

복합생산품에 대한 환경오염비용 배분 방법론 제안

김 덕 진[†]
에너코스

Suggestion of Allocation Methodology of Environmental Pollution Cost on Multi-Product

Deok-Jin Kim[†]

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

(Received December 4, 2008; revision received April 30, 2009)

ABSTRACT: In previous study, a new allocation methodology of common cost on multi-product have been suggested. The aim of this study is to suggest the methodology that allocates an environment pollution cost including carbon emission cost to each cost of multi-product. For this study, a supposed multi-energy system composed of twenty kinds of systems was made. The multi-energy system produces eighteen kinds of outputs that are electricity, steam, hot water, chilled water, ice, warm air, and cooling air from seven kinds of energy source that are LNG, coil, geothermal energy, sun heat, hydrogen, bio-mass, and waste. The new methodology was applied to the multi-energy system in order to allocate the environment pollution cost to each production cost, and twenty seven equations were induced. From this result, it is concluded that this methodology can estimate each unit cost and allocate each cost flow in any product of any energy system.

Key words: CHP(열병합발전), Unit cost(원가), Cost estimating(원가산정), Cost allocation(비용 배분), Environmental pollution(환경오염), Carbon emission right(탄소배출권)

———— 기 호 설 명 ————

C : 에너지원가 [\$/GJ]
 D : 비용흐름 [\$/h]
 \dot{E}_X : 엑서지흐름 [GJ/h]
 \dot{H} : 엔탈피흐름 [GJ/h]
 \dot{K} : 워너지흐름 [GJ/h]
 \dot{P} : 에너지 생산량 [GJ/h]
 \dot{Q} : 열 생산량 [GJ/h]
 \dot{W} : 전기 생산량 [GJ/h]

\dot{Z} : 간접비 및 구성기기의 비용흐름 [\$/h]

그리스 문자

κ : 워너지율

윗첨자

AR : 흡수식냉동기시스템의 작동유체
 BS : 보일러시스템의 작동유체
 CA : 냉기 생산품
 CR : 압축식냉동기시스템의 작동유체
 CS : 냉방시스템의 작동유체
 FC : 연료전지시스템의 작동유체
 GT : 가스터빈시스템의 작동유체

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

<i>HE</i>	: 열교환시스템의 작동유체
<i>HP</i>	: 히트펌프시스템의 작동유체
<i>HS</i>	: 난방시스템의 작동유체
<i>HW</i>	: 온수 생산품
<i>MT</i>	: 수온터빈시스템의 작동유체
<i>PH</i>	: 예열기시스템의 작동유체
<i>S</i>	: 증기 생산품
<i>ST</i>	: 증기터빈시스템의 작동유체
<i>WA</i>	: 온기 생산품

하첨자

[]	: 구성기기
<i>C</i>	: 공통구성기기
<i>P</i>	: P-번째의 생산품
<i>ES</i>	: 에너지원
<i>ID</i>	: 간접비
<i>K</i>	: 워너지
<i>W</i>	: 전기

1. 서 론

1992년 브라질 리우에서 개최된 유엔환경개발회의(UNCED)에서, 각국 정상들은 지구온난화 방지를 위해 온실가스의 인위적 방출을 규제하는 유엔기후변화협약(UNFCCC)을 채택하였다. 이를 추진하기 위해 당사국총회(COP)를 개최하기로 하였으며, 1997년 일본 교토에서 열린 제3차 당사국총회에서 2008년부터 2012년 동안 선진국의 이산화탄소배출량을 1990년 기준으로 평균 5.2% 감축하기로 한 교토의정서(Kyoto Protocol)를 결의하였다. 교토의정서에서는 선진국의 탄소 감축량에 대해 국가별 목표수치를 제시하고 있으며, 보다 효과적으로 감축목표를 달성하기 위해 지구온난화를 야기하는 탄소등을 비용화하고, 이 비용의 시장거래를 위해 국제배출권거래제도(IET, International Emission Trading), 공동이행제도(JI, Joint Implementation), 청정개발체제(CDM, Clean Development Mechanism)를 도입하였다. 이 교토의정서는 2004년 러시아의 참여로 발효되어, 2008년 본격적인 감축의무 기간에 접어들었고, 우리나라는 2013년부터 감축의무 대상국에 포함될 것으로 각종 문헌에서 보고되고 있다.

경제적인 관점에서 중요한 관심 대상은 탄소배출비용(Carbon emission cost)이며, 판매자와 구매자 사이에서 거래가 이루어진 후, 구매자는 최

종 생산제품으로 그 비용을 배분해야 할 것이다. 여기서, 국제배출권거래제도, 공동이행제도, 청정개발체제는 전 세계적으로 활발히 수행되고 있으나, 모두 판매자와 구매자 사이의 탄소배출비용에 관한 것이며, 유엔기후변화협약 공식사이트(www.unfccc.int)에서 매우 엄격하고 체계적으로 관리하고 있다.

탄소배출비용은 포괄적으로 환경오염비용에 속하며, 본 연구의 대상은 환경오염비용의 과세 또는 거래 이후 고려해야 할 복합생산품으로의 환경오염 비용배분 방법론이다. 현재 탄소세, 유탄세, 에너지세 등의 환경세를 도입하고 있는 나라는 영국, 프랑스, 스웨덴, 핀란드, 네덜란드, 덴마크, 노르웨이 등 몇 개국에 불과하며, 우리나라에서 환경세라는 명칭을 가진 세목은 아직 없다. 그러나 저탄소 녹색성장 실현을 위해 각 국가에서 다양한 형태의 환경세를 이룬 시일 내에 도입할 것으로 예상된다.

복합생산품의 비용배분 방법론은 생산품의 판매가 책정, 손익 산정 및 경제성 검토에 직접적으로 활용되므로 상당히 중요하다. 대표적인 복합생산시스템은 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합발전이며, 열병합발전에서 비용배분 방법론은 크게 회계학적 방법론과 엑서지경제학적 방법론으로 나눌 수 있다. 회계학적 방법론으로는 The world bank사의 기술보고서⁽¹⁾에서 소개되어 있듯이, Energy 방법, Alternative heat 방법, Alternative electricity 방법, Proportional 방법, Work 방법, Equal distribution 방법, Benefit distribution 방법 등이 있으며, 일반적으로 국내에서 감발량보상방식으로 불리는 Work 방법과 E.Shuly 방식으로 불리는 Benefit distribution 방법이 열과 전기의 비용 배분에 많이 적용되고 있다. 위의 방법론은 매우 간단하고 이해하기 쉽다는 것이 장점이나, 공학적인 근거가 없다는 것이 단점이다. 엑서지경제학적(Exergoeconomics) 방법론은 열역학적 법칙과 경제학적 원칙을 접목한 학문으로서, 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. 위의 방법론은 공학적인 근거를 제시한다는 것이 특징이나, 엑서지의 개념을 알고 있는 공학자일지라도 위의 수식을 적용하기 난해하다는 것이 단점이다.

한편, 선행연구에서 Reversible work 방법론을 제안⁽⁹⁾하였고, 엑서지경제학적 방법론과의 차이점⁽¹⁰⁾을 서술한 바 있다. 최근 연구에서는 제안한 방법론과 회계학적 방법론을 통합한 가치평가 방법(Worth evaluation method)⁽¹¹⁾을 새로이 제안하였고, 33.1 MW의 전기와 564.0 Gcal/h의 증기를 생산하는 가스터빈열병합발전,⁽¹²⁾ 22.2 MW의 전기와 44.4 Gcal/h의 온수를 생산하는 증기터빈열병합발전,⁽¹³⁾ 4개의 실에 냉기를 배분하는 냉방시스템,⁽¹⁴⁾ 그리고 4개의 실에 온기를 배분하는 난방시스템⁽¹⁵⁾에 적용하여 연료비, 간접비 및 직접비의 투입으로부터 전기, 증기, 온수, 온기, 냉기의 원가를 산정하고 비용을 배분한 바 있다.

현재까지 기존의 회계학적 및 엑서지경제학적 방법론 모두에서 환경오염비용 배분 방법론에 대한 연구문헌은 찾아볼 수 없다. 기존의 방법론을 확대 해석하여 적용할 수 있었으나, 환경오염비용이 전 세계적으로 핵심 사항인 만큼, 각 방법론에서는 그 배분 방법론을 명확히 서술하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

본 연구에서는 가상의 복합에너지 시스템으로부터 산출된 18종류의 생산품에 대해 환경오염비용 배분 수식을 명확히 밝히고, 제안된 방법론이 어떠한 에너지 시스템일지라도 적용 가능하다는 일반성을 입증하는데 그 목적이 있다.

2. 원가산정 및 비용배분 수식

제안된 방법론은 엔탈피, 엑서지, 위치에너지, 운동에너지 등을 포함한 어떠한 에너지라도 적용할 수 있다. 따라서 기존의 에너지들을 통합한 새로운 단어가 본 수식의 전개에서 필요하며, 워너지(Wonergy)라 명하기로 한다.

가치평가 방법은 생산원가는 제품의 가치에 비례한다고 정의⁽¹¹⁾되며, 그 원가산정 및 비용배분 수식은 다음과 같다.

$$C_P = \kappa_P \cdot \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{D}_{CO2} + \dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\sum \kappa_P \dot{P}} + \frac{\dot{Z}_P}{\dot{P}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_P &= \dot{K}_P \cdot \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{D}_{CO2} + \dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\sum \dot{K}_P} + \dot{Z}_P \quad (2) \\ &= C_P \cdot \dot{P} \quad [where] \quad \kappa_P = \dot{K}_P / \dot{P} \end{aligned}$$

여기서, 하첨자 P 는 N 개의 생산 제품 중 P 번째 생산품, 기호 C_P 는 제품 P 의 생산원가, \dot{K}_P 는 제품 P 를 생산하기 위해 투입된 워너지량, \dot{P} 는 제품 P 의 생산된 에너지량, κ 는 투입된 워너지량과 생산된 에너지량과의 비 또는 비에너지적으로 주어진 어떤 지표, \dot{D}_{ES} 는 열원투입 비용, \dot{D}_{CO2} 는 환경오염비용, \dot{Z}_{ID} 는 간접비용, \dot{Z}_C 는 각 제품을 생산하기 위해 공동으로 관여되는 구성기기의 비용, \dot{Z}_P 는 제품 P 의 생산에만 관여되는 구성기기의 비용, \dot{D}_P 는 제품 P 로 배분된 비용이다.

열병합발전을 해석할 경우 제품은 전기와 열이다. 따라서 기호 P 는 W 와 Q 로 대체된다. 수식의 전개에서 워너지로 엔탈피, 엑서지 등을 대입할 수 있다. 워너지에 엔탈피를 대입할 경우 기호 \dot{K}_P 은 $\Delta \dot{H}_P$ 로 대체되며 제품 P 를 생산하는 구성기기에서 엔탈피흐름의 입출차이고, 엑서지를 대입할 경우 $\Delta \dot{E}_{X,P}$ 로 대체되며 제품 P 를 생산하는 구성기기에서 엑서지흐름의 입출차이다. 워너지로 어떤 에너지를 대입하느냐에 따라 다양한 계산결과가 산출되며, 가장 합리적인 결과라고 판단되는 값을 채택해야 할 것이다.

시스템이 간단한 경우 원가를 식(1)로부터 산정할 수 있고, 비용을 식(2)로부터 배분할 수 있다. 시스템이 복잡한 경우에는 작동유체의 워너지단가를 구한 후, 제품의 원가산정과 비용배분을 수행하는 것이 보다 용이하다. 따라서 작동유체의 워너지단가 C_K 는 식(3)으로 정의되며, 식(4)로부터 원가산정 그리고 식(5)로부터 비용배분을 수행할 수 있다.

$$C_K = \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{D}_{CO2} + \dot{Z}_{ID} + \dot{Z}_C}{\sum \dot{K}_P} \quad (3)$$

$$C_P = C_K \cdot \dot{K}_P / \dot{P} + \dot{Z}_P / \dot{P} \quad (4)$$

$$\dot{D}_P = C_K \cdot \dot{K}_P + \dot{Z}_P \quad (5)$$

여기서, 식(4)는 식(1)과 같고 식(5)는 식(2)와 서로 같은 수식이다.

식(3)~식(5)에서 환경오염비용만을 고려하면, 작동유체의 워너지단가 C_K 는 식(6)과 같고, 식(7)로부터 원가를 산정할 수 있고, 식(8)로부터 비용을 배분할 수 있다.

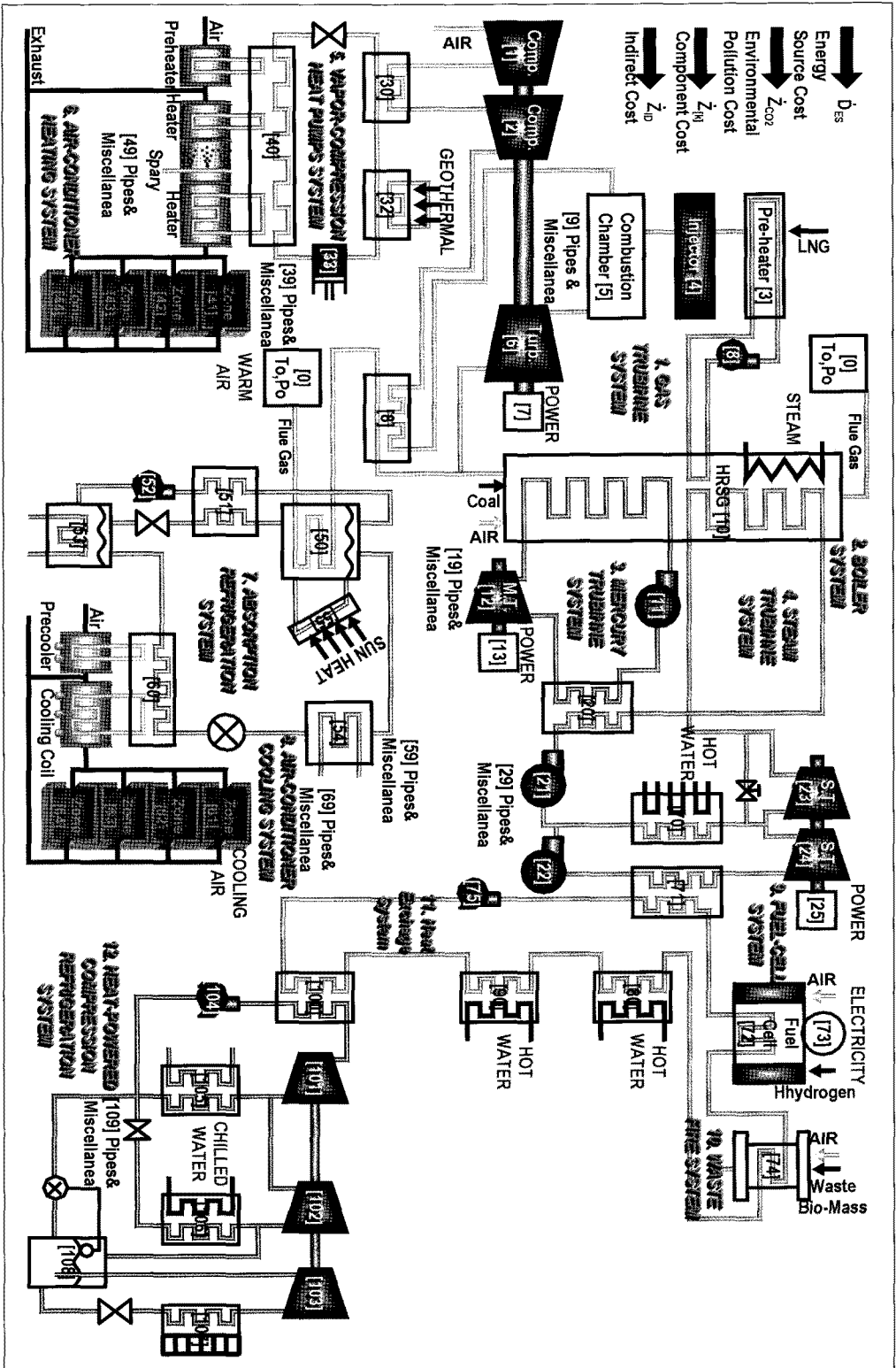


Fig. 1 A supposed multi-energy system composed of twenty kinds of each system.

$$C_K = \frac{\dot{D}_{CO_2}}{\sum \dot{K}_P} \quad (6)$$

$$C_P = C_K \cdot \dot{K}_P / \dot{P} \quad (7)$$

$$\dot{D}_P = C_K \cdot \dot{K}_P \quad (8)$$

3. 복합 생산품으로의 비용배분

Fig. 1은 가스터빈 시스템, 보일러 시스템, 수은터빈 시스템, 증기터빈 시스템, 열펌프 시스템, 난방 시스템, 흡수식냉동 시스템, 냉방 시스템, 연료전지 시스템, 쓰레기소각 시스템, 열교환기 시스템, 압축식냉동 시스템 즉 12종류의 단일 시스템을 통합한 가상 복합에너지 시스템으로서, LNG, 석탄, 지열, 태양열, 수소, 바이오매스, 쓰레기의 투입으로부터 전기, 증기, 온수, 냉수, 얼음, 온기, 냉기 등의 18종류의 생산품을 산출하고 있다.

탄소배출비용을 포함한 환경오염비용의 과세 또는 거래는 현재 전 세계적으로 핵심적인 관심 대상인 바, Fig. 1의 가상 복합에너지 시스템으로부터 산출된 18종류의 생산품에 대해 환경오염비용을 배분하는 수식을 유도하여 제안된 방법론이 어떠한 에너지 시스템일지라도 적용 가능하다는 범용성을 보이고자 한다.

식(6)~식(8)을 Fig. 1의 가스터빈 시스템에 적용하면, 가스터빈작동유체(GT)는 LNG의 연소로 인한 환경오염비용 \dot{D}_{LNG}^{GT} 과, 추가적으로 구성기기 [3]에서 워너지량 $\dot{K}_{[3]}^{HRSG}$ 과 그 단가 C_K^{HRSG} 의 비용 그리고 구성기기 [8]에서 전력 $\dot{W}_{[8]}^{HRSG}$ 과 그 원가 C_W^{GT} 의 비용이 투입되고, 구성기기[1, 2, 4, 6]에서 전기생산을 위한 워너지 $\dot{K}_{[1,2,4,6]}^{GT}$, 구성기기 [10]에서 폐열회수를 위한 워너지 $\dot{K}_{[10]}^{GT}$, 구성기기 [30]에서 히트펌프 가동을 위한 워너지 $\dot{K}_{[30]}^{GT}$, 그리고 구성기기 [50]에서 흡수식 냉동기 가동을 위한 워너지 $\dot{K}_{[50]}^{GT}$ 가 투입된다. 위 해석을 식(6)과 식(7)에 적용하면 다음의 수식으로부터 가스터빈 작동유체의 워너지단가 C_K^{GT} 와 생산된 전기원가 C_W^{GT} 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{GT} = \frac{\dot{D}_{LNG}^{GT} + \dot{K}_{[3]}^{HRSG} C_K^{HRSG} + \dot{W}_{[8]}^{GT} C_W^{HRSG}}{\dot{K}_{[1,2,4,6,10,30,50]}^{GT}} \quad (9)$$

$$C_W^{GT} = C_K^{GT} \cdot \dot{K}_{[1,2,4,6]}^{GT} / \dot{W}_{[1,2,4,6]}^{GT} \quad (10)$$

배열회수 보일러 [10]에서 배열의 환경오염비용 $\dot{K}_{[10]}^{GT} C_K^{GT}$ 과 석탄의 환경오염비용 \dot{D}_{Coal} 이 투입되고, 수은터빈 시스템(MT) 가동을 위한 $\dot{K}_{[10]}^{MT}$, 증기터빈 시스템(ST) 가동을 위한 $\dot{K}_{[10]}^{ST}$, LNG 에열을 위한 $\dot{K}_{[3]}^{HRSG}$, 그리고 증기(S) 생산을 위한 $\dot{K}_{[10]}^S$ 의 워너지가 투입된다. 위 해석을 식(6)과 식(7)에 적용하면, 다음의 수식으로부터 배열회수보일러 작동유체(HRSG)의 워너지단가 C_K^{HRSG} 와 생산된 증기원가 $C_{[10]}^S$ 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{HRSG} = \frac{\dot{D}_{Coal} + \dot{K}_{[10]}^{GT} C_K^{GT}}{\dot{K}_{[10]}^{MT} + \dot{K}_{[10]}^{ST} + \dot{K}_{[3]}^{HRSG} + \dot{K}_{[10]}^S} \quad (11)$$

$$C_{[10]}^S = C_K^{HRSG} \cdot \dot{K}_{[10]}^S / \dot{Q}_{[10]}^S \quad (12)$$

수은터빈 시스템(MT)에서는 배열회수 보일러로부터 비용 $\dot{K}_{[10]}^{MT} C_K^{HRSG}$ 이 투입되고, 전기 생산을 위한 워너지 $\dot{K}_{[11,12]}^{MT}$ 와 증기터빈 가동을 위한 워너지 $\dot{K}_{[20]}^{MT}$ 를 투입한다. 위 해석을 식(6)과 식(7)에 적용하면, 다음의 수식으로부터 수은터빈 작동유체의 워너지단가 C_K^{MT} 와 생산된 전기원가 C_W^{MT} 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{MT} = \frac{\dot{K}_{[10]}^{MT} C_K^{HRSG}}{\dot{K}_{[11,12,20]}^{MT}} \quad (13)$$

$$C_W^{MT} = C_K^{MT} \cdot \dot{K}_{[11,12]}^{MT} / \dot{W}_{[11,12]}^{MT} \quad (14)$$

증기터빈 시스템(ST)에서는 배열회수 보일러로부터 비용 $\dot{K}_{[10]}^{ST} C_K^{HRSG}$ 과 수은터빈 시스템(MT)으로부터 비용 $\dot{K}_{[20]}^{MT} C_K^{MT}$ 이 투입되어, 전기생산을 위한 $\dot{K}_{[21,22,23,24]}^{ST}$, 온수생산(HW)을 위한 $\dot{K}_{[70]}^{ST}$, 그리고 열교환 시스템 가동을 위한 $\dot{K}_{[71]}^{ST}$ 의 워너지를 투입한다. 따라서 증기터빈 작동유체의 워너지 단가 C_K^{ST} , 생산된 전기원가 C_W^{ST} , 그리고 생산된 온수원가 $C_{[70]}^{HW}$ 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{ST} = \frac{\dot{k}_{[10]}^{ST} C_K^{HRSG} + \dot{k}_{[20]}^{MT} C_K^{MT}}{\dot{K}_{[21,22,23,24,70,71]}^{ST}} \quad (15)$$

$$C_W^{ST} = C_K^{ST} \cdot \dot{k}_{[21,22,23,24]}^{ST} / \dot{W}_{[21,22,23,24]}^{ST} \quad (16)$$

$$C_{[70]}^{HW} = C_K^{ST} \cdot \dot{k}_{[70]}^{ST} / \dot{Q}_{[70]}^{HW} \quad (17)$$

증기압축식 히트펌프 시스템(HP)에서는 외부 생 산품이 없고 또한 단일의 온기를 생산하므로 비 용배분은 생략 가능하다.

난방 시스템(HS)에서는 히트펌프 시스템(HP)의 구성기기 [30]으로 부터 열비용 $\dot{k}_{[30]}^{GT} C_K^{GT}$, [32]로 부터 지열비용 \dot{D}_{Geo}^{HP} , 그리고 [33]으로 부터 전기 비용 $\dot{W}_{[33]}^{HP} C_W^{GT}$ 이 투입되어, 구역 [41]에서 $\dot{k}_{[41]}^{HS}$, 구역 [42]에서 $\dot{k}_{[42]}^{HS}$, 구역 43에서 $\dot{k}_{[43]}^{HS}$, 구역 44에서 $\dot{k}_{[44]}^{HS}$ 의 온기생산을 위한 워너지를 투입한다. 따라서 난방 시스템 작동유체의 워너지단가 C_K^{HS} 와 온기(WA)의 생산원가는 다음과 같이 산 정할 수 있다.

$$C_K^{HS} = \frac{\dot{k}_{[30]}^{GT} C_K^{GT} + \dot{D}_{Geo}^{HP} + \dot{W}_{[33]}^{HP} C_W^{GT}}{\dot{K}_{[41,42,43,44]}^{HS}} \quad (18)$$

$$C_{[41]}^{WA} = \dot{k}_{[41]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[41]}^{WA} \quad (19)$$

$$C_{[42]}^{WA} = \dot{k}_{[42]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[42]}^{WA} \quad (20)$$

$$C_{[43]}^{WA} = \dot{k}_{[43]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[43]}^{WA} \quad (21)$$

$$C_{[44]}^{WA} = \dot{k}_{[44]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[44]}^{WA} \quad (22)$$

흡수식 냉동 시스템(AR)에서는 외부 생 산품이 없 고 또한 단일의 냉기를 생산하므로 비 용배분은 생 략 가능하다.

냉방 시스템(CS)에서는 냉동 시스템(AR)의 구 성기기 [50]으로 부터 비 용 $\dot{k}_{[50]}^{GT} C_K^{GT}$, [55]로 부터 태양열비용 \dot{D}_{Sun}^{AR} , 그리고 [52]로 부터 전기비용 $\dot{W}_{[52]}^{AR} C_W^{GT}$ 이 투입되어, 구역 [61]에서 $\dot{k}_{[61]}^{HS}$, 구역 [62]에서 $\dot{k}_{[62]}^{HS}$, 구역 63에서 $\dot{k}_{[63]}^{HS}$, 구역 64에서 $\dot{k}_{[64]}^{HS}$ 의 냉기생산을 위한 워너지를 투입한다. 따 라서 냉방 시스템 작동유체의 워너지단가 C_K^{CS} 와 냉기(CA)의 생산원가는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{CS} = \frac{\dot{k}_{[50]}^{GT} C_K^{GT} + \dot{D}_{Sun}^{AR} + \dot{W}_{[52]}^{AR} C_W^{GT}}{\dot{K}_{[61,62,63,64]}^{AR}} \quad (23)$$

$$C_{[61]}^{CA} = \dot{k}_{[61]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[61]}^{CA} \quad (24)$$

$$C_{[62]}^{CA} = \dot{k}_{[62]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[62]}^{CA} \quad (25)$$

$$C_{[63]}^{CA} = \dot{k}_{[63]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[63]}^{CA} \quad (26)$$

$$C_{[64]}^{CA} = \dot{k}_{[64]}^{HS} C_K^{HS} / \dot{Q}_{[64]}^{CA} \quad (27)$$

연료전지 시스템(FC)에서는 수소의 환경오염비 용 $\dot{D}_{H_2}^{FC}$ 이 투입되어, 전기생산 $\dot{W}_{[72]}^{FC}$ 과 열교환 시 스템 가동을 위한 $\dot{K}_{[72]}^{FC}$ 의 워너지를 투입한다. 따 라서 연료전지 작동유체의 워너지단가 C_K^{FC} 와 생 산된 전기원가 C_W^{FC} 를 산정할 수 있다.

$$C_K^{FC} = \frac{\dot{D}_{H_2}^{FC}}{\dot{W}_{[72]}^{FC} + \dot{K}_{[72]}^{FC}} \quad (28)$$

$$C_W^{FC} = C_K^{FC} \quad (29)$$

열교환 시스템(HE)에서는 구성기기 [71]로 부 터 비 용 $\dot{k}_{[71]}^{ST} C_K^{ST}$, [72]로 부터 $\dot{k}_{[72]}^{FC} C_K^{FC}$, [74]로 부터 \dot{D}_{Waste}^{BS} 또는 \dot{D}_{Bio}^{BS} , [75]로 부터 $\dot{W}_{[75]}^{HE} C_W^{ST}$ 이 투입되고, 구성기기 [80]에서 온수생산을 위한 $\dot{k}_{[80]}^{HE}$, [90]에서 온수생산을 위한 $\dot{k}_{[90]}^{HE}$ 그리고 [100]에서 압축식 냉동기 가동을 위한 $\dot{k}_{[100]}^{HE}$ 의 워너지를 투 입한다. 따라서 작동유체의 워너지단가 C_K^{HE} 와 생 산된 온수원가 $C_{[80]}^{HW}$, $C_{[90]}^{HW}$ 를 다음과 같이 산정 할 수 있다.

$$C_K^{HE} = (\dot{k}_{[71]}^{ST} C_K^{ST} + \dot{k}_{[72]}^{FC} C_K^{FC} + \dot{D}_{Waste}^{BS} + \dot{D}_{Bio}^{BS} + \dot{W}_{[75]}^{HE} C_W^{ST}) / (\dot{k}_{[80]}^{HE} + \dot{k}_{[90]}^{HE} + \dot{k}_{[100]}^{HE}) \quad (30)$$

$$C_{[80]}^{HW} = \dot{k}_{[80]}^{HE} C_K^{HE} / \dot{Q}_{[80]}^{HW} \quad (31)$$

$$C_{[90]}^{HW} = \dot{k}_{[90]}^{HE} C_K^{HE} / \dot{Q}_{[90]}^{HW} \quad (32)$$

압축식 냉동 시스템(CR)에서는 구성기기 [100] 으로 부터 열비용 $\dot{k}_{[100]}^{HE} C_K^{HE}$ 과 [104]로 부터 전기 비 용 $\dot{W}_{[104]}^{CR} C_W^{ST}$ 이 투입되고, [106]에서 냉수생산을 위한 $\dot{k}_{[106]}^{CR}$ 그리고 [107]에서 얼음생산을 위한

$\dot{K}_{[107]}^{CR}$ 의 워너지를 투입한다. 따라서 작동유체의 워너지단가 C_K^{CR} , 생산된 냉수원가 $C_{[106]}^{CW}$, 그리고 생산된 얼음원가 $C_{[107]}^{ICE}$ 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_K^{CR} = \frac{\dot{K}_{[100]}^{HE} C_K^{HE} + \dot{W}_{[104]}^{CR} C_W^{ST}}{\dot{K}_{[106,107]}^{CR}} \quad (33)$$

$$C_{[106]}^{CW} = \dot{K}_{[106]}^{CR} C_K^{CR} / \dot{Q}_{[106]}^{CW} \quad (34)$$

$$C_{[107]}^{ICE} = \dot{K}_{[107]}^{CR} C_K^{CR} / \dot{Q}_{[107]}^{ICE} \quad (35)$$

이상으로, 투입된 환경오염비용을 18종류의 생산품 비용으로 각각 배분해 보았으며, 식(9)부터 식(35)까지 총 27수식이 유도되었다.

향후 Fig. 1에 도시된 시스템 이외에 새로운 시스템들을 계속 추가하여 본 방법론의 범용성 및 합리성을 지속적으로 입증할 계획이다.

4. 검토 및 토의

원가산정 및 비용배분에서 총 투입비용과 총 생산비용은 같다는 수식을 최종적으로 확인해야 한다. 따라서 유도된 수식 또한 이 원리에 부합되어야만 하며, 식(9)부터 식(35)까지 모두 합하면 시스템 내부 비용흐름 즉 \dot{K} 관련항들은 모두 소거되고 시스템 외부에서 투입된 그리고 외부로 생산된 비용흐름만 남게 되므로 제안된 방법론은 투입과 산출의 총합은 같다는 조건을 어떠한 시스템에 적용할지라도 만족시킨다.

열병합발전을 해석할 경우 워너지로서 엔탈피, 대체열, 대체전기, 대체연료, 동일연료절약량 그리고 엑서지를 제안⁽¹¹⁻¹³⁾한 바 있고, 열교환기를 해석할 경우 워너지로서 질량기준, 엔탈피, 그리고 가역일을 제안⁽¹¹⁾한 바 있으며, 냉난방시스템을 해석할 경우 워너지로서 질량기준, 엔탈피, 엑서지 그리고 워너지율로서 예상불만족률(PPD)과 열쾌적지표를 제안⁽¹⁴⁻¹⁵⁾한 바 있다. 이와 같이 다양한 에너지 및 지표가 워너지량 \dot{K} 또는 워너지율 κ 값으로 적용될 수 있으며, 원가산정 및 비용배분 결과 또한 다양하게 제시된다. 선행연구의 결과에 의하면, 열병합발전에서의 전기와 열 그리고 열교환기에서의 각종 열들은 엑서지가 가장 합리적으로 평가하였으며, 냉난방시스템의 냉

기와 온기의 평가로는 예상불만족률이 가장 합리적으로 평가하였다.

현재 환경오염 비용으로는 탄소배출 비용이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 만약 탄소거래시장에서 화석연료에 대한 탄소배출권(CER, Carbon Emission Right)을 구매하여 원가에 반영한다면 원가는 상승할 것이고, 시스템 개조로 인한 효율 향상 또는 신재생에너지 적용 등으로 인한 탄소배출의 감축을 유도하였다면 그만큼의 탄소배출 비용을 획득할 수 있고 원가는 감소하게 된다.

유엔기후변화협약(UNFCCC)의 청정개발체제(CMD) 사업 즉 시스템 효율향상 또는 신재생에너지 적용 등으로 인한 탄소배출 감축실적은 CMD 집행위원회에서 엄격한 승인을 거쳐 인정받게 된다. 현재 승인된 CMD 사업(www.unfccc.int)은 72종류이다. 이 중 많은 사업이 Fig. 1의 어느 부분에 속하는 복합에너지 시스템이며, 이로 인한 탄소배출 감축실적을 인정받고 있다. 감축된 비용 또는 증가된 비용은 제품의 원가로 실시간 반영될 것이며 이때 합리적인 비용배분 방법론이 필요로 할 것이다. 따라서 제안된 방법론은 원가산정 및 비용배분에 유용하게 적용될 것으로 기대한다.

5. 결 론

선행연구에서 제안한 가치평가 방법의 정의는 각 제품의 원가는 그 가치에 비례한다이며, 다양한 산출제품에 적용할 수 있다고 제안하였다. 이번 연구에서는 가스터빈, 보일러, 수은터빈, 증기터빈, 열펌프, 난방, 흡수식냉동, 냉방, 연료전지, 쓰레기소각, 열교환, 압축식냉동 즉 12종류의 단일시스템을 통합한 가상 복합에너지 시스템을 대상으로 LNG, 석탄, 지열, 태양열, 수소, 바이오메스, 쓰레기의 투입으로부터 전기, 증기, 온수, 냉수, 얼음, 온기, 냉기 등의 18종류의 생산품에 대해 탄소배출비용을 포함한 환경오염비용을 제안한 방법론을 적용하여 배분하였다.

이 결과 총 27수식으로 유도되었으며, 유도된 수식을 모두 더하면 투입된 금액과 산출된 금액은 같다는 수식이 추가적으로 유도되어 본 방법론은 어떠한 에너지 시스템에 적용할지라도 원가산정 및 비용배분을 수행할 수 있다.

CMD 집행위원회에서 승인한 CMD 사업은 현재 72종류이며 이 중 많은 사업이 본 연구의 과제

에 해당하므로 본 연구의 결과는 원가산정 및 비용배분 담당자에게 실무적으로 많은 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

향후 본 연구에서 도시된 가상 복합에너지 시스템 이외의 새로운 에너지 시스템을 지속적으로 추가하여 제안된 방법론의 범용성 및 합리성을 계속 검증해 나갈 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., 1999, Exergy and thermoeconomic analysis of power systems, MS thesis, Chungang University, Seoul, Korea, pp. 85-95.
10. 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.
11. 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
12. Kim, D. J., 2009, 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.
13. 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.
14. Kim, D. J., 2009, Suggestion of the worth evaluation of cool air and the allocation methodology of cooling cost, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 201-208.
15. 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.