



Physics Laboratory

실험 2-4. 전류와 전류 사이 (로렌츠의 힘)

실험 목적

전류가 흐르는 도선 주위에는 자기장이 생겨난다. 그런데 또 한편으로, 전류가 흐르는 도선 고리는 자기장의 영향이 있으면 자기력에 의한 토크(돌림힘)를 받을 수 있다. 즉, 전류와 전류 사이에는 토크가 작용할 수 있다. 이 실험에서는 직류 전류가 흐르는 솔레노이드를 사용해서 자기장을 만들고, 전류가 흐르는 도선 고리를 그 안에 넣는다. 이 고리가 받는 자기 토크를 측정해서 그 방향과 크기가 솔레노이드 또는 고리에 흐르는 전류에 어떻게 의존하는지 알아본다.

실험 개요

- 솔레노이드를 이용해 자기장을 만들고, 전류가 흐르는 전류 천칭(도선 고리가 설치되어 있음)이 이에 의해 받는 자기 토크를 확인한다.
- 자기 토크 측정을 통해 다음과 같은 점들을 알아본다.
 - 솔레노이드가 만드는 자기장의 방향 및 세기와 솔레노이드의 전류의 관계는?
 - 전류 천칭에 흐르는 전류의 방향 및 세기와 자기 토크 사이의 관계는?

- 전류 천칭에 흐르는 전류가 만드는 자기장이 결과에 주는 영향은?

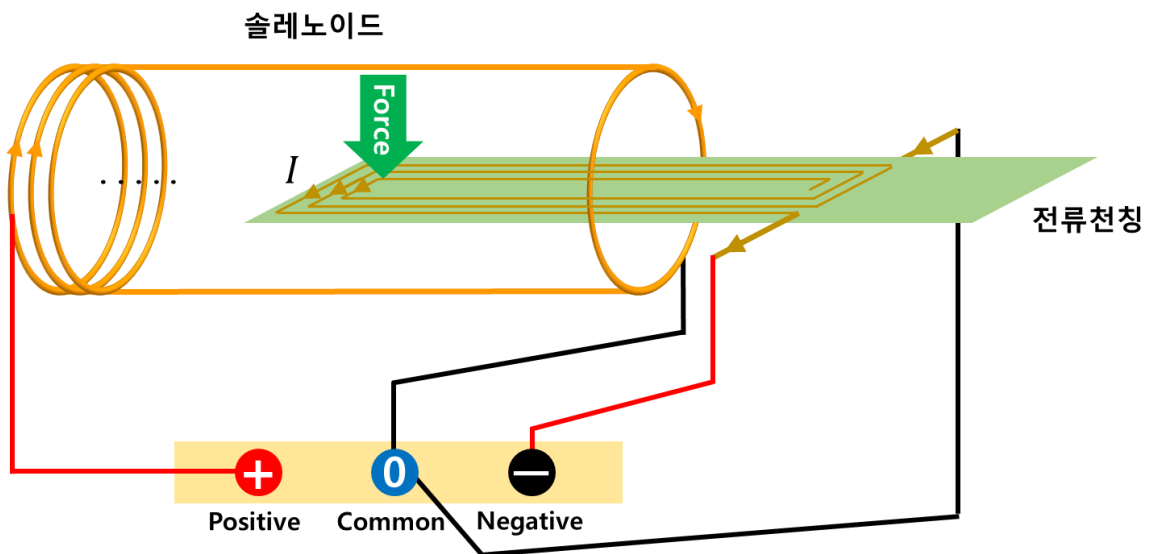
➤ 전류 천칭의 원리 및 이론적 계산 방법을 이해한다.

실험 방법

실험에 사용되는 기본적인 장비는 다음과 같다.

솔레노이드 (감은 수 550 회)	1 개
직류 이중 전원 장치	1 대
악어 집게가 달린 전선	4 개
전류 천칭	1 개
버니어 캘리퍼스	1 개

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



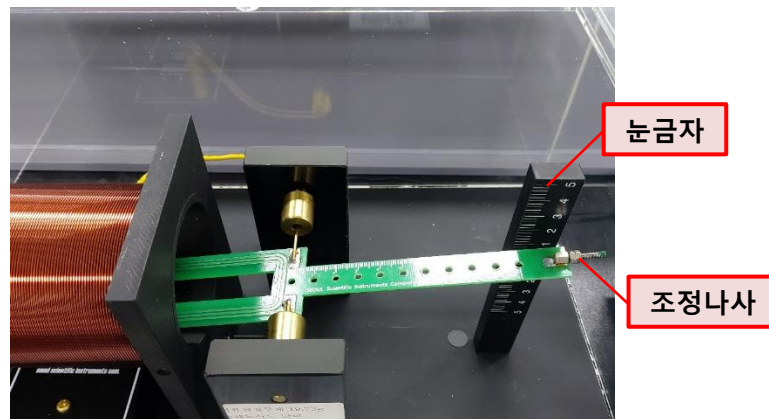
[그림 1] 직류 이중 전원 장치 및 실험 세트의 대략적 회로도

본격적인 실험에 앞서 위 장비들의 세팅 및 사용 방법에 대해 알아보자.

1. 솔레노이드와 전류 천칭을 직류 이중 전원 장치에 연결한다. 연결 방법에 따라 전류의 방향이 달라질 수 있다. 예를 들어 그림 1처럼 연결하면 솔레노이드와 천칭에 흐르는 전류는 각각 표시된 방향으로 흐르게 된다.

2. 전류 천칭 끝에 달려 있는 조정나사를 돌리면 자기장이 없을 때 전류 천칭의 기울기를 조절할 수 있다. (그림 2 참조) 수평인 채로 평형을 이루도록 조절해 보자. 그리고 이때 천칭의 끝 부분이 눈금자의 어느 위치를 가리키는지 기록해 둔다. (정확히 0 은 아닐 수도 있다)

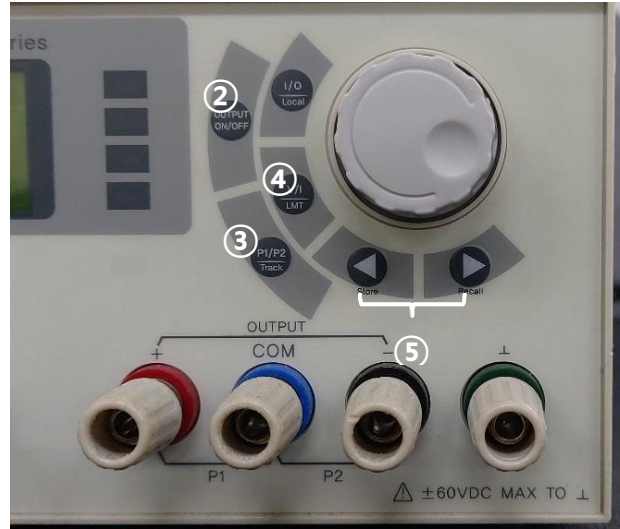
※참고: 실험에서 바꾸려 하는 전류의 범위에 따라, 자기장이 없을 때의 전류 천칭이 어느 정도는 기울어진 채로 평형을 이루는 편이 더 유리할 수도 있다. 전류 천칭이 움직일 수 있는 범위에 제한이 있기(눈금자 기준으로 $+2.5\text{cm} \sim -2.5\text{cm}$ 정도)때문이다. 배경 이론을 잘 살펴보고, 이런 경우에는 어떻게 실험 결과를 분석해야 할지 생각해 보자.



[그림 2] 전류 천칭의 모습

3. 다음은 직류 이중 전원 장치의 사용법이다. (그림 3 참조) 장치를 켤 때는 power 버튼(①)을 누른다. 다음으로 output on/off 버튼(②)을 눌러 output 단자들을 활성화시킨다. P1/P2 버튼(③)으로는 패널에 나타나 있는 P1, 또는 P2 항목으로 커서를 움직일 수 있고, V/I 버튼(④)으로는 전압 또는 최대 전류 섹션으로 커서를 움직일 수 있다. 좌우 화살표 버튼(⑤)을 이용하면 전압과 최대 전류 섹션 내에서 10의 자리부터 소수 점 둘째 자리까지 커서를 움직일 수 있다.

패널에 기본적으로 표시되는 것은 단자 P1 과 P2 의 출력 전압 및 출력 전류이다. 전압 섹션에 커서를 두고 다이얼을 돌리면 출력 전압 값이 바뀐다. 그리고, 이에 따라 출력 전류값도 함께 바뀌게 된다. 이 상태에서 V/I 버튼을 누르면 잠시 동안 현재 설정된 최대 전류가 패널에 표시되는데, 여기서 V/I 버튼을 다시 한번 누르면 최대 전류값의 설정을 다이얼로 바꿀 수 있게 된다.



[그림 3] 직류 이중 전원 장치의 모습과 사용법

다음은 권장하는 실험 방법이다.

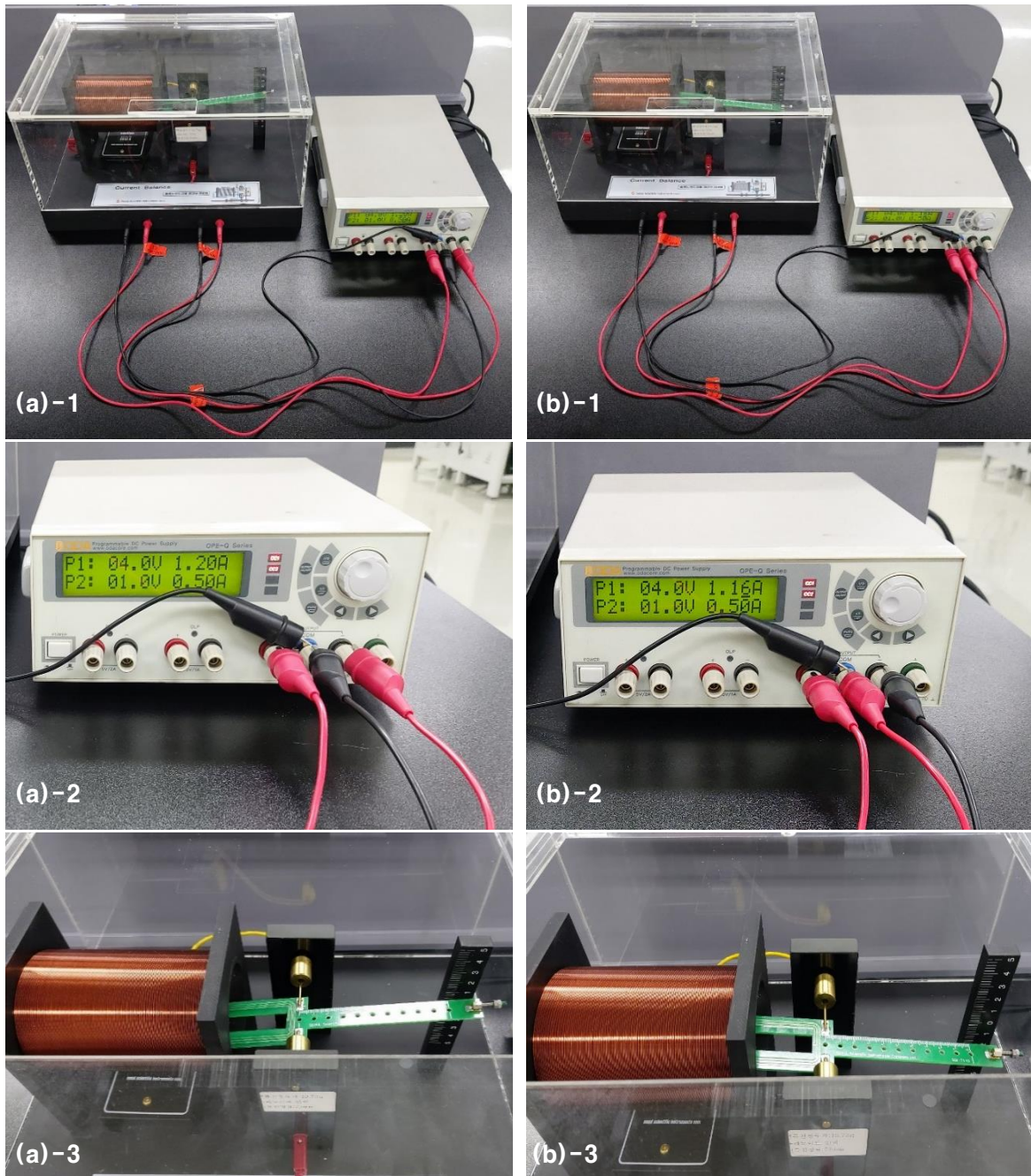
<스텝 1> 준비된 전류 천칭에는 도선 고리가 깔려 있다. 이 도선 고리의 폭, 그리고 고리의 끝 부분과 전류 천칭의 중심 축 사이의 거리를 측정한다. 또 전류 천칭의 중심 축과 눈금자 사이의 거리, 중심 축의 지름, 전류 천칭의 질량 및 두께, 솔레노이드의 길이 및 반지름도 측정한다. (이 가운데 일부는 실험 장치에 이미 기재되어 있다.)

<스텝 2> 장치들을 세팅한 다음, 직류 이중 전원 장치를 켜다. 솔레노이드 또는 전류 천칭에 전류가 흐르는 방향에 따라 전류 천칭이 받는 자기력의 방향이 바뀔 수 있음을 확인한다. (그림 4 참조)

<스텝 3> 솔레노이드의 전류를 0.2 A 로 맞춘다. 이 상태에서 전류 천칭에 흐르는 전류를 $0 \sim 2\text{ A}$ 사이에서 바꾸어가며 천칭 끝 부분의 위치(천칭이 멈추었을 때)를 기록한다.

<스텝 4> 솔레노이드 전류를 다른 값으로 맞춘 다음 다시 위의 스텝처럼 여러 천칭 전류에 대한 측정을 반복한다. 이렇게 해서 솔레노이드에 흐르는 전류는 $0.2 \sim 1.0\text{ A}$, 전류 천칭에 흐르는 전류는 $0 \sim 2\text{ A}$ 사이에서 바꾸어 가며 가급적이면 많은 측정 결과를 얻는다. 이들 결과를 이론 계산과 정량적으로 비교하려면 어떻게 해야 할지 생각해 보자.

※주의사항: 이 실험을 하는 도중 솔레노이드나 전류 천칭에 높은 전류를 필요 이상으로 오래 흘리지 않도록 주의한다. 특히 2A 가까이 되는 전류가 흐르면 도선에서 열이 날 수 있다. 또한 천칭에 전류가 흐르고 있을 때는 축을 받침대에서 떼지 않도록 한다. 스파크에 의해 장치가 손상될 수 있기 때문이다. 천칭이 기울어지면서 솔레노이드의 안쪽 벽이나 눈금자에 닿는지 여부도 자주 확인해야 한다.



[그림 4] (a)-1~3: 그림 1과 같이 연결한 경우다. (b)-1~3은 전류 천칭에 흐르는 전류의 방향을 그림 1과는 반대로 한 경우다. 그 결과 (a)-3 과 (b)-3 에서 천칭이 서로 반대로 기울어짐을 볼 수 있다.

실험 노트

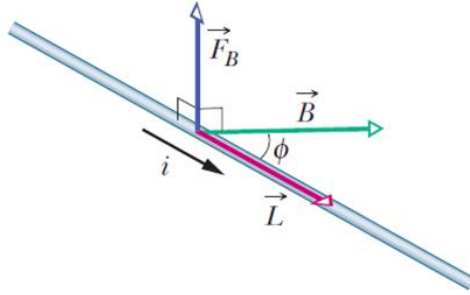
도선 고리의 폭: $w =$ (m)
 전류 천칭의 축과 도선 고리의 끝(솔레노이드 안쪽)사이의 거리: $d =$ (m)
 전류 천칭의 축과 눈금자 사이의 거리: $L =$ (m)
 솔레노이드의 길이: $l =$ (m), 솔레노이드의 반지름: $R =$ (m)
 전류 천칭의 질량: $M =$ (kg), 전류 천칭의 두께: $D =$ (m)
 전류 천칭의 축의 반지름: $r =$ (m)

i_{sol} (A)	0.20		0.40		0.60		0.80		1.00	
I (A) \ y (mm)	y	Δy	y	Δy	y	Δy	y	Δy	y	Δy
0.00										
0.25										
0.50										
0.75										
1.00										
1.25										
1.50										
1.75										
2.00										

- ◆ I 는 천칭에 흐르는 전류, i_{sol} 은 솔레노이드에 흐르는 전류를 의미한다.
- ◆ I 가 고정되어 있을 때 i_{sol} 에 따른 Δy 를 그래프로 그린다. 또한, i_{sol} 이 고정되어 있을 때 I 에 따른 Δy 도 그래프로 그린다.
- ◆ Ii_{sol} 에 따른 Δy 를 그래프로 그리고, 기울기를 구해본다. 배경 이론의 식 (8)을 통해 계산한 결과와 비교해 보자.

※이 외에도 필요한 데이터가 있다면 각자 체계적으로 정리해 두도록 한다.

1. 자기장과 자기력



[그림 5] 직선 도선이 받는 자기력. ϕ 는 전류 흐름 방향과 자기장 사이의 각도를 의미. (Walker, 2020, p. 733)

전류 i 가 흐르는 직선 도선이 자기장 \vec{B} 인 위치에 있다고 하자. 이 도선의 길이 L 인 부분이 받는 자기력은

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (1)$$

이다. \vec{L} 의 방향은 전류 i 의 방향과 같다(그림 5 참조).

이 실험에서는 솔레노이드를 이용해서 자기장을 만든다. 솔레노이드가 무한히 긴 이상적인 경우라면 외부에 만드는 자기장은 0이며 내부의 자기장은 균일하다. 내부 자기장의 방향은 솔레노이드의 축과 평행하고 솔레노이드에 흐르는 전류에 대해 오른나사의 법칙을 따른다(즉 전류의 흐름을 따라 오른나사를 돌릴 때 나사가 진행되는 방향이 자기장의 방향). 그리고 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$B = \mu_0 i_{\text{sol}} n \quad (2)$$

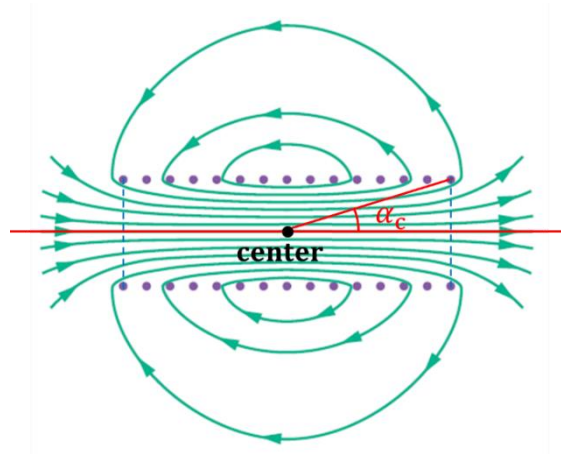
여기서 μ_0 는 진공의 투자율로 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ 이다. i_{sol} 은 솔레노이드에 흐르는 전류, n 은 솔레노이드의 단위 길이당 감긴 도선의 수다. 그런데 이 실험에서 사용하는 솔레노이드는 길이가 유한하다. 이런 경우 솔레노이드 외부에도 자기장이 생기며, 내부에서의 자기장은 균일하지 않다. (그림 6 참조) 특별히 솔레노이드의 중심에서의 자기장을 나타내 보면 크기가 다음과 같다.

$$B = \mu_0 i_{\text{sol}} n \cos \alpha_c \quad (3)$$

여기서 α_c 는 솔레노이드의 중심에서 끝을 잇는 직선이 중심축과 이루는 각도다. 솔레노

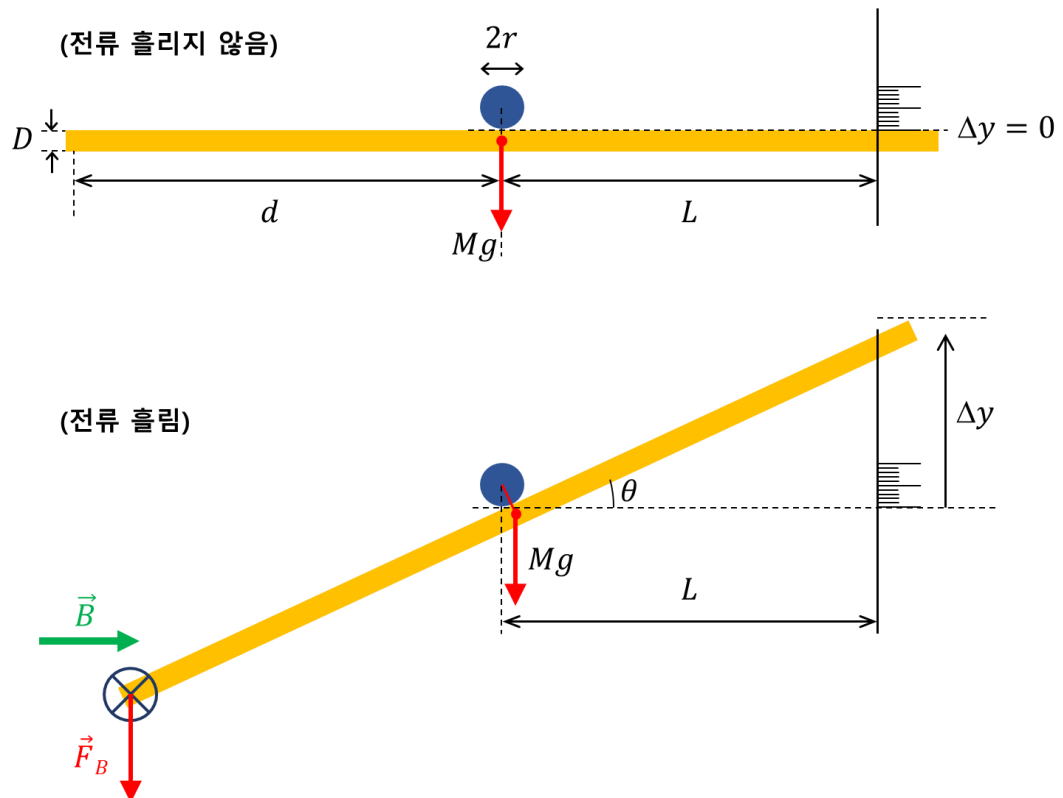
이드의 길이가 l , 반지름이 R 이라면 $\cos \alpha_c$ 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$\cos \alpha_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 4(R/l)^2}} \quad (4)$$



[그림 6] 길이가 유한한 솔레노이드가 만드는 자기장

2. 전류 천칭의 원리



[그림 7] 전류 천칭의 원리. 위는 전류를 흘리지 않는 상황, 아래는 솔레노이드와 전류 천칭에 둘 다 전류를 흘리는 상황의 예시.

이 실험에서 사용하는 전류 천칭은 얇은 기관의 위 · 아래에 구리 막을 입혀 도선 고리를 형성시킨 것이다. 그리고 지지대인 동시에 도선 고리에 전류를 공급하는 역할을 하는 축이 있는데, 이는 기관의 윗면에서 가운데쯤에 붙어 있다. 이러한 축의 위치가 결과적으로 판에 안정성을 제공하여, 천칭의 역할을 할 수 있게 한다.

이제 그림 7을 보면서 전류 천칭의 원리를 알아보자. 편의상 전류를 흘리지 않은 상태였을 때는 천칭이 수평인 채로 평형을 유지하고 있었다고 가정한다. 또한 도선 고리는 6번 겹쳐 감긴 직사각형 모양이고 (실제로는 도선들이 완전히 겹쳐 감겨있지는 않다. 이로 인해 어떤 차이가 생겨날지 생각해 보자), 그 끝 부분은 솔레노이드의 축에 수직인 방향이라고 하자.

솔레노이드와 천칭에 전류가 흐르게 되면 도선 고리는 솔레노이드의 자기장에 의해 자기력을 받을 수 있다. 전류 I 가 흐르는 고리가 각도 θ 만큼 기울어져 있다면, 고리가 받는 자기력에 의한 토크는

$$\tau_{\text{magnetic}} = NIwdB \cos \theta \quad (5)$$

이다. 여기서 w 는 도선 고리의 폭, d 는 전류 천칭의 축과 도선 고리의 끝 사이의 거리를 의미한다. N 은 고리에 도선이 감긴 횟수로, 이 실험에서는 $N = 6$ 이다.

도선 고리의 끝 부분이 솔레노이드 중심 근처에 있다고 보고 식 (3)과 (4)를 이용하면, 위의 자기 토크는 다음처럼 다시 쓸 수 있다.

$$\tau_{\text{magnetic}} = \frac{N\mu_0 w d n I_{\text{sol}}}{\sqrt{1 + 4(R/l)^2}} \cos \theta \quad (6)$$

만약 천칭이 이러한 자기 토크만을 받는다면, 계속 회전하여 솔레노이드의 안쪽 벽에 닿게 될 것이다. 그러나 실제로는 천칭이 기울어지면 기관의 질량 중심을 지나는 수직선이 축의 지지점을 지나지 않게 되므로, 이에 따라 중력에 의한 토크도 작용하게 된다. 위에서 설명한 것처럼 이 실험에서 사용하는 천칭의 경우 축이 기관의 윗면에 붙어 있기 때문에, 이 중력 토크는 자기 토크와는 반대 방향으로 기관을 돌리려는 되돌이 토크의 역할을 한다.

기관의 질량은 천칭 전체의 질량과 같고, 밀도가 균일하다고 가정하자. 천칭의 질량을 M , 기관의 두께를 D , 축의 반지름을 r , 중력가속도를 g 라고 하면 되돌이 토크의 크기는

$$\tau_{\text{restoring}} = Mg \left(r + \frac{D}{2} \right) \sin \theta \quad (7)$$

이 되어, 자기 토크에 의한 기관의 회전각 θ 가 커질수록 되돌아 토크의 크기도 같이 증가한다. 결국 두 토크의 크기가 같아져 서로 상쇄시키는 상태에서 기관은 평형을 유지할 수 있다. 즉, 평형 상태에서 $\tau_{\text{magnetic}} = \tau_{\text{restoring}}$ 이 된다. 식 (6)과 (7)을 적용시키면,

$$\frac{N\mu_0 w d n I_{\text{sol}}}{\sqrt{1 + 4(R/l)^2}} \cos \theta = Mg \left(r + \frac{D}{2} \right) \sin \theta \quad (8)$$

로 쓸 수 있다.

위 식에 의하면 I_{sol} 은 $\tan \theta$ 에 비례하는 셈이다. 이 실험에서는 전류 천칭의 끝이 가리키는 눈금자의 위치를 통해 $\tan \theta$ 를 알아낼 수 있다. 축으로부터 눈금자까지의 거리를 L , 수평일 때와 비교한 천칭 끝 부분의 수직 변위를 Δy 라 하면,

$$\tan \theta = \frac{\Delta y}{L} \quad (9)$$

이다.

참고문헌

한국물리학회 편, *일반물리학실험*, 2008.

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