

18장: 온도, 열, 열역학 제1법칙

Temperature, Heat, and the First Law of Thermodynamics

이번장에서 배울 내용

- 온도(temperature) 와 열평형(thermal equilibrium)
- 열역학 제0법칙(zeroth law): 온도 측정의 기초
- 온도 척도: 켈빈(K), 섭씨(°C), 화씨(°F) 사이의 변환
- 열팽창(thermal expansion): 선팽창과 부피 팽창
- 열(heat) 과 비열(specific heat), 상변화의 열(heat of transformation)
- 열역학 제1법칙(first law): $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$
- 열전달 메커니즘: 전도, 대류, 복사

왜 열역학이 중요한가?

겨울에 손이 시리면 손난로를 쥘다. 뜨거운 라면 냄비는 맨손으로 잡을 수 없다. 이 모든 현상의 뒤에는 **열에너지(thermal energy)**의 이동이 있다.

- 건물의 단열 설계
- 자동차 엔진의 효율
- 스마트폰 발열 관리
- 기후 변화와 지구 온난화

이 장에서는 **온도**가 무엇인지, **열**이 어떻게 전달되는지, 그리고 에너지 보존을 열역학적 과정에 적용하는 **열역학 제1법칙**을 배운다.

18.1 온도

온도란?

온도(temperature) 는 7개의 SI 기본 단위 중 하나로, 물체의 뜨겁고 차가운 정도를 나타내는 물리량이다.

- 온도는 **온도계(thermometer)** 로 측정한다
- 온도계는 온도에 따라 변하는 물리적 성질(길이, 부피, 저항, 압력 등)을 이용한다

열평형과 열역학 제0법칙

두 물체를 접촉시키면, 시간이 지남에 따라 두 물체의 온도는 같아진다. 이 상태를 **열평형(thermal equilibrium)** 이라 한다.

열역학 제0법칙(zeroth law of thermodynamics):

물체 A 와 B 가 각각 제3의 물체 T 와 열평형 상태에 있으면, A 와 B 도 서로 열평형 상태에 있다.

이 법칙이 중요한 이유: **온도** 라는 개념의 존재를 보장한다. 온도계(T)를 두 물체에 각각 대어 같은 눈금을 보이면, 두 물체의 온도가 같다고 결론 내릴 수 있다.

켈빈 척도와 삼중점

SI 단위계에서 온도는 **켈빈(K)** 으로 측정한다.

- 기준점: **물의 삼중점(triple point of water)** = 273.16 K
- 이 온도에서 물의 고체, 액체, 기체가 공존한다
- **절대영도(absolute zero)** = 0 K: 도달 가능한 가장 낮은 온도

정밀한 온도 측정에는 **정적 기체 온도계(constant-volume gas thermometer)** 를 사용한다:

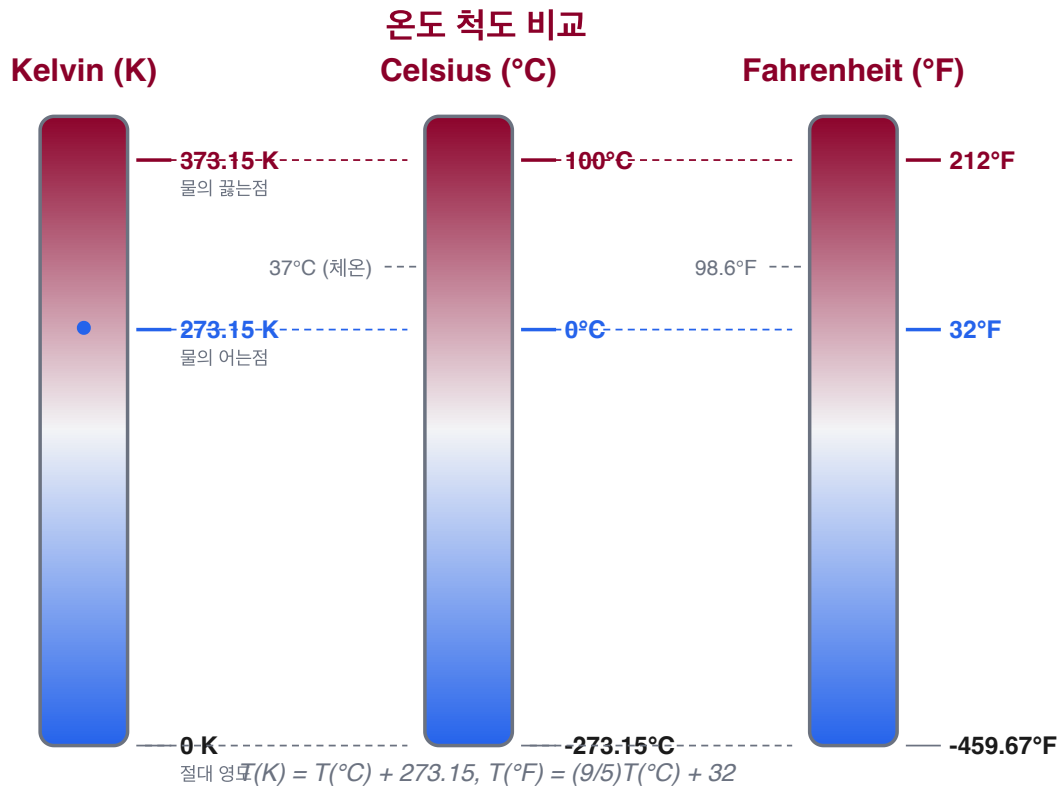
$$T = (273.16 \text{ K}) \left(\lim_{p_3 \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} \right)$$

여기서 p 는 측정 온도에서의 기체 압력, p_3 는 삼중점에서의 기체 압력이다.

어떤 기체를 사용하든 같은 온도에 수렴한다. 이것이 **이상 기체 온도(ideal gas temperature)** 이다.

18.2 섭씨와 화씨 척도

온도 척도 비교



변환 공식

켈빈 ↔ 섭씨:

$$T_C = T - 273.15$$

여기서 T 는 켈빈 온도이다. 켈빈과 섭씨의 **눈금 크기**는 같다:

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}).$$

섭씨 ↔ 화씨:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

온도	K	°C	°F
물의 끓는점	373.15	100	212
체온	310.15	37.0	98.6
물의 어는점	273.15	0	32
절대 영도	0	-273.15	-459.67

참고: 온도 **차이**의 크기는 섭씨와 켈빈이 같다 ($1\text{ C}^{\circ} = 1\text{ K}$), 섭씨와 화씨는 다르다 ($5\text{ C}^{\circ} = 9\text{ F}^{\circ}$).

예제: 온도 변환

서울의 한여름 최고 기온이 35°C 일 때:

$$T_F = \frac{9}{5}(35) + 32 = 63 + 32 = 95^{\circ}\text{F}$$

$$T = 35 + 273.15 = 308.15\text{ K}$$

섭씨와 화씨가 같아지는 온도: $T_C = T_F$ 로 놓으면

$$T_C = \frac{9}{5}T_C + 32 \implies -\frac{4}{5}T_C = 32 \implies T_C = -40^{\circ}$$

$-40^{\circ}\text{C} = -40^{\circ}\text{F}$. 이 온도에서 두 척도가 만난다!

18.3 열팽창

선팽창

온도가 올라가면 물체의 크기가 커진다. 길이 L 인 물체의 온도가 ΔT 만큼 변하면:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

- α : **선팽창 계수(coefficient of linear expansion)** (단위: $1/^\circ\text{C}$ 또는 $1/\text{K}$)
- α 는 재질에 따라 다르다

물질	α ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
알루미늄	23
구리	17
강철	11
유리 (파이렉스)	3.2
콘크리트	12

핵심: 모든 선형 치수가 같은 비율로 변한다. 구멍이 있는 금속판에서 **구멍의 지름도 같은 비율로 커진다!**

부피 팽창

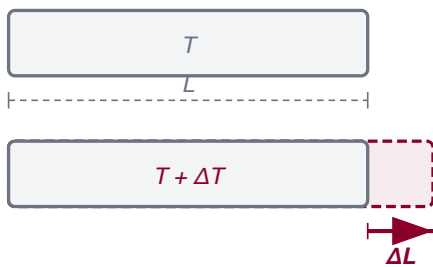
3차원 물체는 모든 방향으로 팽창하므로 부피도 변한다:

$$\Delta V = \beta V \Delta T$$

- β : 부피 팽창 계수(coefficient of volume expansion)
- 고체의 경우: $\beta = 3\alpha$

열팽창

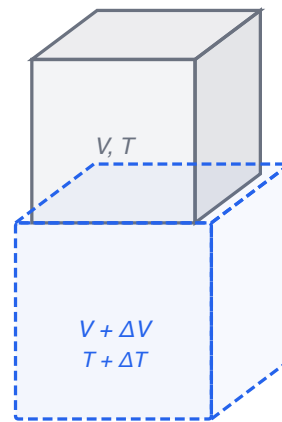
선팽창 (Linear)



$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

α : 선팽창 계수 ($1/^\circ\text{C}$)

부피 팽창 (Volume)



$$\Delta V = \beta V \Delta T$$

$\beta = 3\alpha$: 부피 팽창 계수

열팽창의 응용과 물의 특이한 행동

바이메탈(bimetal strip): 팽창계수가 다른 두 금속을 접합하면, 온도 변화에 따라 휘다. 이 원리로 **온도 조절기(thermostat)** 를 만든다.

다리의 신축 이음(expansion joint): 여름과 겨울 온도 차이로 인한 팽창/수축을 흡수하기 위해 다리에 틈을 둔다.

물의 이상 팽창: 물은 0°C ~ 4°C 사이에서 온도가 올라가면 오히려 **수축** 한다. 4°C 에서 밀도가 최대가 되어, 호수가 위에서부터 어는 이 유가 된다. 이 덕분에 수중 생태계가 겨울을 버틸 수 있다.

예제: 다리의 열팽창

길이 $L = 200$ m인 강철 다리가 겨울(-10°C)에서 여름(40°C)으로 온도가 변하면:

$$\Delta T = 40 - (-10) = 50^\circ\text{C}$$

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = (11 \times 10^{-6})(200)(50) = 0.11 \text{ m} = 11 \text{ cm}$$

이 팽창을 수용하기 위해 다리에는 **신축 이음(expansion joint)**을 설치한다.

18.4 열의 흡수

열이란?

열에너지(thermal energy) 는 물체를 구성하는 원자와 분자의 무질서한 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 합이다. 이것을 **내부 에너지(internal energy)** E_{int} 라 한다.

열(heat) 은 온도 차이 때문에 계(system)와 환경(environment) 사이에서 이동하는 에너지이다.

- $Q > 0$: 계가 에너지를 흡수 (환경 → 계)
- $Q < 0$: 계가 에너지를 방출 (계 → 환경)
- $Q = 0$: 열평형 상태

열의 단위: SI 단위는 줄(J)이다.

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}, \quad 1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal} = 4186.8 \text{ J}$$

열용량과 비열

열용량(heat capacity) C : 물체의 온도를 1도 올리는 데 필요한 열

$$Q = C\Delta T = C(T_f - T_i)$$

비열(specific heat) c : 단위 질량당 열용량

$$Q = cm\Delta T = cm(T_f - T_i)$$

물질	비열 c (J/(kg·K))
물	4187
얼음 (-10°C)	2220
알루미늄	900
유리	840
구리	386
납	128

물의 비열이 유난히 크다. 그래서 바닷가의 기온 변화가 내륙보다 작다.

열량 보존 (열량측정법)

고립된 계에서 모든 열의 합은 0이다:

$$\sum Q_i = 0$$

뜨거운 구리(m_c , 온도 T_c)를 찬 물(m_w , 온도 T_w)에 넣으면:

$$c_c m_c (T_f - T_c) + c_w m_w (T_f - T_w) = 0$$

평형 온도:

$$T_f = \frac{c_c m_c T_c + c_w m_w T_w}{c_c m_c + c_w m_w}$$

예제: 열량측정

75 g의 구리 조각을 312°C 로 가열한 후 220 g의 물(12°C)에 넣는다. 비커의 열용량은 $C_b = 45 \text{ cal/K}$ 이다.

$$c_c m_c (T_f - T_c) + C_b (T_f - T_i) + c_w m_w (T_f - T_i) = 0$$

분자: $(0.0923)(75)(312) + (45)(12) +$
 $(1.00)(220)(12) = 5339.8 \text{ cal}$

분모: $(1.00)(220) + 45 + (0.0923)(75) = 271.9 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$

$$T_f = \frac{5339.8}{271.9} \approx 20^{\circ}\text{C}$$

상변화의 열

물질이 **상전이(phase change)** 를 겪을 때, 온도 변화 없이 열이 흡수/방출된다:

$$Q = Lm$$

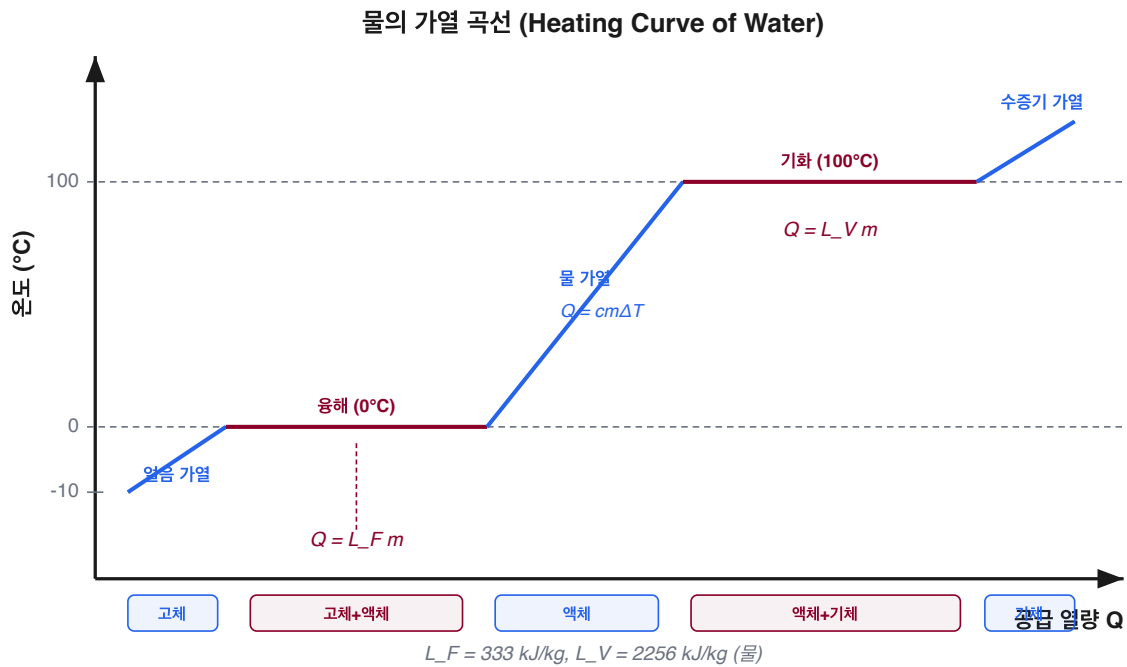
- **L : 변환열(heat of transformation)** (J/kg)
- **융해열(heat of fusion) L_F** : 고체 ↔ 액체
- **기화열(heat of vaporization) L_V** : 액체 ↔ 기체

물의 경우:

$$L_F = 333 \text{ kJ/kg}, \quad L_V = 2256 \text{ kJ/kg}$$

기화열이 융해열보다 훨씬 크다. 분자를 완전히 분리시키는 데 더 많은 에너지가 필요하기 때문이다.

상변화 다이어그램



얼음을 계속 가열할 때 온도 변화: 얼음 가열 → 용해 (0°C 유지) → 물 가열 → 기화 (100°C 유지) → 수증기 가열

상전이 구간에서는 공급된 열이 **분자 간 결합을 끊는 데** 사용되므로 온도가 올라가지 않는다.

예제: 얼음을 물로 만들기

$m = 720$ g의 얼음이 -10°C 에 있다. 이것을 15°C 물로 만드는 데 필요한 열은?

1단계. 얼음을 -10°C 에서 0°C 로 가열:

$$Q_1 = c_{\text{ice}}m\Delta T = (2220)(0.720)(10) \approx 16.0 \text{ kJ}$$

2단계. 0°C 에서 얼음을 녹임:

$$Q_2 = L_F m = (333)(0.720) \approx 239.8 \text{ kJ}$$

3단계. 0°C 물을 15°C 로 가열:

$$Q_3 = c_{\text{water}}m\Delta T = (4187)(0.720)(15) \approx 45.2 \text{ kJ}$$

합계: $Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 16.0 + 239.8 + 45.2 \approx 301 \text{ kJ}$

대부분의 에너지가 **얼음을 녹이는 데** 사용된다!

18.5 열역학 제1법칙

열과 일

실린더에 갇힌 기체가 피스톤을 밀어 팽창할 때, 기체가 한 미소 일은:

$$dW = p dV$$

부피가 V_i 에서 V_f 로 변할 때 전체 일:

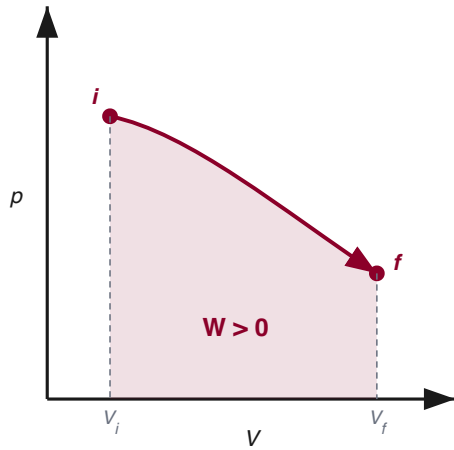
$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

- 기체가 **팽창** 하면 ($V_f > V_i$): $W > 0$ (기체가 일을 함)
- 기체가 **압축** 되면 ($V_f < V_i$): $W < 0$ (외부가 기체에 일을 함)
- **등적 과정** ($V = \text{const}$): $W = 0$

p-V 다이어그램

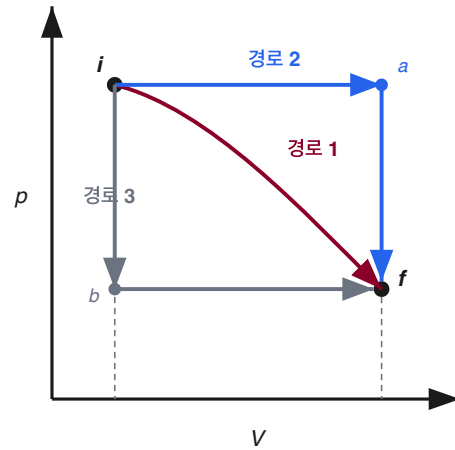
p-V 다이어그램과 경로 의존성

일 = 곡선 아래 면적



$$W = \int p dV$$

경로에 따라 W가 다르다



W: 경로 의존적 (path dependent)

ΔE_{int} : 경로 무관 (state function)

$$\Delta E_{int} = Q - W \text{ (열역학 제1법칙)}$$

경로 의존성

p - V 다이어그램에서 **곡선 아래의 면적** 이 기체가 한 일 W 에 해당한다.

같은 시작 상태 i 에서 같은 끝 상태 f 로 가더라도, **경로에 따라** W 와 Q 가 다르다:

- 등압 경로: $W = p(V_f - V_i)$ (넓은 면적)
- 등적 + 등압: 두 단계로 가면 면적이 줄어듦
- 직접 곡선 경로: 그 사이의 값

그러나 $Q - W$ 는 항상 같다. 이것이 열역학 제1법칙으로 이어진다!

순환 과정(cycle): $i \rightarrow f \rightarrow i$ 로 돌아오면, 시계 방향 순환의 알짜 일은 **양(+)** 이다 (닫힌 곡선 내부 면적).

열역학 제1법칙

$$\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = Q - W$$

- E_{int} : 내부 에너지(internal energy). 상태 함수 (경로에 무관)
- Q : 계가 흡수한 열 ($Q > 0$ 이면 흡수, $Q < 0$ 이면 방출)
- W : 계가 한 일 ($W > 0$ 이면 팽창, $W < 0$ 이면 압축)

미분 형태:

$$dE_{\text{int}} = \delta Q - \delta W$$

이것은 에너지 보존 법칙의 열역학적 표현이다.

제1법칙의 특수한 경우들

과정	조건	결과
등온(isothermal)	$\Delta T = 0, \Delta E_{\text{int}} = 0$ (이상기체)	$Q = W$
단열(adiabatic)	$Q = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = -W$
등적(constant volume)	$W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q$
순환(closed cycle)	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = W$
자유 팽창(free expansion)	$Q = W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = 0$

등온 과정 ($\Delta T = 0$, 이상기체)

이상기체에서 내부 에너지는 온도만의 함수이므로 $\Delta E_{\text{int}} = 0 \rightarrow Q = W$.

상태식 $pV = nRT$ 에서 T 가 일정하면 $p = nRT/V$. 이를 적분:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = \boxed{nRT \ln \frac{V_f}{V_i}}$$

p-V 도해에서는 $pV = \text{const}$ 쌍곡선.

단열 과정 ($Q = 0$)

계와 환경 사이에 열교환이 없다. 두 가지 상황: ① 계가 완벽히 단열되어 있거나 ② 과정이 매우 빠르게 일어나 열이 전달될 시간이 없을 때.

$$\text{제1법칙: } \Delta E_{\text{int}} = -W$$

이상기체 상태식 + 비열 관계로부터 (다음 19장 유도):

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

여기서 $\gamma = C_p/C_V$. p-V 도해에서 단열 곡선은 등온 쌍곡선보다 **더 가파르다** ($\gamma > 1$).

- 단열 팽창: 기체가 일을 함 ($W > 0$) $\rightarrow \Delta E_{\text{int}} < 0 \rightarrow$ **온도 감소**
- 단열 압축: 외부가 일을 함 ($W < 0$) $\rightarrow \Delta E_{\text{int}} > 0 \rightarrow$ **온도 증가**

디젤 엔진은 공기를 단열 압축해서 온도를 올려 연료를 점화시킨다.

등적 과정과 순환 과정

등적 과정 ($W = 0$): 부피가 변하지 않으므로

$$\Delta E_{\text{int}} = Q$$

열을 가하면 전부 내부 에너지 증가(온도 상승)로 간다.

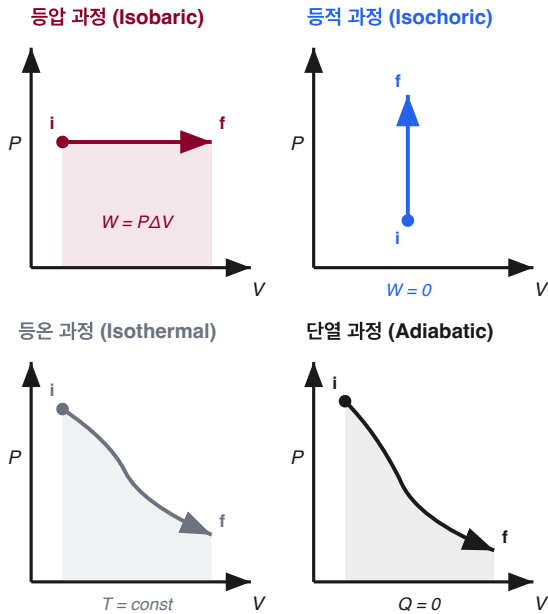
순환 과정 ($\Delta E_{\text{int}} = 0$): 계가 원래 상태로 돌아오면

$$Q = W$$

- p-V 다이어그램에서 닫힌 곡선의 면적이 한 순환 동안의 알짜 일
- 시계 방향: $W_{\text{net}} > 0$ (열기관)
- 반시계 방향: $W_{\text{net}} < 0$ (냉동기, 열펌프)

네 과정의 p-V 도해 비교

PV 다이어그램: 열역학 과정



열역학 제1법칙 특수 경우

$\Delta E_{int} = Q - W$

등압 (Isobaric):
 $W = P\Delta V, \Delta E_{int} = Q - P\Delta V$

등적 (Isochoric):
 $W = 0, \Delta E_{int} = Q$

등온 (Isothermal):
 $\Delta E_{int} = 0, Q = W$ (이상기체)

단열 (Adiabatic):
 $Q = 0, \Delta E_{int} = -W$

자유팽창 (Free Expansion):
 $Q = W = 0, \Delta E_{int} = 0$

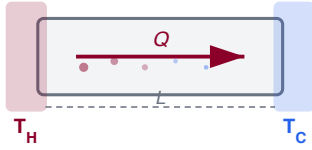
같은 시작점에서 출발해도 등온/등압/등적/단열 경로에 따라 끝점과 일($\int p dV = \text{곡선 아래 면적}$)이 모두 다르다.

시뮬레이션: 열역학 과정 시뮬레이션 PV 다이어그램 시뮬레이션

18.6 열전달 메커니즘

세 가지 열전달 방식

전도 (Conduction)

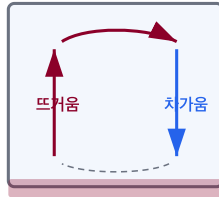


$$P_{\text{cond}} = kA(T_H - T_C)/L$$

k: 열전도율, A: 단면적

분자의 진동이 이웃에 에너지를 전달

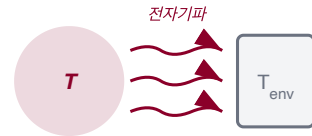
대류 (Convection)



열원

유체의 흐름에 의한 열에너지 수송

복사 (Radiation)



$$P_{\text{rad}} = \sigma \epsilon A T^4$$

σ : 슈테판-볼츠만 상수

ϵ : 방사율 (0~1)

매질 없이 전자기파로 에너지 전달

비교: 전도와 대류는 매질이 필요, 복사는 진공에서도 가능 (태양 → 지구)

열전달률: $P = dQ/dt$ (단위: $W = J/s$)

전도 (Conduction)

물질 내부에서 분자의 진동이 이웃 분자에 에너지를 전달하는 방식이다. **매질이 필요하다.**

단위 시간당 전도되는 열(열전달률):

$$P_{\text{cond}} = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L}$$

- k : **열전도율(thermal conductivity)** (W/(m·K))
- A : 단면적, L : 두께
- $T_H - T_C$: 양끝의 온도 차

물질	k (W/(m·K))
구리	401
알루미늄	235
유리	1.0
나무	0.12
공기	0.026

구리 냄비가 열을 잘 전달하는 이유, 그리고 나무 손잡이를 쓰는 이유가 여기에 있다.

열저항과 복합벽

열저항(thermal resistance):

$$R = \frac{L}{kA}$$

직렬로 연결된 여러 층의 벽:

$$P_{\text{cond}} = \frac{T_H - T_C}{\sum R_i} = \frac{T_H - T_C}{\sum L_i / (k_i A)}$$

겨울에 외벽이 여러 층(벽돌 + 단열재 + 석고보드)으로 이루어진 이유: 각 층의 열저항을 합산하여 전체 열전달을 줄인다.

대류 (Convection)

유체(액체 또는 기체)의 **흐름** 에 의한 열전달이다.

- **자연 대류(natural convection):** 뜨거운 유체는 밀도가 낮아 올라가고, 차가운 유체는 내려온다 → 대류 순환
- **강제 대류(forced convection):** 팬, 펌프 등으로 유체를 강제로 순환

예시: 난방기 위의 따뜻한 공기 상승, 냄비 속 물의 순환, 해풍과 육풍

복사 (Radiation)

전자기파에 의한 열전달이다. **매질이 필요 없다**. 태양에서 지구까지 진공을 통해 에너지가 전달된다.

슈테판-볼츠만 법칙(Stefan-Boltzmann law):

$$P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A T^4$$

- $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$: 슈테판-볼츠만 상수
- ε : **방사율(emissivity)**, $0 \leq \varepsilon \leq 1$
- A : 표면적
- T : 절대 온도 (K)

알짜 복사 열전달률: 환경 온도가 T_{env} 일 때

$$P_{\text{net}} = \sigma \varepsilon A (T^4 - T_{\text{env}}^4)$$

T^4 에 비례하므로 고온에서 복사가 지배적이다.

예제: 사람의 복사 열손실

체온 $T = 310$ K, 환경 $T_{\text{env}} = 293$ K, 피부 면적 $A = 1.8$ m²,
방사율 $\varepsilon = 0.97$ 일 때:

$$P_{\text{net}} = (5.67 \times 10^{-8})(0.97)(1.8)(310^4 - 293^4)$$

$$310^4 = 9.235 \times 10^9, \quad 293^4 = 7.370 \times 10^9$$

$$P_{\text{net}} = (5.67 \times 10^{-8})(0.97)(1.8)(1.865 \times 10^9) \approx 185 \text{ W}$$

옷을 입으면 방사율이 줄고 대류도 고려해야 하지만, 인체가 상당한 열을 복사로 잃는다는 것을 알 수 있다.

Review & Summary

핵심 개념

개념	공식
온도 변환	$T_C = T - 273.15, T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$
선팽창	$\Delta L = \alpha L \Delta T$
부피 팽창	$\Delta V = \beta V \Delta T, \beta = 3\alpha$
열과 비열	$Q = cm\Delta T$
상변화의 열	$Q = Lm$

핵심 개념 (계속)

개념	공식
기체가 한 일	$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV$
열역학 제1법칙	$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$
전도	$P_{\text{cond}} = kA(T_H - T_C)/L$
복사	$P_{\text{rad}} = \sigma \epsilon AT^4$

기억할 것:

- **열역학 제0법칙** 이 온도 측정의 기초이다
- **열** 은 온도 차이에 의한 에너지 전달이지, 물체가 "갖고 있는" 것이 아니다
- **W 와 Q 는 경로 의존적** 이지만, $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$ 는 경로에 무관하다
- 상변화 중에는 온도가 변하지 않지만 열의 흡수·방출이 일어난다
- p-V 다이어그램에서 곡선 아래 면적 = 기체가 한 일