

복합열병합발전에서 생산된 전기와 온수의 원가산정

김 덕 진[†]

에너코스

Cost Estimating of Electricity and Hot Water on a Combined Cycle Cogeneration

Deok-Jin Kim[†]

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 electricity and heat 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 wonergy methodology that can be applied to any system. The definition of this methodology is that the cost flow of the product is proportion to the amount of wonergy input. Where, wonergy is an energy that can equally evaluate the worth of each product. Any energy can be applied to the wonergy. In this study, we applied this methodology to a combined cycle cogeneration that produces 314.1 MW of electricity and 279.4 Gcal/h of hot water, and then we allocated 26,900 \$/h of fuel cost to electricity cost and hot water cost. Also, we compared with various cost allocation methods. As the result, we conclude that the exergy method evaluates the worth of electricity and heat most reasonably.

Key words: Thermoeconomics(열경제학), Exergy(엑서지), CHP(열병합발전), Cost estimating (원가산정), Cost allocation(비용배분), Unit cost(원가), Heating price(열요금)

1. 서 론

단일 시스템으로부터 두 종류 이상의 제품이 생산될 경우, 연료종류, 발전방식, 운전방식 등에 따른 각 제품으로의 비용배분 방법론은 생산자와 구매자의 손익에 직접적으로 관계되기 때문에 매우 중요하다. 대표적인 복합생산물은 열병합발전(CHP, Cogeneration)에서 생산된 전기와 열이며, 공통비로는 연료비, 동력비, 용수비, 인건비, 초기투자비, 감가상각비, 유지보수비, 각종 세액 등이

해당 된다.

열병합발전에서 생산된 열과 전기에 대한 대표적인 원가산정 및 비용배분 방법론에는, The World Bank의 기술보고서⁽¹⁾에서 소개되어 있듯이, Energy 방법, Proportional 방법, Work 방법, Equal distribution 방법, Benefit distribution 방법 등이 있으며 통칭하여 대체설비방법이라 불린다. 일반적으로 국내에서 감발량보상방식이라 불리는 Work 방법과 E.Shuly 방식이라 불리는 Benefit distribution 방법이 열과 전기의 비용배분에 많이 적용되고 있다.

대표적인 엑서지적 방법론에는, 엑서지경제학(Exergoeconomics)에 대한 리뷰논문⁽²⁾에서 소개되어 있듯이, the theory of the exergetic cost

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

(TEC), intelligent functional approach (IFA), thermoeconomic functional analysis (TFA), the structural theory of thermoeconomics (STT), the theory of exergetic cost-disaggregating methodology (TECD), last-in-first-out principle (LIFO), specific exergy costing/average cost approach (SPECO/AVCO), modified productive structure analysis (MOPSA), and engineering functional analysis (EFA)이 있다.

한편, 선행연구⁽³⁾에서 워너지 방법론(Wonergy methodlogy)을 새로이 제안한 바 있다. 워너지란 생산품의 가치를 동급으로 평가할 수 있는 어떤 에너지이며, 개인의 판단에 따른 상대적인 개념이다. 이 방법론은 기존의 대체설비 방법론을 단일의 원리와 단일의 수식으로 통합하고 있다. 이 방법론을 22.2 MW의 전기와 44.4 Gcal/h의 온수를 생산하는 증기터빈열병합발전⁽⁴⁾ 그리고 33.1 MW의 전기와 564.0 Gcal/h의 증기를 생산하는 가스터빈열병합발전⁽⁵⁾에 적용하여 전기, 증기, 온수의 원가산정 및 비용배분을 수행한 바 있다.

제안된 방법론의 범용성과 합리성을 확인하기 위해서는 다양한 시스템에 적용하여 그 원가산정과 비용배분 결과를 비교 검토해야 하는바, 본 연구에서는 전기 1,131 GJ/h(314.1 MW)와 온수 1,170 GJ/h(279.4 Gcal/h)를 생산하는 전체효율 86.9%의 복합열병합발전을 대상으로, 연료 투입비 26,471 \$/h를 전기와 온수로 각각 배분하여 그 원가산정 및 비용배분을 수행하고, 기존의 방법론들과 결과를 비교 검토하고자 한다.

2. 워너지 방법론의 이해

선행 연구⁽³⁾에서 제안한 바와 같이 워너지방법의 정의는 식(1)과 같이 생산비용은 워너지 투입량에 비례한다 이며, 연료의 투입비용에 대한 전기의 비용배분은 식(2), 열의 배용배분은 식(3), 전기원가는 식(4), 열원가는 식(5), 그리고 전기와 열의 원가비는 식(6)으로 산정할 수 있다.

$$\dot{D}_W : \dot{D}_Q = \frac{\dot{K}_W}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} : \frac{\dot{K}_Q}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} \quad (1)$$

$$\dot{D}_W = \frac{\dot{K}_W}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} \cdot \dot{D}_F \quad (2)$$

$$\dot{D}_Q = \frac{\dot{K}_Q}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} \cdot \dot{D}_F \quad (3)$$

$$C_W = \dot{D}_W / \dot{W} \quad (4)$$

$$C_Q = \dot{D}_Q / \dot{Q} \quad (5)$$

$$C_W : C_Q = \frac{\kappa_W}{\kappa_W + \kappa_Q} : \frac{\kappa_Q}{\kappa_W + \kappa_Q} \quad (6)$$

$$|where| \kappa_W = \dot{K}_W / \dot{W}, \kappa_Q = \dot{K}_Q / \dot{Q}$$

여기서, \dot{D}_W 는 전기생산비용, \dot{D}_Q 는 열생산비용, \dot{K}_W 는 전기생산을 위한 워너지 투입량, \dot{K}_Q 는 열생산을 위한 워너지 투입량, \dot{D}_F 는 연료의 투입비용, \dot{W} 는 전기생산량, \dot{Q} 는 열생산량, C_W 는 전기원가, C_Q 는 열원가, κ_W 는 전기의 워너지 투입율, κ_Q 는 열의 워너지 투입율이다. 위 수식에서 워너지 투입량 \dot{K} 또는 워너지 투입율 κ 을 제외하면 모두 사전에 주어지는 값들이므로, 이 값을 결정하는 것이 본 방법론의 핵심이다.

워너지란 생산된 전기와 열의 가치를 동급으로 평가하기 위해 본 방법론에서 정의한 어떤 에너지이며, 워너지 투입율 κ 은 워너지 투입량과 에너지 생산량과의 비이다. 열병합발전의 경우에 적용될 수 있는 워너지를 Table 1에 정리하였으며, 엔탈피(Enthalpy), 대체열(Alternative heat), 대체전기(Alternative electricity), 동일연료절약량(Equal fuel saving), 대체연료(Alternative fuel), 보상연료(Compensated fuel), 엑서지(Exergy)가 적용⁽³⁾될 수 있다. 여기서 엔탈피는 기존의 Energy 방법, 대체열은 기존의 Proportional 방법, 대체전기는 기존의 Work 방법, 동일연료절약량은 기존의 Equal distribution 방법, 그리고 대체연료는 기존의 Benefit distribution 방법과 그 계산결과가 같다. 보상연료와 엑서지는 본 방법론에서 새롭게 제안된 워너지이다.

이 테이블에서, \dot{F} 는 연료의 투입열량, $\eta_{A,W}$ 는 어떤 발전시스템의 발전효율, $\eta_{A,Q}$ 는 어떤 열전용보일러에서의 열효율이며, 각각 대체전기효율, 대체열효율이라 불린다. 엑서지방법을 적용하기 위해서는 전기를 생산하기 위해 투입된 엑서지량 $\Delta \dot{E}_{X,W}$ 과 열을 생산하기 위해 투입된 엑서지량 $\Delta \dot{E}_{X,Q}$ 값이 사전에 주어져야 하며, 열역학적인 시스템 해석이 필요하다.

Table 1 Unification of alternative methods and exergy method to wonergy method.

Allocation methods	Wonerger	Amount of wonergy input			Ratio of wonergy input	
		Common \dot{K}_C	= Electricity \dot{K}_W	+ Heat \dot{K}_Q	κ_W	κ_Q
Energy	enthalpy	$\Delta\dot{H}_W + \Delta\dot{H}_Q$	$\Delta\dot{H}_W$	$\Delta\dot{H}_Q$	$\frac{\Delta\dot{H}_W}{\dot{W}} \approx 1$	$\frac{\Delta\dot{H}_Q}{\dot{Q}} \approx 1$
Proportional	alternative heat	$\dot{F} \cdot \eta_{A,Q}$	$\dot{F} \cdot \eta_{A,Q} - \dot{Q}$	\dot{Q}	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{A,Q} - \dot{Q}}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}} = 1$
Work	alternative electricity	$\dot{F} \cdot \eta_{A,W}$	\dot{W}	$\dot{F} \cdot \eta_{A,W} - \dot{W}$	$\frac{\dot{W}}{\dot{W}} = 1$	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{A,W} - \dot{W}}{\dot{Q}}$
Benefit distribution	alternative fuel	$\frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}}$	$\frac{1}{\eta_{A,W}}$	$\frac{1}{\eta_{A,Q}}$
Equal distribution	equal fuel saving(\dot{M})	$\dot{M} = \frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}} - \dot{F}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{1}{\eta_{A,W}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{W}}$	$\frac{1}{\eta_{A,Q}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{Q}}$
Merit distribution	compensated fuel	$\frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}^M}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{A,W}}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_{A,Q}^M}$	$\frac{1}{\eta_{A,W}}$	$\frac{1}{\eta_{A,Q}^M}$
Exergy	reversible work	$\Delta\dot{E}_{X,W} + \Delta\dot{E}_{X,Q}$	$\Delta\dot{E}_{X,W}$	$\Delta\dot{E}_{X,Q}$	$\frac{\Delta\dot{E}_{X,W}}{\dot{W}}$	$\frac{\Delta\dot{E}_{X,W}}{\dot{Q}}$

Table 2 Values on each term of Table 1.

Term	Equation	Value	Unit
C_F		10.0	\$/GJ
\dot{D}_F		2,6471	\$/h
\dot{F}		2647.1	GJ/h
\dot{W}_{net}^{GT}		902.3	GJ/h
$\dot{Q}_{[10]}^{GT} \approx \dot{W}_{net}^{ST} + \dot{Q}/\eta_{A,Q}^{ST}$		1398.1	GJ/h
$\eta_{A,W}^{GT}$		50.8	%
$\eta_{A,Q}^{GT}$		90.0	%
$\eta_{A,Q}^{M,GT}$	From the reference ⁽³⁾	115.6	%
$\Delta\dot{E}_{X,W}^{GT} = \dot{E}_{X,1,3,5} - \dot{E}_{X,2,4,6}$		1036.2	GJ/h
$\Delta\dot{E}_{X,Q}^{GT} = \dot{E}_{X,7} - \dot{E}_{X,8}$		705.5	GJ/h
$\dot{Q}_F^{ST} = \dot{F} - \dot{W}_{net}^{GT}$		1744.8	GJ/h
\dot{W}_{net}^{ST}		228.5	GJ/h
\dot{Q}		1169.6	GJ/h
$\eta_{A,W}^{ST} \approx (\dot{F} \cdot \eta_{A,W}^{GT} - \dot{W}_{net}^{GT}) / \dot{Q}_F^{ST}$		25.4	%
$\eta_{A,Q}^{ST}$		100.0	%
$\eta_{A,Q}^{M,ST}$	From the reference ⁽³⁾	89.6	%
$\Delta\dot{E}_{X,W}^{ST} = \dot{E}_{X,20,22,26} - \dot{E}_{X,21,23,24,27,28}$		250.0	GJ/h
$\Delta\dot{E}_{X,Q}^{ST} = \dot{E}_{X,29,30} - \dot{E}_{X,31}$		348.4	GJ/h
\dot{W}		1130.8	GJ/h

3. 엑서지 계산을 위한 시스템 해석

Fig. 1은 압축기 [1], 연료분사기 [2], 연소기 [3], 가스터빈 [5], 기타구성기기 [9], 배열회수보일러 [10], 증기터빈 [11], 펌프 [12], 히터 [13], 열교환기 [14], 그리고 환경 [0]으로 구성된 전체 효율 86.9%의 복합열병합발전이다. 시스템 해석을 위해 자체 개발한 소프트웨어를 이용하였으며, Fig. 1에 시스템의 개략도와 T-s 선도 상에 시스템의 운전상태가 출력되어 있다.

주어진 시스템에서 전기 전용기기는 압축기 [1], 연료분사기 [2], 가스터빈 [5], 증기터빈 [11], 펌프[12]이고 열 전용기기는 배열회수보일러 [10]와 열교환기 [14] 이다. 복합 열병합발전은 가스터빈사이클(GT)과 증기터빈사이클(ST)로 나누어지며, Table 1의 각 항을 계산하기 위한 값들이 Table 2에 정리되어 있다. 엑서지의 환경상태로 15°C, 101.325 kPa을 적용하였으며, $\eta_{A,W}^{GT}$ 는 본 시스템의 복합발전효율, $\eta_{A,Q}^{GT}$ 는 어떤 보일러의 열효율, $\eta_{A,Q}^{ST}$ 는 열교환기효율, 그리고 $\eta_{A,Q}^{M,GT}$ 과 $\eta_{A,Q}^{M,ST}$ 는 선행연구⁽³⁾에서 제안한 수식으로부터 산정하였다.

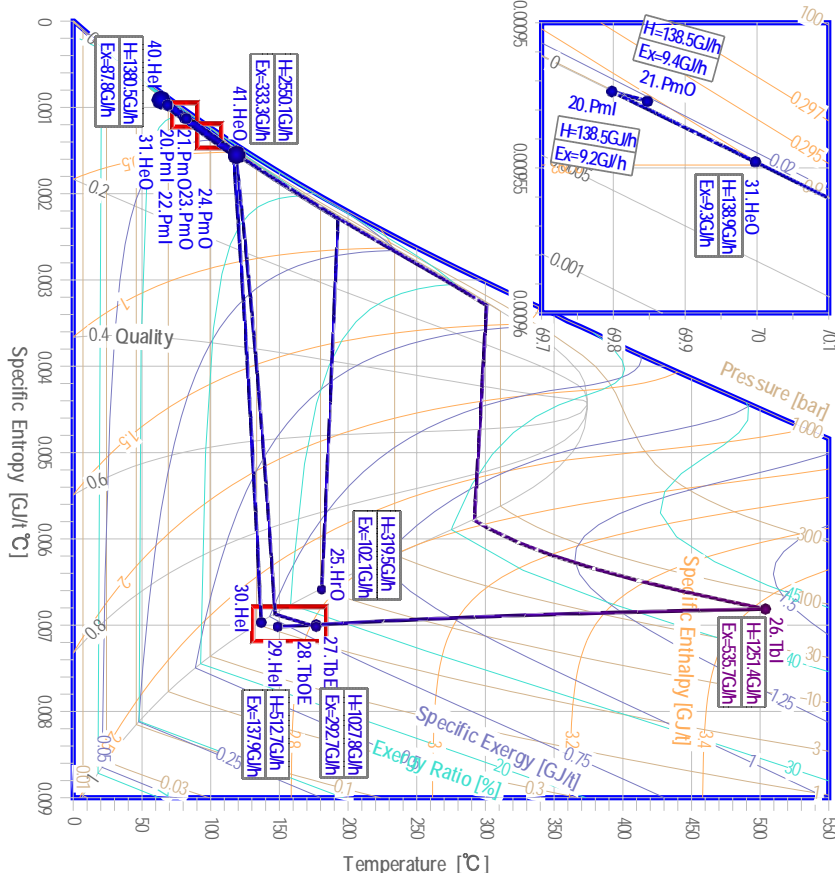
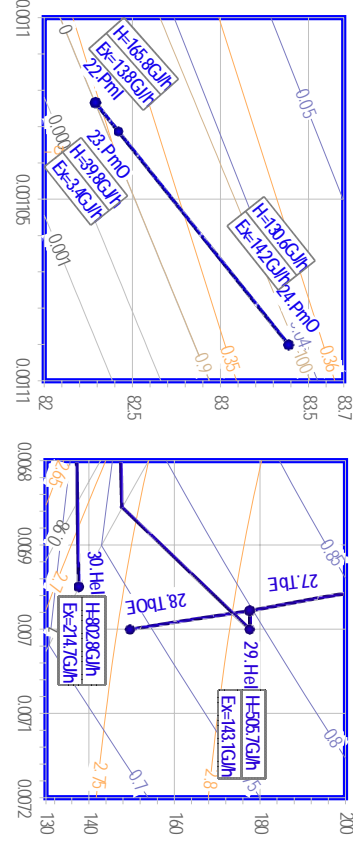
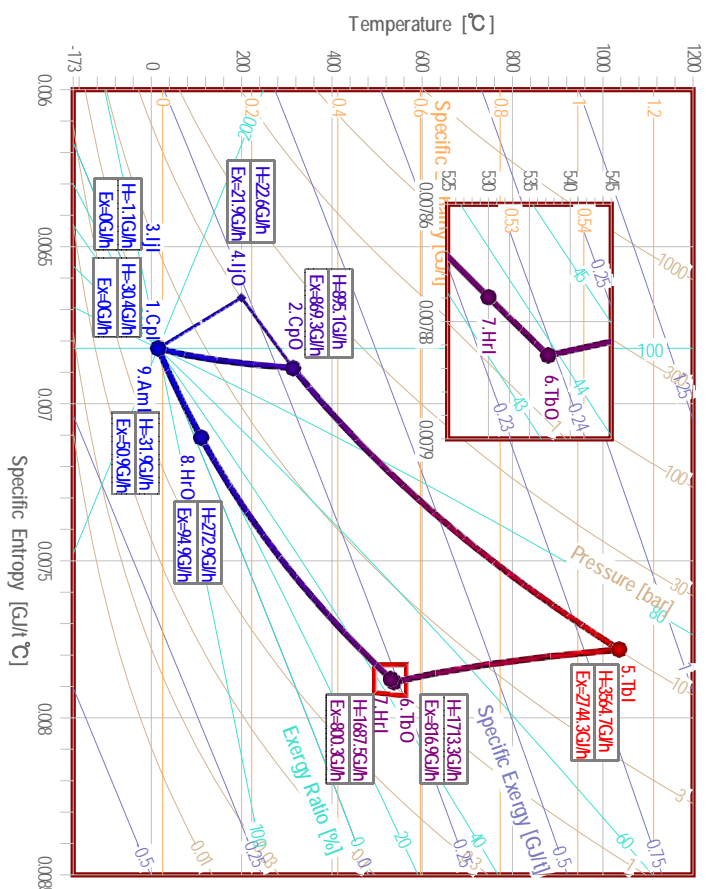
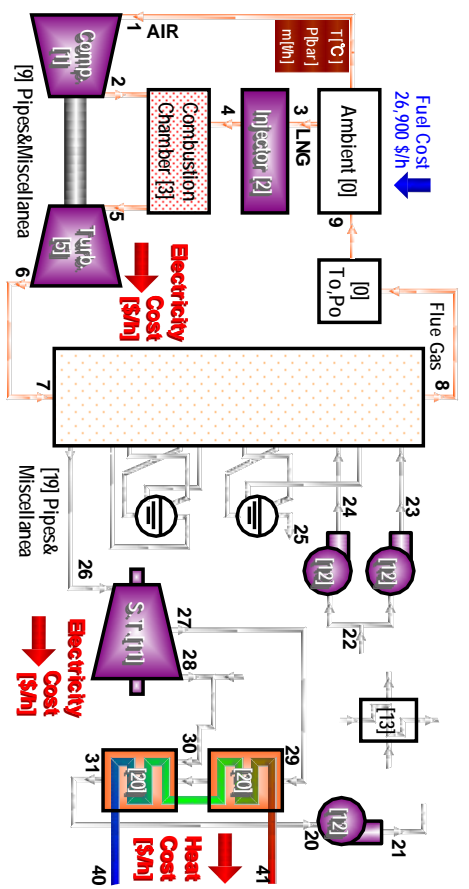


Fig. 1 Heat balance diagram on a combined cycle cogeneration and system analysis on T-s chart.

Table 3 Results of cost allocation and cost estimating on the combined cycle cogeneration.

Cost Allocation Method	\dot{D}_W		\dot{D}_Q		C_Q		C_W	
	\$/h	%	\$/h	%	\$/GJ	%	\$/GJ	%
1) Energy	13,012.3	49.2	13,458.7	50.8	11.507	50.0	11.507	50.0
2) Proportional	16,057.7	60.7	10,413.3	39.3	14.200	61.5	8.903	38.5
3) Work	22,259.8	84.1	4,211.2	15.9	19.685	84.5	3.601	15.5
4) Equal Distribution	19,477.5	73.6	6,993.5	26.4	17.225	74.2	5.979	25.8
5) Benefit Distribution	19,495.4	73.6	6,975.6	26.4	17.240	74.3	5.964	25.7
6) Merit Distribution	20,092.7	75.9	6,378.3	24.1	17.769	76.5	5.453	23.5
7) Exergy	20,228.2	76.4	6,242.8	23.6	17.888	77.0	5.338	23.0

4. 원가산정 및 비용배분 수식

Fig. 1의 복합열병합발전은 가스터빈사이클(GT)과 증기터빈사이클(ST)로 구분된다. 따라서 식(2)와 식(3)을 반복 적용하고, Table 2의 데이터를 Table 1에 적용하면 복합열병합발전에 대해 다음의 수식으로부터 전기와 열의 비용배분을 수행할 수 있다.

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

$$\dot{D}_Q^{GT} = \frac{\dot{K}_Q^{GT}}{\dot{K}_W^{GT} + \dot{K}_Q^{GT}} \cdot \dot{D}_F \quad (8)$$

$$\dot{D}_W^{ST} = \frac{\dot{K}_W^{ST}}{\dot{K}_W^{ST} + \dot{K}_Q^{ST}} \cdot \dot{D}_Q^{GT} \quad (9)$$

$$\dot{D}_Q^{ST} = \frac{\dot{K}_Q^{ST}}{\dot{K}_W^{ST} + \dot{K}_Q^{ST}} \cdot \dot{D}_Q^{GT} \quad (10)$$

$$\dot{D}_W = \dot{D}_W^{GT} + \dot{D}_W^{ST} \quad (11)$$

$$\dot{D}_Q = \dot{D}_Q^{ST} \quad (12)$$

5. 결과 및 토의

Table 3에는 Table 2의 데이터, Table 1의 워너지 투입량, 식(11)의 전기비용흐름, 식(12)의 열비용흐름, 식(1)의 비용흐름의 비, 식(4)의 전기원가, 식(5)의 열원가, 그리고 식(6)의 원가비가 계산되어 있다. 이 결과들 중에서 가장 중요한 것은 열의 원가비이며, Energy 방법이 50%로 가장 높게 그리고 Work 방법이 15.5%로 가장 낮게 산정되었다. 전기와 열의 합리적인 판매가를 책정

하기 위해서는 원가산정이 필수적이며, 위의 7개의 결과들 중에서 가장 합리적이라고 평가되는 결과를 선택해야만 한다. 그러나 위의 데이터만으로는 그 합리성을 평가할 수가 없다. 즉 합리성의 판단은 다양한 시스템을 해석한 결과들을 종합적으로 판단해야 하기 때문이다.

따라서 선행연구⁽³⁾의 결과를 인용하고자 하며, Fig. 2에는 11개의 시스템을 7 종류의 방법으로 해석한 열원가의 비 그리고 Fig. 3에는 증기터빈 열병합에서 열전비의 변화에 따른 6 종류의 방법으로 해석한 열원가의 비가 도시되어 있다.

각 방법론의 합리성은 Fig. 2와 Fig. 3을 기준으로 다음의 항목에 의해 평가될 수 있다.

- [1] 총투입비용과 총산출비용은 정확히 같은가?
- [2] 열원가비는 15%~35% 정도로 산정되는가?
- [3] 열전비에 따라 열원가가 변하는가?
- [4] 컨텐싱모드의 응축열 원가는 0 \$/GJ인가?
- [5] 열생산으로부터 이득을 얻을 수 있는가?
- [6] 비표준 열병합에서도 적용될 수 있는가?
- [7] 모두가 그 방법론을 쉽게 이해하는가?
- [8] 열역학적 근거에 기반하고 있는가?

위의 문항에서 어떤 항목을 비용배분 담당자가 삭제할 수도 있고 또한 새로이 추가할 수도 있다. Table 4에 각 방법론의 합리성을 평가한 결과가 나와 있다. Exergy 방법이 가장 합리적이라 평가된다. Fig. 2의 결과로부터 Merit distribution 방법은 Exergy 방법 보다 약 0.4% 정도 높게 산정한다. 따라서 표준 열병합발전을 해석할 경우 Merit distribution 방법 역시 합리적이라 평가할 수 있으며, 이 방법은 시스템 도입을 위한 경제성 검토 등에서 쉽게 적용될 수 있다.

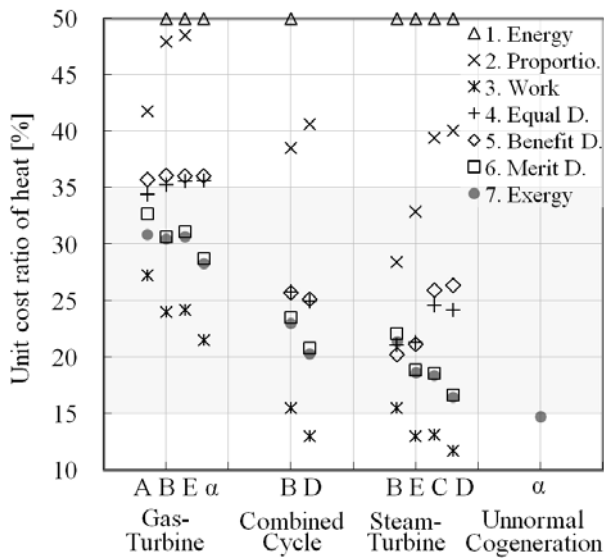


Fig. 2 Unit cost ratios of heat applying seven methods to eleven cogenerations.

Table 4 Evaluation of the rationality.

Method	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	Total
1) Energy	O				O		O		3
2) Proportional	O		O		O		O		4
3) Work	O	O	O	O			O		5
4) Equal Dist.	O	O	O		O		O		5
5) Benefit Dist.	O	O			O		O		4
6) Merit Dist.	O	O	O	O	O		O		6
7) Exergy	O	O	O	O	O	O		O	7

6. 결론

원가산정 및 비용배분에 대한 선행연구에서 워너지 방법론의 통합수식과, 엔탈피, 대체열, 대체연료, 동일연료절약량, 대체연료, 보상연료, 엑서지 즉 7 종류의 워너지를 제안한 바 있다. 본 연구에서는 워너지 방법론을 복합열병합발전에 적용하여 전기와 열의 비용을 배분하였다.

해석결과 열의 원가비는 엔탈피 기준일 경우 50%, 대체열 기준일 경우 38.5%, 대체전기 기준일 경우 15.5%, 동일연료절약량 기준일 경우 25.8%, 대체연료 기준일 경우 25.7%, 보상연료 기준일 경우 23.5%, 그리고 엑서지 기준일 경우 23.0%로 산정되었다.

계산된 값들은 복합열병합의 열전비 1.03을 해석한 값이다. 한달 또는 일년 동안 열전비는 실시간 변하므로 그 산정값 또한 실시간 변하게 된다. 따라서 한달 또는 일년을 해석하려면, 그 기

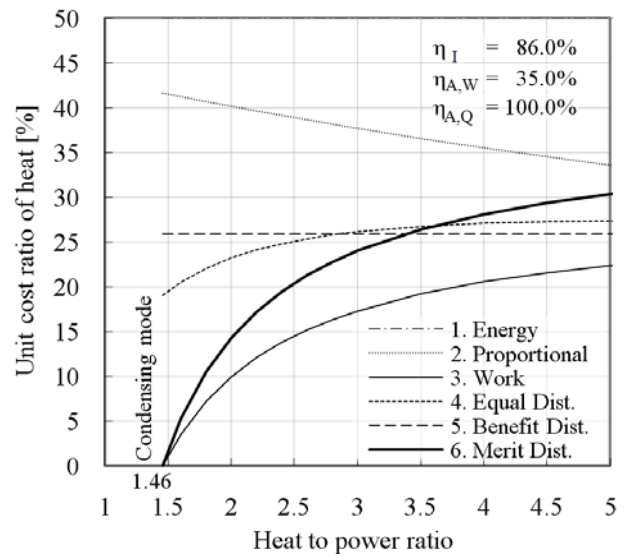


Fig. 3 Relation of the heat unit cost ratio and the heat-to-power ratio by six methods.

간만큼의 실시간 발전 데이터를 제안된 수식 반복 적용해야 한다.

제안된 이론은 다양한 원가산정 결과를 제시하며, 이 중에서의 선택은 생산자와 구매자 즉 당사자가 합의해야 할 사항이다. 그러나 엑서지 기준은 열역학 제 1법칙과 제 2법칙을 기반으로 해석대상의 시스템을 실시간 그리고 직접적으로 가치평가함으로 합리성과 객관성을 충분히 갖추고 있다고 판단한다.

참고문헌

1. Carolyn, G., 2003, Regulation of heat and electricity produced in combined-heat-and-power plants, The World Bank, Washington, D. C.
2. Abusoglu, A., Kanoglu, M., 2009, Exergo-economic analysis and optimization of combined heat and power production: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 2295-2308.
3. Kim, D. J., 2009, A new thermoeconomic methodology for energy systems, Energy, In press.
4. 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.
5. Kim, D. J., 2008, Cost estimating of electricity and steam on a gas-turbine cogeneration, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 252-259.