

한국 제조업 에너지효율성 분석*

Analysis of Energy Efficiency in Korean Manufacturing

윤정혜** · 강상목***

Junghye Yun · Sangmok Kang

요약: 본 연구의 목적은 2005년부터 2019년까지 우리나라 10대 제조업의 에너지 효율을 SFA 모형을 이용하여 분석하는 것이다. 본 연구는 제조업을 중심으로 7가지 기술비효율 설명변수 (에너지 및 환경자본, 수입액, 수출액, 매출액, 평균기온, 평균 최고·최고 기온)의 비중에 트랜스로그 함수를 적용한 SFA를 이용해 추정했다. 1단계 추정은 부가가치가 에너지 소비를 증가시키고 노동 및 유형고정자산이 에너지 소비를 감소시키는 것으로 나타났다. 2단계 추정 결과에서는 에너지 및 환경자본스톡의 경우, 비중이 증가할수록 음(-)에서 양(+)으로 U자형을 나타내 에너지 효율을 감소시킨다는 결과를 보였다. 아울러 산업별 에너지 효율 분석결과에서는 중화학공업뿐 아니라 에너지 집약적 산업에 속하는 1차 금속, 석유화학, 조립금속 등은 에너지 효율성이 높은 경공업보다 낮은 에너지 효율을 보였다.

핵심주제어: 에너지효율, 한국 제조업, 에너지소비, 에너지환경자본스톡, 확률변경분석

Abstract: The purpose of this study is to analyze the energy efficiency of Korea's top 10 manufacturing industries from 2005 to 2019 using the Stochastic Frontier Analysis (SFA) model. This study estimated the energy efficiency using SFA, which applied the translog production function to the seven explanatory variables for technical inefficiency (energy and environmental capital stock, imports, exports, sales, average temperature, average minimum temperature, and maximum temperature). Phase one estimates show that added value increases energy consumption, while labor and tangible fixed assets decrease energy consumption. According to the estimation results of the second stage, when the ratio of energy and environmental capital stock is high, the function's U-shape changes from negative (-) to positive (+), and energy efficiency decreases. The results of energy efficiency analyses in various industries additionally revealed that not only heavy-chemical industries, but also primary metals, petrochemicals, and assembly metals belonging to energy-intensive industries, showed lower energy efficiency than light industries.

Key Words: Energy Efficiency, Korean Manufacturing, Energy Consumption, Energy and Environment Capital Stock, Stochastic Frontier Analysis

* 본 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2020S1A5B8103268).

** 주저자, 부산대학교 경제학과 박사과정

*** 교신저자, 부산대학교 경제학과 교수

I. 서론

세계경제포럼(WEF: World Economic Forum, 2021)에 의하면, 전 세계적으로 영향을 받고 있는 코로나19와 함께 기후변화로 인해 오랫동안 존재하고 있는 교육, 재정 안정성, 고용 등의 격차로 국가 전반적인 불균형에 더 좋지 않은 영향을 줄 수 있다고 하였다. 한국은행(2020)은 기후변화 대응을 위해 국가 간 갈등이 발생하겠지만 환경규제의 강화 추세가 세계경제의 구조적 흐름이 되면서 주요 산업 및 시장교역에 영향을 줄 것이라고 하였다. 기후변화의 주요 요인은 온실가스 배출과 관련되어 있다. 한국의 온실가스 배출량은 2019년 기준 701.4백만톤 CO₂eq이며 1990년 대비 140%가 증가하였다.¹⁾ 배출량 중 가장 많이 차지하는 것이 에너지 분야이다. 에너지 분야는 총 배출량의 87.2%(2019년 기준)로 1990년 대비 154.5% 증가하였다. 한국은 에너지 분야 배출량의 99.3%를 차지하는 연료연소에 의한 이산화탄소 배출량만을 봤을 때 전 세계에서 7위이다(IEA, 2020).

한국의 온실가스 총배출량을 감축하기 위해서 에너지 분야를 집중적으로 줄일 필요가 있다. 국제에너지기구(IEA)에 의하면 한국의 1차 에너지공급의 85%가 화석연료이고, 84%의 높은 에너지수입의존, 그리고 IEA 국가들 중 산업 부문에서 최종에너지 중 55%를 사용할 정도로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 이러한 화석에너지사용으로 발생하는 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해서 에너지의 합리적인 소비를 유도할 수 있는 에너지효율 개선이 필요하다.²⁾ 특히 산업부문이 에너지 다소비업종(석유화학 등)으로 소비가 증가하면서 국가의 에너지원단위는 2017년 기준 0.159로 OECD 평균(0.105)보다 효율성이 낮은 수준에 있다.³⁾

한국은 제조업 비중이 높은 국가 중 하나이다. 지난해 코로나19로 인해

1) 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 이용하여 계산함. 이는 LULUCF 즉, 토지와 산림부분은 제외한 것임.

2) IEA는 에너지효율이 지속가능한 글로벌 에너지시스템의 첫 번째 연료이고 청정 에너지전환의 핵심으로 본다. 에너지효율의 지표로서 에너지원단위(총에너지/GDP)를 주로 사용하고 있다.

3) 에너지 효율이 향상될수록 에너지원단위는 낮아진다.

세계경제의 성장률(-3.3%)이 악화된 상황에서 한국 경제성장률은 제조업으로 인해 -1.0%로 하락 비율이 낮았다 (KIET, 2021). 한국은 유엔산업개발기구(United Nations Industrial Development Organization, UNIDO)의 세계제조업경쟁력(Competitive Industrial Performance Index, CIP) 지수에서 전세계 5위를 차지할 정도의 수준을 가지고 있다. 또한 동일한 통계자료에서 총 GDP에서 제조업 부가가치 비중과 총 수출에서 제조업 수출이 상위권을 차지하고 있었다. 2018년 기준으로 GDP(명목, 10억 달러)가 높은 주요 국가들(1위 미국, 2위 중국, 3위 일본, 4위 독일)과 비교했을 때 한국은 CO2 배출량은 7위, 최종에너지소비량은 10위, GDP는 12위였다. 하지만 제조업 비중(명목)은 다른 국가들(미국 11.2%, 중국 28.5%, 일본 20.8%, 독일 22.2%)보다 가장 높은 비중(29.1%)을 차지하였다. 주요 국가들과 비교했을 때, GDP에 비하여 한국의 에너지소비와 CO2 배출량이 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 설명했듯이 한국이 최종에너지소비에서 55%를 산업부문에서 사용한다는 점과 제조업 비중이 다른 국가들에 비해 가장 높다는 점과 관련이 있다. 이처럼 한국의 온실가스 총배출량의 대부분이 제조업 부문에서 발생하므로 제조업 부문에서 에너지효율 향상이 된다면 온실가스배출 감축에 영향을 미칠 수 있을 것이다 (이슬기, 2019).

따라서 본 연구의 목적은 한국의 경제성장과 직결되는 에너지 사용량과 이산화탄소를 배출하는 산업부문 중 가장 많은 배출 비중을 차지하는 제조업을 중심으로 에너지 효율성과 그 결정요인을 분석해 보고자 함이다. 특히 관련 결정요인들 중에서 에너지 및 환경자본스톡에 대한 투자가 증가할수록 에너지 효율에 미치는 영향에 초점을 두고자 한다.

제조업의 에너지효율 분석방법으로는 로그평균 디비지아 지수분해법(Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition, LMDI)과 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA), 확률변경분석(Stochastic Frontier Analysis, SFA)이 많이 사용되고 있다. 하지만 LMDI 방법은 생산효과, 구조효과, 에너지 집약도효과를 분석하는 것으로 에너지효율만을 분석하지 않

는다. 또한 DEA는 확률오차(random error)를 기술비효율 오차(technical inefficiency error)에 포함시키기 때문에 기술효율 추정에서 정확도의 한계가 있지만 SFA를 이용하면 이 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 그래서 본 연구에서는 에너지효율성 분석을 위해 확률오차를 고려한 SFA 접근법을 사용하고자 한다.

SFA 접근법을 사용한 제조업과 에너지 효율성에 관련된 선행연구들은 이전부터 존재하였다. 우선 제조업에 대한 이 접근을 사용한 국외 선행연구들은 Boyd(2008), Boyd(2014), Shui et al.(2015), Honma and Hu(2018), Sun et al.(2019), Boyd and Lee(2019), Hu et al.(2019), Na et al.(2019), Haider and Mishra(2021) 등이 있다.

Boyd(2008)는 미국의 제조업 부문에서 공장 수준의 에너지 사용효율을 측정하였다. 투입물 거리함수를 이용하여 에너지투입량을 종속변수로 두고 습식 옥수수 정제 공장의 사례를 통해 분석하였다. 전력과 연료라는 두 가지 유형의 에너지 효율성을 추정하였다. Boyd(2014)는 투입물 함수를 이용해 EPA의 ENERGY STAR 프로그램과 발전된 ENERGY STAR 에너지 성과 지표(Energy Performance Indicator, EPI)에 의해 측정된 자동차 제조 산업을 분석하였다. 2003-2005년 사이의 조립 공장의 에너지(화석연료, 전력) 효율성과 1997-2000년 사이의 결과를 비교하였다. Shui et al.(2015)는 산출물과 투입물 효율접근을 둘 다 사용하여 공장의 생산과 유틸리티 소비 데이터를 기반으로 자동차 제조업의 에너지 효율성을 추정하였다. Honma and Hu(2018)는 일본 47개 도도부현을 대상으로 2단계 투입물 SFA 접근법을 이용하여 메타프론티어 총요소에너지효율(Total-Factor Energy Efficiency, TFEE)을 측정하였다. 47개 지역을 대도시와 대도시가 아닌 2개의 그룹으로 나누어서 에너지 집약적인 제조업의 비중, 비제조업의 비중, 정부 서비스 등 8가지 환경적 변수들을 고려해 에너지효율을 측정하였다. Sun et al.(2019)은 2000년에서 2016년 기간 동안 중국의 26개 산업부문의 탄소 효율성 증대를 위한 배출감소 잠재력을 평가하였다. 온실가스배출 효율성을 향상시키기 위해 현재 기술보다는 새로운 기술을 통해 에너지 절약과 배출량 감소

가 산업구조에 필요하다고 하였다.

국내적으로 제조업의 에너지효율성에 대해 SFA 접근법을 이용한 선행연구로는 정용훈(2012), 민윤지(2015), 김길환·이지웅(2017), 서윤석(2017), 임승모·김명석(2017), 민윤지(2018) 등이 있다.

정용훈(2012)은 1990년부터 1999년까지의 한국의 광공업 통계조사를 통해 산업별 및 지역별로 기존의 에너지원단위와 SFA 방법을 이용한 에너지효율 결과를 비교·분석하였다. 김길환·이지웅(2017)은 투입물거리함수를 이용하여 2011-2015년 사이 석유화학제품을 사용하는 기업들의 에너지효율성을 연도별로 분석하였다. 또한 한국 석유화학 기업들의 재고관리 성과가 에너지효율에 미치는 영향에 대해서도 분석하였다. 민윤지(2018)는 1990년에서 2012년까지 OECD 10개국을 대상으로 에너지소비효율에 영향을 주는 요소로서 국내총생산과 최종에너지의 실질가격을 통제변수로 설정하였다. 또한 설명변수로서 각각의 모델에 에너지진단, 보조금, 저리 융자, 세금공제 및 감면, 비효율기기에 대한 세금부과를 포함하여 추정하였다.

그런데 이러한 선행연구들에서 한국의 제조업에 대해 SFA 방법론을 적용시켜 에너지 효율성 분석을 하였지만 기술적 비효율성의 결정요인까지 살펴보지는 못했다는 한계가 있다. 그래서 본 연구는 선행연구들과는 달리 한국의 산업만을 대상으로 확률변경함수의 추정과 기술적 비효율성 영향요인까지 고려할 수 있는 Battese and Coelli(1995)의 2단계 접근법을 채택하여 초월대수함수를 이용해 투입물 SFA 분석을 하였다는 점에서 차이가 있다. 세부적인 차이점으로는 3가지가 있다. 첫째는 한국의 제조업 에너지효율성을 기술적 비효율 효과까지 고려한 선행연구가 없다는 점이다. 둘째는 에너지 및 환경관련 설비투자에 대해 영구재고법을 사용해 누적시킨 에너지 환경자본스톡 비중 확대에 따른 에너지효율의 변화를 분석했다는 점이다.⁴⁾ 세 번째는 에너지 및 환경자본스톡 비중, 수입액 및 수출

4) 본 연구에서 영구재고법은 강상목(2002)의 방법에 따라 계산하였다. 우선 $K(1) = I(1)/(\delta + g)$ 를 이용해 초기 5년 동안의 자본스톡에 신규투자를 누적시켜 추정하였다. 단, $K(1)$ 은 1기의 자본스톡, $I(1)$ 은 1기의 에너지 및 환경관련 설비투자, δ 는 강상목

액 비중, 매출액 비중, 평균 기온, 평균 최저 및 최고 기온을 에너지비효율의 설명 변수로 두고 에너지 효율에 미치는 영향을 추정한다는 점이다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 한국의 산업 및 제조업에서의 본 연구에서 사용한 초월대수함수를 적용한 확률변경함수에 대한 방법론을 기술한다. 제3장에서는 에너지 및 환경자본스톡 비중을 1차식과 2차식으로 나누어 추정한 결과들과 에너지 효율성 결과들을 설명할 것이다. 제4장에서는 본 연구에 대한 결론을 기술할 것이다.

II. 이론모형

본 연구에서 사용한 SFA 방법은 Aigner et al.(1977)에 의해 처음 소개되었다. SFA는 에너지뿐만 아니라 일반적으로 효율성을 추정하는데 사용된다(Boyd, 2008). 본 연구에서는 Battese and Coelli(1995)에 따라 1단계에서는 확률변경함수의 추정과 기술적 비효율을 측정하고 2단계에서는 예측된 기술적 비효율 효과에 대한 회귀분석을 하는 2단계 접근법을 사용한다. 우선 Battese and Coelli(1995)가 제시한 확률변경생산함수의 기본 모형은 다음과 같다.

$$Y_{it} = \exp[f(K_{it}, L_{it}) + v_{it} - u_{it}] \quad (1)$$

여기서 Y_{it} 는 개별 산업 i 의 t 기 동안의 생산량, $f(K_{it}, L_{it})$ 는 생산함수를 나타낸다. v_{it} 는 확률오차로서 $iid \sim N(0, \sigma_v^2)$ 으로 분포하고 u_{it} 와 독립적이다. u_{it} 은 기술적 비효율성과 관련된 변수로서 비음이고 독립적이며 $iid \sim (z_{it}\delta, \sigma^2)$ 의 절단정규분포(truncated-normal distribution)를 하는 것

(2002) 등 선행연구에서 사용되고 있는 감가상각률 6%, g 는 초기 5년 동안의 신규투자의 연간성장률 의미한다. 이후 연속적인 자본스톡은 $K(t) = (1-\delta)K(t-1) + I(t)$, $t=2, \dots, T$ 을 이용해 추정하였다.

으로 가정한다. z_{it} 는 설명변수 (1 x m) 벡터이고, 기술적 비효율성과 관련된 변수이다. 그리고 δ 는 (m x 1) 벡터로 각각의 설명변수의 추정계수이다. 기술적 비효율성 오차항은 $u_{it} = z_{it}\delta + w_{it}$ 로 구체적으로 나타낼 수 있으며 생산함수 $f(K_{it}, L_{it})$ 와 함께 추정계수(δ)를 추정할한다. 만약 δ 가 0의 값을 가지게 된다면 z 설명변수들과 관련이 없어지면서 반정규분포(half-normal distribution) 형태가 될 것이다.

확률변경함수와 기술적 비효율성을 동시에 추정하기 위해 최대우도추정(Maximum Likelihood Estimation, MLE) 방법을 사용할 것이다. 우도추정은 $\sigma_s^2 \equiv \sigma_v^2 + \sigma^2$, $\gamma \equiv \sigma^2/\sigma_s^2$ 와 같이 분산변수로 나타낼 수 있다. 개별 산업 i 의 t 기 동안의 기술적 효율을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$TE_{it} = \exp[-u_{it}] = \exp[-z_{it}\delta - w_{it}] \quad (2)$$

한편, 에너지효율의 추정식을 설정하여 최대우도추정이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 투입물 거리함수를 이용해 초월대수함수형태(translog function)를 사용하고자 한다.⁵⁾ 거리함수 $D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i)$ 에 대한 1차 동차함수의 특성을 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = E_i \times D_E(K_i, L_i, 1, Y_i) \quad (3)$$

여기서 i 는 개별산업, K 는 유형고정자산, L 은 종업원수, Y 는 부가가치, E 는 에너지소비를 나타내며 식(3)의 양변을 로그취하면 다음과 같다.

$$\ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = \ln E_i + \ln D_E(K_i, L_i, 1, Y_i) \quad (4)$$

식(4)의 투입물 거리함수는 $D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i)$ 를 설명변수들로 구체적으

5) 이러한 유도과정은 Zhou et al.(2012, p.200)를 원용하였다.

로 초월대수 함수형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i \\ & + 0.5\beta_{KK} \ln K_i^2 + 0.5\beta_{LL} \ln L_i^2 + 0.5\beta_{EE} \ln E_i^2 + 0.5\beta_{YY} \ln Y_i^2 \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i \\ & + \beta_{LE} \ln L_i \ln E_i + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{EY} \ln E_i \ln Y_i + v_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 v_i 는 통계적 오차를 뜻하는 확률오차이다. 마찬가지로 투입물 거리함수에 1차 동차함수의 특성을 부여한 $D_E(K_i, L_i, 1, Y_i)$ 도 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \ln D_E(K_i, L_i, 1, Y_i) = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln 1 + \beta_Y \ln Y_i \\ & + 0.5\beta_{KK} \ln K_i^2 + 0.5\beta_{LL} \ln L_i^2 + 0.5\beta_{EE} \ln 1^2 + 0.5\beta_{YY} \ln Y_i^2 \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln 1 + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i \\ & + \beta_{LE} \ln L_i \ln 1 + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{EY} \ln 1 \ln Y_i + v_i \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 식(4)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다. 즉,

$$\ln E_i (\beta_{KE} \ln K_i + \beta_{LE} \ln L_i + \beta_{EY} \ln Y_i) = (1 - \beta_E) \ln E_i \quad (7)$$

식(7)을 다시 식(5)에 넣고 정리하면 최종적으로 에너지를 종속변수로 하는 다음과 같은 추정식을 얻을 수 있다.⁶⁾ 즉,

$$\begin{aligned} -\ln E_{it} = & \beta_0 + \beta_Y \ln Y_{it} + \beta_L \ln L_{it} + \beta_K \ln K_{it} + \\ & 0.5\beta_{YY} \ln Y_{it}^2 + 0.5\beta_{LL} \ln L_{it}^2 + 0.5\beta_{KK} \ln K_{it}^2 + \\ & \beta_{YL} \ln Y_{it} \ln L_{it} + \beta_{YK} \ln Y_{it} \ln K_{it} + \beta_{KL} \ln K_{it} \ln L_{it} + v_{it} - u_{it} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 식(8)의 최종 추정식을 이용하여 에너지 효율을 추정하고자 한다. 여기서 E_{it} 는 개별 산업 i 의 t 기 동안의 최종에너지소비량, Y_{it} 는 개별

6) 식(5)의 좌변의 거리함수는 식(8)의 확률변경함수에서는 우변의 비효율오차 u 로 표시된다.

산업 i 의 t 기 동안의 부가가치, K_{it} 는 개별 산업 i 의 t 기 동안의 유형고정 자산, L_{it} 은 개별 산업 i 의 t 기 동안의 종업원수를 나타낸다. u_{it} 는 기술적 비효율성 효과를 나타내는 설명변수이다. 1단계 추정을 한 이후 u_{it} 가 도출되면 종속변수로서 기술적 비효율 결정요소들을 설명하기 위한 2단계 모형의 추정식은 식 (9), (10)과 같이 각각 제시할 수 있다.

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 I_{it} + \delta_2 IM_{it} + \delta_3 EX_{it} + \delta_4 Sale_{it} + \delta_5 A T_{it} + \delta_6 L T_{it} + \delta_7 H T_{it} + \epsilon_{it} \quad (9)$$

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 I_{it} + \delta_1 I_{it}^2 + \delta_2 IM_{it} + \delta_3 EX_{it} + \delta_4 Sale_{it} + \delta_5 A T_{it} + \delta_6 L T_{it} + \delta_7 H T_{it} + \epsilon_{it} \quad (10)$$

여기서 u_{it} 는 기술적 비효율오차항이고 I_{it} , IM_{it} , EX_{it} , $Sale_{it}$, $A T_{it}$, $L T_{it}$, $H T_{it}$ 은 확률변경함수를 이용한 1차 추정에서 사용된 변수들로는 설명될 수 없는 에너지 비효율에 영향을 미치는 설명변수들이다. 각각 개별 산업 i 의 t 기 동안의 에너지 및 환경자본스톡 비중(I), 수입액 비중(IM), 수출액 비중(EX), 매출액 비중(Sale), 평균기온(AT), 평균최저(LT) 및 최고기온(HT)을 나타낸다. 에너지 및 환경자본스톡(I)을 포함한 기술적 비효율성의 결정요인들 모두가 본래 값에서는 유의한 결과를 얻지 못해, 본 연구에서는 모든 기술적 비효율성 결정요인들을 비중으로 변환하여 에너지 환경자본스톡 비중 확대에 따른 에너지효율 변화를 분석하였다. 식(10)은 I의 변곡점을 확인할 수 있게 I의 제곱항을 포함하고 있다는 점에서 식(9)와 상이하다.

III. 자료 및 실증분석

1. 자료의 구성

본 연구에서는 2005년부터 2019년까지 패널데이터를 이용해 한국 제조업 산업의 에너지 효율성을 측정하였다.⁷⁾ <표 1>은 본 연구에서 사용한

7) 설비투자액 자료가 2005년부터 존재하여 2005년부터 연구기간을 설정하였다.

개별 산업별 에너지소비, 부가가치, 종업원수, 유형고정자산의 기초 통계량을 보여주고 있다. 부가가치(Y), 유형고정자산(K), 종업원수(L)는 통계청(KOSIS)의 광업제조업조사 자료를 사용하였다.⁸⁾ 에너지소비량(E)은 국가 에너지통계종합정보시스템(KESIS)의 에너지통계연보 2020(에너지밸런스) 자료를 사용하였다. 에너지사용 변수에 해당되는 산업은 석유화학, 비금속, 1차 금속, 비철금속, 조립금속, 음식담배, 섬유 의복, 목재나무, 펄프인쇄, 기타제조업으로 구성되어 있다. Istans의 산업군 분류⁹⁾와 KESIS의 분류가 상이하여 한국표준산업분류를 참고해 KESIS의 분류 항목에 맞춰 조정하였다.¹⁰⁾

〈표 1〉 기초 통계량

변수		Mean	Std. Dev.	Min	Max
E	에너지소비 (단위: 1,000toe)	10,863	17,699	180	72,091
Y	부가가치 (단위: 백만 원)	14,500,000	10,100,000	1,195,378	38,300,000
L	종업원수 (단위: 명)	99,529	75,054	21,222	273,465
K	유형고정자산 (단위: 백만 원)	19,700,000	15,900,000	901,818	66,500,000

2. 변수 설명

본 연구에서는 기술적 비효율의 결정요인으로 사용되는 에너지 및 환경

8) 생산량에도 재화와 서비스가 포함되어 있지만 산업마다 상이한 제품과 서비스의 물량 차이로 인해 부가가치를 사용하여 추정하였다.

9) 산업연구원 Istans에는 에너지소비량 자료 외 통계청 등에서 제공하는 산업통계 자료들을 통합하여 제공하고 있으며 통계발행기관별로 다른 산업분류코드를 독자적인 Istans 코드로 연계시키고 있다.

10) KESIS 코드분류는 석유화학(1201 석유화학), 비금속(1304-6 유리, 세라믹, 시멘트), 1차 금속(1308 철강, 13010 주조), 비철금속(1309 비철금속), 조립금속(1311 조립금속), 음식담배(1401-2 음식료, 담배), 섬유 의복(1403-4 섬유, 의류), 목재나무(1406-7 목재, 제지), 펄프인쇄(1408 인쇄), 기타제조업(1410 기타 제조업)이다. 업종분류의 괄호 안은 Istans 산업분류이다.

자본스톡 비중(I), 수입액 비중(IM), 수출액 비중(Ex), 매출액 비중(Sale)은 Istats 자료¹¹⁾를 사용하였고 평균기온(AT), 평균최저기온(LT), 평균최고기온(HT)은 기상청의 전국 기온 자료를 사용하였다.¹²⁾ 7가지 변수들을 사용한 이유는 이들이 제조업의 생산활동과 관련된 변수들로서 특히 에너지효율과 관련성이 있을 수 있다고 판단하였다.

에너지 및 환경 자본스톡(I)으로 사용한 에너지 및 환경 관련 설비변수의 경우 본 연구에서 중점적으로 분석하는 변수이다. 일반적으로 에너지 환경 자본스톡은 에너지 효율화를 지향하므로 에너지 효율과 양(+)의 관계를 가질 것으로 기대한다. 그러나 이 자본스톡이 반드시 에너지시설과 환경시설의 에너지 효율화를 위한 설비투자만으로 구성된 것이라는 점은 명확한 언급이 없다. 본 연구에서는 연구기간 내 설비투자의 에너지 효율 관련 투자 비중 증가에 따른 결과를 분석하기 위해 영구재고법에 기초하여 에너지 및 환경 설비투자를 누적시킴으로써 에너지 환경자본스톡을 추정하였다.¹³⁾

수입액(IM) 및 수출액(EX)을 분리하여 포함한 이유는 수입품목 중 에너지관련 제품이 많다면 수입비중의 증가는 에너지비효율과 양(+)의 관계를 가질 수 있다. 또한 수출액 비중의 증가도 에너지비효율과 양(+)의 관계를 보인다면 동일하게 에너지 다소비 관련제품의 수출이 많이 이루어진다는

11) 에너지 및 환경관련 설비투자의 출처는 한국산업은행 설비투자계획조사, 수입 및 수출액자료는 관세청과 한국무역통계이다. 또한 각 산업의 비중은 각주 10번의 산업 분류 코드에 맞춰 필요한 산업들을 추출한 후 연도별 10개 산업의 합계에서 개별 산업을 백분율로 산출하였다.

12) 설비투자액은 한국산업은행 설비투자계획조사의 자료를 사용하였다. 냉난방도일은 기온변수로 많은 논문에서 사용되고 있지만 월별 자료만 존재하였다. 따라서 본 연구는 연도별 추정이 가능한 평균기온 관련 자료들을 사용하였다.

13) 영구재고법에 기초한 자본스톡추계는 강상목(2002)를 참조바란다. 설비투자액은 한국산업은행 설비투자계획조사에서 투자동기별 설비투자 자료를 기반으로 하고 있기 때문에 산업에서 필요한 요소들을 고려하고 있다. 한국산업은행의 설비투자계획조사 조사표에서 투자동기별 설비투자 항목은 설비능력확충(유형별: 신제품 생산, 설비의 확장, 수요별: 국내수요대비, 수출수요대비), 설비의 유지보수, 자동화, 에너지 및 환경관련 투자, 연구개발 투자, 기타로 구성되어 있다. 여기서 에너지 및 환경관련 투자는 에너지 절약 및 환경오염 감소를 위한 기존 시설 개선이나 설비 도입을 말한다.

추측이 가능하다. 특히 2018년 기준 한국은 GDP에서 수출의존도가 35%로 독일(39.5%)보다 낮지만 미국(8.09%), 일본(14.9%) 등과 비교해 높은 수준이다. 또한 제조업의 매출액(Sale)의 경우, 판매실적을 보여주기 때문에 에너지 효율과 관계를 확인해 볼 필요가 있다. 즉, 매출이 에너지 비용 제품이 아니라 에너지 사용이 높은 제품 중심으로 이루어지면 매출은 에너지비효율과 양(+)의 관계를 가질 것이다.

기온(AT, LT, HT)의 경우도 에너지효율에 영향을 미칠 수 있다. 딜로이트(2021)는 기온변화로 인해 노동자들의 업무 속도가 느려지고 더위로 인한 스트레스 등으로 노동 생산성이 낮아질 수 있다고 하였다. 기온은 제조업 현장에서 일하는 직원들의 생산력에 영향을 미치기 때문에 전체 제조업 생산성과 에너지 사용과도 연결될 것이라 고려하여 선택하였다.

3. 실증 결과

우선 <표 2>는 에너지효율을 측정하는 추정식의 결과를 보여준다. 모델 1은 I를 1차 함수로 둔 경우이고 모델 2는 I를 2차 함수로 둔 추정결과식이다. 본 연구에서 1차 추정식의 종속변수인 에너지소비가 음(-)의 값이므로 결과해석을 할 때 추정된 부호와 반대로 해석해야 한다. 모형의 적합성 검정을 위해 로그우도비 검정값(likelihood-ratio test, LR)을 이용하였다. LR 검정은 $LR = -2\{L(H_0) - L(H_1)\}$ 을 이용해 제약식 수를 자유도로 보는 카이제곱 분포를 통해 구한다. <표 2>의 가장 아래에 LR 검정값을 제시하였다. $L(H_0)$ ($\gamma = 0$)은 귀무가설로 만약 LR 검정 값이 1% 유의수준인 21.67을 넘지 않는다면 기각되어야 한다. 본 연구에서는 두 모형 모두 1% 유의수준의 임계값을 넘어 귀무가설이 기각되어 에너지비효율 효과를 가정하는 확률변경 함수를 사용하는 것이 적합하다고 볼 수 있다. 분산(Sigma-squared)의 값과 감마($\gamma = \sigma_u^2 / \sigma_v^2$)의 값에 기초할 때, 추정 방법 모두 1% 수준에서 유의하게 나타났다. 감마의 값을 통하여 전체 오차항은 거의 기술적 비효율오차로 설명할 수 있다.

우선 1단계 추정결과는 <표 2>와 같다. $\ln Y$ 는 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 즉, 산출량이 증가할수록 에너지 소비량이 증가한다고 볼 수 있다. 이는 산출량이 높아질수록 산업들이 생산활동을 위해 많은 자원을 투입하게 되면서 에너지 소비량도 함께 증가한다는 것이다. 반면 종업원 수($\ln L$)와 유형고정자산($\ln K$)은 1% 유의수준에서 음(-)의 값을 가졌다. 이는 노동력과 자본스톡이 에너지와 대체관계로 노동과 자본스톡이 증가할수록 에너지 소비량이 감소한다고 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 연구기간 동안의 에너지 절약 및 환경과 관련된 자본스톡 증가로 인해 영향을 받은 것으로 보인다.¹⁴⁾

<표 2> 1단계 추정결과

	모델 1		모델 2	
	계수	표준오차	계수	표준오차
constant	-91.118***	1.040	-97.192***	1.244
$\ln Y$	-32.157***	3.283	-17.057***	4.679
$\ln K$	30.319***	2.629	21.764***	3.975
$\ln L$	18.900***	2.449	10.863***	1.902
$0.5 \cdot \ln Y^2$	12.164***	1.772	7.792***	1.367
$0.5 \cdot \ln K^2$	2.327***	0.836	0.023	0.647
$0.5 \cdot \ln L^2$	2.363***	0.787	1.971***	0.659
$\ln L \ln K$	3.109***	0.608	3.107***	0.474
$\ln L \ln Y$	-5.833***	0.900	-5.039***	0.605
$\ln K \ln Y$	-6.295***	1.171	-3.449***	0.928
σ^2	0.262***	0.040	0.230***	0.030
γ	1.000***	0.000	1.000***	0.000
Log likelihood	-103.252		-88.274	
LR Test	127.463		157.420	

주) **, ***는 각각 5%, 1% 수준에서 유의함을 의미한다.

14) 실제 통계청 자료에 의하면 2005년과 2019년만을 비교했을 때 자본스톡은 10개 산업 모두 증가하였고, 노동력은 섬유·의복, 펄프·인쇄를 제외한 모든 산업이 증가하였다. 하지만 에너지 소비는 석유·화학, 1차 금속, 조립금속, 비철금속, 음식·담배 외에는 감소하였는데 이들 업종에서는 에너지효율화가 진행된 것으로 보인다.

〈표 3〉에서는 2단계의 에너지비효율의 결정요인을 제시하였다. 2단계의 종속변수는 에너지비효율의 오차이다. 모델 1과 모델 2의 결과를 비교하면 모델 1에서는 에너지환경자본스톡을 1차 변수만 두었고 모델 2에서는 2차 변수로 두어서 그 차이를 확인하였다. 두 모델은 에너지환경자본스톡(I) 변수를 제외하면 그 외 변수들의 추정계수 값은 약간의 차이를 보였으나 모두 같은 부호로 유의하였다.

첫째, 모델 1에서 1차 함수의 관계에서는 에너지환경자본스톡은 에너지비효율과 양(+)의 관계로 유의적이었다. 즉, 에너지환경자본스톡 증가는 에너지비효율을 증가시키는 것을 나타냈다. 이러한 관계에 변곡점의 존재여부를 확인하기 위하여 1변수를 2차식으로 둔 모델 2에서도 1의 1차 계수와 2차 계수가 모두 유의적으로 에너지비효율과 관계에서 U자형을 보여주었다. 엄밀히 말하면 U자형이기는 하지만 일정 I 수준 이후부터 음(-)에서 양(+)으로 매우 완만하게 우상향하는 형태라고 할 수 있다. 결과적으로 모델 1과 2에서는 I가 증가할수록 에너지 비효율은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 제조업에서 에너지 및 환경자본스톡의 증가는 에너지효율 증가에는 기여하지 못한 것으로 보인다. 이는 전체 산업에서 본 연구에서 사용되는 10개 산업을 포함한 전체 제조업의 에너지 및 환경관련 설비투자액 비중의 변화를 보면 알 수 있다. 2005년 86.77%였던 것에 비해 점차 하락하여 2019년에는 50.88%가 되었다. 즉, 연도별로 에너지환경설비투자액 비중이 감소했을 뿐만 아니라 에너지효율 개선에 초점을 맞춘 일관된 계획으로 이루어진 것은 아닌 것 같다.

둘째, 두 모델에서 수입액 비중(IM)은 1% 수준에서 유의하였으며 음(-)의 값을 가졌다. 즉, 수입액 비중이 증가할수록 에너지 효율은 증가하였다. 이는 제조업의 수입비중 가운데 에너지 비중이 감소하거나 에너지 다소비 관련 제품의 수입이 감소한 것으로 해석될 수 있다. 특히 이들 제조업 중 석유화학, 1차 금속, 비철금속 등 관련 석유나 석탄 관련 수입이 점차 감소한데 기인할 수 있다.

셋째, 수출액 비중(EX)은 수입비중과 반대로 에너지비효율과 양(+)의 부

호로 유의적이었다. 즉, 수출액비중의 증가는 에너지비효율을 증가시켰다. 이는 제조업의 수출을 위한 제품의 생산에서 에너지다소비업의 비중이 높거나 혹은 에너지를 많이 사용하거나 에너지투입이 많은 제품의 수출이 높다는 것을 의미한다. 이는 우리 제조업이 에너지다소비 업종을 중심으로 수출에 많이 의존한 것 때문인 것으로 보인다. 이와 관련 EU의 탄소국경조정제도(2026년 본격 시행예정)와 같이 탄소국경세가 국외에서 논의되고 있어 탄소배출량이 많은 제조업 부문에서는 친환경 관련 제품 개발과 같은 녹색제품 발굴이 필요하다. 그렇지 않으면 에너지 및 환경자본스톡 비중이 높아져도 수출관련 변수는 에너지 효율성을 개선시키기가 어려울 것이다.

넷째, 매출액 비중(Sale)도 에너지비효율과 양(+)의 부호로 1% 수준에서 유의하였다. 즉, 매출도 에너지사용이 높은 제품이거나 많은 에너지를 사용해서 생산하는 제품이 많이 판매되었다고 볼 수 있다. 이는 다른 관점에서 보면 10개 제조업 중 에너지 다소비 업종의 판매가 매출액의 비중을 주도한 것으로 보인다.

다섯째, 기온 변화와 관련된 변수들(AT, HT, LT)도 모두 1% 수준에서 유의한 값을 가졌다.¹⁵⁾ 전체 평균기온(AT)의 경우 음(-)의 부호를 가져 에너지 효율을 증가시키는 것으로 보인다. 반면 평균 최저 및 최고 기온은 양(+)의 값을 가졌기 때문에 에너지 효율을 감소시킨다. 전체 제조일수에서 최저기온이나 최고기온이 많이 나타날수록 에너지 사용은 증가할 것이므로 비효율은 증가한 것으로 보인다. 반면 평균기온은 전체제조일수에서 증가할수록 에너지 사용을 일정하게 유지할 수 있으므로 에너지효율을 증가시키는 것을 보여주고 있다.

15) 본 연구에서는 2005년-2019년 전국(45개 지점)의 연평균기온 자료를 이용하고 있다. 기상청(2019)에서는 연평균값을 1월-12월까지 전국의 매월 월평균값 합계를 평균해 산출한다. 또한 최고 및 최저 기온은 극값으로서 1년 동안 월별 극값 중에서 최대 혹은 최소값을 찾아 통계처리하고 있다.

〈표 3〉 2단계 추정결과

	모델 1		모델 2	
	계수	표준오차	계수	표준오차
constant	6.045***	1.405	3.491***	1.327
I	0.016**	0.007	-0.137***	0.021
I ²	-	-	0.002***	0.000
IM	-0.261***	0.034	-0.318***	0.018
EX	0.136***	0.018	0.159***	0.014
Sale	0.085***	0.030	0.093***	0.017
AT	-4.092***	1.156	-2.156***	0.907
LT	1.857***	0.537	0.966**	0.448
HT	1.850***	0.625	1.041**	0.463

주) **, ***는 각각 5%, 1% 수준에서 유의함을 의미한다.

〈그림 1〉은 2005년에서 2019년까지 에너지 및 환경자본스톡 비중이 증가했을 경우 10개 산업별 평균 에너지 효율을 분석한 자료이다. 2개의 모형을 비교했을 때 전반적으로 에너지 효율 관련 자본스톡 비중이 증가했을 경우(모델 2) 10개 산업의 에너지효율이 더 높았다. 따라서 에너지 효율 투자비중 증가에 따른 변화를 설명하기 위해 모델 2를 중심으로 분석하면 다음과 같다.

우선 에너지 및 환경자본스톡 비중이 증가할수록 음식·담배가 가장 높게 에너지효율성 값이 나타났다. 비철금속, 목재·나무, 기타제조, 섬유·의복 순으로 에너지효율이 높았다. 이들 업종(비철금속 제외)은 경공업으로 분류될 수 있다. 한국은 중화학공업 비중이 경공업보다 높다. 부가가치의 구성비를 비교했을 때 2019년 기준으로 중화학공업과 경공업 각각 83.4%, 16.6%이었고 이전 3년간을 비교했을 때도 비슷한 경향을 보였다. 기본적으로 경공업은 중화학공업보다 부가가치도 낮고 에너지소비가 적다. 에너지다소비 산업이 모여 있는 중화학공업에 비교하면 경공업의 에너지 소비 비중도 낮아서 에너지 효율성은 상대적으로 높다.¹⁶⁾ 그런데 중화학공업에

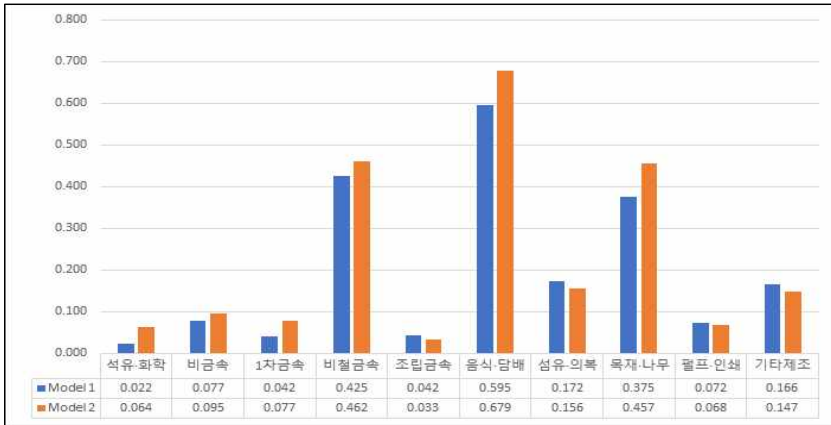
16) 본 연구의 최종에너지소비 자료를 이용해 중화학공업(조립·금속 포함)과 경공업(기타제조 제외)을 비교했을 때, 연구대상 기간 동안 중화학공업의 에너지소비량이 경공업보다 약 19.5배 많았다.

속하는 비철금속의 경우는 에너지효율성이 높게 나타났다. 이는 이 업종에서 에너지절약 및 환경친화설비 도입에 노력한 것으로 보인다. 실제 비철금속은 2005-2019년 사이 최종에너지사용 합계가 실증에 포함된 10개 산업에서 2번째로 낮았다.¹⁷⁾

반면 석유·화학, 펄프·인쇄, 1차 금속, 비금속 순으로 에너지효율이 낮았다. 이들 산업들은 앞서 언급했듯이 에너지다소비 업종(철강, 석유·화학 등)으로 중화학공업에 속한다. 한국은 에너지다소비 업종들을 대상으로 에너지효율과 온실가스 감축정책을 시행하고 있다. 즉, 에너지 효율 향상과 온실가스 감축을 위하여 사업장 효율목표관리, 온실가스배출규제(배출권거래제, 목표관리제), FEMS(공장에너지관리시스템) 활성화(설치보조금, 설치확인 세액공제) 등 온실가스 총량규제 중심으로 관리되고 있다(산업통상자원부, 2019) 특히 1차 금속, 비금속, 석유·화학들은 소재 산업 업종으로 친환경소재, 신소재 개발 투자 등 지속적인 성장을 전망하고 있다(산업통상자원부, 2020). 하지만 생산량이나 부가가치가 큰 업종들이기에 에너지소비가 커서 에너지효율정책을 시행하더라도 효율향상의 성과는 여전히 미미한 것으로 보인다. 펄프·인쇄가 포함되는 제지산업은 원자재 투입부터 가공 공정까지 대규모의 설비투자가 필요한 자본집약적인 산업이며 건조설비가 에너지 소비에서 많은 비중을 차지하고 있다. 윤병훈(2017)은 제지산업이 에너지 다소비 업종에 속하지만 해외 의존도가 높은 원자재의 가격변동과 국내의 ICT 발달로 인한 수요 감소로 생산량과 설비를 점차 축소하고 있다고 하였다. 또한 국내 제지산업이 성숙기에 있으며 공급과잉 해소를 위해 설비투자를 줄이며 관련 기업들은 수익을 계속 유지하고자 한다고 보았다. 그러므로 펄프·인쇄 제조업 분야는 정부의 에너지 효율 정책이나 자체의 에너지효율 노력으로 에너지가 감소한 것은 아니다. 오히려 시장규모의 축소 등 생산량 감소로 인하여 최종에너지소비도 줄고 에너지사용도 줄어들었지만 에너지효율은 여전히 좋지 못하다.

17) 정은미 외(2016)는 비철금속 산업의 생산량이 계속 증가하고 있지만 에너지절약 및 친환경적인 설비도입의 활성화로 탄소집약도가 낮아지고 있다고 설명하고 있다.

〈그림 1〉 산업별 평균 에너지효율



IV. 결론

본 연구는 2005년부터 2019년까지 한국 제조업의 에너지 효율성과 그 결정요인을 분석해 보았다. 초월대수함수를 적용한 확률변경모형을 이용하여 에너지효율을 측정하였고 에너지 및 환경자본스톡 비중(I), 수입액 비중(IM), 수출액 비중(EX), 매출액 비중(Sale), 평균기온(AT), 평균최저기온(LT), 평균최고기온(HT)이 에너지 비효율성의 결정요인으로 사용하였다. 실증결과를 요약하면 다음과 같다.

1차 추정식에서는 모든 변수들이 유의하였다. 기업의 부가가치는 양(+)의 값을 가졌으며 종업원수와 유형고정자산은 음(-)의 값을 가졌다. 에너지 비효율의 2단계 추정에서는 수출액 비중, 매출액 비중, 평균 최저 및 최고 기온은 양(+)의 영향을 주는 반면, 수입액 비중, 평균 기온은 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 2단계 추정 결과에 기초할 때, 에너지 및 환경자본스톡의 경우, 비중이 증가할수록 음(-)에서 양(+)으로 U자형을 나타내 에너지 효율을 감소시킨다는 결과를 보였다. 실제 본 연구 기간인 2005년부터 2018년 사이의 산업연구원의 자료에서 전체 제조업의 설비투자 가운데 에너지 및 환경 관련 투자 비중을 살펴보면 2005년(86.77%)부

터 상승과 하락을 반복해 2019년은 50.88%였다. 이는 기업들이 환경오염 감소를 위한 설비개선이나 신규 도입의 투자 비중을 줄여나갔으며, 에너지 효율성 증가에 기여하지 못한 것으로 보인다. 하지만 2019년 이후 기업들이 에너지 관련 설비투자 비중을 2020년 54.3%, 2021년 63.5%로 증가시키는 추세를 보이기에 정책적으로도 유도하면 향후 산업의 에너지 효율성 향상에 도움이 될 수 있을 것이다.

가장 에너지 효율성이 높게 나타난 업종은 음식·담배였으며 전반적으로, 비철금속, 목재·나무, 기타제조, 섬유·의복의 에너지효율성이 점차 증가하였다. 이들 업종들은 대부분 경공업에 속하며 16% 정도의 낮은 부가 가치를 가지고 생산성도 낮고 에너지 소비도 적어 에너지 효율성이 높게 나타난 것으로 보인다. 에너지 및 환경자본스톡 비중이 증가할수록 가장 에너지 효율성이 낮게 나타난 업종은 조립·금속이고 석유·화학, 펄프·인쇄, 1차 금속, 비금속 순으로 에너지효율이 낮았다. 1차 금속, 조립·금속, 석유·화학, 비금속은 같은 에너지다소비 산업에 속해있으며 한국 산업의 대부분을 차지하는 중화학공업인 동시에 제조업 비중이 높은 한국의 산업 경쟁력 향상을 위한 핵심이고 에너지다소비 문제를 해결하기 위해 FEMS 등 정부의 에너지효율 투자정책 및 지원이 집중되어 있다. 따라서 현재는 상승과 하락을 반복하는 에너지 및 환경 관련 설비투자로 인해 효과가 미미하여 낮은 에너지효율성을 가졌지만, 산업별 에너지효율의 실증결과에 서처럼 에너지 및 환경자본스톡 비중이 증가할수록 에너지효율성이 점차 증가할 것으로 예상된다.

실증 결과를 기반으로 한 본 연구에서의 시사점은 다음과 같다. 첫째, 에너지 및 환경자본스톡 비중을 증가시켜 산업전반의 생산성 향상과 부가 가치를 높이면서 에너지 효율성도 향상시키는 방향으로 투자 전환을 할 수 있도록 유도해야 한다. 이를 위해 현재 시행되고 있는 연간 에너지사용량 2,000toe이상인 에너지다소비 사업장을 대상으로 하는 자발적 에너지효율목표제를 정식 출범시켜 목표 달성 시 인센티브를 지급하는 등 다방면으로 산업계의 에너지효율을 장려할 제도 및 투자유인책을 마련할 필요가

있다. 둘째, 설비투자 내에 에너지 및 환경 관련투자가 일관되게 투자되지 못하고 경제상황이 좋지 않으면 감소하는 등 굴곡이 많았다. 향후에는 기업이나 정부 모두 에너지 효율향상이라는 목표를 수립하였으면 이를 경제 상황에 따라 중단하거나 후퇴시키지 말고 계획대로 일관되게 추진해 나가야 할 것이다.

본 연구는 에너지 소비 자료 획득의 한계로 제조업들 중 10개 산업만을 다루어 전체 산업의 에너지 효율성을 추정하지 못했다는 점과 기술적 비효율성의 결정요인들이 모두 유의하지 않아 비중으로 변환하여 에너지효율 변화를 추정하였다는 점에서 한계를 가지고 있다.

■ 참고문헌 ■

- 강상목, 2002, “중국의 지역성장분석,” 『경제학연구』, 50(4), pp.329-368.
- 기상청, 2019, 『기후통계지침』, 서울: 기상청.
- 김길환·이지웅, 2017, “재고관리성과가 에너지효율성에 미치는 영향에 대한 실증분석: 국내 석유화학 기업을 대상으로,” 『경영과학』, 34(3), pp.1-14.
- 딜로이트, 2021, 『한국경제의 터닝포인트_기후행동이 우리 경제의 미래를 주도한다』, 서울: 딜로이트안진회계법인.
- 민윤지, 2015, “한국과 OECD 국가의 에너지효율 정책효과 분석,” 박사학위 논문, 동국대학교, 서울.
- 민윤지, 2018, “우리나라와 OECD 10개국의 에너지효율정책의 경제성 분석,” 『e-비즈니스 연구』, 19(4), pp.183-194.
- 황경인, 2021, 『한국 제조업 경쟁력, 코로나19 경제위기의 버팀목』, 세종: 산업연구원.
- 산업통상자원부, 2019, 『에너지효율 혁신전략』, 세종: 산업통상자원부.
- 서윤석, 2017, “우리나라 제조업 부문의 지역별 에너지 효율성과 이산화탄소 감축 잠재력 분석,” 석사학위논문, 숭실대학교, 서울.
- 심성희, 2016, 『에너지효율향상 R&D 투자효과 분석 및 정책방향 연구』, 울산: 에너지경제연구원.
- 엄익천·이장재, 2020, 『국가혁신체계의 효율성 진단과 향후 방향』, 음성: 한국과학기술기획평가원.
- 윤병훈, 2017, “4차 산업혁명 시대, 종이의 생존전략”, 『산은조사월보』, 744, pp.44-77.
- 산업통상자원부, 2020, 『제1차 소재·부품·장비산업 경쟁력강화 기본계획』, 세종: 산업

통상자원부.

- 이슬기, 2019, “산업부문 에너지효율 개선정책의 평가와 과제-온실가스 감축의 관점에서”, 『월간 KIET 산업경제』, 11, pp.32-41
- 임승모·김명석, 2017, “확률별경모형을 이용한 지역별 에너지효율 측정-제조업의 구조가 에너지 효율성에 미치는 영향을 중심으로”, 『에너지경제연구』, 16(2), pp.89-118.
- 정용훈, 2012, 『에너지효율향상에 영향을 미치는 요인에 대한 기업별 회귀분석과 정책적 시사점-우리나라 제조업 통계조사』, 울산: 에너지경제연구원.
- 정은미 외, 2016, 『환경규제가 소재산업에 미치는 영향과 대응방향 - 온실가스배출 관련 제도의 영향분석을 중심으로-』, 세종: 산업연구원.
- 한국은행 조사국 국제경제부, 2020, “2020년 이후 글로벌경제 향방을 좌우할 주요 이슈 (I)_글로벌 이슈 [5]: 기후변화 관련 국제적 대응 노력 가속화”, 『국제경제리뷰』, pp.1-13.
- 한국통계진흥원, 2020, 『설비투자계획조사 2020년 정기통계품질진단 결과보고서』, 서울: 통계청.
- Aigner, D., C. A. K. Lovell, and P. Schmidt, 1977, “Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models,” *Journal of Econometrics* 6(1), pp.21-37. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
- Battese, G. E. and T. J. Coelli, 1995, “A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data,” *Empirical Economics* 20(2), pp.325-332.
- Boyd, G. A., 2008, “Estimating Plant Level Energy Efficiency with a Stochastic Frontier,” *The Energy Journal*, 29(2), pp.23-43. <http://www.jstor.org/stable/41323155>
- Boyd, G. A., 2014, “Estimating the Changes in the Distribution of Energy Efficiency in the U.S. Automobile Assembly Industry,” *Energy Economics*, 42, pp.81-87.
- Boyd, G. A. and J. M. Lee, 2019, “Measuring Plant Level Energy Efficiency and Technical Changes in the U.S. Metal-based Durable Manufacturing Sector using Stochastic Frontier Analysis,” *Energy Economics*, 81, pp.159-174. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.03.021>
- Haider, S. and P. P. Mishra, 2021, “Does Innovative Capability Enhance the Energy Efficiency of Indian Iron and Steel Firms? A Bayesian Stochastic Frontier Analysis,” *Energy Economics*, 95, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105128>
- Honma, S. and J. L. Hu, 2018, “A Meta-Stochastic Frontier Analysis for Energy Efficiency of Regions in Japan,” *Journal of Economic Structures*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40008-018-0119-x>
- Hu, B., Z. Li, and L. Zhang, 2019, “Long-run Dynamics of Sulphur Dioxide Emissions, Economic Growth, and Energy Efficiency in China,” *Journal of Cleaner*

- Production*, 227(1), pp.942-949. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.170>
- IEA, 2020, *KOREA 2020-Energy Policy Review*, Paris: International Energy Agency.
- Na, H., T. Du., W. Sun., J. He., J. Sun., Y. Yuan., and Z. Qiu, 2019, "Review of Evaluation Methodologies and Influencing Factors for Energy Efficiency of the Iron and Steel Industry," *International Journal of Energy Research*, 43(11), pp.5659-5677. <https://doi.org/10.1002/er.4623>
- Shui, H., X. Jin, and J. Ni, 2015, "Manufacturing Productivity and Energy Efficiency: A Stochastic Efficiency Frontier Analysis," *International Journal of Energy Research*, 39(12), pp.1649-1663. <https://doi.org/10.1002/er.3368>
- Sun, J., T. Du., W. Sun., H. Na., J. He., Z. Qiu., Y. Yuan, and Y. Li , 2019, "An Evaluation of Greenhouse Gas Emission Efficiency in China's Industry based on SFA," *Science of the Total Environment*, 690, pp.1190-1202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.093>
- World Economic Forum(WEF), 2021, *The Global Risks Report 2021 16th Edition*, Geneva: World Economic Forum.
- Zhou, P., B. W. Ang, and D. Q. Zhou , 2012, "Measuring Economy-wide Energy Efficiency Performance: A Parametric Frontier Approach," *Applied Energy*, 90(1), pp.196-200 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.025>

윤정혜: 부산대학교 대학원 경제학과 박사과정에 재학 중이다. 주요 관심분야는 효율성과 생산성경제학, 에너지경제학이다(jhyun925@pusan.ac.kr).

강상묵: 부산대학교 경제통상대학 경제학부 교수로 재직중이다. 연구 관심분야는 환경규제, 환경지수, 지속가능성성장, 환경생산성 등이다. 주요 발표 논문은 다음과 같다. "An empirical study on effective pollution enforcement in Korea" (Environment and Development Economics, 2004), "A sensitivity analysis of Korean composite environmental index (CEI)"(Ecological Economics, 2002)(smkang@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2022년 05월 19일
심 사 일: 2022년 05월 25일
게재확정일: 2022년 06월 12일