대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 B pp. 222~227 KSME 00F151

엑서지 단가를 각 작동유체별로 나눈 열경제학 (CGAM 문제해석)

김덕봉*. 김덕진**

Thermoeconomics to divided the exergetic cost into each working fluid (CGAM problem analysis)

Deok Bong Kim and Deok Jin Kim

Key Words : Exergy(엑서지), Thermoeconomics(열경제학), Exergy cost(엑서지 비용)

Abstract

At representative thermoeconomic theory to determine the unit cost of multiple products, there are the 「 SPECO 」 method of Tsatsaronis's study group and the 「 MOPSA 」method of chung-ang university phase laboratory. Against this theory, we propose new theory called 「 Thermoeconomics to divide the exergetic cost into each working fluid 」 in this study. Also, we apply new thermoeconomic theory to CGAM problem (30MW-grade imaginary gas turbine cogeneration power plant) that it is representative power system in thermoeconomics theory, and we fixed to interpreted the unit cost of electricity on the part of gas turbine and the unit cost of steam exergy(enthalpy) on the part of HRSG.

기호설명

C	the unit cost of production [$/GJ]
$\dot{E}_X$	exergy flow rate [MW]
$\dot{W}$	work or electricity [MW]
$\dot{Z}$	capital cost flow rate [$/hr]
$\dot{K}$	exergy difference flow rate [MW]
$\dot{H}$	enthalpy flow rate [MW]
$\dot{C}_n$	enthalpy unit cost at n-state [$/hr]

Subscripts

$[k]$	k-th component
$[outer]$	outer environment of the whole system
W	work
EX	exergy
CV	control volume

Superscripts

CHE	fuel
GT	gas turbine
ST	steam turbine
BQ	steam or hot water production

* 전남대학교 기계공학부
** 정회원

1. 서 론

열경제학은 열역학적(엑서지)해석에 경제원리를 접목시켜 에너지시스템에 대한 투자와 생산의 비용 관계를 규명하는 학문이다. 따라서 열경제학은 복합 생산물들의 단가를 결정함으로써 향후 설치가 예상되는 산업, 민생, 건축 등의 모든 복합에너지시스템에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 에너지절약정책과 에너지시스템의 도입에 대한 경제성 검토에도 기여할 수 있다.

단일 생산물 즉 전력만을 생산하는 시스템일 경우, 시스템에 대한 전체 비용균형식과 엑서지 효율로부터 유도된 다음식[Moran, 1982 and Valero, 1995]에 의해서 그 전력단가를 쉽게 구할 수 있다.

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

그러나 시스템이 열병합과 같은 복합에너지 시스템인 경우 식(1)에서 보여지듯이 그 복합생산물의 단가를 각각 결정하기는 쉽지가 않다. 이런 복

합생산물의 단가를 결정하기 위한 대표적인 열경제학이론에는 Tsatsaronis 연구그룹의 SPECO(1,2)방법과 중앙대학교 상변화실험실의 MOPSA 방법(3,4)이 있다. SPECO 방법은 각 구성기기마다 투입비용흐름은 산출비용흐름과 정확히 같다라는 수식과 그 그룹에서 정한 여러 규칙을 적용하여 열경제학에 접근하였고 MOPSA 방법은 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 결합하여 만들어진 엑서지균형식의 각 항에 새로운 엑서지차단가와 생산단가를 첨가시킨 엑서지비용균형식이라는 수식을 제안하여 접근하였다. 이에 반해 본 논문에서 새롭게 제시되어지는 이론은 동일작동유체일 경우 엑서지단가는 모두 같다라는 특성과 시스템의 각 구성기기를 열적• 기계적으로 나누어 열경제학에 접근하였다.

2. 엑서지단가를 각 작동유체별로 나눈 열경제학

위에서 제시한 이론들이 각자의 방법으로 열경제학에 접근하는 가장 큰 차이점은 다음과 같다. SPECO 방법은 각 구성기기에서 각 상태마다 엑서지 종류별로 고유한 가격변수를 엑서지균형식에 부여하고 MOPSA 방법은 각 구성기기에서 주되게 증가한 엑서지차 종류별로 고유한 가격변수를 엑서지균형식에 부여한다. 이에 반해 본 열경제학 이론은 각 작동유체의 종류(개스,증기)에 고유한 엑서지 가격변수를 부여하는 것을 원칙으로 한다. 따라서 엑서지 또는 엑서지차 단가의 성격을 어떻게 보느냐에 따라 열시스템에 대한 보다 타당한 열경제학적 해석이 결정되어짐을 잘 알 수 있다.

2.1 엑서지 정의와 엑서지 균형식

열경제학 해석에서 가장 기본이 되는 엑서지의 정의는 그 계가 주어진 상태에서부터 환경과의 열적· 기계적 평형상태(T_0,P_0)에 도달할 때까지 가역과정을 겪으면서 할 수 있는 최대 가역일이다. 즉 에너지를 열(heat)이 아닌 일(work)의 관점으로 해석하고자 할 때 엑서지라는 개념이 매우 중요하다.

열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 실제 발전시스템인 경우에 결합하여 엑서지 정의 $e_X = (h-h_O) - T_O(S-S_O)$ 를 적용시키면 다음의 엑서지균형식을 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{CV} = \dot{E}_X^{CHE} + \sum_{inlet} \dot{E}_{X,i} - \sum_{outlet} \dot{E}_{X,j} - \dot{W}_{Lost} \qquad (2)$$

여기서 $\dot{E}_X^{CHE}$ 는 연료의 화학엑서지 투입항이고 우변의 두 번째와 세 번째 항의 합은 작동유체들의 엑서지차이다. 그 작동유체들을 가스터빈작동유체(GT), 증기· 온수생산물(BQ), 증기터빈작동유체(ST)로 분리하고 그 엑서지차를 $\dot{K}$ 라는 간단한 기호로 표현하여 임의의 [k]구성기기에 대해 엑서지균형식(2)을 다시 쓰면 다음으로 정리되어진다.

$$\dot{W}_{CV,[k]} = \dot{E}_{X,[k]}^{CHE} + \dot{K}_{[k]}^{GT} + \dot{K}_{[k]}^{BQ} + \dot{K}_{[k]}^{ST} - \dot{W}_{Lost,[k]} \qquad (3)$$

2.2 엑서지단가는 동일작동유체인 경우 모두 같은 값을 가진다

엑서지는 정의에서 알 수 있듯이 어느 상태에 있든지 그 상태에서 환경상태로 변할 때까지 등엔트로피 과정과 등엔탈피과정을 거쳐 생산되어질 수 있는 최대 가역일이다. 따라서 그 성격이 모두 같으므로 동일 작동유체인 경우 엑서지의 가격은 모두 같다. 그러므로 가격변수들을 시스템 전체 경계를 기준으로 투입 및 산출물들인 외부적 가격 (C_{EX}^{CHE} :연료투입, C_W^{GT} :가스터빈전력생산, C_{EX}^{BQk} :증기, 온수엑서지생산, C_W^{ST} :증기터빈전력생산)과 각 시스템 작동유체들의 엑서지가격인 내부적 가격(C_{EX}^{GT} : 가스터빈작동유체엑서지, C_{EX}^{ST} :증기터빈작동유체엑서지)으로 나눌 수 있다. 또한 가스와 증기터빈의 각 작동유체 대해 설명해 보면 하나의 사이클을 이루는 가스터빈 작동유체에 대해 $\sum \dot{K}_{[k]}^{GT} = 0$ 과 하나의 사이클을 이루는 증기터빈작동유체에 대해 $\sum \dot{K}_{[k]}^{ST} = 0$ 은 시스템이 정상상태이므로 반드시 성립하게 된다. 그러므로 그 내부적 가격흐름들의 사이클 합 $C_{EX}^{GT} \sum \dot{K}_{[k]}^{GT}$ 과 $C_{EX}^{ST} \sum \dot{K}_{[k]}^{ST}$ 은 각각 정확히 0 이 되어 발전시스템의 가격흐름은 최초투입과 최종산출비용흐름만이 남게 되며 이것은 전체 비용균형을 정확히 만족시킨다.

2.3 엑서지 비용 균형식

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

$$\dot{Q}_O \cdot 0 = \dot{H}^{CHE} C_F + \sum \dot{H}_e C_e - \sum \dot{H}_i C_i + \dot{W}_{CV} C_W \qquad (4)$$

그리고 각 n 상태에서는 엔탈피적 가격흐름과 엑서지적 가격흐름이 같아야 하므로 다음의 관계

식이 정의되어 진다.

$$\dot{H}_n C_n = \dot{E}_{X,n} C_{EX} \quad or \quad C_n = (e_X / h_n) C_{EX} \tag{5}$$

작동유체의 엑서지단가를 구했다면 위 식으로부터 각 상태의 엔탈피단가를 구할 수 있다. 그리고 식(5)을 식(4)에 적용시켜 $\dot{K}$ 으로 표현하면 다음의 엑서지 비용 균형식을 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{CV,[k]} C_W = \dot{E}^{CHE}_{X,[k]} C^{CHE}_{EX} + \dot{K}^{GT}_{[k]} C^{GT}_{EX} + \dot{K}^{BQ}_{[k]} C^{BQk}_{EX} + \dot{K}^{ST}_{[k]} C^{ST}_{EX} \tag{6}$$

즉 식(4)의 각 구성기기에서 환경으로 나아가는 손실 열량($\dot{Q}_{0,[k]}$)의 가격이 0 인 것과 같이 이 수식은 식(3)의 각 구성기기에서 발생되는 손실일($\dot{W}_{Lost,[k]}$)의 가격흐름은 정확히 0 임을 말해 준다.

2.4 엑서지비용균형식을 적용하여 작동유체의 엑서지단가를 열적구성기기들로부터, 전력의 생산단가를 기계적구성기기들로부터 그리고 증기·온수 생산단가를 그 구성기기로부터 구할 수 있다.

식 6)은 각각의 [k]구성기기에 가격흐름을 적용시킨 수식이다. 그러나 C_W 의 가격은 압축기나 터빈 등의 각각의 단가가 아니라 사이클을 이루는 물질흐름의 net 전력 가격임을 잘 알 수 있다. 그리고 산출되는 증기 및 온수의 생산가격흐름도 각 구성기기에서의 단가가 아니라 그 물질이 흐르는 동안에 최초 투입흐름과 최종 산출흐름의 차이므로 net 개념으로 해석을 해야 한다. 따라서 개별적이 아닌 전체적인 구성기기흐름을 해석하여 가격흐름의 균형을 생각한다.

한 사이클을 이루는 작동유체의 전체 구성기기들은 외부로부터 엑서지를 받는 구성기기들(A), 내부적으로 엑서지를 교환하는 구성기기들(B), 전력을 생산 및 소비하는 구성기기들(C), 외부 작동유체로 유용한 엑서지를 건네주는 구성기기들(D) 그리고 쓸모없는 엑서지를 환경으로 버리는 구성기기들(E)로 나뉘어 진다. 또한 생산물은 전력과 증기·온수로 나뉘어 진다. 따라서 증기·온수생산과 관련 있는 즉 온도차로 엑서지를 전달해주는 구성기기는 A·B·D·E 이고 전력생산과 관련 있는 구성기기는 C 이다. 그러므로 A·B·E 구성기기를 식(6)에 적용하여 작동유체의 엑서지단가를 구하고 C 구성기기를 식(6)에 적용하여 전력단가를 구하고 D 구성기기를 식(6)에 적용하여 증기·온수생산단가를 구할 수 있다.

2.5 외부투자비용흐름은 연료와 같이 투입된다

전체투입비용흐름은 연료, 각 구성기기 그리고 발전시스템의 외부적 (설계,건설,인건비,토지등등) 비용으로 나뉘어 진다. 연료투자비용흐름은 에너지의 외부적 흐름으로써 연소기를 통하여 내부 가격흐름화 되어 생산물을 생산한다. 따라서 발전시스템의 외부적 투입비용흐름도 연료와 같은 성격이므로 연소기를 통하여 내부 가격흐름화 되어져야 함을 알 수 있다. 추가적인 연료투입이 있는 발전시스템인 경우에는 외부적 투입비용흐름은 각 연소기에서 연료투입의 비만큼 나누어져 투입된다.

2.6 각 구성기기의 비용흐름

각 구성기기의 초기구입금액 및 유지보수 비용흐름인 $\dot{Z}_{[k]}$ 를 구하는 방법은 MOPSA 열경제학에서 제안했었던 Moran(5)의 연간등가비용(annualized cost)방법을 이용하였다. 즉 이자율에 i 년 n 등분가 상환기간인 경우 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 n 년후의 그 구성기기의 잔존가격(S_n)을 연간등가비용시키면 다음과 같다.

$$\dot{C}[\$/year] = \{C_i - S_n PWF(i,n)\} \cdot CRF(i,n) \tag{7}$$

이 식으로부터 [k]구성기기의 유지보수비용을 고려한 계수($\phi_{[k]} \approx 1.06$)와 1 년 동안의 그 구성기기 작동시간($\delta_{[k]} \approx 8000$)을 고려하여 [k]구성기기에대한 자본 및 유지보수비용흐름을 구할 수 있다.

$$\dot{Z}_{[k]}[\$/\sec] = \frac{\phi_{[k]}}{3600 \cdot \delta_{[k]}} \dot{C}_{[k]} \tag{8}$$

3. 가스터빈 열병합발전(CGAM)에 적용

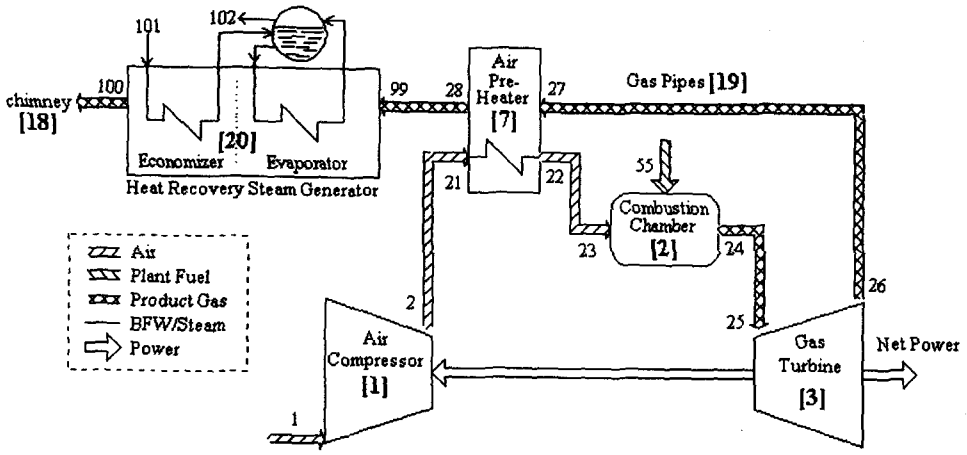

Fig. 1 CGAM gas turbine cogeneration plant.

Fig.1 은 열경제학해석에서 대표적발전시스템인 CGAM(C.Frangopoulos, G.Tsatsaronis, A.Valero, and M.,von Spakovsky)이다. 이 CGAM 은 가스터빈에서 전력을 그리고 폐열회수 보일러에서 증기를 생산하는 시스템으로 전력과 증기의 생산가격을 결정하는 문제이다. 본 계산에 사용되어진 가스 및 증기의 상태량은 JANAF 표에 나와 있는 엔탈피 및 엔트로피 다항식이(6) 사용되어졌고 물과 증기의 상태량들은 IFC (International Formulation Committee)(7)에서 제시한 수식들이 사용되어졌다.

이 발전시스템에 본 열경제학을 적용시키면 다음 수식들이 정리되어 지고 $C_{EX}^{GT}, C_{EX}^{BQ20}, C_{W}^{GT}$ 를 각각 구할 수 있다.

[가스터빈작동유체의 엑서지 단가]

$$0 = \dot{E}_{X,[2]}^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \dot{K}_{[2,7,18,19]}^{GT} \mathbf{C}_{\mathbf{EX}}^{\mathbf{GT}} + \dot{Z}_{[2,7,18,19]} + \dot{Z}_{[outer]} \quad (9)$$

우변은 투입비용흐름으로써 첫째 항은 연소기를 통한 연료의 투입, 둘째 항은 연소기, 예열기, 굴뚝, 개스파이프 구성기기의 합 그리고 셋째 항은 외부적 투입이다. 좌변은 개스작동유체의 엑서지가격흐름으로써 연소기로부터 받은엑서지($\dot{K}_{[2]}^{GT}$), 예열기에서의 손실엑서지($\dot{K}_{[7]}^{GT}$), 굴뚝을 통하여 환경으로 방출되는 엑서지($\dot{K}_{[18]}^{GT}$) 그리고 개스파이프에서의 손실엑서지($\dot{K}_{[19]}^{GT}$)를 더한 가격흐름이다.

[폐열회수 보일러에서의 증기 생산단가]

$$0 = \dot{K}_{[20]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{K}_{[20]}^{BQ} \mathbf{C}_{\mathbf{EX}}^{\mathbf{BQ20}} + \dot{Z}_{[20]} \quad (10)$$

우변은 투입비용흐름으로써 첫째항은 가스작동유체가 준 엑서지 가격흐름이고 둘째항은 HRSG 가격흐름이다. 좌변은 증기생산비용흐름으로써 그 생산단가는 이 구성기기에서의 손실엑서지와 HRSG 가격흐름만큼 높아진다.

[가스터빈 시스템의 전력 생산단가]

$$\dot{W}_{net}^{GT} \mathbf{C}_{\mathbf{W}}^{\mathbf{GT}} = \dot{K}_{[1,3]}^{GT} C_{EX}^{GT} + \dot{Z}_{[1,3]} \quad (11)$$

우변은 투입엑서지비용흐름으로써 $\dot{K}_{[1]}^{GT}$ 은 압축기에서 받은 엑서지, $\dot{K}_{[3]}^{GT}$ 는 터빈에서 전력을 생산하기위해서 준 엑서지이다. 좌변은 실제 생산되어진 전력가격흐름이다.

위의 수식들을 모두 더하면 가스터빈작동유체의 net 가격흐름은 2.2 절에서 설명한 바와 같이 모두 소거되기 때문에 최초투입과 최종산출비용흐름만이 남게 되며 이 해석은 전체 투입과 전체 생산의 비용균형을 정확히 만족시킨다.

$$\dot{W}_{net}^{GT} C_{W}^{GT} + \left|\dot{K}_{[20]}^{BQ}\right| C_{EX}^{BQ20} = \dot{E}_{X,[2]}^{CHE} C_{EX}^{CHE} + \sum \dot{Z}_{[k]} + \dot{Z}_{[outer]} \quad (12)$$

4. 결과 및 토의

Table.1 에는 주어진 질량유량, 압력, 온도에 대해 각 상태 물성치 값(기준:25oC,1atm)들, 엑서지 계산값들과 본 열경제학의 계산 결과인 엔탈피 가격과 그 가격흐름(식 5)이 나와 있다. Table.2 에는 Table.1 의 값으로부터 엑서지 균형식 (식 3)의 각

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

state	$\dot{m}$ [kg/s]	P [MPa]	T [°C]	$\dot{H}-\dot{H}o$ [MW]	$\dot{S}-\dot{S}o$ [MW/K]	$\dot{E}_X$ [MW]	Case1)		Case2)		Case3)	
							C_n [$/GJ]	$\dot{C}_n$ [$/hr]	C_n [$/GJ]	$\dot{C}_n$ [$/hr]	C_n [$/GJ]	$\dot{C}_n$ [$/hr]
1	95.919	0.1013	25.00	0.000	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	95.919	1.0264	348.68	32.223	0.00865	29.645	5.287	613.322	5.358	621.558	6.603	765.907
21	95.919	1.0264	348.68	32.223	0.00865	29.645	5.287	613.322	5.358	621.558	6.603	765.907
22	95.919	0.9748	576.85	56.239	0.04294	43.437	4.439	898.679	4.498	910.747	5.543	1122.255
23	95.919	0.9748	576.85	56.239	0.04294	43.437	4.439	898.679	4.498	910.747	5.543	1122.255
24	97.684	0.9261	1252.88	140.543	0.11837	105.249	4.304	2177.529	4.362	2206.769	5.375	2719.262
25	97.684	0.9261	1252.88	140.543	0.11837	105.249	4.304	2177.529	4.362	2206.769	5.375	2719.262
26	97.684	0.1115	718.01	75.888	0.12690	38.052	2.882	787.257	2.920	797.829	3.599	983.114
27	97.684	0.1115	718.01	75.888	0.12690	38.052	2.882	787.257	2.920	797.829	3.599	983.114
28	97.684	0.1084	505.77	51.382	0.09990	21.597	2.416	446.826	2.448	452.826	3.017	557.989
55	1.765	1.2159	300.00	1.255	0.00090	0.987	4.520	20.427	4.580	20.701	5.644	25.509
99	97.684	0.1084	505.77	51.382	0.09990	21.597	2.416	446.826	2.448	452.826	3.017	557.989
100	97.684	0.1023	150.53	12.947	0.03594	2.232	0.991	46.180	1.004	46.800	1.237	57.669
101	14.000	2.0265	25.10	0.031	0.00001	0.027	7.651	0.848	8.078	0.895	9.879	1.094
102	14.000	2.0265	-1.00	37.697	0.08351	12.799	**2.958**	401.493	**3.124**	423.924	**3.820**	518.417

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

Component	Exergy balance [MW]					Initial Investment Cost[$10^6$$]	$\dot{Z}_{[k]}$ [$/hr]
	$\dot{W}^{CV}_{[k]}$	$= \dot{E}^{CHE}_{X,[k]}$	$+ \dot{K}^{GT}_{[k]}$	$+ \dot{K}^{BQ}_{[k]}$	$- \dot{W}^{Lost}_{[k]}$		
Compressor [1]	-32.223	0.000	-29.645	0.000	-2.578	3.470	59.001
Combustor [2]	0.000	+89.131	-60.825	0.000	-28.306	0.210	3.571
Gas turbine [3]	+64.655	0.000	+67.198	0.000	-2.543	2.750	46.759
Preheater [7]	0.000	0.000	+2.662	0.000	-2.662	0.720	12.242
Chimney [18]	0.000	0.000	+1.245	0.000	-1.245	0.000	0.000
Gas pipes [19]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HRSG [20]	0.000	0.000	+19.365	-12.772	-6.593	1.000	17.003
[outer]						16.300	277.153
Total	+32.432	+89.131	0.000	-12.772	-43.926	24.450	415.729

Table.3 Net cost balance equation and unit cost

Equations[$/hr]	$\dot{W}^{GT}_{net} C^{GT}_W$	$= \dot{E}^{CHE}_{X,[2]} C^{CHE}_{EX}$	$+ \dot{K}^{GT}_{[k]} C^{GT}_{EX}$	$+ \dot{K}^{BQ}_{[20]} C^{BQ20}_{EX}$	$+ \dot{Z}_{[k]}$
Case1) have no components and outer flow rate					
UNIT COST	**6.654**[$/GJ]	3.670[$/GJ]	5.747[$/GJ]	**8.713**[$/GJ]	
Eq.9)	0.000	+1177.595	-1177.595	0.000	0.000
Eq.10)	0.000	0.000	+400.646	-400.646	0.000
Eq.11)	+776.949	0.000	+776.949	0.000	0.000
Eq.12)	+776.949	+1177.595	0.000	-400.646	0.000
Case2) have components but no have outer cost flow rate					
UNIT COST	**7.650**[$/GJ]	3.670[$/GJ]	5.824[$/GJ]	**9.200**[$/GJ]	
Eq.9)	0.000	+1177.595	-1193.408	0.000	+15.813
Eq.10)	0.000	0.000	+406.026	-423.029	+17.003
Eq.11)	+893.142	0.000	+787.382	0.000	+105.760
Eq.12)	+893.142	+1177.595	0.000	-423.029	+138.576
Case3) have components and outer cost flow rate					
UNIT COST	**9.216**[$/GJ]	3.670[$/GJ]	7.177[$/GJ]	**11.251**[$/GJ]	
Eq.9)	0.000	+1177.595	-1470.561	0.000	+292.966
Eq.10)	0.000	0.000	+500.320	-517.323	+17.003
Eq.11)	+1076.001	0.000	+970.241	0.000	+105.760
Eq.12)	+1076.001	+1177.595	0.000	-517.323	+415.729

항에 대응되는 값들과 각 구성기기 비용흐름 값들이 계산되어져 있다. 각 구성기기뿐만 아니라 전체구성기기에서도 정확히 엑서지 균형이 맞고 개스작동유체의 모든 엑서지차 합은 정확히 0 이 됨을 볼 수 있다. Table.3 에는 식(9,10,11,12)의 각 항에 대응하는 가격흐름 값들이 계산되어져 있다. 여기서 식(3)과 식(6)의 특성상 좌변의 전력은 생산이 + , 투입이 - 이고 우변의 물질흐름 엑서지차는 생산이 - , 투입이 +이다. case1)은 구성기기와 외부 투자비용흐름이 없을 때이고 case2)는 각 구성기기비용흐름은 있으나 외부 투자비용이 없을 때를 case3)는 모두 존재할 때이다. 중기엑서지의 가격이 전력의 가격보다 더 비싸게 계산되어졌는데 그 이유는 중기를 생산하는데 상대적으로 더 많은 손실일이 발생하였기 때문이다. 구성기기가 고려되어지면 투입되는 가격흐름이 증가하므로 전력단가 및 중기엑서지단가는 더욱 비싸진다.

본 열경제학으로 계산되어진 엑서지 단가들을 식(5)에 적용시키면 각 상태의 엔탈피 가격이 Table.1 의 C_n 으로 계산되어진다. 그 값을 살펴보면 하류 흐름으로 갈수록 엔탈피 가격이 점점 낮아짐을 볼 수 있다. 이 현상은 에너지가 흐를수록 가역일은 더욱 손실된다는 열역학 제 2 법칙으로 설명되어질 수 있다. Case2)는 case3)에 비해 case1)에서 별로 증가 하지 않았다. 그 이유는 식 9)에서 알 수 있듯이 $\dot{Z}_{[2,7,18,19]}$ 이 $\dot{Z}_{[outer]}$ 보다 훨씬 작기 때문이다. 본 계산에 사용되어진 연료의 LHV 단가는 3.750[$/GJ](엑서지가격은 3.670[$/GJ])이지만 폐열회수 보일러의 중기산출 엔탈피가격은 2.958[$/GJ]으로써 훨씬 더 낮다. 만약 연소 보일러로부터 중기가 직접 생산되어진다면 환경으로의 배기가스 손실흐름이 있으므로 LHV 가격보다 더 높아야 하고 또한 복합 생산 시스템의 열경제학적 해석을 1 법칙적으로 해석한다면 전력과 중기는 열에너지라는 동일의 입장이므로 그 가격이 같고 또한 환경으로의 손실열량이 있으므로 LHV 가격보다 더 높게 계산되어진다. 그러나 전력과 중기는 분명 그 차원이 틀린 생산물로써 전력의 가격이 훨씬 더 비싸야 함을 알 수 있는데 본 열경제학적 계산 결과는 전력생산가격은 6.654[$/hr], 중기생산 엔탈피가격은 2.958[$/hr]로써 이를 아주 잘 만족시키고 있다. Table.1 에서 상태 101 의 엔탈피가격이 LHV 보다 월등히 높은 이유는 상태 101 은 환경상태의 물(25°C,1atm)이 압축기의 압축을 받아 압축물(25.1°C,20atm)로 바뀌어 졌기 때문이다. 즉 환경상태의 작동유체에 압력을 높이면 환경상태로부터 엔트로피는 거의 증가하지 않으므로 즉 엑서지와 엔탈피의 크기가 서로 비슷하게 되므로 엔탈피 가격이 엑서지가격보다 약간 작게된다. 이 현상은 상태 2 에서도 확인되어질 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 열경제학을 새롭게 접근해 본바 그 타당성 여부를 자연스럽게 설명할 수 있었고 또한 그 수식들을 쉽게 유도할 수 있었다. 그리고 유도되어진 결과는 전체투입과 전체산출 비용흐름은 같아야 한다라는 열경제학의 대원칙에 정확히 성립하였다. 이 열경제학을 CGAM 문제에 적용시켜 그 생산단가들을 구하여 본바 연료의 LHV 가격을 기준으로 전력단가는 1.774 배 비싸고 중기생산엔탈피가격은 0.789 배로 계산되어졌다.

모든 생산물들은 시장에서 실제로 거래되는 가격을 가지고 있다. 따라서 위의 열경제학적 해석방법은 일반적인 에너지 시스템에 대해 투자를 해서 생산을 할 때 그 생산물들의 생산단가를 합리적으로 결정지음으로써 생산자에게 투자에 대한 이익정도를, 소비자에게 타당한 구입가격을 제시해 준다. 또한 위의 해석방법은 시스템해석 등에서 광범위하게 활용되어지리라 기대되어진다.

참고문헌

(1) Tsatsaronis, G., and Winhold, M., "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants-I, ANew 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 Trubine 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 Burean of Standard Publications, NSRDS-N3537, Washington, DC.

(7) JSME Steam Tables, 1968, JSME