

CGAM 열병합발전의 인수성능에 대한 페널티 비용 책정 방법론 제안 - Part I

김덕진*†
*엔테스

A Suggestion of Penalty Cost Appropriation Methodology for Performance Acceptance Test of CGAM Cogeneration - Part I

Deok-Jin Kim*†
*EnTEs

ABSTRACT : At the contract for power plant construction, the penalty appropriation on performance decrease is signed between ordering organization and construction firm. In this, the penalty cost signed must be reasonable value that both of ordering organization and construction firm can accept, therefore the methodology for penalty appropriation is very important. Cogeneration is a system that produces electricity and heat at the same time, therefore the penalty appropriation for cogeneration should be uncertain. Thermoeconomics analyzes various energy costs, however the relation of thermoeconomics and penalty cost may not be analyzed up to now. The aim of this study demonstrates that thermoeconomics can be applied to the penalty appropriation at the performance acceptance test. As the result of CGAM system, if the construction cost is \$10,000,000, the value of \$6,665,688 was appropriated to the electricity production performance and the value of \$3,334,312 was appropriated to the heat production performance. Therefore if one percentage at the electricity production performance decreases, the penalty is \$6,666, and one percentage at the heat production performance decrease, we can understand that the penalty is \$3,334.

초록 : 발전소 건설시 성능감소에 따른 페널티 책정은 발주처와 건설사의 계약서에 서명되며, 그 페널티 책정 방법론은 발주처와 건설사의 손익과 관련되어 있으므로 모두가 인정할 수 있도록 합리적이어야 한다. 따라서 페널티 책정 방법론은 매우 중요하다. 열병합발전은 전기와 열을 동시에 생산하는 시스템이므로, 열병합발전의 페널티 책정 방법론은 명확하지 않다. 열경제학은 다양한 에너지 비용을 산정하는 학문이나, 지금까지 페널티 책정 방법론에 대해 연구된 바 없다. 본 연구의 목적은 열경제학이 성능인수시험의 페널티 책정 방법론에 적용될 수 있음을 예시하는 것이다. CGAM 시스템의 해석결과 \$10,000,000의 건설비용이 투입되었을 경우, \$6,665,688이 전기생산 성능비용으로 책정되었고, \$3,334,312이 배기가스 성능비용으로 책정되었다. 따라서 만약 전기생산 성능이 1% 감소하였다면 그 페널티는 \$6,666 그리고 배기가스 에너지 성능이 1% 감소하였다면 그 페널티는 \$3,334로 책정됨을 알 수 있다.

Key words : Thermoeconomics(열경제학), Exergy(엑서지), Available energy(유효에너지), Cost allocation(비용배분), Performance Test (성능시험)

† Corresponding author
E-mail address: entes@outlook.kr

1. 서론

열병합발전 건설 계약시 발주처와 건설사 간에는 전기

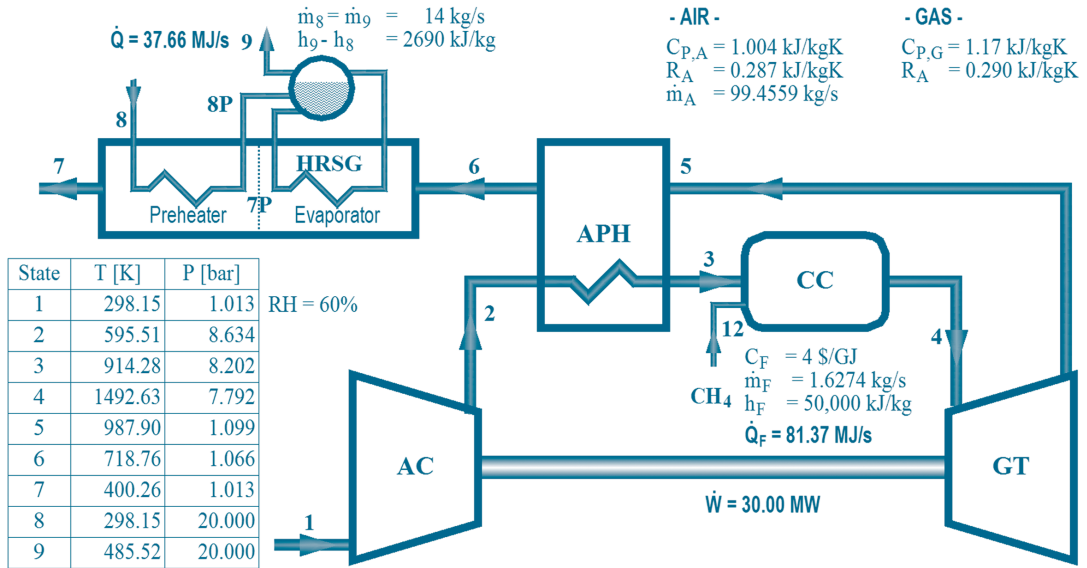


Fig. 1 CGAM system.

출력과 열 출력에 대한 성능 보증 계약이 이루어지며, 건설 완료 후 인수 성능 시험을 통해 시험된 성능이 보증된 성능을 만족하는지 여부를 판단하여 출력 또는 효율 성능이 미달될 경우 건설사에는 페널티가 부여된다. 페널티 책정은 발주처와 건설사의 계약시 이루어지며, 책정된 페널티는 양자 모두가 인정할 수 있는 합리적인 값이 되어야 한다. 따라서 페널티 책정 방법론의 합리성은 매우 중요하다.

열병합발전은 전기와 열이 동시에 생산되는 시스템이므로, 성능 보증 대상은 발전량, 발전효율 그리고 열출력량이다. 성능 평가는 위 세 가지 성능이 모두 합격되는 경우와 한 가지 이상이 불합격되는 경우로 나눌 수 있다. 화력 발전의 경우 출력은 발전량이며 효율은 발전량과 투입열량의 비이므로 예를 들어 “1% 성능 저하 당 페널티는 총 건설비의 1% 부과”로 페널티 비용 계산이 명확히 정의 내려질 수 있다. 그러나 열병합발전은 전기와 열이 동시에 생산되며 전기와 열의 가치는 상호 다르므로 열병합발전에서 어느 성능 하나 이상이 불합격되는 경우 “1% 성능 저하”는 쉽게 정의 내려질 수 없다.

위는 단일 시스템에서 이중 에너지가 생산될 때 그 비용을 어떻게 책정해야 하는가의 문제이며, 열경제학

(Thermoeconomics)이라는 학문에서 산출된 에너지와 비용 산정을 다루고 있다. 열경제학에 대한 소개는 Abusoglu 등(1)의 리뷰 논문에 세부적으로 서술되어 있다. 열경제학은 전기와 열의 원가산정, 시스템의 경제성 최적화, 시스템 내부의 비용흐름 해석 분야가 있으며, 전세계적으로 약 10여 종의 방법론⁽²⁾이 제안되고 있다.

본 연구에서 제시된 인수성능과 페널티 비용 산정은 열경제학에서 아직 연구되지 않은 것으로 파악되고 있으며, 본 연구의 목적은 Kim⁽²⁾이 제안한 열경제학적 방법론을 적용하여 인수성능과 페널티 비용 산정 방법론을 제안하는 것이다.

2. CGAM 시스템 해석

CGAM⁽³⁾은 Fig. 1과 같이 열경제학에서 제시하는 어떤 가스터빈 열병합발전이며, 열경제학에 공헌한 연구자(C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero and M. von Spakovsky) 성명의 첫 글자를 조합하여 만든 명칭이다. 전기와 열의 원가산정을 위한 열경제학 방법론들이 다양하게 제안(1)되고 있으며 CGAM 시스템을 해석함으로써 제안된 방법론의 결과를 상호 비교할 수 있다. CGAM의

Table 1 Thermodynamic Analysis

State	dot m	T	P	h	e
	kg/s	°C	bar	kJ/kg	kJ/kg
1	99.4559	25.00	1.013	25.10	0.00
2	99.4559	322.36	8.634	323.65	274.81
3	99.4559	641.13	8.202	643.69	462.13
4	101.0833	1,219.48	7.792	1,426.79	1,012.07
5	101.0833	714.75	1.099	836.26	396.15
6	101.0833	445.61	1.066	521.36	189.57
7	101.0833	127.11	1.013	148.72	16.73
8	14.0000	25.00	20.000	0.00	1.90
9	14.0000	212.38	20.000	2,960.00	912.51
12	1.6274	-	-	-	-

각 상태에 대한 질량, 온도, 압력, 엔탈피량 및 엑서지량이 Table 1에 제시되어 있다.

CGAM의 정의에서 엔탈피는 공기의 경우 식(1) 그리고 가스의 경우 식(2)로 계산한다.

$$h_i = C_{P,A}(T_i - T_0) \quad (1)$$

$$h_i = C_{P,G}(T_i - T_0) \quad (2)$$

일반적으로 시스템 해석은 열역학 제 1 법칙에 의해서만 수행되어 지며, 이 경우 1 kJ 당 전기와 열의 단가는 정확히 같게 된다. 열경제학은 엑서지(Exergy)를 기반으로 전기와 열의 가치 평가를 통해 1 kJ 당 전기와 열의 단가를 산정하므로, 일반적으로 전기는 열단가에 비해 시스템 종류에 따라 약 3배~5배 정도^[2]로 산정된다.

엑서지(Exergy)는 어떤 주어진 상태의 에너지원이 환경 상태와 열적 및 기계적 평형상태에 도달할 때까지 최대한 얻을 수 있는 일의 양이다. 이 엑서지는 핀치기법(Pinch technology)과 함께 공정진단 및 시스템 최적화설계에서 매우 중요한 인자이며, 발전, 열병합, 열교환, 냉동, 열펌프, 냉열, 화학 등의 다양한 분야에 적용되고 있다.

엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에 의해 손실일에 관한 연구로부터 시작되었으며, 1956년 Rant는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지

Table 2 Cost allocation for fuel input cost

Term	Value	Unit	Equation	
< Thermodynamic analysis >				
Fuel	Mass flow	1.6274	kg/s	\dot{m}_F
	LHV	50,000	kJ/kg	LHV
	Heat input	81,370	kJ/s	$\dot{Q}_F = \dot{m}_F \cdot LHV$
Enthalpy input	Power	30,001	kJ/s	$\dot{H}_W = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5)$
	Heat	37,669	kJ/s	$\dot{H}_Q = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7)$
Exergy input	Power	34,927	kJ/s	$\dot{E}_W = \dot{m}_1 \cdot (e_1 - e_2) + \dot{m}_4 \cdot (e_4 - e_5)$
	Heat	17,471	kJ/s	$\dot{E}_Q = \dot{m}_6 \cdot (e_6 - e_7)$
Output	Power	30,001	kJ/s	$\dot{W} = \dot{H}_W$
	Heat	37,669	kJ/s	$\dot{Q} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_8)$
Heat rate	Power	2.712	kJ/kJ	$R_W = \dot{Q}_F / \dot{W}$
	Heat	2,160	kJ/kJ	$R_Q = \dot{Q}_F / \dot{Q}$
< Cost input analysis >				
Fuel	unit cost	4.000	\$/GJ	C_F
	cost flow	325,480	\$/10 ⁶ s	$\dot{D}_F = C_F \cdot \dot{Q}_F$
< Cost allocation and estimating based on enthalpy >				
Output Cost flow	Power	144,300	\$/10 ⁶ s	$\dot{D}_W = \text{Eq. (5)}$
	Heat	181,180	\$/10 ⁶ s	$\dot{D}_Q = \text{Eq. (6)}$
Cost flow ratio	Power	44.33	%	$\alpha_W = \dot{D}_W / (\dot{D}_W + \dot{D}_Q)$
	Heat	55.67	%	$\alpha_Q = \dot{D}_Q / (\dot{D}_W + \dot{D}_Q)$
Unit cost	Power	4.810	\$/GJ	$C_W = \dot{D}_W / \dot{W}$
	Heat	4.810	\$/GJ	$C_Q = \dot{D}_Q / \dot{Q}$
< Cost allocation and estimating based on exergy >				
Output Cost flow	Power	216,955	\$/10 ⁶ s	$\dot{D}_W = \text{Eq. (5)}$
	Heat	108,525	\$/10 ⁶ s	$\dot{D}_Q = \text{Eq. (6)}$
Cost flow ratio	Power	66.66	%	$\alpha_W = \dot{D}_W / (\dot{D}_W + \dot{D}_Q)$
	Heat	33.34	%	$\alpha_Q = \dot{D}_Q / (\dot{D}_W + \dot{D}_Q)$
Unit cost	Power	7.232	\$/GJ	$C_W = \dot{D}_W / \dot{W}$
	Heat	2.881	\$/GJ	$C_Q = \dot{D}_Q / \dot{Q}$

(Exergy) 일로 변환 불가능한 부분을 아너지(Anergy)라는 이름을 제안하였다. Baehr는 이 엑서지를 열적시스템에 적용하여 엑서지 손실의 근원과 그 크기를 산정할 수 있는 수식을 상세하게 유도하였고, Hussein 등은 열기관에

Table 3 Cost allocation for construction cost

Term		Value	Unit	Equation
Construction cost input		10,000,000	\$	\dot{Q}_Z
Cost ratio	Power	66.66	%	α_W
	Heat	33.34	%	α_Q
Construction cost	Power	6,665,688	\$	$\dot{Q}_Z \alpha_W / 100$
	Heat	3,334,312	\$	$\dot{Q}_Z \alpha_Q / 100$

대한 엑서지 효율을 연구하였으며, 열역학적인 경제성평가의 응용에 관하여 Robert 및 Tsatsaronis 등의 다양한 연구가 있다.

CGAM의 정의에서 엑서지는 공기의 경우 식(3) 그리고 가스의 경우 식(4)로 계산하나, 식(4)의 화학적 엑서지 항은 Kim(2)이 제안한 열경제학적 방법론에서는 적용 여부와 관련없이 상호 동일한 결과가 도출되므로, 본 연구에서는 간결한 계산을 위해 생략하였다. 물의 경우 식(5)로 계산한다.

$$e_i = C_{P,A} \left[T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right] + R_A T_0 \ln \frac{P_i}{P_0} \quad (3)$$

$$e_i = C_{P,G} \left[T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right] + R_G T_0 \ln \frac{P_i}{P_0} + R_G T_0 \sum_j y_j^i \ln \frac{y_j^i}{y_j^0} \quad (4)$$

$$e_i = h_i - h_0 + T_0 (s_i - s_0) \quad (5)$$

Table 1에는 CGAM 시스템의 각 상태값들이 계산되어 있다.

3. 연료투입비의 비용배분

Fig. 1의 CGAM 시스템은 81,370 kJ/s의 열량이 투입되어 30,001 kW의 전기와 37,669 kJ/s의 열이 생산되고 있다. 여기서 연료원가는 \$4/GJ이므로 연료 투입비는 \$325,480/106s 이며, 이 투입비용이 전기와 열로 얼마만큼 배분되어야 하는가가 열경제학적 문제이다. 위 문제를 풀기위해 본 연구에서는 Kim(2)이 제안한 방법론을 적용하며, 그 제안 수식은 다음과 같다.

$$\dot{D}_W = \dot{D}_F \cdot \frac{\dot{X}_W}{\dot{X}_W + \dot{X}_Q} \quad (6)$$

$$\dot{D}_Q = \dot{D}_F \cdot \frac{\dot{X}_Q}{\dot{X}_W + \dot{X}_Q} \quad (7)$$

위 수식에서 D_F 는 연료 투입비, X_W 는 압축기 및 터빈에서 투입된 엔탈피량 또는 엑서지량, X_Q 는 HRSG에서 투입된 가스의 엔탈피량 또는 엑서지량, D_W 는 전기생산비용, 그리고 D_Q 는 열생산비용이다.

계산결과 전기비용은 \$216,955/106s 그리고 열비용은 \$108,525/106s로 산정되었으며, 연료투입비 중 66.66%는 전기측에 그리고 33.34%는 열측에 배분됨을 알 수 있다.

4. 건설비의 비용배분

페널티는 건설비 내에서 분담되어 져야 하며, 건설비를 전기와 열로 배분한 결과, 건설비가 \$10,000,000 (100%) 투입되었다고 가정했을 경우, 전기측에 \$6,665,688 (66.66%) 그리고 열측에 \$3,334,312 (33.34%)가 배분되었다. 따라서 만약 전기측 성능이 -1% 부족하였다면, 전기측 페널티로 \$6,666 그리고 열측 성능이 -1% 부족하였다면 열측 페널티로 \$3,334가 부여된다는 것을 이해할 수 있다.

본 연구에서 적용된 비용배분 방법론은 Kim(2)이 제안한 방법론을 적용하였으며, 타 방법론(1)을 적용할 경우 배분된 값은 다르게 된다. 열경제학은 에너지와 비용을 해석하는 학문이나, 현재까지 어느 하나의 방법론으로 정립되지 못하고 있으며, 다양한 방법론 제시로 인해 에너지와 비용 해석에 혼란이 존재하고 있다. 본 연구에서는 열경제학이 인수성능과 페널티 책정에도 적용될 수 있음을 보였으며, 인수성능과 페널티 책정은 매우 중요함을 누구나 인지하고 있다. 따라서 전세계적으로 다양한 방법론들에 대한 열경제학자들의 정립된 견해가 필요한 시점이다.

5. 결론

본 연구에서는 CGAM 열병합발전을 대상으로 페널티 책정 방법론이 제안되었다. 해석 결과 건설비가

\$10,000,000 (100%)일 경우 전기측으로 \$6,665,688 (66.66%) 그리고 열측으로 \$3,334,312 (33.34%) 값이 배분되며, 만약 전기 출력이 -1% 부족하였다면, 전기측 페널티로 \$6,666 그리고 열 출력이 -1% 부족하였다면 열측 페널티로 \$3,334가 부여된다는 것을 이해할 수 있다. 여기서 전기와 열의 에너지량이 동일하게 부족하였다 할지라도, 전기의 가치는 열의 가치보다 매우 높으므로, 그 가치는 비용 또는 페널티에 반영되어야 하며, 본 해석 결과는 그 가치가 반영되어 있음을 알 수 있다.

본 연구는 Part I 과 Part II로 구분되어 있으며, Part II에서는 CGAM에 대한 인수성능 분석 및 그 페널티 책정이 산정되어 있다.

참고문헌

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. Kim, D. J., 2010, "A New Thermoeconomic Methodology for Energy Systems," *Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422.
3. Valero A., Lozano M. A., Serra L., Tsatsaronis G., Pisa J. and Frangopoulos C.A., 1994, "CGAM problem: definition and conventional solution," *Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 279-286. 