

에너지 시스템에 대한 성능 및 비용의 최적화 수식

김 덕 진[†]

에너코스

Formula Optimization of Performance and Cost for Energy Systems

Deok-Jin Kim[†]

ABSTRACT: Thermoconomics, or exergoeconomics, can be classified into the three fields: cost allocation, cost optimization, and cost analysis. In this study, a new cost optimization methodology for energy systems is proposed. Conventional optimization formula can accomplish only cost or only performance. However, the proposed formula can accomplish the cost and performance at the same time. The formula is composed of fuel cost, capital cost, and overall system efficiency, which is very simple and clear. That is, the number of the proposed equation is only one, and it is developed with a wonergy newly introduced in this paper. The wonergy is defined as an energy that can equally evaluate the worth of each product. Any energy, including enthalpy or exergy, can be applied to the wonergy and be evaluated by this equation. To confirm its validity, the optimization of the CGAM problem was analyzed. Exergy is generally recognized as the most reasonable criterion in exergoeconomics. From the results of optimization using the suggested formula, however, both of exergy and enthalpy were reasonable. Therefore, we conclude that various forms of wonergy should be applied to the analysis of optimization.

Key words: Thermoconomics(열경제학), Exergoeconomics(엑서지경제학), Exergy(엑서지), Cogeneration(열병합발전), Optimization(최적화), Performance(성능), Cost(비용)

1. 서 론

열경제학(Thermoconomics) 또는 엑서지경제학(Exergoeconomics)은 열역학 제 2법칙과 경제 원칙의 접목을 통해 생산품의 비용배분, 시스템의 비용최적화, 그리고 시스템 내부의 비용해석을 수행하는 기법이다. 비용배분의 목적은 생산품의 각 원가를 산정하고 그 비용을 배분하는 것이다. 이 기법은 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합발전에서 중요하고, 생산품의 판매단가 결

정, 이익과 손실 계산, 그리고 경제성 평가를 위해 필요로 된다. 비용최적화의 목적은 주어진 제약조건하에 열원과 자본의 투입비용을 최소화하는 또는 생산품의 산출비용을 최대화하는 것이다. 이 해석으로부터, 에너지시스템의 성능과 비용의 최적화를 수행할 수 있다. 비용해석의 목적은 시스템 내부의 비용형성과정을 파악하고, 각 상태 및 각 구성기기에서 비용흐름의 양을 계산하는 것이다. 이러한 정보는 각 상태 및 각 구성기기를 평가하고 주 구성기기의 비용흐름을 개선하기 위해 유용하다.

열경제학적 문제를 해석하기 위한 다양한 방법론들이 제시⁽¹⁾되고 있다. 대표적인 방법론으로, the theory of the exergetic cost (TEC)^(2,3), the

[†] Corresponding author

Tel.: +82-61-793-2730; fax: +82-61-794-2730

E-mail address: enecos@hotmail.com

theory of exergetic cost-disaggregating methodology (TECD)^(2,4), thermoeconomic functional analysis (TFA)^(5,6), intelligent functional approach (IFA)^(7,8), last-in-first-out principle (LIFO)⁽⁹⁾, specific exergy costing/average cost approach (SPECO/AVCO)⁽¹⁰⁻¹³⁾, modified productive structure analysis (MOPSA)⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, and engineering functional analysis (EFA)^(17,18)이 있다.

위 방법론들의 주된 특징은 엑서지균형식에 각자의 원리에 따른 엑서지적 단가를 적용하여 비용균형식을 제안한다는 것이다. 그러나 엑서지의 개념을 알고 있는 공학자일지라도 실제 시스템에 위의 방법론을 적용하기 쉽지 않고 또한 그 방법론에 의한 열경제학적 문제를 풀기 쉽지 않다는 단점이 있다.

우리는 선행연구에서 새로운 열경제학적 방법론⁽¹⁹⁾을 제안한 바 있으며, 열경제학 분야에서 각 방법론의 타당성을 검증하기 위해 표준으로 제시된 CGAM 시스템^(20,21)을 대상으로 그 성능과 비용의 최적화 수식을 소개하고자 한다.

2. 워너지 균형식의 제안

2.1 에너지 균형식

열병합발전에서 연료의 투입으로 부터 일과 열이 산출될 때 임의의 k 구성기기에 대한 그리고 시스템 전체에 대한 에너지 균형식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{W}_k + \dot{Q}_k = \dot{Q}_{F,k} + \sum \dot{H}_i - \sum \dot{H}_o - \dot{Q}_{L,k} \quad (1)$$

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{Q}_F - \dot{Q}_L \quad (2)$$

여기서 좌변의 \dot{W} 와 \dot{Q} 는 생산품으로서의 일산출량과 열산출량, 우변의 \dot{Q}_F 는 연료의 열투입량, \dot{H}_i 는 구성기기에 유입되는 엔탈피량, \dot{H}_o 는 구성기기에 유출되는 엔탈피량, 그리고 \dot{Q}_L 은 환경 등으로의 열손실량이다.

2.2 엑서지 균형식

연료엑서지의 투입으로부터 일과 열엑서지가 산출될 때 임의의 k 구성기기에 대한 그리고 시

스템 전체에 대한 엑서지 균형식은 다음과 같다.

$$\dot{W}_k + \dot{E}_{X,Qk} = \dot{E}_{X,F,k} + \sum \dot{E}_{X,i} - \sum \dot{E}_{X,o} - \dot{E}_{X,L,k} \quad (3)$$

$$\dot{W} + \dot{E}_{X,Q} = \dot{E}_{X,F} - \dot{E}_{X,L} \quad (4)$$

여기서, 좌변의 \dot{W} 와 $\dot{E}_{X,Q}$ 는 생산품으로서의 일산출량과 열엑서지산출량, 우변의 $\dot{E}_{X,F}$ 는 연료의 열엑서지투입량, $\dot{E}_{X,i}$ 는 구성기기에 유입되는 엑서지량, $\dot{E}_{X,o}$ 는 구성기기에 유출되는 엑서지량, 그리고 $\dot{E}_{X,L}$ 은 환경 등으로의 엑서지손실량이다.

2.3 워너지 균형식

에너지 균형식과 엑서지 균형식은 근본적으로 그 형태가 같음을 볼 수 있다. 따라서 에너지와 엑서지를 새로운 단어인 워너지(Wonergy)로 그리고 기호 H 와 E_X 를 새로운 기호 G 로 통합한 워너지 균형식은 다음과 같다.

$$\dot{W}_k + \dot{G}_{Qk} = \dot{G}_{F,k} + \sum \dot{G}_i - \sum \dot{G}_o - \dot{G}_{L,k} \quad (5)$$

$$\dot{W} + \dot{G}_Q = \dot{G}_F - \dot{G}_L \quad (6)$$

여기서 \dot{G}_Q 는 유출흐름과 유입흐름의 차이이다.

3. 성능과 비용의 최적화 수식

시스템에서 투입비용은 연료비용 \dot{D}_F 과 연료 이외의 비용 즉 자본비용 \dot{D}_Z 으로 구성된다. 전통적인 비용최적화 수식 즉 목적함수 F_{\min} 는 연료비용과 자본비용이 최소화되는 식(7)로 표현된다.

$$F_{\min} = \dot{D}_F + \dot{D}_Z \quad (7)$$

식(7)은 비용의 최소화 수식이며, 위의 수식으로 성능의 최대화는 추구할 수 없다.

식(6)에서 연료 \dot{G}_F 가 최소로 투입되기 위해서는 손실 \dot{G}_L 이 최소가 되어야 하고, 또한 생산 $\dot{W} + \dot{G}_Q$ 이 최대가 되기 위해서는 손실 \dot{G}_L 이 최소가 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 최소의 연료 투입과 최대의 제품생산 즉 성능의 최대화는 최소의 손실로 정의 내릴 수 있다. 연료의 워너지

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{GT} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-\gamma_g}{\gamma_g}} \right] \right\} \quad (18)$$

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m}_g C_{P,g} (T_4 - T_5) \quad (19)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{GT} \quad (20)$$

$$T_{8P} = T_9 - \Delta T_A, \Delta T_A = 15K \quad (21)$$

$$\dot{m}_g C_{P,g} (T_6 - T_{7P}) = \dot{m}_s (h_9 - h_{8P}) \quad (22)$$

$$\dot{m}_g C_{P,g} (T_6 - T_7) = \dot{m}_s (h_9 - h_8) \quad (23)$$

$$P_0 = P_6 (1 - \Delta P_{HRSG}), \Delta P_{HRSG} = 0.05 \quad (24)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_s (h_9 - h_8) \quad (25)$$

$$\dot{E}_{X,Q} = \dot{m}_s (e_{X,9} - e_{X,8}) \quad (26)$$

위의 열역학적 수식에 대한 제약 조건들은 다음과 같다.

$$T_{7P} - T_9 \geq 1.64^\circ C \quad (27)$$

$$T_7 \geq 105^\circ C \quad (28)$$

4.2 투입비용 해석

투입비용에는 연료비와 자본비가 있다. 연료비는 다음과 같다.

$$\dot{D}_F = C_F \cdot \dot{m}_F \cdot LHV \quad (29)$$

Fig. 1의 각 구성기기에 대한 초기 구입비용은 다음과 같이 정의 된다.

$$Z_{AC} = \left(\frac{C_{11} \dot{m}_a}{C_{12} - \eta_{AC}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (30)$$

$$C_{11} = \$39.5 / (kg/s), C_{12} = 0.9$$

$$Z_{CC} = \left(\frac{C_{21} \dot{m}_a}{C_{22} - P_4/P_3} \right) [1 + \text{EXP}(C_{23} T_4 - C_{24})] \quad (31)$$

$$C_{21} = \$25.6 / (kg/s), C_{22} = 0.995 \\ C_{23} = 0.018 / K, C_{24} = 26.4$$

$$Z_{GT} = \left(\frac{C_{31} \dot{m}_g}{C_{32} - \eta_{GT}} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) [1 + \text{EXP}(C_{33} T_4 - C_{34})] \quad (32)$$

$$C_{31} = \$266.3 / (kg/s), C_{32} = 0.92 \\ C_{33} = 0.036 / K, C_{34} = 54.4$$

$$Z_{APH} = C_{41} \left[\frac{\dot{m}_g C_{P,g} (T_5 - T_6)}{U \Delta TLM} \right]^{0.6} \quad (33)$$

$$\Delta TLM = \frac{(T_6 - T_2) - (T_5 - T_3)}{\log[(T_6 - T_2)/(T_5 - T_3)]}$$

$$C_{41} = \$2290 / m^{1.2}, U = 0.18 kW / m^2 K$$

$$Z_{HRSG} = C_{51} \left[\left(\frac{\dot{m}_s (h_{8P} - h_8)}{\Delta TLM_{PH}} \right)^{0.8} + \left(\frac{\dot{m}_s (h_9 - h_{8P})}{\Delta TLM_{EV}} \right)^{0.8} \right] \quad (34)$$

$$+ C_{52} \dot{m}_s + C_{53} \dot{m}_g^{1.2}$$

$$\Delta TLM_{PH} = \frac{(T_7 - T_8) - (T_{7P} - T_{8P})}{\log[(T_7 - T_8)/(T_{7P} - T_{8P})]}$$

$$\Delta TLM_{EV} = \frac{(T_{7P} - T_9) - (T_6 - T_9)}{\log[(T_{7P} - T_9)/(T_6 - T_9)]}$$

$$C_{51} = \$3650 / (kW/K)^{0.8}, C_{52} = \$11820 / (kg/s)$$

$$C_{53} = \$658 / (kg/s)^{1.2}$$

각 구성기기에 대한 초기 구매비용을 단위 시간당으로 감가상각화 해야 하며, 임의의 k 구성기기에 대한 그 수식은 다음과 같다.

$$\dot{D}_{Z,k} = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \phi}{N \cdot 3600} \quad (35)$$

여기서 CRF 는 자본회수계수이며 18.2%로, ϕ 는 구성기기의 유지보수계수이며 1.06으로, N 은 시스템의 연간가동시간이며 8000 h로 CGAM 시스템에서 정의 된다.

4.3 최적화 대상 및 수행

최적화의 대상은 식(29)의 연료투입비용 \dot{D}_F 의 최소화, 식(35)의 자본비용의 최소화 \dot{D}_Z , 식(20)의 전기생산량 \dot{W} 의 최대화, 식(25)의 증기의 열생산량 또는 식(26)의 증기의 엑서지생산량의 최대화이다. 따라서 전개된 수식에서 위의 변수를 제외한 내부변수는 압축비 P_2/P_1 , 압축기효율 η_{AC} , 공기의 연소기 입구온도 T_3 , 가스의 연소기 출구온도 T_4 , 그리고 터빈효율 η_{GT} 로 정리된다.

열생산의 최적화는 2가지 개념이 있다. 하나는 열량의 개념 그리고 다른 하나는 엑서지의 개념이다. 즉 최적화를 최대 열량으로 수행한다면 그 최적화 수식은 식(36)과 같고, 최대 엑서지로 수행한다면 그 최적화 수식은 식(37)과 같다.

$$F_{\min} = \dot{D}_F \cdot \left(1 - \frac{\dot{W} + \dot{Q}}{\dot{m}_F \cdot LHV} \right) + \sum \dot{D}_{Z,k} \quad (36)$$

$$F_{\min} = \dot{D}_F \cdot \left(1 - \frac{\dot{W} + \dot{E}_{X,Q}}{\dot{m}_F \cdot e_{X,F}} \right) + \sum \dot{D}_{Z,k} \quad (37)$$

Table 1 Optimization according to the combination of the fixed conditions and the optimal objects.

Optimization	\dot{D}_F	\dot{D}_Z	\dot{W}	\dot{Q}	P_2/P_1	η_{AC}	η_{GT}	T_3	T_4	ΔT_{TP}	T_7	F_H	F_{EX}	$\dot{D}_F + \dot{D}_Z$	η_H	η_{EX}		
Fixed	\$/h	\$/h	GJ/h	GJ/h		%	%	°C	°C	°C	°C	\$/h	\$/h	\$/h	%	%		
Before	1,271	138.6	108.0	135.6	10.00	86.0	86.0	577	1247	67.39	190	435.3	816.1	1,410	76.7	46.7		
(a) Result of the enthalpic optimization using Eq. (36)														min.				
Case 1)	\dot{W}	\dot{Q}	1,172	131.3	108.0	135.6	8.50	84.7	87.9	641	1219	1.66	127	328.8	709.7	1,303	83.1	50.6
Case 2)	\dot{W}	\dot{D}_F	1,271	128.5	108.0	169.5	8.93	84.4	87.8	570	1220	1.83	105	289.4	761.7	1,400	87.3	50.2
Case 3)	\dot{W}	\dot{D}_Z	1,313	138.6	108.0	181.2	9.85	85.1	88.3	511	1227	14.54	105	294.6	798.3	1,451	88.1	49.7
Case 4)	\dot{Q}	\dot{D}_F	1,271	114.2	115.6	135.6	6.86	83.8	86.9	688	1206	6.38	145	380.7	762.6	1,385	79.0	49.0
Case 5)	\dot{D}_F	\dot{D}_Z	1,271	138.6	109.5	168.2	9.30	84.8	88.1	569	1223	1.64	105	298.7	767.6	1,410	87.4	50.5
(b) Result of the exergetic optimization using Eq. (37)														min.				
Case 1)	\dot{W}	\dot{Q}	1,172	131.3	108.0	135.6	8.50	84.7	87.9	641	1219	1.66	127	328.8	709.7	1,303	83.1	50.6
Case 2)	\dot{W}	\dot{D}_F	1,271	107.8	108.0	159.2	7.58	83.5	86.9	621	1209	4.17	122	310.0	754.5	1,379	84.1	49.1
Case 3)	\dot{W}	\dot{D}_Z	1,057	138.6	108.0	88.1	6.37	85.9	88.2	753	1215	5.28	164	410.8	663.7	1,195	74.2	50.3
Case 4)	\dot{Q}	\dot{D}_F	1,271	112.7	115.2	135.6	6.80	83.7	86.9	688	1205	6.87	146	380.7	762.6	1,384	78.9	48.9
Case 5)	\dot{D}_F	\dot{D}_Z	1,271	138.6	114.3	154.6	8.77	84.6	87.9	617	1220	1.64	120	333.9	766.9	1,410	84.6	50.6

5. 결과 및 토의

전통적인 최적화 수식은 식(7)의 연료비 \dot{D}_F 와 자본비 \dot{D}_Z 의 최소화이며, Fig. 1의 시스템에서는 고정변수로서 전기생산량 \dot{W} 는 108.0 GJ/h 그리고 열생산량 \dot{Q} 는 135.6 GJ/h로 주어졌다.

식(36) 또는 식(37)에서 내부변수는 연료비 \dot{D}_F , 자본비 \dot{D}_Z , 전기생산량 \dot{W} , 그리고 열생산량 \dot{Q} 이다. 즉 이 4가지 변수들 중 고정 변수와 최적화 변수를 임의로 선택 가능하므로, 제안된 수식은 전통적인 최적화 수식보다 다양한 조건의 최적화를 수행할 수 있다.

CGAM 시스템의 최적화 전 상태로 압축비 P_2/P_1 는 10, 압축기효율 η_{AC} 은 86%, 공기의 연소기 입구온도 T_3 는 577°C, 가스의 연소기 출구온도 T_4 는 1247°C, 그리고 터빈효율 η_{GT} 은 86%로 주어졌다. 이 값을 4장에서 전개한 식에 대입하면, 연료비 \dot{D}_F 는 \$1,271/h, 자본비 \dot{D}_Z 는 \$138.6/h, 전기생산량 \dot{W} 은 108.0 GJ/h, 그리고 열생산량은 \dot{Q} 은 135.6 GJ/h로 계산된다.

4가지 변수들의 다양한 조합에 따라 식(36)과 식(37)을 적용한 최적화 결과가 Table 1에 계산되어 있다. 여기서 Table 1의 (a)는 엔탈피적 최적화의 결과이고 (b)는 엑서지적 최적화의 결과이다. Case 1)은 고정 변수가 \dot{W} 와 \dot{Q} 일 때 최소의 \dot{D}_F 와 최소의 \dot{D}_Z 를 계산한 결과로서, 식(7)의

비용최적화, 식(36)의 엔탈피적 최적화, 그리고 식(37)의 엑서지적 최적화의 결과가 서로 정확히 같음을 볼 수 있다. 이것은 식(36)과 식(37) 모두 최적화의 수행에 합리적인 수식임을 뜻한다.

Case 1)을 제외한 나머지 조합의 경우 식(7)은 적용될 수 없고, 식(36) 그리고 식(37)의 결과 또한 조금 다름을 볼 수 있다. Case 5)를 예로 들면, 고정 변수는 \$1,271/h의 \dot{D}_F 그리고 \$138.6/h의 \dot{D}_Z 로서, 총 비용 \$1,410/h를 투입하여 최대의 \dot{W} 생산량과 최대의 \dot{Q} 생산량을 결정하는 문제이다. 엔탈피적 해석은 \dot{W} 가 109.5 GJ/h 그리고 \dot{Q} 가 168.2 GJ/h일 때 성능이 최대화된다고 계산하며, 엑서지적 해석은 \dot{W} 가 114.3 GJ/h 그리고 \dot{Q} 가 154.6 GJ/h일 때 성능이 최대화된다고 계산한다. 위 둘의 결과는 서로 약간 상이하며 어느 결과가 합리적인지를 결정할 수 없다.

전통적인 열경제학에서 최적화는 엑서지로 수행된다. 그러나 Table 1의 결과와 같이 엔탈피적 최적화 또한 충분히 타당한 값을 제시하고 있다. 어떠한 변수의 조합일지라도 최적화 전보다 최적화 후의 비용은 감소했고 성능은 향상됐음을 볼 수 있다. 그러므로 최적화는 반드시 수행되어야 함을 알 수 있다.

본 해석의 결과로부터, 최적화는 정답 또는 오답의 문제가 아니라, 설계자가 다양한 외부적 상황을 고려한 판단 또는 채택의 문제임을 이해할 수 있을 것이다.

6. 결 론

열역학적 에너지에는 엔탈피 및 엑서지 등이 있다. 이외에도 비열역학적 에너지는 경제학 등에서 다수 제안되고 있다. 이러한 에너지는 모두 워너지라는 단일의 단어로 통합될 수 있고, 그 균형식 또한 워너지 균형식으로 통합될 수 있다. 엑서지는 카르노 사이클을 기반으로 제안되는 에너지이다. 향후 어떤 새로운 사이클이 개발될 경우 그 사이클을 가장 잘 표현하는 어떤 에너지가 제안될 것이다. 여기서 그 새로운 에너지 또한 워너지라는 단어로 통합될 수 있으며, 그 균형식 역시 워너지 균형식으로 표현될 수 있다.

최적화에는 성능최적화와 비용최적화가 있다. 기존의 최적화 수식은 이 두 수식이 따로 제시되어 왔으나, 본 방법론에서는 이 두 수식을 단일의 수식으로 통합하였다. 제안된 최적화 수식은 연료투입비, 자본투입비, 그리고 시스템 전체 효율로 구성되어 있으며, 항상 최소의 투입비와 최대의 효율을 계산한다.

제안된 최적화 수식을 다양한 에너지 시스템에 적용하여 그 범용성 및 합리성을 앞으로 계속 검증해나갈 예정이다.

참 고 문 헌

1. Abusoglu, A., and Kanoglu, M., 2009, Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 2295-2308.
2. Lozano, M. A., and Valero, A., 1993, Theory of the exergetic cost, *Energy*, Vol. 18, No. 9, pp. 939-960.
3. Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., and Torres, C., 1994, Application of the exergetic cost theory to the CGMA problem, *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 365-381.
4. Erlach, B., Serra, L., and Valero, A., 1999, Structural theory as standard for thermoeconomics, *Energy Convers Manage*, Vol. 40, pp. 1627-1649.
5. Frangopoulos, C. A., 1987, Thermoeconomic functional analysis and optimization, *Energy*, Vol. 12, No. 7, pp. 563-571.
6. Frangopoulos, C. A., 1994, Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem, *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 323-42.
7. Frangopoulos, C. A., 1991, Intelligent functional approach: a method for analysis and optimal synthesis-design-operation of complex systems, *J Energy Environ Econ*, Vol. 1, No. 4, pp. 267-274.
8. Frangopoulos, C. A., 1991, Optimization of synthesis-design-operation of a cogeneration system by the intelligent functional approach, *J Energy Environ Econ*, Vol. 1, No. 4, pp. 275-287.
9. Tsatsaronis, G., Lin, L., and Pisa, J., 1993, Exergy costing in exergoeconomics, *J Energy Resour - ASME*, Vol. 115, pp. 9-16.
10. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 1999, On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems, *Proc ASME Adv Energy Syst Div*, Vol. 39, pp. 421-430.
11. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 2001, Comparison between SPECO and functional exergoeconomic approaches, *Proceedings of the ASME international mechanical engineering congress and exposition-IMECE-23656*, November, pp. 11-16.
12. Cziesla, F., and Tsatsaronis, G., 2002, Iterative exergoeconomic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems, *Energy Convers Manage*, Vol. 43, pp. 1537-1548.
13. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 2006, SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy*, Vol. 31, No. 5, pp. 1257-1289.
14. Kim, S. M., Oh, S. D., Kwon, Y. H., and Kwak, H. Y., 1998, Exergoeconomic analysis of thermal systems, *Energy*, Vol. 23, No. 5, pp. 393-406.
15. Kwon, Y. H., Kwak, H. Y., and Oh, S. D., 2001, Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems, *Exergy*, Vol. 1, No. 1, pp. 31-40.
16. Kwak, H. Y., Byun, G. T., Kwon, Y. H., and Yang, H., 2004, Cost structure of CGAM cogeneration system, *Int J Energy Res* Vol. 28, No. 13, pp. 1145-1158.
17. Spakovsky, M. R., and Evans, R. B., 1993, Engineering functional analysis : Parts I, II, *J Energy Resour - ASME*, Vol. 115, No. 2, pp. 86-99.
18. Spakovsky, M. R., 1994, Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem, *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 343-364.
19. Kim, D. J., 2010, A new thermoeconomic methodology for energy systems, *Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422.
20. Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C. A., and Spakovsky M. R., 1994, CGAM problem: definition and conventional solution, *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 279-386.
21. Toffolo, A., and Lazzaretto, A., 2002, Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design, *Energy*, Vol. 27, No. 6, pp. 549-567.