

복합 에너지 시스템에서 이윤 최적화 방법론의 제안

김 덕 진[†]

에너코스

Suggestion of Profit Optimization methodology in Combined Energy System

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 profit optimization methodology for combined energy systems is proposed. Cost optimization methodology can calculate the minimum input cost and the maximum output cost in combined energy systems. The suggested profit optimization methodology can calculate the value of maximum profit for combined energy systems, which is very simple and clear. Generally, the aim of installation of energy systems is to make maximum profit. Therefore, the approach for profit optimization needs to consider. To confirm its validity, the profit optimization for the CGAM problem was analyzed. The CGAM is a gas-turbine cogeneration defined in thermoconomics in order to compare various methodologies each other. From the results, we conclude that the profit optimization can be reasonable and applied to any combined energy systems.

Key words: Thermoconomics(열경제학), Exergoeconomics(엑서지경제학), Exergy(엑서지), Cogeneration(열병합발전), Optimization(최적화), Profit(이윤), 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 복합 생산품의 판매단가 결정, 이익과 손실 계산, 그리고 경제성 평가를 위해 필요로 된다. 비용최적화의 목적은 주어진 제약 조건하에 열원과 자본의 투입비용을 최소화하는 그리고 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 theory of exergetic cost-disaggregating methodology (TECD)^(2,4), thermo-economic 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 engine-

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

ring functional analysis (EFA)^(17,18)이 있다.

열경제학 분야에서 최적화는 투입비용의 최소화과 산출비용의 최대화에 기초하며, 비용최적화 (Cost optimization)라 부를 수 있다. 에너지 시스템을 설치하면 그로부터 이윤을 얻을 수 있다. 따라서 최대의 이윤을 얻을 수 있는 설계 그리고 운전 조건을 계산할 수 있으며, 이것을 이윤최적화(Profit optimization)라 부를 수 있다.

열경제학 또는 엑서지경제학 분야에서는 이윤 최적화를 해석하지 않고 있다. 우리는 선행연구에서 이윤최적화를 포함한 새로운 열경제학적 방법론^(19,20)을 제안한 바 있다. 따라서 본 연구의 목적은 이윤최적화 방법론을 소개하고, 열경제학 분야에서 각 방법론의 타당성을 검증하기 위해 표준으로 제시된 CGAM 시스템^(20,21)을 대상으로 그 이윤 최적화를 수행하고자 한다.

2. 최적화 수식

최적화는 에너지 관점에서 최소의 연료투입량과 최대의 에너지 산출량을 산정하는 성능최적화, 비용의 관점에서 최소의 투입비용과 최대의 산출비용을 산정하는 비용최적화, 그리고 최대의 이윤을 추구하는 이윤최적화로 나뉠 수 있을 것이다. 설계최적화 또는 운전최적화를 위해서는 위의 3가지 방법의 최적화를 모두 해석하는 것이 바람직 할 것으로 여겨진다.

2.1 성능 최적화

열병합발전에 대한 성능최적화의 목적함수는 식(1)과 같이 열역학 제 1법칙적 개념으로, 그리고 식(2)와 같이 열역학 제 2법칙적 개념으로 전개할 수 있다.

$$\dot{F}_{H,\min}^{perform} = \dot{Q}_F - (\dot{W} + \dot{Q}) \quad (1)$$

$$\dot{F}_{EX,\min}^{perform} = \dot{E}_{X,F} - (\dot{W} + \dot{E}_{X,Q}) \quad (2)$$

여기서 \dot{Q}_F 는 연료의 투입열량, $\dot{E}_{X,F}$ 는 연료의 투입 엑서지량, \dot{W} 는 전기산출량, \dot{Q} 는 열 산출량, $\dot{E}_{X,Q}$ 열의 엑서지 산출량이다. 수식에서 보여지듯이 투입량이 최소일 때, 그리고 산출량이 최대일 때 성능은 최적화가 되므로, 그 목적함수는 최소

값을 구하는 것이다.

2.2 비용 최적화

열병합발전에 대한 비용최적화의 목적함수^(19,20)는 식(1)과 같이 열역학 제 1법칙적 개념으로, 그리고 식(2)와 같이 열역학 제 2법칙적 개념으로 전개할 수 있다.

$$\dot{F}_{H,\min}^{cost} = \dot{D}_F \cdot \left(1 - \frac{\dot{W} + \dot{Q}}{\dot{Q}_F} \right) + \dot{D}_Z \quad (3)$$

$$\dot{F}_{H,\min}^{cost} = \dot{D}_F \cdot \left(1 - \frac{\dot{W} + \dot{E}_{X,Q}}{\dot{E}_{X,F}} \right) + \dot{D}_Z \quad (4)$$

여기서 \dot{D}_F 는 연료의 투입비용 그리고 \dot{D}_Z 는 자본의 투입비용이다. 수식에서 보여지듯이 연료와 자본의 투입비용이 최소일 때, 그리고 시스템 효율이 최대일 때 그 목적함수는 최소가 된다.

2.3 이윤 최적화

시스템에서 단일의 에너지 제품이 생산될 때는 비용최적화와 이윤최적화의 결과는 정확히 서로 같다. 또한 서론에서 언급한 비용배분 및 비용해석을 세부적으로 수행할 필요가 없다. 그러나 시스템에서 둘 이상의 복합 제품이 생산될 때는 각 제품의 원가산정 즉 비용배분, 시스템 내부의 비용흐름 파악 즉 비용해석, 그리고 최소투입비용과 최대산출비용의 설계 및 운전조건 파악 즉 비용최적화는 필수적이라 할 수 있다. 위의 해석에서 추가적으로 이윤최적화를 수행할 수 있으며, 그 일반적인 수식은 다음과 같다.

$$\dot{F}_{\max}^{profit} = \sum (C_{Si} \cdot \dot{P}_i) - (\dot{D}_F + \dot{Z}) \quad (5)$$

여기서 하첨자 i 는 i 번째 제품, C_S 는 제품의 판매단가, \dot{P} 는 제품의 생산량, \dot{D}_F 는 연료의 투입비용, \dot{Z} 는 시스템 건설비 및 초기구매비 등의 자본비용, 그리고 \dot{F}_{\max}^{profit} 은 이윤최적화 목적함수이다.

열병합발전은 연료비와 자본비의 투입으로부터 전기와 열을 동시에 생산하는 대표적인 복합에너지 시스템이다. 따라서 식(5)를 열병합발전에 적용하면 다음과 같다.

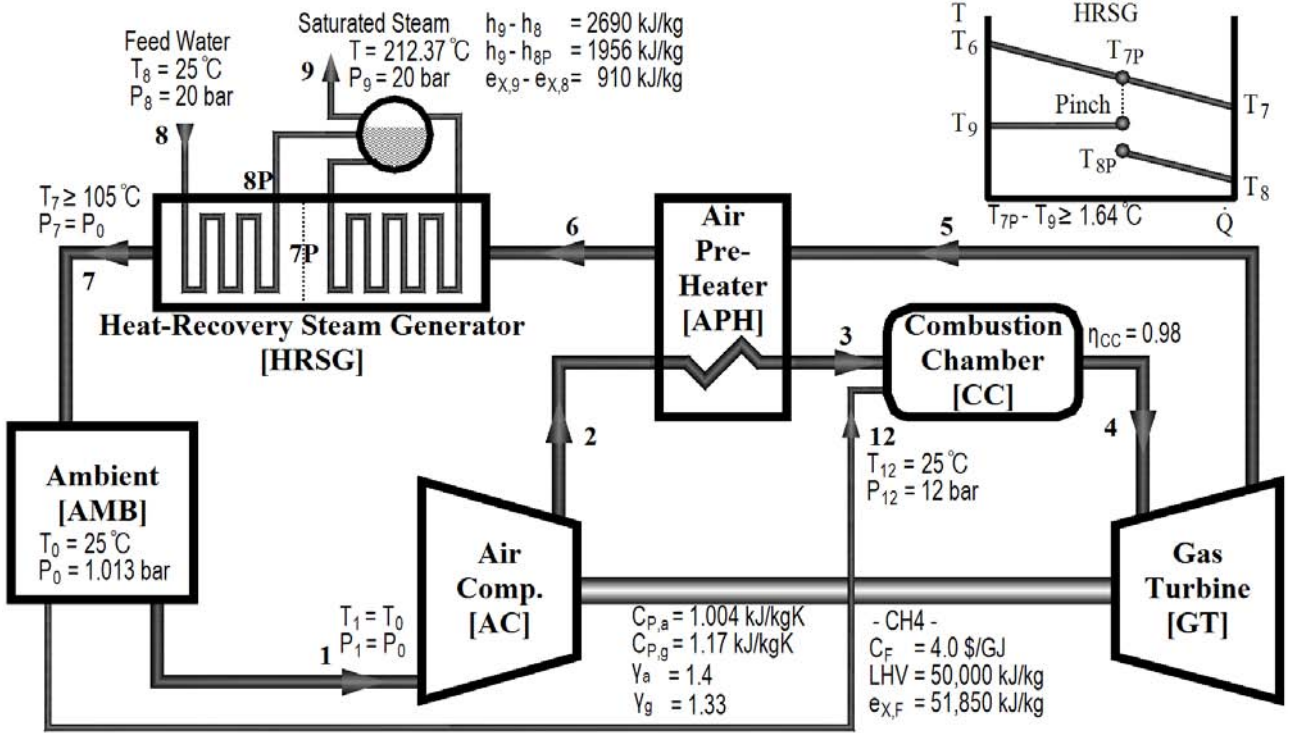


Fig. 1 Flow diagram of the CGAM cogeneration system.

$$\dot{E}_{\max}^{\text{profit}} = (C_{SW} \cdot \dot{W} + C_{SQ} \cdot \dot{Q}) - (\dot{D}_F + \dot{Z}) \quad (6)$$

3. CGAM 시스템에 적용

CGAM 시스템^(20,21)이란 전기와 열의 비용배분 및 비용최적화를 위해 열경제학 분야에서 미리 정의한 열병합발전이며, 이에 공헌한 전문가들(C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero, and M. von Spakovsky)의 이니셜에 따라 이름지어졌다. 최적화 수행을 위해서는 3.1 절의 열역학적 해석과 3.2 절의 경제학적 해석으로 부터 2장의 최적화 수식을 수치적으로 풀어야 한다.

3.1 열역학적 해석

Fig. 1에는 CGAM 시스템의 개략도가 나와 있으며 각 상태 및 구성기기에 대한 열역학적 수식은 다음과 같다.

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{AC}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{AC} = \dot{m}_a C_{P,a} (T_1 - T_2) \quad (8)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (9)$$

$$\dot{m}_g C_{P,g} (T_4 - T_0) = \dot{m}_a C_{P,a} (T_3 - T_0) + \eta_{CC} \dot{m}_f LHV \quad (10)$$

$$P_4 = P_3 (1 - \Delta P_{CC}), \Delta P_{CC} = 0.05 \quad (11)$$

$$\dot{m}_a C_{P,a} (T_3 - T_2) = \dot{m}_g C_{P,g} (T_5 - T_6) \quad (12)$$

$$P_3 = P_2 (1 - \Delta P_{a,APH}), \Delta P_{a,APH} = 0.05 \quad (13)$$

$$P_6 = P_5 (1 - \Delta P_{g,APH}), \Delta P_{g,APH} = 0.03 \quad (14)$$

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{GT} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1 - \gamma_g}{\gamma_g}} \right] \right\} \quad (15)$$

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m}_g C_{P,g} (T_4 - T_5) \quad (16)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{GT} \quad (17)$$

$$T_{8P} = T_9 - \Delta T_A, \Delta T_A = 15K \quad (18)$$

$$\dot{m}_g C_{P,g} (T_6 - T_{7P}) = \dot{m}_s (h_9 - h_{8P}) \quad (19)$$

$$\dot{m}_g C_{P,g} (T_6 - T_7) = \dot{m}_s (h_9 - h_8) \quad (20)$$

$$P_0 = P_6 (1 - \Delta P_{HRSG}), \Delta P_{HRSG} = 0.05 \quad (21)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_s (h_9 - h_8) \quad (22)$$

$$\dot{E}_{X,Q} = \dot{m}_s (e_{X,9} - e_{X,8}) \quad (23)$$

위의 열역학적 수식에 대한 제약 조건들은 다음과 같다.

$$T_{7P} - T_9 \geq 1.64^\circ\text{C} \quad (24)$$

$$T_7 \geq 105^\circ\text{C} \quad (25)$$

3.2 경제학적 해석

투입비용에는 연료비와 자본비가 있다. 연료비는 다음과 같다.

$$\dot{D}_F = C_F \cdot \dot{m}_F \cdot LHV \quad (26)$$

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

$$Z_{AC} = \left(\frac{C_{11} \dot{m}_a}{C_{12} - \eta_{AC}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (27)$$

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

$$Z_{CC} = \left(\frac{C_{21} \dot{m}_a}{C_{22} - P_4/P_3} \right) [1 + \text{EXP}(C_{23} T_4 - C_{24})] \quad (28)$$

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

$$Z_{GT} = \left(\frac{C_{31} \dot{m}_g}{C_{32} - \eta_{GT}} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) [1 + \text{EXP}(C_{33} T_4 - C_{34})] \quad (29)$$

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

$$Z_{APH} = C_{41} \left[\frac{\dot{m}_g C_{P_g} (T_5 - T_6)}{U \Delta TLM} \right]^{0.6} \quad (30)$$

$\Delta TLM = \frac{(T_6 - T_2) - (T_5 - T_3)}{\log[(T_6 - T_2)/(T_5 - T_3)]}$
 $C_{41} = \$2290 / \text{m}^{1.2}, U = 0.18 \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ K}$

$$Z_{HRSG} = C_{51} \left[\left(\frac{\dot{m}_s (h_{8P} - h_8)}{\Delta TLM_{PH}} \right)^{0.8} + \left(\frac{\dot{m}_s (h_9 - h_{8P})}{\Delta TLM_{EV}} \right)^{0.8} \right] \quad (31)$$

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

$\Delta TLM_{PH} = \frac{(T_7 - T_8) - (T_{7P} - T_{8P})}{\log[(T_7 - T_8)/(T_{7P} - T_{8P})]}$
 $\Delta TLM_{EV} = \frac{(T_{7P} - T_9) - (T_6 - T_9)}{\log[(T_{7P} - T_9)/(T_6 - T_9)]}$

$C_{51} = \$3650 / (\text{kW/K})^{0.8}, C_{52} = \$11820 / (\text{kg/s})$
 $C_{53} = \$658 / (\text{kg/s})^{1.2}$

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

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \phi}{N} \quad (32)$$

여기서 CRF는 자본회수계수이며 18.2%로, ϕ 는

구성기기의 유지보수계수이며 1.06으로, N은 시스템의 연간가동시간이며 8000 h로 CGAM 시스템에서 정의 된다.

3.3 최적화 대상 및 수행

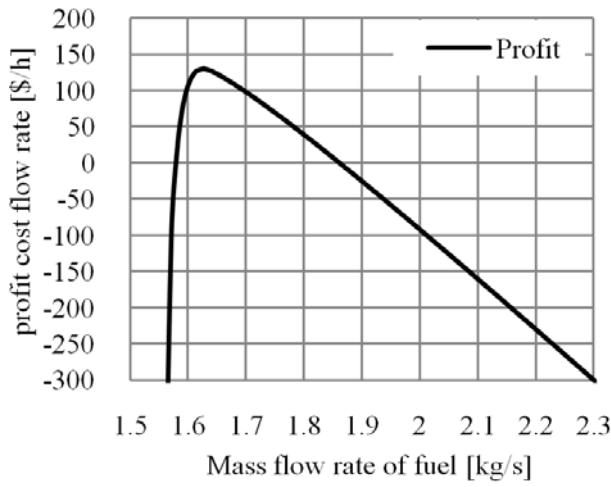
최적화의 대상은 식(26)의 연료투입비용 \dot{D}_F , 식(32)의 자본투입비용 \dot{Z} , 식(17)의 전기생산량 \dot{W} , 식(22)의 열생산량이다. 이 값을 식(6)에 대입하면, 이윤최적화를 수행할 수 있다. 따라서 전개된 수식에서 위의 변수를 제외한 내부변수는 압축비 P_2/P_1 , 압축기효율 η_{AC} , 공기의 연소기 입구온도 T_3 , 가스의 연소기 출구온도 T_4 , 그리고 터빈효율 η_{GT} 로 정리된다.

4. 결과 및 토의

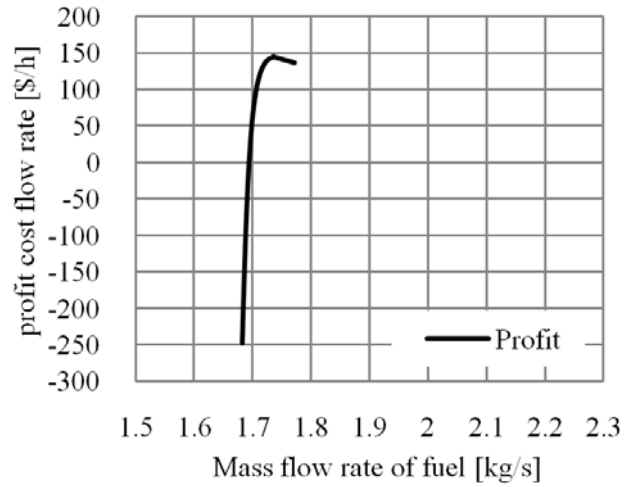
식(6)의 이윤최적화에서 변수는 연료비 \dot{D}_F , 자본비 \dot{Z} , 전기생산량 \dot{W} , 그리고 열생산량 \dot{Q} 이다. 즉 이 4가지 변수들 중 고정 변수와 최적화 변수를 임의로 선택 가능하다. 전기판매단가 C_{SW} 그리고 열 판매단가 C_{SQ} 의 개념은 본 연구에서 제안하는 새로운 개념이므로, CGAM 시스템에서 정의되지 않았다. 따라서 본 계산에서는 C_{SW} 를 \$9.0 /GJ 그리고 C_{SQ} 를 \$3.4 /GJ로 적용하였다.

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 3장에서 전개한 식에 대입하면, 연료비 \dot{D}_F 는 \$1,271 /h, 자본비 \dot{Z} 는 \$138.6 /h, 전기생산량 \dot{W} 은 108.0 GJ/h, 그리고 열생산량 \dot{Q} 은 135.6 GJ/h로 계산된다. 따라서 이윤은 \$23.4 /h이다.

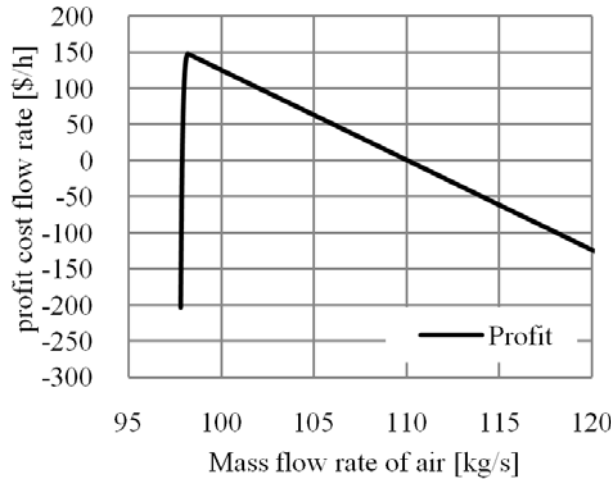
4가지 변수들의 다양한 조합에 따라 식(6)을 적용한 이윤최적화의 내부계산과정이 Fig. 2의 차트로 도시되어 있다. 차트에서 보여지듯이 최대 이윤이 발생하는 점이 존재하며, 그 값이 Table 1에 계산되어 있다. 하나의 예로서 해석하자면, Case 1)은 고정 변수가 108.0 GJ/h의 전기를 생산하는 \dot{W} 그리고 135.6 GJ/h의 열을 생산하는 \dot{Q} 일 때, \$1,172 /h의 연료비 투입 그리고 \$131.3 /h의 자본비 투입으로부터, \$129.8 /h의



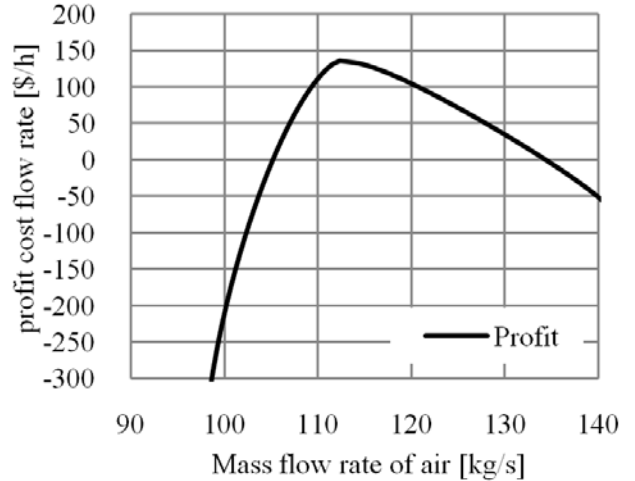
(a) Fixed condition of \dot{W} and \dot{Q} .



(b) Fixed condition of \dot{W} and \dot{Z} .



(c) Fixed condition of \dot{Q} and \dot{D}_F .



(d) Fixed condition of \dot{D}_F and \dot{Z} .

Fig. 2 Expression of the internal calculation on the profit optimization.

이윤을 얻을 수 있으며, 그 값이 최대값이다. 따라서 식(6)의 이윤 최적화 수식은 CGAM 문제를 충분히 해석할 수 있음을 증명할 수 있고, 더 나아가 일반적인 시스템도 해석할 수 있을 것이다.

Fig. 2의 극값에서 곡선이 비연속임을 볼 수

있다. 식(24)와 식(25)는 CGAM 시스템의 제한조건이며, Table 1의 ΔT_{7P} 그리고 T_7 의 값으로부터 극값은 제한조건에서 발생됨을 확인할 수 있다. 이로 인해 곡선의 극값에서 비연속점이 발생하게 된다.

Table 1 Result of profit optimization.

Optimization	\dot{D}_F	\dot{Z}	\dot{W}	\dot{Q}	P_2/P_1	η_{AC}	η_{GT}	T_3	T_4	ΔT_{7P}	T_7	η_H	η_{EX}	$\dot{D}_F + \dot{Z}$	\dot{F}_{max}^{profit}
Fixed	\$/h	\$/h	GJ/h	GJ/h		%	%	°C	°C	°C	°C	%	%	\$/h	\$/h
Before opt.	1,271	138.6	108.0	135.6	10.00	86.0	86.0	577	1247	67.39	190	76.7	46.7	1,410	23.4
Profit optimization using Eq. (6)															
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	83.1	50.6	1,303	129.8
Case 2) \dot{W} \dot{Z}	1,250	138.6	108.0	165.1	9.38	84.8	88.1	568	1224	1.64	105	87.4	50.6	1,388	145.1
Case 3) \dot{Q} \dot{D}_F	1,271	152.5	122.0	135.6	8.23	85.0	88.0	673	1220	1.64	137	81.1	50.9	1,424	135.3
Case 4) \dot{D}_F \dot{Z}	1,271	138.6	109.5	168.2	9.30	84.8	88.1	569	1223	1.64	105	87.4	50.5	1,410	148.1

5. 결 론

성능최적화 또는 비용최적화 방법론으로부터 최적화된 시스템의 설계 및 운전 조건을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 이윤최적화라는 새로운 방법론을 제안하고 있으며, CGAM 시스템에 적용하여 최대의 이윤을 얻을 수 있는 설계 및 운전 조건을 파악하였다. 그 결과 최적화 수행 후의 이윤이 최적화 전의 이윤 보다 6배 이상 발생하였다. 이윤최적화로부터 시스템 소유주는 보다 더 많은 이익을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

현재의 열경제학 즉 열역학적인 비용을 해석하는 학문에서는 이윤 최적화의 개념이 존재하고 있지 않다. 그러나 본 연구에서 CGAM 문제를 통하여 증명하였듯이 제안된 이윤최적화는 최적화된 설계 및 운전 조건을 합리적으로 파악할 수 있으므로, 이윤 최적화 방법론 역시 열경제학 분야에 포함되어야 함을 제안하고자 한다.

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 thermoconomics, *Energy Convers Manage*, Vol. 40, pp. 1627-1649.
5. Frangopoulos, C. A., 1987, Thermo-economic functional analysis and optimization, *Energy*, Vol. 12, No. 7, pp. 563-571.
6. Frangopoulos, C. A., 1994, Application of the thermo-economic 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 thermo-economic methodology for energy systems, *Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422.
20. Kim, D. J., 2010, Formula Optimization of Performance and Cost for Energy Systems, *Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 509-515.
21. 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.
22. 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.