

스팀 동력 플랜트의 엑서지 및 열경제학적 해석

김덕진* · 정정열* · 곽호영†

(2002년 8월 5일 접수, 2002년 11월 28일 심사완료)

Exergetic and Thermo-economic Analysis of Steam Power Plant

Duck-Jin Kim, Jung-Yeul Jung and Ho-Young Kwak

Key Words : Exergy(엑서지), Thermo-economics(열경제학), Exergetic Cost(엑서지 비용), Steam Power Plant(스팀 동력 플랜트)

Abstract

Exergetic and thermo-economic analyses were performed for a 137-MW steam power plant. In these analyses, mass and energy conservation laws were applied to each component of the system. Quantitative balance of the exergy and exergetic cost for each component, and for the whole system was carefully considered. The exergo-economic model, which represented the productive structure of the system was used to visualize the cost formation process and the productive interaction between components. The computer program developed in this study can determine production costs of power plants, such as gas- and steam-turbines plants and gas-turbine cogeneration plants. The program can also be used to study plant characteristics, namely, thermodynamic performance and sensitivity to changes in process and/or component design variables.

기호 설명

C_i	: 초기 투자 비용 (\$)
C_o	: 연료 단가 (\$/kJ)
C_w	: 일(또는 전기) 단가(\$/kJ)
$CRF(i, n)$: 자본 회수 비용
\dot{C}	: 자본 흐름율 (\$/year or \$/hr)
D	: 수증기 단가 (\$/MJ)
\dot{E}_x	: 엑서지 흐름율 (MW)
i	: 이자율
\dot{m}	: 질량 유속 (kg/s)
P	: 압력
PW	: 현존 가치
$PWF(i, n)$: 현존 가치 계수
\dot{Q}	: 열유속
\dot{S}_i	: 엔트로피 유속 (MW/K)

S_n	: 잔여가치 (\$)
T	: 온도 (K)
T_0	: 환경 온도
\dot{Z}_k	: k 번째 구성기기의 자본 흐름율(\$/hr)

그리스문자

ϕ_k	: 유지 비용 계수
η_e	: 엑서지 효율

하첨자

$boun$: 경계 시스템
cv	: 검사 체적
k	: k 번째 구성기기
o	: 연료
P	: 역학적
S	: 엔트로피
T	: 열적
W	: 일 또는 전기

상첨자

BQ	: 수증기
------	-------

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kwakhy@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5278 FAX : (02)826-7464
* 회원, 중앙대학교 대학원

- CHE : 화학적
- P : 역학적
- T : 열적
- W : 일 또는 전기
- ST : 스팀 터빈에 의한 생산된 전기

1. 서론

엑서지 해석은 시스템 구성요소들의 엔트로피 생성량을 정확하게 줌으로써 구성기기들의 효율과 열역학적인 성능을 예측할 수 있다. 더욱이 열경제학적 해석은 생산물의 단가는 물론 비가역성에 의한 경제적인 손실을 제공해 준다. 또한 복잡한 열 시스템의 작동 및 최적화 설계를 위한 수단을 제공해줄 수 있다. 최근 이러한 에너지 시스템의 경제적인 평가는 물론 구성기기들의 오작동도 예측할 수 있어 이에 대한 연구가 진행중이다.

만약 어떤 에너지 시스템이 한 종류의 생산물(예를 들어, 전기)을 생산할 경우, 생산물의 단가(C_w)는 식 (1)과 같은 엑서지 비용균형식^(1,2)으로 간단히 구할 수 있다.

$$C_w = \frac{C_o}{\eta_e} \left[1 + \frac{\sum \dot{Z}_{[k]}}{C_o \cdot \dot{E}_X^{CHE}} \right] \quad (1)$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 생산단가는 연료 단가와 시스템의 엑서지 효율과 연료비용흐름과 구성요소들이 고정비용흐름의 비에 따라 정해진다. 그러나 에너지 시스템이 여러 생산물이 있는 경우에는 생산물의 단가계산은 그리 쉽지 않다.

본 연구에서는, Fig. 1에서 볼 수 있는 137-MW 스팀 동력 플랜트에 대한 엑서지 및 열경제학적 해석을 수행하였다. 이 연구에서는 질량 및 엑서지 보존식들을 스팀 발전 시스템의 각 구성기기에 엄밀히 적용하였을 뿐만 아니라 엑서지 및 엑서지 비용 균형식도 엄밀하게 적용하였다. Oh⁽³⁾ 등이 개발한 엑서지 균형식과 Kim⁽⁴⁾ 등이 개발한 열 경제학 방법을 이용하여 서울화력발전소에서 가동중인 137-MW 스팀 발전 시스템의 엑서지 및 열경제학적 해석을 수행하였다. 그러나 단열인 경우에만 적용할 수 있었던 엑서지 균형식과 비용 균형식은 열전달로 인한 엑서지 손실을 고려하여 수정하여 적용하였다.

2. MOPSA 에 기초한 비용균형식

열시스템을 구성하는 모든 성분에 적용할 수

있는 일반적인 엑서지 균형식은 열역학 제 1 및 제 2 법칙을 이용하여 정식화할 수 있다⁽³⁾. 열전달에 의한 엑서지손실도 고려한 일반적인 엑서지 균형식은 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\begin{aligned} & \dot{E}_X^{CHE} + \left[\sum_{input} \dot{E}_{X,i}^{BQ} - \sum_{output} \dot{E}_{X,j}^{BQ} \right] \\ & + \left[\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right] + \left[\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^P - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^P \right] \quad (2) \\ & + T_0 \left[\sum_{inlet} \dot{S}_i - \sum_{outlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{CV}/T_0 \right] = \dot{E}^W \end{aligned}$$

식 (2)의 첫번째 항인 \dot{E}_X^{CHE} 는 연료 엑서지 유량을 나타내고, 다섯번째 항의 \dot{Q}_{CV} 는 기기와 주위와의 열전달을 나타내는데, 이량은 해당 기기에 대한 열역학 제 1 법칙인 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{CV} + \sum \dot{H}_i = \sum \dot{H}_e + \dot{W}_{CV} \quad (3)$$

각기 분해된 엑서지 흐름에 엑서지 단가를 부여하면, 식 (2)에 주어진 엑서지 균형식에 상응하는 비용균형식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \dot{E}_X^{CHE} C_o + \left(\sum_{input} \dot{E}_{X,i}^{BQ} - \sum_{output} \dot{E}_{X,j}^{BQ} \right) C_{BQ} \quad (4) \\ & + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) C_T + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^P - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^P \right) C_P \\ & + T_0 \left(\sum_{inlet} \dot{S}_i - \sum_{outlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{CV}/T_0 \right) C_s + \dot{Z}_{[k]} = \dot{E}^W C_w \end{aligned}$$

위 식에서, 좌변 여섯 번째 항인 $\dot{Z}_{[k]}$ 는 k 번째 기기를 소유하고 운전하게 됨에 따라 이에 관계되는 모든 재정적 부담을 포함하는 자본비용흐름이다. 식 (2)과 식 (4)은 본 해석에서 사용된 두 가지 기본식이다. 이 식들을 기초로 한 엑서지 단가 계산 방법은, 열 시스템의 생산적 구조를 도출할 수 있기 때문에 MOPSA(MODified Productive Structure Analysis)방법⁽⁴⁾이라 칭하였다. 이 방법은 Lozano 와 Valero⁽⁵⁾ 및 Torres et al.⁽⁶⁾이 제안하고 발전시킨 방법과 유사하지만 이 MOPSA 방법은 복잡한 에너지 시스템에서의 비용형성 과정과 기기들 간의 상호작용을 명료하게 가시화할 수 있는 장점이 있다.⁽⁶⁾

현재까지, 생산물의 엑서지 단가계산에 여러 가지 방법이 제안되었다.^(5,7-10) 그러나, 본 방법을 사용하면 아무리 복잡한 발전 시스템일지라도 한층

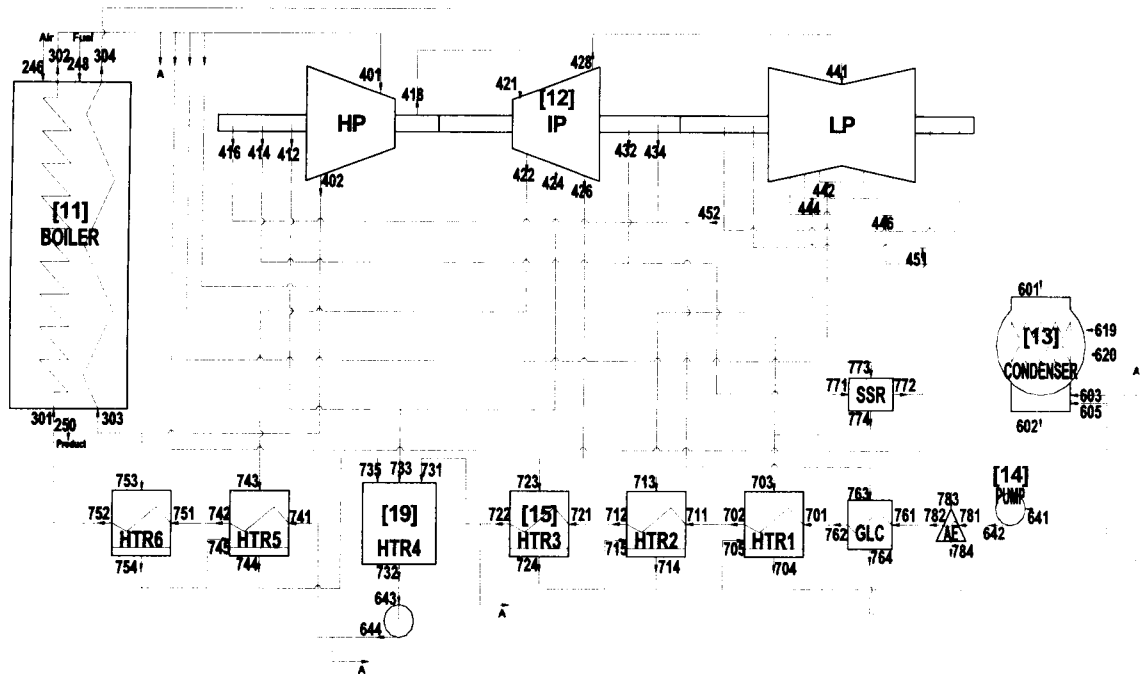


Fig. 1 Steam power plant

더 체계적이고 융통성이 있게 취급할 수가 있다.⁽¹¹⁾ 반면에, Tsatsaronis 와 Pisa⁽¹⁰⁾가 제안한 SPECO(SPEcific COst)방법은 성분들을 출입하는 각각의 물질 및 에너지의 흐름에 단가를 부여하고 있어 많은 미지수가 나오게 된다. 이 방법을 이용할 경우, 결과적으로 생산단가를 구하기 위해서는 부차적인 가정이 필요하게 된다.

3. 발전설비 기기의 비용방정식

발전설비를 설치하고 이를 운전하게 됨으로써 발생하는 모든 비용은 초기투입자금, 이자율 및 발전설비의 예상수명 등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 Moran 의 연간등가비용방법⁽¹⁾을 사용하였다.

특정 설비의 기기에 대한 상환비용은 다음의 식과 같이 쓸 수 있다.

$$PW = C_i - S_n PWF(i, n) \quad (5)$$

기기의 현존가치는 자본회수율 $CRF(i, n)$ 을 사용하여 다음과 같이 연간등가비용으로 변환시킬 수 있다. 즉,

$$\dot{C}(\$ / \text{year}) = PW \cdot CRF(i, n) \quad (6)$$

등가 비용을 연간운전시간인 8000 시간으로 나누면, 설비의 k 번째 성분에 대한 자본비용흐름을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Z}_k = \phi_k \dot{C}_k / (3600 \times 8000) \quad (7)$$

예상수명을 15 년으로 잡은 각각의 기기성분에 대한 정비 및 운전비용은 연간등가비용의 6%로 정해 $\phi_k = 1.06$ 으로 계산하였다.

4. 스팀 동력 플랜트의 비용 균형식

137-MW 스팀 동력 플랜트의 개략도는 Fig. 1 에 주어져 있다. 100% 부하에서 보일러에 들어가는 연료의 질량유속은 8.33 kg/s 이고 공기-연료의 비는 50.90 이다.

식 (4)에 주어진 것과 같이 MOPSA 방법의 비용 균형식을 이용하여 스팀 동력 플랜트의 각 구성기기에 대한 비용 균형식을 얻을 수 있다. 비용 균형식에서 T, P, S, W, BQ 같은 대문자는 각각 열적 엑서지, 기계적 엑서지, 엔트로피(entropy)와 일엑서지와 스팀엑서지를 나타낸다. 특정 구성기기에 대한 주요 생산물의 엑서지 유량의 경우에는 그 요소를 나타내는 숫자를 맨 앞에 표기하지만, 소

비된 자원의 엑서지일 경우에는 엑서지 성분을 나타내는 대문자 뒤에 숫자를 표기한다.

보일러는 연료의 엑서지를 소비하여 스팀의 열적 엑서지를 증가시키는 기기이므로 다음과 같이 기술할 수 있다.

보일러[11]:

$$\begin{aligned}
 & E_{X,[11]}^{CHE} C_0 \\
 & + \left(\dot{E}_{X,246} + \dot{E}_{X,248} - \dot{E}_{X,250} + \sum_{Water}^{inlet} \dot{E}_{X,i} - \sum_{Water}^{outlet} \dot{E}_{X,j} \right) C_{11BQ} \\
 & + T_0 \left(\dot{S}_{246} + \dot{S}_{248} - \dot{S}_{250} + \sum_{Water}^{inlet} \dot{S}_i - \sum_{Water}^{outlet} \dot{S}_j - \dot{Q}_{[11]}/T_0 \right) C_S \\
 & + Z_{[11]} = 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \left(\sum_{Water}^{inlet} \dot{E}_{X,i} - \sum_{Water}^{outlet} \dot{E}_{X,j} \right) C_{11BQ} &= \left(\sum_{Water}^{inlet} \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{Water}^{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) D_{11T} \\
 &+ \left(\sum_{Water}^{inlet} \dot{E}_{X,i}^P - \sum_{Water}^{outlet} \dot{E}_{X,j}^P \right) D_P
 \end{aligned} \tag{9}$$

보일러에서 물은 기계적 엑서지와 열적 엑서지를 모두 받지만 보일러의 주된 역할은 작동유체의 온도를 높이기 위한 것이므로 스팀의 열적 엑서지를 주요 생산물로 간주하여 그 가격을 C_{11BQ} 로 표시하였다. 앞으로 기술되는 각 구성기기도 이와 같은 방식으로 표기하였다.

스팀 동력 플랜트에서 보일러 이외의 스팀 터빈, 응축기, 펌프에서의 엑서지 비용균형식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

스팀터빈[12];

$$\begin{aligned}
 & (\dot{E}_{X,401}^T - \dot{E}_{X,402}^T + \dot{E}_{X,421}^T - \dot{E}_{X,422}^T + \dot{E}_{X,441}^T - \dot{E}_{X,442}^T) D_T \\
 & + (\dot{E}_{X,401}^P - \dot{E}_{X,402}^P + \dot{E}_{X,421}^P - \dot{E}_{X,422}^P + \dot{E}_{X,441}^P - \dot{E}_{X,442}^P) D_P \\
 & + T_0 (\dot{S}_{401} - \dot{S}_{402} + \dot{S}_{421} - \dot{S}_{422} + \dot{S}_{441} - \dot{S}_{442}) C_S + \dot{Z}_{[12]} = \dot{W}_{[12]} D_W
 \end{aligned} \tag{10}$$

응축기[13];

$$\begin{aligned}
 & (\dot{E}_{X,601}^T + \dot{E}_{X,603}^T + \dot{E}_{X,605}^T + \dot{E}_{X,607}^T - \dot{E}_{X,602}^T) D_T \\
 & + (\dot{E}_{X,601}^P + \dot{E}_{X,603}^P + \dot{E}_{X,605}^P + \dot{E}_{X,607}^P - \dot{E}_{X,602}^P) D_P + (\dot{E}_{X,619} - \dot{E}_{X,620}) C_{13BQ} \\
 & + T_0 (\dot{S}_{601} + \dot{S}_{603} + \dot{S}_{605} + \dot{S}_{607} - \dot{S}_{602} + \dot{S}_{619} - \dot{S}_{620}) C_S + \dot{Z}_{[13]} = 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

펌프[14];

$$\begin{aligned}
 & (\dot{E}_{X,641}^T - \dot{E}_{X,642}^T + \dot{E}_{X,643}^T - \dot{E}_{X,644}^T + \dot{E}_{X,645}^T - \dot{E}_{X,646}^T) D_T \\
 & + (\dot{E}_{X,641}^P - \dot{E}_{X,642}^P + \dot{E}_{X,643}^P - \dot{E}_{X,644}^P + \dot{E}_{X,645}^P - \dot{E}_{X,646}^P) D_{14P} \\
 & + T_0 (\dot{S}_{641} - \dot{S}_{642} + \dot{S}_{643} - \dot{S}_{644} + \dot{S}_{645} - \dot{S}_{646}) C_S + \dot{Z}_{[14]} = \dot{W}_{[14]} D_W
 \end{aligned} \tag{12}$$

한 개의 개방형 가열기[15]와 몇몇의 밀폐형 가열기와 파이프[19]에서의 엑서지 비용균형식은 다음과 같다.

밀폐형 가열기[15];

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,ii}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,ii}^T \right) D_T + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,ii}^P - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,ii}^P \right) D_P \right]_{hot\ stream} \\
 & + \left[\left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) D_{15T} + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^P - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^P \right) D_P \right]_{cold\ stream} \\
 & + T_0 \left[\left(\sum_{inlet} \dot{S}_{jj} - \sum_{outlet} \dot{S}_{ii} \right)_{hot\ stream} + \left(\sum_{inlet} \dot{S}_j - \sum_{outlet} \dot{S}_i \right)_{cold\ stream} + \dot{Q}_{[15]}/T_0 \right] \\
 & C_S + \dot{Z}_{[15]} = 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

개방형 가열기 & 파이프[19];

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) D_{19T} + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,i}^P - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^P \right) D_P \\
 & + T_0 \left(\sum_{inlet} \dot{S}_i - \sum_{outlet} \dot{S}_j + \dot{Q}_{[19]}/T_0 \right) C_S + \dot{Z}_{[19]} = 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 7 개의 식에서 다음의 10 개의 미지수 C_{11BQ} , D_{11T} , C_{13BQ} , D_{14P} , D_{15T} , D_{19T} , D_T , D_P , C_S , D_W 를 얻었다. 따라서 3 개의 비용균형식이 더 필요하다. 열 엑서지와 기계적 엑서지에 대한 접합점(junction)에서 2 개의 비용균형식을 더 얻을 수 있다. 하나는 $D_P = D_{14P}$ 이고 다른 하나는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix}
 \dot{E}_{X[1]}^{BO} + \dot{K}_{[1]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{X[1]}^{LOST} \\
 0 & -\dot{E}_{X[2]}^P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[2]}^T & \dot{K}_{[2]}^P & -\dot{E}_{X[2]}^{LOST} \\
 0 & 0 & \dot{E}_{X[3]}^{BO} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[3]}^T & \dot{K}_{[3]}^P & -\dot{E}_{X[3]}^{LOST} \\
 0 & -\dot{E}_{X[4]}^P & 0 & \dot{K}_{[4]}^P & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[4]}^T & 0 & -\dot{E}_{X[4]}^{LOST} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[5]}^T & 0 & 0 & \dot{K}_{[5]}^T & \dot{K}_{[5]}^P + \dot{K}_{[5]}^P & -\dot{E}_{X[5]}^{LOST} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[9]}^T & 0 & 0 & \dot{K}_{[9]}^P & \dot{E}_{X[9]}^{LOST} \\
 -\dot{K}_{[11]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[11]}^T & 0 & \dot{K}_{[11]}^P & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{K}_{[5]}^T & -\dot{K}_{[9]}^T & -\dot{K}_{[11]}^T & \dot{K}_{[11]}^T + \dot{K}_{[5]}^T + \dot{K}_{[9]}^T & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\dot{K}_{[4]}^P & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{[4]}^P & 0 \\
 -\dot{E}_{X[1]}^{BO} & 0 & -\dot{E}_{X[3]}^{BO} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{X[bound]}^{LOST}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 C_{11BQ} \\
 D_w \\
 C_{13BQ} \\
 D_{14P} \\
 D_{15P} \\
 D_{19P} \\
 D_{11P} \\
 D_T \\
 D_P \\
 C_S
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -\dot{E}_{X[1]}^{CHE} C_0 - \dot{Z}_{[11]} \\
 -\dot{Z}_{[12]} \\
 -\dot{Z}_{[13]} \\
 -\dot{Z}_{[14]} \\
 -\dot{Z}_{[15]} \\
 -\dot{Z}_{[19]} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 -\dot{Z}_{[bound]}
 \end{bmatrix}$$

System Cost Structure

Output
Unit CostInput Cost
Flow Rate

Fig. 2 Cost structure of steam power plant

$$\left[\left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,j}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right)_{11, Water} + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,j}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right)_{15, cold stream} + \sum (\dot{E}_{X,j}^T - \dot{E}_{X,j}^T)_{19} \right] D_T \\
 = \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,j}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) D_{11T} + \left(\sum_{inlet} \dot{E}_{X,j}^T - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j}^T \right) D_{15T} + \sum (\dot{E}_{X,j}^T - \dot{E}_{X,j}^T) D_{19T} \quad (12)$$

생산물의 단가계산에 가장 중요한 나머지 균형식은 시스템의 경계를 출입하는 엑서지와 엔트로피를 고려함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\dot{E}_{X,248} + \dot{E}_{X,246} - \dot{E}_{X,250}) C_{11BQ} + (\dot{E}_{X,619} - \dot{E}_{X,620}) C_{13BQ} \\
 + T_o (\dot{S}_{248} + \dot{S}_{246} - \dot{S}_{250} + \dot{S}_{383} - \dot{S}_{384} + \dot{S}_{619} - \dot{S}_{620} + \sum \dot{Q}_{[k]} / T_o) C_S \\
 + \dot{Z}_{[bound]} = 0 \quad (13)$$

식 (13)에서 $\dot{Z}_{[bound]}$ 는 발전소 건설에 필요한 토지 매입비용, 플랜트의 건설비용 등이 포함될 수 있다.

플랜트의 전체 엑서지 균형식은 들어간 비용과 생산물의 총합이 같아야 한다⁽¹⁾는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\dot{E}_X^{CHE} C_0 + \sum \dot{Z}_{[k]} = \dot{E}_{ST}^{W_{net}} D_w + \dot{E}_{ST}^{W_{net}} C_w \quad (14)$$

어떤 열경제화 방법을 이용하여도 에너지 시스템의 각 구성기기에 대한 엑서지 비용 균형식을 얻을 수 있다. 하지만 중요한 점은 각 구성기기에 대한 비용 균형식을 모두 더할 경우 식 (14)와 같은 전체 시스템에 대한 엑서지 비용 균형식을 만족해야 한다. 이런 점에서 볼 때 열 엑서지 (C_T)와 (D_T), 기계적 엑서지 (C_P)와 (D_P), 엔트로피

(C_S)에 대한 단가는 에너지 시스템의 생산단가를 결정하는 중요한 변수이지만 전체시스템에 대한 엑서지 비용 균형식에서는 나타나지 않는다. 따라서 이들 엑서지의 단가는 에너지 시스템의 생산단가를 결정하는 내부변수(internal parameter)라 할 수 있다.⁽¹²⁾

Fig. 2에는 식 (8)-식 (13)에 주어진 엑서지 비용 균형식을 행렬을 이용하여 표현한 것이다. 좌변의 행렬에서 각 열(row)의 합은 스팀동력플랜트의 각 구성기기 또는 접합점에 대한 엑서지 균형식을 나타낸다. 즉 주어진 열에서 각 행의 값들은 해당 구성기기에서 투입되는 엑서지 흐름율이며 대각선에 주어진 것은 그 구성기기의 주된 생성물에 대한 엑서지 흐름율이다. 또한 각 행(column)의 합은 스팀동력플랜트의 생산물인 전기(두번째 행)를 제외하곤 0이 됨을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 2에 주어진 행렬 그 자체가 주어진 에너지 시스템의 생산물 가격을 결정하는데 구성기기 간의 상호작용을 보여주는 역할을 함을 알 수 있다.

5. 해석 결과 및 고찰

Table 1는 100% 부하일 경우 Fig. 1에 주어진 137MW 스팀동력플랜트의 각 지점에서의 열 엑서지, 기계적 엑서지의 흐름과 엔트로피 흐름을 나타내고 있다. 이 상태량들은 각 지점에서 실제 운전시 작동유체의 압력, 온도, 질량 유량의 데이터에 기초하여 계산되어진 값들이다.

보일러에서의 가스 상태량은 JANAF 표에 나와있는 엔탈피 및 엔트로피 값에 잘 일치하도록 한 다항식⁽¹³⁾을 사용하였고 물과 증기의 온도와 압력에

Table 1 Property values and thermal, mechanical exergy flows and entropy production rates at various state points in the steam power plant for the case of 100 % load condition. The values in parentheses in the temperature column indicate the steam qualities

State	\dot{m} [kg/s]	P [Mpa]	T [°C]	\dot{E}_x^T [MW]	\dot{E}_x^P [MW]	\dot{S} [MW/K]
246	416.667	0.101	15.000	0.000	-0.669	0.060
248	8.333	0.101	15.000	0.000	-0.021	-0.001
250	425.000	0.101	178.141	15.231	-0.691	0.290
301	118.605	15.199	234.900	28.954	1.786	0.312
302	118.605	13.289	537.340	181.852	1.560	0.777
303	105.377	3.298	354.800	125.006	0.337	0.707
304	105.377	3.035	536.600	150.011	0.309	0.773
401	117.689	12.863	535.500	180.022	1.499	0.773
402	114.655	3.298	354.800	136.013	0.366	0.770
412	0.717	0.845	405.189	0.788	0.001	0.005
414	0.106	0.446	402.308	0.108	0.000	0.001
416	0.050	0.028	399.249	0.033	0.000	0.000
418	2.161	3.035	420.330	2.730	0.006	0.015
421	107.538	3.035	534.271	152.725	0.315	0.788
422	4.638	1.376	439.800	5.573	0.006	0.034
424	3.828	0.845	357.700	3.993	0.003	0.028
426	3.430	0.446	274.000	3.004	0.001	0.025
428	95.415	0.446	274.000	83.546	0.033	0.708
432	0.147	0.446	399.798	0.149	0.000	0.001
434	0.080	0.028	396.707	0.052	0.000	0.001
441	95.415	0.446	274.000	83.546	0.033	0.708
442	6.135	0.231	208.000	4.500	0.001	0.046
444	8.123	0.028	(0.960)	2.972	-0.001	0.061
446	81.194	0.028	(0.960)	29.710	-0.006	0.610
451	0.160	0.122	356.800	0.127	0.000	0.001
452	0.124	0.028	144.218	0.052	0.000	0.001
601	81.194	0.028	(0.960)	29.710	-0.006	0.610
602	100.148	0.004	29.900	0.156	-0.010	0.044
603	0.955	0.028	(0.539)	0.204	0.000	0.004
605	17.999	0.028	38.685	0.069	-0.001	0.010
619	3055.556	0.203	15.000	0.000	0.304	0.685
620	3055.556	0.152	30.290	5.005	0.149	1.346
641	100.148	0.004	29.900	0.156	-0.010	0.044
642	100.148	1.869	30.054	0.159	0.177	0.044
643	118.780	0.952	169.500	15.554	0.101	0.242
644	118.780	15.401	172.254	15.914	1.812	0.243
701	100.148	1.667	32.900	0.223	0.157	0.048

State	\dot{m} [kg/s]	P [Mpa]	T [°C]	\dot{E}_x^T [MW]	\dot{E}_x^P [MW]	\dot{S} [MW/K]
702	100.148	1.565	87.500	3.282	0.147	0.116
703	8.322	0.028	-0.960	3.045	-0.001	0.063
704	17.887	0.070	39.500	0.074	-0.001	0.010
705	9.565	0.212	120.940	0.632	0.001	0.015
711	100.148	1.565	87.500	3.282	0.147	0.116
712	100.148	1.464	122.000	6.738	0.136	0.155
713	6.135	0.231	208.000	4.500	0.001	0.046
714	9.565	0.212	120.940	0.632	0.001	0.015
715	3.430	0.401	125.400	0.245	0.001	0.005
721	100.148	1.464	122.000	6.738	0.136	0.155
722	100.148	1.363	141.900	9.191	0.126	0.176
723	3.430	0.446	264.000	2.970	0.001	0.025
724	3.430	0.401	125.400	0.245	0.001	0.005
731	99.972	1.363	141.900	9.175	0.126	0.176
732	118.780	0.952	169.500	15.554	0.101	0.242
733	4.544	0.845	353.800	4.721	0.003	0.034
735	14.264	1.312	182.000	2.148	0.017	0.031
741	118.605	15.401	169.300	15.360	1.810	0.239
742	118.605	15.300	194.000	20.034	1.798	0.267
743	4.638	1.376	439.800	5.573	0.006	0.034
744	14.264	1.312	182.000	2.148	0.017	0.031
745	9.626	2.994	201.200	1.760	0.028	0.023
751	118.605	15.300	194.000	20.034	1.798	0.267
752	118.605	15.199	234.900	28.954	1.786	0.312
753	9.626	3.146	354.700	11.379	0.029	0.065
754	9.626	2.994	201.200	1.760	0.028	0.023
761	100.148	1.768	31.200	0.184	0.167	0.045
762	100.148	1.667	32.900	0.223	0.157	0.048
763	0.254	0.028	356.000	0.153	0.000	0.002
764	0.254	0.028	0.000	0.005	0.000	0.000
771	0.254	0.446	400.850	0.257	0.000	0.002
772	0.160	0.122	356.800	0.127	0.000	0.001
773	0.106	12.863	535.500	0.162	0.001	0.001
774	0.200	0.028	470.581	0.147	0.000	0.002
781	100.148	1.869	30.400	0.166	0.177	0.044
782	100.148	1.768	31.200	0.184	0.167	0.045
783	0.112	13.289	537.340	0.172	0.001	0.001
784	0.112	0.028	34.170	0.000	0.000	0.000

따른 상태량들은 IFC(International Formulation Committee)⁽¹⁴⁾에서 제시한 식들을 이용하여 구하였다.

Table 2 에는 스팀 동력 플랜트의 각 구성기기별 초기 투자비용과 유지비용을 고려한 연가 등가액과 이에 대응되는 연간 비용흐름이 나와 있다. 초기투자 비용은 서인천 화력의 경우를 참조하여 정하였다. Table 3 와 4 에는 100% 부하 스팀동력플랜

트의 각 구성기에서 관계되는 여러 종류의 엑서지 흐름과 이에 상응되는 엑서지 비용흐름이 각각 나와 있다. Table 3 에서 투입엑서지는 음의 값으로 산출엑서지는 양의 값으로 나와 있으며 각 구성기 별로 이들 엑서지의 합이 0 이 됨은 각 구성기의 엑서지 밸런스가 맞는 것을 뜻한다. 좀 더 구체적으로 설명하면 Table 3 의 터빈에서 133.839MW 의 일 엑서지가 143.199MW 의 열엑서지와 1.437MW 의 기계적 엑서지의 소비로 산출되었으며 이 과정에서 10.796MW 의 손실엑서지가 발생됨을 알 수 있다. Table 3 에서 확인할 수 있는 바와 같이 각 구성기 별로 각 엑서지 흐름의 합산된 양을 볼 때 투입엑서지, 산출엑서지 및 손실 엑서지의 합은 0 이 되어 본 연구에서 수행한 계산결과가 정확함을 알 수 있다. 또한 Table 3 에서 투입엑서지의 64%가 손실됨을 알 수 있으며 손실 엑서지중 84.5%가 보일러 즉 연소실에서 일어남을 알 수 있다.

Table 4 에서 볼 수 있는 바와 같이 각 구성기 별로 투입엑서지 비용흐름과 산출엑서지 비용흐름의 절대 값은 서로 같음을 알 수 있다. 이 Table 에서도 투입엑서지의 비용흐름은 음의 값으로 산출엑서지의 비용흐름은 양의 값으로 나타내었다. 또한 시스템 전체에 대한 비용흐름의 경우 투입된 연료비용과 투자비용의 합은 생산된 전기 엑서지의 비용흐름과 같고 즉 식 (14) 의 우변과 좌변이 일치함을 알 수 있고 내부변수에 대한 비용흐름의 합은 건설비의 비용흐름과 같음을 알 수 있어 플랜트의 건설비용이 어떻게 생산단가에 영향을 주는 지 확실히 알 수 있다. 또한 이 Table 에서 손실 엑서지에 의해 얼마만큼의 비용손실이 일어남도 알 수 있다.

Table 5 에는 스팀동력플랜트의 부하별로 측정된 전기 출력량과 계산에 의한 전기출력량, 시스템 효율 및 전기단가가 나와 있다. 이 Table 에서 볼 수 있는 바와 같이 전기 출력량 및 시스템 효율은 최대 4.6% 내에서 서로 일치함을 알 수 있다. 특히 50% 부하일 때가 100% 부하일 때 비교해 볼 때 시스템 효율은 50% 부하일 때 1.1% 정도 감소하지만 전기 단가는 무려 18% 상승함을 볼 수 있어 열경제학 해석이 중요함을 말해 주고 있음을 알 수 있다. Table 5 에서 볼 수 있는 바와 같이 적은 부하일수록 전기단가는 올라감을 알 수 있어 이를 이용하여 주어진 조건에서 어떤 부하에서 운전하는 것이 최적인지도 알 수 있다. 또한 Table 3 에서 알 수 있는 바와 같이 기계적 엑서지가

Table 2 Initial investments, annualized costs and the corresponding monetary flow rates at each component in the steam power plant

Component	Initial investment [10 ⁶ \$]	Annualized cost [10 ⁶ \$/year]	Monetary flow rate [\$/hr]
Boiler	10.000	1.283	170.032
Turbine	25.000	3.208	425.081
Condenser	8.000	1.027	136.026
Pump	2.000	0.257	34.006
Closed heater	6.000	0.770	102.019
D.H.Supply	2.000	0.257	34.006
Open&S.Pipe	2.000	0.257	34.006
Boundary	50.000	6.416	850.162
Total	105.000	13.474	1785.341

Table 3 Exergy balances at each component in the steam power plant for the case of 100 % load condition

Component	\dot{E}_X^W [MW]	\dot{E}_X^{CHE} [MW]	\dot{E}_X^T [MW]	\dot{E}_X^P [MW]	\dot{E}_X^{LOST} [MW]
Boiler	0.000	-420.808	193.134	-0.254	227.929
Turbine	133.839	0.000	-143.199	-1.437	10.796
Condenser	0.000	0.000	-24.823	-0.157	24.981
Pump	-2.614	0.000	0.363	1.898	0.353
Closed heater	0.000	0.000	-2.946	-0.096	3.042
Open&Pipes	0.000	0.000	-2.293	-0.110	2.404
Total	131.225	-420.808	20.236	-0.156	269.504

Table 4 Exergetic-cost balances for each component in the steam power plant for the case with initial investment and maintenance and 100 % load condition

Component	\dot{C}_W [\$/hr]	\dot{C}_0 [\$/hr]	\dot{C}_T [\$/hr]	\dot{C}_P [\$/hr]	\dot{C}_S [\$/hr]	\dot{Z} [\$/hr]
Boiler	0.000	-7574.548	11217.583	-27.122	-3445.880	-170.032
Turbine	9511.652	0.000	-8769.812	-153.535	-163.224	-425.081
Condenser	0.000	0.000	588.718	-75.029	-377.664	-136.026
Pump	-185.769	0.000	22.235	202.874	-5.333	-34.006
Closed heater	0.000	0.000	158.271	-10.260	-45.992	-102.019
Open & Pipes	0.000	0.000	82.125	-11.781	-36.337	-34.006
Boundary	0.000	0.000	-3299.121	74.853	4074.430	-850.162
Total	9325.883	-7574.548	0.000	0.000	0.000	-1751.335

Table 5 Measured and calculated production rates of electricity and the exergetic and efficiency at various load conditions. The values in parentheses are calculated ones

Load Condition	Mass flow rate (1000kg/hr)			\dot{E}_X^{CHE} [MW]	\dot{E}_{ST}^{Wnet} [MW]	Exergetic efficiency [%]	D_w [\$/GJ]
	Air	Fuel	Steam				
50%	750.00	15.00	177.62	210.40 (210.40)	68.00 (65.86)	32.32 (31.30)	(23.360)
75%	125.00	22.50	265.74	315.61 (315.61)	102.66 (98.85)	32.53 (31.32)	(20.885)
100%	500.00	30.00	360.53	420.81 (420.81)	137.58 (131.22)	32.69 (31.18)	(19.741)

열엑서지에 비해서 그 흐름량이 작다. 또한 스팀 동력플랜트와 같이 생산되는 전기가 주로 열엑서지의 소비에 의존하는 경우에는 엑서지 흐름을 열엑서지와 기계적 엑서지로 분해하지 않고 전기단가를 구해도 똑 같은 값을 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

6. 결론

열 경제학 이론중의 하나인 MOPSA 방법을 이용하여 137-MW 스팀 동력 플랜트의 에너지 및 엑서지 계산과 엑서지 비용해석을 수행하여 시스템의 산출엑서지의 생산단가를 구하였다. 시스템과 각 구성기기 별로 엑서지 및 엑서지 비용 균형은 물론 전체 시스템에 대한 엑서지 및 엑서지 비용균형은 정확하였다. 따라서 이와 같은 엑서지 해석 및 열경제학 해석을 통하여 보다 복잡한 에너지 시스템의 평가와 예측을 가능하게 하여^(4,11) 시스템의 효율적인 운영을 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

서울화력의 자료를 제공해 주신 한국수력원자력(주) 안전기술처 심홍기 처장님과 서울화력 이순병 소장님께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Moran, J., 1982, "Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.
 (2) Valero, A., 1995, "On the Energy Costs of Present Day Society," *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-Vol.35. ASME, pp. 1~7.

(3) Oh, S., Pang, H., Kim, S., and Kwak, H., 1996, "Exergy Analysis for a Gas-Turbine Cogeneration System," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.118, pp.782~791.
 (4) Kim, S., Oh, S., Kwon, Y., and Kwak, H., 1998, "Exergoeconomic Analysis of Thermal Systems," *Energy*, Vol.23, pp.393~406.
 (5) Lozano, M.A., and Valero, A., 1993, "Theory of the Exergetic Cost," *Energy*, Vol.18, pp.939~960.
 (6) Torres, C., Serra, L., Valero, A. and Lozano, M.A., 1996, "Theories of System Optimization," *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-vol.36, ASME, pp. 429~436.
 (7) Frangopoulos, C.A., 1986, "Thermal-Economic Functional Analysis and Optimization," *Energy*, Vol.12, pp.563~571.
 (8) Von Spakovsky, M.R., and Evans, R.B., 1990, "The Design and Performance Optimization of Thermal Systems," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol.112, pp.86~93.
 (9) Lozano, M.A., and Valero, A., 1993, "Thermo-Economic Analysis of Gas-Turbine Cogeneration Systems," *In Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-vol.30. ASME, pp. 311~320.
 (10) Tsatsaronis, G., and Pisa, J., 1994, "Exergoeconomic Evaluation and Optimization of Energy System; Application to the CGAM Problem," *Energy*, Vol.19, pp.287~321.
 (11) Kim, D., Jeon, J., and Kwak, H., 1999, "Exergetic and Thermoeconomic Analysis of Combined Cycle Plant," *Proceeding of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-vol.39, pp.397~405. *Energy* 에 게재 예정.
 (12) Kim, D., Lee, H., Kwak, H., and Hong, J. "Thermoeconomic Analysis of Power Plants with Integrated Exergy Stream," In: *Proceeding of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-Vol. 40. ASME, 2000. pp. 393~404.
 (13) JANAF Thermochemical Tables, National Bureau of Standard Publications, NSRDS-N3537, Washington, DC., 1971.
 (14) JSME Steam Tables, Japanese Society of Mechanical Engineers, 1968.