일반 지침

2026년 7월 6일

아래 규칙을 지키지 않으면 실격될 수 있다. 실험 시험은 5시간 동안 진행되며 총 20점이다. 시험의 시작과 종료는 안내 방송으로 알리며, 매 시간 경과 시간도 알린다. 시험 종료 30분, 15분, 5분 전에도 안내한다.

시험 시작 전

지시가 있을 때까지 봉투나 상자를 열지 말 것. 책상에서 사용할 수 있도록 다음이 제공된다. (1) 펜, (2) 공학용 계산기.

시험 중

- 제공된 펜으로 답을 작성한다.
- 최종 답안은 A 답안지에 작성한다. 해당 칸에 답과 필요한 관찰 내용을 기입하고, 필요한 그래프를 그린다.
- 계산용으로 W 표시가 된 빈 연습지가 제공된다. 지정된 것을 사용한다. 채점하지 않을 답이나 초안은 X로 지운다. 각 용지의 앞면만 사용하고 가장자리 여백은 깨끗하게 유지한다. 뒷면은 스캔되지 않으며 그 내용은 고려되지 않는다.
- 답은 간결하고 읽기 쉽게 쓴다. 수식, 논리 기호, 기호, 개략도를 사용해 생각을 분명히 표현한다. 채점자가 다국어를 구사하지 못할 수 있으므로 설명하는 문장은 피한다.
- 별도 언급이 없으면 불확도를 정량화한다. 별도 지정이 없으면 필요한 측정점의 수나 측정 횟수는 스스로 판단해야 한다.
- 허가 없이 자리를 떠나지 않는다. 도움이 필요하면(화장실, 물 등) "Help" 표지판을 든다.

시험 종료 시

- 종료가 안내되면 즉시 쓰기를 멈춘다.
- 모든 용지를 제공된 봉투에 넣는다. 일반 지침, 문제지(Q), 답안지(A), 연습지(W) 순서로 앞면이 위를 향하게 정리하고 쪽 번호 순으로 배열한다.
- 감독관이 나가도 된다고 할 때까지 기다린다. 계산기를 포함해 어떤 것도 시험장에서 가지고 나가지 않는다.

협조에 감사드립니다.

구체적 지침

시험 전체에서, 별도 언급이 없으면 지침에 제시된 물리 상수 값을 사용한다. 일련의 측정을 할 때는 측정값과 그래프에 나타낸 값을 표에 명시한다. 적절한 유효숫자를 쓰도록 주의한다. 모든 그래프는 관련된 물리량을 분명히 나타내야 한다. 사용한 모든 값의 단위를 항상 표기한다.

이상 기체, 증기압, 그리고 열전도 [20점]

이 실험 시험에서는 세 가지 물리 현상, 즉 이상 기체의 거동, 물의 증기압, 전도에 의한 열전달을 다룬다. 시험의 목표는 압력 P, 공기의 부피 V, 온도 T, 시간 t 사이의 관계를 분석하여 적절한 그래프로 결과를 제시하고, 관련된 물리 상수와 그 불확도를 추정하는 것이다.

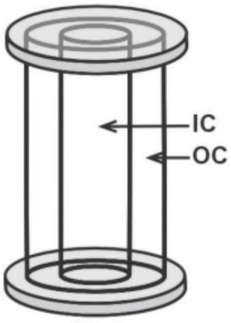
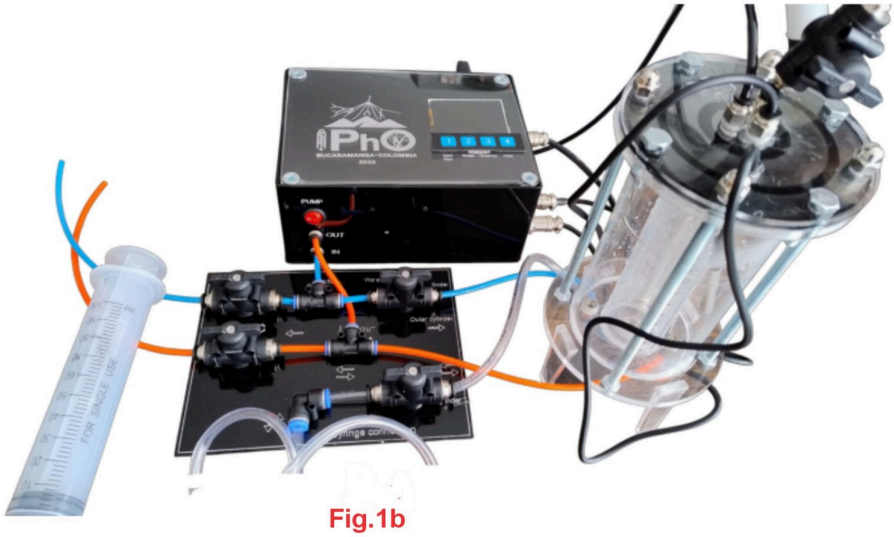


Fig.1a


Fig.1b

실험 장치 개요

실험을 시작하기 전에 조립 설명, 재료 목록, 일반 지침, 각 파트의 절차를 읽는다.

장치는 아크릴로 만든 두 개의 동심 원통으로 이루어져 있다(그림 1a). 안쪽 원통(이하 **IC**)에는 공기와 액체를 담을 수 있으며, IC 안의 공기를 **갇힌 공기**(이하 **CA**)라 부른다. IC 안의 액체 양은 호스 D에 주사기를 연결하여 조절할 수 있다.

바깥 원통(이하 **OC**)에는 물만 채울 수 있으며 열 재킷 역할을 한다. 물 높이는 입구·출구 호스와 밸브로 조절하고, 온도는 전기 히터로 제어한다. IC 안에는 압력 센서와 온도 센서 두 개가 설치되어 있고, OC에는 별도의 온도 센서가 있다.

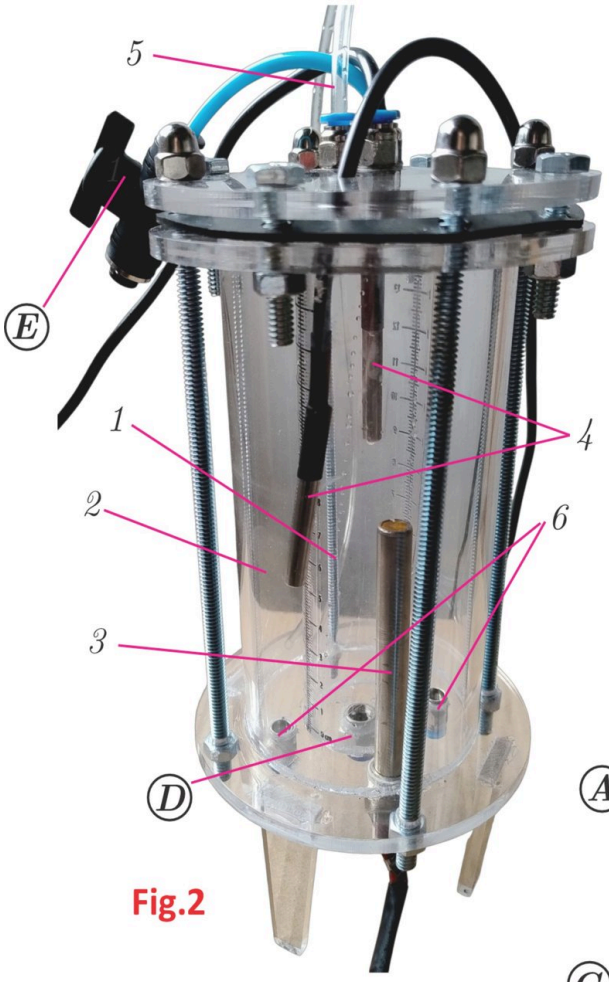


Fig.2



Fig.3



Fig.4

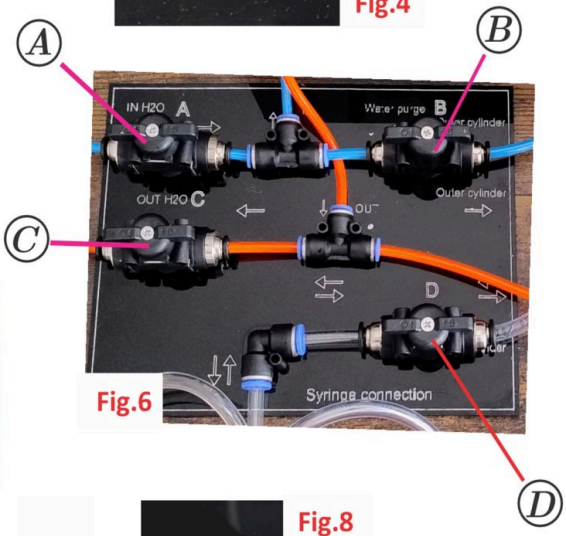


Fig.6



Fig.5

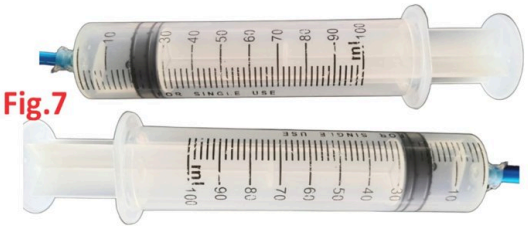


Fig.7



Fig.8

실험 기구

주 장치 (그림 2 참조)

1. **안쪽 원통 (IC):** 두 개의 센티미터 눈금이 있다. 고정된 뚜껑이 내용물을 밀폐한다.
2. **바깥 원통 (OC):** 열 재킷 역할을 한다.
3. **히터:** OC 안에 설치되어 있으며 전자 모듈로 전원을 공급한다.
4. **온도 센서:** 검은색 전선으로 전자 모듈에 연결된 두 개의 센서가 각 원통의 온도를 측정한다.
5. **압력 센서 호스:** CA를 전자 모듈 안의 압력 센서에 연결하여 내부 압력을 측정할 수 있게 한다.
6. **OC 물 연결부:** 두 개의 호스가 OC로 물을 넣고 빼는 입구와 출구를 제공한다.

밸브 E — IC 대기 연결: IC와 대기 사이의 연결을 열거나 닫는다.

전자 모듈 (그림 3 참조)

사용 전에 전자 모듈을 주 전원에 연결해야 한다. 전원 스위치(Power)는 모듈 뒷면에 있다(그림 4).

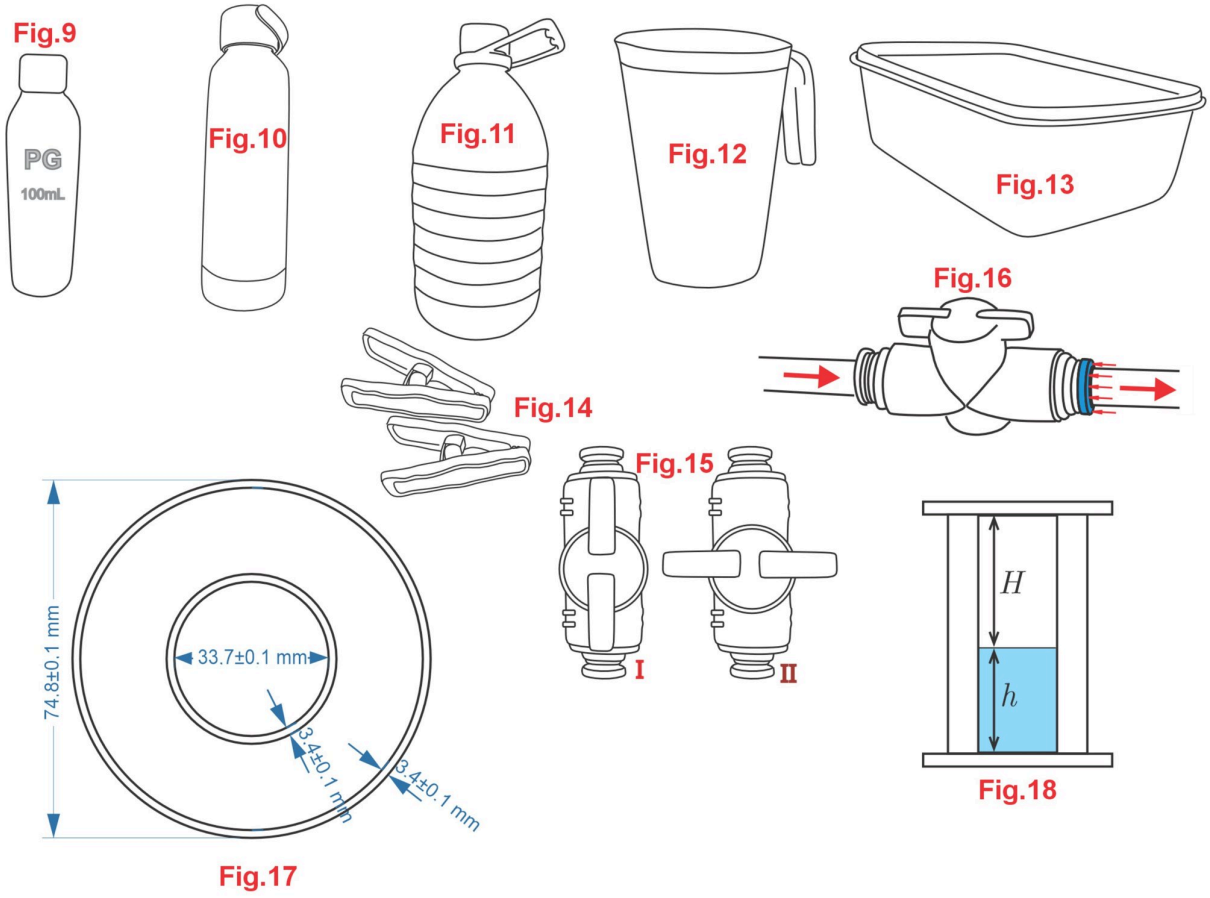
디지털 화면은 다음을 표시한다.

- **내부 압력:** IC 내부의 압력 (INT. PRESSURE)
- **대기압:** 현지 대기압 (ATM. PRESSURE)
- **내부 온도:** IC 내부의 온도 (INT. TEMPERATURE)
- **외부 온도:** OC 내부의 온도 (EXT. TEMPERATURE)
- **스톱워치:** 타이머 표시 (TIMER)

화면 아래의 번호가 붙은 네 개의 버튼이 모듈의 주요 기능을 제어한다.

- **버튼 1 — 타이머:** 스톱워치를 시작하거나 멈춘다.
- **버튼 2 — 리셋:** 타이머 표시를 지운다.
- **버튼 3 — 그래프 표시:** 그래프 표시와 수치 표시를 전환한다. 이 실험에서는 사용하지 않는다.
- **버튼 4 — 히터:** 히터를 켜거나 끈다. 히터가 작동 중이면 화면 오른쪽 아래의 표시등이 빨강과 초록으로 번갈아 바뀐다.

주의: 히터가 물에 완전히 잠기지 않았다면 절대 켜지 말 것. OC 온도가 65 °C에 도달하면 히터가 꺼진다. 표시등이 더 이상 빨간색이 아닐 때에만 다시 켤 수 있다.



모듈의 오른쪽 면(그림 5)에는 IC 온도 센서(Internal Temp.), OC 온도 센서(External Temperature), 히터(Water Heater), 그리고 CA를 압력 센서에 연결하는 호스(Internal Pressure)의 연결부가 있다.

유압 모듈 (그림 6 참조)

유압 모듈에는 A, B, C, D로 표시된 네 개의 밸브가 있다. 각 밸브는 장치 안의 특정 유체 경로를 제어한다.

- **밸브 A — OC 물 입구:** 호스 A(IN H_2O)를 통해 OC로 들어가는 물의 흐름을 제어한다.
- **밸브 B — 순환 밸브:** 아래 펌프 조작 설명의 순환 회로를 통과하는 물의 흐름을 제어한다.
- **밸브 C — OC 물 출구:** 호스 C(OUT H_2O)를 통해 OC에서 나가는 물의 흐름을 제어한다.
- **밸브 D — 주사기 연결부:** 호스 D에 연결된 주사기로 IC의 유체 유입·유출을 제어한다(그림 2). 밸브가 새면 호스를 장치에서 떼어 내고 주사기를 호스에 직접 연결해도 된다.

펌프와 밸브 조작

전자 모듈 앞면의 펌프 스위치(PUMP)(그림 8)가 전자 모듈 내부의 펌프를 작동시킨다. 펌프를 켜기 전에 수행할 작업에 맞게 밸브를 설정한다. 펌프를 작동하기 전에 클립으로 호스를 용기 가장자리에 고정한다.

- **OC에 물 채우기:** 밸브 A를 열고 밸브 B, C를 닫는다. 호스 A를 물통에 넣는다. 원하는 높이에 도달하면 밸브 A를 닫는다. 수위가 원통 뚜껑보다 최소 1 cm 아래에 유지되도록 한다. 물이 OC로 잘 들어가지 않으면 밸브 B를 즉시 열었다 닫아 펌프를 배기한다.
- **OC의 물 빼기:** 밸브 A를 닫고 밸브 B, C를 연다. 호스 C를 물을 받을 용기에 넣는다.
- **OC 온도 균일화:** 밸브 B를 열고 밸브 A, C를 닫는다. 이 상태에서 물이 OC를 닫힌 회로로 순환하여 온도가 고르게 된다.

다음 작업에서는 주사기를 호스 D에 연결한다. 이때 펌프는 사용하지 않는다.

- **IC에 액체 넣기:** 밸브 D와 E를 열고 주사기로 액체를 주입한다.
- **IC에서 액체 빼기:** 밸브 D와 E를 열고 주사기로 액체를 뽑아낸다.

추가 물품: 실험을 위해 다음 재료가 제공된다.

- 연결 호스가 달린 100 mL 주사기 두 개(그림 7). 하나는 물용, 다른 하나는 PG용이다.
- **프로필렌 글리콜(PG):** 100 mL가 담긴 용기(그림 9). 이 실험의 온도 범위에서 증기압은 무시할 수 있다. **주의:** PG는 물과 잘 섞인다. 또한 공기 중에 열어 두면 수분을 흡수할 수 있으므로 사용하지 않을 때는 용기를 닫아 두기를 권한다.
- **찬물:** 500 mL의 찬물이 담긴 보온 용기(그림 10).
- **상온 물:** 상온의 물 한 병(그림 11).
- **따르는 용기:** 물을 따르는 데 쓰는 용기(그림 12).
- **여분 물통:** 남는 물을 모으는 통(그림 13).
- **클립:** 실험 중 호스를 고정하고 부품을 지지하는 데 사용(그림 14).
- 정리용 종이 타월.

중요한 조작 참고 사항

장치를 설치하고 조작할 때 다음을 유의한다.

- **밸브 위치:** 각 밸브는 열림(I)과 닫힘(II) 두 위치만 갖는다(그림 15).
- **호스 연결:** 호스를 빼려면 고리를 누르고 호스를 당긴다. 끼울 때는 끝까지 밀어 넣는다(그림 16). 시험 시작 시점에 장치는 완전히 조립되어 있으며, 통상적인 조작에서는 호스를 다시 연결할 필요가 없다.
- **원통 치수:** 그림 17에 원통의 단면 치수가 나와 있다.
- **기호:** 그림 18은 IC 내용물에 대한 기호를 정의한다. h 는 액체의 높이, H 는 액체 위 공기의 높이이다.
- **부피 보정:** 연결 호스의 내부 부피는 IC 안 온도 센서의 부피로 거의 상쇄된다. 따라서 이 효과는 무시한다.

상수와 참고값

실험 전체에서 다음 상수와 참고값을 사용한다.

- 아보가드로 상수: $N_A = 6.022 \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$
- 물의 비열 용량: $c_0 = 4.184 \times 10^3\ \mathrm{J/(kg \cdot K)}$
- 물의 밀도: $\rho_0 = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$
- 물의 몰질량: $M_0 = 18.02\ \mathrm{g/mol}$
- 공기의 몰질량: $M_a = 28.96\ \mathrm{g/mol}$
- 표준 상태 이상 기체의 몰부피: $V_m = 22.4\ \mathrm{L/mol}$ ($T_0 = 273.15\ \mathrm{K}$, $P_0 = 101.3\ \mathrm{kPa}$)

파트 A [4.0점]. 이상 기체의 등적 과정

CA는 이상 기체 상태 방정식을 따른다.

$$PV = nRT \qquad (1)$$

여기서 R 은 보편 기체 상수이다.

절차

IC에 PG를 $h = 4.5\ \mathrm{cm}$ 까지 넣고 밸브 D와 E를 닫는다. 이렇게 하면 CA의 부피가 고정된다.

부카라망가의 주위 공기 밀도는 현지 온도와 압력에 따라 변한다. 다음 문제에서는 시간 평균값 $\rho = 1.12\ \mathrm{kg/m^3}$ 을 사용하라.

A1. [0.4점] CA의 질량 m, 몰수 n, 전체 공기 분자 수 N 을 구하라.

1. OC를 상온의 물로 위쪽 가까이까지 채운다.
2. 히터를 켠다. 펌프로 온도를 균일하게 만드는 것을 잊지 말 것.

A2. [1점] CA의 압력 P 를 온도 T 의 함수로 표에 기록하라.

A3. [0.9점] A2에서 얻은 자료로 온도에 대한 압력의 거동을 그래프로 나타내라.

IPhO 경쟁 조건에서는 기준값에 대한 R 의 기댓값을 바꾸기 위해 센서가 의도적으로 교정에서 벗어나 있을 수 있다.

A4. [1.0점] A.3의 그래프를 이용해 R 의 실험값을 구하라.

부피 일정에서의 열 압력 계수는 다음 관계로 정의된다.

$$\beta_0 = \frac{1}{P_0}\left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right) \qquad (2)$$

여기서 P_0 는 참고 상수와 값에 제시된 기준 온도 T_0 에서의 계의 압력이다.

A5. [0.7점] 공기에 대한 계수 β_0 의 값을 구하라.

다음 파트로 넘어가기 전에 IC에서 PG를 제거하고 세척한다. 파트 B로 진행한다면 OC의 더운물은 빼지 않는다.

파트 B [8.0점]. 증기압

액체와 그 증기가 평형을 이루고 있는 밀폐 용기에서 증기압은 절대 온도 T 에 대해 클라우지우스-클라페이롱 식에 따라 달라진다.

$$P_v = P_{v0}\, e^{-\frac{Q_v}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} \qquad (3)$$

여기서 T_0 는 기준 온도로 0 °C를 취하고, P_{v0} 는 T_0 에서의 증기압, R 은 보편 기체 상수, Q_v 는 물의 몰 기화 잠열이다.

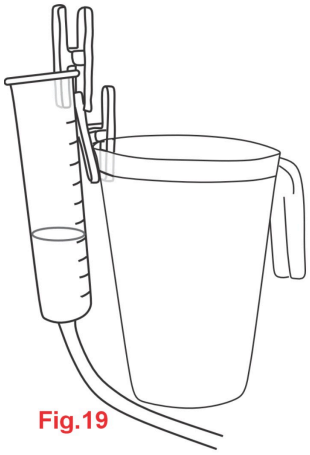


Fig.19

절차

PG와 물은 서로 잘 섞인다는 점을 기억하라. 물과 PG에 서로 다른 주사기를 사용한다.

- OC를 물로 위쪽 가까이까지 채운다.
- 주사기에 물을 채워 IC에 연결하고 밸브 E를 연 뒤, 주사기 피스톤을 빼고 수위가 $h = 5.0\ \mathrm{cm}$ 에 도달할 때까지 주사기를 들어 올린다. 밸브 E를 닫고 그림 19와 같이 주사기를 통에 고정한다. 이렇게 하면 IC 내부 압력이 대기압과 거의 같게 유지된다. 호스에 공기 방울이 남지 않도록 한다.
- OC의 물을 65 °C까지 데운다. 순환 장치로 물 온도를 균일하게 만드는 것을 잊지 말 것.
- 온도가 내려가기 시작할 때부터 H 를 T 의 함수로 기록한다.
- 온도를 더 낮추려면 적절한 시점에 OC의 물을 제공된 찬물로 교체해도 된다.

B1. [1.0점] 높이 H 를 온도 T 의 함수로 표에 기록하라.

B2. [1.0점] B1에서 얻은 자료로 H 를 T 의 함수로 그래프에 나타내라.

상온 부근에서 증기압은 비교적 작으므로 $H(T)$ 곡선을 선형으로 근사할 수 있다.

B3. [0.5점] B2의 그래프를 외삽하여 H_0 (0 °C에서의 H)의 값을 구하라.

B4. [1.0점] IC가 건조 공기와 수증기를 함께 담고 있다고 가정하고, 증기압 P_v 를 P_{atm}(대기압), H_0, H, T_0, T 로 나타내는 대수적 표현식을 유도하라. 이 문제에서는 0 °C에서의 증기압을 0으로 두어도 된다.

다음 문제에서는 참고값 $R = 8.31\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}$ 를 사용하라.

B5. [4.0점] 식 (3)과 B4의 표현식을 이용해 적절한 그래프를 그려 Q_v 의 실험값을 구하라.

B6. [0.5점] Q_v 의 값으로부터 단위 질량당 기화 잠열 L_v 를 구하고, 사용한 공식을 제시하라.

파트 C [8.0점]. 열전도

이 파트에서는 두 원통을 가르는 벽을 통해 OC의 물과 IC의 물 사이에서 일어나는 열 교환을 다룬다. IC의 물 온도 T_{IC} 와 OC의 물 온도 T_{OC} 의 시간 변화를 분석하여, 벽의 유효 열저항, 계의 평형 온도, 아크릴의 열전도도를 추정하는 것이 목표이다.

고체 벽을 통한 열전도는 다음 관계를 따른다.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{R_{Th}}(T_{OC} - T_{IC}) \qquad (4)$$

여기서 ΔQ 는 시간 간격 Δt 동안 벽을 통해 IC의 물이 받은 열이다. 유효 열저항 R_{Th} 는 IC와 OC를 가르는 벽의 재질과 기하에 의존한다.

절차

1. OC의 수위를 $h = 15\ \text{cm}$ 로 맞춘다.
2. OC의 물을 65 °C까지 데운다. 펌프로 물 온도를 균일하게 만든다.
3. IC의 수위를 $h = 10\ \text{cm}$ 로 맞추고 스톱워치를 시작한다.

C1. [1.0점] 내부 온도 T_{IC} 와 외부 온도 T_{OC} 를 시간 t 의 함수로 기록하라.

C2. [1.0점] 하나의 그래프에 T_{IC} 와 T_{OC} 를 시간 t 의 함수로 나타내라.

C3과 C4에서는 장치의 열용량을 무시한다. T_{eq} 는 주위로의 열 전달이 없을 때 IC와 OC가 함께 도달하게 될 평형 온도를 뜻한다.

C3. [0.7점] $T_{OC} - T_{IC}$ 를 T_{OC} 와 T_{IC} 각각의 함수로 같은 그래프에 나타내라. T_{OC} 와 T_{IC} 를 같은 온도 축에, $T_{OC} - T_{IC}$ 를 다른 축에 둔다.

C4. [1.1점] C3에서 그린 그래프로부터 T_{eq} 를 구하라. 이 문제에서는 불확도를 계산할 필요가 없다.

변수를 유한한 횟수만 측정한다면 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{T_{IC,j} - T_{IC,(j-1)}}{t_j - t_{j-1}} \propto \bar{T}_{OC} - \bar{T}_{IC} \qquad (5)$$

여기서 j 는 측정 번호이고 $\bar{T}$ 는 t_{j-1} 부터 t_j 까지의 구간에서 각 원통의 평균 온도이다.

C5. [1.0점] 식 (5)의 좌변을 우변의 함수로 그래프에 나타내라.

C6. [1.6점] C5에서 그린 그래프로부터 R_{Th} 의 값을 구하라.

얇은 원통 벽을 통한 지름 방향 열전도에 대한 푸리에 법칙은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dr} \qquad (6)$$

여기서 A 는 벽의 넓이, λ 는 벽 재질의 열전도도, r 은 원통 축으로부터의 거리이다.

C7. [1.6점] 식 (4)와 (6)을 이용하여 아크릴(IC와 OC를 가르는 재질)의 열전도도 λ 의 값을 구하고, 사용한 공식을 제시하라.