COVER

GPhO
Dammam 2022

제4회 걸프 물리 올림피아드 — 실험 경연

사우디아라비아 담맘 — 2022년 3월 15일

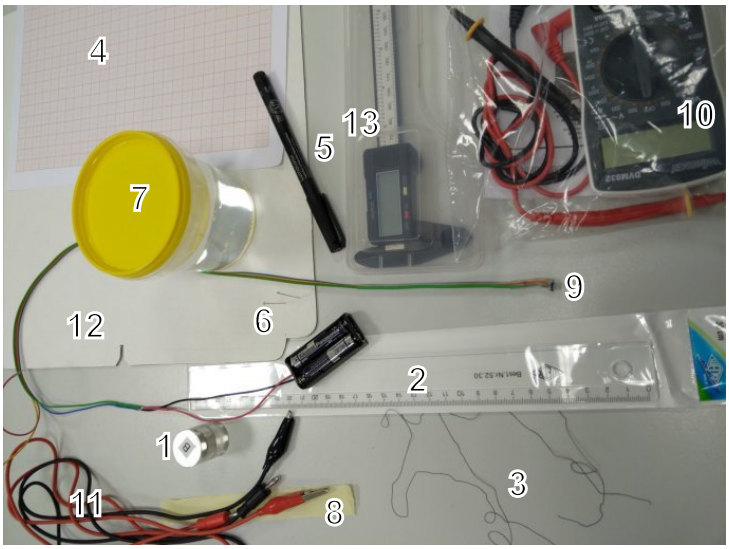
- 시험 시간은 5시간이다. 문제는 1개이며 모두 합쳐 20점이다.
- 처음에 책상 위의 실험 장비는 덮여 있다. **시작 신호가 울리기 전에는 덮개를 벗기거나 문제가 든 봉투를 열어서는 안 된다.**
- **허락 없이 자리를 떠나서는 안 된다.** 도움이 필요하면(**장비 고장**, 계산기 고장, 화장실 이용 등) 진행 요원이 올 때까지 손을 들고 있으시오.
- 종이는 앞면만 쓰시오.
- 문제마다 **전용 풀이지**가 있다(번호와 그림 기호는 머리말을 볼 것). 풀이는 해당 풀이지에 쓰시오. 문제별 풀이지에는 번호가 매겨져 있으니 번호 순서대로 쓰시오. **어느 문제의 어느 부분과 질문을 풀고 있는지 항상 표시하시오.** 최종 답은 **답안지**의 해당 칸에 옮겨 적으시오. **연습지**도 있으니 채점받고 싶지 않은 내용은 연습지에 쓰시오. 풀이지에 채점받고 싶지 않은 내용(처음 시도나 틀린 풀이 등)을 썼다면 줄을 그어 지우시오.
- 어떤 문제에 종이가 더 필요하면 손을 들고 진행 요원에게 문제 번호를 말하시오. 풀이지 두 장을 받는다(여러 번 요청해도 된다).
- **불확도는 문제에서 특별히 요구한 경우에만 추정하면 된다.**
- **글은 가능한 한 적게 쓰시오:** 풀이는 주로 식, 수, 기호, 그림으로 설명하시오. 어떤 곳에서는 글로 설명할 수밖에 없을 수도 있다.
- **시험 종료 신호가 울리면 즉시 쓰기를 멈추어야 한다.** 모든 종이를 책상 위의 봉투에 넣으시오. **어떤 종이도 시험장 밖으로 가지고 나가서는 안 된다.** 종료 신호 전에 다 풀었으면 손을 드시오.

문제 E1. 원통 속의 원통 *(20점)*

이 실험의 목표는 영구 자석이 들어 있는 투명 원통의 여러 특성을 측정하는 것이다.

장비

아래 그림에 있는 장비는 다음과 같다:
1 — 원통형 영구 자석이 들어 있고 위아래가 포일 덮개로 덮인 투명 원통;
2 — 자;
3 — 고무줄;
4 — 모눈종이;
5 — 유성 마커;
6 — 옷핀;
7 — 물이 든 컵;
8 — 고무줄을 원통에 고정하는 테이프;
9 — 전지 홀더의 전지에 연결된 저항형 자기장 센서;
10 — 도선이 달린 멀티미터;
11 — 바나나/악어 커넥터가 달린 도선 2개;
12 — 옷핀을 수직으로 꽂는 판지 조각;
13 — 버니어 캘리퍼스.



경고:

- **전지 도선을 단락시키지 마시오 — 전지가 과열되어 쓸 수 없게 된다!**
- **전지를 아끼도록, 쓰지 않을 때는 멀티미터를 끄시오.**
- **투명 원통의 포일 덮개를 조금이라도 벗기지 마시오 — 벗기면 감점된다!**
- **자기 센서를 영구 자석에 너무 가까이 가져가지 마시오! 그러면 센서의 오프셋 전압 V_0이 바뀔 수 있다(V_0은 문제 본문에 정의되어 있다).**
- **책상 아래에 철제 막대가 있다는 점에 주의하시오. 강자성 간섭을 피하려면 자기 측정을 할 때 원통과 센서를 책상 가운데에 두시오.**

과제

아래의 모든 과제에서 점수의 일부는 답의 정밀도에 주어지므로, 이에 맞게 실험을 설계하고 수행하시오. 무엇보다도 (과제에서 요구할 때) 불확도 추정을 개선하기 위해 추가 측정을 해야 할 수도 있다.

해당 과제에 쓰는 모든 측정 도구의 위치를 분명히 나타낸 측정 장치 그림을 항상 그리시오. 풀이의 모든 단계를 분명히 기술하시오. 그림과 설명에 근거한 적절한 절차에 상당한 점수가 주어진다. 모든 경우에 직접 측정한 결과, 사용한 식, 계산을 모두 적으시오.

A 부분. 기하학적 특성 *(5점)*

1. (2점) 원통의 전체 부피 V를 구하고 결과의 불확도를 추정하시오.

2. (1점) 원통 안 영구 자석의 높이 h를 구하고 결과의 불확도를 추정하시오.

3. (2점) 원통의 굴절률을 몰라도 되는, 영구 자석의 지름 d를 구하는 방법을 설계하시오. 자석의 지름을 구하고 결과의 불확도를 추정하시오.

B 부분. 역학적 특성 *(3점)*

1. (2점) 물의 밀도가 $\rho_w = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$임을 이용해 원통(유리와 자석)의 평균 밀도를 구하시오.

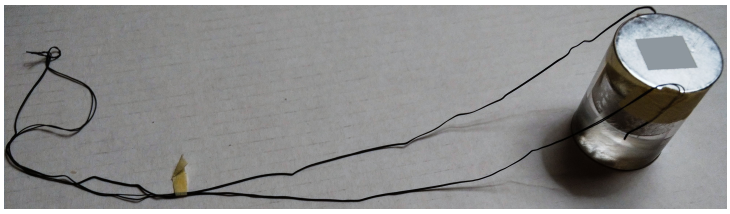
2. (0.5점) 원통의 전체 질량을 구하시오.

3. (0.5점) 자석의 밀도가 $\rho_m = 7500\,\mathrm{kg/m^3}$임을 이용해 유리의 평균 밀도를 구하시오.

힌트: 고무줄을 용수철저울로 쓰시오. 고무줄 두 개를 합치고(더 뻣뻣하게 하려고), 테이프 조각으로 줄의 끝을 원통의 양 끝에 붙이시오. 줄 길이를 잴 때 표시로 쓰도록 줄에 아주 작은 테이프 조각도 붙이시오. 전체 장치는 아래 그림과 같다. 주어진 줄의 장력은 다음 양에 비례한다.

$$\tau \equiv \left(1-\lambda^{-1}\right)\left(1-0.2664\lambda+0.1191\lambda^2\right), \quad \lambda \equiv l/l_0,$$

여기서 l은 줄의 길이, l_0은 늘어나지 않은 상태에서의 길이이다.

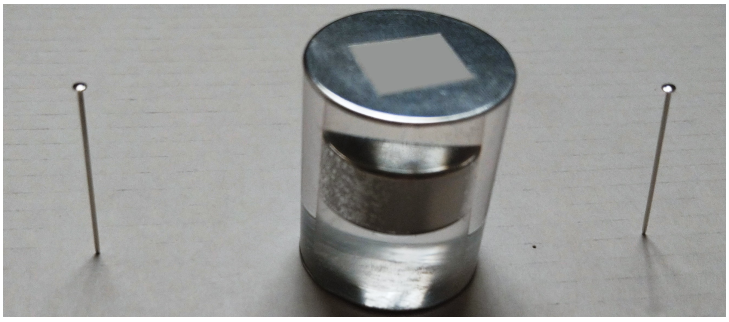


C 부분. 광학적 성질 *(5점)*

1. (2.5점) 원통의 투명한 부분은 실제로 서로 다른 두 물질로 이루어져 있다는 점에 유의하라. 가운데 부분의 굴절률 n_c는 원통 바깥 부분의 굴절률 n_o와 조금 다르다(가운데 부분의 지름은 영구 자석의 지름과 같다). 굴절률 n_o를 구하는 방법을 설계하고 결과의 불확도를 추정하시오.

힌트: 자석의 겉보기 지름을 재고, 스넬 법칙을 이용해 이를 굴절률 n_o와 연결하시오.

2. (1.5점) 굴절률 n_c를 구하기 위해 원통을 두꺼운 렌즈로 써서 옷핀의 상을 만들고, 시차법으로 옷핀 상의 위치를 정하라. 이를 위해 다음 단계를 따르시오. 최종 결과는 아래 그림과 같다. 주어진 판지 조각에 옷핀 두 개를 핀 사이의 거리가 원통의 지름보다 크도록 수직으로 꽂으시오. 두 핀에서 원통까지의 거리가 엄밀히 같고, 두 핀과 원통의 축이 같은 직선 s 위에 놓이도록 원통을 두 핀 사이에 수직으로 세우시오. 한쪽 핀 쪽에서 직선 s를 따라 원통을 보시오 — 가까운 핀("핀 A"라 하자)이 원통을 통해 보이는 다른 핀(핀 B)의 상과 겹치도록. 이제 머리(눈)를 오른쪽으로 움직이시오. 핀 A가 핀 B의 상에서 오른쪽으로 움직이면, 핀 A가 핀 B의 상보다 더 멀리 있다는 뜻이다. 핀 A와 핀 B의 상이 일치하는 상황을 만들어야 한다. 그러면 처음 위치에서 눈을 왼쪽이나 오른쪽으로 움직여도 둘의 상대 위치가 바뀌지 않는다. 핀과 원통 사이의 거리를 같게 유지하면서 필요에 따라 핀을 뽑아 서로 더 멀리 또는 더 가깝게 옮기고, 원하는 결과를 얻을 때까지 되풀이해야 한다. 핀 A와 핀 B의 상이 일치하면 판지 위 두 핀 사이의 거리 L을 재고 결과의 불확도를 추정하시오.



3. (1점) 원통의 굴절률 n_c를 구하시오.
힌트: 다음 식을 써도 된다.

$$\left(\frac{1}{L-D}-\frac{n_o-1}{D}\right)\left(\frac{n_c d}{n_c-n_o}-D\right)=n_o,$$

여기서 D는 원통의 지름이다.

D 부분. 자기적 성질 *(7점)*

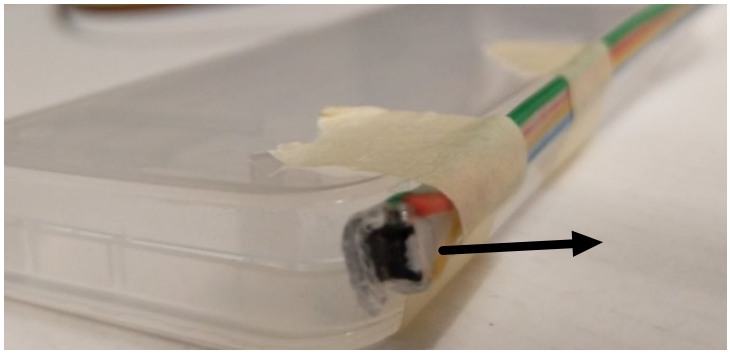
1. (0.5점) 두 도선의 바나나 끝을 멀티미터의 COM 단자와 VΩmA 단자에 연결하시오. 멀티미터를 20 V(직류) 범위로 켜고, 도선의 악어 끝을 전지 홀더의 두 금속 단자(빨간 도선과 검은 도선이 홀더에서 나오는 곳 옆)에 대시오. 전지 홀더 출력 단자의 전압 $\mathcal{E}$를 기록하시오. 전압이 3.0 V보다 낮으면 전지 교체를 요청할 수 있다.

모든 자기장 측정에서, 전지 전압이 정확히 3 V라면 측정값 1 mV는 자기장 세기 10 μT에 해당한다는 점을 명심하시오. 그러나 mV 단위의 측정값은 자기장과 전지 전압 모두에 비례한다. 따라서 자기장 세기를 계산하려면 이 전지 전압 값이 필요하다.

악어 클립을 자기 센서의 노란 도선과 빨간 도선에 연결하시오. 센서에 0이 아닌 오프셋이 있을 수 있음을 명심하시오: 자기장이 전혀 없어도 멀티미터의 값 V_0은 0이 아닐 수 있다. 또한 지구 자기장은 항상 있다는 점도 명심하시오.

2. (1점) x축을 수평이고 책상의 짧은 변에 나란하게 잡자. 이 부분부터는 자기장의 x성분만 측정한다. 아래 그림과 같이 테이프 조각으로 자기 센서를 캘리퍼스의 플라스틱 상자에 고정하면 편리하다. 이렇게 하면 센서의 방향을 쉽게 그대로 유지할 수 있다. 그림의 화살표는 측정하는 자기장 성분의 방향이다.

멀티미터를 200 mV(직류) 범위로 켜고, 센서를 자석에서 멀리 떨어진 책상 위에 자기장의 x성분을 재도록 놓은 뒤, 멀티미터의 값 V_1을 읽어 적으시오. 센서를 180도 돌려(다시 자기장의 x성분을 재되 반대 방향으로) 새 값 V_2를 읽으시오. 이 두 값으로부터 오프셋 전압 V_0과 지구 자기장의 수평 성분 B_{Ex}를 구하시오.



3. (2.5점) 자석의 대칭축(x축) 위에서 자석 중심으로부터 거리 x가 서로 다른 여러 점에 대해, 영구 자석의 자기장의 x성분 $B_x(x)$를 측정하여 표로 정리하시오. 쓸 수 있는 거리 범위 전체에서 값을 읽어야 한다. 전압값이 300 mV를 넘는 거리는 피하시오. 직접 측정한 결과(전압)를 빠짐없이 적고, 자기장 값을 계산할 때는 오프셋 전압을 빼는 것을 잊지 마시오(지구 자기장의 x성분과 0이 아닌 오프셋 전압 V_0을 모두 보정해야 한다).

4. (2.5점) 자석에서 충분히 멀면, 자기장의 세기는 다음 식으로 주어진다.

$$B_x(x)=\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{p}{x^3},$$

여기서 p는 자석의 자기 쌍극자 모멘트이고, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{H\,m^{-1}}$은 진공의 투자율이다. 이 식을 따르는 데이터 점이 직선 위에 놓이도록 앞 과제의 측정 데이터를 그리는 방법을 찾으시오. 어떤 x 값에서 이 식이 측정 불확도 안에서 성립하는지 보이시오. 그래프를 이용해 자석의 쌍극자 모멘트를 구하시오.

5. (0.5점) 영구 자석의 자화 J(자기 쌍극자 모멘트의 부피 밀도로 정의)를 구하시오.