

Chapter 5: 열역학 제 1법칙

■ 문제해석 및 풀이 기법

- 검사질량 혹은 검사체적의 선택해서 시스템을 정한다.
- 초기상태와 최종상태에 대한 정보가 있는 지를 확인한다.
- 상태 사이의 일어나는 과정에 대한 정보를 파악한다(예를 들어서 상태량 사이에 주어진 함수관계)
- 선도를 이용한 상태에 대한 정보를 표시한다.
- 순수물질의 거동에 대한 열역학 모델을 정한다(상태량표 혹은 이상기체거동, 압축성인자).
- 적용할 법칙을 정한다(질량보존의 법칙, 열역학 제 1법칙, 이상기체상태방정식)
- 풀이기법 선택해서 구하고자 하는 정보를 푼다.

간단히 말해서, 문제를 통해 주어진 정보 파악하고 주어진 정보를 재구성하여, 구하고자 하는 정보를 파악한 후에, 주어진 정보와 구하고자 하는 정보사이의 관계를 살펴보고, 그 둘사이의 관계를 정의하는 법칙을 이용해 문제 풀이.

예시) 초기 혹은 최종 온도와 압력이 어떤지 - 정보파악

그때의 물질의 상은 어떻게, 선도에 표시할 수 있는지 -주어진 정보를 재구성

주어진 상을 포함하는 시스템에 적용될 수 있는 모델 및 법칙이 무엇인지 - 정보간의 관계 및 법칙 정함 (예를 들어서 상태량표를 이용할 것인가 이상기체상태방정식을 이용할 것인가를 물질의 상을 통해 선택)

최종적으로 문제를 푼다.

■ 열역학 제 1법칙 예시

1) 입을 작게 벌려 바람을 부는 경우 - 찬바람

나가는 공기는 부피가 작은 상태에서 커짐 - 외부로 일을 함 (체적의 팽창을 통해 일을 함)

외부로부터 일을 했기 때문에 내부에너지는 감소 - 온도가 떨어져서 찬바람이된다.

2) 입을 크게 벌려 바람을 부는 경우 - 뜨거운 바람

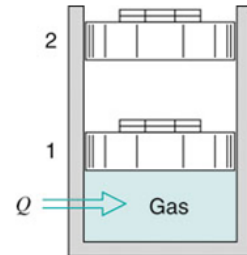
나가는 공기는 부피가 큰 상태에서 작아짐 - 외부로부터 일을 받음 (압축은 일을 요한다)

외부로부터 일을 받았으므로 내부에너지 증가 - 온도가 올라가서 뜨거운 바람이 나온다.

문제해석 및 풀이기법	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 검사질량 혹은 검사체적의 선택 ➤ 초기상태와 최종상태 	문제를 통해 주어진 정보 파악 정보를 재구성하여, 구하고자 하는 정보를 파악
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 상태 사이의 일어나는 과정에 대한 정보 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 상태량 사이에 주어진 함수관계 ➤ 선도를 이용한 상태에 대한 정보 표시 	주어진 정보와 구하고자 하는 정보 사이의 관계를 파악
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 순수물질의 거동에 대한 열역학 모델 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 상태량표 혹은 이상기체거동, 압축성인자 ➤ 적용할 법칙 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 열역학 제 1법칙, 이상기체상태방정식 ➤ 풀이기법 선택 	관계를 정의하는 법칙을 이용해 문제 풀이

■ 열역학 상태량 - 엔탈피

에너지 보존 방정식은 다음과 같이 정의되고, 그림에서 보여지는 시스템처럼 위치에너지와 운동에너지의 변화가 없다고 한다면 에너지의 변화는 내부에너지의 변화와 같고, 내부에너지의 변화는 열과 일의 차이와 같다고 할 수 있다.



$$U_2 - U_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

$dE = dU + mVdV + mgdZ = \delta Q - \delta W$ 위치에너지와 운동에너지의 변화가 없다고 가정

$dE = dU = \delta Q - \delta W$

적분을 하고 다시 정리하면, 1에서 2사이의 열은 1상태와 2상태의 내부에너지의 차이와 그때의 일의 합과 같다. 이때 일은 PdV 를 상태1에서 2까지의 경로로 적분한 것과 같으므로 아래와 같이 쓸 수 있고, 정압과정이므로 압력 곱하기 체적변화를 통해서 구할 수 있다. (왜 정압과정인가? 관심의 대상이 되는 검사질량의 압력은 피스톤을 통하여 가해지는 압력뿐이고, 이 압력은 기체가

팽창하더라도 그대로이다 - 대기압과 피스톤의 질량에 의한 압력 외에 다른 외력이 상태가 변함에 따라 가해지지 않았다)

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2 \quad {}_1W_2 = \int_1^2 PdV$$

$${}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1) \quad \text{정압과정}$$

구한 일을 대입을 해서 풀어주면, 내부에너지의 차이 더하기 압력과 체적의 변화의 곱이 되고, 결과적으로 초기상태에서 최종상태까지의 열전달은 초기상태와 최종상태의 U+PV의 차이라고 할 수 있게 된다. 이때의 이 차이를 H라 표시하고 엔탈피라 한다.

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + PV_2 - PV_1 = \underline{U_2 + PV_2} - \underline{(U_1 + PV_1)}$$

$$H = U + PV \quad \text{엔탈피}$$

▶ 엔탈피의 상태량으로서의 성질

- H는 질량에 따라 변하므로 종량적 상태량임
- 단위질량당 엔탈피: 비엔탈피 - 강성적 상태량
- 초기상태와 최종상태에 의존하므로, 점함수이다.
- 엔탈피는 순수물질의 상태량이다 - 엔탈피식을 보면 내부에너지와 압력 비체적(혹은 체적)으로 구성되어 있으므로, 상태량의 조합으로 엔탈피를 표현하고, 이 또한, 상태량이 된다.

▶ 엔탈피의 단위: kJ (정압과정의 예시에서 엔탈피는 열전달량과 같다고 했으므로 열전달량의 단위는 kJ, 혹은 일과 내부에너지를 통해서 계산했으므로 kJ이 된다)

1) 내부에너지와 엔탈피

식에서 알 수 있듯이 내부에너지와 엔탈피는 서로의 값을 계산할 수 있게끔 되어 있다. 많은 열역학 표에서는 비내부에너지의 값이 제시되어 있지 않으므로, 엔탈피를 이용해서 계산한다.

$$H = U + PV \quad \text{총엔탈피}$$

$$h = u + Pv \quad \text{비엔탈피 (단위질량당 엔탈피)}$$

포화액체의 엔탈피 포화증기의 엔탈피

Saturated Water				
ENTHALPY, kJ/kg				
Temp. (°C)	Press. (kPa)	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g
0.01	0.6113	0.00	2501.35	2501.35
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74
15	1.705	62.98	2465.93	2528.91
20	2.339	83.94	2454.12	2538.06
25	3.169	104.87	2442.30	2547.17
30	4.246	125.77	2430.48	2556.25
35	5.628	146.66	2418.62	2565.28
40	7.384	167.54	2406.72	2574.26
45	9.593	188.42	2394.77	2583.19
50	12.350	209.31	2382.75	2592.06

포화액체와 포화증기의 엔탈피 차이 ($h_g - h_f$)

<상태량 표에서의 엔탈피>

2) 정압과정에서의 일과 에너지의 변화 = 엔탈피 = 열전달량

정압과정에서는 엔탈피는 열량의 변화와 같다. 이는 정압과정에만 해당하고, 일을 단순히 압력과 체적변화의 곱으로 나타낼 수 없는 경우(폴리트로프과정, 등온과정)에는 성립하지 않는다. 하지만, 엔탈피는 상태량으로서의 점함수이고 엔탈피를 이용해서 내부에너지를 계산하는 것은 항상 성립한다

▶ 엔탈피는 상태량이므로 상태량표에 주어져 있다. 앞선 상태량(비체적과 내부에너지)과 똑 같은 형태로 주어져 있으며, 포화상태의 경우 포화액체상태, 포화증기상태, 포화액체와 증기상태의 차이가 상태량표에 제시되어 있다. 비체적과 내부에너지의 경우와 마찬가지로, 엔탈피를 이용해서 건도를 구할 수 있고, 건도가 주어져 있는 경우 포화상태의 총 엔탈피를 구할 수 있다.

$$H = H_{liq} + H_{vap} \longrightarrow mh = m_{liq}h_f + m_{vap}h_g$$

$$h = \frac{m_{liq}}{m} h_f + \frac{m_{vap}}{m} h_g$$

1 - 건도 건도: 증기의 질량 분율

$$h = (1 - x)h_f + xh_g$$

비체적, 내부에너지와 $v = (1 - x)v_f + xv_g$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

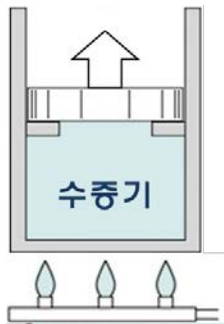
같은 형태의 식

$$u = (1 - x)u_f + xu_g$$

♠ 왜 엔탈피를 사용? - 열역학에서 $u + pv$ 의 형태가 자주 등장하게 됨에 따라 엔탈피로 정의했다.

<예제 1>

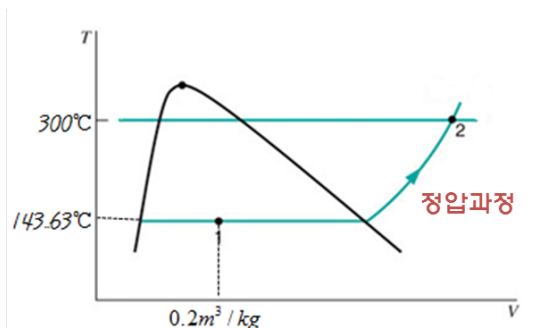
체적이 0.1m^3 인 피스톤이 장치된 실린더에 압력 0.4MPa , 질량 0.5kg 의 증기가 있다. 압력이 일정하게 유지되면서 열이 증기로 전달되어 온도가 300 도가 되었다. 이 과정에서의 열전달량과 일량을 구하라.



주어진 정보: 초기상태의 체적, 압력, 질량 / 최종상태의 온도와 압력 (정압과정)

구하고자 하는 정보: 열전달량과 일량

- 열전달량 - 엔탈피로 부터 구함
- 일량 - 정압과정에서의 일 = 압력 X 체적변화



상태 1과 2를 확정할 수 있고, 관련 정보를 상태량 표를 통해서 얻을 수 있다.

■ 연습문제

1. 물의 온도가 300°C일 때 비체적이 0.015 m³/kg이다. 이 때의 압력과 비내부에너지와 비엔탈피를 구하여라

300°C에서 $v_f < 0.015 \text{ m}^3/\text{kg} < v_g$ 이므로, 포화상태이다. 그러므로, 압력은 포화압력 8581kPa이다
이 때 건도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.015 - 0.001404}{0.02027} = 0.67 = 67\%$$

그러므로, 내부에너지와 엔탈피는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = u_f - x \cdot u_{fg} = 1331.97 + 0.67 \times 1230.99 = 2156.73 \text{ kJ/kg}$$

$$h = h_f - x \cdot h_{fg} = 1344.01 + 0.67 \times 1404.93 = 2285.31 \text{ kJ/kg}$$

2. 0.1m³ 체적을 가진 강체안에 물(또는 증기)이 압력 500kPa 온도 200°C에 놓여 있다. 이 물이 50°C까지 되는 변화를 T-v선도에 나타내고, 이 때 외부로 방출해야 하는 열량을 구하여라. 이때 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없다고 가정한다

열역학 제 1법칙에 의해서

$$\Delta E = \Delta U + \Delta PE + \Delta KE = Q - W$$

주어진 조건에 의해 $\Delta PE = \Delta KE = W = 0$ 이므로, 위의 식은 아래와 같이 단순화 된다.

$$\Delta U = Q = m(u_2 - u_1)$$

그러므로, 각 상태의 내부에너지와 질량을 구해야 한다.

500kPa, 200°C에서 물은 과열증기상태이고 이 때의 내부에너지 및 비체적은 다음과 같다

$$u_1 = 2642.91 \text{ kJ/kg}, \quad v_1 = 0.42492 \text{ m}^3/\text{kg}$$

그러므로 이때의 질량은

$$\frac{V}{v_1} = \frac{0.1}{0.42492} = 0.235 \text{ kg}$$

정적과정이므로 50°C에서 $v_2 = 0.42492 \text{ m}^3/\text{kg}$ (질량은 마찬가지로 0.235 k)이고 이는 포화상태라 할 수 있고, 건도는 다음과 같이 구할 수 있다

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.42492 - 0.001012}{12.0308} = 0.0352 = 3.52\%$$

그러므로, 내부에너지는 다음과 같이 구한다.

$$u_2 = u_f - x \cdot u_{fg} = 209.30 + 0.0352 \times 2234.17 = 287.94 \text{ kJ/kg}$$

그러므로, 방출해야할 열량은,

$$Q = \Delta U = m(u_1 - u_2) = 0.235 \times (287.94 - 2642.91) = -553.42 \text{ kJ}$$

3. 압력 200kPa, 건도 30%인 물 5kg이 정압과정으로 온도가 80°C 증가하였다. 엔탈피 변화량은 얼마인가? 단, 온도는 소수점 첫째자리에서 반올림하여 이용하라

건도가 주어졌으므로, 포화상태이다. 그러므로 표 B.1.2를 이용하면 다음과 같은 정보를 얻을 수 있다.

$$h_f = 504.68 \text{ kJ/kg}, \quad h_g = 2706.63 \text{ kJ/kg}, \quad T_1 = 120^\circ\text{C}$$

그러므로, 이때의 엔탈피는 건도와 정의에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_1 = h_f + xh_{fg} = 504.68 + 0.3 \times 2201.96 = 1165.27 \text{ kJ/kg}$$

온도가 정압하에서 80°C 증가하였으므로, $T_2 = 200^\circ\text{C}$ 가 되고 이때의 상태는 포화온도보다 높으므로, 과열증기상태가 된다. 그러므로, 표 B.1.3를 이용하면, $h_2 = 2870.46 \text{ kJ/kg}$

비엔탈피의 변화량은 $h_2 - h_1 = 2870.46 - 1165.27 = 1705.19 \text{ kJ/kg}$

그러므로, 엔탈피의 변화량은 $m(h_2 - h_1) = 5 \times 1705.19 = 8525.95 \text{ kJ/kg}$