

# 발전시스템에 물질흐름의 net 개념을 적용한 열경제학 해석

김덕진\*

## Thermoeconomics Analysis to apply net concept of material flow to Power System

Deok Jin Kim

Key Words: Exergy(엑서지), Thermoeconomics(열경제학), Exergetic Cost(엑서지 비용)

### Abstract

Quality that character of exergy is the same at every state in case of equal working fluid and net concept of material flow was applied to thermoeconomics about energy system, and we could naturally explain the suitable degree about this concept, also thermoeconomic equations about general power plant was easily deduced. And deduced equations exactly corresponded with principle of thermoeconomics that overall input cost flow rate equal overall output cost flow rate. This equations is applied to gas turbine cogeneration power plant as one example and found the product unit cost. Also this product cost comparison could be naturally explained.

### 1. 서론

열경제학은 열역학적(엑서지)해석에 경제원리를 접목시켜 열시스템에 대한 투입 및 생산의 비용 관계를 규명하는 학문으로 에너지 시스템의 복합 생산물들의 생산단가를 결정함으로써 향후 설치가 예상되는 산업체, 민생용, 건축물 등의 모든 복합 에너지 시스템에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 최근 들어 관심이 고조되고 있는 에너지 절약 정책과 에너지 시스템의 도입에 대한 경제성 검토에도 기여할 수 있다. 수식으로 열경제학을 정리하자면 전체 투입비용흐름은 전체 생산비용흐름과 정확히 같다는 다음의 수식으로 정리될 수 있다.

$$\sum \dot{H}_{[k]}^{CHE} C_F + \sum \dot{Z}_{[k]} + \dot{Z}_{[outer]} = \dot{W}_{net}^{GT} C_W^{GT} + \dot{W}_{net}^{ST} C_W^{ST} + \sum (\sum \dot{H}_{[k],e}^{BQ} C_e^{BQ} - \sum \dot{H}_{[k],i}^{BQ} C_i^{BQ}) \quad (1)$$

단일 생산물 즉 전력만을 생산하는 발전시스템

일 경우 그 생산단가는 그 시스템에 대한 전체비용균형식(1)과 엑서지 효율 정의로부터 그 전력단가를 다음식[Moran,1982 and Valero,1995]으로 아주 쉽게 구할 수 있다.

$$C_w = \frac{C_{EX}^{CHE}}{\eta_{EX}} \left[ 1 + \frac{\sum \dot{Z}_{[k]}}{C_{EX}^{CHE} \dot{E}_X^{CHE}} \right] \quad (2)$$

그러나 시스템이 열병합과 같은 복합에너지 시스템일 경우 식(1)에서 보여지듯이 그 복합생산물의 단가를 각각 결정하기는 쉽지가 않다. 이런 복합생산물의 단가를 결정하기 위한 대표적인 열경제학 이론에는 SPECO방법(1,2)이라 불리는 Tsatsaronis 연구그룹의 열경제학 이론과 MOPSA방법(3,4)이라 불리는 중앙대학교 상변화연구실의 열경제학 이론이 있다. SPECO방법은 각 구성기기에서 투입비용흐름은 산출비용흐름과 정확히 같다는 수식과 그 연구그룹에서 정한 여러 규칙을 적용하여 열경제학에 접근하였고 MOPSA방법은 열역학 제 1법칙과 제 2법칙을 결합하여 만든 엑서지균형식의 각 항에 새로운 엑서지차단가와 생산단가를 부여하여 엑서지비용균형식이라는 수식을

\* 중앙대학교 대학원

제안하여 그 수식을 여러 발전시스템에 적용한 바 있었다. 이에 반해 이번에 제시하는 열경제학 이론은 엑서지의 최대 가역일적인 성격은 동일 작동유체인 경우 모두 같다는 특성과 그 물질흐름의 net 개념을 이용하여 열경제학에 접근하였다.

## 2. 물질흐름의 net 개념을 적용한 열경제학

위에서 제시한 이론들이 각자의 방법으로 열경제학에 접근하는 가장 큰 차이점은 다음과 같다. SPECO 방법은 각 구성기기에서 각 상태마다 엑서지 종류별로 고유한 가격변수를 부여하고 MOPSA 방법은 각 구성기기마다 주되게 증가한 엑서지차 종류별로 고유한 가격변수를 부여한다. 이에 반해 본 열경제학 이론은 각 작동유체의 종류(가스, 증기)에 고유한 엑서지 가격변수를 부여하는 것을 원칙으로 하고 있다. 따라서 엑서지 또는 엑서지차 가격의 성격을 어떻게 보느냐가 열시스템에 대한 보다 타당한 열경제학 해석원리를 결정하게 됨을 잘 알 수 있다.

### 2.1 엑서지 정의와 엑서지 균형식

열경제학 해석의 가장 기본이 되는 엑서지의 정의는 그 계가 주어진 상태에서부터 환경과의 열적·기계적 평형상태(T0, P0)에 도달할 때까지 가역과정을 겪으면서 할 수 있는 최대 가역일이다. 즉 에너지를 열(heat)의 관점이 아닌 일(work)의 관점으로 해석하고자 할 때 엑서지라는 개념이 매우 중요하게 된다.

열역학의 가장 기본 법칙인 열역학 제 1법칙과 제 2법칙을 실제 발전시스템인 경우에 결합하여 엑서지 정의식  $e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$ 을 적용시키면 다음의 수식을 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{CV} = \dot{E}_X^{CHE} + \sum_{inlet} \dot{E}_{X,i} - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j} - \dot{W}_{Lost} \quad (3)$$

여기서  $\dot{E}_X^{CHE}$ 는 연료의 화학엑서지 투입항이고 우변의 두 번째 항과 세 번째 항의 합은 작동유체들의 엑서지차로써 그 작동유체들을 증기, 온수, 생산 작동유체(BQ), 가스터빈작동유체(GT), 증기터빈

작동유체(ST), 환경으로 버리는 작동유체(WQ)로 분리하고 그 엑서지차를  $\dot{K}$ 라는 간단한 기호로써 임의의 [k]구성기기에 대해 엑서지 균형식(3)을 다시 쓰면 다음으로 정리 할 수 있다.

$$\dot{W}_{CV,[k]} = \dot{E}_{X,[k]}^{CHE} + \dot{K}_{[k]}^{BQ} + \dot{K}_{[k]}^{GT} + \dot{K}_{[k]}^{ST} + \dot{K}_{[k]}^{WQ} - \dot{W}_{Lost,[k]} \quad (4)$$

### 2.2 엑서지가격은 동일작동유체인 경우 같다.

본 열경제학 방법의 해석적 원리는 다음으로 정리할 수 있다. 엑서지는 정의에서 알 수 있듯이 어느 상태에 있는지 그 상태에서 환경상태로 변할 때까지 등엔트로피 과정과 등엔탈피과정을 거쳐 생산해 낼 수 있는 최대 가역일로써 그 성격이 모두 같으므로 동일 작동유체인 경우 엑서지의 가격은 모두 같다. 따라서 시스템 전체 경계를 기준으로 투입 및 산출물들인 외부적 가격( $C_W^{CHE}$ : 연료투입가격,  $C_W^{GT}$ : 가스터빈전력생산가격,  $C_W^{ST}$ : 증기터빈전력생산가격,  $C_{EX}^{BQ}$ : 증기, 온수 엑서지생산가격)과 각 시스템 작동유체들의 엑서지가격인 내부적 가격( $C_{EX}^{GT}$ : 가스터빈작동유체 엑서지가격,  $C_{EX}^{ST}$ : 증기터빈작동유체 엑서지가격)으로 나눌 수 있다. 또한 가스와 증기터빈의 각 작동유체 대해 설명해 보면 하나의 사이클을 이루는 가스터빈 작동유체에 대해  $\sum_{gas} \dot{K}_{[k]}^{GT} = 0$ 과 하나의 사이클을 이루는 증기터빈 작동유체에 대해  $\sum_{water} \dot{K}_{[k]}^{ST} = 0$ 은 시스템이 정상 상태이므로 반드시 성립하게 된다. 그러므로 그 내부적 가격흐름들의 사이클 합은 정확히 0이 되어 발전시스템의 가격흐름은 최초투입비용흐름과 최종산출비용흐름만이 남게됨을 잘 알 수 있다.

### 2.3 net 가격 흐름 균형

실제 발전시스템의 [k]구성기기에 열역학 제 1법칙을 적용시키고 그 각 항에 가격을 부여한 가격 흐름 식은 다음으로 정리되어진다.

$$\dot{Q}_0 \cdot 0 = \dot{H}^{CHE} C_F + \sum \dot{H}_e C_e - \sum \dot{H}_i C_i + \dot{W}_{CV} C_W \quad (5)$$

그리고 각 n상태에서는 열량적 가격흐름과 엑서지적 가격흐름이 같아야 하므로 다음의 관계식이

정의되어 진다.

$$\dot{H}_n C_n = \dot{E}_{X,n} C_{EX} \text{ or } C_n = (e_{X,n}/h_n) C_{EX} \quad (6)$$

이 관계식으로써 각 상태의 엔탈피 가격을 쉽게 구할 수 있음을 볼 수 있다. 이 관계식을 식(5)에 적용시켜  $\dot{K}$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{W}_{CV,[k]} C_W = \dot{E}_{X,[k]}^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \dot{K}_{[k]}^{BQ} C_{EX}^{BQK} + \dot{K}_{[k]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{K}_{[k]}^{ST} C_{EX}^{ST} + \dot{K}_{[k]}^{HQ} C_{EX}^{HQK} \quad (7)$$

즉 이 수식은 식(5)의 각 구성기기에서 환경으로의 손실 열량( $\dot{Q}_{0,[k]}$ )의 가격이 0인 것과 같이 식(4)의 각 구성기기에서 발생하는 손실열( $\dot{W}_{Loss,[k]}$ )의 가격흐름은 정확히 0임을 말해 준다. 그러나 시스템 전체비용균형식(1)을 보면  $C_W$ 의 가격은 압축기나 터빈등의 독립적인 가격이 아니라 사이클을 이루는 물질흐름의 net 전력 가격임을 잘 알 수 있다. 뿐만 아니라 산출되는 증기 및 온수의 생산가격흐름도 그 물질 흐름 중 최초 투입비용흐름과 최종 산출되는 비용흐름의 차이므로 net 개념으로 해석을 해야 함을 잘 알 수 있다. 따라서 개별적인 구성기기를 해석해야 하는 것이 아니라 전체적인 구성기기흐름을 해석하여 그 가격흐름의 균형을 생각해야 한다.

#### 2.4 각 구성기기의 비용흐름

각 구성기기의 초기구입금액 및 유지보수 비용흐름인  $\dot{Z}_{[k]}$ 를 구하는 방법은 MOPSA 열경제학에서 제안했던 Moran(5)의 연간등가비용(annualized cost)방법을 이용하였다. 즉 present worth factor[PWF]  $PWF(i, n) \equiv (1+i)^{-n}$ 와 capital recovery factor[CRF]  $CRF(i, n) \equiv i/[1-(1+i)^{-n}]$ 를 이용하여 그 구성기기의 초기가격( $C_i$ )과 n년후의 그 구성기기의 잔존가격( $S_n$ )을 연간등가비용시키면 다음과 같다.

$$\dot{C}[\$/year] = (C_i - S_n PWF(i, n)) \cdot CRF(i, n) \quad (8)$$

이 식으로부터 [k]구성기기의 유지보수비용을 고려한 계수( $\phi_{[k]} \approx 1.06$ )와 1년 동안의 그 구성기기 작동시간( $\delta_{[k]} \approx 8000$ )을 고려하여 k구성기기에

대한 자본 및 유지보수비용흐름을 구할 수 있다.

$$\dot{Z}_{[k]}[\$/sec] = \frac{\phi_{[k]}}{3600 \cdot \delta_{[k]}} \dot{C}_{[k]} \quad (9)$$

### 3. 일반적인 발전시스템에 물질흐름의 net 개념을 적용한 열경제학

이제 Fig.1에 보여지는 일반적인 발전시스템(가스터빈발전, 가스터빈열병합발전, 보일러시스템, 증기터빈발전, 증기터빈열병합발전 그리고 복합발전)에 net 개념을 이용한 열경제학을 적용시켜 작동유체에 따른 엑서지단가와 복합생산물의 생산단가를 구하는 수식을 유도해 본다.

#### 3.1 가스터빈 작동유체의 엑서지단가

시스템 외부적 가격흐름인 연료와  $\dot{Z}_{[outer]}$  그리고 시스템 내부적 가격흐름이지만 외부 작동유체에서 이 가스터빈에게 주는 엑서지 가격흐름과 그 연소기 및 열교환기 소모비용흐름은 공기 또는 가스 작동유체 흐름이 하나의 net를 이룰 때 이 구성기기들로부터 얻은 엑서지와 환경으로 방출되는 엑서지차이 만큼의 가격흐름과 같아야 하므로 다음의 수식으로 가스터빈 작동유체의 엑서지단가를 구할 수 있다.

$$|\dot{K}_{[2.5.18]}^{GT}| C_{EX}^{GT} = \dot{H}_{[2]}^{CHE} C_F + \dot{K}_{[5]}^{BQ} C_{EX}^{BQ0} + \dot{K}_{[5]}^{ST} C_{EX}^{ST} + \dot{Z}_{[2.5.18]} + \alpha_1 \dot{Z}_{[outer]} \quad (10)$$

여기서 연료 투입비용흐름은  $\dot{H}_{[2]}^{CHE} C_F = \dot{E}_{X,[2]}^{CHE} C_{EX}^{CHE}$ 으로써 연료발열량을 기준으로 해석할 수도 있고 연료엑서지를 기준으로 해석할 수도 있다. 위식의 우변은 투입비용흐름으로 연소기에서 연료의 투입, 연료 예열기에서 엑서지 투입, 위의 엑서지 전달이 가능하게끔 해주는 연소기와 예열기, 배기가스를 환경으로 방출하게 해주는 굴뚝 그리고 k구성기기 이외의 투자 비용흐름으로써 공장 건설, 인건비, 토지매입 비용 등의 전체 시스템 외부적 가격흐름 중  $\alpha_1$ 비만큼의 구성기기비용흐름의 투입이고 좌변은 가스작동유체가 가지고 가는 산출비용흐름이다. 여기서  $\alpha$ 는 연료의 투입이 있

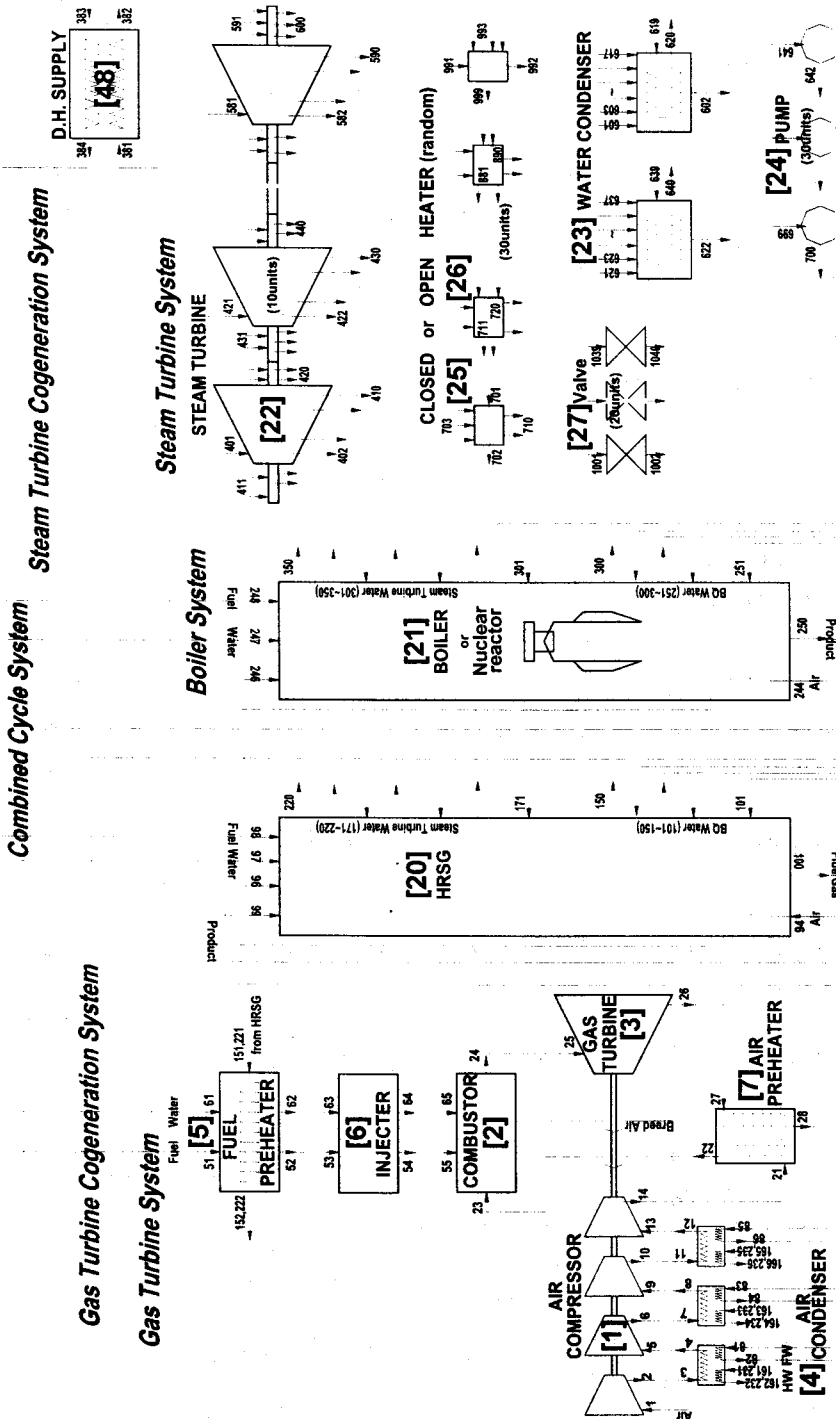


Fig.1 General power plant

는 구성기에서 존재하게 됨을 알 수 있고 그 크기는 전체 투입연료량 대 그 구성기에서의 투입연료량의 비이다.

### 3.2 폐열회수보일러 증기생산 엑서지단가

추가적인 연소가 있는 폐열회수 보일러에서 가스 및 연료 작동유체에서 주는 가격흐름과 그 구성기 소모비용흐름은 정확히 증기생산유체가 받은 내부적 엑서지가격흐름과 같아야 하므로 다음 식으로부터 증기생산유체의 엑서지가격을 구할 수 있다.

$$|\dot{K}_{[4,20]}^{BQ}| C_{EX}^{BQ20} = \dot{K}_{[4,20]BQ}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{H}_{[20]BQ}^{CHE} C_F + \dot{Z}_{[4,20]}^{BQ} + \alpha_2 \dot{Z}_{[outer]} \quad (11)$$

위식의 우변은 투입비용흐름으로써 가스터빈 작동유체의 엑서지와 추가적인 연료 그리고 그 구성기들의 투입이고 좌변은 산출함으로써 증기생산 가격흐름이다. 추가적인 연소로 인한 연소가스는 엑서지를 얻어 생산되어 졌지만 곧바로 환경으로 방출되므로 좌변의 수식에서 서로 소거됨을 알 수 있고 이것은 가스터빈시스템에서도 똑같이 적용되었고 또한 연소보일러의 경우에도 똑같이 적용됨을 알 수 있다.

### 3.3 연소보일러 증기생산 엑서지단가

연소보일러에서 증기 또는 온수를 생산하는 경우에는 열원이 연료이므로 다음식으로부터 증기 또는 온수의 엑서지가격을 구할 수 있다.

$$|\dot{K}_{[21]}^{BQ}| C_{EX}^{BQ21} = \dot{H}_{[21]BQ}^{CHE} C_F + \dot{Z}_{[21]}^{BQ} + \alpha_3 \dot{Z}_{[outer]} \quad (12)$$

### 3.4 증기터빈 작동유체의 엑서지단가

증기터빈 작동유체의 열원은 폐열회수보일러에서의 폐열과 추가적인 연소 그리고 연소보일러에서의 연소반응이므로 다음의 식으로 유도된다.

$$|\dot{K}_{[4,20,21]}^{ST}| C_{EX}^{ST} = \dot{K}_{[4,20]ST}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{H}_{[20]ST}^{CHE} C_F + \dot{H}_{[21]ST}^{CHE} C_F + \dot{Z}_{[4,20,21]}^{ST} + \alpha_4 \dot{Z}_{[outer]} \quad (13)$$

### 3.5 온수발생기에서의 온수생산 엑서지단가

온수발생기에서 온수를 생산하는 경우에는 열원이 증기터빈내부작동유체이므로 다음 식으로 온수의 엑서지가격을 구할 수 있다.

$$|\dot{K}_{[48]}^{BQ}| C_{EX}^{BQ48} = \dot{K}_{[48]}^{ST} C_{EX}^{ST} + \dot{Z}_{[48]} \quad (14)$$

따라서 식(10,11,12,13,14)으로부터  $C_{EX}^{GT}$ ,  $C_{EX}^{ST}$ ,  $C_{EX}^{BQ20}$ ,  $C_{EX}^{BQ21}$ ,  $C_{EX}^{BQ48}$ 을 구할 수 있다. 위 식에서 각 생산물들의 엑서지가격의 특징은 회계원리에 의해 외부로부터 엑서지를 전달받은 작동유체가 그 엑서지 전달과정 중의 손실일과 그 구성기 비용흐름의 책임을 전적으로 짐을 알 수 있다.

### 3.6 가스터빈 시스템에서의 전력생산가격

가스터빈 시스템의 전력생산을 살펴보면 이 시스템에서 외부 작동유체로부터 받은 엑서지와 환경으로 방출한 흐름 및 엑서지는  $\dot{K}_{[2,5,18]}^{GT}$ 이고 그 흐름 및 엑서지 중  $\dot{K}_{[4BQ,4ST,20]}^{GT}$ 는 유용한 증기를 생산하기 위해 사용되어 졌으므로 나머지 흐름 및 엑서지들은 전력을 생산하는데 쓰여져야 함을 알 수 있다. 따라서 다음 식으로부터 그 가스터빈시스템의 전력생산단가를 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{net}^{GT} C_W^{GT} = \dot{K}_{[1,3,4FW,6,7,19]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[1,3,4FW,6,7,19]} \quad (15)$$

### 3.7 증기터빈 시스템에서의 전력생산가격

증기터빈 시스템의 전력생산을 살펴보면 이 시스템에서 외부작동유체로부터 받은 엑서지는  $\dot{K}_{[4,20,21]}^{ST}$ 이고 그 흐름 및 엑서지 중  $\dot{K}_{[5,48]}^{ST}$ 는 외부 작동유체의 유용한 엑서지를 생산하기 위해 사용되어 졌으므로 나머지 흐름 및 엑서지들은 전력을 생산하는데 쓰여져야 함을 알 수 있다. 따라서 다음 식으로써 그 증기터빈시스템의 전력생산단가를 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{net}^{ST} C_W^{ST} = \dot{K}_{[22,23,24,25,26,27,49]}^{ST} C_{EX}^{ST} + \dot{Z}_{[22,23,24,25,26,27,49]} \quad (16)$$

이제 어떠한 발전시스템일지라도 식(10,11,12,

13,14,15,16)을 이용하여 내부작동유체들의 엑서지 가격과 그 각각의 생산물 단가를 손쉽게 계산해 낼 수 있을 뿐만 아니라 각 상태에서의 엔탈피가격들도 식(6)을 이용하여 쉽게 구할 수가 있음을 알 수 있다.

열경제학의 가장 기본 조건은 해석한 수식은 반드시 전체시스템에 대한 전체비용균형식이 정확히 성립해야 한다는 것이다. 본 방법으로 해석한 수식(10,11,12,13,14,15,16)을 모두 합하면 각 작동유체의 내부적 가격흐름은 모두 소거가 되어 식(17)이 됨을 확인할 수 있고 또한 이 수식은 식(1)과 정확히 같음을 알 수 있다.

$$\dot{H}_{[2,20,21]}^{CHE} C_F + \sum \dot{Z}_{[k]} + \dot{Z}_{[outer]} = \dot{W}_{net}^{GT} C_W^{GT} + \dot{W}_{net}^{ST} C_W^{ST} + |\dot{K}_{[4,5,20]}^{BQ}| C_{BQ} + |\dot{K}_{[21]}^{BQ}| C_{BQ21} + |\dot{K}_{[48]}^{BQ}| C_{BQ48} \quad (17)$$

#### 4. 가스터빈 열병합발전제 적용

Fig.2은 엑서지 개념을 이용하여 열-경제학 모델을 연구하는 세계의 주요 연구 그룹들이 모여 제안한 열병합발전 시스템을 Fig.1에 맞게 그리므로써 각 연구 그룹을 대표하는 연구자 성명의 첫 글자(C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero, and M., von Spakovsky)를 따서 CGAM이라고 부른다. 이 발전시스템은 연소기에서 연료를 투입하여 가스터빈에서 전력을 그리고 폐열회수 보일러에서 증기를 생산하는 시스템으로 전력의 생산과

격과 증기의 생산가격을 결정하는 문제이다. 본 계산에 사용되어진 가스 및 증기의 상태량은 JANAF 표에 나와 있는 엔탈피 및 엔트로피 값에 맞도록 한 다항식을(6) 사용하였고 물과 증기의 온도와 압력에 따른 상태량들은 IFC (International Formulation Committee)(7)에서 제시한 식들을 이용하여 구하였다.

이 발전시스템에 본 열경제학을 적용시키면 다음의 수식들로 정리할 수 있다.

[가스터빈작동유체의 엑서지 가격]

$$|\dot{K}_{[2,18]}^{GT}| C_{EX}^{GT} = \dot{E}_{X,[2]}^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \dot{Z}_{[2,18]} + \dot{Z}_{[outer]} \quad (18)$$

[폐열회수 보일러에서의 증기 생산단가]

$$|\dot{K}_{[20]}^{BQ}| C_{EX}^{BQ20} = \dot{K}_{[20]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[20]} \quad (19)$$

[가스터빈 시스템의 전력 생산단가]

$$\dot{W}_{net}^{GT} C_W^{GT} = \dot{K}_{[1,3,7,19]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[1,3,7,19]} \quad (20)$$

그리고 위의 수식들을 모두 더하면 가스터빈작동유체의 net 가격흐름은 모두 소거되어 다음의 수식이 유도되며 이 수식은 정확히 전체비용균형을 만족함을 알 수 있다.

$$\dot{W}_{net}^{GT} C_W^{GT} + |\dot{K}_{[20]}^{BQ}| C_{EX}^{BQ20} = \dot{E}_{X,[2]}^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \sum \dot{Z}_{[k]} + \dot{Z}_{[outer]} \quad (21)$$

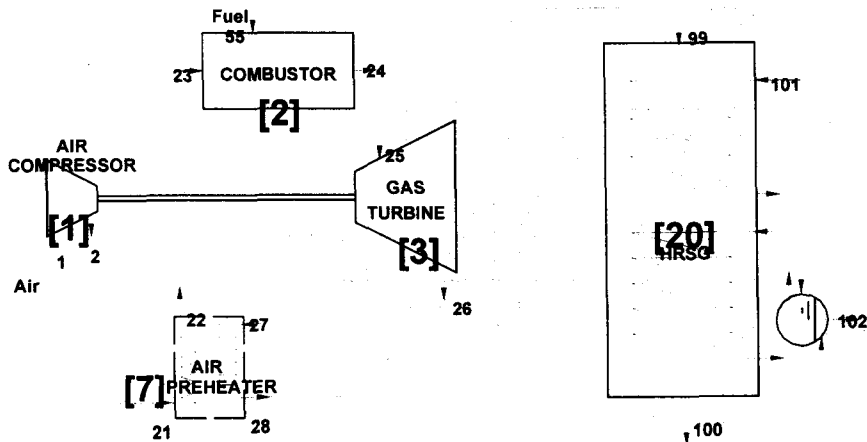


Fig.2 Gas turbine cogeneration power plant

Table.1 Property values, exergy flows rates and unit cost of enthalpy at various state points

state	$\dot{m}$ [kg/s]	$P$ [MPa]	$T$ [°C]	$\dot{H}$ [MW]	$\dot{S}$ [MW/K]	$\dot{E}_x$ [MW]	case1) $C_n$ [\$/GJ]	case2) $C_n$ [\$/GJ]	case3) $C_n$ [\$/GJ]
1	95.919	0.10133	25.000	0.000	0.01821	0.000			
2	95.919	1.02642	348.677	32.223	0.02686	29.645	5.051	5.066	6.255
21	95.919	1.02642	348.677	32.223	0.02686	29.645	5.051	5.066	6.255
22	95.919	0.97475	576.850	56.239	0.06115	43.437	4.240	4.253	5.251
23	95.919	0.97475	576.850	56.239	0.06115	43.437	4.240	4.253	5.251
24	97.684	0.92611	1252.879	140.543	0.14274	105.249	4.111	4.124	5.091
25	97.684	0.92611	1252.879	140.543	0.14274	105.249	4.111	4.124	5.091
26	97.684	0.11146	718.008	75.888	0.15127	38.052	2.753	2.761	3.409
27	97.684	0.11146	718.008	75.888	0.15127	38.052	2.753	2.761	3.409
28	97.684	0.10842	505.768	51.382	0.12426	21.597	2.308	2.315	2.858
55	1.765	1.21590	300.000	1.255	0.00090	0.987	4.318	4.331	5.347
99	97.684	0.10842	505.768	51.382	0.12426	21.597	2.308	2.315	2.858
100	97.684	0.10234	150.476	12.941	0.06028	2.230	0.946	0.949	1.172
101	14.000	2.02650	25.000	1.493	0.00513	0.027	<b>0.151</b>	<b>0.158</b>	<b>0.193</b>
102	14.000	2.02650	-1.000	39.165	0.08864	12.799	<b>2.721</b>	<b>2.850</b>	<b>3.490</b>

Table.2 Exergy balance equation and initial investment cost, corresponding monetary flow rates

Component	Exergy balance [MW]							Initial investment cost [\$10 <sup>6</sup> ]	$\dot{Z}_{(k)}$ [\$ /hr]
	$\dot{W}_{(k)}^{CV}$	$= \dot{E}_{X,(k)}^{CHE}$	$+ \dot{K}_{(k)}^{BQ}$	$+ \dot{K}_{(k)}^{GT}$	$+ \dot{K}_{(k)}^{ST}$	$+ \dot{K}_{(k)}^{WQ}$	$- \dot{W}_{(k)}^{Lost}$		
Compressor [1]	-32.223	0.000	0.000	-29.645	0.000	0.000	-2.578	3.470	59.001
Combustor [2]	0.000	89.131	0.000	-60.825	0.000	0.000	-28.306	0.210	3.571
Gas turbine [3]	64.655	0.000	0.000	67.198	0.000	0.000	-2.543	2.750	46.759
Preheater [7]	0.000	0.000	0.000	2.662	0.000	0.000	-2.662	0.720	12.242
G.T. Chimnev [8]	0.000	0.000	0.000	1.243	0.000	0.000	-1.243	0.000	0.000
Gas pipes [9]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HRSG [20]	0.000	0.000	-12.772	19.367	0.000	0.000	-6.594	1.000	17.003
WQ(outer)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.300	277.153
Total	32.432	89.131	-12.772	0.000	0.000	0.000	-43.927	24.450	415.729

Table.3 Net cost balance equation and unit costs.

Equation	$\dot{C}_w$ [\$ /hr]	$\dot{C}_F$ [\$ /hr]	$\dot{C}_{BQ}$ [\$ /hr]	$\dot{C}_{CT}$ [\$ /hr]	$\dot{C}_Z$ [\$ /hr]
<i>case1) no have a component and outer cost flow rate</i>					
UNIT COST	6.808[\$/GJ]	3.670[\$/GJ]	8.325[\$/GJ]	5.490[\$/GJ]	
Eq.(18)	0.000	-1177.595	0.000	+1177.595	0.000
Eq.(19)	0.000	0.000	+382.769	-382.769	0.000
Eq.(20)	+794.826	0.000	0.000	-794.826	0.000
Eq.(21)	+794.826	-1177.594	+382.769	0.000	0.000
<i>case2) have a component but no have outer cost flow rate</i>					
UNIT COST	7.839[\$/GJ]	3.670[\$/GJ]	8.720[\$/GJ]	5.507[\$/GJ]	
Eq.(18)	0.000	-1177.595	0.000	+1181.166	-3.571
Eq.(19)	0.000	0.000	+400.933	-383.929	-17.003
Eq.(20)	+915.239	0.000	0.000	-797.236	-118.002
Eq.(21)	+915.239	-1177.595	+400.933	0.000	-138.576
<i>case3) have a component and outer cost flow rate</i>					
UNIT COST	9.441[\$/GJ]	3.670[\$/GJ]	10.679[\$/GJ]	6.799[\$/GJ]	
Eq.(18)	0.000	-1177.595	0.000	+1458.318	-280.723
Eq.(19)	0.000	0.000	+491.019	-474.016	-17.003
Eq.(20)	+1102.305	0.000	0.000	-984.302	-118.003
Eq.(21)	+1102.305	-1177.595	+491.019	0.000	-415.729

## 5. 해석 결과 및 토의

Table.1에는 주어진 질량유량, 압력, 온도에 대해 각 상태 물성치 값(기준:25oC,1atm, 0oC,x=0)들, 엑서지 계산값들과 본 열경제학의 계산 결과인 엔탈피 가격이 나와 있다. Table.2에는 Table.1의 값으로부터 엑서지 균형식(4)의 각 항에 대응되는 값들과 각 구성기기 비용흐름 값들이 계산되어져 있다. 각 구성기기뿐만 아니라 전체구성기기에서도 정확히 엑서지 균형이 맞고 내부 작동유체들의 각 구성기기들의 합들은 정확히 0이 됨을 볼 수 있다. Table.3에는 식(18,19,20,21)의 각 항에 대응하는 가격흐름 값들이 계산되어져 있다. 여기서 -기호는 투입비용흐름이고 +기호는 산출비용흐름으로써 정확히 그 비용흐름이 같음을 확인할 수 있다. case1)은 구성기기와 외부 투자비용흐름이 없을 때이고 case2)는 각 구성기기비용흐름은 있으나 외부 투자비용이 없을 때를 case3)는 두 가지 모두 존재할 때를 뜻한다. CGAM의 경우 증기엑서지의 가격이 전력의 가격보다 더 비싸게 계산되어졌는데 그 이유는 식(19)와 식(20) 그리고 Table.2에서도 알 수 있듯이 증기를 생산하는데 상대적으로 더 많은 손실일이 발생하였기 때문이다. 구성기기 가격흐름이 고려되어지면 투입되는 가격흐름이 많아지므로 전력단가 및 증기엑서지단가는 당연히 비싸짐을 알 수 있다. 본 열경제학으로 계산되어진 엑서지 단가들을 식(6)에 적용시키면 각 상태에서의 엔탈피 가격이 Table.1의  $C_n$ 으로 계산되어진다. 그 값을 살펴보면 하류 흐름으로 갈수록 점점 엔탈피 가격이 낮아짐을 볼 수 있는데 이 현상은 에너지가 흐를수록 가역일은 손실된다는 열역학 제 2법칙으로 설명되어질 수 있다. 또한 구성기기 흐름이 고려될수록 그 가격이 비싸게됨을 알 수 있다. 본 계산에 사용되어진 연료의 LHV 가격은 3.750[\$/GJ]이지만 폐열회수 보일러의 증기 산출 엔탈피가격은 2.721[\$/GJ]로써 훨씬 더 낮다. 만약 단일의 연소 보일러로부터 직접 증기를 생산한다면 환경으로의 손실열량이 있으므로 LHV가격보다 더 높아야 하고 또한 복합 생산 시스템의 열경제학적 해석을 1법칙적으로 해석한다면 전력과 증기는 열에너지라는 동일한 입장이므로 그 가격이 같고 또한 환경으로의 손실열량이 있으므로 LHV 가격보다 더 높게 계산되리라는 것을 잘 알 수 있다. 그러나 전력과 증기는 분명 그 차원이 틀린

생산물으로써 전력의 가격이 훨씬 더 비싸야 함을 알 수 있는데 본 열경제학적 계산 결과는 이를 아주 잘 만족시키고 있다.

## 6. 결론

에너지 시스템에 대한 열경제학(엑서지)에 net 개념을 이용하여 접근해 본바 그 타당성 여부를 자연스럽게 설명할 수 있었고 또한 일반적인 발전 시스템에서도 그 수식들을 쉽게 유도할 수 있었다. 그리고 유도되어진 결과는 전체투입비용흐름과 산출비용흐름은 같다는 열경제학의 대원칙이 정확히 성립하였다. 이 열경제학을 CGAM 문제에 적용시켜 그 생산단가들을 구하여 본바 그 생산단가들의 크기비교도 자연스럽게 설명할 수 있었다.

모든 생산물들은 시장에서 실제로 거래되는 가격이 있다. 따라서 위의 열경제학적 해석 방법은 어떠한 에너지 시스템일지라도 투자를 해서 생산을 할 때 그 생산물들의 생산단가를 결정지어 생산자에게는 각 생산물들에 대해 투자의 이익 정도를 소비자에게는 그 구입물의 타당한 가격을 제시해 준다. 또한 위의 해석방법은 시스템해석 등에서 광범위하게 활용되어지리라 기대된다.

## 참고 문헌

1. Tsatsaronis, G., and Winhold, M., "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants-I, A New General Methodology," Energy Vol. 10, pp.69~80, 1985.
2. Lozano, M. A., and Valero, "Theory of the Exergetic Cost," Energy Vol.18, pp.939~960,1993.
3. Oh, S, Pang, H., Kim, S. and Kwak, H., "Exergy of Eng. for Gas Turbine cogeneration system" J. of Eng. for Gas Turbine and Power, Vol.118. pp782~791,1995.
4. Kim, S., Oh, S., Kwon, Y. and Kwak, H., "Exergoeconomic analysis of thermal systems" Energy. Vol. 23, pp393~406, 1998
5. Moran, J., Availability Andlyais : A Guide to Efficient Energy Use, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1982.
6. JANAF Thermochemical Tables, 1971, National Bureau of Standard Publications, NSRDS-N3537, Washington, DC.
7. JSME Steam Tables, 1968, JSME