Q1-1

자기 블랙박스[1]

스마트폰은 주변의 자기장을 재기 위해 홀 효과를 이용한 자력계를 쓴다. 이 자력계는 자기장의 세 성분을 모두 측정한다. 자력계 센서는 스마트폰의 회로 기판 위에 있어 밖에서는 보이지 않는다.

자석의 자기장

그림 1은 반길이가 d 이고 쌍극자 모멘트가 M 인 작은 막대자석을 나타낸다.

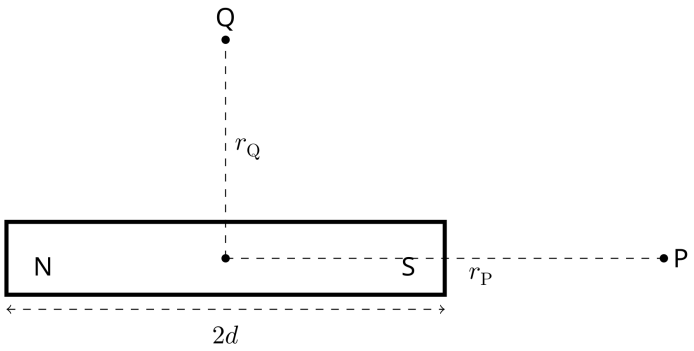


그림 1

막대자석의 축 방향 위의 점 P에서의 자기장 크기(B_{axial})와, 수직 이등분선 위의 점 Q 에서의 자기장 크기($B_{\mathrm{equatorial}}$)는 다음 식으로 주어진다.

$$B_{\mathrm{axial}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2Mr_{\mathrm{P}}}{(r_{\mathrm{P}}^2 - d^2)^2} \tag{1}$$

$$B_{\mathrm{equatorial}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{M}{(r_{\mathrm{Q}}^2 + d^2)^{3/2}} \tag{2}$$

여기서 μ_0 는 자유 공간의 투자율($\mu_0/4\pi = 10^{-7}\ \mathrm{N\,A^{-2}}$)이고, r_{P}, r_{Q} 는 자석의 중심에서 자기장을 재는 점까지의 거리이다. 이 문제에서는 자석을 점 쌍극자로 본다($d \ll r_{\mathrm{P}},\ r_{\mathrm{Q}}$).

실험 시험을 위해 시험 포털에서 "EQ1-Magnetic Black Box" 링크를 클릭하라.

화면의 모의실험에 대하여:

화면에는 흰 바탕의 모눈 형태로 된 캔버스가 보인다. 이 모눈 캔버스는 실험이 수행되는 연직 평면의 일부이다. 캔버스에는 네 개의 물체가 있다.

1. 스마트폰
2. 파란색(S)과 빨간색(N)으로 칠해진 자석
3. 두께가 균일한 어두운색의 속 빈 관
4. 'SHOW/HIDE SCALE' 버튼을 눌러 켤 수 있는 눈금자

모눈 캔버스의 모눈 간격은 1 cm이다.

---

1 Chandan Relekar(IISc 방갈로르), Siddhant Mukherjee(영국 케임브리지 대학교), Siddharth Tiwary(IIT 파와이 뭄바이), Charudutt Kadolkar(IIT 구와하티), Praveen Pathak(HBCSE-TIFR 뭄바이)가 이 문제의 주 저자이다. 학술위원회와 국제이사회의 기여에 감사드린다.

Q1-2

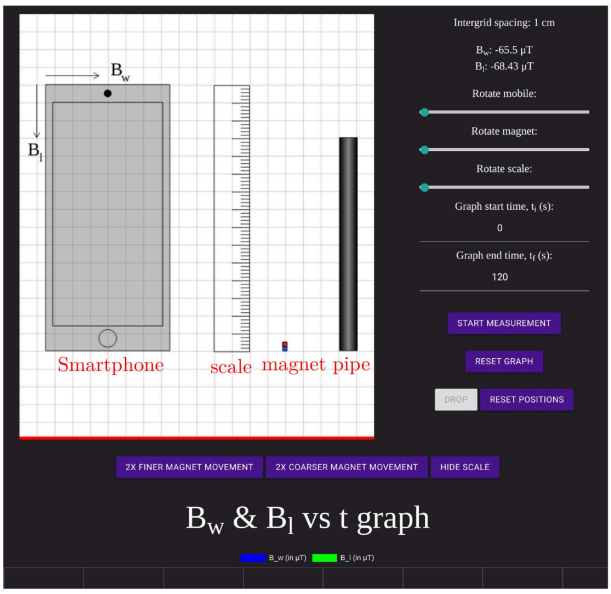


그림 2: 모의실험 화면

장치:

마우스로 잡아 끌어 물체를 옮길 수 있다. 스마트폰, 눈금자, 자석은 평면 안에서 회전시킬 수도 있다. 회전 조절 슬라이더는 오른쪽 패널에 있다. 슬라이더를 끌어 방향을 바꿀 수 있다. 더 정밀하게 조절하려면 슬라이더를 클릭한 뒤 화살표 키를 써서 회전시키면 된다.

스마트폰 안에는 주변 자석의 자기장을 재는 자력계가 있다. 스마트폰 안에서 자력계의 정확한 위치는 주어지지 않는다. 자력계의 위치에 따라, 오른쪽 패널에는 그림 2와 같이 스마트폰이 그 너비 방향과 길이 방향으로 측정한 자기장의 성분 B_w 와 B_l 이 표시된다. 스마트폰이 기본 위치(세로 방향)일 때 성분 B_w 는 오른쪽을 향한다. 성분 B_l 은 스마트폰의 길이 방향을 따라 아래쪽을 향한다.

측정:

'START MEASUREMENT'를 클릭하면 B_w 와 B_l 이 시간에 따라 변하는 그래프도 볼 수 있다. 'RESET GRAPH'는 이 그래프에 기록된 모든 값을 지운다. 얻은 그래프의 곡선 위로 커서를 옮기면 그 자료점의 값을 볼 수 있다. "Graph start time (t_i)"와 "Graph end time (t_f)" 칸에 시간을 넣어 그래프의 일부를 확대할 수 있다.

스마트폰은 강한 자기장에 노출되면 손상될 수 있다. 이를 막기 위해, 스마트폰이 측정한 알짜 자기장 값이 6500 μT를 넘으면 측정이 멈추고 오른쪽 패널에 'Maximum Magnetic field exceeded.' 경고가 표시된다. 자석을 스마트폰에서 충분히 멀리 옮기면 곧바로 측정이 복구된다.

그 밖의 기능:

자석은 키보드 화살표 키로 위아래·좌우로 옮길 수 있다. 이를 위해서는 캔버스의 아무 곳이나 클릭하면 된다. '2X FINER MAGNET MOVEMENT / 2X COARSER MAGNET MOVEMENT'를 클릭하여 자석을 더 정밀하게 또는 더 거칠게 움직일 수 있다. 이 버튼을 누를 때마다 움직임이 두 배씩 정밀해지거나 거칠어진다. 최대 정밀도/거칠기에 이르면 버튼이 회색으로 바뀐다.

중력은 화면 아래쪽을 향한다. 바닥은 빨간 선으로 표시되어 있다. 모든 물체는 화면 평면 안에만 있다고 본다. 관에 대한 더 자세한 정보는 파트 (B) 앞에 주어져 있다.

자석을 화면의 어디에 놓든 정지해 있다고 본다. "Drop" 버튼을 클릭하면 자석이 놓여 내려가기 시작한다. 자석은 'START MEASUREMENT' 버튼을 누른 뒤에만 떨어뜨릴 수 있음에 유의하라. 'RESET POSITION' 버튼을 누르면 자석이 마지막으로 떨어뜨린 위치로 되돌아온다. 필요하면 물체를 캔버스 밖으로 옮길 수도 있다.

이 실험에서는 자석을 점 쌍극자로 본다.

이 문제에서는 오차 평가가 필요하지 않음에 유의하라.

A.1	스마트폰에서 자력계의 위치를 구하라. 답안지에서 이 문항에 답하기 쉽도록 스마트폰 개략도 안에 더 촘촘한 모눈을 그려 두었다. 촘촘한 모눈의 간격은 2 mm이다. 스마트폰의 알맞은 자리에 "⊗"를 그려 자력계의 위치를 표시하라.	1pt

A.2	알맞은 직선 그래프를 그리고 그 그래프에서 자석의 쌍극자 모멘트를 구하라. 자신이 쓴 방법으로 기록한 자료를 표에 채워 넣으라.	2.3pt

화면에는 연직으로 세워진, 두께가 균일하고 유한한 비자성 속 빈 관이 주어져 있다. 자석을 관 안으로 떨어뜨리려면 자석을 관의 축과 잘 맞추어야 한다. "DROP" 버튼은 자석을 연직면 안에서 놓아준다. 관 안에서 자석의 운동은 볼 수 없다. 자석을 관 안으로 떨어뜨렸을 때 내려가는 동안 기울거나 회전하지 않는다고 가정한다. 관은 서로 다른 세 구간으로 이루어져 있다. 한 구간은 나무(W), 다른 한 구간은 전기 전도도가 $3.77 \times 10^7\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$ 인 알루미늄(Al), 나머지 한 구간은 전기 전도도가 $5.96 \times 10^7\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$ 인 구리(Cu)로 되어 있다. 이 세 재질이 반드시 이 순서인 것은 아니다. 자석을 연직으로(아래쪽 y 축을 따라) 떨어뜨리면 자석의 낙하는 다음 식을 따른다.

$$m\ddot{y} = mg - k\dot{y} \tag{3}$$

여기서 m 은 자석의 질량, g 는 중력 가속도($g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$), k 는 관에서 맴돌이 전류가 생겨 나타나는 감쇠 상수이다. 나무, 알루미늄, 구리 구간의 감쇠 상수는 각각 0, k_{Al}, k_{Cu} 이다. 다음 단계에 따라 자석을 관 안으로 떨어뜨리라.

1. 스마트폰, 자석, 관을 적절히 놓는다.
2. "Start Measurement" 버튼을 클릭한다.
3. "DROP" 버튼을 클릭한다.

자력계는 관에서 맴돌이 전류 때문에 생기는 아주 작은 자기장은 잴 수 없다. 자석이 관을 따라 내려가는 동안 B_w 와 B_l 이 시간에 따라 변하는 그래프를 화면에서 볼 수 있다.

Experiment

Q1-4

Korean (Korea (Republic of))

B.1	화면에 나타난 자기장-시간 그래프로부터 관에서 서로 다른 재질 구간들의 순서를 알아내라. 위에서부터 차례로 생각하여 재질 옆에 번호를 써서 답하라. 맨 위 구간은 1, 가운데 구간은 2, 맨 아래 구간은 3이다.	0.3pt

B.2	알맞은 직선 그래프를 그려 관의 알루미늄 구간에서 자석의 종단 속도를 구하라. 답안지에는 모의실험 화면과 비슷한 캔버스 모눈이 주어져 있다. 이 문항의 자료를 얻기 위해 사용한 정확한 위치와 방향으로 스마트폰, 관, 자석의 개략도를 그리라. 스마트폰은 네모로 표시하라. 그래프를 그리는 데 쓴 관련 자료를 표에 채워 넣으라. 관의 알루미늄 구간의 길이를 구하라. 알루미늄 구간의 길이를 재는 데 그래프를 써도 되고 쓰지 않아도 된다. 길이를 구하는 데 그래프나 자료를 썼다면 표의 남는 칸에 해당 자료를 적으라.	2.6pt

B.3	알맞은 직선 그래프를 그려 관의 구리 구간에서 자석의 종단 속도를 구하라. 관의 구리 구간의 길이를 구하라. 구리 구간의 길이를 재는 데 그래프를 써도 되고 쓰지 않아도 된다. 길이를 구하는 데 그래프나 자료를 썼다면 표의 남는 칸에 해당 자료를 적으라.	2.2pt

B.4	관의 나무 구간의 길이를 구하라. 나무 구간의 길이를 재는 데 그래프를 써도 되고 쓰지 않아도 된다. 길이를 구하는 데 그래프나 자료를 썼다면 표의 남는 칸에 해당 자료를 적으라.	1.6pt