

국내 열병합발전사업의 기술적 생산효율성 추정 및 사업구조 평가: 16개 집단에너지사업자에 대한 패널 확률프론티어모형(SFA) 분석

임형우* · 김재혁** · 신동현***

요약 : 집단에너지는 에너지전환의 중간단계이자, 분산전원으로서 전력구조에 미치는 영향이 크다. 하지만 최근 일부 집단에너지사업자의 수익성 악화로 인해 집단에너지사업의 문제가 대두되고 있다. 본 연구는 우리나라 집단에너지사업자의 기술적 생산효율성 추정을 통해, 주요 사업자의 기술적 생산효율성을 측정하였으며 이를 바탕으로 사업자의 수익구조 개선방안을 살펴 보았다. 16개 집단에너지사업자의 2016~19년 세부 재무 및 생산 자료를 수집한 후, 패널 확률 프론티어모형을 이용하여 사업자들의 기술적 생산효율성을 추정하였다. 추정 결과, 증기공급병행, 대형 전기중심, 소규모 구역전기, 역송CHP 사업자 순으로 생산효율성이 높음을 확인하였다. 더 나아가 수익성 영향요인에 대해 살펴본 결과, 기술적 생산효율성은 전반적으로 수익성과 양(+)의 영향 관계를 가지나, 소규모 구역전기사업자와 같이 열 생산 비중이 높은 사업자는 수익성이 악화됨을 확인하였다. 이는 현재 열 판매 시장의 구조적 한계로 인한 현상이며, 수익성 개선을 위해서는 열 판매단가에 대한 조정이 필요함을 확인하였다.

주제어 : 열병합발전사업, 기술적 생산효율성, 효율성 분석, 수익성 분석

JEL 분류 : Q40, Q48

접수일(2021년 11월 1일), 수정일(2021년 12월 9일), 게재확정일(2021년 12월 18일)

* 한국환경연구원 부연구위원, 제1저자(e-mail: hwlim@kei.re.kr)

** 연세대학교 경제연구소 전문연구원, 공동저자(e-mail: safin84@gmail.com)

*** 에너지경제연구원 연구위원, 교신저자(e-mail: dhshin@keei.re.kr)

Evaluation of Technical Production Efficiency and Business Structure of Domestic Combined Heat and Power (CHP) Operators: Panel Stochastic Frontier Model Analysis for 16 Collective Energy Operators

Hyungwoo Lim*, Jaehyeok Kim** and Donghyun Shin***

ABSTRACT : Collective energy is an intermediate stage in energy conversion and has a great influence on the power structure as a distributed power source. However, the problem of the collective energy business has recently emerged due to the worsening profitability of some collective energy operators. This study measured the technical efficiency of major operators through the estimation of the production efficiency of Korean collective energy operators, and based on this, we looked at ways to improve the profit structure of operators. After collecting detailed data from 16 collective energy operators between 2016 and 2019, the production efficiency of operators was estimated using the panel stochastic frontier model. As a result of the estimation, combined steam power operators showed the highest production efficiency and reverse CHP operators showed the lowest efficiency. Furthermore, as a result of examining the factors influencing profitability, it was confirmed that production efficiency has a positive effect on overall profitability. However, businesses with a high proportion of heat production, such as small district electricity operators, profitability was lower. This phenomenon is due to the structural limitations of the current heat sales market. Hence, the adjustment of the heat sales unit price is necessary to improve profitability of collective energy operators.

Keywords : Combined heat and power (CHP), Technical production efficiency, Efficiency analysis, Profitability analysis

Received: November 1, 2021. Revised: December 9, 2021. Accepted: December 18, 2021.

* Research Fellow, Korea Environment Institute, First author(e-mail: hwlim@kei.re.kr)

** Researcher, Yonsei University, Coauthor(e-mail: safin84@gmail.com)

*** Research Fellow, Korea Energy Economics Institute, Corresponding author(e-mail: dhshin@keei.re.kr)

I. 서론

1981년 중장기적 에너지 절약 추진 수단으로 지역난방사업이 포함되었고, 1990년대 수도권을 중심으로 아파트에 대한 수요가 급증하면서 열병합발전사업자와 같은 집단에너지 보급이 획기적으로 확대되었다. 2000년대 들어 집단에너지 사업이 민간에 부분적으로 개방되었고, 2010년대 이후에는 에너지전환 및 탄소중립의 국가 목표 달성의 주체로 열병합발전이 주목받으면서 분산형 전원으로의 역할이 높아지고 있다.

열병합발전은 1개소 이상의 집중된 에너지 생산시설에서 생산된 에너지(열 또는 열과 전기)를 주거, 상업지역 또는 산업단지 등에 일괄적으로 공급하는 사업을 의미한다. 일반발전의 경우, 연료 에너지의 약 40%만이 전력으로 생산되기 때문에 절반 이상의 연료 에너지가 손실되는 데 비해, 열병합발전의 경우 총 효율이 75~90%까지 개선되어 상대적으로 에너지의 효율성이 높다. 이렇듯 높은 에너지의 공급효율은 열병합발전사업 도입의 가장 큰 이유 중 하나이다(한국에너지공단, 2003).¹⁾ 또한, 열병합발전사업은 전기 및 열의 수요처 근처에서 에너지를 생산하고, 공급하는 분산전원의 역할을 담당하고 있다. 송배전 거리가 짧아지기 때문에 불필요한 송배전 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전력공급의 안정성을 확보하고 주민 수용성을 제고할 수 있다. 구체적으로 전력산업연구회(2014)와 전기연구원(2015)는 열병합발전 사업으로 송전선로 건설비용의 회피, 송전손실 회피 및 계통 안정성으로 인한 편익을 연간 3,354억 원, 3,666억 원으로 추정하였다. 또한 김효진 외(2015)는 열병합발전 시 소비자의 추가 지불의사액이 41.4원/kWh라는 연구 결과를 제시하고 있다.

열병합발전사업은 외향적 측면에서 지속하여 확대되고 있다. 1995년 24개로 시작하여 2019년 82개로 지난 20여 년간 약 3.5배의 양적 성장을 이루었다. 이 과정에서 열 공급설비는 약 5배, 전기공급설비는 약 3.5배만큼 규모가 커졌다(한국에너지공단, 2020).

하지만 최근 들어, 열병합발전사업의 사업 여건은 <표 1>에서 나타난 것처럼 악화되고 있다. 영업손실과 당기순손실을 보이는 사업자는 2018년 기준 전체 사업자의 절반을 넘고 있다.

1) 1970년대 두 차례의 석유파동으로 유가가 급격히 상승하면서 에너지 이용효율 향상에 따른 에너지 절감 정책 수립 과정에서 집단에너지 사업이 지역난방의 형태로 도입되었다.

〈표 1〉 국내 열병합발전사업의 연도별 영업손실 및 당기순손실 기록 사업체 수 추이

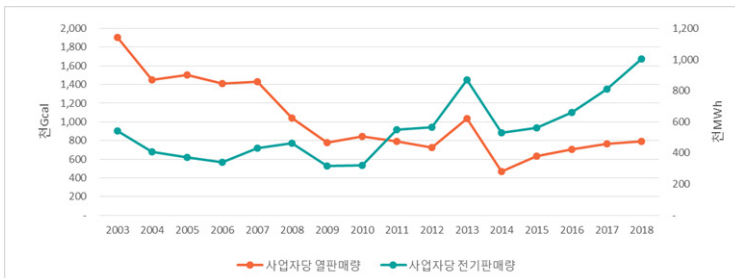
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
영업손실 기업 수	20	20	20	19	17	14	14
당기순손실 기업 수	22	22	26	23	24	24	24
전체 사업체 수	33	33	34	35	37	38	37

주: 2016~2018년까지 부산시청은 자료 미확보로 영업손실 및 당기순손실 기업 수에 미포함 되었으며, 삼성물산의 2018년 자료도 미확보로 인해 포함되지 않음.

자료: 집단에너지협회 제공.

열병합발전사업의 경영 악화 원인 중 하나로 열 요금 제도와 전력시장 지향적 사업구조를 고려할 수 있다. 독점공급 시장에 대한 규제와 지역 간 요금 격차를 최소화하기 위해서 국내 열 요금 제도는 총괄원가 보상을 원칙으로 시장기준요금의 110%를 상한으로 설정하고 있다.²⁾ 이러한 열 요금 제도하에서 사업자별로 수익성 편차가 클 수밖에 없다. 시장기준요금 사업자인 한국지역난방공사는 열병합발전사업자 중 최대 규모의 사업자로 소각열과 같은 외부수열을 이용하여 열 생산원가를 낮출 수 있기 때문에 시장기준요금의 110%를 적용받는 다른 사업자들 대부분은 열 생산에 대한 원가를 회수할 수 없는 상황에 직면하고 있을 것으로 예상된다. 열 생산을 통해서 사업의 경제성을 확보할 수 없다면 열병합 발전기에서 생산하는 전기를 통해 수익을 확보하고자 할 것이다. 실제로 아래 <그림 1>에서 보는 것처럼 2011년부터 집단에너지 사업자의 전기 판매량이 열 판매량을 넘어섰고 지속적으로 그 격차는 커지고 있다.

〈그림 1〉 국내 지역난방 사업의 사업자당 열 판매량과 전기 판매량 추이 비교



자료: 한국에너지공단, 2019 집단에너지사업편람, 2019.

2) 시장기준요금은 한국지역난방공사의 요금이다.

본 연구의 문제의식은 열 요금 체계와 전기시장 지향적 사업구조가 열병합발전사업 도입의 가장 큰 이유인 높은 에너지 공급효율에 부정적 영향을 줄 수 있다는 점에서 출발한다. 현재의 시장 상황과 제도적 여건 속에서 열병합발전 사업자가 전기 생산 위주로 사업을 지속하는 것이 생산효율을 악화하는지 통계적 방법론을 적용하여 확인하고 이를 해결하기 위한 시사점을 논의하고자 한다.

구체적으로 분석자료를 확보할 수 있는 16개 집단에너지사업자의 2016~19년 패널 데이터를 이용하여 확률프론티어모형 방법론을 적용하여 기술적 생산효율성을 추정하였다. 16개 사업자를 전기 생산 중심 사업자와 전기와 열을 병행하여 생산하는 사업자로 구분하여 두 사업자 간 기술적 생산효율성을 비교하였다. 여기서 확률프론티어모형 방법론을 통해 추정된 효율성은 집단에너지사업자가 보유하고 있는 발전기의 기술적 생산효율성과 구분된다. 기술적 효율성이 연료투입량에 대한 산출량의 개념으로 이해할 수 있다면 기술적 생산효율성은 연료투입물만이 아니라 사업자의 자본과 노동의 비용을 포함하면서 전기 또는 열을 생산하는 행태와 관련된 사업자의 의사결정까지 고려한 개념으로 집단에너지사업의 공급 효율성에 처음으로 도입하였다는 측면에서 의의가 있다. 또한 본 연구에서 활용한 자료는 16개 집단에너지 발전사의 세부적인 재무 정보 및 생산/판매 정보 등을 발전사의 협조를 통해 직접 수집한 것으로, 개별 사업자의 세부적인 수익구조 분석이 가능하다는 점에서 데이터 측면의 의의가 크다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 확률프론티어모형을 이용해 기술적 생산효율성을 추정한 선행연구를 검토하고, 본 연구의 차별점을 제시한다. 3장에서는 분석 모형 및 데이터를 설명하며, 4장에서는 주요 분석 결과 및 사업자별 기술적 생산효율성 수준을 제시한다. 5장에서는 열병합발전사업의 수익성 악화 원인을 탐색하고, 마지막 6장에서는 이상의 결과를 종합하여 제도 개선에 대한 시사점을 도출한다.

II. 선행연구

1. 발전소의 에너지 효율성 분석

집단에너지 분야를 법제화하여 에너지 시장과 별도로 구분하는 국가는 우리나라가 유일하며, 이에 따라 집단에너지 분야에 대한 효율성 분석을 수행한 연구는 국내외 전무

하다. 다만, 발전소 단위의 효율성 분석 및 기업 단위의 에너지 효율성 분석 등에 유사한 기법이 사용된 바 있다.

정성문(2011)은 비모수적 방법인 DEA 기법을 활용하여 국내 태양광발전소의 효율성을 평가하였다. 태양광발전소의 경우 명확한 생산함수 구축이 어려우므로, 투입변수로 총사업비, 건설단가, 발전소 면적, 투입 인원, 발전용량, 일조량 등 다양한 투입변수 후보군을 두고 전문가의 샘플링을 통해 주요 투입변수를 선정하였다. 이러한 투입변수를 바탕으로 비모수적 방식인 DEA 기법을 활용하여 기술적 생산효율성을 계산하였다. 또한, 이를 바탕으로 개선 잠재율을 계산하였다.

유상열(2012)은 국내 5개 화력 발전회사의 연료 및 노동 효율성 측정을 위해 SFA 및 DEA 기법을 적용하였다. 2003~10년간에 대한 패널분석을 통해 우리나라 화력발전 부문의 연료 및 노동 효율성이 시간에 따라 개선되었음을 발견하였다.

김예정(2019)은 전기공사업 운영 기업의 효율성 및 생산성 분석을 위해 DEA 모형을 이용하여 분석을 진행하였다. 투입 요소로는 판매비·관리비, 총자본, 총자산, 인건비, 종업원 수 등을 이용하였으며, 이를 바탕으로 전기공사업체의 효율성 및 생산성 변화를 살펴보았다.

정다솜·강상목(2019)은 2단계 확률경계모형을 통해 풍력 부품 제조 기업의 비용효율성을 도출하고 결정요인을 분석하였다. 코스피 및 코스닥 상장 24개 기업을 대상으로 10년의 패널자료를 이용하였으며, 비용효율성의 평균은 0.4 수준으로 나타났다. 시간에 따라 비용효율성이 개선되나, 개선 정도는 크지 않았다. 반면 연도, 설립 연차, 기업규모 등이 비용효율성에 유의적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Boyd and Lee(2019)는 SFA 기법을 적용하여 미국의 제조업 기업 단위의 에너지 효율성 분석을 시행하였다. 강건성 확보를 위해 DEA 기반의 Malmquist index를 이용하여 에너지 효율성을 도출하였다. 효율성은 33%~86% 수준으로 나타났으며, 중간수준의 효율성 수준으로 개선할 경우, 약 21%의 에너지소비량 감축이 가능할 것으로 전망되었다.

2. 선행연구와의 차별점

본 연구는 다음과 같은 부분에서 선행연구와 차별점이 존재하며, 학술적·실무적 의의가 있다. 첫째, 본 연구는 집단에너지사업자의 기술적 생산효율성을 측정하였다는 점에서 의의가 있다. 기존까지는 단순하게 설비가동률만을 이용하여 효율성을 측정하였

으나, 이는 설비만을 중심으로 한 일차원적인 효율성일 뿐, 설비 이외의 투입물(노동, 연료소비량)에 따른 효율성 변화를 충분히 반영하지 못한다. 예를 들어, 설비가동률은 낮더라도 연료소비량 대비 열과 전기의 생산량이 많다면 연료 소비 측면에서 효율적이라고 볼 수 있다. 특히 사업자는 다수의 설비를 보유하고 있기에, 이를 종합적으로 고려해야만 사업자 수익성과의 관계를 분석할 수 있다. 본 연구는 이처럼 생산함수에 기반하여 효율성을 추정했다는 점에서 의의가 있다.

둘째, 본 연구는 집단에너지사업자의 세부적인 재무 정보 및 생산·판매액 정보를 확보하여 분석에 활용하였다. 집단에너지사업자의 경우 사업 초창기부터 지속적인 수익성 악화의 문제를 겪고 있으나, 세부적인 생산 관련 정보는 영업기밀로 처리되어 데이터를 이용한 분석 및 검토가 어려웠다. 본 연구에서는 집단에너지사업자의 협조를 통해 2016년부터 2019년까지의 세부적인 운영현황 및 재무 정보를 확보하였고, 이를 바탕으로 분석을 수행하였다. 이러한 데이터는 향후 집단에너지사업의 지속가능성 개선을 위한 정책개발 등에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

III. 분석 모형 및 데이터

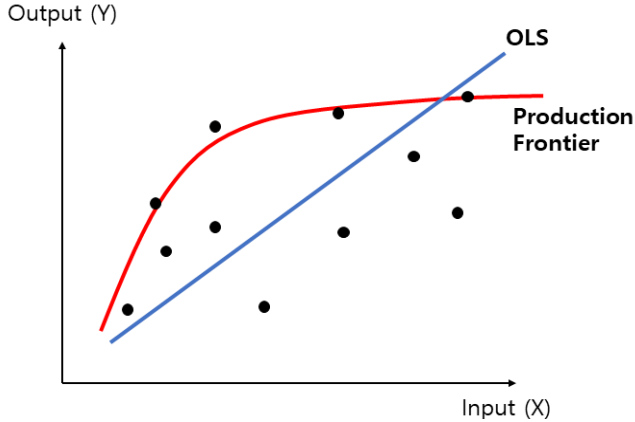
1. 분석 모형

기업의 기술적 생산효율성은 다양한 방식으로 측정할 수 있다. 이 중 가장 널리 이용되는 방식은 확률프론티어모형(Stochastic Frontier Analysis)을 이용하는 방식이다. 이는 생산함수 혹은 비용함수에서 발생하는 비효율성을 측정하기 위한 방법론으로 Aigner et al.(1977) 및 Meeusen and van den Broeck(1977)에 의해 최초로 고안되었으며, 현재까지 효율성 측정에 많이 이용되고 있다. 확률프론티어모형은 주어진 투입물을 활용하여 최대 생산량의 프론티어(frontier)를 설정하고, 이에 미치지 못하는 부분 중 일부를 기술적 비효율성으로 판단하는 과정을 통해 해당 기업의 전반적인 효율성 정도를 측정한다.

다음 <그림 2>은 일반적인 OLS (Ordinary Least Squares)와 SFA 추정 방식을 비교한 것이다. OLS는 실제 관측치와 적합치의 잔차를 최소화하는 방식으로 계수를 추정하기 때문에, 투입물과 산출물의 중앙을 관통한다. 반면, SFA 분석은 최적 프론티어를 추정하기 때문에 주어진 투입물에서 가장 많은 산출물을 프론티어로 설정하고, 프론티어와

실제 관측치의 격차를 비효율성으로 간주한다.

〈그림 2〉 OLS와 확률프론티어모형의 비교



Battese and Coelli(1995)는 패널데이터에 적용 가능한 SFA 방법론을 제안하였다. Battese and Coelli(1995)는 기존 연구와 동일하게 비효율성의 분포가 독립적이라고 가정하고, 분산 역시 상수(constant)로 고정된다고 가정한다. 특징적으로 비효율성의 평균은 관찰 가능한 여러 요인의 선형함수 형태로 구성된다고 가정한다.

이를 수식으로 나타내면 다음 식 (1)~(3)과 같다. 종속변수인 $y_{i,t}$ 는 i 기업의 t 시점 산출량을 의미하며, 이는 여러 투입물($x_{i,t}$)에 따라 결정된다. 다만, 생산과정에서 기술적 비효율성($u_{i,t}$)이 존재할 수 있으며, 본 모형에서는 이러한 비효율성의 평균이 식 (2)와 같이 설명변수($z_{i,t}$)의 함수라고 가정한다.

$$y_{i,t} = x_{i,t}'\beta - u_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T) \quad (1)$$

$$u_{i,t} \sim N^+(\mu_{i,t}, \sigma_u^2), \quad \mu_{i,t} = z_{i,t}'\delta \quad (2)$$

$$\epsilon_{i,t} \sim N(0, \sigma_\epsilon^2) \quad (3)$$

이때의 기술적 생산효율성은 다음 식(4)와 같이 계산할 수 있다. 식(3)과 같이 생산 비효율성의 오차항은 양의 절반 정규분포(half-normal distribution)를 따른다고 가정함으로써 기술적 생산효율성이 0과 1 사이의 양수 값으로 도출되도록 가정하였다.

$$TE_{i,t} = \exp(-u_{i,t}) \quad (4)$$

집단에너지사업자의 경우 열과 전력을 동시에 생산하기 때문에, 산출물이 두 개 이상인 다중산출모형(multiple output model)을 구축해야 한다. 다중산출모형은 다음의 과정을 통해 확률프론티어모형 형태로 재편할 수 있다.

표현을 간단하게 하도록 다음 식(5)와 같이 가정하여 수식을 도출하면,

$$\text{산출물: } y = (E, H) \quad (5)$$

$$\text{투입물: } x = (K^E, K^H, L, F)$$

여기서, E : 전력 생산량, $\exp(-\hat{u}_{i,t})$: 열 생산량, K^E : 전기생산용량, K^H : 열 생산용량, L : 직원 수, F : 연료 사용량

설비의 효율은 산출물거리함수(output distance function)를 이용하여 다음 θ 로 표현 가능하다. 이때 D_0 는 주어진 기술집합에서의 최대 효율성을 의미한다.

$$D_0(y, x) = \min_{\theta} \left\{ \theta \mid \left(x, \left(\frac{E}{\theta}, \frac{H}{\theta} \right) \right) \in f(x, y) \right\} \quad (6)$$

여기서, θ 는 효율성 수준을 의미³⁾하며, $f(x, y)$ 는 주어진 투입물(x) 하에서 생산 가능한 산출물(y)의 기술집합(technology set)을 의미한다.

위 산출물거리함수가 y 에 대해 1차 동차함수(homogenous of degree one in y)라고 가정하면 다음 식(7)과 같이 수정할 수 있다.

3) θ 가 작을수록 경계(frontier)와 멀어지며 비효율성이 증가한다. 반면, θ 가 1이면 경계와 접하여 효율성이 극대화된다.

$$D_0 = f\left(x, \left(\frac{E}{E}, \frac{H}{E}\right)\right) \cdot E \quad (7)$$

식 (7)에 E 를 양변으로 나누어 다시 쓰면,

$$\frac{D_0}{E} = f\left(x, \left(1, \frac{H}{E}\right)\right) = f\left(x, \frac{H}{E}\right) \quad (8)$$

양변에 로그를 취하면,

$$\ln D_0 - \ln E = \ln\left(f\left(x, \frac{H}{E}\right)\right) \quad (9)$$

생산함수가 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 형태라고 가정한다면, 로그 생산함수는 다음과 같다.

$$\ln f(x, y) = \beta_0 + \sum_k \beta_k \ln x_k + \beta_y \ln y \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln D_0 - \ln E = \beta_0 + \sum_k \beta_k \ln x + \beta_y (\ln H - \ln E) \quad (11)$$

기술적 생산효율성을 의미하는 $\ln D_0$ 를 좌변으로 넘겨 정리하면 다음 식 (12)와 같다.

$$-\ln E = \beta_0 + \sum_k \beta_k \ln x + \beta_y (\ln H - \ln E) - \ln D_0 \quad (12)$$

이때, D_0 는 항상 1보다 작으므로, $\ln D_0 \leq 0$ 가 성립

기술적 생산효율성인 $\ln D_0 \equiv -u$ 라고 정의하고, 확률적(stochastic) 모형을 위해 오차항($\epsilon_{i,t}$)을 추가하여 패널데이터 형태로 나타내면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$-\ln E_{i,t} = \beta_0 + \sum_k \beta_k \ln x_{i,t} + \beta_y (\ln H_{i,t} - \ln E_{i,t}) + u_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (13)$$

Battese and Coelli(1995)에서는 비효율성 수준에 영향을 미치는 요인($z_{i,t}$)을 추가하여 모형을 확장하였다.

$$-\ln E_{i,t} = \beta_0 + \sum_k \beta_k \ln x_{i,t} + \beta_y (\ln H_{i,t} - \ln E_{i,t}) + u_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (14)$$

여기서, $u_{i,t} = z_{i,t}'\delta + v_{i,t}$

본 연구에서는 비효율성 수준에 영향을 미치는 요인(z 변수)으로 매출액, 설비가동률, 공급 가구 수 등의 변수를 고려하였다. 실제 투입물 및 산출물 등의 변수를 활용하여 수식을 정리하면 다음과 같다.

$$-\ln E_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln K_{i,t}^E + \beta_2 \ln K_{i,t}^H + \beta_3 \ln L_{i,t} + \beta_4 \ln F_{i,t} + \beta_5 (\ln H_{i,t} - \ln E_{i,t}) + u_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (15)$$

$$u_{i,t} = \delta_0 + \delta_1 SL_{i,t} + \delta_2 OR_{i,t}^E + \delta_3 OR_{i,t}^H + \delta_4 NH_{i,t} + \delta_5 SA_{i,t} + \delta_6 ST_{i,t} + \delta_7 RE_{i,t} + \sum_{j=1}^3 \kappa_j D_{i,t}^j + \tau_{i,t} + v_{i,t}$$

여기서, SL : 매출액, OR^E : 전기 가동률, OR^H : 열 가동률, NH : 열 공급 가구 수, SA : 가구당 평균 공급면적, ST : 증기 판매 가변수, RE : 신재생 전력 판매 가변수, D : 기업그룹 가변수를 나타낸다.

위 식에서 전기 및 열 생산의 효율성을 의미하는 θ 는 $\exp(-\widehat{u}_{i,t})$ 로 계산이 가능하며, 0에서 1 사이의 값을 가진다. 즉, 값이 1에 가까워질수록 기술적 생산효율성이 더 높음을 의미한다.⁴⁾

4) 다만, 이러한 방식은 복합 효율성만을 제공할 뿐, 열 및 전력 각각에 대한 효율성지수는 측정할 수 없다는 한계가 존재한다.

2. 자료 소개

본 연구에서는 총 32개의 집단에너지사업자의 2016~2019년의 연간 경영지표를 수집하여 세부적인 기초통계분석을 수행하였다. 다만, 2016~19년 패널분석을 위해 각 사업자의 투입물 및 산출물 정보를 모두 갖추고 있는 16개 기업을 대상으로 효율성 추정을 수행하였다.⁵⁾ 전체 32개 기업 중 14개 기업은 경영현황 자료는 제공하였으나, 운영실적 및 수익성 관련 정보를 제공하지 않았기에 분석에서 배제하였으며, 1개 기업은 비상장기업으로 근로자 관련 데이터 확보가 어려워 분석에서 제외했다. 또한 나머지 1개 기업은 데이터 결측치가 지나치게 많아 분석대상에서 제외하였다.

본 분석에 활용된 데이터는 다음 <표 2>와 같다. 확률프론티어모형 분석 시 생산함수에 활용되는 투입물로는 자본에 해당하는 설비용량(전기, 열 설비용량), 근로자 수, 연료 사용량 등을 고려하였다. 이를 바탕으로 한 산출물로는 전기 생산량과 열 생산량이 있다. 이외에도 효율성 수준에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 해당 기업의 매출액과 전기·열 가동률, 공급 가구 수 및 기타 운영 관련 특징들(증기 판매 여부, 신재생설비 이용 여부 등)을 이용하였다.

집단에너지사업자의 경우 그 특성에 따라 총 4개 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 번째 그룹은 ‘대형전기중심사업자’로, 전기의 매출액 규모가 크며 매출액 중 전기의 비중이 높은 사업자를 의미한다. 본 연구에서 확보한 32개 기업 중 5개 기업에 해당하며, 본 데이터셋에서는 이 중 4개 기업을 포함하였다. ‘소규모 구역전기사업자’는 전력 생산량이 적고, 실제 지역에 열을 공급하는 사업자로 총 7개 업체 중 4개 기업의 자료를 확보하여 분석에 활용하였다. ‘역송CHP 운영사업자’는 CHP (Combined Heat and Power Generation) 전기판매량 중 GSCON (Generator-Self CONstraint) 정산량의 비중이 높은 10개 사업자를 의미하며,⁶⁾ 이 중 6개 사업자를 데이터셋에 반영하였다. 마지막으로 ‘증기공급병행 사업자’는 열 판매 이외에 증기 판매를 통해 상당한 수익을 얻고 있는 사업자를 의미하며 총 2개 사업자를 반영하였다. 각 변수에 대한 기초통계량은 <부록 표 1>에 기재하였다.

5) 생산함수를 바탕으로 효율성을 도출하기 때문에, 생산함수의 주 투입물인 자본, 노동 데이터를 확보할 수 있는 기업을 대상으로 분석을 진행했다. 특히 노동 관련 자료의 경우 내부 데이터셋에서 확보할 수 없어 KIS-VALUE에서 각 기업의 직원 수 데이터를 이용하였다.

6) GSCON은 계획발전량과 비교해 발전소가 초과 생산했을 때, 발전소가 받는 정산금으로 시장가격과 변동비 중 낮은 가격을 채택하여 전력을 정산한다.

국내 열병합발전사업의 기술적 생산효율성 추정 및 사업구조 평가: 16개 집단에너지사업자에 대한
패널 확률프론티어모형(SFA) 분석

〈표 2〉 분석에 활용한 데이터

구분	변수	변수명	출처	비고
투입물	K ^E	전기생산용량(MW)	수집	
	K ^H	열 생산용량(Gcal/h)	수집	
	L	근로자 수(명)	KIS-VALUE	
	F	연료 사용량(천 Nm ³)	수집	CHP, PLB 기타 연료 사용량 합계 (총열량 기준으로 천연가스 환산)
산출물	E	전기생산량(MWh)	수집	
	H	열 생산량(Gcal)	수집	
효율성 관련 영향요인	SL	매출액(백만 원)	수집	열, 전기, 기타 영업수익 매출액 합산
	OR ^E	전기 가동률(%)	수집	
	OR ^H	열 가동률(%)	수집	
	NH	열 공급 가구 수(세대)	수집	
	SA	가구당 평균 공급면적 (m ² /세대)	수집	
	ST	증기 판매 가변수	수집	증기를 판매하는 경우 1
	RE	신재생 전력 판매 가변수	수집	태양광, 연료전지 등 이용하였으면 1
	D	집단에너지사업자 특성 가변수	수집	대형전기중심 : 4개 소규모구역전기: 4개 역송CHP: 6개 증기공급병행: 2개

주: 근로자 수 이외의 자료는 컨설팅업체를 통해 열병합발전사업자의 내부자료를 수집하여
분석에 활용.

IV. 모형 추정 결과 및 효율성 수준 도출

2016~19년 16개 집단에너지 사업자의 균형패널데이터를 바탕으로 확률경계모형을
추정한 결과는 다음과 같다. 본 연구에서는 기본적으로 Cobb-Douglas 함수를 기반으로
모형을 구축하였으며, 모형의 강건성 확보를 위해 비효율성의 영향요인을 변경해가며
다음 <표 3>과 같이 총 4가지 모형을 추정하였다.⁷⁾

7) 생산함수를 Cobb-Douglas 대신 Translog 생산함수를 이용하여 분석하였으나, 결과는 유사했다. 본 연구의 표

〈표 3〉 확률프론티어모형 추정 결과

		모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)
log(K ^H)		-1.675***	-1.569***	-1.636***	-1.830***
log(K ^E)		1.045***	0.812***	0.856***	1.159***
log(L)		-0.021	-0.025	-0.020	-0.010
log(F)		-0.210***	-0.156***	-0.143***	-0.186**
추세항		-0.214***	-0.231***	-0.218***	-0.206***
log(H)-log(E)		0.930***	0.910***	0.918***	0.944***
상수항		-7.386***	-7.344***	-7.421***	-7.520***
비효율성 영향요인	log(SL)	-0.689**	-0.454**	-0.393*	-0.798**
	OR ^E		-0.597*	-1.289**	0.310
	OR ^H		-0.597	-0.320	-1.428
	log(NH)	-0.426***	-0.422***	-0.569***	-0.443***
	log(SA)				0.647
	ST			0.467	0.252
	RE				0.477***
	대형전기중심사업자	0.224	0.316	0.800*	0.032
	소규모 구역전기사업자	-3.730***	-3.270***	-3.385***	-4.257***
	역송CHP 사업자	-2.262***	-1.680***	-1.292***	-1.863***
	추세항	0.091*	0.090*	0.102**	0.095**
상수항	13.475***	10.879***	11.324	11.918***	
Log-likelihood		18.17	20.26	21.92	32.95
Obs		64	64	64	64
Groups		16	16	16	16

모형 추정 결과, 모형(1)~(4) 모두에서 공통으로 직원 수를 제외한 나머지 투입물은 모두 통계적 유의성을 보였다. 비효율성의 영향요인 역시 변수 대부분이 통계적 유의성을 보이는 것으로 나타났다. 생산 측면의 비효율성을 줄이는 요인으로는 판매액의 증가, 전기 가동률의 증가 및 공급 가구 수의 증가 등이 존재한다. 다만 열 가동률의 경우 음의 부호로 추정되었으나, 통계적으로 유의하지 않았다. 반면, 신재생 전력 판매와 같은 변수는 비효율성을 높이는 요인으로 추정되었다. 이는 신재생 설비 등을 운영함에 따라 추가적인 비용 등이 발생한 영향으로 판단된다.

본 수가 적기 때문에 추정하는 모수가 비교적 적은 Cobb-Douglas 함수 형태를 적용하였다.

국내 열병합발전사업의 기술적 생산효율성 추정 및 사업구조 평가: 16개 집단에너지사업자에 대한
패널 확률프론티어모형(SFA) 분석

이상의 추정 결과를 바탕으로 기업들의 기술적 생산효율성 수준을 도출한 결과, 평균적으로 0.65 수준으로 나타났으며, 중윗값은 0.82 수준으로 음의 왜도를 보이는 것으로 나타났다. 또한 효율성 값들 사이의 상관계수가 매우 높게 나타나 값이 유사함을 확인할 수 있었다.⁸⁾ 위 4개 모형의 효율성 수준이 유사하게 나타났으므로, 이후에 분석에서는 유의성이 없는 설명변수를 가능한 배제하고, 효과가 존재하는 설명변수를 중심으로 비효율성의 영향요인을 분석한 모형(2) 효율성을 기준으로 분석을 진행하도록 한다.

다음 <표 4>는 16개 기업의 연도별 기술적 생산효율성 및 2016~19년의 평균값을 보여주고 있다. 기술적 생산효율성 수준은 연도에 따라 크게 변하지 않는 모습이 발견된다. 2018년의 평균은 0.66으로 소폭 개선되었으나, 이후 다시 0.64 수준으로 하락하는 등 연도에 따라 크게 변화하지 않았다.

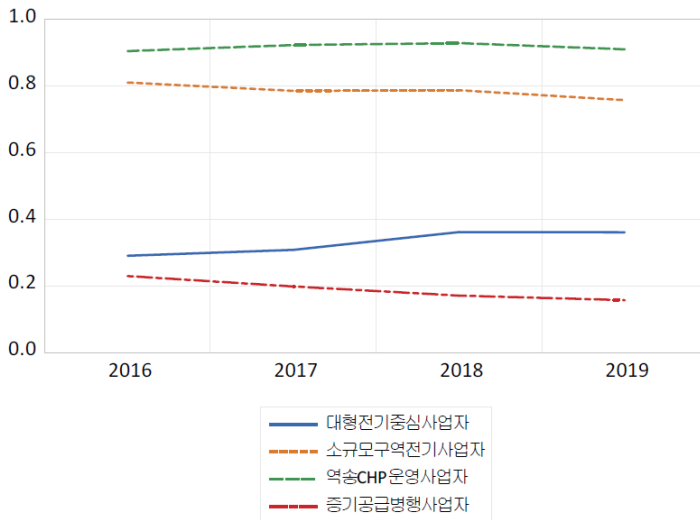
<표 4> 기업별 기술적 생산효율성 수준 비교

사업자 구분	기업	2016	2017	2018	2019	평균
대형 전기중심사업자	A	0.50	0.47	0.49	0.47	0.48
	B	0.17	0.21	0.28	0.25	0.23
	C	0.19	0.28	0.41	0.47	0.34
	D	0.29	0.27	0.26	0.26	0.27
소규모 구역전기사업자	E	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
	F	0.91	0.89	0.86	0.81	0.86
	G	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95
	H	0.41	0.33	0.36	0.30	0.35
역송CHP 운영 사업자	I	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97
	J	0.97	0.96	0.96	0.94	0.96
	K	0.83	0.91	0.96	0.97	0.92
	L	0.83	0.77	0.78	0.71	0.77
	M	0.95	0.96	0.96	0.93	0.95
증기공급병행 사업자	N	0.88	0.97	0.96	0.93	0.94
	O	0.33	0.28	0.22	0.19	0.25
	P	0.13	0.12	0.12	0.13	0.12
	평균	0.64	0.64	0.66	0.64	

8) 기술적 생산효율성 수준에 대한 기초통계량 및 상관관계는 <부록 표 2>를 참고하십시오

다만 사업자 특징에 따라 기술적 생산효율성 수준의 차이가 발견되었다. 사업자를 특성을 4가지로 구분하여 특성별 평균적인 효율성 수준을 살펴보면 다음 <그림 3>과 같다. 4가지 사업자 구분 중 평균적으로 가장 효율성이 높았던 사업자는 역송CHP 운영사업자들이다. 이들은 전기발전 중심 사업자들이며 CHP 전기판매량 중 GSCON 정산량 비중이 높은 사업자를 의미한다. 이들의 경우, 열 생산 비율이 전체 생산량의 60% 수준으로 비교적 높으며, 이로 인해 전반적인 효율성이 높은 것으로 보인다. 다음으로 효율성이 높은 사업자는 소규모 구역전기사업자들로, 소비자에게 전력 및 열에너지를 직접 판매하는 사업자들이다. 이들의 경우 역송CHP사업자에 비해 낮지만 타 사업자들 대비 상대적으로 높은 수준의 효율성을 보이고 있다.

<그림 3> 사업자 특성별 기술적 생산효율성 수준 비교



반면 대형전기중심사업자와 증기공급병행사업자의 경우 기술적 생산효율성이 낮게 나타났다. 이들의 경우, 열과 전기 두 가지를 모두 생산하는 것이 아닌 한 가지 산출물에 집중하고 있기에 기술적 생산효율성이 낮게 나타나는 것으로 보인다. 대형전기중심사업자의 전력 부문 매출액은 열 부문 매출액의 2,400% 수준으로, 매출 대부분을 전력 판매로 달성하고 있으며, 열 생산 및 판매량이 타 사업자에 비해 현저히 적다. 즉, 이들은 열 생산 및

판매에 소극적인 모습을 보이기 때문에 발전설비를 충분히 활용하지 못하고 있으며, 이로 인해 기술적 생산효율성이 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 증기공급병행 사업자의 경우에도 유사하다. 증기공급병행 사업자의 전력 부문 매출액은 열 부문 매출액의 57% 수준에 불과하는 등 오히려 열 생산 및 증기 생산에 초점을 두고 설비를 운영하고 있다.

이상의 결과를 통해 볼 때, 집단에너지사업자의 경우 두 산출물(전기와 열)을 적절하게 함께 생산할 때 기술적 생산효율성이 높아짐을 확인할 수 있었다. 다만, 이러한 높은 기술적 생산효율성은 이후 5장에서 자세히 다룰 수익성 측면과 차이가 존재하는 것으로 나타난다.

V. 기술적 생산효율성과 수익성의 관계

이상의 기술적 생산효율성 추정 결과를 바탕으로, 본 장에서는 기술적 생산효율성과 수익성의 관계에 대해 살펴본다. 이를 통해 기업의 기술적 생산효율성이 수익성 개선에 도움이 되는지, 수익성에 영향을 미치는 주요한 요인이 무엇인지에 대해 분석하였다. 다음 <표 5>는 사업자 구분에 따른 평균적인 기술적 생산효율성과 가동률, 수익성 수준을 정리한 것이다. 기술적 생산효율성과 영업이익률의 관계를 살펴볼 때, 전반적으로 기술적 생산효율성이 높아질수록 영업이익률 역시 개선됨을 확인할 수 있다.

다만 소규모 구역전기사업자의 경우에는 높은 기술적 생산효율성에도 불구하고 2016~19년 평균 음(-)의 영업이익률을 보이고 있다. 기업 G를 제외하면 원가 대비 매출액 비중이 100% 이하로, 손실을 보고 있는 것으로 나타난다.

소규모 구역전기사업자들이 기술적 효율성이 높음에도 불구하고, 영업이익률이 타 사업자에 비해 유독 낮게 나타나는 이유는 앞의 서론에서 언급한 것처럼 상한제를 두고 있는 국내 열요금 제도 때문이다. 시장기준요금을 가장 낮은 열 생산원가를 확보할 수 있는 한국지역난방공사의 열요금으로 하고 있어 대부분의 사업자들이 열 생산 비용을 회수하고 있지 못하고 있음을 알 수 있다. <표 6>은 사업자 특성별로 열과 전기의 판매단가이며, 전기와 열의 단위가 상이하므로 판매량을 모두 kcal 단위로 환산하여 비교하였다. 두 요금 모두 총괄원가보상을 원칙으로 할 수 있게 사업자들이 열과 전기를 한 단위 생산하면 회수할 수 있는 수입으로 해석할 수 있다.

〈표 5〉 기술적 생산효율성과 수익성(2016~19년 평균)

기업	기술적 생산 효율성	가동률		수익성			
		전기	열	매출액 (백만 원)	원가 대비 매출액 비중	영업 이익률	
대형 전기중심사업자	A	0.48	86%	6%	337,619	105%	4%
	B	0.23	34%	6%	192,487	109%	7%
	C	0.34	42%	5%	378,030	109%	7%
	D	0.27	74%	5%	279,400	107%	5%
	평균	0.33	59%	5%	296,884	107%	6%
소규모 구역전기사업자	E	0.98	15%	15%	29,912	95%	-10%
	F	0.86	22%	19%	6,544	98%	-3%
	G	0.95	2%	2%	27,264	114%	4%
	H	0.35	4%	4%	8,316	98%	-5%
	평균	0.79	11%	10%	18,009	101%	-3%
역송CHP 운영 사업자	I	0.97	43%	34%	141,141	123%	15%
	J	0.96	34%	36%	64,004	122%	13%
	K	0.92	25%	26%	56,343	111%	8%
	L	0.77	11%	22%	37,077	105%	1%
	M	0.95	37%	35%	82,335	112%	8%
	N	0.94	5%	6%	39,318	113%	4%
	평균	0.92	26%	26%	70,036	114%	8%
증기공급 병행 사업자	O	0.25	12%	19%	67,034	103%	-1%
	P	0.12	38%	30%	53,591	108%	4%
	평균	0.19	25%	24%	60,312	106%	1%

〈표 6〉에 따르면 사업자 특성과 무관하게 전기의 판매단가는 열에 비해 더 높으며, 평균적으로 약 2배가량 전기의 판매단가가 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 사업자는 전기와 열을 동시에 생산하기보다 전기 위주로 생산하는 것이 수익 측면에서 유리하다.

〈표 6〉 평균 판매단가(2016~19년 평균값) (단위: 원/kcal)

	전기	열
대형 전기중심사업자	0.14	0.08
소규모 구역전기사업자	0.14	0.08
역송CHP 운영사업자	0.18	0.08
증기공급병행사업자	0.17	0.08
평균	0.16	0.08

<표 7>은 16개 기업의 전기, 열의 생산 비율과 매출 비율을 비교한 표로, 집단에너지 사업자의 전기시장 지향적 사업 형태를 보여준다. 모든 기업에서 전기의 생산 비율에 비해 전기를 통한 판매 비율 및 매출 비율이 더 높게 나타나며, 특히 소규모 구역전기사업자의 경우에는 전체 생산량 중 열이 82%를 차지하나, 판매 비율은 46%, 실제 매출에서 열의 비중은 34%에 불과했다. 즉, 열 생산을 중심으로 설비를 운영하나, 실제 판매 및 매출은 열이 아닌 전기에서 발생하는 모습이 발견되었다.

<표 7> 생산, 판매 및 매출비율(2016~19년 평균)

기업	생산 비율		판매 비율		매출 비율		
	전기	열	전기	열	전기	열	
대형 전기중심사업자	A	90%	10%	91%	9%	94%	6%
	B	85%	15%	87%	13%	94%	6%
	C	94%	6%	95%	5%	97%	3%
	D	97%	3%	97%	3%	98%	2%
	평균	92%	8%	93%	7%	96%	4%
소규모 구역전기사업자	E	28%	72%	46%	54%	59%	41%
	F	26%	74%	45%	55%	60%	40%
	G	6%	94%	51%	49%	65%	35%
	H	13%	87%	72%	28%	79%	21%
	평균	18%	82%	54%	46%	66%	34%
역송CHP 운영 사업자	I	45%	55%	46%	54%	60%	40%
	J	52%	48%	52%	48%	66%	34%
	K	51%	49%	52%	48%	68%	32%
	L	37%	63%	57%	43%	69%	31%
	M	49%	51%	49%	51%	58%	42%
	N	2%	98%	2%	98%	7%	93%
	평균	39%	61%	43%	57%	55%	45%
증기공급 병행 사업자	O	7%	93%	7%	93%	17%	83%
	P	9%	91%	9%	91%	13%	87%
	평균	8%	92%	8%	92%	15%	85%

집단에너지사업자들의 수익구조를 살펴보면 전기 판매에 대한 의존도가 높고, 전기를 중심으로 매출이 발생하고 있다.⁹⁾ 열 요금 규제와 전기시장 지향적 사업구조는 열과

전기를 동시에 생산하고 에너지 효율 개선을 달성하고 분산형 전원으로 역할을 기대했던 본래의 사업 도입 취지를 무색하게 만들고 있다. 따라서 집단에너지 사업자가 열과 전기를 동시에 생산하여 기술적 생산효율을 높이기 위해서는 사업자가 열을 생산하고 판매하여 얻을 수 있는 수익이 확보되어야 한다. 열 판매로부터 수익을 확보하기 위해서는 사업자가 열생산 원가를 회수할 수 있도록 열요금 제도를 개선할 필요가 있다. 장기적 측면에서 추가적인 열수요 확보를 통해서 열판매량을 늘려 규모의 경제를 확보할 수도 있지만 더욱 시급한 것은 현재의 기준요금 상한제에 대한 개선이 필요하다.

VI. 결론 및 시사점

본 연구에서는 2016~19년도의 16개 집단에너지사업자 데이터를 수집하여 기술적 생산효율성 추정 및 수익구조 현황을 살펴보았다. 패널확률프론티어모형을 기반으로 각 사업자의 기술적 생산효율성을 추정한 결과, 역송CHP 사업자 및 소규모 구역전기사업자의 기술적 생산효율성이 높게 추정되었다.

기술적 생산효율성이 높으면 수익성이 높을 것으로 예상할 수 있으나 소규모 구역전기사업자와 같이 기술적 생산효율성은 높으나 손실을 보는 사업자가 존재하였다. 더욱이, 현재의 집단에너지사업자 구조는 생산효율성에 따라 수익성이 바뀐다기보다, 전기와 열 중에서 어떤 에너지에 집중하여 생산하는지에 따라 수익성에 직접적인 영향을 받는 구조이다. 구체적으로 집단에너지사업자는 열과 전기를 동시에 생산하여 기술적 생산효율성을 확보하는 것보다 전기만을 생산하여 기술적 생산효율성이 낮더라도 수익성을 확보하고자 하는 경향을 보였다. 이는 현재 집단에너지의 열 요금 체계에서 열의 생산과 판매를 통한 원활한 보상이 이루어지지 않고 있는 시장 구조적 문제 때문이다.

이상의 내용에서 살펴볼 수 있듯이, 집단에너지의 기술적 생산효율성을 개선하기 위해서는 사업자의 열 생산을 높일 수 있는 유인이 필요하다. 구체적으로 국내 열 요금은 한국지역난방공사의 요금을 기준으로 한 110% 상한제로 규제하고 있는데 가장 낮은 생

9) 특히 동일한 전기 판매라도 어떤 방식으로 정산받는지에 따라 수익성 차이가 존재할 수 있다. 역송CHP 운영사업자와 소규모 구역전기사업자 모두 열 생산 비율이 높으나, 역송CHP 사업자의 수익성이 높다. 이는 역송CHP 사업자의 전기판매량 중 8~90%를 CON (Constrained-On energy payment) 형태로 정산받기 때문에 최소 변동비 이상을 보상받아 수익성 측면에서 유리하기 때문으로 판단된다.

산원가를 확보할 수 있는 한국지역난방공사의 요금을 일괄적으로 다른 사업자의 기준
요금으로 설정하는 것에 대한 전반적인 검토가 필요할 것으로 보인다. 더욱이, 열과 전
기를 동시에 생산하여 에너지 공급효율을 확보하는 것과 정반대로 집단에너지 사업이
전기 생산 위주로 이루어진다는 점에서 열 요금 제도 개선이 시급하다고 판단된다.

유럽의 주요 국가의 경우 집단에너지 사업의 목적을 달성하기 위해 여러 지원정책을
펼치고 있다. 특히, 덴마크, 스웨덴과 같은 국가들은 지역난방의 보급률이 50%를 넘어
서며, 열 판매 시 가격 규제 등을 철폐하여 집단에너지사업자의 자립성을 높이고, 분산
전원으로서의 충분한 역할을 담당할 수 있도록 지원하고 있다(마용선·권재현, 2015). 오
세신(2017)은 열 요금을 시장기준 사업자가 아니라 대체 난방인 도시가스 가격에 연계
하는 방안을 도입하여 집단에너지사업에서 열 생산과 판매 부문 측면의 구조적 문제 해
결을 제안하고 있다. 그럼에도 불구하고 기준요금 상한제의 열 요금 제도는 현재까지 유
지 중이며 집단에너지 사업자의 전력 지향적 사업 형태가 더 심화되고 있다. 에너지효율
개선이라는 집단에너지의 도입 취지에 부합하면서 기술적 공급효율을 개선하여 얻을
수 있는 환경문제 해결, 주민 수용성 제고, 분산형 전원 역할 확대 등과 같은 추가적인 사
회적 편익을 고려한다면 집단에너지 사업의 전기와 열의 균형적인 생산과 판매를 위한
제도적 개선이 신속하게 이루어져야 할 것이다.

[References]

- 김예정, “전기공사업 효율성 및 생산성 변화 분석: DEA 및 Malmquist 생산성지수 모델을 중심
으로”, 「대한경영학회지」, 제32권 제5호, 2019, pp. 825~843.
- 김효진·최효연·유승훈, “분산형 전원으로서의 집단에너지사업 열병합발전의 송전망 피해
회피편익 추정”, 「에너지공학」, 제24권 제3호, 2015, pp. 67~73.
- 마용선·권재현, “유럽의 지역난방 현황 및 정책”, 세계 에너지시장 인사이트 Weekly 15-40, 에
너지경제연구원, 2015.11.
- 오세신, “국내 집단에너지 공급의 문제점과 개선방향”, 에너지경제연구원 수시연구보고서
17-02, 2017.

- 유상열, “확률적 생산프런티어를 이용한 국내 화력발전부문의 효율성 평가”, 『Journal of The Korean Data Analysis Society』, 제14권 제1호, 2012, pp. 405~418.
- 전력산업연구회, 「분산형 집단에너지 전원 활성화를 위한 정책연구」, 2014.
- 정성문, “DEA 모형을 활용한 국내 태양광발전소의 효율성 평가에 관한 연구”, 『에너지기후변화학회지』, 제6권 제2호, 2011, pp.40~62.
- 한국에너지공단, 「열병합발전 기술 가이드북」, 2003.
- 한국에너지공단, 「2020 집단에너지사업 편람」, 2020.
- 한국전기연구원, 「집단에너지사업 활성화를 위한 전력시장 제도개선 및 지원방안 연구」, 2016.
- Aigner, D., C. K. Lovell, and P. Schmidt, “Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models,” *Journal of Econometrics*, Vol. 6, No. 1, 1977, pp. 21~37.
- Battese, G. E., and T. J. Coelli, “A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data,” *Empirical Economics*, Vol. 20, No. 2, 1995, pp. 325~332.
- Boyd, G. A., and J. M. Lee, “Measuring Plant Level Energy Efficiency and Technical Change in the Us Metal-Based Durable Manufacturing Sector using Stochastic Frontier Analysis,” *Energy Economics*, Vol. 81, 2019, pp. 159~174.
- Meeusen, W., and J. van den Broeck, “Technical Efficiency and Dimension of the Firm: Some Results on the Use of Frontier Production Functions,” *Empirical Economics*, Vol. 2, No. 2, 1977, pp. 109~122.

[부록]

〈부록 표 1〉 변수의 기초통계량

	K ^E	K ^H	L	F	E	H	
평균	193.3	154.3	720.6	145676.0	795541.5	315871.9	
중윗값	109.2	97.0	48.5	68867.8	149000.9	260176.4	
최댓값	833	381.3	10234	705732.3	4379015	1280982	
최솟값	7.3	6.3	17	1327.828	4.57	12236.3	
표준편차	230.5	129.1	2303.7	186835.4	1179579.0	302789.6	
관측치 수	64	64	64	64	64	64	
	SL	OR ^E	OR ^H	NH	SA	ST	RE
평균	112526	0.30	0.17	24988.7	94.6	0.19	0.20
중윗값	63183	0.27	0.15	23063.0	90.9	0	0
최댓값	524490	0.92	0.42	69184	134.8	1	1
최솟값	6309	2.2E-05	1.4E-03	524	63.5	0	0
표준편차	121172	0.2	0.1	18490.5	18.5	0.4	0.4
관측치 수	64	64	64	64	64	64	64

〈부록 표 2〉 다양한 기술적 생산효율성의 기초통계량 및 상관계수 비교

	모형(1) 효율성	모형(2) 효율성	모형(3) 효율성	모형(4) 효율성
평균	0.65	0.65	0.65	0.66
중윗값	0.80	0.82	0.83	0.83
최댓값	0.98	0.98	0.98	0.99
최솟값	0.08	0.12	0.10	0.05
표준편차	0.33	0.33	0.34	0.34
관측치 수	64	64	64	64
	효율성(1)	효율성(2)	효율성(3)	효율성(4)
효율성(1)	1	0.99	0.98	0.99
효율성(2)		1	1.00	0.99
효율성(3)			1	0.99
효율성(4)				1