

열병합발전에서 비용배분 방법론의 합리성 검토

김덕진[†] · 최병렬*

환경열경제연구소, *에너지경제연구원

(2020년 4월 7일 접수, 2020년 5월 11일 수정, 2020년 5월 15일 채택)

Rationality Review of Cost Allocation Methodology at CHP

Deokjin Kim[†] · Byungryeal Choi*

Environmental Thermoeconomics Institute, *Korea Energy Economics Institute

(Received 7 April 2020, Revised 11 May 2020, Accepted 15 May 2020)

요 약

단일 에너지 시스템으로부터 다양한 종류의 제품이 생산될 때, 공통비를 각 제품으로 배분하는 방법론은 생산자와 구매자의 손익과 직접적으로 관련되기 때문에 매우 중요하다. 열병합발전에서 전기와 열의 비용배분 방법론에는 Heat 방법, Work 방법, Benefit distribution 방법, Exergy 방법 등이 있다. 전 세계적으로 Benefit distribution 방법이 가장 많이 알려져 있고, Exergy 방법은 열공학자들 사이에서 크게 인정받고 있다. 검토 결과 Benefit distribution 방법은 일반 상식과 어긋나는 결과가 도출되어 합리성이 낮고, Exergy 방법은 일반 상식과 일치하는 결과가 도출되어 합리성이 높다고 판단된다. 회계학에서는 메리트 방법론으로 계산하여 그 결과를 생산자와 구매자 간의 협상에 활용하고 있으나, 열공학에서는 엑서지 방법론의 합리성을 논문으로만 서술하고 있다. 본 연구의 목적은 메리트 방법론과 엑서지 방법론의 합리성을 비교 검토하는 데 있으며, 생산자와 구매자가 각 방법론의 합리성을 이해할 수 있도록 세부적으로 서술하고자 한다.

주요어 : 열병합발전, 비용배분, 원가산정, 열경제학, 엑서지

Abstract - When various kinds of products are produced from a single energy system, the methodology which allocates the common cost to each product cost is very important because it is directly related with the profit and loss of producer and purchaser. In the cost allocation methodology of electricity and heat for CHP, there are heat method, work method, benefit distribution method, exergy method, and so on. Benefit distribution method is the most widely known worldwide, and exergy method is widely recognized among thermal engineers. As a result of review, it is judged that the rationality of benefit distribution method is low because the result deviates from common sense, and the rationality of exergy method is high because the result consistent with common sense. In accounting, it is calculated as merit methodology and the result is used for negotiations between producer and buyer, but In thermal engineering, the rationality of exergy methodology is described only as a thesis. The purpose of this study is to compare and examine the rationality of merit methodology and exergy methodology, and the aim is to describe in detail in order that producer and buyer can understand the rationality of each methodology.

Key words : CHP, Cost allocation, Cost estimating, Thermoeconomics, Exergy

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-61-793-2730 E-mail : entes@outlook.kr

1. 서론

복합생산설비는 두 종류 이상의 제품이 동시에 생산되는 시스템이며, 대표적인 복합생산물은 열병합발전에서 생산되는 전기와 열이다. 비용배분이란 연료비를 포함한 각종 투입 비용을 전기와 열에 각각 배분하는 것을 뜻하며, 원가산정이란 비용배분으로부터 단위 에너지당 가격을 산정하는 것을 뜻한다. 그러나 복합 제품이 생산될 때, 비용배분에 정답이 존재하지 않는다는 근본적인 문제가 발생하며, 그 문제를 현재까지 그 누구도 합리적으로 해결하지 못한 상태이다.

열병합발전에서 생산된 전기와 열에 대한 비용배분 방법론은 크게 메리트(Merit)를 적용하는 경제학적 방법(Economic method)⁽¹⁾과 엑서지(Exergy)를 적용하는 열역학적 방법(Thermodynamic method)⁽²⁾으로 구분된다. 메리트 방법론은 열병합 공동으로부터 파생되는 이득(Merit)을 전기와 열에 배분하여 각 원가를 산정한다. The World Bank의 레포트⁽¹⁾에 세부적으로 소개되어 있으며, 그중 Benefit distribution 방법이 전 세계적으로 가장 많이 알려져 있다. 엑서지 방법론은 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 혼합한 엑서지(Exergy)를 적용하며, 생산품의 원가를 산정하는 비용 배분(Cost Allocation), 시스템 내부의 비용흐름을 계산하는 비용 분석(Cost Analysis), 최소 투자 비용으로 최대 생산 능력을 설계하는 비용 최적화(Cost Optimization)로 구분된다⁽³⁾. 이 분야를 열경제학(Thermoeconomics) 또는 엑서지경제학(Exergoeconomics)이라 칭하고 있다. www.sciencedirect.com 에서 Thermoeconomics로 검색하면 2,922개의 논문이 검색되며, Exergoeconomics로 검색하면 2,273개의 논문이 검색된다. 대표적인 엑서지 방법에는, The exergetic cost theory⁽⁴⁾, The average cost approach⁽⁵⁾, The specific cost exergy costing⁽⁶⁾, The modified productive structure analysis⁽⁷⁾ 등이 있으며, 저자 또한 Wenergy method⁽³⁾라는 새로운 방법론을 제안하여, 그 합리성을 평가받은 바 있다^(8,9).

회계학에서 전기와 열의 원가산정을 주도하고 있으며, 그 결과를 생산자와 구매자 간의 협상 자료로 활용하고 있으나, 열공학에서는 오직 논문 출판만 하는 것으로 여겨진다. 그 근본적인 이유는 열공학에서 제시하는 엑서지 방법론이 너무 어려워, 생산자와 구매자 그 누구도 이해하지 못하기 때문일 것이다. 메리트 방법론은 이해하기 쉽고 계산 또한 매우 간단하나, 편이성과 합리성은 전혀 다른 개념이다. 엑서지 방법론은 열역학적 지식이 상당히 필요하므로, 일반인이 이해하기는 매우 어려우나, 열공학자들 간에 논문을 통해 그 합리성 여부를 논쟁하고 있다. 회계학의 메리트 방법론 역

시 논문으로 그 합리성이 평가되어야 할 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 열병합발전에서 생산된 전기와 열의 비용배분 및 원가산정에 대해 메리트 방법론과 엑서지 방법론의 합리성을 평가하는 것이며, 생산자와 구매자 모두 본 연구의 내용을 이해할 수 있도록 세부적으로 글을 서술하고자 한다.

2. 비용배분 및 원가산정의 이해

2.1 환경열경제학의 제안

비용배분 방법론의 합리성을 평가하기 위해서는 자연법칙으로부터 출발해야 하며, 열역학 법칙을 단순화한 수식은 식(1)과 같고, 양변에 똑같은 숫자를 곱하라는 등식의 원리를 적용하면 식(2)와 같다.

$$F = P + L \quad [kJ/s] \quad (1)$$

$$F \cdot C = P \cdot C + L \cdot C \quad [$/s] \quad (2)$$

여기서 F 는 연료 투입에너지, P 는 전기 생산량, L 은 대기 방출에너지, C 는 임의의 에너지 단위 $[\$/kJ]$ 이다. 식(2)에서 자연으로 방출되는 L 은 환경학의 분야이고, 전기 P 는 열공학의 분야이고, 단위 C 는 경제학의 분야이므로, 저자는 환경열경제학(Environmental thermoeconomics)이라는 새로운 학문을 제안⁽¹⁰⁾한 바 있다. 목표는 열공학에 기반한 정확한 에너지 시스템 해석으로부터 그 에너지의 비용을 경제학적으로 산정(C)하여 자원절약(F), 인류발전(W), 환경보전(L)에 이바지한다 이고, 사상은 자연·인간·인공지능 개체들이 서로 협력하여 발전하는 공동체의 구현이다. 식(2)는 열역학 법칙과 등식의 원리를 융합한 것이므로 100% 정답이며, $F \cdot C$ 는 자연이 50억년 동안 만들어낸 권리, $P \cdot C$ 는 인간의 권리, $L \cdot C$ 는 자연의 권리로서, 저자는 이것을 “권리 배분의 법칙”이라 칭하고자 한다.

2.2 비용배분의 원리

식(1)의 열역학 법칙에 연료 F 의 구매 단가는 C_F 이고, 자연으로 방출된 에너지 L 의 단가는 0원이라는 회계원리를 적용하면, 전기원가 C_P 를 아래의 식으로 산정할 수 있다.

$$F \cdot C_F = P \cdot C_P + L \cdot 0 \quad (3)$$

위 식은 좌변의 총 투입비용과 우변의 총 산출비용은 서로 같다는 회계원리이다. 그러나 식(3)은 식(1)의 양변에 똑같은 숫자를 곱하라는 등식의 원리에 어긋났으므로 비용배분의 법칙이 아니라 비용배분의 원리이다.

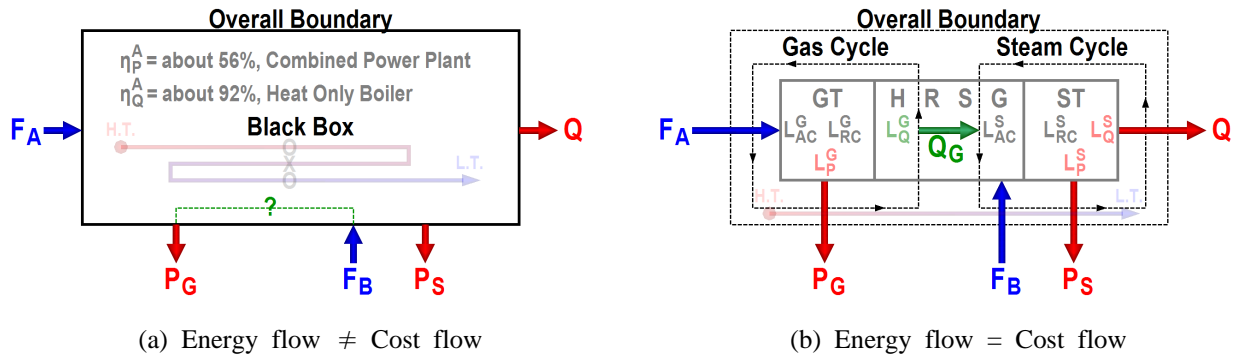


Fig. 1. The relationship between thermodynamics and economics

2.3 열역학적 효율과 경제학적 효율

식(3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_p = P/F = C_F/C_P \quad (4)$$

P/F 는 열역학적 효율이고 C_F/C_P 는 경제학적 효율로서 양자는 서로 같다는 것을 파악할 수 있다. 그러나 열역학에서 식(3)과 같이 L 의 단가가 0원이라는 근거는 존재하지 않는다. 따라서 시스템 효율은 경제학적 효율⁽¹¹⁾임을 이해할 수 있다.

2.4 생산원가와 거래단가의 구분

생산원가는 투입비용과 산출비용은 서로 같다는 식(3)으로부터의 계산 결과이고, 거래단가는 시장 상황에 따른 흥정의 대상이다. 양자를 구분하여 판단해야 하며, 정상적인 시장 상황이라면 거래단가는 생산원가에 비례하는 것이 합리적이다.

2.5 경계의 중요성

열역학에서 경계(Boundary)는 해석하고자 하는 설비의 범위이고, 그 설비 테두리와 내부에 열역학 법칙을 적용한다. 그 경계의 밖은 해석 대상이 아니다. 원가를 산정하고자 하는 그 공장 부지의 담장이 경계이다. 생산원가 산정은 담장과 안쪽의 설비가 해석 대상이고, 거래단가 책정은 담장과 밖쪽의 시장상황이 해석 대상이라는 관점이 합리적이다.

2.6 정답과 방법론의 차이점

단일 제품만 생산될 경우, 계산의 미지수는 한 개이므로 식(3)으로부터 제품의 원가는 쉽게 산정된다. 예를 들면, $10=5x$ 일 때, x 는 2이다. 그러나 제품이 둘 이상 생산될 경우, 미지수가 둘 이상이므로 그 미지수를 풀기 위한 어떤 전제 조건이 추가되어야 한다. 예를 들면, $10=4x+3y$ 일 때, 어떤

전제 조건 하나가 있어야 문제가 풀린다. 그 전제 조건은 정답이 아니라 가정이므로 복합 생산 제품의 원가산정은 정답이 아니라 방법론이 된다.

2.7 에너지흐름과 비용흐름의 관계

Fig. 1은 열역학과 경제학의 해석 관점에 대한 개념이며, (a)는 에너지흐름과 비용흐름은 전혀 관련 없다는 개략도이고, (b)는 에너지흐름과 비용흐름은 정확히 일치한다는 개략도이다. 경제학은 에너지 시스템 내부를 해석하지 않으므로 (a)와 같이 그 내부를 블랙박스로 취급한다. 에너지흐름을 살펴보면, 연료 F_A 와 F_B 가 투입되어 전기 P_G , 전기 P_S , 그리고 열 Q 가 생산된다. 여기서 연료 F_B 비용은 전기 P_G 비용과 관련이 있는가 질문을 한다. 답은 블랙박스이므로 알 수 없다 이다. 열역학은 에너지 시스템 내부를 (b)와 같이 열역학 법칙으로 해석한다. 에너지흐름을 살펴보면, 가스사이클에서 연료 F_A 가 투입되어 전기 P_G 와 열 Q_G 가 생산되고, 증기 사이클에서 열 Q_G 와 연료 F_B 가 투입되어 전기 P_S 와 열 Q 가 생산된다. 연료 F_B 비용은 가스터빈 전기 P_G 비용과 관련이 전혀 없다는 것을 알 수 있다.

(a)는 열역학 제 1 법칙인 에너지 보존의 관점에서 비용은 역방향으로 흐를 수 있다는 뜻이고, (b)는 열역학 제 2 법칙인 엔트로피 증가의 관점에서 비용은 필히 순방향으로 흐른다는 뜻이다. 에너지흐름과 비용흐름은 일치하다는 관점이 옳바르다. 따라서 비용흐름을 열역학 제 2 법칙으로 해석해야 한다는 것을 파악할 수 있다.

2.8 통합사이클과 개별사이클

Fig. 1(a)의 통합사이클에 식(3)의 비용배분의 원리를 적용하면 식(5)가 된다. Fig. 1(b)의 가스사이클에 비용배분의 원리를 적용하면 식(6)이 되고, 증기사이클에 비용배분의 원리를 적용하면 식(7)이 되고, 양자를 합하면 식(5)가 된다. 통합사이클이

아니라 개별사이클로 비용배분을 수행해야 합리적이라는 것을 이해할 수 있다.

$$D_F^A + D_F^B = D_P^G + D_P^S + D_Q \quad (5)$$

$$D_F^A = D_P^G + D_Q \quad (6)$$

$$D_F^B + D_Q^G = D_P^S + D_Q \quad (7)$$

3. 전기와 열의 비용배분 수식 전개

3.1 에너지 가치 평가 기준

에너지란 변화를 일으킬 수 있는 능력이다. 열역학은 열과 일을 해석하는 학문이며, 열기관에서 약 40%~80% 정도의 열방출로부터 열(Heat)은 일(Work)로 변환되고, 발전기에서 약 2% 정도의 손실로부터 일은 동력(Power)으로 변환되고, 소내소비동력 등이 소모되어 동력은 전기(Electricity)로 최종 생산된다. 열역학 법칙에 의해 에너지는 일을 생산할 수 있는 유효에너지와 일을 생산할 수 없는 무효에너지로 구분된다. 유효에너지는 일을 생산할 가능성이 있는 에너지이고, 무효에너지는 일을 생산할 가능성이 없는 에너지이다. 열은 유효에너지와 무효에너지의 합으로 이루어져 있으며, 일, 동력, 전기는 100% 유효에너지이다.

변화 역시 사회가 발전할 수 있는 유효변화와 사회가 발전할 수 없는 무효변화로 구분될 수 있다. 전기가 보유한 에너지는 100% 전량 사회를 발전시킬 가능성이 있다. 여기서 열이 보유한 에너지 중 몇 % (예를 들면 66%, 33%) 정도가 사회를 발전시킬 가능성이 있는가를 산정하는 것이 가치 평가의 핵심이다. 이를 위해서는 전기와 열의 가치를 객관적으로 평가할 수 있는 어떤 방법론이 필요하다.

3.2 비용배분 수식 전개

선행 연구⁽³⁾에서 가치(Worth)와 에너지(Energy)의 합성어로서 워너지(Wonergy)라는 단어를 새로이 제안하여 식(10)과 식(11)을 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙으로부터 유도한 바 있다. 워너지란 생산품의 가치를 평가할 수 있는 어떤 에너지라는 뜻이며, 다양한 에너지가 워너지로 제시될 수 있다. 본 연구에서는 식(10)과 식(11)을 회계학적 관점으로 유도해 본다. 발전소에서는 일을 Shaft Power, 동력을 Gross Power, 전기를 Net Power라 칭하고 있으며, 동력생산을 발전이라 칭한다.

식(8)과 같이, 연료비용 D_F 은 발전비용 D_P^F 과 열비용 D_Q^F 의 합이다. 식(9)와 같이, 발전비용 D_P^F 과 열비용 D_Q^F 은 동력을 생산하기 위해 투입된 워너지량

K_P 과 열을 생산하기 위해 투입된 워너지량 K_Q 에 비례한다는 전제 조건을 세운다. 식(8)과 식(9)를 혼합하면, 식(10)의 발전비용과 식(11)의 열비용이 쉽게 유도된다. 여기서 주의할 점은 아래의 수식은 모두 방법론이라는 것이다.

$$D_F = D_P^F + D_Q^F \quad (8)$$

$$D_P^F : D_Q^F = K_P : K_Q \quad (9)$$

$$D_P^F = \frac{K_P}{K_P + K_Q} \cdot D_F \quad (10)$$

$$D_Q^F = \frac{K_Q}{K_P + K_Q} \cdot D_F \quad (11)$$

위 수식은 연료 F 에 대한 것이며, 탄소배출 CO_2 및 소내소비동력 A 역시 공통비이다. 발전 P 는 소내소비동력 등이 소비된 후 최종 전기 E 로 생산된다. 생산된 열 Q 는 소내소비동력 등이 고려된 후 최종 열 H 로 생산된다. 전기생산 전용비 Z_E 와 열생산 전용비 Z_H 를 추가하면, 전기비용 D_E 과 열비용 D_H 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_E = \frac{K_P}{K_P + K_Q} \cdot D_{F,CO_2,A} + Z_E \quad (12)$$

$$D_H = \frac{K_Q}{K_P + K_Q} \cdot D_{F,CO_2,A} + Z_H \quad (13)$$

위 수식은 에너지 흐름인 변동비에 대한 비용배분 수식이다. 토지매입비, 건설비, 인건비 등의 고정비 역시 전기비용과 열비용으로 배분해야 한다. 일례로 오늘 하루 열병합발전소 근무자가 노동하였으므로 그 노동비를 전기측과 열측에 배분해야 한다. 식(10)과 식(11)의 비용 비율과 일치하게 노동비를 배분하는 것이 합리적일 것이다.

3.3 발전원가와 열원가

식(14) 및 식(15)와 같이, 발전원가 C_P 는 발전비용 D_P 과 발전량 P 의 비이며, 열원가 C_Q 는 열비용 D_Q 과 열량 Q 의 비이다. 최종 전기원가 C_E 및 최종 열원가 C_H 역시 수식은 동일하다.

$$C_P = D_P / P, \quad C_E = D_E / E \quad (14)$$

$$C_Q = D_Q / Q, \quad C_H = D_H / H \quad (15)$$

3.4 발전효율과 열효율

열병합발전에서 투입된 연료 F 는 동력생산을 위한 연료 F_P 와 열생산을 위한 연료 F_Q 로 구분된다. 공통비용 배분 식(8)을 세부적으로 표현하면 식(16)이 되고, 식(17)의 발전효율 η_P 과 식(18)의 열효율 η_Q 이 계산된다⁽¹¹⁾. 이로부터 열병합 발전효율 식(17)은 복합발전 효율과 비교될 수 있고, 열병합 열효율 식(18)은 열전용보일러 효율과 비교될 수 있다.

$$(F_P + F_Q) \cdot C_F = P \cdot C_P + Q \cdot C_Q \quad (16)$$

$$\eta_P = P/F_P = C_F/C_P \quad (17)$$

$$\eta_Q = Q/F_Q = C_F/C_Q \quad (18)$$

연료 F 가 투입될 때, 발전 P 와 열 Q 가 실제 생산되며, 이것을 모두 발전으로 환산하면 발전량 $F \cdot \eta_P$ 이고, 이것을 모두 열로 환산하면 $F \cdot \eta_Q$ 이다.

3.5 효율성과 효과성

경제학 용어에서, 효율성은 최소의 투입으로 최대의 산출을 지향하는 양적 단어이고, 효과성은 원하는 목표에 얼마나 도달했는가라는 표현하는 질적 측면이다. 생산성은 제품 생산이나 서비스 제공에 있어 투입대비 얼마만큼의 산출이 이루어졌는지를 나타내는 지표로서, 효율성과 생산성 둘 중 하나로 계산한다. 하나의 요인만 존재할 경우를 단일요소 생산성이라 칭하고, 둘 이상의 요인이 존재할 경우 총요소생산성이라 칭한다. 단일요소생산성의 경우 계산은 곧바로 수행되나, 총요소생산성의 경우 이론적으로 합의된 바 없으며, 연구자에 따라 사용하는 방법론은 다르다. 총요소생산성의 합리성 평가에 대한 논쟁과 같이, 열병합발전에서 전기와 열의 비용배분 및 원가산정 방법론의 합리성 평가에 대한 논쟁 역시 동일하게 발생하고 있다.

4. 다양한 비용배분 방법론

Table 1에는 다양한 비용배분 방법론에 의한 워너지 계산 공식이 제시되어 있다. 1~6항은 대체설비의 효율을 적용하는 메리트 방법론이고, 8~11항은 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 혼합하는 엑서지 방법론이다.

4.1 메리트(Merit)

대체설비(Alternative equipment)란 해석 대상이 아닌 어떤 현장의 설비를 뜻한다. 여기서 대체설비

라는 단어보다 제품 하나만을 생산하는 전용설비(Only equipment)라는 단어가 더 명확하다. 열병합발전에서 생산된 발전량 P 을 효율 η_P^A 의 발전전용설비로 생산하기 위해서는 식(19)와 같이 연료 F_P^A 가 투입되어야 한다. 열병합발전에서 생산된 열량 Q 을 효율 η_Q^A 의 열전용설비로 생산하기 위해서는 식(20)과 같이 연료 F_Q^A 가 투입되어야 한다. 따라서 전용설비들에 투입된 연료량 $F_P^A + F_Q^A$ 보다 열병합발전에서 투입된 연료량 F 은 식(21)과 같이 M 만큼 적게 투입된다. 그 연료절약량을 메리트(Merit)라 한다.

$$F_P^A = P/\eta_P^A \quad (19)$$

$$F_Q^A = Q/\eta_Q^A \quad (20)$$

$$M = F_P^A + F_Q^A - F \quad (21)$$

4.2 Heat method

이 방법은 동력과 열의 가치를 모두 열로 평가하는 방법론이다. 따라서 열생산을 위해 워너지 Q 가 투입되고, 연료 F 를 열로 환산하면 $F \cdot \eta_Q^A$ 이므로, 동력생산을 위해 투입된 열은 $F \cdot \eta_Q^A - Q$ 이다. 모든 것을 연료로 환산하면, 열전용설비에서 열생산을 위해 연료 F_Q^A 가 투입되어야 하므로, 동력생산을 위해 투입된 연료는 $F_P^A - M$ 이다. 본 방법의 특징은 열병합가동에 의한 연료 절약의 편익(메리트)이 모두 발전측에 부여되며, 발전원가 C_P 와 열원가 C_Q 는 항상 서로 동일하다는 것이다.

4.3 Power method

이 방법은 동력과 열의 가치를 모두 동력으로 평가하는 방법론이다. 따라서 동력생산을 위해 워너지 P 가 투입되고, 연료 F 를 동력으로 환산하면 $F \cdot \eta_P^A$ 이므로, 열생산을 위해 투입된 동력은 $F \cdot \eta_P^A - P$ 이다. 모든 것을 연료로 환산하면, 발전전용설비에서 동력생산을 위해 연료 F_P^A 가 투입되어야 하므로, 열생산을 위해 투입된 연료는 $F_Q^A - M$ 이다. 본 방법의 특징은 열병합가동에 의한 연료 절약의 편익(메리트)이 모두 열측에 부여되며, 발전원가 C_P 는 발전전용설비 원가와 동일하다는 것이다.

4.4 Equal method

이 방법은 메리트를 동력측과 열측에 동등하게 배분하는 방법으로서, 동력생산을 위해 $F_P^A - M/2$ 을 적용하고, 열생산을 위해 $F_Q^A - M/2$ 을 적용한다.

Table 1. Wonerger Calculation Table

Method		Amount of Wonerger Input	
$F_P^A = P / \eta_P^A$ $F_Q^A = Q / \eta_Q^A$		for Power Production	for Heat Production
Merit $M = F_P^A + F_Q^A - F$		K_P	K_Q
1	Heat	$F \cdot \eta_Q^A - Q$	Q
		$F_P^A - M$	F_Q^A
2	Power	F_P^A	$F_Q^A - M$
		P	$F \cdot \eta_P^A - P$
3	Equal	$F_P^A - M/2$	$F_Q^A - M/2$
4	Benefit	F_P^A	F_Q^A
	Reverse benefit	$F_P^A - M$	$F_Q^A - M$
5	Distribution	$F_P^A - M \cdot F_P^A / (F_P^A + F_Q^A)$	$F_Q^A - M \cdot F_Q^A / (F_P^A + F_Q^A)$
	Reverse distribution	$F_P^A - M \cdot F_Q^A / (F_P^A + F_Q^A)$	$F_Q^A - M \cdot F_P^A / (F_P^A + F_Q^A)$
6	Finish	$PES = 1 - F / (F_P^R + F_Q^R) = 1 - 1 / (\eta_P / \eta_P^R + \eta_Q / \eta_Q^R)$	
		$F \cdot (1 - PES) \cdot \eta_P / \eta_P^R, \eta_P = P / F$	$F \cdot (1 - PES) \cdot \eta_Q / \eta_Q^R, \eta_Q = Q / F$
7	Energy	$E_P = P$	$E_Q = Q$
8	Exergy output	$X_P = P$	$X_Q = Q \cdot (1 - T_0 / T_Q)$
9	Exergy out in	$X_P = P$	$X_Q^y = L_Q + X_Q$
10	Exergy input ⁽³⁾	$X_P^y = L_P + P$	$X_Q^y = L_Q + X_Q$
11	ECT, MOPSA, SPEC0	There are various exergetic methods in thermoeconomics	

4.5 Benefit method

정식 명칭은 Benefit distribution method이며, 본 방법이 전 세계적으로 가장 많이 알려져 있다. 발전전용설비에서 연료 F_P^A 가 투입되고, 열전용설비에서 연료 F_Q^A 가 투입되므로, 이 값을 비용배분에 적용한다. 회계학적 방법론은 기본적으로 메리트 M 을 동력과 열에 배분하는 방식이다. 그러나 F_P^A 와 F_Q^A 값에는 메리트 항목이 없으므로, 이 방법론이 논리적인가 의문이 발생한다.

4.6 Reverse benefit method

Table 1에서 Benefit method는 Power method의 F_P^A 를 K_P 에 적용하고, Heat method의 F_Q^A 를 K_Q 에 적

용한다. 역으로, Heat method의 $F_P^A - M$ 을 K_P 에 적용하고, Power method의 $F_Q^A - M$ 을 K_Q 에 적용할 수도 있다. 회계학적 방법의 기본은 메리트를 배분하는 것이며, 위 값에는 메리트가 포함되어 있다. 따라서 Benefit method와 Reverse benefit method는 서로 반대의 결과가 도출될 것임을 예측할 수 있고, 둘 중 하나는 비합리적이라는 판단을 내릴 수 있다.

4.7 Distribution method

이 방법은 메리트를 대체설비 연료 투입량의 비로 배분하는 방식으로서, 전세계적으로 가장 많이 언급되고 있다. 그러나 Table 1의 5항 K_P 을 전개하면 식(22)와 같고, K_Q 를 전개하면 식(23)과 같다.

$$\frac{[F_P^A \cdot (F_P^A + F_Q^A) - (F_P^A + F_Q^A - F) \cdot F_P^A]}{(F_P^A + F_Q^A)} = F_P^A \cdot F / (F_P^A + F_Q^A) \rightarrow F_P^A \quad (22)$$

$$\frac{[F_Q^A \cdot (F_P^A + F_Q^A) - (F_P^A + F_Q^A - F) \cdot F_Q^A]}{(F_P^A + F_Q^A)} = F_Q^A \cdot F / (F_P^A + F_Q^A) \rightarrow F_Q^A \quad (23)$$

비용배분 수식은 식(10) 및 식(11)과 같이 비례식이므로, 위 식에서 동일 항목을 약분하면 그 수식은 Benefit method의 F_P^A 및 F_Q^A 과 같으므로, 본 방법은 결국 메리트를 배분하지 않은 수식이다.

4.8 Reverse distribution method

이 방법은 Distribution method를 역으로 적용하는 방식이다. 열생산을 감소시켜 동력생산을 증가시킨다면, 열측 할인 혜택이 증가하고 동력측 할인 혜택이 감소해야 한다. 열생산을 증가시켜 동력생산을 감소시킨다면, 열측 할인 혜택이 감소하고 동력측 할인 혜택이 증가해야 한다. 즉 생산량과 할인 혜택은 반비례한다는 것이다.

열생산이 0이면 F_Q^A 역시 0이 되므로, 그 결과는 식(24)와 같이 Power method와 같아진다. 전기생산이 0이면, F_P^A 역시 0이 되므로, 그 결과는 식(25)와 같이 Heat method와 같아진다.

$$F_P^A - M0 / (F_P^A + 0), F_Q^A - MF_P^A / (F_P^A + 0) \quad (24)$$

$$F_P^A - MF_Q^A / (0 + F_Q^A), F_Q^A - M0 / (0 + F_Q^A) \quad (25)$$

Benefit distribution method의 결과는 생산량과 할인 혜택은 비례한다는 관점에서, 열생산량이 0이면, Heat method와 같아지고, 전기생산량이 0이면 Power method와 같아진다. 이것은 오류로서, 열생산량이 0이면, Power method가 되어야 한다.

4.9 Finish method

이 방법은 Reference system method라고도 불리며, 유럽 연합 통계국(Eurostat)^(12,13)에서 채택한 방법이다. Table 1의 6항에서 PES는 Primary energy saving compared to reference system으로서, 메리트와 같다. 수식이 복잡하나, 비용배분은 식(10) 및 식(11)과 같이 비례식이므로, $F \cdot (1 - PES)$ 는 K_P 와 K_Q 에서 서로 소거된다. η_P 는 P/F 이고, η_Q 는 Q/F 이며, 아래 수식으로 간결화되므로, 본 수식은 Benefit method의 수식과 일치한다.

$$P/F/\eta_P^R : Q/F/\eta_Q^R = F^{R_P} : F^{R_Q} \quad (26)$$

본 방법론의 특징은 대체설비효율이 아니라 기

준설비효율을 적용한다는 것이다. 동력기준설비 효율 η_P^R 에 전세계 모든 발전소의 평균 효율 40%를 적용하고, 열기준설비 효율 η_Q^R 에 전세계 모든 보일러의 평균 효율 90%를 적용한다.

4.10 Energy method

이 방법은 동력과 열의 가치를 열역학 제 1 법칙적 에너지로 평가하는 방식으로, 산출된 에너지량을 적용한다. 따라서 동력의 에너지 E_P 는 P 이고, 열의 에너지 E_Q 는 Q 이다. 동력의 원가 C_P 와 열의 원가 C_Q 는 항상 같게 산정되며, 1. Heat method의 결과와 거의 유사하다.

4.11 Exergy output method

이 방법은 동력과 열의 가치를 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 혼합한 엑서지로 평가하는 방법이다. 엑서지의 정의는 주어진 상태에서 환경상태로 변화하는 동안 얻을 수 있는 최대일(유효에너지)이다. Exergy output method의 정식 명칭은 Carnot method이며, 산출된 엑서지량을 적용한다. 따라서 동력산출 엑서지량 X_P 은 P 이고, 열산출 엑서지량 X_Q 은 열역학 공식에 의해 근사적으로 $Q \cdot (1 - T_0 / T_Q)$ 이다. 여기서 T_0 는 외기온도, T_Q 는 생산된 열의 대수평균온도로서, $1 - T_0 / T_Q$ 는 카르노 효율이다. 열의 엑서지 생산량 X_Q 는 열생산을 위해 감소된 발전량보다 약간 크다. 따라서 본 방법의 결과는 2. Power method와 거의 유사하며, 열을 폐열로 취급하는 방법론이다.

4.12 Exergy out in method

이 방법의 정식 명칭은 존재하지 않는다. 지역난방 열교환기 내부에서 엑서지 손실 L_Q 이 크게 발생하며, 그 엑서지 손실의 책임은 열측에 있다는 주장이 여러 연구자에 의해 제기되고 있다. 따라서 동력산출 엑서지량 $X_P = P$ 이고, 열생산을 위해 투입된 엑서지량 $X_Q^y =$ 손실 엑서지 $L_Q +$ 생산 엑서지 X_Q 이다.

4.13 Exergy input method

이 방법은 저자가 2000년부터 논문을 통해 제안하고 있다. 터빈에서 투입된 엑서지량 $X_P^y =$ 손실 엑서지 $L_P +$ 생산 엑서지 P 이고, 지역난방 열교환기에서 투입된 엑서지량 $X_Q^y =$ 손실 엑서지 $L_Q +$ 생산 엑서지 X_Q 이다. 동력전용기기인 터빈에서의 엑서지 손실 L_P 은 동력 P 가 책임지는 것이며, 열전용기기인 지역난방 열교환기에서의 엑서지 손실 L_Q 은 열 Q 가 책임을 진다. 일반적으로 L_P 는 P 의 약 8% 정도이며, L_Q 는 X_Q 의 약 33% 정도이다.

4.14 ECT, MOPSA, SPEC0

서론에서 언급한 바와 같이, 열경제학적 방법론에는 대표적으로 ECT, MOPSA, SPEC0 방법이 있다. 그러나 위 방법론에서 제시하는 수식은 매우 복잡하며, 수치해석 기법을 동원하여 컴퓨터로 문제를 풀어야 한다. 이로 인해 열경제학 전문가일지라도 위 방법론을 이해 및 계산하기는 매우 어렵다.

4.15 기타 방법들

Market based method는 시장가격을 기준으로 생산 원가를 산정한다. European standard EN 15613-4-5: 2007에서 제정된 Power bonus method⁽¹⁴⁾는 열을 주 생산품 그리고 전기를 보너스로 채택한다. The Danish Energy Agency에서 개발된 LCoE method⁽¹⁵⁾는 열효율에 125%~200% 효율을 적용한다. 영국 표준인 PAS2050⁽¹⁶⁾은 온실가스 배출량을 전기와 열측에 배분하기 위해 설비 종류에 따른 특정 계수를 전기측에 곱한다. 이와 같이 다양한 방법론이 존재하나, 각 방법론의 합리성 입증은 불가하다.

5. 복합열병합발전에서의 원가산정

5.1 비용배분 및 원가산정

Table 2에는 어떤 복합열병합발전에서 동력과 열의 비용배분 및 원가산정 결과가 제시되어 있다. 이해의 편의를 위해 단위는 모두 kJ로 통일하고자 한다. 연료투입량 F 은 100 kJ/s, 발전량 P 은 48.42 kJ/s, 열생산량 Q 은 43.58 kJ/s, 연료단가 C_F 는 \$100/kJ이다. The World Bank 기술 보고서에서 LHV 기준 어떤 발전전용설비의 효율 η_p^b 은 56%, 어떤 열전용설비의 효율 η_q^a 은 92%로 주어졌다. 이 값을 식(21)에 대입하면 메리트 M 이 33.83 kJ/s로 계산되고, Table 1에 적용하면 각 방법론에 따른 동력생산을 위해 투입된 워너지량 K_p 과 열생산을 위해 투입된 워너지량 K_q 이 계산된다. 따라서 식(10)과 식(11)로부터 D_p 와 D_q 가 배분되고, 식(14)와 식(15)로부터 C_p 와 C_q 가 산정된다.

Fig. 3(a)에서 제시되었듯이, 외기온도 3.3 + 273.15 K, 지역난방 온수 입구 60°C, 출구 110°C 일 때, 식(30)에 의해 Table 1의 Exergy output의 대수 평균 온도 T 는 84.42 + 273.15 K으로 계산된다. 카르노 효율은 22.69%이므로, X_q^c 값은 9.89 kJ/s이다. Fig. 3(b)에서 제시되었듯이, 지역난방 온수를 생산하기 위한 증기측 온도가 270°C에서 70°C로 변할 때, Exergy input의 카르노 효율은 33.72%이므로, X_q^c 값은 14.70 kJ/s 이다.

5.2 열전비에 따른 비용배분 및 원가산정

Table 2에서 열전비 Φ 값은 0.900이다. 이 값을 수정하면 Table 2의 모든 값이 다시 계산된다. 열전비에 따른 각 방법론의 산정결과가 Fig. 2에 도시되어 있다.

5.3 각 방법론의 합리성 평가

Fig. 2(a)에는 열전비 Φ 에 따른 발전원가 C_p 산정 결과가 도시되어 있다. 1. Heat method와 7. Energy method의 결과는 동일하며, 모든 메리트(이득)를 동력측에 부여하므로, 발전원가는 가장 낮게 산정된다. 2. Power method에서는 모든 메리트를 열측에 부여하므로, 발전원가는 가장 높게 산정된다. 3. Equal method에서는 메리트를 동등하게 부여하므로, Heat method와 Power method의 중간값으로 산정된다. 4. Benefit 5. Distribution method의 산정 결과는 정확히 동일하다. 열병합발전에서 열은 동력을 감소시켜 생산한다. 따라서 열전비가 높을수록 발전원가는 낮아져야 하고, 열원가는 높아져야 한다. 그러나 이 방법의 결과는 열전비가 높을수록 발전원가 역시 높아지므로 그 방법론의 합리성은 낮다고 판단된다. 4. Reverse benefit method의 산정 결과는 열전비가 높을수록 발전원가는 낮아지므로 합리성이 있다. 5. Reverse distribution method의 산정 결과는 Distribution method와 정확히 반대이며, 열전비가 높을수록 발전원가는 낮아지므로 합리성이 있다. 6. Finish method는 발전전용설비 효율로 40%를 대입하는 방법으로서, 그 경향은 Benefit distribution method와 같다. 8. Exergy output method의 경향은 Finish method 및 Benefit distribution method와 일치하고 있으며, 열전비 약 1.0 이상에서 오히려 Power method 보다 더 높게 되므로, 틀린 방법임을 확인할 수 있다. 9. Exergy out in method 및 10. Exergy input method를 계산하기 위해서는, 열전비가 변함에 따라 Table 1에서 X_p^b 및 X_q^c 값이 변하므로, 열병합발전소의 세부적인 내부 데이터가 필요하다.

Fig. 2(b)에는 열전비 Φ 에 따른 열원가 C_q 의 산정 결과가 도시되어 있다. 전기생산을 감소시켜 열생산을 증가시키는 것이므로, 발전원가 C_p 와 열원가 C_q 는 서로 반대가 되어야 한다는 것이 일반상식이다. 따라서 4. Benefit, 5. Distribution, 6. Finish, 8. Exergy output 방법은 합리적이지 못하다는 것이 파악된다. 4. Reverse benefit method의 산정 결과는 열생산이 없는 콘텐싱 모드($\Phi=0.643$)에서 Power method와 일치하므로 합리적이라 판단된다. 5. Reverse distribution method는 콘텐싱 모드에서 열원가가 너무 높으므로 합리성이 떨어진다고 판단된다.

Fig. 2(c)에 열전비 Φ 에 따른 열원가와 발전원가의 비 C_q/C_p 가 도시되어 있다. 일반적으로 복합열병합

발전의 열전비는 약 0.8~1.0 정도이다. 4. Benefit method, 5. Distribution method, 6. Finish method, 8. Exergy output method의 결과는 열전비와 관련 없이 항상 일정하다고 산정한다. 열원가는 발전원가의 약 66% 정도가 되어야 하는가? 아니면 약 33% 정도가 되어야 하는가? 이것이 핵심이다.

5.4 발전효율과 열효율

발전전용설비의 효율은 56%로 주어졌고, 열전비에 따른 열병합발전의 발전효율은 식(17)로 계산된다. Fig. 2(d)에는 열전비 Φ 에 따라 개선된 발전효율 $\Delta\eta_P$ 이 도시되어 있다. 발전소에서 발전효율 1%P를 개선하기는 매우 어렵다. 1. Heat method와

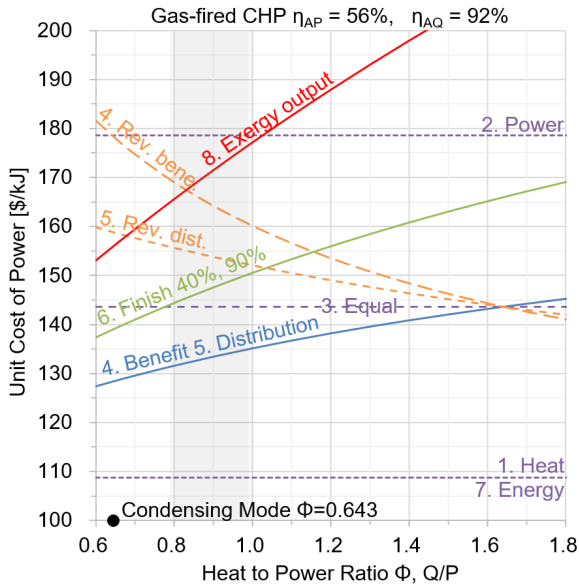
Table 2. Cost allocation and cost accounting for a gas-fired CHP

Gas-fired CHP, LHV						Alternative System					T_0	3.3
Fuel	Power	Heat	H2PR	Fuel Cost		Efficiency		Fuel		Merit	T_1^{out}	60
F	P	Q	Φ	C_F	D_F	η_P^A	η_Q^A	F_P^A	F_Q^A	M	T_2^{out}	110
Given	Given	Given	Q/P	Given	$C_F \cdot F$	Given	Given	P/η_P^A	Q/η_Q^A	Eq.(21)	T_Q^{out}	84.42
kJ/s	kJ/s	kJ/s	-	\$/kJ	\$/s	%	%	kJ/s	kJ/s	kJ/s	η_C^{out}	22.69%
100	48.42	43.58	0.900	100	10,000	56%	92%	86.47	47.37	33.83	T_Q^{in}	143.94
P/F	48.42%	Q/F	43.58%	η_I	92.00%	40%	90%	121.05	48.42	69.47	η_C^{in}	33.72%
Cost Allocation Methodology	Wonerger Input		Cost Allocation		Cost Accounting		Cost	Efficiency		Improved Eff.		
	K_P	K_Q	D_P	D_Q	C_P	C_Q	Ratio	η_P	η_Q	$\Delta\eta_P$	$\Delta\eta_Q$	
	Table 1		$K/(K_P+K_Q) \cdot D_F$		D_P/P	D_Q/Q	C_Q/C_P	C_F/C_P	C_F/C_Q	$\eta_P - \eta_P^A$	$\eta_Q - \eta_Q^A$	
	kJ/s	kJ/s	\$/s	\$/s	\$/kJ	\$/kJ	%	%	%	%P	%P	
1	Heat	52.63	47.37	5,263	4,737	108.70	108.70	100.00%	92.00	92.00	36.00	0.00
2	Power	86.47	13.53	8,647	1,353	178.57	31.06	17.39%	56.00	322.00	0.00	230.00
3	Equal	69.55	30.45	6,955	3,045	143.63	69.88	48.65%	69.62	143.11	13.62	51.11
4	Benefit	86.47	47.37	6,461	3,539	133.43	81.22	60.87%	74.95	123.13	18.95	31.13
	Rev. bene.	52.63	13.53	7,955	2,045	164.28	46.94	28.57%	60.87	213.05	4.87	121.05
5	Distribution	64.61	35.39	6,461	3,539	133.43	81.22	60.87%	74.95	123.13	18.95	31.13
	Rev. dist.	74.49	25.51	7,449	2,551	153.84	58.54	38.05%	65.00	170.84	9.00	78.84
6	Finish	121.05	48.42	7,143	2,857	147.52	65.56	44.44%	67.79	152.53	11.79	60.53
7	Energy	48.42	43.58	5,263	4,737	108.70	108.70	100.00%	92.00	92.00	36.00	0.00
8	Exergy output	48.42	9.89	8,304	1,696	171.50	38.91	22.69%	58.31	257.02	2.31	165.02
9	Exergy out in	48.42	14.70	7,672	2,328	158.43	53.43	33.72%	63.12	187.16	7.12	95.16
10	Exergy input	Thermodynamics		1) Integral Cycle Analysis 2) Individual Cycle Analysis								

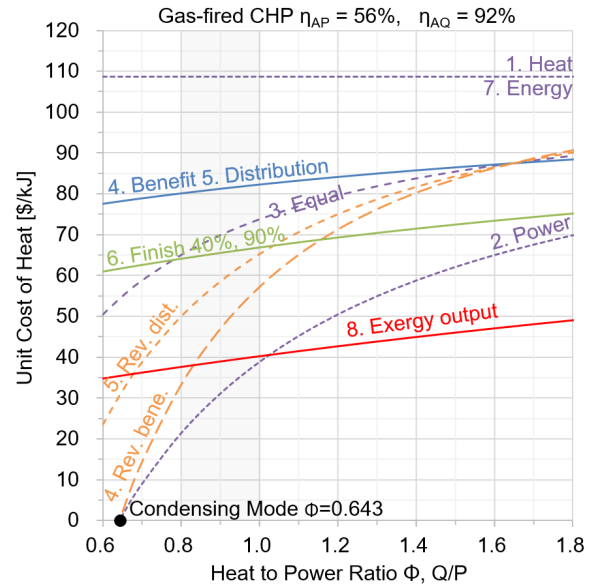
7. Energy method는 발전효율 개선치로 36%P를 부여하므로, 틀린 방법론이다. 2. Power method는 개선치로 0%P를 부여하므로, 이 역시 틀린 방법론이다. 열전비 0.9에서 4. Benefit 5. Distribution method는 개선치로 18.95%P를 부여하나, 복합발전의 18.95%P 효율 향상은 불가능하다. 4. Reverse benefit method는 4.87%P, 5. Reverse distribution method는 9.00%, 6. Finish method는 11.79%P를 부여하므로, 이 결과

가 타당하다고 할 수 있으나, 어떤 대체효율을 적용하느냐에 따라 그 수치는 달라진다. 8. Exergy output method는 경향상 틀렸다는 것이 확인된다.

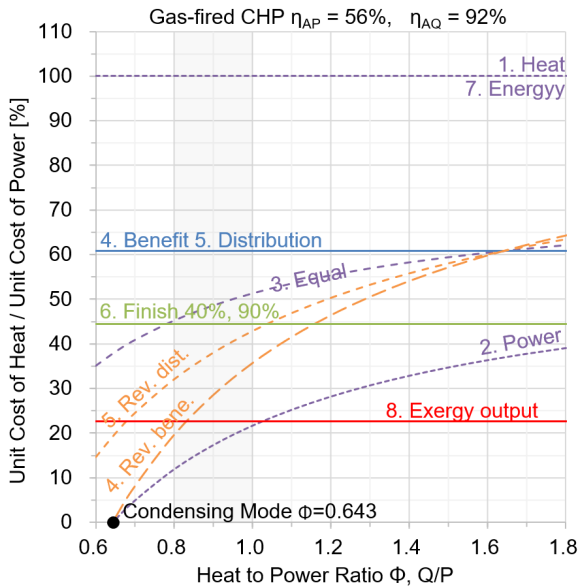
Table 2에서 열효율 η_Q 을 살펴보면, 1. Heat method를 제외하고 모두 100%를 넘는다는 것을 볼 수 있고, 개선된 열효율 $\Delta\eta_Q$ 은 31.13%P~165.02%P로서 열효율이 월등히 개선된 것을 볼 수 있다. 발전효율 1%P 개선 시키는 것은 매우 어려우나, 열효율



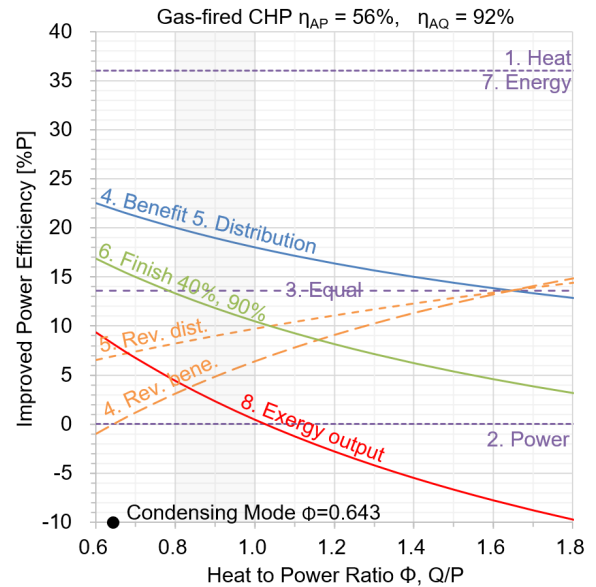
(a) Unit cost of power



(b) Unit cost of heat



(c) Unit cost ratio of heat and power



(d) Improved power efficiency

Fig. 2. The result of cost allocation according to heat to power ratio for a gas-fired CHP

1%P 개선 시키기는 매우 쉽다. 90% 효율의 보일러로부터 열을 생산하지 말고, 천연가스 히트펌프로부터 열을 생산하면 열효율은 140% 이상이 된다. 열을 생산하는 열기관에서 효율은 100%를 넘을 수 없으나, 열을 생산하는 시스템에서 그 효율은 100%를 넘을 수 있음을 향후 연구에서 세부적으로 서술할 예정이다.

5.5 외기온도에 따른 원가의 변화

겨울철 평균온도는 0°C 정도이고, 봄가을철은 15°C 정도이고, 여름철 평균온도는 30°C 정도이다. 여름철 온수의 가치와 겨울철 온수의 가치는 서로 다르다. 겨울철의 열원가는 높게 산정되고, 여름철의 열원가는 낮게 산정되는 방법론이 합리적이다. 1년 평균 외기온도 15°C가 아니라, 실제 가동 평균 외기온도(예를 들어 3.3°C)를 원가산정에 적용하는 것이 합리적이다.

5.6 통합사이클과 개별사이클

Table 2의 계산 결과는 Fig. 1(a)의 통합 사이클 관점이다. 복합열병합발전은 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클로 구성되어있으므로, 비용흐름 또한 Fig. 1(b)와 같이 개별 사이클로 구분되어야 한다. 엑서지 방법은 (a) 관점 및 (b) 관점 모두 계산할 수 있으며, 선행연구 결과 양자의 차이는 조금 크다. 그 이유는 (a)의 관점에서는 HRSG가 존재하지 않으므로 HRSG는 공통기기가 되나, (b)의 관점에서는 HRSG는 열생산기기이다. (b)의 관점이 합리적이며, (b)의 열원가가 (a) 보다 조금 크게 산정된다.

5.7 복합열병합발전의 최적화 전략

복합열병합발전의 최적화 전략은 다음의 네 가지이다. 첫째, Mode III 발전효율이 높게 건설되어야 한다. 둘째, 열전비를 낮추어 지역난방 열교환기에서의 엑서지 파괴를 줄여야 한다. 셋째, Mode I에서 LP 터빈 작동이 없어야 한다. 넷째, 종합효율이 높아야 한다. 위 네 가지가 구현되면 복합열병합발전은 그 어떠한 시스템보다 가장 우수한 성능을 갖게 될 것이다. 생산자는 열병합발전 건설 계획 단계에서 위를 철저히 준수하고, 구매자는 설계 단계에서 원가산정을 수행하여 타 열병합발전과 최적화 비교 검증을 해야 한다. 이를 수행하지 않으면, 결국 생산자와 구매자 모두에게 예상치 못한 손해가 발생한다.

5.8 원가산정의 전제조건

열병합발전의 단점은 전기와 열이 동시에 생산되므로, 전기가 필요한 시점과 열이 필요한 시점이

어긋날 때 최적화되지 못한다는 것이다. 이로 인해 전기를 원가 이하로 판매하는 경우가 다수 발생한다. 본 해석에 따르면, 열병합발전의 발전효율이 높아 복합발전보다 가동 우선순위가므로, 이 문제는 해결될 가능성이 있다. 문제는 석탄 화력발전 가동만으로도 우리나라 전력 공급이 충분할 때 발생한다. 천연가스 단가와 석탄 단가는 근본적으로 차이가 매우 크기 때문에 이러한 경우는 해결될 수 없는 문제이다. 정부가 환경오염 및 탄소배출 등의 문제를 해결해야한다면, 천연가스 발전소와 석탄 발전소의 경쟁을 분리해야 할 것이다.

원가산정은 전기와 열이 동시에 요청되었을 때를 전제조건으로 한다. 요청하였다는 것은 그 요청자가 모든 위험을 부담하겠다는 뜻이다. 위의 전제조건에 어긋나는 시장 상황이 연간 어느 정도 발생되는지 파악하여 열병합발전 연간 운전 시뮬레이션 예측이 필수이다.

5.9 열거래단가 책정 방안

Table 2의 결과는 원가산정이다. Exergy input method에서는 원가산정을 기반으로 생산자와 구매자가 협상할 수 있는 거래단가 방안을 제시하고 있다. Fig. 1(b)에서 전기와 열 생산에 공동으로 관여하는 장치가 공통기기이며, 그 공통기기에서 발생하는 손실 L_{RC} 의 책임을 열측에서 부담한다면, 열단가는 상승하게 된다. 소내소비동력 역시 공통기기이며, 이 역시 열측에서 부담한다면 열단가는 더 상승하게 된다. 위는 복합발전이 선순위, 복합열병합발전이 후순위 가동일 때의 경우이다. 복합열병합발전이 선순위, 복합발전이 후순위 가동이라는 것이 증명되었다면, 다수의 사업자가 복합발전을 복합열병합발전으로 개조를 시도할 것이다. 이 경우 열생산자 사이의 경쟁으로 인해 위의 설명은 반대가 된다.

5.10 원가산정과 비용최적화

생산자와 구매자의 열거래를 위해 다음의 3단계가 추천된다. Step 1) 비용해석: Table 1의 다양한 방법론 중에서 하나의 방법론을 양자가 선택한다. Step 2) 비용배분: 선택된 방법론에 따라 전기와 열의 비용배분 및 원가산정을 수행한다. Step 3) 비용최적화: 계산된 원가가 구매자 회사에 최적화된 원가인지를 판단하여, 최적화된 원가라면 그 원가대로 열거래 협상을 추진하고, 최적화되지 않은 원가라면 구매자 회사에서 기존에 거래하였던 가격들의 평균치를 협상가로 제시한다. 여기서 주의할 점은 식(11)이 아니라, 생산지로부터 열네트워크망까지의 배관 매설비를 포함한 식(13)으로 Step 2) 원가

산정이 수행되어야 한다. 계약이 이미 완료되었거나, 독점 및 정부 강제 사항 등이 존재한다면 Step 3) 비용최적화의 판단은 성립하지 않는다.

5.11 생산자와 구매자의 손익 공유제

시스템 성능이 높을수록 원가는 낮고, 시스템 성능이 낮을수록 원가는 높다. 시장 경쟁체제라면 성능이 낮아 원가가 높은 시스템은 도태될 것이다. 그러나 열병합발전은 그 지역을 독점적으로 공급하므로 경쟁체제가 아니다. 시스템 성능이 높을수록 생산자의 이윤이 많이 책정되어야 하고, 시스템 성능이 낮을수록 생산자의 이윤이 적게 책정되어야 할 것이다. 즉 원가는 시스템 성능과 반비례하고, 이윤은 시스템 성능과 비례한다. 생산자와 구매자가 손익을 서로 공유하면, 항상 최고 성능의 복합 열병합발전이 건설될 것이다.

5.12 소형열병합발전

복합열병합발전은 가스터빈과 증기터빈에서 전기를 생산하고 열교환기에서 온수를 생산하는 시스템이며, 열전비가 약 0.9 정도이다. 소형열병합발전은 가스엔진에서 전기를 생산하고 HRSG에서 온수를 생산하는 시스템이며, 열전비가 약 1.6 정도로서 증기터빈에서 전기생산을 포기한다는 것이 큰 단점이다. 이로 인해 Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 열원가비는 급격히 상승하게 된다. 선행연구 결과 소형열병합발전의 전기원가는 복합열병합발전에 비해 2% 정도 감소하였고 열원가는 60% 정도 증가하였다. 소형열병합발전 사업자는 이점을 신중히 고려해야 할 것이다.

5.13 검토 및 결과

Fig. 2의 차트 4개를 동시에 분석한 결과, 열전비가 높을수록 발전원가는 감소하고 열원가는 증가하는 것이 합리적이라 판단되므로, 현재 전 세계적으로 가장 잘 알려진 4. Benefit distribution method는 합리성이 가장 떨어진다고 판단된다. 4. Reverse benefit method가 콘텐츠 모드에서 Power method와 정확히 일치하므로 가장 합리적일 것으로 판단되나 이 역시 합리성이 떨어진다. 외기온도 15℃일 때, 복수기의 온도는 약 33℃ 정도이며, 발전소 주변의 수산양식장에서 그 33℃의 열을 구매하여 수산물을 양식한다고 한다면, 그 33℃의 열가격은 0원이 아니다. Fig. 2(b)에서 열전비 0.6 정도일 때, 생산된 열의 온도는 외기온도와 근접한다. 즉 열전비 0.6 정도에서 열원가는 0 정도가 되어야 한다. 시스템의 에너지 상황은 실시간 변한다. 원가산정 역시 실시간 변하는 시스템의 상황에 맞게 계산되어야 한다.

이것이 Exergy input method로서 다수 전문가들이 엑서지 방법을 적용해야 한다고 주장하는 근본적 이유이다.

6. 엑서지 방법론의 이해

6.1 에너지와 엑서지의 정의

엑서지의 정의는 주어진 상태에서 환경상태로 변화하는 동안 얻을 수 있는 최대일(유효에너지)이다. 그 뜻을 보다 쉽게 서술해 보고자 한다. 에너지의 정의는 변화를 일으킬 수 있는 능력이다. 변화에는 사회가 발전되는 유효변화가 있고 사회발전과 관련 없는 무효변화가 있다. 이와 같이 에너지는 사회발전을 이룰 수 있는 유효에너지(Available energy)와 사회발전을 이룰 수 없는 무효에너지(Non-available energy)의 합으로 이루어져 있다. 에너지를 엔탈피(Enthalpy), 유효에너지를 엑서지(Exergy), 무효에너지를 아너지(Anergy)라 한다.

$$\begin{aligned} \text{에너지} &= \text{유효에너지} + \text{무효에너지} & (28) \\ \text{엔탈피(양)} &= \text{엑서지(질)} + \text{아너지(무)} \end{aligned}$$

엔탈피는 열역학 제 1 법칙적 에너지로서 에너지의 양(Quantity)을 뜻하고, 아너지는 열역학 제 2 법칙의 엔트로피(무질서한 정도)로부터 계산되는 무효에너지로서 에너지의 무(None)를 뜻하고, 엑서지는 엔탈피와 아너지의 차로써 에너지의 질(Quality)을 뜻한다. 일에너지는 질로서, 사회발전을 100% 도모할 수 있다. 열에너지는 양으로서 사회발전을 도모할 수 있는 부분과 도모할 수 없는 부분의 합이다. 사장이 일을 열심히 하면 그 일량 100%가 회사 발전에 기여될 가능성이 있다. 사장이 열을 열심히 내면 그 열량 중 일부만이 회사 발전에 기여될 가능성이 있다. 여기서 그 열량 중 몇 %가 회사 발전에 기여하는가를 계산해 내는 것이 핵심이다. 일과 열의 가치는 이와 같이 서로 다르며, 질(엑서지)과 양(에너지) 중 가치는 질이다.

6.2 에너지 변화의 방향성

식 $A = B$ 는 A와 B는 서로 같다는 수학이다. 식 $A \rightarrow B$ 는 보존법칙에 의해 A와 B는 서로 같다는 수학과 함께 A가 B로 변한다는 방향성이 포함되어 있다. 즉 모든 수식은 열역학 제 1 법칙의 수학적 계산(=)에 반드시 맞아야 하며, 그와 동시에 열역학 제 2 법칙 열은 고온에서 저온으로 흐른다는 변화의 방향성(\rightarrow)에 맞아야 한다. 열의 흐름은 변화이고, 변화는 반드시 고립계에서 총 엔트로피가 증가하는 방향으로 흐른다. Table 1의 Exergy를 제외한

나머지 공식은 변화의 방향성이 존재하지 않는 열역학 제 1 법칙적 관점의 수학적 계산이다.

6.3 경제학에서 엑서지 연구 수행

The World Energy Council의 2004년 레포트⁽¹⁷⁾에서 엑서지를 기반으로 탄소배출량을 전기측과 열측에 배분한 결과를 제시하였다. 미국 ACEEE의 2013년 레포트⁽¹⁸⁾에서 It is exergy not energy that drives activity, Exergy accounting, Exergy policies의 중요성을 강조하고 있다. Science Europe의 2016년 레포트⁽¹⁹⁾ 제목은 Think Exergy Not Energy 이다. The World Bank의 2003년 레포트⁽¹⁾에서 엑서지 계산을 통한 열병합발전의 원가산정 수행 결과를 제시하였다. IAEA의 2017년 레포트⁽²⁰⁾에서 엑서지 방법으로 원자력발전소에서 생산된 전기와 열의 원가를 산정하였다. 카자흐스탄 KAZENERGY Association의 2019년 레포트⁽²¹⁾에서 엑서지 방법만을 사용한다고 서술되어 있다. 러시아 연방에서는 Exergy method에 열이 최종 소비되는 과정을 포함한 ORGRES method⁽²²⁾가 사용되고 있다고 서술되어 있다. 구글의 이미지 검색에서 Aggregate exergy efficiency를 입력하면, 각 국가별 엑서지 사용 효율 차트가 다수 검색된다. 이와 같이 경제학에서도 엑서지 방법을 적용하고 있음을 확인할 수 있다.

6.4 열역학에서 에너지 비용 계산

기계공학 열역학 교재 중 하나인 WILEY 출판사의 Fundamentals of Engineering Thermodynamics 제 8 판 7장 7절이 Thermoconomics이며, 그 항목은 1. Costing, 2. Using exergy in design, 3. Exergy costing of a cogeneration system이다. 그 책에서는 전기원가와 온수의 엑서지원가는 서로 같다는 가정하에 열병합발전의 원가산정을 시도하고 있다.

6.5 회계학에서 엑서지 계산 수식

열역학적으로 엑서지량의 차를 계산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\Delta X = m \cdot [h_2 - h_1 - T_0 \cdot (s_2 - s_1)] \quad (29)$$

여기서 ΔX 는 엑서지 차, m 은 유체의 질량, h 는 엔탈피, T_0 는 외기온도, s 는 엔트로피, 하첨자 1은 입구 및 2는 출구를 뜻한다. 현 회계학에서 계산하는 엑서지 수식을 세부적으로 설명하고자 한다.

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1) \approx C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (30)$$

$$s_2 - s_1 = \int 1/T dh - \int v/T dP \approx C_p \cdot \ln(T_2/T_1) \quad (31)$$

$$T_Q = (T_2 - T_1) / \ln(T_2/T_1) \quad (32)$$

$$X_Q \approx (1 - T_0/T_Q) \cdot Q \quad (33)$$

$$\eta_c = 1 - T_0/T_Q \approx X_Q/Q \quad (34)$$

여기서 Q 는 온수의 열량, C_p 는 정압비열, T 는 온도, v 는 비체적, P 는 압력이다. Q 는 식(30)의 우변과 같이 근사화되고, $s_2 - s_1$ 은 식(31)의 우변과 같이 근사화되고, 대수평균온도 T_Q 를 식(32)로 정의하면, X_Q 의 근사식은 식(33)과 같다. 식(34)의 η_c 는 카르노 효율로서, 고온 T_Q 와 저온 T_0 사이의 열기관에서 얻을 수 있는 최대 효율이다.

회계학에서 X_Q 를 식(33)으로 계산한다. 그러나 반드시 식(29)로 계산해야 오류가 발생하지 않는다. Table 2에서 열 Q 는 43.58 kJ/s, T_2 는 온수의 출구 온도 273.15+110°C, T_1 은 온수의 입구온도 273.15+60°C, T_0 는 외기온도 273.15+3.3°C이다. 따라서 식(32)의 T_Q 는 357.57K(84.42°C)이다. Table 2의 8. Exergy output method에는 식(33)으로부터 X_Q 로 9.89 kJ/s이 적용된다.

6.6 엑서지 투입량과 엑서지 산출량

압력 P 와 온도 T 는 측정값이며, 유체의 특성으로부터 엔탈피 h 와 엔트로피 s 는 자동으로 결정된다. Fig. 3에는 식(29)와 식(33)의 이해를 돕기 위한 온도-엔트로피 선도가 도시되어 있다. Fig. 3(a)는 엑서지 산출로서, 지역난방 온수가 상태 1의 60°C로 입력되어 상태 2의 110°C로 출력된다. 그 초록색의 내부 면적이 식(29)의 ΔX 이다. 식(32)의 T_Q 는 초록색 면적과 회색 면적은 같으므로 계산된다. -273.15°C부터 3.3°C까지의 직사각형 면적이 아니지이다. 온수의 열량은 43.58 kJ/s이고, 온수의 엑서지차는 9.89 kJ/s이므로, 식(34)의 카르노 효율은 22.70%이고, 이값이 Table 1의 Exergy output method에 적용된다.

Fig. 3(b)는 엑서지 투입으로서, 터빈으로부터 상태 1의 270°C 증기가 입력되어 상태 2의 물 70°C로 출력된다. 이 경우 면적을 세 부분으로 나누어 그 평균 T_Q 값을 계산해야 하나, 결국 열역학적 엔트로피를 계산해야 한다. 증기의 열전달량은 43.58 kJ/s 이고, 증기의 엑서지차는 14.70 kJ/s이므로, 식(34)의 카르노 효율은 33.72%이고, 이값이 Table 1의 Exergy input method에 적용된다.

증기가 준 엑서지는 14.70 kJ/s이고, 온수가 받은 엑서지는 9.89 kJ/s로서, 지역난방 열교환기 내부에서 엑서지 손실 L_Q 4.81 kJ/s이 발생되었다. 그 손

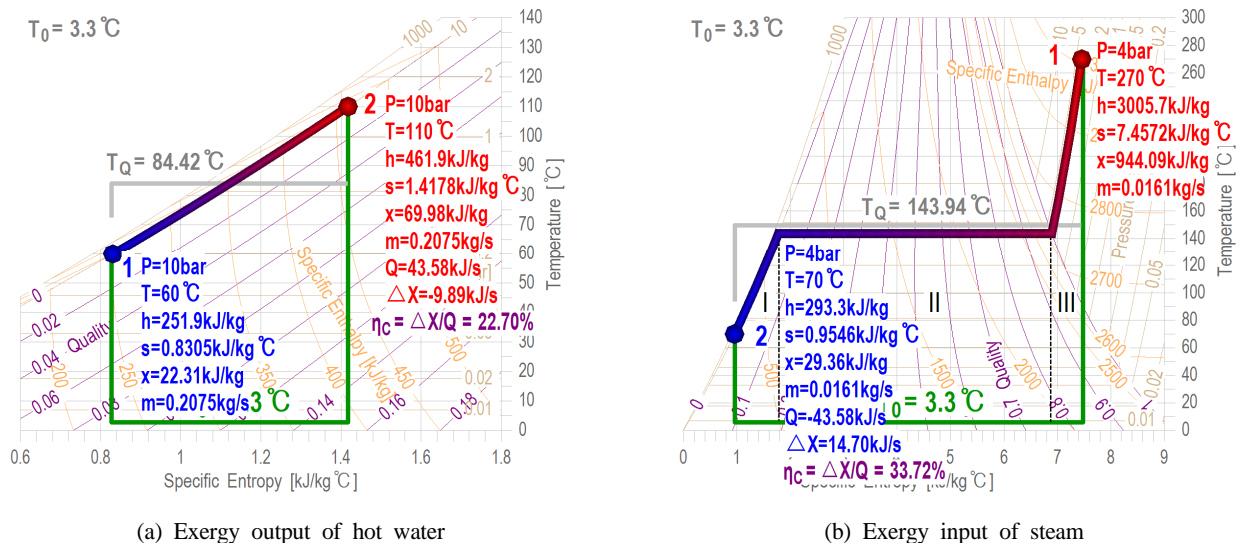


Fig. 3. Calculation of amount of exergy difference

실의 책임은 온수에 있다. 따라서 온수의 열원가는 그 손실만큼 상승하게 된다. 위와 동일한 논리로 가스터빈 및 증기터빈에서도 엑서지 손실 L_p 이 약 8% 정도 발생하며, 그 8% 엑서지 손실의 책임은 전기측에 있다. Exergy output이 아니라 Exergy input 이 원가산정에 적용되어야 한다.

6.7 생산품의 가치평가

열네트워크의 온수 온도가 110°C라 가정한다. 어떤 사업자가 110°C 온수를 생산하는 열병합발전이 90°C 온수를 생산하는 히트펌프를 추가로 설치한 후 최종 105°C 온수를 열네트워크에 공급하였다면, 그 105°C 온수는 열네트워크 온도를 떨어뜨린다. 즉 105°C 온수가 110°C 온수와 혼합되는 그 위치에서 엑서지 손실이 발생하며, 열병합발전의 전기측이 그 손실을 부담해야 할 것이다. 위 열네트워크 최적화 온도는 110°C이므로, 생산자는 110°C 온수를 열네트워크로 전송해야 한다.

오피스텔의 열전비는 약 1 정도, 점포의 열전비는 약 2 정도, 호텔의 열전비는 약 3 정도, 병원의 열전비는 약 4 정도의 온수가 필요하다. 염색공장에서는 열전비 5의 고온 고압 증기열이 필요하다. 이와 같이 전기의 가치는 상황에 관련 없이 모두 100%이나, 열의 가치는 상황에 따라 달라진다. 제품을 생산하기 위한 과정에서 발생된 손실을 계산할 수 있고, 생산된 최종 제품의 가치를 평가할 수 있고, 계산 결과가 일반 상식과 일치하는 그 방법이 가장 합리적인 원가산정 방법론이다.

6.8 기존 문헌 분석

Table 3에는 기존 문헌에서 산정된 엑서지 방법에 의한 결과를 역으로 계산한 값이 제시되어 있다. The World Bank 보고서에서 복합열병합일 때, 그 비용이 D_p 는 11.03 그리고 D_Q 는 11.03으로 배분되었다. 이를 역으로 계산하면, C_Q 는 C_p 의 76% 라는 결과가 도출되나, 계산의 오류로 판단된다. 석탄화력열병합에서 D_p 는 4.13 그리고 D_Q 는 2.83으로 배분되었다. 이를 역으로 계산하면, C_Q 는 C_p 의 34%로서, 합리적인 결과라 할 수 있다. Dresden 대학의 결과를 역으로 계산하면, Exergy output method를 적용한 Exergetic Network는 24% 그리고 Exergy out in method를 적용한 Exergetic Generation은 35%로 계산된다. 이 값들은 Table 2와 거의 같다. KAXENERGY 레포트의 결과를 역으로 계산하면, 36%이다.

터빈에서의 엑서지 손실이 포함된 Exergy input method가 합리적이다. 또한 Fig. 1(b)에서 설명하였듯이 가스사이클 비용배분을 먼저 수행한 후 증기사이클 비용배분을 수행하고, 이것을 합하여 원가를 최종 산정해야 한다. 선행연구 결과, C_Q 와 C_p 의 비율은 약 26%~32% 범위로 산정되었으며, 그 값은 외기온도, 열전비, 종합효율, Mode III의 발전효율에 따라 달라진다.

6.9 Mode I 발전효율 보정곡선

겨울철 120°C 온수의 가치가 여름철 120°C 온수의 가치보다 더 높아야 한다는 것은 당연하다. 즉 외기온도가 변할 때마다 엑서지 방법에 의한 원가

Table 3. The results of exergy method in previous literature

Literature	CHP Type	P	Q	D_P	D_Q	C_P	C_Q	Ratio
		Reference					D_P/P	
The World Bank ⁽¹⁾	Gas-fired	120	120	11.03	8.37	0.092	0.070	76%
	Coal-fired	60	120	4.13	2.83	0.069	0.024	34%
Dresden University ⁽²³⁾	Exergetic Network	100	100	404	96	4.042	0.958	24%
	Exergetic Generation	100	100	367	129	3.674	1.294	35%
KAZENERGY ⁽²¹⁾	Gas-fired	35	65	60	40	1.714	0.615	36%

는 실시간 변하게 된다. 외기온도 변화에 따라 발전효율 또한 변한다. 발전 우선순위를 결정하기 위해서는 외기온도에 따른 발전효율 보정곡선이 전력거래소에 제출되어야 한다. 열병합발전 사업자는 Mode III의 발전효율 보정곡선을 전력거래소에 제출한다. 이로 인해 당연히 복합발전이 선 순위가 되고, 열병합발전의 Mode I은 후 순위가 된다. Mode III는 후 순위가 될 수 있으나, Mode I은 본 연구에 따르면 복합발전보다 선순위 가동이다. 이를 인정받기 위해서는 외기온도에 따른 Mode I 발전효율 보정곡선이 전력거래소에 제출되어야 할 것이다.

6.10 열원가와 열의 엑서지원가

현재 열경제학에서는 지역난방 온수가 보유하고 있는 엑서지 x_Q 의 엑서지 원가 C_Q^x 를 최종 결과로 제시하고 있는 듯하다. 엑서지 원가 C_Q^x 를 생산자와 구매자가 이해하기는 힘들다. 식(35)의 좌변 및 우변은 지역난방 온수 비용이다. 위 식에서 볼 수 있듯이, 열의 엑서지 원가 C_Q^x 와 열원가 C_Q 는 서로 환산된다. 지역난방 온수가 보유하고 있는 열 Q 의 열원가 C_Q 를 최종 결과로 제시해야 생산자와 구매자가 이해할 수 있다.

$$C_Q^x \cdot x_Q = C_Q \cdot Q \quad (35)$$

6.11 다양한 복합 생산 에너지 시스템

대표적인 복합 생산 에너지 시스템은 열병합발전이며, 전세계적으로 다양한 종류의 복합 생산 에너지 시스템이 존재한다. 단일 제품만 생산하는 플랜트는 국가의 에너지 사용 효율 정책에 어긋나는 것이므로, 전세계의 모든 플랜트는 복합 생산 에너지 시스템이 될 수밖에 없다. 예를 들면 전기와 48

9℃·330℃·220℃ 산업용 증기 생산 시스템에서 전기와 각 증기의 원가, 연료전지에서 전기와 온수의 원가, 해수담수화발전에서 전기와 담수의 원가, 제철소에서 철과 부생가스의 원가, 수소생산 원자력 발전에서 전기와 수소의 원가, 전기·냉수 생산 플랜트에서 전기와 냉수의 원가, 전기·설탕 생산 플랜트에서 전기와 설탕의 원가, 전기·황산·산업용증기 생산 플랜트에서 각 제품의 원가, 석유 증류탑에서 각 제품의 원가, 메탄올·올레핀·전기·증기 생산 플랜트에서 각 제품의 원가를 어떻게 산정해야 하는가 이다.

무더운 여름철 A 업체는 고객 유치를 위해 실내를 23℃로 유지하고, B 업체는 국가의 에너지 절약 정책을 충실히 따라 실내를 28℃로 유지하였다고 가정하자. 각 업체에 전기 사용량 만큼만 요금을 책정해야 하는가? 아니면 그 요금에 추가로 A 업체에는 벌칙 요금을, B 업체에는 할인 요금을 부여해야 하는가? 누구라도 에너지 과소비 업체에는 벌칙, 에너지 절약 업체에는 할인 정책을 국가가 시행해야 한다고 발언할 것이다. 그렇다면 그 벌칙과 할인 비용 책정 방법론⁽²⁴⁾은 무엇인가의 문제가 발생한다. 발전소를 건설하였는데 실제 운전 성능이 건설사에서 보증한 성능보다 낮았다면 발주사는 건설사에 벌칙 금액을 부여해야 한다. 그 벌칙 금액을 어떻게 계산⁽²⁵⁾해야 하는가? 탄소배출권과 같이 플랜트에서 각종 환경을 오염시켰을 때 그 벌칙 금액을 어떻게 계산⁽²⁶⁾해야 하는가? 시스템이 최소의 비용으로 최대의 성능을 발휘하기 위해 어떻게 설계⁽³⁾되어야 하는가? 현재 가동 중인 시스템 전체 성능이 저하되었는데, 어느 구성기기에서 성능 저하가 발생하였으며, 그 구성기기로 인해 발생한 손실 금액⁽³⁾은 얼마인가?

이와 같이 성능 분석의 열역학과 비용 산정의 경제학은 긴밀하게 연결되어 있으며, 단일의 원칙으

로 모든 에너지 시스템의 성능과 비용이 분석되어야 한다. 가장 합리적인 단일 원칙이 바로 열역학 제 1 법칙과 제 2 법칙을 혼합한 엑서지 성능 분석 및 엑서지 비용 배분이다.

6.12 에너지 경제와 엑서지 경제

위에서 열거한 시스템을 모두 합해보자. 이것이 바로 합리적인 국가 에너지 경제 정책을 어떻게 펼쳐야 하는가의 문제이며, 위 모두를 하나의 차트로 도표화한 것이 6.3절에서 서술한 각 국가의 Aggregate exergy efficiency 차트이다. 흔히 우리는 에너지 위기가 심각하다고 걱정한다. 그러나 지구상에 에너지는 얼마든지 있다. 엑서지 위기가 심각하다는 것이 정확한 표현이다. 국가의 엑서지 효율을 높이는 정책이 바로 단일 시스템에서 다수의 제품을 생산하는 것이며, 정부에서 에너지 효율화 정책을 통해 엑서지 경제를 이미 추진하고 있다.

6.13 합리적인 거래단가 책정 방법론

원가산정의 가장 큰 문제점은 그 누구도 복합 생산품에 대한 원가산정 방법론을 결정하지 못한다는 것이다. 그 이유는 첫째 2.6절에서 서술하였듯이 정답이 존재하지 않기 때문이며, 둘째 4장에서 서술하였듯이 누구라도 인정하는 방법론이 아직 탄생하지 않았기 때문이며, 셋째 5.7절에서 서술하였듯이 원가산정의 전제조건 자체가 성립하지 않는 시장 상황이 다수 발생하기 때문이며, 넷째 6.9절에서 서술하였듯이 열병합발전의 원가산정은 전력거래소의 구매단가와 연결되어 있기 때문이다. 즉 합리적인 원가산정 방법론이 중요한 것이 아니라, 합리적인 거래단가 책정 방법론이 중요한 것이다. 따라서 생산자, 전기구매자, 열구매자 모두가 인정할 수 있는 거래단가 방안을 제시하는 그 원가산정 방법이 가장 합리적인 방법론이다.

7. 증기터빈 열병합발전에서의 원가산정

7.1 비용배분 및 원가산정

Table 4에는 단순 증기터빈 열병합발전에서 동력과 열의 비용배분 및 원가산정 결과가 제시되어 있다. 이해의 편의를 위해 단위는 모두 kJ로 통일하고자 한다. 연료투입량 F 는 100 kJ/s, 발전량 P 는 28.79 kJ/s, 열생산량 Q 는 61.21 kJ/s, 연료단가 C_F 는 \$1.00/kJ이다. The World Bank 기술 보고서에서 LHV 기준 어떤 발전전용설비의 효율 η_p^A 은 39%, 어떤 열전용설비의 효율 η_Q^A 은 90%로 주어졌다. 이 값을 식(21)에 대입하면 메리트 M 이 41.84 kJ/s로 계산되고, Table 1에 적용하면 각 방법론에 따른 동력

생산을 위해 투입된 워너지량 K_P 과 열생산을 위해 투입된 워너지량 K_Q 이 계산되며, 식(10)과 식(11)로부터 D_P 와 D_Q 가 계산되고, 식(14)와 식(15)로부터 C_P 와 C_Q 가 계산된다.

7.2 Exergy input method

Fig. 4(a)에는 단순 증기터빈 열병합발전에서 엑서지 계산을 위한 개략도가 도시되어 있고, Fig. 4(b)에는 동력만을 생산하는 콘텐싱 모드에 대한 T-s 선도가 도시되어 있다. 여기서 열역학 계산을 위한 세부적인 수식은 Fig. 4(a)에 제시되어 있다. 증기터빈 [4]의 출구 온도 $T_1 (=T_2)$ 값이 변함에 따라 열전비가 변하고 또한 Fig. 4의 모든 것이 변한다. 대략적으로, 상태 4와 상태 1의 길이를 발전량 그리고 상태 1과 상태 2의 아래 직사각형 면적을 열생산량으로 이해할 수 있다. 따라서 세로축 $T_1 (=T_2)$ 값이 높아지면, 발전량은 줄어들고 열생산량은 증가하므로, 열전비 Φ 는 증가한다. 운전 상태에 따라 Fig. 4의 시스템 내부 모든 것이 변하는데, 무조건 대체설비 효율 η_p^A 39%와 η_Q^A 90%를 상수로 적용하는 것은 타당하지 못하다는 것을 이해할 수 있다.

Table 5에는 T_1 값이 변함에 따른 열전비 Φ 와 각 상태에서 열역학적 계산값이 제시되어 있고, Exergy input method에 의한 비용배분과 원가산정 결과가 계산되어 있다. Table 4의 10. Exergy input method 결과는 Table 5에서 열전비 Φ 가 2.126일 때의 값이다. 증기터빈 [4]에서 동력 P 를 생산하기 위해 투입된 엑서지량 K_P 은 $m \cdot (x_4 - x_1)$ 이며, 열교환기 [1]에서 열 Q 을 생산하기 위해 투입된 엑서지량 K_Q 은 $m \cdot (x_1 - x_2)$ 이다. 본 계산에서는 이해의 편의를 위해 증기터빈 효율을 100%로 가정하였기 때문에 K_P 과 P 값은 서로 동일하게 계산된다. 일반적으로 증기터빈 효율은 약 88% 정도로서, Fig. 4(b)의 상태 1이 오른쪽으로 약간 휘어져 도시된다. 이로 인해 K_P 는 P 보다 약 8% 정도 더 크게 된다.

7.3 열전비에 따른 비용배분 및 원가산정

Fig. 5(a)에는 열전비 Φ 에 따른 발전원가 C_p 의 산정 결과가 도시되어 있다. Fig. 2(a)의 결과와 매우 유사함을 볼 수 있다. 8. Exergy input method가 새로이 계산되었으며, 열전비가 증가함에 따라 발전원가는 낮아지므로 합리적이다.

Fig. 5(b)에는 열전비 Φ 에 따른 열원가 C_Q 의 산정 결과가 도시되어 있다. 10. Exergy input method의 열원가가 비교적 낮다는 것을 볼 수 있으나, 본 해석은 단순 증기터빈 열병합발전을 대상으로 하였으므로, 실제 증기터빈 열병합발전의 결과는 열원가가 더 높게 산정된다. 계산에서 외기온도는 15°C이다. 콘텐싱 모드($\Phi=1.308$)는 동력만을 생산하는

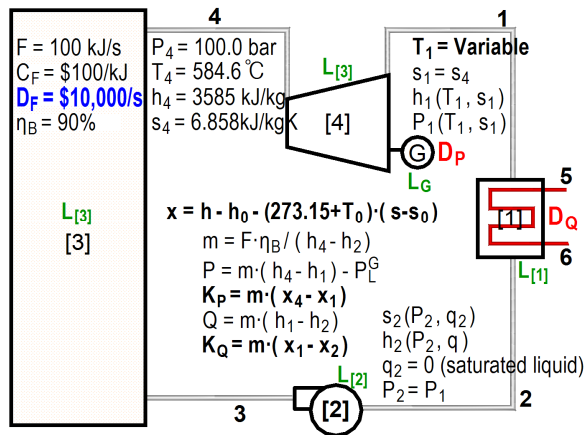
Table 4. The result of cost allocation for a simple steam-turbine CHP

Simple steam-turbine CHP, LHV						Alternative System					T_0	3.3
Fuel	Power	Heat	H2PR	Fuel Cost		Efficiency		Fuel		Merit	T_1^{out}	-
F	P	Q	Φ	C_F	D_F	η_P^A	η_Q^A	F_P^A	F_Q^A	M	T_2^{out}	-
Given	Given	Given	Q/P	Given	$C_F \cdot F$	Given	Given	P/η_P^A	Q/η_Q^A	Eq.(21)	T_Q^{out}	-
kJ/s	kJ/s	kJ/s	-	\$/kJ	\$/s	%	%	kJ/s	kJ/s	kJ/s	η_C^{out}	-
100	28.79	61.21	2.126	100	10,000	39%	90%	73.83	68.01	41.84	T_Q^{in}	-
P/F	28.79%	Q/F	61.21%	η_I	90.00%	40%	90%	71.98	68.01	39.99	η_C^{in}	-
Cost Allocation Methodology	Wonerger Input		Cost Allocation		Cost Accounting		Cost	Efficiency		Improved Eff.		
	K_P	K_Q	D_P	D_Q	C_P	C_Q	Ratio	η_P	η_Q	$\Delta\eta_P$	$\Delta\eta_Q$	
	Table 1		$K/(K_P+K_Q) \cdot D_F$		D_P/P	D_Q/Q	C_Q/C_P	C_F/C_P	C_F/C_Q	$\eta_P - \eta_P^A$	$\eta_Q - \eta_Q^A$	
	kJ/s	kJ/s	\$/s	\$/s	\$/kJ	\$/kJ	%	%	%	%P	%P	
1	Heat	31.99	68.01	3,199	6,801	111.11	111.11	100.00%	90.00	90.00	51.00	0.00
2	Power	73.83	26.17	7,383	2,617	256.41	42.76	16.68%	39.00	233.87	0.00	143.87
3	Equal	52.91	47.09	5,291	4,709	183.76	76.94	41.87%	54.42	129.98	15.42	39.98
4	Benefit	73.83	68.01	5,205	4,795	180.78	78.34	43.33%	55.32	127.65	16.32	37.65
	Rev. bene.	31.99	26.17	5,500	4,500	191.03	73.51	38.48%	52.35	136.03	13.35	46.03
5	Distribution	52.05	47.95	5,205	4,795	180.78	78.34	43.33%	55.32	127.65	16.32	37.65
	Rev. dist.	53.77	46.23	5,377	4,623	186.74	75.53	40.45%	53.55	132.39	14.55	42.39
6	Finish	71.98	68.01	5,142	4,858	178.58	79.37	44.44%	56.00	125.99	17.00	35.99
7	Energy	28.79	61.21	3,199	6,801	111.11	111.11	100.00%	90.00	90.00	51.00	0.00
10	Exergy input	28.79	16.35	6,379	3,621	221.54	59.16	26.70%	45.14	169.03	6.14	79.03

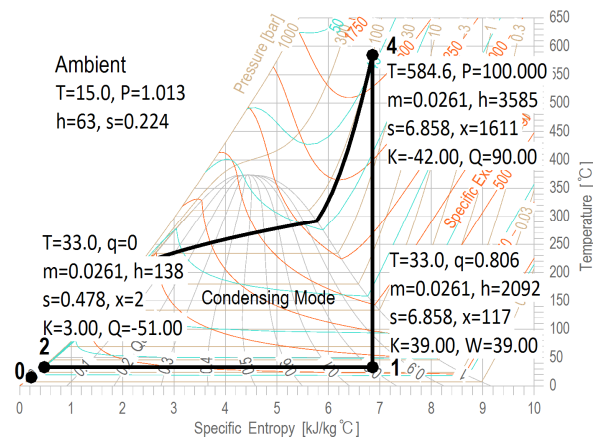
운전으로서, 복수기에서 약 33℃의 열을 환경으로 방출한다. 본 연구는 열병합모드에서 동력과 열의 원가산정이므로, 콘덴싱 모드라 할지라도 33℃의 열은 수산 양식장 등에 판매된다는 전제 조건이 있다. 열전비 1.2에서의 열온도는 17℃로서 열원가는 거의 0원임을 볼 수 있다. Table 5의 Exergy input method의 결과에서 볼 수 있듯이 15℃($\Phi=1.187$)의 열은 당연히 가치가 전혀 없는 0원이다. 4. Benefit 5 Distribution 방법에서는 15℃의 열원가가 \$70/kJ 라고 산정하므로 매우 비합리적인 결과이다. 4.

Reverse benefit method의 33℃ 열원가는 0이다. 그 이유는 발전전용설비를 기준으로 원가를 산정하기 때문에 콘덴싱 모드에서 열원가는 반드시 0으로 계산된다. 그러나 외기온도 15℃ 기준으로 33℃ 열의 가치는 0 보다 약간 높아야 한다.

Fig. 5(c)에는 열전비 Φ 에 따른 열원가와 발전원가의 비율 C_Q/C_P 이 도시되어 있고, Fig. 5(d)에는 열전비 Φ 에 따른 개선된 발전효율 $\Delta\eta_P$ 이 도시되어 있다.



(a) Flow diagram and equations



(b) T-s diagram at condensing mode

Fig. 4. A simple steam-turbine CHP

Table 5. The result of cost allocation for a simple steam-turbine CHP by exergy input method

ϕ	m	q_1, P_1	T_1	h_1	x_1	K_P	P	h_2	s_s	x_2	K_Q	Q	D_P	D_Q	C_P	C_Q	$\Delta\eta_P$
-	kg/s	-, bar	$^\circ\text{C}$	kJ/kg	kJ/kg	kJ/s	kJ/s	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kJ/s	kJ/s	\$/s	\$/s	\$/kJ	\$/kJ	%
1.187	0.0256	0.775	15.0	1974	0	41.16	41.16	63	0.224	0	0.00	48.84	100.00	0.00	2.430	0.000	2.16
1.308	0.0261	0.806	33.0	2091	117	39.00	39.00	138	0.478	2	3.00	51.00	92.86	7.14	2.381	0.140	3.00
1.395	0.0265	0.826	45.0	2167	193	37.57	37.57	188	0.638	6	4.94	52.43	88.37	11.63	2.352	0.222	3.51
1.514	0.0270	0.851	60.0	2259	284	35.80	35.80	251	0.831	13	7.32	54.20	83.02	16.98	2.319	0.313	4.12
1.644	0.0275	0.876	75.0	2348	373	34.04	34.04	314	1.015	23	9.64	55.96	77.92	22.08	2.289	0.394	4.68
1.788	0.0281	0.901	90.0	2434	460	32.28	32.28	377	1.193	35	11.92	57.72	73.04	26.96	2.262	0.467	5.20
1.892	0.0284	0.918	100.0	2490	516	31.12	31.12	419	1.307	44	13.41	58.88	69.88	30.12	2.246	0.511	5.53
2.126	0.0292	0.952	120.0	2599	625	28.79	28.79	504	1.528	65	16.35	61.21	63.79	36.21	2.215	0.592	6.14
2.400	0.0300	0.986	140.0	2704	729	26.47	26.47	589	1.739	90	19.22	63.53	57.93	42.07	2.189	0.662	6.69
2.594	0.0306	5.050	160.0	2766	791	25.04	25.04	642	1.864	106	20.96	64.96	54.44	45.56	2.174	0.701	7.00
2.727	0.0309	6.129	180.0	2804	829	24.15	24.15	674	1.939	117	22.03	65.85	52.29	47.71	2.165	0.724	7.18

7.4 검토 및 결과

전체적으로 5장의 결과와 유사한 경향으로 계산되었다. 10. Exergy input method의 결과는 Power method와 Reverse distribution method의 사이 값으로 산정된다는 것이 특징임을 볼 수 있다.

다양한 비용배분 방법론 중 가장 합리적인 방법론이 있을 것이고, 가장 비합리적인 방법론이 있을 것이다. 그 합리성 판단의 기준은 원가산정의 결과

가 일반 상식에 맞아야 한다는 것이다. Exergy input method는 열역학 법칙을 기반으로 하므로 그 합리성은 높을 수밖에 없다. 선행연구에서 실제 가동 중인 다양한 열병합발전을 대상으로 생산원가를 산정한 바 있으며, 다양한 에너지 시스템에 대해 그 방법론의 합리성과 범용성을 입증해 나아갈 계획이다.

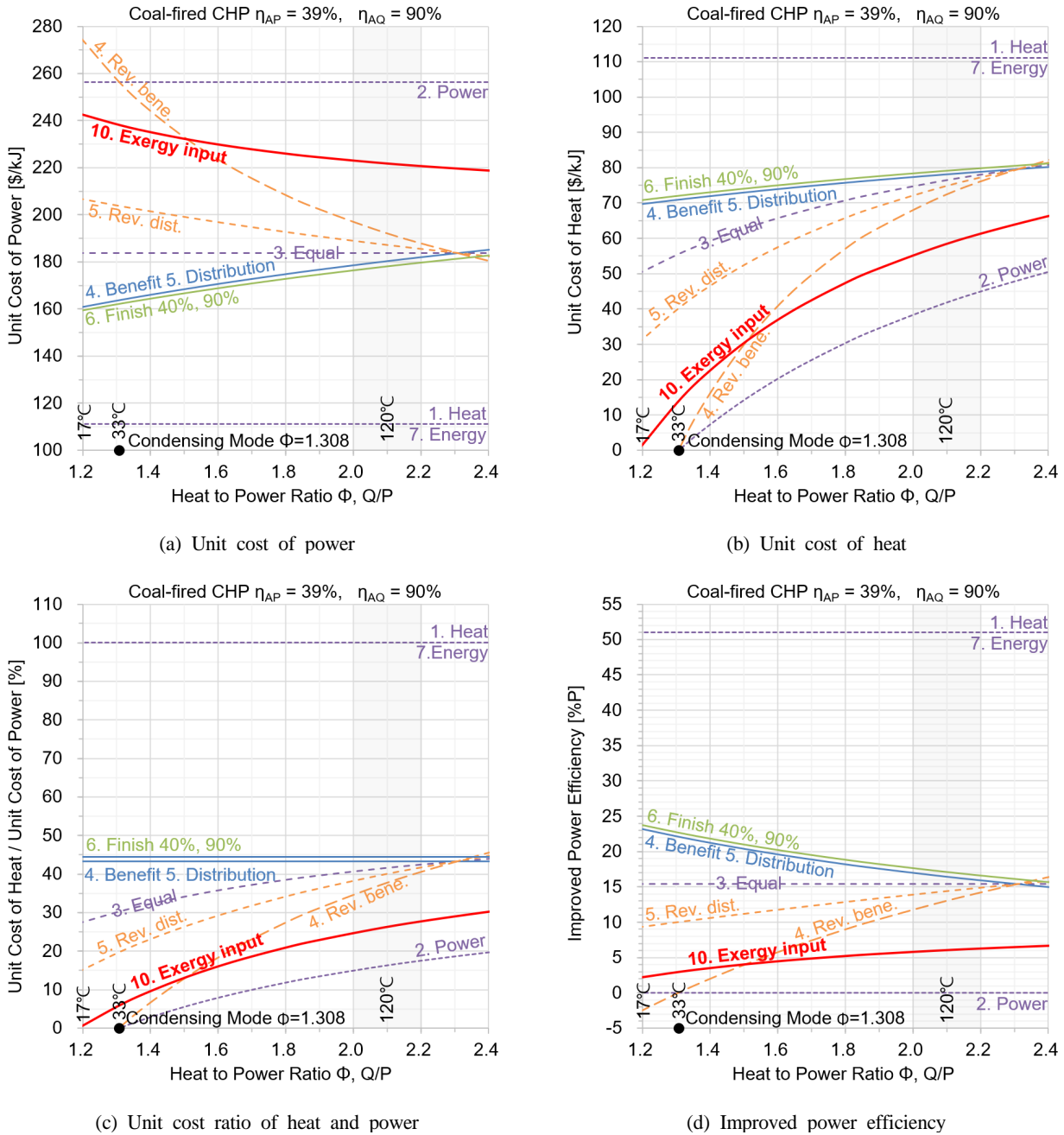


Fig. 5. The result of cost allocation according to heat to power ratio for a steam-turbine CHP

8. 결론

본 연구에서 열병합발전의 비용배분 및 원가산정에 대해 다양한 방법론을 소개하고, 그 합리성을 평가하였다. 메리트 방법론은 대체설비 효율을 해석 대상에 적용하나, 왜 대체설비를 해석 대상에 적용하는가에 대한 근거를 제시할 수 없다는 큰 단점이 있다. 메리트 방법론 중 전 세계적으로 Bene-

fit distribution method가 가장 많이 알려져 있으나, 열전비가 증가할수록 발전원가 역시 증가하게 산정되므로 그 합리성이 가장 낮다고 판단한다. Exergy input method는 열역학 제 2 법칙에 기반하므로 그 근거가 명확하며, 본 연구 검토 결과 그 합리성은 매우 높다고 판단한다. Exergy input method가 정답에 가깝다면, 그 방법은 어떠한 반론에도 일반 상식과 일치하게 설명해 낼 것이다.

엑서지는 열공학의 한 분야이다. 그러나 국가의 엑서지 경제 분석 등 엑서지를 현 경제학에서 이미 활용하고 있고, 전세계적으로 전문가들이 열병합발전의 원가를 엑서지 방법으로 계산하여 정부에 제안하고 있다. Exergy input method를 생산자와 구매자가 신중히 검토해 볼 것을 제안한다.

향후 연구에서는 열경제학 분야에서 Exergy input method를 포함한 4 종류의 엑서지적 방법론에 대해 각 방법의 합리성을 열공학적 관점으로 평가할 예정이다.

References

1. Carolyn, G., 2003, Regulation of heat and electricity produced in combined-heat-and-power plants, The world bank, pp. 29-36.
2. Abusoglu, A., Kanoglu, M., 2009, Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 2295-2308.
3. Kim, D., 2010, A new thermoeconomic methodology for energy systems, Energy, Vol. 35, pp. 410-422.
4. Lozano, M. A., Valero, A., 1993, Theory of the exergetic cost, Energy, Vol. 18, No. 9, pp. 939-960.
5. Bejan, A., et al., 1996, Thermal design and optimization, Wiley, New York
6. Lazzaretto, A., 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., et al., 1996, Exergy analysis for a gas turbine cogeneration system, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 118, pp. 781-791.
8. Derya, H., Aysegul, A., 2018, A comparative thermoeconomic cost accounting analysis and evaluation of biogas engine-powered cogeneration, Energy, Vol. 159, pp. 97-114.
9. Derya, H., Aysegul, A., 2018, Application and comparison of exergetic cost theory and wonergy methods to a biogas engine powered cogeneration, 8th International Renewable Energy Conference, IRENEC 2018
10. Kim, D., 2015, Suggestion of environmental thermoeconomics, Proceedings of the Korea Institute of Plant Engineering & Construction, Conference, pp. 95-98.
11. Kim, D., 2014, A suggestion of thermoeconomic power efficiency and heat efficiency: CGAM analysis, The Korean Society of Mechanical Engineers, Conference, pp. 2976-2981.
12. Eurostat, 2017, Combined heat and power (CHP) generation, Directive 2012/27/Eu of the European Parliament and of the Council.
13. Anke, E., et. al., 2016, Review of the default primary energy factor (PEF) reflecting the estimated average EU generation efficiency referred to in Annex IV of Directive 2012/27/EU and possible extension of the approach to other energy carriers.
14. European Standard, EN 15316:2007, Heating systems in buildings - method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Brussels
15. The Danish Energy Agency, The danish leveled cost of energy calculator.
16. British Standards Institution, PAS 2050:2008, Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. London.
17. World Energy Council (WEC), 2004, Comparison of energy system using life cycle assessment, A Special Report of the World Energy Council. London:
18. John, A., 2013, Linking energy efficiency to economic productivity: recommendations for improving the robustness of the U.S. economy, American Council for an Energy-Efficient Economy
19. Paul, B., et al., 2016, Think exergy not energy, Science Europe
20. IAEA, 2017, Opportunities for cogeneration with nuclear energy, International Atomic Energy Agency
21. The National Energy Report 2019, KAZENERGY Association, Republic of Kazakhstan.
22. Romanov, M., 2017, The national power grid and the room for feed-in energy supply, Sustainable Energy in Kazakhstan.
23. Dittmann, A., et al., Allocation of CO₂-emissions to power and heat from CHP-plants, Technische Universität Dresden.
24. Kim, D., 2009, Suggestion of the worth evaluation of cool air and the allocation methodology of cooling cost, Korean Journal of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers

- of Korea, Vol. 21, No. 3, pp. 201-208.
25. Kim, D., 2016, A suggestion of penalty cost appropriation methodology for performance acceptance test of CGAM cogeneration, Journal of the Korea Institute of Plant Engineering & Construction, Vol. 12, No. 2, pp. 36-40.
 26. Kim, D., 2015, Suggestion of thermal environmental pollution cost pricing methodology, Proceeding of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Conference, pp. 817-820.