

에너지 절약의 기본 개념

Basic Concept of Energy Saving

조 강 래*
Kang Rae Cho

1. 엔트로피와 엑셀기

에너지에는 활용할 수 있는 에너지와 활용 못하는 에너지가 있다. 이를 규정하는 양으로서 엔트로피(entropy)와 엑셀기(exergy)라는 양이 사용된다. 에너지 절약을 생각할때는 이들 양에 대한 개념이 확립되어 있어야 한다. 여기서는 이들 양을 중심으로 에너지 절약의 기본 개념에 대하여 개설한다.

1) 엔트로피 : 에너지는 독립된 계에서 보면 不生不滅이다. 그러나 에너지의 質은 변화

한다.

기름을 태워서 난방하는 경우를 생각해 보자. 기름을 태우면 熱量 Q 가 발생하고 온도 T' 의 高溫가스가 된다. 이 열은 熱交換器(효율 100%)에 의해 실내온도 T'' 의 공기에 전달된다. 열은 마지막으로 방에서 온도 T_0 인 실외에 방출된다. 이상의 과정을 엔트로피 변화로 살펴보면 그림 1과 같다.

엔트로피는 물질의 한 상태량을 나타낸다. 그 정의에서 알 수 있듯이 절대온도 T °K 에서 열량 dQ 가 공급되면 엔트로피는 $ds = dQ/T$ 만큼 증가한다. 연료가 기름상태로 있을 때는 기름의 온도는 실내온도와 같다고 볼 수 있으므로 연료의 열에너지는 대단히 적다. 따라서 엔트로피는 대단히 작은 값으로 된다. 기름과 같이 엔트로피가 작고 부피가 작은 연료는 良質의 에너지라고 말할 수 있다. 연소후에는 열량 dQ 가 대단히 크게 증가하지만 가스 온도 T' 도 대단히 높게 되기 때문에(예 : 1000 °C) 이때에도 엔트로피 dQ/T' 는 비교적 작은 값을 유지한다. 다음에 열의 온도는 열교환기에 의해 실내온도 T'' (예 : 20 °C)까지 낮아지므로 dQ/T'' 는 대단히 커진다(dQ 는 변함 없음). 따라서 열교환기는 효율이 100%라고 하여도 열의 질적인 면에서 보면 엔트로피가 큰 에너지에서 작은 에너지로, 즉 良

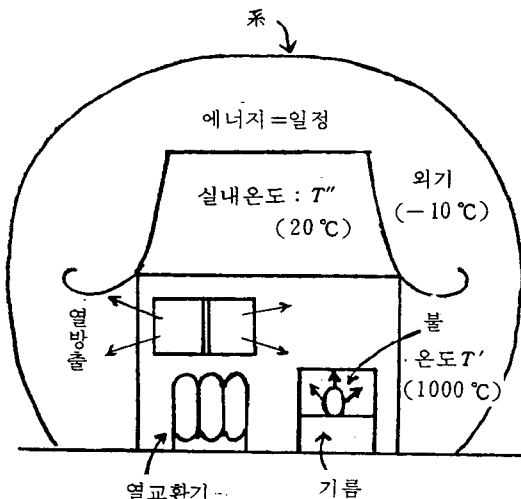


그림 1. 엔트로피의 변화

* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

質의 에너지에서 低質의 에너지로 바꾸는 기기라고 할 수 있다. 마지막으로 방 안의 열이 온도가 낮은 방 밖으로 100% 누설되는 데, dQ 는 변함이 없으므로 이 때도 역시 엔트로피는 증가한다. 그러나 방의 단열이 잘 되어 있으면 누설 열량이 적어지므로 그만큼 엔트로피의 증가를 막을 수 있다.

2) 엑셀기 : 엑셀기라는 용어는 국내에서는 물론 미국에서도 별로 사용되지 않는 용어이지만 독일에서는 더러 사용되고 있다. 앞에서 설명된 엔트로피는 과학적인 양인 데 비해 엑셀기는 熱經濟에 관련된 양이라고 할 수 있으며, 非可逆性을 평가하는 데 사용된다. 따라서 에너지 절약을 논의하기 위해서는 熱量보다 엑셀기를 사용하는 쪽이 효과적이라는 의견이 있다. 그러면 엑셀기라는 개념은 어떤 것인가? 엑셀기의 정의를 설명하면 “熱量을 動力으로 환산하여 評價하는 方式”이라고 설명할 수 있다. 보다 알기 쉽게 표현하면 “相對인 有效에너지”를 나타낸다고도 설명할 수 있다.

지금 용기 안에 압축공기가 들어 있는 경우를 생각하자. 이 탱크에 저장돼 있는 에너지는 얼마라고 말할 수 있을까? 그 답의 하나로서 내부 에너지의 양으로 나타낼 수 있을 것이다. 그러나 그 답은 정확하다고는 할 수 없을 것이다. 왜냐하면 만일 탱크 안의 압력이 대기압이면 그 탱크에는 내부 에너지는 존재하지만 사용될 수 있는 에너지는 저장되어 있다고는 볼 수 없기 때문이다. 또 탱크 압력이 진공으로 되어 있을 때는 탱크내의 내부 에너지는 0이 될 것이다. 그러나 실제로는 진공탱크가 외부 공기를 빨아들임으로써 유효 에너지를 발생시킬 수 있는 것이므로 진공탱크도 에너지를 가진다고 보아야 할 것이다.

이상의 설명으로부터 공학적으로 가치있는 에너지는 周圍環境에 의해 정해지는 상대적인 에너지임을 이해할 수 있을 것이다. 즉 진공탱크는 지상에서는 에너지源으로 이용할 수 있으나 이를 진공상태인 우주공간으로 가지고 가면 아무 일도 못하는 무용지물이 된다는 것이다. 이상과 같이 상대적인 유효에너지를 “엑

셀기”라고 부른다. 이것을 보다 과학적으로 다루기 위해 다음과 같이 정의한다. 溫度 T_1 의 熱量 Q_1 이 갖는 엑셀기는 基準이 되는 熱機關, 예를 들어 Carnot 기관에서 얻어질 수 있는 最大의 일 W 와 같다고 정의될 수 있으며, W 는 기준이 되는 열기관과 종류와 주위 온도에 따라 달라진다. 일반적으로 기준 熱機關으로서 Carnot 기관이 택해진다. Carnot 기관에 의해 얻어질 수 있는 W 는 다음과 같다(그림 2 참조).

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$\eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\text{면적 } 1234}{\text{면적 } 122'1'}$$

$$= \frac{(T_1 - T_2)(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

따라서

$$W = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

단, η_c 는 Carnot 기관의 효율이며, 과정 1→2는 等溫加熱 및 膨脹이며, 가열량은 Q_1 . 과정 2→3은 斷熱膨脹, 과정 3→4는 等溫冷却 및 壓縮이며, 冷却熱量은 Q_2 , 과정 4→1은 斷熱壓縮이다.

엑셀기는 같은 열량 Q_1 이라도 低溫源의 온도 T_2 에 따라 변함을 알 수 있다.

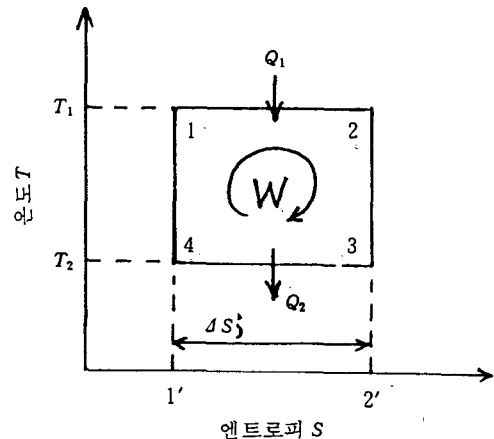


그림 2. Carnot 열기관

2. 엑셀기 흐름과 엑셀기 효율

지금 가상적으로 그림 3과 같이 鋼塊를 가열하는 경우를 생각하자. 그림 3에 해당하는 熱흐름도는 그림 4와 같이 도시된다. 熱흐름도에서는 당연히

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

으로 되어 있다.

다음에 熱量(Q_1, Q_2, Q_3)에 대응하는 온도

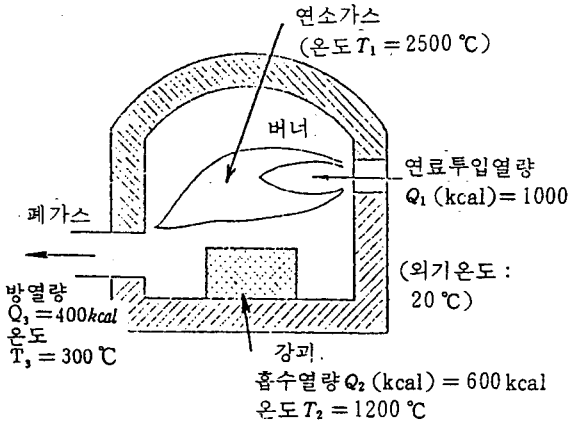


그림 3. 강괴의 가열

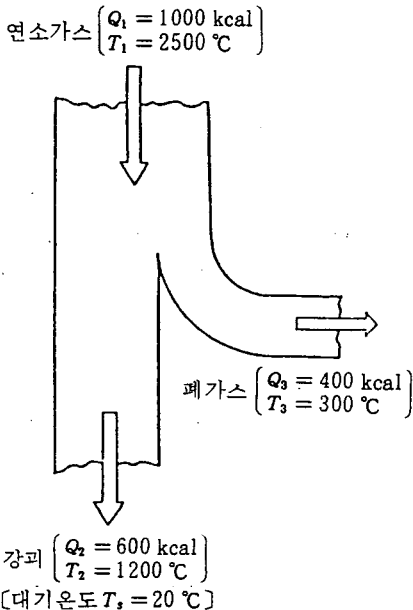


그림 4. 열흐름도

(T_1, T_2, T_3)를 써서 엑셀기를 계산한다. 이때 기준이 되는 열기관은 Carnot 기관으로 하고 低溫源의 溫度로서 표준 대기온도 $T_s = 20^\circ\text{C}$ 를 택한다. 열량(Q_1, Q_2, Q_3)에 해당하는 엑셀기(E_1, E_2, E_3)는 각각 다음과 같다.

$$E_1 = Q_1 \left(1 - \frac{T_s}{T_1} \right) = 1000 \left(1 - \frac{273+20}{273+2500} \right) = 894.3 \text{kcal}$$

$$E_2 = Q_2 \left(1 - \frac{T_s}{T_2} \right) = 600 \left(1 - \frac{273+20}{273+1200} \right) = 480.7 \text{kcal}$$

$$E_3 = Q_3 \left(1 - \frac{T_s}{T_3} \right) = 400 \left(1 - \frac{273+20}{273+300} \right) = 195.5 \text{kcal}$$

이들의 엑셀기는 각각 高熱源(溫度 T_1, T_2, T_3)와 低熱源(溫度 T_s)사이에서 熱量(Q_1, Q_2, Q_3)을 사용해서 Carnot 기관에 의해 얻어질 수 있는 일량을 나타내고 있음은 분명하다. 이상의 엑셀기(E_1, E_2, E_3)를 써서 엑셀기 흐름도를 나타내면 그림 5와 같다.

이상의 엑셀기 계산치로부터

$$E_1 = 894.3 \text{kcal}, E_2 + E_3 = 480.7 + 195.5 = 676.2 \text{kcal}$$

$$\therefore E_1 > E_2 + E_3$$

으로 되어 있음을 알 수 있다. 즉 엑셀기의

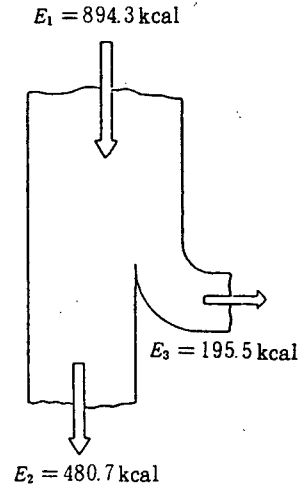


그림 5. 엑셀기의 흐름도

흐름은 보존칙을 만족하지 않음을 알 수 있다. 이점은 엑셀기를 사용할 때 특히 유의하여야 한다.

다음에 效率을 고찰하기 위해 다음과 같이 폐열손실이 전혀 없는 경우를 가상해 본다. 즉

$$Q_1 = 1000 \text{ kcal}, Q_2 = 1000 \text{ kcal}, Q_3 = 0 \\ T_1 = 2500 \text{ }^\circ\text{C}, T_2 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

이때의 엑셀기値는 다음과 같다.

$$E_1 = 1000 \left(1 - \frac{273+20}{273+2500} \right) = 894.3 \text{ kcal}$$

$$E_2 = 1000 \left(1 - \frac{273+20}{273+1200} \right) = 801.1 \text{ kcal}$$

따라서 엑셀기 效率 η_e 는 다음과 같다.

$$\eta_e = \frac{\text{유출엑셀기}}{\text{유입엑셀기}} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{801.1}{894.3} = 89.6 \%$$

한편 熱效率 η_h 는 다음과 같다.

$$\eta_h = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1000}{1000} = 100 \%$$

이상으로 알 수 있듯이 열효율이 100%인 경우라도 엑셀기 효율은 그보다 낮은 값으로 나타난다. 따라서 다음과 같은 의문이 나타날 것이다.

- 1) 어느 효율을 사용하는 것이 옳은가?
- 2) 엑셀기효율의 최대치는 얼마이고, 그때의 상태는 어떤 것인가?
- 3) 실제 플랜트의 에너지 흐름을 평가하는데 왜 가상적인 Carnot 기관을 사용한 엑셀기를 도입해야 하는가?
- 4) 엑셀기와 실제 플랜트와의 관계는 옳은 것인가?

이상의 의문에 대한 해답은 엑셀기에 대한 지금까지의 설명에서 어느 정도 가능할 것이다.

3. 열에너지 평가법의 선택

에너지를 평가하려고 할 때 다음 기준에 따라 평가법을 택하는 것이 합리적인 것이다.

- 1) 열에너지를 加熱用으로 사용하는 경우에는 열량으로서 평가한다.
- 2) 열에너지에 의해 動力을 발생시키려고

하는 경우에는 열량으로서 평가하는 것보다 열량을 동력화하였을 때 얻어질 수 있는 최대 열량(Carnot 기관을 사용) 즉, 엑셀기로서 평가하는 것이 바람직하다.

같은 廢熱이라도 폐열을 이용하는 쪽의 조건에 따라 그 가치가 결정된다. 예를 들어 폐열온도가 높음으로써 엑셀기値가 높다고 하여도 이 폐열을 난방용으로 밖에 이용 못하는 경우는 그 가치는 떨어질 수 밖에 없다. 난방용 에너지는 난방조건에 맞는 에너지이면 족하는 것이며 반드시 온도가 높아야 할 필요는 없다.

이상에서 설명된 내용으로부터 공장에서 에너지절약을 검토할 때 폐열의 세부내용에 대해 알아야 함은 물론 폐열을 어떻게 활용해야만 효율을 높일 수 있는지에 대해서도 함께 검토되어야 함을 알 수 있다.

4. 에너지 절약

에너지 절약이라 함은 유효에너지의 절약, 즉 엑셀기를 절약한다는 뜻으로 된다. 그러나 엑셀기를 절약한다는 표현은 에너지 절약의 목표를 제시할 뿐이지 그 방법까지 제시하고 있는 것은 아니다.

에너지를 절약하는 데 있어서 문제가 되는 것은 에너지의 변환이나 수송 등에서 발생하는 엑셀기 손실을 어떻게 하면 줄일 수 있을 까라는 것이다.

에너지 移動에서 나타나는 損失에는 일반적으로 直列損失과 併列損失이 있다. 직렬손실은 에너지 이동을 일으키는 데 필요한 여분의 에너지손실을 의미하며, 병렬손실은 에너지의 이동과정에서 밖으로 새어 나가는 손실을 의미한다. 이들 중에서 어느 한쪽이 작게 되도록 설계하면 다른 쪽이 커지므로 두 손실의 합이 최소가 되도록 설계되어야 한다. 지금 예를 들어 熱傳變換의 경우를 생각하면, 열전 변환에는 傳導體의 전기저항에 의한 손실과 熱傳導에 의한 손실이 있다. 전자는 전기를 통하게 하는 데 나타나는 直列損失이며, 후자는 溫度差(熱傳達)에 의해 熱損失로서 나타나는

併列損失이라고 할 수 있다. 다음에 熱交換器의 경우는 給熱側과 受熱側의 溫度差에 의한 熱傳達量이(개념적으로는 맞지 않으나) 併列損失에 해당하고 유체를 유동시키는 데 필요한 에너지는 直列損失에 해당한다. 이들 두 손실은 서로 경합적으로 나타난다. 같은 유량에 대해 接觸面積을 크게 하면 熱交換은 잘 이루어지지만 반대로 유동을 유지하는 데 필요한 펌프 에너지는 증가한다. 이점이 바로 열교환기 설계에 있어서 중요한 과제가 되는 것이다.

5. 에너지의 축적과 수송

에너지 공급에는 場所와 時間的인 제약이 있고, 일반적으로 에너지 需要側의 장소와 시간하고 맞지 않는다. 따라서 이 차이를 조정하기 위해 에너지의 蓄積과 輸送이 필요하다. 化石燃料의 경우는 에너지의 축적과 수송에 소요되는 추가 에너지가 적으므로 대단히 우수한 에너지라고 할 수 있다. 그러나 다른 에너지들은 그렇지 않다.

에너지 절약을 생각할 때 특히 주목해야 하는 점은, 우리들이 사용하는 에너지의 상당한 부분이 自然界로부터의 에너지공급의 時間的, 空間的 不均衡에서 유래되어 있다는 점이다.

요컨대 熱帶와 寒帶의 기온차, 晝間과 夜間의 기온차, 冬季와 夏季의 온도차 등이다. 즉, 溫度環境이 시간과 장소에 따라 변화하는 것에 유래되어 있는 것이다. 이러한 에너지의 需要特性에서 보면 大氣는 이미 환경이 아니고 에너지源으로 이용될 수 있음을 의미한다. 열을 장기간 축적할 수 있거나 원거리 수송이 가능하면 이와 같은 온도차는 유효에너지源으로서 활용될 수 있다. 그러나 이 온도차를 이용하려면 따로 대량의 에너지가 투입되어야 한다.

1 日週期의 온도차는 적절한 축열장치를 이용함으로써 충분히 유효에너지로 활용될 수 있다. 1 年週期의 온도차는 장기간의 축열이 어려우므로 이용하기가 쉽지 않다. 그러나 지하 10 m 이하에서는 夏季와 冬季의 온도차가 거의 없으므로 지하환경을 잘 이용하면 추가 에너지 없이도 온도조절이 가능해질 수 있다.

이상은 에너지 절약에 관한 기본 개념에 대해 나름대로 기술해 본 것이다. 에너지 절약은 여러 곳에서 가능하며, 그 대책은 다양각색이다. 하지만 각 경우에 대해 다시 한번 에너지절약의 기본에 대해 생각해 봄으로써 보다 효과적인 대책이 세워질 수 있지 않을까 기대해 본다.