

## 열역학적 계와 엑서지

### Thermodynamic System and Exergy

이 창 식\*  
Chang Sik Lee

#### 1. 머리말

우리들이 일반적으로 다루고 있는 에너지에는 열, 운동, 위치, 압력, 연료, 자기, 파동 등의 여러가지 형태로 존재한다. 그 가운데서 열공학과 관계가 있는 에너지로는 열에너지가 그 대표적인 것의 하나이다. 세계적인 에너지 자원의 유한성은 지금까지 사용하고 있는 각종 에너지의 유효 이용을 위한 연구를 더욱 가속시키게 되었다. 이러한 관점에서 각종 열기관을 비롯하여 공기 조화 장치, 증기 동력 장치 등의 열에너지를 이용하는 각종 기계 및 장치에 대한 에너지 절약을 위한 노력이 매우 필요하게 되었다.

우리들이 공학적인 여러 현상을 생각할 때 각종 에너지 손실을 고려하여 주위의 상황이 나 비가역적 성질을 포함하는 과정에서 공학적으로 이용할 수 있는 최대 에너지를 검토할 필요가 있다.

기계적 에너지는 마찰 등에 의하여 거의 상당한 부분을 열에너지로 변화시킬 수 있으나 열에너지는 그 일부분을 기계적 에너지로 변화시키는 데 불과하다.

카르노의 정리에 의하면 고열원  $T_K$ 의 열원으로부터 열량  $Q$ 를 받아서 절대 온도  $T_0$

K인 외계에 열을 버리는 경우의 최대일  $W_{max}$ 는

$$W_{max} = Q \frac{T - T_0}{T} \dots\dots\dots (1)$$

로 표시된다. 이 때 외계의 온도란 주위 온도를 뜻한다. 식 (1)에서 열에너지 중에서 최대한  $Q(T - T_0)/T$ 만이 기계적 에너지로 바꿀 수 있고, 나머지 부분  $Q(T_0/T)$ 는 무효 에너지(anergy)로 되어 주위에 방산된다.

가역적으로 기계적 에너지로 변화시킬 수 있는 에너지 부분을 엑서지(exergy)라 한다.

에너지 보존칙에 의하면 열기관에 주어진 열량  $Q$ 는 그 열기관이 역학적으로 발생하는 일  $W$ 와 열기관으로부터 버리는 열량  $Q_0$ 의 합과 같다.

$$Q = W + Q_0 \dots\dots\dots (2)$$

만일 이상적인 열기관을 사용할 경우 버리는 열량은 극소치로 되며 이것을  $Q_{0min}$ 이라 하면  $Q = W_{max} + Q_{0min}$ 가 된다. 따라서,

$$\begin{aligned} Q_{0min} &= Q - W_{max} \\ &= Q \left( 1 - \frac{T - T_0}{T} \right) = Q \frac{T_0}{T} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

\* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

가 된다. 앞에서 살펴본 바와 같이 에너지란 실용적으로 가치가 없는 에너지로서 온도  $T$  인 경우의 열전달량은  $\{(T-T_0)/T\} \times 100\%$  의 엑서지와  $(T_0/T) \times 100\%$ 의 에너지로 구성된다.

공급된 에너지에 대한 유효한 일의 비가 효율로 표시되며, 효율에는 엔탈피 효율(제 1종 효율)  $\eta_I$  과 엑서지 효율(제 2종 효율)  $\eta_{II}$  가 있다. 여기서 엔탈피 효율이란 이용된 에너지와 공급된 에너지의 비로 표시되며, 엑서지 효율이란 이용된 엑서지와 공급된 엑서지의 비로 표시된다.

엑서지 효율을 높이기 위해서는 어떠한 열역학적 과정에 대한 엑서지 손실을 감소시킴과 아울러 열기관, 열설비 등에서 나가는 배출 가스의 열을 회수하는 것이 효과적이다. 여기서는 주로 각종 열기관과 열설비 등에서 일어나는 에너지의 유효 이용을 위한 엑서지 개념과 그 간단한 응용의 보기에 대하여 다루기로 한다.

2. 엑서지 개념

2.1 엑서지의 기원과 정의식

엑서지란 말은 1956년 Z. Rant 가 처음으로 제창하여 독일 기술자 협회 VDI에서 정식으로 “die Exergie”란 용어로 채용되었다. 그러나 열역학 제 2법칙의 관점으로부터 생각한 것은 일의 능력 또는 일의 가능도(Arbeitsfähigkeit), 유효 에너지(available energy) 등으로 사용되어 왔으며, energie utilisable 이라고도 사용되었다. 그러나 유효 에너지(available energy)란 지금까지 관용되어 온 말로써 여러가지 의미로 사용되고 있으므로 잘못 사용되거나 혼동을 일으키기 쉽다.

앞의 식 (1)에서 엑서지  $E$ 는

$$E = \int_{T_0}^T \frac{T-T_0}{T} dQ \dots\dots\dots (4)$$

가 된다. 비열  $c_p$  인 물질이 임의의 절대 온도  $T$ 로부터  $T_0$ 로 될 때까지의 변화를 생각하면  $-dQ=dH=c_p dT$ 이므로 앞의 식 (3)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} E &= \int_{T_0}^T \frac{T-T_0}{T} dH = \int_{T_0}^T c_p \left( \frac{T-T_0}{T} \right) dT \\ &= \int_{T_0}^T c_p dT - T_0 \int_{T_0}^T \frac{dT}{T} \\ &= (H-H_0) - T_0(S-S_0) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

여기서  $S, S_0$ 는 각각 이 물질의 절대 온도  $T, T_0$ 에서의 엔트로피이다. 또한 식 (5)에서  $(H-H_0)$ 는 이 물질이 온도  $T$ 로부터  $T_0$ 로 될 때까지 가역 열기관에 주어진 에너지이므로  $T_0(S-S_0)$ 는 에너지임을 알 수 있다.

물질이 갖는 엑서지는 상태량으로 취급할 수 있으므로 열역학적 다른 상태량과 마찬가지로 단위 질량마다의 엑서지를 비엑서지(specific exergy)라 하며 엑서지와 구분하기 위하여 소문자  $e$ 를 사용한다.

식 (5)를 단위 질량당으로 표시하면

$$e = (h-h_0) - T_0(s-s_0) \dots\dots\dots (6)$$

가 된다.

물질이 닫힌계(closed system)에서 주위(외계) 온도를  $T_0$ , 주위의 조성이나 압력의 영향을 받지 않는다면 비엑서지  $e$ 는

$$e = (h-h_0) - T_0(s-s_0) - (P-P_0)v \dots\dots (7)$$

로 표시된다. 여기서  $v$ 는 물질의 비체적,  $P$ 는 물질의 압력,  $P_0$ 는 온도  $T_0$ 에서 물질의 포화 압력이다.

단지 에너지의 절만에 주안을 두어 생각하는 경우에는 다음에 표시되는 무차원 값

$$\psi = \frac{e}{h-h_0} \dots\dots\dots (8)$$

을 사용하며, 이것을 유효비(available ratio)라 한다.

엑서지 개념을 돕기 위하여 몇가지 보기를 들어 보기로 한다.

[보기 1] 주위 온도  $20^\circ\text{C}$ 일 때  $10\text{kg/cm}^2$ 의 건포화 증기가 갖는 비엑서지를 구하라.

[풀이] 포화 증기의 상태량  $h, s$ 를 증기표로부터 구하면

$$\begin{aligned} h_0 &= 606.23 \text{ kcal/kg}, \quad s_0 = 2.07041 \text{ kcal/kg}^\circ\text{K} \\ h &= 662.90 \text{ kcal/kg}, \quad s = 1.57389 \text{ kcal/kg}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

비엑서지는

$$\begin{aligned}
 e &= (h - h_0) - T_0(s - s_0) \text{ kcal/kg} \\
 &= (662.90 - 606.23) - (273.15 + 20) \times \\
 &\quad (1.57389 - 2.07041) \\
 &= 202.22 \text{ kcal/kg} = 846.654 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

### 2.2 엑서지 저감의 법칙

앞에서 다룬 바와 같이 엑서지는  $E = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$ 로 표시되므로 비가역 과정을 할 때 엑서지  $E$ 가 어떻게 변화하는가를 다음의 3가지 경우에 대하여 살펴 보기로 한다.

(1) 계로부터 열량  $dQ$ 가 나가는 경우

온도  $T$ 인 계로부터 온도  $T_0$ 인 주위 ( $T > T_0$ )로 열량  $dQ$ 가 나가는 경우 계의 엑서지 변화  $dE$ 는

$$\begin{aligned}
 dE &= -dQ - T_0 \left( -\frac{dQ}{T} \right) \\
 &= -dQ \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) < 0 \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

로 표시되고, 이 때 엑서지는 감소한다.

(2) 계에 열량  $dQ$ 의 출입이 없는 경우

이 경우는 고립계(isolated system)에 대한 비가역 과정에 해당되므로 엑서지 변화  $dE$ 는

$$dE = -T_0 dS < 0 \dots\dots\dots (10)$$

가 된다.

(3) 계로 열량  $dQ$ 가 유입하는 경우

계의 온도  $T$ 가 외계 온도  $T_0$ 보다 높은 경우에는 열은 그 자신만으로는 계 내로 유입될 수 없다. 따라서  $T \geq T_0$ 인 경우 계 내로 열이 흐르기 위해서는  $T < T_0$  이어야 한다. 따라서 엑서지의 변화는

$$\begin{aligned}
 dE &= dQ - T_0 \left( \frac{dQ}{T} \right) \\
 &= dQ \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) < 0 \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

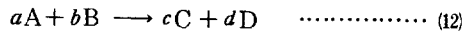
가 된다.

이들 식 (9), (10), (11)로부터 알 수 있는 바와 같이 어느 경우에도 계의 엑서지는 감소

하게 되는 데 이것을 엑서지 저감의 법칙이라 한다.

### 2.3 물리 엑서지와 화학 엑서지

지금 화학종(chemical species) A와 B가 반응하여 생성 물질(products)을 C와 D가 생기는 반응을 생각하기로 한다. 이 반응을 식으로 표시하면



가 된다. 여기서  $a, b, c, d$ 를 반응에 관여하는 각 화학종의 화학 양론 계수(stoichiometric coefficient)라 한다. 식 (12)에서 A, B를 반응 물질(reactants), C, D를 생성물질(products)이라 한다.

화학종 A, B, C, D의 변화가 일정한 비로써 진행된다고 하면 반응 물질(A, B) 또는 생성 물질(C, D) 중 어느 것의 시간적 변화량을 알면 다른 것의 변화를 구할 수 있다. 성분 몰농도  $N_i$  mol/cm<sup>3</sup>의 시간적 변화  $dN_i/dt$ 를 반응 속도(reaction rate)라 한다.

지금 어느 일정 체적하에서 반응이 진행된다고 하면 정적 반응열  $\Delta U$ 는

$$\Delta U = (cU_C + dU_D)_P - (aU_A + bU_B)_R \dots (13)$$

로 표시된다. 여기서  $U_A, U_B, U_C, U_D$ 는 각각 물질 A, B, C, D의 몰내부 에너지이다.

만일 반응이 일정한 압력 하에서 이루어진다면 정압 반응열  $\Delta H$ 는

$$\Delta H = (cH_C + dH_D)_P - (aH_A + bH_B)_R \dots (14)$$

로 표시된다. 식 (12), (13)에서 첨자 P, R은 각각 생성 물질과 반응 물질을 표시한다. 또한  $H_C, H_D, H_A, H_B$ 는 각각 물질 A, B, C, D의 엔탈피이다. 계로부터 주위로 열이 방출될 때는  $\Delta H < 0$ 가 되며 이 반응을 발열 반응(exothermic reaction)이라 한다.

반응은 임의의 온도, 압력에서도 이루어지므로 편의상 반응의 처음과 마지막 상태를 1 atm, 25°C로 하였을 때의 반응열을 표준 반응열이라 하고  $\Delta H_{298}^\circ$ 로 표기한다.

화학 반응에서 몇 개의 원소로부터 화합물

1몰을 생성할 경우의 반응열을 생성열이라 한다. 1 atm, 25 °C의 안정된 상태에 있는 원소로부터 1 atm, 25 °C의 화합물 1몰을 만들 때의 생성열을 표준 생성열이라 하고  $\Delta H_f^\circ$ 로 표기한다.

반응의 엔트로피 변화도 생성계와 반응계의 절대 엔트로피의 차로 표시된다. 1 atm, 25 °C일 때의 표준 엔트로피의 변화를  $\Delta S_{298}^\circ$  이라 하면

$$\Delta S_{298}^\circ = (c S_C^\circ + d S_D^\circ)_P - (a S_A^\circ + b S_B^\circ)_R \quad (15)$$

가 된다. 여기서  $S_C^\circ, S_D^\circ, S_A^\circ, S_B^\circ$ 는 각각 물질 C, D, A, B의 몰 절대 엔트로피이다.

어느 반응계가 상태 변화하여 주위와 평형에 달하였을 때의 계를 생성계라 하면 엑서지 E는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} E &= H - H_0 - T_0(S - S_0) \\ &= \Delta H_0 - \Delta H_{298}^\circ - \Delta H - T_0(\Delta S_0 - \Delta S_{298}^\circ - \Delta S) \\ &= [(\Delta H_0 - \Delta H) - T_0(\Delta S_0 - \Delta S)] \\ &\quad - [\Delta H_{298}^\circ - T_0 S_{298}^\circ] \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

여기서  $\Delta H_0, \Delta S_0$ ; 생성계가 각각 주위와 평형되어 있는 상태로부터 25 °C, 1 atm의 상태로 물리적인 변화를 하였을 때의 엔탈피와 엔트로피의 증가량

$\Delta H, \Delta S$ ; 반응계의 실제 상태로부터 25 °C, 1 atm의 상태로 물리적 변화하였을 때의 엔탈피와 엔트로피의 증가량

식 (16)에서  $[(\Delta H_0 - \Delta H) - T_0(\Delta S_0 - \Delta S)]$

표 1. 주요 물질의 표준 엔트로피  $S_{298}^\circ$

| 물질(분자식)          | 엔트로피 kcal/kmol K |
|------------------|------------------|
| O <sub>2</sub>   | 49.003           |
| C                | 1.360            |
| CO               | 47.301           |
| CO <sub>2</sub>  | 51.061           |
| H <sub>2</sub>   | 31.211           |
| H <sub>2</sub> O | 45.104           |
| S                | 7.62             |
| SO <sub>2</sub>  | 59.40            |

를 몰리 엑서지,  $-(\Delta H_{298}^\circ - \Delta H)$ 를 화학 엑서지라 한다. 표 1은 주요 물질의 표준 엔트로피  $S_{298}^\circ$ 를 나타낸 것이다.

2.4 연료의 화학 엑서지

화석 연료의 화학 엑서지를  $e_f$ 라 하면

$$e_f = H_I + T_0 \Delta S_{298}^\circ \quad \dots\dots\dots (17)$$

로 표시된다. 여기서  $H_I$ 은 연료의 연소열(저발열량)이다.

일반적으로 공업용 연료는 복잡한 조성을 가지므로 다음과 같은 Rant의 근사식을 사용한다.

고체 연료  $e_f = H_I + r w \quad \dots\dots\dots (18)$

액체 연료  $e_f = 0.975 H_h \quad \dots\dots\dots (19)$

기체 연료  $e_f = 0.95 H_h \quad \dots\dots\dots (20)$

여기서,  $H_I$ : 연료의 저발열량

$H_h$ : 연료의 고발열량

$r$ : 1 atm, 25 °C에서 수분의 증발열 (2,438 kJ/kg)

$w$ : 연료중의 전수분

식 (20)은 2원자 이상의 탄소를 함유하는 탄화수소에만 적용되며, H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>를 주성분으로 하는 연료에는 적용되지 않는다.

일반적으로 연료의 화학 엑서지  $e_f$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$e_f = H_I + T_0 \Delta S \quad \dots\dots\dots (21)$$

이 식은 식 (17)과 같은 형태로서  $T_0$ 는 주위의 절대 온도,  $\Delta S$ 는 생성계의 엔트로피 합으로부터 반응계(연료와 연소용 공기)의 엔트로피 합을 뺀 량이다. 생성계의 H<sub>2</sub>O는 기체로 계산한다.

$T_0 = 298.15^\circ K$ , 계의 압력이 1 atm일 때의 화학 엑서지를 연료의 표준 엑서지라 한다. 이 값을  $e_c^\circ$ 라 표시하면 기체 연료의 경우에는 다음 식으로 계산된다.

$$\bar{e}_c^\circ = \sum x_i \bar{e}_{ci}^\circ + RT_0 \sum x_i \ln x_i \quad \dots\dots\dots (22)$$

여기서  $\bar{e}_{ci}^\circ$ 는 성분  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )의 표준 엑서지,  $R$ 은 기체 상수(0.08862 kcal/Nm<sup>3</sup> K,

표 2. 단일 연료의 표준 엑서지  $\bar{e}_c^0$

| 고 체 액 체                          |  | 기 체                            |  |
|----------------------------------|--|--------------------------------|--|
| 물질(분자식)                          | 표준 엑서지<br>kcal/Nm <sup>3</sup> (MJ/Nm <sup>3</sup> ) | 물질(분자식)                        | 표준 엑서지<br>kcal/Nm <sup>3</sup> (MJ/Nm <sup>3</sup> ) |
| C                                | 7.990(33.450)  | H <sub>2</sub>                 | 2.480( 10.380)                                       |
| S                                | 2.235(93.560)  | CO                             | 2.740( 11.470)                                       |
| C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>   | 10.970(45.920)                                       | CH <sub>4</sub>                | 8.520( 35.665)                                       |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>    | 9.820(41.110)  | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 13.120( 54.920)                                      |
| C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>   | 10.850(45.420)                                       | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 15.510( 64.925)                                      |
| C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>   | 11.150(46.670)                                       | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 22.300( 93.350)                                      |
| C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>    | 11.460(47.970)                                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 29.070(121.690)                                      |
| CH <sub>3</sub> OH               | 5.020(21.010)  | NH <sub>3</sub>                | 3.499( 14.650)                                       |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 6.880(28.800)  | H <sub>2</sub> S               | 5.290( 22.144)                                       |

0.3710kJ/Nm<sup>3</sup>K),  $x_i$ 는 성분  $i$ 의 체적 분율이다.

표 2는 한 가지 성분만으로 구성된 연료(단일 연료)의 표준 엑서지를 표시한 것이다.

2.5 엑서지 계산

(1) 가스의 엑서지

온도  $T$ , 압력  $P_0$ 인 기체 1Nm<sup>3</sup>이 주위(온도  $T_0$ , 압력  $P_0$ )와 평형이 될 때까지의 하는 일, 즉 엑서지는 다음 식으로 표시된다.

$$e = - \int_h^{h_0} \frac{T-T_0}{T} dh = (h-h_0) - T_0 \int_{h_0}^h \frac{dh}{T}$$

$$= \int_{T_0}^T c_p dT - T_0 \int_{T_0}^T c_p \frac{dT}{T} \dots \dots \dots (23)$$

비열  $c_p$ 가 일정이면 다음 식으로 표시된다.

$$e = c_p \left[ (T-T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right]$$

$$= (h-h_0) \left[ 1 - \frac{T_0}{T-T_0} \ln \frac{T}{T_0} \right] \dots \dots \dots (24)$$

[보기 2] 공기의 비열이 다음 식으로 주어질 경우 주위 온도가 20℃라 하면 2,000℃에서의 엑서지는 얼마인가?

$$c_p = 0.281 + 8.984 \times 10^{-5} T - 1.938 \times 10^{-8} T^2 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ K}$$

[풀이]

$$h-h_0 = \int_{293}^{2273} c_p dT = 0.281(2273-293)$$

$$+ \frac{8.984}{2} \times 10^{-5} (2273^2 - 293^2) -$$

$$\frac{1.938}{3} \times 10^{-8} (2273^3 - 293^3)$$

$$= 708.90 \text{ kcal/Nm}^3$$

$$s-s_0 = \int_{293}^{2273} c_p \frac{dT}{T} = 0.281 \ln \frac{2273}{293} +$$

$$8.984 \times 10^{-5} (2273-293) - \frac{1.938}{2}$$

$$\times 10^{-8} (2273^2 - 293^2)$$

$$= 0.70434 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ K}$$

식 (23), (24)로 구한 비엑서지를 각각  $e_{23}$ ,  $e_{24}$ 라 하면

$$(e)_{23} = 708.90 - 293 \times 0.70434$$

$$= 502.42 \text{ kcal/Nm}^3$$

$$(e)_{24} = 708.90 \times \left[ 1 - \frac{293}{2273-293} \times \ln \frac{2273}{293} \right] = 493.92 \text{ kcal/Nm}^3$$

따라서

$$(e)_{23} / (e)_{24} = 0.983$$

가 된다.

(2) 혼합 기체의 엑서지

$n_1$  몰의 기체 1과  $n_2$  몰의 서로 다른 기체 2를 혼합하였을 때의 엔트로피 변화는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta S &= -R \left[ n_1 \ln \frac{n_1}{n_1+n_2} + n_2 \ln \frac{n_2}{n_1+n_2} \right] \\ &= R \left[ (n_1+n_2) \ln(n_1+n_2) - n_1 \ln n_1 \right. \\ &\quad \left. - n_2 \ln n_2 \right] \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

혼합에 의하여 엑서지는 변하지 않으므로 엑서지의 변화  $\Delta e$ 는  $-T_0 \Delta S$ 로 표시된다.

$$\begin{aligned} e &= -T_0 \Delta S \\ &= RT_0 \left[ \frac{n_1}{n_1+n_2} \ln \frac{n_1}{n_1+n_2} + \frac{n_2}{n_1+n_2} \right. \\ &\quad \left. \times \ln \frac{n_2}{n_1+n_2} \right] \\ &= RT_0 [x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2] \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

여기서,  $x_1 = \frac{n_1}{n_1+n_2}$ ,  $x_2 = \frac{n_2}{n_1+n_2}$

[보기 3] 순수한 산소 1Nm<sup>3</sup>의 엑서지는 얼마인가? 단, 온도와 압력은 주위 온도  $T_0$ , 주위 압력  $P_0$ 와 같다.

[풀이] 지금  $T_0 = 298\text{K}$ ,  $P_0 = 1\text{atm}$ 이라 하고, 공기의 조성을 물분율로서 O<sub>2</sub> 21%, N<sub>2</sub> 79%로 잡으면 엑서지의 변화는

$$\begin{aligned} \Delta e &= -RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \\ &= -\frac{R}{22.8} T_0 \ln \frac{P}{P_0} \\ &= -0.0886 \times 298 \ln 0.21 \\ &= 41.2 \text{ kcal/Nm}^3 \end{aligned}$$

(3) 연료의 엑서지

① 단일 연료의 화학 엑서지

앞의 2.4절에서 다른 바와 같이 단일 연료의 표준 엑서지는 식 (2)로부터 구할 수 있다.

[보기 4] C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH의 저발열량은 437,000 kcal/kmol이고, 그 엔트로피는 46.1 kcal/kmol<sup>o</sup>K이다. 이 연료의 화학 엑서지를 구하라.

[풀이] 반응식은

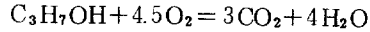


표 1의 값을 이용하면,

$$\begin{aligned} \Delta S &= (3 \times 51.061) + (4 \times 45.104) - 46.1 \\ &\quad - 4.5 \times 49.003 \\ &= 66.986 \text{ kcal/kmol}^{\circ}\text{K} \end{aligned}$$

주위 온도를 20<sup>o</sup>C라 하면

$$\begin{aligned} e_f &= H_f + T_0 \Delta S \\ &= 437,000 + 298.15 \times 66.986 \\ &= 456,970 \text{ kcal/kmol} = 7,600 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

주위 온도를 0<sup>o</sup>C라 하면

$$\begin{aligned} e_f &= H_f + T_0 \Delta S \\ &= 437,000 + 273.15 \times 66.986 \\ &= 455,300 \text{ kcal/kmol} = 7,590 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

즉 주위의 온도 변화에 따라 엑서지는 변화한다.

② 기체 연료의 엑서지

기체 연료의 조성을 알고 있는 경우에는 표 2의 엑서지 값과 식 (2)를 사용하여 계산한다.

[보기 5] 다음과 같은 성분을 갖는 도시 가스의 표준 화학 엑서지를 구하라.

| 성분                            | %    |
|-------------------------------|------|
| CO                            | 7.0  |
| CO <sub>2</sub>               | 2.1  |
| H <sub>2</sub>                | 54.7 |
| CH <sub>4</sub>               | 28.6 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 4.1  |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | 0.6  |
| H <sub>2</sub> S              | 0.3  |
| O <sub>2</sub>                | 2.5  |
| N <sub>2</sub>                | 0.1  |

[풀이] 식 (2)와 표 2의 값을 이용하면

$$\begin{aligned} \bar{e}_c^{\circ} &= (0.07 \times 2,740) + (0.547 \times 2,480) + \\ &\quad (0.286 \times 8,520) + (0.041 \times 14,050) + \\ &\quad (0.006 \times 20,730) + (0.003 \times 5,290) + \\ &\quad 0.08862 \times 293.15 [0.021 \ln 0.021 + \end{aligned}$$

$$0.07 \ln 0.07 + 0.547 \ln 0.547 + 0.286 \ln 0.286 + 0.041 \ln 0.041 + 0.006 \ln 0.006 + 0.003 \ln 0.003 + 0.025 \ln 0.025 + 0.001 \ln 0.001] = 4.668 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ fuel}$$

③ 액체 연료의 엑서지

일반적으로 액체 연료는 여러 가지 분자로 구성되므로 그 조성을 중량 분율로 표시하여 다음과 같은 실용식으로 구하거나 식 (19)로부터 근사 계산할 수 있다.

$$e_f = H_l \left( 1.0038 + 0.1365 \frac{h}{c} + 0.0308 \frac{o}{c} + 0.0104 \frac{s}{c} \right) \dots\dots\dots (27)$$

여기서  $e_f$ 는 액체 연료의 화학 엑서지,  $H_l$ 은 저발열량,  $h, c, o, s$ 은 각각 액체 연료의 수소, 탄소, 산소, 유황의 중량 분율이다.

[보기 6] 어느 액체 연료의 원소 분석치가 다음과 같을 경우 연료의 화학 엑서지를 구하라. 단, 연료의 고발열량은 10,600 kcal/kg 이다.

$$c=0.84, h=0.12, o=0.01, s=0.03$$

[풀이] Rant의 근사식 식 (19)를 이용하면

$$e_f = 0.975 \times 10,600 = 10,335 \text{ kcal/kg}$$

저발열량은

$$H_l = H_h - 600 \times 9h = 10,600 - (600 \times 9 \times 0.12) = 9,687 \text{ kcal/kg}$$

식 (27)을 이용하면

$$e_f = 9,687 \times \left( 1.0038 + 0.1365 \times \frac{0.12}{0.84} + 0.0308 \times \frac{0.01}{0.84} + 0.0104 \times \frac{0.03}{0.84} \right) = 9,919.857 \text{ kcal/kg}$$

이들 결과를 비교해 보면 Rant의 근사식은 식 (27)로부터 구한 값보다 조금 큰 값을 알 수 있다.

④ 고체 연료의 엑서지

고체 연료의 화학 엑서지 계산식은

$$e_f = H_l \left( 1.0064 + 0.1519 \frac{h}{c} + 0.0616 \frac{o}{c} + 0.0429 \frac{n}{c} \right) \dots\dots\dots (28)$$

여기서  $H_l$ 은 저발열량,  $c, h, o, n$ 은 연료 중의 탄소, 수소, 산소, 질소의 중량분율이다. 한편 Rant의 고체 연료에 대한 근사식은 식 (18)로 표시된다.

3. 엑서지 손실과 응용

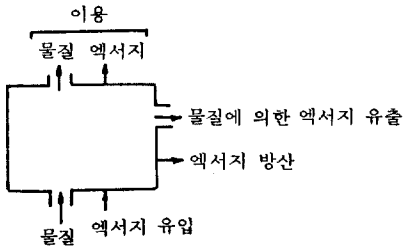
엑서지 손실이란 엑서지 부분이 유용한 일로 사용되지 않고 방산되거나 소멸되는 것을 말한다. 에너지 절약을 위한 관점에서 보면 엑서지 손실을 최대한으로 억제하여 유효하게 사용하는 것이 필요하다.

엑서지 개념을 적용하여 에너지를 해석할 경우 그 대상이 되는 계에는 열역학에서 다루는 고립계, 폐쇄계, 개방계를 생각하여 취급할 수 있다.

일반적으로 어느 계에 공급된 엑서지는 유용한 역학적 일이나 유용한 형태의 엑서지로 이용되는 이외에도 계 내에서 소멸되거나 검사면을 통하여 계 외로 방출된다. 엑서지가 계 외로 방출될 경우에는 다음과 같은 2가지 양식이 있다. 하나는 역학적 일, 전기 에너지, 열전도, 열복사 등과 같이 물질의 이동과 무관하게 나가는 경우이고, 다른 하나는 엑서지가 물질에 의하여 나가는 경우이다. 그림 1은 계방계에 대한 엑서지 이동과 변화를 도시한 것이다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 엑서지 손실은 다음의 세 가지 경우로 나눌 수 있다.

- (1) 엑서지 소멸
- (2) 엑서지 방산
- (3) 엑서지 유출

엑서지 손실은 공업적으로 많이 이용되고 있는 연소 과정, 전열, 물질의 혼합 과정 등의 에너지 해석, 에너지 시스템의 해석, 에너지 흐



$$\begin{aligned} \text{유입 물질 질량} &= (\text{계 내의 축적량}) + (\text{유출} \\ &\quad \text{물질의 질량}) \\ \text{유입 엔탈피} &= (\text{계 내의 엔탈피 증가}) + \\ &\quad (\text{유출 엔탈피}) \end{aligned}$$

그림 1. 엑서지 변화(개방계)

름의 평가 등에 이용한다. 그 예로는 보일러의 열정산과 엑서지 흐름, 공업로의 에너지 흐름, 열교환기의 열성능 해석, 공기 조화 및 냉동 과정, 건조 과정, 화력 발전소의 열에너지 정산, 열병합 발전, 연료 전지, 에너지 수송 및 저장, 자동차를 비롯한 교통 기관의 에너지 소비와 효율 평가 등에 이용할 수 있다.

엑서지 개념을 이용하여 냉동·냉방시의 효율을 정의하여 보면

엑서지 효율(압축식)

$$\eta_{II} = \frac{\text{냉방(냉동) 부하의 엑서지}}{\text{공급 전력의 엑서지}} \quad \dots (29)$$

엑서지 효율(흡수식)

$$\eta_{II} = \frac{\text{냉방(냉동) 부하의 엑서지}}{\text{공급 열량의 엑서지}} \quad \dots (30)$$

로 표시할 수 있다.

#### 4. 맺음 말

이상은 주로 엑서지의 기초 개념에 대하여 다룬 것으로서 구체적인 응용에 대하여는 다른 문헌이나 전문서<sup>1~4)</sup>를 참고로 하여야 할 것으로 생각한다. 특히 인간의 삶은 각종 에너지의 소비의 과정이며, 에너지의 유효 이용이란 우리의 생활을 풍요롭게 하려는 인간의 지혜란 점에서 에너지 자원의 효율성을 높이는 데 더욱 노력을 경주하여야 할 것으로 믿는다.

#### 참 고 문 헌

1. E. A. Brugs : "Available Energy and The Second Law Analysis", Butterworths Scientific Publications, 1959.
2. Adbrian Bejan : "Entropy Generation through Heat and Fluid Flow", John Wiley & Sons, 1982.
3. Mohey Hussen, R. J. Wood, P. W. O' Callaghan and S. D. Probert : "Efficiencies of Exergy Transductions", Applied Energy Vol.6. p.371. 1980.
4. 이창식·한영출 : "공업 열역학", p.135, 문운당, 1987.