

가스터빈 열병합발전에서 생산된 전기와 증기의 원가산정

김 덕 진[†]
에너코스

Cost Estimating of Electricity and Steam on a Gas-Turbine Cogeneration

Deok-Jin Kim[†]

ENECOS, Gwangyang-si, Chollanam-do, 545-884, Korea

(Received November 27, 2008; revision received March 5, 2009)

ABSTRACT: When various kinds of outputs are produced from a single energy system, the methodology which allocates the common cost to each output cost is very important because it is directly related with the profit and loss of producers and purchasers. In the cost allocation methodology of the heat and the electricity on a cogeneration, there are energy method, work method, proportional method, benefit distribution method, various exergetic methods, and so on. On the other hand, we have proposed a worth evaluation method which can be applied to any system. The definition of this methodology is that the unit cost of a product is proportion to the worth. Where, worth is a certain evaluating basis that can equalize the worth of products. In this study, we applied this methodology to a gas-turbine cogeneration which produces 119.2 GJ/h of electricity and 134.7 GJ/h of steam, and then we allocated 3,150 \$/h of fuel cost to electricity cost and steam cost. Also, we compared with various cost allocation methods. As the result, we conclude that reversible work of various kinds of worth basis evaluates the worth of heat and electricity most reasonably.

Key words: Worth(가치), Exergy(엑서지), Reversible work(가역일), Cogeneration(열병합발전), Unit cost(원가), Cost estimating(원가산정), Cost allocation(비용배분)

기 호 설 명

C : 에너지원가 [\$/GJ]
 \dot{D} : 가격흐름 [\$/h]
 \dot{E}_X : 엑서지흐름 [GJ/h]
 \dot{F} : 연료투입량 [GJ/h]
 \dot{K} : 투입된 가치에너지량 [GJ/h]
 \dot{P} : 일 또는 열 등의 에너지 생산량 [GJ/h]
 \dot{Q} : 열 생산량 [GJ/h]

\dot{R} : 가역일 [GJ/h]
 \dot{L} : 비가역일 또는 손실일 [GJ/h]
 \dot{W} : 전기 생산량 [GJ/h]
 Z : 간접비 및 구성기기의 비용흐름 [\$/h]

그리스 문자

ϵ : 엑서지율
 η : 효율
 κ : 가치율

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

하첨자

A : 대체 시스템

- B : 고정비
- C : 전기와 열 생산의 공통구성기기
- CV : 검사체적
- ID : 간접비
- F : 연료
- Q : 열
- W : 전기
- U : 변동비

1. 서 론

단일 시스템으로부터 두 종류 이상의 제품이 생산될 경우, 연료종류, 발전방식, 운전방식 등에 따른 각 제품으로의 원가산정(Cost estimating) 및 공통비배분(Common cost allocation) 방법론은 생산자와 구매자의 손익에 직접적으로 관계되기 때문에 매우 중요하다. 대표적인 복합생산물은 열병합발전(CHP, Cogeneration)에서 생산된 전기와 열이며, 공통비용으로는 연료비, 동력비, 용수비, 인건비, 초기투자비, 감가상각비, 유지보수비, 각종 세액 등이 해당 된다.

우리나라의 경우 1986년 서울화력발전소에 대한 한국산업개발연구원의 남서울지역난방사업의 열요금 산정 연구를 시작으로, 에너지경제연구원 등을 중심으로 전기요금, 난방요금, 냉방요금, 냉수요금 등의 다양한 요금책정 및 비용배분 연구가 진행되고 있으며, 에너지경제연구원의 웹사이트(www.keei.re.kr)에서 그 연구보고서가 공개되어 있다. 에너지경제연구원의 최근 연구로는 2008년 한국지역난방공사의 용역을 받아 원가배분에 관한 연구를 수행하였으며, 이 보고서에는 덴마크, 스웨덴, 체코, 독일의 4개국을 대상으로 열병합발전에서의 열과 전기의 원가를 어떤 방법론으로 산정하는지가 조사되어 있다.

열병합발전에서 생산된 열과 전기에 대한 대표적인 비용배분 방법론에는 The world bank 사의 기술보고서⁽¹⁾에서 소개되었듯이, Energy 방법, Proportional 방법, Work 방법, Equal distribution 방법, Benefit distribution 방법, Alternative heat 방법, Alternative electricity 방법 등이 있으며, 일반적으로 국내에서 감발량보상방식이라 불리는 Work 방법과 E.Shuly 방식이라 불리는 Benefit distribution 방법이 열병합발전의 열과 전기의 비용배분에 많이 적용되고 있다.

또한, 많은 공학자들이 열역학 제 2법칙에 기반을 둔 엑서지적 방법론들을 제안해 오고 있으며, 대

표적인 방법들로는, the exergetic cost theory,⁽²⁻³⁾ the average cost approach,⁽⁴⁾ the specific cost energy costing,⁽⁵⁻⁶⁾ the modified productive structure analysis⁽⁷⁻⁸⁾ 등이 있다. 그러나, 위의 엑서지적 방법론은 증기 및 온수의 열원가를 산정하는 것이 아니라 엑서지 원가를 산정한다는 점에서 그리고 그 방법론에서의 제안 수식을 비전문가가 이해하기에는 난해⁽⁹⁾하다는 점에서 단점이 있다.

한편, Reversible work 방법이라는 새로운 방법론을 선행연구에서 제안⁽⁹⁾하였고, 최근 연구에서는 제안한 방법론과 The world bank 사의 기술보고서⁽¹⁾에서 소개된 방법론을 통합한 가치평가방법론(Worth evaluation methodology)⁽¹⁰⁾을 제안하여, 22.2 MW의 전기와 44.4 Gcal/h의 온수를 생산하는 증기터빈열병합발전⁽¹¹⁾ 그리고 4개의 실에 각각의 온기를 투입하는 난방시스템⁽¹²⁾에 적용하여 각 생산물의 원가산정 및 공통비배분을 수행한 바 있다.

제안된 방법론은 각 제품의 원가는 그 가치에 비례한다고 정의⁽¹⁰⁾되며, 유형의 제품뿐만 아니라 무형의 서비스까지 다양하게 적용되어 각 제품으로의 원가산정 및 비용배분을 수행할 수 있다는 것이 기존 방법론에 비해 가장 큰 특징이다.

제안된 방법론의 범용성과 합리성을 확인하기 위해서는 다양한 시스템에 적용하여 그 원가산정과 비용배분 결과를 비교 검토해야 하는바, 본 연구에서는 전기 119.2 GJ/h(33.1 MW)와 증기 134.7 GJ/h(32.2 Gcal/h)를 생산하는 가스터빈 열병합발전을 대상으로, 연료 투입비 3,150 \$/h를 전기와 증기로 각각 배분하여 그 원가산정 및 비용배분을 수행하고, 기존의 방법론들과 결과를 비교 검토하고자 한다.

2. 생산품의 가치평가

선행 연구⁽¹⁰⁾에서 제안한 바와 같이 가치평가방법의 정의는 생산원가는 제품의 가치에 비례한다이며, 그 원가산정 수식은 식(1)로 공통비배분 수식은 식(2)로 표현된다.

$$C_i = \kappa_i \cdot \frac{D_{ES} + \dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C + \frac{\dot{Z}_i}{P_i}}{\sum_{j=1}^N \kappa_j \dot{P}_j} \quad (1)$$

$$\dot{D}_i = C_i \cdot \dot{P}_i \quad [where] \quad \kappa_i = \dot{K}_i / \dot{P}_i \quad (2)$$

여기서, 하첨자 i 는 N 개의 생산 제품 중 i 번째 생산품, κ_i 는 전달된 가치에너지량 \dot{K}_i 와 생산된 에너지량 \dot{P}_i 와의 비율 또는 비에너지적으로 주어진 어떤 지표, \dot{D}_{ES} 는 열원의 투입비용, \dot{Z}_{ID} 는 시스템 외적인 간접비용, \dot{Z}_C 는 각 제품을 생산하기 위해 공동으로 관여되는 구성기기의 비용, \dot{Z}_i 는 i 번째 제품 생산에만 관여되는 구성기기의 비용, C_i 는 i 번째 제품의 생산원가, \dot{D}_i 는 i 번째 제품으로 배분된 비용이다. 위 수식에서 \dot{P}_i , \dot{D}_{ES} , \dot{Z}_{ID} , \dot{Z}_C , \dot{Z}_i 는 사전에 주어지는 값이므로, 원가산정 및 비용배분을 본 방법론으로 수행할 경우 가치율 κ 의 결정이 핵심 사항이다.

식(1)의 i 번째 제품의 생산원가 C_i 는 열원투입비용 \dot{D}_{ES} 에 의한 변동비원가 $C_{U,i}$ 와 간접비 \dot{Z}_{ID} 및 구성기기비용 \dot{Z}_C , \dot{Z}_i 에 의한 고정비원가 $C_{B,i}$ 로 나뉘질 수 있으며 그 수식은 다음과 같다.

$$C_{U,i} = \kappa_i \cdot \frac{\dot{D}_{ES}}{\sum_{j=1}^N \kappa_j \dot{P}_j}, \quad \kappa_i = \frac{\dot{K}_i}{\dot{P}_i} \quad (3)$$

$$C_{B,i} = \kappa_i \cdot \frac{\dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_i}{\sum_{j=1}^N \kappa_j \dot{P}_j} \quad (4)$$

위의 수식을 전기와 열을 생산하는 열병합발전에 적용하면, 생산품 i 는 전기 W 와 열 Q 기호로, 열원 ES 는 연료 F 기호로, 생산된 에너지량 \dot{P} 은 전기생산량 \dot{W} 와 열생산량 \dot{Q} 기호로 대체된다. 따라서, 전기와 열의 변동비원가를 식(5)와 식(6)으로, 그 원가의 비를 식(7)로, 고정비원가를 식(8)과 식(9)로 산정할 수 있다.

$$C_{U,W} = \kappa_W \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_W = \frac{\dot{K}_W}{\dot{W}} \quad (5)$$

$$C_{U,Q} = \kappa_Q \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_Q = \frac{\dot{K}_Q}{\dot{Q}} \quad (6)$$

$$C_{U,W} : C_{U,Q} = \frac{\kappa_W}{\kappa_W + \kappa_Q} : \frac{\kappa_Q}{\kappa_W + \kappa_Q} \quad (7)$$

$$C_{B,W} = \kappa_W \cdot \frac{\dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_W}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}} + \frac{\dot{Z}_W}{\dot{W}} \quad (8)$$

$$C_{B,Q} = \kappa_Q \cdot \frac{\dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_Q}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Q}} \quad (9)$$

한편, 가치에너지 \dot{K} 란 생산된 각 에너지의 가치를 동급으로 평가하기 위해 본 방법론에서 제시하는 어떤 에너지이다. 열병합발전의 경우 전기와 열의 가치를 동급으로 평가할 수 있는 어떤 에너지를 Table 1에 정리하였으며, 가치에너지로서 엔탈피(Enthalpy), 대체열(Alternative heat), 대체전기(Alternative electricity), 대체연료(Alternative fuel), 동일연료절약량(Equal fuel saving), 가역일(Reversible work)을 적용할 수 있다. 여기서, 가치에너지로서 엔탈피를 적용할 경우 기존의 Energy 방법과, 대체열을 적용할 경우 기존의 Proportional 방법과, 대체전기를 적용할 경우 기존의 Work 방법과, 대체연료를 적용할 경우 기존의 Benefit distribution 방법과, 동일연료절약량을 적용할 경우 기존의 Equal distribution 방법과 그 계산결과가 동일하다. 위의 방법론들은 회계학적인 방법론들로서 공학에서는 다루지 않고 있다. 따라서 공학적으로 접근하는 방법론이 새로이 제안될 수 있으며, 선행연구⁽⁹⁻¹⁰⁾에서 가치에너지로서 열역학 제 1법칙과 제 2법칙으로부터 유도되는 가역일을 제안하였으며, Reversible work 방법론이라 명하였다. 가치평가방법론은 기존 방법론뿐만 아니라 제안된 방법론까지 모두 포함한 방법론이다. 즉 가치에너지라는 통합된 설명 방식과 식(1)의 단일 수식을 적용하므로 명확하고 다양하게 원가산정 및 비용배분을 수행할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 만약 통합된 설명과 단일의 수식이 개발되지 않았다면, 각자의 방법론이 각자의 원리와 각자의 수식으로 원가산정을 수행하므로 상당히 이해하기 난해한 상황이 발생할 수 있을 것이다.

Table 1에는 각 방법론에 따른 가치에너지 \dot{K} 와 가치율 κ 가 정리되어 있다. Energy 방법에서는 가치평가기준으로 엔탈피를 적용하므로, 외부에서 시스템 내부로 투입되는 가치에너지량 \dot{K}_C 을 전기생산량 \dot{W} 와 열생산량 \dot{Q} 와의 합으로 보고, 이중 \dot{W} 의 에너지가 전기생산을 위해 투입된 가치에너지량 \dot{K}_W 으로, 그리고 \dot{Q} 의 에너지가 열생산을 위해 투입된 가치에너지량 \dot{K}_Q 으로 취급한다. 따라서 κ_W 와 κ_Q 모두 100%로 계산되며, 식

Table 1 Unification of previous methods to worth evaluation method

Allocation methods	Worth energy	Inflow of worth energy in common	Transfer of worth energy in private component		Worth ratio		
		component $\dot{K}_C =$	\dot{K}_W	+	\dot{K}_Q	κ_W	κ_Q
Energy	enthalpy	$\dot{W} + \dot{Q}$	\dot{W}		\dot{Q}	$\frac{\dot{W}}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}}$
Proportional	alternative heat	$\dot{F} \cdot \eta_{AQ}$	$\dot{F} \cdot \eta_{AQ} - \dot{Q}$		\dot{Q}	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{AQ} - \dot{Q}}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}}$
Work	alternative electricity	$\dot{F} \cdot \eta_{AW}$	\dot{W}	$\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}$		$\frac{\dot{W}}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}}{\dot{Q}}$
Benefit distribution	alternative fuel	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}}$		$\frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{1}{\eta_{AW}}$	$\frac{1}{\eta_{AQ}}$
Equal distribution	equal fuel saving (\dot{M})	\dot{F}	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}} - \frac{\dot{M}}{2}$		$\frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{1}{\eta_{AW}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{W}}$	$\frac{1}{\eta_{AQ}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{Q}}$
Reversible work	reversible work	$\dot{R}_W + \dot{R}_Q$	\dot{R}_W		\dot{R}_Q	\dot{R}_W / \dot{W}	\dot{R}_Q / \dot{Q}

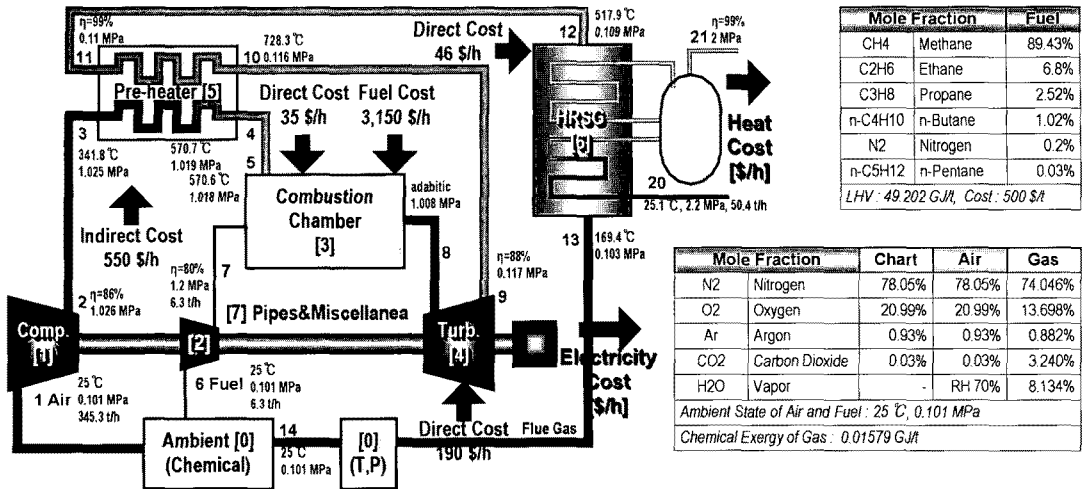
(7)로 부터 전기와 열의 원가비는 50% : 50%로 산정되고, 식(5)로부터 전기원가 그리고 식(6)으로부터 열원가를 산정할 수 있다. Proportional 방법에서는 가치평가기준으로 대체열을 적용하므로, 연료투입량 \dot{F} 에 어떤 대체열효율 η_{AQ} 을 곱하여 연료량을 대체열량 $\dot{F} \cdot \eta_{AQ}$ 으로 환산하고, 열생산을 위해 \dot{Q} 의 가치에너지가 투입되고, 전기생산을 위해 $\dot{F} \cdot \eta_{AQ} - \dot{Q}$ 의 가치에너지가 투입된다는 방법론이다. Work 방법에서는 가치평가 기준으로 대체전기를 적용하므로, 연료투입량 \dot{F} 에 어떤 대체전기효율 η_{AW} 을 곱하여 연료량을 대체전기량 $\dot{F} \cdot \eta_{AW}$ 으로 환산하고, 전기생산을 위해 \dot{W} 의 가치에너지가 투입되고, 열생산을 위해 $\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}$ 의 가치에너지가 투입된다는 방법론이다. Benefit distribution 방법에서는 가치평가기준으로 대체연료를 적용하므로, 전기생산을 위해 대체연료량 \dot{W}/η_{AW} 이 그리고 열생산을 위해 대체연료량 \dot{Q}/η_{AQ} 이 투입된다는 방법론이다. Equal distribution 방법에서는 가치평가기준으로 동일연료 절약량을 적용하므로, 전기 및 열생산을 위한 대체연료량 $\dot{W}/\eta_{AW} + \dot{Q}/\eta_{AQ}$ 과 실제 투입된 연료량 \dot{F} 과의 차이를 연료 절약량 \dot{M} 으로 보고, 이 연료절약량은 열측과 전기측에 동일하게 기여한다는 방법론이므로, 전기

생산을 위해 $\dot{W}/\eta_{AW} - \dot{M}/2$ 그리고 열생산을 위해 $\dot{Q}/\eta_{AQ} - \dot{M}/2$ 의 가치에너지가 투입된다는 방법론이다. 이상의 방법론은 회계학적인 방법론으로서 공학적인 근거는 없다는 것을 원가산정 수행 담당자는 이해해야 하겠다. Reversible work 방법에서는 가치평가기준으로 시스템 해석으로부터 계산되는 가역일 \dot{R} 을 적용하므로, 압축기, 터빈, 펌프 등의 구성기기에서 전기생산을 위해 \dot{R}_W 의 가역일이 투입되고, 배열회수보일러, 열교환기 등의 구성기기에서 열생산을 위해 \dot{R}_Q 의 가역일이 투입된다는 방법이다.

다양한 방법론으로 계산한 가치에너지량과 실제 생산된 에너지량과의 비 즉 가치율에 적용하면, Table 1과 같이 전기의 가치율 κ_W 와 열의 가치율 κ_Q 를 결정할 수 있고, 이 값을 식(5)에 적용하면 전기원가 C_W 를, 식(6)에 적용하면 열원가 C_Q 를, 식(7)에 적용하면 그 원가비 $C_W : C_Q$ 를 산정할 수 있다.

3. 열과 전기의 비용배분

압축기[1], 연료분사기[2], 연소기[3], 터빈[4], 예열기[5], 배열회수열교환기[6], 파이프 등의 기타 구성기기[7], 그리고 환경[0]으로 구성된 Fig. 1의



Mole Fraction		Fuel
CH4	Methane	89.43%
C2H6	Ethane	6.8%
C3H8	Propane	2.52%
n-C4H10	n-Butane	1.02%
N2	Nitrogen	0.2%
n-C5H12	n-Pentane	0.03%

LHV : 49,202 GJ/t, Cost : 500 \$/t

Mole Fraction	Chart	Air	Gas
N2	Nitrogen	78.05%	74.046%
O2	Oxygen	20.99%	13.698%
Ar	Argon	0.93%	0.882%
CO2	Carbon Dioxide	0.03%	3.240%
H2O	Vapor	-	8.134%

Ambient State of Air and Fuel : 25 °C, 0.101 MPa
Chemical Exergy of Gas : 0.01579 GJ/t

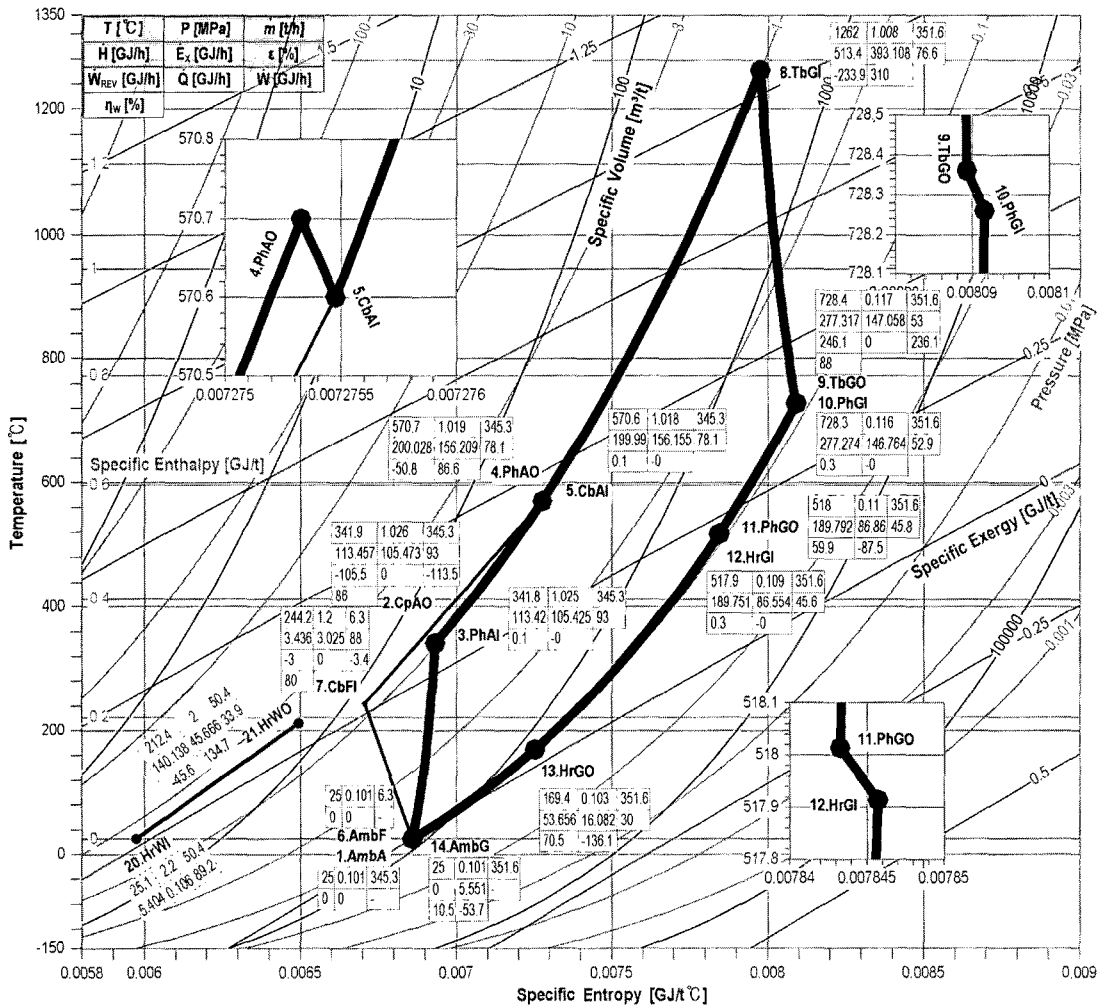


Fig. 1 Heat balance diagram on a gas-turbine cogeneration and system analysis on T-s chart.

가스터빈 열병합발전은 310.0 GJ/h의 연료 \dot{F} 를 투입 받아 119.2 GJ/h(33.1 MW)의 전기 \dot{W} 와 134.7 GJ/h(32.2 Gcal/h)의 증기 \dot{Q} 를 생산하는 전체 효율 81.9%의 시스템이다. 시스템 해석을 위해 폐사에서 자체 개발한 AirPlan 소프트웨어를 이용하였으며, Fig. 1에 시스템의 열평형선도와 T-s 선도 상에 온도, 압력, 질량유량, 엔탈피, 엑서지, 엑서지율, 가역일, 열생산량, 전기생산량, 효율이 출력되어 있다.

Table 2에는 시스템 해석으로부터 계산된 각 구성기기에서의 열량 \dot{Q}_{CV} , 전력량 \dot{W}_{CV} , 가역일 \dot{R} , 손실일 \dot{L} 값이 나와 있으며, 각 구성기기에서 열역학 제 1법칙적 해석과 제 2법칙적 해석이 모두 성립하고 있음을 보여주고 있다.

열과 전기의 원가산정 및 비용배분을 위해서는 Table 1과 같이 생산품의 가치를 κ_W, κ_Q 을 선행 결정해야 하며, Energy 방법과 Reversible work 방법을 제외하고 대체전기효율 η_{AW} 또는 대체열효율 η_{AQ} 값이 필요로 된다. 본 연구에서는 대체 전기효율로 시스템 자체의 전기효율 즉 전기생산량과 연료투입량의 비 38.45%를 적용하였으며, 대체열효율 값으로 임의의 보일러 효율 90%를 적용하고자 한다. 여기서, 연료투입량 \dot{F} 는 310.0 GJ/h, 전기생산량 \dot{W} 는 119.2 GJ/h, 열생산량 \dot{Q} 는 134.7 GJ/h이므로 Reversible work 방법론을 제외한 나머지 방법론에서의 전기의 가치율 κ_W 와 열의 가치율 κ_Q 를 Table 1을 통해 쉽게 계산할 수 있다.

Table 2 Each component analysis

Each Component	\dot{Q}_{CV} [GJ/h]	\dot{W}_{CV} [GJ/h]	\dot{R} [GJ/h]	\dot{L} [GJ/h]
[1] Compressor	0.0	-113.5	-106.5	8.0
[2] Fuel injector	0.0	-3.4	-3.0	0.4
[3] Combustion	310.0	0.0	75.7	75.7
[4] Turbine	0.0	236.1	246.1	10.0
[5] Pre-heater	-0.9	0.0	9.1	9.1
[6] HRSG	air	-136.1	70.5	24.9
	steam	134.7	-45.5	
[7] Pipes	-53.7	0.0	16.1	16.1
[0] Ambient	-0.2	0.0	0.7	0.7
SUM	119.2	119.2	264.1	144.9

전기와 열의 가치를 가역일로서 평가한다면, 열병합발전에서의 각 구성기기를 공통기기, 전기전용기기, 열전용기기로 구분⁽⁹⁾하는 것이 중요하다. Table 2에서 구성기기 [0, 3]은 공통기기로, 구성기기 [1, 2, 4]는 전기전용기기로, 구성기기 [6]는 열전용기기로의 구분이 명확하나, 구성기기 [5, 7]의 구분은 모호성이 존재하고 있다. 따라서 구성기기 [5, 7]을 공통기기로, 열전용기기로, 전기전용기기로 분류하는 세 가지 방안이 존재한다. 먼저 공통기기로 구분한다면 전기생산을 위해 투입한 가역일 $\dot{R}_{[1,2,4]}$ 은 Table 2로부터 137.6 GJ/h, 열생산을 위해 연소공기에서 투입한 가역일 $\dot{R}_{[6]}$ 은 Table 2로부터 70.5 GJ/h이므로, Table 1에 의해 전기의 가치율 κ_W 는 115.4% 그리고 열의 가치율 κ_Q 은 52.3%로 평가된다. 만약 전기전용기기로 구분한다면, 전기생산을 위해 투입한 가역일 $\dot{R}_{[1,2,4,5,7]}$ 은 147.4 GJ/h, 열생산을 위해 투입한 가역일 $\dot{R}_{[6]}$ 은 70.5 GJ/h이므로, 전기의 가치율 κ_W 은 123.6% 그리고 열의 가치율 κ_Q 은 52.3%로 평가된다. 열전용기기로 구분한다면, 전기생산을 위해 투입한 가역일 $\dot{R}_{[1,2,4]}$ 은 137.6 GJ/h, 열생산을 위해 투입한 가역일 $\dot{R}_{[6,5,7]}$ 은 80.3 GJ/h이므로, 전기의 가치율 κ_W 은 115.4% 그리고 열의 가치율 κ_Q 은 59.6%로 평가된다. 위의 세 가지 방안 중에서, 구성기기 [5, 7]를 전기전용기기로 구분할 경우 전기가치와 전기원가는 최대로 열가치와 열원가는 최소로 평가되고, 열전용기기로 구분할 경우 전기가치와 전기원가는 최소로 열가치와 열원가는 최대로 평가된다. 따라서 투입된 가역일을 가치평가 기준으로 할 경우 그 가치 및 원가는 위의 값들 사이에 존재한다는 결론이 도출된다. 한편, 열병합발전에서의 작동유체는 열과 전기를 동시에 생산하는데 공헌하는 것이므로 구성기기 [5, 7]를 공통기기로 구분하는 방안이 타당할 것으로 판단한다.

4. 결과 및 토의

Table 3에는 구매단가 42.5 \$/Gcal의 연료투입 비용 3,150 \$/h에 대해, Table 1의 다양한 방법론을 적용한 가치에너지량 \dot{K} 과 가치율 κ , 식(5)와 식(6)을 적용한 전기원가 C_W 와 열원가 C_Q , 식

Table 3 Results of worth evaluation by Table 1, cost estimating by Eq. (5) and (6), and cost allocation by Eq. (2) on the fuel cost(42.5 \$/Gcal). Where, \dot{D}_F is 3,150 \$/h, \dot{F} is 310.0 GJ/h, \dot{W} is 119.2 GJ/h, and \dot{Q} is 134.7 GJ/h.

Cost Allocation Method	η_{AW} [%]	η_{AQ} [%]	\dot{K}_C [GJ/h]	\dot{K}_W [GJ/h]	\dot{K}_Q [GJ/h]	κ_W [%]	κ_Q [%]	C_W [\$ /MWh]	C_Q [\$ /Gcal]	\dot{D}_W [\$ /h]	\dot{D}_Q [\$ /h]	η_{AW} [%]	η_{AQ} [%]		
1) Energy			253.9	119.2	134.7	100.0	100.0	44.7	50.0	51.9	50.0	1,479	46.9	1,671	53.1
2) Proportional		90.0	279.0	144.2	134.7	121.0	100.0	49.2	54.8	47.3	45.2	1,629	51.7	1,521	48.3
3) Work	38.45		119.2	119.2	0.0	100.0	0.0	95.1	100.0	0.0	0.0	3,150	100.0	0	0.0
4) Equal Dist.	38.45	90.0	310.0	235.1	74.9	197.3	55.6	72.2	78.0	23.6	22.0	2,389	75.9	761	24.1
5) Benefit Dist.	38.45	90.0	459.7	310.0	149.7	260.1	111.1	64.2	70.1	31.9	29.9	2,124	67.4	1,026	32.6
6.1) Rev. Work			218.6	137.6	70.5	115.4	52.3	62.9	68.8	33.2	31.2	2,083	66.1	1,067	33.9
6.2) "		Min.CQ	228.4	147.4	70.5	123.6	52.3	64.4	70.3	31.7	29.7	2,131	67.7	1,019	32.3
6.3) "		Max.CQ	228.4	137.6	80.3	115.4	59.6	60.1	65.9	36.1	34.1	1,989	63.1	1,161	36.9

(7)을 적용한 원가비 $C_W : C_Q$ 그리고 식(2)를 적용한 전기비용흐름 \dot{D}_W 과 열비용흐름 \dot{D}_Q 을 계산한 결과가 나와 있다. 이 결과들 중에서 핵심은 전기와 열에 대한 생산원가의 비이며, 추가적으로 Fig. 2에 도시되어 있다.

다양한 방법론으로 계산된 전기의 가치율 κ_W 과 열의 가치율 κ_Q 을 식(7)에 대입한 결과, Energy 방법에서는 전기와 열의 원가비를 50% : 50%, Proportional 방법에서는 54.8% : 45.2%, Work 방법에서는 100% : 0%, Equal distribution 방법에서

는 78.0% : 22.0%, Benefit distribution 방법에서는 70.1% : 29.9%, 그리고 Reversible work 방법에서는 68.8% : 31.2%로 산정되었다. 이 결과로부터 전기와 열의 원가산정 방법론 중, Energy 방법은 전기와 열의 원가가 같다고 산정되고, Proportional 방법은 전기와 열의 원가가 서로 비슷하게 산정되고, Work 방법은 열의 가격이 없다는 것으로 산정되므로 위의 방법론들은 본 시스템의 원가산정에 그 타당성이 낮다고 판단된다. 반면, Equal distribution 방법, Benefit distribution 방법, 그리고 Reversible work 방법은 본 시스템에서 생산된 열과 전기의 원가비를 타당성 있게 산정하고 있다고 판단된다.

그러나 Reversible work 방법을 제외한 나머지 방법들은 주어진 열병합발전을 해석하는 것이 아니라, 대체 시스템을 적용하는 회계학적 방법으로서, 대체전기효율 η_{AW} 및 대체열효율 η_{AQ} 값에 자의성이 상당히 내포되어 있으므로 그 산정 결과의 합리성 및 객관성이 공학적 측면에서 부족하다고 여겨진다. 또한 가스터빈 열병합발전, 증기터빈 열병합발전, 복합 열병합발전 등 시스템의 다양성 그리고 열전비, 부하율, 계절별, 시간대별 등 운전방식의 다양성을 반영하지 못한다는 단점이 있다. 열역학 제 2법칙에 기반을 두고 있는 가역일은 해석하고자 하는 시스템의 원가산정을 공학적 측면에서 수행 즉 시스템 및 운전방식의 다양성을 실시간 반영하므로, 합리성과 범

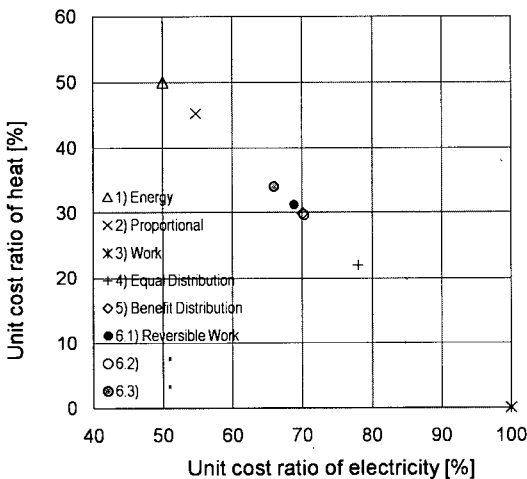


Fig. 2 Unit cost ratio from Table 2.

용성을 충분히 갖추고 있다고 판단한다.

5. 결 론

선행연구에서 제안한 가치평가방법의 정의는 각 제품의 원가는 그 가치에 비례한다이며, 다양한 시스템의 생산품에 적용할 수 있다. 그 적용은 1단계 시스템 해석, 2단계 각 제품의 가치평가, 3단계 원가산정, 4단계 공통비배분으로 수행되며, 열병합발전에서 엔탈피, 대체열, 대체전기, 동일연료절약량, 대체연료, 그리고 가역일을 열과 전기의 가치평가 기준으로 제시하였다.

본 연구에서는 제안된 방법을 119.2 GJ/h(33.1 MW)의 전기와 134.7 GJ/h(32.2 Gcal/h)의 증기를 생산하는 가스터빈 열병합발전에서 적용하였으며, 해석결과 전기와 열의 원가비는 엔탈피 기준일 경우 50% : 50%, 대체열 기준일 경우 54.8% : 45.2%, 대체전기 기준일 경우 100% : 0%, 동일연료절약량 기준일 경우 78.0% : 22.0%, 대체연료 기준일 경우 70.1% : 29.9%, 그리고 가역일 기준일 경우 68.8% : 31.2%로 산정되었다.

제안된 이론은 다양한 원가산정 결과를 제시하며, 이 중에서의 선택은 생산자와 구매자 즉 당사자가 합의해야 할 사항이므로, 본 연구에서조차 그 옳고 그름을 결정지을 수는 없다. 그러나 가역일 기준은 열역학 제 1법칙과 제 2법칙을 기반으로 해석대상의 시스템을 실시간 그리고 직접적으로 가치평가함으로 합리성과 객관성을 충분히 갖추고 있다고 판단한다.

향후 다양한 복합 에너지 시스템을 대상으로 각 방법론을 보다 세부적으로 비교 검토하여, 본 방법론의 합리성 및 범용성을 지속적으로 검토할 예정이다.

참고문헌

1. Carolyn, G., 2003, Regulation of heat and electricity produced in combined-heat-and-power plants, The world bank, Washington, D. C.
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 CGAM problem, Energy, Vol. 19, No. 3, pp. 365-381.
4. Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. J., 1996, Thermal design and optimization, Wiley, New York.
5. Tsatsaronis, G. and Pisa, J., 1994, Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems-application to the CGAM problem, Energy, Vol. 19, No. 3, pp. 287-321.
6. 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.
7. Oh, S. D., Pang, H. S., Kim, S. M., and Kwak, H. Y., 1996, Exergy analysis for a gas turbine cogeneration system, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 118, pp. 781-791.
8. 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.
9. Kim, D. J., 2003, Suggestion of power and heat costing for an energy system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 360-371.
10. Kim, D. J., 2008, A new cost allocation method on the multi-products of energy systems, Report of Enecos Inc. Available on : www.enecos.com
11. Kim, D. J., 2008, Cost allocation of heat and electricity on a steam-turbine cogeneration, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 624-630.
12. Kim, D. J., 2008, A suggestion for the worth evaluation of warm air and the allocation methodology of heating cost, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 654-661.