



## 확률적 변경모형을 이용한 우리나라 기업의 온실가스배출효율성 추정

김길환\* · 노동운\*\* · 이지웅\*\*\*†

\*계명대학교 경영학부 조교수, \*\*에너지경제연구원 선임연구위원, \*\*\*부경대학교 경제학부 조교수

### Estimating Greenhouse Gas Emission Efficiency of Firms in South Korea: A Stochastic Frontier Analysis Approach

Kim, Gilwhan\*, Noh, Dongwoon\*\* and Lee, Jiwoong\*\*\*†

\*Assistant Professor, Department of Business Administration, Keimyung University, Daegu, Korea

\*\*Senior Research Fellow, Korea Energy Economics Institute, Ulsan, Korea

\*\*\*Assistant Professor, Department of Economics, Pukyong National University, Busan, Korea

#### ABSTRACT

The goal of this study is to introduce greenhouse gas (GHG) Emission Efficiency (GEE) as the index to evaluate the effectiveness of GHG mitigation policies. To define and estimate GEE, we rely on the concept of multiple output distance function and employ stochastic frontier analysis, respectively. The data set used in this study comprises firm-level panel data from 251 firms operating in 15 industries under the regulation of the Energy Target Management System, and the critical variables for estimating GEE are GHG emissions, energy consumption, sales, tangible assets, and number of employees from 2011 to 2015. The main results are as follows. First, the average GEE of total firms improved in 2012 and then decreased in both 2013 and 2014. However, it improved in 2015 with establishment of the Emissions Trading Schemes. Second, the trend of average GEE across many industries was similar to that of total firms. Finally, the average GEE of the refining industry improved rapidly in 2013 and 2014 and reached a peak in 2015.

*Key words:* Greenhouse Gas, Efficiency, Distance Function, Stochastic Frontier Analysis

#### 1. 서 론

기후변화는 이번 세기에 인류가 직면하고 있는 가장 도전적인 문제 중 하나이다. 기후변화에 잠재적 위험은 1980년부터 꾸준히 제기되어 왔으며, 이에 대응하기 위하여 국제사회는 1997년에는 교토의정서 (Kyoto Protocol)를, 2015년에는 파리협정 (Paris Accord)을 체결하였다. 하지만 파리협정으로 규정된 신기후체제의 등장은 기후변화 대응의 국제적 협력에 관한 큰 틀이 마련되었다는 점에서는 상당한 의미가 있는 것은 사실이나, 신기후체제의 근간을 이루는 NDC (Nationally Determined Contribution) 달성 여부는 각 국가의 자발적 의사에 맡겨져 있다는 점에서 그 실효성에 대해서는 아직 불확실하다.

NDC 달성을 위한 각국의 노력은 온실가스 감축정책의 기획·실행으로 구현되어야 하며, 무엇보다 정책의 성과를 사후적으로 상시 평가하는 시스템을 갖추는 것이 전제되어야 한다. 그리고 관련 평가 시스템은 정교한 평가지표 개발을 통해 확립될 수 있다. 이런 측면에서 온실가스 감축정책의 효과성을 보다 정확하게 평가하기 위한 엄밀한 시스템 수립이 요구되며, 아울러 정교한 관련 평가지표 개발이 중요하다. 또한 현재 많은 국가에서 주로 사용되는 관련 평가지표가 평가대상이 되는 조직 (또는 기업)의 과거 단순 배출량에 근거한다는 점에서 정교한 평가지표의 개발이 요구된다고 볼 수 있다.

이러한 문제의식을 바탕으로, 본 연구는 온실가스배출 관련 평가지표로서 온실가스배출효율성 (Greenhouse gas Emission Efficiency)의 개념을 제시한다. 온실가스배출효율

† Corresponding author: [j.lee@pknu.ac.kr](mailto:j.lee@pknu.ac.kr) (Yongso-ro 45, Nam-gu, Busan 48513, S. Korea. Tel: +82-51-629-5321)

Received April 24, 2019 / Revised May 20, 2019 / Accepted June 3, 2019

성은 생산이론 (production theory)에 근거하여 투입물과 산출물을 동시에 고려한 상태에서 각 조직의 현재 온실가스 배출 수준을 최적상태의 배출수준과 비교하므로 계산된다. 이를 통해 각 기업의 규모 및 특성을 고려한 온실가스배출 수준을 알 수 있으므로 보다 정교한 평가지표를 얻을 수 있다. 분석을 위해 본 연구는 우리나라 기업을 대상으로 목표관리제 시행 직전 해인 2011년부터 배출권거래제 시행 첫해인 2015년까지의 총 5년간의 자료를 이용하였으며 2012년 기준 251개 관리대상 기업을 선정하여 분석하였다. 구체적으로 산업·에너지부문의 15개 업종 (반도체·디스플레이·전기전자, 석유화학, 철강, 조선, 섬유, 제지, 요업, 자동차, 발전에너지, 시멘트, 기계, 비철금속, 정유, 통신, 광업)에 포함된 기업들을 분석대상으로 삼았다. 한편, 온실가스배출효율성의 정의를 위해 거리함수 (Distance Function)의 개념을 사용하였다. 일반적으로 거리함수는 특정 관측치와 변경선 (frontier line)간의 거리를 표현한 것으로 특정 관측치를 제외한 나머지 관측치를 고정한 상태에서 변경선에 이를 때까지 특정 관측치를 확대 또는 축소할 수 있는 최대 비율값을 의미한다. 본 연구에서는 매출액, 유형자산, 노동자수 (특정 관측치를 제외한 관측치들)를 고정한 상태에서 온실가스배출량 (특정 관측치)을 최대한 줄일 수 있는 비율을 거리함수로 나타내었다. 한편 본 연구는 각 기업의 온실가스배출효율성 추정을 위해 모수적인 방법인 확률변경분석 (Stochastic Frontier Analysis)을 이용하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 본 연구와 관련된 선행연구를 살펴본 뒤, 제3장에서는 거리함수의 바탕을 둔 온실가스배출효율성을 제시하고, 온실가스배출효율성의 추정을 위한 모수적 방법론을 개관한다. 제4장은 추정된 결과를 바탕으로 온실가스배출효율성을 살펴보고 업종별로 비교·검토한다. 제5장은 주요 결과를 요약하고 시사점을 제시한다.

## 2. 선행연구

본 연구에서 제시하는 온실가스배출효율성 개념과 관련된 기존 연구는 크게 세 그룹으로 나눌 수 있다.

첫 번째 그룹은 생산과정 (production process)에서 필연적으로 발생하는 오염물질 또는 비소망재 (undesirable goods)의 생산 (또는 배출)에 관한 연구이다. 이와 관련된 대표적인 연구에는 미국 209개 발전소의 발전량과 발생하는 오염물질인 이산화황 (SO<sub>2</sub>)을 감안하여 각 발전소의 기술적 효율성 (technical efficiency)을 측정할 Färe et al. (2005)가 있다. 그

들은 비소망재를 줄이면서 동시에 소망재를 늘리는 개념의 방향거리함수 (Directional Distance Function)을 제시하였으며, 이후 Wang et al. (2013) 등 다수의 논문이 그들의 거리함수 개념을 차용하여 분석을 진행하였다. 유사한 접근 방식으로 Aso (2014)은 확률변경비용함수 (Stochastic frontier cost function)를 이용하여 스페인 146개 산업공장에서 배출되는 오염물질 (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)의 배출효율성을 측정하였으며, Reinhard et al. (2000)는 질소, 인산염, 총에너지 사용량 등의 자료를 이용하여 네덜란드 낙농업자들의 환경효율성을 분석하였다.

두 번째는 온실가스 또는 이산화탄소의 배출 관련 효율성을 분석한 연구들이다. 우선 Herrala and Goel (2012)는 전 세계 170개국의 GDP, 국토면적, 인구수 등이 이산화탄소배출에 미치는 영향을 계량적 방법으로 분석한 후 이산화탄소 배출효율성을 추정하였다. 그리고 Wang et al. (2019)는 중국의 지역 및 산업별 차이를 고려하여 이산화탄소배출 효율성을 추정하였다. Shortall and Barnes (2013)는 스코틀랜드 낙농업자들의 자료를 이용하여 에코효율성을 제시하였는데, 환경에 영향을 미치는 요소로 온실가스를 고려하였으며 기술적 효율성 (technical efficiency)이 높을수록 온실가스의 배출효율도 높다는 것을 밝혔다. 유사하게 Sintori et al. (2019)도 그리스 낙농업의 환경효율성을 평가하기 위하여 온실가스를 주요 요소로 고려한 뒤 기술효율성과 환경효율성 간의 유의한 양의 상관관계를 확인하였다. 본 연구는 온실가스배출효율성을 분석한다는 점에서 위에서 언급한 기존 연구들과 유사한 측면이 있으나 기업별 단위의 온실가스배출효율성을 분석하였다는 점에서 차별성이 있다고 볼 수 있다. 한편 국내 연구로는 Min (2011), Kang et al. (2014)이 있다. Min (2011)는 국내 45,505개 제조업체의 기술적 효율성을 분석하였고, 이를 바탕으로 온실가스감축잠재량을 추정하였다. 그러나 Min (2011)은 국내 제조업체를 분석대상으로 하였지만 온실가스배출량 자료를 직접적으로 이용한 것이 아니라 계산된 기술적 효율성 값을 활용하여 간접적으로 온실가스감축잠재량을 추정하였다. 본 연구는 국내 제조업체 기업들의 온실가스배출량 자료를 이용하여 배출효율성을 추정하였다는 점에서 Min (2011)과의 차이점이 있다. 한편, Kang et al. (2014)은 기업의 에코효율성 (Shortall and Barnes, 2013)을 추정하였으며 이를 바탕으로 온실가스배출량 및 에너지사용량 절감여부를 살펴보았다. 그러나 Kang et al. (2014)는 분석 대상을 35개 발전·에너지업종으로 한정하였으나 본 연구는 15개 업종의 251개 기업을 분석대상을 삼아 관련 논의를 확장하였다. 마지막으로 본 연구에서 제시하는 온실가스배출효율성의

이론적 기반을 제공하는 거리함수 및 추정기법으로 차용된 확률변경분석에 대한 연구가 있다. Shephard (1969)가 생산이론에 기반을 둔 거리함수의 개념을 제시한 이후, 관련 개념은 효율성분석에 널리 응용되어 왔으며, 특히 투입거리함수(input distance function)의 개념은 에너지효율분석에 자주 응용되어 왔다. 가령, Zhou et al. (2012)는 OECD국가의 에너지 효율을 투입거리함수의 개념을 통해 추정하였고 비모수적인 방법론과의 비교분석을 시도하였다. Lee and Zhang (2012)도 투입거리함수를 추정함으로써 이산화탄소의 암묵적 가격(shadow price)을 제시하였고 Lin and Long (2015)는 중국 석유화학산업의 에너지효율을 지역별로 추정·분석하였다.

효율성에 대한 모수적(parametric) 추정을 위해서는 거리함수에 대한 적절한 전환(transformation)이 필요한데, 이에 대한 방법을 소개한 연구로 Coelli and Perelman (1999)을 들 수 있다. 그들은 다수의 산출물 및 투입물이 존재할 경우에 산출거리함수 및 투입거리함수를 모수적으로 추정하기 위한 방법론을 제시하였으며, 본 연구는 그들이 제시한 전환방법을 채택하여 거리함수를 추정한다.

또한, 본 연구는 251개 기업의 2011-15년 자료를 이용하였기 때문에 패널자료를 고려한 기존 연구와도 밀접한 관련이 있다. 먼저 Schmidt and Sickels (1984)는 상수항에 비효율성항이 포함되었다고 가정한 후 고정효과모형(Fixed-Effect Model)을 고려하였는데 비효율성항에 특정 분포를 가정하지 않은 모형(Distribution-free model)을 제안하였다. 대조적으로 비효율성항에 확률분포를 가정한 후 패널자료에 대한 확률변경분석을 시도한 연구가 다수 존재한다(Battese and Coelli, 1992; Cornwell et al., 1990; Lee and Schmidt, 1993; Kumbhakar, 1990). 관련 대부분의 연구에서 비효율성항에 다양한 확률분포를 부여한 후 비효율성이 시간에 따라 변화한다고 가정하였다. 한편, Greene (2005)는 확률변경함수에 고정효과(true-fixed effect) 및 임의효과(true-random-effect)를 고려한 모형을 제시하였는데 패널모형에 널리 사용되는 고정효과(true-fixed) 및 임의효과(random-effect) 개념을 확률변경분석에 접목하였다. 본 연구는 Greene (2005)이 제시한 방법론 중 고정효과모형을 활용하여 온실가스배출효율성을 분석하였다.

### 3. 연구방법론

#### 3.1 거리함수와 온실가스배출효율성

온실가스배출효율성을 정의하기 위하여 일반적인 산출물

로써 소망재(desirable output)를 고려하는 동시에, 소망재가 생산될 때 부산물(by-product)인 비소망재(undesirable output)가 발생하는 상황을 고려하자. 본 연구에서는 온실가스 배출에 관한 효율을 측정해야 하므로 온실가스가 생산과정에서 발생하는 부산물인 비소망재로 간주된다. 그리고 다음의 조건부 생산기술함수를 가정하자.

$$P(\mathbf{X}) = \{(y, g) : (k, l, e) \text{를 투입하여 } (y, g) \text{을 생산}\} \quad (1)$$

여기서  $P(\mathbf{X})$ 는 자본( $k$ ), 노동( $l$ ), 에너지( $e$ )를 투입하여 소망재인 일반산출물( $y$ )과 비소망재인 온실가스( $g$ )를 생산하는 생산기술집합을 나타낸다.

그리고 비소망재인 온실가스( $g$ )에 대한 거리함수를 다음과 같이 정의하자.

$$D((y, g), (k, l, e)) = \max_{\lambda} \{\lambda(y, g/\lambda) \in P(\mathbf{X})\} \quad (2)$$

식(2)로 표현된 거리함수는 비소망재가 고려된 산출거리함수(output Distance Function)로서 투입물( $k, l, e$ )과 일반산출물( $y$ ) 수준을 유지한 상태에서 온실가스( $g$ )를 줄일 수 있는 최대값( $\lambda$ )을 찾게 된다. 그리고 위의 거리함수로부터 온실가스배출효율성(Greenhouse gas Emission Efficiency, 이하 GEE)을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$GEE = \frac{1}{D((y, g), (k, l, e))} \quad (3)$$

#### 3.2 확률변경분석 적용을 위한 거리함수의 전환

식(3)으로 정의된 온실가스배출효율성을 추정하기 위해 본 연구는 모수적 확률변경분석(parametric SFA)을 적용한다. 따라서 위에서 제시된 거리함수의 적절한 전환이 필요하다(Kumbhakar et al., 2015). 이를 위해 거리함수가 산출물 벡터에 대해서 선형동차조건(linear homogeneity condition)을 만족한다는 다음의 조건을 가정한다.

$$D\left(\left(\frac{y}{\beta}, \frac{g}{\beta}\right), (k, l, e)\right) = \frac{1}{\beta} D(y, g), (k, l, e) \quad (\text{단, } \beta > 0) \quad (4)$$

여기에서  $\beta = g$  놓은 뒤, 위의 식 양변에 자연로그를 취한 후 정리하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\ln D((y,g),(k,l,e)) = \ln(g) + \ln D\left(\left(\frac{y}{g}, 1\right), (k,l,e)\right) \quad (5)$$

그리고  $\ln D((y,g),(k,l,e)) = u$ 로 정의하면, 식 (5)는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$-\ln(g) = \ln D\left(\left(\frac{y}{g}, 1\right), (k,l,e)\right) - u \quad (6)$$

이후  $\ln D((y,g),(k,l,e))$ 가 초윌로그함수 (translog function)의 형태 (Coelli and Perelman, 1999)를 갖는다고 가정하고 오차항 ( $v$ )을 추가한 후 기업 ( $i$ ) 및 시간 ( $t$ )에 대한 접자를 추가하면 아래 식을 얻게 된다 (부록 참조).

$$\begin{aligned} -\ln(g_{it}) = & \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y}_{it} + \alpha_k \ln k_{it} + \alpha_l \ln l_{it} + \alpha_e \ln e_{it} + \frac{1}{2} \alpha_{kl} \ln k_{it} \ln l_{it} \\ & + \frac{1}{2} \alpha_{ke} \ln k_{it} \ln e_{it} + \frac{1}{2} \alpha_{le} \ln l_{it} \ln e_{it} + \alpha_{ky} \ln k_{it} \ln \tilde{y}_{it} \\ & + \alpha_{ly} \ln l_{it} \ln \tilde{y}_{it} + \alpha_{ey} \ln e_{it} \ln \tilde{y}_{it} + v_{it} - u_{it} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\tilde{y}_{it} = y_{it}/g_{it}$ 를 나타낸다. 본 연구는 산출물변수로 매출액을 사용하기 때문에  $\tilde{y}_{it}$ 는 배출원단위 (=온실가스배출량/매출액)의 역수로 정의된다고 볼 수 있다. 한편 위 식은 오차항 ( $v_{it}$ )과 비효율성항 ( $u_{it}$ )이 존재하는 확률변경함수의 형태로 추정이 가능한 식이 된다. 추정된 비효율성항 ( $u_{it}$ )을 이용하여 각 기업의 시간별 온실가스배출효율성을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$GEE_{it} = \exp(-u_{it}) \quad (8)$$

따라서 온실가스배출효율성은 0과 1사이의 값을 갖게 되며 1에 가까울수록 효율성이 높음을 의미한다.

### 3.3 확률변경함수의 추정

식 (7)의 추정을 위해 비효율성항 ( $u_{it}$ )과 오차항 ( $v_{it}$ )에 다음과 같은 확률분포를 각각 가정한다.

$$u_{it} \sim i.i.d.N^+(0, \sigma_u^2) \quad (9)$$

$$v_{it} \sim i.i.d.N(0, \sigma_v^2) \quad (10)$$

즉  $u_{it}$ 는 반정규분포 (half-normal distribution)를,  $v_{it}$ 는 표준정규분포를 따른다. 그리고  $v_{it}$ 에 대한 가정으로부터 로그 우도함수 (log likelihood function)를 구성한 후 최우추정법 (MLE: Maximum Likelihood Estimation)으로 식 (7)를 추정한 후 온실가스배출효율성인  $\exp(-u_{it})$ 을 얻을 수 있다 (부록 참조)

## 4. 분석 결과

### 4.1 분석자료와 추정방법

본 연구에서 사용한 자료는 크게 산출변수와 투입변수로 구성된다. 소망재인 일반산출물 ( $y$ )에 대한 변수로는 매출액을, 비소망재 산출물 ( $g$ )에 대한 변수로 온실가스배출량을 각각 사용하였다. 또한 투입변수인 노동 ( $l$ ), 에너지 ( $e$ )에 대한 변수로 노동자수, 에너지사용량을 각각 사용하였다. 특별히 자본 ( $k$ )에 대한 대리변수로 유형자산 중에서 기계 및 시설 (장비) 평가액을 사용하였다 (Imrohoroglu and Selale, 2014). 이를 위해 유형자산 총액에서 토지 및 건물 평가액을 제외한 값을 기계 및 시설 (장비)의 근사치로 간주하였다. 일반적으로 유형자산은 토지, 건물, 기계장치, 시설장치 등으로 평가된다는 점을 감안했을 때 토지 및 건물 평가액을 제외한 유형자산 평가액은 생산과정에 실질적으로 투입된 기계 또는 장비의 근사치로 볼 수 있기 때문이다 (Kim and Lee, 2017). 또한 우리나라의 특성상 기업들의 토지 및 건물에 대한 평가액 수가 실제보다 과도하게 높을 가능성이 있다는 점을 고려한다면 생산과정에 투입된 실질적 자본에 대한 대리변수를 얻기 위해 토지 및 건물평가액을 제외하는 것이 합리적일 것이라 판단하였다. Table 1은 투입 및 산출변수의 기술통계량을 보여준다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 에너지사용량과 에너지사용은 각각 Tera Joule 및 tCO2eq 단위로 측정된 자료이다. 그리고 매출액 및 유형자산 (토지 및 건물 평가액 제외)은 백만원 단위로 측정된 자료이며 노동자수는 연간 고용자수와 같다.

자료는 2012년 기준 목표관리제 대상 251개 기업을 대상으로 수집하였으며, 15개 업종별 기업 수는 Table 2에 나타나 있다.

온실가스배출량과 에너지사용량은 온실가스종합정보센터 (GIR)에서 제공하는 2011-15년 명세서 통계자료를 통해 얻을 수 있다<sup>1)</sup>. 동 기간의 기업별 매출액, 유형자산, 노동자수의 자료는 NICE 평가정보에서 제공하는 KIS-value 데이터베이스에서 획득하였다.<sup>2)</sup>

Table 1. Descriptive statistics of variables

Variable	Unit	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Number of Observations
Greenhouse Gas Emissions	tCO2eq	2,032,158	7,629,733	948	77,100,000	1,255
Sale	million Korean Won	3,930,000	11,500,000	234	158,000,00	1,255
Energy Consumption	TJ*	25567.62	87439.89	18	863,564	1,255
Tangible Assets	million Korean Won	1,320,000	4,590,000	216.00	52,400,000	1,255
Labor	person	2942.303	8843.793	16	101,970	1,255

\*Tera Joule

Table 2. Number of firms in each industry

Industry	Number of Firms	Industry	Number of Firms
Semiconductor · Display · Electronic	23	Power Generation	30
Petrochemical	57	Cement	14
Steel	23	Machinery	8
Shipbuilding	8	Nonferrous	12
Textile	11	Refinery	5
Paper	33	Telecommunication	4
Ceramic	11	Mining	1
Automobile	11	.	.

그리고 본 연구는 Greene (2005)이 제시한 고정효과 (true-fixed effects) 모형을 활용하였다. Greene (2005)은 각 의사결정단위에 더미변수 (dummy variables)를 고려함으로써 의사결정단위의 이질성 (heterogeneity)을 통제하는 모형을 제안하였는데, 본 연구는 각 의사결정단위 (업체) 대신 업종별 더미변수를 고려하였다. 이는 온실가스배출 또는 에너지 사용의 특징이 같은 업종에 속한 기업일수록 유사한 반면 타 업종 기업들과는 상이할 가능성이 높다는 점에 근거한다. 이를 고려하기 위해 식 (7)에 업종별 더미변수를 고려하였고 시간에 따른 변화수준을 통제하기 위해 시간변수 ( $t$ )를 추가로 부여한 후 최우추정법을 통해 추정을 실시하였다.<sup>3)</sup>

#### 4.2 확률변경함수 추정결과

확률변경함수 식 (7)에 대한 추정결과는 Table 3과 4에 정

리하였다. 우선 온실가스배출효율성의 존재여부를 통계적으로 살펴보기 위해 다음의 귀무가설<sup>4)</sup>을 설정하였다.

$$H_0 : \sigma_u^2 = 0$$

그리고 귀무가설에 대한 LR검정통계량<sup>5)</sup>이 1%수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다 (Table 3 참조). 따라서 온실가스배출효율성 항이 통계적으로 존재한다고 볼 수 있으므로 확률변경분석이 가능하다 (Kumbhakar et al., 2015). 또한, 노동자수 ( $l$ ), 유형자산 ( $k$ )과 에너지사용량 ( $e$ )의 곱하기 항 ( $\ln k \cdot \ln e$ ), 노동자수 ( $l$ )와 배출원단위역수 ( $\tilde{y}$ )의 곱하기 항 ( $\ln l \cdot \ln \tilde{y}$ )의 효과는 통계적으로 유의하지 않은 반면 나머지 변수들의 경우 통계적으로 유의하다는 것을 확인할 수 있다.

1) <http://www.gir.go.kr/home/main.do>

2) <https://www.kisvalue.com/web/index.jsp>

3) 자료에서 광업에 속한 기업의 수는 1개이지만 광업 업종의 온실가스배출 및 에너지사용 특징이 타 업종과 상이하다는 가정 하에 광업에 더미변수를 부여하여 추정을 하였다.

4) 귀무가설 ( $\sigma_u^2 = 0$ )은 모든 기업이 가장 효율적 수준에서 온실가스를 배출하고 있다고 것을 나타낸다.

5) LR검정통계량은  $-2\{\ln L(H_0) - \ln L(H_1)\}$  이고  $L(H_0)$ 는 귀무가설하에서의 로그우도 값을,  $L(H_1)$  대립가설하의 로그우도값을 나타낸다.  $L(H_0)$ 는 OLS (ordinary least square) 방법을 통해 얻게 되며  $L(H_1)$ 는 확률변경함수를 MLE로 추정된 후 얻게 된다.

Table 3. Estimation results of the stochastic frontier function

	Estimated Value	Standard Error
$\alpha_0$	-15.85790***	2.03936
$\alpha_{\tilde{y}}$	0.63045***	0.14585
$\alpha_k$	0.43435***	0.09187
$\alpha_l$	0.27147	0.17136
$\alpha_e$	-1.07439***	0.17260
$\alpha_{kl}$	-0.04073***	0.01432
$\alpha_{ke}$	-0.01619	0.01214
$\alpha_{le}$	0.03034*	0.01686
$\alpha_{k\tilde{y}}$	-0.02333***	0.00670
$\alpha_{l\tilde{y}}$	0.00190	0.00561
$\alpha_{e\tilde{y}}$	0.02837***	0.00601
$t$	0.02555***	0.00595
$\sigma_u$	0.10525***	0.01381
$\sigma_v$	0.05393***	0.00464
log likelihood	-275.98047	
LR statistic	35.84615***	

\*\*\* significant at 1% level  
 \*\* significant at 5% level  
 \* significant at 10% level

### 4.3 전체 분석대상기업의 평균 온실가스배출효율성 결과

전체 분석대상기업의 전 기간 그리고 연도별 온실가스배출효율성의 전반적인 수준을 살펴보기 위해 평균 온실가스배출효율성 (Average Greenhouse-gas Emission Efficiency, 이하  $AGEE$ )을 아래와 같이 각각 구하였다.

$$AGEE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T GEE_{it}}{NT}, i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$AGEE_t = \frac{\sum_{i=1}^N GEE_{it}}{N}, t = 1, \dots, T \quad (12)$$

Table 5에서 볼 수 있듯이  $AGEE$ 는 0.78986이다. 또한 최소 및 최대값을 살펴봤을 때 온실가스배출이 가장 효율적으

Table 4. Estimation results of dummy variables for industry

	Estimated Value	Standard Error
dummy2 (petrochemical)	-0.19529***	0.03998
dummy3 (steel)	-0.23157***	0.04370
dummy4 (shipbuliding)	-0.20592***	0.05594
dummy5 (textile)	-0.13003**	0.05124
dummy6 (paper)	-0.14839***	0.04282
dummy7 (ceramic)	-0.111420**	0.05130
dummy8 (automobile)	-0.07001	0.05088
dummy9 (power generation)	0.01096	0.05659
dummy10 (cement)	-0.69837***	0.05806
dummy11 (machinery)	-0.16250**	0.05672
dummy12 (nonferrous)	-0.18191***	0.04996
dummy13 (refinery)	-0.68129***	0.08366
dummy14 (telecommunication)	0.07911	0.07777
dummy15 (mining)	-0.85115***	0.13900

\*\*\* significant at 1% level  
 \*\* significant at 5% level  
 \* significant at 10% level

Table 5. Estimation of GEE

	Average ( $AGEE$ )	Standard Deviation	Min	Max
Value	0.78986	0.09049	0.26288	0.96991

로 이루어진 수준 (0.96991)이 가장 낮게 이루어진 수준 (0.26288)보다 약 3.5배 크다는 것을 알 수 있다.

한편, Table 6은 2011-15년  $AGEE_t$ 의 추이를 보여주고 있다. 2011-12년에  $AGEE_t$ 는 증가하였으나 2012-14년에는 감소추세를 보였다. 그리고 2015년에 다시 증가추세로 바뀐 것을 확인할 수 있다. 즉  $AGEE_t$ 의 추세만을 놓고 봤을 때 목표관리제 시행 첫해인 2012년에  $AGEE_t$ 가 개선되었으나 이듬해부터 악화되었고 배출권거래제 시행 첫해인 2015년에  $AGEE_t$ 가 다시 개선된 것을 알 수 있다.

### 4.4 업종별 평균 온실가스배출효율성 결과

업종별 온실가스배출효율성 ( $GEE$ )의 수준을 비교·검토하기 위해 업종별 평균 온실가스배출효율성 ( $AGEE$ ) 및 각 업종의 연도별 평균 온실가스배출효율성 ( $AGEE_t$ )을 고려하

였다. 동일하게 위에서 제시한 식 (11)와 (12)를 이용하여 값을 구하였다.

Table 7은 15개 업종의  $AGEE_t$ 와 그 순위를 보여주고 있다. 우선 광업의  $AGEE_t$ 가 0.81267로 15개 업종 중 가장 높다는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 본 연구에서 사용된 자료는 1개의 광업기업만을 포함하고 있어 광업전체의 온실가스 배출수준을 말하기 어렵다. 따라서 이후 업종별  $AGEE$  분석에서 광업은 제외하기로 한다. 그 다음으로 조선, 통신, 기계 등이 비교적 높은  $AGEE$  수준을 보였으며 석유화학, 발전에너지, 시멘트 등 에너지다소비업종은 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 한편, 철강의 경우 전체 업종에서 6번째의  $AGEE$  순위를 보여 다른 에너지다소비업종에 비해 온실가스배출효율성이 상대적으로 높았다.

업종별 연평균  $AGEE_t$  증가율을 살펴보면, 석유화학, 철강, 섬유, 자동차, 기계, 비철금속, 정유의  $AGEE_t$ 는 양의 연평균 증가율을 보여 온실가스배출효율성이 개선된 것을 알 수 있다. 반면 반도체·디스플레이·전기전자, 조선, 제지, 요업, 발전·에너지, 시멘트, 통신은 음의 연평균 증가율을 보여 온실가스배출효율성이 감소하였다. 한편, 정유의 경우

$AGEE_t$ 가 전체 업종 중에 11위로 비교적 낮은 순위를 보였으나  $AGEE_t$ 의 연평균 증가율이 3.17%로 가장 빠르게 개선된 업종임을 확인할 수 있다. 반면 시멘트 업종의  $AGEE_t$ 는 전체에서 13위로 낮은 순위를 보였고  $AGEE_t$ 도 -0.88%의 연평균 증가율을 보여 가장 빠르게 악화된 업종임을 알 수 있다.

Table 8은 업종별 전년 대비  $AGEE_t$  증가율을 보여준다. 목표관리제 시행 첫해인 2012년에 총 10개 업종 (반도체·디스플레이·전기전자, 석유화학, 철강, 조선, 섬유, 제지, 요업, 자동차, 기계, 통신)의  $AGEE_t$ 가 전년 대비 증가한 것을 확인할 수가 있다. 반면 4개 업종 (발전에너지, 시멘트, 비철금속, 정유)의  $AGEE_t$ 는 2012년에 전년 대비 감소하였음을 알 수 있다. 한편, 목표관리제 시행 이후 (2013년, 2014년)의 업종별  $AGEE_t$ 를 살펴봤을 때 2013년의 경우 5개 업종 (철강, 조선, 섬유, 제지, 기계, 비철금속)을 제외한 나머지 업종에서  $AGEE_t$ 가 감소하였고 2014년에는 1개 업종 (정유)을 제외한 나머지 업종의  $AGEE_t$ 가 감소하였다. 그리고 배출권거래제의 시행 첫해인 2015년  $AGEE_t$ 의 전년 대비 증가율을 살펴보면 2개 업종 (조선, 통신)을 제외한 모든 업종에서 양의 값을 보였다.

Table 6.  $AGEE_t$  and annual growth rate

Year	$AGEE_t$	Annual growth rate
2011	0.79165	.
2012	0.79484	0.40%
2013	0.79278	-0.26%
2014	0.77866	-1.78%
2015	0.79123	1.62%
Average annual growth rate	-0.01%	.

### 5. 결론 및 정책적 시사점

본 연구는 온실가스배출 관련 평가지표를 제안하고 분석하고자 온실가스배출효율성이라는 평가지표를 거리함수에 근거하여 정의하고 제시하였다. 그리고 정의된 온실가스배출효율성을 모수적으로 추정하기 위해 거리함수를 추정가능한 식으로 전환하여 확률변경분석을 적용하였다. 또한 Greene

Table 7. Industry  $AGEE_t$ , average annual growth rate and ranking

Industry	$AGEE$	Average annual growth rate (%)	ranking	Industry	$AGEE$	Average annual growth rate (%)	ranking
Semiconductor · Display · Electronic	0.79978	-0.17	8	Power Generation	0.78620	-0.45	12
Petrochemical	0.77389	0.42	15	Cement	0.78431	-0.88	13
Steel	0.80586	0.18	6	Machinery	0.80780	0.36	4
Shipbuilding	0.80913	-0.43	2	Nonferrous	0.79383	0.12	9
Textile	0.80366	0.69	7	Refinery	0.78626	3.17	11
Paper	0.78191	-0.85	14	Telecommunication	0.80909	-0.35	3
Ceramic	0.78919	-0.04	10	Mining	0.81267	-0.21	1
Automobile	0.80741	0.28	5				

Table 8. Annual growth rate of  $AGEE_t$  by industry

Industry	Semiconductor · Display · Electronic	Petrochemical	Steel	Shipbuilding	Textile	Paper	Ceramic
2012	0.5%	0.6%	0.9%	1.2%	1.7%	1.2%	1.0%
2013	-1.1%	-0.2%	0.5%	0.3%	0.1%	2.3%	-0.4%
2014	-1.6%	-0.4%	-2.0%	-1.0%	-0.5%	-7.5%	-1.9%
2015	1.5%	1.7%	1.4%	-2.2%	1.4%	1.0%	1.2%
Industry	Power Generation	Cement	Machinery	Nonferrous	Refinery	Telecommunication	Automobile
2012	-1.7%	-0.6%	1.3%	-0.2%	-0.5%	0.8%	0.3%
2013	-1.0%	-0.8%	0.1%	0.0%	-11.4%	-0.5%	-1.0%
2014	-1.4%	-2.1%	-1.5%	-1.3%	12.0%	-0.7%	-0.1%
2015	2.4%	0.1%	1.6%	2.0%	14.8%	-1.0%	1.9%

(2005)이 제시한 고정효과 (true-fixed) 모형에 근거하여 업종별 터미변수를 고려하므로써 업종별 상이성을 제거한 후 추정을 실시하였다. 분석대상은 2012년 기준 목표관리제에 포함된 총 15개 업종의 251개 기업이었으며 분석기간은 목표관리제 및 배출권거래제의 첫 시행연도 (목표관리제:2012년, 배출권거래제:2015년)가 포함된 2011-15년이었다. 주요 분석결과는 다음과 같다.

첫째, 전체 기업의 평균 온실가스배출효율성은 목표관리제 시행 첫해인 2012년에 개선되었다가 이후 2013-14년에 연속해서 감소하였으나, 배출권거래제가 시행된 2015년에 큰 폭으로 개선되었다. 특별히 2012년의 평균 온실가스배출효율성이 개선된 것은 기업의 전략적 행동에 기인한 것으로 볼 수 있다. 즉 시장에 적용되는 새로운 환경정책의 불확실성이 기업들로 하여금 온실가스배출에 대한 감축노력을 유인하게 했을 가능성이 있다. 일반적으로 시장의 불확실성은 기업들의 의사결정 및 관련 행동을 수동적으로 만드는 경향이 있다 (Wernerfelt and Karnani, 1987).<sup>6)</sup> 그러나 환경관련 규제의 불확실성은 기업들로 하여금 반대로, 적극적인 행동을 취하도록 하게 할 수 있다. 환경규제와 관련된 불확실성은 규제를 준수하지 못했을 경우 기업이 부담해야 하는 벌칙 (penalty) 수준에서 비롯될 수 있기 때문이다. 이러한 벌칙은 과태료와 같은 금전적 손해는 물론, 기업에 대한 소비자들의 부정적 이미지에서 비롯된 비금전적 손해까지 포함한다. 과태료의 경우 비교적 명시적으로 규제에 포함되어 있어 불확실성이 작다고도 볼 수 있지만, 장기적 관점에서 규제준수를 위해 기업 내부의 생산 및 운영과정에서 향후 소요될 비용에 대한 불확

실성이 항상 존재하기 때문에 최종적으로 어느 정도의 관련 총비용이 발생하는지는 불확실하다. 한편, 기업에 대한 부정적 이미지는 미래의 매출에 영향을 주기 때문에 관련 불확실성 또한 크다고 볼 수 있다. 이런 불확실성이 존재하는 상황에서 기업은 벌칙을 회피하기 위해 환경규제에 대응하기 위한 의사결정 및 관련 행동을 적극적으로 취할 가능성이 높다. 한편, 2013-14년에 평균 온실가스배출효율성이 감소한 결과 역시 목표관리제라는 환경규제의 불확실성측면에서 검토해 볼 수도 있다. 예컨대 목표관리제 시행 이후인 2013-14년 동안에 규제에 대한 기업들의 관련 경험치가 쌓이게 되고 이는 기업들이 이전에 체감하던 불확실성의 제거로 연결될 수 있다. 이러한 상태는 기업들의 온실가스 감축노력을 어느 정도 느슨하게 했을 수 있고 이것이 온실가스배출효율성 감소로 이어졌을 가능성이 있다. 관련하여 Moon (2016)은 다양한 불확실한 요인이 계획된 배출량과 실제 배출량의 차이를 유발할 때 불확실성의 증가는 기대배출량의 감소로 나타날 수 있음을 모형을 통해 보였다. 따라서 새로운 환경규제가 불확실성을 증가시켜 기업의 배출효율성 개선으로 이어질 수 있다는 본 연구의 설명은 Moon (2016)의 결과와 같은 맥락위에 있다고 볼 수 있다. 한편 배출권거래제가 시행된 2015년에 온실가스배출효율성이 큰 폭으로 개선되었으나 그 이후의 추세를 본 연구에서는 다루지 않았기 때문에 관련 정책의 불확실성이 어떻게 작용했는지 설명하기 어려운 측면이 있다.

둘째, 업종별 분석 결과 목표관리제 시행 첫해인 2012년에 10개 업종 (반도체 · 디스플레이 · 전기전자, 석유화학, 철강, 조선, 섬유, 제지, 요업, 자동차, 기계, 통신)의 평균 온실가스

6) Wernerfelt and Karnani (1987)는 기업이 위험회피적 (risk-averse)일수록 불확실한 상황에서 행동을 미루기 보다 (“act early”)는 “기다리기 전략 (wait-strategy)”을 취할 가능성이 높다고 지적하였다.



배출효율성이 개선된 반면 4개의 업종 (발전에너지, 시멘트, 비철금속, 정유)의 평균 온실가스배출효율성은 감소하였다. 2013년에는 5개 업종 (철강, 조선, 섬유, 제지, 기계, 비철금속)을 제외한 나머지 업종의 평균 온실가스배출효율성이 감소하였으며 2014년에는 1개 업종 (정유)을 제외한 나머지 업종의 평균 온실가스배출효율성이 감소하였다. 마지막으로 배출권거래제 시행 첫해인 2015년에는 2개 업종 (조선, 통신)을 제외한 전 업종에서 평균 온실가스배출효율성이 개선되었다. 즉 상당수 업종의 평균 온실가스배출효율성 추이결과가 위에서 제시한 환경규제 관련 불확실성에 대한 기업의 전략적 대응방식에 기인한 것으로 볼 수 있다.

셋째, 정유업종의 경우 연도별 온실가스배출효율성의 연평균 증가율이 다른 업종에 비해 월등히 높았다. 특별히 2014-15년 기간 동안 큰 폭의 증가수준을 보여 2015년의 경우 가장 높은 수준의 온실가스배출효율성을 기록하였다. 이 결과는 동 기간 동안 정유업종에 속한 기업들이 타 업종 기업들에 비해 온실가스배출효율성 측면에서 두드러진 성과를 보였음을 나타낸다.

본 연구의 시사점은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 본 연구에서 제안한 온실가스배출효율성은 기업의 온실가스 감축활동 및 성과를 평가하기 위한 정량적 지표로 다양하게 사용될 수 있으며 관련 정책의 효과성을 분석하기 위한 기본 자료로 사용될 수 있다. 일반적으로 기업 그리고 업종마다 에너지사용 그리고 온실가스 배출의 특성이 상이하여 단순히 온실가스 배출량만을 가지고 기업별, 업종별 성과를 살펴보는 데 무리가 있다. 따라서 기업 및 업종별 특성을 감안할 필요가 있는데 본 연구는 확률변경분석을 통해 기업별 변수 (매출액, 노동자, 유형자산)를 고려하였고 업종별 더미변수를 이용하여 업종별 상이성을 제거한 후 비교가능한 지표로써 온실가스배출효율성을 제안하였다. 이 지표는 향후 관련 성과 및 효과성을 평가하는데 방법론적 대안이 될 수 있을 것으로 보인다. 둘째, 업종별 온실가스배출효율성에 대한 검토를 통해 온실가스배출 관련 감축활동이 상대적으로 우수한 업종을 확인해 볼 수 있었다. 즉 본 연구의 주요 결과는 온실가스배출효율성의 개선을 위해 어느 업종을 참고해야하는지 관련 정보를 제공한다고 볼 수 있다. 물론 업종간의 에너지사용 및 온실가스 배출의 특징이 상이하여 타 업종을 직접적으로 벤치마킹하기가 어려운 측면이 있다. 하지만 본 연구는 업종별 상이성을 고려한 추정방법을 통해 이런 문제를 어느 정도 해결하였다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 온실가스배출효율성이 우수한 업종을 참고하는 것은 의미가 있을 것으로 판단된다. 구체적으로 정유업의 경우 2013년 이후 빠르게 온

실가스배출효율성이 개선된 것으로 나타나 정유업계의 온실가스 감축을 위한 대응노력을 살펴보는 것이 필요할 것으로 보인다.

한편 본 연구는 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 첫째, 배출권거래제 시행 첫해까지의 자료를 이용하였기 때문에 배출권거래제 이후의 온실가스배출효율성을 엄밀하게 분석하는데 제한이 있었다. 둘째, 앞서 살펴봤듯이 본 연구는 환경규제의 불확실성에 대한 기업의 전략적 대응이라는 관점에서 온실가스배출효율성의 추이를 설명하였다. 하지만 각 기업의 차별적 특징이 온실가스배출효율성에 영향을 줬을 가능성은 충분하다. 따라서 기업의 전략적 행동으로만 온실가스배출효율성의 추이를 일반화하여 해석하기에 어려운 측면이 있다. 또한 산업별 고유특성이나 산업별로 다르게 나타나는 정책의 차별적 효과 등이 산업별 온실가스배출효율성의 추이와 관련 결과에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 하지만 본 연구에서는 자료의 한계에 기인하여 이를 반영하지 못하였다.

위에서 언급한 한계점은 향후 후속 연구의 필요성을 부각시킨다. 우선 배출권거래제 시행 이후의 자료를 추가 확보하여 분석할 필요가 있다. 구체적으로 기업들의 온실가스배출량 및 에너지사용량에 대한 2016-17년 자료 및 동 기간의 기업자료를 이용하여 분석한다면 배출권거래제 이후의 온실가스배출효율성 추이를 보다 엄밀히 검토할 수 있을 것이다. 또한 기업별 특징 (생산 및 운영관리 특징, 에너지효율 또는 온실가스감축 관련 기술 보유 여부, R&D 투자액 등)들을 온실가스 배출에 영향을 줄 수 있는 설명변수로 고려하여 추정 모형에 반영한다면 기업측면에서 온실가스를 효과적으로 줄이기 위해 집중해야 할 부분이 어느 곳인지 분석할 수 있을 것이다. 아울러 산업별 특징 (산업집중도, 산업역동성 등)과 정책의 차별적 효과를 반영할 수 있는 지표 (산업별 목표치와 실제 배출량간의 차이 등)를 추가 설명변수로 고려한다면 산업별 분석결과를 보다 엄밀히 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 논문은 에너지경제연구원 기본연구보고서 '목표관리제 시행에 따른 온실가스 감축효율성에 대한 실증연구 (2016)'의 일부 내용을 대폭 발전시켜 학술논문 형태로 재구성한 글임을 밝힘. 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2017년)에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

- Aso AR. 2014. Estimation of stochastic frontier cost function model: An empirical analysis of industry pollution in Spain. *International. Proceedings of International Conference on Regional Science*; 2014 Nov 20-Nov 21.
- Battese GE, Coelli TJ. 1988. Prediction of firm-level technical efficiencies with a generalized frontier production function and panel data. *Journal of Econometrics*. 38 (3): 387-399.
- Battese GE, Coelli TJ. 1992. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India. *Journal of Productivity Analysis*. 3 (1): 153-169.
- Coelli T, Perelman S. 1999. A comparison of parametric and non-parametric distance functions: With application to European railways. *European Journal of Operational Research*. 117 (2): 326-339.
- Cornwell C, Schmidt P, Sickles RC. 1990. Production frontiers with cross-sectional and time-series variation in efficiency levels. *Journal of Econometrics*. 46 (1): 185-200.
- Färe R, Grosskopf S, Noh DW, Weber W. 2005. Characteristics of a polluting technology: theory and practice. *Journal of Econometrics*. 126 (2): 469-492.
- Greene W. 2005. Fixed and random effects in stochastic frontier models. *Journal of Productivity Analysis*. 23 (1): 7-32.
- Herrala R, Goel RK. 2012. Global CO2 efficiency: country-wise estimates using a stochastic cost frontier. *Energy Policy*. 45: 762-770.
- Imrohoroglu A, Selale T. 2014. Firm-level productivity, risk, and return. *management Science*. 60 (8): 2073-2090
- Kang IK, Shim GS, Kim JY. 2014. Eco-Efficiency Analysis of Target Management Enterprises for Green House Gases and Energy Using DEA. *Korean Corporation Management Rev*. 53: 1-25.
- Kim GW, Lee J. 2017. Analyzing the Impact of Inventory Management Performance on the Energy Efficiency in Korean Petrochemical Companies. *Korean Management Sci. Rev*. 34 (3): 1-14.
- Kumbhakar SC. 1990. Production frontiers, panel data, and time-varying technical inefficiency. *Journal of Econometrics*. 46 (1): 201-211.
- Kumbhakar SC, Wang H, Horncastle AP. 2015. *A Practitioner's Guide to Stochastic Frontier Analysis Using Stata*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lee M, Zhang N. 2012. Technical efficiency, shadow price of carbon dioxide emissions, and substitutability for energy in the Chinese manufacturing industries. *Energy Economics*. 34 (5): 1492-1497.
- Lee YH, Schmidt P. 1993. A production frontier model with flexible temporal variation in technical efficiency. In: Fried HO, Lovell CAK, Schmidt SS (ed.) *The measurement of productive efficiency: Techniques and applications*. Oxford: Oxford University Press: p.230-257.
- Lin B, Long H. 2015. A stochastic frontier analysis of energy efficiency of China's chemical industry. *Journal of Cleaner Production*. 87: 235-244.
- Min DK. 2010. A Study on the CO2 Reduction Potential by Means of Increased Efficiency of the Electricity. *Journal of Environ Policy*. 9 (3): 143-160.
- Moon Jin-Young. 2016. The impacts of decision order and uncertainty on emissions trading. *Environmental and Resource Economics Review*. 25 (3): 03-419
- Reinhard S, Lovell CK, Thijssen GJ. 2000. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. *European Journal of Operational Research*. 121 (2): 287-303.
- Schmidt P, Sickles RC. 1984. Production frontiers and panel data. *Journal of Business and Economic Statistics*. 2 (4): 367-374.
- Shepherd RW. 1969. *Theory of cost and production functions*. New Jersey: Princeton University Press.
- Shortall OK, Barnes AP. 2013. Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. *Ecological Indicators*. 29: 478-488.
- Sintori A, Lontakis A, Tzouramani I. 2019. Assessing the environmental efficiency of greek dairy sheep farms: GHG emission and mitigation potential. *Agriculture*. 9 (2)
- Wang QW, Zhou P, Shen N, Wang SS. 2013. Measuring carbon dioxide emission performance in Chinese provinces: a parametric approach. *Renewable and Sustainable Energy Rev*. 21: 324-330.
- Wang Yong, Duan F, Ma Xuejiao, He L. 2019. Carbon

- emissions efficiency in China:Key facts from regional and industrial sector. *Journal of Cleaner Production*. 2006: 850-869
- Wernerfelt B, Karnani A. 1987. Competitive strategy under uncertainty. *Strategic Management Journal*. 8 (2): 187-194.
- Zhou P, Ang BW, Zhou DQ. 2012. Measuring economy-wide energy efficiency performance: a parametric frontier approach. *Applied Energy*. 90 (1): 196-200.

부록

1. 식 (7) 도출

$\ln D((y,g),(k,l,e))$ 가 아래와 같은 초월로그함수 (translog function)의 형태를 갖는다고 가정하자 (Coelli and Perelman, 1999).

$$\begin{aligned} \ln D((y,g),(k,l,e)) = & \alpha_0 + \alpha_y \ln y + \alpha_g \ln g + \alpha_k \ln k + \alpha_l \ln l + \alpha_e \ln e \\ & + \frac{1}{2} \alpha_{yy} \ln y \ln y + \frac{1}{2} \alpha_{kl} \ln k \ln l + \frac{1}{2} \alpha_{ke} \ln k \ln e \\ & + \frac{1}{2} \alpha_{le} \ln l \ln e + \alpha_{ky} \ln k \ln y + \alpha_{ly} \ln l \ln y \\ & + \alpha_{ey} \ln e \ln y + \alpha_{kg} \ln k \ln g + \alpha_{lg} \ln l \ln g + \alpha_{eg} \ln e \ln g \end{aligned} \tag{13}$$

따라서 식 (6)과 식 (13)를 통해 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -\ln(g) = & \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y} + \alpha_k \ln k + \alpha_l \ln l + \alpha_e \ln e + \frac{1}{2} \alpha_{kl} \ln k \ln l + \frac{1}{2} \alpha_{ke} \ln k \ln e \\ & + \frac{1}{2} \alpha_{le} \ln l \ln e + \alpha_{ky} \ln k \ln \tilde{y} + \alpha_{ly} \ln l \ln \tilde{y} + \alpha_{ey} \ln e \ln \tilde{y} - u \end{aligned} \tag{14}$$

위 식에 오차항 ( $v$ )을 추가한 후 기업 ( $i$ ) 및 시간 ( $t$ )에 대한 첨자를 추가하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

2. 온실가스배출효율성 추정량

온실가스배출효율성인  $\exp(-u_{it})$ 에 대한 추정값은 Battes and Coelli (1988)가 제시한 아래의 식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$E[\exp(-\hat{u}_{it})|\epsilon_{it}] = \exp\left(-\mu_{*it} + \frac{1}{2}\sigma_*^2\right) \frac{\Phi\left(\frac{\mu_{*it} - \sigma_*}{\sigma_*}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu_{*it}}{\sigma_*}\right)} \tag{15}$$

여기서  $\phi(\cdot)$  및  $\Phi(\cdot)$ 는 각각 표준정규분포의 확률밀도함수 (PDF: probability density function)와 누적확률밀도함수 (CDF: cumulative density function)를 의미하며  $\epsilon_{it}$ ,  $\mu_{*it}$ ,  $\sigma_*$  는 아래와 같다.

$$\epsilon_{it} = v_{it} - u_{it} \tag{16}$$

$$\mu_{*it} = -\frac{\sigma_u^2 \epsilon_{it}}{\sigma_v^2 + \sigma_u^2} \tag{17}$$

$$\sigma_*^2 = \frac{\sigma_u^2 \sigma_v^2}{\sigma_v^2 + \sigma_u^2} \tag{18}$$