

열병합발전의 열원가 산정과 지역난방비 책정의 제안

김 덕 진[†]

에너코스

A Suggestion of the Heat Cost Estimating for Cogeneration and the Price Fixing for District Heating

Deok-Jin Kim[†]

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

ABSTRACT: When various kinds of outputs are produced from a single energy system, the methodology which allocates the common cost to each output cost is very important because it is directly related with the profit and loss of producers and purchasers. In the cost allocation methodology of the electricity and heat for cogeneration, there are various methods. The unit cost of heat produced from cogeneration is important to estimate the district heat cost. The aim of this study is to analysis the cost relation between the cogeneration and the district heat and to present the academic basis of a new cooling and heating charge system. From this analysis, we hope that the suggested methodology can offer a theoretical basis to the politic propulsion and induce the spontaneous energy saving of consumers.

Key words: CHP(열병합발전), Exergy(엑서지), Cooling cost(냉방비), Heating cost(난방비), Unit cost(원가), Cost allocation(비용배분), Thermoeconomics(열경제학)

1. 서 론

열병합발전(CHP, Cogeneration)은 연료의 투입으로부터 전기와 열을 동시에 생산한다. 이 열은 지역난방으로 투입되며, 지역난방비 책정과정도 연계된다. 열역학 제 1법칙을 적용하여 그 전기와 열 생산량은 파악될 수 있다. 그러나 연료비 및 자본비의 투입으로부터 전기생산비와 열생산비를 결정하기는 쉽지 않다.

열병합발전에서 생산된 열과 전기에 대한 대표적인 원가산정 및 비용배분 방법론에는, The World Bank의 기술보고서⁽¹⁾에서 소개되어 있듯

이, Enthalpy 방법, Heat 방법, Work 방법, Benefit distribution 방법 등이 있으며 통칭하여 회계학적 방법이라 불린다.

공학적 방법은 엑서지를 적용하여 열병합발전의 원가산정 및 비용배분에 접근하고 있으며, 대표적인 방법론에는 열경제학(Thermoeconomics) 또는 엑서지경제학(Exergoeconomics)에 대한 리뷰논문⁽²⁾에서 소개되어 있듯이, the theory of the exergetic cost (TEC)^(3,4), the theory of exergetic cost-disaggregating methodology (TECD)^(3,5), thermoeconomic functional analysis (TFA)^(6,7), intelligent functional approach (IFA)^(8,9), last-in-first-out principle (LIFO)⁽¹⁰⁾, specific exergy costing/average cost approach (SPECO/AVCO)⁽¹¹⁻¹⁴⁾, modified productive structure analysis (MOPSA)⁽¹⁵⁻¹⁷⁾, engineering functional analysis (EFA)^(18,19)이 있다.

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

우리는 선행연구에서 에너지 시스템에 적용할 수 있는 워너지 방법론(Wonergy methodlogy)⁽²⁰⁾을 새로이 제안하여 열병합발전에서 생산된 열원가를 산정한 바 있다. 또한 냉방비/난방비의 차등요금체계를 통해 자발적인 에너지 절약을 실현할 수 있다는 제안^(21,22)을 한 바 있다. 열병합발전에서 생산된 열은 지역난방 및 지역냉방에 투입된다. 따라서 열병합발전의 원가산정과 지역난방비 책정은 서로 긴밀한 관계가 있다. 본 연구의 목적은 이 관계를 비용의 관점으로 해석하고, 선행연구에서의 냉난방비 요금체계 제안의 학문적 근거를 제시하는 데 있다.

2. 열병합발전의 원가산정 방법론

열병합발전에서 전기와 열의 비용배분에 대해 선행연구⁽²⁰⁾에서 다음의 수식을 제안한 바 있다.

$$\dot{D}_W = \frac{\dot{K}_W}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} \cdot \dot{D}_{F,ZC} + \dot{D}_{ZW} \quad (1)$$

$$\dot{D}_Q = \frac{\dot{K}_Q}{\dot{K}_W + \dot{K}_Q} \cdot \dot{D}_{F,ZC} + \dot{D}_{ZQ} \quad (2)$$

여기서 \dot{D}_W 는 전기생산비, \dot{D}_Q 는 열생산비, \dot{D}_F 는 연료투입비, \dot{D}_{ZC} 는 공통비, \dot{D}_{ZW} 는 전기전용비, \dot{D}_{ZQ} 는 열전용비이다. 위 수식에서 핵심인자는 \dot{K}_W 즉 전기생산을 위해 투입된 워너지 그리고 \dot{K}_Q 즉 열생산을 위해 투입된 워너지이다. 이 값들은 Table 1과 같이 다양하게 적용될 수 있다.

Table 1에서 \dot{F} 은 연료투입량, \dot{W} 는 일생산량, \dot{Q} 는 열생산량, η_W 는 전기생산효율, \dot{Q} 는 열생산효율, \dot{M} 은 열병합발전으로부터 얻은 이득(Merit), $\Delta\dot{E}_{X,W}$ 는 전기생산을 위해 투입된 엑서지량, $\Delta\dot{E}_{X,Q}$ 는 열생산을 위해 투입된 엑서지량을 뜻하며 그 수식들은 다음과 같다.

$$\eta_W = \dot{W}_{\max} / \dot{F} \quad (3)$$

$$\eta_Q = (\dot{W} + \dot{Q}) / \dot{F} \quad (4)$$

$$\dot{M} = \dot{W} / \eta_W + \dot{Q} / \eta_Q - \dot{F} \quad (5)$$

$$\eta_W^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \cdot \eta_Q \quad (6)$$

$$a = \dot{Q}(\Delta\dot{E}_{X,W} + \dot{E}_{X,Q}) - \dot{F}\eta_Q\Delta\dot{E}_{X,Q}$$

Table 1 Wonergy distribution table.

Allocation methods	Amount of wonergy input	
	Work \dot{K}_W	Heat \dot{K}_Q
1. Heat	$\dot{F} \cdot \eta_Q - \dot{Q}$	\dot{Q}
2. Work	\dot{W}	$\dot{F} \cdot \eta_W - \dot{W}$
3. Benefit distribution	$\frac{\dot{W}}{\eta_W}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_Q}$
4. Efficiency	$\frac{\dot{W}}{\eta_W} - \dot{M} \frac{\eta_W}{\eta_W + \eta_Q}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_Q} - \dot{M} \frac{\eta_Q}{\eta_W + \eta_Q}$
5. Equal	$\frac{\dot{W}}{\eta_W} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_Q} - \frac{\dot{M}}{2}$
6. Enthalpy	$\Delta\dot{H}_W (= \dot{W})$	$\Delta\dot{H}_Q (= \dot{Q})$
7. Exergy	$\Delta\dot{E}_{X,W}$	$\Delta\dot{E}_{X,Q}$
8. Exergetic equal	$\frac{\dot{W}}{\eta_W^*} - \frac{\dot{M}}{2}$	$\frac{\dot{Q}}{\eta_Q^*} - \frac{\dot{M}}{2}$
9. Exergetic work	\dot{W}	$\dot{F} \cdot \eta_W^* - \dot{W}$

$$b = \dot{F}\eta_Q\Delta\dot{E}_{X,W}$$

$$c = -\dot{W}(\Delta\dot{E}_{X,W} + \Delta\dot{E}_{X,Q})$$

$$\dot{M}^* = \dot{W} / \eta_W^* + \dot{Q} / \eta_Q - \dot{F} \quad (7)$$

여기서 \dot{W}_{\max} 는 열병합발전이 발전만을 수행할 때의 일생산량이다.

식(1)과 식(2)는 비용배분의 수식이며, 그 일원가와 열원가는 다음과 같다.

$$C_W = \dot{D}_W / \dot{W} \quad (8)$$

$$C_Q = \dot{D}_Q / \dot{Q} \quad (9)$$

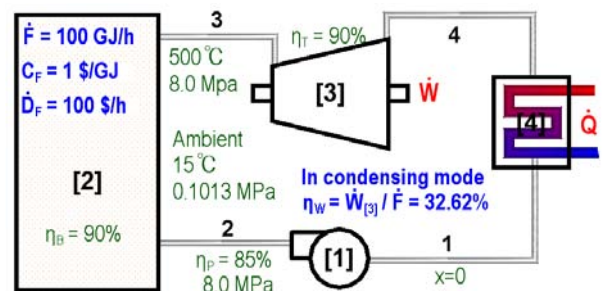


Fig. 1 A simple steam-turbine cogeneration.

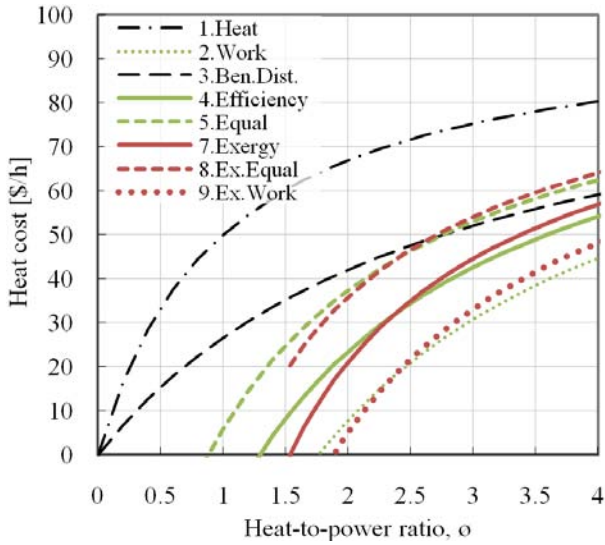


Fig. 2 Variation of heat cost.

3. 열전비에 따른 열원가 산정

Fig. 1의 보일러, 터빈, 열교환기, 펌프로 이루어진 증기터빈 열병합발전에 대해 열전비의 변화에 따른 열원가를 산정한다. 시스템 해석의 수식은 다음과 같다.

$$h_2 = (h_{2,S} - h_1) / \eta_P + h_1(P_1) \quad (10)$$

$$\dot{m} = \dot{F} \eta_B / (h_3 - h_2) \quad (11)$$

$$h_4 = h_3 - (h_3 - h_{4,S}) \eta_T \quad (12)$$

$$\dot{W} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (14)$$

$$\phi = \dot{Q} / \dot{W} \quad (15)$$

$$\Delta \dot{E}_{X,W} = \dot{E}_{X,3} - \dot{E}_{X,4} \quad (16)$$

$$\Delta \dot{Q}_{X,W} = \dot{E}_{X,4} - \dot{E}_{X,1} \quad (17)$$

위 수식들은 P_1 의 함수이며, P_1 의 변화에 따라 열전비 ϕ 가 변한다. 여기서 응축기의 압력이 0.008 MPa일 때 최대의 전력을 생산하며, 그 전기효율 η_W 은 32.62%로 주어졌다. 수식 계산에 필요한 고정값들은 Fig. 1에 제시되어 있다.

P_1 의 변화에 따라 식(10)~(17)을 계산하고 그 값들을 Table 1과 식(1)~(9)에 대입하면, Fig. 2의 열비용과 Fig. 3의 열원가를 얻을 수 있다. 이와 같이 다양한 결과가 열원가로 제시되고 있으며 어느 결과가 가장 합리적인가의 논란은 서론에서 언급하였듯이 논쟁의 대상이다. 그러나 본

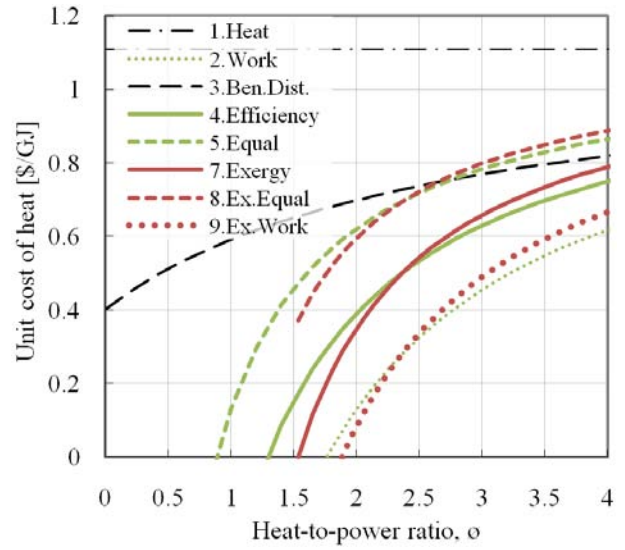


Fig. 3 Variation of unit cost of heat.

결과에서 핵심은 어느 방법론을 적용하더라도 열전비가 증가할수록 즉 열생산량이 증가할수록 열비용 및 열원가는 증가한다는 것이다.

4. 열전비에 따른 열원가와 지역난방비

현재 한국지역난방공사에서의 열판매는 크게 온수와 냉수로 나뉜다. 온수에 대해 주택용은 계절별 차등요금을 그리고 업무용과 공공용은 시간대별 차등요금을 적용하고 있다. 냉수요금은 침두부하시간, 중간부하시간, 경부하시간별로 차등 적용하고 있다.

Fig. 4에는 어떤 복합열병합발전시스템의 연간 시간에 따른 열전비의 변화가 도시되어 있다. 이와 같이 실시간 열전비는 변하며, 그 열원가 또한 Fig. 3의 결과와 같이 변하게 된다. 이 결과는 지역난방비가 실시간 차등 적용되어야 한다는 논리에 학문적인 근거를 제공할 것이다.

5. 세대별 차등 요금제의 제안

4장에서 설명하였듯이 열소요량이 많아지면 열원가는 높아지게 된다. 열소요량 증가의 원인은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 냉난방 세대수의 증가와 다른 하나는 각 세대별 냉난방량의 증가이다. 예를 들어 설명하자면, A 세대가 난방을 하고 B 세대는 난방을 하지 않은 상태에서 B 세대가 난방을 수행한다면 이것은 난방 세대수의

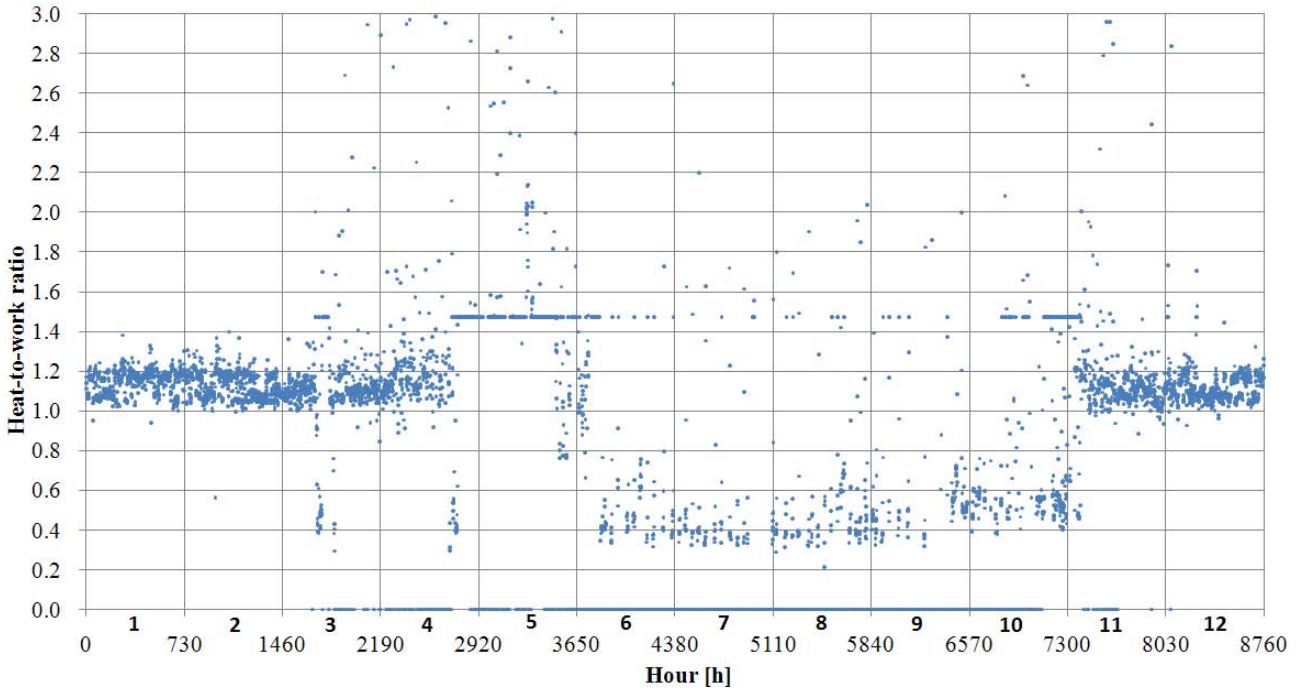


Fig. 4 Heat-to-work ratio during a year.

증가에 따른 열소요량의 증가이다. A 세대와 B 세대 모두 20℃를 유지한 상태에서 B 세대가 18℃로 변경 한다면 이것은 B 세대로 인한 열소요량의 증가이다. 두 경우 모두 난방비의 단가는 상승한다. 그러나 후자의 경우 분명 B 세대에 난방열량이 증가했으나 현재의 지역난방 요금체계는 그 책임을 A 세대에게도 지우고 있다.

현재의 지역난방비는 냉난방 세대수의 증가에 따라 계절별 또는 시간대별로 차등 적용하고 있다. 본 연구에서 세대수의 증가에 따른 차등요금제 뿐만 아니라 각 세대별 냉난방량의 증감에 따른 차등요금제를 새로이 적용해야함을 제안한다.

선행연구에서 냉방에 대한 차등요금제⁽²¹⁾ 그리고 난방에 대한 차등요금제⁽²²⁾를 세부적으로 제안한 바 있다. 그 수식은 워너지(Wonergy) 방법론으로 전개될 수 있으며, 다음과 같다.

$$\dot{D}_i = \frac{\dot{K}_i}{\sum_{i=1}^N \dot{K}_i} \cdot \dot{D}_{QZ} \text{ or } \frac{\kappa_i \dot{Q}_i}{\sum_{i=1}^N \kappa_i \dot{Q}_i} \cdot \dot{D}_{QZ} \quad (18)$$

[where] $\kappa_i = \dot{K}_i / \dot{Q}_i$

여기서 하첨자 i 는 i -번째 실, 세대, 또는 건물, \dot{D}_i 는 i 세대에 배분된 요금, \dot{D}_{QZ} 는 식(2)로부터 배

분된 열병합발전에서의 열생산비, \dot{D}_z 는 시설비 등의 자본비, \dot{Q}_i 는 i 세대에서의 열소요량이다. 위 수식에서 핵심은 \dot{K} 이며, 다양한 방법론이 제시될 수 있다. Table 1에서의 \dot{K} 항은 열병합발전의 특성을 대표하는 값들이다. 즉 세대별 요금체계에서는 냉난방의 특성에 맞는 \dot{K} 값들이 새로이 제시되어야 한다. 선행연구에서 제안한 바와 같이 \dot{K} 를 결정하는 방법론에는 다양하게 있다.

식(19)와 같이 열역학 제 1법칙적인 엔탈피 투입량 $\Delta \dot{H}_i$ 을 \dot{K}_i 에 적용할 수 있다. 이 경우 엔탈피 투입량과 냉난방 열량 \dot{Q}_i 은 서로 같다. 이 방법론은 세대별 열소요량의 증감에 관계없이 모든 세대의 요금단가가 서로 동일하다는 것으로 현재의 지역난방 요금체계이다.

식(20)과 같이 열역학 제 2법칙적인 엑서지 투입량 $\Delta \dot{E}_{x,i}$ 을 \dot{K}_i 에 적용할 수 있다. 엑서지는 열기관의 성능평가에 가장 합리적으로 인정받고 있다. 그러나 인간의 쾌적환경을 엑서지로 평가한다는 것에 다소 불합리성이 존재하고 있다.

식(21)과 같이 질량 투입량 \dot{m}_i 을 \dot{K}_i 에 적용할 수 있다. 그러나 소비자는 냉난방 열량을 소비하는 것이 그 질량을 소비하는 것이 아니라는 것에 불합리성이 존재한다.

식(22)와 같이 실내 열환경에 대한 인체의 불

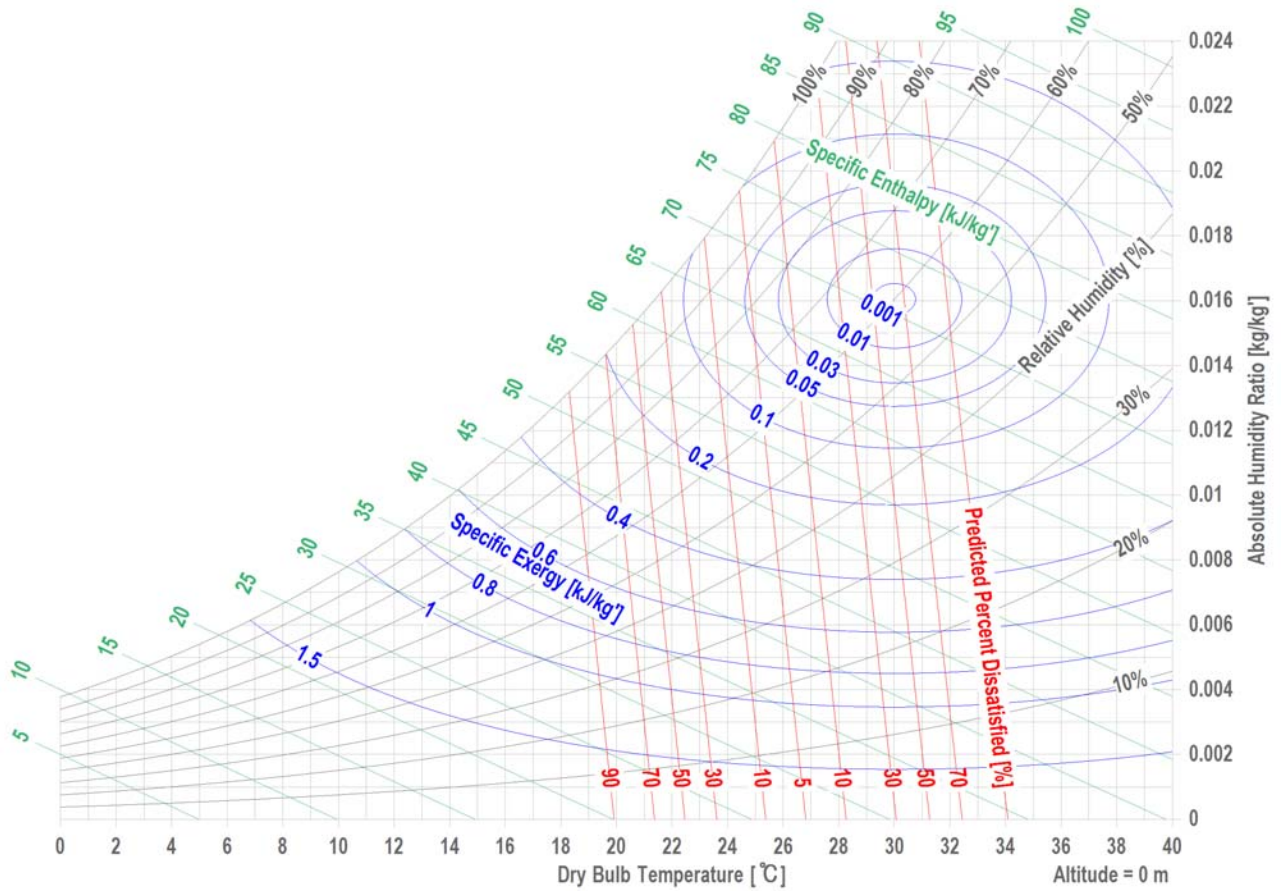


Fig. 5 Psychrometric chart.

쾌감을 수식화한 예상불만족률(PPD)을 기준으로 요금을 차등화 할 수 있다. PPD는 열역학 법칙과 같이 명확한 정답은 아니나 설비공학에서 오랜 기간 동안 검증한 실험 데이터로서 그 신뢰성을 확보하고 있다. 식(22)에서 ξ 는 1 PPD 당 요금 할인율이다. 100명 중 1명이 불쾌감을 표현하면 1 PPD이다. 따라서 1 PPD 당 1%의 요금 할인·할증이 설비 공학적으로 합리적이다. 그러나 유가 급상급과 같이 에너지 절약이 절실히 필요할 경우 ξ 값은 상승될 수 있다. 즉 ξ 값은 에너지 절약의 중요성을 표현한 값이라 할 수 있다.

예상불만족률은 설비 공학 용어로서, 일반인이 이해하기 힘들다. 따라서 일반인이 이해할 수 있는 어떤 지표가 필요하며, 가장 쉽게 식(23)과 같이 실내온도 t 를 적용할 수 있다. 여기서 + 기호는 에너지를 과소비할 경우 그리고 - 기호는 에너지를 절약할 경우이다. ξ 는 1°C 당 요금 할인율이며, 선행연구⁽²¹⁾에서 1 PPD 당 냉방비의 경우 5~10% 정도 그리고 난방비의 경우 2~4%

정도로 책정할 수 있음을 설명한 바 있다.

$$\dot{K}_i = \Delta \dot{H}_i = \dot{Q}_i, \quad \kappa_i = 100\% \quad (19)$$

$$\dot{K}_i = \Delta \dot{E}_{X,i}, \quad \kappa_i = \Delta \dot{E}_{X,i} / \dot{Q}_i \quad (20)$$

$$\dot{K}_i = \dot{m}_i, \quad \kappa_i = \dot{m}_i / \dot{Q}_i \quad (21)$$

$$\kappa_i = 100\% + \xi \cdot (PPD_{avg}^* - PPD_i^*) \quad (22)$$

$$PPD_{avg}^* = \sum (PPD_i^* \cdot \dot{Q}_i) / \sum \dot{Q}_i$$

$$\kappa_i = 100\% \pm \xi \cdot |t_{avg} - t_i| \quad (23)$$

$$t_{avg} = \sum (t_i \cdot \dot{Q}_i) / \sum \dot{Q}_i$$

위 수식들은 Fig. 5의 습공기선도 상으로 이해될 수 있다. 식(19)는 엔탈피의 변화에 따른, 식(20)은 엑서지의 변화에 따른, 식(22)는 예상불만족률의 변화에 따른, 그리고 식(23)은 건구온도의 변화에 따른 값이다.

이와 같이 냉난방비를 각 세대별로 차등화 할 수 있으며, 세대가 에너지를 절약하면 할인을 그리고 에너지를 과소비하면 할증을 통하여 국가적

인 에너지 절감을 수행할 수 있음을 제안한다.

5. 결론

열병합발전에서 생산된 열의 원가는 지역난방 원가와 연결된다. 원가산정 방법론으로부터 그 열원가를 산정할 수 있으며, 어떠한 방법론일지라도 열생산량이 증가할수록 열원가는 상승한다라는 결과를 도출한다. 연간 열 수요량은 실시간 변하므로 그 열원가 또한 실시간 변하게 된다.

열생산량의 증가 요인은 지역난방 세대수의 증가 그리고 각 세대의 난방열량 증가로 구분할 수 있다. 현재의 지역난방비는 세대수 변화에 따른 시간별 차등 요금제를 택하고 있다. 본 연구에서 세대수 뿐만 아니라 각 세대의 열소요량 변화에 따른 차등 요금제를 제안하였다. 엔탈피, 엑서지, 유량, 예상불만족률, 그리고 실내온도를 기준으로 각 세대수의 요금을 차등화 할 수 있다.

본 요금 체계는 자발적인 에너지 절감의 동기를 부여할 수 있을 것으로 판단하며, 냉난방 에너지 절감 대책에 본 제안이 학문적 근거를 제공할 수 있기를 기대한다.

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. Abusoglu, A., and 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. Lozano, M. A., and Valero, A., 1993, Theory of the exergetic cost, Energy, Vol. 18, No. 9, pp. 939-960.
4. 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.
5. Erlach, B., Serra, L., and Valero, A., 1999, Structural theory as standard for thermoeconomics, Energy Convers Manage, Vol. 40, pp. 1627-1649.
6. Frangopoulos, C. A., 1987, Thermoeconomic functional analysis and optimization, Energy, Vol. 12, No. 7, pp. 563-571.
7. Frangopoulos, C. A., 1994, Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem, Energy, Vol. 19, No. 3, pp. 323-42.
8. Frangopoulos, C. A., 1991, Intelligent functional approach: a method for analysis and optimal synthesis-design-operation of complex systems, J Energy Environ Econ, Vol. 1, No. 4, pp. 267-274.
9. Frangopoulos, C. A., 1991, Optimization of synthesis-design-operation of a cogeneration system by the intelligent functional approach, J Energy Environ Econ, Vo. 1, No. 4, pp. 275-287.
10. Tsatsaronis, G., Lin, L., and Pisa, J., 1993, Exergy costing in exergoeconomics, J Energy Resour - ASME, Vol. 115, pp. 9-16.
11. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 1999, On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems, Proc ASME Adv Energy Syst Div, Vol. 39, pp. 421-430.
12. Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., 2001, Comparison between SPECO and functional exergoeconomic approaches, Proceedings of the ASME international mechanical engineering congress and exposition-IMECE-23656, November, pp. 11-16.
13. Cziesla, F., and Tsatsaronis, G., 2002, Iterative exergoeconomic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems, Energy Convers Manage, Vol. 43, pp. 1537-1548.
14. 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.
15. 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.
16. Kwon, Y. H., Kwak, H. Y., and Oh, S. D., 2001, Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems, Exergy, Vol. 1, No. 1, pp. 31-40.
17. Kwak, H. Y., Byun, G. T., Kwon, Y. H., and Yang, H., 2004, Cost structure of CGAM cogeneration system, Int J Energy Res Vol. 28, No. 13, pp. 1145-1158.
18. Spakovsky, M. R., and Evans, R. B., 1993, Engineering functional analysis : Parts I, II, J Energy Resour - ASME, Vol. 115, No. 2, pp. 86-99.
19. 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.
20. Kim, D. J., 2010, A new thermoeconomic methodology for energy systems, Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422.
21. Kim, D. J., 2008, 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.
22. Kim, D. J., 2009, A suggestion of the heating cost allocation methodology, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 68-73.