COVER

제3회 걸프 물리 올림피아드 — 실험 경연

오만 무스카트 — 2019년 10월 8일

- 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. 물질의 자기적 성질 *(20점)*

이 실험의 목표는 반자성 물질과 강자성 물질의 자기적 특성을 측정하는 것이다. 이를 위해 다른 측정도 몇 가지 필요하다 — 예를 들어 주사기 바늘의 지름과 물의 표면 장력 계수의 측정.

장비

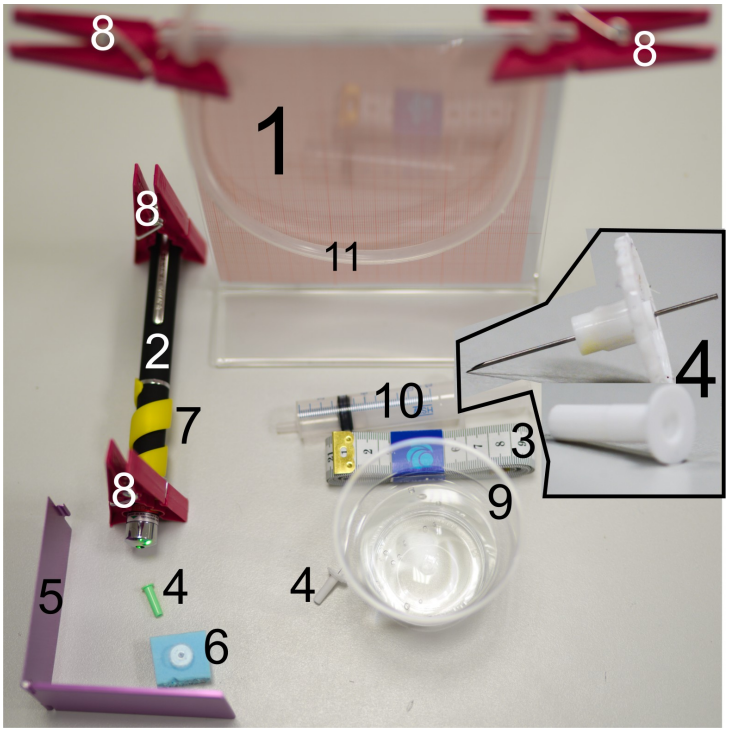


그림 1

그림 1에 있는 장비는 다음과 같다:
1 — 스탠드;
2 — 초록색 레이저 포인터;
3 — 줄자;
4 — 초록색과 흰색 주사기 바늘. 바늘의 한쪽 끝은 뾰족하고 다른 쪽 끝은 축에 수직으로 잘려 있다. 그림 1의 삽입 그림을 볼 것;
5 — 접는 거울;
6 — 스펀지 조각;
7 — 레이저 포인터의 버튼을 눌린 채로 유지하는 나선형 플라스틱 고정구;
8 — 빨래집게;
9 — 물이 든 컵;
10 — 주사기;
11 — 실리콘 관.

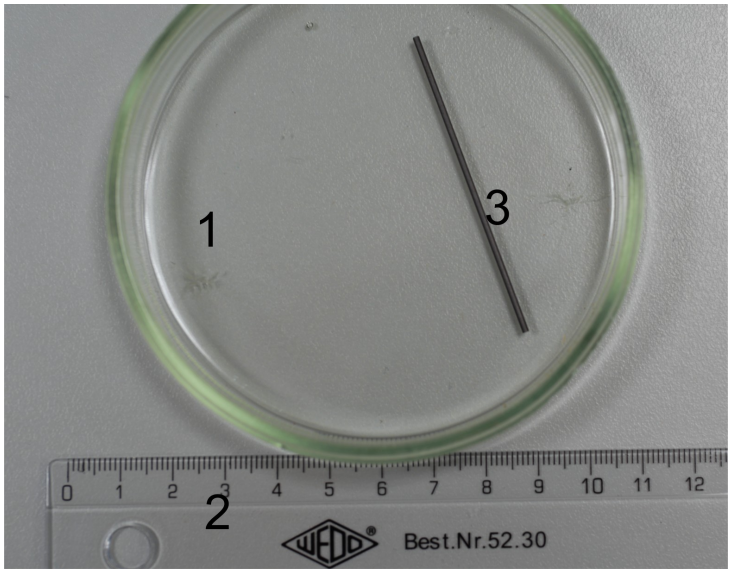


그림 2

그림 2에 있는 장비는 다음과 같다:
1 — 페트리 접시;
2 — 자;
3 — 흑연 막대.

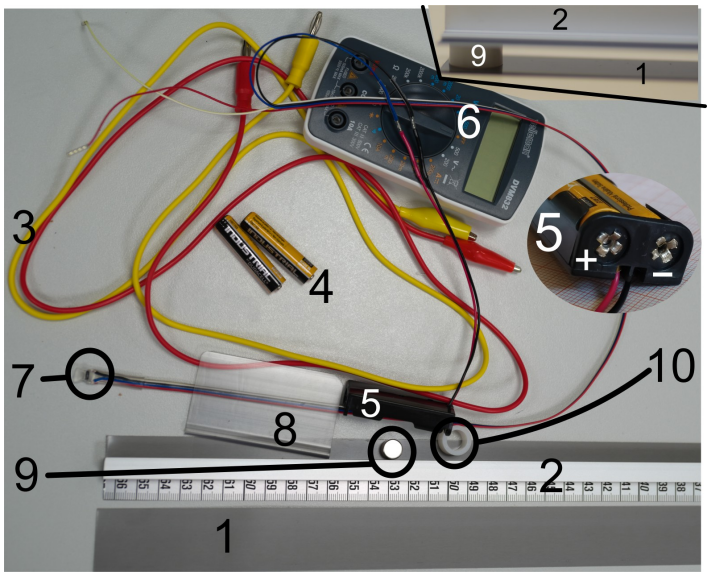


그림 3

그림 3에 있는 장비는 다음과 같다:
1 — 단독 강자성 띠;
2 — 알루미늄 막대로 보강하고 줄자를 붙인 강자성 띠;
3 — 악어 클립이 달린 도선;
4 — 전지;
5 — 전지 홀더;
6 — 멀티미터;
7 — 저항형 자기장 센서;
8 — 센서의 방향을 고정하는 플라스틱 클램프;
9 — 자석;
10 — 띠 (2)를 엄밀히 수평으로 유지하는 플라스틱 간격재.

그림에 없는 것: 자석을 감싸는 폴리에틸렌 필름 한 조각.

경고:

- **강자성체를 구부리지 마시오. 쓸 수 없게 된다! 구부러져도 교체해 주지 않으며 그 부분에서는 점수를 받을 수 없다.**
- **레이저 빔이 직접 또는 반사되어 눈에 들어가지 않도록 하시오. 눈에 해로울 수 있다!**
- **주사기 바늘은 날카로우니 찔리지 않도록 조심하시오!**
- **전지 도선을 단락시키지 마시오 — 전지가 과열되어 쓸 수 없게 된다!**
- **전지를 아끼도록, 쓰지 않을 때는 멀티미터와 레이저를 끄시오.**

과제

A 부분. 주사기 바늘의 지름 *(3점)*

다음 방법으로 주사기 바늘의 지름을 구하시오.

그림 4B와 같이 주사기를 플라스틱 마개가 아래로 가게 책상 위에 세우고, 그림처럼 빨래집게를 이용해 레이저를 설치한 뒤 레이저 빔을 바늘에 비추시오. 레이저 빔이 너무 높으면(즉 바늘 위로 지나가면) 그림 4A처럼 스펀지 조각을 써도 된다(초록색 주사기 바늘의 뾰족한 끝을 스펀지에 꽂아 바늘이 수직으로 서게 할 것). 레이저 빔이 약간 너무 낮으면 접은 종이로 높여도 된다. 레이저 전지가 다 되면 교체를 요청할 수 있다. 레이저 빔의 길이를 늘리려면 거울을 쓰시오(그림 4A 참고). 스크린에서 회절 극대 사이의 거리를 가능한 한 정밀하게 재시오(가능한 최고 정확도를 어떻게 얻었는지 설명할 것). 주사기 바늘에서 스크린까지 빛의 경로 길이를 재고 바늘의 지름을 계산하시오. 레이저 빔의 파장은 $\lambda = 532\,\mathrm{nm}$이다.

결과의 불확도를 추정하시오. 흰색 바늘로 같은 과정을 되풀이하시오.

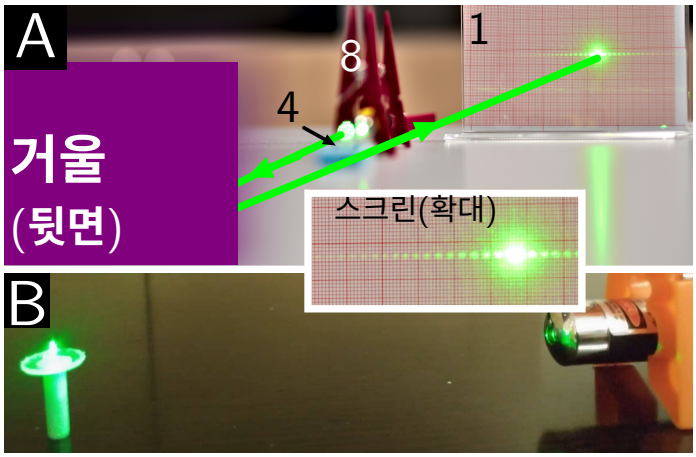


그림 4

B 부분. 물의 표면 장력 *(4점)*

실리콘 관에 물을 채우시오 — 주사기를 써도 된다(바늘은 쓰지 말 것!). 관의 약 2/3가 물로 차게 하고(물의 양은 나중에 필요에 따라 조절), 물이 공기 틈 없이 이어진 기둥을 이루도록 하시오. 클램프로 관의 두 끝을 스크린(이제 스탠드로 쓴다)에 고정하시오. 초록색 주사기 바늘의 뾰족한 끝으로 관을 찔러 바늘을 꽂으시오. 바늘의 평평한 끝이 연직 아래를 향하도록, 관의 가운데 가까이를 수직으로 찌르시오. 바늘의 열린 끝 위 물기둥의 높이에 따라 물이 천천히 떨어지기 시작할 수도, 그렇지 않을 수도 있다. 떨어지지 않으면 관의 가운데를 아래로 당겨 V자에 가깝게 만들어 바늘을 낮추시오. 그래도 물이 떨어지지 않으면 관에 물을 더 넣으시오 (그래도 안 되면 바늘 교체를 요청할 것).

물이 바늘에서 천천히 떨어지는 동안 바늘을 아주 천천히 올려 어느 높이에서 물방울이 멈추는지 알아내고, 그때의 물기둥 높이 (관 속 수면과 바늘의 가장 낮은 점 사이의 높이 차)를 재시오.

힌트*:* 관이 U자 모양으로 걸려 있을 때, 관의 가운데를 당겨 V자로 만들거나 들어 올려 W자로 만들면 물기둥의 높이를 조절할 수 있다.

초록색 바늘로 여러 번 측정하고, 흰색 바늘로 전체 과정을 되풀이하시오. 두 바늘에 대해 임계 물기둥 높이를 불확도와 함께 적으시오. 측정을 바탕으로 물의 표면 장력 계수 σ와 그 불확도를 구하시오. 물의 밀도는 $\rho_w = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$, 자유 낙하 가속도는 $g = 9.81\,\mathrm{m/s^2}$이다.

힌트*:* 주사기 바늘 끝에서 물방울이 자라는 여러 단계가

그림 5에 있다. 표면 장력 때문에 휘어진 수면을 사이에 두고 압력 차가 생긴다. 구면인 경우 이 압력 차는 $\Delta p = 2\sigma/r$이다. 여기서 r는 구면의 반지름이다.

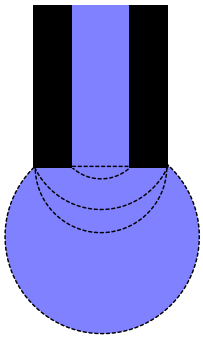


그림 5

C 부분. 흑연의 자화율 *(4점)*

자석의 지름을 재어 결과를 적으시오.

물층의 깊이가 접시 높이의 절반쯤 되도록 페트리 접시에 물을 채우시오. 흑연 막대에서 아주 작은 조각을 떼어 물 위에 올려놓으시오. 조각은 표면 장력 덕분에 떠 있어야 한다.

그림 6과 같이 폴리에틸렌 필름 조각을 이용해 자석을 주사기에 고정하시오(자석의 축이 주사기와 나란해야 한다). 자석을 수평에 대해 약 45도로 기울이시오(주사기와 연직 방향 사이의 각이 주사기와 수평면 사이의 각과 거의 같도록). 자석을 흑연 조각에 가까이 가져가면 반자성 때문에 조각이 "헤엄쳐" 멀어진다. 조각을 페트리 접시의 벽 쪽으로 미시오. 자석이 벽에서 너무 멀지 않으면, 자석의 각 위치마다 흑연 조각의 평형 위치가 있다. 두 가지 평형 배치를 만들어야 한다: (a) 자석의 지름과 흑연 조각이 대략 정삼각형을 이룬다; (b) 자석의 지름과 흑연 조각이 대략 직각 이등변 삼각형을 이룬다. 그림 6을 보시오.

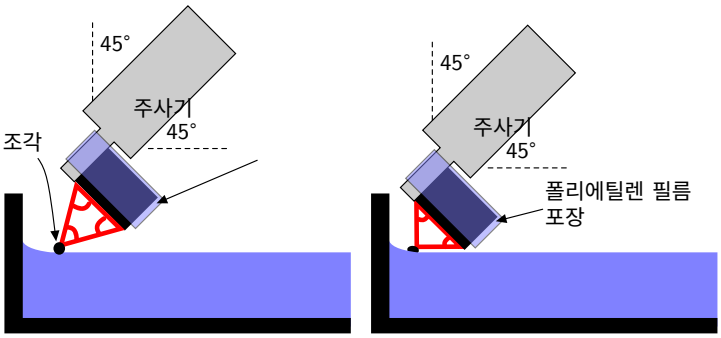


그림 6

자로 두 배치에서 조각과 접시 벽 사이의 거리를 재시오. 불확도를 줄이도록 측정을 여러 번 되풀이하시오.

흑연 조각이 받는, 조각의 단위 질량당 미는 힘은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{F}{m} = (|\chi_g - \chi_w|)\frac{1}{2\mu_0}\frac{\mathrm{d}B^2}{\mathrm{d}z},$$

여기서 χ_g와 $\chi_w = -9.05 \times 10^{-9}\,\mathrm{m^3/kg}$는 흑연과 물의 비자화율(물질의 단위 질량당)이고, $\frac{1}{2\mu_0}\frac{\mathrm{d}B^2}{\mathrm{d}z}$는 자기 압력의 기울기이다.

그림 7은 접시의 연직 벽으로부터의 수평 변위 x를 특성 길이 $\sqrt{\sigma/\rho_w g}$로 나눈 값의 함수로 나타낸 수면의 기울기 각 α이다. 여기서 $\rho_w = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$는 물의 밀도, $g = 9.81\,\mathrm{m/s^2}$는 자유 낙하 가속도이다. 흑연 조각은 아주 작은 각에서 정지하므로 근사 $\alpha \ll 1$을 쓸 수 있다.

그림 8은 주어진 영구 자석의 평평한 면으로부터의 거리에 따른, 자석 축 위의 자기 압력 기울기이다.

이 자료와 앞의 측정 결과를 바탕으로 χ_g를 구하고 그 불확도를 추정하시오.

D 부분. 강자성 띠의 상대 투자율 *(9점)*

i. (1점) 그림 3의 삽입 그림에 "+"와 "−"로 표시된 도선에 멀티미터를 연결하고 20 V(직류) 범위로 바꾸어, 전지 홀더 출력 도선의 전압 $\mathcal{E}$를 재시오. 전압이 3.0 V보다 낮으면 전지 교체를 요청할 수 있다.

자기 센서의 파란 도선과 검은 도선은 전지 홀더의 전지에, 빨간 도선과 흰 도선은 멀티미터에 연결하시오. 그림 3과 같이 센서 가까이에서 네 도선을 플라스틱 클램프로 감싸면, 센서는 연직 자기장을 재는 방향으로 유지된다. 멀티미터를 200 mV(직류) 범위로 켜고, 센서를 자석과 강자성 띠에서 멀리 떨어진 책상 위에 놓은 뒤 멀티미터의 값 V_0을 읽어 적으시오. (센서의 영점 오차와 지구 자기장을 보정하도록) 이후의 모든 측정값에서 이 전압을 빼시오.

ii. (4점) 전지 전압이 정확히 3 V라면, 측정값 1 mV는 자기장 세기 10 μT에 해당한다. 그러나 측정값은 전지 전압에 비례한다.

단독 강자성 띠를 책상 위에 놓고, 그 위에 자석과 원통형 플라스틱 간격재를 띠의 양 끝에 되도록 가깝게 놓은 뒤(그림 3의 삽입 그림 참고), 보강한 띠를 그 위에 올려 두 띠 사이에 폭이 일정한 틈이

생기게 하시오. 두 띠 사이의 자기장 세기 $B = B(z)$를 띠의 자석 없는 끝으로부터의 거리 z의 함수로 재시오. 자석에서 가장 먼 위치, 즉 z가 몇 mm인 곳에서 시작하여 5 cm 간격으로 재시오. 각 거리 z에서 센서를 띠 사이에서 수평으로 움직여 가장 큰 값을 찾으시오. 직접 읽은 전압값과 그에 대응하는 자기장 세기를 함께 표로 정리하시오.

이론에 따르면 이 배치에서 띠 사이의 자기장은

$$B = B_0 \cosh(z/\lambda),$$

이고, 여기서

$$\lambda = \sqrt{\mu\delta h/2}$$

이며, 쌍곡코사인은 $\cosh x = \frac{1}{2}(\mathrm{e}^{x} + \mathrm{e}^{-x})$로 정의된다. 여기서 $\delta = 0.27\,\mathrm{mm}$는 띠의 두께, h는 두 띠 사이 틈의 폭이다. h는 자로 잴 수 있다. 측정 데이터를 바탕으로 상대 투자율 μ를 구하기에 알맞은 그래프를 그리시오. μ를 구하고 결과의 불확도를 추정하시오.

힌트*:* 강자성 띠 안의 자기장이 너무 크면 포화 효과 때문에 주어진 $B(z)$ 식이 맞지 않는다. 계산기에는 보통 cosh 함수와 그 역함수(acosh 또는 $\cosh^{-1}$로 표시)가 모두 있다.

iii. (2점) 자기 선속이 띠의 폭에 걸쳐 어떻게 분포하는지 알아보기 위해, z의 범위 가운데쯤의 어떤 고정된 값에서, 띠의 대칭축으로부터의 거리 s의 함수로 자기장 세기를 재시오. 4 mm 간격을 쓰되 필요한 곳에서는 간격을 줄이시오. 결과를 그래프로 그리시오. 결과에 대해 논평하시오.

iv. (2점) 띠의 폭에 걸친 자기 선속의 분포가 z에 거의 의존하지 않는다고 가정하고, 측정 데이터를 바탕으로 강자성 띠 안의 자기장 세기를 z의 함수로 계산하여 그래프로 그리시오(필요하면 추가 측정을 해도 된다). 강자성 물질의 자화가 포화되기 시작하는 자기장 세기 B_s를 추정하시오.

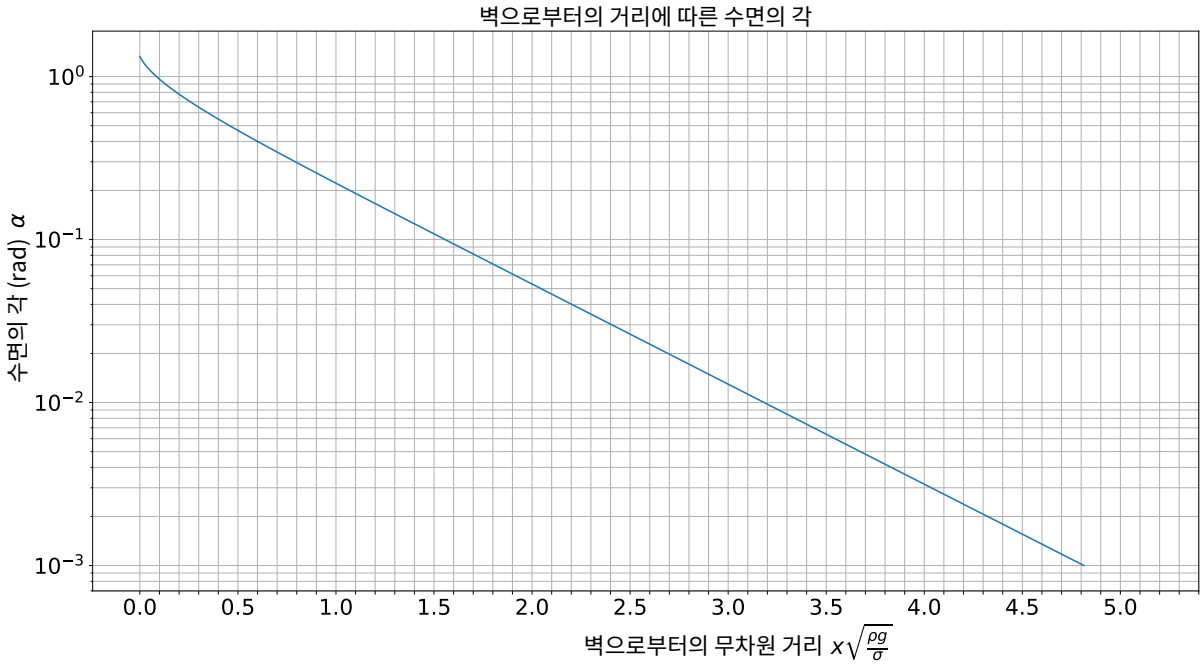

벽으로부터의 거리에 따른 수면의 각
수면의 각 (rad) α
10^{0}
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
벽으로부터의 무차원 거리 $x\sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}}$

그림 7

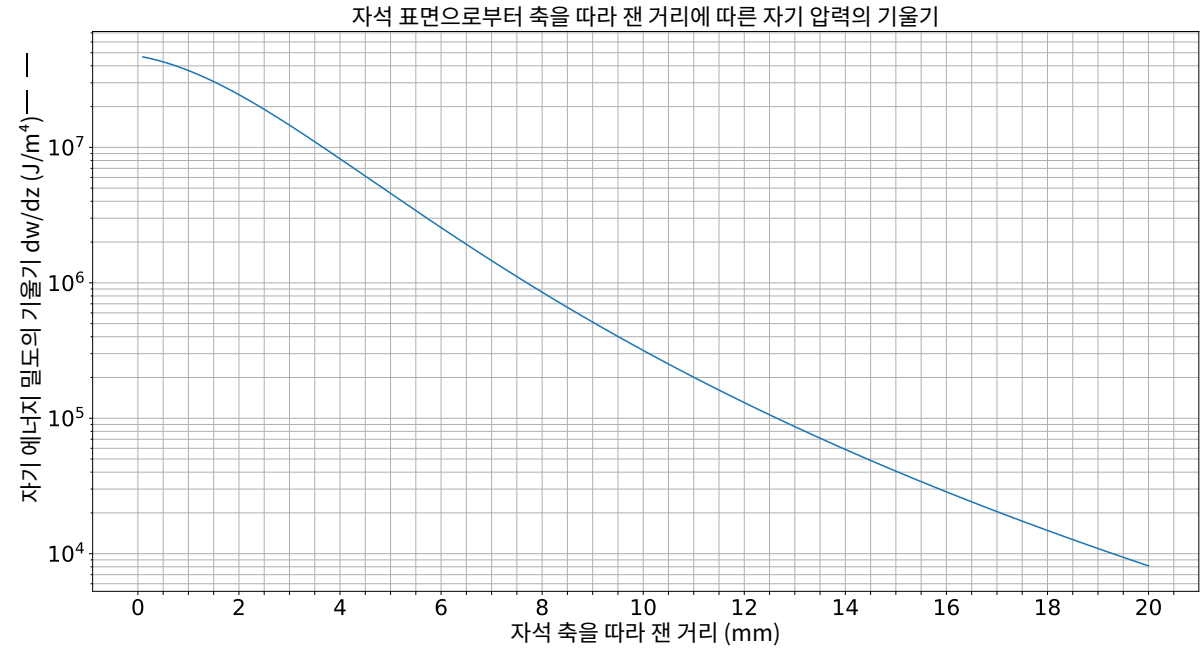

자석 표면으로부터 축을 따라 잰 거리에 따른 자기 압력의 기울기
자기 에너지 밀도의 기울기 dw/dz (J/m^4)
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
자석 축을 따라 잰 거리 (mm)

그림 8