Experiment

Q2-1

Korean (Korea (Republic of))

위데만-프란츠 법칙

금속에서 열은 주로 전자가 전달한다. 이 때문에 열전도도와 전기전도도는 서로 관계가 있다. 이를 위데만-프란츠 법칙이라 한다.

이 실험의 목표는 여러 금속의 열적 성질과 전기적 성질을 상당히 높은 정확도로 재는 것이다. 파트 A에서는 구리, 황동, 알루미늄의 전기전도도를 잰다. 파트 B에서는 구리의 열전도도를 잰다. 파트 C에서는 구리의 비열용량을 잰다. 파트 D에서는 황동과 알루미늄의 열전도도를 잰다. 마지막으로 파트 E에서는 우리가 조사한 금속들에 대해 이 물리량들 사이의 보편적인 관계를 확인한다.

이 실험에서는 오차 계산을 전혀 하지 않아도 된다.

파트 B와 D에는 **15분**의 대기 시간이 있음에 유의하라. 그에 맞추어 시간을 계획하라.

안전 수칙

220V/25A 외부 전원 콘센트에 전선이나 허가되지 않은 기구를 직접 연결하지 말 것. 제공된 전원 장치만을 개조 없이 외부 콘센트에 연결할 수 있다.

장비 목록



그림 1

1. **구리** 속이 빈 원통관. 길이 200.0 mm, 안쪽 구멍의 지름 6.0 mm, 바깥지름 **20.0 mm**
2. **황동** 속이 빈 원통관. 길이 200.0 mm, 안쪽 구멍의 지름 6.0 mm, 바깥지름 **19.0 mm**
3. **알루미늄** 속이 빈 원통관. 길이 200.0 mm, 안쪽 구멍의 지름 6.0 mm, 바깥지름 **20.0 mm**

4. 질량 1.2 g의 작은 영구자석.
5. 물통 – 원래 “야흐눈(Jachnun)”이라는 이스라엘 전통 음식을 만들기 위해 특별히 설계된 냄비. 냄비 뚜껑에는 안쪽에 열교환기가 있고 위에 나사가 있다. 물통을 채우려면 정수 4리터(2리터짜리 병 2개)가 필요하다.
6. 봉 #1 – 지름 20.0 mm의 구리 봉. 케이블 소켓에 연결된 온도 센서들과, 빨간 전선에 연결된 내장 히터가 있다 (그림 2.a). 빨간 전선은 회로를 통해 (아래 15번) DC 전원에 연결한다. 봉은 검은 단열 폼으로 덮여 있다.
7. 봉 #2 – 지름 20.0 mm의 복합 봉. 케이블 소켓에 연결된 온도 센서들과, 빨간 전선에 연결된 내장 히터가 있다 (그림 2.b). 빨간 전선은 회로를 통해 (아래 15번) DC 전원에 연결한다. 봉은 검은 단열 폼으로 덮여 있다.
8. 단열 마감 캡.
9. 디지털 표시 상자용 12V DC 전원 장치.
10. 디지털 표시 상자. 여덟 개 온도계의 값과 시간을 표시한다. 아래 설명을 보라. 이 상자는 스톱워치로도 쓴다.
11. 봉의 온도계들을 디지털 표시 상자에 연결하는 온도계 케이블.
12. 전압계 – 전압계 기능 선택 스위치를 20 Volts DC에 맞추어야 한다(그림 3).
13. 전류계 – 전류계 기능 선택 스위치를 10 Amperes DC에 맞추어야 한다(그림 3).
14. 전선.
15. 바나나 플러그로 히터에 연결하는 9V DC 전원 장치.

경고: 1. (표준 AC 플러그가 달린) 제공된 전원 장치만 외부 콘센트에 연결해야 한다. 절연되지 않은 전선이나 다른 기구를 콘센트에 연결하는 것은 엄격히 금지되며 심각한 부상을 일으킬 수 있다.

2. 봉을 물에 담그지 말 것.

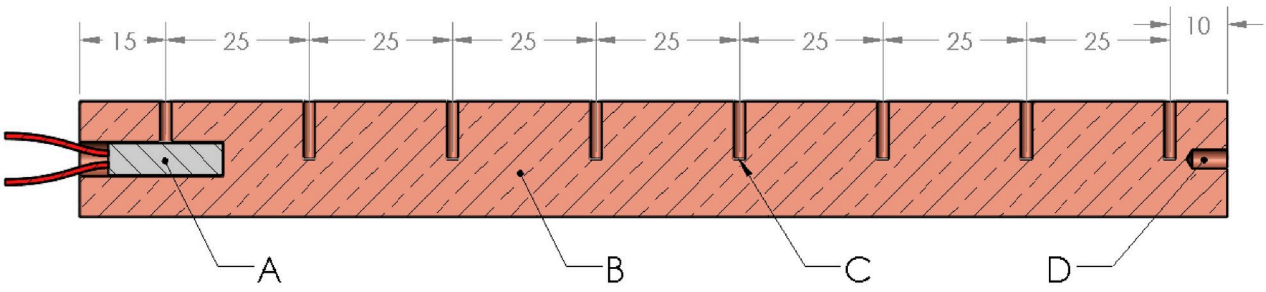


그림 2.a - 봉 #1의 개략도.

거리는 0.1 mm의 정확도로 mm 단위로 주어진다.
(A) 빨간 전선에 연결된 히터. (B) 구리 봉. (C) 여덟 개의 온도 센서로, 각각은 화살표가 가리키는 것과 같은 홈으로 표시되어 있다.
(D) 물통 뚜껑의 나사를 위한 나사 구멍

Q2-3

Korean (Korea (Republic of))

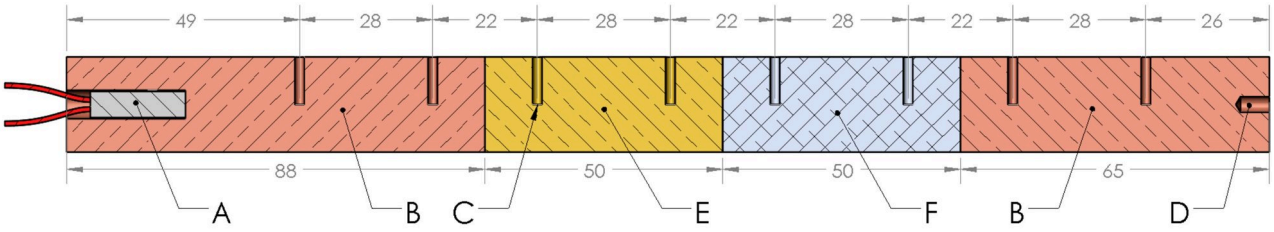


그림 2.b - 봉 #2의 개략도.

거리는 0.1 mm의 정확도로 mm 단위로 주어진다.
(A) 빨간 전선에 연결된 히터. (B) 구리 봉. (C) 여덟 개의 온도 센서로, 각각은 화살표가 가리키는 것과 같은 홈으로 표시되어 있다.
(D) 물통 뚜껑의 나사를 위한 나사 구멍
(E) 황동 봉. (F) 알루미늄 봉.

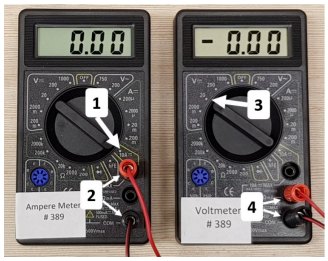


그림 3 – 전류계와 전압계
(1) – 실험에서 쓰는 10A용 회전 선택기의 위치. (2) 전류계에서 쓰는 입력 단자.
(3) – 실험에서 쓰는 20V용 회전 선택기의 위치. (4) 전압계에서 쓰는 입력 단자.

디지털 표시 상자 사용법

디지털 표시 상자를 12V DC 전원 장치에 연결하라.

디지털 표시 상자에는 두 가지 작동 모드, 곧 스톱워치 모드와 온도 표시 모드가 있다. 센서에서 오는 케이블을 상자에 연결하면 상자는 자동으로 온도 표시 모드로 바뀐다. 센서 케이블을 빼면 상자는 자동으로 스톱워치 모드로 바뀌고, 화면에 “Timer mode”라는 글자가 나타난다.

온도 모드에서 :

- 빨간 버튼을 3초 동안 누르고 있으면 시간이 초기화된다
- 빨간 버튼을 짧게 누르면 표시 값이 고정된다(상자는 마지막 초기화 이후의 시간을 계속 세지만 표시하지는 않는다)
- 빨간 버튼을 다시 누르면 실시간 온도와 시간 표시가 다시 시작된다.

스톱워치 모드에서:

- 빨간 버튼을 누르면 스톱워치가 시작된다.
- 다시 누르면 스톱워치가 멈춘다.

- 한 번 더 누르면 스톱워치가 0으로 초기화된다.

각 봉을 처음 쓰기 전에 표시 상자를 보정해야 한다. 쓰이는 온도계들은 정확히 똑같지는 않다. 따라서 봉이 열평형 상태에 있는 동안 모든 센서에서 같은 값을 읽도록 보정하려 한다. 그렇게 하려면 먼저 온도계 케이블의 한쪽 끝을 봉에 연결하라. 그런 다음 빨간 버튼을 누른 채로 온도계 케이블의 다른 쪽 끝을 상자에 연결하라. 상자를 전원과 센서 케이블 양쪽에서 분리해도 보정은 지워지지 않는다.

경고: 봉을 물통에 연결하거나 히터를 전원에 연결하기 **전에** 보정하라. 그래야 보정하는 동안 봉의 온도가 균일함을 보장할 수 있다.

표시 상자에 문제가 생기면 전원에서 뽑았다가 다시 꽂아 보는 것이 도움이 될 수 있다. 상자는 마지막 보정을 기억한다.

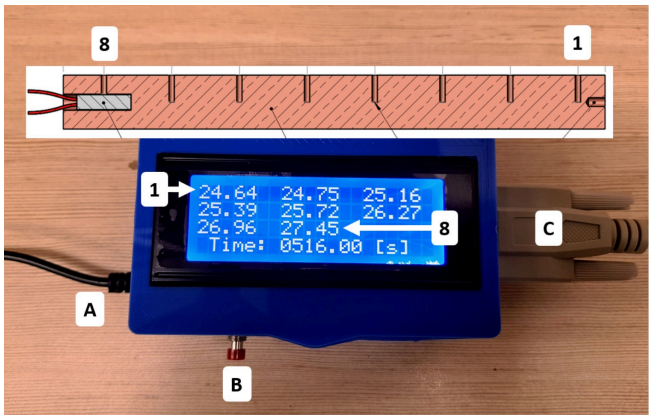


그림 4 - 표시 상자
(A) 12V DC 전원 케이블. (B) 다기능 빨간 버튼.
(C) 온도계 케이블. (1-8) 여덟 개 온도계의 값을 섭씨로 가로 순서대로 줄줄이 표시한다.

파트 A: 구리, 알루미늄, 황동의 전기전도도 (1.5점)

이론

영구자석이 속이 빈 원통형 도체 관 안에서 떨어질 때, 유도된 맴돌이 전류 때문에 소산력을 받는다. 따라서 자석은 종단 속도에 이른다. 이 기하 구조에서 종단 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$v_{terminal} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f\left(\frac{d}{a}\right)} \,. \tag{1}$$

여기서 m 은 자석의 질량, σ 는 관 물질의 전기전도도, a 는 관의 안쪽 반지름, r_m 과 d 는 각각 자석의 반지름과 높이, M 은 자석의 잔류 자화, w 는 관 벽의 두께, $f\left(\frac{d}{a}\right)$ 는 크기 함수이다. 우리 경우 $a \approx r_m$, $d = 2r_m \approx 2a$ 이고 $f(2) \approx 1.75$ 이다. 따라서 자석이 관을 통해 떨어지는 데 걸리는 시간은

다음과 같이 근사할 수 있다:

$$t = 0.22\frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0}{mg}\sigma\,. \tag{2}$$

여기서 $L_0 = 0.2$ m 는 관의 길이이고, 자석은 놓자마자 곧바로 종단 속도에 이른다고 가정한다.

계산에 필요한 관과 자석의 특성은 다음과 같다:

$\mu_0 M = 0.65$ T, $w_{\text{Aluminum}} = w_{\text{Copper}} = 7.0 \times 10^{-3}$ m, $w_{\text{Brass}} = 6.5 \times 10^{-3}$ m, $m = 1.2 \times 10^{-3}$ kg , $r_m = 3.0 \times 10^{-3}$ m, $g = 9.8$ m/s^2

실험

A.1	디지털 표시 상자를 스톱워치 모드로 써서, 알루미늄, 구리, 황동으로 만든 속이 빈 관에서 자석이 떨어지는 데 걸리는 시간을 재라. 측정값을 표 A1에 적어라.	1.0pt

A.2	위 식을 써서 세 물질 각각의 전기전도도 $\sigma_{\mathrm{Aluminum}}, \sigma_{\mathrm{Copper}}, \sigma_{\mathrm{Brass}}$ 를 구하라.	0.5pt

파트 B: 구리의 열전도도 (3.0점)

이 절의 목표는 정상 상태에 가까운 조건에서 구리의 열전도도를 재는 것이다.

이론

열전도도 κ 는 식 $P(x) = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$ 로 정의된다. 이 식은 국소 온도 기울기와 단면을 통해 흐르는 국소 열출력 사이의 선형 관계를 나타낸다. 여기서 $P(x)$ 는 위치 x 의 단면을 통해 흐르는 출력, A 는 봉의 단면적, $\Delta T(x)/\Delta x$ 는 위치 x 에서의 온도 기울기이다.

실험

디지털 표시 상자를 외부 콘센트에 연결하고 봉 #1을 보정하라. 열교환기가 완전히 잠기도록 냄비에 물 4리터(2병)를 붓고 뚜껑을 닫아라.

B.1	봉 #1을 책상 위에 두었을 때의 처음 온도를 적어라.	0.1pt

봉에서 표시 케이블을 빼라. 단열 캡을 떼고 봉 #1을 냄비 뚜껑에 돌려 끼워라. 그림 5처럼 케이블을 표시 상자에 다시 연결하라. 너무 세게 조이지 않도록 주의하라.



그림 5

B.2	히터에 전력을 공급하고 그 전력을 잴 수 있는 회로를 그려라. 회로에는 다음이 들어 있어야 한다: 9V 전원, (이미 봉에 연결된) 히터, 전압계, 전류계, 전선. 전선을 회로를 열고 닫는 스위치로 써도 된다.	0.5pt

열전도도는 봉의 한쪽에 열출력을 가하고 다른 쪽은 물통의 거의 일정한 온도로 유지하면서 잰다.

모든 온도계에서 정상 상태에 가까워지는 것을 목표로 한다. B2절의 회로를 연결하고 히터에 전력을 공급하라.

B.3	히터에 가해진 전력 P 를 계산할 수 있도록 적절한 측정을 하고, 답안지에 적어라.	0.1pt

전력을 가하면서 15분 동안 기다려라(이 시간을 이용해 실험을 계획해도 된다).

B.4	대략 15분, 17.5분, 20분일 때 여덟 개 온도계 모두의 온도를 주어진 표에 적어라.	0.5pt

B.5	그래프 용지에, 측정한 각 시간에 대해 위치의 함수로 온도의 그래프 세 개를 그려라. 이 그래프들은 파트 D에서도 쓴다.	1.0pt

B.6	그래프를 이용하여, 대략 17.5분부터의 자료로 구리의 열전도도 κ_0 을 구하라. 이 파트에서는 열손실을 무시하라. 대략 17.5분일 때 봉의 평균 온도 변화율 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ 를 어림하라.	0.5pt

B.7	κ_0 이 실제 κ 값보다 크리라고 / 작으리라고 / 같으리라고 예상하는가?	0.3pt

파트 C: 열손실과 구리의 열용량 어림 (4.0점)

이론

열용량 C 는 다음 두 식 가운데 하나로 정의된다:

$$\Delta Q = C\Delta T, \qquad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right). \tag{3}$$

여기서 $\Delta Q/\Delta t$ 는 물질로 전달되는 순 열전달률이고 $\Delta T/\Delta t$ 는 온도 변화율이다. 비열 c_p 는 단위 질량당 열용량이다. 구리 봉의 질량은 0.58 kg 으로 잡으면 된다.

실험

히터 전원을 꺼라. 회로를 분리하고 봉 #1을 풀어 책상 위에 놓아라. 실험을 시작할 때 있던 대로 단열 마감 캡을 봉에 끼워라. 히터 회로를 다시 연결하고 봉을 디지털 표시 상자에 다시 연결하라.

경고: 이 파트에서는 온도를 확인하지 않은 채 히터를 오래 켜 두지 말 것.

냉각–가열–냉각의 연속 과정을 이용하면 열손실과 물질의 열용량을 모두 뽑아낼 수 있다. 가열 단계에서 봉의 평균 온도가 약 $2.5^\circ\mathrm{C}$ 변하도록 해야 한다. 이 단계에서 필요한 정확도는 10–15분 길이의 냉각–가열–냉각 과정으로 얻을 수 있다.

여기서는 파트 B의 정상 상태 근처에서 잰 평균 온도 부근에서 작업하는 것을 목표로 한다.

봉에 저장된 모든 열에너지를 고려하려면 봉의 평균 온도를 따라가야 한다. 봉 중앙의 온도가 평균 온도의 좋은 근사이다.

C.1	냉각–가열–냉각 과정을 수행하고 측정값을 표 C1에 기록하여 평균 온도를 구하라.	1.0pt

C.2	그래프 용지에 시간에 대한 평균 온도의 그래프를 그려라.	1.0pt

C.3	그래프를 이용하여, 파트 B의 평균 온도 부근에서 비열 c_p 와 단위 시간당 열손실 P_{loss} 를 계산하라. 그림과 식을 써서 방법을 설명하라.	1.0pt

파트 B에서 구한 열전도도의 정확도를 높이려면 고려해야 할 주된 메커니즘이 두 가지 있다.

- 단열재를 통한 지름 방향 열전달로 인한 열손실이 있다.
- 측정하는 시점에 계가 정상 상태에 이르지 않았다

1차 근사로, 이 메커니즘들 때문에 봉을 따라 흐르는 단위 길이당 출력의 변화 $\Delta P(x)/\Delta x$ 가 일정하다고 가정해도 된다.

C.4	두 메커니즘을 모두 고려하여 파트 B에서 구한 열전도도를 1차까지 보정하는 식을 적어라. 파트 B, C에서 얻은 $\kappa_0, P, c_p, m, P_{\text{loss}}, \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 를 써서 보정된 열전도도 κ_{Copper} 를 나타내고 그 값을 계산하라.	1.0pt

파트 D: 황동과 알루미늄의 열전도도 (1.0점)

단열된 봉 #2를 디지털 표시 상자에 연결하고, 파트 B의 처음에 설명한 대로 이 봉의 온도계들을 보정하라 (빨간 버튼을 누른 채로 단열된 봉 #2를 온도계 케이블로 표시 상자에 연결하라).

D.1	봉을 책상 위에 두었을 때의 처음 온도를 적어라.	0.1pt

케이블을 빼고 봉 #2를 그림 4처럼 냄비 뚜껑에 돌려 끼워라. 케이블을 표시 상자에 다시 연결하라.

파트 B에서 쓴 과정을 반복하여 가열하면서 정상 상태에 가깝게 만들어라.

측정하기 전에 최소 **15분** 동안 히터에 전력을 공급하라.

이 파트에서 요구하는 정확도에서는 봉이 정상 상태에 있다고 가정해도 된다. 또한 봉을 따라 단위 길이당 열손실이 일정하다고 가정해도 된다.

D.2	봉 #2의 여덟 개 온도계 값을 모두 적고, 각 구간에 대해 $\Delta T/\Delta x$ 를 적어라.	0.2pt

1차 근사로, 과제 C.4에서와 같은 가정, 곧 $\Delta P(x)/\Delta x$ 가 일정하다는 가정을 써도 된다.

D.3	앞서 한 측정을 이용하여 κ_{Brass} 와 $\kappa_{\mathrm{Aluminum}}$ 을 나타내고 그 수치 값을 구하라.	0.7pt

파트 E: 위데만–프란츠 법칙 (0.5점)

위데만–프란츠 법칙은, 열수송이 전도 전자에 의해 지배되는 금속에서 열전도도와 전기전도도의 비가 절대온도에 선형으로 의존한다는 것이다. 또한 이 법칙은 기울기 $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$ ("로렌츠 수"라 한다)가 대부분의 금속에서 같고 자연의 보편상수들에만 의존한다고 말한다. 실제로 실온의 금속에서 이 법칙은 약 10% 의 정확도로 성립한다.

E.1	열전도도와 전기전도도에 대해 얻은 결과 (κ, σ) 를 표 E1에 적어라. 각 물질에 대해 L 값을 계산하여 같은 표 E1에 나타내라. 이때 열전도도가 1차까지 온도에 의존하지 않는다고 가정하라.	0.5pt