

# 우리나라 16개 시·도의 제조업부문 총요소 에너지 효율성 및 결정요인 분석\*

박창수\*\* · 서윤석\*\*\*

## Regional Total Factor Energy Efficiency and its Determinants of the Korean Manufacturing Sector\*

Changsuh Park\*\*, Yun Seok Seo\*\*\*

**국문요약** 본 논문은 에너지 효율성 지표로써 투입물로 에너지뿐만 아니라 노동과 자본 등을 동시에 고려한 총요소 에너지 효율성을 DEA에 기초하여 2005-2013년 기간 동안 우리나라 16개 시·도의 제조업 부문에 대하여 추정하였다. 추정결과에 의하면, 단일요소 에너지 효율성과 총요소 에너지 효율성 간에 차이가 존재하여 두 지표를 서로 보완적으로 사용할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 한편, 총요소 에너지 효율성 지표는 대부분의 시·도들에서 높게 나타났는데 서울, 광주, 울산, 경북 등은 프런티어에 위치하지만, 강원, 부산, 대구, 인천 등은 상대적으로 매우 비효율적인 것으로 나타났다. 또한 패널 토빗 모형을 통해 총요소 에너지 효율성의 결정 요인을 추정한 결과에 의하면, 대기업의 생산액 비중이 클수록, 에너지 다소비업종의 생산액 비중이 작을수록, 그리고 전력 사용 비중이 클수록, 총요소 에너지 효율성에 긍정적인 영향을 주는 것으로 추정되었다.

**주제어** 에너지원단위, 총요소 에너지 효율성, DEA, 패널 Tobit

**Abstract** : This paper analyzed 16 regional total factor energy efficiency (TFEE) of the Korean manufacturing sector using data envelopment analysis method for the period of 2005-2013. According to the empirical results, it is necessary to use TFEE as well as partial energy efficiency defined by the ratio of energy usage to output (energy intensity) when we compare energy efficiency. Secondly, TFEE in the Korean manufacturing sector is quite different across 16 regions. For example, Gangwon province should improve energy efficiency by 55% compared to Seoul, Gwangju, Ulsan, and Gyeongbuk which are located on production frontier. Furthermore, the estimation of panel tobit regression model showed that the higher non fossil fuel using, the higher production share of large-sized firms, the lower energy intensity, and the lower capital-labor ratio could have positive effect

\* 본 연구의 일부는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20144010200660).

\*\* 숭실대학교 경제학과 부교수(교신저자: cpark@ssu.ac.kr)

\*\*\* 숭실대학교 경제학과 대학원(제1저자: wotn99882@nate.com)

on TFEE.

**Key Words** : Energy Intensity, Total Factor Energy Efficiency, DEA, Panel Tobit

## 1. 서론

우리나라는 국내에서 사용되고 있는 에너지의 대부분을 해외에 의존하고 있기 때문에 해외 에너지 시장에서 에너지의 안정적 공급과 더불어 에너지 절약은 에너지 안보와 더불어 지속 가능한 경제성장을 위한 주요 관심사라 할 수 있다. 이와 더불어 글로벌 문제가 되고 있는 기후변화에 적극적으로 대처하기 위한 저탄소 녹색성장을 위해 그 동안 우리나라 정부는 탄소녹색성장기본법을 제정하였으며, 목표관리제와 배출권거래제 등을 도입하여 시행하고 있다.

또한, 우리나라 정부는 2015년 6월 말 UN 기후변화협약에 최종 제출한 ‘자발적 기여공약(INDCs)’<sup>1)</sup>에서 2030년 온실가스 배출량 전망치(Business As Usual, BAU) 대비 37%를 감축하는 안을 제시하였으며 2015년 12월에 열린 파리 기후변화협정 당사국총회(COP21)에서 채택되었다.<sup>2)</sup> 따라서 온실가스 배출량 감축을 위하여 석탄과 석유와 같은 화석연료의 의존도를 줄여야 하는 에너지원 구성(energy mix)의 변화와 더불어 에너지 절약과 관련한 에너지의 효율적인 사용도 매우 중요하게 다룰 수밖에 없다.

그 동안 에너지 사용의 효율성 지표로 많이 사용되고 있는 것이 에너지원단위이다. 이는 일반적으로 에너지사용량을 국내총생산(GDP)으로 나눈 수치로서 계산의 편리성 등으로 인해 에너지 효율성을 측정하는 지표로 한 국가뿐만 아니라 국가간 국제 비교에서도 자주 사용되고 있다. 이러한 측면에서 에너지원단위는 단일요소 에너지 효율성(Partial Factor Energy Efficiency, PFEE) 지표라 할 수 있다. 하지만 GDP 생산에 사용되는 투입물은 에너지뿐만 아니라 노동, 자본, 주요생산비 등이 있으나 에너지원단위는 단순히 에너지 투입량만을 GDP에 고려하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 것이 총요소 에너지 효율성(Total

Factor Energy Efficiency, TFEE) 지표인데, 이 지표는 에너지 사용량뿐만 아니라 자본이나 노동과 같은 다른 투입량도 동시에 고려한 에너지 효율성 지표이다.

에너지 효율성 추정과 관련하여 총요소 에너지 효율성을 측정하는 연구들이 해외에서는 많이 이루어져 왔으나<sup>3)</sup> 우리나라에서는 아직 이와 관련된 연구가 이루어지지 않은 것으로 파악되고 있다.<sup>4)</sup> 해외 논문에서는 총요소 에너지 효율성을 측정하기 위하여 한국가 내에서 행정구역별 산출물과 에너지를 포함한 투입물 자료들을 이용하여 주로 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA) 기법으로 총요소 에너지 효율성을 추정하였다.

본 논문에서는 우리나라 제조업부문을 대상으로 16개 시·도의 산출물과 투입물 자료들을 이용하여 시도별 총요소 에너지 효율성을 DEA 방법을 이용하여 추정하였으며, 본 연구의 분석기간은 사용 변수들의 사용 가능한 기간에 맞춰 2005~2013년이다. 이 기간 동안에 우리나라 16개 시·도의 총요소 에너지 효율성을 추정한 후, 총요소 에너지 효율성을 결정하는 요인으로 시도별 대기업 생산비중, 전력과 같은 비화석 연료의 사용비중, 에너지 다소비업종의 생산비중 등을 고려한 Tobit 모형을 이용하여 추정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장은 에너지 효율성과 관련된 국내·외 선행연구들을 간략히 살펴보고 있으며, 제3장은 TFEE 추정을 위한 DEA 방법에 대해서 서술하였다. 제4장은 사용자자료와 기초 통계량을 제시하였으며, 총요소 에너지 효율성의 추정결과와 토빗(tobit) 회귀분석의 결과를 분석하였다. 마지막으로 제5장은 본 연구의 결론 부분이다.

## 2. 선행연구

DEA 방법을 활용한 총요소 에너지 효율성 추정은 Hu and Wang(2006)에 의해 시작되었는데, 이들은 중국 29개 성에 대한 자료를 이용하여 1995-2002년 기간 동안에 투입물로 노동, 자본 스톡, 에너지 사용량, 그리고 경작면적을 고려하였으며, 산출물로 GDP가 사용됐다.<sup>5)</sup> Hu and Wang(2006)이 추정된 총요소 에너지 효율성은 DEA를 통해서 추정된 목표 에너지 투입량(target energy input)을 실제 에너지 투입량(actual energy input)의 비율로 정의하였다. 이들의 추정 결과에 의하면, 전통적인 에너지 효율성 지표인 PFEE보다 TFEE가 더 나은 지표임을 보였고, 중국의 중앙 지역이 다른 지역에 비해 에너지 효율성이 좋지 않은 것으로 나타났다.

Honma and Hu(2008)은 일본의 47개 현에 대하여 1993-2003년 기간 동안 총요소 에너지 효율성을 DEA 방법으로 추정하였다. 이들은 산출물로 GDP를 고려하였으며 투입물로 14개를 고려하였는데 노동, 민간 자본 스톡, 공공 자본 스톡 이외에 에너지 투입물을 11개로 세분화하여 고려하였다. 지역별 총요소 에너지 효율성을 비교했을 때 일본 내륙과 북쪽 해안 지역은 에너지 사용에 있어 효율적이지만, 에너지 다소비 산업이 발달되어 있는 지역은 에너지 사용이 비효율적인데 주로 태평양 연안에 접한 지역들이다.

Wang et. al(2012)과 Xiaoli et. al(2014)은 중국 산업부문의 총요소 에너지 효율성을 추정하였다. 전자는 중국 30개 성에 대하여 2005-2009년 동안의 자료를 이용하였으며, 후자는 지역별 산업자료의 제약 때문에 10개의 성만을 고려하였으며 39개 산업 중 25개 산업부문에 대하여 1997-2007년 기간이 표본으로 선정되었다. 이들의 추정 결과에 따르면, 중국 산업 부문에서 에너지 효율성이 개선될 여지가 높음을 보였으며, 지역적으로 동부에 비해 중부나 서부 지역에서 에너지 효율성 개선에 대한 필요성이 좀 더 큰 것으로 나타났다.

그 동안 국내에서 DEA 기법을 적용한 논문들은 제조업, 농업, 그리고 금융업 등에서 다양하게 적용되어

왔다. 한광호(2005)는 DEA와 SFA(stochastic frontier analysis)를 이용하여 1986-2000년 기간 동안의 국내 358개 제조 기업 자료를 이용하여 총요소 생산성을 기술진보와 효율성으로 분해하여 추정하였다. 이창근 외(2009)는 1998-2005년 기간 우리나라 15개 지역의 총요소 생산성을 DEA를 이용하여 추정하였다. 박창수·유동현(2007)은 1982-2004년 동안 우리나라 제조업을 에너지 다소비업종과 에너지 비다소비업종으로 나누어 에너지절약투자가 에너지 소비에 미치는 영향을 실증 분석하였다.

김광욱·황석준(2015)은 Wang(2007, 2011)과 Li(2010)의 거리함수를 이용하여 우리나라 14개 제조업의 에너지 효율성 변화를 분해하기 위하여 에너지 투입 단위당 노동 및 자본 비율과 에너지 믹스의 변화가 생산성에 미치는 효과를 각각 분해요인으로 세분화하여 살펴보았다.

에너지 효율성과 관련된 국내 선행연구와 관련하여 생산의 총요소 측면에서 에너지 효율성을 측정한 논문은 아직까지 이루어지지 않는 것으로 파악되고 있다. 따라서 생산과 에너지 간의 관계만을 고려하지 않고 생산의 총요소 측면에서 총요소 에너지 효율성을 추정한 본 논문은 기존의 국내 에너지 효율성에 관한 연구들과 차별적이라 할 수 있다.

본 연구는 우리나라를 16개 시·도로 나누어 사용 가능한 자료들을 이용하여 제조업부문의 총요소 에너지 효율성을 추정하였다. 그리고 패널 토빗(panel tobit) 모형을 이용하여 시·도별 총요소 에너지 효율성에 미치는 요소들을 실증 분석하였다.

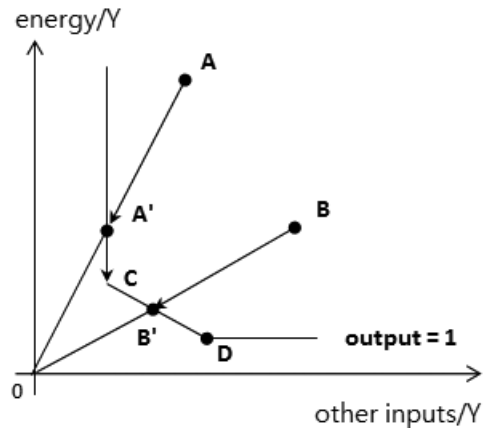
## 3. DEA 추정방법

생산성 또는 효율성을 추정하는 방법으로 모수적 접근법(parametric techniques)과 비모수적 접근법(non-parametric techniques) 등이 있다. 각 추정방법은 장점과 단점을 갖고 있기 때문에 자료 사용의 제약이나 연구 목적에 적합한 방법론이 선택될 수 있다. 우선 모수적 추정방법은 계량경제학적인 접근방법

으로서 생산함수나 비용함수의 모수를 추정할 때 측정오차를 반영하는 확률경계분석(stochastic frontier analysis, SFA) 추정법이 있다. 그리고 비모수적 추정 방법은 생산함수나 비용함수의 형태나 오차항에 대한 확률분포를 특정의 형태로 규정하지 않고 선형계획법을 이용하여 효율성 프런티어를 추정하는 것이다. 이에 대한 대표적인 추정방법이 DEA이다. DEA모형은 접근방법에 따라 투입물 지향적인(input-oriented) 모형과 산출물 지향적인(output-oriented) 모형으로 구분되는데, 전자는 생산된 산출량 수준을 기준으로 투입물을 최소한으로 사용하기 위하여 최대한 줄이고자 하는 투입물의 값의 정도에 의해서 효율성이 결정되는 반면에 후자는 투입물 값 대비 산출량을 최대화시키고자하는 산출량의 값에 따라서 효율성이 결정된다. DEA 모형은 투입물과 산출물의 관계를 기준으로 산출량이 투입량과 정비례 관계를 갖는 CCR(불변규모수익) 모형과 규모의 경제가 반영된 BCC(가변규모수익) 모형으로 구분되며 각 모형을 경제 규모와 상황에 맞추어 사용할 수 있다(강상목, 2015, pp. 53~54).

본 논문은 우리나라 16개 지역의 총요소 에너지 효율성을 추정하기 위하여 비모수적 방법인 DEA를 적용하였다. DEA는 효율성 추정을 위해 실제 산출량과 투입량 조합을 이용하여 등량곡선을 추정하고 등량곡선 상의 생산점들과 내부에 있는 생산점들 사이의 거리를 추정하여 효율성의 정도를 측정한다. 따라서 DEA를 통해 추정된 효율성은 표본 내에서 형성된 등량곡선 상의 생산점들과 등량곡선 내부에 있는 생산점 사이의 상대적인 효율성의 정도를 나타낸다.

본 논문은 규모에 대한 수확 불변을 가정하여 Farrell(1957)에 의해 고안된 투입물 중심(input-oriented)의 거리함수를 이용하여 효율성을 추정하였다. 자본 및 노동과 에너지사용량을 동시에 투입요소로 고려하고 이를 개선하기 위한 에너지효율성을 기반으로 하고 있으므로 투입물 중심의 거리함수는 주어진 산출량을 최소의 투입량으로 생산하기 위하여 투입요소의 투입량을 어느 정도 줄여야 하는지를 의미한다. 이를 그림과 추정식을 이용하여 간략히 설명하면 다음과 같다.



〈그림 1〉 투입물 중심의 CRS에서 방사성 조정과 여유분 조정  
자료: Hu and Wang(2006), p. 321f.

〈그림 1〉에서 점 A, B, C, 그리고 D는 단위 산출량에 대한 에너지와 다른 투입물의 조합을 나타내고 있다. 점 C와 점 D는 등량곡선 상에 있기 때문에 효율적인 생산투입물 조합이라 할 수 있으며 점 A와 점 B는 등량곡선 내부에 위치하고 있기 때문에 비효율적인 투입물 조합이다. 따라서 점 A와 점 B는 투입물의 효율성을 개선하기 위하여 두 가지를 고려해야 한다.

첫 번째는 원점 방향으로의 투입량 조정으로 이를 '방사성 조정(radial adjustment)'이라 한다. 예컨대 점 A가 등량곡선 상의 점 A'으로 에너지 투입량과 기타 투입량을 줄여도 동일한 생산량을 유지할 수 있다. 따라서 점 A와 점 A' 사이의 거리가 방사성 조정의 크기이다.

두 번째는 투입물의 '여유분 조정(slack adjustment)'이다. 이것은 점 A'에서 점 C까지의 투입물 조정을 의미한다. 점 A'에서 점 C로 등량곡선 상에서 에너지 투입물을 줄여도 동일한 산출량을 생산할 수 있다. 따라서 실제 투입물 조합을 나타내는 점 A는 방사성 조정을 통해서 등량곡선 상의 점 A'에 도달할 수 있으나 동일한 생산량을 유지하면서도 여유분 조정을 통해 점 C에 도달할 수 있다. 그러므로 점 A의 최선의 투입물 조합은 점 A'이 아니라 점 C이다. 따라서 목표 투입량(target input)은 이 최소한의 투입물 수준이라 할 수 있다.

이러한 목표 투입량들은 DEA에 의해서 추정되며

Hu and Wang(2006)에 의해서 제시된 총요소 에너지 효율성(TFEE)은 다음과 같이 정의된다:

$$TFEE_{it} = \frac{\text{목표에너지 투입량}_{it}}{\text{실제에너지 투입량}_{it}} \quad (\text{식 1})$$

위의 (식 1)에서  $i$ 는 의사결정단위로서 본 연구에서는 16개 시·도이며,  $t$ 는 연도를 나타낸다. 그리고 (식 1)에서 지역  $i$ 의  $t$ 연도의 TFEE는 목표 에너지 투입량을 실제 에너지 투입량으로 나눈 값이다. 따라서 TFEE의 값은 0과 1 사이에 있으며 TFEE의 값이 클수록 총요소 에너지 효율성이 크다는 것을 의미한다.

DEA 방법은 기본적으로 다수 산출물(multiple outputs)-다수 투입물(multiple inputs)에 적용될 수 있다. 따라서  $N$ 개로 구성된 각 의사결정단위(decision making unit, DMU)는  $K$ 개의 투입물을 이용하여  $M$ 개의 산출물을 생산한다고 가정하자. 각 DMU  $i$ 는 투입물과 산출물의 열벡터  $x_i$ 와  $y_i$ 를 갖는다. 따라서  $K \times N$ 의 투입물 행렬  $X$ 와  $M \times N$ 의 산출물 행렬  $Y$ 는  $N$ 개의 DMU에 대한 자료를 나타낸다. 그리고 투입물 중심의 규모에 대한 수확불변의 DEA는 다음의 선형 프로그래밍<sup>6)</sup>을 푸는 과정이다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, \lambda} \theta \\ & \text{such that } -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ & \theta_{xi} - X\lambda \geq 0, \\ & \lambda \geq 0. \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

위의 식에서  $\theta$ 는 스칼라(scalar)이고  $\lambda$ 는  $N \times 1$ 의 상수 벡터이다.  $\theta_i$ 의 값은  $i$ 번째 DMU의 효율성 지표 (efficiency score)를 의미한다. 앞의 <그림 1>에서 방사성 조정의 크기인  $\theta_i = \overline{OA'} / \overline{OA}$ 로 계산된다.<sup>7)</sup>  $\theta_i$ 는 0과 1 사이의 값을 갖는데 1에 가까울수록 효율적이라 할 수 있으며 1인 경우 등락곡선 상에 있음을 의미한다.  $\lambda$ 는 가중치 벡터(weight vector)로서 투입물과 산출물의 선형결합을 나타낸다.

또한 (식 2)에서 도출한  $\theta$ 값으로 본 연구에서는 방사성 조정과 더불어 여유분 조정(slack adjustment)까

지 모두 고려한 총요소 에너지 효율성 지표를 도출할 수 있는데 다음 (식 3)은 이러한 여유분 조정을 고려한 값까지 도출하는 선형 프로그램 식을 나타낸다.

다음의 (식 3)에서 OS는  $M \times 1$  산출물 여유분 벡터이고, IS는  $K \times 1$  투입물 여유분 벡터이다. 그리고 M1과 K1은 각각 1의 값을 갖는  $M \times 1$  벡터와  $K \times 1$  벡터이다. 두 번째 선형 프로그램에서는 변수가 아닌 상수이며, 첫 번째 추정결과로부터 도출된 값이다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, OS, IS} - (M1'OS + K1'IS), \\ & \text{such that } -Y_i + Y\lambda - OS = 0, \\ & \theta_{xi} - X\lambda - IS = 0, \\ & \lambda \geq 0, OS \geq 0, IS \geq 0. \end{aligned} \quad (\text{식 3})$$

## 4. 사용자료 및 추정결과 분석

### 1) 사용자료 및 기초통계량

본 연구에서 사용된 자료는 우리나라 16개 광역 시·도를 표본으로 하고 있다. 분석 기간은 시·도별 에너지 자료에 대한 사용계약 때문에 2005-2013년이다. 산출물은 한국은행에서 발표하는 각 시·도의 제조업 부문의 총산출액으로서 각 시도의 2010년 불변 가격기준의 GRDP(경제활동별 지역내 총생산)를 사용하였다.

그리고 투입물로 자본, 노동 그리고 에너지 사용량이 고려되었다. 각 시도별 에너지 사용량은 에너지경제연구원에서 발간하는 『지역에너지통계연보』에 제시되어 있는 자료를 사용하였으며, 각 연료별 에너지열량을 에너지 전환계수를 사용하여 석유환산톤(Tons of Oil Equivalent, TOE) 단위로 전환한 후 합산하여 구하였다. 산출물을 포함한 노동 및 자본 투입물은 국가통계포털 사이트(<http://kosis.kr>)의 행정구역별 자료를 이용하였다.<sup>8)</sup>

제조업부문의 16개 시·도별 에너지 사용량 자료는 휘발유, 석탄, 가스를 포함한 전통적인 에너지와 전력을 포함하고 있다. 제조업부문의 시·도별 나머지 투입물 사용량 자료 중 노동은 제품을 생산하는데 들어

〈표 1〉 제조업 부문의 16개 광역시·도별 기초 통계량

시도	투입물						산출물	
	에너지사용량(10,000TOE)		종업원 수(10,000명)		자본(100억 원)		GRDP(100억 원)	
	평균	비중(%)	평균	비중(%)	평균	비중(%)	평균	비중(%)
서울	113.5	1.0	32.2	8.9	744.6	1.9	1,532.5	4.7
부산	212.0	1.8	19.8	5.5	1,479.3	3.8	1,160.1	3.6
대구	176.5	1.5	17.6	4.9	810.9	2.1	739.5	2.3
인천	480.7	4.0	22.2	6.1	2,061.6	5.4	1,532.1	4.7
광주	68.2	0.6	7.3	2.0	611.8	1.6	629.7	1.9
대전	66.2	0.6	5.0	1.4	434.7	1.1	388.8	1.2
울산	2,519.2	21.0	15.3	4.2	3,538.2	9.2	3,437.2	10.6
경기	1,314.3	11.0	103.4	28.5	9,640.8	25.0	7,960.5	24.5
강원	355.2	3.0	4.4	1.2	549.8	1.4	275.7	0.9
충북	468.7	3.9	14.2	3.9	1,967.3	5.1	1,387.3	4.3
충남	2,194.3	18.3	25.0	6.9	5,108.5	13.3	3,620.1	11.1
전북	333.0	2.8	10.9	3.0	1,306.1	3.4	870.4	2.7
전남	2,434.9	20.3	10.7	3.0	2,528.8	6.6	1,986.6	6.1
경북	764.9	6.4	30.8	8.5	3,495.8	9.1	3,659.1	11.3
경남	469.6	3.9	43.2	11.9	4,204.8	10.9	3,343.5	10.3
제주	4.7	0.04	1.0	0.3	35.4	0.1	31.0	0.1
평균	748.5	-	2.3	-	2,407.4	-	2,034.6	-

주: 모든 화폐가치는 2010년 불변가격 기준임.

자료: 에너지경제연구원(<http://www.keei.re.kr>)과 국가통계포털(<http://kosis.kr>) 자료를 정리한 것임.

간 종업원 수를 사용하였고, 자본변수로 10인 이상 시군구·산업분류별 주요 지표에 나와 있는 유형자산연말잔액을 사용하였는데 2010년 기준의 시·도별 생산자물가지수를 이용하여 실질가격으로 전환하였다.

〈표 1〉은 각 시·도별 모든 투입물과 산출물의 9년간의 기초통계량을 요약하고 있다. 이를 좀 더 자세히 살펴보면, 9년 동안 평균 총 에너지 사용량이 많은 지역은 울산(21.0%), 전남(20.3%), 충남(18.3%) 등인데, 이들 지역들은 에너지 다소비 업종 산업들이 밀집되어 있기 때문으로 보인다.<sup>9)</sup> 경기도는 주요 투입요소인 노동과 자본의 투입량 측면에서 각각 28.5%, 25.0%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 경기도 다음으로 노동 비중이 높은 지역은 경남(11.9%)이고, 자본 비중이 높은 지역은 충남(13.3%)인 것으로 나타나고 있다.

마지막으로 산출물인 생산액 측면에서는 전체 제조업 생산액 중 경기도의 비중은 24.5%로 16개 시·도 중에서 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 그 다음으

로 경북(11.3%), 충남(11.1%) 순으로 나타나고 있다. 반면에 생산액이 가장 작은 지역은 제주, 강원, 대전 지역 순이다.

## 2) 16개 시·도별 총요소 에너지 효율성

본 논문에서 3개의 투입물과 1개의 산출물을 이용하여 DEA를 통해서 추정된 TFEE 지표는 〈표 2〉와 〈표 3〉에 제시되어 있다. 〈표 2〉는 투입물에 대한 방사성 조정(radial adjustment)만 고려한 총요소 에너지 효율성 값이며, 〈표 3〉은 방사성 조정과 여유분 조정(slack adjustment)을 모두 고려한 총요소 에너지 효율성의 지표를 나타낸다.

우선 〈표 2〉에서 전반적으로 한국의 16개 시·도 지역의 산업용 전기, 석탄, 휘발유, 경유, 도시가스 등을 사용하는 제조업의 총요소 에너지 효율성 지표는 0.902(2006년)~0.864(2005년)로 추정되었으며 2010년 이후 총요소 에너지 효율성이 0.876~0.900 수준

〈표 2〉 방사성 조정만을 고려한 시도별 총요소 에너지 효율성

연도 시도	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	평균
서울	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
부산	0.813	0.832	0.805	0.773	0.647	0.639	0.650	0.602	0.657	0.713
대구	0.740	0.697	0.645	0.615	0.583	0.682	0.688	0.649	0.602	0.656
인천	0.792	0.774	0.738	0.637	0.534	0.620	0.638	0.617	0.618	0.663
광주	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
대전	0.886	0.974	0.930	0.823	0.789	0.781	0.781	0.759	0.821	0.838
울산	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
경기	0.759	0.874	0.849	0.879	0.854	0.844	0.827	0.832	0.885	0.845
강원	0.351	0.396	0.422	0.465	0.445	0.477	0.487	0.528	0.495	0.452
충북	0.728	0.732	0.672	0.625	0.688	0.743	0.738	0.812	0.774	0.724
충남	0.858	0.926	0.888	0.849	0.846	0.951	0.938	1,000	0.992	0.916
전북	0.791	0.747	0.728	0.708	0.635	0.652	0.637	0.668	0.622	0.688
전남	0.850	0.897	0.920	0.952	0.827	0.979	0.973	0.938	1,000	0.926
경북	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
경남	0.902	0.954	0.889	0.939	1,000	0.936	0.925	0.890	0.933	0.930
제주	0.707	0.694	0.618	0.658	0.588	0.581	0.610	0.565	0.517	0.615
가중평균 <sup>1)</sup>	0.864	0.902	0.880	0.881	0.867	0.883	0.876	0.880	0.900	-

주 1) 각 시도가 차지하는 GDP 생산 비중이 가중치로 사용됨.

에서 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.<sup>10)</sup> 특히, 서울, 광주, 울산, 그리고 경북 지역은 총요소 에너지 효율성이 1,000으로 추정되어 이들 지역들이 생산 프런티어를 형성하고 있음을 알 수 있다. 서울은 자본생산성이 높은 지역으로서 특히 서울에서 가장 많은 에너지를 소비하는 섬유·의복업종에서 자본생산성이 4.43으로 나타난다.<sup>11)</sup> 이로 인해 서울의 총요소 에너지 효율성이 높은 것으로 판단된다. 그리고 울산, 전남, 그리고 경북 지역은 높은 기술진보, 대규모 인프라 시설 구축, 그리고 산업단지 조성으로 집적효과를 만들어 총요소 에너지 생산성에 긍정적인 영향<sup>12)</sup>을 미쳐 총요소 에너지 효율성이 높은 것으로 판단된다.<sup>13)</sup>

〈표 3〉은 에너지 투입물의 방사성 조정과 여유분 조정을 모두 고려한 TFEE의 결과를 제시하고 있다. 이에 따르면 방사성 조정만 한 경우보다 방사성 조정과 여유분 조정을 한 경우 총요소 에너지 효율성이 낮아지는 것은 당연하다. 다만 생산프런티어에 있는 서울, 광주, 울산, 그리고 경북의 총요소 에너지

효율성은 여전히 1,000을 유지하고 있다. 그리고 2005~2013년 기간 동안 총요소 에너지 효율성이 가장 낮은 지역은 강원도(0.347)이며 그 다음으로 대구(0.612), 제주(0.615) 등이다.

〈표 2〉와 〈표 3〉을 통해서 에너지 투입물에 대한 방사성 조정의 에너지 효율성과 여유분 조정까지 고려한 에너지 효율성이 일부 시도에서 차이가 있음을 확인할 수 있다. 특히 대구, 강원, 전남 지역은 타 지역에 비해 방사성 조정만 고려한 에너지 효율성(각각 0.656, 0.452, 0.926)과 방사성 조정과 여유분 조정까지 고려한 에너지 효율성(각각 0.612, 0.347, 0.635) 사이의 차이가 두드러지게 나타나고 있다. 따라서 이들 지역에서는 산출물의 감소 없이 에너지 투입물의 방사성 조정 부분과 여유분 조정을 통하여 총요소 에너지 효율성을 개선할 여지가 큰 것으로 보인다.

한편, 전남 지역은 프런티어에 있지 못할 경우에 에너지 투입량에 대한 여유분 조정을 고려한 총요소 에너지 효율성 지수는 급격하게 하락하는 것을 확인할

〈표 3〉 방사성 조정과 여유분 조정을 고려한 시도별 총요소 에너지 효율성

연도 시도	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	평균
서울	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
부산	0.813	0.832	0.805	0.773	0.647	0.639	0.650	0.602	0.657	0.713
대구	0.740	0.697	0.645	0.615	0.583	<b>0.506</b>	<b>0.500</b>	<b>0.625</b>	0.602	<b>0.612</b>
인천	0.792	0.774	0.738	0.637	0.534	<b>0.556</b>	<b>0.636</b>	0.617	0.618	<b>0.656</b>
광주	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
대전	0.886	0.974	0.930	0.823	0.789	0.781	0.781	0.759	0.821	0.838
울산	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
경기	0.759	0.874	0.849	0.879	0.854	0.844	0.827	0.832	0.885	0.845
강원	0.351	0.396	0.422	<b>0.419</b>	<b>0.443</b>	<b>0.204</b>	<b>0.183</b>	<b>0.213</b>	<b>0.490</b>	<b>0.347</b>
충북	0.728	0.732	0.672	0.625	0.688	0.743	0.738	0.812	0.774	0.724
충남	0.858	0.926	0.888	0.849	0.846	0.951	0.938	1.000	0.992	0.916
전북	0.791	0.747	0.728	0.708	0.635	0.652	0.637	0.668	0.622	0.688
전남	<b>0.562</b>	<b>0.624</b>	<b>0.594</b>	<b>0.549</b>	<b>0.460</b>	<b>0.577</b>	<b>0.664</b>	<b>0.688</b>	1.000	<b>0.635</b>
경북	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
경남	0.902	0.954	0.889	0.939	1.000	0.936	0.925	0.890	0.933	0.930
제주	0.707	0.694	0.618	0.658	0.588	0.581	0.610	0.565	0.517	0.615
가중평균	0.845	0.885	0.861	0.855	0.847	0.849	0.850	0.862	0.900	-

주 : 굵은 숫자는 〈표 2〉와 비교했을 때 다른 경우를 나타냄. 즉, 여유분 조정이 일어난 지역임.

수 있다. 이와 같은 결과를 통해 전남 지역이 다른 지역에 비해 상대적으로 많은 에너지를 사용하고 있는 것으로 판단된다. 또한 ‘가죽, 의복, 신발’ 산업이 발달한 대구 지역은 표본기간 가운데 자본 생산성 저하로 인한 성장 둔화가 총요소 에너지 효율성 하락의 주요한 원인으로 판단된다.<sup>14)</sup>

일반적으로 에너지 효율성 지표로서 단일요소 에너지 효율성이 에너지 생산성을 나타내는 지표로 사용되어 왔다. 단일요소 에너지 효율성 지표는 에너지사용량이 유일한 투입요소로 들어가는 지표이며, 에너지사용량을 GDP로 나누어 에너지원단위를 측정하여 에너지 효율성 지표로 사용된다. 그러나 총요소 에너지 효율성 지표는 에너지 사용량과 함께 자본, 노동, 주요생산비 등을 투입요소로 동시에 고려하여 에너지 효율성을 추정한다. 따라서 에너지 효율성 지표라 할 수 있는 두 지표 사이에 큰 차이가 존재하는지를 비교할 필요성이 있다.

이를 위해 본 연구에서는 산출물인 생산액을 에너지사용량으로 나누어 16개 시·도별 제조업 분야의

단일요소 에너지 효율성을 계산하였다.<sup>15)</sup>

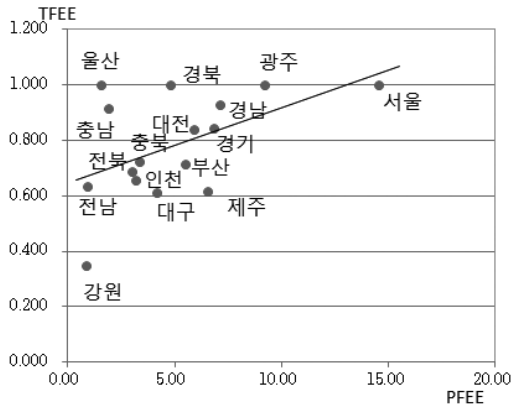
〈표 4〉는 시도별 에너지원단위의 역수를 계산한 값을 제시하고 있다. 따라서 값이 클수록 에너지 효율성이 크다고 해석할 수 있다. 우선 각 시도별 시계열 분석에 따르면 2005년 대비 2013에 에너지 효율성이 약화된 지역은 부산, 울산, 충남, 전북, 그리고 전남 등이며, 나머지 지역은 에너지 원단위가 개선된 것으로 파악되었다. 그리고 시도별 횡단면 분석에 의하면, 서울이 다른 지역에 비해 압도적으로 에너지 원단위가 높다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 서울 지역이 다른 지역에 비해 환경에 대한 규제가 높기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 반면에 울산, 전남, 그리고 강원은 에너지 원단위 기준으로 에너지 효율성이 낮은 지역에 속하고 있다.

〈그림 2〉는 〈표 3〉의 시도별 총요소 에너지 효율성 지표(TFEE)와 〈표 4〉의 단일요소 에너지 효율성(PFEE)인 에너지 원단위의 역수 값을 9년 동안(2005~2013)의 각각의 평균값에 대한 산포도를 나타낸다. 이에 따르면, 단일요소 에너지 효율성 지표와



〈표 4〉 시도별 제조업의 에너지 원단위의 역수 값 (=생산액/TOE : TOE당 백만원)

연도 시도	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	평균
서울	8.91	10.58	10.70	10.58	19.84	19.91	17.21	15.61	17.39	14.53
부산	5.60	5.63	6.06	5.94	5.34	5.66	5.24	4.75	5.27	5.50
대구	3.66	3.81	4.07	4.16	4.01	4.44	4.12	4.46	4.91	4.18
인천	3.07	3.17	3.33	3.58	2.83	3.11	3.24	3.11	3.28	3.19
광주	8.76	8.42	9.07	9.12	9.59	9.78	9.03	10.03	9.10	9.21
대전	5.79	5.82	6.24	5.81	5.84	6.09	5.57	5.74	6.01	5.88
울산	1.68	1.56	1.56	1.70	1.73	1.62	1.39	1.38	1.41	1.56
경기	6.12	6.69	6.80	7.01	6.99	7.34	6.66	6.99	7.01	6.84
강원	0.74	0.78	0.76	0.84	0.92	0.99	0.83	0.99	0.96	0.87
충북	3.02	3.23	3.21	3.07	3.38	3.60	3.35	3.53	3.54	3.33
충남	1.98	2.04	1.89	1.80	1.77	1.95	1.88	1.95	1.91	1.91
전북	2.98	2.98	3.19	3.35	3.20	3.16	2.60	2.80	2.70	3.00
전남	0.95	0.97	0.93	0.93	0.80	0.93	0.93	0.95	0.91	0.92
경북	4.54	4.67	5.06	5.15	5.02	4.96	4.48	4.55	4.71	4.80
경남	6.56	6.67	6.83	7.20	7.84	7.61	6.91	7.12	7.21	7.10
제주	5.71	5.99	6.13	6.77	7.07	7.34	6.64	6.73	6.51	6.54
가중평균	4.38	4.68	4.82	4.91	5.38	5.48	4.97	5.03	5.17	-



〈그림 2〉 우리나라 16개 시·도의 TFEE와 PFEE의 산포도

주: PFEE = 백만원/TOE

총요소 에너지 효율성 지표 사이에 정(+)의 관계에 있지만 낮은 상관관계<sup>10)</sup>가 있는 것으로 보인다.

서울은 총요소 에너지 효율성 지표가 1인 동시에 단일요소 에너지 효율성 지표도 다른 시도에 비해 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 광주의 경우도 총요소 에너지 효율성 지표가 1이고 단일요소 에너지 효율

성지표도 서울 다음으로 높은 것을 알 수 있다. 그러나 울산과 경북은 총요소 에너지 효율성은 1이지만 단일요소 에너지 효율성은 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 강원도는 총요소 에너지 효율성도 다른 시도에 비해 가장 낮지만 단일요소 에너지 효율성도 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 제주는 단일요소 에너지 효율성은 높지만 총요소 에너지 효율성은 낮음을 알 수 있다.

따라서 총요소 에너지 효율성이 1.0인 울산과 경북은 에너지 원단위인 단일요소 에너지 효율성만 고려하였다면, 부산, 대전, 경기, 경남, 제주에 비해 에너지 효율성이 낮다고 볼 수 있다. 하지만 총요소 에너지 효율성 지표로 판단하면 울산과 경북은 이들 지역보다 에너지 효율성이 높다. 이러한 측면에서 에너지 투입량만 고려하는 단일요소 에너지 효율성 지표와 에너지 투입량뿐만 아니라 노동, 자본, 주요생산비 등 주요 투입요소를 동시에 고려하는 총요소 에너지 효율성 지표가 서로 보완적으로 사용될 필요성이 있음을 알 수 있다.

### 3) 총요소 에너지 효율성의 결정요인

에너지 효율성을 개선하기 위하여 우선 에너지 효율성의 지표를 추정해야 하며, 그 지표들을 설명하는 요인들을 선정하여 회귀 분석할 필요가 있다. 따라서 앞에서 DEA를 이용하여 추정한 총요소 에너지 효율성 지표 값을 이용하여 에너지 효율성을 결정하는 변수들을 추정하고자 한다.

지역별 에너지 효율성의 차이를 유발하는 가장 중요한 변수 중 하나가 지역별 산업구조의 차이가 될 것이다. 예컨대, 전남의 경우 제조업에서 에너지 다소비업종의 생산액 비중이 83.9%에 달하는 반면에 서울의 경우는 18.5%에 불과하다. 에너지 다소비업종의 생산액 비중이 높을수록 에너지 소비량이 많다는 것을 의미하기 때문에 에너지 다소비업종의 비중은 에너지 효율성에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

에너지 효율성의 결정요소로 두 번째 고려한 변수는 전력 사용량 비중이다. 석탄, 석유, 그리고 도시가스 같은 화석연료를 사용하는 경우 보일러 설비의 에너지 손실이 발생하기 때문에 전력 사용량 비중이 높을수록 에너지 효율성에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.<sup>17)</sup>

세 번째 설명변수는 지역별 중소기업의 생산액 비중이다. 중소기업의 생산액 비중보다 대기업의 생산액 비중이 클수록 규모의 경제로 인해 에너지 효율이 개선될 것이다. 따라서 중소기업의 생산액 비중이 클수록 에너지 효율성에 부정적인 영향을 미칠 것이다.

본 연구에서 에너지 효율성의 결정요소로 고려한 마지막 설명변수는 근로자 1인당 자본량이다. 제조업의 생산과정에 있어 1인당 자본량이 에너지와 대체 및 보완 관계에 있는지는 산업에 따라 다르다(Roy *et al.*, 1999). Mukherjee(2008)에서는 1인당 자본량의 추정 계수가 에너지 효율성에 음(-)의 부호를 띠고 있으나 통계적으로 유의미하지는 않았다.

DEA 분석에서 TFEE의 값이 0과 1사이의 한정된 값을 갖는다. 따라서 그 분포가 보통의 회귀분석모형에서 가정하고 있는 정규분포와는 다르기 때문에 최소자승법에 의한 회귀분석 계수가 불일치 추정치를 다르게 되므로 잘못된 실증 결과를 초래할 가능성이

내재되어 있다. 이러한 최소자승법의 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 패널 Tobit 모형을 이용하여 각 지역별 총요소 에너지 효율성 지표의 결정요인을 추정하였다. 이를 위한 추정모형은 다음과 같다.

$$\ln TFEE_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln Eimt_{i,t} + \beta_2 \ln Elec_{i,t} + \beta_3 \ln Small_{i,t} + \beta_4 \ln(K/L)_{i,t} + e_{i,t} \quad (\text{식 4})$$

(식 4)에서  $i = \{1, 2, 3, \dots, 16\}$ 은 우리나라 16개 시·도를 나타내며,  $t = \{2005, \dots, 2013\}$ 로서 연도를 의미한다. 그리고 종속변수인  $\ln TFEE_{i,t}$ 는 총요소 에너지 효율성 지표의 자연로그 값이다. 위에서  $\ln Eimt_{i,t}$ 는 제조업의 생산액 대비 에너지 다소비업종의 생산액 비중의 자연로그 값이며,  $\ln Elec_{i,t}$ 는 시도별 에너지 총사용량 대비 비화석 연료인 전력의 사용 비중에 대한 자연로그 값으로서 시도별 에너지 사용 구성의 구조적 차이를 고려한 것이다. 그리고 시도별 산업구조를 나타내는 변수로 두 독립변수를 고려하였는데,  $\ln Small_{i,t}$ 는 시도별 제조업 총생산액 대비 중소기업의 총생산액 비중에 대한 자연로그 값이며,  $\ln(K/L)_{i,t}$ 는 종업원 1인당 자본스톡량의 자연로그 값이다. 마지막으로  $e_{i,t}$ 는 오차항을 나타낸다.

<표 5>는 다중회귀 분석모형인 패널 Tobit모형을 사용하여 총요소 에너지 효율성의 결정요인을 추정한 결과이다.<sup>18)</sup> 모형 1은 기본적으로 (식 4)를 추정한 결

<표 5> 에너지 효율성 결정요인: Tobit 회귀분석

설명변수	모형 1	모형 2
Constant	-0.095(0.121)	-0.094(0.119)
$\ln Eimt_{i,t}$ (다소비업종 생산액 비중)	-0.226*** (0.054)	-0.230*** (0.054)
$\ln Elec_{i,t}$ (전력 사용량 비중)	.118** (0.052)	.117** (0.052)
$\ln Small_{i,t}$ (중소기업 생산액 비중)	-0.510*** (0.086)	-0.491*** (0.089)
$\ln(K/L)_{i,t}$ (1인당 자본투입량)	-0.130*** (0.025)	-0.127*** (0.024)
Dummy 2009	-	-0.049*** (0.019)
Log likelihood	147.02	150.29

주: \*, \*\*, 그리고 \*\*\*는 10%, 5%, 그리고 1% 유의수준을 각각 나타냄.

과이며, 모형 2는 (식 4)에 2009년의 글로벌 금융위기를 반영하는 더미변수 'Dummy 2009'를 추가한 모형에 대한 추정결과이다.

추정결과에 의하면, 우선 모형 1의 우도(log likelihood) 값보다 Dummy 2009를 추가한 모형 2의 우도 값이 커졌다. 따라서 모형 1보다 모형 2의 설명력이 더 개선되었다고 볼 수 있다. 이와 관련하여 더미변수가 음(-)의 부호를 띠고 있는데 이것은 2009년에 글로벌 금융위기로 인해 전국 제조업 성장률은 1.1% 감소하였으나 에너지 사용량은 오히려 0.7% 증가하여 제조업의 에너지 효율성이 감소한 것을 반영한 것으로 보인다.

에너지 다소비업종의 생산액 비중( $\ln E_{int}$ )이 클수록, 중소기업 생산액 비중( $\ln S_{small}$ )이 클수록, 그리고 근로자 1인당 자본투입량( $\ln K/L$ )이 클수록 총요소 에너지 효율성이 악화되며, 비화석 연료인 전력의 사용량 비중( $\ln E_{elec}$ )이 클수록 총요소 에너지 효율성이 개선되는 것으로 추정되었다.

각 독립변수와 종속변수의 관계를 좀 더 구체적으로 살펴보면, 첫째로 제조업 전체 생산액 중에서 에너지 다소비업종의 생산액 비중의 추정계수는 음(-)의 부호를 띠고 있으며, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미한 것으로 추정되었다. 따라서 에너지 다소비업종의 생산액 비중이 클수록 에너지 효율성은 좋지 않은 것으로 나타났다. 이는 에너지 사용량이 많을수록 에너지 효율성에 부정적인 영향을 미치기 때문으로 보인다.

총 에너지 사용량 대비 비화석 연료(전력) 사용량 비중의 추정계수는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 추정되었다. 표본기간 동안 화석연료(석유·석탄·도시가스) 사용은 2005년 대비 2013년에 1.29배 증가하였다. 비화석 연료인 전력 사용량은 2005년 대비 2013년에 1.53배 증가하였다.<sup>19)</sup> 따라서 비화석 연료 사용량 비율의 추정계수의 부호가 양(+)의 값으로 통계적으로 유의미하게 나온 이유는 표본기간 동안에 상대적으로 화석연료 사용 증가율보다 비화석 연료의 사용 증가율이 더 컸기 때문으로 판단된다.

둘째, 지역별 중소기업의 생산액 비중이 커질수록 총요소 에너지 효율성이 감소하는 것으로 추정되었다. 즉, 중소기업의 생산액 비중보다 대기업의 생산액 비중이 클수록 총요소 에너지 효율성이 개선된다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 제조업에서 대기업 생산액 비중이 커짐에 따라 규모의 경제가 발생하여 상대적으로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있기 때문으로 보인다.

마지막으로 근로자 1인당 자본투입량이 많을수록 총요소 에너지 효율성에 부정적인 효과를 미치는 것으로 추정되었다. 따라서 1인당 자본투입량의 증가는 투자의 증가로 볼 수 있는데 이러한 투자가 총요소 에너지 효율성에 부정적인 영향을 주는 것으로 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 DEA를 이용하여 우리나라 16개 시·도별 제조업부문의 총요소 에너지 효율성 지표를 추정하였다. 투입요소로는 자본, 노동, 그리고 에너지 사용량을 사용하였으며, 산출물로는 제조업 부문의 총산출액을 사용하였다. 본 논문의 총요소 에너지 효율성 추정결과에 의하면, 각 지역의 제조업분야 총요소 에너지 효율성을 TFEE로 추정하였을 때 <표 2>를 기준으로 생산 프런티어에 있는 서울, 광주, 울산, 경북 등에 비해서 나머지 지역들은 많게는 55%(강원), 적게는 7%(경남) 정도 에너지 효율성을 개선시킬 잠재성이 있는 것으로 나타났다. 또한, TFEE와 PFEE를 비교하면 그 상관관계가 낮은 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 단순히 에너지원단위라고 하는 단일요소 에너지 효율성 지표와 더불어 총요소 에너지 효율성 지표를 보완적으로 고려할 필요가 있음을 보여준다.

추가적으로 총요소 에너지 효율성의 결정요인을 살펴보기 위하여 패널 토빗(Tobit) 회귀분석을 이용하여 총요소 에너지 효율성(TFEE)의 결정요인을 추정하였다. 추정결과에 의하면, 비화석 연료인 전력의 사용 비중이 클수록, 대기업의 생산액 비중이 클수록, 에너

지 다소비업종의 생산액 비중이 작을수록, 그리고 1인당 자본투입량이 작을수록 중요소 에너지 효율성이 개선되는 것으로 나타났다. 따라서 우리나라 제조업의 에너지 효율성 개선을 위한 정책적 시사점으로 중소기업의 기업 규모확대, 에너지 다소비 업종의 의존도 축소 등을 제시할 수 있다. 또한 본 논문에서 1인당 자본 투자량이 증가할수록 에너지 효율성이 낮아지는 결과가 나타났는데, 이는 자본집약적인 산업일수록 에너지 효율성이 낮아지는 경향이 있음을 시사한다. 따라서 정부에서는 기업들에게 기술진보를 유발시키는 자본 투자를 통해 에너지 효율성을 개선시키는 정책을 수립해야 할 것이다.

우리나라 정부는 기후변화협약에 제출한 최종 INDCs에서 2030년 BAU 대비 37% 온실가스를 감축하는 것으로 제출하였다. 따라서 온실가스 감축을 위한 수단으로 높은 에너지 효율성을 달성해야 하며, 부문별 에너지 절약을 통하여 지속 가능한 경제성장을 이루어야 할 것이다. 특히 제조업의 시도별 에너지 효율성의 차이는 경공업 위주의 생산구조, 또는 대기업 중심의 에너지 다소비형 산업구조 등 지역별 제조업의 생산구조에 의해 결정될 것이다. 따라서 제조업을 좀 더 세분화하여 지역별 에너지 효율성을 평가할 필요가 있다. 이를 위해서 각 부문별 중요소 에너지 효율성 추정에 대한 연구가 좀 더 활성화되기를 기대한다.

## 주

- 1) 2020년 이후 형성될 신(新)기후체제 하에서 각 국가들이 이산화탄소를 비롯한 온실가스 감축량을 자발적으로 정해서 유엔에 제출하는 것으로, '자발적 기여공약(Intended Nationally Determined Contributions, INDCs)' 또는 'Post-2020 감축공약'이라 불린다. 2015년 12월 파리에서 개최된 기후변화협약 당사국 총회(COP21)에서 각국이 제출한 INDCs에 대해서 논의가 되었으며 우리나라는 6월 말에 제출한 37%를 채택하였다.
- 2) 이는 기존 2020년 감축목표(목표배출량 5억 4300만)에서 사실상 후퇴한 목표치(목표배출량 5억 3590만)라는 논란도 있음. 한편, 2030년 온실가스 배출전망치 대비 37% 감축 중 25.7%는 국내에서 감축하고 11.3%를 국외에서 감축하는 것으로 되어 있음(출처: <http://climateactiontracker.org>)(최종

열람일: 2016년 11월 10일)

- 3) 중요소 에너지 효율성 측정과 관련된 해외 문헌들로 Hu and Wang(2006), Honma and Hu(2008), Hu and Lio(2012) 등이 있음.
- 4) 우리나라 지역 간 특성에 따른 생산성이나 효율성을 다룬 연구(고경환 · 김대철, 2016; 최영준 · 박현용, 2015; 최원철 외, 2013; 김의준 외, 2011)는 있으나 지역 간 에너지 효율성이나 생산성을 다루지는 않음.
- 5) 에너지효율성의 정의와 이에 대한 다양한 측면에서 접근한 연구는 문하나 · 민대기(2015), pp. 38-39를 참조.
- 6) 본 논문에서 Coelli(1996)의 DEAP Version 2.1 프로그램을 사용하여 DEA를 분석함.
- 7) 좀 더 자세한 내용은 이정동 · 오동현(2012), pp. 37-38 참조.
- 8) <http://kosis.kr>
- 9) 본 연구에서 사용되고 있는 에너지 다소비업종은 비금속광물 및 금속제품 제조업, 석탄 및 석유, 화학제품 제조업, 그리고 목재, 종이, 인쇄 및 복제업으로 구성되어 있음. (출처: <http://www.kemco.or.kr>)
- 10) 중국의 경우 Hu and Wang(2006)에서 TFEE의 값이 0.641~0.760, 그리고 인도의 경우 Mukherjee(2008)에서 TFEE의 값이 0.877~0.947로 추정됨.
- 11) 자본생산성이 높은 권역은 수도권, 동남권, 대경권 등이고, 낮은 권역은 충청권과 호남권이다. 지역별로 보면 서울(2.78)이 매우 높고, 광역시가 대체로 높은 반면, 광역도는 낮게 나타난다. 서울 자본생산성 섬유업의복분야 지수는 4.43로 나타남(박재곤 외, 2011).
- 12) 매크로스트 생산성지수를 사용하여 지역별 제조업의 중요소 생산성 변화를 분석한 결과에 의하면, 분석기간 동안 가장 높은 생산성 향상을 보인 지역은 울산시로 연평균 6.1%의 생산성 증가를 보이고 있으며, 그 다음으로 전남(4.9%) 순으로 나타나고 있음. 울산의 경우 높은 수준의 기술진보와 함께 유일하게 기술효율성 증가를 시현함으로써 기술진보가 중요소 생산성 증가를 견인하고 기술효율성 증가가 이를 뒷받침하는 모습을 보이고 있음(조윤기 · 배규한, 2012).
- 13) 문하나 · 민대기(2015)에 따르면, 에너지 사용량이 많아질수록 순수 기술 효율성에는 부정적인 영향을 주는 반면, 규모효율성에는 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석됨. 즉 에너지 사용량이 많을수록, 개별 기업의 에너지 효율성은 감소하지만, 규모에 의한 영향이 증가한 것으로 나타남.
- 14) 대구 지역에서 섬유, 의복 업종이 가장 많은 에너지를 사용하는 것으로 나타났는데, 이 기간 가운데 섬유·의복 업종이 자본 생산성과 자본 성장 기여도가 평균적으로 저조한 지역으로 나타났다(박재곤 외, 2011, p. 101). 따라서 생산성 저하가 에너지효율성에 부정적인 영향을 줄 것으로 판단

- 됨.
- 15) 분석의 편의를 위해 본 논문에서는 생산액을 에너지 사용량으로 나누었음. 따라서 이 값이 클수록 에너지 효율성이 크다고 볼 수 있음.
  - 16) 두 변수 간의 상관계수는 0.503임.
  - 17) 2014년기준 설비별 발전 전력량은 원자력(30%), 집단 및 대체에너지(6.4%), 화력(62.1%), 수력(1.5%) 등으로 전력 생산에 있어 화력, 즉 유연탄 의존도가 매우 높음.
  - 18) 총요소 에너지 효율성의 결정요인 분석에 있어 PFEE를 종속변수로 사용하여 추정한 결과는 TFEE를 종속변수로 사용한 추정 결과와 큰 차이가 나지 않았음을 밝힘.
  - 19) 전국 제조업의 전력 사용량은 2005년에 13,630천TOE이며, 2013년에 20,838천TOE로 52.9% 증가하였으며, 화석에너지(석유+석탄+도시가스+천연가스) 사용량은 2005년 71,632천TOE에서 2013년 92,542천TOE로 29.2% 증가함 (에너지경제연구원, 2014, 『에너지통계연보』, p.54와 p.73).

### 참고문헌

강상목, 2015, 『효율성 생산성 성과분석』, 경기: 법문사.

고경완 · 김대철, 2016, 지역 간 특성에 따른 소매점의 효율성 차이 및 결정요인 분석, 『생산성논집』, 30(1), pp.75-101.

김광욱 · 황석준, 2015, 제조업 에너지 생산성 분해분석, 『자원 · 환경경제연구』, 24(2), pp.411-433.

김의준 · 최은진 · 이유진 · 장재원, 2011, 투입산출 구조분해를 이용한 지역별 산업구조와 생산성의 연계성 분석, 『지역연구』, 27(4), pp.65-86.

문하나 · 민대기, 2015, DEA를 활용한 국내 기업의 에너지 효율성 분석, 『한국경영과학회지』, 32(3), pp.37-54.

박재곤 · 변창욱 · 정운선, 2011, 지역별 제조업 투자의 효율성과 효과성 분석, 『연구보고서 2011-591』, 산업연구원.

박창수 · 유동현, 2007, 한국 제조업에 대한 에너지절약 투자의 에너지 원단위 개선효과 분석, 『자원 · 환경경제연구』, 16(3), pp.485-510.

에너지경제연구원, 각년도, 『에너지통계연보』, 울산: 범신사.

에너지경제연구원, 각년도, 『지역에너지통계연보』, 울산: 범신사.

이정동 · 오동현, 2012, 『효율성 분석이론: DEA 자료포락 분석법』, 서울: 지필미디어.

이창근 · 최명섭 · 김의준, 2009, “우리나라 지역의 총요소 생산성과 결정요인 분석: DEA와 2SLS를 이용하여,”

『지역연구』, 25(3), pp.25-43.

조윤기 · 배규한, 2012, “지역별 제조업 총요소 생산성 변화와 요인분석,” 『GRI 연구논총』, 14(1), pp.87-102

중소기업 중앙회 중소기업 통계(<http://www.kbiz.or.kr>).

최영준 · 박현용, 2015, “기후환경변수와 한국의 지역별 총요소생산성의 연관성에 관한 연구,” 『생산성논집』, 29(2), pp.121-141.

최원철 · 이종근 · 이만형, 2013, “자료포락분석(DEA) 기법에 근거한 시·군의 도시공공서비스 공급 효율성과 영향요인 분석,” 『지역연구』, 29(1), pp.49-65.

한광호, 2005, “한국 제조업의 총요소 생산성, 효율성 변화와 기술진보: SFA와 DEA에 의한 추정,” 『한국경제연구』, 53(4), pp.119-146.

한국은행 경제통계(<http://ecos.bok.or.kr>).

Coelli, T.(1996), A Guide to DEAP Version 2.1 : A Data Envelopment Analysis (Computer) Program, Centre for Efficiency and Productivity Analysis, Department of Econometrics, University of New England. Working paper 96/08.

Farrell, M. J., 1957, The measurement of productive efficiency, 『Journal of the Royal Statistical Society』, Series A, 120(3), pp.253-290.

Honma, S., and Hu, J. L., 2008, Total-factor energy efficiency of regions in Japan, 『Energy Policy』, 36(2), pp.821-833.

Hu, J. L., and Lio, M.-C., 2012, Total-factor energy efficiency for regions in Taiwan, 『Energy Sources』 Part B, 7(3), pp.292-300.

Hu, J. L. and Wang, S. C., 2006, Total-factor energy efficiency of regions in China, 『Energy Policy』, 34(17), pp.3206-3217.

Li, M., 2010, Decomposing the change of CO<sub>2</sub> emissions in China: a distance function approach, 『Ecological Economics』, 70(1), pp.77-85.

Mukherjee, K., 2008, Energy use efficiency in the Indian manufacturing sector : An interstate analysis, 『Energy Policy』, 36(2), pp.662-672.

Patterson, M. G., 1996, What is energy efficiency

- concepts, indicators, and methodological issues,  
『Energy Policy』, 24(5), pp.377-390.
- Roy, J., Sathaye, J., Sanstad, A., Mongia, P., and  
Schumacher, K., 1999, Productivity trends  
in India's energy intensive industries, 『Energy  
Journal』, 20(3), pp.33-61.
- Wang, C., 2007, Decomposing energy efficiency change:  
a distance function approach, 『Energy』, 32(8),  
pp.1326-1333.
- Wang, C., 2011, Source of energy productivity growth  
and its distribution dynamics in China, 『Resource  
and Energy Economics』, 33(1), pp.279-292.
- Wang, Z.-H., Zeng, H.-L., Wei, Y.-M. and Zhang, Y.-X.,  
2012, Regional total factor energy efficiency: An  
empirical analysis of industrial sector in China,  
『Applied Energy』, 97, pp.115-123.
- Xiaoli, Z., Rui, Y. and Qian, M., 2014, China's total  
factor energy efficiency of provincial industrial  
sectors, 『Energy』, 65, pp.52-61.

게재신청 2016.11.21

심사일자 2016.11.24

게재확정 2017.01.27

주저자: 서윤석, 교신저자: 박창수