

열경제학에 대한 새로운 방법론 제안

김 덕 진[†]

에너코스

A Suggestion of New Methodology on Thermoconomics

Deok-Jin Kim[†]

ABSTRACT: Thermoconomics or exergoeconomics can be classified into the three fields of cost estimating, cost optimization, and internal cost analysis. The objective of cost estimating is to estimate each unit cost of product and allocate each cost flow of product such as electricity or hot water. The objective of optimization is to minimize the input costs of capital and energy resource or maximize the output costs of products under the given constraints. The objective of internal cost analysis is to find out the cost formation process and calculate the amount of cost flow at each state, each component, and overall system. In this study, a new thermo-economic methodology was proposed in the three fields. The proposed methodology is very simple and obvious. That is, the equation is only each one, and there are no auxiliary equations. Any energy including enthalpy and exergy can be applied and evaluated by this equation. As a new field, the cost allocation methodology on cool air or hot air produced from an air-condition system was proposed. Extending this concept, the proposed methodology can be applied to any complex system.

Key words: Thermoconomics(열경제학), exergoeconomics(엑서지경제학), optimization(최적화), cost estimating(원가산정), cost allocation(비용배분), unit cost(원가)

기 호 설 명

C : 원가 [\$/GJ]
 \dot{D} : 비용흐름 [\$/h]
 \dot{E} : 엑서지흐름 [GJ/h]
 \dot{K} : 워너지흐름 [GJ/h]
 \dot{H} : 엔탈피흐름 [GJ/h]
 \dot{P} : 일 또는 열 등의 에너지 생산량 [GJ/h]
 \dot{Q} : 열량 [GJ/h]
 \dot{W} : 전기 생산량 [GJ/h]
 \dot{Z} : 간접비 및 구성기기의 비용흐름 [\$/h]

그리스 문자

κ : 워너지율

하첨자

C : 공통구성기기
 ES : 에너지원
 ID : 간접비
 K : 워너지
 L : 손실
 P : P 번째 생산품
 Q : 열
 W : 전기

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

1. 서 론

열경제학(Thermoeconomics) 또는 엑서지경제학(Exergoeconomics)은 열역학 제 2법칙과 경제 원칙의 접목을 통해 생산품의 원가산정, 시스템의 비용최적화, 그리고 내부비용흐름을 파악하는 기법이다. 원가산정의 목적은 생산품의 각 원가를 산정하고 비용흐름을 배분하는 것이다. 이 기법은 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합발전에서 중요하고, 생산품의 판매단가 결정, 이익과 손실 계산, 그리고 경제성 평가를 위해 필요로 된다. 비용최적화의 목적은 주어진 제약조건하에 열원과 자본의 투입비용을 최소화하는 또는 생산품의 산출비용을 최대화하는 것이다. 이 해석으로부터, 설계자는 에너지시스템의 최적화된 작동 조건을 결정지을 수 있다. 내부비용해석의 목적은 비용형성과정을 파악하고, 각 상태, 각 구성기에서 비용흐름의 양을 계산하는 것이다. 이러한 정보는 각 구성기기를 평가하고 주 구성기기의 비용흐름을 개선하기위해 유용하다.

열경제학적 문제를 풀기위한 다양한 방법론들이 제시되어 오고 있다. 대표적인 방법론으로는, the exergetic cost theory (ECT)^(1,2), the specific cost exergy costing method (SPECOC)^(3,4), the thermoeconomic functional analysis (TFA)⁽⁵⁻⁷⁾, the engineering functional analysis (EFA)⁽⁸⁾, the average cost method (AVCO)⁽⁹⁾, the modified productive structure analysis (MOPSA)^(10,11)이 있다. 이러한 방법론들의 주된 특징은 엑서지균형식에 각자의 원리에 따른 엑서지적 단가를 적용하여 비용균형식을 제안한다는 것이다. 그러나 엑서지의 개념을 알고 있는 공학자일지라도 실제 시스템에 위의 방법론을 적용하기 쉽지 않고 또한 그 방법론에 의한 열경제학적 문제를 풀기 쉽지 않다는 단점이 있다.

본 연구의 목적은 새로운 원가산정, 비용최적화, 그리고 내부비용해석 방법론을 제안하는 것이다. 엔탈피와 엑서지를 포함한 다양한 에너지 또는 어떤 지표가 제안된 방법론에 적용될 수 있고, 매우 간결하고 명확하다는 것이 본 방법론의 주된 특징이다. 이 방법론을 가치평가방법(Worth evaluation method) 그리고 엔탈피 및 엑서지를 통합한 임의의 어떤 에너지를 워너지(Wonergy)라 명하기로 한다.

2. 원가산정 및 비용배분 방법론 제안

k 구성기기 및 시스템 전체의 에너지균형식은 다음과 같이 재정렬될 수 있다.

$$\dot{W}_k + \dot{Q}_k = \dot{Q}_{ES,k} + \Delta \dot{H}_{I,k} + \Delta \dot{H}_{O,k} - \dot{Q}_{L,k} \quad (1)$$

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_L \quad (2)$$

여기서, \dot{W} 과 \dot{Q} 는 최종 생산물로서 전기와 열의 양, \dot{Q}_{ES} 는 에너지원의 열투입량, $\Delta \dot{H}_I$ 는 다른 흐름으로 에너지를 투입하는 흐름에서 엔탈피량의 차, $\Delta \dot{H}_O$ 는 다른 흐름으로부터 에너지를 받는 흐름에서 엔탈피량의 차, 그리고 \dot{Q}_L 은 환경으로의 손실열량이다.

한편, k 구성기기 및 시스템 전체의 엑서지균형식은 다음과 같이 재정렬될 수 있다.

$$\dot{W}_k + \dot{E}_{Q,k} = \dot{E}_{ES,k} + \Delta \dot{E}_{I,k} + \Delta \dot{E}_{O,k} - \dot{E}_{L,k} \quad (3)$$

$$\dot{W} + \dot{E}_Q = \dot{E}_{ES} - \dot{E}_L \quad (4)$$

여기서, \dot{E}_Q 는 최종 생산물로서 열의 엑서지 양, \dot{E}_{ES} 는 에너지원의 엑서지투입량, $\Delta \dot{E}_I$ 는 다른 흐름으로 엑서지를 투입하는 흐름에서 엑서지량의 차, $\Delta \dot{E}_O$ 는 다른 흐름으로부터 엑서지를 받는 흐름에서 엑서지량의 차, 그리고 \dot{E}_L 은 손실일 (엑서지 파괴 및 손실)이다.

위의 에너지균형식과 엑서지균형식의 형태는 기본적으로 서로 같다. 따라서 에너지와 엑서지의 명칭을 워너지로, $\Delta \dot{H}$ 와 $\Delta \dot{E}$ 를 \dot{K} 로 통합하면, 워너지균형식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{W}_k + \dot{K}_{Q,k} = \dot{K}_{ES,k} + \dot{K}_{I,k} + \dot{K}_{O,k} - \dot{K}_{L,k} \quad (5)$$

$$\dot{W} + \dot{K}_Q = \dot{K}_{ES} - \dot{K}_L \quad (6)$$

원가산정 및 비용배분의 전제조건은 시스템 전체에 대한 생산비용들의 총합은 투입비용들의 총합과 반드시 같아야 한다는 것이다. 따라서 전체 비용균형식은 다음과 같이 수식화 된다.

$$C_W \dot{W} + C_Q \dot{Q} = \dot{D}_{ES} + \sum \dot{Z}_k + \dot{Z}_{CO_2} + \dot{Z}_{ID} \quad (7)$$

여기서, C_W 와 C_Q 는 시스템으로부터 생산된 전기와 열의 원가, \dot{D}_{ES} 는 에너지원의 투입비용흐름, \dot{Z}_k 는 k 구성기기의 자본비용흐름, \dot{Z}_{CO_2} 는 탄소배출과 같은 환경오염비용, 그리고 \dot{Z}_{ID} 는 시스템 외부로부터 유입되는 간접비용흐름이다.

식(5)와 식(6)으로부터 알 수 있듯이, 환경을 포함한 모든 구성기기에서 $\dot{K}_{I,k}$ 과 $\dot{K}_{O,k}$ 의 합은 정확히 0이다. 따라서 작동유체의 워너지단가 C_K 를 $\dot{K}_k(=\dot{K}_{I,k}+\dot{K}_{O,k})$ 에 곱하고 식(7)에 추가하면, 전체비용균형식은 다음과 같다.

$$C_W\dot{W} + C_Q\dot{Q} = \dot{D}_{ES} + C_K\dot{K} + \sum \dot{Z}_k + \dot{Z}_{CO_2} + \dot{Z}_{ID} \quad (8)$$

모든 시스템은 세가지 구성기기들로 구분되어 질 수 있다. (1) 연소기, 예열기, 열교환기, 배열회수보일러, 그리고 환경등과 같이 전기와 열 생산에 모두 관여되는 공통구성기기. (2) 압축기, 터빈, 그리고 펌프와 같이 오직 전기 생산에만 관여되는 전기구성기기. (3) 배열회수보일러 그리고 열교환기와 같이 오직 열 생산에만 관여되는 열구성기기. 따라서 식 $\dot{K}=0$ 은 식(9)와 같이 세개의 부분 항들로 나누어 질 수 있고, 식(8)은 공통, 전기, 그리고 열 구성기기들의 세가지 비용균형식 식(10)-(12)로 나누어 질 수 있다.

$$-\dot{K}_C = \dot{K}_W + \dot{K}_Q \quad (9)$$

$$0 = \dot{D}_{ES} + C_K\dot{K}_C + \dot{Z}_C + \dot{Z}_{CO_2} + \dot{Z}_{ID} \quad (10)$$

$$C_W\dot{W} = C_K\dot{K}_W + \dot{Z}_W \quad (11)$$

$$C_Q\dot{Q} = C_K\dot{K}_Q + \dot{Z}_Q \quad (12)$$

여기서, 하첨자 C는 공통구성기기들, W는 전기구성기기들, 그리고 Q는 열구성기기들이다.

식(9)를 식(10)에 대입하면 식(13)과 같이 워너지단가 C_K 를 구할 수 있고, 전기원가 C_W , 열원가 C_Q , 전기생산비용흐름 \dot{D}_W , 그리고 열생산비용흐름 \dot{D}_Q 을 다음의 수식으로서 구할 수 있다.

$$C_K = \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_{CO_2} + \dot{Z}_{ID}}{\kappa_W\dot{W} + \kappa_Q\dot{Q}} \quad (13)$$

$$C_W = \kappa_W \cdot C_K + \dot{Z}_W/\dot{W} \quad (14)$$

$$C_Q = \kappa_Q \cdot C_K + \dot{Z}_Q/\dot{Q} \quad (15)$$

$$\dot{D}_W = C_W \cdot \dot{W} \quad (16)$$

$$\dot{D}_Q = C_Q \cdot \dot{Q} \quad (17)$$

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

여기서, κ_W 는 전기의 워너지율을 그리고 κ_Q 는 열의 워너지율을 뜻한다. 식(13)-(17)에서 오직 κ_W 와 κ_Q 만이 독립변수이고 그 이외는 모두 사전에 주어진 값들이다. 따라서 본 방법론의 핵심은 κ_W 와 κ_Q 값을 결정하는 것이다.

열역학 제 1 법칙적으로 위 수식을 해석할 경우 \dot{K} 는 제품을 생산하는 구성기기에서 엔탈피흐름의 입출력차 $\Delta\dot{H}$ 이고, 열역학 제 2 법칙적으로 위 수식을 해석할 경우 \dot{K} 는 제품을 생산하는 구성기기에서 엑서지흐름의 입출력차 $\Delta\dot{E}$ 이다. 엔탈피를 적용한 결과와 엑서지를 적용한 결과는 서로 상이하게 다르며, 엑서지를 적용한 결과가 열경제학 분야에서 합리적으로 인정받고 있다.

식(13)-(17)은 전기 W와 단일의 열 Q을 생산하는 열병합발전예 적용할 수 있다. 이 수식을 임의의 생산품 P를 산출하는 복합에너지시스템에 적용하면 그 원가산정 및 비용배분수식은 다음과 같이 최종적으로 표현된다.

$$C_K = \frac{\dot{D}_{ES} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_{CO_2} + \dot{Z}_{ID}}{\sum \kappa_P \dot{P}} \quad (18)$$

$$C_P = \kappa_P \cdot C_K + \dot{Z}_P/\dot{P} \quad (19)$$

$$\dot{D}_P = C_P \cdot \dot{P} \quad (20)$$

$$[where] \quad \kappa_P = \dot{K}_P/\dot{P}$$

새로운 열경제학 분야로서, N개의 실로 냉기 또는 온기를 공급하는 어떤 공기조화시스템을 가정해 본다. 열경제학적 문제는 공기의 각 비용흐름을 배분하는 것이다. 가장 먼저, 각 비용흐름은 소비된 열의 양에 비례하여 배분된다는 방법이 쉽게 제안될 수 있다. 그 다음, 소비된 엑서지의 양에 비례한다는 접근법이 제안될 수 있다. 또한, 공기의 질량, 쾌적함 정도, 그리고 실의 온도에 비례하는 방법들이 다양하게 제안될 수 있다. 이러한 모든 방법들은 식(19)와 식(20)으로 통합되

어지고, 워너지량 \dot{K} 과 워너지율 κ 은 다음의 수식으로 계산된다.

$$\dot{K}_P = \Delta \dot{H}_P \quad (21)$$

$$\dot{K}_P = \Delta \dot{E}_P \quad (22)$$

$$\dot{K}_P = \dot{m} \cdot \sum \dot{Q}_P / \sum \dot{m}_P \quad (23)$$

$$\kappa_P = 100 \pm |PPD_P - 5| \quad (24)$$

$$\kappa_P = 100 \pm \xi \cdot |t_P - t_{avg}| \quad (25)$$

여기서, 하첨자 P 는 P 번째 실로 공급되는 공기, PPD 는 예상불만족률(predicted percent dissatisfied index)⁽¹³⁾, t 는 건구온도 등의 열쾌적지표(thermal comfort index)⁽¹³⁾, t_{avg} 는 각 지표들의 평균, 그리고 ξ 는 단위 열쾌적지표 당 약 2%~10% 정도의 할인율이다.

3. 시스템 최적화 방법론 제안

3.1 설계최적화 방법론

전통적인 최적화 목적함수는 식(26)과 같이 투입비용의 최소화, 또는 식(27)와 같이 생산량의 최대화이다.

$$F_{min} = \dot{D}_{ES} + \sum \dot{Z}_k \quad (26)$$

$$F_{max} = \sum P_k \quad (27)$$

식(27)에서 생산량 \dot{P} 는 열역학 제 1 법칙적으로 해석할 경우 전기량과 열량이며, 제 2 법칙적으로 해석할 경우 전기량과 열의 엑서지량이다.

열병합발전일 경우 최적화의 대상은 에너지원의 투입비용 \dot{D}_{ES} , 구성기기비용 \dot{Z} , 전기생산량 \dot{W} , 열생산량 \dot{Q} 이며, 이 네 종류 중 두 개를 선택하는 조합 개수 즉 총 여섯 종류의 조합에 대해 최적화가 수행될 수 있다. 식(26)로부터 전기생산량과 열생산량이 고정조건으로 주어질 때, 최소의 에너지원 투입비용 \dot{D}_{ES} 과 구성기기비용 \dot{Z} 이 결정될 수 있고, 식(27)로부터 에너지원의 투입비용과 구성기기비용이 고정조건으로 주어질 때, 최대의 전기생산량 \dot{W} 과 열생산량 \dot{Q} 이 결정될 수 있다.

여기서, 총 여섯 종류의 최적화 대상 중 위의 두 종류를 제외한 나머지 네 종류 즉 투입비용의 최소화과 생산량의 최대화를 동시에 최적화할 수 있는 수식이 필요로 된다. 식(6)의 양변에 에너지원의 워너지단가 $C_{ES,K}$ 를 곱하면 설계적 관점에서 전체비용균형식은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ES,K} \dot{W} + C_{ES,K} \dot{K}_Q = \dot{D}_{ES} - C_{ES,K} \dot{K}_L \quad (28)$$

여기서, 에너지원의 투입비용 \dot{D}_{ES} 은 $C_{ES,K} \dot{K}_{ES}$ 이다. 설계 최적화는 투입비용의 최소화 또는 생산량의 최대화이다. 이 개념을 식(6)에 적용하면, 두 가지 경우 모두 손실비용 $C_{ES,K} \dot{K}_L$ 의 최소화로 정리된다. 따라서 설계 최적화를 위한 목적함수는 다음과 같이 제안할 수 있고, 식(26)과 식(27)의 최적화 대상이 아닌 나머지 네 종류의 조합 역시 최적화를 수행할 수 있다.

$$F_{min} = C_{ES,K} \cdot \dot{K}_L + \sum \dot{Z}_k \quad (29)$$

여기서, 설계 최적화를 열역학 제 1 법칙적으로 해석할 경우 $C_{ES,K}$ 는 에너지원의 열량구매단가이고 \dot{K}_L 은 각 구성기기에서 환경으로 손실된 그리고 방출된 열량의 총합이며, 제 2 법칙적으로 해석할 경우 $C_{ES,K}$ 는 에너지원의 엑서지구매단가이고 \dot{K}_L 은 각 구성기기에서 파괴된 그리고 환경으로 방출된 엑서지량의 총합이다. 식(26)과 같이 전기와 열 생산량이 고정조건으로 주어진 상태에서 에너지원의 투입량과 구성기기를 결정하는 최적화 문제일 경우, 제 1 법칙적 해석과 제 2 법칙적 해석의 결과는 정확히 서로 일치하며, 그 이외의 조합일 경우 최적화 결과는 서로 다르다. 일반적으로 엑서지적 해석의 결과가 설계최적화에 합리적으로 인정받고 있다.

3.2 이익최적화 방법론

식(29)로부터 투입비용의 최소화과 생산량의 최대화를 동시에 구현할 수 있다. 이 방법론은 설계의 관점에서 접근한 것이다. 여기서 경제적 관점으로 접근한다면 최적화는 최대의 이익을 얻을 수 있는 운전조건을 결정하는 문제가 된다.

이익은 판매비용과 생산비용과의 차이이며 이익 최적화는 다음의 수식으로부터 구할 수 있다.

$$F_{\min} = \sum \dot{P} \cdot (C_{S,P} - C_P) \quad (30)$$

여기서, F 는 목적함수, \dot{P} 은 생산품의 양, $C_{S,P}$ 는 생산품의 판매단가, 그리고 C_P 는 식(19)로부터 산정한 원가이다. 이해를 돕기 위해 열병합발전에서 생산된 전기와 열을 적용하면 이익 최적화 함수는 다음과 같다.

$$F_{\max} = \dot{W} \cdot (C_{S,W} - C_W) + \dot{Q} \cdot (C_{S,Q} - C_Q) \quad (31)$$

여기서 전기판매단가 $C_{S,W}$ 와 열판매단가 $C_{S,Q}$ 는 이익최적화를 위해 사전에 주어지는 또는 예측해야할 값이며, 전기생산원가 C_W 는 식(14) 그리고 열생산원가 C_Q 는 식(15)로 산정할 수 있다.

설계 최적화에서와 같이, 최적화의 대상은 에너지원의 투입비용 \dot{D}_{ES} , 구성기기비용 \dot{Z} , 전기생산량 \dot{W} , 열생산량 \dot{Q} 이며, 이 네 종류 중 두 개를 선택하는 조합 개수 즉 총 여섯 종류의 조합에 대해 최적화가 수행될 수 있다. 전기생산량 \dot{W} 와 열생산량 \dot{Q} 가 고정조건으로 주어질 때, 식(31)은 식(7)과 연결되어 최소투입비용을 결정하는 수식으로 변환되며 결국 식(26)의 결과와 정확히 동일하게 된다. 나머지 다섯 종류의 조합에 대한 이익 최적화 수행 결과는 식(29)의 설계 최적화 결과와 약간 다르다.

4. 내부비용해석 방법론 제안

시스템 내부의 비용형성과정을 파악하고, 각 상태 및 각 구성기기에서의 비용흐름의 양을 계산하는 것이 필요하다. 이러한 정보는 각 구성기기를 평가하고 비용흐름을 개선하기위해 유용하다. 이 수식 역시 식(5)의 양변에 에너지원의 워너지단가 $C_{ES,K}$ 를 곱하면 설계적 관점에서의 내부비용흐름을 파악할 수 있다. 이 수식은 식(29)의 설계최적화와 관계되며, 식(19)의 원가산정 그리고 식(30)의 이익최적화와는 관계가 없음에 유의해야 할 것이다.

$$C_{ES,K} \dot{W}_k + C_{ES,K} \dot{K}_{Q,k} = C_{ES,K} \dot{K}_{ES,k} + C_{ES,K} \dot{K}_{I,k} + C_{ES,K} \dot{K}_{O,k} - C_{ES,K} \dot{K}_{L,k} \quad (32)$$

5. 결과 및 검토

선행연구에서, 33.1 MW의 전기와 564.0 Gcal/h의 증기를 생산하는 가스터빈열병합발전⁽¹⁴⁾, 314.1 MW의 전기와 279.4 Gcal/h의 증기를 생산하는 복합열병합발전⁽¹⁵⁾, 그리고 22.2 MW의 전기와 44.4 Gcal/h의 온수를 생산하는 증기터빈열병합발전⁽¹⁶⁾에 적용하여 전기, 증기, 온수의 원가산정 및 비용배분을 수행한 바 있다. 또한 4개의 실에 냉기⁽¹⁷⁾ 및 온기⁽¹⁸⁾를 투입하는 어떤 공기조화 시스템에 대해 각 공기의 원가산정 및 비용배분을 수행한 바 있다.

위의 열병합발전에 대한 비용배분 결과는 다음과 같다. 워너지 \dot{K} 로 엔탈피, 엑서지, 대체전기, 대체열, 대체연료를 적용할 수 있으며, 이 중 엑서지가 가장 합리적이라 평가된다. 엑서지를 적용한 결과, 생산된 전기와 열의 원가비는 가스터빈열병합발전에서 68.8% : 31.2%, 복합열병합발전에서 77.0% : 23.0%, 그리고 증기터빈열병합발전에서 81.6% : 18.4%로 산정되었다.

공기조화 시스템에 대한 비용배분 결과는 다음과 같다. 워너지 \dot{K} 로 엔탈피와 엑서지를 그리고 워너지율 κ 로 질량, 예상불만족률(PPD), 열쾌적지표를 적용할 수 있고, 이 중 예상불만족률이 가장 합리적이라 평가된다. 예상불만족률을 적용한 결과, 29°C, 27°C, 26°C, 25°C를 유지하는 각 실 냉기의 원가비는 19.4%, 25.8%, 27.0%, 27.7%로 산정되었다. 21°C, 20°C, 19°C, 18°C를 유지하는 각 실 온기의 원가비는 25.9%, 25.8%, 24.8%, 23.5%로 산정되었다.

식(29)의 설계 최적화 방법론과 식(30)의 이익 최적화 방법론의 결과는 서로 다르다. 이와 같은 문제는 단일시스템에서 두 종류 이상의 제품이 생산될 때 발생하며, 경제성 검토를 수행할 수 있는 이익 최적화 방법론이 설계 최적화 방법론보다 합리적이라 판단한다.

식(32)로부터 계산된 내부비용흐름을 해석하는 관점은 식(1)의 에너지균형 및 식(2)의 엑서지균형을 해석하는 관점과 정확히 같다.

생산품의 판매단가 결정, 이익과 손실 계산, 그리고 경제성 평가는 어느 원가산정 방법론을 적

용하느냐에 따라 그 결과가 다르게 된다. 즉 비합리적인 원가산정 결과를 적용할 경우 비합리적인 결론이 도출될 수밖에 없다. 따라서 가장 합리적인 원가산정방법론을 선택하는 것이 중요하며, 제안된 방법론의 합리성과 범용성을 지속적으로 검증해 나갈 예정이다.

6. 결 론

본 연구에서, 원가산정, 비용최적화, 내부비용 해석 방법론이 새롭게 제안되었다. 엔탈피, 엑서지 등은 워너지라는 새로운 단어로 통합될 수 있고, 제안된 수식들은 워너지로서 표현된다. 따라서 제안된 수식의 결과는 워너지로 어떤 에너지를 적용하느냐에 따라 다양한 결과를 제시하며, 일반적으로 엑서지가 가장 합리적인 결과를 도출하고 있다.

새로운 분야로서, 어떤 공기조화시스템에서 생산된 냉기 또는 증기에 대한 비용배분 방법론을 제안하였다. 이러한 개념을 확장하면, 제안된 방법론은 어떠한 복합 시스템일지라도 적용 가능할 것으로 판단한다.

기존 방법론을 적용하여 원가산정 및 최적화를 수행하기 위해서는 수십 개의 내부 수식을 유도해야하므로 상당히 난해하나, 제안된 방법론은 단일의 수식으로 매우 간결하고 명확하다는 것이 가장 큰 장점이다. 따라서 기존의 방법론들과 그 수식 및 결과를 쉽게 비교할 수 있다. 향후 다양한 시스템에 본 방법론을 적용하여 그 범용성과 타당성을 지속적으로 검증해나갈 예정이다.

참고 문헌

1. Lozano, M. A. and Valero, A., 1993, Theory of the exergetic cost, *Energy*, vol. 18, No. 9, pp. 939-960.
2. Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L. and Torres, C., 1994, Application of the exergetic cost theory to the CGMA problem, *Energy*, vol. 19, No. 3, pp. 365-381.
3. 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.
4. 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.
5. Frangopoulos, C. A., 1983, Thermo-economic functional analysis: a method for optimal design or improvement of complex thermal systems, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
6. Frangopoulos, C. A., 1987, Thermo-economic functional analysis and optimization, *Energy*, vol. 12, No. 7, pp. 563-571.
7. Frangopoulos, C. A., 1994, Application of the thermo-economic functional approach to the CGAM problem, *Energy*, vol. 19, No. 3, pp. 323-342.
8. von Spakovsky, M. R., 1994, Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem, *Energy*, vol. 19, No. 3, pp. 343-364.
9. Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M. J., 1996, *Thermal design and optimization*, New York, Wiley.
10. 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.
11. Kwak, H. Y., Kim, D. J. and Jeon, J. S., 2003, Exergetic and thermo-economic analyses of power plants, *Energy*, vol. 28, pp. 343-360.
12. Valero, A., Lozano, M. A. and Serra, L., 1994, CGAM problem: definition and conventional solution, *Energy*, vol. 19, No. 3, pp. 279-386.
13. ASHRAE, 2005, *ASHRAE Handbook Fundamentals*, Atlanta, Chapter 8.
14. 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.
15. 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
16. 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.
17. 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.
18. 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.