였고 이는 비저항( $1.72 \times 10^{-8}$ )이 가장 작은 금속으로 맴돌이 전류가 구리판에서 가장 잘 형성되는 것을 볼 수 있었다. 다음으로 큰 금속은 황동판, 알루미늄판 순으로 저항력이 큰 것을 확인하였다.

#### 4. 추의 질량에 따른 종단속도

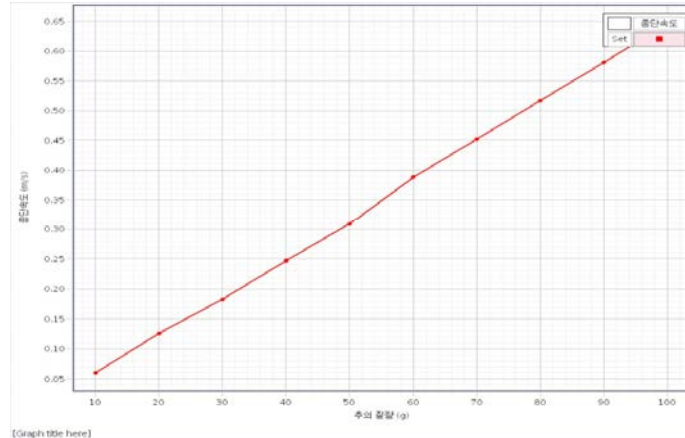


그림 9 추의 질량 대 종단속도

그림 9는 추의 질량 대 종단속도의 크기를 측정된 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개를 사용했으며 알미늄판(3mm)을 사용하여 측정하였다. 추의 질량이 늘어남에 따라 종단속도가 선형적으로 증가하고 있음을 확인하였다. 이를 통하여 저항력의 크기는 속도가 빨라짐에 따라 커지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 5. 자석의 높이에 따른 저항력의 크기

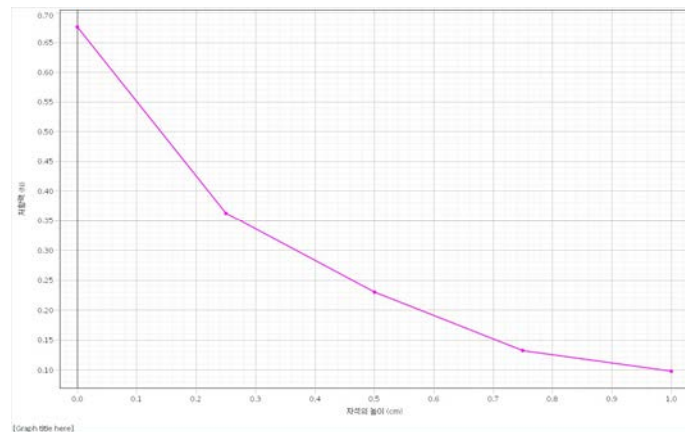


그림 10 자석의 높이 대 저항력

그림 10은 자석의 높이 대 저항력의 크기를 측정된 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개를 사용했으며 알미늄판(3mm)을 사용하여 측정하였다. 금속판으로부터 1mm 떨어진 곳에서부터 측정하기 시작했고 자석을 2.5mm씩 떨어트려가면서 11mm까지 떨어트려가면서 측정하였다. 1mm떨어진 곳에서 종단속력 0.365m/s을 기준으로 하여 측정하였고 거리가 멀어짐에 따라 거리에 반비례하는 그래프를 볼 수 있었다. 금속판으로부터 거리가 가까웠을 때 저항력이 가장 큰 것을 확인하였다.

## 6. 자석의 배치에 따른 저항력의 크기

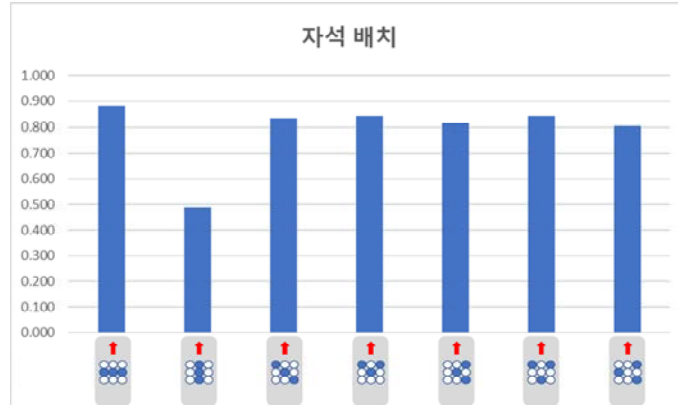


그림 11 자석의 배치형태 대 저항력

그림 11은 자석의 배치 형태 대 저항력의 크기를 측정한 결과 그래프이다. 자석의 개수는 6개를 사용했으며 알미늄판(3mm)을 사용하여 측정하였다. 자석의 배치를 가로로 일렬로 했을 때 종단속도 0.356m/s를 기준으로 측정하였다. 자석을 진행 방향에 대해 가로로 일렬이였을때가 가장 큰 저항력(0.882N)을 가지고 있었고, 반대로 세로로 일렬일때가 가장 작은 저항력(0.490N)을 가지고 있음을 보았다. 이는 진행방향에 대해 앞쪽과 뒤쪽의 맴돌이 전류가 자석의 배치 상태에 따라 형성되는 맴돌이 전류가 다르고 이것에 따른 영향임을 확인 하였다.

## V. 결론 및 제언

현대 사회에서는 겨울철에 미세먼지로 부터 벗어나 살 수 없다. 대도시에 발생하는 미세먼지중 자동차 브레이크에서 만들어지는 미세먼지를 줄이기 위하여 현재 직접 접촉에 의한 마찰에 의해 멈추는 시스템을 접촉이 이루어지지 않고 멈출 수 있는 자기 브레이크라는 주제로 실험을 진행한 결과 맴돌이 전류를 제어함으로 브레이크를 대신해서 멈출 수 있음을 확인하였다. 자석과 금속판의 사이간격, 금속판의 재질, 자석의 배치등에 따라 저항력이 달라지고 효과적으로 맴돌이 전류를 이용하였을 때 저항력을 효과적으로 만들어 낼 수 있을 것이다. 물질이 직접 접촉하지 않으므로 마찰에 의한 분진이 생성되지 않으며 효과적으로 제동력을 확보 할 수 있을 것이다.

## VI. 참고문헌

- [1] 이석환.(2019). 브레이크 마모 미세먼지, 배기구 배출 미세먼지보다 2배 많다. <https://www.kimm.re.kr/sub0504/view/page/6/id/17739#u>
- [2] Serway.(2012). 대학물리학(8판 pp.753). 북스힐
- [3] Serway.(2012). 대학물리학(8판 pp.739). 북스힐
- [4] Serway.(2012). 대학물리학(8판 pp.746-747). 북스힐

물리B

## 09\_부메랑 종이비행기의 곡예 원리 탐구



# 부메랑 종이비행기의 곡예 원리 탐구

박민준 (대아중학교 2학년)

이현우 (계룡중학교 2학년)

지도교수 : 손정우 (경상국립대학교 물리교육과)

2022년 세계 종이비행기 대회에서 한국팀은 부메랑 비행기로 곡예 부분에서 우승하였다. 종이비행기를 원하는 위치와 방향으로 되돌아오게 하는 원리를 탐구한 연구가 거의 없었다. 이에 종이비행기의 승강타 각도, 윙렛(winglet) 각도, 윙렛 폭에 따른 회전 반경 및 회전 각도의 변화를 알아보려고 하였다. 이를 위해 먼저 부메랑 비행기 접었고, 일정한 힘으로 종이비행기를 날릴 수 있는 발사대를 제작하였다. 다음으로 각 변인을 변화시키면서 날아가는 장면을 동영상으로 촬영한 뒤 영상분석 프로그램인 트랙커로 회전 반경과 회전 각도를 측정하였다. 마지막으로 측정 데이터를 인공지능의 선형회귀 학습 모델을 이용하여 변인 간의 관계를 도출하였다. 그 결과는 다음과 같았다. 첫째, 승강타 각도는 회전 방향에 영향을 미친다. 둘째, 윙렛 폭은 회전 반경에 더 큰 영향을 미친다. 셋째, 윙렛 각도는 회전 각도에 더 큰 영향을 미친다. 결론적으로 종이비행기의 회전 방향은 승강타 각도, 회전 각도는 윙렛 각도, 회전 반경은 윙렛 폭으로 조정하면 원하는 위치로 날릴 수 있다. 그러나 손으로 던질 때는 힘과 방향을 항상 일정하게 하는 지속적인 연습이 필요하다.

## I. 서론

2022년 세계 종이비행기 대회에서 우승한 팀이 TV의 예능 프로그램에 나와 부메랑처럼 되돌아오는 종이비행기 곡예 기술을 선보였다. 종이비행기를 날리는 사람이 원하는 위치와 방향으로 되돌아오게 하는 원리가 궁금해졌다. 이에 인공지능인 ChatGPT에 ‘종이비행기의 곡예 기술의 원리를 알려줘!’라고 질문하였다. 답변은 공기동력, 중력, 안정성과 제어, 스로틀과 에르론 조절, 공기 저항, 미세 조절 등 관련 개념과 용어 설명만 있을 뿐 주요 변인이나 이들 간의 관계에 대해서는 자세한 설명을 찾기가 어려웠다. 이에 관련 학회 논문을 찾아보았으나 종이비행기 관련한 논문은 한국항공우주학회 학술대회에서 김종철(2016)이 발표한 ‘종이비행기의 XFLR5 해석’이 있었다. 이 논문에서는 종이비행기가 기원전 500년 경 중국에서 시작한 것으로 추정하였고, 시뮬레이션 프로그램으로 종이비행기와 같은 소형 물체에 대한 성능 예측이 가능하다고 하였다. 그러나 종이비행기의 곡예 비행에 관한 정보를 찾기가 어려웠다.

최근 유튜브에서 많은 정보를 찾을 수 있어 부메랑 종이비행기를 검색한 결과 부메랑 종이비행기 접는 방법과 날리는 방법이 있었다(네모 아저씨, 2023). 앞쪽을 무겁게 하고, 뒤쪽 날개에 승강타와 윙렛을 만들어 날리는데, 그 폭과 각도에 관한 자

제한 내용은 나오지 않았다. 여기서 승강타는 수평 꼬리 날개로 비행기 기수의 세로 조정을 하는 역할을 하고, 윙렛은 날개 끝에 발생하는 와류를 감소시키는 역할을 한다.

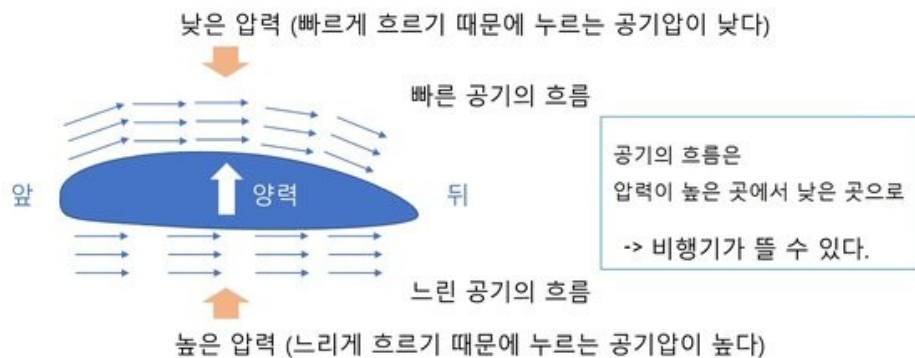
그래서 본 연구는 승강타의 각도와 윙렛의 각도와 폭을 조절하여 곡예 비행으로 원하는 위치에 도달할 수 있게 하는 방안을 찾는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 ‘종이비행기의 곡예 비행은 승강타의 각도, 윙렛의 폭과 각도에 의해 조정할 수 있다.’를 가설로 정하고, 이를 검증하기 위해 다음과 같은 연구 문제를 정하였다.

- 첫째, 승강타의 각도는 회전 각도, 회전 반경과 어떤 관계가 있는가?
- 둘째, 윙렛의 폭은 회전 각도, 회전 반경과 어떤 관계가 있는가?
- 셋째, 윙렛의 각도는 회전 각도, 회전 반경과 어떤 관계가 있는가?

## II. 이론적 배경

### 1. 종이비행기 나는 원리

종이비행기는 베르누이 정리인 ‘유체(기체, 액체)가 빠르게 흐르면 압력이 감소하고, 느리게 흐르면 압력이 증가한다.’에 의해 [그림 1]과 같이 압력이 높은 아래쪽에서 낮은 위측으로 양력이 발생하여 뜰 수 있게 된다. 이때 비행기가 바닥과 수평인 것보다 약간 올려 대각선을 이뤄야 더 많은 바람을 맞게 되므로, 종이비행기를 날릴 때도 살짝 위로 올려 날리면 비행기가 더 큰 양력을 받게 되어 잘 날게 된다.

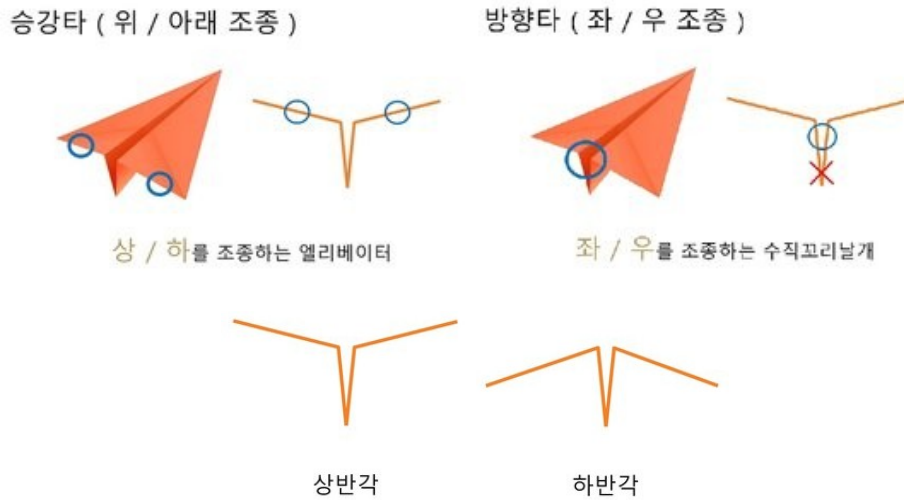


[그림 1] 종이비행기가 나는 베르누이 원리(소년중앙, 2018)

### 2. 종이비행기 조정 원리

종이비행기의 조정은 [그림 2]와 같이 날개의 꼬리 부분 끝에 해당하는 승강타와 수직 꼬리 날개에 해당하는 방향타에 의해 가능하다. 승강타인 날개 꼬리 부분을 살짝 말아주면 말린 방향에 따라 비행기가 위나 아래로 꺾이면서 날아간다. 그리고

방향타인 수직 꼬리 날개를 손톱으로 조금씩 눌러서 주름을 만들면 왼쪽 또는 오른쪽으로 휘면서 날아간다. 이때 상반각이 하반각보다 바람을 받는 면이 더 넓어서 안정적으로 날아간다.



[그림 2] 종이비행기의 승강타와 방향타 역할(소년중앙, 2018)

다음으로 [그림 3]과 같은 윙렛은 1897년 영국의 프레드릭 랜체스터가 발견한 것으로 사전적 의미로 ‘작은 날개’로 비행기의 양 날개 끝에 살짝 꺾여 있는 부분이다. 추진력과 반대되는 움직임을 방해하는 힘인 와류, 즉 항력을 감소시켜주는 역할을 한다.



[그림 3] 비행기의 윙렛(소년중앙, 2018)

따라서 종이비행기의 날개를 하반각으로 하고, 윙렛을 위쪽으로 꺾어서 날리면 비행기가 원을 그리며 부메랑처럼 되 돌아온다. 만약 윙렛을 아래쪽으로 꺾어서 날리면 공기가 날개를 밀어 올렸다 내렸다 하면서 마치 날개 짓 하듯 출렁이면서 날아간다.

### Ⅲ. 연구 방법

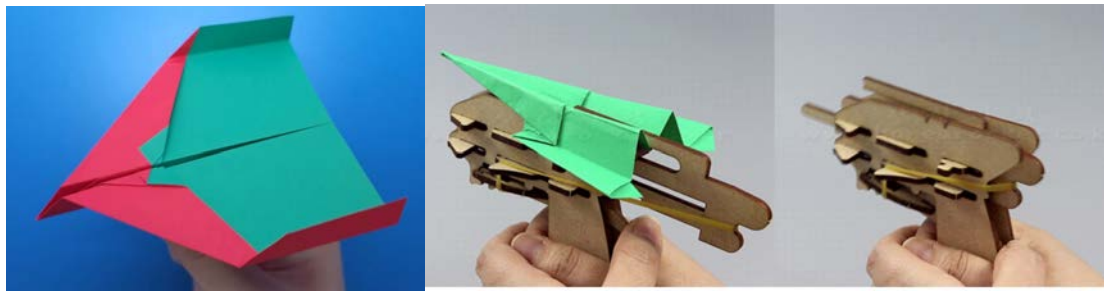
#### 1. 준비물

색종이, 종이비행기 발사대. 디지털 카메라, 영상 분석 프로그램(트랙커), 데이터 분석 프로그램(ChatGPT, 엔트리)

#### 2. 실험 과정 및 방법

##### (1) 실험 도구 제작

유튜브에 제시된 [그림 4]와 같은 부메랑 비행기를 접기 방법에 따라 만든다. 그리고 종이비행기를 일정한 힘으로 발사하기 위한 발사대를 제작한다.



[그림 4] 부메랑 종이비행기(네모 아저씨, 2023)와 종이비행기 발사대(한진과학, 2003)

##### (2) 실험 및 촬영

[그림 5]와 <표 1>과 같은 조건에 따라 종이비행기의 승강타와 윙렛의 각도를 조정한다. 독립변인인 승강타 각도는 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 윙렛 폭은 0.6cm, 0.8cm, 1cm, 1.2cm, 1.4cm, 1.6cm, 1.8cm, 2cm, 2.2cm, 2.4cm, 윙렛 각도는 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150° 로 각각 변화시킨다.



[그림 5] 종이비행기의 변인

<표 1> 종이비행기의 변인 통제

독립변인	통제 변인	종속 변인
승강타 각도	윙렛 각도 90°, 윙렛 폭 1.4cm 일정	회전 반경, 회전 각도
윙렛 폭	승강타 각도 30°, 윙렛 각도 90° 일정	
윙렛 각도	승강타 각도 30°, 윙렛 폭 1.4cm 일정	

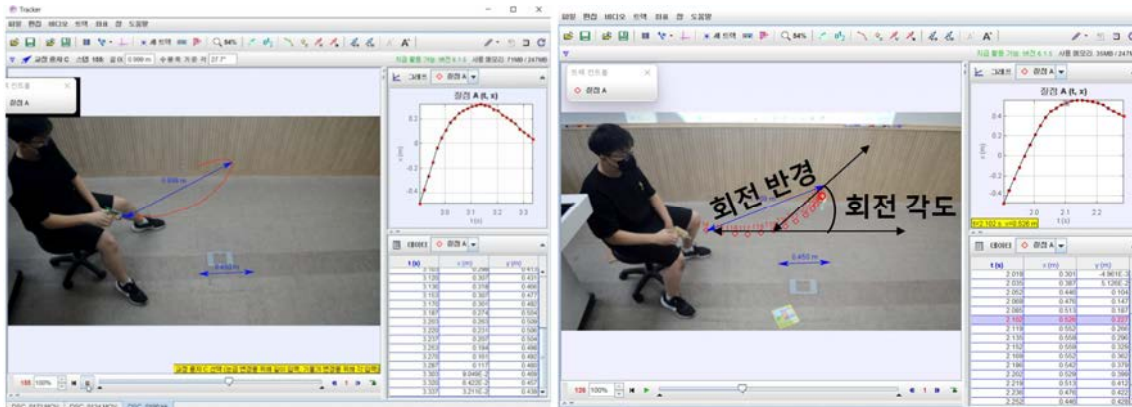
중속 변인인 회전 반경과 회전 각도를 측정하기 위해 발사 후 날아가는 장면을 [그림 6]처럼 촬영한다.



[그림 5] 실험 장면 및 종이비행기 날리는 장면

### (3) 실험 데이터 측정 및 분석

[그림 6]과 같이 영상 분석 프로그램인 트랙커(Tracker)를 이용하여 각 경우의 회전 반경과 회전 각도를 측정한다. 이 값들을 표에 정리하고, 그래프를 그린다.



[그림 6] 트랙커를 이용한 영상 분석

[그림 7]과 같이 측정한 값을 기록한 표를 생성형 인공지능인 ChatGPT에 입력하고, ‘변인 간의 관계를 분석해줘!’라고 명령을 내려 분석시킨다.

Certainly! Here are the three sets of data organized into tables:

**Table 1: Elevator Angle (Winglet Angle 90°, Winglet Width = 1.4cm)**

Elevator Angle (°)	Rotation Angle (°)	Turning Radius (cm)
30	20	93
60	14	108
90	16	94
120	10	100
150	16	174

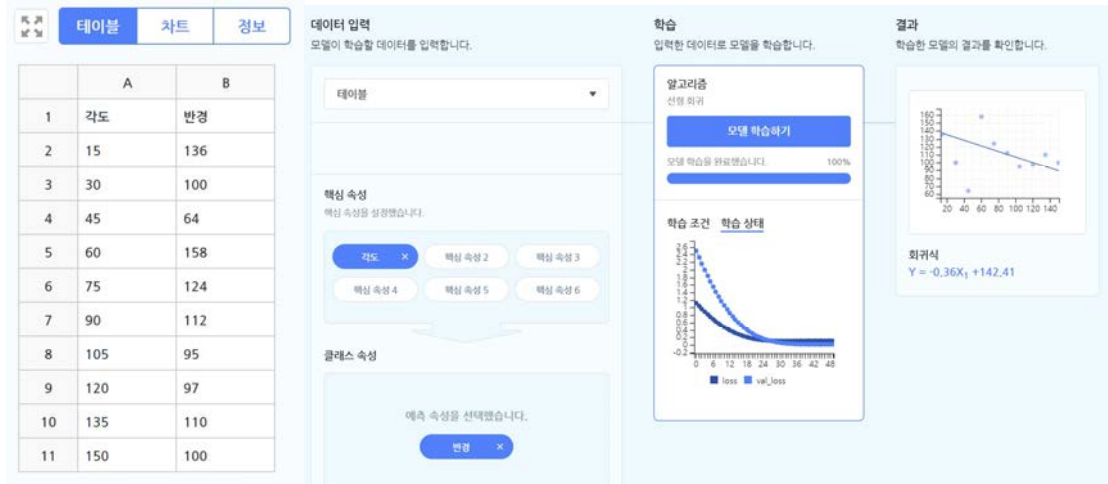
주어진 표에서 변인들 간의 관계를 분석하겠습니다.

**Table 1: Elevator Angle (Winglet Angle 90°, Winglet Width = 1.4cm)**

- Elevator Angle와 Rotation Angle 간의 관계: 일반적으로 Elevator Angle이 증가함에 따라 Rotation Angle이 감소하는 경향이 있습니다.
- Elevator Angle와 Turning Radius 간의 관계: Elevator Angle이 증가할수록 Turning Radius는 일부 증가하다가 다시 감소하는 경향이 있습니다.

[그림 7] ChatGPT를 이용한 데이터 분석

마지막으로 ChatGPT가 분석한 변인 간의 관계를 점검하기 위해 [그림 8]과 같이 엔트리의 인공지능 학습 모델인 선형회귀를 활용한다.



[그림 8] 엔트리의 인공지능 활용 선형회귀 분석

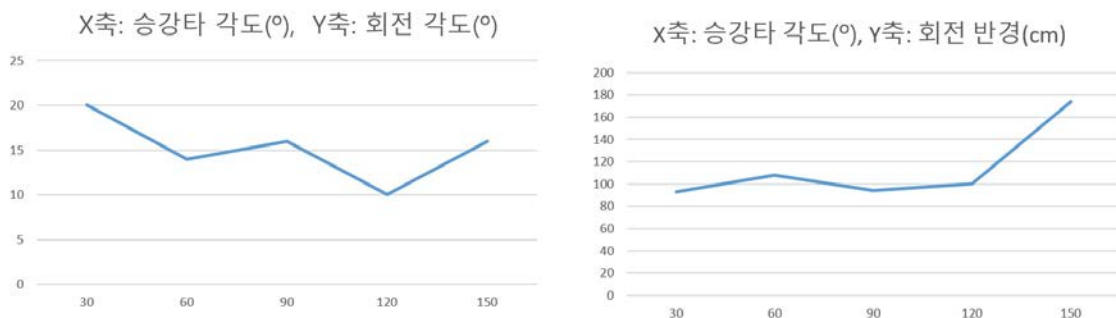
#### IV. 연구 결과

##### 1. 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경

윙렛 각도를 90°, 윙렛 폭을 1.4cm로 고정하고, 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경에 관한 측정 결과는 <표 2>와 <그림 9>와 같다.

<표 2> 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 측정 결과

승강타 각도(°)	30	60	90	120	150
회전 각도(°)	20	14	16	10	16
회전 반경(cm)	93	108	94	100	174



[그림 9] 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 그래프

인공지능을 활용하여 주요 변인 간의 관계를 분석하면 [그림 10]과 같다. 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경은 그래프의 기울기가 너무 작아 회전 각도와 회전 반경에 큰 영향이 없다고 볼 수 있다. 즉 승강타 각도는 단지 회전하는 방향에 만 영향을 미친다.



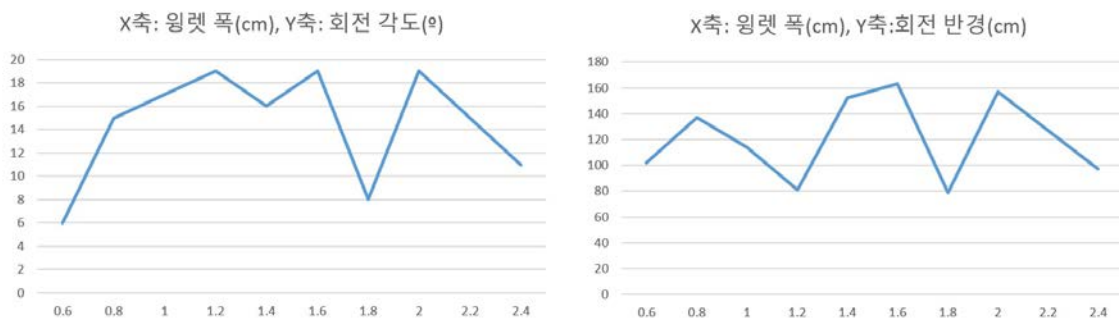
[그림 10] 승강타 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 회귀곡선

## 2. 윙렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경

승강타 각도를 30°, 윙렛 각도를 90°로 고정하고, 윙렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경에 관한 측정 결과는 <표 3>과 <그림 11>과 같다.

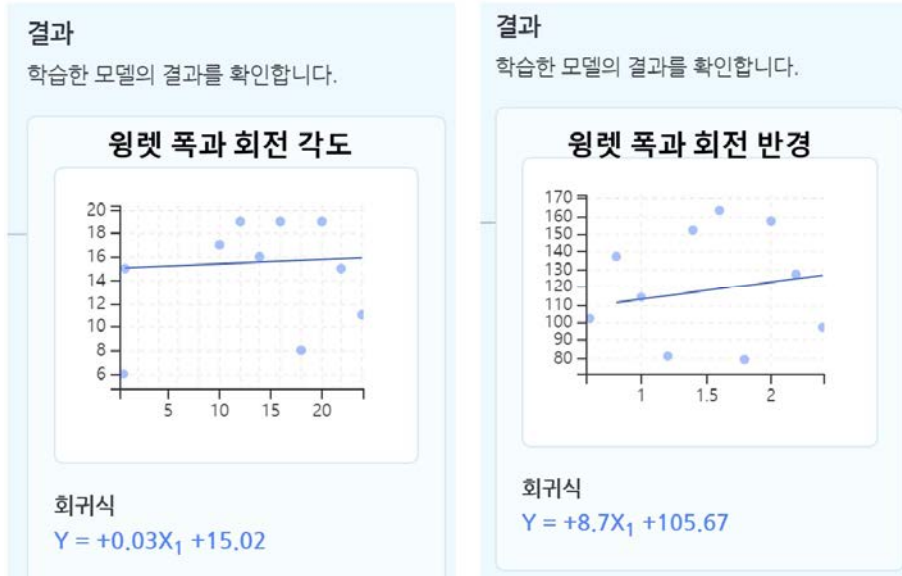
<표 3> 윙렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경 측정 결과

윙렛 폭(cm)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
회전 각도(°)	6	15	17	19	16	19	8	19	15	11
회전 반경(cm)	102	137	114	81	152	163	79	157	127	97



[그림 11] 윙렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경 그래프

인공지능을 활용하여 주요 변인 간의 관계를 분석하면 [그림 12]와 같다. 잉렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경은 각각 비례 관계가 있다. 그러나 회귀식의 기울기를 보면 잉렛 폭은 회전 반경에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



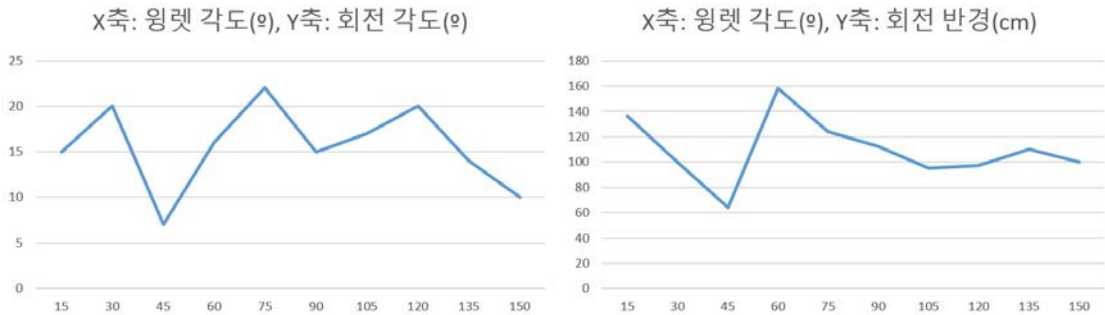
[그림 12] 잉렛 폭에 따른 회전 각도와 회전 반경 회귀곡선

### 3. 잉렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경

승강타 각도를 30°, 잉렛 폭을 1.4cm로 고정하고, 잉렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경에 관한 측정 결과는 <표 4>와 <그림 13>과 같다.

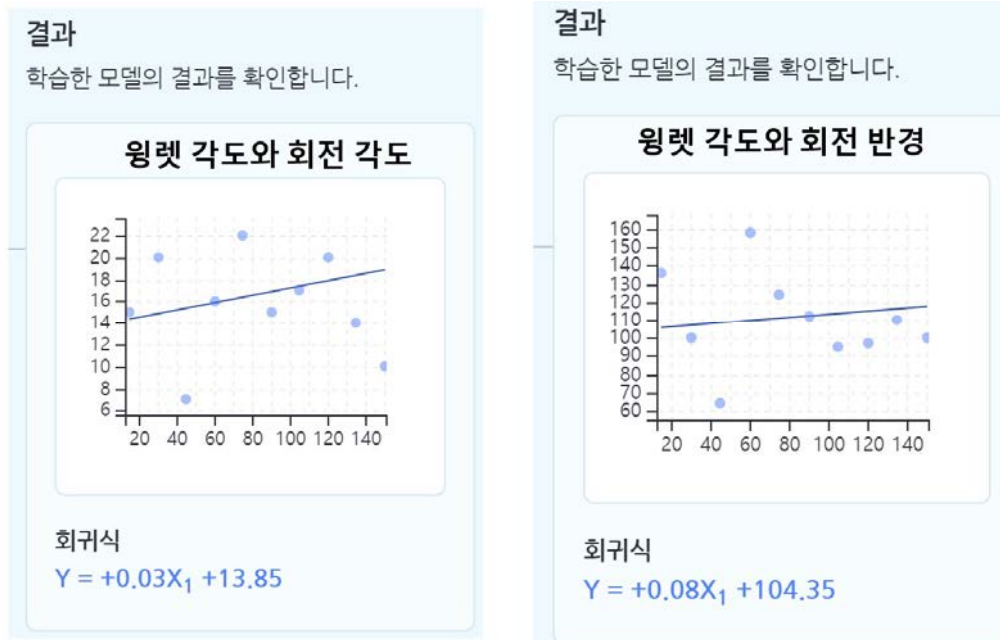
<표 4> 잉렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 측정 결과

잉렛 각도(°)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
회전 각도(°)	15	20	7	16	22	15	17	20	14	10
회전 반경(cm)	136	100	64	158	124	112	95	97	110	100



[그림 13] 잉렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 그래프

인공지능을 활용하여 주요 변인 간의 관계를 분석하면 [그림 14]와 같다. 윙렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경은 각각 비례 관계가 있다. 그러나 이미 회전 반경이 윙렛의 폭에 큰 영향을 받는 것을 확인하였으므로, 여기서는 윙렛 각도는 회전 각도에 더 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.



[그림 14] 윙렛 각도에 따른 회전 각도와 회전 반경 회귀곡선

## V. 결론 및 제언

종이비행기를 원하는 위치와 방향으로 되돌아오게 하는 원리를 탐구하기 위해 종이비행기의 승강타 각도, 윙렛(winglet) 각도, 윙렛 폭에 따른 회전반경 및 회전 각도의 변화를 측정하였다. 측정 값은 인공지능의 선형회귀 학습 모델을 이용하여 변인 간의 관계를 도출하였다. 그 결과는 다음과 같았다.

- 첫째, 승강타 각도는 회전 방향에 영향을 미친다.
- 둘째, 윙렛 폭은 회전 반경에 더 큰 영향을 미친다.
- 셋째, 윙렛 각도는 회전 각도에 더 큰 영향을 미친다.

이상의 결과들로부터 ‘종이비행기의 곡예 비행은 승강타의 각도, 윙렛의 폭과 각도에 의해 조정할 수 있다.’는 가설을 검증할 수 있었다. 또한 부메랑 종이비행기의 곡예비행에서 회전 방향은 승강타 각도, 회전 각도는 윙렛 각도, 회전 반경은 윙렛 폭으로 조정하면 원하는 위치로 날릴 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 손으로 던질 때는 힘과 방향을 항상 일정하게 하는 지속적인 연습이 필요하다.

이번 연구는 실험 과정에서 다수의 한계점을 가진다.

첫째, 종이비행기는 주변 공기 흐름에 영향을 많이 받기 때문에 이에 관한 통제가 원활하게 이뤄지지 못해 측정 과정에서 바람의 영향을 배제하기 어려워 측정값이 부정확하다.

둘째, 승강타 각도, 윙렛 각도, 윙렛 폭의 조건을 달리하는 수많은 실험 데이터가 수집되어야 인공지능의 회귀분석 모델이 충분히 학습할 수 있는데, 실험의 횟수가 부족하여 이를 충족하지 못하였다.

셋째, 부메랑 종이비행기 움직임에 대한 영상 분석에서 ‘회전 반경, 회전 각도’ 등에 관한 측정 기준이 명확하지 않아 측정값을 정확하지 못하다.

넷째, 인공지능의 선형회귀 학습 모델과 ChatGPT 분석 결과가 일치하지 않고, 실제 실험을 관찰한 결과와도 일치하지 않는 경우가 있어 이를 보완하기 위한 후속 연구가 필요하다.

이러한 한계가 있지만, 이번 연구를 통해 종이비행기의 운동과 관련된 실험 과정을 새롭게 개발할 수 있었다. 또한 부족한 데이터를 활용하여 변인 간의 관계를 분석하는데 인공지능 학습모델인 선형회귀를 활용할 수 있음을 확인하였다.

## VI. 참고문헌

김종철(2016). 종이비행기의 XFLRS 해석. 한국항공우주학회 2016년도 추계학술대회 논문집, 849-850.

네모 아저씨(2023). 부메랑 비행 가능한 활공형 페이퍼윙즈 델타제트 종이비행기 접는 방법. <https://youtu.be/yqtpRxZWlrs?si=9v-UOfzIXKfr6A8A>

소년중앙(2018). 손에 묻은 땀도 조심... 잘 나는 종이비행기 접으려면? <https://www.joongang.co.kr/article/22825087#home>

한진과학(2023). 슈팅 글라이더. <https://youtu.be/inbU2uDfR2Y>

물리B

## 10\_최대 에너지 효율의 수평축 윈드 터빈 제작



# 최대 에너지 효율의 윈드터빈에 관한 연구

곽동진 (이목중학교 2학년)

권나운 (이목중학교 2학년)

류희원 (이목중학교 2학년)

하 운 (수내중학교 2학년)

황도현 (늘푸른중학교 2학년)

지도교수 : 강재필 (아주대학교 다산학부대학)

## 초 록

본 연구에서는 풍력발전기의 저조한 효율이라는 풍력발전의 고질적인 문제를 근본적으로 해결하기 위해 다양한 상황에서 풍력발전기가 최고의 효율을 낼 수 있는 조건을 도출했다. 실험에서의 변인(상황 및 조건)은 5가지로, 풍속, 풍향, 블레이드 길이, 피치각, 모양이며, 풍력발전기 모형을 이용해 강풍기로 바람을 가하는 방식으로 실험하였다. 그 결과 풍속과 생산 전압은 비례하고, 풍향이 정방향일수록 생산 전압이 높고, 가장 효율적인 블레이드 면적은 약  $25\text{cm}^2$ 이고, 피치각은 약  $24.7^\circ$ 이며, 대체로 블레이드 끝이 뾰족할수록 회전 속도가 높아 생산 전압이 높다는 결과를 얻었다. 이 추세는 대부분의 수평축 풍력발전기에 공통적으로 적용되어 풍력발전기의 기본적인 효율을 높일 수 있다는데 연구의 의의가 있다.

## I. 서론 (또는 연구의 필요성 및 목적)

최근 기후 위기가 심해짐에 따라 재생에너지가 어느 때보다 절실해졌다. 이 중 가장 대표적인 재생에너지인 풍력발전은 지속 가능한 재생에너지에 해당하지만 효율이 10%에도 미치지 못할 정도로 생산량이 저조하고, 생산량이 날씨의 영향을 많이 받는다는 단점이 있다. 따라서 이 단점을 보완하기 위해 이전보다 거대한 풍력 발전기가 만들어지거나 여러 풍력 발전기를 한곳에 모아서 풍력 발전단지를 만드는 등 전력 생산량을 높이려는 노력이 계속되고 있다. 그러나 본 논문에서는 발전기 여러 개를 모으거나 큰 발전기를 개발하는 대신 이전보다 다양한 상황에서 더욱 효율적으로 전력을 생산할 수 있는 풍력발전기의 조건을 도출하여 풍력에너지의 저조한 효율이라는 문제점을 근본적으로 해결하려고 했다. 즉, 풍력발전기의 다양한 상황에서 가장 효율적인 조건을 탐구하는 본 연구는 지속 가능한 미래에 기여할 수 있다. 이를 위해서 풍력발전기가 바람을 받는 위치, 거리, 블레이드 피치각, 길이, 모양 등의 변수에서 가장 높은 전력을 생산하는 조건이 무엇인지 도출하는데 초점을 맞추어 실험을 진행하였다.

## II. 이론적 배경

### 풍력발전기 원리

풍력발전기의 바람을 이용하여 전기 에너지를 생산하는 장치이다. 풍력 발전은 지속 가능한 에너지 생산의 한 형태로, 환경 친화적이고 재생 가능한 에너지원으로 인정받고 있다.

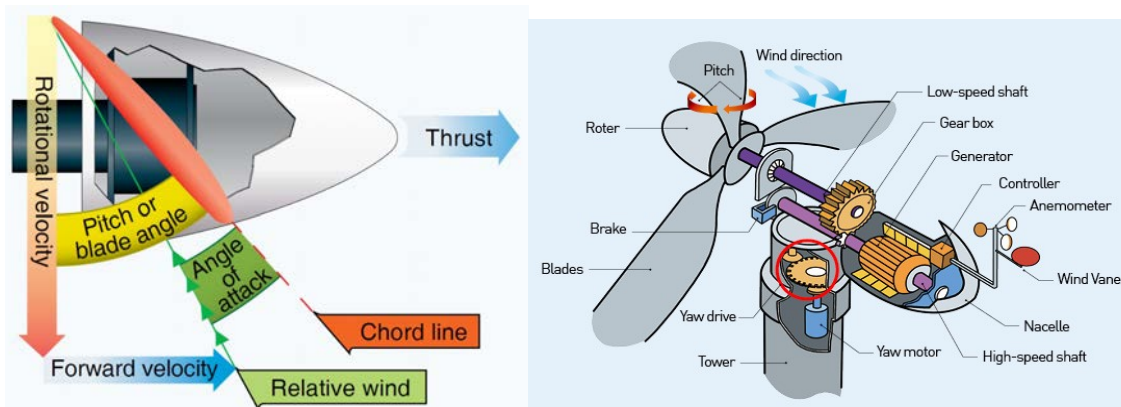
풍력발전기는 일반적으로 높은 위치에 설치된 큰 회전하는 날개 또는 로터를 가지고 있다. 바람이 날개를 통과할 때, 날개에 붙어있는 로터로 힘을 전달하여 회전시킨다. 회전하는 로터는 회전 에너지를 전기에너지로 변환시키는 발전기를 구동한다. 구체적으로는 다음과 같다.

바람이 불면 축을 중심으로 블레이드가 회전하며 바람을 회전운동 에너지로 변환한다. 주축에서 블레이드가 만든 회전력을 회전 속도를 높여주는 증속기로 전달한다. 주축과 베어링으로 연결된 증속기가 주축으로부터 건네받은 저속의 회전운동 에너지를 기계의 힘을 통해 고속으로 변환한다. 증속기에서 고속으로 변환된 회전운동 에너지를 발전기가 전기에너지로 전환한다. 바람이 불면 블레이드가 회전함으로써 자석이나 코일이 회전하며 유도 전류를 만드는 것이다. 코일은 정전기 유도현상을 이용해 전압을 만드는데, 정전기 유도현상은 대전체를 도체에 가까이하면 대전체와 가까운 부분에는 대전체와 다른 전하가, 먼 부분에는 같은 전하가 유도되는 현상이다. 발전기는 코일 안의 대전체를 움직임으로써 정전기 유도를 일으킨다.

### 풍력발전기 종류

풍력발전기는 일반적으로 풍속, 날개의 크기와 형태, 그리고 기타 설치 조건에 따라서 다양한 크기와 유형으로 설치될 수 있다. 대형 풍력 발전소는 대량의 전기를 공급하기 위해 수십 개 이상의 풍력발전기를 설치하기도 하며, 작은 규모의 풍력 발전기는 주택이나 농장과 같은 지역적인 에너지 수요를 충족시키고 설치가 간편하다는 이점 때문에 사용되기도 한다. 풍력발전기 회전축을 기준으로 수평축 풍력발전기와 수직축 풍력발전기로 구분된다. 수평축 풍력발전기는 타워가 높아지면 양질의 전력을 생산할 수 있고, 효율이 높아 대형 풍력발전기에 주로 사용되지만, 바람의 방향에 영향을 받기 때문에 요잉시스템(블레이드를 바람 방향에 맞추어 나셀 회전)을 통해 풍력발전기를 바람의 방향에 맞춰주어야 한다. 수직축 풍력발전기는 풍향의 영향을 덜 받고 유지보수 접근성이 우수하지만 에너지 변환 효율이 수평축 풍력발전기에 비해 낮아 주로 소형 풍력발전기에 사용된다. 최근 풍력과 태양광 발전을 함께 할 수 있는 하이브리드 형태의 발전기도 존재한다.

## 풍력발전기 구조



피치각 [사진 1]

윈드 터빈의 구성 [사진 2]

블레이드: 바람의 운동에너지를 회전운동에너지로 변환

축: 블레이드의 회전력을 증속기와 발전기에 전달

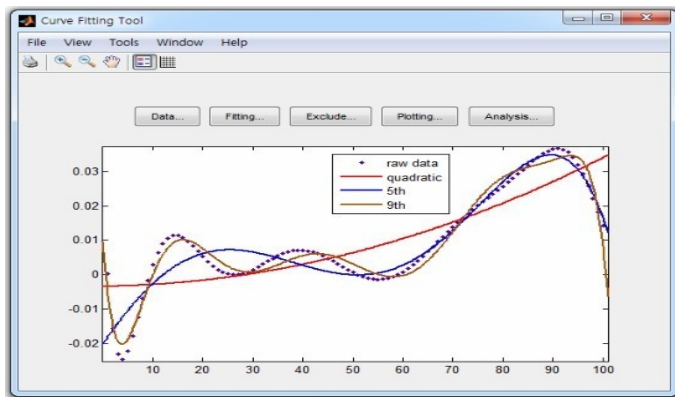
증속기: 주축의 저속회전을 고속회전으로 전환

발전기: 증속기로부터 전달받은 회전력을 전기에너지로 변환

피치 시스템: 풍속에 따라 블레이드 각도를 조절

로터: 블레이드와 터빈을 연결

## 2. Graph Fitting-Curve Fitting



[사진 3] - Graph Fitting의 예시

그래프 피팅(Graph Fitting)이란 데이터들을 어떤 적합한 곡선으로 맞추는 것을 말하며 이산적인 값 사이에 있는 점들을 근사화하는 추정 곡선(함수)을 얻거나

경향, 모델을 찾을 때 사용한다. Graph Fitting-Curve Fitting은 방법 상 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 보간법(Interpolation)이란 주어진 값들을 이용해 미지값에 대한 근사식을 도출하는 것을 말한다.

둘째, 회귀 분석(Regression Analysis)이란, 데이터 집단이 갖는 추세 모형을 도출하는 것을 말하며 각 점을 정확히 통과하지는 않지만 전체적인 경향을 갖는 곡선 추출이 가능하다. 일련의 변수들 간 확률적 관계를 가질 때, 특히 예측 변수/독립 변수와 반응 변수/종속 변수 간에 확률적 관계를 갖도록 취해진다. 이 관련성을 랜덤 변수의 가설적 함수 모형에 입각해 정확에서 정해지는 수학적 함수 관계식이 아닌 확률적 관계식으로 맞춤, 곡선 적합, 근사를 도모한다. 변수들 간 가설적 함수 관계(선형적 관계 등)를 탐색, 규명, 검증, 분석하거나 1개 이상의 여러 변수들의 변화로 다른 변수를 예측하는 데 사용한다. 우리가 사용한 Libre Office Calc에서는 최소 자승 근사법(Least Square Method)을 이용하며 이는 회귀 분석에 해당된다. 최소 자승 근사법이란 적은 수의 관찰값으로, 그 상황을 가장 잘 설명하는 모델 방정식을 예측하는 것을 말하며 전체를 대표하는 모델 방정식에서 각 항의 계수를 찾아 식을 도출한다. 최소 자승법은 관측 데이터와 모델 데이터 간에 추정된 값에 대한 오차의 제곱 합을 최소화하도록, 모델 식 내 파라미터(계수)를 결정하여 유도할 수 있다. 보간 다항식 유도-보간 함수(데이터를 모두 지나는 함수)에 대한 근사식으로, 다항식 보간법으로 찾았으며 테일러 근사, 최소 자승 근사, 푸리에 표현에 의한 근사 등의 종류가 있다.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 1. 연구 수행 개요

##### 1) 사전 자료 조사

수평축 윈드 터빈에 대한 배경지식을 조사하고 숙지한다.

##### 2) 실험 모형 제작

수평축 윈드 터빈 모형 5개를 제작한다. 윈드 터빈 모형은 3.5cm 높이의 판에 테이프로 고정하고, 모형 뒤에는 DC 모터와 멀티미터를 연결한 전선 회로를 만든다.

##### 3) 각 실험 별 통제 변인과 조작 변인

- 실험 (1)-강풍기와의 거리와 전압, 풍속의 관계 - 풍속(거리로 대체)

통제 변인: 풍향, 피치 각도, 블레이드 모양 및 면적

조작 변인: 풍속(거리)

- 실험 (2)-각도별 위치와 전압, 풍속의 관계 - 풍향(풍력발전기의 위치 변화로 대체)

통제 변인: 피치 각도, 블레이드 모양 및 면적

조작 변인: 풍향(각도 위치), 풍속(거리)

- 실험 (3)-블레이드 넓이, 전압의 관계 - 넓이

통제 변인: 풍속(거리), 풍향(각도 위치), 피치 각도, 블레이드 모양 및 면적

조작 변인: 블레이드 면적

- 실험 (4)-블레이드 피치각 변경에 따른 생산 전압 - 피치각

통제 변인: 풍속(거리), 풍향(각도 위치), 블레이드 모양 및 면적

조작 변인: 피치 각도

- 실험 (5)-블레이드 모양, 전압 간 관계 - 모양

통제 변인: 풍향(각도 위치), 피치 각도, 블레이드 면적

조작 변인: 풍속(거리), 블레이드 모양

#### 4) 실험 결과를 바탕으로 가장 효율적인 풍력발전기 조건 확립

실험을 통해 알아낸 각 풍속과 풍향 별 가장 효과적으로 전기를 생산하는 블레이드의 모양 및 면적, 피치각을 지닌 풍력발전기의 조건을 제시한다.

#### 가설설정

- 1) 거리가 멀어질수록 생산 전압이 줄어들 것
- 2) 윈드터빈이 강풍기 앞의 구역에서 벗어날 때 생산 전압이 크게 줄어들 것
- 3) 블레이드 면적이 넓어질수록 작용하는 바람이 많아지므로 생산 전압이 커질 것
- 4) 블레이드 피치각이 약 40°~50°일 때 생산 전압이 가장 클 것
- 5) 블레이드 끝부분이 뾰족할수록 생산 전압이 클 것

#### 기본 세팅

풍력발전기 모형을 조립하고 포함되어 있는 전압계를 제거하고 집계전선, DMM을 연결해 교류에서 전압을 측정할 수 있도록 한다. 회로와 풍력발전기를 약 3.5cm 높이의 판에 장착해서 강풍기와 수평이 되도록 했다. 모형은 총 5개를 조립해 상태가 좋은 것을 선별했다. 강풍기를 모형과 마주 보도록 배치했고 모델은 [신일 공기순환기 SIF-C09TS]이다.

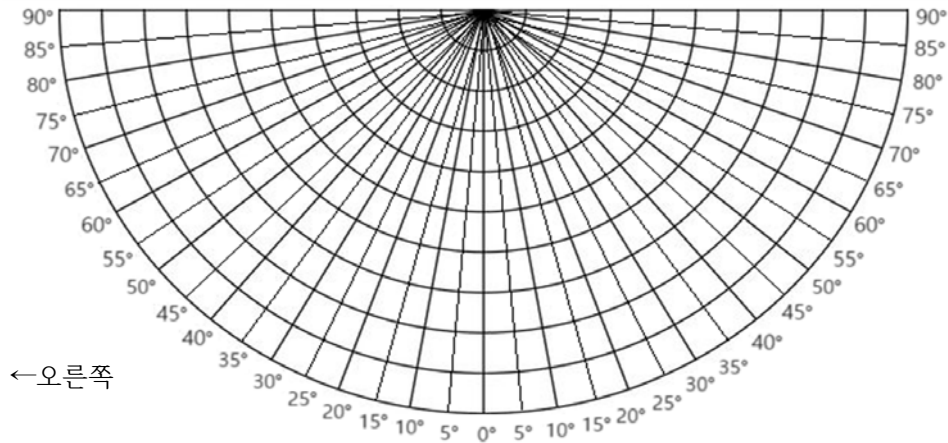
#### 1. <강풍기와의 거리와 전압, 풍속의 관계> 실험

강풍기의 세기를 터보로 한 후 TURBINE 1, 2의 거리를 5cm씩 0m에서 4m까지 뒤로 미치는 방법으로 실험하였고, 풍속계도 마찬가지로 뒤로 밀어가면서 풍력발전기가 있던 자리의 풍속을 측정하였다. 풍속 측정 시 직각으로 세워서 높이를 측정할 수 있도록 한 자를 사용해 일정한 높이에서 풍속을 측정했다. 각 위치에서 전압은 2번, 풍속을 1번 측정하였다.

참고문헌 [1]에서 위 실험과 같이 선풍기를 사용하여 실험하였으나 거리를 변화시켜 풍속의 변화를 구현하지는 않았고 참고문헌 [3]에서는 시뮬레이션을 이용하여 수학적으로 실험하였다는 점이 본 실험과 차이점이다.

> 변인 : 거리/전압, 거리/풍속

## 2. <각도별 위치와 전압, 풍속의 관계> 실험



바람이 불어오는 방향을 측정하기 위해 고안한 실험이다. 강풍기의 방향을 바꾸는 대신 풍력발전기의 위치를 바꾸었다.

각도별 위치란 강풍기의 중심을 기준으로 할 때 원의 둘레 위에 있는 점을 말한다. ‘각도별 위치’는 피타고라스 정리를 이용해서 빗변의 길이를 계산하는 방법으로 빗변의 제곱의 제곱근을 구하는 과정에서 최대한 정수에 가까운 값을 구해서 위치를 정하려고 했으나, 각 각도에 따른 위치의 빗변의 길이를 정수에 가까운 값으로 맞추는 과정에서 강풍기와의 거리가 각각의 위치마다 다르게 계산되었다. 이에 따라 연구 중 오류가 우려되어 더 간편한 방법인 각도기의 중심을 기준으로 1m 자를 회전시키는 방법으로 실험하였다. 이 방법은 강풍기와의 직선거리가 정확하게 일정해서 이전의 문제를 해결할 수 있다. 각도의 범위는 강풍기의 오른쪽을 기준으로 0°~90°로 정했고, 강풍기와의 거리는 20, 40, 60, 80, 100cm일 때의 값을 모두 도출했다. 풍력 발전기는 강풍기와 평행하게 위치시켰고, 풍속 또한 같은 방법으로 측정하였다.

참고문헌에서 풍향을 변수로 측정한 실험은 없었다.

> 변인 : 풍력발전기 위치/전압, 풍력발전기 위치/풍속

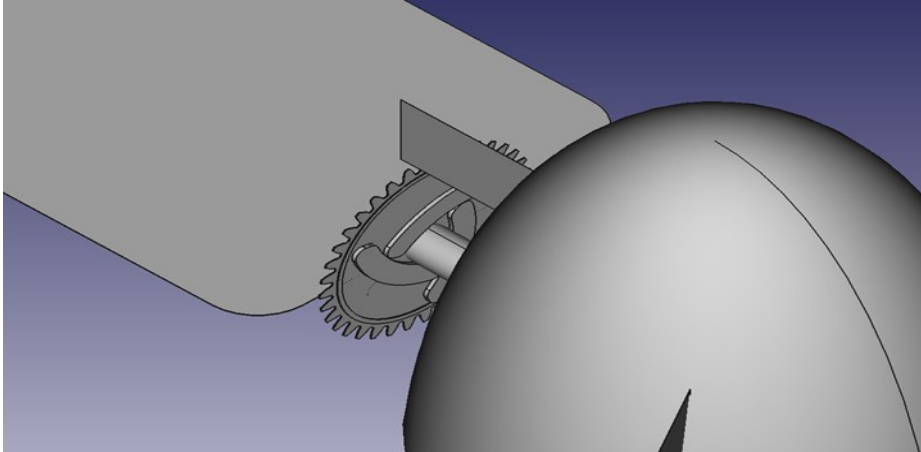
## 3. <블레이드 넓이, 전압의 관계>

풍력 발전기 로터에 붙어있던 기존의 블레이드 넓이를 점점 감소시키는 방법으로 측정하였다. 사다리꼴형 기존의 블레이드(높이 18.4cm, 윗변 2.7cm, 아랫변 3.9cm)에서 높이를 1cm씩 줄이면서 원래 블레이드와 닮은 크기가 되도록 하기위해 높이 1cm, 윗변 0.15cm, 아랫변 0.21cm씩 줄이면서 전압이 0이 될 때까지 측정을 계속한다. 이렇게 점점

줄여나가는 블레이드의 넓이는 다음과 같다. (60.72, 54.29, 48.22, 42.5, 37.15, 32.16, 27.53, 23.26, 19.34, 15.79, 12.6, 9.77, 7.3, 5.18, 3.43, 2.04, 1.01 단위 : cm<sup>2</sup>)

> 변인 : 블레이드 넓이/전압

#### 4. <블레이드 피치각 변경에 따른 생산 전압> 실험

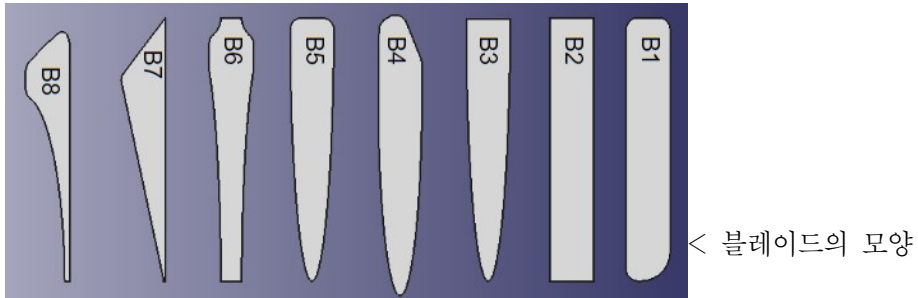


블레이드 피치각을 조절하기 위한 방법으로 3가지 방안을 구상했는데, 자석으로 블레이드를 고정 시키는 것, 축을 이용해서 조절하는 것, 톱니바퀴를 이용해서 조절하는 방안이 그것이다. 이중 가장 정확하게 조절할 수 있는 세 번째 방안을 채택해서 블레이드 피치각은 수정테이프의 톱니바퀴를 이용해 각도를 일정하게 조절할 수 있도록 했으며 동일한 부품을 로터에 3개 붙여서 블레이드와 연결했다. 블레이드 뒤에 플라스틱 막대 부품과 고정시켜 바람에 블레이드가 밀려 내구도를 보완하고 생산 전력이 줄어드는 현상을 해결했다. 측정은 강풍기의 정면 80cm 거리에서 피치각을 0°~90°까지 10°씩 변경하며 생산 전압을 측정하였다.

참고문헌 [1]에서는 피치각을 조절하기 위해 로터에 나사를 이용해서 블레이드 피치각을 조절하도록 하였으나 이 방법은 나사가 돌아감에 따라 미세한 블레이드 반지름의 변화가 일어나고 10°단위로 각도를 특정하기 어려우므로 실험에서는 이 방법을 사용했다. 참고문헌 [3]에서는 실제 풍력발전 시스템의 운전시 피치각을 변동시키는 상황을 크게 3가지 경우로 구분하여 비상정지, 가동원활, 출력제한에 대한 각각의 상황이 어떤 경우에 나타나는지 설명하기 위해 그 상황을 가정하여 시뮬레이션했는데, 본 실험에서는 풍력발전기가 일정한 바람에 노출된다고 가정하고 일정한 풍속에서 어떤 피치각이 가장 효율이 높은지를 구하는 것을 목적으로 연구해서 이 부분이 다르다고 볼 수 있다.

> 변인 : 블레이드 피치각 / 전압

## 5. <블레이드 모양, 전압 간 관계> 실험



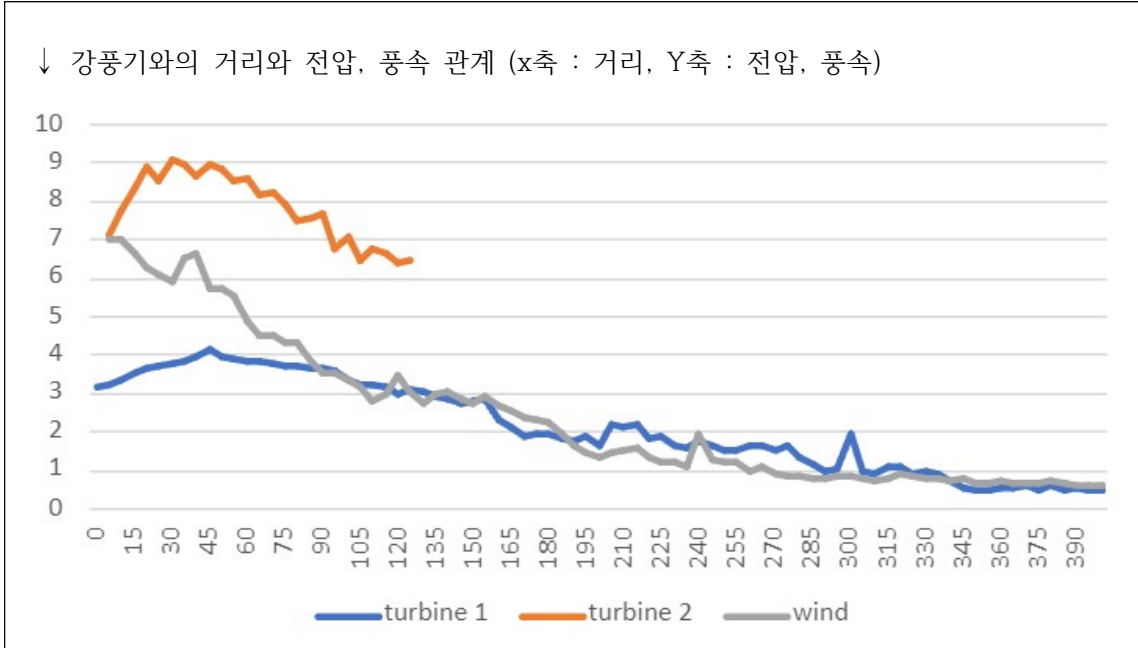
HDPE 판에 8가지 모양의 블레이드를 3개씩 제작한다. 같은 종류의 블레이드 3개를 윈드 터빈에 붙이고 전압을 측정한다. 다른 블레이드로 바꾸어 가며 과정을 반복한다. 블레이드를 만들고 보니 블레이드마다 넓이에 차이가 있어 블레이드의 모양이 아니라 넓이, 길이가 전압에 영향을 줄 수 있어 각 블레이드의 무게를 재서 블레이드 간 넓이의 비를 구한 후 원래 블레이드와 HDPE 소재의 블레이드의 각각의 1cm<sup>2</sup>의 무게를 측정해서 각 블레이드의 넓이를 구했다. (넓이는 무게에 비례한다는 것을 이용한 것이다.)

참고문헌 [1]에서는 블레이드를 2종류만은 제작했고 날개 폭과 단면, 형태만을 차이를 주었으나 본 실험은 8가지 블레이드를 고안하여 실험 결과를 분석해 효율이 높은 블레이드의 경향을 발견해내었다,

#### IV. 연구 결과

##### 실험 결과

##### 1. <강풍기와의 거리와 전압, 풍속의 관계> 실험 결과



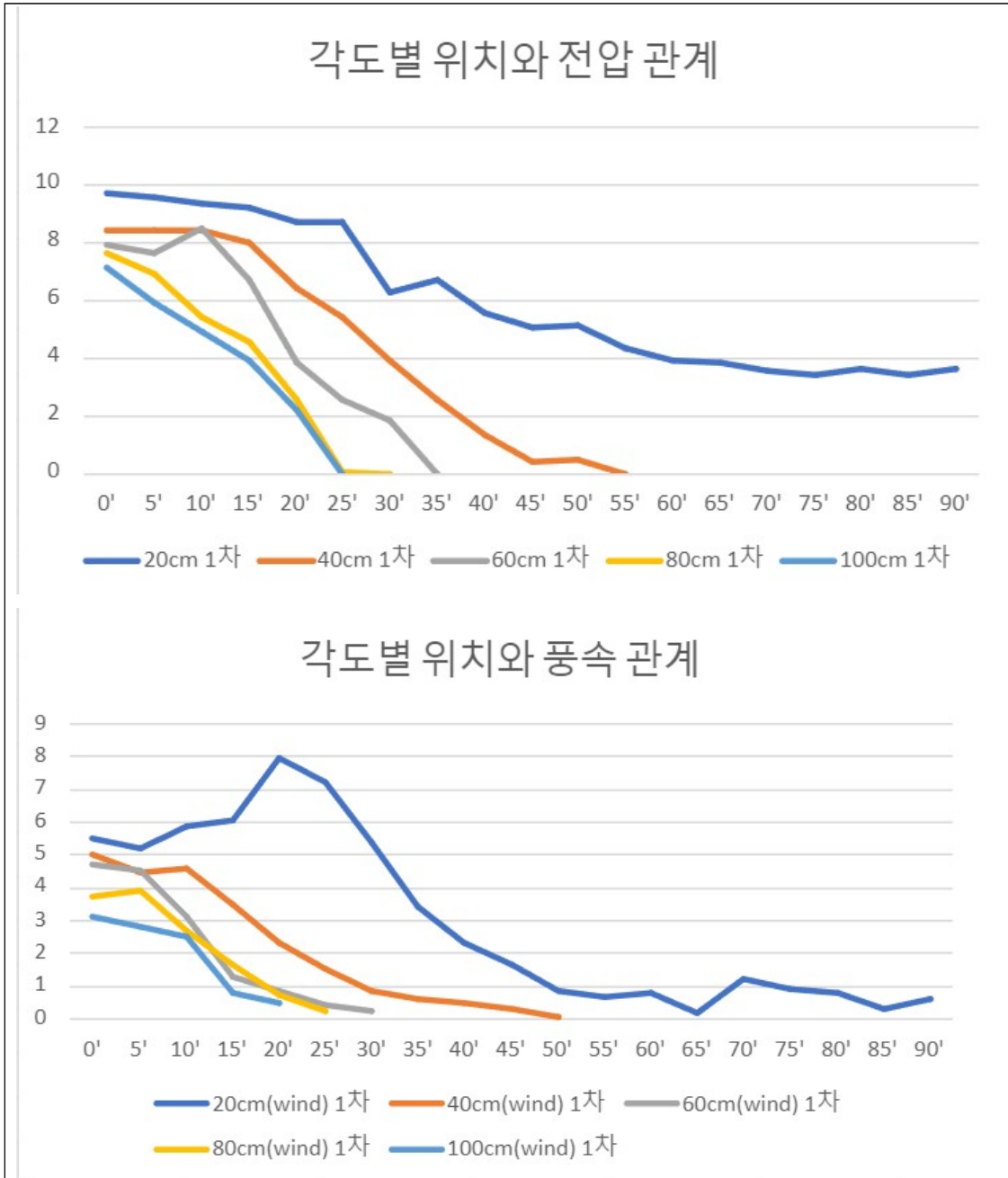
풍력 발전기의 경우, 45cm 전후로 추세가 바뀐다. 45cm보다 가까울 때는 멀어질수록 전압이 증가하지만, 45cm보다 멀 때는 멀어질수록 전압이 감소한다. 바람은 멀어질수록 풍속이 감소한다. TURBINE 1과 2의 전압에 차이가 있는 이유는 발전기에 포함된 전류계를 터빈 2에서만 제외했기 때문이다. 실험과 더불어 이 전압계의 저항을 계산하였으나 정확한 값은 계산하지 못한 것으로 보인다. 그러나 전압계가 회로에서 많은 영향을 주고 있음을 알게 되어 이를 제거했을 때보다 변화를 더 잘 측정할 수 있었다.

거리(cm)	turbine 1 전압	거리(cm)	turbine 2 전압	거리(cm)	wind 풍속
0	3.15	0		0	
5	3.225	5	7.15	5	7
10	3.347	10	7.72	10	7.031
15	3.549	15	8.35	15	6.641
20	3.628	20	8.89	20	6.267
25	3.743	25	8.51	25	6.101
30	3.775	30	9.11	30	5.911
35	3.868	35	8.93	35	6.524
40	3.939	40	8.63	40	6.659
45	4.13	45	8.94	45	5.719

50	3.99	50	8.81	50	5.711
55	3.93	55	8.52	55	5.561
60	3.833	60	8.6	60	4.852
65	3.864	65	8.17	65	4.538
70	3.804	70	8.24	70	4.511
75	3.745	75	7.93	75	4.347
80	3.739	80	7.47	80	4.347
85	3.642	85	7.58	85	3.861
90	3.65	90	7.68	90	3.539
95	3.577	95	6.78	95	3.527
100	3.342	100	7.04	100	3.375
105	3.227	105	6.48	105	3.16
110	3.246	110	6.75	110	2.775
115	3.165	115	6.64	115	2.997
120	3.005	120	6.37	120	3.48
125	3.095	125	6.45	125	3.034
130	3.075	130		130	2.724
135	2.953	135		135	2.963
140	2.879	140		140	3.02
145	2.732	145		145	2.837
150	2.823	150		150	2.77
155	2.884	155		155	2.909
160	2.29	160		160	2.691
165	2.137	165		165	2.536
170	1.909	170		170	2.402
175	1.939	175		175	2.286
180	1.947	180		180	2.263
185	1.841	185		185	1.939
190	1.79	190		190	1.653
195	1.915	195		195	1.456
200	1.638	200		200	1.312
205	2.193	205		205	1.434
210	2.112	210		210	1.498
215	2.185	215		215	1.598
220	1.857	220		220	1.337
225	1.873	225		225	1.233
230	1.633	230		230	1.212
235	1.602	235		235	1.084
240	1.775	240		240	1.942
245	1.662	245		245	1.29
250	1.543	250		250	1.224

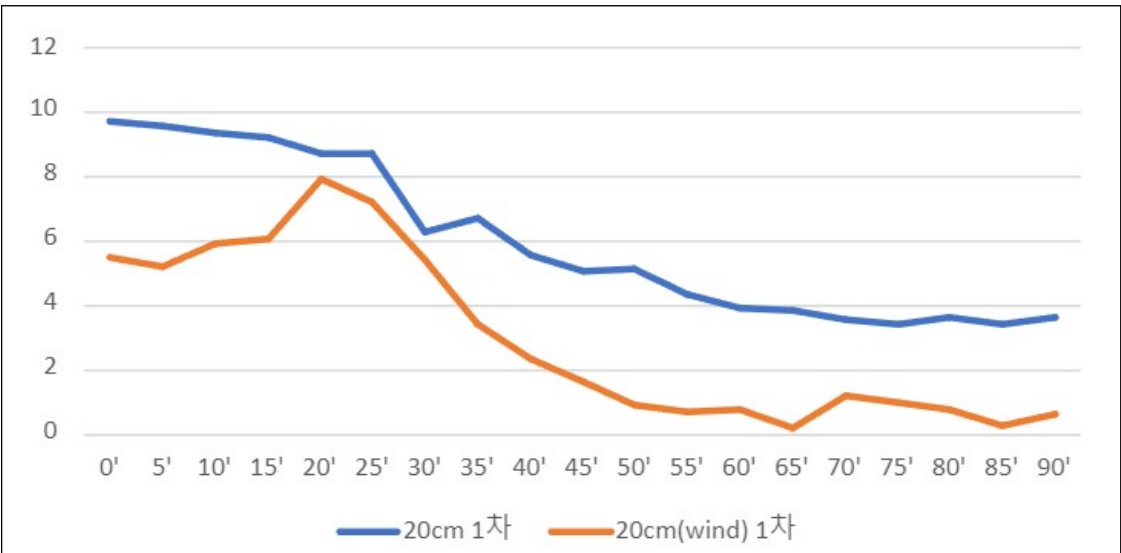
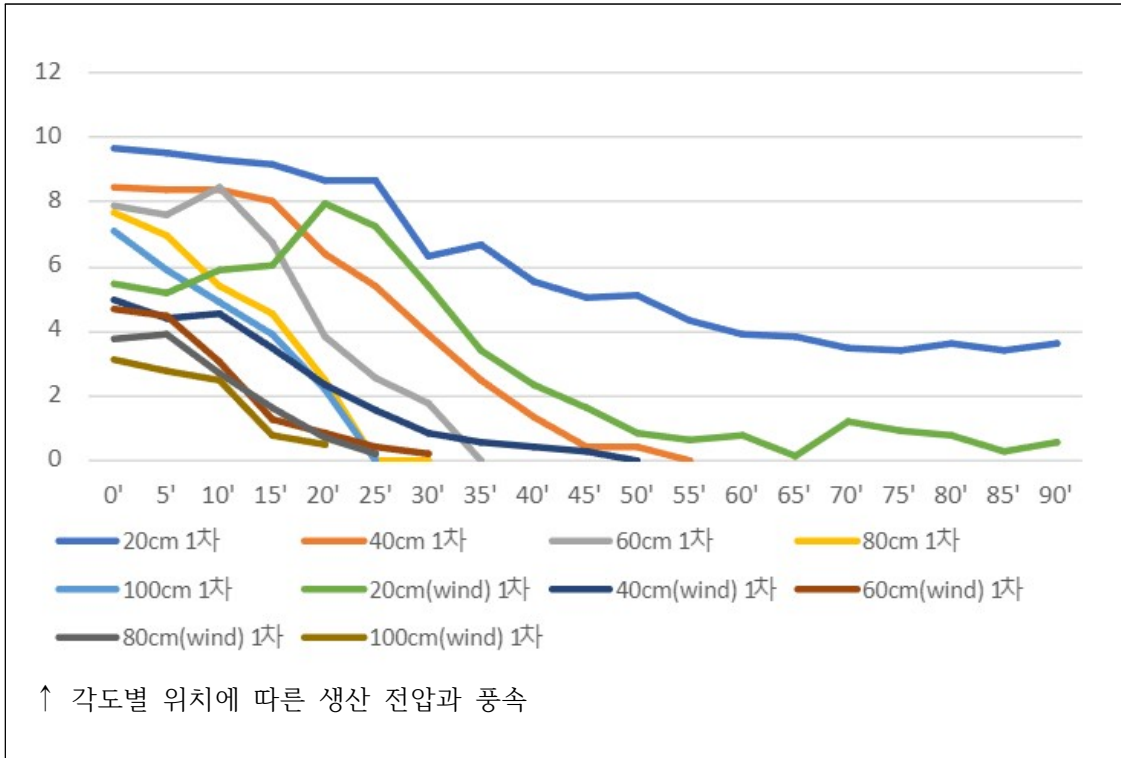
255	1.512	255		255	1.199
260	1.636	260		260	1.004
265	1.67	265		265	1.105
270	1.52	270		270	0.934
275	1.617	275		275	0.878
280	1.37	280		280	0.856
285	1.174	285		285	0.812
290	0.958	290		290	0.809
295	1.03	295		295	0.852
300	1.961	300		300	0.841
305	0.982	305		305	0.81
310	0.894	310		310	0.742
315	1.074	315		315	0.761
320	1.092	320		320	0.889
325	0.927	325		325	0.857
330	0.978	330		330	0.795
335	0.884	335		335	0.79
340	0.722	340		340	0.739
345	0.528	345		345	0.771
350	0.502	350		350	0.691
355	0.492	355		355	0.677
360	0.565	360		360	0.722
365	0.562	365		365	0.652
370	0.604	370		370	0.674
375	0.502	375		375	0.681
380	0.586	380		380	0.749
385	0.503	385		385	0.683
390	0.531	390		390	0.615
395	0.48	395		395	0.638
400	0.457	400		400	0.583

2. <각도별 위치와 전압, 풍속의 관계> 실험 결과

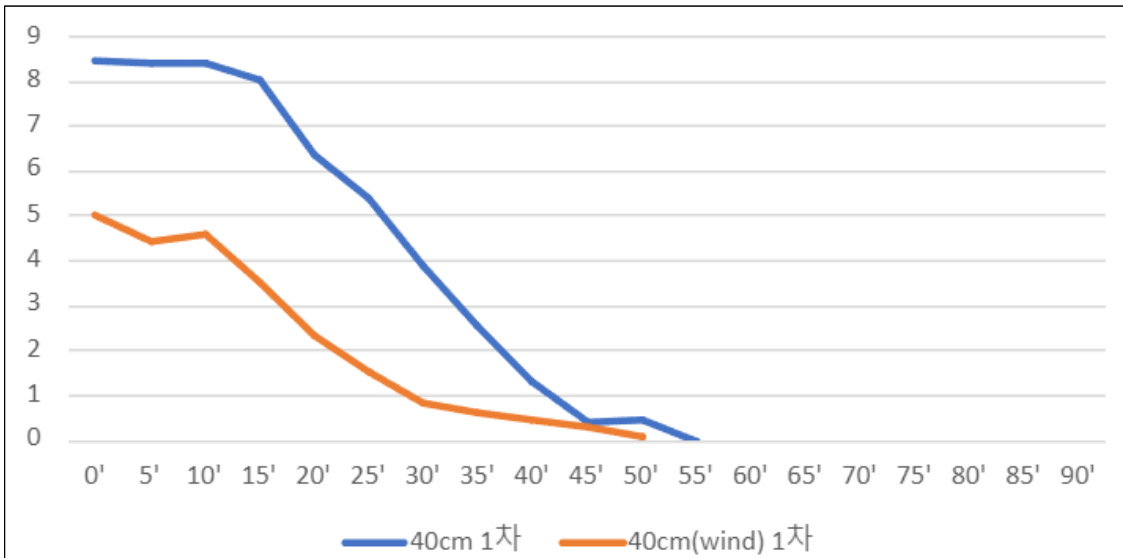


풍력 발전기는 각도별 위치가 벌어질수록 생산 전압이 줄어든다. 거리가 먼 경우일수록 감소하는 추세가 크고 더 빨리 0에 도달한다. 20cm의 경우는 아예 0에 도달하지 않았다. 풍속 또한 20cm에서의 경우를 제외하고 위치가 벌어질수록 감소하는 추세를 보인다. 거리가 멀수록 더 빨리 0에 도달한다.

20cm의 경우 180°의 경우에도 블레이드 끝이 강풍기에 노출되기 때문에 계속 돌아가며 일정한 것으로 보인다. 주로 바람이 부는 구역이 있는데 그 구역을 벗어날 때 급격히 전압과 풍속이 줄어드는 것으로 보인다.

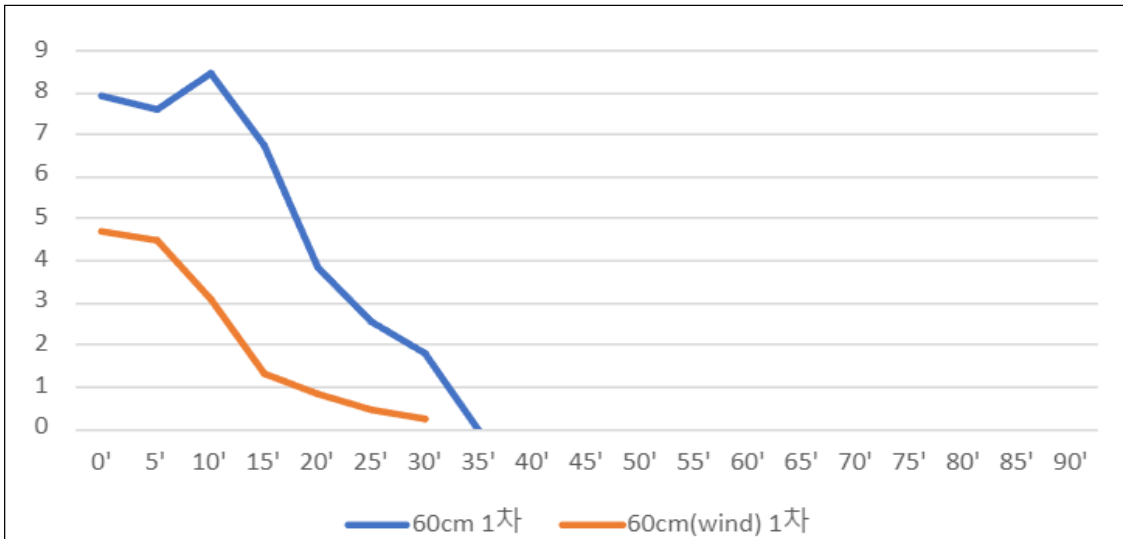


20cm에서의 전압, 풍속  
 115' 위치까지는 어느정도 일정하다가 이후 둘 다 급격히 감소한다. 그러나 180' 위치가 되어도 0에 도달하지는 않는다.



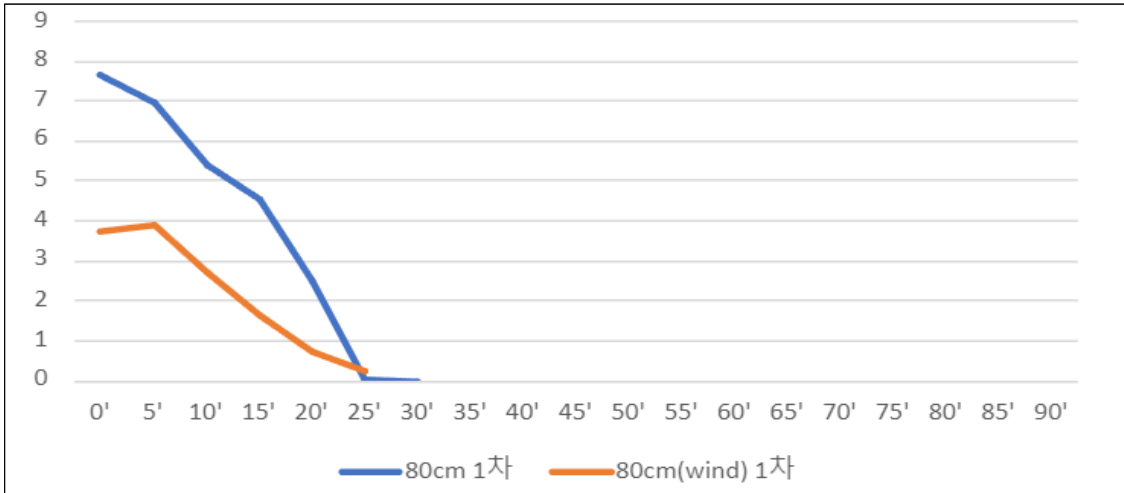
40cm에서의 전압, 풍속

20' 위치까지는 어느정도 일정하다가 이후 둘 다 급격히 감소한다. 50'쯤에서 0에 도달한다.



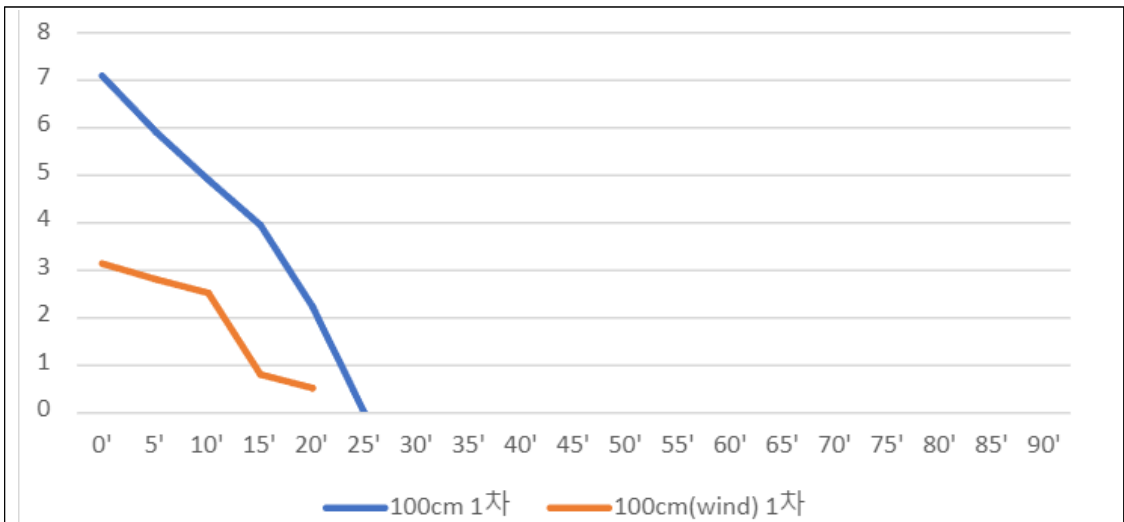
60cm에서의 전압, 풍속

95'까지 일정하다가 역시 감소한다. 120' 쯤에 0에 도달한다.



80cm에서의 전압, 풍속

95' 까지 일정하다가 감소한다. 115'쯤에 0에 도달한다.



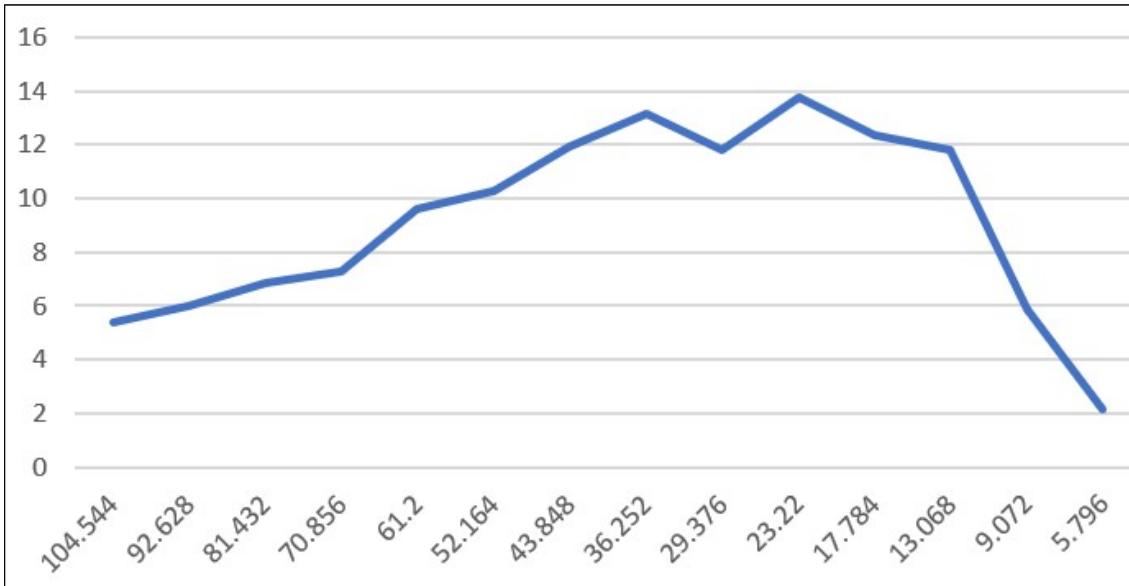
100cm에서의 전압, 풍속

90'부터 계속 감소한다. 115'쯤에서 0에 도달한다.

20cm 1차	20cm 2차	40cm 1차	40cm 2차	60cm 1차	60cm 2차	80cm 1차	80cm 2차	100cm 1차	100cm 2차
9.67	9.44	8.45	8.38	7.92	7.93	7.65	7.69	7.11	7.7
9.53	9.62	8.39	8.17	7.6	7.2	6.94	6.9	5.91	6.15
9.32	9.25	8.41	8.13	8.47	7.38	5.39	5.32	4.9	4.96
9.19	9.26	8.01	7.61	6.73	6.8	4.56	4.16	3.94	3.34
8.68	8.66	6.39	6.18	3.867	3.798	2.519	1.76	2.22	2
8.7	8.7	5.42	5.14	2.58	2.268	0.05	0.57	0	0
6.3	6.35	3.89	4.06	1.8	1.09	0	0		
6.68	6.19	2.53	2.33	0	0				
5.53	5.59	1.34	1.35						
5.07	5.3	0.424	0.45						
5.1	4.89	0.452	0.39						
4.33	4.37	0	0						
3.89	3.87								
3.85	3.715								
3.53	3.66								
3.44	3.31								
3.64	3.45								
3.423	3.412								
3.65	3.71								

20cm (wind) 1차	20cm (wind) 2차	40cm (wind) 1차	40cm (wind) 2차	60cm (wind) 1차	60cm (wind) 2차	80cm (wind) 1차	80cm (wind) 2차	100cm (wind) 1차	100cm (wind) 2차
5.5	5.22	5	5.06	4.69	4.753	3.76	3.34	3.13	3
5.19	4.96	4.44	4.51	4.51	3.8	3.92	4.01	2.802	2.602
5.9	5.76	4.57	4.89	3.1	3.2	2.71	2.56	2.5	2.72
6.04	6.3	3.52	3.58	1.3	1.52	1.66	1.49	0.8	0.95
7.94	7.92	2.34	2.75	0.86	0.82	0.75	0.64	0.49	0.42
7.22	6.79	1.56	1.72	0.45	0.56	0.22	0.27		
5.4	4.94	0.86	0.895	0.26	0.28				
3.4	3.41	0.6	0.72						
2.33	2.18	0.48	0.39						
1.65	1.42	0.3	0.33						
0.89	0.9	0.06	0.02						
0.7	0.65								
0.78	0.79								
0.16	0.15								
1.2	1.1								
0.95	1.19								
0.78	0.73								
0.28	0.4								
0.6	0.57								

3. <블레이드 넓이, 전압의 관계> 실험 결과

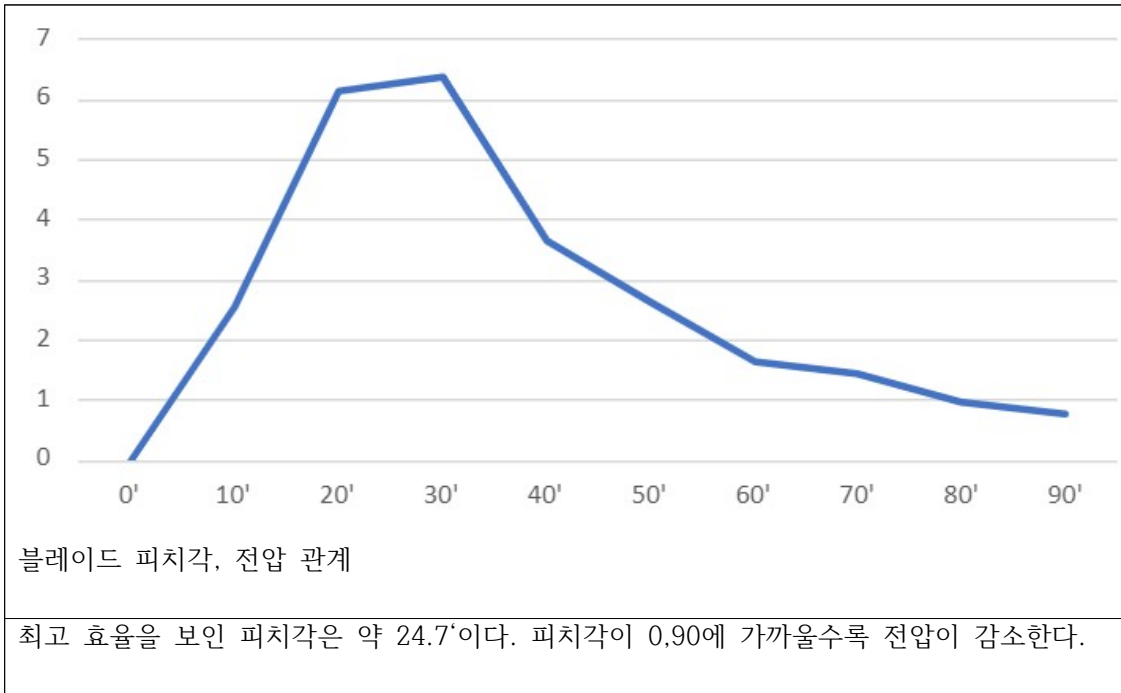


블레이드 넓이, 전압 관계

23.22cm<sup>2</sup>까지는 넓이가 줄어들 때 전압이 증가한다. 반면 23.22cm<sup>2</sup> 이후 넓이가 줄어들수록 전압도 줄어든다. 회전운동 법칙에 따라 23.22cm<sup>2</sup>까지는 블레이드 길이가 짧아지므로 회전 속도가 빨라지지만 이후로는 블레이드 길이 감소보다 블레이드 면적이 감소해서 바람을 받는 면적이 줄어든다는 영향이 더 커서 전압이 감소한다고 추측한다.

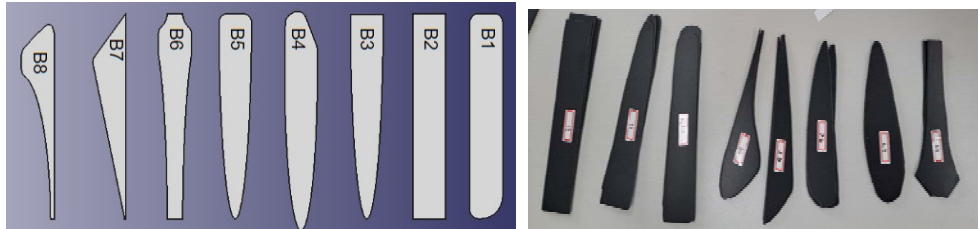
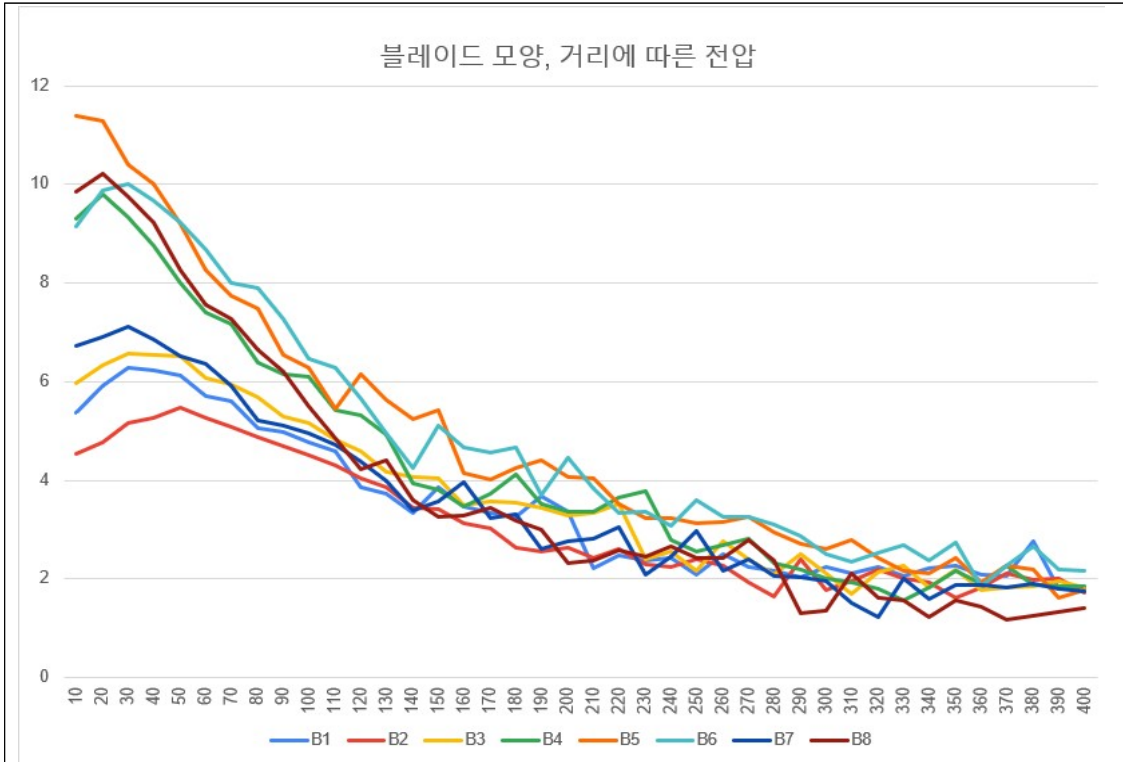
넓이(cm <sup>2</sup> )	전압
60.72	5.37
54.29	6
48.22	6.83
42.5	7.26
37.15	9.6
32.16	10.28
27.53	11.91
23.26	13.16
19.34	11.83
15.79	13.74
12.6	12.38
9.77	11.8
7.3	5.88
5.18	2.14

4. <블레이드 피치각 변경에 따른 생산 전압> 실험 결과



피치각	전압
0'	0.001
10'	2.54
20'	6.15
30'	6.39
40'	3.64
50'	2.64
60'	1.66
70'	1.46
80'	0.96
90'	0.76

5. <블레이드 모양, 전압 간 관계> 실험 결과



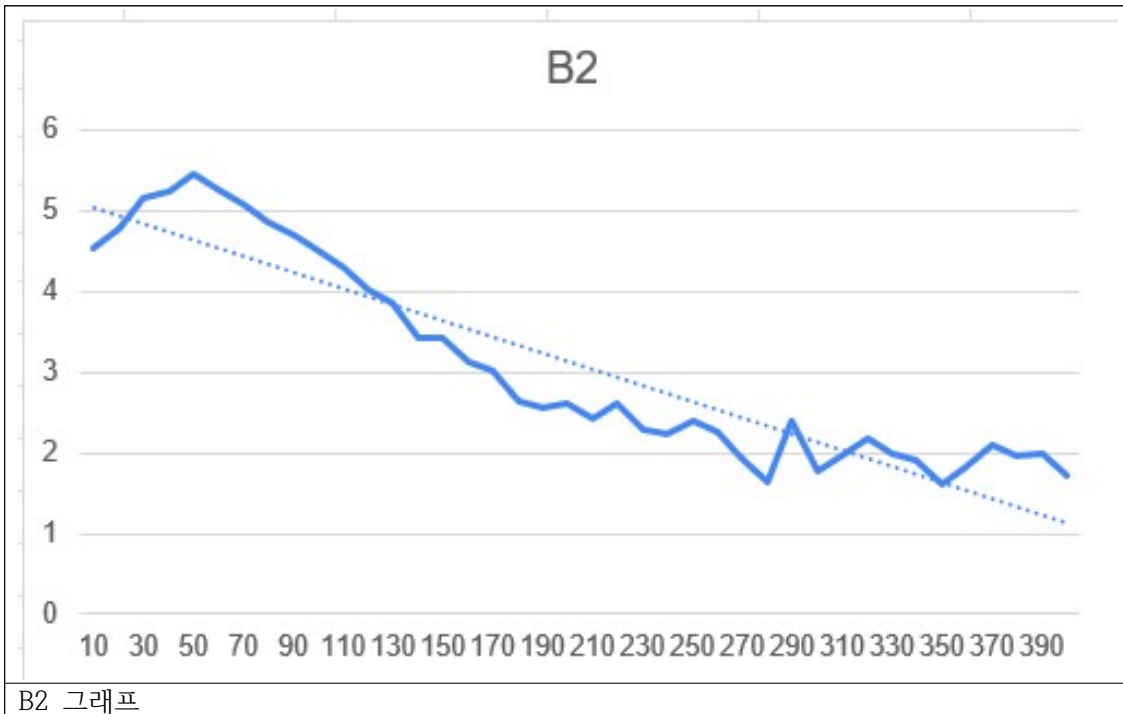
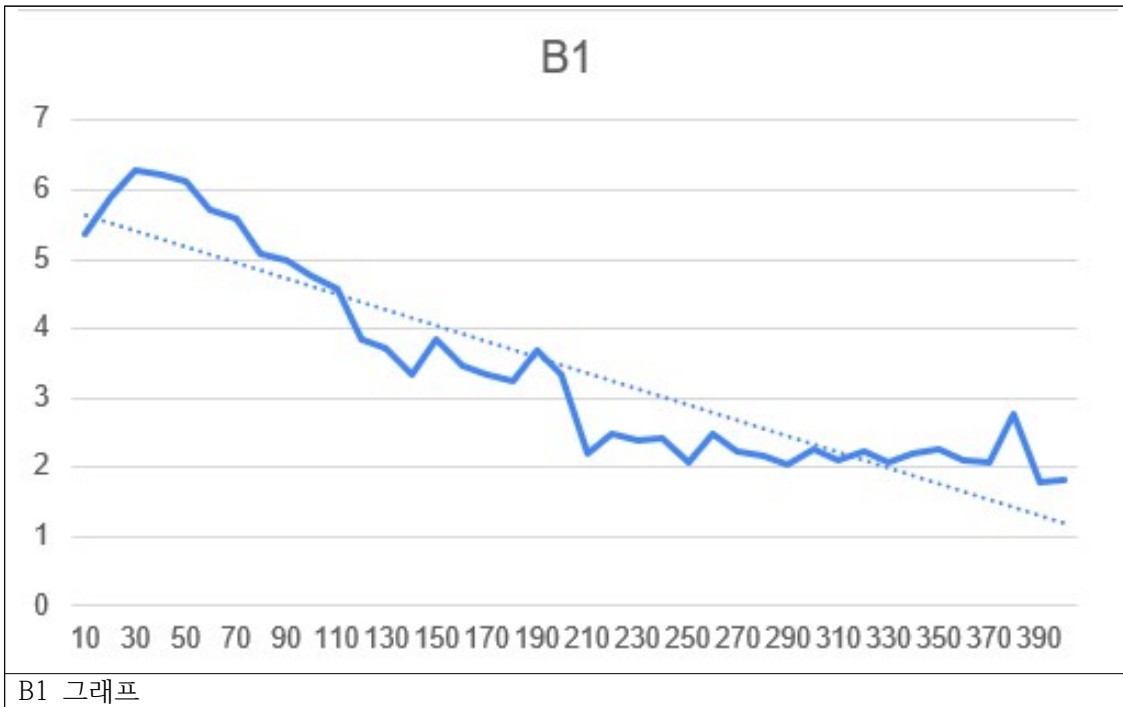
검은색 HDPE소재와 기존 블레이드 소재를 단위넓이로 잘랐을 때의 질량

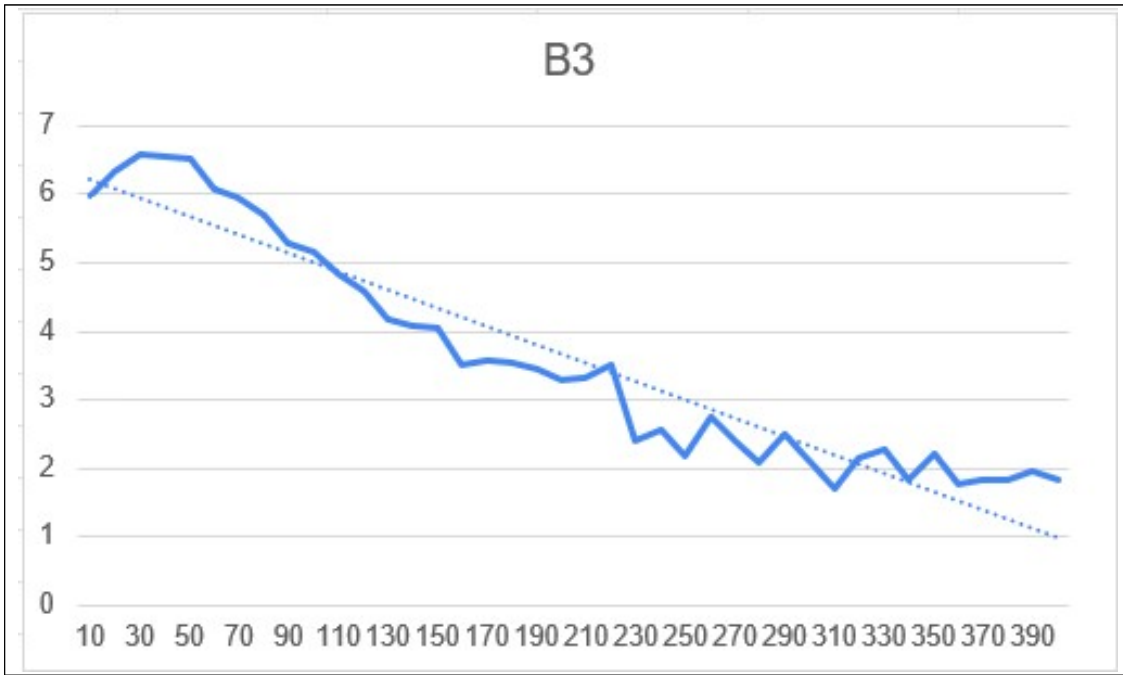
black		white	
1cm <sup>2</sup>	0.0826	1cm <sup>2</sup>	0.053
9cm <sup>2</sup>	0.7594		
25cm <sup>2</sup>	1.9547		

위 소재별 단위 넓이당 무게를 이용해 유도한 각 블레이드의 무게와 넓이.

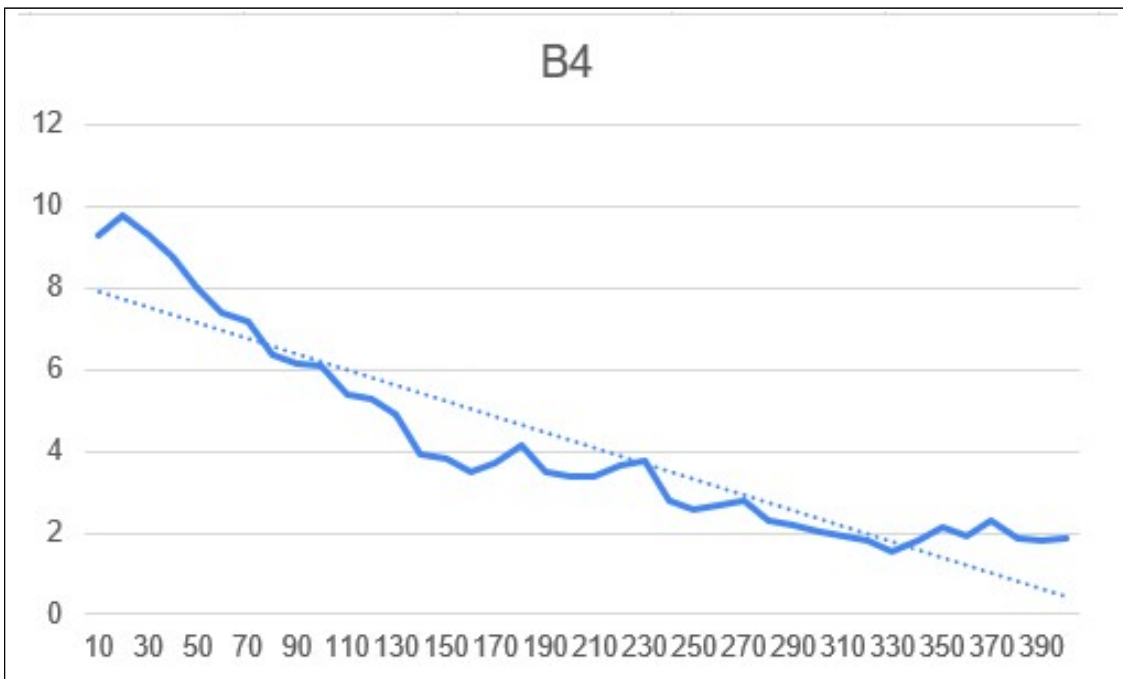
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
g	5.1859	5.7754	4.6252	3.6293	4.1136	3.2184	3.1812	3.3194
cm <sup>2</sup>	62.827	69.92	55.995	43.938	49.801	38.964	38.513	40.186

모든 블레이드가 거리가 멀어질수록 전압이 낮아진다. 초반에 끝이 뾰족한 B4, B5, B6, B8은 생산 전압이 나머지 B1, B2, B3, B7보다 높게 나왔고, 후반에서는 모두 비슷했다. 다만 실험에 사용한 블레이드의 넓이가 모두 달라서 무게를 재어 비율을 따졌음에도 끝부분이 뾰족한 블레이드의 전압이 더 높았다. 끝부분의 회전관성이 작은 블레이드이므로 회전도 빨랐던 것으로 추측한다.

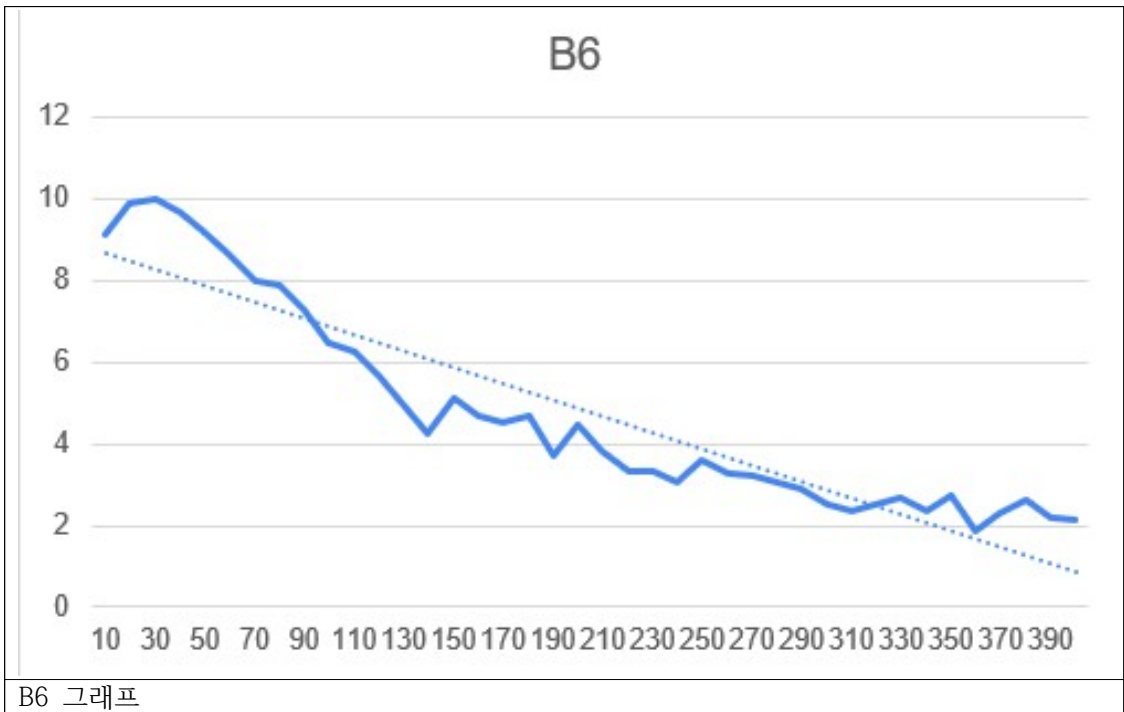
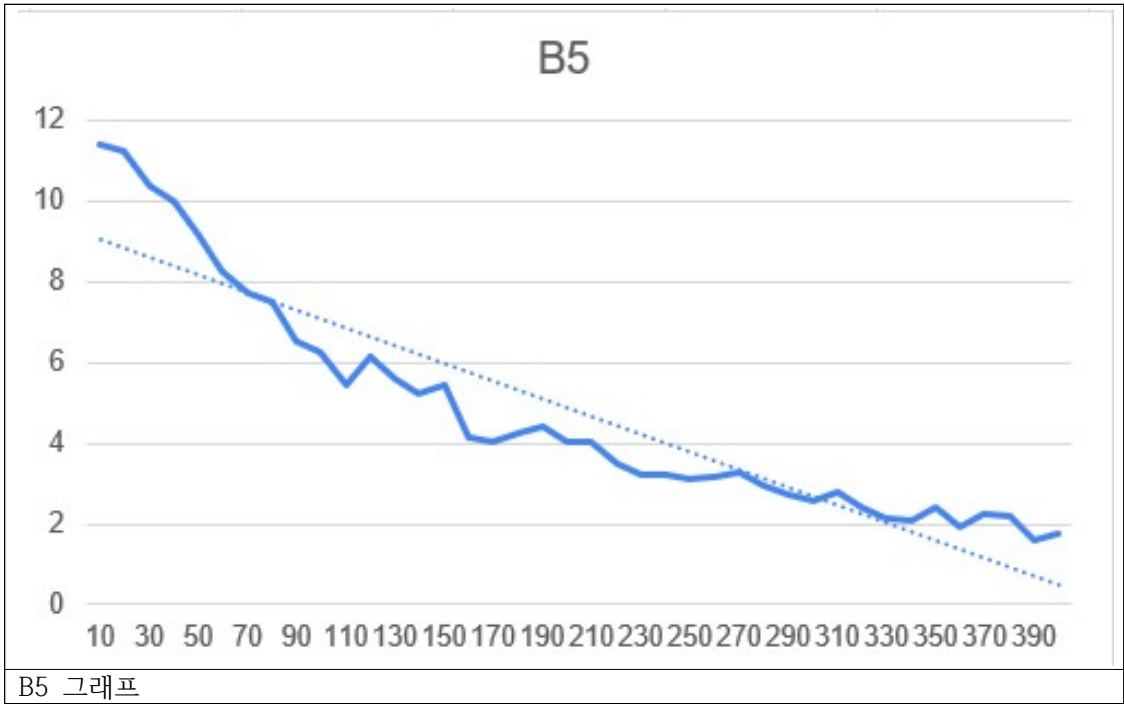


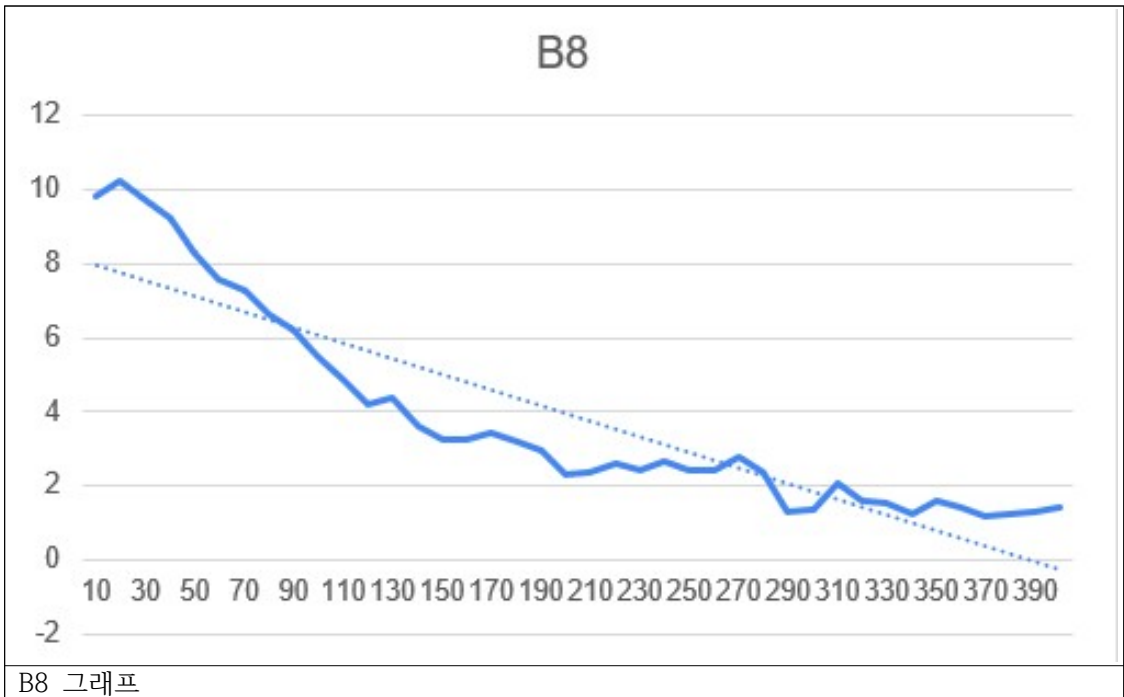
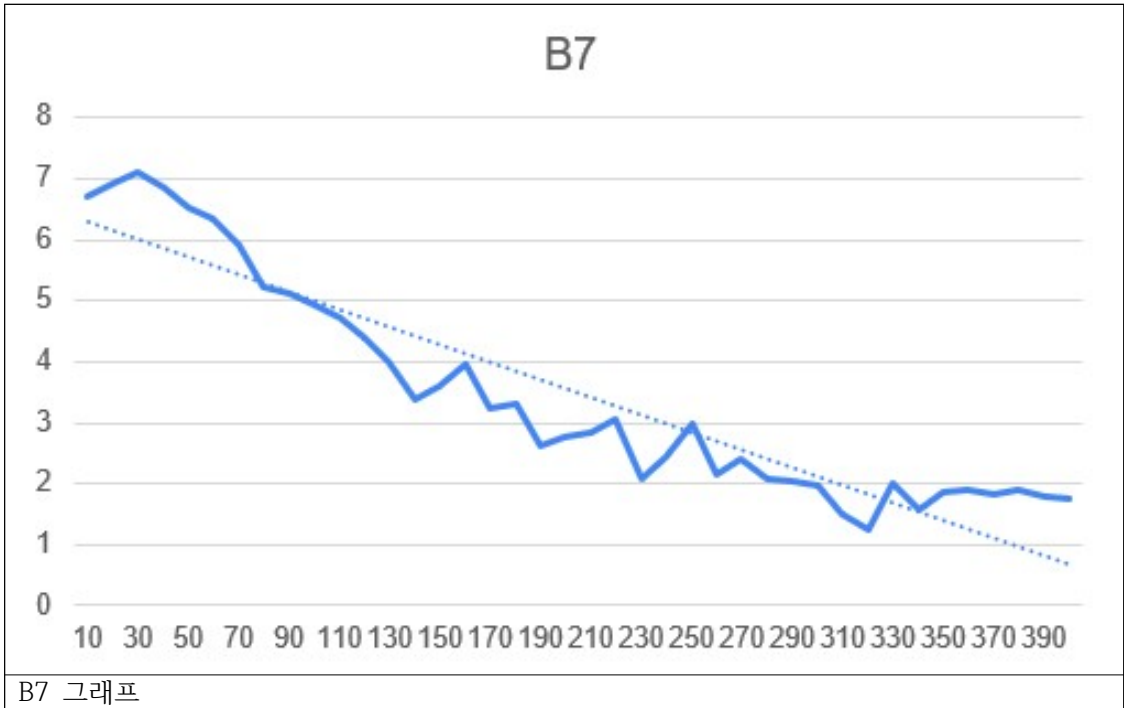


B3 그래프



B4 그래프





거리(cm)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
10	5.36	4.54	5.98	9.3	11.4	9.15	6.72	9.84
20	5.91	4.78	6.34	9.79	11.28	9.89	6.92	10.23
30	6.27	5.16	6.57	9.33	10.41	10.02	7.11	9.74
40	6.23	5.26	6.54	8.75	10.01	9.67	6.85	9.22
50	6.13	5.47	6.52	8.01	9.2	9.22	6.52	8.27
60	5.7	5.27	6.07	7.41	8.26	8.67	6.35	7.56
70	5.6	5.08	5.94	7.17	7.75	8.01	5.92	7.28
80	5.07	4.87	5.69	6.39	7.49	7.9	5.22	6.65
90	4.97	4.7	5.29	6.15	6.53	7.28	5.1	6.2
100	4.76	4.51	5.15	6.09	6.29	6.47	4.95	5.5
110	4.58	4.31	4.83	5.42	5.44	6.27	4.72	4.86
120	3.86	4.04	4.59	5.31	6.15	5.65	4.39	4.23
130	3.73	3.86	4.16	4.93	5.62	4.95	3.98	4.4
140	3.35	3.43	4.07	3.95	5.23	4.25	3.396	3.59
150	3.86	3.42	4.04	3.81	5.43	5.11	3.581	3.27
160	3.467	3.137	3.5	3.48	4.14	4.67	3.967	3.28
170	3.332	3.017	3.58	3.73	4.02	4.55	3.237	3.45
180	3.254	2.638	3.543	4.13	4.25	4.67	3.3	3.181
190	3.674	2.565	3.445	3.51	4.41	3.7	2.607	2.991
200	3.351	2.623	3.288	3.374	4.06	4.47	2.753	2.322
210	2.209	2.43	3.328	3.373	4.03	3.83	2.824	2.368
220	2.49	2.616	3.524	3.65	3.512	3.34	3.043	2.589
230	2.381	2.289	2.388	3.786	3.246	3.357	2.095	2.458
240	2.417	2.232	2.563	2.794	3.239	3.09	2.451	2.665
250	2.085	2.397	2.175	2.564	3.124	3.6	2.982	2.422
260	2.494	2.277	2.758	2.686	3.151	3.27	2.167	2.43
270	2.242	1.93	2.399	2.805	3.27	3.25	2.412	2.787
280	2.162	1.643	2.091	2.328	2.956	3.091	2.071	2.37
290	2.045	2.396	2.491	2.197	2.715	2.877	2.032	1.309
300	2.247	1.772	2.123	2.02	2.602	2.506	1.965	1.361
310	2.107	1.953	1.698	1.918	2.791	2.349	1.513	2.102
320	2.239	2.186	2.147	1.812	2.418	2.518	1.231	1.616
330	2.072	2.004	2.26	1.552	2.159	2.68	2.011	1.567
340	2.211	1.918	1.838	1.836	2.101	2.384	1.585	1.222
350	2.267	1.614	2.2	2.153	2.434	2.742	1.879	1.577
360	2.093	1.827	1.762	1.914	1.919	1.859	1.889	1.445
370	2.057	2.109	1.825	2.277	2.269	2.279	1.814	1.163
380	2.768	1.976	1.842	1.881	2.189	2.648	1.905	1.262
390	1.787	1.996	1.949	1.841	1.616	2.192	1.802	1.318
400	1.82	1.727	1.833	1.847	1.781	2.153	1.755	1.404

## 결과분석

- 그래프 피팅 중 보간법(최소자승법)을 이용하여 실험 데이터 그래프를 함수로 구현함.

### 1. <강풍기와의 거리와 전압, 풍속의 관계> 실험 결과

풍력 발전기의 경우, 45cm 전후(풍속 5.7m/s 이하)로 추세가 바뀐다. 45cm보다 가까울 때는 멀어질수록 전압이 증가하지만, 45cm보다 멀 때는 멀어질수록 전압이 감소한다. 거리가 멀어질수록 풍속이 감소한다. 45cm 이전에서 전압이 오히려 늘어난 것은 블레이드 지름이 강풍기의 팬보다 길어서 강풍기에서 나온 바람이 초반에는 블레이드에 온전히 영향을 미치지 못했기 때문이라고 추측한다.

$$Voltage = \frac{75321}{d^2} \quad (d = distance)$$

$$Speed\ of\ Wind = -3\ln(d) + 6 \quad (d = distance)$$

### 2. <각도별 위치와 전압, 풍속의 관계> 실험 결과

각도별 위치가 멀어질수록 생산 전압이 줄어든다. 거리가 먼 경우일수록 감소하는 추세가 크고 더 빨리 0에 도달한다. 20cm의 경우는 아예 0에 도달하지 않았다. 풍속 또한 20cm에서의 경우를 제외하고 위치가 멀어질수록 감소하는 추세를 보인다. 거리가 멀수록 더 빨리 0에 도달한다.

20cm의 경우 180°의 경우에도 블레이드 끝이 강풍기에 노출되기 때문에 계속 돌아가며 일정한 것으로 보이며, 주로 바람이 부는 곳이 따로 있고 그 구역을 벗어날 때 급격히 전압과 풍속이 줄어드는 것으로 보인다.

$$Voltage = 10.33^{-0.14\theta_2} \quad (\theta_2 = \text{각도별 위치})$$

### 3. <블레이드 넓이, 전압의 관계> 실험 결과

23.22cm<sup>2</sup>까지는 넓이가 줄어들 때 전압이 증가한다. 반면 23.22cm<sup>2</sup> 이후 넓이가 줄어들수록 전압도 줄어든다. 회전운동 법칙에 따라 23.22cm<sup>2</sup>까지는 블레이드 길이가 짧아지므로 회전 속도가 빨라지나 이후로는 블레이드 길이 감소보다 블레이드 면적이 감소해서 바람을 받는 면적이 줄어든다는 영향이 더 커서 전압이 감소한다고 추측한다.

$$Voltage = 19.2^{-0.124s} \quad (s = surface, s \geq 25)$$

$$Voltage = 0.3 * s^{1.4} \quad (s = surface, s \leq 25)$$

#### 4. <블레이드 피치각 변경에 따른 생산 전압> 실험 결과

그래프 피팅으로 그래프의 추세를 분석하면 최고 효율을 보인 피치각은 약 24.7°이다. 피치각이 0°, 90°에 가까울수록 전압이 감소한다. 피치각이 변화할 때 바람을 받는 면적과 입자의 충격에 의한 작용이 회전력으로 전환되는 비율은 서로 반비례하는데, 그 두 요소가 서로 영향을 받아 24.7°이라는 최대 값이 나온 것으로 추측한다.

$$Voltage = \frac{4311}{\theta_1^2} \quad (\theta_1 \geq 24.7, \theta_1 = \text{pitch angle})$$

$$Voltage = -0.0007\theta_1^3 + 0.28\theta_1^2 + 0.52\theta_1 + 0.0001 \quad (\theta_1 = \text{pitch angle}, \theta_1 \leq 24.7)$$

#### 5. <블레이드 모양, 전압 간 관계> 실험 결과

모든 블레이드가 거리가 멀어질수록 전압이 낮아진다. 초반에 끝이 뾰족한 B4, B5, B6, B8은 생산 전압이 나머지 B1, B2, B3, B7보다 높게 나왔고, 후반에서는 모두 비슷했다. 다만 실험에 사용한 블레이드의 넓이가 모두 달라서 무게를 제어 비율을 따졌음에도 끝부분이 뾰족한 블레이드의 전압이 더 높았다. 블레이드가 뾰족할수록 끝부분의 회전관성이 작아 더 회전수가 높아 생산 전압이 높다고 추측한다.

- 날개 모양을 수치로 표현하는 것이 불가능하므로 식을 도출할 수 없다.

## V. 결론 및 제언

본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 강풍기와 풍력 발전기 사이의 거리가 가까울수록 풍력 발전기의 생산 전압이 높다.
- 블레이드에 가해지는 풍속이 빠를수록 회전 속도와 생산 전압이 높다.
- 2) 풍력 발전기의 위치가 풍원(風原)의 정면에 위치할수록 풍력 발전기의 생산 전압이 높다.
- 3) 블레이드 면적이 25cm<sup>2</sup>보다 넓을 때 오히려 생산 전압이 적었고, 25cm<sup>2</sup>보다 좁아질수록 생산 전압이 적어져 가장 효율적인 넓이는 약 25cm<sup>2</sup>이다.
- 4) 피치각이 약 24.7°일 때 풍력 발전기의 효율이 최대이다.
- 5) 대체로 블레이드 끝이 뾰족할수록 회전 속도가 높아 생산 전압이 높다.

또한, 실험 결과에서 얻은 데이터의 공식들을 합성하여 하나로 합쳐서 요약했다. 유도 과정은 다음과 같다. 실험 시 변인 5개 중 4개는 일정하게 유지시키고 하나만 조정했고 값은 모두 전압으로 설정했으므로 5개의 식을 합칠 때 합치는 식의 변수가 아닌 나머지의 것들은 모두 상수 취급하고 이항해서 정리했다. 따라서, 아래의 통합 공식은 변수 5개가 한번에 달라지는 것이 아니라 하나만 달라질 때 유효하다. 또한 이 식은 본 연구에서 사용한 모형 풍력 발전기 모델에만 해당하는 값이며, 다른 풍력 발전기에 적용하면 생산 전압값은 맞지 않지만 추세는 동일하다.

$$\text{Speed of Wind} = k \frac{d^2}{\theta_1^2} * \ln\left(\frac{e^2}{d}\right) * 10.33^{-0.14\theta_2}$$

$$\text{Voltage} = k \frac{10.33^{-0.14\theta_2}}{\theta_1^2 d^2} * \ln\left(\frac{e^2}{d}\right) * 19.2^{-0.124S} \quad - \quad S > 25\text{cm}^2$$

$$\text{Voltage} = k \frac{10.33^{-0.14\theta_2}}{\theta_1^2 d^2} * \ln\left(\frac{e^2}{d}\right) * S^{1.4} \quad - \quad S < 25\text{cm}^2$$

본 연구는 참고문헌 [1]과 비교할 때 참고문헌 [1]은 저풍속에서 효율이 좋은 블레이드 형태와 피치각이 생산값에 많은 영향을 준다는 것이 결론이었으나, 본 실험은 5가지 변인에서 전압의 추세를 도출하여 분석하고 공식을 도출했다는 점이 차이가 있다. 또한 참고문헌 [3]은 비상정지, 가동원활, 출력제한 3가지 상황에서 피치각이 각 시점에 가장 효율적인 형태로 조절될 때 전압의 변화를 구체적으로 시뮬레이션했으나, 본 실험은 실제 모형으로 일정한 바람에서 가장 효율적인 피치각을 구했음이 차이점이다.

따라서, 본 논문은 발전기 여러 개를 모으거나 큰 발전기를 개발하는 대신 이전보다 다양한 상황에서 더욱 효율적으로 전력을 생산할 수 있는 풍력 발전기의 조건을 도출하여 풍력에너지의 저조한 효율이라는 문제점을 근본적으로 해결하려고 했으므로, 풍력발전기의 다양한 상황에서 가장 효율적인 조건을 탐구하는 본 연구는 지속 가능한 미래에 기여할 수 있다.

## VI. 참고문헌

[1] 이종덕·송민중, 블레이드 형태와 피치각이 풍력터빈의 출력에 미치는 영향, 2008

[2] 송가영·선민영, 윈드 블레이드 출력 극대화 설계에 관한 연구,  
한국기계기술학회지 제23권 제3호, pp. 432~438, 2021

[3] 송승호·정병창, 피치각을 고려한 풍력발전기 출력특성 시뮬레이션 모델의 응용,  
2006

[사진 1] <https://skyfalcon.tistory.com/80>, 3 page

[사진 2] 풍력발전 터빈의 구성, [https://www.knrec.or.kr/biz/korea/intro/kor\\_wind.do](https://www.knrec.or.kr/biz/korea/intro/kor_wind.do),  
3 page

[사진 3] raw data, 2차 커브 피팅, 5차 커브 피팅, 9차 커브 피팅,  
[https://blog.naver.com/PostView.naver?blogId=lgrange0115&logNo=220680744561  
&parentCategoryNo=&categoryNo=&viewDate=&isShowPopularPosts=false&from=po  
stView](https://blog.naver.com/PostView.naver?blogId=lgrange0115&logNo=220680744561&parentCategoryNo=&categoryNo=&viewDate=&isShowPopularPosts=false&from=postView), 4 page

[본문 내용 출처 - 이론적 배경]

정보통신기술용어해설 - Curve Fitting, Approximation 곡선 적합, 커브 피팅,  
근사, [http://www.ktword.co.kr/test/view/view.php?m\\_temp1=4666](http://www.ktword.co.kr/test/view/view.php?m_temp1=4666), 4 page

[이용 프로그램]

Libere Office Calculator

물리B

11\_태양광 패널의 온도 변화에 따른 효율과  
바람을 활용한 효율 개선 방법 탐구



# 태양광 패널의 온도 변화에 따른 효율과 바람을 활용한 효율 개선 방법 탐구

김진현 (서울갈산초등학교 6학년)

지도교수 : 박재용 (서울교육대학교 과학교육학과)

## 초록

본 연구는 태양광 패널의 온도 상승이 발전 효율에 미치는 영향과 고온으로 인해 발생 가능한 발전 비효율을 자연 바람을 통해 해결할 방안에 대해 연구한 것이다. 태양광 패널 온도를 상승시키며 발전량을 측정한 결과 35.38℃가 되는 시점부터 발전량이 현저히 하락하는 현상이 관측되었다. 이를 고려해 패널 온도를 40℃까지 상승시킨 후 자연 바람을 통해 온도를 35℃ 이하로 효과적으로 낮출 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 본 연구를 위해 특별한 장치가 없는 일반적인 패널 거치대(이하 '일반거치대')와 벤츄리 현상 등을 활용해 패널 뒤편으로 가속된 바람을 유도하는 구조물이 부착된 거치대 2종(각각 "풍속 유도 거치대1", 풍속 유도 거치대1 대비 더욱 바람을 패널에 집중시키도록 개조한 "풍속 유도 거치대2")을 고안하였다. 3종의 거치대에 설치된 태양광 패널 온도를 40℃까지 상승시킨 후 동일한 풍속의 바람을 가했을 때 35℃까지 냉각시키는데 걸리는 시간을 측정한 결과 일반거치대는 평균 288.3초, 풍속 유도 거치대1은 평균 203.3초, 풍속 유도 거치대2는 평균 168.3초 소요되었다. 이를 통해 벤츄리 현상을 활용해 높은 풍속을 유도할 수 있는 구조물을 패널 거치대에 설치하는 방법으로 패널 냉각 시간을 최대 41.6%까지 개선하여 태양광 패널의 발전 효율을 높일 수 있음을 확인할 수 있었다.

## I. 서론

### 1. 탐구동기

환경오염이 심해지면서 최근 친환경에너지가 주목받고 있다. 다양한 종류의 친환경 에너지에 대한 연구들이 진행되고 있지만 가장 널리 보급된 친환경에너지는 태양광 에너지이다. 태양광 발전의 경우 이미 아파트 단지 내에서도 창문에 설치된 소형 태양광 패널을 흔히 볼 수 있을 정도로 보편화된 기술이다. 하지만 화석연료를 사용하는 발전과 비교시 여전히 보조적인 발전 수단에 머물러 있다. 이는 여전히 전통적인 연료 발전 방법에 비해 비싸고, 발전 효율이 떨어지기 때문이라는 생각이 들었다. 이 때문에 태양광 패널의 발전 효율 개선 방법에 관심을 가지게 되었다.

다양한 요소들이 태양광 발전 효율에 영향을 미치지만, 선행연구 조사에 따르면 태양광 패널의 온도 역시 태양광 발전의 효율에 영향을 미친다는 사실을 알게 되었다. 특히 한여름 태양광 패널의 온도가 과도하게 상승하면 발전 효율이 떨어진다는 것이 확인되었다. 이러한 선행연구를 통해 패널 온도 상승으로 인한 발전효율 저하

현상을 해결할 방법에 대해 고민하게 되었고, 온도 상승을 해결하는 방법 역시 친환경적인 방법을 활용할 수 없을지를 고민하게 되면서, 본 연구를 시작하게 되었다.

## 2. 연구의 필요성 및 목적

최근 화석연료 사용으로 인한 환경오염 문제가 심각해지면서 신재생에너지가 주목 받고 있다. 신재생에너지 중 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 에너지는 태양광 에너지이다. 그럼에도 불구하고 전통적인 화석연료 발전 방식 대비 보조적인 발전 방법에 머무르고 있는 한계점을 감안할 때 태양광발전의 이용을 확대하기 위해서는 태양광 발전의 효율성 개선을 위한 연구가 필요하다.

선행연구에 따르면 일사량, 온도, 주위 구조물에 의한 그늘 등 다양한 요소들이 태양광 발전의 효율을 저하시키는 원인이 된다. 이 중 온도의 경우 급격한 온도 상승이 태양광 비효율의 원인이 되며, 이를 해결하기 위해 전기적 장치들을 활용해 차가운 공기, 냉매 등을 패널에 공급하여 패널 온도를 낮추는 방법들이 연구되고 있는 것으로 파악된다. 하지만 인위적인 전기 장치가 아닌 자연적인 바람을 통해 패널의 온도를 낮출 수 있는 방법을 고안할 수 있다면 냉각을 위한 전기 소비를 줄일 수 있어서, 더욱 태양광발전 효율 개선에 의미 있는 연구가 될 것으로 판단된다. 또한 본 연구를 통해 기존 태양광 발전시설로부터 더 많은 에너지를 만들 수 있게 된다면 화석연료 대비 태양광 발전의 효율을 더 개선할 수 있어 신재생 에너지 활성화에 더욱 도움이 될 수 있을 것이다.

## 3. 연구문제

- 연구문제 1: 패널 온도가 상승할 때 태양광 패널의 발전 효율은 어떤 변화가 발생할까?
- 연구문제 2: 패널 온도가 상승할 경우 자연 바람을 통해 상승한 패널 온도를 낮출 수 있을까?
- 연구문제 3: 바람을 통해 패널 온도를 낮출 수 있다면 어떤 방법을 활용하여 패널에 전달될 바람의 양과 속도를 증가시켜 패널을 더 빨리 냉각시킬 수 있을까?

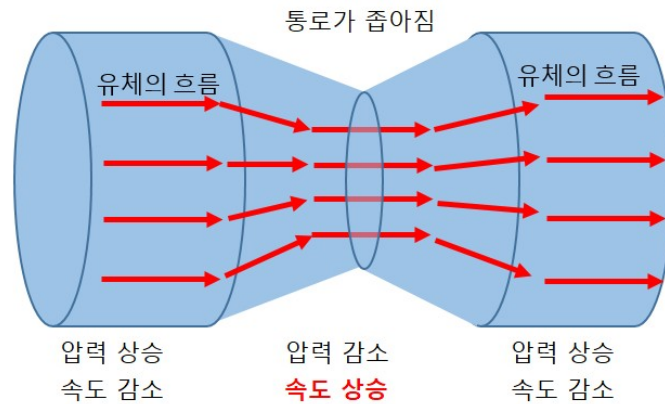
## II. 이론적 배경

### 1. 주요 배경 지식 및 용어정리

가. 태양광 발전: 태양의 빛에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 발전기술로서 햇빛을 받으면 광전효과에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용한 발전방식이다.

나. 베누리 현상: 유체가 지나가는 길의 단면적이 좁아질 때, 압력이 감소하면 속도

가 증가하는 현상이다. 동일한 부피의 유체가 관 안을 이동할 때 한 단면을 동일한 시간 내에 통과해야 하기 때문에 통로가 넓은 곳과 좁은 곳을 동일한 부피의 유체가 같은 시간 내에 통과하려면 좁은 통로를 지날 때 더 빨리 지나가게 된다.



[그림1] 벤추리 효과

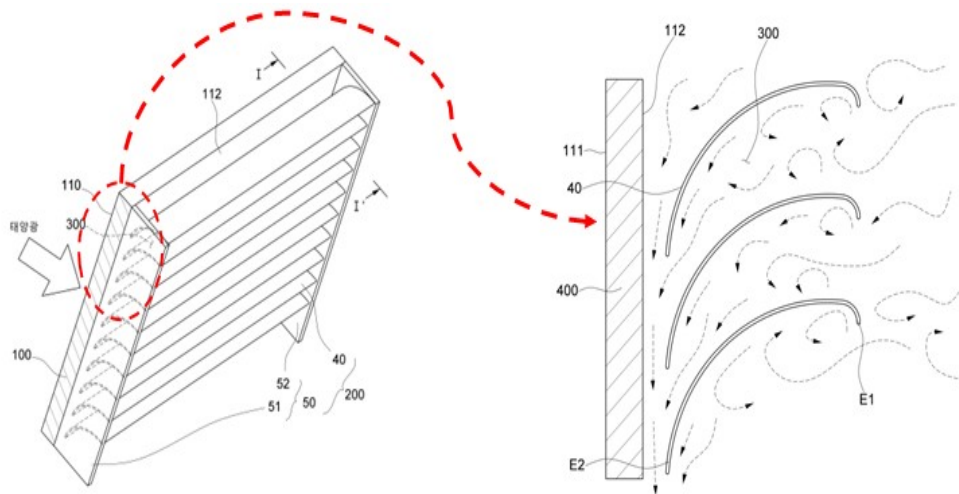
## 2. 태양광 발전의 효율에 대한 선행연구

가. 태양광 발전시스템의 효율감소에 대한 특성 분석(2001 윤정필 외 5인): 태양광 발전 시스템의 효율 저하 요인에는 일사량의 변화, 대기온도 등의 기상조건 및 인버터 효율 그리고 주변의 구조물 등에 의한 그들의 영향 등이 있다.

나. 태양전지 온도에 따른 효율(신혜영 외8인): 태양전지 모듈의 온도가 1℃ 감소하는 경우 효율이 0.45% 증가한다.

다. 온도와 풍속에 따른 태양광발전 효율 실증분석 연구(차왕철 외3인): 모듈 온도는 발전설비의 효율에 영향을 미치게 되는데, 모듈 온도가 약 35℃ 이후부터 발전 효율에 영향을 미치게 된다.

라. 공기 자연 순환 방식의 냉각 장치 및 이를 구비한 태양광 발전장치(공개특허 10-2022-0042540): 본 발명은 태양광 패널의 온도 상승을 최소화할 수 있는 공기 자연 순환 방식의 냉각 장치에 관한 것으로, 태양광 패널의 배면으로부터 이격되어 배치된 슬릿판을 포함한다. 태양광 패널 뒷부분에 좁은 통로 형태의 슬릿판을 만들어 바람이 불 때 공기의 흐름이 빨라지게 하여 태양광 패널의 온도를 냉각시키도록 고안된 발명품이다. 슬릿판의 세부 형태는 아래와 [그림2]와 같다.



[그림2] 슬릿판을 포함하는 태양광 패널 냉각장치와 슬릿판 주변의 공기순환 도식화

앞서 살펴본 선행연구 가.와 같이 태양광 패널의 효율에는 일사량, 대기온도 등의 기상조건, 인버터 효율 및 구조물에 따른 패널의 그늘 등이 영향을 미친다. 그 중 대기 온도의 경우 패널의 온도에 영향을 주어 비효율을 발생시킬 수 있는데, 선행연구 나.와 같이 패널 온도를 냉각시키는 것이 발전 효율을 개선하는데 도움이 되며, 특히 선행연구 다.와 같이 비효율은 패널 온도가 약 35℃ 이상 상승하는 순간부터 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

상기 선행연구 이외에 여러 연구 자료와 특허들을 통해 고온으로 인한 태양광발전의 비효율 개선을 위해 전기적 장치를 활용한 수냉식, 공랭식 패널연구에 대한 시도들을 확인할 수 있었다. 하지만 자연 바람 냉각을 활용한 효율 개선에 대한 학술 논문은 확인되지 않았다. 다만, 선행연구 라.와 같이 2022년에 공개된 공개특허공보를 확인해보면 공기 자연순환 냉각 방식을 활용한 태양광 패널에 대한 연구가 이루어진 바가 있는 것을 확인할 수 있다.

### Ⅲ. 연구 방법

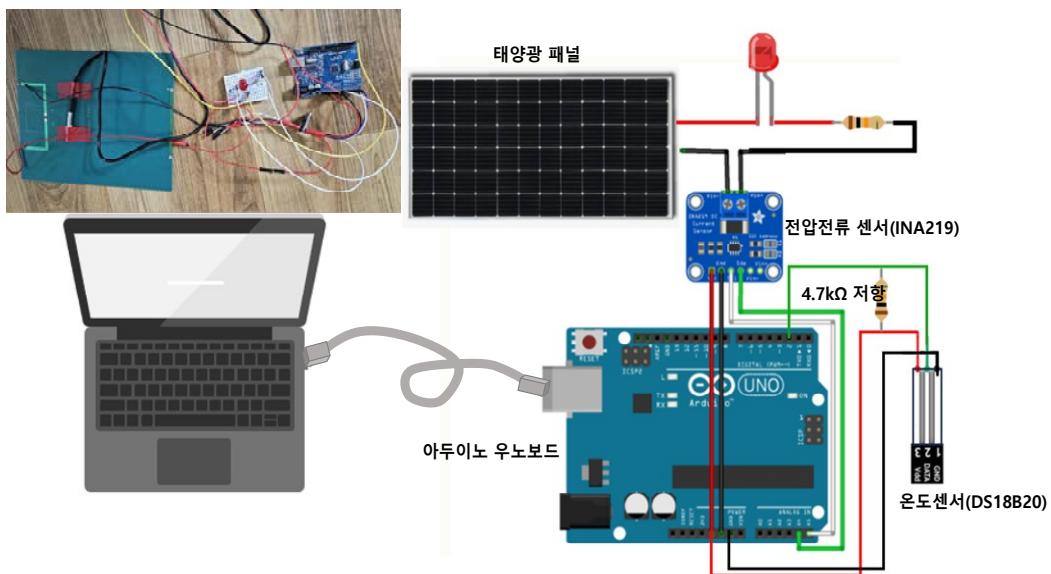
#### 1. 실험(1): 온도와 태양광 패널 효율의 관계

연구는 크게 두가지 절차로 이루어진다. 1단계 실험은 본격적인 분석을 하기 위한 방향성을 점검하기 위한 실험으로, 태양광 패널의 온도를 변화시켜가며 패널에서 생산되는 전기 발전량을 추적하는 방식을 통해 온도가 태양광 발전 효율에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험이다. 또한 실제 패널에 바람을 불어 패널을 냉각시킬 수 있는지, 풍속이 변화에 따라 유의미하게 패널 냉각에 소요되는 시간이 달라질

수 있는지를 1단계 실험을 통해 탐구하였다.

### 가. 실험절차

- ① 태양광 패널을 설치한 후 태양광 패널의 발전량 측정을 위해 아두이노 전압, 전류 측정 센서를 설치한다.
- ② 태양광 패널의 온도 변화 측정을 위해 온도센서를 태양광 패널 뒷면에 설치한다.
- ③ 태양광 패널 옆에 전기난로를 설치하여 패널의 온도를 높인다.
- ④ 상승한 패널의 온도를 선풍기를 통해 낮춘다.
- ⑤ 패널 온도가 상승하고, 하락하는 동안 발전량 변화를 관측한다.



[그림3] 태양광 패널 및 측정장치 설치 (1)

### 나. 실험 장비 설치 방법 및 세부 실험 과정

- ① 태양광 패널을 열전도도가 높은 금속으로 된 독서대에 놓아둔다.
- ② 빠른 온도 상승을 위해 패널 아래 핫팩을 깔고, 측면에 전기난로를 설치한다.
- ③ 온도 상승 후 패널을 냉각시키기 위해 패널 뒷편에 선풍기를 설치한다.
- ④ 난로를 통해 패널 온도를 40℃까지 상승시키며, 발전량의 변화를 관측한다.
- ⑤ 온도가 40℃에 이르는 순간 즉시 선풍기를 켜서 패널 온도를 떨어트리며 발전량의 변화를 관측한다.
- ⑥ 선풍기 풍속 단계별로 패널 근처에서의 측정되는 풍속을 측정하고, 각 풍속 단계별로 패널 온도를 낮추는데 소요되는 시간을 측정한다.



[그림4] 태양광 패널 및 측정장치 설치 (2)

## 2. 실험(2): 풍속 유도 패널 거치대를 통한 패널 효율 개선 방안 탐구

2단계 실험은 1단계 실험에 이어 본격적으로 바람을 효과적으로 모으고, 풍속을 상승시켜 패널에 전달시킬 수 있는 구조물을 고안하고, 해당 구조물이 실제로 패널 냉각 효과를 개선하는데 도움이 될 수 있을 것인지를 연구하기 위한 절차이다.

### 가. 실험개요

- ① 바람을 통해 온도를 효과적으로 낮출 수 있는 패널 설치 방법을 고안한다.
- ② 각 방법 별로 패널을 설치한 후 온도가 낮아지는데 걸리는 시간을 측정한다.
- ③ 가장 효과적으로 패널 온도를 낮출 수 있는 방법을 찾는다.

### 나. 구조물 고안 및 설치

#### 1) 일반 거치대

별도의 바람을 유도하는 구조물이 설치되지 않은 경사면의 거치대를 준비하였다. 다만 난로를 통해 가열한 후 냉각시 온도변화를 짧은 시간 내에 관찰하기 용이하게 열전도도가 높은 금속으로 만들어진 독서대를 이용하여 일반 거치대를 구현하였다.



[그림5] 일반 거치대 (정면, 측면, 후면)

일반 거치대는 거치대 정면 쪽이 막혀 있어 거치대 후면에서 불어오는 바람이 앞으로

통과하여 지나가지 못하는 형태이며, 이는 패널 냉각 측면에서 부정적인 요소로 판단되어 이후 개선된 구조물 고안 과정에서 개선할 예정이다. 또한 후면부가 평평한 일반적인 평면(대부분의 일반적인 태양광 패널 거치대 구조)이라 뒷면에서 바람이 불어와도 경사면을 부딪친 후 패널 주변에서의 공기 순환이 없이 측면으로 빠져나가 냉각 효과가 부족할 것으로 보여 이 또한 구조물 고안과정에서 개선할 예정이다.

## 2) 풍속 유도 거치대1

앞서 살펴본 일반 거치대에서 바람을 이용한 패널 냉각에 부정적 요소로 분석된 부분을 개선하고, 패널 아래쪽으로 더 많은 바람을 유도할 수 있는 구조물을 고안하여 해당 구조물을 일반거치대에서 사용한 금속 독서대 아랫면에 장착하여 바람을 유도할 수 있는 형태로 거치대(이하 ‘풍속 유도 거치대1’)를 고안하였다.

선행연구 라.의 특허에서 패널 뒤편에 슬릿판을 설치하여 패널 뒷면에 도달하는 풍속을 상승시켜 패널 효율을 개선시키는 방법을 확인한 바 있다. 본 연구에서 활용될 풍속 유도 거치대는 슬릿을 통한 풍속 유도 대신, 거치대 밑면 판을 여러 구멍이 뚫려 있는 판 형태를 적용하여 뒷면에서 불어오는 바람이 작은 구멍들을 통과하며 벤츄리 현상으로 인해 순간적으로 바람 속도가 빨라지도록 설계하였다. 또한 선행연구에서 검토되지 않았던 정면 아래 부분에 작은 틈을 만들어 뒷면에서 들은 바람이 속도가 빨라지며 정면으로 통과하도록 설계하였다. 밑면 판에는 패널을 밑면으로부터 띄울 수 있도록 받침판을 만들어 밑면을 통해 들어온 바람이 패널 사이에서 순환할 수 있는 공간을 마련하여 냉각을 도와줄 수 있도록 구조를 설계하였다.



[그림6] 풍속 유도 거치대1 (정면, 측면, 후면)

## 3) 풍속 유도 거치대2

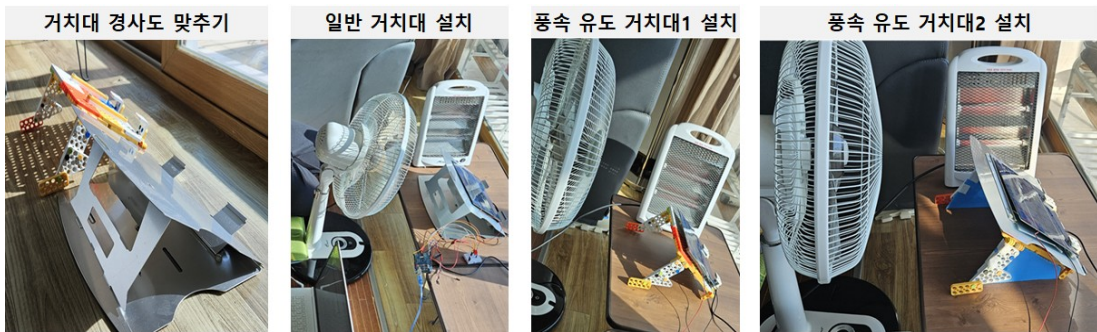
풍속 유도 거치대1을 개조하여 패널 장착 부분으로 바람을 더 모을 수 있는 형태로 풍속 유도 거치대2를 고안하였다. 구체적인 개선 방법은 풍속 유도 거치대1의 패널 아래 양쪽 면을 막아 패널 뒷면에서 불어오는 바람이 패널 옆으로 세어나가지 않고 패널 아래로 집중될 수 있도록 구조물을 개선하였으며, 이 또한 선행연구 라. 특허에서 고려되지 않은 요소이다. 아래 [그림7]의 측면 사진을 보면 패널 아래쪽 양면을 막고 있는 가림막을 확인할 수 있다.



[그림7] 풍속 유도 거치대2 (정면, 측면, 후면)

#### 다. 세부실험 절차

- ① 일반 거치대, 풍속 유도 거치대1, 풍속 유도 거치대2를 비슷한 경사를 가지도록 설치한다.
- ② 일반 거치대에 패널을 설치하고 전기난로로 온도를 40℃ 이상 상승시킨 후 선풍기 2단 바람으로 패널 온도를 35℃ 이하로 떨어뜨리는데 걸리는 시간을 측정한다.
- ③ 2번 과정을 3회 반복하여 실시한다.
- ④ 일반 거치대를 대신하여 풍속 유도 거치대1로 동일한 실험을 3회 반복한다. 이때 난로를 통한 패널 온도 상승을 유도하기 위해 풍속 유도 거치대1 위에 일반 거치대 금속판을 올리고 그 위에 패널을 올려서 실험 실시한다.
- ⑤ 풍속 유도 거치대2를 설치하고 동일한 실험을 3회 반복하여 3가지 거치대 사용시 패널 냉각 소요 시간을 비교한다.



[그림8] 패널 거치대 구조를 통한 패널 효율개선 실험

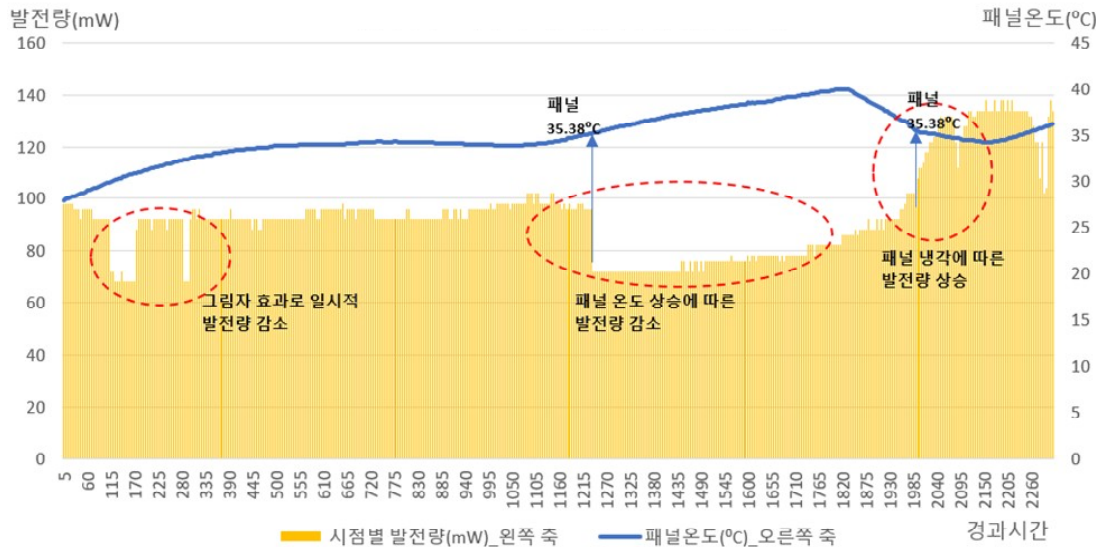
## IV. 연구 결과

### 1. 실험(1) 결과

#### 가. 온도와 태양광 패널 효율의 관계

30℃ 이하의 온도에서부터 전기난로를 통해 패널 온도를 지속적으로 올린 결과 35℃ 근처에서 급격히 발전량이 감소하는 현상이 관측되었다.

<그래프 1> 패널 온도변화에 따른 발전량 변화



위 <그래프1>과 같이 온도가 35.38℃가 되기 전에는 온도 상승이 발전 효율에 미치는 영향이 관측되지 않았다. 전기난로를 켜서 패널의 온도를 서서히 높이면서 발전량을 측정한 결과 구름이 태양을 가리는 일시적인 순간의 발전량 감소는 관측되었으나, 그 외 온도 상승에 따른 발전량 변화는 관측되지 않았다.

하지만 온도가 35.38℃에 이르는 순간 직전에 96mW의 발전량이 72mW 수준으로 급격히 떨어졌고, 이후 패널 온도가 40.00℃에 이르는 순간까지 35.38℃ 이하의 온도에서 보였던 발전량을 회복하지 못하였다. 40.00℃에 이르기까지 소폭으로 발전량이 증가하였지만 이는 이른 아침시간에 발전량을 측정하였기 때문에 시간이 지남에 따라 태양 고도가 높아지며 서서히 발전량이 증가한 현상으로 판단된다.

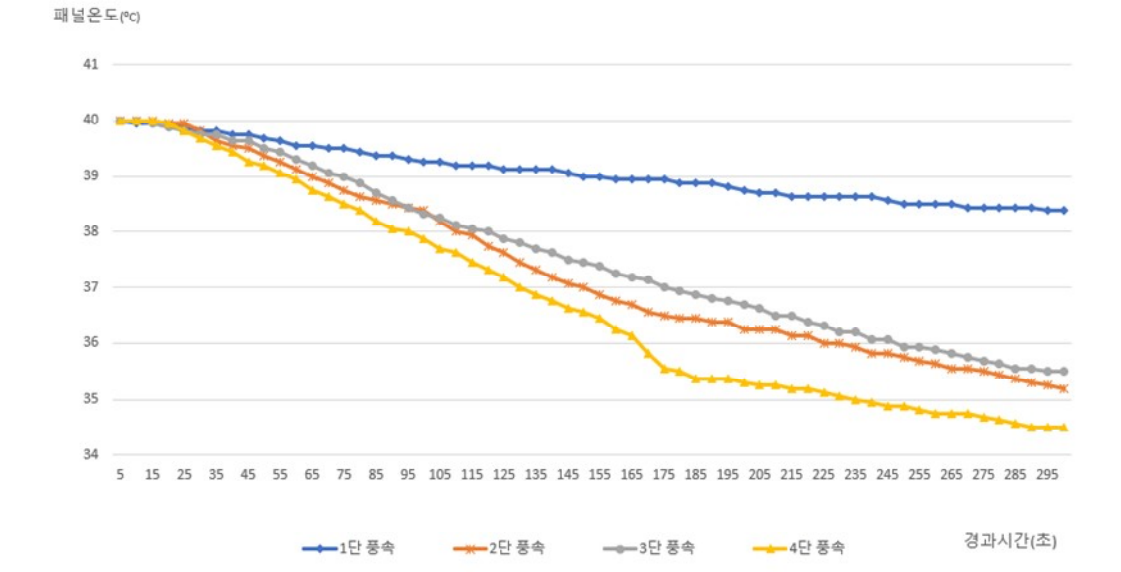
온도가 40.00℃에 이르는 순간부터 전기난로를 켜놓은 상태에서 선풍기를 틀어 온도를 낮춘 결과 약 35℃ 근처에서 발전량이 다시 뚜렷하게 상승하는 것이 확인되었다. 40.00℃에서 온도가 35℃ 근처에 이르기 전까지도 발전량은 점차 증가하였으나, 이는 40.00℃까지 온도가 지속적으로 상승하는 과정에서도 태양 고도가 높아짐에 따라 발전량이 늘어나던 구간에서의 상승 기울기와 크게 다르지 않은 속도로 발전량이 증가하는 수준이었다. 온도가 36.56℃가 되었을 때 기존 하락 전 발전량을 회복하였으며, 35.38℃에 이르렀을 때 112 mW, 35.00℃에 이르렀을 때 132mW 수준까지 발전량이 상승하였다.

#### 나. 풍속 변화와 패널 온도 변화

앞서 살펴본 태양광 발전의 비효율이 발생하는 구간을 감안하여 태양광 패널의 온도를 40℃에서 35℃까지 냉각시키는 속도에 풍속이 유의미한 영향을 미치는지를 확

인하기 위한 실험을 실시하였다.

<그래프 2> 풍속별 패널 표면 온도 냉각 속도 비교



패널 바로 뒤에서 선풍기를 패널 방향으로 설정하여 풍속을 1단 ~ 4단까지 조정하여 냉각속도를 측정하였다. 각 단계별로 패널 근처에서 풍속계로 측정한 풍속은 1단에서 1.5m/s, 2단에서 2.7m/s, 3단에서 3.3m/s, 4단: 4.0m/s 수준이었다.

실험 결과 1단과 4단에서는 냉각 속도가 확연히 차이가 났다. 2단과 3단에서는 냉각속도의 비교적 차이가 없었으며, 오히려 2단의 냉각속도가 3단에서보다 더 빠르게 측정되어 예측과 다른 결과가 나왔다.

#### 다. 실험(1)의 결론

##### 1) 온도와 패널 효율성

패널 온도가 35°C 내외에 이르기 전에는 뚜렷한 발전 비효율이 관측되지 않았으나, 35°C 근처에 이르렀을 때 급격한 발전 비효율이 발생한다. 해당 결과는 선행연구 다의 결과와 일치한다. 즉, 바람을 이용해 한여름 태양광 패널 온도를 35°C 이하로 유지시킬 수 있다면 태양광 발전의 효율을 높일 수 있을 것이다.

##### 2) 풍속과 패널 냉각속도

2단과 3단 풍속 사이에 냉각속도가 예측과 다른 부분이 있었지만 소요시간 차이가 크지 않았고, 그 외 1단과 나머지 속도 사이에 냉각 소요시간을 비교할 때 풍속이 냉각속도에 유의미한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 1단과 풍속에서 5분간 온도를 1.6°C 하락시킬 수 있었지만, 4단 풍속에서는 5.5°C 하락시켜 동일시간 동안 3.4 배 더 빠른 냉각 속도를 보였다. 1단 수준의 속도로 불어오는 바람이 2단~4단 수준

으로 풍속이 상승될 수 있다면 패널을 냉각시키는데 소요되는 시간을 현격하게 단축시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

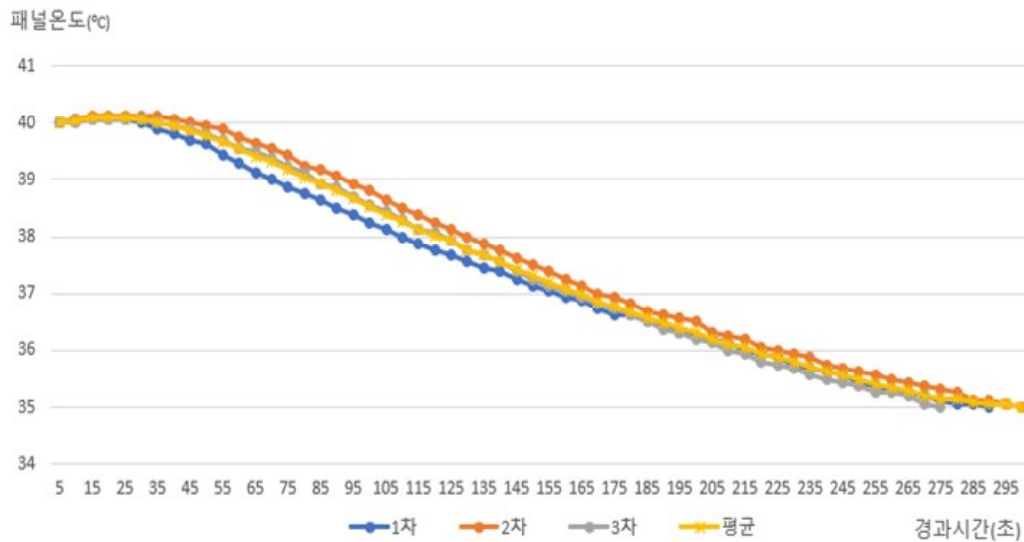
## 2. 실험(2) 결과

### 가. 패널 거치대 종류별 냉각 속도 측정 결과

#### 1) 일반 거치대

냉각 실험을 3회 실행한 결과 평균 288.3초 소요되었다.

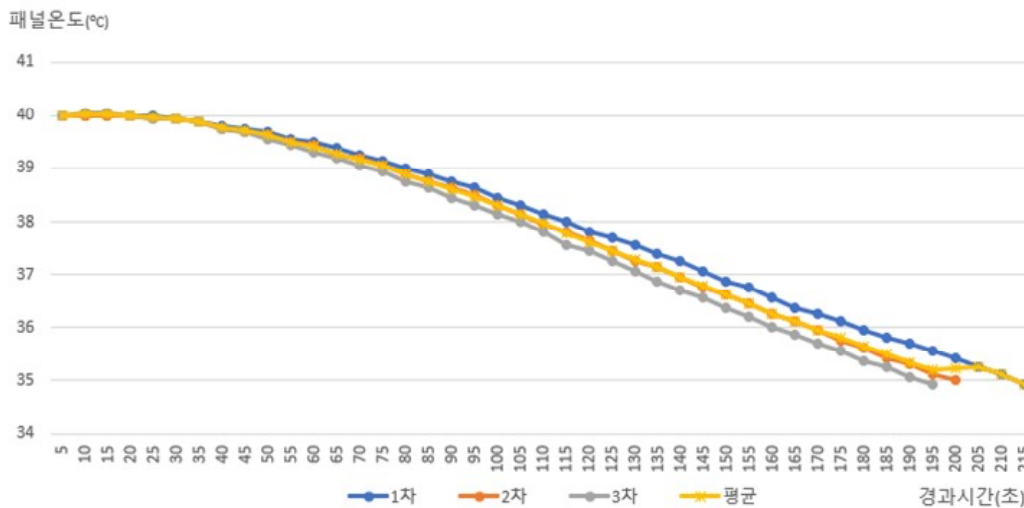
<그래프 3> 일반거치대 설치 패널 뒷면 냉각(40℃에서 35℃) 소요시간



#### 2) 풍속 유도 거치대1

냉각 실험을 3회 실행한 결과 평균 203.3초 소요되었다.

<그래프 4> 풍속 유도 거치대1 설치 패널 뒷면 냉각(40℃에서 35℃) 소요시간



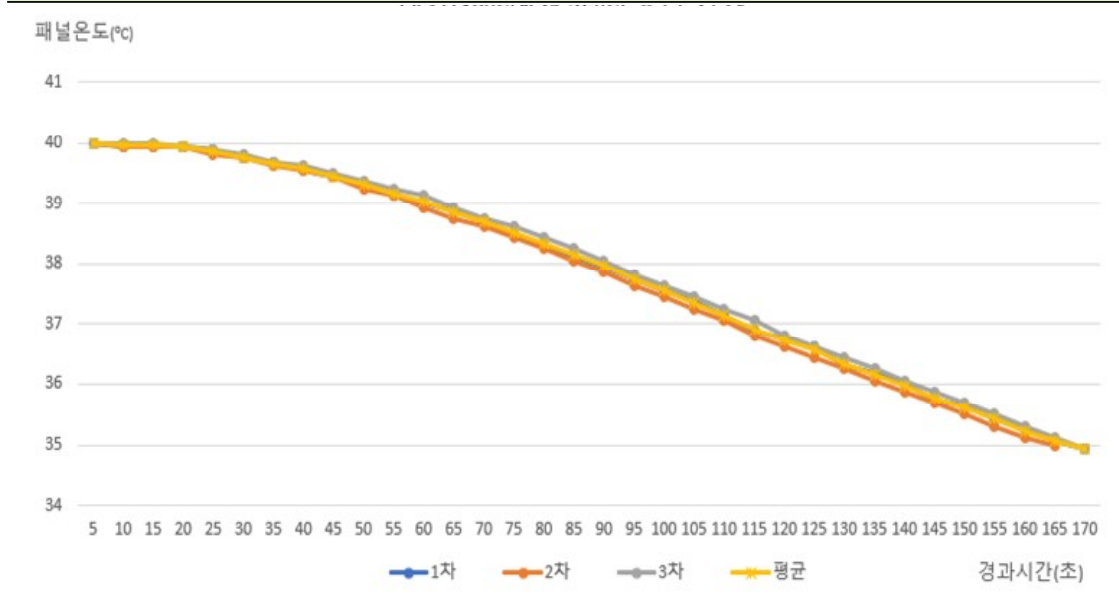
동일한 풍속의 선풍기 바람에서 풍속 유도 거치대1를 적용하였을 때 패널 온도를

35℃까지 냉각시키는데 소요된 시간이 일반 거치대와 비교시 85초 단축되었다. 이를 통해 거치대 밑면 환기구, 거치대 밑판에 뚫려 있는 구멍, 거치대 밑판 사이에서 순환할 공간 등이 실제 냉각 효과를 증가시키는데 효과가 있다는 점이 확인되었다.

### 3) 풍속 유도 거치대2

냉각 실험을 3회 실행한 결과 평균 168.3초가 소요 되었다.

<그래프 5> 풍속 유도 거치대2 설치 패널 뒷면 냉각(40℃에서 35℃) 소요시간



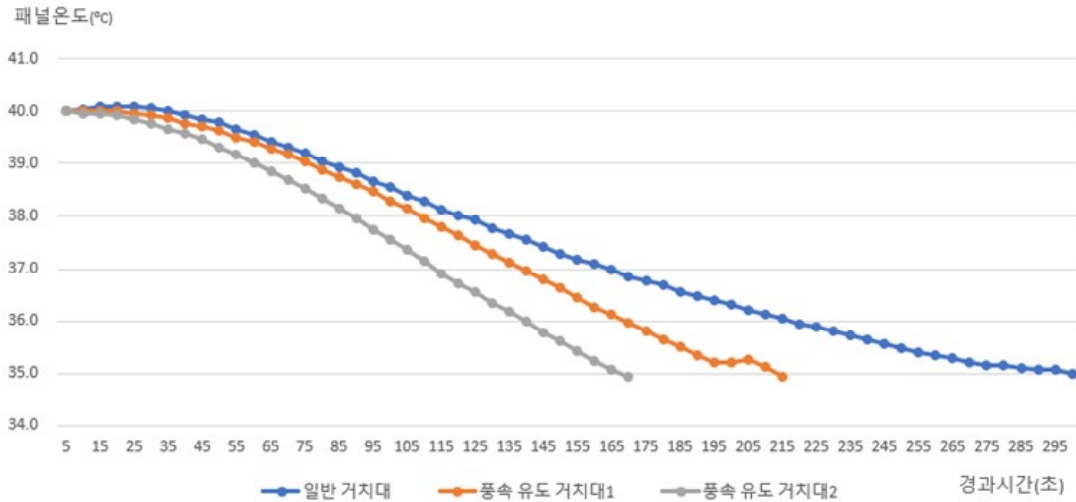
동일한 풍속의 선풍기 바람에서 풍속 유도 거치대2를 적용하였을 때 패널 온도를 35℃까지 냉각시키는데 소요된 시간이 풍속 유도 거치대1 대비 35초 단축되었다. 풍속 유도 거치대1 양쪽 옆면 아래 부분을 막아 패널 뒷편에서 불어오는 바람을 패널 아래쪽 공간으로 집중되도록 하는 것만으로도 실제 냉각 효과를 증가시키는데 뚜렷한 효과가 있다는 점이 확인되었다.

#### 나. 패널 거치대 종류별 냉각 속도 측정 결과 비교

아래 [표1]과 같이 풍속 유도 거치대1이 일반 거치대 대비 냉각 속도를 29.5% 가량 개선하는 결과를 보였다. 이를 통해 거치대 구조물의 밑판에 좁은 바람 구멍을 뚫어 거치대 아래로 유입되는 바람이 벤츄리 현상으로 인해 좁은 구멍 통해 유입되면서 속도가 상승되어 냉각 효과를 높이고, 패널과 거치대 아래판 사이에 공기가 순환할 수 있는 공간을 마련하여 빠른 속도로 유입된 공기가 공간 내에서 공기가 순환하며 패널의 냉각 효과를 높을 것이라는 가설이 맞다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 거치대 앞쪽부분에 바람이 빠져나갈 좁은 틈의 환기구를 마련하여 넓은 뒤쪽 공간으로 유입된 바람이 좁은 앞쪽 틈으로 빠져나가며 벤츄리 현상으로 인해 풍속

이 증가하게 되었고, 이를 통해 냉각속도를 개선하는데 도움이 된 것으로 판단된다.

<그래프 6> 거치대 유형별 패널 뒷면 냉각(40℃에서 35℃) 평균 소요시간



<표 1> 거치대 유형별 패널 뒷면 냉각(40℃에서 35℃) 속도 개선도

	(1) 일반 거치대	(2) 풍속 유도 거치대1	(3) 풍속 유도 거치대2
1차	290	215	170
2차	300	200	165
3차	275	195	170
평균	288.3	203.3	168.3
(1) 대비 개선도		29.5%	41.6%
(2) 대비 개선도			17.2%

풍속 유도 거치대2의 경우 일반 거치대와 비교시 평균 41.6% 정도 냉각 효과를 개선한 효과를 보였으며, 풍속유도 거치대1과 비교시에도 냉각효과를 17.2% 개선한 결과를 보였다. 이를 통해 거치대 아래 옆면을 막음으로써 패널 뒷편에서 불어오는 바람을 패널 아래 공간으로 더욱 집중시키고, 유입된 공기가 빠져나갈 공간을 앞쪽 부분의 좁은 틈으로 집중시켜서 패널 아래쪽의 공기 흐름 속도를 더욱 상승시키는 방법을 이용하여 냉각 효과를 더욱 개선할 수 있음을 확인하였다.

## V. 결론 및 제언

### 1. 결론

태양광 발전의 효율이 약 35℃ 때부터 현저히 감소하였고 바람을 통해 온도를 감소시키면 다시 효율이 올라가는 것을 확인하였다. 바람을 유도하는 형태의 패널 거치대 구조물을 설계하는 데에는 1) 벤츄리 현상을 활용하여 패널 거치대 아래판에 좁은 구멍을 뚫는 방법, 2) 패널 거치대 아래 판과 패널 사이에 공기가 순환하며 머무

를 수 있는 공간을 마련하는 방법, 3) 거치대 앞면의 아래 부분에 좁은 틈을 만들어 패널 거치대 뒷부분에서 들어오는 바람이 거치대 앞부분으로 빠른 속도로 통과하면서 패널 아래 면을 지나가도록 유도하는 방법, 4) 패널 거치대 아래 부분의 옆면에 가림막을 설치하여 뒤에서 불어오는 바람을 더욱 패널 아래로 집중시키는 방법 등을 활용하였다.

본 연구처럼 자연 바람을 통한 패널 효율성 개선을 위해 패널 뒷면에 바람 슬릿을 활용하였던 기존 선행연구 라.와 다른 방식을 적용하였으며, 다양한 요소를 고려한 연구를 진행하였다는 점에서 의미가 있다. 1)~3) 방법을 활용한 풍속 유도 거치대1에서는 일반 거치대 대비 29.5% 수준의 냉각 효율 개선을 보였고, 1)~4) 방법을 모두 적용한 풍속 유도 거치대2의 경우 일반 거치대 대비 41.6% 수준의 냉각 효율 개선을 보였다.

이를 종합적으로 고려할 때 본 연구에서 살펴본 방법들을 적용하여 패널 거치대를 설치할 경우 별도의 전자 보조 장치 없이 자연 바람을 이용하여 패널을 효율적으로 냉각시켜 태양광 발전 효율을 개선하는 방법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 한계점

본 연구는 기본적으로 패널의 경사면 뒷부분에서 패널 경사면을 향해 정확히 바람이 불어오는 환경에서 실험을 실시하였다. 하지만 실제 태양광 발전소에서는 풍향을 예측할 수 없는 경우 많고, 일사량을 늘리기 위해 패널을 설치해야 하는 방향과 풍향이 장소마다 달라 본 연구에서 적용한 환경이 동일하게 구현되는 곳이 많지 않을 수 있다. 특히 본 연구에서 활용한 옆면 가림막 장치의 경우 패널 옆면에서 바람이 불어오는 환경에서는 오히려 패널 냉각을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 이를 감안할 때 실제 태양광 발전에 적용함에 있어서는 현실적 제약 요소들이 존재할 것으로 판단된다.

## 3. 연구 확장 가능성 및 제언

본 연구는 패널의 경사면 뒷부분에서 패널 경사면을 향해 정확히 바람이 불어오는 환경만을 전제로 실시된 것으로 다양한 방향에서 바람이 불어올 때 패널 냉각을 개선할 수 있는 구조에 대해 추가적인 연구를 실시한다면 실제 발전소에서의 활용 가능성을 더욱 높일 수 있을 것이라 생각된다. 또한 본 연구는 실내에서 인공적으로 전기난로로 만들어진 열과 선풍기로 만들어진 바람을 통해 간접적인 실험을 진행한 것으로 실제 한여름 바람이 부는 외부 환경에서 본 연구를 추가로 실시한다면 현실적인 한계 및 개선점 등을 확인하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

일반적으로 태양광 발전을 설계할 때에는 지역별 일사량 데이터에 기초하여 태양광

발전소를 건설할 장소와 패널 설치 방향을 결정한다. 자연 바람을 통한 태양광 발전 효율성 개선 가능성을 고려한다면, 발전소 설계 단계부터 주변 지역의 풍향 및 풍속의 정보도 함께 고려하여 위치를 정하고, 패널 배치한다면 일사량에만 기초하여 발전소를 개발하는 경우보다 높은 발전 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## VI. 참고문헌

- 김준성 외 4인 (2014) 태양전지 모듈의 온도 특성에 따른 효율 변화 연구
- 신혜영 외 8인 (2009) 태양전지 온도에 따른 효율
- 윤정필 외 5인 (2001) 태양광 발전시스템의 효율감소에 대한 특성 분석
- 차왕철 외 3인 (2015) 온도와 풍속에 따른 태양광발전 효율 실증분석 연구
- 한국남동발전 주식회사 (2022) 공기자연순환 방식의 냉각 장치 및 이를 구비한 태양광 발전 장치에 대한 특허청 공개특허공보



물리B

12\_코일을 통과하는 자석의 위치에 따른 유도  
전류의 세기



# 코일을 통과하는 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기

나형준 (동도중학교 3학년)

조윤솔 (월촌중학교 2학년)

표건우 (휘문중학교 2학년)

지도교수 : 전동렬 (서울대학교 물리교육과)

## 초록

자석의 위치, 검류계 바늘의 위치를 재서 자기 다발의 변화와 유도 전류의 관계에 대한 패러데이의 전자기 유도 법칙을 확인하기 위한 실험을 계획하였다. 중학생의 수준으로 실험을 진행하기 위해서 실험 내용을 동영상으로 찍고, 비교적 친숙한 트래커 동영상 분석 프로그램을 이용하였다. 역학 수레에 관과 자석을 달고, 자석이 코일 속으로 들어가면 위치를 알아내지 못하므로 관에 추적 표지를 붙여서 이를 트래커를 통해 추적하고 자석과의 거리를 계산하여 자석의 위치를 알아내는 방법을 사용했다. 검류계도 함께 촬영하여 바늘 끝에 추적 표지를 붙여 트래커 프로그램에 내장된 각도기 기능과  $-50$ 도일 때, 유도 전류가  $500\mu\text{A}$ 임을 이용하여 유도 전류의 세기를 알아내었다. 자석이 이동함에 따라 자기 다발이 변화하므로, 알아낸 유도 전류의 세기와 자석의 위치를 이용하여 자기 다발의 변화와 유도 전류의 관계에 대한 그래프를 그리고 이를 분석해내었다.

## I. 서론

중학교 과학을 공부하다가 전자기 유도 법칙에 대해서 알게 되었고 여러 가지 문제를 풀면서 전자기 유도 법칙에 관심을 갖게 되었다. 그래서 전자기 유도 법칙에 관련된 여러 가지 실험을 찾아보다가 자유 낙하하는 자석이 코일을 통과하면서 일으키는 전자기 유도 현상에 대한 선행 연구를 찾아보았다. 처음으로 찾아본 선행 연구에서는 회전 센서로 줄이 풀리는 정도를 측정하여 자석의 위치를 알아내었고, 동시에 전류 센서로 전류를 측정하였다. 그러나 이러한 방식은 여러 가지 컴퓨터 프로그래밍을 거쳐야 하기에 우리와 같은 중학생이 하기에는 어려운 부분이 많이 있었고, 유도전류와 자석의 위치의 관계를 쉽게 알아낼 수 있는 방법은 없을까?에 대한 고민을 하게 되었다. 다음으로 찾아본 연구에서는 코일에 자석을 낙하시켰고 유도전류를 전류 센서로 측정하였으며, 실험값과 이론값을 비교하여 그래프로 나타내었다. 이 실험에서는 전류 센서를 이용하였는데 전류 센서를 이용하면 시간에 따른 유도 전류의 세기를 알려준다. 그런데 이 실험의 결과에서는 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기를 나타내었다. 그래서 중학생도 쉽게 유도 전류 그래프를 알아낼 방법이 될까 고민을 했고 자석의 위치에 따른 유도 전류를 구할 수 있는 방법에 대해서 여러 가지 고민을 하였다. 그러다가 연구 목표를 동영상 분석 프로그램인 트랙터를 이용해서 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기를 알아내는 것으로 정하였다. 동영상 분석 프로그램을 이용하면 여러 가지 센서나 복잡한 기구 없이 유도전류 그래프를 쉽게 얻을 수 있다고 생각했기 때문이다.



Figure 1. Experimental setup.

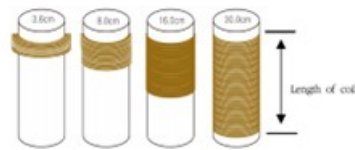


Figure 2. Various Coils.

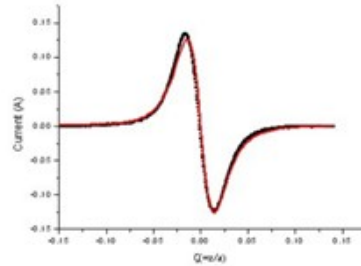
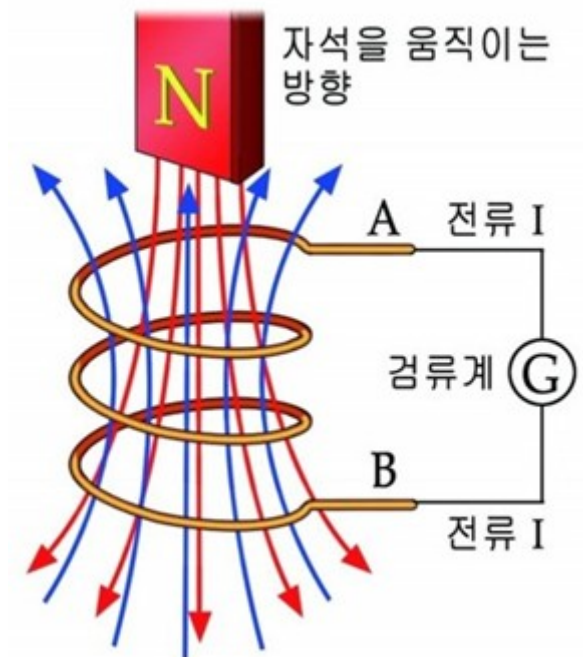


Figure 4. Typical current change when the magnet is falling through the coil.

## II. 이론적 배경

이 연구에 앞서서 2가지의 이론적 배경이 필요하다. 첫 번째로 필요한 이론적 배경은 패러데이 전자기 유도 법칙이다. 패러데이 전자기 유도 법칙은 유도기전력을 자속의 변화량, 코일의 감은 수, 시간의 변화량으로 나타낸 식이다. 코일 주위에서 자석을 움직이게 되면 코일 내부의 자기장이 변하게 되고 코일에 유도 전류가 발생하게 된다. 또한 코일에 유도되는 전압의 크기는 코일을 관통하는 자속의 시간적 변화의 비율에 비례한다. 자속의 변화량이 크고 자속의 변화가 더 빠를수록 더 큰 기전력이 발생한다. 패러데이 법칙은 패러데이에 의해서 발견된 이후에 우리가 현재 사용하고 있는 모든 전자제품에 활용되고 있으며 응용되고 있는 분야로는 와 전류

식 브레이크, 전자 흡착 브레이크 등 우리가 매일 이용하고 있는 대중교통에도 사용이 되고 있다. 또한 이 연구에 필요한 두 번째 이론적 배경으로는 렌츠의 법칙이 있다. 렌츠의 법칙도 유도기전력을 코일의 감은 수, 시간의 변화량, 자속의 변화량으로 나타낸 식이다. 렌츠의 법칙에 의하면 코일에 유도되는 전압은 코일을 관통하는 자속의 증감을 방해하는 방향으로 발생한다. 또한 코일에 전압을 가하면 코일에 가한 전압과 역방향의 전압이 발생하여 전류가 제한된다. 패러데이 법칙에서 -부호가 렌츠의 법칙을 의미한다. 그리고 렌츠의 법칙에 의해서 자석이 코일에 들어갈 때와 나갈 때의 유도전류의 크기는 같은데 부호가 반대이므로 대칭성에 의해서 코일이 자석의 중심을 지날 때 유도 전류가 0이 된다. 또한 렌츠의 법칙은 변압기, 발전기, 인덕션 쿡탑 등 우리 일상생활에서 많이 이용되고 있는 가전제품의 원리로 사용된다.



### III. 연구 방법

자석의 위치에 따른 유도전류의 세기를 복잡한 센서나 컴퓨터 인터페이스 없이 쉽게 알아내고자 핸드폰 카메라와 비교적 친숙한 트래커 프로그램을 이용하여 분석하는 방법을 생각했다. 이를 위해 자석의 움직임과 코일에 연결된 검류계 바늘을 한 개의 동영상으로 동시에 촬영하여 분석했다. 실험에는 직경 15mm, 두께 3mm인 네오디뮴 자석을 1개에서 9개까지 붙여서 사용했다.

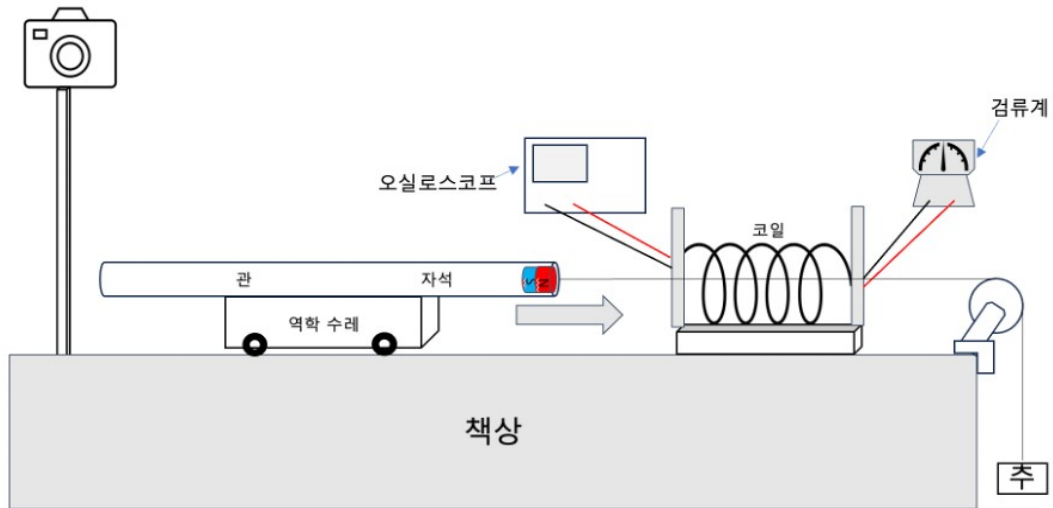


그림 4

실험 순서로는 우선 그림 1과 같이 아크릴관 끝에 자석을 부착하고 관을 역학 수레에 붙였다. 실을 이용하여 수레에 추를 연결하고, 책상 끝에 도르래를 설치하여 실을 걸어서 추의 무게로 수레가 코일 쪽으로 천천히 움직이게 하였다. 자석이 코일 속을 통과할 때 자석의 위치와 검류계 바늘의 반응을 영상으로 촬영해서 트래커 영상 분석 프로그램을 이용하여 자석의 위치와 유도 전류의 관계를 알아보았다.

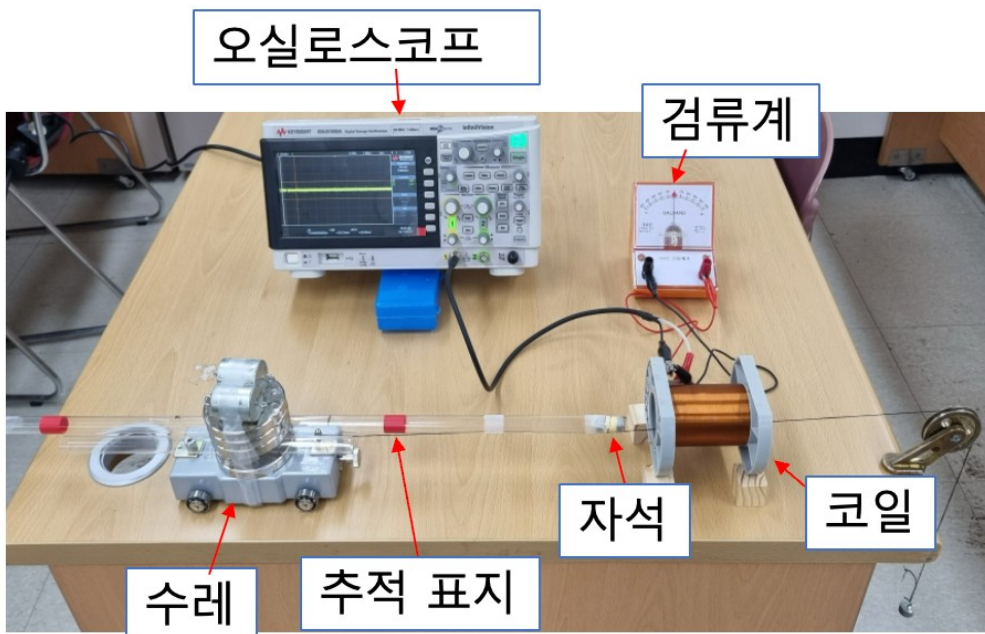


그림 5

이때 간혹 수레의 경로가 일직선이 아니거나 마찰의 영향 등으로 인해 실험이 잘 진행되지 않은 경우가 있을 수 있다. 그런데 이 실험에서는 그 사실을 알아내기까지 검류계 바늘의 움직임을 분석하는데 많은 시간을 소비하게 된다. 이에 실험이 잘 진행되고 있는지 판단할 수 있도록 코일에 그림 2와 같이 스토리지 오실로스코프

프를 연결하였다. 오실로스코프는 시간에 따른 유도 기전력을 나타내는데 이는 전류에 비례하므로 검류계의 바늘 대신 참고하기에 적절하다. 그림 3과 같은 오실로스코프의 화면에서 그래프의 파형이 연속적인지 등을 보고 실험이 제대로 진행되고 있는지 판단했다. 그러나 오실로스코프의 데이터를 분석하는데 이용하는 것은 우리 수준을 넘어간다고 생각해서 참고만 하는 용도로 사용했다.

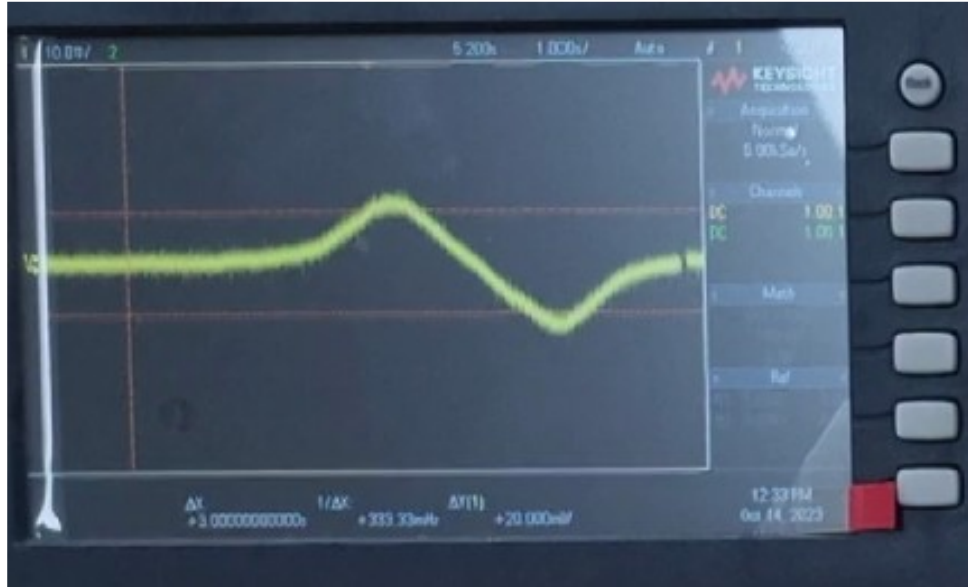


그림 6

또한 자석의 속력이 빨라서 코일에 유도되는 전류의 세기가 급격하게 변하게 되는 경우 검류계 바늘이 반응하는데 시간이 걸려서 이를 잘 반영하지 못하는 문제가 있었다. 그래서 수레가 천천히, 일정한 속력으로 코일 속을 통과하도록 수레의 질량을 크게 하고, 가벼운 추를 사용하여 수레가 천천히, 일정한 속력으로 움직일 수 있게 했다. 추가로 자석이 코일 속을 통과할 때는 보이지 않으므로 영상으로 자석을 직접 촬영하여 분석하는데 한계가 있었기 때문에 대신 아크릴판에서 코일을 통과하지 않는 부분에 빨간색 테이프를 붙여서 추적 표지로 이용했다. 추적 표지와 자석 사이의 거리를 알면

$$(\text{자석의 위치}) = (\text{추적 표지의 위치}) + (\text{추적 표지와 자석 사이 거리})$$

이므로 자석의 위치도 알 수 있다(그림 4).

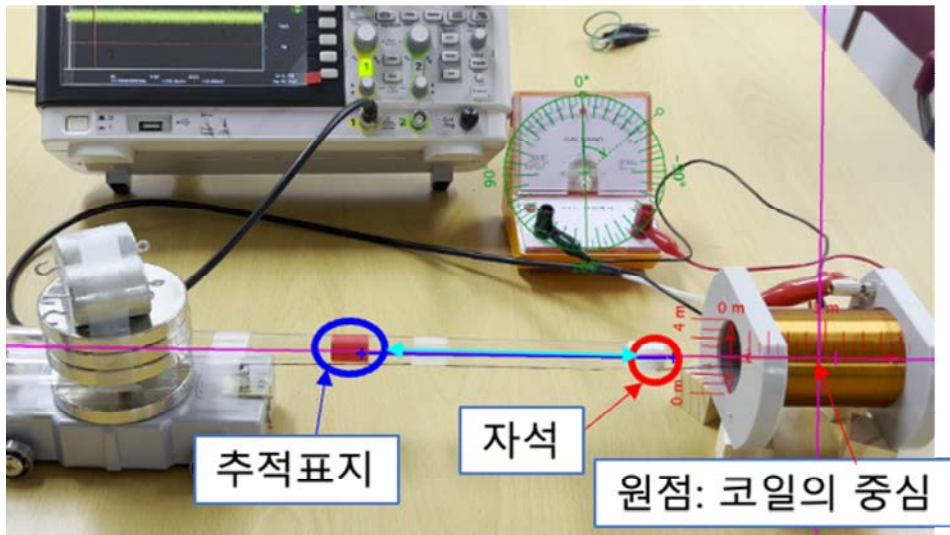


그림 7

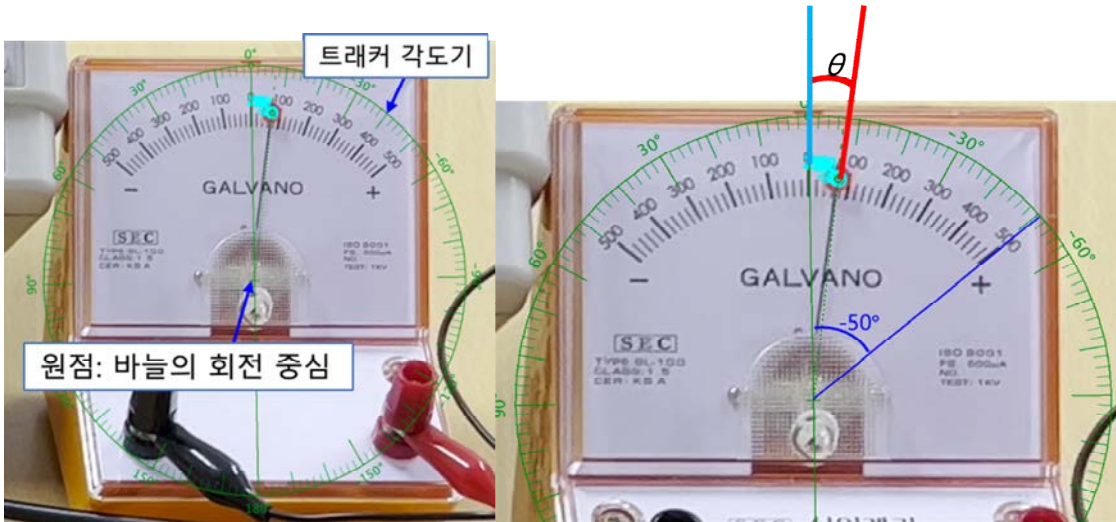


그림 8

그림 9

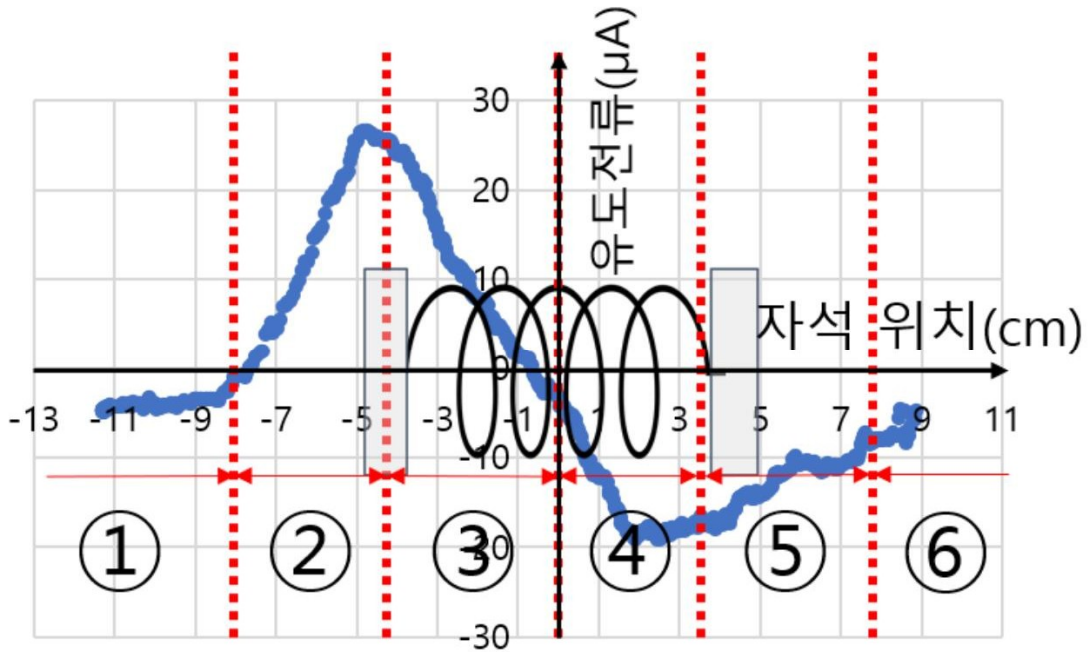
유도 전류의 세기를 알아내기 위해서 우선 검류계 바늘의 각도를 알아낸다. 검류계 바늘 끝에 빨간색 테이프를 붙여서 영상에서 트래커를 이용하여 추적하고, 트래커의 각도기 기능을 이용하여 각도를 알아냈다. 이때 각도기의 중심은 바늘의 회전 중심이고, 각도기의 팔을 검류계의 바늘에 맞췄다(그림 5). 실험에 사용한 검류계에서는 그림 6과 같이 바늘의 각도가  $-50^\circ$ 일 때 유도 전류의 세기가  $500\mu\text{A}$  였고 이로부터

$$(\text{유도 전류의 세기}) = (\text{검류계 바늘의 각도}) \times (-10)$$

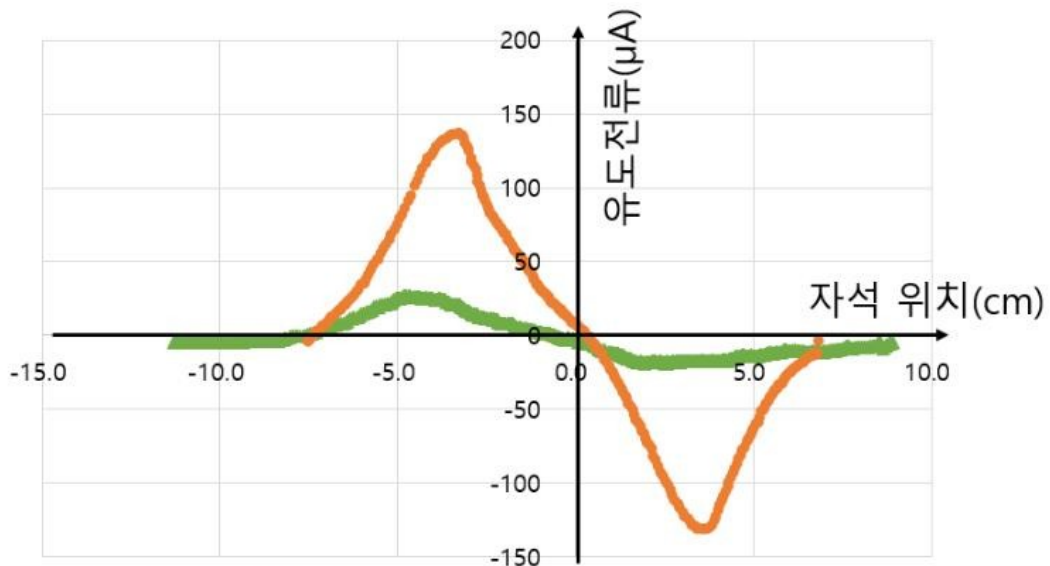
임을 이용하여 바늘의 각도를 알면 전류의 세기도 알 수 있다.

이렇게 알아낸 시간에 따른 자석의 위치와 시간에 따른 유도 전류의 세기를 엑셀에서 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기로 그래프로 나타내면 그림 7과 같이 된다. 이 그래프는 위치에 대한 그래프이므로 그래프에 코일의 위치도 나타내어 비교할 수 있다.

#### IV. 연구 결과



이 그래프를 보면 1번부터 6번 구간으로 나누어져 있는데, 1번 구간은 자석이 코일에 멀리 떨어져 있는 상태, 2번 구간은 자석이 코일에 점점 가까워지는 상태, 3번 구간은 자석이 코일에 완전히 들어간 상태, 4번 구간은 자석이 코일에서 점점 빠져나오는 상태, 5번 구간은 자석이 코일에서 멀어지고 있는 상태, 6번 구간은 자석이 코일에서 완전히 벗어난 상태이다. 이 그래프에서 1번 구간을 지날 때, 자기 다발의 변화가 0이 되고, 유도 전류 또한 0이 된다. 2번 구간을 지날 때, 자기 다발이 증가하고, 증가율 또한 증가한다. 유도 전류도 증가한다. 3번 구간을 지날 때, 자기 다발이 증가하나, 증가율은 감소한다. 그래서 유도 전류는 감소하게 된다. 4번 구간을 지날 때, 자기 다발이 감소하고, 감소율이 증가해서 반대 방향 유도 전류가 증가하게 된다. 3번과 4번 구간 사이에는 자기 다발의 증감이 바뀌기 때문에 유도 전류가 0이 되어야 하고, 그 위치는 코일의 중심이 된다. 5번 구간을 지날 때, 자기 다발이 감소하나, 감소율이 감소해서 반대 방향 유도 전류가 감소하게 된다. 6번 구간에 도달했을 때, 자기 다발의 변화가 0이 되고, 유도 전류 또한 0이 된다. 이렇게 해서 우리는 자석의 위치에 따른 유도 전류의 세기를 그래프로 표현했다. 그리고 더 나아가 자기장의 세기에 따른 유도 전류의 세기도 알아보았다.



- 자석 1개  지름 15mm / 두께 3mm
- 자석 9개 

이 그래프를 보면, 자석이 1개일 때 발생한 기전력과 9개일 때 발생한 기전력을 비교한 것인데, 자석이 9개일 때, 1개일 때보다 더 큰 기전력이 발생함을 확인할 수 있었다. 즉, 자기장의 세기가 셀수록 더 큰 유도 전류를 얻을 수 있다는 패러데이 법칙을 확인할 수 있었다.

## V. 결론 및 제언

1. 자석의 위치와 유도 전류 사이의 관계를 실험으로 알아냈다.
2. 자석이 코일의 중앙을 지날 때 유도 전류가 0이 됩니다. 이때, 코일의 중앙은 3번 구간과 4번 구간의 사이이다.
3. 자석이 코일의 중앙을 지날 때, 자기 다발이 증가에서 감소로 바뀌면서 자기 다발의 변화율이 0이 된다.
4. 트레이커 영상 분석으로 자석의 위치, 검류계 바늘의 위치를 재서 자기 다발의 변화와 유도 전류의 관계에 대한 패러데이의 전자기 유도 법칙을 확인할 수 있었다.

## VI. 참고문헌

김소연 and 김중복. (2011). RL회로에서 코일을 통과하는 자석의 자유낙하 현상 분석. *현장과학교육*, 5(1), 35-41.

Robert Kingman, S. Clark Rowland, Sabin Popescu; An experimental observation of Faraday's law of induction. *Am. J. Phys.* 1 June 2002; 70 (6): 595 - 598



물리B

13\_열 증착법으로 제조한 구리 박막의 저항 탐구



# 열 증착법으로 제조한 구리 박막의 저항 탐구

김상원 (반림중학교 2학년)

안승학 (삼계중학교 2학년)

이솔 (능동중학교 2학년)

이준영 (웅남중학교 2학년)

정지후 (토월중학교 2학년)

지도교수 : 곽진성 (창원대학교 물리학과)

## 초록

본 연구를 통해 금속의 특성들과 각각의 요소와의 관계를 이해하여 산업 발전에 필요한 전자기기 내의 금속의 주요 특성을 배우며 탐구한다. 또한 연구에 사용되는 장비의 특성을 조사하며 경험한다. 이론을 바탕으로 연구하여 연구 결과와 이론 간의 관계를 탐구하며 금속 박막의 저항과 기타 조건의 상관관계, 금속 박막의 저항과 온도의 관계를 이해한다. 본 실험에서는 Thermal Evaporator를 이용하여 금속 박막을 제작하고 Vacuum Probe Station을 사용하여 금속 박막의 저항을 측정하고 연구 결과를 도출한다. 금속 박막의 길이, 폭, 두께에 따른 저항의 변화와 금속 박막의 저항과 온도의 변화를 기록하여 이론적 배경의 수식과 같은 경향성을 확인한다. 이처럼 다양한 조건에서의 금속 박막의 저항을 파악하여 탐구하는 것은 미래 사업의 발전에 기여할 수 있는 지식의 기반이 된다.

## I. 서론

현재 시대는 전자기기가 가지는 중요성이 큰 사회이다. 전자기기는 다양한 특징을 가지고 있으나, 그중 가장 중요하고 대표적인 특징 중 전류가 흐를 수 있는 도체가 이용된다는 것이다. 도체에서 전류가 흐를 때 저항이 발생하게 되는데, 저항이란 전류가 흐르는 것을 방해하는 정도이다. 이 저항으로 인해 전자기기에서 발열 현상 등이 일어난다. 이러한 저항에 대해 잘 알고 있어야 최선의 제품을 생산해낼 수 있으며, 저항을 줄이는 방법을 알아내어 발전시켜 나갈 수 있다. 4차 산업 시대가 되고 반도체 산업이 중요해지면서 전자기기 내 금속의 전기저항은 현대 산업 뿐만 아니라 미래의 산업에서 필수적인 요소일 것이라 예상된다. 이처럼 중요하게 사용되는 금속의 저항은 다양한 조건으로 증착한 구리 박막을 제조하여 측정할 수 있으며, 이를 통해 구리 박막의 전기적 특징을 알 수 있다.

본 연구에서 Thermal Evaporator, Vacuum Probe Station 등 다양한 실험장비를 이용하여 구리 박막을 증착하고 구리 박막의 저항을 측정한다. 구리 박막의 길이, 폭, 두께를 달리하여 Thermal Evaporator를 이용하여 증착시킨 후 변화시킨 각각의

요인에 따라 저항의 변화를 측정한다. 또한 동일한 조건으로 증착한 구리 박막의 온도에 따른 저항값의 변화를 관찰한다.

이러한 실험을 거쳐 나온 연구 결과를 통해 금속 박막의 저항과 기타 조건의 상관관계에 대해 이해하며, 금속 박막의 온도에 따른 저항 변화를 탐구한다. 전자기기 내의 금속의 특성에 대해 실험을 통해 이해하며 앞으로의 발전에 기여할 수 있는 지식의 발판을 만들 수 있다.

## II. 이론적 배경

저항이란 물질이 전류에 흐름을 얼마나 방해하는지를 측정할 물리량으로, 단위는 옴( $\Omega$ )이다. 도체의 저항은 온도나 박막의 구조적 특성에 따라 다르게 나타나는 값인데, 이를 구하기 위한 수식을 이용한다.

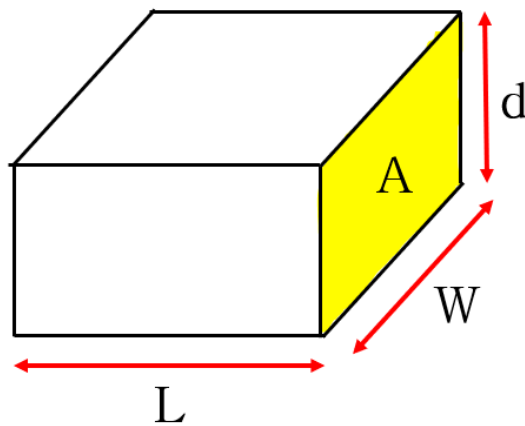


그림 1. 수식 (2)에 관한 박막의 모식도

도체의 전기저항을  $R$ 은 길이  $L$ 에 비례하고 단면  $A$ 에 반비례한다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \text{----- (1)}$$

수식 (1)로 표현하며, 비저항수  $\rho$ 는 도체의 비저항으로 단위는  $\Omega \cdot m$ 이다.  $A$ 는 박막의 단면적을 의미하므로 박막의 폭( $W$ )과 박막의 두께( $d$ )의 곱인  $Wd$ 로 변환한다.

이는

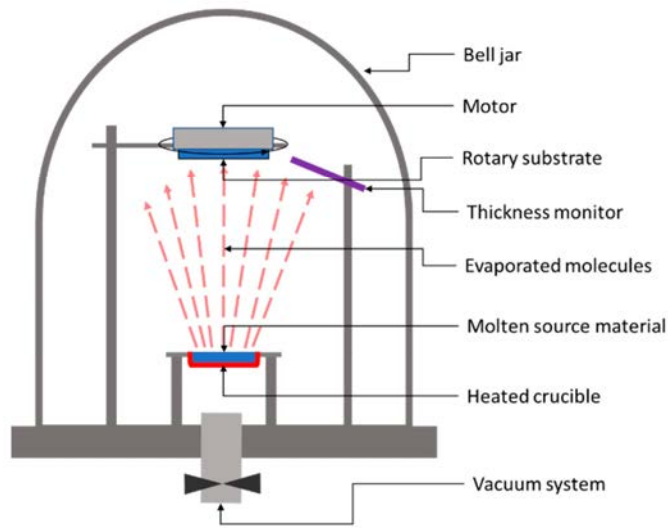
$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Wd} \text{----- (2)}$$

로 표현된다. 이때 비저항은 수식 (1)과 수식 (2)을 통하여

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{RWd}{L} \text{----- (3)}$$

로 구할 수 있다. 수식 (3)을 이용하여 박막에 대한 값을 지정하여 제작하고, 저항을 측정하면 비저항을 구할 수 있다.

그림 2. 열 증착기의 모식도 (그림 출처: Materials, 15(23), 8427)



구리 박막을 증착하기 위해 PVD(Physical Vapor Deposition, 물리적 기상 증착법)의 일종인 열 증착법(Thermal Evaporation)을 사용한다. 이는 증착시킬 물질에 전류를 흘려 생기는 열로 물질을 기화시킨 후 기판에 응축시키는 방법으로, 박막 증착법 중 가장 간단하다.

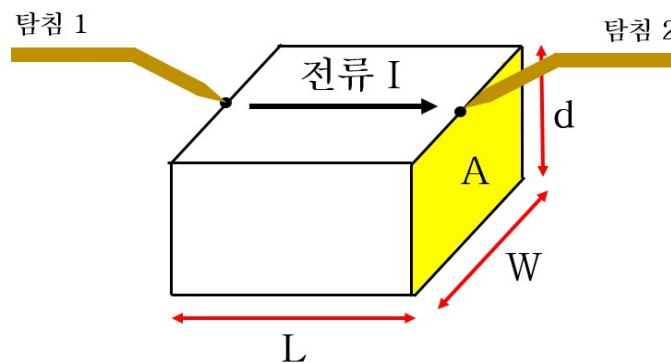


그림 3. Vacuum Probe Station을 이용한 저항 측정 모식도

열 증착법으로 구리 박막이 완성되면 그림 3과 같이 Vacuum Probe Station을 이용하여 해당 박막에 탐침 1에서 탐침 2로 전류를 흘려 전압을 측정한다. 측정한 전압을 이용하여 옴의 법칙( $V=IR$ )을 사용하여 구리 박막의 전기저항을 구한다.

일반적으로 금속의 전기저항은 온도에 비례해서 증가하는데 이는 금속의 원자가 온도가 높아질수록 운동이 활발해져 물질을 통과하는 전자와 부딪힐 확률이 더욱 증가하게 되므로 전자와의 충돌 횟수가 증가하여 저항이 커지게 된다. 저항과 온도 관계를 수식적으로 표현하면 온도 범위가 한정적인 경우에서 저항과 온도의 사이에서는

$$R_2 = R_1 \{1 + \alpha(T_2 - T_1)\} = R_1 (1 + \alpha \Delta T) \text{----- (4)}$$

와 같은 관계식이 된다. 기준온도  $T_1$ 의 저항을  $R_1$ , 온도  $T_2$ 의 저항을  $R_2$ 라고 하고,  $\alpha$ 는 금속의 저항온도계수로서 보통 금속에서는  $0.0038 \sim 0.0068/^\circ\text{C}$ 이다. 즉, 저항의 변화는 온도의 변화와 비례한다.

### III. 연구 방법

구리 박막을 증착하기 위해 박막 증착법 중에서 가장 간단한 열 증착법(Thermal Evaporation)을 활용하였다. 열 증착법은 PVD(Physical Vapor Deposition, 물리적 기상 증착법)의 일종으로 열을 이용하여 박막의 재료를 기화시켜 기판 위에 증착시키는 방법을 말한다. “김관도. (2020). Thermal Evaporation 증발원 개발 및 응용에 관한 연구. 반도체디스플레이기술학회지, 19(3), 19-22.”를 인용하여 실험을 진행한 열 증착법의 과정은 다음과 같다.

- 1) 챔버를  $1.0 \times 10^{-6}$  torr 이하의 진공 상태로 만든다.
- 2) 증착하려는 물질의 전류를 흐르게 하여 저항열을 이용해 기화시킨다.
- 3) 기체 상태의 물질이 기판을 만나 응축된다.
- 4) 분자들이 계속해서 쌓여 기판에 증착된다.

이와 같이 구리 박막을 증착할 수 있지만 식 (2)를 탐구하기 위하여 각각의 실험 조건에 따라 길이, 폭, 두께를 다르게 해야 한다. 구리를 증착시키고자 하는 유리 기판 위에 원하는 길이와 폭으로 구멍을 낸 PET 필름을 붙여서 원하는 모양으로 만든다. 두께는 그림 2와 같이 Thermal Evaporator의 thickness monitor를 참고한다.

구리 박막의 길이, 폭, 두께에 따른 저항을 측정하기 위해 본 연구에서는 “Singh, Y. (2013). Electrical resistivity measurements: a review. In International journal of modern physics: Conference series (Vol. 22, pp. 745-756). World Scientific Publishing Company.”를 인용하여 실험을 진행하였다. 이 참고문헌에서는 그림 4처럼 2단자 측정방법으로 전류를 공급하고 두 지점의 전압을 측정하여 저항을 계산한다.

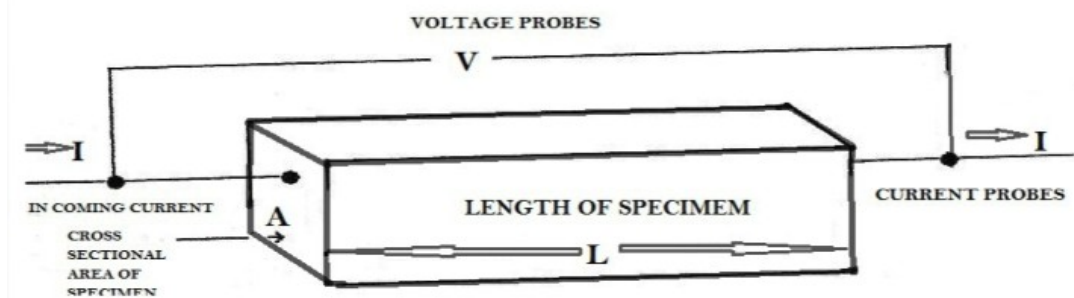


그림 4. 참고문헌의 2단자 측정 모식도

(그림 출처: International journal of modern physics: Conference series (Vol. 22, pp. 745-756). World Scientific Publishing Company.)

저항 측정에 관하여 참고문헌과 일치하며 본 실험은 그림 3과 같이 Vacuum Probe Station의 탐침 1, 2에서 전류를 공급하고 전압을 측정하여 측정된 전압을 이용하여 옴의 법칙( $V=IR$ )을 사용하여 구리 박막의 저항을 구한다.

#### IV. 연구 결과

##### 1. 길이(L), 폭(W), 두께(d)에 따른 저항 측정값

##### 1-1. 길이(L)가 다른 구리 박막

길이 변화 실험	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
길이(L)	0.5cm	1cm	2cm	3cm
폭(W)	0.5cm	0.5cm	0.5cm	0.5cm
두께(d)	100nm	100nm	100nm	100nm
저항(R)	4.1Ω	4.6Ω	5.6Ω	6.2Ω

표 1. 길이(L)가 다른 구리 박막의 조건 및 저항

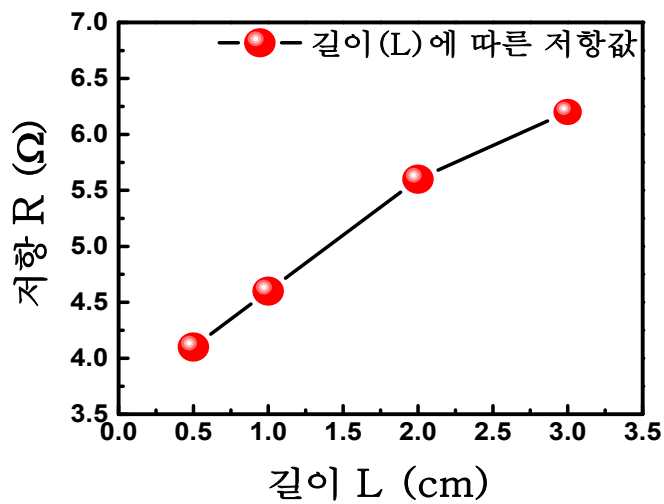


그림 5. 길이(L)의 변화에 따른 저항

식 (2)에서 저항과 길이가 비례하는 것을 표 1과 그림 5를 측정 결과로써 참고하여 구리 박막의 길이가 늘어남에 따라 저항이 증가함을 확인한다.

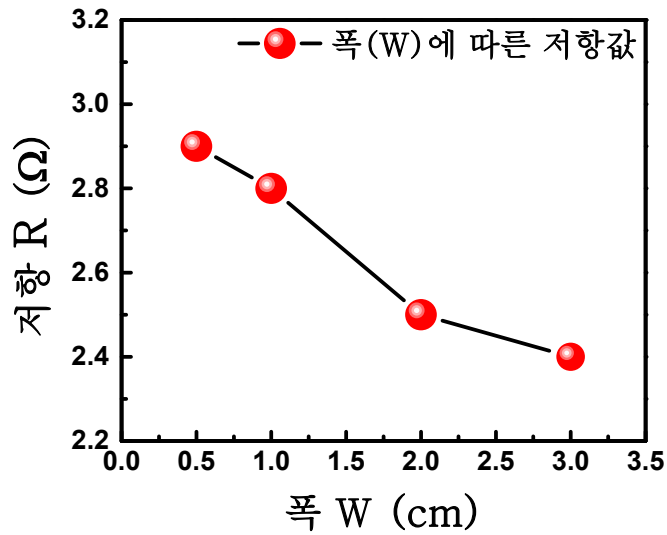
##### 1-2. 폭(W)이 다른 구리 박막

폭 변화 실험	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>
길이(L)	0.5cm	0.5cm	0.5cm	0.5cm
폭(W)	0.5cm	1cm	2cm	3cm
두께(d)	200nm	200nm	200nm	200nm
저항(R)	2.9Ω	2.8Ω	2.5Ω	2.4Ω

표 2. 폭(W)이 다른 구리 박막의 조건 및 저항

그림 6. 폭(W)의 변화에 따른 저항

식 (2)에서 저항과 폭이 반비례하는 것을 표 2과 그림 6을 측정 결과로써 참고하여 구리 박막의 폭이 늘어남에 따라 저항이 감소함을 확인한다.



1-3. 두께(d)가 다른 구리 박막

두께 변화 실험	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
길이(L)	0.5cm	0.5cm	0.5cm	0.5cm
폭(W)	0.5cm	0.5cm	0.5cm	0.5cm
두께(d)	100nm	200nm	300nm	400nm
저항(R)	4.1Ω	2.9Ω	2.3Ω	2.0Ω

표 3. 두께(d)가 다른 구리 박막의 조건 및 저항

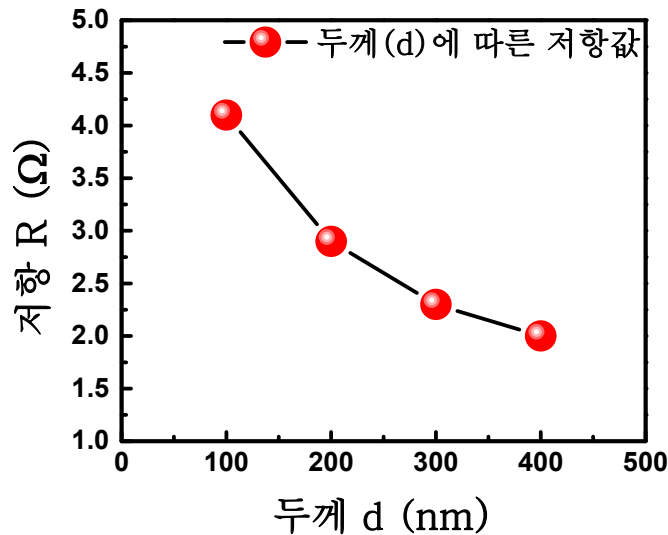


그림 7. 두께(d)의 변화에 따른 저항

식 (2)에서 저항과 두께가 반비례하는 것을 표 3과 그림 7을 측정 결과로써 참고하여 구리 박막의 두께의 증가에 따라 저항의 감소를 확인한다.

2. 온도에 따른 저항 측정값

Sample A는 길이(L): 3cm, 폭(W): 0.5cm, 두께(d): 100nm이고, Sample B는 길이

(L): 0.5cm, 폭(W): 3cm, 두께(d): 200nm이고, Sample C는 길이(L): 0.5cm, 폭(W): 0.5cm, 두께(d): 400nm이다. 이와 같은 조건으로 증착된 구리 박막(Sample A, Sample B, Sample C)을 Vacuum Probe Station으로 25°C를 기준으로 45°C까지 5°C 간격으로 온도를 높여 온도변화에 따른 저항값을 측정한다.

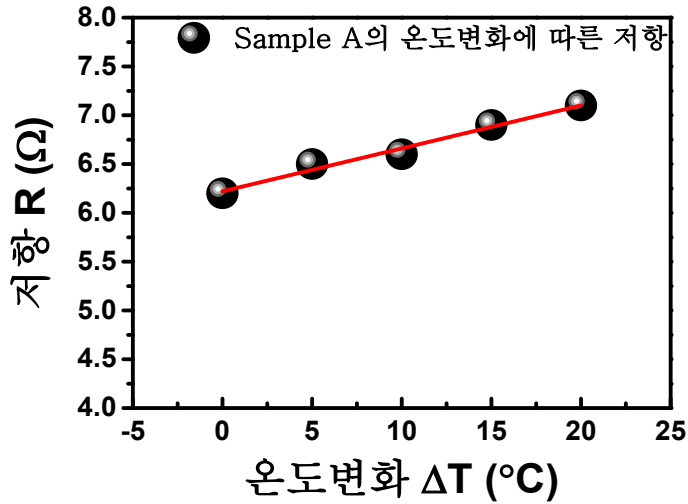


그림 8. Sample A의 온도변화에 따른 저항값

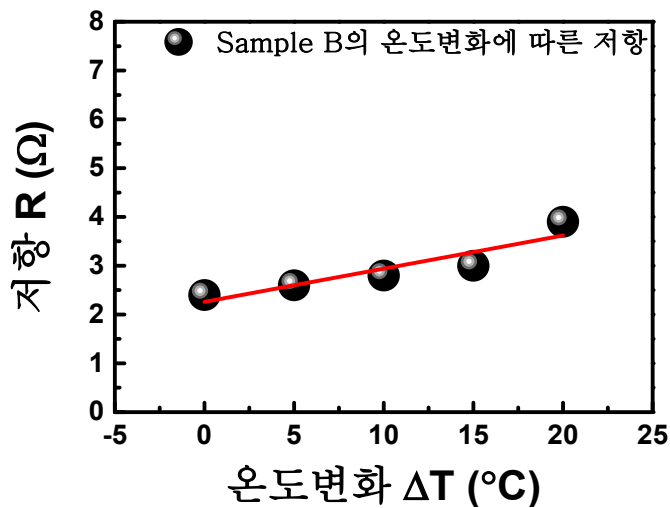
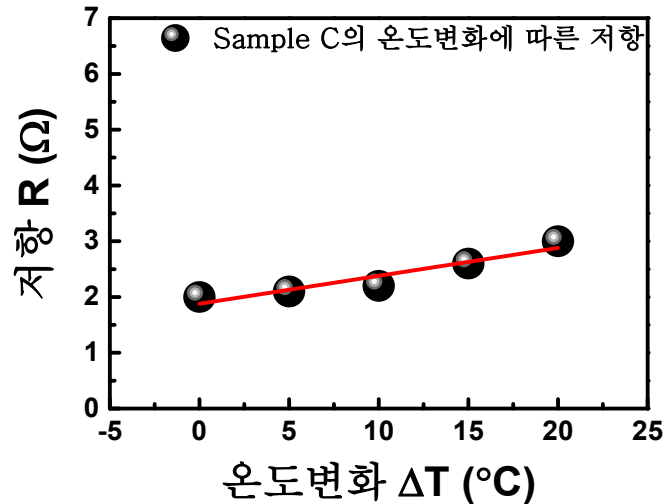


그림 9. Sample B의 온도변화에 따른 저항값

그림 10. Sample C의 온도변화에 따른 저항값

식 (4)에서 온도변화에 따라 저항이 선형적으로 증가함을 측정 결과인 그림 8, 그림 9, 그림 10을 참고하여 온도와 저항이 서로 비례하는 것을 확인한다.



## V. 결론 및 제언

필요한 조건으로 Thermal Evaporator를 이용하여 제조한 구리 박막의 저항은 연구이론인 수식  $R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Wd}$ 에서 길이(L)에 비례하고, 폭(W)에 반비례하고, 두께(d)에 반비례하는 것을 직접 실험을 통해 탐구하여 연구 결과가 연구이론과 같다는 것을 결론지었다. 또한 금속의 저항과 온도 관계를 설명하는 이론의 수식  $R_2 = R_1\{1 + \alpha(T_2 - T_1)\} = R_1(1 + \alpha\Delta T)$ 에서 온도가 증가할수록 저항이 증가하는 것을 Vacuum Probe Station 내의 온도를 높이면서 저항을 측정하여 연구이론과 같은 경향을 가지는 것을 확인하였다. 이처럼 연구이론을 바탕으로 금속의 저항을 다양한 조건에서 측정하여 금속 박막의 여러 요소와의 관계를 탐구하며 이해하고, 전자 기기 내의 금속에 대한 특성을 직접적으로 경험한 연구이다.

## VI. 참고문헌

1. 한응교, 이명호, 박준서, & 전준탁. (1990). 접착형 박막측은 Gauge 의 온도특성에 관한 연구. 설비공학논문집, 2(4), 327-339.
2. 김관도. (2020). Thermal Evaporation 증발원 개발 및 응용에 관한 연구. 반도체 디스플레이기술학회지, 19(3), 19-22.
3. Boerasu, I., & Vasile, B. S. (2022). Current Status of the Open-Circuit Voltage of Kesterite CZTS Absorber Layers for Photovoltaic Applications—Part I, a Review. Materials, 15(23), 8427
4. Singh, Y. (2013). Electrical resistivity measurements: a review. In International journal of modern physics: Conference series (Vol. 22, pp. 745-756). World Scientific Publishing Company.