

가스터빈 열병합발전에서 생산된 열과 전기의 원가산정

김 덕 진[†]

에너코스

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

Deok-Jin Kim[†]

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

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 heat, and then we allocated 3,150 \$/h of fuel cost to electricity cost and heat cost. Also, we compared with various cost allocation methods. As the result, we conclude that exergy of various kinds of worth basis evaluates the worth of heat and electricity most reasonably on this system.

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} : 에너지 산출량 [GJ/h]

\dot{Q} : 열 산출량 [GJ/h]

\dot{W} : 전기 산출량 [GJ/h]

\dot{Z} : 간접비 및 구성기기의 비용흐름 [\$/h]

그리스 문자

ε : 엑서지율

η : 효율

κ : 가치율

하첨자

A : 대체 시스템

B : 고정비

C : 전기와 열 생산의 공통구성기기

CV : 검사체적

ID : 간접비

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

$LOST$: 비가역
 F : 연료
 Q : 열
 REV : 가역
 W : 전기
 U : 변동비

1. 서론

단일 시스템으로부터 두 종류 이상의 제품이 생산될 경우, 연료종류, 발전방식, 운전방식 등에 따른 각 제품으로의 공통비(Common Cost) 배분 방법론은 생산자와 구매자의 손익에 직접적으로 관계되기 때문에 매우 중요하다. 대표적인 복합 생산물은 열병합발전(Cogeneration, CHP)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, 현재까지 전기요금, 난방요금, 냉방요금, 냉수요금 등의 다양한 요금 책정 및 원가산정 연구가 진행되고 있다. 열병합 발전에서 생산된 전기와 열에 대한 대표적인 원가산정 방법론에는 The World Bank Technical Paper⁽¹⁾에서 소개되었듯이, Energy 방법, Work 방법, Proportional 방법, Benefit distribution 방법, Alternative heat 방법, Alternative electricity 방법 등이 있다. 여기에 많은 공학자들이 열역학 제 2법칙에 기반을 둔 엑서지적 방법들을 제안해 오고 있으며, 대표적인 방법들로는, the exergetic cost theory^(2,3), the average cost approach⁽⁴⁾, the specific cost exergy costing^(5,6), the modified productive structure analysis^(7,8) 등이 있다.

한편, 우리는 선행연구에서 Reversible Work 방법론을 새롭게 제안⁽⁹⁾하였고, 기존의 엑서지적 방법론과의 차이점을 밝힌바 있다. 최근 연구에서는 제안한 방법론과 The World Bank Technical Paper에서 소개된 방법론을 통합한 가치평가 방법(Worth Evaluation Method)⁽¹⁰⁾을 제안하여, 22.2 MW의 전기와 44.4 Gcal/h의 열을 생산하는 증기터빈열병합발전⁽¹¹⁾ 그리고 4개의 실에 온기를 배분하는 난방시스템⁽¹²⁾에 적용하여 각 생산물의 원가를 산정한바 있다.

제안된 방법은 각 제품의 원가는 그 가치에 비례한다고 정의되며, 유형의 제품뿐만 아니라 무형의 서비스까지 다양하게 적용되어 각 제품의 원가를 산정할 수 있다는 것이 기존 방법론에 비해 가장 큰 특징이다.

본 연구에서는 가치평가방법의 적용 예로서, 전기 119.2 GJ/h(33.1 MW)와 열 134.7 GJ/h(564.0 Gcal/h)을 생산하는 가스터빈 열병합발전을 대상으로, 연료 투입비용 3,150 \$/h을 전기와 열로 각각 배분하여 그 원가를 산정하고, 기존의 방법론들과 그 결과를 비교 검토하고자 한다.

2. 생산품의 가치평가

선행 연구⁽¹⁰⁾에서 제안한 바와 같이 가치평가방법의 정의는 생산원가는 제품의 가치에 비례한다이며, 그 원가산정 수식은 다음과 같다.

$$C_i = \kappa_i \cdot \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\sum_{i=1}^N \kappa_i \dot{P}_i} + \frac{\dot{Z}_i}{\dot{P}_i} \quad (1)$$

$$\dot{D}_i = C_i \cdot \dot{P}_i \quad \text{where, } \kappa_i = \frac{\dot{K}_i}{\dot{P}_i} \quad (2)$$

여기서, 하첨자 i 는 N 개의 생산 제품 중 i 번째 생산품, 기호 C 는 생산원가, κ_i 은 전달된 가치에너지량 \dot{K}_i 과 생산된 에너지량 \dot{P}_i 과의 비율 즉 가치율, \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, \dot{D}_i 는 i 번째 제품으로 배분된 비용이다.

위의 수식을 전기와 열을 생산하는 열병합발전에 대입하면 다음의 수식으로써 전기와 열의 변동비원가와 고정비원가를 산정할 수 있다.

$$C_{U,W} = \kappa_W \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_W = \frac{\dot{K}_W}{\dot{W}} \quad (3)$$

$$C_{U,Q} = \kappa_Q \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_Q = \frac{\dot{K}_Q}{\dot{Q}} \quad (4)$$

$$C_{U,W} : C_{U,Q} = \frac{\kappa_W}{\kappa_W + \kappa_Q} : \frac{\kappa_Q}{\kappa_W + \kappa_Q} \quad (5)$$

Table 1 Unification of previous methods to worth method

Allocation methods	Worth Evaluation	Inflow in common component			Transfer in private component		Worth ratio	
		$\dot{K}_C =$	\dot{K}_W	+	\dot{K}_Q	κ_W	κ_Q	
Energy	Enthalpy	$\dot{W} + \dot{Q}$	\dot{W}		\dot{Q}	100%	100%	
Proportional	alternative heat	$\dot{F} \cdot \eta_{AQ}$	$\dot{F} \cdot \eta_{AQ} - \dot{Q}$		\dot{Q}	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{AQ} - \dot{Q}}{\dot{W}}$	100%	
Work	alternative electricity	$\dot{F} \cdot \eta_{AW}$	\dot{W}		$\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}$	100%	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}}{\dot{Q}}$	
Equal distribution	equal fuel saving(\dot{M})	\dot{F}	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}} - \frac{\dot{M}}{2}$		$\frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{1}{\eta_{AW}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{W}}$	$\frac{1}{\eta_{AQ}} - \frac{\dot{M}}{2\dot{Q}}$	
Benefit distribution	alternative fuel	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}}$		$\frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{1}{\eta_{AW}}$	$\frac{1}{\eta_{AQ}}$	
Reversible Work	Reversible Work Input	$\dot{W}_{REV,W} + \dot{W}_{REV,Q}$	$\dot{W}_{REV,W}$		$\dot{W}_{REV,Q}$	$\dot{W}_{REV,W} / \dot{W}$	$\dot{W}_{REV,Q} / \dot{Q}$	

$$C_{B,W} = \kappa_W \cdot \frac{\dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}} + \frac{\dot{Z}_W}{\dot{W}} \quad (6)$$

$$C_{B,Q} = \kappa_Q \cdot \frac{\dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Q}} \quad (7)$$

여기서 하첨자 U 는 변동비, B 는 고정비, F 는 연료, W 는 전기 그리고 Q 는 열을 뜻한다.

한편, 가치에너지란 생산된 각 에너지의 가치를 동급으로 평가하기 위해 본 이론에서 제시하는 어떤 에너지로서, Table 1에 가치에너지를 엔탈피, 대체열, 대체전기, 동일연료절약량, 대체연료, 가역일로 기준할 경우에 대한 가치에너지 전달량 \dot{K} 과 가치율 κ 이 정리되어 있다. 본 테이블의 장점은 기존의 각 방법에서 각자의 이론으로 설명 및 전개하였던 수식을 가치에너지라는 통합된 개념으로 설명 및 수식을 전개할 수 있으므로 명확하고 간결하다는 것과, 더 나아가 가역일을 적용하면, 기존에 없었던 새로운 원가산정 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

제안된 수식과 테이블에 대한 세부적인 설명은 선행연구^(10,11)에서 자세히 다루었으므로, 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. 열과 전기의 비용배분

압축기, 연료분사기, 예열기, 연소기, 터빈 그리고 폐열회수열교환기로 이루어진 Fig. 1의 가스 터빈 열병합발전은 310.0 GJ/h의 연료를 투입 받아 119.2 GJ/h(33.1 MW)의 전기와 134.7 GJ/h(564.0 Gcal/h)의 증기를 생산하는 전체효율 81.9%의 시스템이다. 시스템 해석을 위해 폐사에서 자체 개발한 AirPlan 1.0 소프트웨어를 이용하였으며, Fig. 1에 시스템 열평형선도, T-s 선도 상에서의 각 상태값 및 과정값, 그리고 시스템 해석 결과가 출력되어 있다.

열과 전기의 원가산정을 위해서는 Table 1과 같이 생산품의 가치평가가 먼저 수행되어야 하며, 대체전기효율과 대체열효율 값이 필요로 된다. 가스터빈열병합발전에서 대체전기효율은 시스템 자체의 전기효율 38.45%을 적용할 수 있으며, 대체열효율 값으로 임의의 보일러 효율 90%를 적용하고자 한다. 또한 폐열회수열교환기에서 투입된 엔탈피량 189.8 GJ/h과 산출된 열량 134.7 GJ/h과의 비 71.01%를 대체열효율 값으로 새롭게 적용할 수 있으며, 여기서 투입된 엔탈피량의 기준은 환경상태이다.

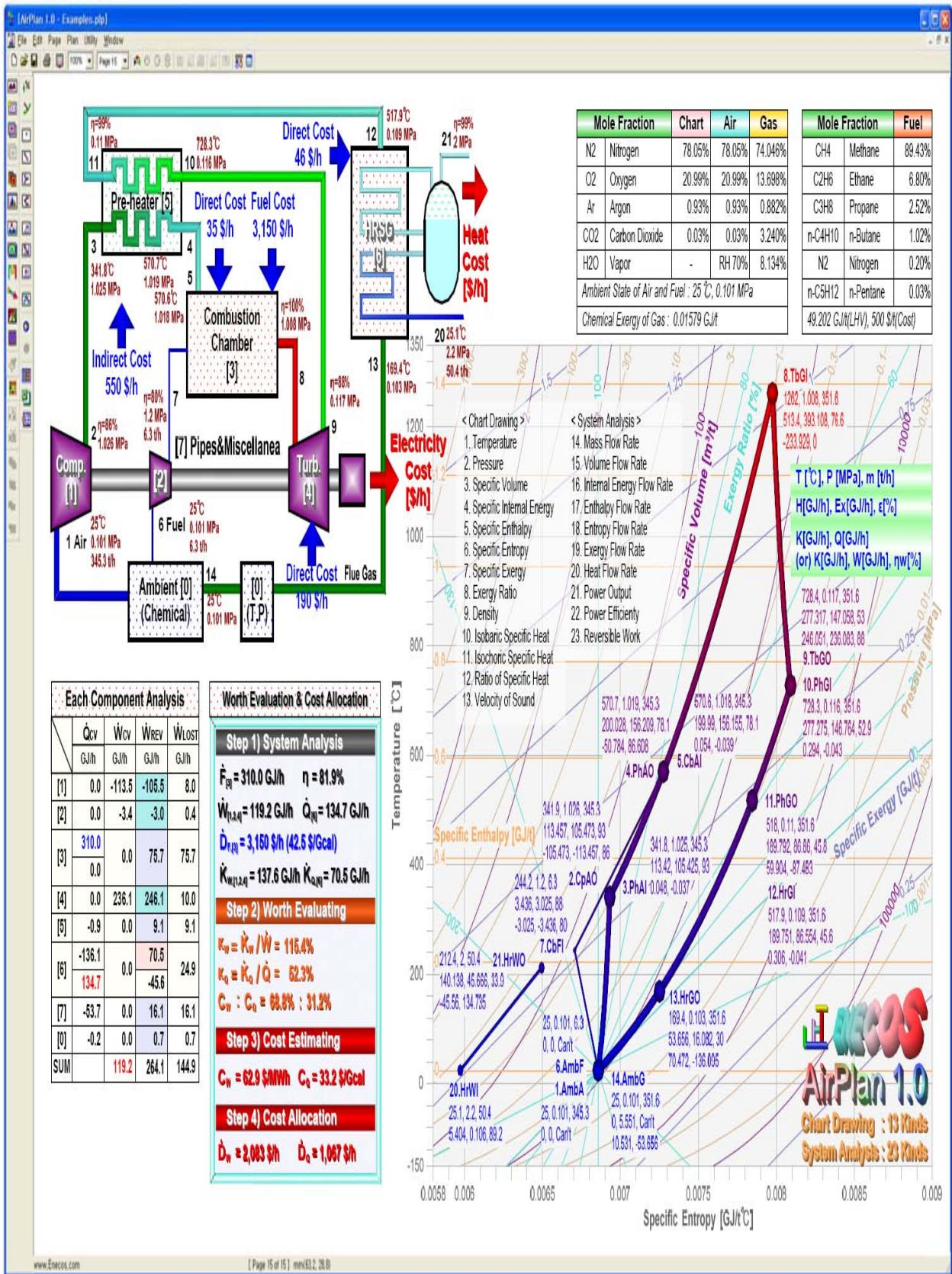


Fig. 1 Heat balance diagram, state and process data on T-s chart, and system analysis values on a gas-turbine cogeneration.

Table 2 Results of worth evaluation by Table 1, cost estimating by Eq. (3) and (4), 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_W [%]	η_Q [%]	\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]				
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
2.1) Proportional		90.00	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
2.2) "		71.01	220.1	85.4	134.7	71.6	100.0	36.9	41.7	59.9	58.3	1,222	38.8	1,928	61.2
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
4.1) Equal Dist.	38.45	90.00	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
4.2) "	38.45	71.01	310.0	215.1	94.9	180.5	70.4	66.0	71.9	30.0	28.1	2,186	69.4	964	30.6
5.1) Benefit Dist.	38.45	90.00	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
5.2) "	38.45	71.01	499.7	310.0	189.8	260.1	140.8	59.0	64.9	37.2	35.1	1,954	62.0	1,196	38.0
6) 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

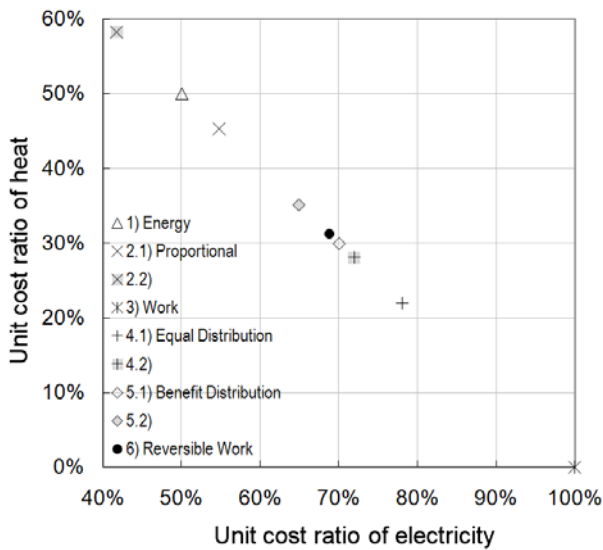


Fig. 2 Unit cost ratio from Table 2

4. 결과 및 토의

Table 2에는 연료의 투입비용에 대해, Table 1의 다양한 방법론과, 식(3)과 식(4)를 적용한 원가산정 결과 그리고 식(2)를 적용한 비용배분 결과가 나와 있다. 이 결과들 중에서 핵심은 식 (5)와 같이 전기와 열에 대한 생산원가의 비율이며, Fig. 2에 도시되어 있다.

Energy 방법에서는 전기와 열의 원가비를 50% : 50%로, Proportional 방법에서는 54.8% : 45.2% 또는 41.7% : 58.3%로, Work 방법에서는 100% : 0%로, Equal distribution 방법에서는

78.0% : 22.0% 또는 71.9% : 28.1%로, Benefit distribution 방법에서는 70.1% : 29.9% 또는 64.9% : 35.1%로, 그리고 Reversible work 방법에서는 68.8% : 31.2%로 산정되었다. 이 결과로부터 전기와 열의 원가 산출 방법론 중, Energy 방법과 Proportional 방법은 전기와 열의 원가가 서로 비슷하게 산정되고, Work 방법은 열의 가격이 없다는 것으로 산정되므로 본 시스템의 원가산정에 그 타당성이 낮다고 판단된다. 반면, Equal distribution 방법, Benefit distribution 방법, 그리고 Reversible work 방법은 본 시스템에서 생산된 열과 전기의 가치를 타당성 있게 산정하고 있다고 판단된다.

그러나 Reversible work 방법을 제외한 나머지 방법들은 주어진 열병합발전을 해석하는 것이 아니라, 대체 시스템을 적용하는 것으로써, 대체 전기효율 및 대체열효율 값에 자의성이 상당히 내포되어 있으므로 그 산정결과에 합리성 및 객관성이 결여된다고 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 수행 즉 시스템 및 운전방식의 다양성을 실시간 반영하므로, 합리성과 범용성을 충분히 갖추고 있다고 판단된다.

5. 결론

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

본 연구에서는 제안된 방법을 119.2 GJ/h(33.1 MW)의 전기와 134.7 GJ/h(564.0 Gcal/h)의 증기를 생산하는 가스터빈 열병합발전예 적용하였으며, 해석결과 전기와 열의 원가비는 엔탈피 기준일 경우 50% : 50%로, 대체열 기준일 경우 54.8% : 45.2% 또는 41.7% : 58.3%로, 대체전기 기준일 경우 100% : 0%로, 동일연료절약량 기준일 경우 78.0% : 22.0% 또는 71.9% : 28.1%로, 대체연료 기준일 경우 70.1% : 29.9% 또는 64.9% : 35.1%로, 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.

특정 시스템의 결과를 일반론으로 확장하기에는 다소 무리가 있으므로, 향후 다양한 복합 에너지 시스템을 대상으로 각 방법론을 보다 세부적으로 비교 검토하여, 본 방법론의 합리성 및 범용성을 확인할 예정이다.

참고 문헌

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.