

## 제 3 장 이 상 기 체

### 3-1 이상기체의 정의

(1) 이상기체 (ideal gas) 또는 완전가스(perfect gas)

Boyle-Charles의 법칙 즉, 이상기체의 특성식을 엄격히 따르는 가상적인 기체.

가정조건 ① \_\_\_\_\_ ② 분자간 거리가 멀고 분자력 무시 ③ 완전 탄성체

(2) 실재가스 (real gas)

① \_\_\_\_\_ : 액화하기 어려운 기체로서 이상기체로 취급 가능

(예) 수소(H<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 헬륨(He), 공기.

② \_\_\_\_\_ : 상변화(액체 ⇌ 기체)가 쉽게 일어나는 기체로서 이상기체로 취급할 수 없음.

단 과열도가 높은 경우는 이상기체에 근접함.

(예) 수증기(H<sub>2</sub>O), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 할로겐탄화수소(상품명: 프레온)등의 냉매

◎ 과열도 : 과열증기의 온도와 동일압력의 포화온도와 차

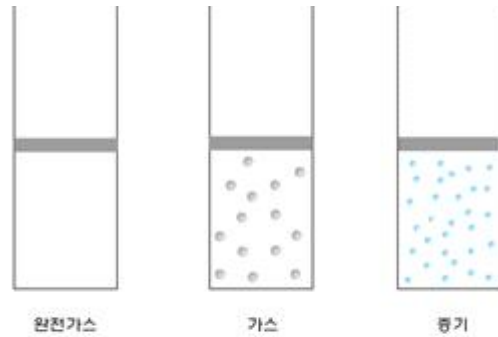


그림 3-1 각종 기체의 비교

### 3-2 이상기체의 특성식

(1) 보일(Boyle, 1662년, 영국)의 법칙 또는 마리오(Mariotte, 1676년, 프랑스)의 법칙  
온도가 일정할 때 가스의 압력과 비체적은 서로 반비례.

즉,  $t = \text{const}(\text{일정}) \quad v \propto \frac{1}{p} \quad \text{또는} \quad [kJ]$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} \quad (3-1)$$

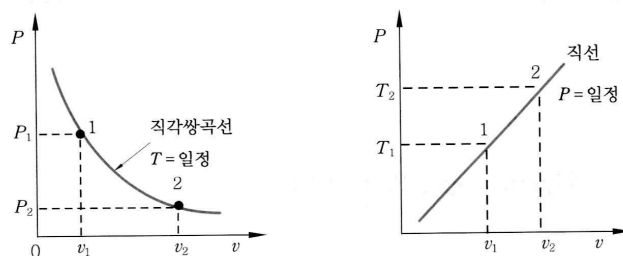


그림 3-2 보일과 샤알의 법칙

(2) 샤알(Charles, 1782년, 프랑스)의 법칙 또는 게이루삭(Gay-Lussac, 1802년, 프랑스)의 법칙  
압력이 일정할 때 가스의 비체적은 온도에 비례

비체적  $v$ 은 온도 1℃가 변함에 따라 0℃일 때의 비체적  $v_o$ 의  $\frac{1}{273.15}$  씩 변화.

즉,  $p = C$  일 때  $t$  °C 의 체적  $v$ 는

$$\begin{aligned} v &= v_o + \frac{t}{273.15} v_o = v_o \left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \\ &= v_o \left(\frac{273.15 + t}{273.15}\right) = v_o \frac{T}{T_o} \end{aligned} \quad (3-2)$$

이때 체적팽창계수는  $\frac{1}{273.15}$  이다.

$p = C$  일때

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad \text{or} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (3-3)$$

(3) 이상기체의 상태방정식 또는 특성식

Boyle-Charles의 법칙 ( Boyle의 법칙 + Charles의 법칙)

$$\frac{pv}{T} = C \quad (3-6)$$

$C$  대신에 상수  $R$ 을 대입하면

$$\frac{pv}{T} = R \quad (3-7)$$

(SI 단위)

(공학단위)

윗 식을 이상기체의 상태식이라 하며  $R$ 을 기체상수 또는 가스정수이라 한다.

◎  $R$  의 단위

$$R = \frac{pv}{T} = \frac{[N/m^2 \cdot m^3/kg]}{[K]} = [Nm/kgK] = [J/kgK] \quad (\text{SI 단위}) \quad (3-8)$$

$$R = \frac{pv}{T} = \frac{[kg_f/m^2 \cdot m^3/kg_f]}{[^\circ C]} = [kg_f m/kg_f ^\circ C] \quad (\text{공학단위})$$

즉, 압력이 일정한 상태에서 1 kg의 기체가 1K 변화할 때 한 일량.

### 3-3 일반가스정수

가스의 상태변화 해석에서 단위질량(중량)외에 1 kmol과 단위체적(표준상태에서 1  $m^3$ 의 체적)을 사용.

(1) 아보가드로 법칙 (Avogadro's law) 또는 기체분자수의 법칙

온도와 압력이 같은 상태에서 같은 체적속에 들어있는 모든 가스의 분자수는 같다. 즉 온도와 압력이 같은 경우 모든 가스의 동일한 분자수가 차지하는 체적은 같다.

가스의 밀도  $\rho$ 는  $\frac{1}{v}$ 이므로

$$pv = RT \text{에서}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} \quad (3-9)$$

2종의 가스에 대하여 가스의 분자량을  $M_1, M_2$  라 하면

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3-10)$$

가스의 분자량  $M$ 과 가스정수  $R$ 과의 곱을 일반가스상수(universal gas constant)  $\overline{R}$ 라 하며, 이 값은 모든 기체에 대하여 동일하다.

$$\overline{R} = MR$$

$$\overline{R} = \frac{kJ/kmolK}{kg \cdot m / kmol K} \quad (3-11)$$

따라서 가스정수는 분자량을 알면 다음 식과 같이 일반가스정수로부터 구할 수 있다.

$$(3-12)$$

주기율표

| 주기 \ 족 | 1  | 2  | 3             | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|--------|----|----|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1      | H  |    |               |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | He |
| 2      | Li | Be |               |    |    |    |    |    |    |    |    |    | B  | C  | N  | O  | F  | Ne |
| 3      | Na | Mg |               |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Al | Si | P  | S  | Cl | Ar |
| 4      | K  | Ca | Sc            | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 5      | Rb | Sr | Y             | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  | Xe |
| 6      | Cs | Ba | La<br>~<br>Lu | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7      | Fr | Ra | Ac<br>~<br>Lr |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

### 3-4 이상기체에 관한 Joule의 실험

A용기에 22 ata의 고압공기가 들어 있고 B의 용기에 진공상태에서 밸브를 열어 자유 팽창하여 열평형이 이루어진 후 물의 온도를 측정하였다. 이때 가스가 외부와의 열과 일의 수수없이 자유 팽창하는 동안 온도의 변화가 없었다.

$$dq = du + dw$$

$$dq = 0, \quad dw = 0$$

$$\therefore du = 0$$

$$(3-13)$$

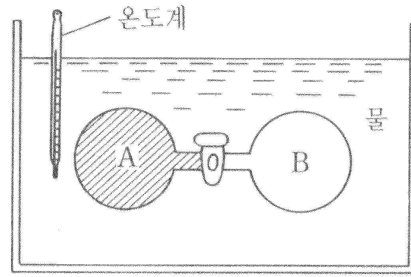


그림 3-4 Joule의 실험 (영국, 1844년)

즉, 가스의 내부에너지는 온도에만 의존하며 압력이나 비체적과는 무관하다.

$$u = u(t) \quad (3-14)$$

$$\left| \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T = 0, \quad \left| \frac{\partial u}{\partial p} \right|_T = 0$$

(cf) **Joule - Thomson 효과**

실제기체의 경우 팽창도중 분자간의 운동에너지가 소비되어 온도가 낮아짐.

$$\mu = \left| \frac{\partial T}{\partial P} \right|_h \quad (3-15)$$

$\mu$  : Joule - Thomson 계수

엔탈피의 경우

$$h = u + pv = u + RT = h(T) \quad (3-16)$$

$$\uparrow pv = RT$$

$$\left| \frac{\partial h}{\partial v} \right|_T = 0, \quad \left| \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T = 0$$

### 3-5 이상기체의 비열

(1) 정적변화 ( $dv = 0$ )

$$dq = du + pdv = du$$

$$C_v = \left| \frac{\partial q}{\partial T} \right|_v = \left| \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v = \frac{du}{dT} \quad \uparrow u = u(T)$$

$$\therefore du = C_v dT \quad [kJ/kg] \quad (3-17)$$

$$dU = mC_v dT \quad [kJ]$$

$$u_2 - u_1 = \Delta u = \int_1^2 du = C_v (T_2 - T_1) \quad (3-18)$$

$$U_2 - U_1 = \Delta U = \int_1^2 dU = mC_v (T_2 - T_1)$$

(2) 정압 변화 ( $dp = 0$ )

$$dq = dh - vdp = dh$$

$$C_p = \left| \frac{\partial q}{\partial T} \right|_p = \left| \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p = \frac{dh}{dT} \quad \uparrow h = h(T)$$

$$\therefore dh = C_p dT \quad [kJ/kg] \quad (3-19)$$

$$dH = m C_p dT \quad [kJ]$$

$$h_2 - h_1 = \Delta h = \int_1^2 dh = C_p (T_2 - T_1) \quad (3-20)$$

$$H_2 - H_1 = \Delta H = \int_1^2 dH = m C_p (T_2 - T_1)$$

(3)  $C_p$ 와  $C_v$ 의 관계

$$h = u + pv = u + RT$$

$$dh = du + R dT$$

$$du = C_v dT, \quad dh = C_p dT \text{ 이므로}$$

$$C_p dT = C_v dT + R dT$$

$$C_p = C_v + R$$

$$\therefore C_p - C_v = R \quad (3-21)$$

비열비  $k = \frac{C_p}{C_v}$  로 부터  $C_p = k C_v$  를 위 식에 대입하면

$$k C_v - C_v = R$$

$$C_v (k - 1) = R$$

$$\therefore C_v = \frac{1}{k-1} R \quad (3-22)$$

$$\therefore C_p = \frac{k}{k-1} R \quad (3-23)$$

여기서 이상기체의  $C_p$ 와  $C_v$ 는 온도와 관계없이 일정하다.

(cf) 반완전가스(Semi-perfect gas)

이상기체의 상태식은 만족하지만 비열이 온도함수인 기체로서 실제 기체 중 가스가 이에 해당됨.

◎ 비열비 ( $k$ )값

$$1 \text{ 원자분자} : k = \frac{5}{3} \approx 1.67 \text{ ( He, Ne, Ar 등 )}$$

$$2 \text{ 원자분자} : k = \frac{7}{5} \approx 1.40 \text{ ( H}_2, \text{ O}_2, \text{ N}_2, \text{, 공기 등 )}$$

$$3 \text{ 원자분자} : k = \frac{8}{6} \approx 1.33 \text{ ( H}_2\text{O, CO}_2, \text{ SO}_2 \text{ 등 )}$$

### 3-6 이상기체의 상태변화

| 상태변화  | 관련식  | 비고 |
|---|--|----|
| ① 정압변화<br>② 정적변화<br>③ 등온변화<br>④ 단열변화<br>⑤ 폴리트로프변화 | ① $p, v, T$ 관계: _____<br>② 절대일: _____<br>③ 공업일: _____<br>④ 가열량: _____<br>_____<br>⑤ 내부에너지변화량: _____<br>⑥ 엔탈피변화량: _____ |    |

(1) 정압변화(constant pressure change)

또는 등압변화(Isobaric change) :  $dp = 0$

①  $p, v, T$  관계

$$pv = RT$$

$$\frac{v}{T} = \frac{R}{p} = C$$

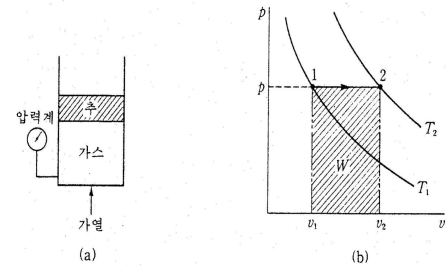


그림 3-5 정압변화

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad \text{또는} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (3-24)$$

② 절대일량 :  $w$

$$dw = p dv$$

$$w = \int_1^2 p dv = p \int_1^2 dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \quad (3-25)$$

$$\uparrow pv = RT$$

③ 공업일량 :  $w_t$

$$dw_t = -v dp$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp = 0 \quad (3-26)$$

④ 가열량 :  $q$

에너지식

$$dq = du + p dv = dh - v dp = dh = C_p dT$$

$$q = \int_1^2 C_p dT = C_p \int_1^2 dT = C_p (T_2 - T_1) \quad (3-27)$$

⑤ 내부에너지 변화량 :  $\Delta u$

$$du = C_v dT$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 du = \int_1^2 C_v dT = C_v \int_1^2 dT = C_v (T_2 - T_1) \quad (3-28)$$

⑥ 엔탈피 변화량 :  $\Delta h$

$$dh = C_p dT$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 dh = \int_1^2 C_p dT = C_p \int_1^2 dT = C_p (T_2 - T_1) \quad (3-29)$$

(2) 정적변화(constant volume change) 또는 등적변화

(Isometric change):  $dv = 0$

①  $p, v, T$  관계

$$pv = RT$$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{V} = C$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ or } \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (3-30)$$

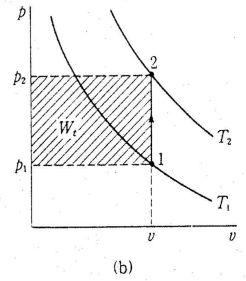
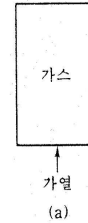


그림 3-6 정적변화

② 절대일량 :  $w$

$$dw = p dv$$

$$w = \int_1^2 p dv = 0 \quad (3-31)$$

③ 공업일량 :  $w_t$

$$dw_t = -v dp$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp = \int_2^1 v dp = v \int_2^1 dp = v(p_1 - p_2) = R(T_1 - T_2)$$

(3-32)

④ 가열량 :  $q$

$$\text{에너지식 : } dq = du + A p dv = du = C_v dT$$

$$q = C_v (T_2 - T_1) = \Delta u \quad (3-33)$$

⑤ 내부에너지 변화량 :  $\Delta u$

$$du = C_v dT$$

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) \quad (3-34)$$

⑥ 엔탈피 변화량 :  $\Delta h$

$$dh = C_p dT$$

$$\Delta h = C_p (T_2 - T_1) \quad (3-35)$$

(3) 등온변화(Isothermal change) 또는 정온변화(constant temperature change) :  $dT = 0$

①  $p, v, T$  관계

$$pv = RT$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \text{ or } \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \quad (3-36)$$

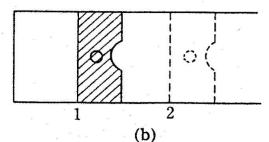
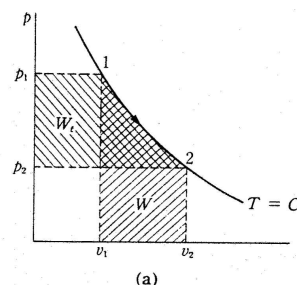


그림 3-7 등온변화

② 절대일량 :  $w$

$$\begin{aligned}
 dw &= p dv \\
 w &= \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT \int_1^2 \frac{dv}{v} \\
 &\quad \uparrow \quad p v = RT \rightarrow p = \frac{RT}{v} \\
 &= RT (\ln v_2 - \ln v_1) = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \\
 &\quad \uparrow \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}
 \end{aligned} \tag{3-37}$$

◎ 적분공식

$$\begin{aligned}
 \int \frac{dx}{x} &= \ln x + C \\
 \int_1^2 \frac{dx}{x} &= \ln x_2 - \ln x_1 = \ln \frac{x_2}{x_1}
 \end{aligned}$$

③ 공업일량 :  $w_t$

$$\begin{aligned}
 dw_t &= -v dp \\
 w_t &= - \int_1^2 v dp = \int_2^1 v dp = \int_2^1 \frac{RT}{p} dp = RT \int_2^1 \frac{dp}{p} \\
 &\quad \uparrow \quad p v = RT \rightarrow v = \frac{RT}{p} \\
 &= RT \ln \frac{p_1}{p_2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = w \\
 &\quad \uparrow \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}
 \end{aligned} \tag{3-38}$$

④ 가열량 :  $q$

에너지식 :  $dq = du + dw = C_v dT + dw = dw$

$$q = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{3-39}$$

⑤ 내부에너지 변화량 :  $\Delta u$

$$\begin{aligned}
 du &= C_v dT = 0 \\
 \Delta u &= 0
 \end{aligned} \tag{3-40}$$

⑥ 엔탈피 변화량 :  $\Delta h$

$$\begin{aligned}
 dh &= C_p dT = 0 \\
 \Delta h &= 0
 \end{aligned} \tag{3-41}$$



(4) 단열변화(adiabatic change) :  $dq = 0$ , 또는 등엔트로피 변화(Isoentropic change) :  $ds = 0$   
 계에 열의 출입이 없는 상태변화로써 내부에너지를 소비하여 외부에 일을 함.

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 내부에너지 | 감소(-) | 증가(+) |
| 일     | 정(+)  | 부(-)  |

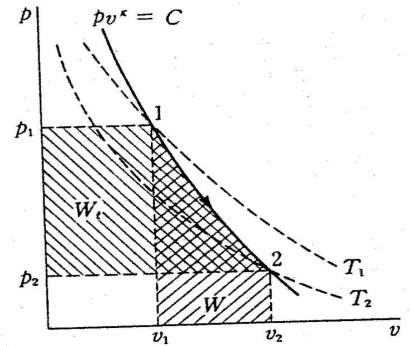


그림 3-8 단열변화

①  $p, v, T$  관계

$p, v, T$ 가 모두 변함

②  $pv$

$$dq = du + p dv = C_v dT + p dv = 0 \quad (3-42)$$

$pv = RT$ 를 양변 미분하면 즉

$$d(pv) = RT$$

$$p dv + v dp = RT$$

$$dT = \frac{p dv + v dp}{R} \quad (3-43)$$

식(3-43)를 (3-42)에 대입

$$C_v \frac{p dv + v dp}{R} + p dv = 0$$

$$C_v (p dv + v dp) + R p dv = 0$$

$$(C_v + R) p dv = -C_v v dp$$

여기서  $C_p - C_v = R$ 에서  $C_v + R = C_p$  이므로

$$C_p p dv = -C_v v dp$$

양변을  $C_v p v$ 로 나누면

$$\frac{C_p}{C_v} \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$$

$$k \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$$

양변을 적분하면

$$k \int \frac{dv}{v} = - \int \frac{dp}{p} + c_1$$

$$k \ln v = - \ln p + c_1$$

$$\ln v^k = - \ln p + c_1$$

$$\ln p v^k = c_1$$

양변을 지수함수(exponential function)화 하면

$$e^{\ln pv^k} = e^{c_1}$$

$$\therefore pv^k = c \quad (3-44)$$

㉞  $Tv$ 관계

$$pv = RT \rightarrow p = \frac{RT}{V} \quad (3-45)$$

$$pV^k = c_1 \quad (3-46)$$

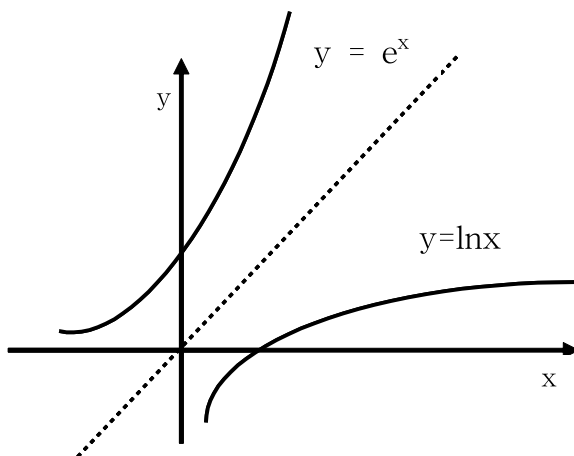
식 (3-45)을 식(3-46)에 대입

$$\frac{RT}{V} V^k = RTV^{k-1} = c_1$$

$$Tv^{k-1} = \frac{c_1}{R} = c$$

$$\therefore TV^{k-1} = c$$

㉟ 지수함수와 자연대수 함수(exponential function and natural logarithm)



(3-47)

그림 3-9 지수 및 자연대수함수

$$e = 2.71828 \dots$$

$$e^x e^y = e^{x+y} \quad \ln(xy) = \ln x + \ln y$$

$$\frac{e^x}{e^y} = e^{x-y} \quad \ln\left(\frac{x}{y}\right) = \ln x - \ln y$$

$$(e^x)^y = e^{xy} \quad \ln(x^a) = a \ln x$$

$\ln x$  는  $e^x$ 의 역함수이다.

$$e^{\ln x} = x$$

$$e^{-\ln x} = e^{\ln(x^{-1})} = e^{\ln \frac{1}{x}} = \frac{1}{x}$$

㉔  $Tp$  관계

$$pv = RT \rightarrow v = \frac{RT}{p} \quad (3-48)$$

$$pv^k = c_1 \quad (3-49)$$

식(3-48)을 식(3-49)에 대입하면  $p\left(\frac{RT}{p}\right)^k = p^{1-k}(RT)^k = c_1$

양변을  $k\sqrt{\quad}$  하면  $p^{\frac{1-k}{k}} RT = k\sqrt{c_1} = c_2$

$$Tp^{\frac{1-k}{k}} = \frac{c_2}{R} = c$$

$$\therefore Tp^{\frac{1-k}{k}} = c \quad (3-50)$$

이상으로부터

$$pv^k = c \quad (3-52)$$

$$TV^{k-1} = c$$

$$Tp^{\frac{1-k}{k}} = c$$

㉕ 절대일량 :  $w$

$$dw = -du = -C_v dT$$

$$\begin{aligned} w &= - \int_1^2 C_v dT = \int_2^1 C_v dT = C_v \int_2^1 dT = C_v (T_1 - T_2) \\ &= \frac{1}{k-1} R (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \end{aligned} \quad (3-53)$$

$$\uparrow c_v = \frac{1}{k-1} AR \quad \uparrow pv = RT$$

㉖ 공업일량 :  $w_t$

$$dw_t = -dh = -C_p dT$$

$$\begin{aligned} w_t &= - \int_1^2 C_p dT = \int_2^1 C_p dT = C_p \int_2^1 dT = C_p (T_1 - T_2) \\ &= \frac{k}{k-1} R (T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1} R (p_1 v_1 - p_2 v_2) = kw \end{aligned} \quad (3-54)$$

$$\uparrow C_p = \frac{k}{k-1} AR \quad \uparrow pv = RT$$

$$\therefore w_t = kw$$

㉗ 가열량 :  $q$

에너지식 :  $dq = du + Aw = 0$

$$\therefore q = 0 \quad (3-55)$$

㉘ 내부에너지 변화량 :  $\Delta u$

$$du = C_v dT$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = C_v (T_2 - T_1) = \frac{1}{k-1} R (T_2 - T_1) = -w \quad (3-56)$$

⑥ 엔탈피 변화량 :  $\Delta h$

$$dh = C_p dT$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) = \frac{k}{k-1} R (T_2 - T_1) = -w_t = -kw = k\Delta u \quad (3-57)$$

(5) 폴리트로픽 변화 (polytropic change)

초이네르(Zeuner)에 의해

$$pv^n = c \quad (3-58)$$

$n$  : polytropic 지수

①  $p, v, T$  관계

$$pv^n = c \quad (3-59)$$

$$TV^{n-1} = c$$

$$Tp^{\frac{1-n}{n}} = c$$

② 절대일량 :  $w$

$$\begin{aligned} w &= \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) \\ &= \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \end{aligned} \quad (3-60)$$

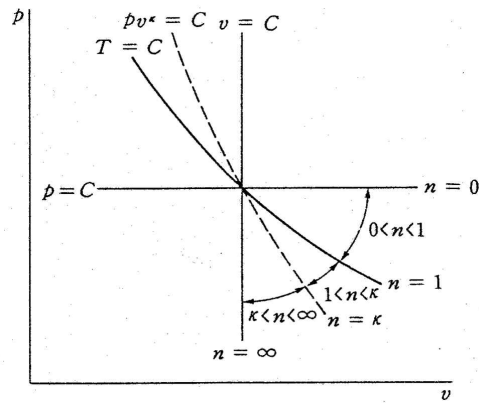


그림 3-10 폴리트로픽 변화

③ 공업일량 :  $w_t$

$$w_t = nw \quad (3-61)$$

④ 가열량 :  $q$

$$dq = du + A p dv$$

$$\begin{aligned} q &= \Delta u + Aw = C_v (T_2 - T_1) + \frac{1}{n-1} R (T_1 - T_2) \\ &= C_v (T_2 - T_1) + \frac{k-1}{n-1} C_v (T_1 - T_2) \\ \uparrow \quad C_v &= \frac{1}{k-1} R \rightarrow R = (k-1) C_v \\ &= \left(1 - \frac{k-1}{n-1}\right) C_v (T_2 - T_1) = \left(\frac{n-k}{n-1}\right) C_v (T_2 - T_1) = C_n (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (3-62)$$

$$C_n = \frac{n-k}{n-1} C_v \quad (3-63)$$

$C_n$  : polytropic 비열

⑤ 내부에너지 변화량 :  $\Delta u$

$$\Delta u = -w \quad (3-64)$$

⑥ 엔탈피 변화량 :  $\Delta h$

$$\Delta h = -kw \quad (3-65)$$

◎  $n$ 값에 의한 상태변화

①  $n = 0$  : 정압비열

$$pV^n = c \text{ 에서 } p = c$$

$$C_n = \frac{n-k}{n-1} C_v = kC_v = C_p \quad (3-66)$$

②  $0 < n < 1$  : 정압변화와 등온변화의 중간

$$C_n = \frac{n-k}{n-1} C_v > 0 \quad (3-67)$$

$$TV^{n-1} = c : T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1}$$

$n-1 < 0$ 이므로 비체적과 온도는 비례한다. 즉 가열량은 온도 상승과 팽창일에 소비되므로 많은 양의 에너지가 소비된다.

③  $n = 1$  : 등온변화

$$pV^n = c \text{ 에서 } pV = c$$

$$C_n = \frac{n-k}{n-1} C_v = \infty \quad (3-68)$$

열을 가하여도 온도는 상승되지 않는다. 즉, 가열량은 모두 팽창일에 소비되고 내부에너지에 사용되지 않으므로 온도는 상승되지 않는다.

④  $n = k$  : 단열변화

$$pV^n = c \text{ 에서 } pV^k = c$$

$$C_n = \frac{n-k}{n-1} C_v = 0 \quad (3-69)$$

열을 가하지 않아도 온도가 변한다. 즉 내부에너지를 소비하여 그 양만큼 일로 변환.