



Physics Laboratory

Last modified : 2015-08-31

물리학 실험 1 - 8. 에너지의 모습

(열 - 역학적 에너지의 보존)

실험 목적

계의 에너지는 역학적 방법 이외에 열(heat)의 전달에 의해서도 변화될 수 있다. 즉, 열은 에너지를 전달하는 한 수단이다. 외부와의 열의 전달이 가능한 계에서 열에 의한 계의 (내부)에너지(internal energy)의 변화와 역학적 방법 즉, 일에 의한 (내부)에너지의 변화는 방법은 다르지만 같은 결과를 준다. 이는 댐의 물이 입구를 통해 흘러들어 오거나 출구를 통해 흘러 나가는 방법으로 변화되지만, 직접 빗물에 의해서 또는 증발에 의해서도 변화되는 것과 같은 이치이다. 일단, 댐으로 들어온 물은 어떤 방법으로 유입되었는지 구별되지 않는다.

열과 일은 같은 물리량(에너지)을 나타내면서도 전통적으로 서로 다른 단위를 사용하여 왔기 때문에, 이를 정량적으로 비교하기 위해서 바꿈 인수(conversion factor)가 필요하다. 이를 열의 일 해당량(mechanical equivalent of heat)이라고 부르며 [제임스 줄\(James P. Joule\)](#)에 의해 처음으로 측정된 바와 같이, 1 칼로리(calorie)의 열이 약 4.2 줄(joule) [더 정확하게는 4.1860 J]의 일과 같다.

열과 일에 의해서 계의 내부에너지가 변화될 수 있는 경우에는 계의 역학적 에너지는 보존되지 않을 수도 있다. 즉, 계의 역학적 에너지가 열의 형태로 바뀌어 방출될 수 있으며, 열의 유입이 계로 하여금 일을 하게 할 수도 있다. 또, 내부적으로도 열과 역학적 에너지의 교환이 일어날 수가 있다. 그러나 이러한 경우에도 외부로부터 고립되어 있는 계의 열과 역학적 에너지의

총량은 변화되지 않는다. 이를 열과 역학적 에너지의 보존(총 에너지의 보존)이라고 부르며, 역학적 에너지 보존 법칙은 열과 역학적 에너지의 보존에서 열에 의한 에너지의 변화가 없는 특별한 경우에 성립하는 것이라고 할 수 있다.

이 실험에서는 열에 의한 계의 내부에너지의 변화를 측정하여, 내부에너지를 변화시키는 방법에 대해 이해하고 열의 일 해당량과 물체의 비열(specific heat)을 구해 본다.



– Halliday & Resnick 일반물리학 책에서

사진 속의 얼음을 녹이기 위해서는 같은 얼음을 지상으로부터 34km 의 높이로 쏘아 올리는데 드는 만큼의 에너지가 필요하며, 또한 얼음을 시속 2942km 의 속력으로 가속시키는데 필요한 일을 해 주어야만 한다!

실험 개요

- 열과 (내부)에너지의 실체를 이해한다.
- 열량계를 사용하여 열의 유입에 따른 내부에너지의 변화를 측정한다.
- 이 측정에서 열량계의 열 용량과 물체(추)의 비열을 구해 본다.

실험 방법

➤ 실험 준비물

열량계 1개, 디지털 온도계 1개, 직류 전원 장치 1대, 열량계 장치(단열 실린더, stirring bar, coil heater) 1대, 연결 전선 2가닥

➤ 실험 과정 및 유의 사항

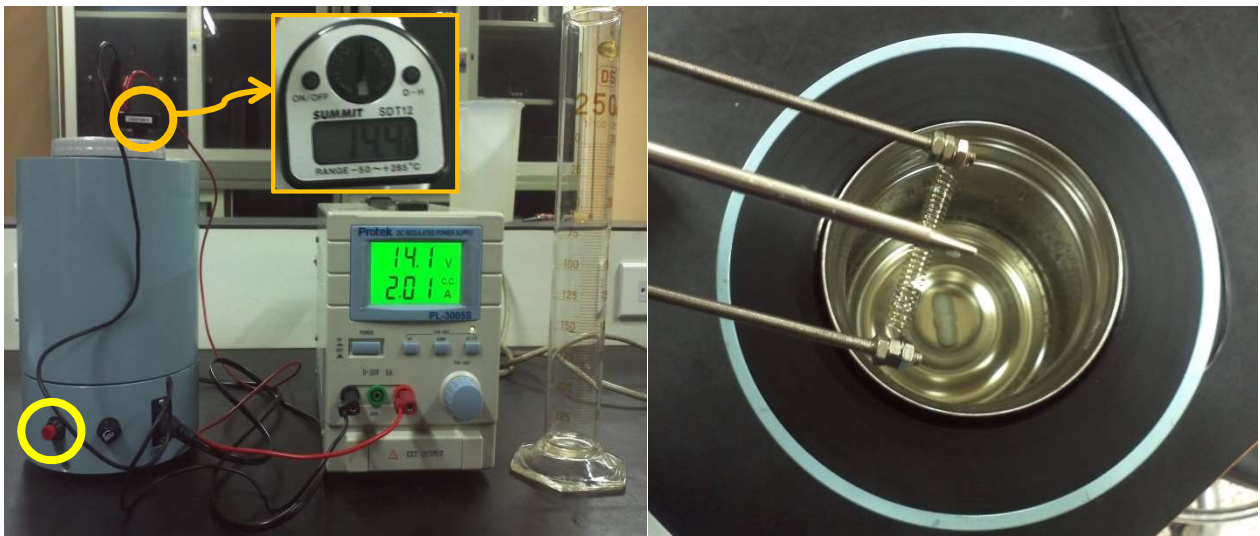


그림 1. 전반적인 실험 장비와 열량계 실험 장치의 내부 구조

1. 열량계와 직류전원 장치를 그림 1에 보이는 바와 같이 준비한다. 그리고 열량계의 뚜껑을 돌려 열고, 메스실린더를 이용하여 1차 실험을 위해 500 mL의 물을 분는다. 그리고 뚜껑을 잘 닫고 열이 세어 들어가거나 나가지 않게 한다.
2. 그런 후 디지털 온도계(주황색 가드라인 관련)의 ‘ON’ 버튼을 눌러 온도계가 잘 작동하는지 확인한다.
3. 이때 노란색 동그라미에 표시된 빨간색 버튼을 누르면 안에 들어간 stirring bar가 돌아가 물을 골고루 섞어 준다. 그렇게 10 초간 물을 잘 섞어 준 후 실험을 시작한다. 중간 중간 물이 잘 섞이게 하기 위해 눌러 주어야 함을 잊으면 안 된다. 자주 골고루 섞어 줄수록 좋다. 그러나 계속 누르고 있으면 버튼의 고장이 우려되니 중간 중간 10초간 눌러준다.

참고) 실험이 끝나고 여분의 실험으로 해볼만한 내용: 물의 회전만으로 물의 온도가 변화 하는 지 한번 체크해봐도 좋다. 실제로 이는 매우 관찰이 어렵다고 볼 수 있다. 즉, 역학적 일로 내

부에너지를 변화하기에는 너무 작다는 사실을 확인해 볼 수 있다. (-> ref: 11.8 ° C ~> 12.1 ° C for 15 min; 0.3 ° C 변화 그러나 이것이 순전히 starring bar의 역학적 일로 이루어진 결과 인지는 의심해보아야 한다.)

4. 다음으로는 열을 직접전달하기 위해 직류전원 장치에서 전류를 인가한다. 전류를 인가하기 위해 아래와 같은 추가적 과정을 시행한다.

- ① 일단 연결해 놓은 연결선을 분리하고, 전원 장치의 파워를 'ON' 한다.
- ② 전압 조절 손잡이와 전류 조절 손잡이를 이용하여 0 V, 0 A 로 패널의 전류, 전압을 조절 한다.
- ③ (그림 2를 참조하여) 전압 손잡이를 돌려 전압을 1 V 정도의 위치에 놓고, (+, -) 단자를 short 시킨다. 그리고 CC/CV 버튼을 눌러 CC(정전류) 상태에 불이 들어 오도록 한다. 그리고 나서 전류 조절 버튼을 이용하여 전류를 변화 시킨다. 그렇게 변화 시킨 전류 값이 최대 허용 전류가 된다.

[주의: 단자를 short 시키거나 단자를 연결할 때 감전이나 스파크가 발생하지 않도록 주의한다.]

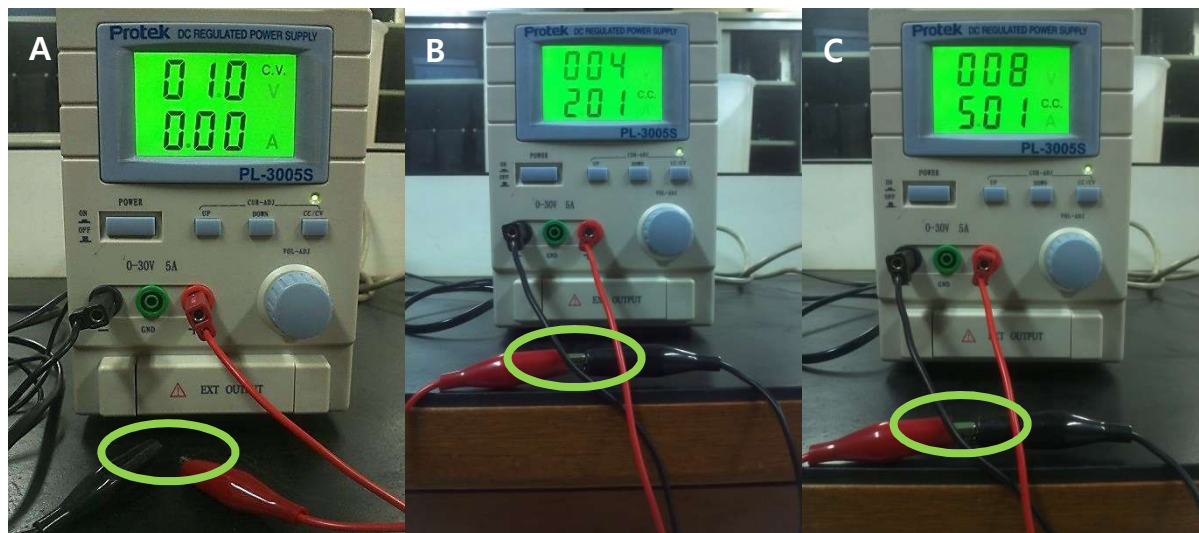


그림 2. 단락(short)을 통한 2가지 CC 최대값 설정 모습

- ④ 전류 조절 버튼(up 또는 down)을 눌러 전류를 2 A 정도로 맞춘다. 그렇게 변화 시킨 전류 값이 최대 허용 전류가 된다.

[주의1: 전류에 변화하지 않는다면 전선이 제대로 연결되어 있는지 확인한다. 연결이 되지 않거나 저항이 너무 커서 출력 전압이 30V를 넘으면 원하는 전류가 나오지 않게 된다.]

[주의2: 이후 실험에서 온도가 잘 올라가지 않으면 전류를 3A 정도로 올려본다. 새로운 전원 장치는 최대 5A까지 출력이 가능하다.]

⑤ 그림 3. 과 같이 설정된 상태에서 일정한 시간 마다 (10~20초 정도) 온도를 측정하여 기록한다. 그리고 출력되는 전류와 전압을 시간간격을 두고 기록해 둔다. 측정하는 동안 계속해서 빨간 버튼을 눌러 물을 저어 준다.

[참고: 온도의 변화가 클 때는 작은 시간 간격으로, 변화가 적을 때는 시간간격을 길게 하는 것도 좋다]

[주의: 온도가 올라가면서 가열 선의 전기저항이 변하면 일정한 전류를 흘리기 위해 가해지는 전압이 변할 수 있다. 따라서 시간에 따른 전압의 변화를 기록해 둔다.]

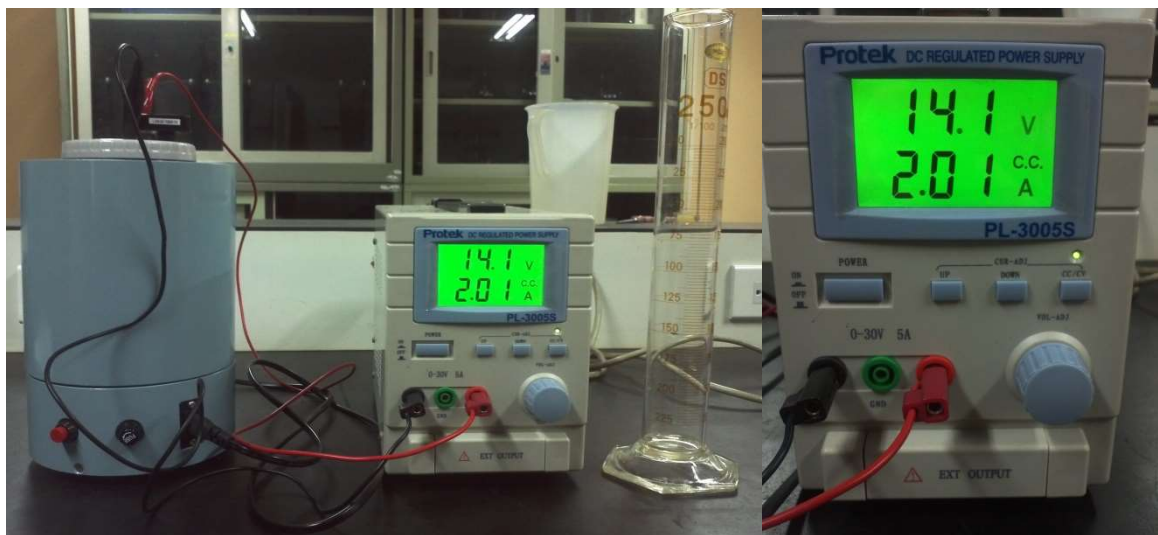


그림 3. 일정한 전류에 따른 온도 변화 실험 장비의 setting 상태

5. 이 측정을 5 분 가량 또는 물의 온도가 처음보다 5° C 이상 올라갈 때까지 계속한다. 보통 14 V, 2 A = 28 W 정도에서 500 mL의 물의 온도 변화가 5 ° C 정도 이다.

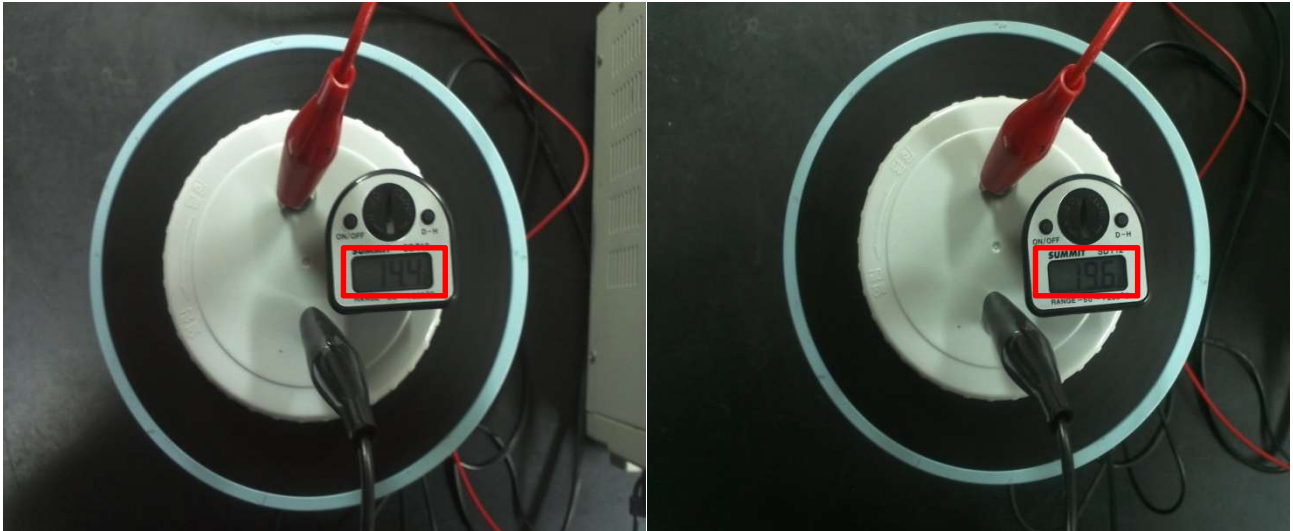


그림 4. 28 W 에서 5 분 동안 변화한 물의 온도

6. 실험 노트에 기록한 시간에 따른 온도의 변화 값은 엑셀과 같은 데이터 처리 프로그램 등을 이용하여 그래프로 그려 데이터를 해석하면 훨씬 직관적이고, 편리하게 이해 할 수 있다. 이번 실험이 이론적인 선형성에 얼마나 가까운지 확인해보면 좋다.

7. 2가지 이상 다른 양 (예를 들면 550 mL, 600 mL)의 물을 사용하여 ‘4.’에서의 측정을 반복함으로써, 열량계 자체의 열용량과 열이 한 일의 양을 구한다. 매번 새로 물을 받아서 사용하고, 물의 온도가 5°C 이상 올라갈 때까지 물의 양에 따라 측정 시간을 적절히 늘린다.

주의) 열량계의 열용량은 [비열 측정 방법](#)으로도 구할 수 있다.

8. 마지막 측정을 마친 후 전원 장치를 끄고 시간에 따라 열량계의 물의 온도가 떨어지는 것을 1°C 이상 내려갈 때까지 측정하여 열량계의 열 손실율을 구한다.

참고) 본 실험 기구의 경우 상당히 보온이 잘되는 편이라 상당히 긴 시간이 필요하다는 점을 참고하여, 다음 실험으로 바로 넘어가도 된다.

9. 준비된 물체(50 g 추)를 열량계 내에 500 mL의 물과 함께 넣고, ‘4.’의 방법으로 측정을 되풀이하여 처음의 ‘4.’ 번 실험에서의 결과와 비교함으로써, 물체의 비열을 구한다.

10. 디지털 온도계와 전원 장치의 파워 전원, 컴퓨터 본체와 모니터를 끄고 전기 꽂이를 콘센트로부터 분리해 놓는다.

참고) 온도가 변하면서 가열선에 가해지는 전압이 바뀌는 경우 단순히 시간에 대한 온도 변화의 그래프를 그리는 것보다는 가해진 에너지(총 열량)에 대한 온도 변화의 그래프를 그리는 것이 낫다. 즉, x 축을 에너지 축적량, y 축을 온도로 두고 그래프를 해석한다.

- 실험 노트(예시)

[illegible]

--	--	--	--	--	--

참고: 기울기 = $dE/dT = \text{_____ J/K} \pm \text{_____ J/K}$ OR = $\text{_____ cal/}^\circ\text{C} \pm \text{_____ cal/}^\circ\text{C}$

위의 기울기를 실험 데이터로 구한 후 열용량을 유추해보라.

배경 이론

열과 일을 외부로 주고받을 수 있는 계의 내부에너지의 변화량 dU 는 계가 흡수한 열량을 dQ , 계가 한 일을 dW 라고 할 때

$$dU = dQ - dW \quad (1)$$

이다. 고립된 계(isolated system)에서와 같이 외부로부터 열이나 일의 유입이 없을 때($dQ = 0$, $dW = 0$), 계의 내부에너지는 일정한 값을 유지한다($dU = 0$). 이를 열과 역학적 에너지의 보존 법칙 또는 열역학의 제1법칙이라고 부른다.

열량계의 가열 선과 같은 전기 저항체에 전압 $V(\text{volt})$ 를 가하여 전류 $I(\text{ampere})$ 가 흐를 때, 가열 선에서는 매초

$$P = VI \quad (2)$$

의 전기에너지가 열로 변환되어 발생한다. 이를 줄(Joule)열이라고 부른다. 이 열에 의해 올라가는 물의 온도는 물의 질량을 $m(\text{kg})$, 비열을 $c(\text{cal/kg}\cdot\text{K})$ 라고 할 때, 초당

$$P/(qmc) \text{ (K/s)} \quad (3)$$

이다. 여기서 $q \simeq 4.2(\text{J/cal})$ 는 열의 일 해당량이고, 열량의 단위인 1 calorie 는 14.5°C 의 물 1 g 의 온도를 1°C 만큼 높이는데 필요한 열량으로 정의한다. 상온 부근에서 물의 비열은 온도에 따라 크게 변하지는 않으므로, 일반적으로는 온도에 구애받지 않고 1 g 의 물을 단위 온도(1°C 또는 1 K)만큼 높이는데 드는 열량으로 취한다. 물질의 비열은 단위 질량의 온도를 단위 온도만큼 높이는데 드는 열량이고, 따라서 물의 비열은 $c = 1 \text{ cal/g}\cdot\text{K}$ 또는 $4190 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ [이때는 윗 식에서 $q = 1$ 을 택한 경우이다.]이다. 어떤 물체의 열용량(heat capacity)은 (비열 x 질량) 을 가리킨다.

물의 온도가 올라가면서 열량계 자체의 온도도 함께 올라가므로, 발생한 열의 일부는 열량계로 흡수되어 열량계 자체의 내부에너지를 증가시키는데 사용된다. 따라서 가열 선과 온도계 등을 포함한 열량계의 열용량을 $C(\text{cal/K})$, 열량계 내의 물의 질량을 $m(\text{kg})$ 이라고 하면 가열 선에서 발생하는 열은 물의 온도를

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{\{q(10^3 m + C)\}} \quad (\text{K/s}) \quad (4)$$

의 비율로 올라가게 한다. 몇 가지의 다른 물의 양을 써서 온도 증가 비율 dT/dt 를 측정하여, 그 역수 $(dT/dt)^{-1}$ 를 수직 축으로, 질량 m 을 수평축으로 하여 그래프를 그리면 식(4)에 따라 직선이 되며, 이 직선의 기울기는 $10^3 q/P$ 이고 직선의 연장선이 수직 축($m=0$)을 끊는 점이 qC/P 이다. 따라서 이 그래프로부터 열의 일 해당량 q 와 열량계의 열용량 C 를 구할 수 있다.

열량계는 외부로의 열의 출입을 가능한 한 적게 만들었지만 아주 없앨 수는 없다. 이는 가열 선에 흐르는 전류를 중단한 뒤 물의 온도를 시간에 따라서 측정해 보면 알 수 있다. 주된 열의 방출 경로는 열량계 겉 통으로의 열의 전달, 열전쌍(thermocouple)을 통한 열의 전달, 열량계 주위의 공기로의 열의 전달 및 내비침(복사, radiation)에 의한 열손실들을 꼽을 수 있다. 실험 데이터의 정확한 분석을 위해서는 열 손실을 감안해야 한다. 이 실험의 마지막 부분에서 측정한 온도 감소율 dT'/dt 로부터 열량계의 열 손실율

$$P' = q(10^3 m + C) \frac{dT'}{dt} \quad (4)$$

을 구하고, 이를 식(4)의 P 에 포함시킨다. 즉, 식(4)는

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P - P'}{q(10^3 m + C)} \quad (\text{K/s}) \quad (5)$$

으로 쓸 수 있다. 단, 여기에서도 물의 양 m 에 관계없이 열 손실율 P' 과 열량계의 열용량 C 가 일정하다는 가정을 하고 있음에 유의한다. 이 가정의 타당성 여부를 생각하고 실험 결과로부터 판단해 보라.

이제 비열 $c'(\text{cal/kg}\cdot\text{K})$, 질량 $M(\text{kg})$ 인 물체를 질량 $m(\text{kg})$ 의 물과 함께 이 열량계에 넣고 가열하는 경우 온도 증가율은

$$\frac{dT''}{dt} = \frac{P - P'}{q(10^3 m + c'M + C)} \text{ (K/s)} \quad (6)$$

로서 식(6)과 식(7)의 두 온도 변화율의 차이로부터 물체의 비열 c' 을 구할 수 있다.

참고사항

- [정전류\(전압\) 전원 장치](#)
- [물체의 비열 측정 방법 - 열량계](#)
- [디지털 온도계와 열전쌍을 이용한 온도 측정 방법](#)
- [측정 데이터 처리 방법](#)
- [그래프에 의한 분석 방법](#)
- [제임스 줄 - 정확한 측정의 중요성](#)
- [About Temperature](#)