COVER

제1회 걸프 물리 올림피아드 — 실험 경연

사우디아라비아 리야드 — 2016년 3월 22일 화요일

- 시험 시간은 5시간이다. 채점하는 문제는 2개이며 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.
- **레이저 빔이나 그 반사광을 들여다보지 마시오! 눈이 영구적으로 손상될 수 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. 굴러가는 원통 *(7점)*

장치는 다음으로 이루어져 있다(강조된 번호는 그림의 번호와 같다). 1 한쪽 끝에 구멍이 뚫린 나무판, 2 판의 구멍에 끼울 수 있는 막대 2개(이렇게 판의 한쪽 끝을 높이 유지할 수 있다), 3 막대에 끼워 아래에서 판을 받치는 클램프 2개, 4 줄자, 5 스톱워치("go"를 누르면 측정 시작, "stop"을 누르면 시간 기록, "clear"를 누르면 화면이 0으로 초기화), 6 양을 모르는 미지의 액체가 든 원통형 병. 병을 열어서는 안 된다(병은 스티커로 봉해져 있으며, 한 번 떼면 다시 붙일 수 없다).



수치 계산에 쓸 값: **병의 질량(안의 액체 포함)** $M = 50\,\mathrm{g}$**.** 자유낙하 가속도 $g = 9.81\,\mathrm{m/s^2}$.

병 안 액체의 성질은 온도에 따라 달라진다. 액체가 데워지지 않도록 병을 손에 쥐는 시간을 되도록 짧게 하시오.

원통을 경사면에 놓으면 다음 네 가지 경우가 일어날 수 있다.

A, 경사각 α(면의 법선과 연직 방향 사이의 각)가 아주 작으면($\alpha \le \alpha_0$) 원통은 정지한 채로 있다.

B, 경사각이 적당히 작으면($\alpha_0 < \alpha < \alpha_1$) 원통은 거의 일정한 속력으로 굴러 내려간다(각 α가 임계값 α_0에 아주 가까우면 운동이 약간 고르지 않을 수 있다: 원통이 거의 멈췄다가 곧 다시 구르기 시작한다).

C, $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$이면, (면 위에 놓인) 원통을 놓았을 때 먼저 거의 일정한 구름 속력에 이른다. 이 속력에는 원통 지름 정도의 거리를 구르는 동안 아주 빨리 도달한다. 그러나 그 뒤 구르는 동안 속력이 천천히 커진다. 구름 속력이 천천히 커지는 까닭은 병 안의 액체가 병의 벽에 펴 발리기 때문이다($\alpha < \alpha_1$에서는 펴 발림이 일어나지 않는다).

D, $\alpha > \alpha_2$이면 병은 처음부터 끝까지 가속하며 구른다(거의 일정한 속력으로 구르는 것은 볼 수 없다).

A 부분. 임계 경사 *(1점)* 임계 경사 α_0과 α_2를 구하는 측정을 하시오. α_0과 α_2의 값(도 단위)을 불확도와 함께 적으시오. 영역 **C**에서 영역 **D**로 넘어가는 경계가 그다지 뚜렷하지 않으므로 α_2의 측정은 아주 정밀하지는 않을 것이다.

B 부분. 구름 속력 *(3점)* 판을 $\alpha_0 < \alpha < \alpha_2$인 어떤 각 α로 고정하고, 판의 위쪽 끝 가까이에 원통을 놓으시오. 이후의 측정에서는 이 위치에서 원통을 놓는다(원통은 아래로 굴러간다). 이 위치에서 아래로 4 cm를 재어 연필로 판에 표시하시오. 첫 표시에서 아래로 $l = 10\,\mathrm{cm}$ 떨어진 곳에 다음 표시를 하시오. 이 두 표시가 길이 10 cm인 첫 번째 구간을 정한다. 원통이 판의 끝에서 구르기 시작하면, 이 구간에 이를 때쯤에는 일정한 속력에 도달한다. 판의 아래쪽 끝 가까이에도 비슷한 구간을 표시하시오. 판의 위쪽 끝 가까운 곳에서 원통을 놓으시오. 두 구간에서의 구름 속력과, 위 구간의 시작부터 아래 구간의 끝까지 긴 구간에서의 평균 구름 속력을 계산하는 데 필요한 데이터를 측정하고 표로 정리하시오. 측정 데이터로부터 임계각 α_1을 구하시오.

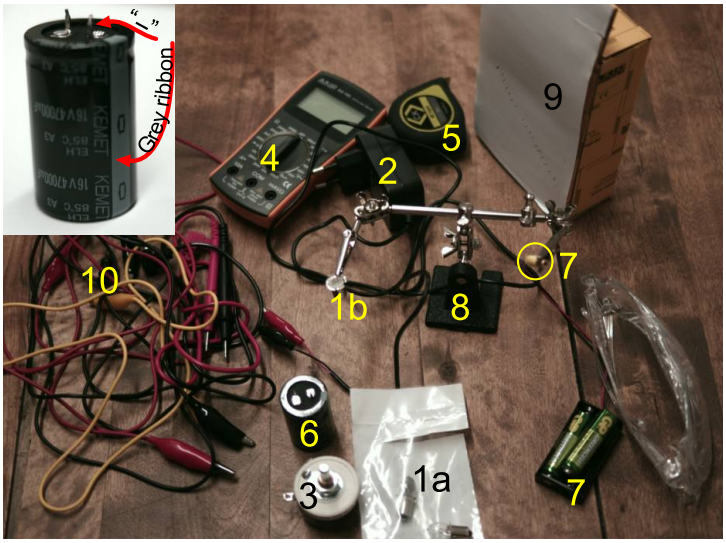
C 부분. 마찰력 *(2.3점)* 원통이 일정한 속력 v로 계속 구르게 하려면 힘 F를 가해야 한다. 이 힘은 구름 속력 v와 구르기 시작한 뒤 지난 시간 t에 의존한다. 즉 $F = F(v,t)$이다. F는 t가 아주 작을 때 커지다가 최댓값 $F_m(v)$에 이른 뒤 천천히 줄어들 수 있다. 앞 과제의 측정을 바탕으로 여러 v 값에 대해 $F_m(v)$를 계산하여 표로 정리하시오. 이 관계를 그래프로 그리고, 이 관계를 기술하는 식을 제안하시오.

D 부분. 액체의 질량 *(0.7점)* 앞 과제들의 측정 데이터를 바탕으로 병 안 액체의 질량을 추정하시오.

문제 E2. 텅스텐 필라멘트 *(13점)*

경고:

- **레이저 빔이나 그 반사광을 들여다보지 마시오!**
- **전해 축전기를 역극성이 걸릴 수 있는 회로에 연결하지 마시오! 축전기의 회색 띠가 "음극" 쪽이다.**
- **멀티미터(전류계 모드 또는 "10 A" 단자)로 전해 축전기를 단락시키지 마시오!**
- **전해 축전기를 쓰는 동안에는 보안경을 쓰시오(축전기를 역극성으로 연결하면 뜨거운 전해액이 뿜어져 나올 수 있다)!**



장치는 다음으로 이루어져 있다. 1a 텅스텐 필라멘트 백열전구 3개(실험에서는 똑같다고 보아도 된다), 1b 유리가 없는 깨진 전구 1개(깨진 필라멘트가 공기 중에 드러나 있다; 전구가 몇 개 더 필요하면 진행 요원에게 요청할 것), 2 전원 어댑터, 3 가변 저항기, 4 멀티미터, 5 줄자, 6 전해 축전기, 7 3 V 전지 묶음이 달린 레이저, 8 스탠드, 9 스크린(흰 종이를 붙인 멀티미터 상자), 10 도선(테스터 도선 2개, 바나나 플러그–악어 클립 도선 3개, 악어 클립–악어 클립 도선 2개).

수치 계산에 쓸 값: 레이저의 파장 $\lambda = 650\,\mathrm{nm}$. 텅스텐의 밀도 $D = 19.25\,\mathrm{g/cm^3}$.

실온에서 텅스텐의 비저항 $\rho_{25} = 5.65 \times 10^{-8}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$. 400 K부터 텅스텐의 녹는점 $T_m = 3695\,\mathrm{K}$ 사이의 온도에서, 텅스텐의 온도를 비저항의 함수로 꽤 잘 나타내는 근사식:

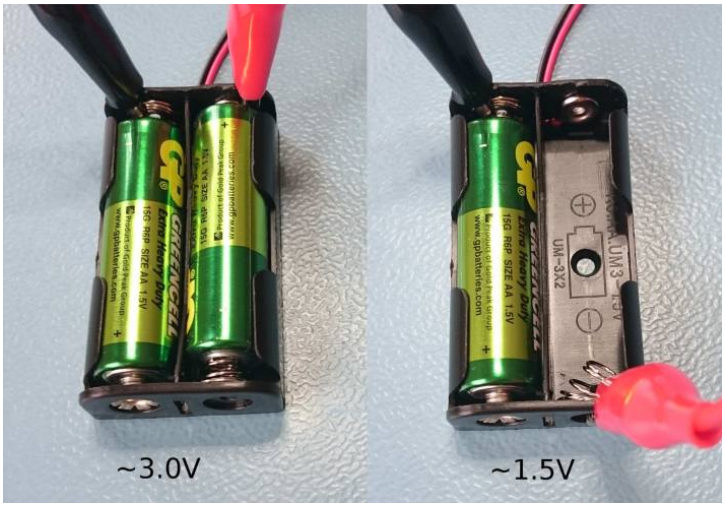
$$T\left(\frac{\rho}{\rho_{25}}\right) = 104\,\mathrm{K} + 216\,\mathrm{K}\cdot\frac{\rho}{\rho_{25}} - 2.46\,\mathrm{K}\cdot\left(\frac{\rho}{\rho_{25}}\right)^2.$$

슈테판-볼츠만 상수 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2K^4)}$. 전해 축전기의 전기 용량 $C = 47\,\mathrm{mF}$. 멀티미터의 불확도: 저항계로 쓸 때 0.8% + 마지막 유효 자릿수(LSD)의 5배, 전류계(10A)로 쓸 때 2% + 5×LSD, 전압계로 쓸 때 0.5% + 4×LSD.

A 부분. 필라멘트의 지름 *(1.5점)* 회절을 이용해 텅스텐 필라멘트의 지름 d를 측정하시오. 필라멘트가 드러난 백열전구를 쓰시오(필라멘트는 원래의 코일 모양에서 곧게 펴져 있다). 측정 장치를 그리시오. 힌트: 가는 줄에 의한 회절 무늬는 지름이 같은 단일 슬릿의 회절 무늬와 같다. 스크린의 회절 무늬를 더 밝게 하려면, 레이저 하우징의 마개를 돌려 레이저 빔을 필라멘트에 초점 맞추시오(스크린의 레이저 점은 흐려진다).

지름을 구하지 못했으면 이후에는 $d = 40\,\mu\mathrm{m}$(정확한 값이 아닐 수 있다)를 쓰시오.

B 부분. 필라멘트의 저항 *(2점)* 실온에서 필라멘트의 저항 R을 **가능한 한 정확하게** 측정하시오. 사용한 회로를 기록하시오. 필라멘트의 길이 l을 계산하시오. 불확도를 추정하시오. 전구 하우징과 필라멘트를 받치는 도선의 저항은 무시해도 된다. 멀티미터를 전압 측정에 쓸 때는 이상적인 전압계로 보아도 된다. **전류계로 쓸 때는 내부 저항을 무시할 수 없다.** 약 12 V를 내는 전원 장치를 쓸 수 있지만, 필요하면 그림과 같이 레이저의 전지 홀더를 3 V 전원이나 1.5 V 전원으로 써도 된다(3 V 전원으로 쓰는 동안에는 레이저가 켜진다).



C 부분. 전류–전압 곡선 *(2.5점)* 0 V부터 필라멘트가 끊어질 때까지, 전구에 흐르는 전류를 전압의 함수로 그래프로 그리시오. 회로를 기록하시오. 필라멘트가 끊어질 때 필라멘트의 최고 온도 T는 얼마였는가?

전류 측정에는 멀티미터의 10 A 범위를 쓸 수 있다. 이렇게 하면 전압을 잴 때 회로를 다시 꾸미지 않아도 된다. 멀티미터의 선택 손잡이를 10 A와 전압 측정 위치 사이에서 돌려도 "10A" 단자와 COM 단자는 멀티미터 안에서 몇 옴짜리 저항을 거쳐 연결된 채로 있고, COM 단자와 다용도 단자 사이의 저항은 아주 크게 유지된다.

D 부분. 방출률 *(3.5점)* (a) 필라멘트의 열은 모두 열복사로 빠져나가고, (b) 텅스텐 필라멘트는 회색체, 즉 방출률이 온도 T에 의존하지 않는다고 가정하면, 슈테판-볼츠만 법칙은 소모 전력이 $P = Ak\sigma T^4$이라고 예측한다. 여기서 A는 필라멘트의 겉넓이, k는 방출률이다. 이 예측을 확인하는 그래프를 그리시오. 이 예측이 성립하는 온도 범위를 나타내고, 그 범위에서 텅스텐 필라멘트의 방출률을 구하시오. 어떤 온도에서 예측이 성립하지 않는가? 그 온도에서 예측이 맞지 않는 까닭은 무엇인가?

E 부분. 텅스텐의 비열 *(3.5점)* 필라멘트의 온도를 실온에서 끊어지는 온도까지 올리는 데 드는 열량 Q를 측정하고, 이 온도 범위에서 텅스텐의 평균 비열 c를 계산하시오. 사용한 회로를 기록하시오. 주된 오차의 원인과 크기를 추정하시오. 힌트: 12 V보다 높은 전압이 필요하면, 전원 장치와 전지 묶음을 직렬로 연결해 약 15 V까지 얻을 수 있다.