

확률적 거리함수를 활용한 지역별 에너지효율성 추정[†]

정다솜*·강상목**

요약 : 본 연구의 목적은 전통적 에너지효율의 지표인 에너지원단위(Energy Intensity)를 넘어 확률적 프런티어 접근으로 우리나라의 지역별 에너지효율성을 추정하고 이를 에너지효율 개선을 위한 기초적 자료로 제공하고자 함이다. 이를 위해 1998-2018년 기간 동안의 우리나라 16개 시·도의 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 확률적 거리함수를 활용하여 추정한다. 부가적으로 선행연구에서 존재하고 있는 자본스톡 추계방법들에 따른 에너지효율성 순위의 강건성을 살펴본다. 분석 결과 첫째, 세 가지 에너지효율의 지표에 따라 지역의 순위에 상당한 변동이 있었으므로 이들을 상호보완적으로 사용해야 할 것이다. 둘째, 에너지효율성은 시간이 지남에 따라 미미하지만 조금씩 개선된 반면, 에너지원단위 효율성은 미미하지만 하락했다. 마지막으로 자본스톡 추계방법에 따른 지역별 에너지효율성은 강건하지 않았다. 경제분석에서 중요한 자본스톡 추정 시 신중을 기해야 할 것이다.

주제어 : 지역, 에너지원단위, 에너지효율성, 에너지원단위 효율성, 확률적 거리함수, 자본스톡

JEL 분류 : Q3

접수일(2021년 5월 3일), 수정일(2021년 8월 30일), 게재확정일(2021년 10월 5일)

[†] 이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020S1A5B8103268).

* 부산대학교 경제학과 박사과정, 제1저자(e-mail: dasonjeong@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 경제학과 교수, 교신저자(e-mail: smkang@pusan.ac.kr)

An Estimation of Domestic Regional Energy Efficiency Using Stochastic Distance Function [†]

Dasom Jeong* and Sangmok Kang**

ABSTRACT : The purpose of this study is to provide basic data for improving energy efficiency by estimating the regional energy efficiency in Korea using the stochastic frontier approach beyond the energy intensity that has been traditionally used as an indicator of energy efficiency. In this paper, energy efficiency and energy intensity efficiency were estimated as a stochastic distance function from 1998 to 2018 for 16 cities and provinces in Korea. In addition, the robustness of energy efficiency according to the capital stock estimation methods which had been mixed in previous studies was reviewed. As a result of the analysis, there is a significant change in regional rankings according to the three energy efficiency indicators, so they should be used complementary to each other. Second, while the energy efficiency improved little by little over time, the energy intensity efficiency decreased slightly though. Lastly, energy efficiency by region according to the capital stock estimation method was not robust. Care must be taken in estimating capital stock, which is important in economic analysis.

Keywords : Region, Energy intensity, Energy efficiency, Energy intensity efficiency, Stochastic distance function, Capital stock

Received: May 3, 2021. Revised: August 30, 2021. Accepted: October 5, 2021.

[†]This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2020S1A5B8103268).

* PhD student, Department of Economics, Pusan National University, First Author(e-mail: dasomjeong@pusan.ac.kr)

** Professor, Department of Economics, Pusan National University, Corresponding Author(e-mail: smkang@pusan.ac.kr)

1. 서론

전 세계적으로 환경을 고려한 지속가능한 성장에 관심이 집중되고 있다. 한국도 2024년까지 에너지소비를 기준수요(BAU)에 대비하여 9.3%를 감축하려는 목표를 세웠다. 또한, 한국은 에너지수요의 95% 이상을 수입에 의존하여 에너지자립도가 낮고, 화석·원자력 에너지에 치중하여 수요를 충족시키고 있다(박응석·김대철, 2016). 이에 따라 에너지·환경에 주목하여 에너지전환, 에너지신산업 육성 등의 정책이 추진되고 있다.

더욱이 과거에는 에너지 정책들이 중앙정부의 주도로 추진되었으나, 최근에는 각 지자체가 주체가 되어 해당 지역 특성에 맞는 정책을 수립하려는 움직임이 활발하다. 전국 17개 광역시·도는 각 지역별로 에너지계획을 수립하였다. 세부적으로 울산광역시는 부유식 해상풍력발전단지 조성사업, 중소·중견기업 4차 산업 기술적용 에너지효율 향상 지원 등의 정책을, 전라북도는 에너지진단·절약 사업과 공장 에너지관리시스템 도입을 지원하는 정책 등을 추진한다(EPJ, 2020.05.03.).¹⁾ 다양한 에너지정책들 중 에너지효율성을 개선하려는 목표는 항상 설정되어왔다. 이를 위해서는 에너지효율성의 명확한 추정이 우선되어야 할 것이다.

그런데, 에너지효율의 추정에서 두 가지 문제가 제기될 수 있다. 첫째, 에너지효율을 대표하는 지표의 문제인데, 전통적으로는 에너지소비량을 부가가치로 나눈 에너지원단위(Energy Intensity)를 사용해왔다.²⁾ 그러나 에너지원단위는 단순히 부가가치를 높이면 에너지효율성이 낮게 추정되어 실제 에너지소비량은 많으나 효율이 개선되는 것으로 보일 수 있다. 따라서 이를 에너지효율 개선의 목표치로 제시한다면 부가가치 증대에만 치중할 우려가 있다. 둘째, 노동과 자본 등을 고려하지 않아 경제활동 과정을 반영하지 못한다는 문제가 있다. 이러한 맥락에서 에너지원단위만으로 에너지효율을 평가하고 정책을 수립하는 것은 적절하지 않다는 지적이 있었다(강상목, 2012; 강상목, 2017; Adom et al., 2018). 최근에는 노동과 자본 등을 고려하여 해당 주체의 실제 에너지소비

1) 전국 17개 지자체가 추진하는 구체적 에너지정책들은 해당 기사와 전국 시·도 홈페이지를 참조하기 바란다.

2) IEA(international energy efficiency)에서는 매년 국가별 에너지원단위(Energy Intensity)와 건물, 산업, 교통 등의 부문별 기술적 에너지효율과 에너지효율 촉진 투자동향 등을 보고하고 있다. 특히, 에너지효율의 주요 지표로 전통적 에너지원단위를 보고한다. 전 세계의 에너지원단위 개선도는 크지 않고(약 2%) 정체되어 있다(Energy Efficiency, 2020).

량 대비 생산활동에서 최소로 달성할 수 있는 에너지소비량을 추정한 생산프런티어 접근의 에너지효율성이 대안적 지표로 제시되고 있다. 이는 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, 이하 DEA) 혹은 확률변경모형(Stochastic Frontier Analysis, 이하 SFA)으로 추정할 수 있다.³⁾ 특히 SFA모형에서 다수의 투입물과 산출물을 허용하는 확률적 거리 함수를 활용하여 에너지효율성을 추정할 수 있다.

부가적으로 본고에서는 에너지효율의 추정 시 사용하는 변수의 문제를 논의하고자 한다. 추정 시 에너지소비량, 노동, 자본스톡은 항상 변수로 사용된다. 이 중에서도 지역별 자본스톡은 선행연구들에서 기준년접속법(Benchmark Year Method, BYM), 영구재고법(Perpetual Inventory Method, PIM), 대리변수(Proxy Variable, PV), 특정 기준에 따른 지역별 할당 등 다양한 방법으로 추계되고 있다(박희석, 2010; 강상목·조상규, 2011; 구자열·김수덕, 2011; 권영성·김희창, 2011; 김미숙, 2011; 강상목·조상규, 2013; 서형석·이형석, 2019).⁴⁾⁵⁾ 그러나 국내에는 통계청에서 실시된 국부통계조사 자료가 존재하므로, 이에 투자시계열을 연결하는 기준년접속법이 비교적 명확한 추계방법인 것으로 사료된다.⁶⁾ 짧은 시계열을 활용한 영구재고법과 대리변수 사용은 과거부터 축적된 개념인 자본스톡의 이론적 의미에 위배되므로 적절하지 못하다고 여겨진다.⁷⁾ 그러나 선행연구들은 각 방법들과 데이터구축의 한계를 인지하고 있음에도 시계열적 추이나 지역별 순위만 확인한다며 분석에 활용하고 있다. 그러나 추정결과의 강건성에 대한 논의는 이루어지지 않고 있다.

3) DEA는 비모수적방법으로 특정 함수를 가정하지 않으나 기술비효율오차와 확률오차를 분리할 수 없고 시계열적 추이를 확인하기 어렵다.

4) 자본스톡 추계방법은 크게 직접추계법과 간접추계법으로 나눌 수 있다. 직접추계법은 과도한 시간과 비용의 소모로 현실적으로 잘 사용되지 않으며 주로 간접추계법을 활용하고 있다. 간접추계법에는 기준년접속법, 영구재고법, 다항식기준년접속법이 있다. 다항식기준년접속법은 두 개 년도의 실사자료 사이에 투자자료를 연결하여 간접적으로 추계하는 방법이고, 기준년접속법은 한 개의 실사 자료만이 존재할 때 그에 투자자료를 연결하는 방식이다. 영구재고법은 실사 자료가 존재하지 않을 때 축적된 투자자료로 초기자본스톡을 추정하고 이에 투자자료를 연결시키는 방법이다(한국은행, 2002).

5) 이와 같은 연구들이 모두 에너지효율성을 추정한 것은 아니다. 총요소생산성, 환경효율성 등으로 다양하나 지역별 자본스톡 추계방법의 혼재를 나타내고 있다.

6) 국내에서는 과거 통계청에서 실사조사로 네 차례의 국부통계조사(1968·1977·1987·1997년)를 실시한 바 있다. 한국과 일본을 제외한 대부분의 OECD 국가들은 실사 자료가 존재하지 않아 영구재고법을 주로 활용하고 있다.

7) 영구재고법은 최소 50년 이상의 투자자료를 필요로 한다. 그러나 한국의 지역별 투자시계열은 1985년부터 구축되었고 가장 늦게 구축된 울산을 고려하면 1998년부터 투자자료를 활용할 수 있다. 따라서, 지역별 자본스톡의 추계방법으로 영구재고법을 활용하는 것은 자료의 미비로 부적절하다고 사료된다.

본 연구의 목적은 첫째, 그간 사용되어온 에너지효율의 지표인 에너지원단위(Energy Intensity)의 한계를 지적하고 확률적 거리함수를 활용한 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 추정하여 이를 기초적 자료로 제공하고자 함이다. 둘째, 선행연구들에서 추정결과의 일치성에 대한 논의 없이 무분별하게 지역별 자본스톡을 추계해 온 문제를 지적하고 이에 따른 에너지효율성 추정결과의 강건성을 확인하고자 함이다.

이를 위해 본 연구에서는 우리나라 16개 시·도를 대상으로 1998 - 2018년 기간 동안의 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 추정하고 전통적 에너지원단위와 비교할 것이다. 부가적으로, 선행연구들에서 주로 사용한 세 가지 방법으로 자본스톡을 추계하고 이에 따른 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성 순위의 변동성을 살펴볼 것이다.⁸⁾

본 연구가 가지는 차별성은 다음과 같다. 첫째, 확률적 거리함수를 활용하여 국내 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 추정한다는 점이다. 이는 에너지소비량을 부가가치로 나눈 에너지원단위의 한계를 넘어, 주어진 생산구조의 기술수준에서 달성 가능한 최소투입량과 비교한 지표로 불필요하게 사용되는 에너지의 양과 에너지원단위의 수준을 제시한다는 점에서 차별된다. 둘째, 선행연구들에서 지역별 자본스톡 추계방법이 혼재하는 상황에 문제를 제기하고 이에 따른 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성의 차이를 실증적으로 규명한다는 점이다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 이하 II 장에서는 선행연구를 살펴보고, III 장에서는 이론모형을 설명한다. 다음으로 IV 장에서는 실증분석 결과를 논의한다. 마지막으로 V 장에서는 결과를 정리하고 정책적 시사점, 한계점 및 향후 과제에 대하여 논의한다.

II. 선행연구

이하에서는 에너지효율성을 추정한 국내외의 선행연구들을 논의한다. 이를 다음의 <표 1>에 제시하였다. 먼저 DEA를 활용한 해외연구들을 살펴보자. Boyd and Pang (2000)은 유리산업을 대상으로 에너지효율성과 산업생산성의 관계를 분석하였다. Mukherjee(2008a)는 미국의 제조업을 대상으로, Mukherjee(2008b)는 인도의 제조업을

8) 지역별로 할당하는 방법은 그 기준이 각기 달라 제외하였다.

대상으로 에너지효율성을 추정하였다. Lv et al.(2012)은 매크스트 지수와 토빗모형을 활용하여, Lv et al.(2017)은 윈도우 DEA를 활용하여 중국의 지역별 에너지효율성과 결정요인을 분석하였다.

다음으로 SFA를 활용한 해외연구들을 살펴보자. Boyd(2007)은 옥수수 생산시설의 에너지효율을 횡단회귀모형으로 추정하였다. Honna and Hu(2018)은 일본의 47개 지역을 대상으로, Yu et al.(2019)은 중국을 4개 지역으로 나누어 메타프런티어 에너지효율성을 추정하였다. Adom et al.(2018)은 고정효과모형 등으로 아프리카 22개국의 에너지효율성을 측정하고 그 수렴성과 결정요인을 분석하였다. 특히 에너지원단위와 SFA 에너지효율성은 낮은 상관계수를 가져 에너지원단위는 정책적 지표로 사용되지 않아야 한다고 주장하여 본 연구와 맥락을 같이 한다.

DEA를 활용한 국내연구들을 살펴보자. 김창범(2010)은 아시아 9개국을 대상으로 하여 단일 에너지효율성을 측정하였다. 구자열·김수덕(2011)은 한국과 일본의 광역경제권을 대상으로 총요소에너지효율 등을 추정하였다. 박창수·서윤석(2017)은 우리나라 16개 시·도 제조업 부문의 총요소에너지효율성을 추정하였다. 분석 결과, 서울, 광주, 울산, 경북 등이 효율적이었고, 강원, 부산, 대구, 인천 등은 비효율적이었다.

다음으로 SFA를 활용한 국내연구들을 살펴보자. 국내 지역을 대상으로 한 연구는 찾을 수 없었다. 강상목(2012)은 OECD국가의 전통적 에너지원단위와 SFA에너지효율 및 원단위효율함수를 추정하고 비교하였다. 또한, 강상목(2017)은 113개 국가의 오염물을 고려한 에너지효율을 추정하였다.⁹⁾ 분석 결과, 강상목(2012)과 강상목(2017)은 모두 에너지원단위와 SFA에너지효율성이 상이하서 서로 보완적으로 활용할 것을 제시하였다.

위에서 살펴본 선행연구의 동향을 종합하면, 에너지효율성은 프런티어접근(DEA, SFA)과 더불어 자본과 노동을 고려하는 형태로 추정되고 있다. 또한, 에너지원단위와 SFA 에너지효율성은 상이한 결과를 보였다. 아울러 국내의 지역적 차원에서 에너지효율성을 분석한 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 국내 지역을 대상으로 SFA 에너지효율성을 추정하고 에너지원단위와 비교하여 제시할 것이다.

9) 강상목(2017)에서 국가별 에너지효율성을 추정한 결과 한국의 화석에너지 효율성은 약 0.33, 에너지원단위 효율성은 약 0.45로 타 국가, 특히 OECD 중에서 낮은 효율을 보였다.

〈표 1〉 에너지효율성 추정관련 선행연구

구분	저자	방법	추정모형	내용	대상표본	기간(년)
해외	Boyd and Pang(2000)	DEA	에너지효율성과 산업의 생산성 관계 분석		미국 유리산업	1987-1995
	Mukherjee(2008a)		기술효율에 근거한/ 에너지 투입물 최소화 조건하의/ 비용효율에 근거한 에너지효율		미국 제조업	1970-2001
	Mukherjee(2008b)				인도 제조업	1998-1999/ 2003-2004
	Lv et al.(2012)		멤퀴스트 지수, 토빗분석	에너지효율의 변화와 결정요인	중국 지역	1998-2009
	Lv et al.(2017)		여유분 기반, 윈도우 DEA	에너지효율성과 결정요인	중국 지역	2001-2010
	Boyd(2007)	SFA	횡단회귀모형	에너지효율성	미국 옥수수 생산시설	1992/1997
	Adom et al.(2018)		고정효과모형	에너지효율성 및 에너지효율의 수렴성과 결정요인	아프리카 22개국	1988-2014
	Honna and Hu(2018)		메타프런티어	총요소에너지효율성	일본 47개 지역	1996-2008
	Yu et al.(2019)		메타프런티어	에너지효율성	구분된 중국 4개 지역	2006-2016
국내	김창범(2010)	DEA	투입물지향, 윈도우 DEA	에너지소비효율성 (단일에너지효율)	아시아 9개국	2003-2006
	구자열·김수덕(2011)		총기술적에너지효율, 에너지저감량, 총요소에너지효율		한국·일본의 17개 광역경제권	1996-2007
	박창수·서윤석(2017)		패널토빗모형	단일요소에너지효율, 총요소에너지효율 및 결정요인	우리나라 16개 시·도의 제조업	2005-2013
	강상목(2012)	SFA	콥-더글라스 투입효율함수	에너지원단위, 에너지효율, 원단위에너지효율	30개 OECD국가	2001-2007
	강상목(2017)		초월대수 거리함수	오염물을 고려한 에너지효율 및 에너지원단위효율	113개 국가	1996-2011

III. 이론모형

본 연구에서는 에너지효율성을 추정하기 위해 확률적 투입물 거리함수를 활용한다. 먼저 SFA는 확률오차와 기술비효율오차를 분리할 수 있으며, 모수적 방법으로 에너지 효율성 추정 시에 특정한 함수를 가정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 주로 활용되는 콥-더글라스 생산함수(Cobb-Douglas production function, 이하 CD함수), 초월대수함수(Trans-log function, 이하 TR함수) 두 가지를 가정하고 어떤 함수가 더 적절한지 로그우도비 가설검정을 수행한다.¹⁰⁾

전통적 확률변경모형은 하나의 산출물만을 허용하지만, 확률적 거리함수는 다수의 투입물과 산출물을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 노동과 자본 등의 다양한 경제활동 요소들을 고려한 에너지효율성을 추정하므로 다수의 투입물을 허용하는 확률적 투입물 거리함수를 활용한다. 일정한 산출물의 생산에서 실제 투입물에 대한 최소투입물로 효율성을 추정한다. 이는 투입거리함수의 1차 동차성과 거리함수와 Farrell(1957)이 제시한 효율성과의 역의 관계를 이용하여 도출된다. 먼저 투입물거리함수는 식 (1)과 같이 정의된다($D =$ 거리함수, $I(\text{input}) =$ 투입물 지향, $x =$ 투입물, $y =$ 산출물, $T = y$ 를 생산하는 기술집합).

$$D_I(y, x) = \max [\theta : x/\theta \in T(y)] \quad (1)$$

식 (1)에서 정의된 투입물 거리함수를 기술비효율오차항 u 와 결합하여 다음 식 (2)와 같은 투입물지향 확률적 거리함수를 정의할 수 있다. 거리함수가 1이면 $u = 0$ 이고 거리함수가 1보다 크면 $u > 0$ 이다. 이를 활용하여 효율성을 측정한다(강상목, 2015). 식 (2)의 양변에 로그를 취하고, 거리함수와 Farrell의 효율의 값이 역의 관계인 것을 적용하면 식 (3)과 같이 표현된다.¹¹⁾

10) 이외의 함수형태로 선형(Linear), 2차식(Quadratic), 일반화된 레온티에프(Generalized Leontief) 등이 있다. 이에 관하여는 박승록(2018)을 참조 바란다.

11) Farrell의 효율 $FE_i = e^{-u}$ 이다.

$$D_I(y, x) = e^u \quad (2)$$

$$\ln FE_I = \ln \frac{1}{D_I} = -\ln D_I(y, x) = -u \quad (3)$$

이에 1차 동차성을 적용하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, 이에 양변 로그 취하고, 식 (3)에서 도출된 것을 대입하면 식 (5)로 표현된다.

$$x_n D_I(y, \frac{x}{x_n}) = D_I(y, x) \quad (4)$$

$$-\ln x_n = \ln D_I(y, \frac{x}{x_n}) - \ln D_I(y, x) = \ln D_I(y, \frac{x}{x_n}) - u \quad (5)$$

이에 u 를 확률변수로 두고, 확률오차 v 도 추가하면 아래의 식 (6)과 같이 투입물접근의 확률변경모형이 도출된다. 이 때, v 는 iid~ $N(0, \sigma_v^2)$ 로 분포하고, u 는 양(+)¹의 단측 정규분포(non-negative one side normal distribution)를 가정하고 $N(\varphi, \sigma_u^2)$ 인 절단정규분포(truncated normal distribution)임을 가정한다(Aigner et al., 1977). 이는 임의의 값 φ 를 중심으로 정규분포하고 0에서 절단된 분포를 보임을 의미한다. 전체의 분산 $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ 이고, $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$ 로 전체 분산에서 비효율오차항의 비중을 나타낸다(Coelli, 1996).

$$-\ln x_n = \ln D_I(y, \frac{x}{x_n}) + v - u \quad (6)$$

전체 오차항 $\varepsilon = v - u$ 에서 u 의 조건 분포에 의한 투입물효율(TE)은 다음 식 (7)와 같이 기댓값을 구할 수 있다. 또한, 패널모형이므로 시간가변적 기술비효율오차항을 두면 식 (8)과 같다(Battese and Coelli, 1992). 실증결과에서 η 의 유의성과 부호로 기술비효율오차의 시간가변성을 확인할 수 있다. 양(+)²의 부호를 가지면, 기술적비효율이 시간의 변화에 따라 감소하고, 음(-)³의 부호를 가지면 증가한다. i 는 개체, t 는 시간이다.

$$TE = E[\exp(-u)|(v-u)] \quad (7)$$

$$u_{it} = \exp[-\eta(t-T)] \cdot u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (8)$$

한편, 본 연구에서는 1998 - 2018년의 21개년 우리나라 16개 시·도별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 두 가지 함수가정(CD·TR함수)에 따라 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)으로 추정한다(Battese and Coelli, 1992). 이하에 각 효율성과 함수가정에 따른 구체적 추정모형을 제시한다.

산출물은 지역내총생산(GRDP)으로, 투입물은 노동(L), 자본스톡(K), 에너지소비량(E)으로 둔다. 먼저, 에너지효율성 추정에 TR함수, CD함수를 적용하면 각각 아래의 식(9)와(10)으로, 에너지원단위 효율성 추정은 각각 식(11)과(12)로 표현된다($i = 1 - 16$, $t = 1998 - 2018$, $\alpha =$ 추정할 계수). 이때, 에너지효율성은 $\Phi = E^*/E$, 에너지원단위 효율성은 $\Phi = (E/GRDP)^*/(E/GRDP)$ 이다($E^* =$ 최소 에너지소비량, $(E/GRDP)^* =$ 최소 에너지원단위).

$$\begin{aligned} -\ln E_{it} &= \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + \alpha_2 \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + \alpha_3 \ln(GRDP)_{it} \quad (9) \\ &+ 0.5 * \alpha_4 \ln^2\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + 0.5 * \alpha_5 \ln^2\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + 0.5 * \alpha_6 \ln^2(GRDP)_{it} \\ &+ \alpha_7 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} \cdot \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + \alpha_8 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} \cdot \ln(GRDP)_{it} + \alpha_9 \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} \cdot \ln(GRDP)_{it} + v_{it} - u_{it} \end{aligned}$$

$$-\ln E_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + \alpha_2 \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + \alpha_4 \ln(GRDP)_{it} + v_{it} - u_{it} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -\ln\left(\frac{E}{GRDP}\right)_{it} &= \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + \alpha_2 \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} \quad (11) \\ &+ 0.5 * \alpha_3 \ln^2\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + 0.5 * \alpha_5 \ln^2\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + \alpha_7 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} \cdot \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + v_{it} - u_{it} \end{aligned}$$

$$-\ln\left(\frac{E}{GRDP}\right)_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{L}{E}\right)_{it} + \alpha_2 \ln\left(\frac{K}{E}\right)_{it} + v_{it} - u_{it} \quad (12)$$

IV. 자료 및 실증결과

1. 자료

본 연구는 우리나라 16개 시·도를 대상으로 하여 1998 - 2018년 동안의 지역별 에너지 및 에너지원단위 효율성을 추정하였다. 즉, 균형패널이며 총 샘플 수는 336개이다.¹²⁾ 산출변수인 부가가치로 지역내총생산(GRDP)을, 투입변수로 노동(L), 자본스톡(K), 에너지소비량(E)을 두었다. 노동은 시·도별 취업자 수, 에너지소비량은 시·도별 최종에너지 소비량을 사용하였다. 자본스톡은 기준년접속법을 활용하여 추계하였다. 1997년 국부통계조사의 유형고정자산을 기준년자본스톡으로 사용하고 이에 투자자료인 시·도별 총고정자본형성을 연장하여 추계하였다. 이때, 유형고정자산의 항목과 총고정자본형성을 구성하는 항목을 일치시켰다.¹³⁾ 영구재고법과 대리변수를 통한 자본스톡 추계는 선행연구대로 국부통계 항목과 일치시키지 않고 시·도별 총고정자본형성만 활용하였다.¹⁴⁾ 이를 아래의 <표 2>에 정리하였다.

<표 2> 변수설명 및 출처

구분	변수	내용	출처
산출	Y(부가가치)	GRDP(지역내총생산)	국가통계포털 (KOSIS)
	L(노동)	취업자 수	
투입	K1(자본스톡1-BYM)	투자(시·도별 총고정자본형성), 기준년 자본(1997년 유형고정자산)	
	K2(자본스톡2-PIM)	시·도별 총고정자본형성	
	K3(자본스톡3-PV)		
	E(에너지소비량)	지역별 최종에너지 소비량	국가에너지통계종합 정보시스템(KESIS)

주1: 모든 가격변수는 2015년 연쇄가격

주2: BYM = 기준년접속법, PIM = 영구재고법, PV = 대리변수

12) 자본스톡 추계 시 사용되는 투자자료인 시·도별 총고정자본형성은 1995년부터 구축되었으나, 울산은 1998년부터 생성되어 시계열적 형평성을 위해 1998년부터 가장 최근자료(조사시점)인 2018년까지 추정하였다.

13) 총고정자본형성에서는 건설투자, 설비투자를 활용하였고, 국부통계의 유형고정자산에서는 건물, 구축물, 기계 및 장치, 선박, 차량운반구, 공구와 기구 비품을 사용하였다.

14) 자본스톡 추계의 구체적 모형은 <부록 표 1>에 제시하였다.

다음으로 1998 - 2018년까지의 국내 시·도별 GRDP, 1인당 GRDP, 에너지소비량, 1인당 에너지소비량, 노동, 자본스톡1-3의 평균(로그변환 전)을 아래의 <표 3>에 제시하였다.¹⁵⁾¹⁶⁾ 작은 관광도시인 제주는 모든 변수에 대해 가장 낮은 수치를 보인다. GRDP와 노동은 서울과 경기에서 두드러지게 높았다. 반면에 1인당 GRDP는 울산이 가장 높고 대구가 가장 낮았다. 에너지소비량은 전남, 경기, 울산 등에서 높았다. 1인당 에너지소비량은 울산, 전남 순으로 높았다. 마지막으로 세 가지 자본스톡의 추정량을 살펴보면 기준년접속법이 가장 높았다. 영구재고법, 대리변수에 의한 추정은 과소 추정되었다고 사료된다.

<표 3> 지역별 기초통계량(1998-2018)

연번	구분	GRDP	GRDP*	에너지 소비량	에너지 소비량*	노동	자본스톡 (BYM)	자본스톡 (PIM)	자본스톡 (PV)
1	서울	309026	30.505	15426	1.520	4962	1198084	757465	63528
2	부산	68315	19.028	6542	1.811	1642	475882	236493	20855
3	대구	42406	16.964	4399	1.758	1161	231359	126421	11681
4	인천	63563	23.156	10104	3.692	1297	361729	275144	20556
5	광주	27745	19.364	2177	1.523	649	138785	126171	7548
6	대전	30656	20.801	2461	1.675	677	143950	185404	10124
7	울산	62994	56.611	22138	19.887	508	240002	143712	16351
8	경기	273905	23.910	23274	2.072	5314	1750462	902241	96129
9	강원	33703	21.957	6217	4.052	699	270656	254542	12964
10	충북	41162	26.677	5851	3.811	737	286589	148521	14983
11	충남	79992	37.798	21971	10.321	1038	466241	305602	32653
12	전북	38730	20.465	4934	2.603	862	244760	180682	12835
13	전남	60339	30.833	33457	17.102	953	411266	433587	21421
14	경북	81270	30.026	17200	6.345	1381	642742	313537	30159
15	경남	85353	26.243	7690	2.371	1540	489465	298482	27380
16	제주	12536	21.396	1082	1.858	297	74899	40834	4373
전체 평균		81981	26.608	11558	5.150	1482	464179	295552	25221

주1: GRDP, GRDP*, 에너지소비량, 에너지소비량*, 노동, 자본스톡의 단위는 각각 십억 원, 백만 원, 천 톤(ton), 톤(ton), 천 명, 십억 원이다.

주2: *표기는 해당 지역의 인구수로 나눈 1인당 지표를 의미한다.

주3: 기준년접속법(Benchmark Year Method, BYM), 영구재고법(Perpetual Inventory Method, PIM), 대리변수(Proxy Variable, PV)

15) 2012년부터 충남에서 분리된 세종시는 충남자료에 합산하였다.

16) 1인당 GRDP·에너지소비량은 비교의 용이성을 위해 제시하였고, 분석에 활용하지는 않았다.

2. 실증결과

1) 에너지효율함수와 에너지원단위 효율함수 추정결과

이하에서는 확률적 거리함수를 활용한 에너지효율함수와 에너지원단위 효율함수의 추정결과를 논의한다.¹⁷⁾ 그 결과를 다음의 <표 4>에 제시하였다.¹⁸⁾ 한 가지 주지할 점은 최대우도추정은 확률오차(v_{it})와 기술적비효율오차(u_{it})를 분리하는 것이 주요 목적이므로 추정계수의 유의성은 크게 중요하지 않다는 점이다.

먼저 에너지효율함수 추정결과를 살펴보자. 총분산(σ^2)과 총분산 대비 에너지비효율 오차의 분산 비인 $\gamma(\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2))$ 는 1% 유의수준에서 유의하여 기술적비효율오차의 존재가 확인되었고 약 97%(TR·CD함수)로 에너지비효율의 비중이 컸다. 또한, 시간가변성을 나타내는 η 는 TR함수에서는 유의하지 않았다. 반면에 보다 적절한 함수로 나타난 CD함수에서 양(+)의 값을 가지며 1% 유의수준에서 유의하여 지역별 에너지효율성이 시간이 지남에 따라 증가하고 있음을 보였다.¹⁹⁾

다음으로 에너지원단위 효율함수 추정결과를 살펴보자. 마찬가지로 γ 는 1% 유의수준에서 유의하였고 TR함수에서는 약 95%, CD함수에서는 약 94%로 에너지원단위 비효율의 비중이 컸다. 또한, η 는 CD함수에서는 양(+)의 값을 가지며 1% 유의수준에서 유의하였지만 보다 적절한 함수인 TR함수에서는 음(-)의 값을 가졌고 유의하지 않았다. 실제 원단위효율성 추정결과를 보면 시간이 지남에 따라 조금씩 하락하는 것을 확인할 수 있다.²⁰⁾ 전통적 에너지원단위의 시계열 추이를 확인한 결과, 대부분의 지역이 상승과 하락을 반복하고 있었다. 이에 따라, 추정된 원단위효율성도 개선되지 못한 것으로 보인다. 즉, 경제성장이 에너지소비를 보다 감소시키는 방향으로의 전환이 더욱 요구된다.

17) FRONTIER Version 4.1로 추정하였다.

18) SFA 함수가정의 적절성을 확인하기 위해 log-likelihood값을 활용하여 LR검정을 수행한 결과를 간략히 언급한다. 첫째, 두 가지 효율성 모두 SFA 추정이 OLS보다 더 적절하다는 결론을 얻었다. 둘째, 에너지효율함수에서는 CD함수가, 에너지원단위 효율함수에서는 TR함수가 더 적절했다. 가설검정 결과표는 지면관계상 <부록 표 2>에 제시하였다.

19) η 가 양(+)의 값을 가지면 시간이 지남에 따라 에너지비효율성을 감소하고, 그 반대인 에너지효율성은 증가한다. ‘Ⅲ. 이론모형’을 참조 바란다.

20) <부록 표 5>를 참조하라.

〈표 4〉 에너지효율함수, 에너지원단위 효율함수 추정결과

모형	변수	Trans-log 함수				Cobb-Douglas 함수			
		MLE		OLS		MLE		OLS	
		계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값
에너지 효율함수	cons	-0.865	-0.876	-1.399	-0.536	-0.913*	-5.730	0.472*	2.594
	ln(L/E)	0.479	1.265	-0.052	-0.075	0.685*	28.857	0.479*	17.147
	ln(K/E)	0.092	0.229	1.594**	1.762	0.195*	10.843	0.344*	9.502
	lnG	-0.684*	-3.001	-1.095*	-4.453	-0.630*	-31.636	-0.892*	-70.197
	0.5*(ln(L/E)) ²	0.085	0.503	0.111	0.854	-	-	-	-
	0.5*(ln(K/E)) ²	0.133	0.920	-0.020	-0.101	-	-	-	-
	0.5*(lnG) ²	0.021	0.455	0.046*	2.094	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K/E)	0.019	0.135	0.148	1.005	-	-	-	-
	ln(L/E)*lnG	0.025	0.299	0.024	0.593	-	-	-	-
	ln(K/E)*lnG	-0.030	-0.432	-0.073	-1.433	-	-	-	-
	σ^2	0.034*	6.156	0.019	-	0.047*	6.331	-	-
	γ (gamma)	0.966*	162.761	-	-	0.967*	207.152	-	-
	μ (mu)	0.364	1.355	-	-	0.427*	4.250	-	-
	η (eta)	0.001	0.523	-	-	0.006*	3.903	-	-
log likelihood	554.354		194.644		563.922		117.011		
에너지 원단위 효율함수	cons	5.946*	6.785	-0.522	-0.212	2.060*	10.497	1.004*	5.349
	ln(L/E)	1.299*	4.767	0.033	0.044	0.510*	14.163	0.386*	13.655
	ln(K/E)	-1.732*	-4.869	1.002	1.053	0.398*	15.115	0.468*	12.823
	0.5*(ln(L/E)) ²	0.140*	2.737	0.119	1.009	-	-	-	-
	0.5*(ln(K/E)) ²	0.518*	7.068	-0.022	-0.121	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K/E)	-0.214*	-4.008	0.185	1.333	-	-	-	-
	σ^2	0.041*	5.065	-	-	0.043*	5.546	-	-
	γ (gamma)	0.950*	117.369	-	-	0.938*	137.569	-	-
	μ (mu)	0.395*	5.094	-	-	0.401*	6.464	-	-
	η (eta)	-0.002	-0.789	-	-	0.016*	8.634	-	-
log likelihood	516.514		165.819		467.186		84.247		

주: *, **, ***는 각각 유의수준 0.01, 0.05, 0.1 이내에서 유의함.

2) 에너지효율성과 에너지원단위 효율성 추정결과

이 장에서는 전통적 에너지원단위(Energy Intensity), 에너지효율성, 에너지원단위 효율성의 평균과 순위를 논의한다.²¹⁾ 다음의 <표 5>에 세 가지 효율성의 순위를 상·중·하로 구분하고, 1998-2018년 동안의 평균값을 제시하였다.²²⁾

먼저, 에너지효율성은 전체 평균이 0.611이고 최소 0.334(경기)에서 최고 0.993(울산)으로 범위가 컸다.²³⁾ 에너지효율성이 높은 지역으로는 울산, 제주 등이, 낮은 지역으로는 경기, 서울, 부산 등이 있었다. 다음으로 에너지원단위 효율성은 전체 평균이 0.656이고 최소 0.440(전남)에서 최고 0.990(서울)으로 범위가 컸다. 에너지원단위 효율성이 높은 지역으로는 서울, 대전, 울산 등이, 낮은 지역으로는 전남, 강원, 경북 등이 있었다.²⁴⁾

두 SFA 효율성은 공통적으로 전체 평균과 지역별 범위는 유사했으나, 순위에서 차이를 보였다. 8개 지역의 순위그룹이 달라져 큰 변동성을 보였다. 특히, 서울은 에너지효율성에서는 하위권에 속했지만, 에너지원단위 효율성에서는 1위를 차지했다. 서울의 GRDP가 압도적으로 높아 이와 같은 결과를 보인 것으로 사료된다.

다음으로 전통적 에너지원단위와 SFA 효율성을 비교해보자. 먼저, 에너지원단위와 에너지효율성을 비교하면 8개 지역(강원, 경기, 부산, 서울, 울산, 전남, 충남, 충북)의 순위그룹이 달라졌다.²⁵⁾ 특히, 서울, 경기, 울산은 상·하위 그룹에 동시에 속하여 큰 차이를 보였다. 서울과 경기의 GRDP가 높아서 에너지소비량을 GRDP로 나눈 에너지원단위에서는 높은 효율을 보였지만, 프런티어관점의 에너지효율성에서는 낮은 효율을 보였다. 울산은 에너지 다소비산업이 밀집하여 전통적 에너지원단위 기준에서는 효율이 낮을지라도, 노동과 자본을 반영한 프런티어관점에서는 높은 효율을 보여 순위에 큰 차이를 보인 것으로 사료된다.

21) 전통적 에너지원단위는 값이 작을수록 비효율적이고, 두 SFA 효율성은 클수록 효율적이다.

22) 세 가지 효율성 수치의 시계열적 추이는 크게 변동되었더라도 0.1정도이며 연도에 따른 지역별 순위가 거의 달라지지 않았다. 따라서 평균값으로 순위를 비교하는 것에 문제가 없다고 사료된다. 세부적으로 5년 간격의 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성을 <부록 표 5>에 제시하였다.

23) 중국과 일본의 지역별 에너지효율성 추정결과에서는 범위가 약 0.7로 우리나라 보다는 조금 더 컸지만 유사하고 볼 수 있다(Honma and Hu, 2018; Yu et al., 2019).

24) 박창수·서윤석(2017)은 DEA를 활용하여 국내 16개 시·도의 제조업 부문을 대상으로 에너지효율성을 추정한 바 있으나, 본 연구는 지역 전반을 대상으로 하여 결과를 비교분석하기에 어려움이 있다. 그러나 두 프런티어 효율성과 비교할 때, 공통적으로 울산, 광주는 상위권에, 부산은 하위권에 속했다.

25) 인천도 순위그룹이 달라졌지만, 1순위 차이로 제외하였다.

마지막으로 에너지원단위와 에너지원단위 효율성에서는 6개 지역(경기, 부산, 울산, 제주, 충남, 충북)의 순위그룹이 달라졌다.²⁶⁾ 위와 마찬가지로, 울산은 에너지원단위에서는 하위권에 속했지만, 에너지원단위 효율성에서는 상위권에 속했다.

종합하여 논하면 지역별 에너지효율의 세 가지 지표(전통적 에너지원단위, 에너지효율성, 에너지원단위 효율성)는 순위그룹에서 상당한 변동을 보였으므로 이를 상호보완적으로 사용해야 할 것이다.

〈표 5〉 에너지원단위, 에너지효율성, 에너지원단위 효율성 순위 비교(1998-2018)

구분	에너지원단위(천 톤/십억 원)	에너지효율성	에너지원단위 효율성
상위 5지역	서울(0.052)	울산(0.993)	서울(0.990)
	광주(0.080)	제주(0.929)	대전(0.793)
	대전(0.082)	대전(0.744)	울산(0.768)
	제주(0.089)	광주(0.732)	광주(0.749)
	경기(0.091)	충북(0.655)	경남(0.712)
중위 6지역	경남(0.093)	충남(0.616)	대구(0.658)
	부산(0.100)	강원(0.610)	제주(0.657)
	대구(0.107)	전북(0.605)	인천(0.654)
	전북(0.129)	경남(0.551)	경기(0.638)
	충북(0.150)	전남(0.539)	충남(0.628)
	인천(0.161)	대구(0.535)	전북(0.620)
하위 5지역	강원(0.190)	인천(0.535)	충북(0.588)
	경북(0.219)	경북(0.492)	부산(0.576)
	충남(0.272)	부산(0.472)	경북(0.519)
	울산(0.351)	서울(0.429)	강원(0.510)
	전남(0.554)	경기(0.334)	전남(0.440)
평균	0.170	0.611	0.656

주1: 괄호 안의 수치는 평균값(1998-2018년).

주2: 에너지효율성과 에너지원단위 효율성에서 순위그룹이 달라진 지역을 음영으로 처리.

주3: 에너지효율성은 CD함수 추정값, 에너지원단위 효율성은 TR함수 추정값을 제시하였음.

26) 경남도 순위그룹이 달라졌지만, 1순위 차이로 제외하였다.

3) 자본스톡 추계방법에 따른 에너지효율성 순위 비교

이하에서는 자본스톡 추계방법에 따른 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성의 차이를 살펴볼 것이다. 아래의 <표 6>에 세 가지 자본스톡 추계방법(기준년접속법, 영구재고법, 대리변수)에 따라 순위그룹이 변동된 지역을 제시하였다. 먼저 에너지효율성의 경우, TR함수에서는 5개 지역, CD함수에서는 4개 지역의 순위그룹이 변동되었다. 다음으로 에너지원단위 효율성의 경우, TR함수에서 12개 지역, CD함수에서 9개 지역의 순위그룹이 변동되었다.²⁷⁾

종합적으로 논의해보자. 첫째, 에너지효율성에서 보다 에너지원단위 효율성에서의 변동성이 더 컸다. 둘째, 자본스톡 추계방법에 따라 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성의 순위그룹이 상당히 변동되었음을 확인하였다. 즉, 짧은 시계열로 영구재고법을 사용하거나 대리변수를 활용하는 것은 그 이전의 자본스톡을 반영하지 못해 과소 추정하게 되고 지역별 에너지효율성 추정의 신뢰도를 하락시킨다고 할 수 있다.

<표 6> 자본스톡 추계방법별 SFA기반 지역별 에너지효율성의 순위변동 요약

	에너지효율성	에너지원단위 효율성
TR함수	경기, 대전, 서울,* 인천, 전북	강원, 경기, 경북, 광주,* 대구, 대전,* 부산, 전남,* 전북, 제주, 충남, 충북
CD함수	경북, 대구, 서울, 전남	경기, 경북, 광주, 대구, 대전, 부산, 인천, 전남, 제주

주: 상·하위그룹에 동시에 속하여 보다 큰 변동을 보인 지역에 “*”를 표기하였음.

V. 결론

본 연구에서는 확률적 거리함수를 활용하여 우리나라 16개 시·도를 대상으로 에너지 효율성 및 에너지원단위 효율성을 추정하고 에너지원단위(Energy Intensity)와 결과를 비교하였다. 또한, 자본스톡 추계방법을 달리하여 추정결과의 강건성을 살펴보았다.

27) 에너지효율함수의 LR검정에서 결과가 불일치했지만(BYM, PV: CD함수, PIM: TR함수), 두 함수 모두에서 순위그룹이 변동되었으므로 에너지효율성의 순위에 차이가 있다고 사료된다.

본 연구의 실증결과에 기초한 학술적 가치 및 시사점은 다음과 같다.

첫째, 에너지효율의 지표로 전통적 에너지원단위뿐만 아니라 에너지효율성과 에너지원단위 효율성을 상호보완적으로 사용할 필요가 있다. 추정결과 세 가지 지표별로 지역의 순위가 크게 변동되었다. 특히, 울산은 에너지원단위에서는 저효율이었으나 프런티어 관점에서는 고효율을 보였다. 반대로 서울, 경기도는 에너지원단위에서는 고효율을 보였지만, 프런티어관점의 에너지효율성에서는 저효율을 보였다.

둘째, 지자체에서는 지역의 경제성장을 에너지원단위 효율을 개선하는 방향으로 추진해야 한다. 분석 결과, 에너지효율성은 시간이 지남에 따라 미미하지만 조금씩 개선된 반면, 에너지원단위 효율성은 미미하지만 하락했다. 전통적 에너지원단위가 상승과 하락을 반복한 것에 기인한 것이라 사료된다. 에너지원단위 효율의 개선은 지역이 GRDP는 계속 증가시키면서도 에너지증가는 억제함으로써 지역온실가스 감소에 기여하므로 지속가능한 성장을 가능하게 한다.

셋째, 국가적 차원에서 에너지효율성을 개선시키고자 한다면 중앙정부의 목표 설정 및 계획수립과 더불어 지자체의 주도 및 중앙정부와 지자체, 지자체 간의 긴밀한 협력이 필요하다. 추정결과에서 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성의 범위는 최대 약 0.6이었다. 또한, 기술적비효율성의 비중이 커서 에너지효율성이 개선될 여지는 많다.

이들을 종합적으로 고려할 때, 지역별 특성에 맞는 에너지효율 향상정책을 추진한다면 더 좋은 성과를 얻을 것으로 기대된다. 가령, 전남과 울산은 모두 제조업이 발달해 산업부문 에너지소비의 비중이 크지만(에너지경제연구원, 2018), 울산은 두 가지 효율성 모두에서 고효율을, 전남은 중·저효율을 기록했다. 이는 울산은 에너지 다소비산업과 저소비산업의 비중이 적절한 반면, 전남은 에너지 다소비산업에 치중되어 이런 차이를 보인 것으로 여겨진다.²⁸⁾ 이렇듯 에너지효율성이 일면 유사할 것으로 보일지라도 그 지역의 발전 특성 등에 의해 에너지효율성에 차이가 있을 수 있다. 따라서 지자체 중심의 현재 정책방향은 적절해 보인다. 아울러, 지자체 간에도 협력하여 에너지효율을 향상시키기 위한 전략을 공유하여 국가적 목표를 달성하는 것이 필요하다.

28) 이진식(2010)은 제조업을 에너지 다소비형과 저소비형으로 구분하여 에너지효율에 미치는 영향을 보고자 하였다. 또한, 에너지 다소비·저소비산업의 비중으로 에너지효율성을 설명하는 아이디어는 임승모·김명석(2017)에서 얻었으나, 추정모형식이 적절하지 않아 선행연구에 포함시키지 않았다.

마지막으로, 지역별 자본스톡 추계 시에 데이터 구축현황과 각 방법의 특징을 고려해야 할 것이다. 자본스톡 추계방법에 따라 국내 지역별 에너지효율성 및 에너지원단위 효율성의 순위에서 상당한 변동이 확인되었으므로 충분한 검토가 필요하다. 짧은 시계열로 영구재고법을 추정하거나 대리변수를 사용하는 문제는 이론적으로도 적절하지 못하다. 경제분석에서 중요하게 고려되는 지역별 자본스톡의 추계방법이 혼재하는 상황에 논의를 제기하고 목표 추정치의 신뢰도를 높이고자 했다는 점에서 학술적 가치가 있다.

본 연구는 지역별 에너지효율성의 명확한 추정 자체에 초점을 두어서 결정요인을 심층적으로 분석하지 않았다는 한계가 있다. 이를 향후 과제로 남긴다.

[References]

- 강상목, “온실가스 감축에 대비한 에너지 효율의 계측”, 『환경정책연구』, 제11권 제1호, 2012, pp. 75~97.
- 강상목, “확률적 변경 초월대수함수를 이용한 대안적 에너지효율모델 개발과 국제적 비교”, 『환경정책』, 제25권 제3호, 2017, pp. 221~256.
- 강상목, 『효율성, 생산성, 성과분석』, 법문사, 2015.
- 강상목·조상규, “광역경제권의 산업성장이전, 인적자본, 생산성성장을 통한 경쟁력 비교”, 『국토계획』, 제48권 제4호, 2013, pp. 253~268.
- 강상목·조상규, “인적자본과 물적자본의 추정을 통한 지역성장분석”, 『국토연구』, 제68권, 2011, pp. 3~24.
- 구자열·김수덕, “자료포락분석법을 적용한 한국과 일본의 광역경제권 단위에서 에너지효율성 분석”, 『한국지구시스템공학보학회지』, 제48권 제1호, 2011, pp. 79~88.
- 권영성·김희창, “우리나라 지역경제의 총요소생산성 결정요인 분석-Malmquist 지수와Barro의 정부지출모형을 이용하여”, 『한국지역경제연구』, 제19권, 2011, pp. 43~67.
- 김미숙, “온실가스 배출제약에 따른 우리나라 시군의 환경효율성 분석”, 『한국지역개발학회지』, 제23권 제2호, 2011, pp. 95~114.
- 김창범, “아시아 지역의 에너지소비 효율성 분석”, 『무역통상학회지』, 제10권 제1호, 2010, pp. 21~32.

- 박승록, 『생산성의 경제학』, 박영사, 2018.
- 박응석·김대철, “전력 생산 에너지 비중 구조에 따른 주요 국가별 효율성 비교”, 「산업혁신연구」, 제32권 제1호, 2016, pp. 243~269.
- 박창수·서윤석, “우리나라 16개 시·도의 제조업부문 총요소 에너지효율성 및 결정요인 분석”, 「지역연구」, 제33권 제1호, 2017, pp. 3~16.
- 박희석, “우리나라 주요 시·도의 총요소생산성 추정”, 「서울도시연구」, 제11권, 제4호, 2010, pp. 1~13.
- 배상훈, “에너지전환, 지자체가 주도… 지역에너지계획 확정”, *Electronic Power Journal*. 2020년 5월 13일 승인, 2021년 6월 4일 접속, <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=24872>.
- 에너지경제연구원, 『2018 지역에너지 통계연보』, 2018.
- 이진식, “제조업부문 에너지효율 추이 분석”, 「GRI 연구논총」, 제12권 제3호, 2010, pp. 249~267.
- 임승모·김명석, “확률변경모형을 이용한 지역별 에너지 효율 측정: 제조업 구조가 에너지 효율성에 미치는 영향을 중심으로”, 「에너지경제연구」, 제16권 제2호, 2017, pp. 89~118.
- 한국은행, 『OECD 자본스톡 매뉴얼』, 서울: 한국은행 경제통계국, 2002.
- Adom, P. K., K. Amakye, K. K. Abrokwa, and C. Quaidoo, “Estimate of Transient and Persistent Energy Efficiency in Africa: A Stochastic Frontier Approach,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 166, 2018, pp. 556~568.
- Aigner, D. J., C. K. Lovell, and P. Schmidt, “Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Model Specifications,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 7, 1977, pp. 399~415.
- Battese, G. E. and T. J. Coelli, “Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: with Application to Paddy Farmers in India,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 3, 1992, pp. 153~169.
- Boyd, G. A., and J. X. Pang, “Estimating the Linkage between Energy Efficiency and Productivity,” *Energy Policy*, Vol. 28, No. 5, 2000, pp. 289~296.
- Boyd, G. A., “Estimating the Distribution of Plant-Level Manufacturing Energy Efficiency With Stochastic Frontier Regression,” Working Paper CES07-07, Duke University, 2007.
- Coelli, T. J., “A Guide to Frontier Version 4.1 : A Computer Program for Stochastic Frontier

- Production and Cost Function Estimation,” CEPA Working Paper, Center for Efficiency and Productivity Analysis, University of New England, Armidale, Australia, 1996.
- Farrell, M. J., “The Measurement of Productive Efficiency,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, Vol. 120, No. 3, 1957, pp. 253~281.
- Honma, S., and J. L. Hu, “A Meta-Stochastic Frontier Analysis for Energy Efficiency of Regions in Japan,” *Journal of Economic Structures*, Vol. 7, No. 21, 2018.
- IEA, *Energy Efficiency 2020*, 2020.
- Ly, K., A. Yu, and Y. Bian, “Regional Energy Efficiency and its Determinants in China during 2001–2010: a Slacks-based Measure and Spatial Econometric Analysis,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol. 47, No. 1, 2017, pp. 65~81.
- Ly, W., X. Hong, and K. Fang, “Chinese Regional Energy Efficiency Change and its Determinants Analysis: Malmquist Index and Tobit Model,” *Annals of Operations Research*, Vol. 228, No. 1, 2015, pp. 9~22.
- Mukherjee, K., “Energy Use Efficiency in the Indian Manufacturing Sector: An Interstate Analysis,” *Energy Policy*, Vol. 36, No. 2, 2018b, pp. 662~672.
- Mukherjee, K., “Energy Use Efficiency in US Manufacturing: A Nonparametric Analysis,” *Energy Economics*, Vol. 30, No. 1, 2018a, pp. 76~96.
- Young, A., “The tyranny of numbers: confronting the statistical realities of the East Asian growth experience,” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, No. 3, 1995, pp. 641~680.
- Yu, J., K. Zhou, and S. Yang, “Regional Heterogeneity of China's Energy Efficiency in ‘New Normal’: A Meta-frontier Super-SBM Analysis,” *Energy Policy*, Vol. 134, 110941, 2019.

[부록]

〈부록 표 1〉 자본스톡 추계모형

	모형 식	비고
기준년 접속	$NK_{it} = NI_{it} + (1 - \delta)NK_{i(t-1)}$	i=1~16(지역), t=1998-2018(연도), NK: 순자본스톡, NI: 투자, δ : 감가상각률(0.04)
	$GK_{it} = GI_{it} + (1 - r)GK_{i(t-1)}$	GK: 총자본스톡, GI: 투자, r: 폐기율
	$GK_{it} = NK_{it} / \text{환가율}$	환가율(총순비)=순자산/총자산
영구 재고 법	$K_t = I_t + (1 - \delta)K_{t-1}$	K: 자본스톡, I: 투자, δ : 감가상각률(0.04)
	$K_t = \sum_{i=0}^{\infty} I_{t-i} (1 - \delta)^i$	(t-1)기 식과 연립 후 가중평균 형태
	$K_0 = \frac{I_0}{(g + \delta)}$	K ₀ : 초기자본스톡, I ₀ : 신규투자, g: 연평균성장률 (초기 5년간 투자의 성장률 사용)

주: 영구재고법에서 Young(1995)에 따라 초기자본스톡 추정.

〈부록 표 2〉 에너지효율함수 및 에너지원단위 효율함수 로그우도비 가설검정 결과

모형	귀무가설(H0)	로그우도 값 (OLS/CD)	로그우도 값 (TR)	검정통계량 (LR)	임계값	결론 (H0)	
에너지 효율성	$\gamma = \eta = 0$	TR	194.644(OLS)	554.354	719.42	9.21	기각
		CD	117.011(OLS)	563.922	893.822	9.21	"
	에너지효율함수는 CD	563.922(CD)	554.354	-19.136	16.81	채택	
원단 위효 율성	$\gamma = \eta = 0$	TR	165.819	516.514	701.39	9.21	기각
		CD	84.247	467.186	765.878	9.21	"
	에너지원단위 효율함수는 CD	467.186	516.514	98.656	11.35	"	

주1: 우도비 검정의 검정통계량(LR)은 $-2\{L(H0)-L(H1)\}$ 로 계산한다.

주2: 임계값은 유의수준 1%의 값이다.

주3: $\gamma = \eta = 0$ (에너지비효율성 없고 불변, 에너지원단위 비효율성 없고 불변)

〈부록 표 3〉 에너지효율함수 추정결과

구분	변수	Trans-log 함수				Cobb-Douglas 함수			
		MLE		OLS		MLE		OLS	
		계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값
영구재고법	cons	-0.728	-0.890	5.183*	3.213	1.053*	7.891	1.102*	5.998
	ln(L/E)	1.993*	7.104	-0.056	-0.128	0.692*	41.245	0.630*	28.401
	ln(K2/E)	-0.766*	-2.940	1.071*	2.199	0.134*	8.686	0.135*	4.975
	lnG	-0.095	-0.685	-2.044*	-10.646	-0.784*	-58.770	-0.847*	-66.831
	0.5*(ln(L/E)) ²	-0.430*	-7.859	-0.497*	-8.582	-	-	-	-
	0.5*(ln(K2/E)) ²	-0.136*	-2.217	-0.424*	-5.219	-	-	-	-
	0.5*(lnG) ²	-0.168*	-7.979	0.025	1.286	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K2/E)	0.312*	5.762	0.649*	10.218	-	-	-	-
	ln(L/E)*lnG	-0.301*	-7.678	-0.217*	-7.805	-	-	-	-
	ln(K2/E)*lnG	0.190*	7.453	0.162*	5.187	-	-	-	-
	σ ² (sigma-squared)	0.015*	9.941	-	-	0.024*	5.892	-	-
	γ(gamma)	0.929*	109.795	-	-	0.940*	142.658	-	-
	μ(mu)	0.236*	4.635	-	-	0.301*	4.992	-	-
	η(eta)	0.009*	4.080	-	-	0.022*	16.106	-	-
log likelihood	600.266		232.496		550.378		88.673		
대리변수	cons	0.479	0.576	-1.566	-1.206	1.059*	5.980	1.051*	8.009
	ln(L/E)	0.355	0.584	-0.822**	-1.817	0.668*	36.155	0.361*	11.466
	ln(K3/E)	1.706*	2.182	2.135*	3.125	0.203*	9.745	0.543*	12.215
	lnG	-1.002*	-4.309	-0.695*	-3.517	-0.767*	-57.676	-0.892*	-76.968
	0.5*(ln(L/E)) ²	-0.275*	-2.261	0.376*	2.890	-	-	-	-
	0.5*(ln(K3/E)) ²	0.132	0.726	-0.278	-1.147	-	-	-	-
	0.5*(lnG) ²	0.033	1.084	0.014	0.717	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K3/E)	0.275*	2.023	0.063	0.368	-	-	-	-
	ln(L/E)*lnG	-0.044	-0.873	0.174*	4.100	-	-	-	-
	ln(K3/E)*lnG	-0.100***	-1.648	-0.102**	-1.703	-	-	-	-
	σ ² (sigma-squared)	0.013*	6.008	-	-	0.015*	8.646	-	-
	γ(gamma)	0.831*	82.432	-	-	0.880*	81.215	-	-
	μ(mu)	0.206*	3.895	-	-	0.229*	6.576	-	-
	η(eta)	0.019*	6.834	-	-	0.024*	12.831	-	-
log likelihood	486.977		226.232		541.843		138.951		

주: *, **, ***는 각각 유의수준 0.01, 0.05, 0.1 이내에서 유의함.

<부록 표 4> 에너지원단위 효율함수 추정결과

구분	변수	Trans-log 함수				Cobb-Douglas 함수			
		MLE		OLS		MLE		OLS	
		계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값	계수	t-값
영구재고법	cons	2.765*	6.900	-8.280*	-6.944	2.805*	27.483	2.679*	17.301
	ln(L/E)	0.309**	1.932	-3.296*	-7.898	0.586*	29.660	0.608*	22.961
	ln(K2/E)	-0.176	-0.994	4.578*	9.142	0.275*	17.541	0.152*	4.669
	0.5*(ln(L/E)) ²	-0.070**	-1.786	-0.561*	-7.233	-	-	-	-
	0.5*(ln(K2/E)) ²	0.176*	4.285	-0.826*	-7.774	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K2/E)	-0.003	-0.115	0.889*	10.517	-	-	-	-
	σ^2 (sigma-squared)	0.018*	8.683	-	-	0.048*	4.415	-	-
	γ (gamma)	0.901*	90.320	-	-	0.947*	88.014	-	-
	μ (mu)	0.254*	4.458	-	-	0.426*	6.531	-	-
	η (eta)	0.023*	13.740	-	-	0.025*	19.630	-	-
log likelihood	504.964		118.93		477.637		27.479		
대리변수	cons	5.143*	12.700	1.329*	2.084	3.281*	49.675	1.917*	18.421
	ln(L/E)	1.785*	7.160	0.223	0.544	0.529*	29.717	0.260*	7.848
	ln(K2/E)	-0.900*	-2.887	1.889*	3.302	0.381*	16.039	0.684*	14.584
	0.5*(ln(L/E)) ²	0.397*	5.140	0.088	0.665	-	-	-	-
	0.5*(ln(K2/E)) ²	0.528*	3.954	-0.500**	-1.890	-	-	-	-
	ln(L/E)*ln(K2/E)	-0.401*	-4.172	0.361*	2.007	-	-	-	-
	σ^2 (sigma-squared)	0.024*	6.225	-	-	0.024*	7.693	-	-
	γ (gamma)	0.865*	42.834	-	-	0.888*	69.706	-	-
	μ (mu)	0.286*	7.477	-	-	0.294*	6.042	-	-
	η (eta)	0.033*	17.231	-	-	0.029*	13.397	-	-
log likelihood	439.856		170.982		431.416		99.799		

주: *, **, ***는 각각 유의수준 0.01, 0.05, 0.1 이내에서 유의함.

확률적 거리함수를 활용한 지역별 에너지효율성 추정

〈부록 표 5〉 지역별 에너지효율성, 에너지원단위 효율성 추정결과

연도/ 지역	1998		2003		2008		2013		2018	
	에너지	원단위	에너지	원단위	에너지	원단위	에너지	원단위	에너지	원단위
서울	0.4062	0.9900	0.4179	0.9899	0.4295	0.9898	0.4410	0.9897	0.4525	0.9896
부산	0.4497	0.5828	0.4611	0.5794	0.4725	0.5760	0.4838	0.5725	0.4949	0.5690
대구	0.5135	0.6637	0.5243	0.6607	0.5351	0.6577	0.5457	0.6547	0.5562	0.6517
인천	0.5133	0.6604	0.5242	0.6575	0.5349	0.6545	0.5456	0.6514	0.5560	0.6484
광주	0.7169	0.7542	0.7244	0.7518	0.7318	0.7495	0.7390	0.7472	0.7461	0.7448
대전	0.7295	0.7971	0.7368	0.7951	0.7439	0.7931	0.7508	0.7911	0.7576	0.7891
울산	0.9926	0.7725	0.9929	0.7704	0.9931	0.7682	0.9933	0.7660	0.9935	0.7637
경기	0.3103	0.6439	0.3219	0.6408	0.3336	0.6377	0.3453	0.6345	0.3570	0.6314
강원	0.5910	0.5172	0.6008	0.5135	0.6105	0.5098	0.6200	0.5061	0.6294	0.5023
충북	0.6374	0.5950	0.6464	0.5917	0.6554	0.5883	0.6641	0.5849	0.6727	0.5815
충남	0.5967	0.6340	0.6065	0.6309	0.6161	0.6277	0.6255	0.6245	0.6348	0.6213
전북	0.5849	0.6265	0.5948	0.6233	0.6046	0.6201	0.6143	0.6169	0.6237	0.6136
전남	0.5173	0.4479	0.5281	0.4440	0.5388	0.4401	0.5494	0.4361	0.5598	0.4322
경북	0.4693	0.5263	0.4806	0.5227	0.4918	0.5190	0.5028	0.5153	0.5138	0.5116
경남	0.5303	0.7174	0.5409	0.7148	0.5515	0.7122	0.5619	0.7095	0.5722	0.7069
제주	0.9242	0.6628	0.9265	0.6599	0.9287	0.6569	0.9308	0.6539	0.9329	0.6508
평균	0.5927	0.6620	0.6018	0.6592	0.6107	0.6563	0.6196	0.6534	0.6283	0.6505

주: 함수가설검정 결과에 따라 에너지효율성은 Cobb-Douglas 함수로, 에너지원단위 효율성은 Trans-log 함수로 추정한 결과를 제시하였다.