



# Physics Laboratory

---

## 실험 2-5. 전류가 만드는 자기장

### 실험 목적

전하가 움직이면 그 주위에는 자기장이 형성된다. 전류가 흐르는 도선 주위에 생기는 자기장은 비오-사바르 법칙 (Biot-Savart law)을 따른다. 이 실험에서는 도선을 이용해서 만든 간단한 구조물에 전류를 흘리고, 그 주위에 형성되는 자기장을 측정한다. 측정 위치나 도선에 흐르는 전류를 바꾸어가며 측정해서 자기장의 변화가 비오-사바르 법칙으로부터 예측된 것과 부합하는지 확인해 본다.

### 실험 개요

- 3 축 자기장 센서를 사용하여 전류가 흐르는 솔레노이드나 원형 코일, 헬름홀츠 코일에 의해 그 중심축 상에 형성되는 자기장을 측정한다.
- 측정을 통해 위치와 자기장의 관계, 구조물에 흐르는 전류와 자기장의 관계를 알아본다.
- 비오-사바르 법칙을 써서 자기장을 계산하는 원리를 이해하고, 측정 결과와 이론적인 계산을 비교해 본다.

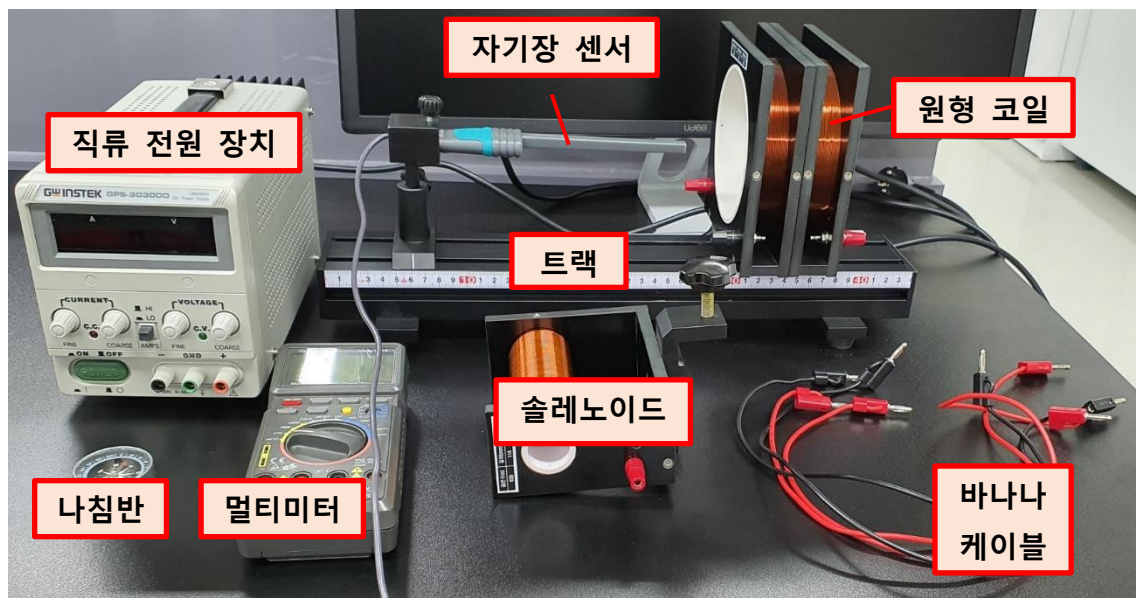
## 실험 방법

실험실에는 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (그림 1 참조)

자기장 측정 장치	트랙	1 개
	3 축 자기장 센서	1 개
	원형 코일 (길이 20 mm, 외경 114 mm, 감은 수 210 회)	2 개
	솔레노이드 (길이 114 mm, 외경 32 mm, 감은 수 630 회)	1 개
직류 전원 장치		1 대
바나나 케이블		4 개
멀티미터		1 개
나침반		1 개

이외에도 더 필요한 것이 있으면 담당 조교에게 문의하거나 각자 미리 준비하도록 한다.

※참고: 직류 전원 장치 사용법에 대해서는 『2-6. 전자기 유도』 매뉴얼을 참고하시오.  
또한 멀티미터 사용 방법을 미리 숙지해 두도록 한다.

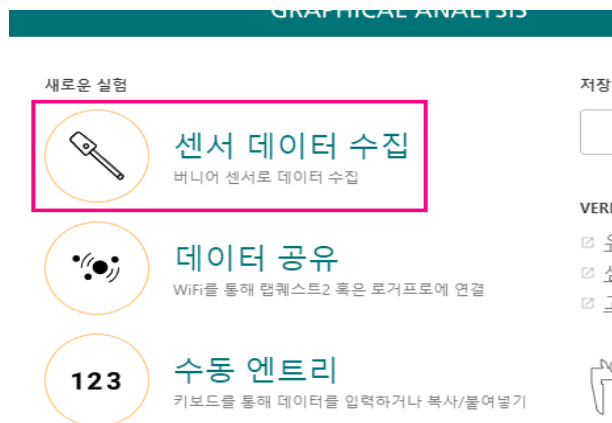


[그림 1] 자기장 측정 실험 장치

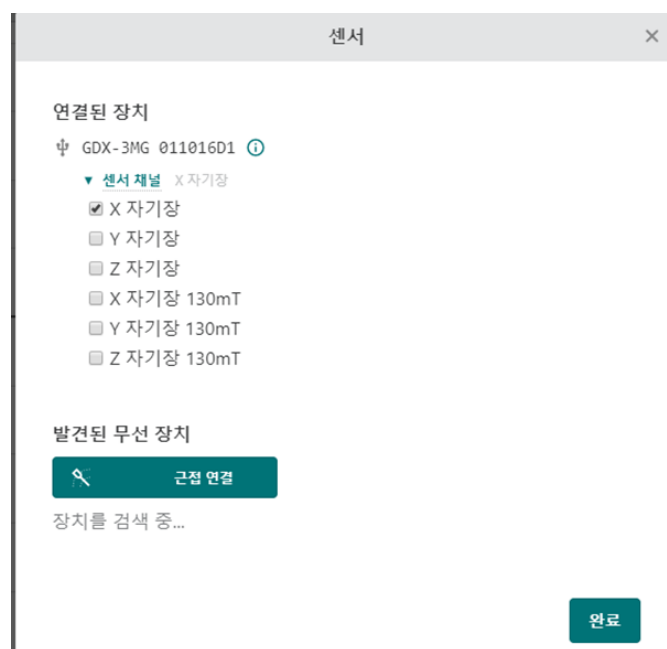
본격적인 실험에 앞서 측정 프로그램을 구동시키고 데이터를 수집할 준비를 갖춘다.

1. 센서를 컴퓨터에 연결하고 프로그램을 실행시킨다. (바탕화면 → physlab 폴더 → 전류가 만드는 자기마당 폴더 → 바로 가기 실행)

2. 「센서 데이터 수집」 버튼을 누른다.



3. 센서가 정상적으로 연결되었다면 「연결된 장치」에 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 장치의 「센서 채널」을 클릭한 다음, 「X 자기장」 또는 「X 자기장 130mT」를 선택하고 「완료」 버튼을 누른다.

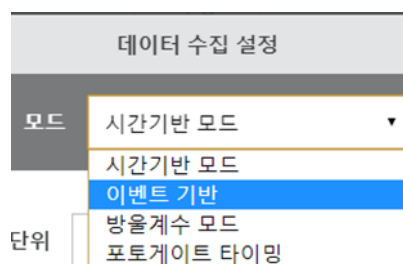


※참고: 「X 자기장」 채널의 경우 측정할 수 있는 자기장의 최대 크기가 5 mT 이고, 「X 자기장 130 mT」의 경우엔 130 mT 이다. 이 실험에서는 대체로 「X 자기장」을 사용하는 편이 적절하다. 그러나 더 넓은 범위가 필요할 경우 「X 자기장 130 mT」 채널을 선택한다.

4. 방금 선택한 채널이 화면 오른쪽 하단의 버튼에 표시된다. 이를 눌러서 아래와 같은 창이 나오면 「영점」을 클릭하여 영점을 맞춘다. 영점은 실험 중에도 몇 차례 맞추어야 할 수 있다. 영점을 맞출 때는 코일이나 솔레노이드에 전류가 흐르지 않아야 한다.



5. 좌측 하단의 「모드」를 클릭한다. (디폴트는 “모드: 시간기반 모드”로 되어 있다) 데이터 수집 설정창이 나오면 모드를 「이벤트 기반」으로 변경한다.



변경이 이루어졌으면 다음으로 이벤트 모드 항목에서 「수동보관 모드」를 선택한다. 이벤트 이름에는 “거리”, 단위에는 cm 를 입력하고 「완료」버튼을 누른다.

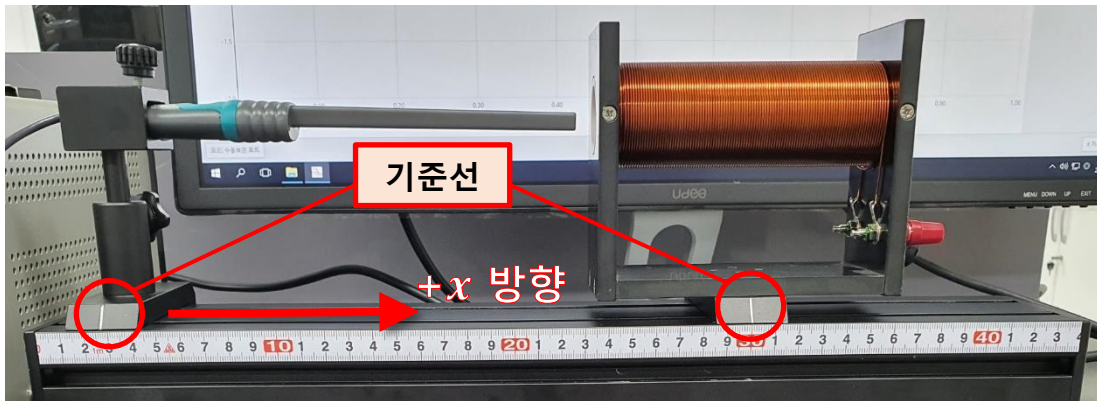


여기까지 마쳤으면 프로그램을 사용해서 측정할 준비가 된 셈이다.

권장할 만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

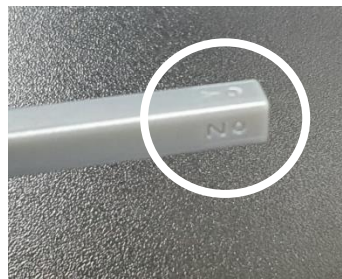
<스텝 1> 실험 장치의 기본적인 구성을 점검하고 제원 등을 기록해 둔다. 다음과 같은 점에 특히 유의한다.

(1) 센서, 솔레노이드, 원형 코일의 홀더가 트랙을 따라 원활하게 움직이는지, 또 위치를 쉽게 알 수 있도록 그어놓은 기준선이 선명하게 보이는지 확인한다. (그림 2 참조)



[그림 2] 기준선과  $x$  축 (편의상 트랙을 따라 움직이는 홀더들은  $x$  축과 평행하게 움직이는 것으로 보기로 한다).

(2) 3축 자기장 센서에서 실제 센서 부품은 막대의 끝 부근에 있다. 이곳의 세 면에는 작은 원이 표시되어 있는데(그림 3 참조), 센서 부품의 위치를 각 면에 정사영시킨 것으로 보면 된다. 원형 코일이나 솔레노이드의 중심축 상에서 센서 부품이 움직일 수 있도록 센서를 최대한 잘 조정한다. 그리고 센서 부품이 홀더의 기준선으로부터  $x$  축 상에서 얼마나 떨어져 있는지 측정한다.



[그림 3] 3축 자기장 센서의 끝 부분

<스텝 2> 솔레노이드 중심축 상의 자기장 측정:

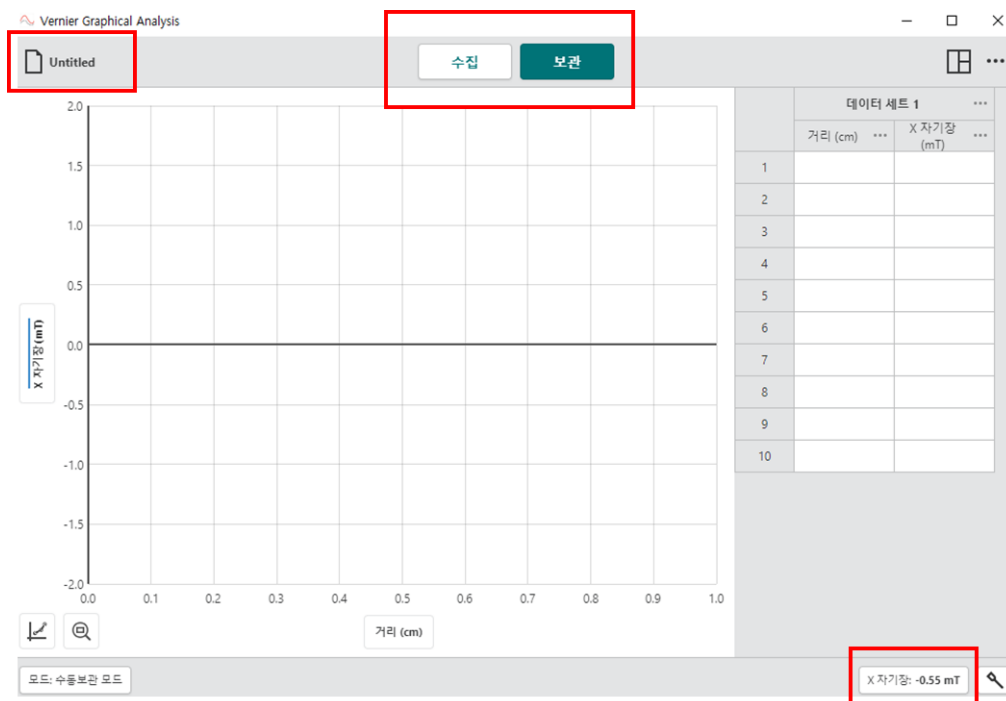
(1) 솔레노이드의 기준선을 트랙의 눈금자 30 cm 지점에 맞추고 센서의 기준선은 3 cm 지점에 맞춘다. 바나나 케이블을 사용하여 솔레노이드와 멀티미터, 직류 전원 장치를 직렬로 연결한다. 그 다음으로 전원 장치를 켜고, 전류를 0.5 A 에 맞춘다.

※참고: 실험 중 코일에 실제로 흐르는 전류는 전원 장치의 패널에 표시된 값과 다소 다를 수 있다. 멀티미터로 측정한 전류를 기록하도록 한다.

(2) 나침반을 이용해 솔레노이드 중심축 상의 자기장 방향을 조사한다. 전류의 방향을 바꾼 다음 한 번 더 반복한다.

(3) 센서를 기준선 위치 3 cm 부터 13 cm 까지 0.5 cm 씩 이동시켜가며 솔레노이드 중심축 상의 자기장을 측정한다. 측정한 데이터( $x$  성분)는 화면 오른쪽 하단의 채널 버튼에 나타난다. 데이터를 저장하는 방법은 다음과 같다.

프로그램 창의 위쪽에 있는 「수집」 버튼을 누른다.

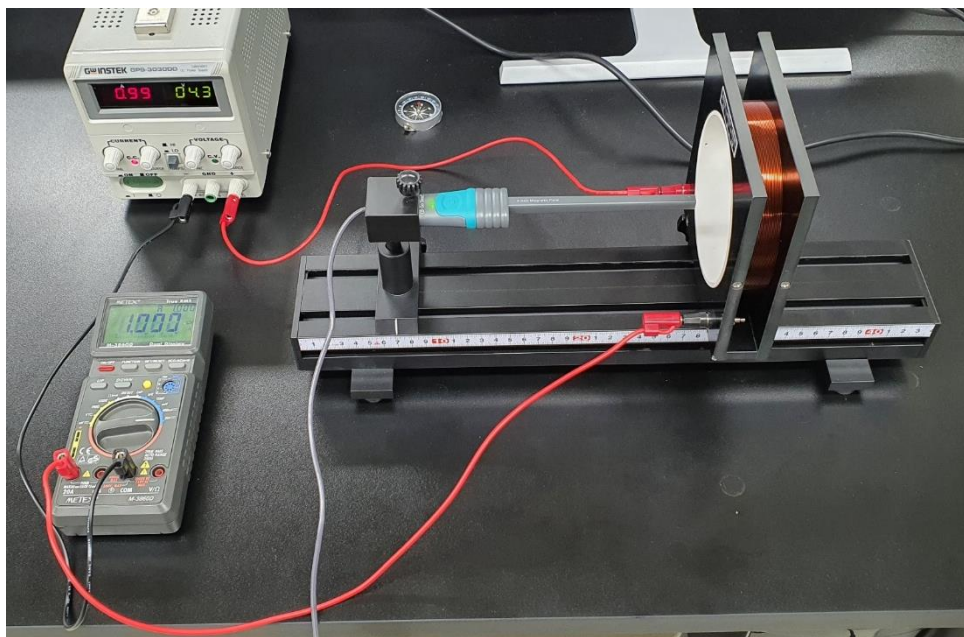


다음으로 「보관」 버튼을 누른다. 그러면 현재의 거리(즉 그래프의  $x$  축 값)를 입력하는 창이 나온다. 입력 후 「보관 점」을 누르면 화면 오른쪽의 「데이터 세트」 탭에 방금 입력한 데이터가 기록되고, 그래프에도 점이 표시되는 것을 볼 수 있다.

새로운 측정 데이터를 저장하고 싶으면 「중지」 버튼을 누르고 다시 「수집」을 클릭하면 된다. 기록한 데이터를 파일로 저장하고 싶으면 프로그램 창 왼쪽 상단의 「Untitled」 (실험 이름, 바꿀 수 있음) 버튼을 누르고 내보내기를 선택한다.

※참고: 그래프의 개형이 잘 그려지도록 충분히 많은 데이터를 기록하는 것이 좋다. 위에서 권장한 21개로 부족하다면 더 측정하도록 한다.

<스텝 3> 단일 원형 코일 중심축 상의 자기장 측정:



[그림 4] 원형 코일이 만드는 자기장 측정

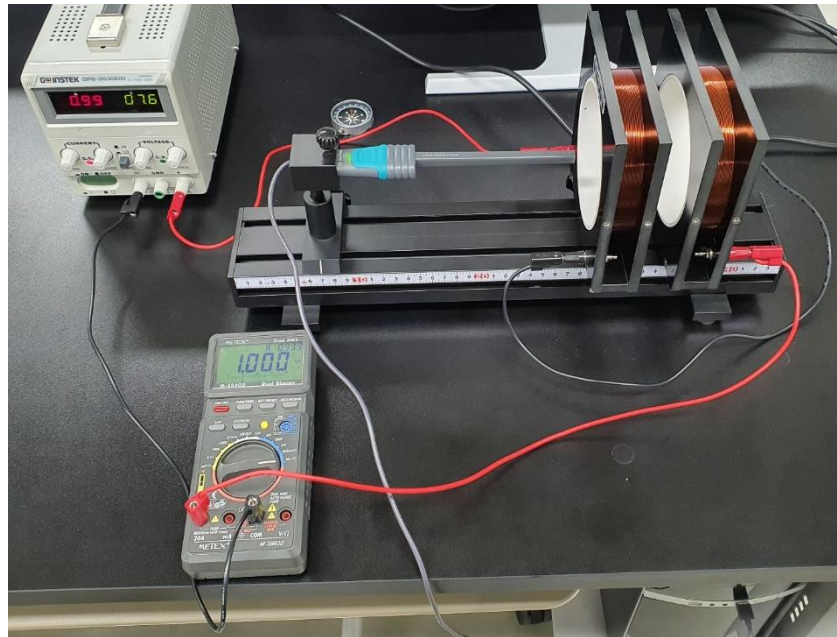
(1) 원형 코일의 기준선을 트랙의 눈금자 30 cm 지점에 맞추고 센서의 기준선은 7 cm 지점에 맞춘다. 원형 코일, 멀티미터, 직류 전원 장치를 직렬로 연결하고, 전류를 1.0 A에 맞춘다. (그림 4 참조)

(2) 나침반을 이용해 원형 코일 중심축 상의 자기장 방향을 조사한다. 전류의 방향을 바꾼 다음 한 번 더 반복한다.

(3) 센서를 기준선 위치 7 cm 부터 13 cm 까지 0.5 cm 씩 이동시켜가며 원형 코일 중심축 상의 자기장을 측정한다. (역시 그래프 개형이 잘 그려지지 않는다면 더 많이 측정한다.)



<스텝 4> 헬름홀츠 코일 중심축 상의 자기장 측정:



[그림 5] 헬름홀츠 코일이 만드는 자기장 측정

- (1) 원형 코일 두 개를 이용해 헬름홀츠 코일을 만든다. 두 코일의 기준선은 각기 트랙의 눈금자 30 cm 지점과 36 cm 지점에 맞추고, 센서의 기준선은 5 cm 지점에 맞춘다. 원형 코일 두 개와 멀티미터, 직류 전원 장치를 직렬로 연결하고, 전류를 1.0 A에 맞춘다. (그림 5 참조)
- (2) 나침반을 이용해 헬름홀츠 코일 중심축 상의 자기장 방향을 조사한다. 전류의 방향을 바꾼 다음 한 번 더 반복한다.
- (3) 센서를 기준선 위치 5 cm 부터 15 cm 까지 0.5 cm 씩 이동시켜가며 헬름홀츠 코일 중심축 상의 자기장을 측정한다. (역시 그래프 개형이 잘 그려지지 않는다면 더 많이 측정한다.)
- (4) 이번에는 두 코일에 서로 반대 방향의 전류가 흐르게 한 다음, 위 (2)와 (3)을 반복한다. 앞에서 낸 결과와는 어떤 차이가 있는지 유의하며 실험한다.



실험 노트의 작성은 다음과 같은 방법으로 하는 것이 좋다.

종목 : [솔레노이드 / 단일 원형 코일 / 헬름홀츠 코일]의 중심축 상의 자기장 측정

자기장 센서의 위치 (cm)	자기장의 축( $x$ ) 성분 (mT)	
	실험값	이론값

헬름홀츠 코일 실험의 경우 두 코일에 흐르는 전류가 같은 방향일 경우와 반대 방향을 경우로 나누어 결과를 정리한다.

실험 결과와 계산을 통해 얻은 결과를 그래프로 그려서 비교해 보자.

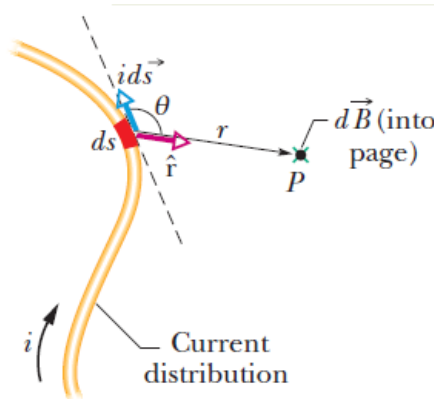
오차가 있다면 그 원인에 대해 생각해 보도록 한다.

### 1. 비오-사바르 법칙

전류가 흐르는 도선 주위에 형성되는 자기장은 비오-사바르 법칙을 따른다. 그림 5처럼 전류  $i$  가 흐르는 도선을 생각하자. 이 도선의 미소 부분(길이  $ds$ )에 의해  $P$  점에 형성되는 자기장을  $d\vec{B}$  라면 이는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

여기서  $d\vec{s}$  의 방향은 전류가 흐르는 방향과 같고  $\vec{r}$  은 도선의 미소 부분을 기준으로 한 점  $P$  의 위치를 의미한다. 위 식을 보면 자기장  $d\vec{B}$  의 크기는 전류  $i$  와  $\sin\theta$  에 비례하며  $r$  의 제곱에 반비례한다. ( $\theta$  는  $d\vec{s}$  와  $\vec{r}$  사이의 각도) 그리고 그 방향은 전류 흐름 방향에서  $\vec{r}$  의 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사가 진행되는 방향과 같다.



[그림 6] 비오-사바르 법칙 (Walker, 2020, p. 727).

도선 전체에 의해 공간상의 한 지점에 형성되는 자기장을 구하고 싶으면, 도선의 각 미소 부분이 그 지점에 만드는 자기장을 모두 벡터적으로 합하면 된다.

### 2. 솔레노이드가 만드는 자기장

도선을 원통형으로 촘촘하게 감아서 만든 전자석을 솔레노이드라고 한다. 솔레노이드의 도선에 전류를 흘렸을 때 솔레노이드 내부에 생성되는 자기장의 세기는 단위 길이당

도선을 감은 수에 비례한다.

길이가 무한히 길고 도선이 빈틈없이 감긴 이상적인 솔레노이드라면 외부에 만드는 자기장은 없고, 내부 자기장의 크기는 다음과 같다.

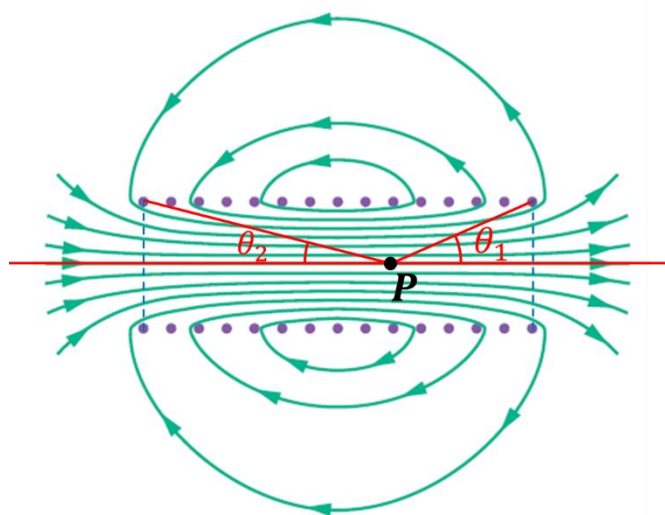
$$B = \mu_0 ni. \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 단위 길이당 도선이 감긴 수,  $i$ 는 전류의 크기이다. 자기장의 방향은 도선에 전류가 흐르는 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사가 진행되는 방향(솔레노이드의 축과 평행)과 같다.

그런데 이 실험에서 사용하는 것과 같은 실제 솔레노이드는 길이가 유한하다. 따라서 외부 자기장이 0이 아니며, 내부에서도 자기장의 크기가 균일하지 않다. 비오-사바르 법칙을 써서 길이가 유한하고 도선이 균일하게 감긴 솔레노이드의 중심축 상의 한 지점에 만들어지는 자기장을 구하면 그 세기는

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 ni (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (3)$$

가 됨을 알 수 있다. 여기서  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 자기장을 구하고 싶은 점과 솔레노이드의 양쪽 가장자리 도선을 이은 선이 중심 축과 이루는 각도를 각각 의미한다. (그림 7 참조) 중심축 상의 자기장 방향은 솔레노이드가 무한히 길 때와 같다. 연습 삼아 길이가  $l$ ,



**[그림 7]** 유한한 솔레노이드의 자기장. 중심축 상의 점  $P$ 에서 자기장을 구하고 싶으면  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 식 (3)에 대입하면 된다 (Walker, 2020, p. 739). 반지름이  $R$ 인 솔레노이드의 정중앙에 형성되는 자기장을 구해보자. 이 경우 위 식(3)에

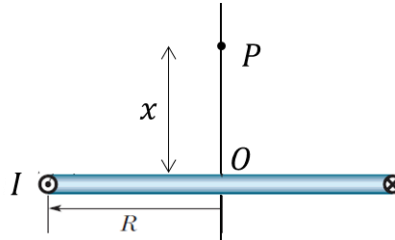
$$\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \quad (4)$$

를 대입하면 된다. 그러면 구하는 자기장의 세기는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$B_{\text{center}} = \mu_0 n i \frac{1}{\sqrt{1 + 4(R/l)^2}} \quad (5)$$

중심축 상의 다른 점에서 자기장도 구해보고, 실험에서 측정된 값과 비교해 보자.

### 3. 원형 코일이 만드는 자기장



[그림 8] 원형 코일 (Walker, 2020, p. 743).

그림 8과 같이 반지름이  $R$ 인 원형 도선 코일에 전류  $I$ 가 흐른다고 하자. 그 중심축 상의 어떤 점  $P$ 에서 자기장을 구하면, 그 세기는 다음과 같다.

$$B(x) = \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{1}{(1 + (x/R)^2)^{3/2}} \quad (6)$$

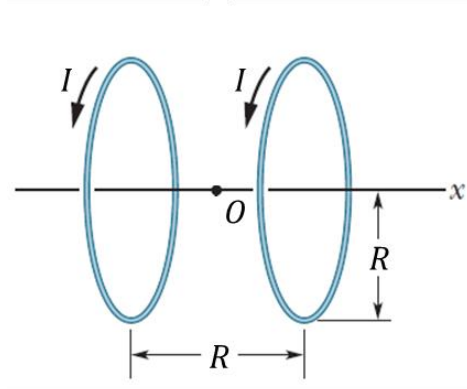
방향은 역시 전류 흐름에 대해 오른나사의 진행 방향이다. 만약 길이에 비해 반지름이 매우 큰 원통에 도선이  $N$ 회 균일하게 감겨 있는 코일이 있다면, 근사적으로 이는  $N$ 개의 원형 코일이 모여 있는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 그 중심축 상의 자기장 세기는

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2R} \frac{1}{(1 + (x/R)^2)^{3/2}} \quad (7)$$

로 근사적으로 표현할 수 있다.

### 5. 헬름홀츠 코일이 만드는 자기장

헬름홀츠 코일은 그림 9와 같이 중심축을 공유(동축)하고 반지름 및 도선 감은 수가 동일한 두 개의 원형 코일을 그 반지름만큼 서로 떨어지게 배치해서 만든 것이다.



[그림 9] 헬름홀츠 코일 (Walker, 2014, p. 768).

원형 코일 하나의 감은 수는  $N$  이고 반지름은  $R$  이라고 하자. 각 코일에 크기가  $I$  인 전류가 같은 방향으로 흐른다면 중심축 상의 어떤 지점에서 자기장 세기는 다음과 같다. (앞의 식 (7)을 이용해 쉽게 보일 수 있다)

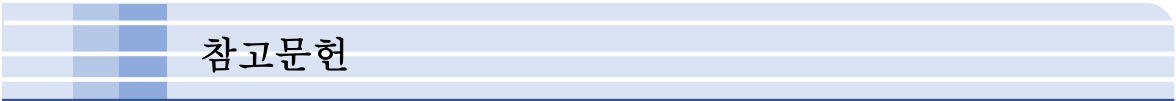
$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2R} \left( \frac{1}{\left[1 + (x/R + 1/2)^2\right]^{3/2}} + \frac{1}{\left[1 + (x/R - 1/2)^2\right]^{3/2}} \right) \quad (8)$$

편의상 중심축을  $x$  축, 헬름홀츠 코일의 중심을 원점으로 잡았다. 자기장의 세기는  $x = 0$  위치에서 다음과 같은 최대값을 가진다.

$$B(0) = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (9)$$

또한  $-\frac{R}{2} < x < \frac{R}{2}$  의 영역(즉 두 코일의 사이)에서 자기장의 세기는 거의 균일함을 알 수 있다.

만약 실제로는 각 코일이 원형이 아니라 원통형이라도 앞의 3. 에서 알아본 것처럼 원통의 길이에 비해 반지름이 매우 크다면 이는 원형 코일이 여러 개 모인 것으로 근사할 수 있다. 두 코일에 흐르는 전류가 서로 반대 방향이라면 자기장은 어떻게 달라지겠는가? 직접 알아내 보자.



## 참고문헌

Walker, J., *Halliday & Resnick's Principles of Physics* (11th ed.), 2020.

Walker, J., *Principles of Physics* (10th ed.), 2014.