

# 전기와 스팀의 동시생산에 대한 할당방법

김창열 · 박선원\*

동양화학 중앙연구소  
\*한국과학기술원 화학공학과

## Allocation Methods for Co-generation of Steam and Electricity

ChangRyol Kim, Sunwon Park\*

Oriental Chemical Industries  
Dept. of Chem. Eng., KAIST\*

### ABSTRACT

Five allocation methods which are applied to the CHP (Combined Heat and Power Production) are compared and in the thermodynamic respect, feasibility based on real process data are investigated using these methods. Among these five allocation methods, allocations based on energy and economic value are not adapted to the CHP unit. Allocations based on empirical thermodynamic efficiencies of steam and electricity have no objective standards needed for deciding their efficiencies. The allocation method based on the ideal thermodynamic efficiency is simple, objective and thermodynamically reasonable.

### 요 약 문

전기와 스팀을 동시에 생산하는 공정에 적용할 수 있는 다섯 가지 할당방법들을 비교하였고, 그 할당방법들을 이용하여, 실제 공정의 자료를 기초로 열역학적 관점에서 타당성을 조사하였다.

다섯 가지의 할당 방법 중, 열량과 경제성을 이용한 할당방법은 열역학적인 관점으로는 이 공정에 대해서는 적합하지 않다. 경험적인 전기와 스팀에 대한 열 효율을 고려한 방법들은 각각의 열 효율을 결정할 수 있는 객관적인 기준이 없는 문제점이 있다. 전기와 스팀의 이상적인 열 효율을 고려한 할당방법은 단순한 방법으로 객관성을 유지하고, 열역학적으로 합리적인 결과를 얻을 수 있다. 전기와 스팀의 이상적인 열 효율을 고려한 할당방법은 간단명료하고, 객관성을 유지하고, 열역학적으로도 합리적이다.

### I. 서 론

전과정평가기법의 목록분석은 물질이나 에너지 흐름에 의해 전체시스템 범위 안에 서브시스템들을 연결해 줄 수 있어야 한다. 하지만, 고려된 시스템들은 하나 이상의 제품을 생산하고, 생산된 제품들은 다른 시스템의 원료로 사용되거나 재활용되기도 한다. 이와 같은 복잡한 문제를 해결하기 위해서 할당과 할

당절차에 대한 일정한 기준이 필요하다.

할당의 기본적인 원리와 할당절차와 관련된 기존의 연구는 Nordic technical report No. 7에서 multi-input/output과 open-loop recycling의 사례 연구를 중심으로 자세히 나와 있고, ISO (International Organization of Standardization) Draft 1, 2)에서도 할당방법론에 대한 일반적인 절차와 원리를 제시하고 있다. 특히, LCA의 할당방법과 사례 연구는 1994년 Leiden 대학에서 개최한 "Pro-

ceedings of the European Workshop on Allocation in LCA"에서 많은 논문<sup>3)</sup>이 발표되었다.

하지만, 많은 연구에도 불구하고 전기와 스팀을 동시에 생산하는 발전기(이하 병합발전기)에 대한 할당은 일부에서 방법들이 제시되긴 하였지만, 아직 그 방법을 실제 적용하기에는 한계점을 가지고 있다. 병합발전기에 관련된 문제점으로는, 전기는 에너지이고, 스팀의 단위는 압력과 온도로 표시되는 스팀의 질량으로 정의되기 때문에 질량기준이나 열량 기준, 그리고 경제적 가치 등, 할당기준을 정하는데 문제점이 있다. APME<sup>4)</sup>에서는 경험적인 방법으로 전기에 대한 열효율을 정하여 결정하였고, Vink et al.<sup>5)</sup> 등은 exergy의 값을 기준으로 할당방법을 결정하였다. 경험적인 방법으로 전기에 대한 열효율은 결정하는 방법은 과학적인 근거가 부족하여, 일반적인 할당방법으로는 한계가 있고, exergy의 개념으로 할당을 정하기에는 exergy의 개념을 명확하게 이해하고 수식화 하는데 어려움이 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 전기와 스팀을 생산하는 발전기에 대한 할당에 관련하여, 실제공정의 자료를 이용하여, 열역학적으로 타당한가에 대한 조사를 수행하였고 그와 관련된 열역학적 타당성을 조사하였다.

## II. ISO에서 제안된 방법<sup>2)</sup>

목록분석은 직관적으로 투입물과 산출물간의 물질 수지에 근거하기 때문에 환경부하의 할당량은 가능한한 투입물과 산출물간의 인과관계와 특성을 고려하여, 추정되어야 한다. 할당되지 않은 시스템의 투입물과 산출물의 합은 할당된 시스템의 투입물과 산출물의 합과 같다. 몇 가지 대안적인 할당 절차들이 가능한 것으로 보일 때는 선정된 접근으로부터의 출발의 중요성을 예시하기 위해 민감도 분석이 수행하여야 한다.

### 1. 일반적인 할당 절차

프로세스를 두 가지나 그 이상의 공정으로 세분화시키거나 투입물과 산출물을 시스템 범위 안에 포함될 수 있도록 시스템의 범위를 확대시키거나 축소시

키는 방법을 통해서 할당을 피할 수 있거나 최소화할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 할당을 피할 수 없는 경우에는 투입물들과 산출물들간의 인과관계를 고려하여 할당을 하여야 한다. 아래와 같은 방법들을 차례로 고려하여 할당방법이 적용되어야 한다.

- 고려된 시스템의 투입물들과 산출물들은 물리적인 변수들에 의해 측정가능한 인과관계가 있다면, 물리적인 인과관계를 고려하여 할당하여야 한다.
- 물리적 관계가 할당을 위한 근거로서 설정되거나 사용될 수 없는 경우에는 투입물과 산출물들을 측정가능한 경제적 가치나 시장가치를 반영하는 방법으로 할당하여야 한다.

이러한 절차로부터 이탈 시에는 문서화되고 정당화되어야 한다.

## III. 병합 발전기에 대한 공정설명

이 공정은 국내 특정 정유회사의 병합발전기에 대한 실제 공정에 대한 자료를 가지고 수행하였다. 이해를 쉽게 하기 위해서 복잡한 공정모델을 단순화하였고 필요한 자료만을 이용하였다.

### 1. 공정흐름도

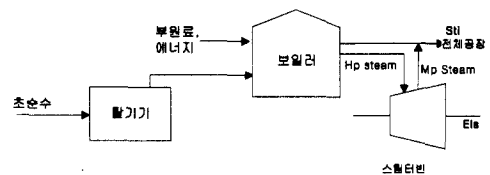


Fig. 1. Structure of the combined heat and power production at a utility plant. Els is the electricity generated by the steam turbine. Three different steams of which the qualities are  $St_i$  are delivered to the site.

고려된 공정은 크게 세가지로 세분화하여 분류되는데, 탈기기, 보일러 그리고 스팀 터빈으로 분류된다. 탈기기는 급수계통에서 부식을 야기시키며 급수 내에 포함된 용존산소와  $CO_2$ 를 제거하는 장치이다. 보일러는 밀폐된 용기에 물을 주입한 후 연료의 연

소에 의한 열을 가하여 증기를 발생시키는 장치이다. 스팀 터빈은 보일러에서 발생한 고온/고압의 스팀을 Nozzle로 분사 (열에너지를 속도에너지로 변환)시켜 고속의 증기 분류로 만들고, 이것을 회전날개에 충돌시켜 생기는 기계적 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 장치이다.

2. 공정의 투입물과 산출물

공정의 투입물은 탈기기의 원료로 들어가는 초순수와 생산스팀이 사용되어진 후, 회수되는 응축수와, 보일러의 연료로 들어가는 에너지 그리고 부원료로 들어가는 소량의 첨가물로 구성되고 전체 공정에 공통으로 들어가는 전기에너지가 있다.

에너지와 관련된 투입물과 산출물의 정량적인 자료는 Table 1과 같다.

Table. 1. Input/output of a CHP plant.

		투입물과 제품의 에너지	연료에너지의 성분과 제품의 가격
투입물	연료에너지	58,760.60 GJ/day	Bunker Oil PFO 연료가스
	전기 에너지	243.91 GJ/day	
제품	전기	5,545.58 GJ/day	43.7원/Kwh (12.14원/MJ)
	스팀	43,062.35 GJ/day 14,929톤/day (3.17 MJ/kg)	11,000원/톤
생산스팀은 14,929톤/일 이 사용되어진 후, 회수되는 응축수는 약 8,668톤/일로써 회수율은 55%임. 투입물의 에너지는 탈기기, 보일러 그리고 STG발전기에 공통으로 사용되어진 전기에너지임.			

3. 할당문제를 풀기 위한 가정

- 병합보일러에서 나오는 고온 스팀의 온도와 압력은 758.15K과 650PSIA이고 3.50 MJ/ Kg 으로 일정하다.
- 이 공정에서는 대부분을 한 종류의 스팀을 생산하므로, 터빈에서 전기와 함께 생산되는 스팀

의 온도와 압력은 658.15K이고 130 PSIA열량은 3.17 MJ/Kg으로 일정하다.

- 공정수의 온도는 288.15 K으로 가정하였다.

IV. 할당방법

스팀과 전기를 할당하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있겠으나, 아래와 같은 5가지 방법으로 정리해 보았다.

1. 스팀과 전기의 열량으로 할당

스팀과 전기의 열량을 계산하여 에너지와 관련된 할당을 하는 방법을 생각할 수 있다. 전기와 스팀에 할당되는 비율을 각각, Be와 Bs<sub>i</sub>라고 하면, 사용되는 할당식은 다음과 같다.

$$Be = \frac{EI_s}{EI_s + \sum (St_i \times StE_i)} \tag{1}$$

$$Bs_i = \frac{St_i \times StE_i}{EI_s + \sum (St_i \times StE_i)} \tag{2}$$

여기서, St<sub>i</sub>는 생산되는 여러 종류의 스팀 i, StE<sub>i</sub>는 스팀 i의 열량 그리고 EI<sub>s</sub>는 생산되는 전기에너지량이다. 생산되는 제품의 전기와 스팀의 열량은 각각 5,545.58 GJ과 43,062.35 GJ이다. 식 (1)과 (2)에 의하면, 전기와 스팀에 대한 전체 할당량은 전기의 생산량에 11.41 %이고, 스팀의 생산량에 88.59 %의 할당을 하여야 한다.

2. 스팀과 전기의 경제적 가치로 할당

다음으로는 경제적 가치로 할당하는 방법을 생각해 볼 수가 있는데, 각각 할당에 관련된 식은 다음과 같다.

$$Be = \frac{EI_{price}}{EI_{price} + \sum (St_i \times St_{price})} \tag{3}$$

$$Bs_i = \frac{St_i \times St_{price}}{EI_{price} + \sum (St_i \times St_{price})} \tag{4}$$

여기서,  $St_i$ 는 생산되는 여러 종류의 스팀  $i$ ,  $St_{price}$ 는 스팀  $i$ 의 가격 그리고  $El_{price}$ 는 생산되는 전기의 가격이다. 식(3)과 (4)에 의하면, 전기의 가격은 43.7원/Kwh이고, 스팀의 가격은 11,000원/톤이므로, 전기와 스팀의 할당비율은 각각 29.07%와 70.93%이다.

### 3. 스팀발전기의 효율에 의한 할당<sup>3)</sup>

발전시스템의 열 생산 효율이 같은 연료를 사용하여, 열만을 생산하는 열전용 보일러 시스템의 효율과 같다고 가정하여 할당을 결정하는 방법이 있을 수 있다. 하지만, 이 공정과 같은 연료를 사용하는 공정 자료를 구할 수 없기 때문에, 부득이 열전용 보일러 시스템의 효율인 88%와 같다고 가정하였다. 이와 같은 방법을 적용하면, 전기와 스팀의 할당율은 각각 17.07%와 82.93%이다.

### 4. 전기효율에 의한 할당<sup>4)</sup>

전기효율에 의한 할당방법은 전기는 일(Work)라는 개념을 중시하여, 열이 전기로 전환될 때의 효율을 생각하여 할당을 하는 방법이다. 즉, 열이 일로 전환될 때는 효율이 그 시스템에 따라 다르지만, 최종 소비되는 일 에너지와 투입되는 열에너지의 비가 40-50%이상을 넘지 못한다는 것과, 외부에서 가져오는 전기에너지의 효율보다는 좋다는 가정을 기준으로 할당율을 결정한다.

이와 같은 방법을 적용하면, 50%와 35%의 중간 수준인 42.5%의 열 효율을 전기에너지가 가진다고 가정하였다. 고려된 시스템에 이 방법을 직접적으로 적용하기에는 문제가 있다.

이 방법에 의해서 전기의 효율을 고려하면, 그 효율은 발전기에 들어가는 연료를 생산하는 단계에서부터, 최종적으로 공정에 사용될 때까지의 단계, 즉 에너지의 최종 분배 단계까지를 고려해야만 한다. 에너지 분배의 과정은 전기 에너지의 효율의 상한선과 하한선에 같이 적용되기 때문에, 본 연구에서는 에너지 분배단계를 무시하고, 시스템의 범위인 발전공정만을 고려하며, 할당문제에 적용시켜 보았다. 이 결과에 의해서 나온 할당 결과는 전기생산에 22.11%,

스팀 생산에 77.89%의 할당을 하여야 한다.

### 5. 열역학적 효율을 고려한 할당

본 연구는 열역학 제2법칙을 고려하여 열기관(발전기)의 효율을 고려하여 할당을 하였다. 이상적인 열기관의 효율은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_H|} \quad (5)$$

Table.2. Qualitative factors for allocation of environmental burdens for electricity and steam.

Energy Carrier	Quality factor
Electricity	$Q_e = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{1 - \frac{T_{input}}{T_{turbine}}} = \frac{T_{turbine}}{T_{turbine} - T_{input}}$
Steam	$Q_i = \frac{1}{\eta_i} = \frac{T_{output, i}}{T_{turbine}} = \frac{T_{turbine}}{T_{output, i}}$
$T_{input}$ 보일러로 들어가는 공정수의 온도 (K) $T_{output, i}$ 터빈에서 생산되는 스팀의 온도 (K) $T_{turbine}$ 터빈으로 들어가는 보일러에서 나온 고온의 스팀 온도(K)	

여기서,  $|Q_c|$ 는 저온의 열저장조이고,  $|Q_H|$ 는 고온의 열저장조를 나타낸다. 열저장조란 온도가 변화하지 않고 무한히 많은 열량을 흡수하거나 방출하는 것이 가능한 가상적 물체를 나타낸다. 이와 같은 열역학 제 2법칙을 고려하여 열에서 일로 얻을 수 있는 최고의 효율을 정량적 인자로 생각하였다. 즉 생산되는 스팀의 온도, 스팀터빈의 온도와 기준 온도를 고려하여 (15℃) 전기와 스팀에 할당하였다. 이와 같은 인자를 고려하기 위해서 Table 2에서와 같은 정량적 인자를 곱하였다. 이와 같이 하여 할당에 관련된 식을 구하면,

$$B_e = \frac{El_e \times q_e}{\sum (St_i \times q_i) + El_e \times q_e} \quad (6)$$

$$Bs_i = \frac{St_i \times q_s}{\sum_i (St_i \times q_i) + El_s \times q_e} \quad (7)$$

스팀 i와 전기에 관련된 할당식은 식 (6)과 (7)이다.

이와 같은 결과로 나타낸 할당의 결과는 전기와 스팀이 각각 15.28%, 84.72%이다.

### V. 할당에 대한 열역학적 타당성 검토

전기와 스팀을 생산하는 발전기에 대한 타당성을 검토하기 위해서는 전기와 스팀에 대한 효율에 대한 검토가 필요하다. 다른 공정 투입물들은 에너지가 연소해서 생기는 소량의 환경부하만이 존재하고, 전기와 스팀을 각각 생산하는 공정의 에너지 효율에 대한 자료가 있기 때문에 이와 같은 자료를 근거로 타당성 검토를 수행할 수 있다.

Table 3. Comparison of allocation ratio and thermodynamic efficiency of electricity and steam by each allocation method.

할당방법	전기 (%)		스팀 (%)	
	할당율	효율	할당율	효율
열량	11.41	82.38 <sup>1</sup>	88.59	82.38
가격	29.07	33.22	70.93	102.90 <sup>2</sup>
스팀발전기의 효율	17.07	55.07	82.93	88.00 <sup>3</sup>
전기의 효율	22.11	42.50 <sup>4</sup>	77.89	93.70
열역학적 효율	15.28	61.52	84.72	86.14
1. 전기의 효율이 열역학 제 2법칙 위배 2. 스팀의 효율이 열역학 제 1법칙 위배 3. 스팀의 효율을 경험적인 방법으로 임의로 고정 4. 전기의 효율을 경험적인 방법으로 임의로 고정				

Table 3에서 보여지는 결과는 위의 5가지 방법에 대한 열역학적 접근방법을 나타낸다. 먼저 열량(엔탈피)에 의한 할당방법은 전기의 효율이 82.38%로 스팀과 효율이 같다. 위와 같은 결과는 열역학 제 2법칙에서 위배된다. 그리고 가격에 의한 할당방법도 스팀의 효율이 102.90%로 자연법칙에 위배된다.

전기의 효율과 스팀 발전기의 효율로 생각하는 것

은 경험적인 방법으로 임의로 고정하기 때문에 과학적이지 못한 면이 있다. 이에 반하여 열역학적 효율 면을 생각해 보았을 때는 전기와 스팀과 발전기의 인과관계를 고려한 합리적인 해답이라고 생각할 수 있다.

### VI. 할당의 결과가 전체 결과에 미치는 영향

스팀의 할당량을  $A_s$ 라고 한다면, 정유 공장에서 석유 제품을 1000kg 생산하는 데 미치는 영향은 식 (8)과 같다.

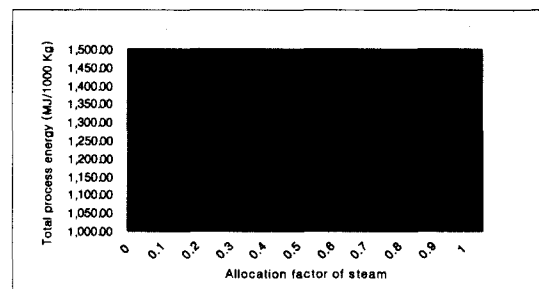
$$Te = 1459.23 - 402.01 \times A_s \quad (8)$$

여기서  $Te$ 는 정유 공장에서 석유 제품 1000kg을 생산하는데 들어가는 데 필요한 공정에너지이다. Fig. 2는 스팀의 할당에 따른 정유 공장에서 석유 제품 1000kg을 생산할 때, 공정에너지의 변화를 나타낸다. 위와 같은 수치는 공장에서 생산하는 모든 제품을 질량단위로 환산하여, 각 공정들에 대해서 생산하는 제품만큼을 가중치를 주어 계산하였다. 예를 들어 A 공정에서 총 생산하는 제품의 질량의 합을  $A_m$ , 필요한 에너지를  $A_e$ 라고 하고, B공정에서 생산하는 제품의 질량의 합을  $B_m$ , 필요한 에너지가  $B_e$ 라고 한다면, 평균 총 공정에너지 ( $Te$ )는

$$Te = \frac{A_e \times A_m + B_e \times B_m}{A_m + B_m} \quad (9)$$

으로 대략 계산하였다.

Fig. 2. The amount of energy required to produce 1,000 Kg of product.



**Table. 4. Comparison of the allocation methods in terms of allocation ratios and total process energy required to produce 1000 Kg of the product.**

할당방법	전기 (%)	스팀 (%)	총 공정에너지
	할당율	할당율	
열량	11.41	88.59	1103.09
가격	29.07	70.93	1174.09
스팀발전기의 효율	17.07	82.93	1125.85
전기의 효율	22.11	77.89	1146.11
열역학적 효율	15.28	84.72	1118.65

Fig. 2와 Table 4에서 각 할당방법에 따른 사용한 총 공정에너지를 표시하였다. 할당방법에 따라서 정유 공장에서 사용한 공정에너지가 많이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

## VII. 결과 및 토의

전과정평가기법에서 할당방법으로 사용하고 있는 4가지의 방법과 우리가 제안한 열역학적 효율에 의한 할당방법을 비교하였다. 비교방법으로는 병합발전기에 대한 열역학적 타당성을 조사하고 총 공정에너지에 미치는 영향을 연구하였다. 열량과 경제성을 이용한 할당방법은 열역학적인 관점으로는 이 공정에 대해서는 적합하지 않다. 경험적인 전기와 스팀에 대한 열 효율을 고려한 방법들은 각각의 열 효율을 결정할 수 있는 객관적인 기준이 없다. 우리가 제안한 전기와 스팀의 이상적인 열 효율을 고려한 할당방법은 단순한 방법으로 객관성을 유지하고, 열역학적인 관점에 위배되지 않은 결과를 얻을 수 있다.

전과정 평가기법의 수행 목적에 따라서 병합 발전기의 할당방법들이 결정되어야 하나, 열역학적인 관점에서 할당방법이 검토되어 져야 한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Lindfors, L. G., et al., Nordic council of Ministers, Copenhagen, LCA-Nordic Technical Reports No 7, "Allocation" (1994).
- 2) ISO, "Environmental management-life cycle assessment inventory analysis", ISO/TC 207/SC 5 N68, (1995).
- 3) Gjal Huppés and Francois Schneider, "Substances & Products", in *Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA at the Centre of Environmental Science of Leiden University*, Leiden, (1994).
- 4) APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe), "Eco-profiles of the European plastics industry Report 2: Olefin feedstock sources", APME/PWMI, Brussels (1993).
- 5) Vink, E. T. H., "A framework for a just allocation procedure", in *Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA at the Centre of Environmental Science of Leiden University*, Leiden, Eds: Gjal Huppés & Francois Schneider, CML-S&P, LEIDEN (1994)
- 6) 박현아, 홍순용, 노중환, "집단에너지 공급 시스템에 대한 전과정 목록분석 기법의 적용", 한국전과정 평가학회, pp153-163, (1998).