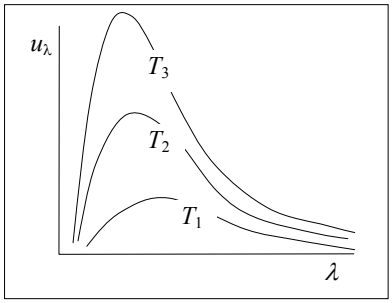
백열전구의 빛으로 구하는 플랑크 상수

1900년 플랑크는 빛이 에너지 hν의 양자 꼴로 물질에서 방출된다는 가설을 내놓았다. 1905년 아인슈타인은 이 생각을 넓혀, 방출된 에너지 양자는 빛의 양자(나중에 광자라는 이름을 얻었다)로서 그대로 남는다고 제안했다. 보통의 빛은 파면마다 엄청나게 많은 광자로 이루어져 있다. 광자들은 덩어리 물질 속 낱낱의 원자처럼 파동 속에 가려 있지만, 플랑크 상수 h가 그 존재를 드러낸다. 이 실험의 목적은 플랑크 상수를 재는 것이다.

물체는 복사를 내보낼 뿐 아니라 바깥에서 오는 복사를 흡수할 수도 있다. 흑체란 모든 파장에서 입사하는 모든 복사를 흡수할 수 있는 물체를 이르는 이름이다. 흑체는 완전한 복사체이다. 전자기 복사에 관해 말하면, 흑체는 모든 것을 흡수하고 아무것도 반사하지 않으며 모든 것을 방출한다. 실제 물체는 완전히 검지 않다. 물체가 방출하는 에너지와 같은 온도의 흑체가 방출할 에너지의 비를 방출률 ε이라 하며, 보통 파장에 따라 다르다.



F-1

플랑크는 절대 온도 T인 물체가 파장 λ의 전자기 복사 꼴로 내보내는 일률 밀도를 다음과 같이 쓸 수 있음을 알아냈다.

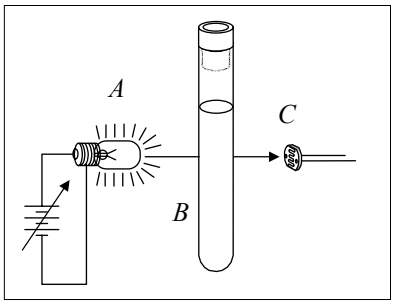
$$u_\lambda = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)} \qquad (1)$$

여기서 c_1과 c_2는 상수이다. 이 문제에서는 h에 비례하는 c_2를 실험으로 구하라고 한다.

작은 λ, 곧 그림 F-1의 극대보다 훨씬 왼쪽의 방출에서는 식 (1)의 분모에서 −1을 빼도 되며, 그러면 식은 다음과 같이 된다

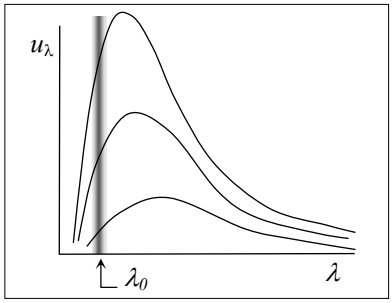
$$u_\lambda = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \qquad (2)$$

이 실험 문제의 기본 요소는 그림 F-2에 그려 놓았다.



F-2

- 방출체는 백열전구 A의 텅스텐 필라멘트로, 넓은 범위의 λ를 방출하며 밝기를 바꿀 수 있다.
- 시험관 B에는 가시광선 스펙트럼에서 λ_0(그림 F-3 참조) 근처의 좁은 띠만 투과시키는 액체 필터가 들어 있다. 필터의 성질에 대해서는 5쪽에서 더 다룬다.
- 끝으로, 투과된 복사는 광저항 C(빛 의존 저항의 머리글자를 따 LDR이라고도 한다)에 떨어진다. LDR의 몇 가지 성질은 6쪽에서 설명한다.



F-3

LDR의 저항 R은 그 조도 E에 달려 있으며, E는 필라멘트의 일률 에너지 밀도에 비례한다

$$\left.\begin{array}{l} E \propto u_{\lambda_0} \\ R \propto E^{-\gamma} \end{array}\right\} \Rightarrow \quad R \propto u_{\lambda_0}^{-\gamma}$$

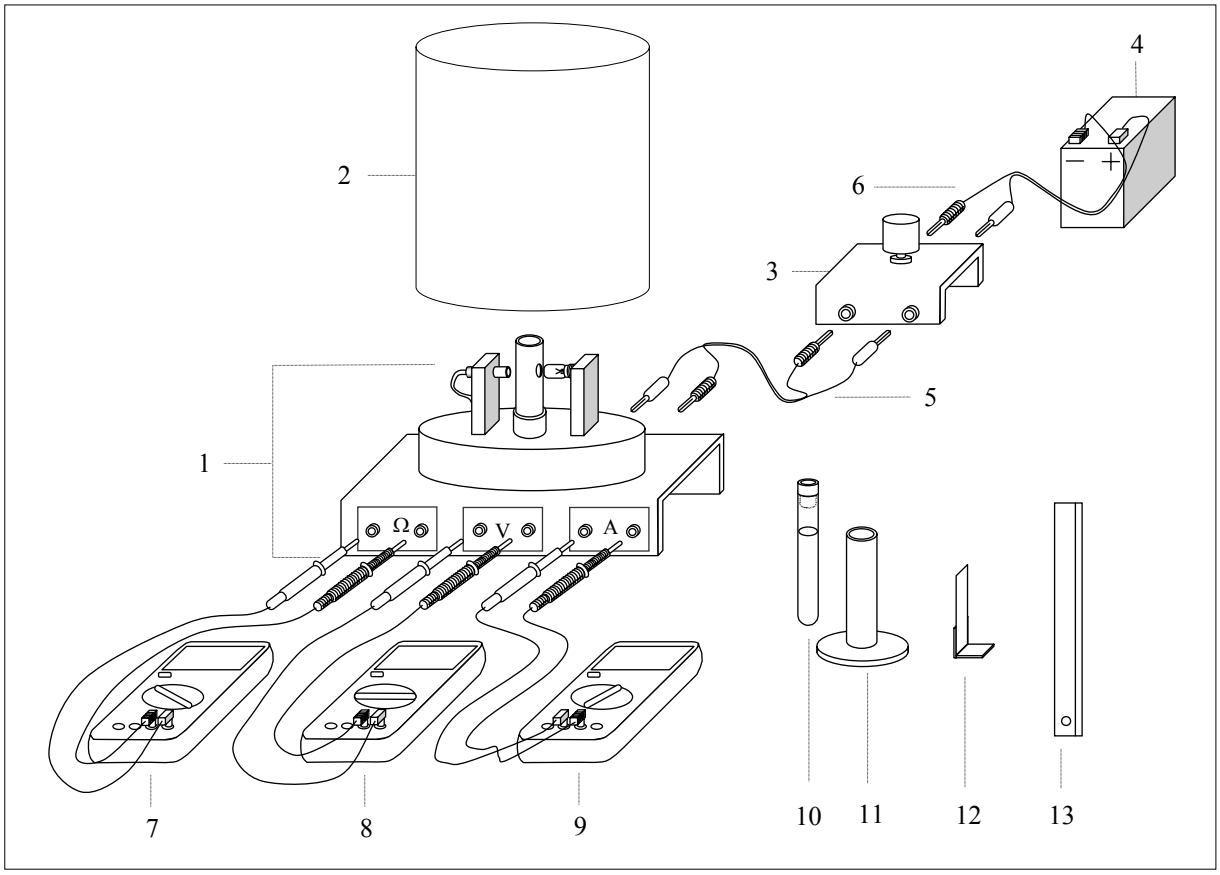
여기서 무차원 매개변수 γ는 실험에서 구할 LDR의 성질이다. 이 장치에서는 마침내 LDR의 저항 R과 필라멘트 온도 T 사이의 관계를 얻는다

$$R = c_3 e^{c_2 \gamma / \lambda_0 T} \qquad (3)$$

이 관계는 6쪽에서 쓴다. 이 관계에서 c_3은 알려지지 않은 비례 상수이다. T의 함수로 R을 재면, 이 실험 문제의 목표인 c_2를 얻을 수 있다.

장치 설명

장치의 부품은 그림 F-4에 있으며, 장치를 꾸미는 몇 가지 안내도 함께 실었다. 지금 모든 부품이 있는지 확인하되, 다음 쪽의 안내를 읽기 전에는 어떤 조작도 하지 마시오.



F-4

장비:

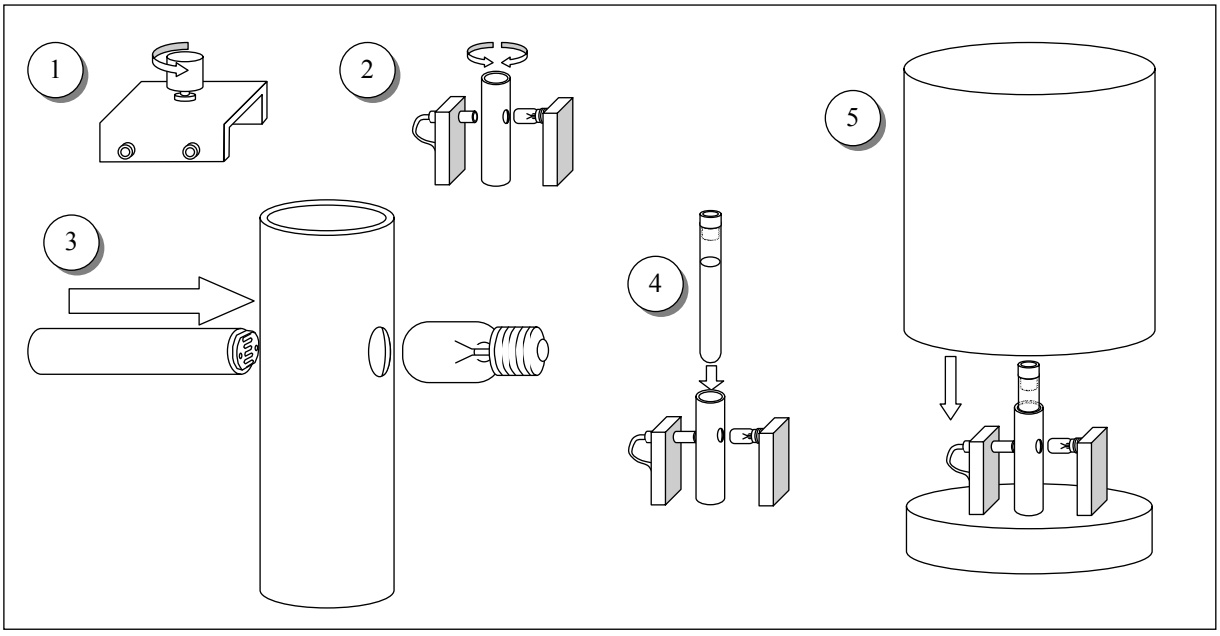
1. 받침대. 위에 원판이 있으며, 원판에는 LDR 받침, 시험관 받침, 그리고 12 V, 0.1 A 전구 받침이 있다.
2. 보호 덮개.
3. 10회전 1 kΩ 전위차계.
4. 12 V 전지.
5. 받침대를 전위차계에 연결하는, 양 끝에 플러그가 달린 빨간 선과 검은 선.
6. 한쪽 끝에 플러그, 다른 쪽 끝에 전지용 소켓이 달린 빨간 선과 검은 선.
7. 저항계로 쓸 멀티미터.
8. 전압계로 쓸 멀티미터.
9. 전류계로 쓸 멀티미터.
10. 액체 필터가 든 시험관.
11. 시험관 받침대.
12. 회색 필터.
13. 자.

멀티미터 사용법과 최소제곱법에 관한 짧은 안내는 따로 나누어 준 쪽에 있다.

장비 꾸미기

다음 안내를 따르시오:

- 그림 F-4에 나타낸 대로 전기 연결을 조심스럽게 하되, 전선 6을 전위차계에 꽂지는 마시오.
- 그림 F-5를 보면서 아래 단계를 따르시오:



F-5

1. 전위차계 손잡이를 끝까지 시계 반대 방향으로 돌리시오.
2. 시험관 받침을 천천히 돌려, 옆구멍 하나는 전구 앞에, 다른 하나는 LDR 앞에 오게 하시오.
3. LDR을 시험관 받침 쪽으로 가까이 가져와 옆구멍에 살짝 닿게 하시오. LDR의 면을 그림 F-5처럼 향하게 하는 것이 좋다.
4. 시험관을 받침에 끼우시오.
5. 바깥 빛을 막도록 받침대에 덮개를 씌우시오. 저항 측정을 시작하기 전에 LDR을 적어도 10분 동안 완전한 어둠 속에 두시오. 어둠 속 저항값에 곧바로 이르지 않으므로 이는 조심하기 위한 단계이다.

과제 1

회로가 모두 연결되었을 때의 완전한 전기 회로를 답안지 1의 상자 안과 상자 사이에 그리시오. 그림을 그릴 때는 그림 F-4의 안내를 고려하시오.

필라멘트 온도 재기

전도성 필라멘트의 전기 저항 R_B는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$R_B = \rho \frac{l}{S} \qquad (4)$$

여기서 ρ는 도체의 비저항, l은 필라멘트의 길이, S는 단면적이다.

이 저항은 다음과 같은 여러 원인으로 온도에 따라 달라진다:

- 금속의 비저항은 온도에 따라 커진다. 300 K에서 3655 K 범위의 텅스텐에 대해서는 SI 단위로 성립하는 다음 경험식으로 나타낼 수 있다.

$$T = 3.05 \cdot 10^8 \rho^{0.83} \qquad (5)$$

- 열팽창은 필라멘트의 길이와 단면을 바꾼다. 그러나 이 실험에서 필라멘트 저항에 대한 그 효과는 무시할 만큼 작다.

  (4)와 (5)에서 팽창을 무시하면 다음을 얻는다

$$T = a R_B^{0.83} \qquad (6)$$

- 따라서 T를 얻으려면 a를 구해야 한다. 이는 실온 T_0에서 필라멘트 저항 $R_{B,0}$을 재서 할 수 있다.

과제 2

a) 멀티미터로 실온 T_0를 재시오.

b) T_0에서 필라멘트 저항 $R_{B,0}$을 재는 데 저항계를 쓰는 것은 좋지 않다. 필라멘트 온도를 높이는 알려지지 않은 작은 전류를 흘리기 때문이다. 대신 $R_{B,0}$을 구하려면 전지를 전위차계에 연결하고, 얻을 수 있는 가장 낮은 전압부터 1 V까지의 전압에서 전류를 충분히 여러 번 읽으시오. (100 mV 아래에서 적어도 15번 읽으면 쓸모 있을 것이다.) 끝나면 전위차계를 처음 위치에 두고 전지와 전위차계 사이의 전선 하나를 떼시오.

V와 I의 각 쌍에 대해 R_B를 구하고, 이 값들을 답안지의 과제 2,b) 표에 옮기시오. 실험으로 얻을 수 있는 가장 낮은 전압을 거기에 적으시오. 세로축에 R_B, 가로축에 I를 두고 그래프를 그리시오.

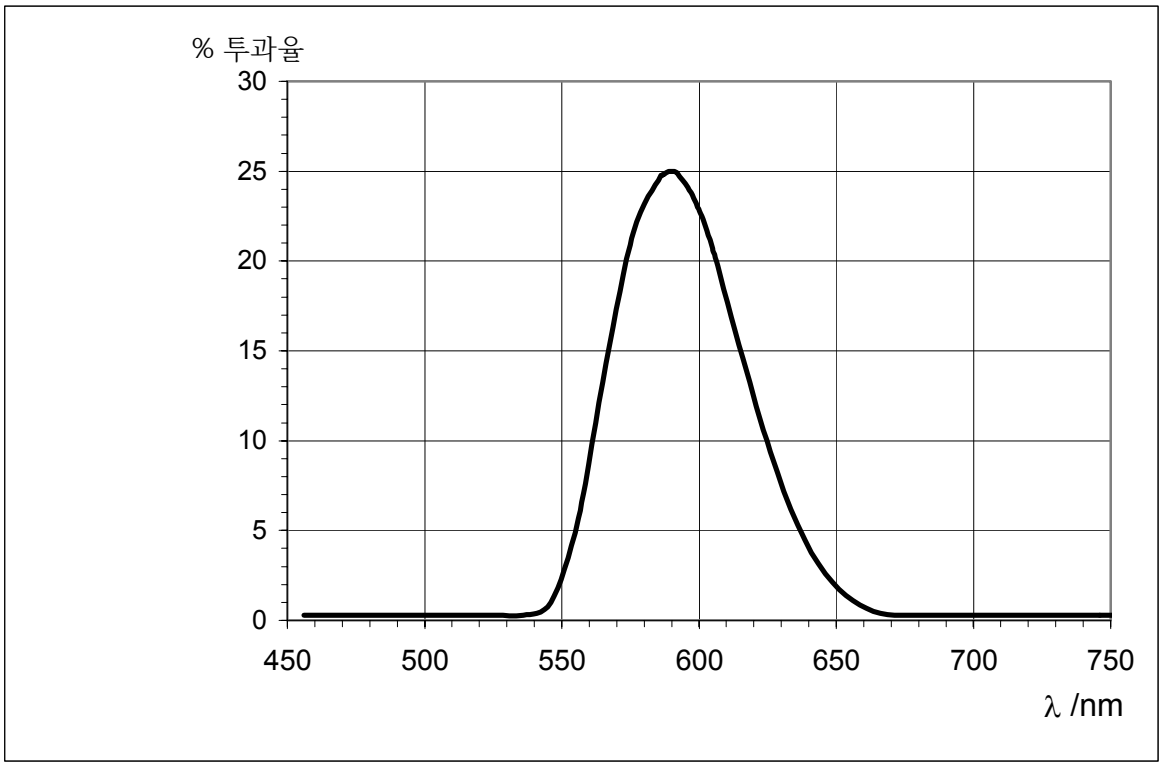
c) b)에서 얻은 그래프를 살펴본 뒤, 원점의 세로 절편 $R_{B,0}$으로 외삽하기에 알맞은 선형 맞춤을 할 값의 범위를 고르시오. 고른 값들을 답안지의 과제 2, c) 표에 적으시오. 끝으로 $R_{B,0}$과 $\triangle R_{B,0}$을 구하시오.

d) (6)을 써서 $R_{B,0}$은 Ω, T_0는 K 단위로 a와 △a의 수치를 계산하시오.

필터의 광학적 성질

시험관 속 액체 필터는 황산구리(II)와 오렌지(II) 아닐린 염료의 수용액이다. 소금은 필라멘트가 내는 적외선 복사를 흡수하려고 넣었다.

필터의 투과율(투과 세기/입사 세기)을 파장에 대해 그림 F-6에 나타냈다.



F-6

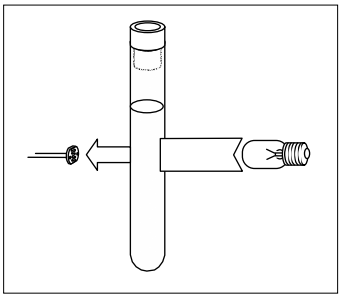
과제 3

그림 F-6에서 λ_0과 $\triangle\lambda$를 구하시오.

주: $2\triangle\lambda$는 절반 높이에서의 전체 폭이고 λ_0는 극대에서의 파장이다.

LDR의 성질

LDR을 이루는 물질은 어둠 속에서 전기가 통하지 않는다. 빛을 비추면 전하 운반자가 일부 활성화되어 전류가 조금 흐를 수 있게 된다. LDR의 저항으로 다음 관계를 쓸 수 있다

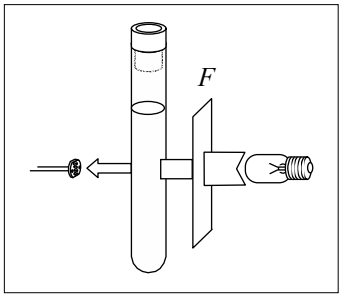


F-7

$$R = bE^{-\gamma} \qquad (7)$$

여기서 b는 LDR의 조성과 기하에 따른 상수이고, γ는 입사 복사가 만드는 조도 E에 따른 저항의 변화를 재는 무차원 매개변수이다. 이론적으로 이상적인 LDR은 γ = 1이지만, 많은 요인이 끼어들어 실제로는 γ < 1이다.

γ를 구해야 한다. 이는 R과 E의 한 쌍을 잰 다음(그림 F-7), 전구와 시험관 사이에 투과율이 51.2 %로 알려져 있고 오차가 없다고 보는 회색 필터 F(그림 F-8)를 넣어서 한다. 그러면 조도 E' = 0.51 E가 된다. 이 조도에 해당하는 저항 R'을 재면 다음을 얻는다



F-8

$$R = bE^{-\gamma} \quad ; \quad R' = b\left(0.512\,E\right)^{-\gamma}$$

이로부터

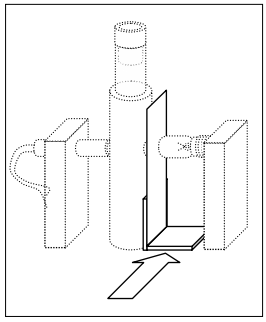
$$\ln\frac{R}{R'} = \gamma \ln 0.512 \qquad (8)$$

아래 과제 4의 b)에 이르기 전까지는 이 절차를 하지 마시오.

과제 4

a) 이 부분을 시작하기 전에 LDR이 적어도 10분 동안 완전한 어둠 속에 있었는지 확인하시오. 전지를 전위차계에 연결하고 손잡이를 아주 천천히 돌려 전구 전압을 높이시오. 9.50 V에서 11.50 V 범위의 V에서 V와 I의 값 쌍을 읽고, 그에 해당하는 LDR 저항 R을 얻으시오. (적어도 12번 읽는 것이 좋다.) 이 값들을 모두 답안지의 표에 옮기시오. LDR 응답의 지연에 대처하려면 다음 절차를 권한다: V > 9.5 V에 이르면 약 10분 기다린 뒤 첫 번째 값을 읽으시오. 그다음 두 번째 값까지 5분 기다리고, 이런 식으로 계속한다. 더 계산하기 전에 다음 단계로 가시오.

b) 저항 R의 가장 낮은 값을 얻으면 보호 덮개를 열고, 그림 F-9처럼 회색 필터를 넣은 뒤 될 수 있는 한 빨리 받침대를 다시 덮고 새 LDR 저항 R'을 기록하시오. 이 데이터를 (8)에 넣어 γ와 Δγ를 계산하시오.



F-9

c) 식 (3)을 고쳐, ln R이 다음에 선형으로 의존하도록 나타내시오: $R_B^{-0.83}$. 그 식을 거기에 적고 (9)라 이름 붙이시오.

d) 이제 a)의 데이터를 써서 식 (9)를 그리는 데 쓸 표를 만드시오.

e) 그래프를 그리고, $c_2 = hc/k$임을 이용해 어떤 방법으로든 h와 Δh를 계산하시오(주최 측이 준 계산기의 통계 기능을 써도 된다).

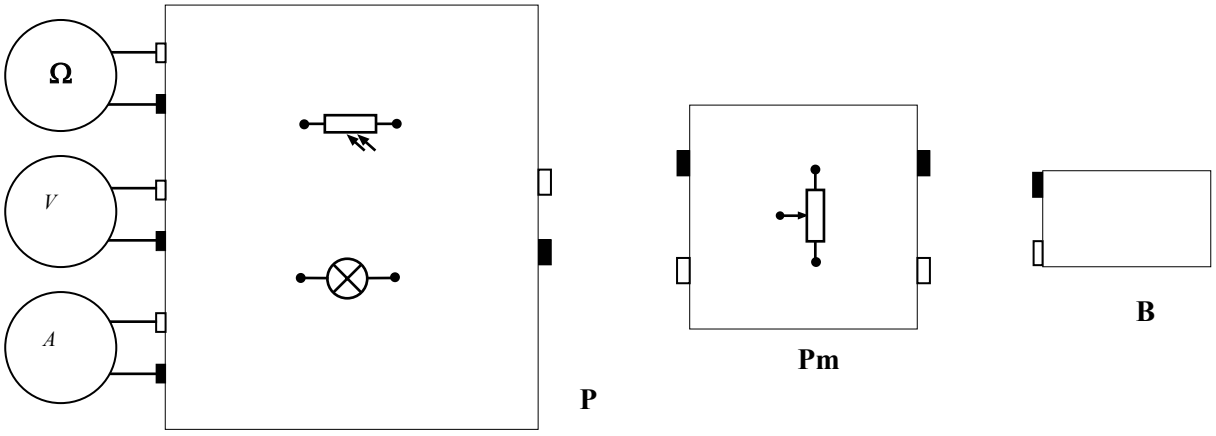
(빛의 속력 $c = 2.998\cdot10^{8}$ m s^{-1}, 볼츠만 상수 $k = 1.381\cdot10^{-23}$ J K^{-1})

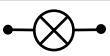
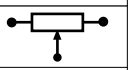
제36회 국제물리올림피아드. 스페인 살라망카. 실험 경연, 2005년 7월 7일

국가 번호	국가 코드	학생 번호	쪽 번호	전체 쪽수

답안지 1

과제 1 (2.0점)
아래 상자 안과 상자 사이의 전기 연결을 그리시오.



광저항	
백열전구	
전위차계	
빨간 소켓	
검은 소켓	

Ω	**저항계**
V	**전압계**
A	**전류계**
P	**받침대**
Pm	**전위차계**
B	**전지**

제36회 국제물리올림피아드. 스페인 살라망카. 실험 경연, 2005년 7월 7일

국가 번호	국가 코드	학생 번호	쪽 번호	전체 쪽수

답안지 2

과제 2

a) (1.0점)

$T_0 =$

b) (2.0점)

V	I	R_B

$V_{min} =$ *

* 이것은 여러분 장치의 특성이다. 이보다 낮출 수 없다.

제36회 국제물리올림피아드. 스페인 살라망카. 실험 경연, 2005년 7월 7일

국가 번호	국가 코드	학생 번호	쪽 번호	전체 쪽수

답안지 3

과제 2

c) (2.5점)

V	I	R_B

R_{B0} =	ΔR_{B0} =

d) (1.0점)

a =	Δa =

과제 3 (1.0점)

λ_0 =	$\Delta\lambda$ =

제36회 국제물리올림피아드. 스페인 살라망카. 실험 경연, 2005년 7월 7일

국가 번호	국가 코드	학생 번호	쪽 번호	전체 쪽수

답안지 4

과제 4

a) (2.0점)

V	I	R

b) (1.5점)

$R =$	$\gamma =$
$R' =$	$\Delta\gamma =$

c) (1.0점)

Eq. (9)

제36회 국제물리올림피아드. 스페인 살라망카. 실험 경연, 2005년 7월 7일

국가 번호	국가 코드	학생 번호	쪽 번호	전체 쪽수

답안지 5

과제 4

d) (3.0점)

V	I		R	

e) (3.0점)

h =	Δh =