

에너지 시스템에 대한 전력 및 열 비용산정

김 덕 진[†]

중앙대학교 기계공학과 벤처 HeatTL.com

Suggestion of Power and Heat Costing for an Energy System

Deok-Jin Kim[†]

HeatTL.com, Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received November 11, 2002; revision received March 26, 2003)

ABSTRACT: The calculation of each unit cost of productions is very important for evaluating the economical efficiency and deciding the reasonable sale price. In the present, two methods of exergy costing on multiple energy systems are suggested to reduce the complexities of conventional SPECO method and MOPSA method and to improve the calculation efficiency of exergoeconomics. The suggested methods were applied to a gas-turbine cogeneration and the unit costs of the power and the steam energy were calculated as an example. The main points of our methods are the following three. First, one exergetic cost is applied to one cycle or system. Second, the suggested equations are the internal cost balance equation and the production cost balance equation. Third, necessary states in a system are only inlet and exit states of the components producing energy.

Key words: Exergy(엑서지), Exergoeconomics(엑서지경제학), Unit cost(단가)

기 호 설 명

C : 단가 [\$/GJ]
 \dot{E}_X : 단위시간당 엑서지흐름 [MW]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 K : 구성기기에서 투입되는 엑서지흐름과 방출되는 엑서지흐름의 차 [MW]
 \dot{N} : 단위시간당 총 몰흐름 [kmol/s]
 \dot{Q} : 단위시간당 열량흐름 [MJ/s]
 s : 엔트로피 [kJ/kgK]
 T : 온도 [K]
 \dot{W} : 전력 또는 단위시간당 일 [MW]

x_i : i 성분의 몰비
 $\dot{Z}_{[k]}$: k 구성기기의 직접비용흐름 [\$/hr]

그리스 문자

α : A 구성기기에서 산출된 총 엑서지량 대 적용된 사이클에서의 부분엑서지량의 비
 β : 전체 열원투입 대 A 기기의 열원투입 비
 μ : 화학포텐셜 [kJ/kg]

상첨자

CHE : 화학적
 GT : 가스터빈
 HS : 열원(연료, 배기가스, 태양열, 지열 등)
 HHV : 연료의 고위발열량

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5281; fax: +82-2-826-2510

E-mail address: bbuvodi@hanmail.net

- Lost* : 손실
LNG : 액화천연가스
PC_i : *i*번째 생산적 사이클
PC_j : *j*번째 생산적 사이클
PC_k : *k*번째 생산적 사이클
PS_i : *i*번째 생산적 시스템
PS_j : *j*번째 생산적 시스템

하첨자

- 0 : 환경상태
 [A] : 전체 시스템을 기준으로 외부열원을 받는 구성기들(연소기, 보일러, 열교환기 등)
 [B] : 엑서지흐름을 타사이클로부터 받는(폐열 회수보일러, 열교환기 등)
 [*B_g*] : 엑서지흐름을 타사이클로 전달
 [*B_r*] : 엑서지흐름을 타사이클로부터 받음
 [C] : 내부적으로 엑서지흐름을 교환, 혼합 및 손실하는 구성기들(열교환기, 밸브, 파이프 등)
 [D] : 환경으로 엑서지흐름을 방출하는 구성기들(굴뚝, 응축기 등)
 [E] : 최종 산출물인 전력을 생산 및 소비하는 구성기들(터빈, 압축기, 펌프, 가열기 등)
 [F] : 최종산출물인 열을 생산하는 구성기들(폐열회수보일러, 열발전기, 열교환기 등)
 [*k*] : *k* 구성기기
CV : 검사체적
EX : 엑서지
IDC : 전체시스템 외적인 간접비용
in : 구성기기에서의 투입 상태
out : 구성기기에서의 방출 상태
Q : 열생산
W : 전력생산

1. 서 론

에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 생산하는 열병합발전 및 복합발전은 고효율 시스템이며 이들의 성능 평가, 도입 여부의 타당성 검사, 생산된 전력과 열의 단가계산 등은 주요 연구 대상

이다. 이 중에서 단가계산은 복합에너지시스템의 경제성 평가와 생산된 열과 전력의 합리적인 판매가 책정을 위해 특히 중요하다. 본 연구의 주된 목적은 복합에너지시스템에서 전력과 열의 생산단가를 열역학에 근거하여 구할 수 있는 합리적인 방법을 제시하는 것이다.

일반적으로 실제 가동중인 열병합발전은 전력과 온수 두 가지만을 생산하고 있다. 현재 우리나라에서는 전력과 온수의 생산단가를 “열생산으로 인하여 감소되는 전력량에 대한 연료비 수준을 보상하는 감소발전량보상방식”과 “열과 전력을 개별적으로 생산할 경우의 비용을 기준으로 하는 대체설비기준방식”에 의해 결정하고 있다. 그러나 전자의 방법은 열을 생산하지만 전력 감소가 전혀 없는 가스터빈-열병합발전 해석시 문제가 발생하며, 후자의 방법은 전력과 열은 하나의 단일 시스템에서 동시에 생산된 것이므로 그 단일 시스템을 직접 해석해야 한다는 논리에서 그 타당성이 부족하다고 여겨진다. 또한 위의 두 방법 모두 그 이론을 수식으로써 대표하는 것이 아니라 글로써 대표하는 것이므로 이론의 명확성이 부족하고 여겨진다.

따라서 어떠한 에너지 시스템일지라도 생산된 에너지의 생산단가를 계산해 낼 수 있고, 하나의 수식으로써 그 이론을 대표할 수 있는 학문이 필요하다. 이러한 것을 만족시킬 수 있는 방법 중의 하나가 엑서지경제학이라 볼 수 있다. 엑서지경제학에서 핵심인 엑서지는 어떤 상태에 있는 계가 상태변화를 하여 그것의 최종 상태가 주위(환경) 상태에 도달할 때까지 그 계로부터 얻을 수 있는 가용일 혹은 최대 유용일을 뜻한다. 그러므로 에너지를 엑서지로 환산한 경우 그 양뿐만 아니라 질도 동시에 고려할 수 있다. 엑서지경제학은 엑서지를 지배량으로 하여 생산된 에너지의 단가와 경제성을 평가하는 것이며, 이것에 의한 복합에너지시스템에 대한 평가는 전체 투자가격과 함께, 작동유체의 열에너지, 운동운동에너지, 위치에너지, 화학에너지 등의 에너지를 모두 엑서지로 환산하고, 이 환산된 엑서지를 바탕으로 이루어진다. 이와 관련된 대표적인 이론으로 SPECO(SPEcific COst)⁽¹⁻⁵⁾ 이론과 MOPSA(MODified Productive Structure Analysis)⁽⁶⁻⁹⁾ 이론 등등이 있다. 그러나 위의 이론들은 몇 가지 문제점을 가지고 있다고 판단되어지며 이를 개선하기 위해

기존의 이론들과는 다른 시각에서 엑서지경제학으로 접근하는 OECOPC(One Exergetic Cost per One Productive Cycle) 이론과 OECOPS(One Exergetic Cost per One Productive System) 이론 두 가지를 본 논문에서 발표하고자 한다.

2. 엑서지와 엑서지균형식

2.1 엑서지

기존의 에너지 시스템 해석 및 생산단가 계산에서 중요시되는 것은 에너지의 양적인 관계를 주로 다루는 열역학 제1법칙 관점에서 본 에너지이다. 그러나 열 등의 에너지는 양뿐만 아니라 질을 가지고 있다. 이러한 에너지의 양과 질을 동시에 고려하는 대표적인 것 중의 하나가 엑서지이다. 이것은 열역학 제1법칙과 제2법칙을 혼합한 관점에서 본 에너지이며, 엑서지경제학에서 가장 중요한 지배량이다. 일반적으로 에너지 시스템에서 작동유체의 운동에너지와 위치에너지는 다른 에너지에 비하여 극히 적은 양이므로 무시될 수 있으며, 이 경우 엑서지는 다음과 같다.

$$\dot{E}_X = \dot{N} \sum_i [\bar{h}_i - \bar{h}_{0,i} - T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_{0,i}) + \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_{0,i}] x_i \quad (1)$$

여기서 \dot{N} 는 총몰수, i 는 i 성분의 기체, 하첨자 0는 환경상태, x_i 는 i 성분의 몰비를 뜻한다.

2.2 엑서지균형식

엑서지균형식은 시스템을 엑서지경제학으로 평가할 때 중요한 지배방정식 중에 하나이다. 정상상태로 운전되는 어떤 에너지시스템에 대하여 운동에너지와 위치 에너지를 무시하고 식(1)로 주어진 엑서지를 구성기기마다 혹은 전시스템에 적용하면 다음과 같은 엑서지균형식을 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{CV} = \dot{E}_X^{HS} + \sum_{in} \dot{E}_{X,i} - \sum_{out} \dot{E}_{X,j} - \dot{W}_{Lost} \quad (2)$$

여기서 \dot{W}_{CV} 는 전력생산량, \dot{E}_X^{HS} 는 외부열원으로 부터 작동유체로 전달되는 엑서지흐름, $\dot{E}_{X,i}$ 는 구성기기로 투입되는 유체의 엑서지흐름, $\dot{E}_{X,j}$ 는 구

성기기에서 방출되는 유체의 엑서지흐름, 그리고 \dot{W}_{Lost} 는 소멸된 엑서지로써 손실일을 뜻한다. 식(2)는 $[k]$ 구성기기에 적용되며, 우변의 둘째항과 셋째항의 차는 $\dot{K}_{[k]}$ 이라는 간단한 기호로 표현할 수 있다. 이 값은 해석하고자 하는 시스템에서 작동유체의 엑서지흐름을 뜻하는 $\dot{K}_{[k]}^i$, 타 작동유체의 엑서지흐름을 뜻하는 $\dot{K}_{[k]}^j$, 그리고 열이 생산되는 유체의 엑서지흐름을 뜻하는 $\dot{K}_{[k]}^Q$ 로 나뉘어질 수 있으며 위의 기호들로써 식(2)를 다시 정리하면 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{W}_{[k]} = \dot{E}_{X,[k]}^{HS} + \dot{K}_{[k]}^j + \dot{K}_{[k]}^i + \dot{K}_{[k]}^Q - \dot{W}_{[k]}^{Lost} \quad (3)$$

3. OECOPC와 OECOPS 엑서지경제학

3.1 기존 엑서지경제학에 의한 비용산정

엑서지경제학의 대표적인 이론에는 SPECO⁽¹⁻⁵⁾ 방법과 MOPSA⁽⁶⁻⁹⁾ 방법이 있다.

식(4)는 SPECO 방법에서 제안하는 엑서지비용균형식이다.

$$\sum_{in} \dot{E}_{X,i}^T C_{EX,i}^T + \sum_{in} \dot{E}_{X,i}^M C_{EX,i}^M + \sum_{in} \dot{E}_{X,i}^{CHE} C_{EX,i}^{CHE} + \dot{Z} = \sum_{out} \dot{E}_{X,j}^T C_{EX,j}^T + \sum_{out} \dot{E}_{X,j}^M C_{EX,j}^M + \sum_{out} \dot{E}_{X,j}^{CHE} C_{EX,j}^{CHE} + \dot{W}_{CW} \quad (4)$$

위 식은 각 구성기기에 대하여 투입비용흐름과 산출비용흐름은 서로 같다는 가정 하에 만들어졌다. 엑서지는 열적엑서지(\dot{E}_X^T), 기계적엑서지(\dot{E}_X^M), 그리고 화학적엑서지(\dot{E}_X^{CHE})의 합이며, 구성기기를 입출하는 각 상태마다 각 엑서지단가($C_{EX}^T, C_{EX}^M, C_{EX}^{CHE}$)를 곱하여 그 상태에서의 엑서지흐름을 비용흐름화하였다. 그리고 우변의 산출비용흐름에서 각 엑서지단가는 모두 미지수이며 식(4)에 의해서 이 중 하나만을 구할 수 있고, 그 이외의 나머지 단가들은 SPECO 방법에서 정의한 추가적인 수식에 의해서 구한다.

SPECO 방법은 주위로 방출되는 배기가스 및 냉각수가 가지고 있는 엑서지비용흐름의 소멸을

전혀 고려하지 않았기 때문에 가장 간단한 전력만을 생산하는 시스템에서조차 전체 투입과 산출 비용흐름이 같아야 한다는 전체 비용흐름의 균형을 만족시키지 못하며, 또한 각 구성기기에서 방출상태마다 미지수가 3개씩 존재하므로 미지수의 개수가 너무 많다는 단점이 있다.

식(5)는 MPOSA 방법에서 제안하는 엑서지비용균형식이다.

$$\begin{aligned} \dot{W}C_w = & \dot{E}_X^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \dot{Z} \\ & + \left(\sum_m \dot{E}_{X,i}^T - \sum_{out} \dot{E}_{X,i}^T \right) C_{EX,k}^T \\ & + T_0 \left(\sum_m \dot{S}_i - \sum_{out} \dot{S}_j \right) C_S \\ & + \left(\sum_m \dot{E}_{X,i}^M - \sum_{out} \dot{E}_{X,i}^M \right) C_{EX,k}^M \\ & + \left(\dot{E}_{X,in}^{BQ} - \dot{E}_{X,out}^{BQ} \right) C_{EX}^{BQ} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식은 엑서지를 열적엑서지와 기계적엑서지로 분해한 후 식(2)로 주어진 엑서지균형식의 각 항에 엑서지단가를 곱하여 만들어졌으며, 각 구성기기에 적용할 수 있다. 또한 해석하고자 하는 구성기기에서 투입되는 엑서지흐름과 방출되는 엑서지흐름의 차에 엑서지단가를 곱하여 비용흐름화 하였으므로 하나의 구성기기마다 열적엑서지, 그리고 기계적엑서지의 단가가 변수로 존재한다. 여기서 각 구성기기마다 단가 하나는 식(5)에 의해서 구할 수 있고, 그 이외의 나머지 단가들은 MOPSA 방법에서 정의한 추가적인 수식에 의해서 구할 수 있다.

MOPSA 방법은 주위로 방출되는 배기가스 및 냉각수가 가지고 있는 비용흐름의 소멸을 손실일 (\dot{W}_{Lost})에 그 단가(C_S)를 곱하여 고려하였다. 이 방법은 어떠한 에너지 시스템에 대해서도 전체 투입과 전체 산출 비용흐름이 같다는 결과가 유도된다는 장점을 가지고 있으나 \dot{W}_{Lost} 과 C_S 의 관계를 명확하게 설명하지 못한다는 단점도 가지고 있다. 또한 SPECO, MOPSA 방법들 모두 엑서지를 온도만의 함수인 열적엑서지, 압력만의 함수인 기계적엑서지 등으로 나누어 취급하고 있다. 이러한 개념은 단일생산물인 열만 혹은 여러 종류의 열들만 생산하는 보일러 시스템 등의 경우에 기계적엑서지 단가를 적용할 수가 없으며, 이 개념을 엔탈피에 그대로 적용하면 엔탈피 역시 열

적엔탈피와 기계적엔탈피 등으로 나누어 해석 가능하다. 뜻이나 엔탈피를 엔탈피 자체로 해석하듯이 엑서지 또한 엑서지 그 자체로 해석하는 것이 더 타당하다고 판단된다.

식(4), 식(5), 그리고 본 연구에서 사용되어지는 각 구성기기의 직접비용흐름($\dot{Z}_{[k]}$: 초기투자비용 및 유지보수비용 등) 및 전체 시스템에 대한 간접비용흐름(\dot{Z}_{DC} : 설계비, 인건비, 관리비 등)을 구하기 위한 경제학적 방법에는 여러 가지 방법이 존재하며, 직접비용흐름에 대한 이해를 돕기 위해 간단한 한 가지 방법을 소개한다.

이자율 i , 회수기간 n 년의 현재계수(Present Worth Factor)는 식(6a)와 같이, 자본회수계수(Capital Recovery Factor)는 식(6b)와 같이 쓸 수 있다. 위 두 계수를 이용하여 구입가격이 $C_{[k]}^{initial}$, 회수가격이 $C_{[k]}^{final}$ 일 때 $[k]$ 구성기기에 대한 연간등가비용은 식(6c)와 같이 쓸 수 있으며, 유지보수계수 $\phi_{[k]}$ 와 연간작동시간 $\delta_{[k]}$ 을 고려하여 식(6d)처럼 $[k]$ 구성기기에 대한 단위시간당 직접비용흐름을 구할 수 있다.

$$PWF(i, n) = (1 + i)^{-n} \quad (6a)$$

$$CRF(i, n) = i / [1 - (1 + i)^{-n}] \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{[k]}[\$/yr] = & \{ C_{[k]}^{initial} - C_{[k]}^{final} \cdot PWF(i, n) \} \\ & \cdot CRF(i, n) \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\dot{Z}_{[k]}[\$/hr] = \dot{A}_{[k]} \cdot \phi_{[k]} / \delta_{[k]} \quad (6d)$$

3.2 OECOPC 방법에 의한 비용산정

앞 절에서 살펴본 기존의 SPECO 방법 및 MOPSA 방법의 문제점과 단점을 개선하여 보다 합리적인 에너지비용산정과 보다 간편한 계산을 위하여 OECOPC(One Exergetic Cost per One Productive Cycle) 방법과 OECOPS(One Exergetic Cost per One Productive System) 방법 두 가지를 제안하며 Fig. 1과 같은 복합발전시스템을 예로 들어 설명하고자 한다.

Fig. 1의 전체 시스템에서 가스작동유체는 가스 터빈에서 전력을 생산한 후, [20] 기기에서 증기를 생산하는 흐름과 [30] 기기에서 증기터빈시스템의 열원이 되는 흐름으로 나뉘어진다. 즉, 가스

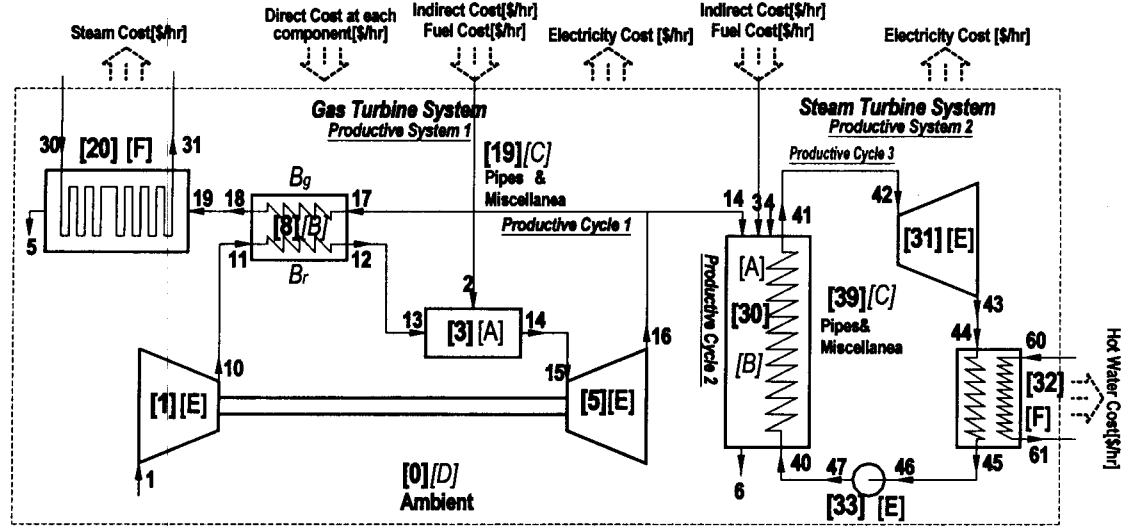


Fig. 1 A combined power plant for explaining the OECOPC and OECOPS methods.

작동유체는 두 종류의 생산적인 흐름으로 나누어 볼 수 있으며 전자의 흐름을 생산적 사이클1(Productive Cycle1, PC1), 후자의 흐름을 생산적 사이클2(Productive Cycle2, PC2)라 부르기로 하자. 증기작동유체는 하나의 흐름이 전력과 온수를 동시에 생산하므로 흐름이 한 개만 존재하며 이 흐름을 생산적 사이클3(Productive Cycle3, PC3)라 부르기로 한다. 이와 같이 각 시스템마다 일반적으로 N 개의 생산적 사이클이 존재하며 여러 사이클 중 해석하고자 하는 사이클을 i 번째 생산적 사이클(PC_i)이라 부르기로 하자.

Fig. 1에서 전체 시스템을 기준으로 외부열원(화석에너지, 자연에너지, 열에너지 등)으로부터 엑서지흐름을 받는 구성기기는 [3]과 [30]이며 각각 [A]라 부르기로 하자. 타 사이클로부터 엑서지흐름을 받는 구성기기는 [8]과 [30]이며 [B]라 부르기로 하자. 이 구성기에서 엑서지흐름을 타 사이클로 전달해 주는 작동유체를 [B_g], 그리고 타 사이클로부터 전달받는 작동유체를 [B_r]라 부르기로 한다. 시스템 내부적으로 엑서지를 교환, 혼합 및 손실하는 구성기기는 [8,19]과 [39]이며 각각 [C], 환경으로 엑서지흐름을 방출하는 구성기기는 가스터빈시스템에서 환경이라는 가상적인 구성기이며 [D], 최종 생산물인 전력을 생산하는 구성기기는 [1,5]와 [11,33]이며 각각 [E],

최종 생산물인 열을 생산하는 구성기기는 [20]과 [32]이며 각각 [F]라 부르기로 하자. 즉, Fig. 1은 두 개의 시스템으로 이루어져 있으며 각 시스템의 작동유체들은 [A, B, C, D, E, F] 구성기기를 순환하면서 가스작동유체는 두 개의 생산적 사이클로 증기작동유체는 한 개의 생산적 사이클로 나뉘어진다.

i 번째 생산적 사이클 해석시 엑서지흐름을 외부로부터 받는 [A, B] 구성기기를, 내부적으로 교환 혼합 및 손실하는 [C] 구성기기를, 그리고 주위로 방출시키는 [D] 구성기기에 식(3)을 각각 적용시켜 수식을 구한 다음 모두 합하면 엑서지균형식을 식(7)과 같이, 전력을 생산 및 소비하는 [E] 구성기기에 식(3)을 적용시키면 엑서지균형식을 식(8)과 같이, 그리고 열을 생산하는 [F] 구성기기에 식(3)을 적용시키면 엑서지균형식을 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$0 = \dot{E}_{X,[A]}^{HS,PC_i} + \dot{K}_{[B_r]}^{PC_j} + \dot{K}_{[A,B_r,C,D]}^{PC_i} - \dot{W}_{[A,B,C,D]}^{Lost,PC_i,PC_j} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{[E]}^{PC_i} = \dot{K}_{[E]}^{PC_i} - \dot{W}_{[E]}^{Lost,PC_i} \quad (8)$$

$$0 = \dot{K}_{[F]}^{PC_i} + \dot{K}_{[F]}^{Q,PC_i} - \dot{W}_{[F]}^{Lost,PC_i} \quad (9)$$

식(7)에서 \dot{K} 기호는 구성기기에 투입되는 엑서

지흐름들 $\dot{E}_{X,in}$ 과 방출되는 엑서지흐름들 $\dot{E}_{X,out}$ 과의 차를 뜻한다. $\dot{E}_{X,[A]}^{HS,PCi}$ 는 [A] 구성기기에서 전체 시스템의 외부로부터 공급받는 열원의 엑서지흐름을, $\dot{K}_{[B_r]}^{PCj}$ 는 [B] 구성기기에서 j 번째 생산적 사이클에서 해석대상인 i 번째 생산적 사이클로 전달되는 엑서지흐름을, $\dot{W}_{[E]}^{PCi}$ 는 전력생산량을, 그리고 $\dot{K}_{[F]}^{Q,PCi}$ 는 열이 생산되는 유체에서의 엑서지생산량을 뜻한다.

시스템 내부를 순환하는 i 번째 생산적사이클에 식(3)의 엑서지균형식을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{[E]}^{PCi} = & \dot{E}_{X,[A]}^{HS,PCi} + \dot{K}_{[B_r]}^{PCj} + \dot{K}_{[F]}^{PCi} \\ & - \dot{W}_{[A,B,C,D,E,F]}^{Lost,PCi,PCj} \end{aligned} \quad (10)$$

위 식은 i 번째 생산적 사이클 전체에 검사체적을 적용하였고, 또한 정상상태의 시스템이므로 검사체적을 기준으로 내부 엑서지흐름의 총 합인 $\dot{K}_{[A,B_r,C,D,B_r,E,F]}^{PCi}$ 항은 당연히 0이 된다. 이러한 원리로부터 식(7)의 $\dot{K}_{[A,B_r,C,D]}^{PCi}$ 항을 $-\dot{K}_{[B_r,E,F]}^{PCi}$ 항으로 바꿀 수 있으며 본 연구에서 제안한 수식을 적용할 때 [A, B_r, C, D] 구성기기들의 입출구에서의 상태값(질량유량, 온도, 압력)을 측정 혹은 계산할 필요가 없어 그 수식의 적용을 상당히 간편화할 수 있다. 따라서 식(7)을 다시 정리하면 식(11)과 같다. 최종 생산물인 전력량과 열엑서지량은 하나의 시스템에서 식(8)과 식(9)처럼 부분생산량이 아니라 총생산량이어야 하므로 식(12)와 식(13)처럼 총생산량에 대한 엑서지균형식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 = & \dot{E}_{X,[A]}^{HS,PCi} + \dot{K}_{[B_r]}^{PCj} - \dot{K}_{[B_r,E,F]}^{PCi} \\ & - \dot{W}_{[A,B,C,D]}^{Lost,PCi,PCj} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{W}_{[E]} = \sum_{PCk=1} \dot{K}_{[E]}^{PCk} - \dot{W}_{[E]}^{Lost} \quad (12)$$

$$0 = \sum_{PCk=1} \dot{K}_{[F]}^{PCk} + \dot{K}_{[F]}^Q - \dot{W}_{[F]}^{Lost} \quad (13)$$

전력·열 등과 같은 생산물들은 시스템의 개별적인 구성기기로부터 얻어지는 것이 아니라 구성

기기들로 구성된 하나의 생산적 사이클로부터 얻어진다고 볼 수 있다. 그리고 에너지를 양의 관점으로 해석하는 열역학 제 1 법칙적 입장에서 본다면 작동유체의 엔탈피단가는 모든 상태에서 같듯이 에너지를 양과 질의 관점으로 해석하는 입장에서 본다면 작동유체의 엑서지단가 또한 모든 상태에서 같다고 볼 수 있다. 따라서 하나의 생산적사이클마다 하나의 엑서지 단가를 적용할 수 있다. 이것이 바로 OECOPC 방법의 기본개념이다. 이러한 원리로서 i 번째 생산적 사이클의 엑서지에 i 번째 엑서지단가(C_{EX}^{PCi})를 적용할 수 있고 j 번째 생산적 사이클의 엑서지에 j 번째 엑서지단가(C_{EX}^{PCj})를 적용할 수 있다.

i 번째 생산적사이클(PCi)을 해석하는 식(11)의 엑서지균형식에 위에서 설명한 엑서지단가를 적용하면 식(14)의 비용균형식을 만들 수 있고 이 식을 이용하여 i 번째 생산적 사이클의 엑서지단가(C_{EX}^{PCi})를 구할 수 있다. 식(14)를 내부비용균형식이라 부르기로 한다.

$$\begin{aligned} 0 = & \alpha_{[A]}^{PCi} (\dot{Q}_{[A]}^{HS} C_Q^{HS} + \beta \dot{Z}_{DC} + \dot{Z}_{[A]}) \\ & + \dot{K}_{[B_r]}^{PCj} C_{EX}^{PCj} + \dot{Z}_{[B,C,D]}^{PCi} \\ & - \dot{K}_{[B_r,E,F]}^{PCi} C_{EX}^{PCi} \end{aligned} \quad (14)$$

복합에너지시스템은 한 개 이상의 시스템을 가지고 있고, 각 시스템마다 한 개 이상의 생산적 사이클을 가지고 있다. 식(14)에서 [A, B, C, D, E, F]는 하나의 시스템을 이루는 각 구성기기들을 뜻하며 PCi는 그 시스템에서 i 번째 생산적사이클을 뜻한다. 괄호 안의 각 항은 i 번째 생산적 사이클을 포함하고 있는 그 시스템으로 투입되는 비용흐름을 뜻하며, 그 시스템의 [A] 구성기기에서 산출된 총엑서지량 대 i 번째 생산적사이클에서 산출된 엑서지량의 비($\dot{K}_{[A]}^{PCi} / \dot{K}_{[A]}$)로 정의된 $\alpha_{[A]}^{PCi}$ 를 곱하여 i 번째 생산적 사이클로 투입되는 비용흐름을 계산할 수 있다. 생산적사이클이 한 개 존재하는 단순한 시스템의 경우 α 는 1이다. $\dot{Q}_{[A]}^{HS} C_Q^{HS}$ 항은 시스템 외부로부터 [A] 구성기기에 투입된 열원비용흐름이며, $\dot{Q}_{[A]}^{HS}$ 는 열원의 열

역학 1법칙적 투입 에너지흐름을, C_Q^{HS} 는 열역학 1법칙적 구입단가를 뜻한다. 이 항은 식(11)에서 열원의 투입 엑서지흐름에 그 엑서지단가를 곱한 $\dot{E}_{X,[A]}^{HS} C_{EX}^{HS}$ 과 같다. \dot{Z}_{DC} 항은 전체 시스템의 외적인 총간접비용흐름(설계비, 인건비, 건설비, 유지비 등)으로써 외부열원의 흐름과 같이 [A] 구성기에 투입된다고 적용하였으며, 외부의 총열원투입 대 그 시스템으로 투입되는 외부열원투입의 비($\dot{Q}_{[A]}^{HS}/\dot{Q}_{[all A]}^{HS}$)로 정의된 β 를 곱하여 그 시스템으로 투입되는 간접비용흐름을 계산할 수 있다. 전체 시스템에서 대부분 열원은 한 곳에 투입되므로 이 경우 β 는 1이다. $\dot{Z}_{[A]}$ 항은 [A] 구성기기의 직접비용흐름(초기구입비, 유지보수비 등)이다. $\dot{K}_{[B,j]}^{PCj} C_{EX}^{PCj}$ 항은 j 번째 생산적사이클이 해석대상인 i 번째 생산적사이클로 투입하는 비용흐름을 뜻한다. $\dot{Z}_{[B,C,D]}^{PCi}$ 항은 [B, C, D] 구성기기들의 직접비용흐름이다. 어떤 구성기에 생산적사이클이 두 개 이상 흐를 경우 그 직접비용흐름은 α 정의처럼 엑서지를 전달받은 비로 나누어진다. $-\dot{K}_{[B,,E,F]}^{PCi} C_{EX}^{PCi}$ 항은 해석대상인 PCi의 내부적 비용흐름의 합이며 식(7)과 식(11)의 관계처럼 $+\dot{K}_{[A,B,,C,D]}^{PCi} C_{EX}^{PCi}$ 과 같다. 식(14)에서 손실일의 총합은 그 값을 가지고 있으나 손실된다는 입장에서 그 단가는 0이며 작동유체의 엑서지단가(C_{EX}^{PCi})를 상승시키는 역할을 한다.

전체 시스템에서 생산적사이클은 N 개 존재하며, 식(14)를 각 생산적사이클마다 적용하여 N 개의 생산적사이클에 대한 엑서지단가($C_{EX}^{PC1}, C_{EX}^{PC2}, \dots, C_{EX}^{PCn}$)를 각각 구할 수 있다.

최종적인 생산물은 앞서도 언급했듯이 하나의 시스템으로 해석해야 하며 식(12)의 엑서지균형식을 식(15)의 전력생산비용균형식으로 만들어 전력생산단가를 구할 수 있고, 식(13)의 엑서지균형식을 식(16)의 열생산비용균형식으로 만들어 열생산단가를 구할 수 있다. 특수한 경우 하나의 시스템에서 서로 다른 M 종류의 열이 생산되어질 수 있으며, 이 경우 식(16)을 M 번 적용시켜 M 개의 열생산단가를 각각 구한다. 아래의 두 수식을 생산비용균형식이라 부르기로 한다.

$$\dot{W}_{[E]} C_W = \sum_{PCk=1}^n \dot{K}_{[E]}^{PCk} C_{EX}^{PCk} + \dot{Z}_{[E]} \quad (15)$$

$$0 = \sum_{PCk=1}^n \dot{K}_{[F]}^{PCk} C_{EX}^{PCk} + \dot{Z}_{[F]} + \dot{Q}_{[F]} C_Q \quad (16)$$

$\dot{W}_{[E]} C_W$ 항과 $\dot{Q}_{[F]} C_Q$ 항은 최종적으로 산출된 전력 및 열생산비용흐름으로써 $\dot{W}_{[E]}$ 는 전력의 생산 및 소비량의 총합을 C_W 는 전력생산단가를, 그리고 $\dot{Q}_{[F]}$ 는 열역학 1법칙적인 열생산량을 C_Q 는 열생산단가를 뜻한다. 여기서 $\dot{Q}_{[F]} C_Q$ 값은 식(13)의 열엑서지생산흐름에 그 엑서지단가를 곱한 값($\dot{K}_{[F]}^Q C_{EX}^Q$)과 같고, 열 또는 에너지는 열역학 1법칙적인 열단가(C_Q)로 판매 혹은 구입되어지므로 식(16)은 그 열생산단가를 바로 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 식(14)와 같이 식(15)와 식(16)에서의 손실일의 단가는 0이며 각각 전력생산단가와 열생산단가를 상승시키는 역할을 한다.

식(14-16)의 적용에 있어 한 가지 유의할 것은 구성기기를 입출하는 엑서지흐름인 \dot{K} , 그리고 엔탈피흐름으로 계산되는 \dot{W} 과 \dot{Q} 은 입력상태일 경우 양수, 출력상태일 경우 음수라는 것이다.

어떠한 비용균형식이라 할지라도 전체 투입비용흐름과 전체 생산비용흐름은 같아야 한다는 식(17)의 전체 비용흐름의 균형을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \sum \dot{W}_{[E]} C_W &= \sum \dot{Q}_{[A]}^{HS} C_Q^{HS} + \dot{Z}_{DC} \\ &+ \sum \dot{Z}_{[A,B,C,D,E,F]} \\ &+ \sum \dot{Q}_{[F]} C_Q \end{aligned} \quad (17)$$

그러므로 OECOPC 수식 또한 위 식을 만족하는 결과가 유도되어야 한다. 식(14)를 각 생산적사이클마다 적용하여 수식을 구하고 식(15)와 식(16)을 각각의 시스템마다 적용하여 그 수식을 구하여 모두 더하면 내부작동유체의 비용흐름은 0이 되어 식(17)의 수식이 유도되므로 본 방법의 수식들은 전체 비용균형을 항상 만족시킨다.

식(4)의 SPECO 방법, 식(5)의 MOPSA 방법과 비교하여 본 이론의 수식인 식(14-16)의 OECOPC 방법의 핵심적 특징은 다음과 같다. 첫째, 엑서지는 분리되지 않고 엑서지 자체(\dot{E}_X)로 해석되어

지며 하나의 생산적 사이클마다 하나의 엑서지 단가를 적용하여 각 상태에서의 엑서지흐름을 비용흐름화하였다. 둘째, 어떠한 에너지 시스템일지라도 식(14)의 내부비용균형식으로부터 내부엑서지단가를 구할 수 있고 식(15-16)의 생산비용균형식으로부터 생산물의 생산단가를 구할 수 있다. 즉, 기본이 되는 수식은 두 개이며 그 이외의 추가적인 수식은 없다. 셋째, 최종 에너지를 생산하는 구성기기, 그리고 다른 생산적 사이클의 열원이 되는 구성기기의 입출구에서 그 상태값들만이 필요할 뿐 그 이외의 상태값들은 측정 혹은 계산되어질 필요가 없다.

3.3 OECOPS 방법에 의한 비용산정

SPECO 방법은 하나의 상태마다, MOPSA 방법은 하나의 구성기기마다, 그리고 OECOPC 방법은 하나의 생산적사이클마다 하나의 엑서지 단가를 고려하였다. 이와 같은 원리를 확장하여 본 연구에서 두번째 방법으로 하나의 생산적시스템마다 하나의 엑서지단가를 고려하는 OECOPS(One Exergetic Cost per One Productive System) 방법을 살펴보자.

예로 든 Fig. 1은 가스터빈시스템과 스팀터빈시스템으로 나눌 수 있으며 각각 전력 혹은 열을 생산한다. 그러므로 전자를 생산적시스템1(Productive System1, PS1), 그리고 후자를 생산적시스템2(Productive System2, PS2)라 부르기로 하자. 일반적으로 전체 시스템에서 생산적시스템은 M 개가 존재하며, 여러 시스템 중 해석하고자 하는 그 시스템을 PS_i 라 부르기로 한다.

기본개념은 3.2절의 OECOPC 방법에서 생산적사이클을 생산적시스템으로 대치한 것이다. 관련 수식은 식(14-16)에서 기호 PC_i , PC_j 가 기호 PS_i , PS_j 로 바뀐 것이며, OECOPS 방법의 내부비용균형식과 생산비용균형식은 다음과 같다.

$$0 = \dot{Q}_{[A]}^{HS} C_Q^{HS} + \beta \dot{Z}_{DC} + \dot{Z}_{[A]} + \dot{K}_{[B_i]}^{PS_i} C_{EX}^{PS_i} + \dot{Z}_{[B, C, D]} - \dot{K}_{[B, E, F]} C_{EX}^{PS_i} \quad (18)$$

$$\dot{W}_{[E]} C_W = \dot{K}_{[E]}^{PS_i} C_{EX}^{PS_i} + \dot{Z}_{[E]} \quad (19)$$

$$0 = \dot{K}_{[F]}^{PS_i} C_{EX}^{PS_i} + \dot{Q}_{[F]} C_Q + \dot{Z}_{[F]} \quad (20)$$

위 수식을 각각의 생산적 시스템에 적용한 후 그 수식들을 모두 더하면 시스템 내부의 각 비용흐름들은 서로 소거되어 식(17)의 전체 비용균형식이 유도됨을 확인할 수 있다.

실제 가동중에 있는 많은 시스템들은 하나의 생산적시스템에 하나의 생산적사이클만이 존재하는데, 이 경우 OECOPC 방법과 OECOPS 방법은 서로 같은 수식을 갖는다.

일반적으로 하나의 전체 시스템은 하나 이상의 생산적시스템들로 구성되며, 그 각각의 생산적시스템은 하나 이상의 생산적사이클들로 작동하고, 그 각각의 생산적사이클은 하나 이상의 구성기기로 구성되며, 그 각각의 구성기기들은 하나 이상의 입출구 상태를 갖고 있다. 비용흐름균형식을 전체 시스템에 대하여 유도한다면 감소발전량 보상방식 혹은 대체설비기준방식이, 생산적시스템들에 대하여 유도한다면 OECOPS 방법이, 생산적사이클들에 대하여 유도한다면 OECOPC 방법이, 구성기기들에 대하여 유도한다면 MOPSA 방법이, 구성기기들의 입출구 상태에 대하여 유도한다면 SPECO 방법이 각각 된다. 이 방법들 중 OECOPC와 OECOPS 방법은 비용산정에서 내부비용균형식과 생산비용균형식만이 적용될 뿐 기타의 가정이나 추가적인 수식이 전혀 없으므로 수식의 명확성이나 범용성에서 큰 장점을 가지고 있다고 판단된다.

4. OECOPC와 OECOPS 방법의 적용 예

이제 OECOPC 방법과 OECOPS 방법의 적용 예를 살펴보자. Fig. 2는 가스터빈에서 전력을, 그리고 폐열회수보일러에서 증기를 생산하는 32MW급 열병합발전시스템으로써 전력생산단가와 증기생산단가를 각각 결정하는 문제이다. 본 계산에 사용된 가스 물성치는 JANAF⁽¹⁰⁾ 테이블에 나와 있는 보간다항식을 이용하였고, 증기 및 물의 물성치는 IFC⁽¹¹⁾에 나와 있는 수치적 계산을 이용하였다. 이론의 적용에 앞서 먼저 주어져야 되는 조건은 다음과 같다.

(1) Table 1에서처럼 각 입출구 상태에서의 질량유량, 온도, 그리고 압력.

(2) 엑서지해석에 기준이 되는 대기의 온도(25°C), 압력(1 atm), 그리고 물성분비(N₂: 77.2%, O₂: 20.7%, Ar: 0.9%, H₂O: 1.2%).

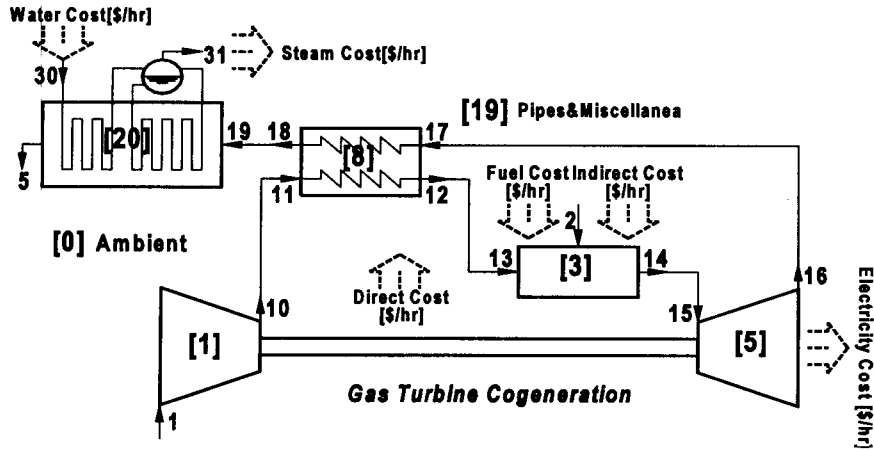


Fig. 2 Gas-Turbine Cogeneration.

(3) 식(5)의 각 구성기기비용흐름($\dot{Z}_{[k]}$)을 계산하기 위한 값으로써 Table 2에서의 초기구입비용($C_{[k]}^{initial}$), 유지보수계수($\phi_{[k]} \approx 1.06$), 그리고 연간작동시간($\delta_{[k]} \approx 8000 \text{ hr/yr}$).

(4) Table 2의 [0] 구성기기에서 시스템 외적인 간접비용흐름($\dot{Z}_{IDC} = 277.15 \text{ \$/hr}$).

(5) 연료의 종류(LNG), 고위발열량($HHV = 54.723 \text{ MJ/kg}$), 그리고 연료구입단가($C_Q^{HHV} = 4.00 \text{ \$/GJ}$).

Table 1에 주어진 조건으로부터 각 입출구 상태에서의 엔탈피흐름과 엑서지흐름이 계산되었다. 엔탈피흐름을 해석한 결과 전력생산량($\dot{W}_{[1,5]}$)은

32.432 MW, 열생산량($\dot{Q}_{[20]}$)은 37.666 MJ/s, 그리고 전체효율은 72.58%인 열병합발전시스템임을 알 수 있다. Table 2에 각 구성기기마다 엑서지균형식, 즉 식(3)을 적용한 결과가 나타나 있으며 식(6)으로부터 구성기기 비용흐름($\dot{Z}_{[k]}$)이 계산되어 있다. 각각의 구성기기뿐만 아니라 시스템 전체에 대해서도 엑서지흐름의 균형이 잘 만족되며, 가스작동유체의 엑서지흐름의 총합은 앞에서 언급한 것과 같이 0이 됨을 확인할 수 있었다.

이제 Fig. 2의 열병합시스템에 본 방법들을 적용하여 해석해 보자. 이 시스템은 OECOPC 입장에서 하나의 생산적사이클만이 존재하고 OECOPS

Table 1 Mass flow rate, pressure, temperature, enthalpy flow rate, and exergy flow rate at inlet and exit states

State	\dot{m} [kg/s]	P [MPa]	T [°C]	$\dot{H} - \dot{H}_0$ [MW]	\dot{E}_X [MW]
1	95.919	0.1013	25.00	0.000	0.000
10	95.919	1.0264	348.68	32.223	29.645
11	95.919	1.0254	348.68	32.223	29.636
12	95.919	0.9748	576.85	56.239	43.437
13	95.919	0.9738	576.85	56.239	43.428
2	1.765	1.2159	300.00	1.255	0.987
14,15	97.684	0.9261	1252.88	140.543	105.249
16	97.684	0.1115	718.01	75.888	38.052
17	97.684	0.1105	718.01	75.888	37.974
18	97.684	0.1084	505.77	51.382	21.597
19	97.684	0.1074	505.77	51.382	21.517
5	97.684	0.1023	150.53	12.947	2.232
30	14.000	2.0265	25.10	0.031	0.027
31	14.000	2.0265	212(sat)	37.697	12.799

Table 2 Exergy balance equation, initial investment cost ($C_{[k]}^{initial}$), and capital cost flow rate at each component ($\dot{Z}_{[k]}$)

Component	$\dot{W}_{[k]} =$	Exergy balance [MW]			$- \dot{W}_{[k]}^{Lost}$	$C_{[k]}^{initial}$ [10 ⁶ \$]	$\dot{Z}_{[k]}$ [\$/hr]
		$E_{X,[k]}^{LNG}$	$+ \dot{K}_{[k]}^{GT}$	$+ \dot{K}_{[k]}^Q$			
[1]	-32.22=		-29.65		-2.58	3.47	59.00
[3]	0.00=	89.13	-60.83		-28.30	0.21	3.57
[5]	64.65=		67.20		-2.54	2.75	46.76
[8]	0.00=		2.58		-2.58	0.72	12.24
[19]	0.00=		0.18		-0.18	0.02	0.34
[20]	0.00=		19.29	-12.77	-6.51	1.00	17.00
[0]	0.00=		1.25		-1.25		277.15
Sum	32.43=	89.13	+0.00	-12.77	-43.93		416.06

입장에서 하나의 생산적시스템만이 존재한다. 그러므로 두 방법의 적용수식은 서로 같고 최종 결과인 생산단가 또한 서로 같게 된다. 따라서 식(14) 또는 식(18)을 적용하면 식(21)과 같은 수식을 얻을 수 있고, 이 수식으로 생산적사이클 혹은 생산적시스템에 대한 엑서지단가를 계산할 수 있다. 식(15) 또는 식(19)를 적용하면 식(22)와 같은 수식을 얻을 수 있고 이 수식으로 전력생산단가를 구할 수 있다. 식(16) 또는 식(20)을 적용하면 식(23)과 같은 수식을 얻을 수 있고, 이 수식으로 증기생산단가를 구할 수 있다.

$$0 = \dot{Q}_{[3]}^{HHV} C_Q^{HHV} + \dot{Z}_{DC} + \dot{Z}_{[3,8,19]} - \dot{K}_{[1,5,20]}^{GT} C_{EX}^{GT} \quad (21)$$

$$\dot{W}_{[1,5]} C_W = \dot{K}_{[1,5]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[1,5]} \quad (22)$$

$$0 = \dot{K}_{[20]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[20]} + \dot{Q}_{[20]} C_Q \quad (23)$$

위 식에서 $\dot{K}_{[1]}^{GT}$ 는 $\dot{E}_{X,1} - \dot{E}_{X,10}$ 를, $\dot{K}_{[5]}^{GT}$ 는 $\dot{E}_{X,15} - \dot{E}_{X,16}$ 를, $\dot{K}_{[20]}^{GT}$ 는 $\dot{E}_{X,19} - \dot{E}_{X,5}$ 를, $\dot{W}_{[1]}$ 는 $\dot{H}_1 - \dot{H}_{10}$ 를, $\dot{W}_{[5]}$ 는 $\dot{H}_{15} - \dot{H}_{16}$, 그리고 $\dot{Q}_{[20]}$ 는 $\dot{H}_{30} - \dot{H}_{31}$ 를 뜻한다. 여기에서 상태값 11번,

12번, 13번, 2번, 14번, 17번, 그리고 18번은 본 계산에서 전혀 사용되지 않았음을 볼 수 있다. SPECO 방법 및 MOPSA 방법은 모든 곳에서의 상태값을 필요로 하므로 복잡한 시스템일수록 본 이론이 매우 편리한 수식임을 알 수 있다. 또한 위의 열병합발전시스템을 SPECO 방법으로 수식을 유도하면 각 출구상태마다 3개의 미지수가 존재하므로 33개의 수식이 필요하고, MOPSA 방법으로 수식을 유도하면 각 구성기기 수마다 1개의 미지수가 존재하고 3개의 미지수가 추가로 필요로 되므로 8개의 수식이 필요하다. 따라서 3개의 수식이 필요로 되는 본 방법이 가장 간단함을 알 수 있다.

식(24)는 해석결과를 확인하는 전체 비용균형 식으로써 좌변은 전력생산비용흐름을, 우변의 첫째항은 열원투입비용흐름을, 둘째항은 간접비용흐름을, 셋째항은 직접비용흐름을, 그리고 넷째항은 증기생산비용흐름을 뜻한다. 또한 식(21-23)을 모두 합하면 식(24)가 됨을 확인할 수 있다.

$$\dot{W}_{[1,5]} C_W = \dot{Q}_{[3]}^{HHV} C_Q^{HHV} + \dot{Z}_{DC} + \sum_{k=1}^{20} \dot{Z}_{[k]} + \dot{Q}_{[20]} C_Q \quad (24)$$

Table 3 The cost-balance equations and the unit costs

Equation [\$/hr]	$\dot{W}_{[1,5]} C_W =$	$\dot{Q}_{[3]}^{HHV} C_Q^{HHV}$	$+ \dot{K}_{[k]}^{GT} C_{EX}^{GT}$	$+ \dot{Q}_{[20]} C_Q$	$+ \dot{Z}_{[k]}$
Unit cost [\$/GJ]	10.436=	4.000	8.218	4.340	
Eq. 21)	0=	+1390.84	-1684.14		+293.30
Eq. 22)	+1218.47=		+1111.71		+105.76
Eq. 23)	0=		+571.43	-588.43	+17.00
Eq. 24)	+1218.47=	+1390.84	0.00	-588.43	+416.06

Table 3에 식(21-24)에 의한 비용흐름들이 계산되어 있다. 주어진 조건에 의해 연료투입비용흐름($\dot{Q}_{13}^{HHV} C_Q^{HHV}$)은 1390.84 \$/hr, 간접비용흐름(\dot{Z}_{DC})은 277.15 \$/hr, 그리고 직접비용흐름의 총합($\sum \dot{Z}_{[k]}$)은 138.91 \$/hr이다. 따라서 전체 투입비용흐름은 1806.90 \$/hr이다. 식(21-23)을 적용한 결과 전력생산단가(C_W)는 10.436 \$/GJ, 그리고 증기생산단가(C_Q)는 4.340 \$/GJ로 계산되어졌다. 따라서 전력생산비용흐름($\dot{W}_{[1,5]} C_W$)은 1218.47 \$/hr, 그리고 증기생산비용흐름($\dot{Q}_{[20]} C_Q$)은 588.43 \$/hr으로써 전체 생산비용흐름은 1806.90 \$/hr이다. 앞서서도 언급하였듯이 생산적 사이클 혹은 생산적시스템에서의 내부비용흐름의 총합은 0이며, 전체 투입비용흐름과 전체 생산비용흐름은 같음을 확인할 수 있다.

위의 시스템을 MOPSA 방법으로 계산한 결과 전력생산단가는 10.160 \$/GJ, 그리고 증기생산단가는 4.574 \$/GJ로써 본 방법의 계산과 대략 3~6% 정도의 차이를 보이고 있다. 위의 두 계산 결과 중 어느 것이 정답이다라고 판단할 수는 없다. 왜냐하면 계산결과를 확인할 수 있는 수식은 전체 투자비용흐름과 전체 생산비용흐름은 같아야 한다는 전체 비용균형식 하나뿐이고, 두 방법 모두 이를 만족하기 때문이다.

본 절에서는 가스터빈열병합발전을 예로 들어 그 전력과 증기의 생산단가를 각각 구하였다. 복합에너지시스템은 가스터빈, 증기터빈, 보일러, 열생산기, 흡수식냉동기, 압축식냉동기, 열펌프, 공조기기 등등이 서로 조합을 이루어 각각의 에너지를 생산하며 에너지 시장에서 그 생산된 각 에너지에 대해 생산단가를 합리적으로 결정해야만 공정한 거래가 이루어질 수 있다. 따라서 엑서지 경제학을 포함한 여러 열경제학 중에서 그 수식이 보다 합리적이고 그 적용이 보다 광범위하고 간편한 이론을 찾아 적용해야 하며, 본 이론은 이들을 충분히 만족한다고 판단된다.

5. 결 론

복합에너지시스템에서 그 경제성 평가와 생산된 열과 전력의 합리적인 판매가 책정을 위해 생산단가들을 계산하는 것은 매우 중요하다. 본 연

구의 주된 목적은 복합에너지시스템에서 전력과 열의 생산단가를 열역학에 근거하여 구할 수 있는 합리적인 방법을 제시하는 것이며 OECOPC 방법과 OECOPS 방법 두 가지를 제안하였다. 기존 방법들과 비교하여 제안된 방법들의 핵심은 다음의 세 가지로 정리될 수 있다.

(1) 엑서지는 분리되지 않고 엑서지 자체로 해석되어지며 하나의 생산적사이클 혹은 시스템마다 하나의 엑서지 단가를 적용하여 각 상태에서의 엑서지흐름을 비용흐름화하였다.

(2) 생산단가 결정에 있어 기본이 되는 수식은 내부비용균형식과 생산비용균형식 두 가지이며, 이외의 추가적인 수식은 필요 없다.

(3) 에너지를 생산하는 구성기기에서의 입출구 상태값들만이 필요로 되어질 뿐 그 이외의 상태값들은 측정 혹은 계산되어질 필요 없다.

제안한 이론들을 가스터빈열병합발전예 적용시켜 그 전력과 증기 생산단가를 한 예로 계산하여 보았으며 앞으로 본 이론들을 실제 가동중인 복합에너지시스템에 적용하는 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

1. Lozano, M. A. and Valero, A., 1993a, Theory of the exergetic cost, *Energy*, Vol. 18, pp. 939-960.
2. Lozano, M. A. and Valero, A., 1993b, Exergoeconomic analysis of gas-turbine cogeneration systems, *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-Vol. 30, pp. 311-320.
3. Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C. A. and von Spakovsky, M. R., 1994, CGAM Problem: Definition and conventional solution, *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 279-286.
4. Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G., 1996, A general process-based methodology for exergy costing, in Duncan, A. B., Fiszdon, J., O'Neal, D. and Den Braven, K.(eds.), *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, AES-Vol. 36, ASME, New York, pp. 413-428.

5. Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G., 1999, On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems, Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division, AES-Vol. 39, ASME, New York, pp. 413-428.
6. Oh, S., Pang, H., Kim, S. and Kwak, H., 1995, Exergy of eng. for gas turbine co-generation system, J. of Eng. for Gas Turbine and Power, Vol. 118, pp. 782-791.
7. Kim, S., Oh, S., Kwon, Y. and Kwak, H., 1998, Exergoeconomic analysis of thermal systems, Energy, Vol. 23, pp. 393-406.
8. 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.
9. Kwak, H., Kim, D. and Jeon, J., 2003, Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants, Energy, Vol. 28, pp. 343-360.
10. JANAF Thermochemical Tables, 1971, National Bureau of Standard Publications, Washington, DC.
11. JSME Steam Tables, 1968, Japanese Society of Mechanical Engineers.