대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 871~878 KSME 00S299

통합적 엑서지에 의한 발전 플랜트의 열경제학적 해석

김덕진* · 이현수* · 곽호영**

Thermoeconomic Analysis of Power Plants with Integrated Exergy Stream

D. Kim, H. Lee and H. Kwak

Key Words : Combined Cycle Plant(복합발전플랜트), Exergy(엑서지), Production cost(생산비용),Thermoeconomics(열경제학)

Abstract

Exergetic and thermoeconomic analysis were performed for a 500-MW combined cycle plant and a 137-MW steam power plant without decomposition of exergy stream of matter into thermal and mechanical exergies. The calculated costs of electricity are almost same within 0.5% as those obtained by the thermoeconomic method with decomposition of exergy into thermal and mechanical exergies of the combined cycle plant. However for the gas-turbine cogeneration plant having different kinds of products, the difference in the unit costs of products, obtained from the two methodologies is about 2%. Such outcome indicates that the level at which the cost balances are formulated does not affect the result of thermoeconomic analysis, that is somewhat contradictory to that concluded previously.

1. 서론

열경제학이란 열역학적(엑서지)해석과 경제원리를 접목시켜 열시스템에 대한 투입 및 생산비용의 관계를 규명하는 학문이다. 본 논문에서는 열경제학 방법을 이용, 일반적인 시스템에서 복합생산물의 생산단가를 결정함으로써 향후 설치가 예상되는 산업체, 민생용, 건축물 등의 모든 복합 에너지 시스템에 적용할 수만 아니라 최근 들어 관심이 고조되고 있는 에너지 절약 정책과 에너지 시스템의 도입에 대한 경제성 검토에도 기여할 수 있으리라 사료된다.

단일 생산물 즉 전력만을 생산하는 발전시스템일 경우는 그 생산단가는 그 시스템에 대한 전체비용균형식과 엑서지 효율로부터 그 전력단가를 다음식[1,2] 으로 쉽게 구할 수 있다.

$$C_W = \frac{C_0}{\eta_e}\left[1 + \frac{\sum \dot{Z}_k}{C_0 \dot{E}_x^{CHE}}\right] \quad (1)$$

위 식에서 생산된 전력단가는 전적으로 엑서지 효율(η_e)에 반비례함을 볼 수 있다. 그러나 열병합 시스템과 같이 전기와 증기를 생산하는 복합에너지 시스템일 경우에 그 생산물의 단가를 각각 결정하기는 쉽지가 않다. 이런 복합생산물의 단가를 결정하기 위한 대표적인 열경제학 이론에는 **SPECO방법[3] (Specific Exergy Costing)**이라 불리는 **Tsatsaronis** 연구구룹의 열경제학 이론과 **MOPSA방법[4] (Modified Productive Structure Analysis)**이라 불리는 중앙대학교 상변화 연구실의 열경제학 이론이 있다. **SPECO방법**은 각 구성기기에서 투입비용흐름은 산출비용흐름과 정확히 같다는 원리를 사용하여 정식화 하였고 **MOPSA방법**은 열역학 제 **1**법칙과 제 **2**법칙을 결합하여 만든 엑서지 균형식의 각 항에 엑서지단가와 생산단가를 부여하여 엑서지 비용균형식을 정식화하여 이를 여러 발전시스템에 적용한 바 있다.

본 논문에서는 **MOPSA방법**에서 사용한 엑서지 흐름을 열 및 기계적 엑서지로 분리하여 열경제학을 적용하는 대신 물질의 엑서지 흐름자체에 단가를 부여하여 여러 발전시스템에 적용, 그 복합생산물의 생산단가를 결정하였고, 엑서지 흐름을 열 및 기계적 엑서지로 분

* 중앙대학교 대학원
** 중앙대학교 공대

리한 경우의 결과와 비교 검토하였다.

본 연구에서는 질량 및 엑서지 보존식들을 복합발전시스템 및 증기터빈 시스템의 각 콤포넌트에 엄밀히 적용하였을 뿐만 아니라 엑서지 및 엑서지 비용 균형식도 마찬가지로 엄밀하게 적용하였다. 가스터빈 시스템의 작동유체인 가스의 상태량은 JANAF표에 나와있는 다항식[6]을 사용하였고 물과 증기의 온도와 압력에 따른 상태량들은 IFC(International Formulation Committee)[7]에서 제시한 식들은 이용하여 구하였다.

2. 엑서지 및 열경제학 해석의 기본식

중앙대학교 상변화 연구실에서는 어떤 열시스템의 콤포넌트에도 적용할 수 있는 엑서지 균형식[5] 및 엑서지 비용 균형식을 개발한 바 있다.[4] 하지만 이들 엑서지 및 비용 균형식에서는 작동유체의 엑서지 흐름을 열 및 기계적인 엑서지 흐름으로 분리하여 각각의 엑서지 흐름에 각각 단가를 부여하여 열경제학 해석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 이들 작동유체의 엑서지 흐름을 분리하지 않고 동일 작동유체의 엑서지에 단가를 부여한 후 열경제학 해석을 수행하여 분리한 경우의 결과와 비교검토하였다. 작동유체의 엑서지 흐름을 분해하지 않을 경우 열시스템의 각 콤포넌트에 적용할 수 있는 엑서지 및 비용 균형식은 다음과 같이 주어진다.

엑서지 균형식

$$\dot{E}_x^{CHE} + (\sum_{input} \dot{E}_{x,i}^{BQ} - \sum_{output} \dot{E}_{x,j}^{BQ}) + (\sum_{inlet} \dot{E}_{x,i} - \sum_{outlet} \dot{E}_{x,j}) + T_0(\sum_{inlet} \dot{S}_i - \sum_{outlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{C.V} / T_0) = \dot{E}_X^W \qquad (2)$$

식(2)에서 $\dot{E}_X^{CHE}$ 는 화학엑서지 유량이며 $\dot{E}_X^{BQ}$는 증기 또는 냉각수의 엑서지 유량이고, 네번째항은 부엔트로피 흐름으로서 손실일을 나타내며 $\dot{Q}_{CV}$ 는 열시스템의 해당콤포넌트와 환경과의 열 교환량이다. 열시스템내의 임의의 구성기기에 대한 비용 균형식은 식 (2)에 주어진 엑서지 균형식에 각 엑서지별로 단위비용을 할당하므로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

비용 균형식

$$\dot{E}_x^{CHE} C_0 + (\sum_{input} \dot{E}_{x,i}^{BQ} - \sum_{output} \dot{E}_{x,j}^{BQ}) C_{BQ} + (\sum_{inlet} \dot{E}_{x,i} - \sum_{outlet} \dot{E}_{x,j}) C_E + T_0(\sum_{inlet} \dot{S}_i - \sum_{outlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{C.V} / T_0) C_S + \dot{Z}_k = \dot{E}_x^W C_W \qquad (3)$$

여기서 C_0 , C_{BQ} , C_E , C_S , C_W 는 각각 화학엑서지, 증기 또는 냉각수 엑서지, 작동유체엑서지, 부엔트로피와 전기(일)에 대한 엑서지 단가이다. 식(3)를 가스터빈 발전시스템이나 가스터빈 열병합발전 플랜트로 작동시킬 수 있는 복합발전플랜트 및 증기터빈 발전 플랜트에 적용하여 보자.

3. 복합발전시스템의 엑서지 비용 균형식

3.1 복합발전시스템

복합발전시스템은 현재 서인천화력에 가동중인 500-MW을 모델로 하였다. 이 복합발전시스템은 압축기[1], 연소기[2], 가스터빈[3], 연료예열기[5], 연료분사기[6], 증기발생기[10], 스팀터빈[12], 응축기[13]와 펌프[14]등의 9개의 콤포넌트로 구성되어 있으며 부하가 50%이하에서는 1개의 가스터빈을, 그 이상이 되면 2개의 가스터빈을 작동시켜 전기를 생산한다. 전 (full) 부하에서 연소실에 유입되는 연료의 질량유속은 8.75 kg/s이며 이때 공연비는 질량비로 50.0이다. 증기터빈의 전부하조건에서 스팀의 유량은 대략 151.17 kg/s이다.

앞서 언급한 바와 같이 복합발전시스템은 가스터빈 발전, 가스터빈 열병합 발전시스템으로 사용할 수 있지만 증기터빈 발전시스템으로는 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 가능한 한 모든 발전시스템을 다루기 위해 현재 서울화력에서 가동중인 증기터빈 발전시스템을 모델로 하여 해석하였다. 전부하에서 증기터빈 시스템의 보일러에 유입되는 연료의 유량은 8.33 kg/s이며 공연비는 질량비로 50.90이다.

3.2 엑서지 비용 균형식

작동유체의 엑서지 흐름을 열 및 기계적인 엑서지로 분리하지 않을 경우 식(3)에 주어진 엑서지 비용 균형식을 복합발전시스템의 각 콤포넌트에 적용하게 되면 구하려는 각 엑서지 단가보다는 식이 더 많게 된다. 따

라서 이 경우에는 복합발전시스템을 재 구성할 필요가 있다. 즉 복합 발전시스템을 그 구성기기들의 특성에 따라 1)열엑서지에 관계되는 콤포넌트 2)기계적인 엑서지에 관계되는 콤포넌트 3)냉각수에 관계되는 콤포넌트 4)엑서지손실에 관계되는 시스템경계 등으로 나눌 수 있다. 복합발전시스템의 경우는 전기를 생산하는 작동유체가 가스와 증기 두 종류가 있으므로 다음과 같이 6개의 엑서지 비용 균형식을 얻을 수 있다.

(1) 연소기[2] 및 연료예열기[5] ; 가스터빈에서 동력을 얻기 위한 열엑서지 생산 콤포넌트

$$\dot{E}_x^{CHE} C_0 + (\dot{E}_{x,23} + \dot{E}_{x,55} + \dot{E}_{x,65} - \dot{E}_{x,24} + \dot{E}_{x,51} - \dot{E}_{x,52})C_E + (\dot{E}_{x,221} - \dot{E}_{x,222})C_D + T_0(\dot{S}_{23} + \dot{S}_{55} + \dot{S}_{65} - \dot{S}_{24} + \dot{Q}_{[2]}/T_0 + \dot{S}_{51} - \dot{S}_{52} + \dot{S}_{221} - \dot{S}_{222} + \dot{Q}_{[5]}/T_0)C_S + \dot{Z}_{[2]} + \dot{Z}_{[5]} = 0 \quad (4)$$

(2) 공기압축기[1], 가스터빈[3] 및 연료분사기[6] ; 가스를 이용한 일 엑서지 생산 콤포넌트

$$(\dot{E}_{x,1} - \dot{E}_{x,2} + \dot{E}_{x,25} - \dot{E}_{x,26} + \dot{E}_{x,53} - \dot{E}_{x,54} + \dot{E}_{x,63} - \dot{E}_{x,64})C_E + T_0(\dot{S}_1 - \dot{S}_2 + \dot{S}_{25} - \dot{S}_{26} + \dot{S}_{53} - \dot{S}_{54} + \dot{S}_{63} - \dot{S}_{64})C_S + \dot{Z}_{[1]} + \dot{Z}_{[3]} + \dot{Z}_{[6]} = (\dot{W}_{[1]} + \dot{W}_{[3]} + \dot{W}_{[6]})C_W \quad (5)$$

(3) 증기발생기[10]; 증기터빈에서 동력을 얻기 위한 열엑서지 생산 콤포넌트

$$(\dot{E}_{x,99} - \dot{E}_{x,100})C_E + (\dot{E}_{x,221} - \dot{E}_{x,222} + \sum_{HRSG\ inlet} \dot{E}_{X,i} - \sum_{HRSG\ outlet} \dot{E}_{X,j})C_D + \dot{T}_0(\dot{S}_{99} - \dot{S}_{100} + \dot{S}_{221} - \dot{S}_{222} + \sum_{HRSG\ inlet} \dot{S}_i - \sum_{HRSG\ inlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{[10]}/T_0)C_S + \dot{Z}_{[10]} = 0 \quad (6)$$

(4) 증기터빈[12] 및 펌프[14]; 증기를 이용한 일엑서지 생산 콤포넌트

$$(\dot{E}_{x,401} - \dot{E}_{x,402} + \dot{E}_{x,421} - \dot{E}_{x,422} + \dot{E}_{x,441} - \dot{E}_{x,442} + \dot{E}_{x,641} - \dot{E}_{x,642} + \dot{E}_{x,643} - \dot{E}_{x,644} + \dot{E}_{x,645} - \dot{E}_{x,646})C_D + \dot{T}_0(\dot{S}_{401} - \dot{S}_{402} + \dot{S}_{411} - \dot{S}_{412} + \dot{S}_{441} - \dot{S}_{442} + \dot{S}_{641} - \dot{S}_{642} + \dot{S}_{643} - \dot{S}_{644} + \dot{S}_{645} - \dot{S}_{646})C_S + \dot{Z}_{[12]} + \dot{Z}_{[14]} = (\dot{W}_{[12]} + \dot{W}_{[14]})D_W \quad (7)$$

(5) 응축기 [13]; 냉각수에 관계되는 콤포넌트

$$(\dot{E}_{x,601} - \dot{E}_{x,603} + \dot{E}_{x,605} + \dot{E}_{x,607} - \dot{E}_{x,602})C_D + (\dot{E}_{x,619} - \dot{E}_{x,620})C_{BQ} + \dot{T}_0(\dot{S}_{601} + \dot{S}_{603} + \dot{S}_{605} + \dot{S}_{607} - \dot{S}_{602} + \dot{S}_{619} - \dot{S}_{620})C_S + \dot{Z}_{[13]} = 0 \quad (8)$$

(6) 시스템 경계 ; 손실일에 관계되는 가상 콤포넌트

$$(\dot{E}_{x,1} - \dot{E}_{x,51} + \dot{E}_{x,63} + \dot{E}_{x,100})C_E + (\dot{E}_{x,619} - \dot{E}_{x,620})C_{BQ} + \dot{T}_0(\dot{S}_1 + \dot{S}_{51} + \dot{S}_{63} + \dot{S}_{100} - \dot{S}_{619} - \dot{S}_{620} + \sum \dot{Q}_{[k]}/T_0)C_S + \dot{Z}_{[boun]} = 0 \quad (9)$$

식 (9)에서 $\dot{Z}_{[boun]}$는 발전소 건설에 필요한 토지 매입비용, 플랜트 건설비용등이 포함되며 $\dot{Q}_{[k]}$는 각 콤포넌트에서의 환경과의 열전달량이다. 식 (4) ~ (9)에서 볼 수 있는 바와 같이 미지수는 고딕체로 표기한 $C_E, C_W, C_D, D_W, C_{BQ}$ 및 C_S 등 6개이며 연료단가 C_0가 주어지면 쉽게 이들 6개식을 풀어 미지수를 구할 수 있다. 또한, 식(4) ~ (9)를 더하면 당연한 결과인 복합발전소 전체에 대한 엑서지 균형식을 얻을 수 있다.

$$\dot{E}_x^{CHE} C_0 + \sum \dot{Z}_k = \dot{E}_x^{WS} D_W + \dot{E}_x^{WG} C_W \quad (10)$$

어떤 열경제학 방법을 사용하여도 에너지 시스템의 각 콤포넌트에 대한 엑서지비용 균형식을 얻을 수 있다. 하지만 중요한 점은 각 콤포넌트에 대한 비용 균형식을 모두 더할 경우 식(10)과 같은 전체 시스템에 대한 엑

서지 비용 균형식이 반드시 나와야 한다.

복합발전시스템을 열병합시스템으로 운전할 경우 시스템경계에 대한 엑서지 비용 균형식은 다음과 같이 된다.

$$(\dot{E}_{x,1}+\dot{E}_{x,51}+\dot{E}_{x,63}-\dot{E}_{x,100})\dot{C}_E + T_1(\dot{S}_1+\dot{S}_{51}+\dot{S}_{63}-\dot{S}_{100}+\sum_{i=171}\dot{S}_i - \sum_{j=172}\dot{S}_j+\dot{Q}_{[k]}/T_0)C_S+\dot{Z}_{[boun]}=0 \quad (11)$$

식 (9)나 (11)에서 볼 수 있는 바와 같이 에너지 시스템의 콤포넌트수가 변하게 되면 즉 경계가 변하게 되면 시스템 경계에 대한 엑서지 비용균형식이 현저히 달라져 에너지 시스템의 생산단가도 당연히 달라지게 된다.

3.3 증기터빈 플랜트에 대한 비용 균형식

증기 터빈 플랜트에 대한 엑서지 비용균형식도 별로 어렵지 않게 구할 수 있다. 즉, 증기터빈인 경우 열엑서지를 얻는 보일러[11], 일엑서지에 관계되는 증기터빈 및 펌프[12,14], 냉각수 엑서지에 관계되는 응축기[13] 및 시스템 경계에 대한 엑서지 비용 균형식을 구하므로서 증기-발전시스템에 대한 전기단가를 구할 수 있다. 이중 증기터빈 및 펌프와 응축기에 대한 비용 균형식은 식 (7) 및 (8)에 주어진 균형식과 비슷하며 다만 보일러의 경우는 연소과정에 의해 열을 공급받으므로 다음과 같이 비용균형식을 쓸 수 있다.

(7) 보일러 ; 증기터빈에서 동력을 얻기위한 열엑서지 생산 콤포넌트

$$(\dot{E}_x^{CHE}C_0+(\dot{E}_{x,246}+\dot{E}_{x,248}-\dot{E}_{x,250} + \sum_{Water}^{in}\dot{E}_{x,i}-\sum_{Water}^{out}\dot{E}_{x,j})\dot{C}_D + T_0(\dot{S}_{246}+\dot{S}_{248}-\dot{S}_{250}+\sum_{Water}^{inlet}\dot{S}_i-\sum_{Water}^{outlet}\dot{S}_j + \dot{Q}_{[11]}/T_0)C_S+\dot{Z}_{[11]}=0 \quad (12)$$

또한 증기터빈 플랜트의 시스템경계에 대하 비용 균형식은 다음과 같이 주어진다.

$$(\dot{E}_{x,246}+\dot{E}_{x,248}-\dot{E}_{x,250})C_D+(\dot{E}_{x,619}-\dot{E}_{x,620})\dot{C}_{BQ}+T_0(\dot{S}_{246}+\dot{S}_{248}-\dot{S}_{250}+\dot{S}_{383}-\dot{S}_{384}-\dot{S}_{619}-\dot{S}_{620}+\sum\dot{Q}_{[k]}/T_0)C_S+\dot{Z}_{[boun]}=0 \quad (13)$$

따라서, 증기터빈 플랜트에 대해서는 식(7), (8), (12)과 (13)를 이용, 연료의 단가 C_0가 주어질 경우 엑서지 단가 C_D, C_{BQ}, D_H, C_S를 구할 수 있다.

4. 각 구성기기의 비용흐름

각 구성기기의 초기투자금액 및 유지보수 비용흐름인 $\dot{Z}_{[k]}$를 구하는 방법은 **MOPSA** 열경제학에서 제안했었던 **Moran**[6]의 연간 등가비용(**annualized cost**)방법을 이용하였다. 즉, **present worth factor(PWF)** $PWF(i,n)=(1+i)^{-n}$ 와 **capital recovery factor(CRF)** $CRF(i,n)=i/[1-(1+i)^{-n}]$를 이용하여 그 구성기기의 초기가격($C_i$)과 n년후의 그 구성기기의 잔존가격($S_n$)을 연간등가비용화 하면 다음과 같다.

$$\dot{C}[\$/year] = \{C_i - S_n PWF(i,n)\}\cdot CRF(i,n) \quad (14)$$

이 식으로부터 k번째의 구성기기의 유지보수비용을 연간등가비용의 6 %라 가정[8]하여 유지비용 계수 ϕ_k를 1.06이라 정하고 1년 동안의 그 구성기기 작동시간이 8000 시간[8] 이라 가정 , 다음과 같이 k번째구성기기에 대한 자본 및 유지보수비용흐름을 구할 수 있다..

$$\dot{Z}_k[\$/\sec] = \frac{\phi_k}{3600\cdot\delta_k}\dot{C}_k \quad (15)$$

5. 해석결과 및 고찰

Table 1에는 **100%** 부하일 경우 복합발전시스템의 각 콤포넌트에서 엑서지 밸런스 즉 각 엑서지 흐름의 변화량과 각 콤포넌트별 초기투자비용과 초기투자비용 및 유지비용을 고려한 연가등가액에 대응되는 연간 비용흐름이 나와 있다. 이 **Table**에서 투입엑서지는 음의 값으로 산출엑서지는 양의 값으로 나와 있으며 이들 엑서지의 합이 **0**이 됨은 콤포넌트의 엑서지 밸런스가 정확히 맞는 것을 뜻한다. 물리적으로 설명하면 가스압축기에서는 일엑서지 **273.94 MW**의 투입으로 엑서지가 **253.31 MW**만큼 산출되었음을 의미하며 손실된 엑서지

는 20.63 MW임을 의미한다. Table 1에서 각 엑서지 흐름의 합산된 양을 볼 때 투입 엑서지, 산출 엑서지 및 손실엑서지의 합은 0이 되어 본 연구에서 수행한 계산결과가 정확함을 알 수 있다. 또한 Table 1에서 투입 엑서지의 46%가 손실됨을 알 수 있으며 손실엑서지 중 77%가 연소실에서 일어남을 알 수 있다. 복합발전 시스템의 시스템의 각 점에서 엑서지량을 구하는 데 필요한 질량유량, 압력과 온도 등의 값은 이미 발표한 바 있어[9] 여기서는 생략하기로 한다.

Table 2에는 콤포넌트별 또는 시스템내에서 동일한 목적을 위한 콤포넌트 조합별로 엑서지 흐름에 대응되는 비용흐름이 나와 있다. 이 Table에서 볼 수 있는 바와 같이 각 콤포넌트별 또는 콤포넌트 조합별로 투입엑서지 비용흐름과 산출엑서지 비용흐름의 절대값은 서로 같음을 알 수 있다. 또한 각 콤포넌트별 또는 각 콤포넌트조합별로 모든 비용의 합이 0이 됨을 알 수 있어 비용균형식 또한 정확히 맞음을 알 수 있다. 이 Table에서도 투입엑서지의 비용흐름은 음의 값으로 산출엑서지 비용흐름은 양의 값으로 나타내었다. 또한 시스템 전체에 대한 비용 흐름의 경우 투입된 연료비용과 투자비용의 합은 생산된 전기 엑서지의 비용 흐름과 같음을 알 수 있다.

Table 3에는 100% 부하일 경우 증기터빈 발전시스템의 각 콤포넌트에서 엑서지 밸런스 즉 각 엑서지 흐름의 변화량과 각 콤포넌트별 초기 투자 비용과 연간비용흐름이 나와 있다. 복합발전시스템에서와 마찬가지로 이 표에서 정확히 각 콤포넌트 별로 엑서지 밸런스가 맞는 것을 알 수 있다. 또한 Table 4에는 열시스템의 성능에 따른 각 콤포넌트별 또는 콤포넌트 조합별로 각 엑서지 별로 비용흐름이 나와 있는 바 이 표를 통하여 비용균형식 또한 정확히 맞음을 확인할 수 있다.

Table 5에는 복합 발전시스템과 증기터빈시스템의 부하별로 측정된 가스터빈 및 증기터빈에서의 전기 출력과 시스템 효율이 나와 있다. 또한, Table 5에는 계산으로 얻어진 복합발전시스템 및 증기터빈시스템에서의 전기 출력과 시스템의 엑서지 효율이 나와있다. 한편 Table 6에는 본 연구를 통하여 계산된 복합발전시스템의 가스터빈에서 생산된 전기 단가 C_W 와 증기터빈에서 생산된 전기단가 D_W 가 부하별로 나와 있고 증기터빈시스템에서의 전기단가 D_W 가 나와 있다. Table 5와 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 측정된 전기 산출량과 계산된 전기 산출량은 최대 6%내에서 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 부하가 25%인 경우를 제외하면 증기터빈에서 생산된 전기단가가 가스터빈에서 생산된 전기 단가보다 GJ당 0.5$정도 비싼 것을 알 수 있다.

또한 Table 6에는 엑서지 흐름을 열엑서지와 기계적 엑서지로 분리하지 않은 경우 복합발전시스템에서 가스터빈에 의해 생산된 전기단가와 증기터빈에서 생산된 전기단가와 복합발전시스템을 가스터빈 열병합발전으로 운전할 경우의 전기단가와 증기단가가 나와 있다. Table 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 엑서지 흐름을 열엑서지와 기계적인 엑서지로 분리한 경우나 안 한 경우나 복합발전 시스템의 전기생산단가는 0.5 %내에서 잘 일치하고 가스터빈발전의 경우는 전기생산단가와 증기생산단가는 2 %내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 증기터빈발전 시스템과 같이 시스템의 생산물이 하나인 경우는 어느 방법을 사용하면 똑같은 생산단가가 나옴을 알 수 있다. 하지만, 엑서지 흐름을 본 논문에서 다룬 바와 같이 분리하지 않는 경우에 구하고자 하는 엑서지 단가의 종류는 줄어들지만 시스템의 콤포넌트를 기능별로 구룹화하는 과정에 명확치 않은 점이 있지만 열엑서지의 손실이 큰 경우에는 연소실이나 공기예열기 등 열엑서지를 생산해내는 콤포넌트에 구룹화시키고 기계적엑서지의 손실이 큰 경우에는 터빈, 압축기 등 기계적인 엑서지를 생산/소비하는 콤포넌트로 구룹화시키면 될 것이다. 이렇듯 전기생산단가에 직접적으로 관계되는 기계적인 엑서지와 증기생산 단가에 관계되는 열엑서지를 명확히 구분하지 않음으로써 전기와 증기를 동시에 생산하는 가스터빈 열병합 발전의 경우 그 생산단가를 결정하는 데 오차가 많이 발생할 여지가 있다. 따라서, 엑서지 흐름을 열엑서지와 기계적인 엑서지로 구분하지 않는 경우에는 시스템의 어느 콤포넌트의 연

간등가비용이 증가했다고 할 때 이 증가가 어떻게 전기나 증기의 생산비용에 영향을 끼칠 수 있는가라는 문제는 해석할 수는 없다 [10]. 왜냐하면, 시스템 내부의 상세한 가격결정구조는 거시적으로는 나타나지는 않지만 콤포넌트간의 열엑서지나 기계적인 엑서지의 상호작용에 의해 결정되기 때문이다. 마지막으로 특기할 일은 계산 엑서지흐름을 열엑서지와 기계적인 엑서지로 분리하지 않고 **500-MW** 복합발전시스템의 에너지 및 엑서지 계산과 엑서지 비용계산을 수행하여 시스템의 산출엑서지의 생산단가를 구하였고 **137-MW** 증기터빈 발전시스템의 전기생산단가를 구하였다. 본 해석을 수행하는데 있어서 복합발전 시스템 각 콤포넌트의 입구 및 출구에서의결과에 의하면 에너지 시스템의 각 콤포넌트에서 손실되는 엑서지의 단가는 투입한 연료단가와 거의 비슷하게 나오는 점으로 볼 때 손실비용 흐름은 엑서지 손실율에 연료비용을 곱해서 얻을 수 있다는 가정이 맞음을 알 수 있다.

5. 결론

열 경제학 이론중의 하나인 **MOPSA**방법을 이용 상태량(질량유속, 압력, 온도)을 이용하였다. 시스템의 생산단가를 구하였고 **137-MW** 증기터빈 발전시스템의 전기생산단가를 구하였다. 본 해석을 수행하는데 있어 서 복합발전 시스템 각 콤포넌트의 입구 및 출구에서의 상태량(질량유속, 압력, 온도)을 이용하였다.시스템의 각 콤포넌트조합별 엑서지 및 엑서지 비용 균형은 정확하였다. 엑서지 흐름을 열엑서지와 기계적인 엑서지로 분리한 경우의 계산결과와 분리하지 않은 경우의 계산결과는 복합발전 플랜트의 경우 **0.5%**내에서 정확하였다. 하지만 엑서지흐름을 열엑서지와 기계적인 엑서지로 분리했을 경우가 열시스템의 경제적 해석을 체계적으로 또 논리적으로 수행 할 수 있을 뿐 만 아니라 열시스템 생산물의 가격형성 구조를 좀 더 명확히 밝힐 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 연구는 **98**년 에너지 자원 기술개발 지원 센터 **(RACER/MOCIE)**의 지원에 의하여 이루어 졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

Table 1. Exergy flow rate, initial investment and monetary flow rate for each component in the combined cycle plant for the case of 100% load condition.

Component	Exergy balance (MW)							Initial investment cost [$10^6]	$\dot{Z}_k$ [$/ hr]
	$\dot{E}_x^W$		$\dot{E}_x^{CHE}$	$\dot{E}_x$	$\dot{E}_x^D$	$\dot{E}_x^{BQ}$	$\dot{E}_x^{Lost}$		
Compressor	-273.939		0.000	253.305	0.000	0.000	20.633	36.976	628.712
Combustor	0.000		-881.220	597.834	0.000	0.000	283.386	2.169	36.880
Gas turbine	593.744	$\dot{E}_x^{WG}$ =	0.000	-611.345	0.000	0.000	17.601	29.213	496.716
Preheater	0.000	300.588	0.000	1.563	-2.178	0.000	0.615	7.487	127.303
Injector	-19.217		0.000	17.811	0.000	0.000	1.406	14.787	251.427
Gas pipes	0.000		0.000	-0.777	0.000	0.000	0.777	0.000	0.000
HRSG	0.000		0.000	-257.302	227.766	0.000	29.537	0.028	0.476
Steam turbine	185.134		0.000	0.000	-200.992	0.000	15.858	23.930	406.888
Condenser	0.000	$\dot{E}_x^{WS}$ =	0.000	0.000	-21.895	7.823	14.073	7.179	122.066
Pump	-2.483	182.651	0.000	0.000	2.306	0.000	0.177	1.346	22.886
Steam pipe	0.000		0.000	0.000	-5.006	0.000	5.006	0.000	0.000
System boundary	0.000		0.000	-1.090	0.000	-7.823	8.913	82.076	1395.559
Total	483.239		-881.220	0.000	0.000	0.000	397.981	205.191	3488.913

Table 2. Cost flow rate for each component or each group of components in the combined cycle plant for the case of 100% load condition.

Component/ Group of component	$\dot{C}_W$ ($/hr)	$\dot{C}_O$ ($/hr)	$\dot{C}_E$ ($/hr)	$\dot{D}_E$ ($/hr)	$\dot{C}_{BQ}$ ($/hr)	$\dot{C}_{Lost}$ ($/hr)	$\dot{C}_Z$ ($/hr)
Combustor and Fuel preheater	0.000	-15861.962	17846.062	-74.997	0.000	-1744.919	-164.183
HRSG	0.000	0.000	-7660.754	7842.707	0.000	-181.476	-0.476
Condensor	0.000	0.000	0.000	-753.932	962.462	-86.464	-122.066
Air Compressor, Gas turbine and Fuel injector	11778.046	0.000	-10152.868	0.000	0.000	-248.323	-1376.855
Steam Turbine and pump	7572.830	0.000	0.000	-7013.777	0.000	-129.279	-429.774
System boundary	0.000	0.000	-32.441	0.000	-962.462	2390.461	-1395.559
	19350.876	-15861.962	0.000	0.000	0.000	0.000	-3488.913

Table 3. Exergy flow rate, initial investment and monetary flow rate for each component in the steam power plant for the case of 100% load condition.

Component	Exergy balance [MW]					Initial investment cost [$10^6]	$\dot{Z}_k$ [$/ hr]
	$\dot{E}_x^W$	$\dot{E}_x^{CHE}$	$\dot{E}_x^D$	$\dot{E}_x^{BQ}$	$\dot{E}_x^{Lost}$		
Boiler	0.000	-420.808	177.650	15.230	227.929	10.000	170.032
Steam turbine	133.839	0.000	-144.635	0.000	10.796	25.000	425.081
Condenser	0.000	0.000	-29.830	4.850	24.981	8.000	136.026
Pump	-2.614	0.000	2.261	0.000	0.353	2.000	34.006
Closed heater	0.000	0.000	-3.042	0.000	3.042	6.000	102.019
Open heater	0.000	0.000	-0.682	0.000	0.682	2.000	34.006
Steam pipes	0.000	0.000	-1.721	0.000	1.721	0.000	0.000
System boundary	0.000	0.000	0.000	-20.080	20.080	50.000	850.162
Total	131.225	-420.808	0.000	0.000	289.584	103.000	1751.33

Table 4. Cost flow rate for each component or group of component in the steam turbine plant for the case of 100% load condition.

Component/ Group of component	$\dot{C}_W$ ($/hr)	$\dot{C}_O$ ($/hr)	$\dot{D}$ ($/hr)	$\dot{C}_{BQ}$ ($/hr)	$\dot{C}_{Lost}$ ($/hr)	$\dot{C}_Z$ ($/hr)
Boiler	0.000	-7574.548	10201.189	874.527	-3331.136	-170.032
Condenser	0.000	0.000	-1712.942	2214.055	-365.087	-136.026
Stream turbine And Heaters	9325.883	0.000	-8488.246	0.000	-242.523	-595.114
System boundary	0.000	0.000	0.000	-3088.583	3938.745	-850.162
	9325.883	-7574.548	0.000	0.000	0.000	-1751.335

Table 5. Measured and calculated production rates of electricity, steam exergy and the exergetic efficiency at various load conditions and for combined cycle and steam turbine plants.

Plant	Load	Mass flow rate (kg/s)			$\dot{E}_x^{CHE}$ (MW)	Measurement (MW,%)			Calculation (MW, %)		
		air	fuel	Steam		$\dot{W}^{GT}$	$\dot{W}^{ST}$	η_e	$\dot{W}^{GT}$	$\dot{W}^{ST}$	η_e
Combined Cycle	25%	280.47	5.69	50.08	286.743	79.160	59.690	47.38	78.738	60.594	48.59
	50%	431.36	8.75	78.47	440.610	159.24	86.760	55.83	150.101	88.696	54.19
	75%	673.61	14.28	125.17	718.756	238.43	154.205	54.63	240.593	152.903	54.74
	100%	862.72	17.50	151.17	881.220	318.50	183.720	56.99	300.588	182.651	54.83
Steam Turbine	50%	208.33	4.17	47.95	210.404		68.000	32.32		65.860	31.30
	75%	312.50	6.25	73.82	315.606		102.660	32.53		98.847	31.32
	100%	416.67	8.33	100.15	420.808		137.580	32.69		131.225	31.18

Table 6. Unit cost of electricity and steam for the each plant at various load conditions. The values in parentheses are the ones for the case without decomposition of exergy into thermal and mechanical exergies.

Plant	Load	Production unit costs based on unit cost of fuel C_0 = 5.0 ($/GJ)		
		C_W	C_{BQ}	D_W
Combined Cycle	25%	17.986(17.900)		16.282(16.395)
	50%	13.079(13.032)		13.631(13.710)
	75%	11.418(11.413)		11.875(11.884)
	100%	10.884(10.856)		11.516(11.563)
Gas Turbine Cogeneration	25%	18.316(18.591)	12.688(13.462)	
	50%	13.173(13.906)	10.796(11.017)	
	75%	11.362(11.341)	9.604(9.756)	
	100%	10.780(10.738)	9.381(9.536)	
Steam Turbine	50%			23.360(23.360)
	75%			20.885(20.885)
	100%			19.741(19.741)

참고문헌

1. Valero "On the energy costs of present day society" in AES-vol. 35, pp1~7, 1995.
2. Moran, J., Availability Analysis : A Guide to Efficient Energy Use, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, 1982.
3. Tsatsaronis, G., and Winhold, M., "Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conservation plants-I, A new general methodology,", Energy, Vol. 10, pp. 69~80, 1985.
4. Kim, S., Oh, S., Kwon, Y. and Kwak, H., "Exergoeconomic analysis of thermal systems", Energy. Vol 23, pp. 393~406, 1998.
5. Oh, S, Pang, H., Kim, S. and Kwak H., "Exergy analysis for gas turbine cogeneration system" J. of Eng. For Gas Turbine and Power, Vol. 118, pp.782~791, 1995.
6. JANAF Thermochemical Tables, 1971, National Bureau of Standard Publication NSRDS-N3537, Washington, DC.
7. JSME Steam Tables, 1968, JSME
8. Valero, A., Lozano, M.A., Serra, L., Tsatsaronius, G., Pisa, J., Frangoponlous C. and Von Spakovsky, M. R., "CGAM problems: Definition and conventional solutions," Energy, Vol. 19, pp.279~286, 1994.
9. 김덕진, 전진석, 곽호영, "복합사이클 플랜트의 엑서지 및 열경제학적 해석", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 748~754, 1999.
10. Kwon, Y., Kwak, H and Oh, S., "Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration system," Will be published in the `International Journal of Exergy, 2000.