

## 열병합발전에서 비용배분 방법론의 고찰

김 덕 진<sup>†</sup>

에너코스

### Consideration of Cost Allocation Methodology on Cogeneration

Deok-Jin Kim<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** Cost allocation on cogeneration is a methodology dividing the input of common cost to electricity cost and heat cost. In the cost allocation methodology of the electricity and heat on a cogeneration, there are energy method, work method, proportional method, benefit distribution method, reversible work method, various exergetic methods, and so on. In previous study, various cost allocation methodologies have been applied and analyzed on a gas-turbine cogeneration producing the 33.1 MW of electricity and the 32.2 Gcal/h of heat, a steam-turbine cogeneration producing the 22.2 MW of electricity and the 44.3 Gcal/h of heat, and combined-cycle cogeneration producing the 314.1 MW of electricity and the 279.4 Gcal/h of heat. In this study, we integrately analyze the results of previous studies and examine the generality and rationality each methodology. Additionally, a new point of view on the values of alternative electricity efficiency and alternative heat efficiency in the previous methodologies was proposed. As the integrated result, we conclude that reversible work method of various common cost allocation methodologies is most rational.

**Key words:** Cogeneration(열병합발전), Cost estimating(원가산정), Cost allocation(비용배분), Unit cost(원가), Common cost(공통비), Heating price(열요금)

#### 1. 서 론

복합 에너지 시스템에서 다양한 에너지가 생산될 때, 산출된 에너지의 각 양은 열역학 제 1법칙을 적용하여 계산할 수 있고, 산출된 에너지의 각 비용은 비용배분 방법론을 적용하여 산정할 수 있다. 대표적인 복합 에너지 시스템은 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합발전이며, 공통비의 투입으로부터 전기비용과 열비용을 배분하는 방법론은 회계학적으로 다양하게 제안되어 있다.

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<sup>(1)</sup>에서 소개되어 있듯이, Energy 방법,

<sup>†</sup> Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

Table 1 Unification of previous methods to worth evaluation method.

Allocation methods	Wonerger	Wonerger input to			Wonerger ratio	
		Working Fluid $\dot{K}_C$	Electricity $\dot{K}_W$	Heat $\dot{K}_Q$	$\kappa_W$	$\kappa_Q$
Benefit distribution	alternative fuel	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}} + \frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{\dot{W}}{\eta_{AW}}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_{AQ}}$	$\frac{1}{\eta_{AW}}$	$\frac{1}{\eta_{AQ}}$
Work	alternative electricity	$\dot{F} \cdot \eta_{AW}$	$\dot{W}$	$\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}$	$\frac{\dot{W}}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{F} \cdot \eta_{AW} - \dot{W}}{\dot{Q}}$
Reversible work	reversible work	$\dot{R}_W + \dot{R}_Q$	$\dot{R}_W$	$\dot{R}_Q$	$\frac{\dot{R}_W}{\dot{W}}$	$\frac{\dot{R}_Q}{\dot{Q}}$

Alternative heat 방법, Alternative electricity 방법, Proportional 방법, Work 방법, Benefit distribution 방법 등이 있으며, 일반적으로 국내에서 감발량보상방식이라 불리는 Work 방법과 E.Shuly 방식이라 불리는 Benefit distribution 방법이 열병합발전의 열과 전기의 비용배분에 많이 적용되고 있다.

한편, Reversible work 방법이라는 새로운 방법을 선행연구에서 제안<sup>(2)</sup>하였고, 이 방법과 The world bank 사의 기술보고서<sup>(1)</sup>에서 소개된 방법들을 통합한 가치평가방법론(Worth evaluation methodology)을 제안<sup>(2)</sup>하여, 증기터빈열병합발전<sup>(3)</sup>, 가스터빈열병합발전<sup>(4)</sup>, 그리고 복합열병합발전<sup>(2)</sup>에 적용하여 전기, 증기, 온수의 원가산정 및 공통비배분을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 선행연구에서 해석한 바 있는 가스터빈열병합발전, 복합열병합발전, 증기터빈열병합발전에 대해, 각 방법론에 의해 산정된 결과를 통합적으로 비교 검토한 후, 새로운 관점으로 해석한 회계학적 방법론을 제안하고, 각 방법론의 합리성과 일반성을 파악해 보고자 한다.

## 2. 공통비 배분 방법론

열병합발전에서 생산된 전기와 열의 공통비를 배분하는 방법론은 회계학 및 열경제학 분야에서 주로 다루어진 주제이며, 기존의 회계학적 방법론 중 Work 방법과 Benefit distribution을 산업현장에서 가장 많이 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 방법론을 고찰하고자 한다.

한편, 선행 연구<sup>(2)</sup>에서 기존의 회계학적 방법론을 단일의 원리와 단일의 수식으로 통합한 가치평가방법론을 제안하였다. 이 방법론의 정의는

생산원가는 제품의 가치에 비례한다 이며, 연료의 투입비용  $\dot{D}_F$ 에 대한 전기원가  $C_W$ 의 산정 수식은 식(1), 열원가  $C_Q$ 의 산정 수식은 식(2), 그리고 전기와 열의 원가비  $C_W : C_Q$ 는 식(3)과 같이 표현된다. 또한 산정된 원가로부터 전기로의 공통비  $\dot{D}_W$ 의 배분 수식은 식(4) 그리고 열로의 공통비  $\dot{D}_Q$ 의 배분 수식은 식(5)로 표현된다.

$$C_W = \kappa_W \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_W = \frac{\dot{K}_W}{\dot{W}} \quad (1)$$

$$C_Q = \kappa_Q \cdot \frac{\dot{D}_F}{\kappa_W \dot{W} + \kappa_Q \dot{Q}}, \quad \kappa_Q = \frac{\dot{K}_Q}{\dot{Q}} \quad (2)$$

$$C_W : C_Q = \frac{\kappa_W}{\kappa_W + \kappa_Q} : \frac{\kappa_Q}{\kappa_W + \kappa_Q} \quad (3)$$

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

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

여기서,  $\dot{W}$ 는 전기생산량,  $\dot{Q}$ 는 열생산량,  $\dot{K}_W$ 는 전기생산을 위해 투입된 워너지(Wonerger),  $\dot{K}_Q$ 는 열생산을 위해 투입된 워너지,  $\kappa_W$ 는 전기의 워너지율,  $\kappa_Q$ 는 열의 워너지율이다. 위 수식에서 워너지  $\dot{K}$  또는 워너지율  $\kappa$ 을 제외하면 모두 사전에 주어지는 값들이므로, 이 워너지를 결정하는 방법이 본 방법론의 핵심이다.

워너지  $\dot{K}$ 란 생산된 전기와 열의 가치를 동급으로 평가하기 위해 본 방법론에서 제시하는 어떤 에너지이며, 워너지율  $\kappa$ 은 워너지량과 생산된 에너지량과의 비이다. 열병합발전의 경우 전기와 열의 가치를 동급으로 평가할 수 있는 워너지를 Table 1에 정리하였으며, 워너지로 대체전기



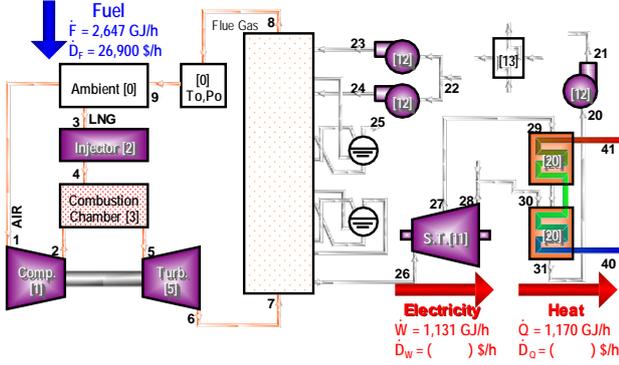


Fig. 3 A combined-cycle cogeneration.

에서  $\eta_{AW}$ 는 35.0% 이다. 대체열효율은 임의의 열전용보일러 효율을 적용하며 일반적으로  $\eta_{AQ}$ 는 90%를 적용한다. 따라서 Table 1과 식(3)으로부터 Benefit distribution 방법을 적용할 경우 72.0% : 28.0% 그리고 Work 방법을 적용할 경우 86.9% : 13.1%로 산정된다.

본 연구에서는 새로운 관점으로, Benefit distribution 방법에서의 대체설비  $\eta_{AW}$ 와  $\eta_{AQ}$ 를 Fig. 2 자체 시스템의  $\eta_W$ 와  $\eta_Q$ 를 적용하고자 한다. 즉 Fig. 2의 시스템은 85.6 MW의 연료로부터 전기 22.2 MW를 생산하므로  $\eta_W$ 는 25.9% 그리고 열교환기 [20, 21]의 효율  $\eta_Q$ 은 99.8% 이다. 따라서 그 원가비는 79.4% : 20.6%로 산정된다.

여기서, 25.9%의  $\eta_W$ 가 35.0%의  $\eta_{AW}$ 로 개선될 때, 같은 비율로 99.8%의  $\eta_Q$ 는 134.9%의  $\eta_{AQ}$ 로 개선되어야 할 것이다. 그러나 대체설비 방법론인 Benefit distribution 방법에서는 오히려 감소된 90%를 적용하고 있으며, 이 결과 증기터빈 열병합발전 가동으로 인한 이득 즉 메리트(Merit)가 거의 열측에 배분되어 열원가가 높게 산정됨을 볼 수 있다. 이에 반해, Work 방법론은 컨덴싱 모드에서 감소된 발전량의 비용 만큼만을 열비용으로 보상하므로 증기터빈 열병합발전 가동으로 인한 메리트가 전량 전기측에 배분되어 전기원가가 높게 산정된다. 따라서 증기터빈 열병합발전 가동으로 인한 메리트가 적절하게 전기와 열측에 배분될 수 있는 방법론이 필요하며, 회계학적으로 다음의 방법론을 제안한다.

컨덴싱 모드에서의 전기 생산량  $\dot{W}_C$ 은 식(6)으로, 그리고 열병합발전 가동으로 감소된 전기량  $\Delta \dot{W}$ 은 식(7)로 계산된다. 컨덴싱 모드에서의 응축열은 열병합발전 가동으로 인해 판매 가능한

열로 변환되므로 이 응축열이 메리트이다. Fig. 2의 시스템에서 생산된 열량  $\dot{Q}$ 는 감소된 전기량  $\Delta \dot{W}$ 과 메리트  $\dot{Q}_M$ 과의 합이므로, 식(8)로 메리트를 구할 수 있다. 컨덴싱 모드에서의 발전량은  $\dot{W}_C$  그리고 응축열은  $\dot{Q}_M$ 이므로, 발전량  $\dot{W}$ 에서 그 응축열  $\dot{Q}_{M,W}$ 은 식(9)로 구할 수 있으며, 이 값이 전기 측에 할당된 메리트 그리고 그 나머지는 식(10)과 같이 열 측에 할당된 메리트  $\dot{Q}_{M,Q}$ 이다. 따라서 열교환기 [20, 21]에서 열생산을 위해 투입된 열량은 감소된 전기량  $\Delta \dot{W}$ 과 열 측에 할당된 메리트  $\dot{Q}_{M,Q}$ 이다. 여기서 감소된 전기량  $\Delta \dot{W}$ 는 식(11)과 같이 열생산을 위해 투입된 연료량  $\Delta \dot{F}$ 으로 환산된다. 따라서 열량  $\dot{Q}$ 를 생산하기 위해  $\Delta \dot{F}$ 와  $\dot{Q}_{M,Q}$ 가 투입되는바, 대체열효율  $\eta_{AQ}$ 을 식(12)로 계산할 수 있다.

$$\dot{W}_C = \dot{F} \cdot \eta_{AW} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{W} = \dot{W}_C - \dot{W} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_M = \dot{Q} - \Delta \dot{W} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{M,W} = \dot{Q}_M \cdot \dot{W} / \dot{W}_C \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{M,Q} = \dot{Q}_M - \dot{Q}_{M,W} \quad (10)$$

$$\Delta \dot{F} = \Delta \dot{W} / \eta_{AW} \quad (11)$$

$$\eta_{AQ} = \frac{\dot{Q}}{\Delta \dot{F} + \dot{Q}_{M,Q}} \quad (12)$$

주어진 값을 대입하면,  $\dot{W}_C$ 는 30.0,  $\Delta \dot{W}$ 는 7.8,  $\dot{Q}_M$ 은 43.8,  $\dot{Q}_{M,W}$ 는 32.4,  $\dot{Q}_{M,Q}$ 는 11.4,  $\Delta \dot{F}$ 는 22.2,  $\eta_{AQ}$ 는 153.6%이다. 따라서 Table 1과 식(3)으로부터 전기와 열의 원가비는 81.4% : 18.6%로 산정된다. 위의 비용배분 방법론을 Merit distribution 방법이라 명하기로 한다.

이 수식의 타당성을 확인하기 위해,  $\dot{Q}_{M,Q}$ 은 0 즉 메리트가 전량 전기 측에 배분되었다고 가정하면, 식(12)로부터  $\eta_{AQ}$ 는 232.1%이며 원가비는 86.9% : 13.1%로 Work 방법과 정확히 같게 된다.  $\dot{Q}_{M,W}$ 는 0 즉 메리트가 전량 열 측에 배분되었다고 가정하면,  $\eta_{AQ}$ 는 78.1%이며 원가비는 69.1% : 30.9%로 Benefit distribution 방법에서의 원가비 72.0% : 28.0%과 비슷하게 산정된다.

Table 2 Unit cost ratio of electricity and heat estimated from each cost allocation methodology.

Cost Allocation Methodology		Unit cost ratio of electricity and heat on each cogeneration		
		Gas-Turbine	Combined-Cycle	Steam-Turbine
Benefit distribution	Previous	70.1% : 29.9%	63.8% : 36.2%	72.0% : 28.0%
	"	New	"	"
	"	New	-	79.4% : 20.6%
	"	New	64.9% : 35.1%	-
Work	Previous	-	84.2% : 15.8%	86.9% : 13.1%
	"	New	77.6% : 22.4%	"
Merit distribution	New	-	-	81.4% : 18.6%
Reversible work	New	68.8% : 31.2%	77.0% : 23.0%	81.6% : 18.4%

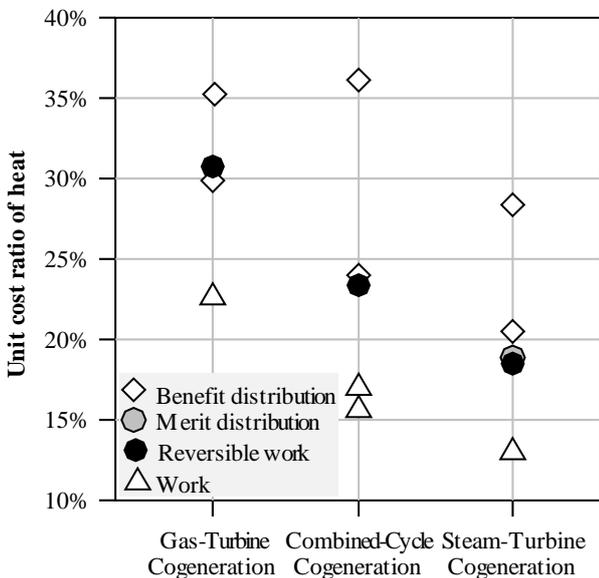


Fig. 4 Unit cost ratio of heat from Table 2

Reversible work 방법을 적용하자면, 선행연구의 결과<sup>(4)</sup>로부터  $\dot{R}_W$ 는 24.8 MW,  $\dot{R}_Q$ 는 13.0 MW이다. 이 값을 Table 1과 식(3)에 대입하면 81.6% : 18.4%로 산정된다. 이 값은 식(6)~식(12)에 의해 계산된 회계학적 방법의 원가비 81.4% : 18.6%와 그 차이가 거의 없는 결과임을 볼 수 있다.

### 5. 복합열병합발전에서 공통비 배분

Fig. 3은 선행연구<sup>(5)</sup>에서 해석한 바 있는 어떤 복합열병합발전의 개략도이다. 이 시스템은 2,647 GJ/h의 연료 투입  $\dot{F}$ 으로 1,131 GJ/h의 전기  $\dot{W}$ 와 1,170 GJ/h의 온수  $\dot{Q}$ 를 생산한다.

복합열병합발전에서 대체전기효율은 컨텐싱 모

드에서의 전기효율을 적용하며, 이 시스템에서  $\eta_{AW}$ 는 51.0%이다. 대체열효율은 임의의 열전용 보일러 효율을 적용하며 일반적으로  $\eta_{AQ}$ 는 90%를 적용한다. 따라서 Table 1과 식(3)으로부터 Benefit distribution 방법을 적용할 경우 63.8% : 36.2% 그리고 Work 방법을 적용할 경우 84.2% : 15.8%로 산정된다.

Reversible work 방법을 적용하자면, 선행연구의 결과<sup>(5)</sup>로부터  $\dot{R}_W$ 는 1,286 GJ/h,  $\dot{R}_Q$ 는 348 GJ/h이다. 이 값을 Table 1과 식(3)에 대입하면 79.2% : 20.8%로 산정된다.

위의 접근법과 다르게 새로운 시각으로, 가스 터빈 사이클을 먼저 해석하고 그 후 증기터빈 사이클을 해석할 수 있다. 즉 에너지의 흐름을 따라 비용흐름을 계산하는 것이다. 이 접근법은 식(1), 식(2), 식(4), 식(5)를 모두 적용해야 산정 가능한 바, 선행연구에서의 결과를 인용하고자 한다. Benefit distribution 방법에서 가스터빈 사이클, 증기터빈 사이클 모두 대체전기효율로 34.1% 그리고 대체열효율로 90%를 적용하였으며 이 결과 76.2% : 23.8%로 산정되었고, Work 방법에서 가스터빈 사이클의 대체전기효율로 51.0% 그리고 증기터빈 사이클의 대체전기효율로 34.1%를 적용하였으며 이 결과 83.2% : 16.8%로 산정되었고, Reversible work 방법에서는 시스템 해석으로부터 77.0% : 23.0%로 산정되었다.

### 6. 검토 및 고찰

Table 2에는 각 방법론에 의해 산정된 전기와 열의 원가비가 정리되어 있다.

먼저, Benefit distribution의 결과를 보면 기준

의 관점에서 가스터빈 열병합발전에서의 열원가비는 29.9%, 복합열병합발전에서는 36.2%, 그리고 증기터빈 열병합발전에서는 28.0%로 산정되었다. 복합열병합발전은 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클로 구성된 만큼 그 사이값으로 산정되는 것이 타당하나, 열원가의 비율이 매우 높게 산정되었다. 새로운 관점으로 산정된 열원가비는 가스터빈 열병합발전에서 35.1%, 복합열병합발전에서 23.8% 그리고 증기터빈 열병합발전에서 20.6%이다. 이 결과로부터 고위에너지에서 생산된 열원가는 높고, 저위에너지에서 생산된 열원가는 낮다는 것을 알 수 있다. 이 뜻은 에너지가 흐를수록 전기는 생산되기 어려워지며 이 결과 전기원가는 상승한다는 것과 같다.

Work 방법의 결과를 보면 기존의 관점에서 복합열병합발전에서의 열원가비는 15.8% 그리고 증기터빈 열병합발전에서는 13.1%로 산정되었다. 새로운 관점으로 산정된 열원가비는 가스터빈 열병합발전에서 22.4% 그리고 복합열병합발전에서 16.8%로 산정되었다. 전체적으로 고위에너지에서의 열원가비는 높고 저위에너지에서의 열원가비는 낮게 산정됨을 볼 수 있다.

Reversible work 방법에서의 열원가비는 각각 31.2%, 23.0%, 18.4%로 산정되었다. 이 역시 고위에너지에서의 열원가비는 높고 저위에너지에서의 열원가비는 낮게 산정됨을 볼 수 있다.

Fig. 4에는 Table 2의 값을 차트상으로 표현한 결과가 도시되어 있다. 기존 관점의 결과와 새로운 관점의 결과를 구분하지 않고 도시하였으며, 전체적인 경향을 볼 때 Benefit distribution 방법에서의 열원가비가 가장 높게, Work 방법에서의 열원가비가 가장 낮게, 그리고 Reversible work 방법에서의 열원가비는 중간 정도로 산정되었다. 또한 가스터빈 열병합발전의 열원가가 가장 높고, 증기터빈 열병합발전의 열원가는 가장 낮고, 복합열병합발전의 열원가는 그 중간 정도의 값을 볼 수 있다.

Table 1의 결과와 같이 다양한 방법론 및 관점 중에서 Reversible work 방법은 가스터빈 열병합발전, 증기터빈 열병합발전, 복합 열병합발전 등 시스템의 다양성 그리고 열전비, 부하율, 계절별, 시간대별 등 운전방식의 다양성을 열역학 제 2 법칙적으로 반영하고 있으므로 합리성과 범용성을 충분히 갖추고 있다고 판단한다.

## 7. 결론

선행연구에서 해석한 바 있는 가스터빈 열병합발전, 증기터빈 열병합발전, 그리고 복합열병합발전에 대해 산정된 전기와 열의 원가비를 통합적으로 검토해 보고, 새로운 관점에서의 대체전기 효율과 대체열효율 값을 제안하였다.

다양한 방법론과 관점으로 산정된 전기와 열의 원가비를 종합적으로 해석할 때, Benefit distribution 방법이 열원가를 높게 산정하고, Work 방법이 열원가를 낮게 산정하고, Reversible work 방법이 그 중간 정도의 값으로 산정하였다. 시스템적으로는, 가스터빈 열병합발전에서의 열원가가 높게 산정되고, 증기터빈 열병합발전에서의 열원가가 낮게 산정되고, 복합열병합발전에서의 열원가는 그 중간 정도로 산정되었다.

Work 방법과 Benefit distribution 방법은 다양한 관점이 제시될 수 있어 방법론의 명확성이 부족하다고 볼 수 있다. 이에 반해, Reversible work 방법은 열역학 제 2법칙을 기반으로 하는 가역일을 적용함으로써, 해석대상의 시스템을 실시간 그리고 직접적으로 가치평가하므로 일반성과 합리성을 충분히 갖추고 있다고 판단한다.

## 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. 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](http://www.enecos.com)
3. 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.
4. 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.