

# CGAM 열병합발전의 인수성능에 대한 페널티 비용 책정 방법론 제안 - Part II

김덕진\*†

\*엔테스

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

Deok-Jin Kim\*†

\*EnTEs

**ABSTRACT** : In this study, a penalty cost appropriation methodology for CGAM performance acceptance test was suggested. As the result of CGAM performance test, there were 0.31% decreases in electricity output, 0.39% decreases in heat rate on electricity output, 0.31% increases in heat output, and 0.23% increases in heat rate on heat output. As the result of penalty cost appropriation for above performance, the penalty cost was calculated as -\$20,837 in electricity output, -\$25,930 in heat rate on electricity output, +\$10,340 in heat output, and +\$7,715 in heat rate on heat output. Each penalty is appropriated as above fore kinds, however the total penalty should be determined as how to combine above fore kinds of penalty. In our calculation, the minimum total penalty was -\$18,215 and the maximum total penalty was -\$46,767. The methodology of total penalty appropriation should be determined in the contract between ordering organization and construction firm, and we can understand that it is very important.

**초 록** : 본 연구에서는 CGAM 인수성능에 대한 페널티 비용 책정 방법론이 제안되어 있다. CGAM 성능시험결과 전기생산량에서 0.33% 감소, 전기생산효율에서 0.37% 감소, 열생산량에서 0.35% 증가, 열생산효율에서 0.31% 증가하였다. 페널티비용 책정 결과 전기생산량에서 -\$22,138, 전기생산효율에서 -\$24,348, 열생산량에서 +\$11,661, 열생산효율에서 +\$10,451로 산정되었다. 위 4 종류의 페널티 산정 계산은 명확하나, 총 페널티 비용은 위 4 종류를 어떻게 조합하는가에 따라 달라진다. 계산결과 최대 -\$46,486부터 -\$13,898 범위였다. 따라서 총 페널티 정의에 대한 발주처와 건설사의 협의는 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

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

### 1. 서 론

본 연구의 Part I에서는 CGAM 시스템에 대한 설계시

전기와 열 생산 비용이 계산되어 있다. Part II에서는 CGAM 시스템이 현재 건설되었다고 가정할 경우 인수성능 시험이 수행되며, 만약 성능이 미달될 경우 전기 생산 성능과 열 생산 성능에 대한 페널티를 각각 어떻게 책정해야 하는가에 대한 방법론이 제안되어 있다.

† Corresponding author

E-mail address: entes@outlook.kr

## 2. 인수성능 시험 분석

Table 1에는 CGAM 시스템의 인수성능 시험 결과가 가장값으로 제시되어 있다. 시험은 외기온도 15.24℃, 외기압력 1.007 bara, 상대습도 43.79%에서 수행되었으며, 연료 1.6840 kg/s가 투입되어 전기 31,432 kW 및 열 36,237 kJ/s가 생산되었다.

## 3. 인수성능 시험 보정

시험시 외기온도 등의 외부조건은 설계치와 다르기 때문

에 출력 및 열소비율 역시 다르게 된다. 따라서 시험 출력 및 시험 열소비율을 설계 외부조건으로 환산을 해야 하며, 이 환산 과정을 보정(Correction)이라 한다. 성능 환산을 위해서는 보정 인자(Correction Factor) 및 보정 절차가 제작사로부터 제공되어야 한다. Fig. 1 부터 Fig. 6에는 외부 조건에 따라 CGAM 해석을 위해 가정된 보정곡선(Correction Curve)이 도시되어 있으며, 계산의 편의를 위해 외기온도, 외기 압력, 상대습도 3가지만을 대상으로 하였다.

보정결과가 Table 2에 제시되어 있다. 건설된 시스템은 전기 출력에서 -0.33% 성능 미달, 전기 생산의 열소비율

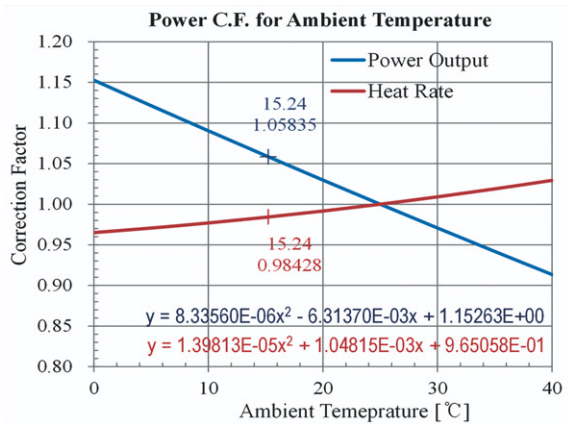


Fig. 1 Ambient temperature C.F. for power output.

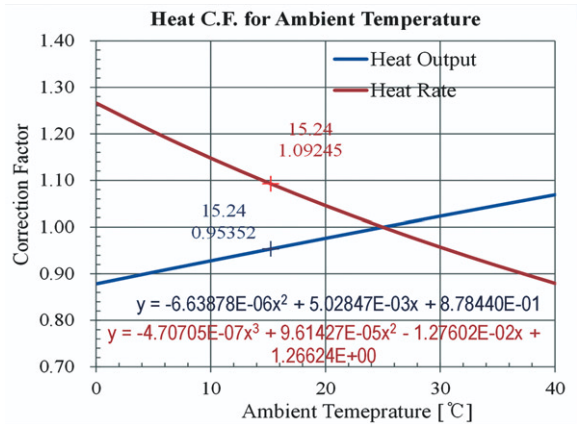


Fig. 2 Ambient temperature C.F. for heat output.

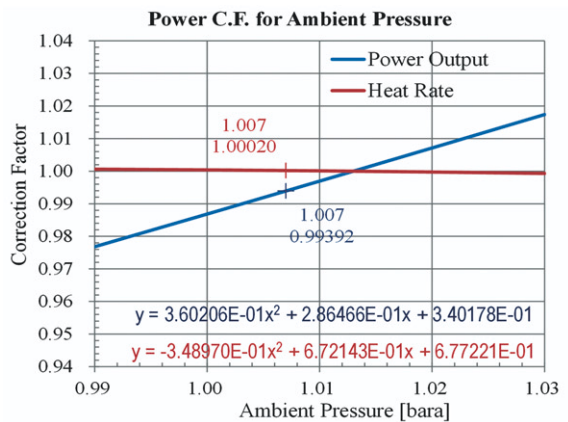


Fig. 3 Ambient pressure C.F. for power output.

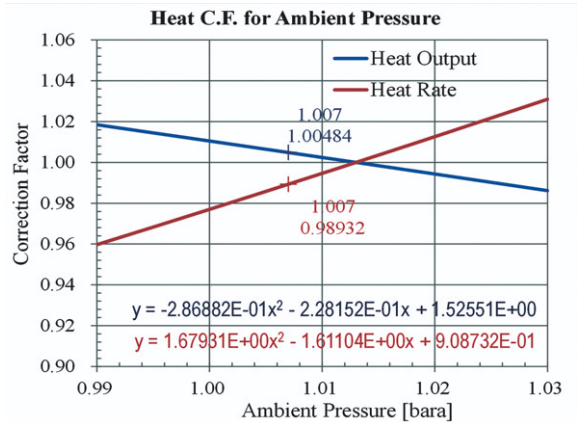


Fig. 4 Ambient pressure C.F. for heat output.

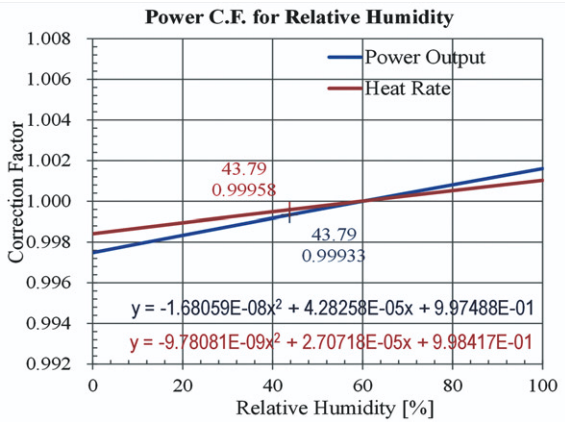


Fig. 5 Relative humidity C.F for power output.

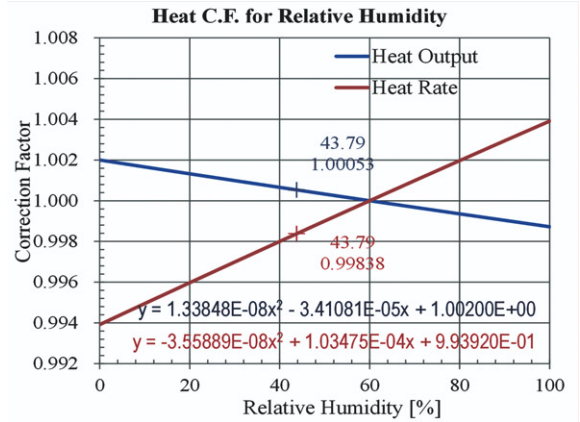


Fig. 6 Relative humidity C.F for heat output.

에서 +0.37% 성능 미달, 열 출력에서 +0.35% 성능 증가, 그리고 열 출력의 열소비율에서 -0.31% 성능 증가로 파악되었다. 전체적으로 전기 생산 성능이 감소하고 열 생산 성능이 증가하였다.

Table 1 Thermodynamic analysis on test value

	Term	Value	Unit	Equation
Ambient	Temp.	15.24	°C	$T_0$
	Pressure	1.007	bara	$P_0$
	Rel.Humid.	43.79	%	$RH_0$
Fuel	Mass	1.6840	kg/s	$\dot{m}_F$
	LHV	50,000	kJ/kg	$LHV$
	Heat	84,200	kJ/s	$\dot{Q}_F = \dot{m}_F LHV$
Water inlet	Temp.	15.24	°C	$T_W$
	Press.	20.000	bara	$P_W$
	Enthalpy	65.86	kJ/kg	$h_W = h(T_W, P_W)$
Output	Power	31,432	kW	$\dot{W}$
	Steam Mass	13.267	kg/s	$\dot{m}_S$
	Steam Temp	212.38	°C	$T_S$
	Steam Press	20.000	bara	$P_S$
	Steam Enth.	2,797.2	kJ/kg	$h_S = h(T_S, P_S)$
	Heat	36,237	kJ/s	$\dot{Q} = \dot{m}_S (h_S - h_W)$
Heat rate	Power	2.679	kJ/kJ	$R_W = \dot{Q}_F / \dot{W}$
	Heat	2.324	kJ/kJ	$R_Q = \dot{Q}_F / \dot{Q}$

본 시스템의 HRSG에서 생산된 열은 전량 지역난방을 위해 사용되었다는 가정이 있다. 즉 이 경우 생산된 증기의 온도와 압력은 중요하지 않으며 열역학 제 1 법칙적 열 생산이 중요하다. 따라서 보정은 열생산을 기준으로 수행한다. 그러나 만약 HRSG에서 생산된 열이 ORC 등에 사용될 경우 주 증기 온도와 압력 생산 조건은 매우 중요하다. 따라서 이 경우 보정대상은 열량이 아니라 주증기 온

Table 2 Each penalty cost pricing

	Term	Value	Unit	Equation	
< Penalty cost pricing for output >					
Power	Cost	6,665,688	\$	$D_W$	Construction
	Output	-0.33	%	$\Delta \dot{W}_{\%}$	Decrease
	Penalty	-22,138	\$	$P_W$	Non-pass
Heat	Cost	3,334,312	\$	$D_Q$	Construction
	Output	+0.35	%	$\Delta \dot{Q}_{\%}$	Increase
	Penalty	+11,661	\$	$P_Q$	Pass
< Penalty cost pricing for heat rate >					
Power	Cost	6,665,688	\$	$D_W$	Construction
	Heat rate	+0.37	%	$\Delta R_{W\%}$	Decrease
	Penalty	-24,348	\$	$P_{RW}$	Non-pass
Heat	Cost	3,334,312	\$	$D_Q$	Construction
	Heat rate	-0.31	%	$\Delta R_{Q\%}$	Increase
	Penalty	+10,451	\$	$P_{RQ}$	Pass

## CGAM 열병합발전의 인수성능에 대한 페널티 비용 책정 방법론 제안 - Part II

Table 3 Correction for performance test value

Term	Value	Unit	Equation
〈 Correction of power output 〉			
Ambient Temp.	1.05835	—	$p_1 = \text{Fig. 2}$
Ambient Press.	0.99392	—	$p_2 = \text{Fig. 4}$
Rel. Humid.	0.99933	—	$p_3 = \text{Fig. 6}$
Total C.F.	1.05120	—	$p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$
Measured	31,432	kW	$\dot{W}$
Corrected	29,901	kW	$\dot{W}_C = \dot{W} / p$
Designed	30,001	kW	$\dot{W}_D$
Difference	-100	kW	$\Delta \dot{W} = \dot{W}_C - \dot{W}_D$
Ratio	-0.33	%	$\Delta \dot{W}\% = \Delta \dot{W} / \dot{W}_D$
〈 Correction of the heat rate for power output 〉			
Ambient Temp.	0.98428	—	$f_1 = \text{Fig. 2}$
Ambient Press.	1.00020	—	$f_2 = \text{Fig. 4}$
Rel. Humid.	0.99958	—	$f_3 = \text{Fig. 6}$
Total C.F.	0.98406	—	$f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$
Measured	2.679	kJ/kJ	$R_W$
Corrected	2.722	kJ/kJ	$R_{CW} = R_W / f$
Designed	2.712	kJ/kJ	$R_{DW}$
Difference	+0.010	kJ/kJ	$\Delta R_W = R_{CW} - R_{DW}$
Ratio	+0.37	%	$\Delta R_W\% = \Delta R_W / R_{DW}$
〈 Correction of heat output 〉			
Ambient Temp.	0.95352	—	$q_1 = \text{Fig. 3}$
Ambient Press.	1.00484	—	$q_2 = \text{Fig. 5}$
Rel. Humid.	1.00053	—	$q_3 = \text{Fig. 6}$
Total C.F.	0.95865	—	$q = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3$
Measured	36,237	kJ/s	$\dot{Q}$
Corrected	37,800	kJ/s	$\dot{Q}_C = \dot{Q} / q$
Designed	37,669	kJ/s	$\dot{Q}_D$
Difference	+132	kJ/s	$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_C - \dot{Q}_D$
Ratio	+0.35	%	$\Delta \dot{Q}\% = \Delta \dot{Q} / \dot{Q}_D$
〈 Correction of the heat rate for steam heat output 〉			
Ambient Temp.	1.09245	—	$g_1 = \text{Fig. 3}$
Ambient Press.	0.98932	—	$g_2 = \text{Fig. 5}$
Rel. Humid.	0.99838	—	$g_3 = \text{Fig. 6}$
Total C.F.	1.07904	—	$g = g_1 \cdot g_2 \cdot g_3$
Measured	2.324	kJ/kJ	$R_Q$
Corrected	2.153	kJ/kJ	$R_{CQ} = R_Q / g$
Designed	2.160	kJ/kJ	$R_{DQ}$
Difference	-0.007	kJ/kJ	$\Delta R_Q = R_{CQ} - R_{DQ}$
Ratio	-0.31	%	$\Delta R_Q\% = \Delta R_Q / R_{DQ}$

도, 압력, 질량이 되며 성능 평가는 엑서지(Exergy, 유효에너지) 기준이 되어야만 할 것이다. 따라서 이 경우 Fig. 2, 4, 6은 온도, 압력, 질량 보정 곡선이 제작사로부터 제시되어야 할 것이다.

### 4. 페널티 책정

Table 3에는 성능 미달에 대한 페널티가 계산되어 있다. 전기출력은 -0.33% 성능 미달로 페널티는 -\$22,138이고, 열출력은 +0.35% 성능 증가로 페널티 없이 그 금액은 +\$11,661이며, 전기출력의 열소비율은 +0.35% 성능 미달로 페널티는 -\$24,348이며, 열출력의 열소비율은 -0.31% 성능 증가로 페널티 없이 그 금액은 +\$10,451로 계산되었다.

### 5. 검토 및 토의

CGAM 시스템의 인수성능 페널티 산정 결과 전기출력 미달로 -\$22,138 금액, 전기측 열소비율 증가로 -\$24,348 금액, 열출력 증가로 +\$11,661 금액, 그리고 열측 열소비율 감소로 +\$10,451 금액이 책정되었다. 위 금액은 각 성능별 페널티 금액으로서 본 연구에서 기술되어 있듯이 수식적으로 계산되는 값들이다.

최종 페널티는 위 4가지 항목들의 조합이 발생하게 되며, Table 4에 정리되어 있다. 현재 실제 현장에서 일반적으로 전력량과 전력열소비율의 합으로만 책정하고 있으며 이것은 Case 1)의 -\$46,486이다. 그러나 전력열소비율에는 전

Table 4 Total penalty appropriation [\$]

Term	Value	Equation
〈 Each Penalty cost pricing 〉		
Power	Output	-22,138
	Heat rate	-24,348
Heat	Output	+11,661
	Heat rate	+10,451
〈 Total Penalty cost pricing 〉		
Case 1)	-46,486	$P_W + P_{RW}$
Case 2)	-13,898	$\max(P_W, P_{RW}) + \max(P_Q + P_{RQ})$
Case 3)	-24,348	$\max(P_W, P_{RW}) + \max(P_Q + P_{RQ}) < 0$

력량이 포함되어 있으므로 위 계산법은 패널티가 중복됨이 명확하다. 따라서 현 계산법은 건설사가 불리함이 명확하다. Case 2)는 전력량과 전력열소비율 중 큰 패널티 그리고 열생산량과 열생산열소비율 중 큰 패널티의 합으로 그 값은 -\$13,898이다. 본 시스템은 전력생산 성능이 감소하고 열생산 성능이 증가하였으나 증가된 열량은 판매할 수 없다라고 한다면 Case 3)의 -\$24,348로 책정된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 CGAM 열병합발전을 대상으로 패널티 책정 방법론이 제안되었다. 해석결과 전기출력 미달로 -\$22,138 금액, 열출력 증가로 +\$11,661 금액, 전기측 열

소비율 증가로 -\$24,348금액 그리고 열측 열소비율 감소로 +\$10,451 금액이 책정되었다. 최종 패널티 산정은 위 4가지 금액을 어떻게 조합하는가에 따라 달리 산정되며, -\$46,486부터 -\$13,898 범위로 책정되어 졌다. 패널티 금액의 편차가 매우 크므로, 계약시 발주처와 건설사 간의 패널티 결정 방법론에 대한 합의는 매우 중요함을 볼 수 있다.

본 연구에서는 열경제학이라는 학문이 발전소 인수성능 수행시 패널티 책정에 적용될 수 있음을 보였다. 현재 열경제학적 연구에서는 인수성능시 패널티 책정에 대한 방법론이 아직 연구되지 않은 것으로 여겨지며, 본 연구가 열경제학 발전에 공헌할 수 있기를 기대한다. (KIPEC)