시차 온도 측정법

이 문제에서는 시차 온도 측정법을 이용해 다음 두 과제를 해결한다.

1. 결정성 고체 물질의 응고 온도 구하기.
2. 태양 전지의 효율 구하기.

A. 시차 온도 측정법

이 실험에서는 순방향 바이어스를 건 실리콘 다이오드를 온도 센서로 써서 온도를 잰다. 다이오드를 지나는 전류가 일정하면, 다이오드 양단의 전압 강하는 다음 관계에 따라 온도에 의존한다.

$$V(T) = V(T_0) - \alpha\,(T - T_0) \tag{1}$$

여기서 $V(T)$와 $V(T_0)$는 각각 온도 T와 실온 T_0(°C 단위로 잰다)에서 다이오드 양단의 전압 강하이며, 계수는

$$\alpha = (2.00 \pm 0.03)\ \mathrm{mV/^\circ C} \tag{2}$$

이다. $V(T_0)$의 값은 다이오드마다 조금씩 다를 수 있다.

이런 다이오드 두 개를 서로 다른 온도에 두면, 두 다이오드 양단의 전압 강하의 차로부터 온도 차를 잴 수 있다. *시차 전압*이라 부르는 이 전압 강하의 차는 높은 정밀도로 잴 수 있으므로, 온도 차도 높은 정밀도로 잴 수 있다. 이 방법을 *시차 온도 측정법*이라 한다. 이 실험에서 다이오드와 함께 쓰는 전기 회로는 그림 1과 같다. 다이오드 D_1과 D_2는 10 kΩ 저항 R_1과 R_2를 거쳐 9 V 전지로 순방향 바이어스된다. 이 회로는 두 다이오드의 전류를 거의 일정하게 유지한다.

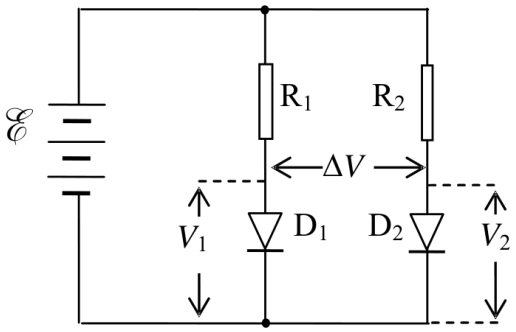


그림 1. 다이오드의 전기 회로

다이오드 D_1의 온도를 T_1, D_2의 온도를 T_2라 하면, (1)에 따라 다음이 성립한다.

$$V_1(T_1) = V_1(T_0) - \alpha\,(T_1 - T_0)$$

그리고

$$V_2(T_2) = V_2(T_0) - \alpha\,(T_2 - T_0)$$

시차 전압은 다음과 같다.

$$\Delta V = V_2(T_2) - V_1(T_1) = V_2(T_0) - V_1(T_0) - \alpha\,(T_2 - T_1) = \Delta V(T_0) - \alpha\,(T_2 - T_1)$$

$$\Delta V = \Delta V(T_0) - \alpha \Delta T \tag{3}$$

여기서 $\Delta T = T_2 - T_1$이다. 시차 전압 ΔV를 재면 온도 차를 구할 수 있다.

다이오드에 바이어스를 걸려고 회로 상자를 쓰며, 그 회로도는 그림 2와 같다.

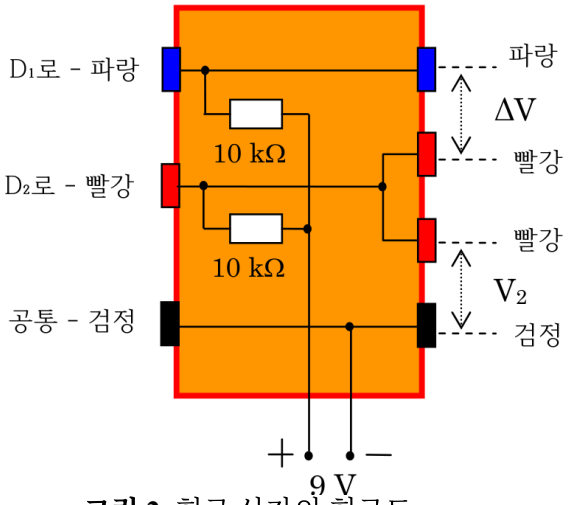


그림 2. 회로 상자의 회로도
(위에서 본 그림)

회로 상자에는 다이오드용 10 kΩ 바이어스 저항 두 개, 9 V 전지로 가는 전선, 다이오드 D_1과 D_2에 연결하는 소켓, 그리고 다이오드 D_2의 전압 강하 V_2와 다이오드 D_1, D_2의 시차 전압 ΔV를 재는 디지털 멀티미터에 연결하는 소켓이 들어 있다.

B. 과제 1: 결정성 물질의 응고 온도 구하기

1. 실험의 목적

결정성 고체 물질을 녹는 상태까지 가열한 다음 식히면, 그 물질은 응고 온도 또는 녹는점이라 부르는 일정한 온도 T_s에서 굳는다. T_s를 구하는 전통적인 방법은 식는 과정에서 시간에 따른 온도 변화를 따라가는 것이다. 응고 과정에는 상전이의 숨은열이 방출되므로, 물질이 굳는 동안에는 온도가 변하지 않는다. 물질의 양이 충분히 많으면 온도가 일정하게 유지되는 시간 간격이 꽤 길어서 이 온도를 쉽게 구할 수 있다. 반대로 물질의 양이 적으면 이 시간 간격이 너무 짧아 관찰하기 어렵고, 따라서 T_s를 구하기 어렵다.

물질의 양이 적은 경우에 T_s를 구하려고 시차 온도 측정법을 쓰며, 그 원리는 다음과 같이 요약할 수 있다. 똑같은 작은 접시 두 개를 쓴다. 하나에는 조사할 물질을 조금 담으며 시료 접시라 부르고, 다른 하나에는 물질을 담지 않으며 기준 접시라 부른다. 두 접시를 온도가 시간에 따라 천천히 변하는 열원 위에 놓는다. 두 접시로 드나드는 열 흐름은 거의 같다. 각 접시에는 온도 센서(순방향 바이어스를 건 실리콘 다이오드)가 들어 있다. 물질에 상변화가 없는 동안에는 시료 접시의 온도 T_{samp}와 기준 접시의 온도 T_{ref}가 거의 같은 빠르기로 변하므로, $\Delta T = T_{\text{ref}} - T_{\text{samp}}$는 T_{samp}에 따라 천천히 변한다. 물질에 상변화가 일어나 상변화가 일어나는 동안 T_{samp}는 변하지 않고 T_s와 같은데 T_{ref}는 계속 변하면, ΔT가 빠르게 변한다. T_{samp}에 대한 ΔT의 그래프에는 급격한 변화가 나타난다. ΔT의 급격한 변화에 해당하는 T_{samp}의 값이 바로 T_s이다.

이 실험의 목적은 전통적인 방법과 시차 열분석 방법으로, T_s가 50 °C에서 70 °C 사이인 순수한

결정성 물질의 응고 온도 T_s를 구하는 것이다. 실험에 쓰는 물질의 양은 약 20 mg이다.

2. 장치와 재료

1. 열원은 20 W 할로겐램프이다.

2. 접시 받침은 네모난 구멍이 뚫린 베이클라이트 판이다. 구멍에는 강철판이 고정되어 있다. 강철판 위에 작은 자석 두 개가 놓여 있다.

3. 실리콘 다이오드가 하나씩 납땜된 작은 강철 접시 두 개. 한 접시는 기준 접시로, 다른 접시는 시료 접시로 쓴다.

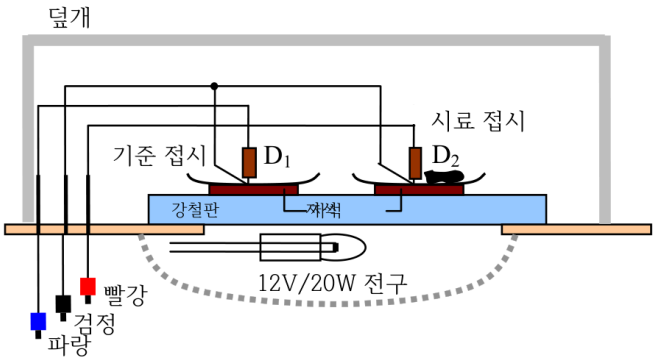


그림 3. 응고 온도 측정 장치

각 접시는 자석 위에 놓는다. 자기력이 접시, 자석, 강철판 사이의 접촉을 유지한다. 자석은 강철판과 접시 사이의 열 접촉도 적당히 유지해 준다.

바깥의 영향으로부터 접시들을 보호하려고 회색 플라스틱 상자를 덮개로 쓴다.

그림 3은 접시 받침 위의 접시와 자석, 그리고 전구의 배치를 보여 준다.

4. 디지털 멀티미터 두 개를 전압계로 쓴다. 기능 선택기를 '°C/°F' 기능으로 돌리면 실온도 잴 수 있다. 멀티미터의 전압 기능은 마지막 자리에 ±2의 오차가 있다.

주: 멀티미터(그림 9 참조)가 "자동 전원

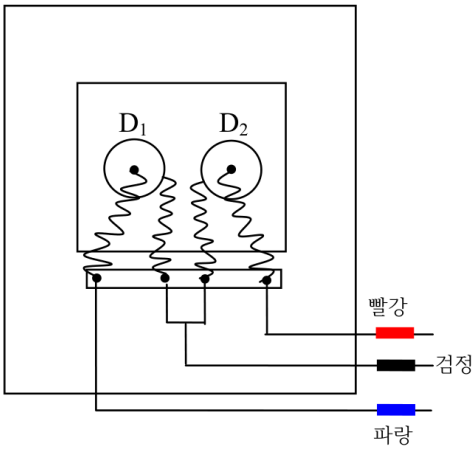


그림 4. 접시 받침 위의 접시들 (위에서 본 그림)

꺼짐” 기능으로 들어가지 않게 하려면, SELECT 단추를 누른 채로 기능 선택기를 OFF 위치에서 원하는 기능으로 돌리시오.

5. 그림 2와 같은 회로 상자.
6. 9 V 전지.
7. 전선.
8. 측정할 물질 약 20 mg이 든 작은 앰풀.
9. 스톱워치
10. 계산기
11. 모눈종이.

3. 실험

1. 자석을 강철판 위의 대등한 두 위치에 놓는다. 그림 4처럼 기준 접시와 빈 시료 접시를 자석 위에 놓는다. 왼쪽 접시를 기준 접시로 쓰며 다이오드 D_1이 붙어 있고(D_1을 기준 다이오드라 한다), 오른쪽 접시를 시료 접시로 쓰며 다이오드 D_2가 붙어 있다(D_2를 측정 다이오드라 한다).

그림 5처럼 램프 갓을 뒤집어 놓으시오. 램프를 켜지 마시오. 접시 받침을 램프 위에 놓으시오. 다이오드 D_2의 전압 강하, 곧 $V_{\text{samp}} = V_2$와 시차 전압 ΔV를 잴 수 있도록 장치를 연결하시오.

기기와 장치의 예열 기간 때문에 생기는 오차를 없애려면, 실제 실험을 시작하기 약 5분 전에 측정 회로 전체를 켜 둘 것을 강력히 권한다.

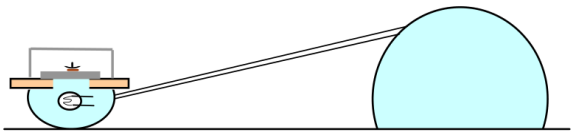


그림 5.
할로겐램프를 열원으로 쓰기

1.1. 실온 T_0와, 실온 T_0에서 시료 접시에 붙은 다이오드 D_2 양단의 전압 강하 $V_{\text{samp}}(T_0)$를 재시오.

1.2. 온도 50 °C, 70 °C, 80 °C에서 측정 다이오드의 전압 강하 $V_{\text{samp}}(50^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(70^\circ\text{C})$, $V_{\text{samp}}(80^\circ\text{C})$를 각각 계산하시오.

2. 두 접시가 모두 빈 채로 램프를 켜시오. V_{samp}를 지켜보시오. 시료 접시의 온도가 $T_{\text{samp}} \sim 80$ °C에 이르면 램프를 끄시오.

2.1. $T_{\text{samp}} \sim 70$ °C가 될 때까지 기다린 다음, 강철판이 식는 동안 시간에 따른 V_{samp}와 ΔV의 변화를 따라가시오. 답안지에 주어진 표에 10 s~20 s마다 V_{samp}와 ΔV의 값을 적으시오. ΔV가 빠르게 변하면 연속한 측정 사이의 시간 간격을 더 짧게 해도 된다. 시료 접시의 온도가 $T_{\text{samp}} \sim 50$ °C로 내려가면 측정을 멈춘다.

2.2. 주어진 모눈종이에 t에 대한 V_{samp}의 그래프를 그리고 그래프 1이라 하시오.

2.3. 주어진 모눈종이에 V_{samp}에 대한 ΔV의 그래프를 그리고 그래프 2라 하시오.

주: 2.2와 2.3에서 각 그래프의 올바른 이름을 적는 것을 잊지 마시오.

3. 앰풀의 물질을 시료 접시에 부으시오. 2절에서 말한 것과 똑같이 실험을 되풀이하시오.

3.1. 답안지에 주어진 표에 시간 t에 따른 V_{samp}와 ΔV의 데이터를 적으시오.

3.2. 주어진 모눈종이에 t에 대한 V_{samp}의 그래프를 그리고 그래프 3이라 하시오.

3.3. 주어진 모눈종이에 V_{samp}에 대한 ΔV의 그래프를 그리고 그래프 4라 하시오.

주: 3.2와 3.3에서 각 그래프의 올바른 이름을 적는 것을 잊지 마시오.

4. 2절과 3절의 그래프를 비교하여 물질의 응고 온도를 구하시오.

4.1. 전통적인 방법으로 T_s 구하기: 3절과 2절의 t에 대한 V_{samp}의 그래프, 곧 그래프 3과 그래프 1을 비교하여, 그래프 3에서 물질이 굳는 점을 표시하고 (이 점에 해당하는) V_{samp}의 값 V_s를 구하시오.

물질의 응고 온도 T_s를 구하고 그 오차를 어림하시오.

4.2. 시차 온도 측정법으로 T_s 구하기: 3절과 2절의 V_{samp}에 대한 ΔV의 그래프, 곧 그래프 4와 그래프 2를 비교하여, 그래프 4에서 물질이 굳는 점을 표시하고 V_{samp}의 값 V_s를 구하시오.

물질의 응고 온도 T_s를 구하시오.

4.3. 측정 데이터와 기기의 오차로부터, 시차 온도 측정법으로 얻은 T_s의 오차를 계산하시오. 오차 계산 과정을 적고, 끝으로 답안지에 T_s의 값을 그 오차와 함께 적으시오.

C. 과제 2: 백열램프 조명 아래에서 태양 전지의 효율 구하기

1. 실험의 목적

이 실험의 목적은 백열램프 조명 아래에서 태양 전지의 *효율*을 구하는 것이다. 효율은 전지가 받는 전체 복사 일률에 대한, 태양 전지가 외부 회로에 공급할 수 있는 전기 일률의 비로 정의한다. 효율은 입사 복사의 스펙트럼에 달려 있다. 이 실험에서 전지에 입사하는 복사는 백열 할로겐램프의 복사이다.

태양 전지의 효율을 구하려면, 램프 아래 연직 방향으로 램프에서 거리 d인 점의 *복사 조도* E와, 전지를 이 점에 놓았을 때 태양 전지의 *최대 일률* $P_{\max}$를 재야 한다. 이 실험에서 $d = 12$ cm 이다(그림 6). 복사 조도 E는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E = \Phi / S$$

여기서 Φ는 복사 선속(복사 일률)이고, S는 빛을 받는 면의 넓이이다.

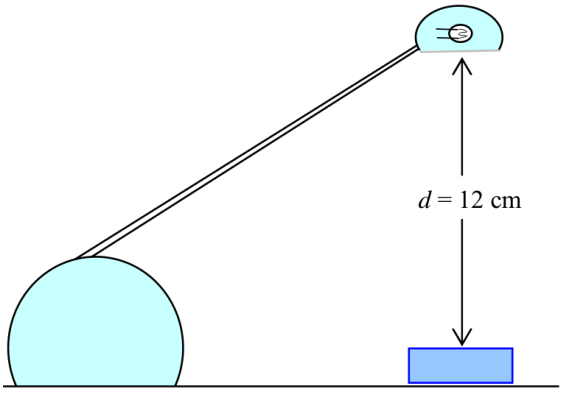


그림 6.
할로겐램프를 광원으로 쓰기

2. 장치와 재료

1. 광원은 20 W 할로겐램프이다.

2. 복사 검출기는 구리로 만든 속이 빈 원뿔이며, 그 안쪽 면은 그을음으로 검게 칠해져 있다 (그림 7). 원뿔은 주위와 열적으로 완전히 차단되어 있지는 않다. 이 실험에서 검출기는 이상적인 흑체로 본다. 온도를 재는 데에는 실리콘 다이오드를 쓴다. 측정 다이오드는 복사 검출기에 붙어 있어(그림 1과 그림 7의 D_2) 그 온도가 원뿔의 온도와 같다. 기준 다이오드는 검출기를 담은 상자의 벽 안쪽에 놓여 있어 그 온도가 주위의 온도와 같다. 검출기(원뿔과 측정 다이오드)의 전체 열용량은 $C = (0.69 \pm 0.02)$ J/K이다. 검출기는 매우 얇은 폴리에틸렌 막으로 덮여 있으며, 이 막의 복사 흡수와 반사는 무시할 수 있다.

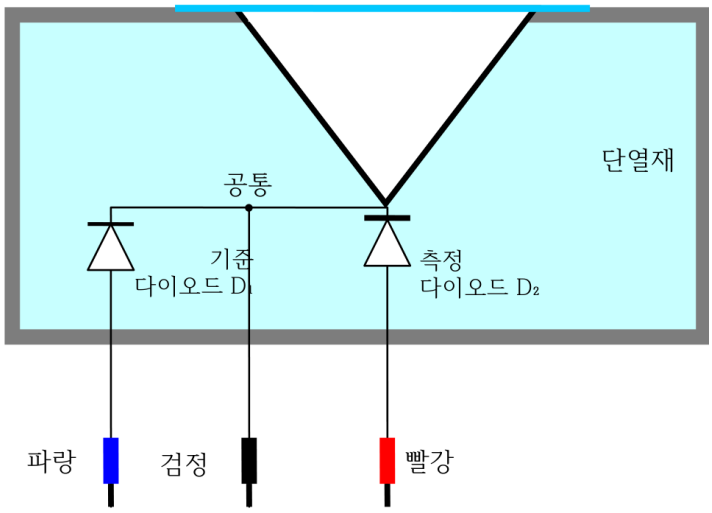


그림 7. 복사 검출기의 구조

3. 그림 2와 같은 회로 상자.

4. 플라스틱 상자에 고정된 태양 전지 조각(그림 8). 전지의 넓이에는 금속 연결 띠가 몇 개 포함되어 있다. 효율을 계산할 때 이 띠들은 전지의 일부로 본다.

5. 디지털 멀티미터 두 개. 전압을 잴 때는 내부 저항이 매우 커서 무한히 크다고 볼 수 있다. 전류를 잴 때는 내부 저항을 무시할 수 없다. 멀티미터의 전압 기능은 마지막 자리에 ±2의 오차가 있다.

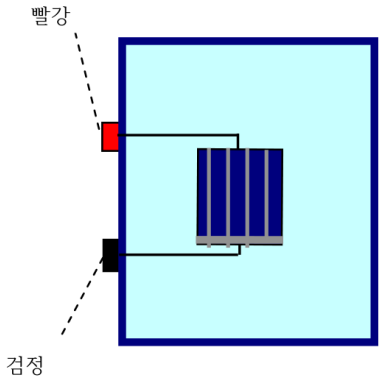


그림 8.
태양 전지

멀티미터로 실온도 잴 수 있다.

주: 멀티미터(그림 9 참조)가 “자동 전원 꺼짐” 기능으로 들어가지 않게 하려면, SELECT 단추를 누른 채로 기능 선택기를 OFF 위치에서 원하는 기능으로 돌리시오.

6. 9 V 전지
7. 가변 저항.
8. 스톱워치
9. 1 mm 눈금 자
10. 전선.
11. 모눈종이.

3. 실험

검출기는 복사로부터 에너지를 받으면 데워진다. 동시에 검출기는 열전도, 대류, 복사 등 여러 메커니즘으로 열을 잃는다. 따라서 시간 간격 dt 동안 검출기가 받은 복사 에너지는 검출기의 온도를 올리는 데 필요한 에너지와 검출기에서 주위로 옮겨 간 에너지의 합과 같다.

$$\Phi\, dt = C\, dT + dQ$$

여기서 C는 검출기와 다이오드의 열용량, dT는 온도 증가, dQ는 열 손실이다.

검출기와 주위의 온도 차 $\Delta T = T - T_0$가 작으면, 시간 간격 dt 동안 검출기에서 주위로 옮겨 가는 열 dQ는 ΔT와 dt에 거의 비례한다고 볼 수 있다. 곧 $dQ = k\Delta T\, dt$이며, k는 W/K의 차원을 갖는 계수이다. 따라서 k가 일정하고 ΔT가 작다고 가정하면 다음을 얻는다.

$$\Phi\, dt = C\, dT + k\Delta T\, dt = C\, d(\Delta T) + k\Delta T\, dt$$

또는 $$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C}\Delta T = \frac{\Phi}{C} \tag{4}$$

이 미분 방정식의 해는, 검출기가 일정한 조도의 빛을 받기 시작한 순간부터 시간 t에 따른 온도 차 ΔT의 변화를 정한다. $t = 0$에서 $\Delta T = 0$이라고 가정하면

$$\Delta T(t) = \frac{\Phi}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{C}t}\right) \tag{5}$$

복사를 끄면 위의 미분 방정식은 다음이 된다.

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{k}{C}\Delta T = 0 \tag{6}$$

그러면 온도 차 ΔT는 시간에 따라 다음 식처럼 변한다.

$$\Delta T(t) = \Delta T(0)\, e^{-\frac{k}{C}t} \tag{7}$$

여기서 $\Delta T(0)$는 $t = 0$(측정을 시작한 순간)에서의 온도 차이다.

1. 실온 T_0를 구하시오.

2. 다이오드 센서, 회로 상자, 멀티미터로 이루어진 전기 회로를 꾸며 검출기의 온도를 재시오.

기기와 장치의 예열 기간 때문에 생기는 오차를 없애려면, 실제 실험을 시작하기 약 5분 전에 측정 회로 전체를 켜 둘 것을 강력히 권한다.

2.1. 검출기를 광원 아래, 램프에서 $d = 12$ cm 떨어진 곳에 놓으시오. 램프는 꺼져 있다. 약 2분 동안 10 s 간격으로 ΔV의 변화를 따라가며 식 (3)의 $\Delta V(T_0)$의 값을 구하시오.

2.2. 램프를 켜 검출기를 비추시오. ΔV의 변화를 따라가시오. 10~15 s마다 답안지에 주어진 표에 ΔV의 값을 적으시오. (주: 표의 x와 y 열은 나중에 4절에서 쓴다.) 2분 뒤에 램프를 끄시오.

2.3. 검출기를 램프에서 치우시오. 그 뒤 약 2분 동안 ΔV의 변화를 따라가시오. 10~15 s마다 답안지에 주어진 표에 ΔV의 값을 적으시오. (주: 표의 x와 y 열은 나중에 3절에서 쓴다.)

힌트: 검출기에는 열관성이 있으므로, 검출기가 빛을 받기 시작한 순간이나 빛이 끊긴 순간 직후에 얻은 데이터 일부는 쓰지 않는 것이 좋다.

3. 램프를 끈 뒤에 식 (7)이 성립함을 보이도록, 변수 x와 y를 알맞게 골라 x-y 좌표계에 그래프를 그리시오.

3.1. 변수 x와 y의 식을 적으시오.

3.2. x에 대한 y의 그래프를 그리고 그래프 5라 하시오.

3.3. 그래프에서 k의 값을 구하시오.

4. 검출기에 빛을 비출 때 식 (5)가 성립함을 보이도록, 변수 x와 y를 알맞게 골라 x-y 좌표계에 그래프를 그리시오.

4.1. 변수 x와 y의 식을 적으시오.

4.2. x에 대한 y의 그래프를 그리고 그래프 6이라 하시오.

4.3. 검출기 입구에서의 복사 조도 E를 구하시오.

5. 복사 검출기가 있던 바로 그 자리에 태양 전지를 놓으시오. 멀티미터와, 전지의 부하를 바꾸는 데 쓰는 가변 저항으로 이루어진 알맞은 전기 회로에 태양 전지를 연결하시오. 저항값을 여러 가지로 바꾸며 회로의 전류와 전지 양단의 전압을 재시오.

5.1. 이 실험에 쓴 회로도를 그리시오.

5.2. 가변 저항의 손잡이를 돌리면 부하의 값이 바뀐다. 손잡이의 각 위치에서 전류 I와 전압 V의 값을 적으시오.

5.3. 전지가 부하에 공급하는 일률을 전지를 지나는 전류의 함수로 그리시오. 이것이 그래프 7이다.

5.4. 그래프에서 전지의 최대 일률 $P_{\max}$를 구하고 그 오차를 어림하시오.

5.5. 얻은 최대 일률에 해당하는 전지의 효율의 식을 적으시오. 그 값과 오차를 계산하시오.

실험 키트의 구성(그림 10도 보라)

1	할로겐램프 220 V/ 20 W	9	스톱워치
2	접시 받침	10	계산기
3	접시	11	복사 검출기
4	멀티미터	12	태양 전지
5	회로 상자	13	가변 저항
6	9 V 전지	14	자
7	전선	15	덮개로 쓰는 상자
8	측정할 물질이 든 앰풀		

주: 멀티미터(그림 9 참조)가 “자동 전원 꺼짐” 기능으로 들어가지 않게 하려면, SELECT 단추를 누른 채로 기능 선택기를 OFF 위치에서 원하는 기능으로 돌리시오.

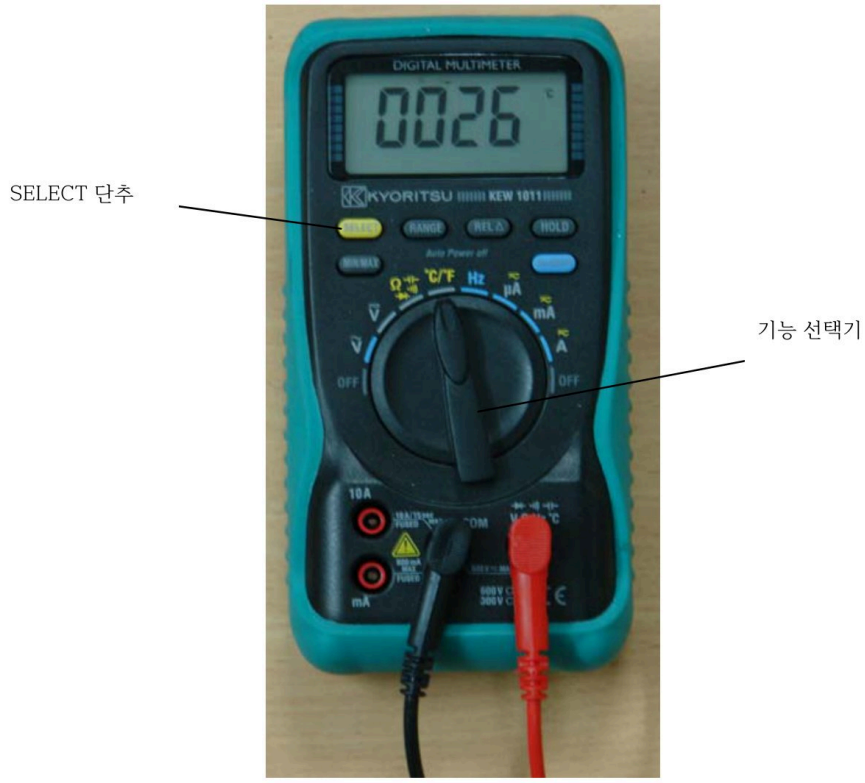


그림 9. 디지털 멀티미터

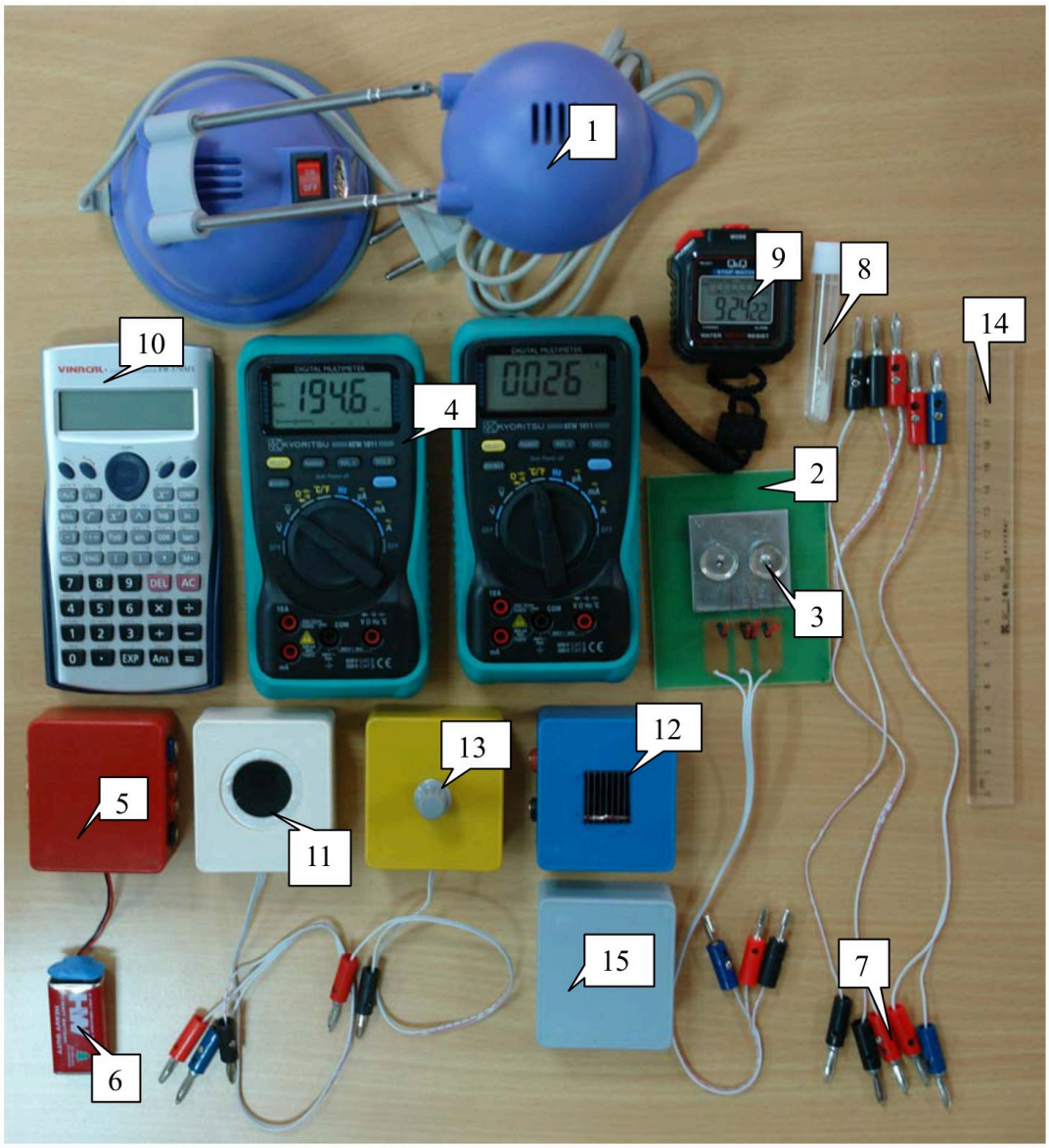


그림 10. 실험 키트의 구성