

# RL회로에서 코일을 통과하는 자석의 자유낙하 현상 분석

김소연<sup>1</sup>, 김종복<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국항공우주연구원, 대전 305-807

<sup>2</sup>한국교원대 물리교육과, 충북 363-791

## Analysis of a magnet falling through a coil connected into a RL circuit

Soyeon Kim<sup>1</sup>, Jung Bog Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-807

<sup>2</sup>Department of Physics Education, Korea National University of Education, Chungbuk, 363-791, Korea

### 요약

본 연구에서는 자석이 코일 내부를 자유 낙하할 때 자기 다발의 변화에 영향을 받아 코일, 저항, 스위치로 구성된 전기 회로에 유도되는 전류 변화를 MBL 장치를 이용하여 정량적으로 측정하였다. 코일의 감은 횟수를 400번으로 하여 그 길이를 3.6 cm, 8.0 cm, 16 cm, 30 cm로 달리하였고 기본 회로에 건전지 유무에 따른 회로의 반응을 분석하였다. RL회로에서 코일을 통과하는 자석의 자유낙하시 유도되는 전류에 대한 이론과 실제의 차이점 및 유도 전류의 특성을 알 수 있었다. 길이가 긴 코일 속을 자석이 낙하할 때 유도 전류에 의한 자기장이 자석을 등가속도로 떨어지도록 않도록 하는 역할을 하였으며, 코일 속에 형성되는 자기 다발의 시간 변화율이 위치에 따라 차이가 발생하여 유도 전류 그래프가 비대칭적으로 관측되었다. 자석이 자유 낙하할 때 자기 다발의 변화율이 최대인 지점은 코일 안쪽에서 발견되었다. 또한, 건전지가 회로에 연결되어 있지 않을 때 유도 전류의 변화가 더 크게 관측되었다.

**주제어** : 전자기유도, magnet falling

### 서론

전자기 유도 현상을 보여주는 실험은 중·고등학교 교과서 및 대학교재, 그리고 과학전람회에서도 흔하게 볼 수 있는 물리 현상이다. 그러나 대다수의 학생들은 전기와 자기의 각각의 개념에 관한 오개념 혹은 개념이 없는 경우가 많으며(송진웅 등, 2004; Roy et al., 2007) 두 개념의 통합이라고도 할 수 있는 전자기 유도 현상에 대한 오개념도 많다. 또한 전자기 유도 현상의 기본적인 '자기다발(flux)' 개념도 어려워한다. 자기 다발(flux)은 자기력선과 흐름이라는 두 개념으로 구성되는데 이 두 개념 모두 학생들에게 친숙한 개념이 아니기 때문이다(Roy et al., 2007; Planinic, 2006).

현재 고등학교에서 사용하는 대부분의 교과서에서는 정성적

인 실험이 포함되어 있고 다양한 대학교재에서는 정성적인 전자기 유도 현상에 관한 실험과 이론적인 정량적인 계산도 함께 다루고 있다. 대부분의 이런 실험들은 자석이 수직상태의 코일 속을 등속도로 통과하는 상황에서 렌츠의 법칙을 다루고 있다(Roy et al., 2007). 그러나 전자기 유도 현상에 관한 실험 대부분은 학생들의 흥미와 호기심 유발을 위한 단순한 실험이며, 정성적으로 접근하는 방법이다. 또한 시범 실험의 형식으로 이루어져 학생들의 이해를 돕기에 부족하고 실제의 상황과는 다른 문제점이 있다. 또한 대학 교재 역시 실험과 이론의 연결이 미흡한 실정이다(권문호와 최호명, 2009). 이러한 문제를 해결하고자 Kingman et al. (2002)은 실험과 이론의 연계를 위해 자석이 코일 속을 등속도로 통과하도록 상황을 설정한 후 전자기 유도현상을 실험으로 제시하였다. 코일을 감는 원통의 반지름이 1.58 cm, 2.26 cm, 2.83 cm로 세 가지 형태의 코일 속을 등속도로 통과하는 자석에 따른 유도 전압을 예상한 후 측정하였다. 이를 통해서 학생들이 예상한 이론값과 측정값과의 차이

\* 교신저자: jbkim@cc.knue.ac.kr

• 2010년 12월 23일 접수, 2011년 1월 28일 1차 수정, 2011년 1월 9일 2차 수정, 2011년 2월 10일 통과.

를 알아보고 쌍극자 모멘트도 그래프를 이용하여 구하였다. Pelesko et al. (2005)는 자석이 금속이 아닌 관을 통과할 때 렌츠의 법칙을 물리량 단위를 통한 차원 분석을 하였다. 이를 통하여 학생들은 질적인 분석과 양적인 분석을 모두 할 수 있게 되었다. 또한 국내 연구로는 권문호와 최호명(2009)은 전자기 유도 법칙의 정량적 분석을 위한 실험 장치를 제작하였다. 이 장치는 기존의 상하 방식의 자석이 떨어지는 것과는 달리 좌우 방식으로 자석이 등속도로 움직일 수 있도록 제작하였고 코일의 감은 수, 자기다발의 수, 자기 다발의 변화속도 등을 모터를 이용하여 변화를 주어 유도전류를 확인하였다. 이밖에도 Carpena (1997)은 자기 유도를 이용한 속도 측정, Nicklin (1986)은 Faraday 법칙의 정량적 분석, Wood et al. (2004)은 Faraday와 Lenz의 법칙을 에너지 보존 관련 연구 결과 등 많은 관련 논문이 발표되고 있다.

그러나 위에 제시한 실험의 경우 움직이는 자석을 등속도로 만드는 등 인위적인 상황을 만들고 실험을 수행하였다. 이는 실제 수업에서는 시간, 장비 등 여러 가지의 제약조건이 따르게 되어 실제적으로 다루기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 주변 상황을 통제하지 않는 자유로운 상황에서 실험을 수행하여 전자기 유도 현상의 이론과 실험의 연계를 시키고자 한다. 특히, 코일의 감은 길이가 짧을 때 이론식과 맞추어 보며, 길이가 길어짐에 따라 코일 내부를 지나는 동안 유도 전류의 정성적 특성이 어떠한가를 살펴보고자 하였다. 또한, 외부 회로에 건전지를 연결하여 회로에 전류가 흐르고 있을 때와 흐르고 있지 않을 때 유도전류가 어떻게 되는지도 살펴보고자 하였다. 모든 실험은 자석이 낙하하는 속도를 등속도가 아닌 자유 낙하시켜 이에 따른 유도 전류를 측정하였다.

## II. 실험 장치 및 실험 방법

유도 전류 실험 측정 장치는 전구, 코일, 스위치로 이루어진 간단한 RL회로와 네오디뮴 자석, 그리고 유도되는 전류를 측정하는 MBL장치로 구성된다.

Figure 1과 같이 건전지, 꼬마전구 및 코일을 직렬로 연결하여 회로를 구성하였다. Figure 2와 같이 직경이 1 mm인 에나멜선으로 코일당 총 감은 수를 400번으로 모든 코일이 같았으며 단지 코일의 길이를 3.6 cm, 8.0 cm, 16.0 cm, 30.0 cm로 다르게 하였으며, 각각의 코일의 내부 직경은 1.4 cm로 동일한



Figure 1. Experimental setup.

재질의 통에 감았으며 주어진 길이에 400번을 감았기 때문에 외부 직경은 각각 1.8 cm, 1.5 cm, 1.4 cm, 1.4 cm로 조금 차이가 있다. 코일의 직경에 의한 유도 효과를 최소한으로 하고자 하였다. 코일을 수직으로 세워 스탠드에 고정을 하고 그 속을 네오디뮴 자석이 통과할 때 유도되는 전류를 측정한다.

사용한 네오디뮴 자석은 직경 1 cm, 두께는 0.38 cm이다. 사용한 자석의 직경이 코일 직경에 비해 작아 코일을 통과할 때 회전할 수 있는 공간이 생겨 원하지 않는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 문제점을 줄이기 위해서 자석 크기보다 약간 큰 종이 원통을 만들어 코일 안에 고정시켜 놓고 그 속을 자석이 통과하도록 하여 회전 효과를 최소화 하였다. 측정된 유도전류 데이터를 이론 값과 비교 분석하였다.

유도 전류를 측정할 때 다음의 요소들을 변인으로 하여 실험하였다. 1) 감은수는 동일하게 하고 코일 길이를 다르게 하여 유도 전류 그래프를 비교 분석한다. 2) 건전지 유무에 따른 유도 전류를 측정 후 그 특징을 분석한다.

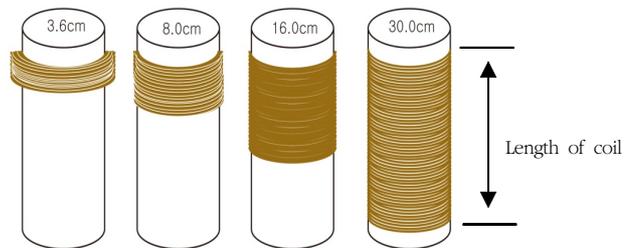


Figure 2. Various Coils.

### III. 이론적 배경

1830년 패러데이는 코일을 통과하는 자기장의 세기를 변화시켜 코일에 기전력이나 전류를 유도할 수 있다는 사실을 발견하였다. 이때 유도된 전류를 유도 전류라고 하고, 유도 전류가 생기도록 단위 전하당 한 일을 유도기전력이라고 한다. 유도 기전력과 유도 전류의 크기는 코일을 통과하는 자기 다발의 수가 변하는 비율에 비례하며, 코일을 통과하는 자기 다발의 수와는 무관하다. 패러데이의 법칙을 이용하여 코일에 유도되는 전류를 계산하기 위해서 자기 다발  $\Phi_B = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ 을 이용한다. 코일에 유도되는 기전력  $\mathcal{E}$ 의 크기는 전류 고리를 통과하는 자기다발  $\Phi_B$ 의 시간 변화율과 같다. 감은 수가  $N$ 인 코일을 통과하는 자기다발을 변화시키면 유도 기전력이 모든 고리에 생기므로 코일의 유도기전력은 각각의 고리에 생기는 유도 기전력의 합과 같다. 만일, 코일을 매우 촘촘히 감아서 각각의 고리를 통과하는 자기 다발이 같다면 총 유도기전력은  $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$ 로 정의된다(Halliday, 2007, Serway et al., 2008). 여기서 (-) 부호는 렌츠의 법칙이라고 알려져 있으며, 자기 다발이 변할 때 그 변화를 막으려고 하는 방향으로 자기장이 생기도록 유도 전류가 흐른다는 것을 나타내기 위하여 사용된다.

코일에 비해 상대적으로 작은 자석은 쌍극자로 가정을 할 수 있다. 그림2에서 정의된 축에 따른 쌍극자 모멘트  $m$ 에 의한 자기장  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} (2\cos\theta\hat{r} + \sin\theta\hat{\theta})$  이다.

Figure 3에서 묘사한 것처럼 코일에 의해 둘러싸인 면과 자석의 초기 위치를 고려하면 코일 속을 통과하는 자기 다발을

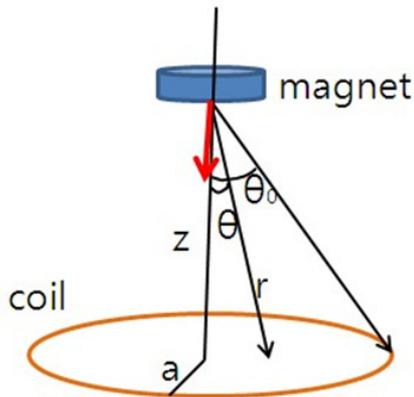


Figure. 3 Configuration of a magnet and a coil to calculate initial magnetic flux.

계산할 수 있다. 코일에 의해 둘러싸인 면적을 통과하는 자기 다발은  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \left(\frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} 2\cos\theta\right)r^2 \sin\theta d\theta d\phi$  이다.

면 전체에 대한 자기 다발을 계산하면

$$\Phi_B = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \frac{\mu_0 m N}{2r} \sin^2 \theta_0 \quad (1)$$

과 같다. 이때  $\theta_0$ 는 코일의 중심을 지나는 축과 코일 사이의 각을 말하며  $N$ 은 코일의 감은 횟수를 말한다. 이 때  $\sin\theta_0 = a/r$ 이고  $r = (a^2 + z^2)^{1/2}$ 이므로, 자기 다발을  $z$ 의 함수로써 표현할 수 있다 (Kingman et al., 2002)

$$\Phi = \frac{\mu_0 m N}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

패러데이의 유도 법칙으로부터 코일내부를 이동하는 자석에 의해 발생하는 유도 기전력은

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} = -\frac{d\Phi}{dz} v \\ &= \frac{3\mu_0 m N a^2}{2} \frac{zv}{(a^2 + z^2)^{5/2}} \end{aligned} \quad (3)$$

실험의 편리성을 고려하여 코일의 단위 반지름  $\zeta = \frac{z}{a}$ ,  $\zeta_0 = \frac{z_0}{a}$  로 변화시켜주고 자유 낙하하는 상황을 고려하여  $v^2 = v_0^2 + 2g(z - z_0)$ ,  $z_0$  는 떨어지는 초기 높이라고 할 때

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \frac{3\mu_0 m N a^2}{2} \frac{(a\zeta) \sqrt{2g(z - z_0)}}{(a^2 + a^2\zeta^2)^{5/2}} \\ &= \frac{3\sqrt{2ag} \mu_0 m N}{2} \frac{\zeta \sqrt{\zeta - \zeta_0}}{(1 + \zeta^2)^{5/2}} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 유도 기전력을 유도 전류로 바꾸어 보면

$$I = \frac{3\sqrt{2ag} \mu_0 m N}{2R} \frac{\zeta \sqrt{\zeta - \zeta_0}}{(1 + \zeta^2)^{5/2}} \quad (5)$$

으로 바꿔서 구할 수 있다.  $R$ 은 회로의 저항이다.

## IV. 실험결과 분석

### 1. 기본 RL회로 유도 전류 측정

RL 회로의 코일 속을 자석이 통과할 때 유도되는 전류를 측정하였다. 사용한 코일은 길이 8.0 cm로 400번 감은 것이다. 자석은 코일의 중심으로부터 높이 22.5 cm인 지점에서 떨어뜨렸다.

그래프를 살펴보면 자석이 코일 속을 통과할 때 유도 전류의 세기가 점점 증가하다가 줄어들고 다시 반대방향으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 자석이 코일 내부를 낙하하면서 자기 다발의 변화가 증가하다 어떤 특정 지점에서는 다시 자기 다발의 변화가 감소하게 되어 유도 전류의 방향이 바뀌게 되는 것을 의미한다. 또한 유도 전류가 0인 지점은 코일 중앙을 통과하는 지점으로 생각할 수 있다. 그래프의 실선은 식(5)를 그린 것으로 이론식과 측정값의 R-square Adjust는 0.992로 두 그래프가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

### 2. 다양한 길이의 코일에서의 유도 전류 측정

3.6 cm, 8.0 cm, 16.0 cm, 30.0 cm 길이로 400번 감은 코일을 각각 사용하여 RL 회로에서 유도 전류를 측정하였다. 네오디뮴 자석을 코일의 중심으로부터 높이 22.5 cm인 지점에서 떨어뜨렸다.

Figure 5에서 유도 전류의 변화가 큰 그래프는 길이가 3.6 cm인 코일의 유도 전류 그래프이고 유도 전류의 변화가 작은

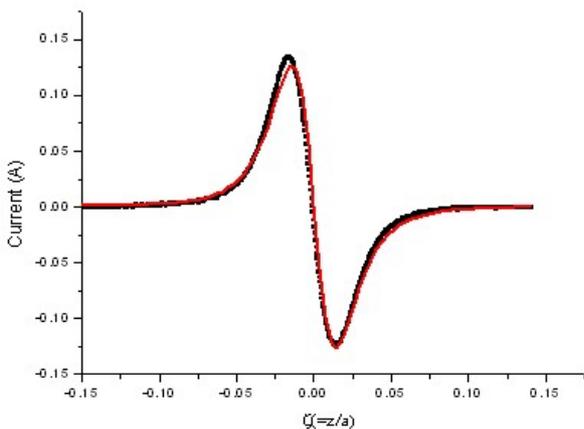


Figure. 4 Typical current change when the magnet is falling through the coil.

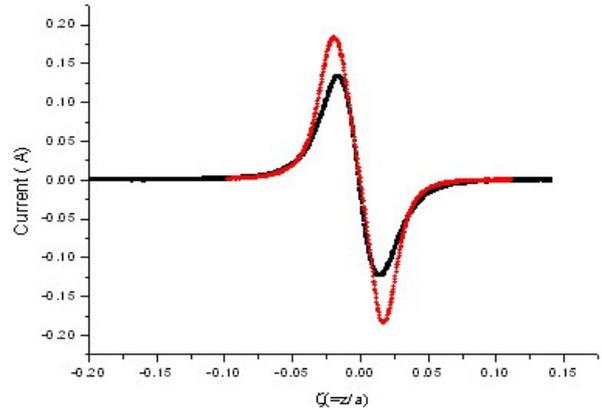


Figure. 5 Induced current dependence on coil length with the same number of turns.

그래프는 길이 8.0 cm 코일의 유도 전류 그래프이다. 두 유도 전류 그래프를 비교해보면 길이 3.6 cm 코일의 유도 전류는 0.184 A이고 길이 8.0 cm 코일의 유도 전류는 0.134 A로서 길이 3.6 cm 코일이 더욱 크게 전류가 유도됨을 볼 수 있다. 즉, 길이가 짧을수록 단위길이당 감긴 수가 많기 때문에 자기력선의 변화를 더 크게 작용함을 알 수 있다. 또한, 흥미있는 2가지 사실을 그래프로부터 알 수 있다. 하나는 최대점과 최소점 사이의 간격이 3.6 cm 일때가 더 멀다는 점이다. 이는 유도 전류에 의해 만들어진 자기장이 자석을 좀더 천천히 코일 입구쪽으로 다가오게 하고 나갈 때도 더 붙들어 못나가게 하는 것으로 해석할 수 있다. 두 번째는 중간 영역을 지나는 경우에 코일의 길이와는 상관없이 기울기가 같은 것으로 보아 코일 내부에서는 같은 비율로 유도 전류가 발생함을 알 수 있다.

코일의 길이가 8.0 cm 정도 까지는 이론적인 곡선과 거의 일치할 하였으나 코일의 길이가 16.0 cm, 30.0 cm 로 길어짐에 따라서 Figure 6, 7처럼 그래프 중간에 거리에 따른 유도 전류 곡선이 평평해지는 모습을 볼 수 있다. 30.0 cm 코일의 그래프의 가운데 부분에서는 유도 전류가 흐르지 않음을 확연하게 볼 수 있다.

길이 8.0 cm까지 짧을 때에는 입구쪽과 출구쪽이 대칭적이었지만 코일의 길이가 길어질수록 비대칭성이 커짐을 Figure 6 과 7로부터 볼 수 있다. 이는 자석이 코일 내부를 지나는 동안 유도 전류가 발생하지 않아 코일에 의한 자기장 효과가 없어져 거의 등가속도 운동을 하게 되며 결과적으로 코일을 빠져 나올 때에는 길이가 긴 코일일수록 더 큰 속도가 되기 때문에 훨씬 시간폭이 좁은 신호가 나타난다. 또한, Figure 6과 7의 입구쪽

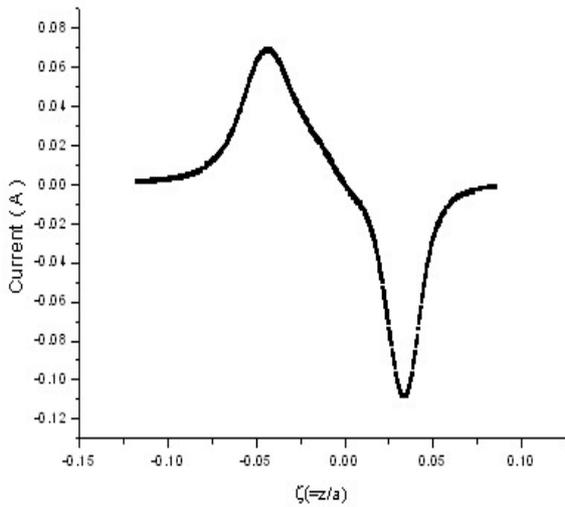


Figure. 6 Current with 16cm long coil.

신호 즉 왼쪽 신호를 보면 긴 코일이 더 시간폭이 좁은 것을 볼 수 있는데 이 또한 유도 전류에 의한 자기장이 자석이 떨어 지는데 반대 방향으로 힘이 작용하는데 더 작다는 것을 의미한다. 즉, 유도 전류도 작고 그에 따른 자기장도 작아 더 빨리 떨어지기 때문이다. 식(5)는 코일이 짧은 경우에만 맞는 식이기 때문에 코일이 긴 경우에 이론식과 비교할 수가 없다. 이를 위해서는 다른 이론식을 유도하여야 할 것이다.

길이가 3.6 cm, 8.0 cm, 16.0 cm, 30.0 cm로 400번 감은 코일들에서 유도 전류의 특성을 비교해보았다. 유도 전류가 양의 방향으로 최대인 지점을, 유도 전류가 음의 방향으로 최대인 지점을 라고 하였다. Table 1은 각각의 길이에 따른 유도 전류 데이터를 10번 측정하여 그 평균값을 구한 것이다.

Table 1을 보면 감은 코일의 길이가 길어짐에 따라서 유도 전류의 절대값이 큰 부분 사이의 길이가 길어지며 또한 코일의 길이가 길어짐에 따라서 와 사이의 시간 및 거리도 멀어짐을 알 수 있다. 또한 유도 전류 그래프의 앞부분 개형과 뒷부분 개형의 크기가 차이가 많이 남을 볼 수 있다. 그래프의 개형은 대칭적이지 않고 코일의 중심에서 윗부분보다 아래 부분이 더 크

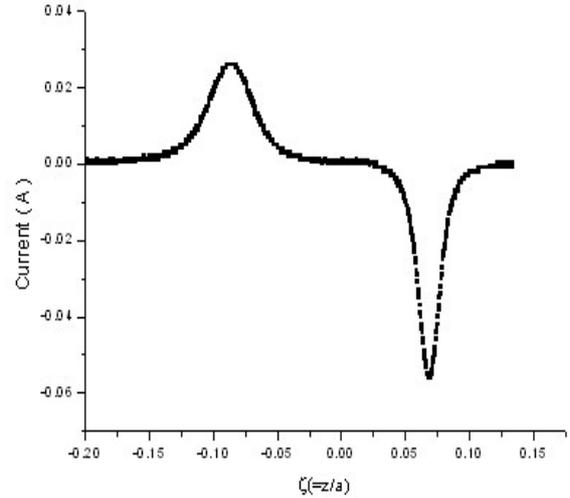


Figure. 7 Current with 30 cm long coil.

게 유도 전류가 생겨나는 것을 살펴볼 수 있다.

각각의 코일을 사용했을 때 자기다발의 변화율이 최대인 지점을 알아보았다. 자기 다발의 변화율이 최대인 지점은 Table 1 에서와 같이 유도 전류의 변화가 양의 방향으로 큰 지점을 지날 때 시간데이터를 이용하여 거리를 구하였다니 Table 2와 같았다. Table1은 최대 최소 전류값을 구한 것이고 Table 2는 최대값이 나타나는 지점을 구한 것이다. 이것은 Figure 5, 6, 7로부터 구하였다.

자기 다발의 변화율이 최대인 지점은 코일 중앙에서 일정한 거리만큼 떨어진 지점이었다. 흔히 자기 다발의 변화율이 최대인 지점은 자석이 코일 입구에 다가가는 순간이라고 생각할 수 있으나 실험을 통해 분석한 결과 자기 다발의 변화율이 최대인 지점은 코일 내부에 있었다. 이 위치를 정확하게 이론적으로 계산하려면 매우 복잡하기 때문에 여기서는 정성적으로 예측하고자 한다. 전류에 영향을 주는 요소에는 크게 3가지가 있다. 첫째 지금까지 살펴본 대로 코일에 자기 다발의 변화가 있기 때문에 유도되는 기전력의 영향이고, 둘째는 코일 자체 인덕턴스 때문에 전류의 변화가 억제되는 방향으로 역기전력이

Table 1. Current characteristics depending on coil length.

Total length coil (cm)	Current at ① (A)	Current at ② (A)	Distance between ① and ②(cm)
3.6	0.155±0.028	-0.158±0.027	0.005±0.001
8.0	0.138±0.014	-0.147±0.011	0.735±0.007
16.0	0.071±0.001	-0.110±0.001	2.636±0.001
30.0	0.027±0.003	-0.054±0.008	10.661±0.001

Table 2. Maximum position of magnet when the peak current is induced.

Total length coil (cm)	3.6	8.0	16.0	30.0
Positions of $(\frac{d\Phi}{dt})_{max}$ length (cm)	0.10±0.001	0.16±0.001	0.83±0.001	3.2±0.001

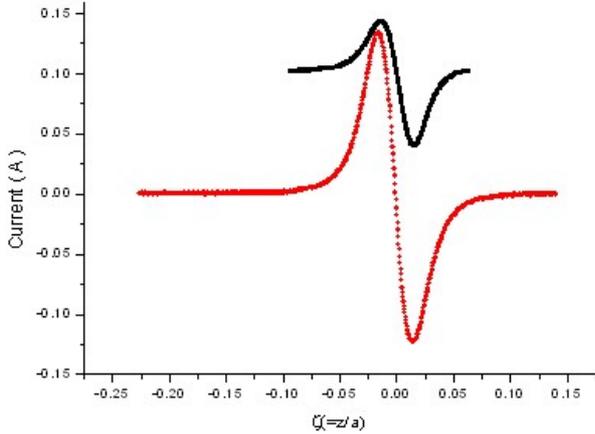


Figure. 8 Response characteristics with and without battery.

다. 물론 저항도 전류의 크기에 영향을 주지만 시간에 따른 곡선의 모양을 변화시키지는 않는다. 셋째는 자석의 빠르기이다. 앞서 살펴 본 바와 같이 코일이 길어질수록 자석이 자유 낙하하는데 방해하는 힘이 약하므로 더 빨리 떨어지게 되어 시간당 자기 다발의 변화가 큰 곳은 자석의 속력이 빠른 곳일 것이다. 물론 코일이 매우 긴 경우에는 자석이 빨리 떨어져도 자기 다발의 변화가 없기 때문에 유도 전류가 흐르지 않게 된다. 이상의 영향들로 인하여 table 2에서 볼 수 있는 사실은 코일의 길이가 길어질수록 자기 다발의 변화가 최대가 되는 지점은 코일의 더 깊은 내부에 위치하게 된다.

### 3. 건전지의 유무에 따른 유도 전류 측정

기본 RL 회로에 건전지를 추가하여 '기본 RL회로 유도전류 측정'과 같은 상황에서 유도 전류를 측정하였다. 건전지가 있는 RL회로의 기전력은 2.3 V다.

Figure 8에서 위쪽 그래프가 건전지가 있을 때 유도 전류 그

래프이고 아래쪽 그래프가 건전지가 없을 때의 유도 전류 그래프이다. 건전지가 있을 때는 회로에 0.1 A의 일정한 전류가 흐르고 있음을 그래프에서 볼 수 있다. 기존에 흐르는 일정 전류와 자석에 의한 유도 전류의 단순 합으로 예상이 되지만 결과는 그렇지 않다는 것을 볼 수 있다. 이는 일정한 전류가 흐르는 코일이 자석의 역할을 하기 때문에 자석의 운동에 영향을 주기 때문이다. 두 그래프의 시간폭을 비교해보면 알 수 있다. 또한 전류의 방향이 결정되어 있는 상황에서 일시적인 유도 전류가 발생했을 때 전자들의 이동 방향이 갑자기 바뀌는 것이 어려웠기 때문이다.

Table 3에 나타나 있는 것처럼 건전지가 있는 RL 회로에서의 유도 전류 증가량 0.440 A(건전지가 있을 때 기본 전류 0.100 A)가 건전지가 없는 RL 회로에서의 유도 전류 0.136 A보다 변화의 크기가 훨씬 작은 것을 볼 수 있다. 또한 최대 유도 전류 사이의 거리 역시 건전지 없는 회로의 거리의 차가 컸다. 그 이유는 건전지가 없는 회로는 자석에 의한 전자기 유도가 더 쉽게 일어나기 때문이다. 따라서 유도 전류의 크기도 더 쉽게 변하고 범위도 더 넓어진다.

## V. 결론 및 제언

수직으로 세워 놓은 코일 속을 낙하하는 자석이 등속도가 아닌 초기 조건에서 자유 낙하 할 때 유도되는 전류 측정을 통하여 코일의 길이가 짧을 때 자석을 쌍극자로 근사하여 유도한 이론식과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 유도된 전류가 만든 자기장이 자석이 자유 낙하하지 못하도록 하는 현상을 관찰할 수 있었다. 코일의 길이가 길어짐에 따라서 코일 내부에서 자유 낙하를 하고 결과적으로 코일을 빠져 나올 때 속도가 커 들어가는 경우와 비교하여 매우 비 대칭적인 신호가 관측되었다. 또한 자석이 코일 속을 통과할 때 자기다발의 변화

Table 3. Induced current characteristics with and without battery.

	Induced current at (A) (A)	Induced current at (B) (A)	Distance between (A) and (B) (cm)
Circuit with battery	0.144±0.013	0.038±0.008	2.958±0.007
Circuit without battery	0.136±0.014	-0.147±0.011	3.125±0.007

율이 최대인 지점은 코일 내부에 있음을 알 수 있었으며, 건전지가 없는 RL 회로보다 건전지가 있는 RL 회로에서 유도 전류가 덜 민감하게 반응하였다. 회로에 흐르는 전류의 정확한 분석을 위해서 코일의 인덕턴스 값을 활용하여야 하나 좀 더 자세한 연구는 추후에 수행될 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국교원대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

### Abstract

While a small neodymium magnet is falling through a coil connected into an electric circuit, the induced current is recorded by a computer interface device, MBL. We have measured the current characteristics depending on lengths of coil, 3.6cm, 8.0cm, 16cm, and 30cm with the same number of 400 turns with or without a battery. When the magnet falls vertically toward a coil, the magnet is not free falling because the induced current makes magnetic field. Inside the long coil, the magnet is almost free falling because of no induced current, which ends up with an asymmetric shape. Induced electric current in the circuit that an external battery is supplied is less sensitive. This is because of inertia and magnetic field by the dc current. We found the very interesting point that the maximum of  $\frac{d\phi}{dt}$  happens inside coil not inlet plane of the coil,

### 참고문헌

- 권문호, 최호명 (2009) 전자기 유도 법칙의 정량적 분석을 위한 실험 장치 제작 및 활용 방안 연구, 새물리 58 : 130-137.
- 송진웅, 김익균, 김영민, 권성기, 오원근, 박종원 (2004) 학생의 물리 오개념 지도, (주) 북스힐.
- Carpena P (1997) Velocity measurements through magnetic induction, Am. J. Phys. 65: 135-140.
- Halliday D (2007) Fundamentals of Physics, John Wiley & Sons Inc.
- Kingman R, Rowland SC and Popescu S (2002) An experimental observation of Faraday's law of induction, Am. J. Phys. 70 (6): 595-598.
- Nicklin R C (1986) Faraday's law - Quantitative experiments, Am. J. Phys. 54: 422-428.
- Pelesko JA, Cesky M and Huertas S (2005) Lenz's law and dimensional analysis, Am. J. Phys. 73 (1): 37-39
- Planinic M (2006) Assesment of difficulties of some conceptual areas from electricity and magnetism using the Conceptual Survey of Electricity and Magnetism, Am. J. Phys. 74 (12):1143-1148.
- Roy MK, Harbola MK and Verma HC (2007) Demonstration of Lenz's law: Analysis of a magnet falling through a conducting tube, Am. J. Phys. 75 (8): 728-730.
- Serway RA, Jewett JW (2008) Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Cengage Learning
- Wood LT, Rottmann RM and Barrera R (2004) Faraday's law, Lenz's law, and conservation of energy, Am. J. Phys. 72: 376-380.