

<技術報告>

토탈에너지 시스템(total energy system)에
의한 열에너지의 효율적 이용

Efficient Use of Thermal Energy by a Total Energy System

김 호 경* · 이 택 식* · 노 승 탁*

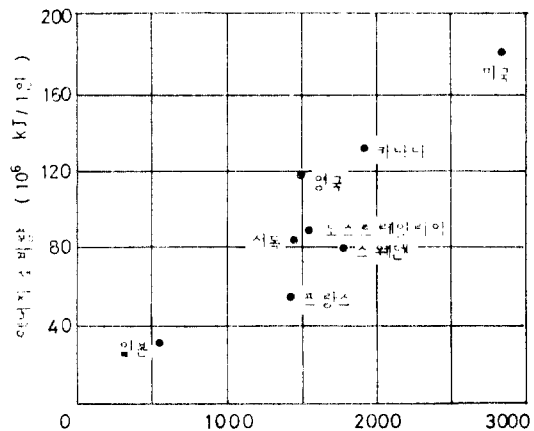
Hyo-Kyung Kim, Taik-Sik Lee, Sung-Tack Ro

1. 서 론

1970년대 초반의 소위 말하는 에너지 파동으로 전 세계는 심각한 에너지 위기를 실감하게 되었다. 에너지 위기 문제가 단순한 화석연료를 보유한 수개국가의 정치적 이유에서 비롯되었거나 실제 위기에 처한 문제 이든 간에 우리나라와 같이 에너지 자원을 충분히 보유하지 못한 나라의 위기 의식을 더욱 절실히 느끼게 된다. 특히 지난 수 세기간 에너지 사용량은 지수 함수적으로 증가되어 나가므로 유한한 화석연료 자원으로서 어느 시기에 가서는 자원의 고갈을 면할 수 없다는 것은 자명한 사실이다. 화석연료의 유한성에 대한 타개책으로는 원자력, 조력, 태양열이용 등과 같은 새로운 대체에너지의 개발, 이용이 적극적인 에너지 해결방안이 되겠으나 실용화를 위한 기술적인 면이나 경제적인 관점에서 제약이 많다. 현재로서는 이에 못지 않게 중요한 것이 에너지 사용시의 전환효율을 증가시키는 것이다. 에너지의 효율적 이용은 근본적으로는 에너지자원의 절약을 의미하고 생산업계의 측면에서는 지품원가에 직접적 영향을 미치는 중요한 문제이다. 더욱 에너지 사용량이 국민 총생산에 비례하여 증가함을 감안한다면⁽¹⁾ (그림 1-1 참조) 우리나라와 같이 공업화에 기반을 둔 고도의 경제성장률을 목표로 하는 경우 에너지의 효율적 사용문제는 결코 경시할 수 없는 것이다. 우리나라의 경우 에너지 소비량을 무연탄 환산량으로 연도에 따른 변화가 그림 1-2에 나타나 있다⁽²⁾. 여기서 에너지 소비량은 국민 총생산과 동일한 유형으로 증가되어 감을 알 수 있다. 미국의 경우 1890년대부터 1960년까지 국민 총생산의 평균 증가율

3.25%에 대하여 에너지 소비 증가율은 평균 2.7%로 나타나았으며 1967년 이후로는 에너지 소비 증가율이 국민 총생산의 증가율을 초과하게 되었다.

우리나라의 경우는 1960년대 후반부터 에너지 소비가 크게 증가되어 1955년부터 1961년 사이에는 연간 2.9%, 1962년~1966년에는 연간 6.1%정도였다. 1967년 이후로는 연간 평균 10% 수준을 상회하여 증가하게 되었다. 에너지 증가율이 가장 높았던 1973년에는 14.8%의 증가율을 보여 이는 과거 10년의 고도의 경제성장, 산업구조의 고도화, 국민 생활수준의 향상과 함께 변화함을 직감할 수 있다⁽³⁾. 어리 예측에 의하면 차후 수년간에 있어서의 에너지 소비증 가율은 7~8%는 될 것으로 예측되므로 에너지의 효율적 이용은 더욱 중요시 되어야 할 것이다.



국민총생산(U.S. DOLLARS/1인)
그림 1-1. 국민총생산과 에너지 소모량

* 정회원, 서울대학교 공과대학

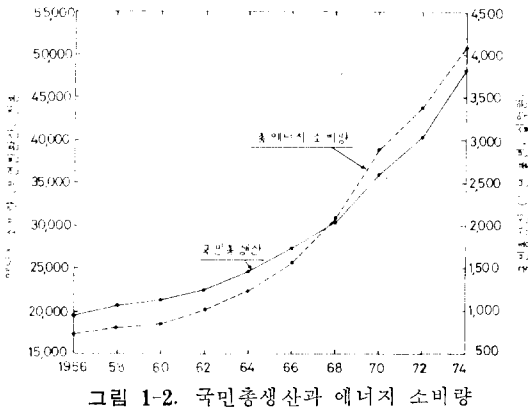


그림 1-2. 국민총생산과 에너지 소비량

에너지의 효율적 이용은 지난 수년간에 시작된 문제만은 아니다. 1974년 미국 상원 상공 위원회에서 미국의 100개 주요 산업체에 대하여 에너지 절감 상황을 조사한 바에 의하면 업체설립 당시부터 에너지의 효율적 이용으로 원가절감과 연관 에너지비용은 크게 절감되어 왔다⁽³⁾. 그러나 1950년 이후 각종 에너지사용에 있어서 효율상승은 거의 점진적이거나 그 증가율이 둔화되어 있다. 특히 에너지 최종 사용형태로서 주종을 이루는 전력에너지의 경우 화력발전이나 원자력발전의 열효율 향상은 포화상태에 이르러 현재까지의 발전방식으로 큰 진전이 있기를 기대하기는 대단히 어렵다. 발전 기술면의 획기적 진전은 전자유체(MHD)발전, 초전도발전등에서 기대하거나 다른 에너지원을 사용하는 고속증식로, 핵융합, 태양열발전 등의 개발이 기대되고 있으나 이는 장기적 목표로 삼아야 할 것이다.⁽³⁾ 그러나 발전시의 전환효율이 한계점에 도달하였다함은 전력 생산 자체만에 국한된 문제로서 전력생산시에 50% 이상의 유용성이 낮은 에너지가 폐기되어 대기중으로 방출되어 버린다는 점에 주목하여야 한다. 이러한 문제는 이미 1920년대에 석탄이용 화력발전시부터 대두되어 전력부문 생산측과 전력, 열에너지 사용자간에 논란의 대상이 되어 왔다⁽⁴⁾. 즉 1920년대에 발전효율의 증가를 고려하지 않은 상태로 열에너지와의 조합사용으로 전체효율을 증가시키는 문제가 크게 제기되었으나 발전부문효율의 급격한 증대로 부분적 사용에 그치게 되었던 것이다. 오늘에 이르러 이는 동일한 양상으로 중요성을 띠게 되었으며 열에너지 자체로 전력을 동시에 공급하여 2종 이상의 필요한 에너지를 사용함으로써 생기는 에너지의 이용을 체계적으로 고려할 필요가 있다. 즉 열기관을 비롯한 각종 단위기기 장치로서의 효율의 증대는 거의 한계점에 다달은 감이 있

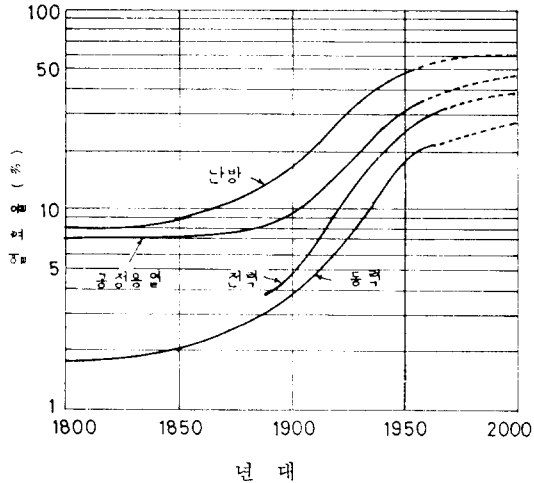


그림 1-3. 1800년 이후의 열효율의 변화

으므로 (그림 1-3) 단일 에너지원으로부터의 공급에 의하여 에너지이용율이 개선될 수 있다. 이를 개괄적으로 토탈에너지 시스템(total energy system)으로 통칭할 수 있다. 그러나 이러한 토탈에너지 시스템은 어느 경우에도 항상 적절하게 응용될 수 있는 것은 아니다. 실제로는 발전설비와 열사용설비는 설계, 제작상 제한이 있고 에너지 수요측도 적절한 비율로 에너지를 필요로 하므로 이 시스템의 적용을 위하여는 먼저 업종에 따른 에너지 필요량이 알려져야 한다. 또 하나의 부수적 문제는 2종 이상의 에너지를 동시에 다루므로서 생기는 에너지 사용의 평가문제이다. 즉 전력과 열 에너지라는 다른 종류의 에너지 평가에 있어서는 적절한 환산계수가 도입되어 효율을 합리적으로 정의하여야 할 것이다.

2. 효율의 합리적 정의

2.1. 필요성

에너지 절약의 척도로 사용되는 효율은 열역학의 제 1법칙의 관점에서 공급된 에너지량에 대한 유용하게 사용된 에너지량의 비율을 의미한다. 그러나 이 효율을 2종 이상의 형태가 다른 에너지 공급원이 있거나 사용시의 에너지 형태가 다를 때는 직접 비교는 아무런 의미도 가지지 못한다. 예를 들어 연료라는 화학에너지 형태로부터 전력에너지를 생산할 때 효율이 30~40%로 표시되거나 연료로부터 수증기를 생산, 생산공정에 열에너지 형태로 이용할 때는 70~90%로 표시되는 경우가 많다. 더욱 토탈에너지시스템에서와 같이 전력

에너지와 공정을 열에너지를 동시에 생산, 공급할 때는 위의 두 값의 중간값을 가지게 되나 이는 에너지의 질에 따른 평가없이 제1법칙의 관점에서 상이한 종류의 에너지에 대한 환산만을 한 것으로 실제 열역학적 측면에서는 불합리한 것이다. 수증기만을 생산하는 경우라도 현재 사용되고 있는 효율의 개념으로는 고온 저온 수증기에 대한 질적 고려가 되어 있지 않다. 에너지의 형태가 변하지 않는 열교환기와 같은 경우에도 고온 매질로부터 저온 매질로 열교환을 시키는 경우 열교환기의 외부가 완전히 보온이 되어 있다면 전 열효율을 100%로 표시할 수 있으나 이것이 열교환기의 성능을 올바르게 표시한 것은 아니다. 열교환기의 경우는 온도차가 작은 상태로 동일 열량을 전달시킬 수 있을 때 성능은 양호한 것으로 단정되어야 할 것이다. 이와같은 불합리점을 배제한 합리적 효율이 정의되어야 한다.

2.2. 유용에너지

제1법칙의 관점에서만 취급한 불합리점을 배제한 합리적 효율은 고전 열역학에서 취급하는 유용에너지(available energy)에 기반을 두어 정의할 수 있다. 열역학 제1법칙에 따르면 열과 일은 에너지 보존의 관점에서 더 등한 것으로 표현되나 제2법칙에 의하면 열에서 일로의 완전한 변환은 부정되고 있다. 즉 에너지의 유용성은 다른 것으로 표현된다. 일개 물질의 상태가 온도 T_0 , 압력 P_0 로 변화하여 변환되는 동안 행할 수 있는 최대유용일은 폐쇄계에 있어서는

$$A = E - T_0S + P_0V - \sum_j \mu_j^0 N_j$$

로 표시된다^(5,6). 여기서 A 를 열역학적 유용에너지(thermodynamic availability)라 부르고 E, S, V 는 각각 에너지, 엔트로피와 체적을 나타내고 마지막 항은 화학포텐셜에 의한 영향을 표시한다. 많은 공업적인 문제는 연속적인 정상 상태에 대하여 취급되며 이때의 최대 유용일은

$$B = H - T_0S - \sum_j \mu_j^0 N_j$$

로 표시되고^(5,6), B 를 정상유동시의 열역학적 유용도라 부른다. 여기서 $\sum_j \mu_j^0 N_j$ 는 작업물질이 대기의 성분과 다를 때 확산에 의하여 행해질 수 있는 일을 나타내는 것으로 연소생성물과 같은 경우에는 무시할 수 없는 양이나 이는 연소를 포함하지 않는 많은 공정에서는 제외하여도 무방한 양이다.

이들의 개념은 J.W. Gibbs에 의해 해석적 기반이 마련되어⁽⁷⁾, 이후 J.H. Keenan에 의해 더욱 발전되었다

(8,9). 최근에 R.W. Haywood에 의해 유용에너지에 연관된 여러개의 정리가 간결한 공식으로 정리표현되었다⁽⁶⁾. 유용에너지를 에너지의 효율적 이용의 척도에 사용하는 이유는 단순한 엔탈피(혹은 에너지)의 계산만으로는 기기 또는 공정에서의 취약점을 발견하기가 어려운데 있다. 몇개의 예를 제시하면 다음과 같다. 먼저 수증기를 사용하는 증기발전의 경우 복수기에서 50% 이상의 엔탈피가 대기 또는 냉각수로 유출되어 여기서 큰 개선점을 찾을 수 있을 것 같으나 실제로는 유용에너지의 관점에서 보면 이 양은 큰 비중을 차지하지 못하는 것이다. 즉 증기사이클에서의 복수기는 사이클 형성에 필요불가결한 것으로 여기에서의 개선의 여지는 별로 없는 것으로 생각된다. 에너지의 효율적 이용방법의 모색은 단순한 엔탈피(에너지)에 대하여 시가 아니고 유용에너지의 손실을 줄여야 하는데 있다. 다음은 연료의 연소의 경우를 검토한다. 연소과정이 단열적으로 정적과정에서 이루어질 때 열전달 및 일의 전달등 에너지의 손실은 전혀 없다. 즉 완벽하게 단열된 상태에서 100%의 연소효율로 작동되는 각종 연소기기의 개선점은 전혀 없는 것으로 판단되어야 하나 실제 연소 과정은 많은 공정에서 상당히 큰 비중의 유용에너지 손실을 초래하고 있다. 그림 2-1은 액체연료 옥테인(C_8H_{18})에 대한 연소과정을 나타낸 것이다. 실온에서 이 연료의 고발열량(HHV)은 44,790kJ/kg이고 이때의 유용에너지는 발열량보다 3.9%가 큰 46,550kJ/kg

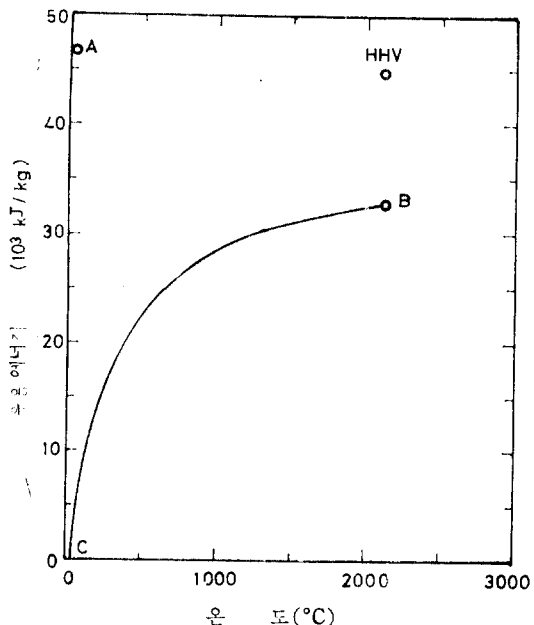
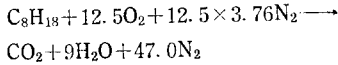


그림 2-1. 옥테인 (C_8H_{18})의 유용에너지 변화

으로 계산된다(점 A). 이 유용열(점 A)을 얻기 위하여는 연료의 산화를 이상적인 가역연료전지에서 수행하고 여기서의 생성물을 대기온도까지 낮추어 대기상태로 확산시키며 일을 추출하여야 한다. 물론 이는 아직 실용적으로 상용화되어 있지는 못하다. 대신 연소에 의해 연료를 사용하는 경우 대기중의 공기에 의해 이온 공기량으로 완전히 연소될 때 그 반응식은 다음과 같다.



대기의 온도를 25°C로 가정할 때 단열화염 최고온도는 2,120°C가 되고 이때의 유용에너지는 32,770kJ/kg이 된다(점 B). 여기서 이미 상태 A에서의 유용에너지의 29.6%에 해당하는 13,780kJ/kg의 유용열 손실이 나타난다. 이 유용에너지가 이상적인 과정에 의해 대기상태(점 C)까지 변화시켰을 때 얻을 수 있는 최대 유용열이 된다. BC사이를 연결한 곡선은 연소생성물과 수열물질이 모두 T로 된 경우의 유용에너지를 표시한다 이 그림에서 수열물질의 온도가 600°C이하인 경우 유용 에너지의 손실이 온도가 내려감에 따라 심하게 나타남을 알 수 있다. 300°C에서는 유용열이 최초의 45.2%가 손실로 되어 단지 17,960kJ/kg만이 이용 가능하다. 0.2MPa의 압력에서 공정을 포화증기(포화온도 120°C)를 사용하는 경우는 최초유용열의 72.4%가 손실로 나타나 유용열은 9,040kJ/kg 밖에 되지 않는다. 이때의 손실 72.4%와 45.2%의 차이 27.2%는 저온과 고온에서 열에너지를 사용함으로써 발생하는 차이로 고온부와 저온부 열이용의 겸용 방식으로 이 손실을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 흔히 거론되는 토탈에너지 시스템에서의 에너지절약은 바로 “유용에너지의 손실감소”라는 말로 대체될 수 있을 것이다.

그림 2-2는 연료의 연소로 수증기를 발생시켜 발전을 하고 최종 소비자에 이르러 소비되는 유용에너지의 변화과정을 개략적으로 표시한 것이다. 여기서 유용도로 표시한 것은 최초 연료의 유용에너지에 대한 각 상태의 유용에너지의 비를 나타낸다. 앞에서 예를 들었듯이 연소과정의 비가역성으로 인하여 약 30%의 유용열이 손실되고 열교환 과정에서 다시 20% 가량의 유용열 손실이 나타난 다음 발전 및 배전 과정에서 약 15%의 유용열 손실이 나타나 다음 최종소비자에게로 흔히 말하는 발전효율과 비슷한 약 35%만이 공급되나 여기서도 대부분의 유용열이 손실되고 단지 평균 10% 내외만이 유효하게 사용된다. 물론 최종 소비단계에서의 유용열은 전력의 사용목적에 따라 크게 달라

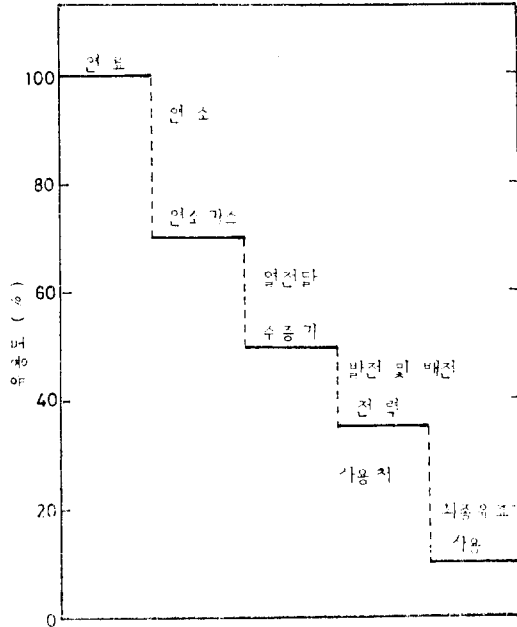


그림 2-2. 전력사용시의 유용도의 변화

진다. 지운의 온수 가열이나 난방목적으로는 수 펌프 등까지 믿어질 것이며 고온가열, 모타의 작동 등에 사용된다면 유용열은 크게 증가될 것이다. 전력에너지 사용때 열손실이 없는 단열과정을 생각한다면 제1법칙에 의한 효율로서는 여러경우에 대한 다른 점을 전혀 고려해 넣을 수 없으므로 에너지의 효율적 사용에 대한 가치판단의 척도가 되기에 비합리적 임은 자명한 일이다.

2.3. 합리적 효율의 정의

열역학 제1법칙에서 에너지 자체는 소모되는 것이 아니고 변환만이 이루어지므로 실제과정에서 일어나는 손실을 고려하여 효율적 사용의 기준을 정하는데, 과정에서 소비되는 양을 에너지 단위로 표시함이 편리하다. 이양을 위에서 설명한 유용에너지로 선택하여 과정에서 비가역성을 고려한 열역학 제2법칙에 의한 효율을 정함으로써 에너지의 효율적 사용에 대한 기준 척도로 삼을 수 있다. 즉 주어진계 또는 과정에서 두 상태간의 변화에 의하여 발생하는 실제 유용열에 대한 최대 유용열의 비로 유용도 ϵ 를 정의한다. 또 일을 소모하는 과정에서는 필요한 최소유용열의 실제 유용열에 대한 비로 표시할 수 있다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\text{실제유용열}}{\text{최대유용열}} \quad \text{또는} \quad \epsilon = \frac{\text{최소유용열}}{\text{실제유용열}}$$

유용도(effectiveness)를 사용할 때 그 이점은 다음과 같다.

1. 최대치는 1이 된다.

지금까지 사용해온 효율(eficiency)에 비해 에너지 사용의 절대적 척도가 될 수 있다. 제1법칙에 의한 효율에서는 냉동기에서와 같이 1이 훨씬 넘는 성능 계수를 취급하는 경우가 많으나 이는 입력에너지가 전력, 출력에너지가 열에 에너지가 되어 양쪽의 에너지 형태가 다르다는 것을 고려해 넣지 않으므로써 생긴 것이다.

2. 동종의 에너지에서 상태에 따른 가치부여가 가능하다.

동일한 연료로서 연소를 통하여 가열할 때 수열물질측의 상태에 따른 효율성이 종래의 효율에서는 같은 양의 에너지(엔탈피)일 때 동일하게 표시되나 유용도로는 더 차를 표시할 수 있다. 드로틀링과정(throttling process)에서 생기는 손실을 나타낼 수 있는 것도 한 예가 된다.

3. 이종의 에너지에 대한 변환계산이 가능하다.

열에너지와 일 형태의 에너지가 혼합생성될 때 제 1법칙의 관점에서의 효율에서는 일과 일의 환산계수에 의해 계산되므로 열에너지 생성비율을 증가시킬 때 전체효율은 증가되는 것으로 나타난다. 그러나 이것 또한 에너지의 상태에 따른 가치를 부여하지 않은 데서 생기는 모순점이다. 흔히 토탈에너지 시스템에서 보통 생각하기 어려운 높은 효율을 제시함으로써⁽¹⁰⁾ 에너지 사용자측의 사용방법 선택에 혼란을 초래한다. 그러나 유용도를 사용함으로써 이 모순점은 제거될 것이다.

4. 에너지 사용의 최적화 계산이 가능하다.

에너지 가치기준 척도가 유용도에 의해 주어지므로 각 공정, 열장치 등에서의 경제적인 면을 고려한 최적화 계산이 가능하다. 이와 같은 개념을 공정에 적용시킴으로서 많은 경우 경시되어온 재료가 내포한 에너지나 유용성을 수치화 할 수 있다. 여기서 다음의 사실을 열거할 수 있다.

(1) 열역학적 측면에서 증기는 고에너지를 가지고 있으나 유용성이 낮은 상태의 물질이므로 유용성은 낮으나 고에너지를 보유한 폐가스를 증기발생에 이용하는 것이 효율적이다.

(2) 연료를 증기발생에 사용하는 경우라면 연소물질을 가급적 고온에서 사용하여야 한다. 즉 고온, 고압상태의 증기를 발생하여 전력발생 또는 유사동력용으로 사용하고 차후 저압축, 즉 저온측에서 공정용 증기를 사용하면 에너지 사용상 합리적이다. 유사한 방

법으로 연소가스를 가스터빈에 이용하고 다음 단계에서 증기 발생을 시킴이 타당하다.

(3) 폐기물로 처리되는 물질의 에너지 또는 유용성이 물질정산 및 열정산에 포함되어야 한다.

3. 주요산업체의 업종별 에너지 사용

3.1. 에너지의 용도별 사용

우리나라의 에너지 사용량은 그림 1-2에서 표시된바와 같이 계속 9% 이상의 증가율을 가지고 증대되어나가고 있다. 이를 용도별로 볼 때도 절대량이 계속 증가되어 갈 것은 분명하다. 표 3-1은 1976년도의 용도별 사용량을 나타낸 것이다. 여기서 수력 및 원자력 발전에 의한 양은 제외되어 있다. 표에서 알 수 있듯이 산업용과 발전용이 차지한 비율은 총에너지 사용량의 40%를 초과하고 있다. 이 비율은 유류 사용량만 고려한다면 약 57%까지 증가된다. 표 3-1의 마지막 칸은 미국의 1968년의 에너지의 용도별 사용량을 표시한다⁽¹¹⁾.

표 3-1. 에너지의 용도별 사용(1976년)

용도별	사용량(10 ³ BbL)	비율(%)	미국의비율(%)
주거용	71,226	37.4	22.5
산업용	39,513	20.8	32.0
발전용	36,668	19.3	20.5
운수용	18,951	9.9	25.0
기타	23,974	12.6	—
계	190,322	100.0	100.0

이중 가장 에너지의 효율적 이용의 가능성이 높은 산업용 에너지 사용을 업종별로 분류하면 표 3-2와 같다.

표 3-2. 산업용 에너지의 업종별 사용(1976년)

업종	사용량 (10 ³ BbL)	비율(%)
요업	11,369	28.8
화학	11,100	28.1
금속	7,227	18.3
섬유	3,152	7.9
식품	2,912	7.4
목재	1,463	3.7
제조	1,145	2.9
기타	1,145	2.9
계	39,513	100.00

3.2. 사용 에너지의 형태

산업체에서의 사용에너지의 형태는 전력과 열에너지의 2종으로 대분할 수 있다. 업종별 사용에너지의 형태는 1개 업종내에서도 세부부분품종, 공정 등의 다양성으로 평균치를 택하기가 대단히 어렵다. 요업을 비롯한 일부 업종은 열에너지의 형태가 연료를 연소시킨 연소가스를 직접 이용하는 것이나, 대부분의 경우 연소가스로부터 열교환을 시켜 수증기의 형태로 열에너지를 이용한다. 1975년부터 1977년사이의 사용실적⁽¹²⁾으로 부터 열에너지와 전력에너지 사용 비율을 같은 단위로 환산하여 보면 방직, 방직의 경우 0.25~2.4, 모직업의 경우 3.7, 섬유화학 1.8~4.5, 제지업 1.3~3.4, 고무공업 2.5~4.6 정도이고 시멘트를 비롯한 요업, 제철, 화학공업등은 그 비가 상당히 다양하다.

4. 토탈에너지 시스템

4.1. 개 요

단일 기기 또는 장치에 의한 에너지 효율은 일부 분야에서는 개선의 여지가 많이 있으나 발전시설을 포함한 근대화 된 산업체에서의 효율증대는 제재의 방법으로 획기적 변환을 기대하기는 어렵다. 따라서 2종 이상의 에너지 사용 형태를 동일 에너지 원으로부터 공급하는 토탈에너지 시스템의 적용이 필요한 것으로 생각된다. 이에 는 공정용 증기와 전력의 조합생산, 전력생산 때의 증기터어빈-가스터어빈의 조합, 증기터어빈-흡수식 냉동기의 조합사용 등이 포함될 수 있다.

4.2. 수증기의 열역학적 성질의 전산화 및 사용

수증기를 포함하는 많은 계산은 수치화된 증기표를 사용하거나 증기표의 기본함수인 헬름홀츠(Helmholtz) 함수 $\psi = \psi(T, v)$ 를 사용하여야 한다. 여기서는 Keenan 등의 증기표⁽¹³⁾에 주어진 헬름홀츠함수와 JSME증기표^(14,15)의 관계식을 사용했다. JSME증기표에는 비체적 엔탈피 엔트로피가 온도와 압력의 함수로 주어지 있어서 주어진 압력과 엔트로피에 대한 각 성질을 계산해야 하는 경우 계산수행에 편리하나 과열증기역에서만 성립하는 결점이 있고 모든 영역에 대해서 적용되는 Keenan의 증기표에 제시된 헬름홀츠함수는 온도와 비체적의 함수이므로 앞에 설명한 계산을 할때는 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 여기서는 위의 두 식을 절충하여 주어진 온도와 압력에 대해서 엔탈피, 엔트로피 및 그 온도에 대한 도함수를 계산하는

SUBROUTINE PROPPT는 JSME증기표에 따르고 주어진 온도와 비체적에 대해 헬름홀츠함수와 그 도함수들을 구하는 SUBROUTINE MIT는 Keenan의 증기표에 따랐다. 그리하여 주어진 온도와 압력에 대해 포화수 또는 포화증기의 엔탈피와 엔트로피를 구하는 SUBROUTINE HSFPT는 SUBROUTINE MIT를 사용했으며 주어진 엔트로피와 압력에 대한 과열증기의 엔탈피를 계산하는 SUBROUTINE HSP와 주어진 엔탈피와 압력에 대해 과열증기의 엔트로피를 구하는 SUBROUTINE SHP는 SUBROUTINE PROPPT를 사용했다. 주어진 압력에 대한 증기의 포화온도는 FUNCTION TSAT로 구하였는데 이 FUNCTION TSAT는 현존하는 증기표의 수치를 간단한 식으로 커브피팅(curve fitting)한 것이다. 계산결과 오차는 아주 작아서 본 연구의 계산용으로 충분하였다. 그리고 SUBROUTINE HSP와 SUBROUTINE SHP에서는 온도를 임의로 정하여 뉴우튼 이터레이션 방법을 써서 만족할 만한 수렴치를 얻었으며, SUBROUTINE SHFPT에서는 비체적을 임의로 정하여 같은 방법으로 계산한 결과 만족할 만 하였다.

4.3. 증기와 전력의 조합생산

수증기는 공정용 열에너지 매체로 많이 사용되고 있으며 동시에 대부분의 전력에너지 발생에서 사용되고 있다. 업종에 따라 다르기는 하나 공정용 증기는 대부분 일정한 압력하에서 포화증기로부터 포화수로 변화하는 등온등압 과정에서의 잠열을 이용한다. 사용범위도 공정에 따라 다르나 대개 0.2~0.3MPa의 비교적 낮은 압력범위에 있다. 따라서 이 공정용 열에너지를 연소로 통하여 생성함은 유용에너지를 파괴시키는 결과를 초래하는 것이다. 여기에 공정용 증기와 전력이 라는 고급에너지 생성을 동시에 시도하는 방법이 에너지 절약 방법의 일환으로 대두될 수 있다. 즉 증기터어빈(extraction turbine)이나 배압터어빈(back pressure turbine)을 사용하여 전력을 발생시키고 동시에 공정용 증기를 추출하는 것이다.

그림 4-1에 증기와 전력공급을 조합하여 사용할 때의 온도-엔트로피(T-S) 선도가 표시되어 있다. 여기서 각 상태 1-6은 다음과 같다.

- 1: 펌프의 입구 상태
- 2: 펌프의 출구 상태
- 3: 터어빈의 입구 상태
- 4, 4': 터어빈의 출구상태로, 가역단열팽창때와 실제 팽창때의 상태
- 5, 5', 6, 6': 추출증기의 상태로, 가역단열팽창때와 실

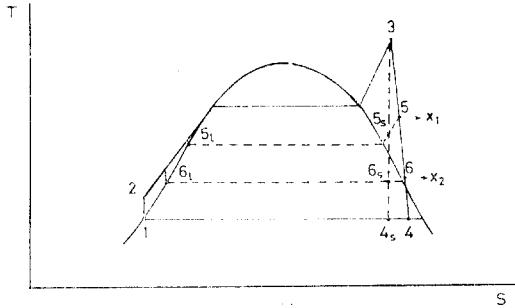


그림 4-1. 증기 발전조합계의 T-S 선도

제 팽창때의 상태

$5_t, 6_t$: 공정용 증기가 응축된 포화액 상태

x_1, x_2 : 터빈 입구에서 공급된 증기 1kg에 대한 제 1차 및 제2차 추기량(kg)

공급증기 1kg에 대한 전력에너지 생산량 W_E 는

$$W_E = \{x_1(h_3 - h_{5s}) + x_2(h_3 - h_{6s}) + (1 - x_1 - x_2) \times (h_3 - h_{4s})\} \eta_t \eta_g$$

로 계산된다. 여기서 터빈 효율 η_t 는 각단에서 동일한 것으로 가정하였고 η_g 는 발전기 효율이다.

발생된 전력 W_E 는 100% 유용에너지로 사용될 수 있는 에너지이다. 한편 발생증기의 유용일은

$$W_s = x_1 \{ (h_5 - T_{0s/5}) - (h_{5t} - T_{0s/5t}) \} + x_2 \{ (h_6 - T_{0s/6}) - (h_{6t} - T_{0s/6t}) \} \\ = x_1(b_5 - b_{5t}) + x_2(b_6 - b_{6t})$$

로 표시된다. 여기서 하첨자를 제외하고 쓰면 $b=h-T_{0s}$ 를 표시한다. 추출증기는 동일압력에서 응축되어 재순환되므로 W_E 와 W_s 를 생성시키는데 필요한 엔탈피는

$$Q_C = \{x_1(h_3 - h_{5t}) + x_2(h_3 - h_{6t}) + (1 - x_1 - x_2)(h_3 - h_2)\} / \eta_B$$

가 된다. 연료의 유용에너지는 그림 2-1에서 표시된 바와 같이 거의 연료의 발열량과 비슷하므로 Q_C 를 과정을 수행하는데 사용된 유용에너지 b_{ca} 로 생각할 수 있다.

따라서 조합생산시의 유용도 ϵ_c 는

$$\epsilon_c = \frac{W_E + W_s}{b_{ca}} = \frac{W_E + W_s}{Q_C} \\ = \eta_t \eta_g \{ [x_1(h_3 - h_{5s}) + x_2(h_3 - h_{6s}) + (1 - x_1 - x_2)(h_3 - h_{4s})] \\ + [x_1(b_5 - b_{5t}) + x_2(b_6 - b_{6t})] \} / \\ \{ x_1(h_3 - h_{5t}) + x_2(h_3 - h_{6t}) + (1 - x_1 - x_2) \times (h_3 - h_2) \} / \eta_B$$

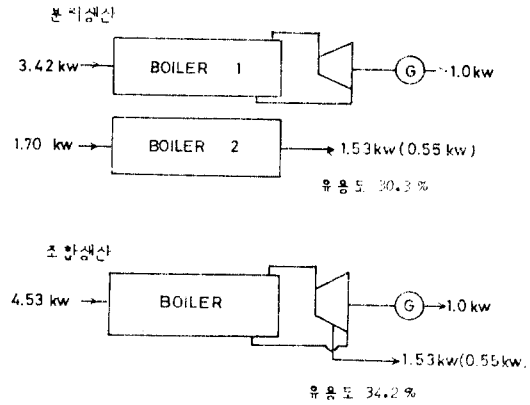


그림 4-2. 증기 전력의 분리생산과 조합생산의 예

로 표시된다. 위에 계산한 W_E 및 W_s 와 동일한 양의 전력 및 공정용증기를 별도 생산하는 경우 소요 유용에너지 b_{sa} 는 소요엔탈피 Q_S 와 근사하며

$$b_{sa} \approx Q_s = W_E / \eta_B \eta_g \eta_t \eta_R + \{x_1(h_5 - h_{5t}) + x_2(h_6 - h_{6t})\} / \eta_B$$

가 된다. 여기서 $\eta_R = (h_3 - h_{4s}) / (h_3 - h_2)$ 이다. 따라서 증기와 전력을 별도 생산할 경우 유용도는 ϵ_s 는

$$\epsilon_s = \frac{W_E + W_s}{b_{sa}} \\ = \frac{[\eta_g \eta_t \{x_1(h_3 - h_{5s}) + x_2(h_3 - h_{6s}) + (1 - x_1 - x_2)(h_3 - h_{4s})\} + \{x_1(b_5 - b_{5t}) + x_2(b_6 - b_{6t})\}]}{[W_E / \eta_B \eta_g \eta_t \eta_R + \{x_1(h_5 - h_{5t}) + x_2(h_6 - h_{6t})\} / \eta_B]}$$

가 된다. 또한 조합방식에 의하여 절약되는 비율은 별도 방식에 의한 것을 기준으로 하여

$$\frac{b_{sa} - b_{ca}}{b_{sa}} = 1 - \frac{b_{ca}}{b_{sa}} = 1 - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c}$$

가 된다.

전력과 증기를 별도 생산할 경우 공정용 증기는 보통 저온이므로 그 유용에너지가 적으며 따라서 보일러에서의 열전달에 따른 유용에너지 손실이 크므로 그 유용도가 낮을 것이다. 그러나 조합생산의 경우 우선 고온의 증기로부터 동력을 생산하며 나머지로 공정열을 공급하므로 사용되는 모든 증기가 고온으로 가열되므로 연료로부터의 유용에너지의 전달이 크다. 따라서 유용도 또한 높을 것이 예상된다. 예로써 480°C, 6MPa의 초기 증기조건을 가지는 발전소가 설치된 공장에서 1MPa에서 증기 0.5kg/kg을 추가시켜 공정용으로 사용할 경우 연료소비량은 3,280kJ/kg증기이며 별도생

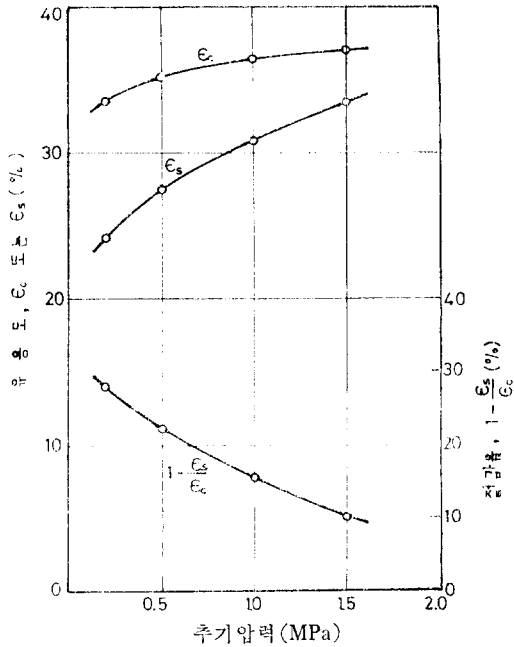


그림 4-3 증기전력의 분리생산과 조합생산시의 유용도 (초기온도 350°C, 압력 2.5MPa)

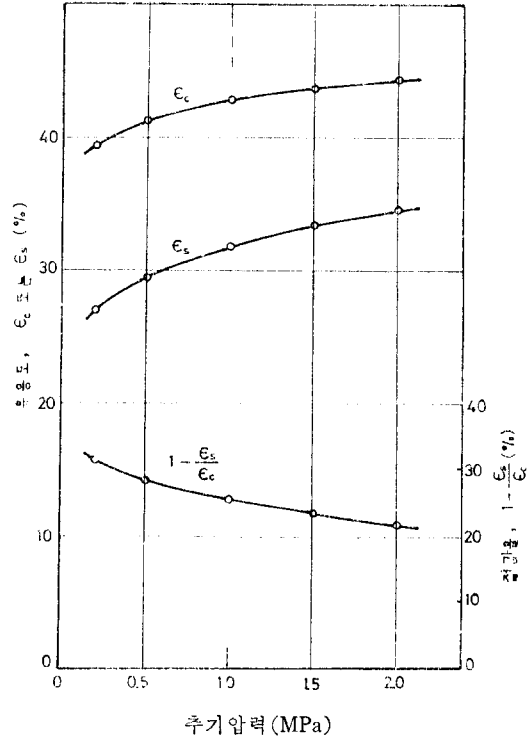


그림 4-5. 증기-전력의 분리생산과 조합생산시의 유용도(초기온도 550°C, 압력 11MPa)

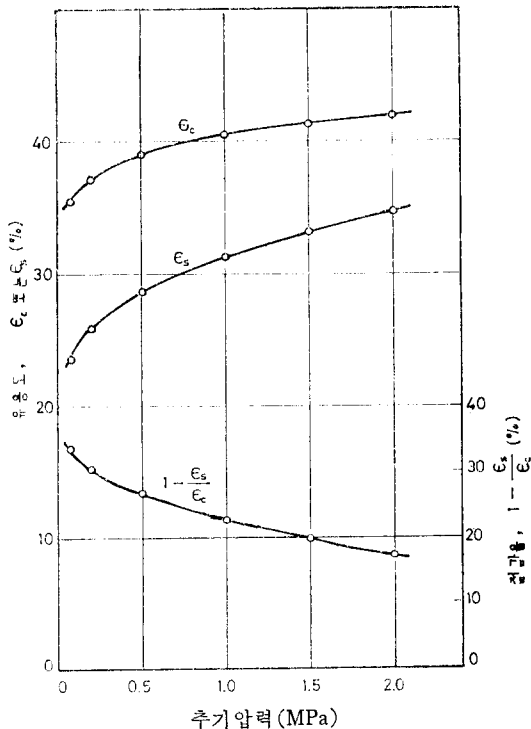


그림 4-4. 증기 전력의 분리생산과 조합생산시의 유용도(초기온도 480°C, 압력 6MPa)

산을 한다면 3,710kJ/kg증기가 되어서 연료절감율은 11.6%에 도달한다. 이 경우가 그림 4-2에 표시되어 있다.

그림 4-3, 4-4, 4-5는 증기를 완전 추기시킬 때 즉 배압터어빈을 사용할 때 그 추기압력과 초기조건에 따른 유용도의 변화를 나타내고 있다. 보는 바와 같이 조합생산의 잇점은 추기 압력이 높아질수록 줄어들고 있으며 또 플랜트가 대형화 될수록 즉 터빈 입구증기의 온도가 높아질 수록 조합생산의 이득은 늘어나고 있는데 그 이유는 보일러에서의 열전달이 보다 고온에서 일어나므로 유용에너지의 파괴가 적기 때문인 것으로 설명된다. 유용에너지의 절감은 초기조건 및 추기압력에 따라 다르나 10~30%에 이른다는 것을 알 수 있다.

그림 4-6은 추기압력이 각각 0.3, 0.5, 1.0MPa일 때 열에너지 소요량과 전력소요량의 비에 따른 추기량을 최초 증기량에 대한 비로 표시한 것이다. 여기서 터어빈입구의 초기조건은 11MPa, 510°C로 택하였다.

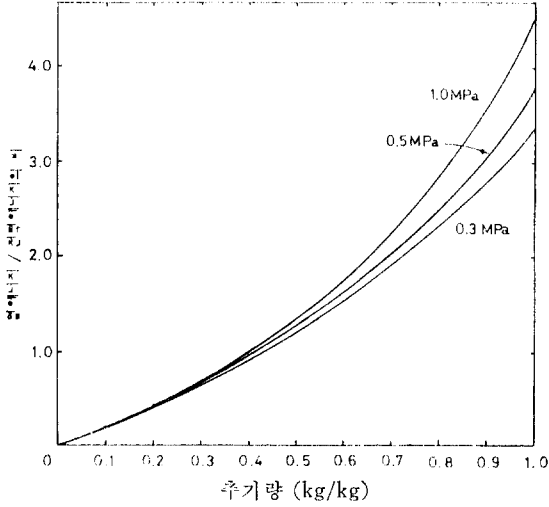


그림 4-6. 열에너지/전력에너지의 비와특기량의 관계

4.4. 가스터어빈의 이용

4.4.1. 가스터어빈을 사용할 때

그림 4-7은 표준적인 가스터어빈 사이클의 T-S선도이다. 압력 P_1 과 P_2 사이에서 작동되며 압축기효율

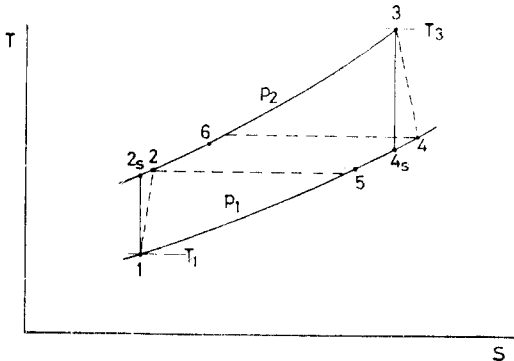
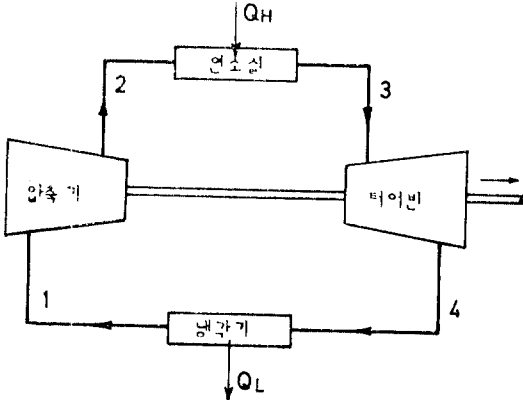


그림 4-7. 가스터어빈의 온도-엔트로피선도

η_{cr} , 가스터어빈 효율 η_{gt} 인 경우 그 최고, 최저 온도가 각각 T_3 , T_1 이라면 공기의 정압비열이 일정하다고 가정하고 각점의 온도를 계산한 결과는 다음과 같다. (16)

$$T_2 = \left[1 + \frac{1}{\eta_{cr}} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right\} \right] T_1$$

$$T_4 = \left[1 + \eta_{gt} \left\{ \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right\} \right] T_3$$

재생기를 사용할 경우, 배기가스 온도와 연소실 입구 온도는 각각

$$T_5 = (1 - \eta_{rg}) T_4 + \eta_{rg} T_2$$

$$T_6 = (1 - \eta_{rg}) T_2 + \eta_{rg} T_4$$

이다. 이때는 동력만을 생산하므로 유용도 ϵ 는 효율 η 와 거의 같다. 즉

$$\epsilon \approx \eta = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_6)}$$

이다. 이때 재생기를 충분히 이용했다 하더라도 배기가스 온도 T_5 는 상당히 높으며 그 열은 그냥 버려지게 된다. 배기가스 온도가 높으므로 가스가 지니는 에너지는 상당히 유용한 에너지이며 충분한 경제성을 가지고 회수될 수 있다. 그 폐열을 회수하기 위하여는 그림 4-8과 같이 배기가스의 냉각열을 일원으로 하는 비터링 사이클(bottoming cycle)의 설치가 필요하며 그 사

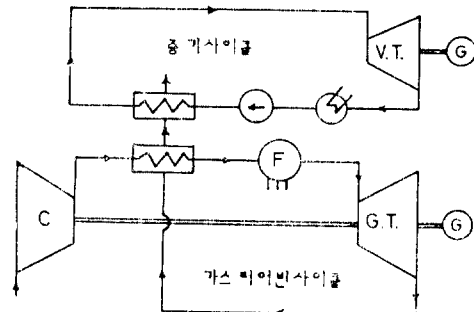
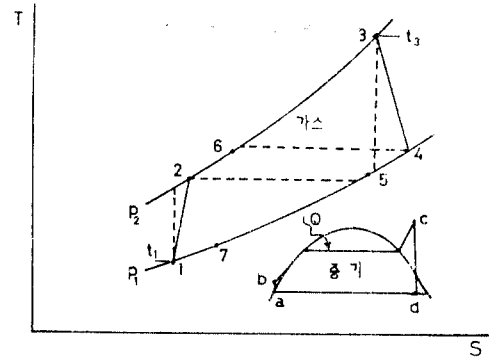


그림 4-8. 가스터어빈과 증기터어빈의 조합

이들의 작동유체로는 흔히 물이 많이 사용되나 열역학적 성질의 특성들을 고려하여 유기유체(organic fluid)를 사용하는 쪽도 검토가 되어야 한다.

4.4.2. 가스터어빈과 증기터어빈의 조합

전술한 바와 같이 가스터어빈의 폐열은 충분히 회수가 가능하다. 그 방법으로는 첫째 증기사이클의 열원을 완전히 폐열에 의존 하는 방법과 둘째, 더욱 많은 동력을 얻기 위하여 부가 연소를 시키는 방법이 있다. 그리고 가스 터어빈 폐열을 거대한 증기발전소의 급수 예열용으로 이용 할 수도 있으나 유용도가 낮아진다. 실제로 위에 말한 조합방식 으로 42~44%의 효율(이는 유용도와 같다)을 얻을 수 있다. 보조연소 없이 폐열만을 이용하는 경우 유용도는 다음과 같다. 배기가스가 T_7 까지 냉각되었다고 할때 그 증기사이클에 의한 출력은

$$c_p(T_5 - T_7) \eta_{RR} \eta_i$$

가 되어 유용도는

$$\epsilon = [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) + (T_5 - T_7) \eta_{RR} \eta_i] / (T_3 - T_6)$$

가 된다. 이때 공경용 증기의 생산을 위하여 증기축에 추기 또는 배압터어빈을 사용할 수도 있다. 이 조합방식에 의한 유용도는 앞으로 더욱 증가하여 가스터어빈 입구온도가 높은 발전소가 증기발전소와 조합될 경우 50% 이상이 될 것으로 예견되고 있다. 그림 4-9에 한 시스템의 예가 표시되어 있다. 이때 가스터어빈 배기가스로부터 재생되는 동력은 108.8kJ이며 시스템의 유용도는 39.0%이다. 만일 효율 70%의 재생기만을 사용했다면 그 유용도는 31.9%이고 연료 소비량은 757.6kJ에 이르러 조합방식의 연료절감은 18.2%에 도달할 것이다.

4.4.3. 유기유체 사이클과의 조합

가스터어빈 폐열회수 방법으로 유기유체(organic fluid)를 사용할 때의 시스템은 증기를 사용할 때와 같

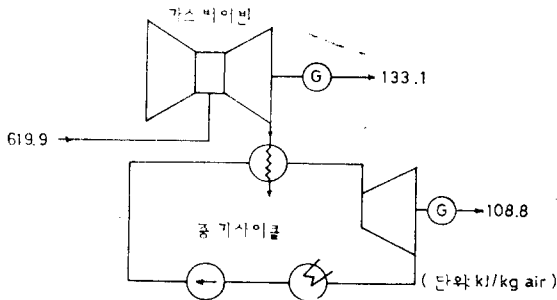
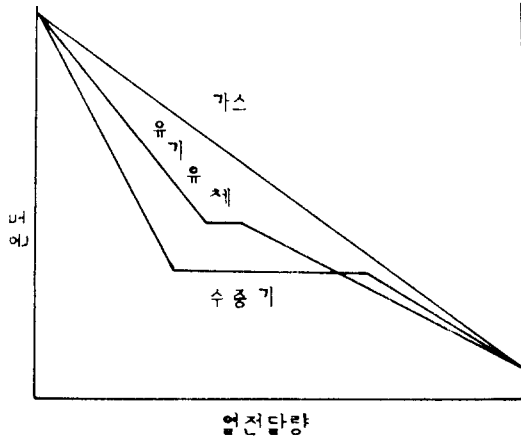


그림 4-9. 가스-증기터어빈의 조합예

다. 유기 유체는 보통 임계점이 낮으며 상온온도, 압력에서는 그 증발잠열이 물의 경우보다 아주 작거나 초임계상태로 사용된다. 열전달과정에서의 유동에너지 파괴는 고온부의 온도차가 클수록 심하므로 증발잠열이 물보다 작은 유기유체의 온도 상승곡선은 물의 경우보다 가스의 온도 하강곡선에 가깝게 되어 전열에 따른 유동에너지의 파괴가 적어지므로 전체적인 유용도의 향상이 기대된다(그림 4-10). 사이클 작업 유체



열전달량

그림 4-10. 배기가스와 작동유체의 온도분포

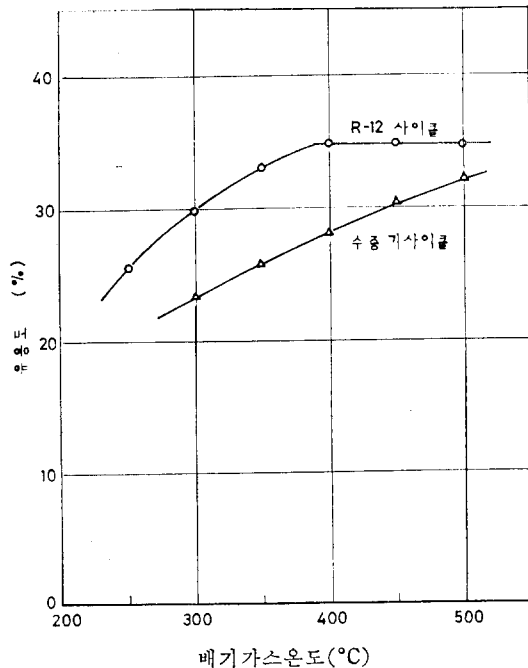


그림 4-11. 가스터어빈 배기온도와 랭킨사이클의 유용도

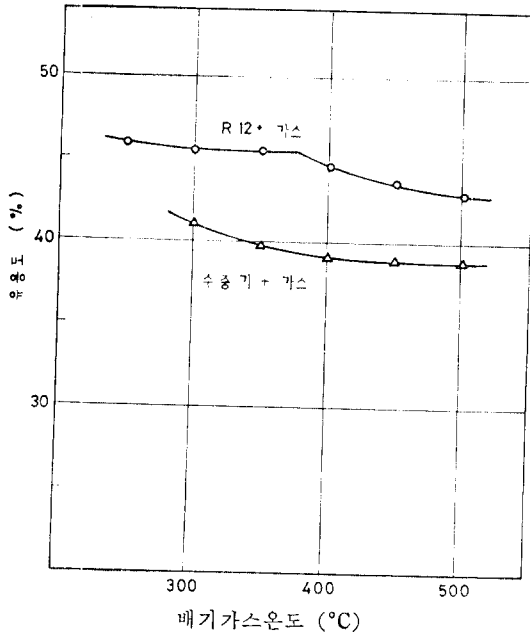


그림 4-12. 가스터어빈 배기온도와 조합계의 유용도

로는 각종 Freon, CH₂Cl₂, C₆F₆등이 많이 사용된다. 실제 사용시의 제한과 관련하여 Angelino & Moroni⁽¹⁷⁾는 배기가스의 냉각한계, 각 유기유체에 대한 효율계산 및 헬륨(helium)을 이용한 폐쇄 가스터어빈 사이클과의 조합에 대해 설명하며 고온에서의 운전과 연관된 유기유체의 열분해에 대해 언급하고 있다. 그림 4-11, 4-12에 Freon 12를 작업유체로 사용한 경우와 수 증기를 작업유체로 사용한 두 경우에 대해서 각각 유용도를 계산 표시하였다. 계산에 사용된 조건들은 표 4-1에 표시된 것과 같다.

표 4-1. 그림 4-11, 4-12에 사용된 조건들

가스터어빈입구온도	830°C
압력비	4.5
대기온도	20°C
압축기효율	0.80
가스터어빈효율	0.85
가스냉각가능온도	110°C
증기터어빈효율	0.80
유기유체터어빈효율	0.88
열교환기내최소온도차	20°C

Freon 12사이클의 유용도가 배기가스 온도 350~400°C에서부터 일정한 것은 그 이상의 고온에서는 열분해가 일어나므로 터어빈의 침식 때문에 사이클 최고 온도 상승에 따른 유용도의 증대를 기대할 수 없기 때

문이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Freon 12 사이클을 이용한 이득은 15%에 이른다. 보다 자세한 계산을 위해서는 광범위한 유기유체의 열역학적 성질 자료의 수집이 필요하다. 여기서는 비교적 정확한 자료를 얻을 수 있었던 Freon 12에 대하여 했으나 기타 유체에 대하여도 이러한 계산이 행해져야 할 것으로 특히 진열과정에서의 유용일 손실에 대한 해석이 이루어져야 할 것이다.

4.5. 흡수식 냉동기의 사용

4.5.1. 증기터어빈과 함께 사용할 경우

보통의 흡수식 냉동기는 그 열원으로 저압증기를 사용하고 있으며 증기를 생산하기 위하여 따로 보일러를 설치하는 것은 앞서의 공정용 증기생산의 경우와 마찬가지로 비합리적이다. 그러므로 흡수식 냉동기의 가동을 위해 배압터어빈 또는 추기터어빈의 사용이 좋을 것으로 예상된다. 그림 4-1에서 전력생산량은

$$W_E = \eta_1 \eta_g [x_1(h_3 - h_{5s}) + x_2(h_3 - h_{6s}) + (1 - x_1 - x_2)(h_3 - h_{4s})]$$

이고, 증기에 의한 유용에너지 생산은 고압부 추출증기에 의한 유용에너지

$$B_1 = x_1(b_5 - b_{5t})$$

와 전부 흡수식 냉동기에 쓰인 저압부 추출증기에 의한 량

$$B_2 = x_2(h_6 - h_{6t})(COP)_a(\eta_{ge})(1 - T_{evap}/T_0)$$

이다. 여기서 η_{ge} 는 냉동기 제네레이터(generator)로의 전열효율이며 T_{evap} 는 증발기(evaporator)의 온도이다. 이를 생산하기 위한 연료의 유용에너지는 연료의 발열량과 거의 같으며

조합생산의 경우

$$b_{ca} \approx Q_c = [x_1(h_3 - h_{5t}) + x_2(h_3 - h_{6t}) + (1 - x_1 - x_2)(h_3 - h_2)]/\eta_B$$

별도생산의 경우

$$b_{sa} \approx Q_s = W_E/\eta_1 \eta_g \eta_B \eta_R + [x_1(h_5 - h_{5t}) + x_2(h_6 - h_{6t})]/\eta_B$$

이 되어 그 유용도는 각각

$$\epsilon_c = (W_E + B_1 + B_2)/Q_c,$$

$$\epsilon_s = (W_E + B_1 + B_2)/Q_s$$

가 된다. 위에서 설명한 이유로 ϵ_c 가 ϵ_s 보다 클 것이 예상된다.

증기터어빈의 입구온도가 480°C, 압력이 6MPa이고 0.07MPa (포화온도 90°C)에서 일부추기시킬 때, 그 증기를 성능 계수 0.78의 흡수식 냉동기에 완전 이용할 경우, 유용도의 냉동부하에 따른 변화가 그림 4-13

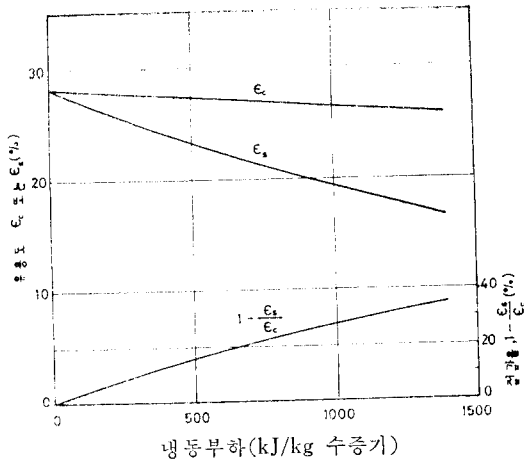


그림 4-13. 냉동부하와 유용도의 변화

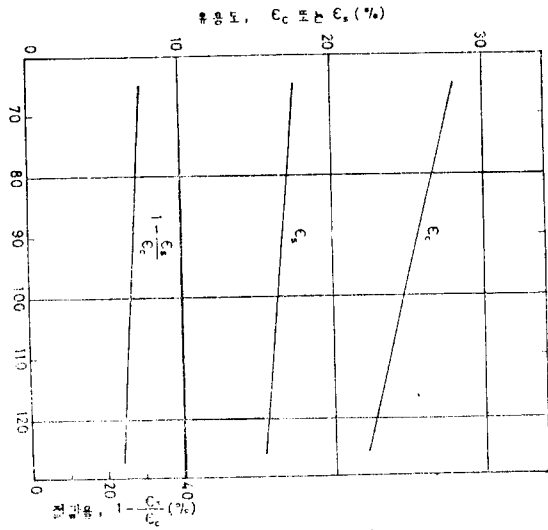


그림 4-14. 수증기의 수기온도와 유용도의 변화

에 표시되어 있다. 이때 증발기의 온도는 4.9°C이고 증기로부터 제네레이터(generator)로의 전열효율은 80%이다. 또 추출증기의 온도가 낮아질수록 유용도는 증가할 것으로 예상되는데 성능계수가 일정하다고 가정된 상태에서 추출증기의 온도에 따른 유용도의 변화가 그림 4-14에 표시되어 있다. 그림에서와 같이 위의 두 경우에 대한 비교결과는 약 20~30%에 이르는 것을 알 수 있다.

4. 5. 2. 압축식 냉동기를 사용한 경우와의 비교

보통의 복수터빈을 사용하여 대기온도에서 포화압력까지 증기를 팽창시켜 발생된 전력으로 압축식 냉동

기를 구동할 경우, 냉동기 운전에는 필요한 전력은

$$W_{comp} = x_2(h_5 - h_{5t})\eta_{ge}(COP)_a / (COP)_{comp}$$

이고, 전체 발전에 필요한 유용에너지는

$$(W_{comp} + W_E) / \eta_1 \eta_g \eta_B \eta_R$$

이다. 또한 증기생산에 필요한 유용에너지는

$$x_1(h_5 - h_{5t}) / \eta_B$$

이므로 전체시스템에 필요한 유용에너지는

$$Q_{comp} = \frac{W_E + W_{comp}}{\eta_1 \eta_g \eta_B \eta_R} + \frac{x_1(h_5 - h_{5t})}{\eta_B}$$

로 계산된다.

그림 4-15에 조합생산의 경우와 압축식 냉동기를 사용한 경우와 (성능계수 4.5) 그 유용도가 비교되어 있으며 수증기 단위 질량당의 냉동부하에 따라 다르나 수 %에 이르는 절감 가능성이 있음을 알 수 있다.

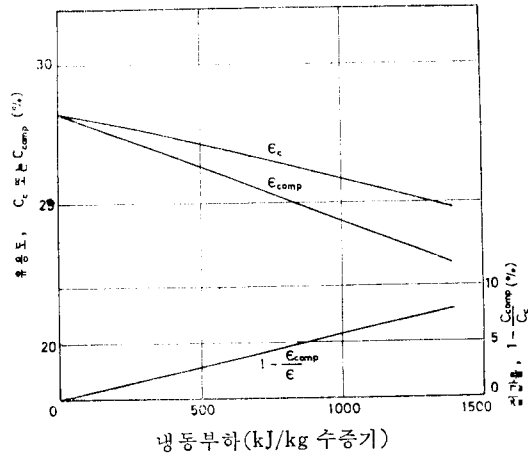


그림 4-15. 냉동부하와 유용도의 변화

부 기

본 연구는 1977년도 문교부 학술연구조성비의 지원에 의하여 이루어 졌다. 연구비를 지원하여 준 문교부 당국에 감사사를 표한다.

참 고 문 헌

1. C. Starr, Energy and Power, W.H. Freeman and Co. (1971).
2. 金胤亨, 金炳穆, 韓國에너지 産業의 需要分析과 豫測, 韓國開發研究院(1975).
3. 省エホルギー技術への展望, 日本工業技術院(1974)
4. C.S. Darling, Exhaust Steam Engineering, Wiley (1929).

5. G.N. Hatsopoulous and J.H. Keenan, Principles of general thermodynamics, Wiley, (1965).
6. R.W. Haywood, A critical review of the theorems of thermodynamic availability with concise formulation, Part I. Availability, Part II. Irreversibility, J. Mech. Engng. Sci. Vol. 16, pp. 160-173, pp. 258-267, (1974).
7. J.W. Gibbs, The collected works of J.W. Gibbs, Vol. 1, Yale Univ. Press, (1948).
8. J.H. Keenan, Thermodynamics, Wiley, (1941).
9. J.H. Keenan, A steam chart for second law analysis, Mech. Engng., Vol. 54, pp. 195~204, (1932).
10. W.H. Levers, The electrical engineer's challenge in energy conservation, IEEE Vol. IA-11, No. 4, pp. 392-404, (1975).
11. Stanford Research Institute, Patterns of energy consumption in the United States, U.S. Office of Science and Technology (1972).
12. 優秀熱管理事例集 (第 1,2回), 韓國熱管理協會 (1976, 1977).
13. J.H. Keenan, F.G. Keyes, P.G. Hill and J.G. Moore, Steam tables, Wiley, (1969).
14. J.S.M.E., Revised steam tables and diagrams of J.S.M.E., J.S.M.E.
15. I. Tanishita, Trans. J.S.M.E., Vol. 10, No. 38, pp. 11-24, (Feb., 1944).
16. G.J. Van Wylen and R.E. Sonntag, Fundamentals of classical thermodynamics, 2nd ed., pp. 342-345, Wiley (1976).
17. G. Angelino and V. Moroni, Perspectives for waste heat recovery by means of organic fluid cycles, J. Engng. Power, pp. 75-82, (April, 1973).