## 문제 E1. 굴러가는 원통 (7점)

### A부분. 임계 기울기 (1점)

보드의 길이 $L = 680$ mm와 그 불확도 $\Delta L = 1$ mm를 잰다. **(0.1점)**

다음으로, 원통을 아래로 밀었을 때 구르기가 멈추는 보드의 가장 가파른 위치를 정하고, 보드 윗면의 위쪽 가장자리와 아래쪽 가장자리 높이 $h_u$와 $h_l$의 차 $H = h_u - h_l$을 잰다. $h_l = 8$ mm **(0.1점)**
그리고 $h_u = 33$ mm를 얻으며 **(0.1점)**
따라서 $H = 25$ mm이다. 마지막으로 공식 $a_0 = \arcsin H/L \approx 2.1°$로 각을 계산한다. 최종 결과는 $2.1° \pm 0.2°$ 안에 있어야 한다. **(0.1점)**
측정을 되풀이한다. 기울기의 임계 위치를 찾고 $h_u$를 잰다. 세 번 이상 측정하면 **(0.1점)**

두 번째 임계각에 대해서도 같은 일을 한다. 결과가 $h_u = 170$ mm, $a_2 \approx 14.5°$이면, 최종 결과는 $14.5° \pm 3°$ 안에 있어야 한다. **(0.1점)**
세 번 이상 측정했다면 **(0.1점)**

오차 어림: $h_l$과 $L$의 불확도는 1 mm 또는 0.5 mm로 어림한다. **(0.1점)**
$a_0$을 정할 때 $h_u$의 불확도는 1 mm에서 2 mm 범위로, $a_2$를 정할 때는 10 mm에서 50 mm 범위로 어림한다. **(0.1점)**
이 어림은 반복 측정의 표준 편차를 바탕으로 할 수 있다.

작은 각에서는 라디안으로 $a \approx H/L$이므로

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2},$$

그리고 $\Delta H = \sqrt{(\Delta {h_u}^2 + \Delta {h_l}^2)}$이며, 수치로는 $\Delta a_1 \approx 0.1°$–$0.3°$, $\Delta a_2 \approx 1°$–$5°$이다. 두 계산을 모두 합리적으로(피타고라스 규칙 대신 오차를 절댓값으로 더하거나 상한-하한 방법을 써도 됨) 실수 없이 했다면 **(0.1점)**

| $h$ (mm) | $t_1$ (s) | $v_1$ (mm/s) | $t_2$ (s) | $v_2$ (mm/s) | $t_l$ (s) | $v_l$ (mm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.6 | 64.8 | 1.54 | 64.5 | 1.55 | 388.2 | 1.55 |
| 3 | 15.2 | 6.6 | 15.2 | 6.6 | 91.2 | 6.58 |
| 3.5 | 7.2 | 13.9 | 7.4 | 13.5 | 43.8 | 13.7 |
| 4 | 4.52 | 22.1 | 4.38 | 22.8 | 26.46 | 22.7 |
| 4.5 | 3.41 | 29.3 | 3.53 | 28.3 | 20.7 | 29.0 |
| 5 | 2.86 | 35.0 | 2.97 | 33.7 | 17.22 | 34.8 |
| 5.5 | 2.27 | 44.1 | 2.31 | 43.3 | 13.56 | 44.2 |
| 6 | 1.78 | 56.2 | 1.65 | 60.1 | 10.14 | 59.2 |
| 6.5 | 1.51 | 66.2 | 1.35 | 74.1 | 8.46 | 70.9 |
| 7 | 1.35 | 74.1 | 1.02 | 98.0 | 7.02 | 85.5 |
| 7.5 | 1.31 | 76.3 | | | | |
| 8 | 1.21 | 82.6 | | | | |
| 8.5 | 1.09 | 91.2 | | | | |
| 9 | 0.98 | 102 | | | | |
| 9.5 | 0.92 | 109 | | | | |
| 10 | 0.84 | 119 | | | | |
| 10.5 | 0.78 | 128 | | | | |
| 11 | 0.72 | 139 | | | | |

보듯이 첫 구간과 둘째 구간의 구르는 시간은 $H = 65$ mm에서 갈라지기 시작하며, 이로부터 임계 기울기 $a_1 = 6.2°$를 얻는다.

**채점:** 첫 구간에 대해 그럴듯한 시간 값 10개 이상 **(0.8점)**
시간 값을 10개보다 적게 쟀다면, 측정이 3개보다 적으면 점수를 주지 않고, 그럴듯한 시간 값이 하나 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**
속력 값 10개 이상을 올바르게 계산함 **(0.5점)**
시간 값을 10개보다 적게 쟀다면, 측정이 2개보다 적으면 점수를 주지 않고, 올바르게 계산한 속력 값이 두 개 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

둘째 구간에 대해 그럴듯한 시간 값 6개 이상 **(0.4점)**
시간 값을 6개보다 적게 쟀다면, 측정이 3개보다 적으면 점수를 주지 않고, 그럴듯한 시간 값이 하나 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**
속력 값 6개 이상을 올바르게 계산함 **(0.2점)**
시간 값을 6개보다 적게 쟀다면, 측정이 2개보다 적으면 점수를 주지 않고, 올바르게 계산한 속력 값이 두 개 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

### B부분. 구르는 속력 (3점)

보드의 위쪽 가장자리 가까이에서 첫 구간을, 아래쪽 끝 가까이에서 둘째 구간을 잡아 $l_t = 60$ mm가 되도록 한다. 그러면 데이터는 다음과 같다.

긴 구간에 대해 그럴듯한 시간 값 6개 이상 **(0.4점)**
시간 값을 6개보다 적게 쟀다면, 측정이 3개보다 적으면 점수를 주지 않고, 그럴듯한 시간 값이 하나 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

속력 값 6개 이상을 올바르게 계산함 **(0.2점)**
시간 값을 6개보다 적게 쟀다면, 측정이 2개보다 적으면 점수를 주지 않고, 올바르게 계산한 속력 값이 두 개 늘 때마다 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

둘째 구간에 대해서는, 첫 구간과 시간 차가 뚜렷하지 않은 모든 $H$ 값에서 시간 값을 잡고, 그에 더해 그다음 $H$ 값 두 개 이상에서도 시간 값을 잰다. **(0.2점)**

긴 구간에 대해서는, 첫 구간과 시간 차가 뚜렷하지 않은 모든 $H$ 값에서 속력 값을 계산한다. **(0.2점)**

$a_1 = 6.2^\circ \pm 0.4^\circ$의 값을 보고함. **(0.2점)**
보고한 값이 이 범위에 들지 않지만 $a_1 = 6.2^\circ \pm 0.7^\circ$ 안이면 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

### C부분. 속력에 따른 힘 (2.3점)

원통을 계속 움직이게 하는 것은 중력 중 보드 면에 나란한 성분 $F_m = mg \sin a$이다. 힘이 시간에 크게 의존하는 경우에는 구르기 시작할 때 마찰력이 최대이므로 첫 구간의 데이터를 써야 한다.

| 구르는 높이 $h$ (mm) | 구르는 속력 $v$ (mm/s) | 가한 힘 ($F_m$): (mN) |
|---|---|---|
| 2.6 | 1.55 | 16.3 |
| 3 | 6.58 | 18.6 |
| 3.5 | 13.7 | 22.0 |
| 4 | 22.7 | 25.1 |
| 4.5 | 29.0 | 28.2 |
| 5 | 34.8 | 31.4 |
| 5.5 | 44.2 | 34.6 |
| 6 | 56.2 | 37.7 |
| 6.5 | 66.2 | 40.8 |
| 7 | 74.1 | 44.0 |
| 7.5 | 76.3 | 47.1 |
| 8 | 82.6 | 50.2 |
| 8.5 | 91.2 | 53.4 |
| 9 | 102 | 56.5 |
| 9.5 | 109 | 59.7 |
| 10 | 119 | 62.8 |
| 10.5 | 128 | 66.0 |
| 11 | 139 | 69.1 |

이 데이터로 그래프를 그린다(다음 쪽 참고). 보듯이 데이터는 한 직선 위에 놓이며, 이 직선은 다음 법칙으로 나타난다:

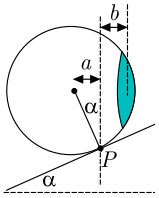
$$F = kv + F_0,$$

여기서 $k = 390$ g/s, $F_0 = 16.6$ mN이다. **채점:** 표에서 $a \le a_1$에 대해 올바른 데이터 점 5개 이상 **(0.6점)**
(힘을 올바르게 계산하고 속력은 $v_l$ 열에서 옮김.)
부분 점수: 데이터 점이 3개보다 적으면 점수 없음.
올바르게 옮긴 속력 값이 하나 늘 때마다 부분 점수; **(0.1점)**
올바르게 계산한 힘 값이 하나 늘 때마다 부분 점수. **(0.1점)**
속력 값을 $v_1$이나 $v_2$ 열에서 옮겼다면, 넷 이상 옮겼을 때 **0.1점**.
표에서 $a > a_1$에 대해 올바른 데이터 점 5개 이상 **(0.6점)**
(힘을 올바르게 계산하고 속력은 $v_1$ 열에서 옮김.)
부분 점수: 데이터 점이 3개보다 적으면 점수 없음.
올바르게 옮긴 속력 값이 하나 늘 때마다 부분 점수; **(0.1점)**
올바르게 계산한 힘 값이 하나 늘 때마다 부분 점수. **(0.1점)**
속력 값을 잘못된 열에서 옮겼으면 점수 없음.
그래프: 축 표시와 이름이 올바름. **(0.1점)**
그래프의 눈금을 합리적으로 고름 (모든 데이터를 덮는 가장 작은 직사각형의 넓이가 그래프 용지 전체 넓이의 적어도 1/3). **(0.1점)**

$a \le a_1$에 대해 그래프에 데이터 점 5개 이상을 올바르게 찍음 — 만점. **(0.3점)**
부분 점수: 데이터 점이 3개보다 적으면 점수 없음. 올바르게 찍은 데이터 점이 하나 늘 때마다 부분 점수; **(0.1점)**
$a > a_1$에 대해 그래프에 데이터 점 5개 이상을 올바르게 찍음 — 만점. **(0.3점)**
부분 점수: 데이터 점이 3개보다 적으면 점수 없음. 올바르게 찍은 데이터 점이 하나 늘 때마다 부분 점수; **(0.1점)**

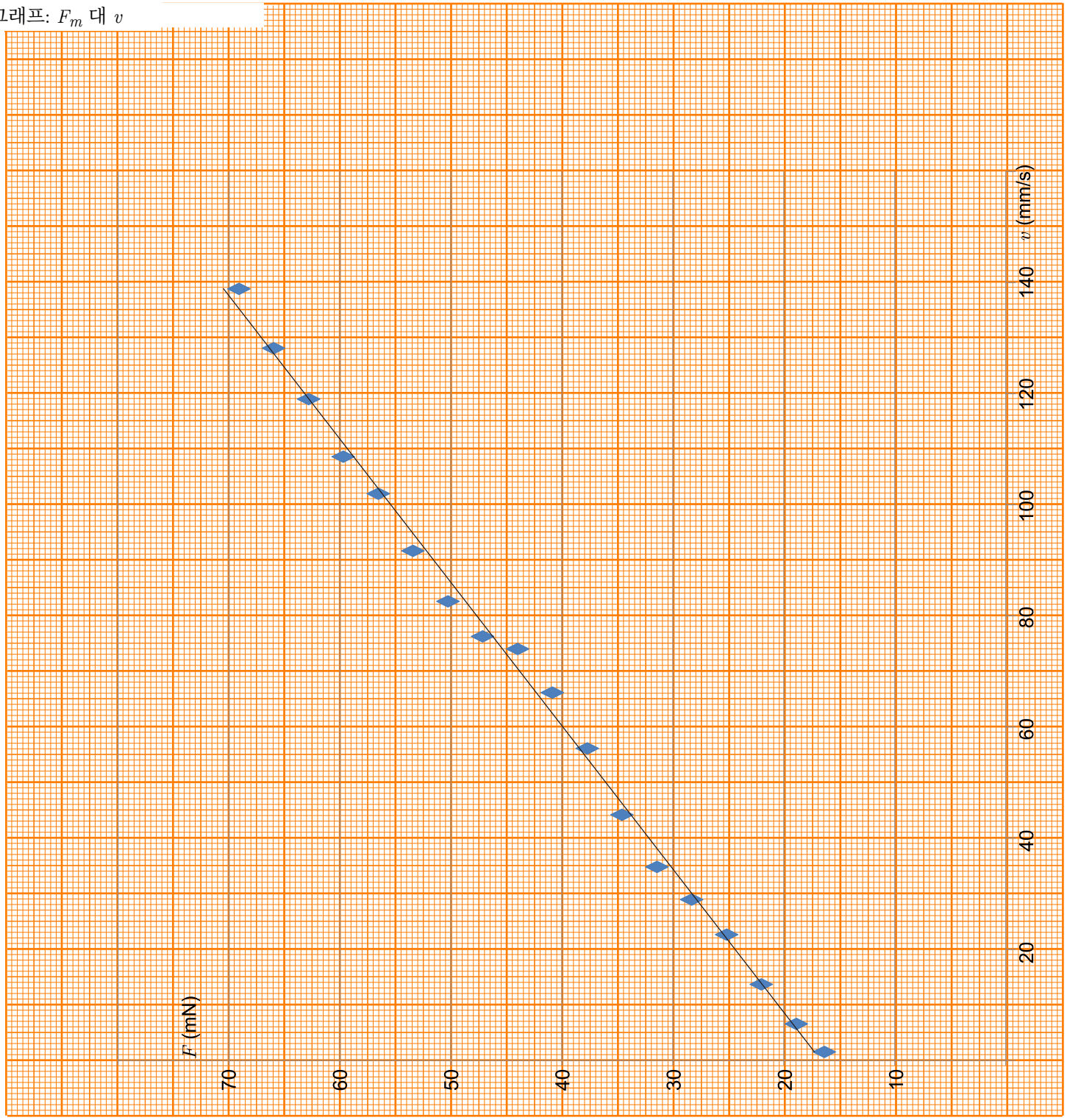
올바르게 유도한 함수 관계
$F = kv + F_0$; **(0.1점)**
$k = 390 \pm 40$ g/s; **(0.1점)**
$F_0 = 16.6 \pm 1$ mN. **(0.1점)**

### D부분. 액체의 질량 (0.7점)




임계각 $a_2$에서는 모든 액체가 굴러 올라가, 액체의 가운데 점과 원통의 중심을 잇는 선이 연직선을 이룰 때 구르기에 가장 강하게 저항한다(그림 참고). 각이 더 크면 이 위치는 아래로의 가속을 멈출 만큼 돌림힘을 주지 못한다. 그러면 계 전체의 질량 중심은 점 $P$ 바로 위에 있어야 하므로 $m_l b = (M - m_l)a$이며, $m_l$은 액체의 질량이다. $a = R \sin a$, $b = R - a$이므로(액체층의 두께는 무시) $m_l(1 - \sin a) = (M - m_l) \sin a$를 얻고, 따라서 $m_l = M \sin a \approx 12.5$ g이다.
**채점:** 비 $m_l/M$이 임계각 $a_2$와 관련됨을 깨달음. **(0.3점)**
$m_l = M \sin a \approx 12.5$ g을 얻음. **(0.2점)**
올바른 수치 계산. **(0.2점)**

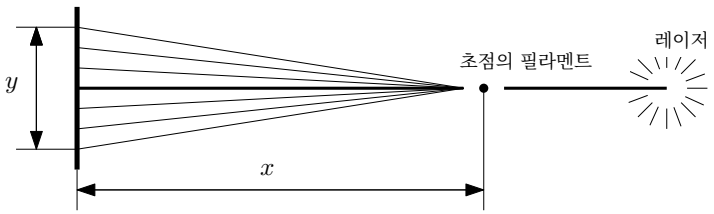
그래프: $F_m$ 대 $v$



## 문제 E2. 텅스텐 필라멘트 (13점)

### A부분. 필라멘트 지름 (1.5점)

측정 장치의 스케치:
화면은 되도록 멀리




**(0.2점)**

레이저를 필라멘트에 맞추는데, 조정하는 동안 화면을 필라멘트 가까이 두면 초점을 맞추기 쉽다. 측정할 때는 화면을 빔에 수직으로, 극대 사이가 벌어지도록 충분히 뒤로($x \geq 50$ cm) 놓는다. **(0.2점)**
$30\text{ cm} \leq x < 50\text{ cm}$이면 부분 점수. **(0.1점)**

두 극대 또는 두 극소 사이 거리를 잰다. 더 정확히 재려고 멀리 떨어진 극대를 고른다($n \geq 5$). **(0.2점)**
$3 \leq n < 5$이면 부분 점수. **(0.1점)**

지름을 계산하는 공식 $d = n\lambda\, x/y$. **(0.2점)**

이 경우 불확도는 대부분 회절 무늬가 흐릿하기 때문에 생긴다. 불확도를 어림하려면 측정을 (세 번 이상) 반복해야 한다.

| $n$ | $x$ | $y$ | $d = \frac{n\lambda x}{y}$ |
|---|---|---|---|
| 10 | 909 mm | 131 mm | 45.1 µm |
| 7 | 905 mm | 89 mm | 46.3 µm |
| 7 | 907 mm | 87 mm | 47.4 µm |

**(0.3점)**

(표의 각 줄마다 셋째 줄까지 0.1점.)
필라멘트 지름 $d$와 그 불확도:

$$d = 46.3\,\mu\text{m}$$

$|d - 46.3\ \mu\text{m}| \leq 2\ \mu\text{m}$이면 **(0.2점)**
$2\ \mu\text{m} < |d - 46.3\ \mu\text{m}| \leq 5\ \mu\text{m}$이면 부분 점수 **(0.1점)**

불확도는 $y$의 불확도가 지배하며, $\Delta d \approx d\Delta x/x \approx 1.2\ \mu\text{m}$이다.
$\Delta y$를 합리적으로 어림함, **(0.1점)**
$\Delta d$를 올바르게 계산함 **(0.1점)**

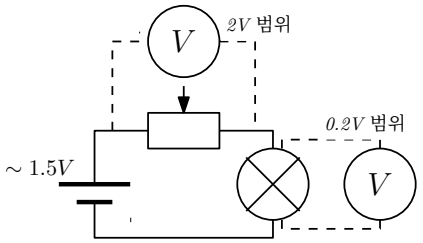
### B부분. 필라멘트의 저항 (2점)

문제는, 손잡이를 저항 측정 위치로 돌렸을 때 이 멀티미터로는 필라멘트의 저항을 직접 정확히 잴 수 없다는 것이다. 저항이 너무 작기 때문이다. 문제가 두 가지 있다. 첫째, 멀티미터가 충분히 정확하지 않다($\pm 0.5\% + 0.5\ \Omega$). 둘째, 내부 저항이 같은 크기일 수 있다. 필라멘트의 저항을 직접 쟀다면 모두 합쳐 0.5점을 넘지 않는다: 답이 $0.8 \pm 0.4\ \Omega$ 안이면 0.3점, 불확도를 $0.5\ \Omega$이나 $0.6\ \Omega$으로 적었으면 0.2점.
따라서 전구에 전류를 흘리고 전압을 재야 한다. **(0.1점)**

전류는 작아야 한다. 그렇지 않으면 필라멘트가 가열된다. **(0.2점)**

전류를 되도록 작게 하려고 1.5 V 전지 하나를 **(0.1점)**
가변 저항과 직렬로 쓴다. **(0.1점)**

전구의 전압은 정확히 잴 수 있지만, 전류계가 이상적이지 않아 전류가 문제이다. "mA" 범위로 쓰면 내부 저항을 고려할 수 없고, 10A 범위로 쓰면 전류 측정 오차가 크다. 따라서 멀티미터를 전압계로 써야 한다. **(0.1점)**
따라서 아래와 같은 회로를 쓴다. **(0.1점)**




가변 저항의 저항은 직접 재거나 전류/전압 측정으로 잴 수 있다. $R_r = 25.3\ \Omega$ **(0.1점)**
$\Delta R_r = 0.7\ \Omega$ **(0.1점)**
여기서부터는 합리적인 결과만 인정한다.
측정 결과: $U_r = 1.483$ V **(0.1점)**
$U_b = 45.0$ mV **(0.1점)**
$\Delta U_r = 0.012$ V, $\Delta U_b = 0.5$ mV **(0.1점)**

필라멘트 저항의 공식 $R = U_b R_r / U_r$ **(0.1점)**
필라멘트 저항 불확도의 공식

$$\Delta R = R \sqrt{\left(\frac{\Delta U_r}{U_r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_b}{U_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_r}{R_r}\right)^2}$$

**(0.1점)**
필라멘트 길이의 공식 $l = Rd^2\pi/(4\varrho_{25})$ **(0.1점)**
필라멘트 길이 불확도의 공식

$$\Delta l = l \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}$$

**(0.1점)**
필라멘트 저항 $R$과 그 불확도:
$R = 0.77\,\Omega$ **(0.1점)**

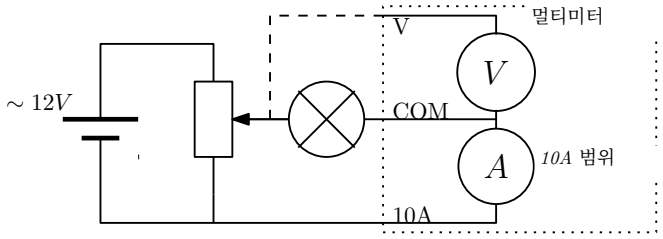
$\pm 0.03\,\Omega$ **(0.1점)**

필라멘트 길이 $l$과 그 불확도:
$l = 23$ mm **(0.1점)**

$\pm 2$ mm **(0.1점)**

## C부분. 전류–전압 곡선 (2.5점)

이제 전구를 가변 저항을 전위차계로 써서, 즉 아래 회로도에 따라 전지에 연결한다. 그래야만 0 V에서 12 V까지 전압 전 범위를 다룰 수 있다. **(0.2점)**
가변 저항을 직렬로 연결하면 (전원을 전지로 바꾸지 않는 한) 낮은 전압 값을 놓친다.




사용할 수 있는 올바른 회로도(가변 저항을 직렬로 연결했더라도)에는 점수를 준다. **(0.2점)**

전압을 재는 동안 전류계를 연결해 두면, 전류계의 전압 강하를 무시할 수 없으므로 COM 단자를 전구에 연결해야 한다. 전류계의 내부 저항을 무시하지 않는 회로에는 모두 점수를 준다. **(0.3점)**

| $U$ | $I$ | $U$ | $I$ | $U$ | $I$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 mV | 100 mA | 1000 mV | 230 mA | 5500 mV | 540 mA |
| 200 mV | 140 mA | 1500 mV | 280 mA | 6000 mV | 560 mA |
| 300 mV | 150 mA | 2000 mV | 320 mA | 6500 mV | 590 mA |
| 400 mV | 150 mA | 2500 mV | 360 mA | 7000 mV | 610 mA |
| 500 mV | 170 mA | 3000 mV | 390 mA | 7500 mV | 630 mA |
| 600 mV | 180 mA | 3500 mV | 430 mA | 8000 mV | 620 mA |
| 700 mV | 200 mA | 4000 mV | 460 mA | 8300 mV | 600 mA |
| 800 mV | 200 mA | 4500 mV | 490 mA | | |
| 900 mV | 220 mA | 5000 mV | 510 mA | | |

1 V 아래에서 올바른 측정 4개 이상. **(0.2점)**
측정 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
측정 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**
(이 과제의 최종 점수는 소수 첫째 자리로 올림한다.)
1 V ≤ $U$ < 3 V에서 올바른 측정 4개 이상 **(0.2점)**
측정 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
측정 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**

3 V ≤ $U$ ≤ 5 V에서 올바른 측정 4개 이상 **(0.2점)**
측정 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
측정 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**

5 V 위에서 올바른 측정 4개 이상 **(0.2점)**
측정 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
측정 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**

텅스텐 필라멘트가 끊어진 전류 $I_{last}$와 전압 $U_{last}$로 나타낸 필라멘트 온도의 공식:

$$T = T\left(\frac{U_{\text{last}}}{I_{\text{last}} R}\right)$$

**(0.2점)**
올바르게 계산한 온도 $T = 3190$ K **(0.1점)**
결과가 3000 K에서 3700 K 사이면 점수를 준다.
그래프는 7쪽에 있다. 그래프 채점: 축에 눈금과 단위를 표시하고 이름을 올바르게 붙임. **(0.1점)**
눈금을 알맞게 고름 (그래프가 그래프 용지 넓이의 적어도 1/3을 덮음). **(0.1점)**
데이터를 그래프에 올바르게 옮김. **(0.3점)**
부분 점수: 분명한 실수 하나면 0.2점, 둘이면 0.1점. 표의 일부 점을 옮기지 않았더라도 위의 네 범위마다 데이터 점이 4개 있으면 감점하지 않는다. 이 조건을 만족하지 않으면, 그래프 점수가 남지 않을 때까지 옮기지 않은 점마다 0.1점을 뺀다.
점들을 잇는 곡선을 그림. **(0.1점)**
그린 곡선이 원점을 지남. **(0.1점)**

## D부분. 방출률 (3.5점)

예측을 확인하려면 일정해야 하는 $k$를 $T$에 대해 그려야 한다. 또는 선형이 될 $P$ 대 $T^4$를 그리거나, $P$ 대 $T$를 로그 눈금으로 그려 기울기를 재도 된다. 이것들이 올바른 방법이다(다만 둘째와 셋째 방법은 이어지는 질문에 답하기가 조금 더 어렵다). **(0.5점)**

온도는 $T = T(U/IR)$로 계산할 수 있다 **(0.2점)**
방출률은 $k = UI/(\pi\, dl\sigma\, T^4)$로 계산할 수 있다 **(0.3점)**

계산한 데이터 (표 전체를 채울 필요는 없다):

| $T$ | $k$ | $T$ | $k$ | $T$ | $k$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 380 K | 2.52 | 1245 K | 0.50 | 2531 K | 0.38 |
| 496 K | 2.43 | 1488 K | 0.45 | 2633 K | 0.37 |
| 648 K | 1.34 | 1695 K | 0.41 | 2691 K | 0.39 |
| 823 K | 0.69 | 1852 K | 0.40 | 2777 K | 0.38 |
| 893 K | 0.70 | 2016 K | 0.37 | 2855 K | 0.37 |
| 993 K | 0.59 | 2112 K | 0.40 | 3033 K | 0.31 |
| 1035 K | 0.64 | 2230 K | 0.39 | 3191 K | 0.25 |
| 1160 K | 0.47 | 2330 K | 0.39 | | |
| 1182 K | 0.53 | 2455 K | 0.37 | | |

표의 만점(0.6점)은 다음과 같이 나뉜다:
1000 K 아래에서 올바른 데이터 점 4개 이상. **(0.2점)**

데이터 점 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
데이터 점 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**
(이 과제의 최종 점수는 소수 첫째 자리로 올림한다.)
1000 K와 2000 K 사이에서 올바르게 계산한 데이터 점 4개 이상 **(0.2점)**
데이터 점 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
데이터 점 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**

2000 K 위에서 올바른 데이터 점 4개 이상 **(0.2점)**
데이터 점 3개이면 부분 점수 **(0.1점)**
데이터 점 2개이면 부분 점수 **(0.05점)**

그래프는 8쪽에 있다. 그래프 채점: 축에 눈금과 단위를 표시하고 이름을 올바르게 붙임. **(0.1점)**
눈금을 알맞게 고름 (그래프가 그래프 용지 넓이의 적어도 1/3을 덮음). **(0.1점)**
데이터를 그래프에 올바르게 옮김. **(0.3점)**
부분 점수: 분명한 실수 하나면 0.2점, 둘이면 0.1점. 표의 일부 점을 옮기지 않았더라도 위의 네 범위마다 데이터 점이 4개 있으면 감점하지 않는다. 이 조건을 만족하지 않으면, 그래프 점수가 남지 않을 때까지 옮기지 않은 점마다 0.1점을 뺀다.
점들을 잇는 곡선을 그림. **(0.1점)**
$k$가 일정한 범위를 보임. **(0.1점)**
낮은 온도에서 $k$가 더 큼. **(0.1점)**

방출률은 그래프 가운데 $1350\ \mathrm{K} < T < 3000\ \mathrm{K}$에서 거의 일정함을 알 수 있다. 이 범위의 아래 한계는 $1350 \pm 250\ \mathrm{K}$ **(0.2점)**
확장된 범위 $1350 \pm 350\ \mathrm{K}$ 안의 결과에는 부분 점수. **(0.1점)**
위 한계는 끊어지는 온도이거나 2900 K보다 큰 값이다. **(0.1점)**

그 범위에서 방출률 $k = 0.4.\ 0.3$에서 0.5 사이의 답은 만점. **(0.3점)**
0.25에서 0.55 사이의 결과에는 부분 점수 **(0.2점)**
0.2에서 0.65 사이이면 **(0.1점)**

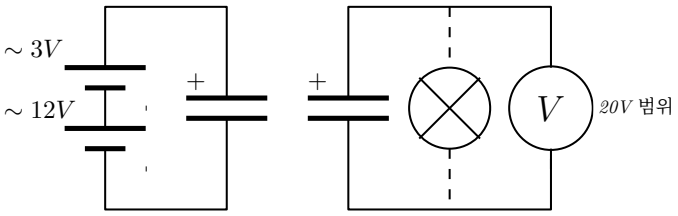
그래프에서 $T < 1350$ K(위에서 말한 값)일 때 예측이 맞지 않음을 알 수 있다. 8쪽의 그래프에 따르면 $T > 3000$ K의 아주 높은 온도에서도 맞지 않는다고 할 수 있지만, 늘 그렇지는 않으며 측정을 얼마나 빨리 하느냐에 달려 있다. 이 경우에는 측정을 꽤 천천히 했고, 텅스텐이 유리 안쪽에 쌓여 마지막에 필라멘트의 저항이 커졌다.

낮은 온도에서는 $k > 1$인 것처럼 보인다. 이 낮은 온도에서는 열이 주로 복사로 전달된다는 가정이 맞지 않아 대류와 전도에 의한 열전달을 무시할 수 없기 때문이다. **(0.5점)**

## E부분. 텅스텐의 비열 (3.5점)

전구를 높은 전압으로 충전한 축전기에 연결하여 필라멘트를 끊는 데 든 에너지를 잴 수 있다. 과정 전후에 축전기 전압을 재면 에너지를 계산할 수 있다. **(0.5점)**

정확도를 높이려면 복사된 일률을 되도록 작게 해야 한다. 즉 필라멘트를 되도록 빨리 끊어야 하며, 그러려면 축전기를 가능한 가장 높은 전압으로 충전해야 한다. 가장 높은 전압으로는 15 V를 쓴다. **(0.3점)**




**(0.2점)**

열량의 공식 $Q = (U_1{}^2 - U_2{}^2)C/2$ **(0.1점)**
$U_1 = 15.00\ \mathrm{V}$ **(0.1점)**
$U_2 = 14.27\ \mathrm{V}$ **(0.1점)**

열량 $Q = 0.5$ J **(0.3점)**

전구가 몇 개뿐이므로 (여러 번) 반복 측정할 수 없다.
평균 비열 $c$에 대해, 잰 양과 계산:
앞 부분의 끊어지는 온도 $T$를 쓴다.

$$c = \frac{4\ Q}{\pi d^2 l D (T - 298.15\ \mathrm{K})}$$ **(0.3점)**

$c = 187\ \mathrm{J/(K\ kg)}$ **(0.2점)**
100 J/(K kg)에서 300 J/(K kg)까지의 결과를 인정하며, 확장된 범위 60 J/(K kg)에서 500 J/(K kg)까지의 결과에는 부분 점수를 준다. **(0.1점)**

축전기에서 빠져나간 에너지의 양은 꽤 정확히 안다. **(0.2점)**
실제로 필라멘트 치수 $d$ 때문에 생기는 상대 불확도는 약 15%, 끊어지는 온도 $T$의 측정에서 생기는 상대 불확도는 약 10%이다.

가장 큰 오차원은 필라멘트가 끊어지기 전에 복사로 빠져나간 열 $Q_r$이다. **(0.5점)**
그 값은 다음과 같이 어림할 수 있다. 전구를 축전기에 연결하면 처음 전류가 가장 크지만, 필라멘트가 가열되어 저항이 커지면서 매우 빨리 줄어든다.

즉 시간의 대부분 동안 필라멘트는 뜨겁고 저항이 크다. 축전기의 전압 강하가 작았으므로 방전 시간을 다음과 같이 어림할 수 있다.

$$t \sim \frac{C\Delta U}{I_{\text{last}}} \sim \frac{C\Delta U R_{\text{last}}}{U_2} \sim \frac{C\Delta U U_{\text{last}}}{U_2 I_{\text{last}}} \approx 30\,\text{ms}$$

**(0.3점)**

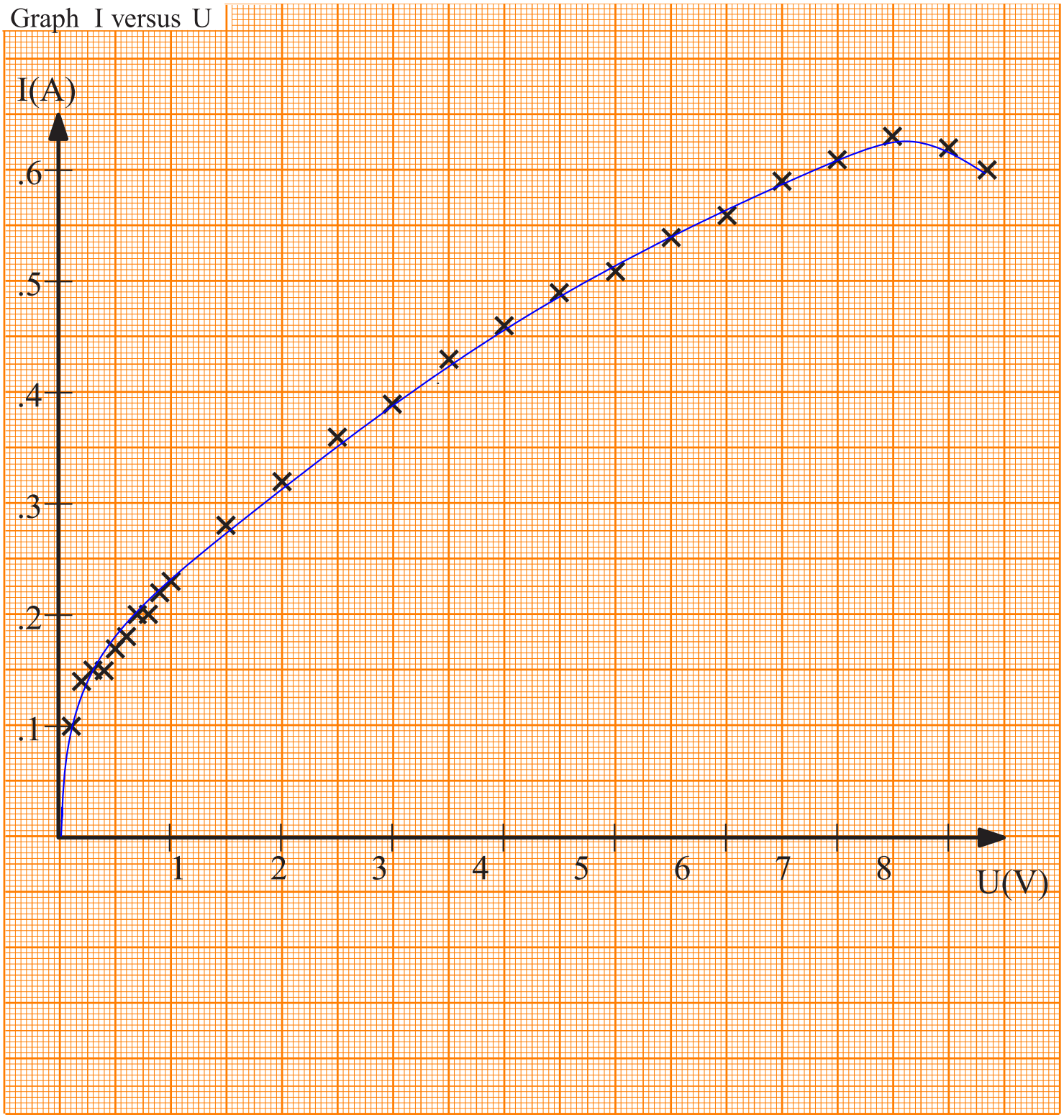
위에 준 것과 조금 다른 합리적인 어림에도 만점을 준다.

그 시간 동안 복사된 에너지는 $Q_r \sim tU_{last}I_{last}$로 어림한다. **(0.3점)**

이는 수치로 $Q_r \approx 0.15$ J을 주며 **(0.1점)**

최종 결과의 30%이다.

Graph I versus U



Graph k versus T

