자기적으로 활성인 유체의 정적 반응 (10점)

서론

강자성유체는 운반 매질 속에 자철석(Fe_3O_4) 나노입자를 떠 있게 만든 것이다. 흥미로운 성질을 여러 가지 보이는데, 특히 가해진 자기장에 강하게 반응한다. 초상자성체라고 부르기도 한다. 이 실험에서는 정적 시험법과 동적 시험법을 모두 쓰고 여러 실험적 측정·어림 기법을 이용하여 강자성유체의 성질 몇 가지를 경험적으로 조사한다. 실험은 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 문제를 순서대로 풀어 나가기를 권한다.

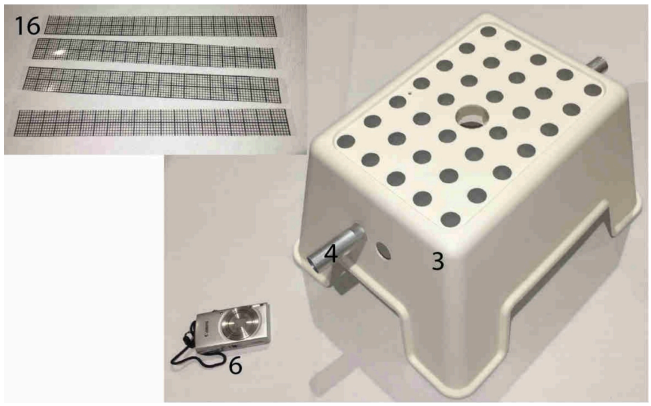
장비 목록



Asian Physics Olympiad Adelaide 2019

Q1-2

Korean (Korea (Republic of))



1. 맑은 매질 아래에 강자성유체가 들어 있는 작은 유리병. **어떤 이유로도 병을 열어서는 안 된다!**
2. 강자성유체가 들어 있고 뚜껑이 밀봉된 유리 접시. **어떤 이유로도 접시의 뚜껑을 열어서는 안 된다!**
3. 차광 덮개와 스탠드 일체
4. 위치를 조절할 수 있는 자석 운반대가 달린 관(처음에는 스탠드를 통해 끼워져 있다)
5. 수평 조절용 나일론 볼트가 달린 조절 가능한 나무 받침
6. 메모리 카드가 들어 있는 카메라
7. N52 자석 2개, 14.2 mm × 3.2 mm
8. N42 자석 1개, 20.0 mm × 5.0 mm (그림에는 없음)
9. 램프 기둥으로 쓸 길이 500 mm의 나사봉
10. 기둥을 스탠드에 붙이기 위한 와셔와 나비너트
11. 나사 구멍이 있는 전지 구동 램프
12. 도광판과 차광판을 만들기 위한 알루미늄 포일
13. 여러 부품을 필요에 따라 붙이기 위한 블루택
14. 초록색 쐐기
15. 투명한 30 cm 자
16. 투명한 눈금 띠 4개
17. 나무 스페이서 2개
18. 종이 줄자

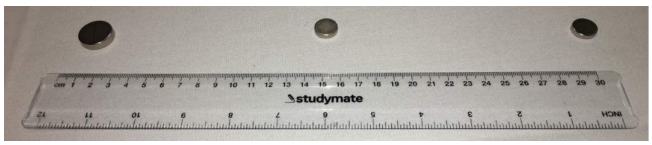
안전 및 그 밖의 중요한 유의 사항

이 실험에서는 세기가 매우 큰 자석을 쓴다. 자석들이 서로 끌어당기게 두면 손가락이 끼이거나 서로 부딪혀 깨질 수 있다. 자석은 언제나 조심해서 다루고, 서로 가까이 둔 채로 방치하지 마라. **깨진 자석은 교체해 주지 않는다.**

이 실험에는 밀봉된 유체 용기가 두 개 있다. 실험 중 어느 때에도 작은 유리병이나 뚜껑이 밀봉된 유리 접시를 열어서는 안 된다. **접시의 옆면이 강자성유체로 덮이면 들여다보기가 매우 어려워지므로 접시를 불필요하게 기울이지 않도록 조심하라.**

램프는 전지로 작동한다. 필요하다고 판단되면 실험 중에 램프용 전지 **한** 세트를 추가로 요청할 수 있다.

자석을 강자성유체에 10초쯤 넘게 가까이 대고 있으면, 잔류 자화와 주변 유체와의 상호작용 때문에 유체의 거동이 달라진다. 실험을 계속할 수는 있지만 옳은 효과를 보기가 더 어려워질 수 있다.



자석을 보관할 때에는 서로 달라붙지 않도록 충분히 멀리 떨어뜨려 두어라. 위 그림에 나타낸 정도로는 떨어뜨려 놓아야 한다.

파트 A: 정적 시험 (1.6점)

실험의 이 부분에서는 자기장에 대한 정적 반응을 측정하여 강자성유체의 성질을 조사한다.

자기 상호작용: 강자성유체에 작용하는 힘

작은 유리병에는 강자성유체와 섞이지 않는 미지의 유체에 둘러싸인 강자성유체가 들어 있다. 강자성유체의 밀도는 $1.21 \times 10^3\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ 이고 자기 감수율은 $\chi = 2.64$ 이다.

강자성유체는 자기장 **B** 에 반응하여 부피당 크기 $m = \frac{\chi B}{\mu_0}$ 의 유도 쌍극자 모멘트를 갖는다.

원통형 자석의 축 위에서의 장은 근사적으로 다음과 같다

$$B_z = \frac{B_r}{2}\left(\frac{z+l}{\sqrt{(z+l)^2+a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2+a^2}}\right)\,, \tag{1}$$

여기서 z 는 자석 표면에서의 거리, l 은 자석의 두께, a 는 반지름, B_r 은 잔류 장세기로 자석을 이루는 자성 물질의 성질이다. 큰 자석(N42)에 대해서는 $B_r = 1.3\,\mathrm{T}$ 이고 작은 자석(N52)에 대해서는 $B_r = 1.4\,\mathrm{T}$ 이다.

강자성유체에 작용하는 z 방향(자석의 자화 방향)의 부피당 힘은 다음과 같다고 볼 수 있다

$$\frac{f}{V} = \frac{\chi B_z \frac{dB_z}{dz}}{2\mu_0}\,. \tag{2}$$

전체 장으로 힘을 계산하는 것은 번거로우므로, 이 파트에서는 강자성유체에 작용하는 힘에 쌍극자 근사를 써도 된다. 이 근사를 쓰면 z 방향의 부피당 힘은

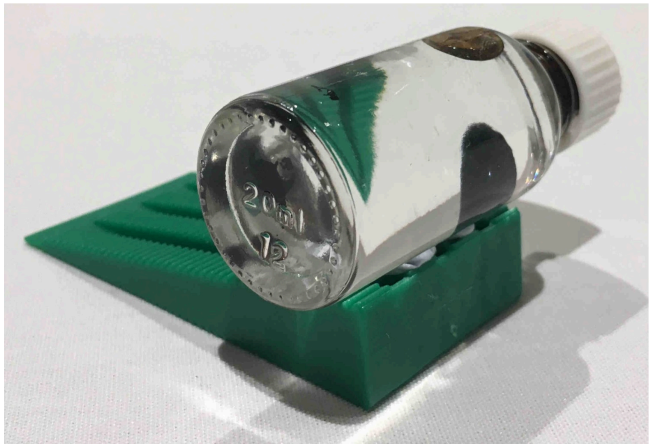
$$\frac{f}{V} = -\frac{3\chi B_r^2 a^4 l^2}{8\mu_0 z^7} \tag{3}$$

알루미늄 관을 통과하는 나사봉이 평평한 면을 아래로 향하도록 스탠드를 설치하라. 알루미늄 관을 돌려 이렇게 맞출 수 있다 – 관을 돌릴 때 나사봉이 바닥면에 닿지 않도록 하라.

블루택을 조금 써서 작은 병을 쐐기의 두꺼운 쪽 끝 위에 옆으로 붙여라.



파트 A를 위한 자석 운반대의 위치



파트 A를 위한 병 설치

A.1	강자성유체가 맑은 미지의 유체 속에 겨우 떠 있을 수 있는 큰 자석의 위치를 찾고, 그 거리 z 를 불확도와 함께 답안지에 기록하라. 완벽한 균형을 이루기는 어려울 수 있으니, 강자성 유체를 안정하게 떠 있게 할 수 없다면 거리와 그 불확도를 최선으로 어림하라. 답안지의 상자 안에, 거리를 어떻게 측정했는지 보여 주는 그림을 그려라. 때때로 강자성유체가 자성 덩어리와 따로 떠 있는 덩어리로 '쪼개진' 것처럼 보일 수 있음에 유의하라. 이는 보통 병 안에 공기가 조금 있기 때문이다. 강자성유체 덩어리의 위치를 조절하여 병 안에서 들어 올릴 빈 공간을 확보할 수 있다.	0.8pt

A.2	거리 결과와 필요한 다른 측정값을 이용하여, 강자성유체의 밀도와 맑은 주변 유체의 밀도 차를 불확도와 함께 계산하라.	0.8pt

파트 B: 자기 상호작용: 강자성유체의 표면장력 (1.2점)

강자성유체는 세 에너지, 곧 중력 퍼텐셜 에너지, 표면장력과 관련된 표면 에너지, 자기 에너지의 영향 아래에서 움직인다.

자석 하나를 써서, 자석을 병에 아주 가까이 가져갔을 때 무슨 일이 일어나는지 관찰하라. 유체의 중력– 모세관–자기 파동의 유효 진동수가 허수가 될 때 일어나는 수직장 불안정성 때문에 강자성유체에 뾰족한 돌기가 나타난다.

분산 관계는 다음과 같다

$$\omega^2 = \frac{gk\Delta\rho}{\rho_1+\rho_2} + \frac{\sigma k^3}{\rho_1+\rho_2} - \frac{k^2\mu_0 M_0^2}{1+(1+\chi)^{-1}}, \tag{4}$$

여기서 σ 는 강자성유체–맑은 유체 경계면에서 강자성유체의 표면장력, ρ_1 은 강자성유체의 밀도, ρ_2 는 맑은 유체의 밀도, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, M_0 은 강자성유체에서의 자화, k 는 파수이다.

조건 $\omega^2 = 0$ 과 $\frac{\partial\omega^2}{\partial k} = 0$ 을 적용하면, **불안정성이 시작되는 점**에서 밀도 차와 유체 표면 섭동의 유효 파장으로 표면장력을 구할 수 있다. 그 관계는

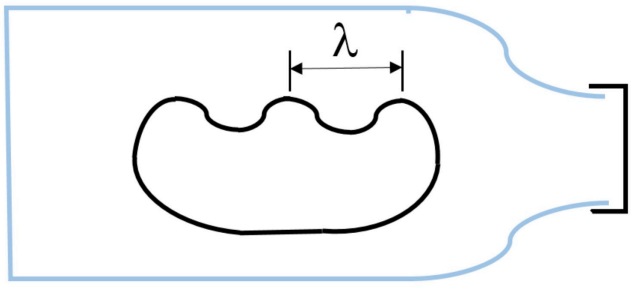
$$\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}, \tag{5}$$

이며 여기서 λ 는 자화 세기가 불안정성 문턱에 있을 때 이웃한 돌기들의 중심 사이의 거리이다.



파트 B를 위한 자석과 운반대의 위치.

나사봉의 방향을 바꾸어(관을 돌리면서 봉의 위치를 조절하는 것이 가장 쉽다) 자석을 스탠드 위쪽 구멍 바로 아래에서 구멍을 통해 올리고 내릴 수 있게 하라.



B.1	유리병을 써서, 불안정성이 막 일어나기 시작할 때(돌기가 막 생기기 시작할 때)의 거리 z_{crit} 를 측정하라. 눈금판이나 다른 방법을 써서, 이 위치에서 강자성유체의 돌기 간격 λ 를 재고 기록하라. 두 측정 모두에서 불확도를 어림하라. **중요한 힌트:** 자석으로 유체를 유리벽에 강하게 붙여 두면 유리에 조금 달라붙어 측정이 더 어려워진다. 이런 일이 생기면 자석으로 유체를 달라붙은 자리에서 떼어내고, 병의 다른 부분을 이 측정에 쓸 수 있다.	0.6pt

B.2	따라서 맑은 유체 아래 강자성유체의 표면장력과 그 불확도를 구하라.	0.6pt

파트 C: 광학적 표면 특성 분석: 비돌기 영역 (4.1점)

임계 장보다 작은 자기장을 가하면 유체의 표면은 자기 퍼텐셜과 중력 퍼텐셜 사이의 균형으로 1차 근사적으로 변형된다. 다음 파트에서는 자석이 유체에서 충분히 멀어 쌍극자 장으로 잘 근사되는 경우를 다룬다.

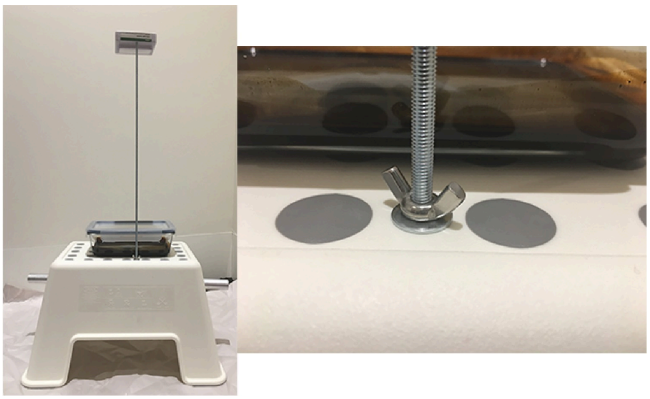
표면 변형은 유체의 표면을 근사적인 구면 거울로 이용하여 광학적으로 조사할 수 있다. 변형 중심의 유효 곡률 반지름은 거듭제곱 법칙 $R = \alpha z^n$ 을 따르며, 여기서 α 는 물질에 의존하는 상수이고 z 는 유체의 교란되지 않은 표면에서 자석까지의 거리이다.

먼저 나사봉을 눈금 맞춤해야 한다.

C.1	주어진 장비를 써서 나사봉 자석 운반대를 한 바퀴 돌릴 때 z 의 변화를 가능한 한 정확하게 구하고, 불확도도 어림하라. 사용한 측정값을 기록하고 장치의 그림을 그려라.	0.6pt

이제 강자성유체가 든 유리 접시를 스탠드 위에 놓아, 스탠드 가운데의 구멍이 접시 가운데 아래에 오게 하라. *실험 중 어느 때에도 접시의 밀봉된 뚜껑을 열지 마라.* 작은 자석 하나를 봉에 끼워라.

램프를 봉에 끼우고, 와셔와 나비너트로 나사봉을 스탠드의 구멍에 고정하라(그림 참조).

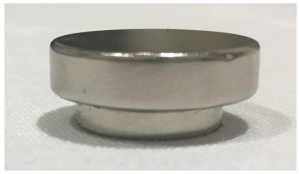


C.2	구면 거울에 대한 곡률 반지름 R 과 상 배율 M 사이의 관계 $R = \frac{2lM}{1-M}$(여기서 l 은 물체까지의 거리)을 이용하여 측정을 하고, 적절한 그래프를 그려 위 관계식의 상수 n 을 정하라. 답의 불확도를 어림하라.	3.5pt

파트 D: 돌기 표면 특성 분석: 돌기의 생성과 소멸 (3.1점)

장이 더 커지면 표면은 유리병에서 관찰한 것과 같이 불안정성을 겪고 돌기를 만든다.

D.1 작은 자석 하나와 큰 자석 하나를 쌓아 쓰고, 불안정성 이론 $\sigma = \frac{g\rho\lambda^2}{4\pi^2}$ 를 이용하여 공기 경계면에서 강자성유체의 표면장력을 정하라. 0.5pt



D.2 돌기가 전혀 보이지 않을 만큼 자석을 표면에서 멀리 둔 상태에서 시작하라. 자석을 유체에 더 가까이 가져가면서 각 돌기가 생길 때의 거리를 읽어 기록하라. 자석을 물릴 때에도 각 돌기가 사라지는 위치를 기록하여 또 한 벌의 자료를 얻어라. 측정의 불확도를 어림하라. 1.0pt

D.3 자석 거리 z 에 대한 보이는 돌기 수의 그래프를 그려라. 그래프에 곡선을 맞추고 자석이 어느 방향으로 움직이고 있었는지 분명히 나타내라. 1.0pt

D.4 자석과 유체 표면 사이의 거리가 바뀌면 유체의 중력 에너지, 자기 에너지, 표면 에너지가 바뀐다. 유체 표면에서 자석까지의 거리의 함수로, 표면 에너지와 자기 퍼텐셜 에너지에 저장된 에너지를 정성적으로 그려라. 앞 그래프에서 임계점이 있으면 표시하고 전체적인 경향을 분명히 하라. 자료의 전 범위를 쓸 필요는 없고, 생각을 보여 줄 만큼만 쓰면 된다. 0.6pt