

패러데이 법칙



장비 구성

EX-5541A Faraday's Law Experiment

Induction Wand	EM-8099
Variable Gap Magnet	EM-8618
Large Rod Base	ME-8735
45cm Long Steel Rod (2)	ME-8736
Multi Clamp	ME-9507
Voltage Sensor	UI-5100
PASPORT 2-Axis Magnetic Field Sensor	PS-2162
PASPORT Rotary Motion Sensor	PS-2120A

Required:

미터자

850 Universal Interface

PASCO Capstone Software



일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

실험 목표

전압은 자기장을 통해 움직이는 코일에서 유도된다. 패러데이의 법칙은 최대 유도 전압으로부터 자석의 자기장을 예측하는 데에 사용된다. 또한, 렌츠의 법칙을 사용하여 코일이 자기장에 들어가고 자기장으로 부터 나옴에 따라 유도된 전압의 방향을 검토하고 분석할 수 있다. 패러데이의 법칙과 렌츠의 법칙을 검토하고 부하 저항(Load Resistor)에서 손실된 에너지를 코일 전자의 진폭 감소와 비교한다.

기본 이론

<유도기전력>

패러데이의 유도법칙에 따라, 감은 수가 N 인 코일을 통해 변하는 자속은 다음과 같은 유도기전력 ϵ 을 만들어 낸다.

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

여기서 자기장 B 의 경우 암페어 법칙에 따라 $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA$ 이며, 이는 면적 A 에 걸쳐 일정하며

이 면적에 대해 수직이다. 코일의 면적은 일정하며, 코일이 자기장 내/외로 통과함에 따라, 평균

$$\epsilon = -NA \frac{dB}{dt}$$

비록 패러데이 법칙이 종종 이 형태로 사용되나, 이것은 각 코일의 면적이 모두 같다는 가정이 필요하다. 이 실험에서 사용하는 코일은 $N = 200$ 인 코일이고, 최대 코일의 면적은 최소 면적의 2배

이상 넓다. NA 는 코일의 전체 면적으로, $\sum A_i$ 와 같다. 이를 어렵하여 구하기 위해 각 코일의 반지름을 평균 내어 계산할 수 있다.

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

여기서 r_{avg}^2 는 코일의 평균 반지름이다. 이를 이용하면 유도기전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = -N\pi r_{avg}^2 \frac{dB}{dt}$$

어떤 시간 간격 Δt 에 대하여, 평균 유도기전력은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_{avg} = -N\pi r_{avg}^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

<저항에서 손실된 열 에너지와 진폭 감소의 관계>

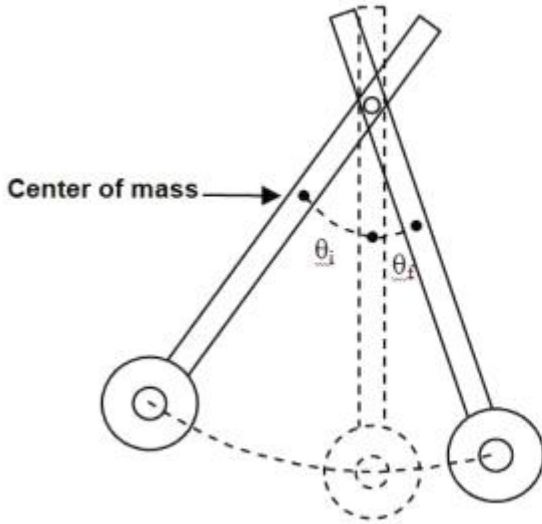


그림1 코일 진자의 진폭 감소

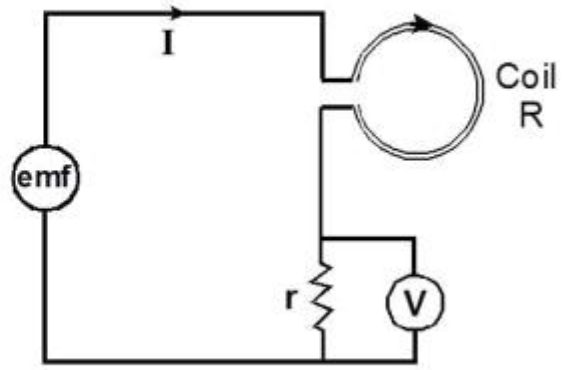


그림2 저항기가 연결된 코일의 회로도

코일 진자의 질량중심이 최초 높이 h_i 로 정지 상태에서 시작한다면, 그 중력퍼텐셜 에너지는 다음과 같다.

$$U = mgh_i$$

진자가 움직여 자석을 통과함에 따라, 일부 에너지는 기계 마찰열로 손실되며 일부 에너지는 전기 에너지로 전환된 다음 저항기에서 열 에너지로 전환된다. 전환된 열 에너지만큼 진자의 진폭이 감소하기 때문에 진자의 질량중심이 최초 높이와 같은 h_i 가 아닌 낮아진 높이인 h_f 로 옮겨진 것처럼 생각할 수 있다. (그림1 참조)

진자가 잃어버린 총에너지는 다음과 같이 높이 감소에 따른 중력퍼텐셜 에너지의 변화량과 동일하다.

$$\text{Energy Loss} = \Delta U = mg(h_f - h_i)$$

저항기(R)에서 손실된 열 에너지는 다음과 같다.

$$E = \int P dt$$

이는 시간에 대한 전력 그래프의 밑면적과 같다.

전력은 다음의 식으로 제시된다.

$$P = I^2(R+r) = \left(\frac{V}{r}\right)^2(R+r)$$

여기서 V 는 저항기(r)에 걸친 전압, I 는 코일을 통해 흐르는 전류이며, R 은 코일의 저항이다. (그림2 참조) 본 실험에서 $R = 3.5\Omega$, $r = 4.7\Omega$ 이다.

[실험 A] 유도기전력

<장비 설치>

1. 그림3과 같이 스탠드에 로드를 놓고 크로스 로드를 고정한다. 회전운동센서를 크로스 로드 끝에 둔다.



그림3 실험 장비의 설치

2. 코일 막대를 회전운동센서의 도르래 바퀴에 결합한다. 이때 그림4와 같이 막대가 도르래 바퀴의 두 홈 사이에 고정될 수 있도록 한다. 그리고 나서 전압 센서의 선을 연결한다. 적색 케이블이 위, 흑색이 아래에 연결된다.

3. 그림5와 같이 극판을 자석에 놓는다. 자석 극간 간격을 조절하여 코일 막대가 자석 극에 닿지 않고 통과하되 자석 극이 서로 가능한 한 가까이 있도록 한다. 극판의 간 변이 가로 방향이 되도록 한다.



그림4 코일 막대와 회전운동센서의 결합



그림5 자석의 배치

4. 코일의 높이를 조절하여 자석의 가운데를 통과하도록 한다. 코일을 좌우로 진자 운동시켜 자석에 부

맞이지 않으면서 자석을 통과해 움직이는지 다시 한번 확인한다.

5. 전압센서, 회전운동센서, 자기장 센서(Magnetic Field Sensor)를 인터페이스 장치에 연결한다.

6. Capstone 프로그램 화면 하단에서 전압 센서와 자기장 센서의 샘플링 속도를 1,000Hz로 설정한다. 회전운동센서의 샘플링 속도를 250Hz로 설정한다.

7. Capstone 화면 오른쪽에서 Digits 아이콘을 드래그하여 수치 디스플레이를 표시한다. <Select Measurement>를 눌러 자기장 센서의 'Magnetic Field Strength (Perpendicular)'를 선택한다. Capstone 화면 오른쪽에서 Graph 아이콘을 더블클릭하여 그래프를 표시하고, Y축의 <Select Measurement>를 클릭하여 전압 센서의 Voltage를 선택한다.

8. 전압 센서의 바나나 플러그를 코일 막대의 바나나 잭에 꽂는다. 그림3에서와 같이 전압 센서의 전선을 로드 위로 걸쳐서 막대가 흔들릴 때 방해하지 않도록 한다. 혹은 실험 중에 전선을 손으로 잡아서 고정해도 된다. 코일이 진자 운동할 때, 전선이 움직이거나 꼬여 토크를 발생시키지 않아야 한다.



일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

<실험 진행>

1. 자기장 센서를 자석에서 멀리 떨어트리고 Tare 버튼을 눌러 영점을 조절한다. 자기장 센서 막대의 끝부분에 실제 센서의 위치가 하얀 점으로 표시되어 있다. 센서 곁에 표시된 그림을 참고한다.

2. 코일 막대를 잠시 자석 사이에서 치운다. **그림6**과 같이 자기장 센서를 자석 사이에 넣는다.

(단, 자석 극 간 거리(plate separation)을 2.5cm 이상으로 유지한다.)



그림6


3. RECORD 버튼을 누르고 화면의 수치 디스플레이를 확인한다. 자기장 센서를 이용하여 자석 극 간의 자기장의 세기를 측정한다.

4. 자기장 센서를 조금씩 움직여서 극판에서의 위치에 따른 자기장을 측정한다. 극판 정중앙에서의 자기장과 극판 가장자리에서 약 0.5cm 안쪽의 둘레 부분의 자기장을 측정하고 기록한다. 또한 자기장의 세기가 0.001T가 되는 위치가 각 가장자리에서부터 좌우로 얼마나 떨어져 있는지 기록한다. 이 거리 밖이 zero-field 위치다.

Plate Sepation (cm)	Center B (T)	Edge B (T)	0.001T Distance (cm)

5. STOP을 눌러 기록을 중지한다. 화면 하단의 Delete Last Run을 눌러 방금 기록한 자기장 및 전압 데이터를 지운다.

6. 자석을 자유롭게 놓아서 10번 진동하도록 한다. 주기를 계산한다. 약 1초보다 조금 더 클 것이다.

7. 코일 막대를 4단계에서 측정한 0.001T 위치에서 살짝 밖에 위치시킨다. RECORD를 눌러 기록을 시작하고, 자석 사이를 통과하고 돌아오도록 한다. STOP을 눌러 기록을 중지한다. 그래프 툴바의 Scale axis to show all data  도구를 사용하여 전체 그래프를 표시한다. 그래프에는 최소한 두 개의 파동이 있어야 한다.


8. 화면 좌측의 Data Summery를 열고 해당 실행의 이름을 'Strong Field'로 변경하고 Data Summery를 닫는다.

9. 자석 사이 간격을 3.0cm로 넓히고 4~8단계를 반복한다. 이번 실행의 이름은 'Weak Field'로 변경한다.

<분석>

1. 그래프 툴바의 Run Select 아이콘의 드롭다운 버튼을 눌러 'Strong Field' 데이터를 선택하고, 툴바의 Selection 아이콘을 누르고 드래그하여 앞서 측정한 진자의 주기에 해당하는 그래프 부분을 영역 범위에 놓는다. Scale axis to show all data 아이콘을 누른다.

2. 진자의 주기가 1초 내외인 것을 기억하고, 이 범위에 그림7과 같이 두 개의 극대점과 극소점이 있는 것을 확인한다.

3. Data selection 드롭다운  버튼을 눌러 'Strong Field'와 'Weak Field' 모두를 선택하여 그래프에 표시함으로써 두 곡선의 차이를 비교할 수 있다. (드롭다운 버튼을 눌러 특정 데이터를 해제할 수도 있다.)

4. 그래프 툴바의 도구를 이용하여 최초 두 개의 파동을 범위 지정하고 Scale axis to show all data 아이콘을 누른다. 전압이 최초로 증가하기 시작한 순간 자기장이 거의 0이란 것을 기억하라. 그리고 전압이 그다음 0을 지나치는 시점엔 자기장이 최대인 것을 기억하라. 따라서 $\Delta B = B_{max}$ 이며, 이는 앞서 기록한 자석 극판 중앙의 자기장 세기와 같은 값이다. 그래프에서 Δt 를 0.01s 단위로 찾고, ΔB 와 Δt 의 값을 기록한다.

5. 구한 ΔB 와 Δt 의 값으로부터 평균 유도기전력을 계산하고, 그래프로부터 얻은 평균값과 비교한다.

$$\epsilon_{avg} = -N\pi r_{avg}^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

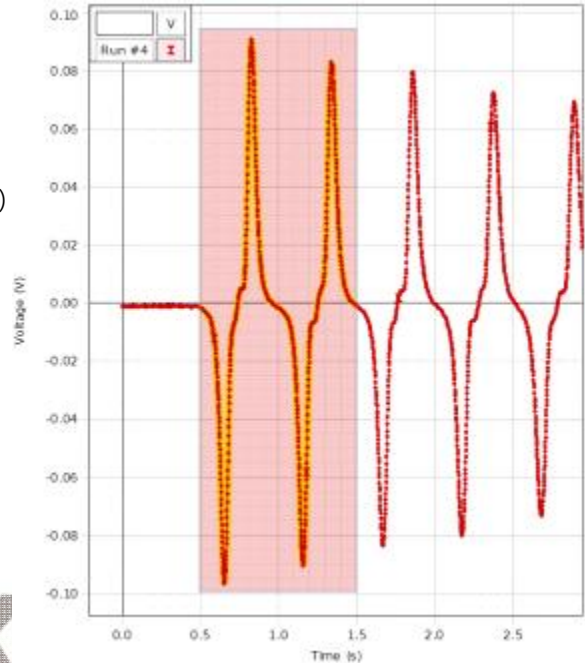


그림7 전압 vs. 시간 그래프

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

[실험 C] 저항에서 손실된 열 에너지와 진폭 감소의 관계

<실험 진행>

1. 그림8과 같이, 코일 막대를 회전운동센서에 부착하고 전압 센서의 플러그를 꽂아 접속한다. 자석 사이 간격을 조절하여 코일 막대가 지날 수 있는 최소한의 간격으로 맞춘다. 또한, 코일의 중심이 자석의 중심을 지날 수 있도록 높이를 조절한다.
4. 진자를 수직 방향으로 둔 채로 RECORD를 눌러 기록을 시작한다. 각도 수치가 0.5rad이 될 때까지 막대를 움직이고 놓는다. 막대가 반대쪽 최고점까지 올라간 뒤 STOP을 눌러 기록을 중지한다.
5. 화면 좌측 도구모음에서 'Data Summery'로 들어가 해당 실행의 이름을 'Loss Run'으로 변경한다.
6. 마찰로 손실되는 에너지 양을 구할 것이다. 저항기 플러그의 한쪽을 코일 막대로부터 분리한다. (그림9 참조) 이렇게 하면 저항기와 전압 센서는 여전히 달린 상태이기 때문에 막대 질량중심의 위치를 바꾸지 않으면서 코일을 단락시킬 수 있다.

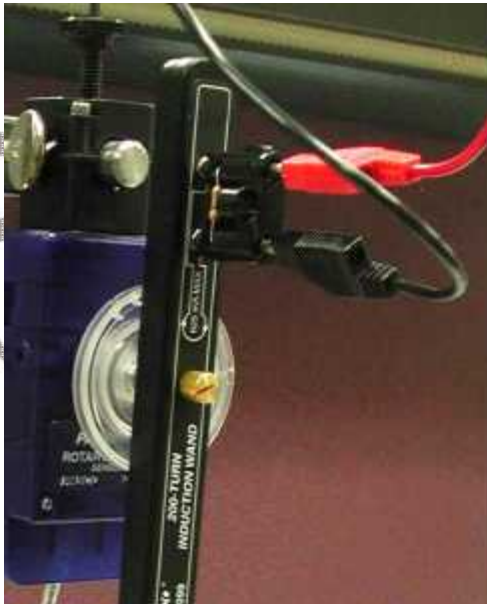


그림8 저항기가 연결된 코일

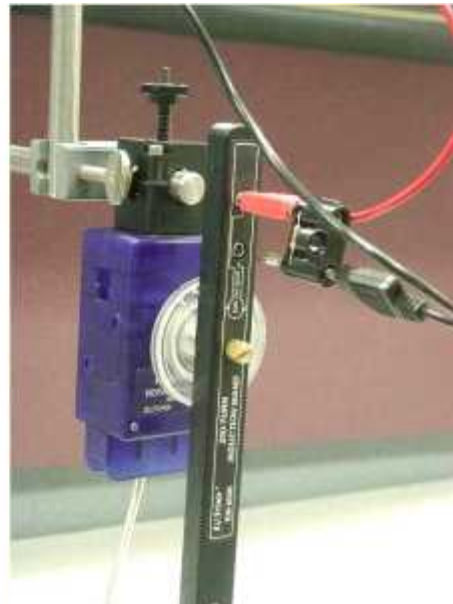


그림9 저항기의 단락

7. 코일 막대의 평형 위치에서 정지 상태로 RECORD 버튼을 클릭한다. 그런 후 최초 각도 0.5rad으로 진자 운동하게 한다. 막대가 자석을 통과해 반대쪽 최대 높이까지 움직인 후에 STOP 버튼을 클릭한다. 'Data Summery'에서 해당 실행 이름을 'Friction Run'으로 변경한다.

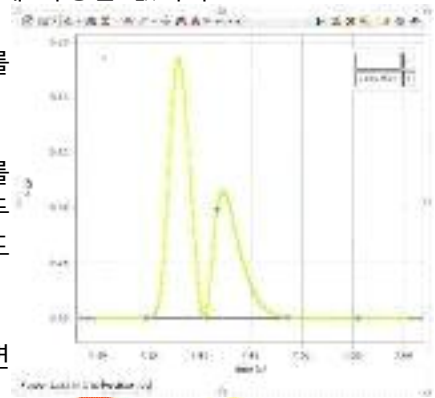
<전력 그래프>

1. 화면 좌측의 계산기를 열어 다음을 입력한다.
 $R = 3.5 (\Omega)$
 $r = 4.7 (\Omega)$
 $P = ([Voltage] / [r (\Omega)])^2 * ([R (\Omega)] + [r (\Omega)]) (W)$

이때 R은 코일의 저항, r은 우리가 가해준 저항, P는 전력이다. 위 수치는 코일 막대의 규격에 의한 수치이며, 멀티미터 등을 이용하여 직접 저항을 구하는 것으로 오차를 줄일 수 있다.

2. 새 그래프를 그려서 P vs. 시간 그래프를 만든다. P는 앞서 계산기에 작성한 값이다.

3. 그래프 툴바의 Data Selection 아이콘을 통해 'Loss Run' 데이터를 불러온다.



4. 코일을 당기면서 생긴 데이터는 무시한다. 그래프 툴바의 도구를 이용하여 코일이 자석에 진입 및 이탈하는 부분을 선택한다. 이는 두 개의 극점을 포함할 것이다. 필요하다면 다른 극점이 포함되지 않도록 선택 영역을 조절한다. 그림10처럼 보여야 한다.

5. 그래프 툴바의 Area Tool 아이콘을 클릭한다. 그래프 아래의 면적 값이 나타날 것이다. 이 값을 기록한다.

그림 10

<분석>

1. 새 페이지에 각도 vs 시간 그래프를 만든다.
2. 'Loss Run' 데이터를 불러오고 Scale axis to show all data 아이콘을 클릭한다.
3. 그래프 툴바의 Coordinate Tool(좌표 도구) 아이콘을 클릭한다. 우리가 코일 막대의 최초 각도를 0.5 rad으로 정한 것을 확인한다. (만약 그렇지 않다면 해당 실행을 다시 한다.)
4. 좌표 도구를 이용하여 코일 막대가 반대쪽에서 가장 높이 올라간 각도를 찾는다. 부호는 무시한다. 이 각도를 최대 손실 각도(Maximum Loss Angle)로 기록한다.
5. 'Run Select'에서 'Friction Run' 데이터를 불러오고 Scale axis to show all data 아이콘을 클릭한다.
6. 그래프 툴바의 Coordinate Tool 아이콘을 클릭한다. 우리가 코일 막대의 최초각도를 0.5rad으로 정한 것을 확인한다. (만약 그렇지 않다면 해당 실행을 다시 한다.)
7. 좌표 도구를 이용하여 코일 막대가 반대쪽에서 가장 높이 올라간 각도를 찾는다. 부호는 무시한다. 이 각도를 최대 마찰 각도(Maximum Friction Angle)로 기록한다.
8. 코일 막대(+저항)의 질량(88.3g), 회전축으로부터 질량중심까지의 거리(9.0cm), 최대 손실 각도, 최대 마찰 각도를 이용하여 코일에 흐르는 전류에 의해 손실된 중력 퍼텐셜에너지를 계산한다. (참고: 저항기 플러그를 코일 막대에 꽂은 채로 실험대 가장자리에서 막대의 균형을 맞춰서 막대의 질량 중심 위치를 찾을 수 있다. 따라서 고정점으로부터 질량중심까지의 거리를 직접 구할 수도 있다.)