

전력부문에서 신재생발전의 온실가스 감축 효율성에 대한 분석

김영덕[†]

부산대학교 경제학부 교수

An analysis of the efficiency of renewable energy generation in contributing to greenhouse gas abatement

Kim, Youngduk[†]

Professor, Dept. of Economics, Pusan National University, Busan, Korea

ABSTRACT

This paper presents a theoretical model for evaluating the efficiency of renewable energy generation in contributing to greenhouse gas reduction during the low-carbon transition in power production. Through empirical estimation, it also examines how efficiently renewable energy generation has reduced greenhouse gas emissions among five public power generation companies in Korea. First, in relation to the low-carbon transition in power production, which involves replacing fossil fuel - based power generation with renewable energy, a production function was established to account for the contribution of greenhouse gas emissions to electricity generation. An optimization-behavior equation for power companies was then derived through a cost-minimization process, providing a theoretical framework for assessing the efficiency of renewable energy generation in reducing greenhouse gas emissions. Based on this framework, the greenhouse gas reduction efficiency of renewable energy generation was estimated and evaluated using data on power generation facilities and generation volume from five public power generation companies from 2015 to 2024. The estimation results indicate that the greenhouse gas reduction efficiency of renewable energy generation was not statistically different from zero in analyses using both facility-capacity and generation-volume data. This finding suggests that renewable energy generation has not yet achieved greenhouse gas reductions efficiently within the current low-carbon transition process in power production. The empirical results indicate the need to establish power systems and infrastructure that enable renewable energy to contribute more effectively to greenhouse gas reduction during the low-carbon transition.

Key words : Renewable Energy Generation, Greenhouse Gas Emissions, Abatement, Efficiency, Low-Carbon Transition

1. 서론

일반적으로 신재생 전력생산은 온실가스 배출 감축을 위한 중요한 발전 수단으로 알려져 있다. 실제로 전력부문에서 온실가스 배출을 줄이기 위해서는 신재생발전을 확대하는 것이 필수적이라고 여겨지고 있다. World Nuclear Association (2024)에 따르면, 발전원별로 건설, 운영, 폐기

까지 전 과정에서 발생하는 온실가스를 분석하여 풍력 발전은 석탄발전 대비 약 1/70 정도 온실가스 배출이 적으며, 태양광은 3/50 정도 온실가스 배출이 적은 것으로 보고하고 있다.¹⁾ 이와 같이 신재생발전은 전력생산에서 온실가스 감축의 중요한 수단이라고 할 수 있다. 이에 따라 우리나라에서도 온실가스 감축 수단으로 발전부문에서 화석 에너지에서 신재생에너지 발전으로의 전환이 이루어지고

[†]Corresponding author : ydkim@pusan.ac.kr (Busandaehak-ro 63beong-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea. Tel. +82-51-510-3777)

ORCID 김영덕 0000-0001-5609-8754

있으며, 신재생에너지 발전이 온실가스 감축에 얼마나 기여하는지에 대한 실증적 연구들이 진행되고 있다.

우리나라의 신재생에너지 발전이 온실가스 배출 저감에 미치는 영향을 실증적으로 추정한 연구인 Kim and Kim (2015)에 따르면, ARDL 모형으로부터 추정한 결과 신재생에너지 보급 확대에 발전부문에서 신재생에너지 발전 비중이 1% 상승함에 따라 우리나라 총 CO₂ 배출량을 16.8% 감소시킨 것으로 보고하고 있다. Kim (2018)의 연구에 따르면, 2010~2015년 기간 동안 우리나라 발전 부문에서 온실가스 배출을 요인 분해를 통해 실증분석하였는데, 전체 발전량 중에서 화석연료 발전 비중이 감소함에 따라 온실가스 배출을 저감하는 발전믹스효과가 우리나라 온실가스 배출을 감소시키는 요인으로 작동하고 있으며, 이러한 효과는 원자력 및 신재생 발전의 확대가 작용한 것으로 분석하고 있다. Lee and Kang (2025)의 연구는 우리나라 지역패널자료를 이용하여 태양광과 풍력을 중심으로 신재생에너지의 온실가스 감축 영향을 실증적으로 추정하고 있다. 이에 따르면 태양광과 풍력 발전이 각각 1% 증가하면 온실가스 배출량은 각각 0.041%와 0.119% 감소하는 것으로 추정하고 있다.

이러한 실증 연구들은 대체로 우리나라 전력발전부문에서 신재생에너지 발전이 우리 경제에서 온실가스 감축에 어떻게 기여했는지에 대해서 분석하고 있지만, 신재생 발전이 전력부문에서 온실가스를 감축하는데 얼마나 효율적으로 기여했는지에 대해서는 충분한 정보를 제시하고 있지 못하는 못하고 있다. 예를 들어, 신재생 발전의 간헐성 등의 영향이 신재생 발전의 온실가스 감축 효과에 제약을 주기도 한다는 연구들이 제시되고 있다.²⁾ 만약 이러한 제약 요인들이 존재한다면 신재생 발전의 온실가스 감축효과가 기대한 것보다 그 효과가 낮을 수도 있으며, 전력시스템에서의 온실가스 감축의 효율성을 제한하는 것으로 나타날 수도 있다. 사실 전력시스템에서 발생하는 온실가스감축 효과의 효율성을 직접적으로 추정하는 것은 쉽지 않다고 할 수 있다. 이러한 의미에서 우리나라 전력시스템에서 온실가스 감축효과에 대한 신재생발전의 효율성을 실증적인

자료를 통해 추정하는 것은 의미를 가진다고 볼 수 있다.

본고에서는 현재 전력시스템 하에서 전력발전부문에서의 신재생발전이 얼마나 효율적으로 온실가스 감축에 기여했는지를 파악하기 위하여 신재생발전의 온실가스 감축 효율성 파라미터를 포함하는 전력생산함수를 설정하였다. 이를 통해 발전회사가 통상적으로 전력생산을 위해 발전소를 운영하는 적정화 모형을 이용하여 신재생발전의 온실가스 감축 효율성 파라미터를 추정할 수 있는 추정식을 이론적으로 도출하고, 발전공기업의 자료를 이용하여 신재생발전의 온실가스 감축 효율성을 실증적으로 추정하고자 하였다.

본고의 구성은 다음과 같다. 우선 다음 장에서는 신재생발전의 온실가스 감축효과에 대한 효율성 파라미터를 추정할 수 있는 간단한 이론적 모형을 살펴보았다. 3장에서는 이론 모형에서 도출한 추정식을 가지고 5개 발전공기업의 자료를 이용하여 신재생발전의 온실효과 감축 효율성을 추정하고 추정 결과를 제시하였다. 마지막으로 4장에서는 추정 결과를 바탕으로 신재생발전의 온실가스 감축 효율성에 대한 시사점을 도출하였다.

2. 신재생발전의 온실가스 감축 효율성 분석 모형

신재생발전이 전력생산에서 온실가스 배출을 효율적으로 저감하는 역할을 하는 것인지 분석하기 위하여 우선 단순한 형태의 이론적 모형을 구성하고 이를 통해 실증적 분석을 위한 추정식을 도출한다. 우선, 단순한 형태의 이론 모형을 구성하기 위하여 다음과 같은 전력수요식으로부터 출발한다. 전력수요는 Taylor (1975)와 Yoo (1996)의 연구에 따라 다음과 같이 전력가격과 소득의 함수로 가정한다.

$$X_d = p^{-\eta} Y^{\gamma} \quad (1)$$

여기서 X_d 는 전력수요를, p 는 전력가격을, Y 는 소득을

1) World Nuclear Association (2024)에 따르면, Schlömer (2014)의 자료를 인용하여, 전 생애주기에서 발전량당 이산화탄소환산량(gCO₂eq/kWh)을 보고하였는데, 중간값(median)으로 석탄은 820, 천연가스 490, 태양광 41~48, 풍력 11~12, 원자력 12 gCO₂eq/kWh로 제시하고 있다.

2) Do et al. (2023)의 연구에 따르면 신재생에너지 발전의 비중 증가 목표에 따라 비례적으로 예비력을 확보하는 방식을 취하면 유연성 자원의 상시 가동에 따른 발전비용 상승과 원자력이나 신재생 발전 자체의 발전제한 등에 따라 비효율이 발생할 수 있음을 제시하고 있다. 한편, Blondeau and Mertens (2019)의 연구에 따르면 신재생발전의 간헐성이 온실가스 감축 효과를 제약하는지에 대한 연구는 더 풍부한 연구들이 이루어져야 함을 제시하면서, 가스복합발전소에서 신재생발전의 간헐성이 온실가스 감축효과를 제약하는 정도는 미미하지만 NO_x의 경우에는 제약이 유의하다고 보고하고 있다.

의미한다.

한편, 전력공급을 위해 전력회사는 다음과 같은 방식을 통해 전력을 생산한다고 가정한다. 전력생산을 위한 투입 요소로 자본설비와 환경자원 변수가 설정된다.³⁾ 오염물인 온실가스 배출은 생산과정에 투입된 청정대기의 사용량으로 해석된다. 이러한 생산함수를 가정함으로써 신재생발전이 화석연료 발전을 대체하면서 온실가스 배출을 효과적으로 감축하는지를 분석할 수 있는 틀이 제공된다. 이 생산함수에서 신재생발전 설비의 증대는 화석연료 발전을 줄이면서 화석연료 발전으로 사용하는 대기의 량 이상으로 전력생산에 기여함으로써 화석연료 자본을 줄이고 온실가스배출량을 줄여 생산에 기여하는 효과를 가지는 것으로 해석할 수 있다.⁴⁾

$$X_s = (K - R)^\alpha (E + \phi R)^\beta \quad (2)$$

X_s 는 전력 공급을, K 는 전통적 자본스톡을, R 은 배출저감 활동으로서의 신재생발전을, E 는 온실가스 배출량을 의미한다. 따라서 $K - R$ 은 화석연료 자본스톡을 의미한다고 볼 수 있다. 여기서 $\alpha + \beta \geq 1$ 을 가정하며, ϕ 는 배출저감의 효율성 파라미터를 의미한다. 이 생산함수는 배출저감 활동인 신재생발전 R 이 증가하면 전통적 화석연료 발전설비의 발전기여도를 줄일 뿐만 아니라 온실가스 배출을 대체하는 효과가 있음을 표현한다. 이는 저탄소발전시스템으로의 전환에서 신재생발전의 화석연료 대체를 효율성 측면에서 평가할 수 있는 틀을 제공한다. 여기서 $\phi > 0$ 을 가정한다.⁵⁾ $\phi = 0$ 이라면, 신재생발전은 화석연료 발전을 대체하기는 하지만 온실가스 감축을 효율적으로 감축하지는 않는 것으로 해석할 수 있다. 다시 말해서 기존의 전력시스템 하에서 신재생발전이 화석연료발전 자본을 대체하지만 전과 같은 전력생산에 대해서 온실가스배출의 감축이 일어나지는 않는다고 할 수 있다. 이는 기존의 전력시스템 하에서 기존의 동일한 전력을 생산하는 경우 신

재생발전이 자본을 대체하지만 온실가스 배출을 감축하는 것에는 기여하지 못하는 것을 의미하므로 기존의 전력시스템 하에서 신재생발전의 증대가 온실가스 배출량 감축에 효율적으로 기여하지 못한다고 할 수 있다. 한편, 전력회사는 전력을 생산하고 공급하기 위하여 다음과 같이 비용을 지불한다고 가정한다. 즉, 총비용은 다음과 같다.

$$TC = rK + mE + sR^\theta, \quad \theta > 1 \quad (3)$$

r 은 전통적 자본에 대한 단위당 비용, m 은 배출에 대한 단위당 비용을 의미한다. $\phi m > r$ 을 가정한다.⁶⁾ 한편, 배출저감활동비용은 저감 활동이 커짐에 따라 비용이 더 증대하는 형태를 가진다. 이는 $\theta > 1$ 임을 의미한다. 다시 설명하면, 저감활동을 위해 전통적 자본을 더 작게 사용한다면 더 큰 설치비용을 들여야 하는 것으로 이해할 수 있다. s 는 신재생발전의 비용조정계수로서 0보다 큰 상수를 의미한다.

한편, 전력회사는 규제에 의해서 요금이 주어지고 있는 것으로 간주하고, 전력수요의 증가에 대해서 이를 충족하기 위해 공급을 맞추는 것으로 볼 수 있다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$X_d = p^{-\eta} Y^\gamma = (K - R)^\alpha (E + \phi R)^\beta = X_s \quad (4)$$

이제 전력회사의 적정화 문제는 r, m, p, Y 가 주어졌을 때 총비용을 극소화하기 위하여 K, R, E 를 선택하는 문제로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{K, R, E} & [rK + mE + sR^\theta] \\ \text{s.t. } & X_s = (K - R)^\alpha (E + \phi R)^\beta \\ & X_d = p^{-\eta} Y^\gamma \\ & X_s = X_d = X \end{aligned} \quad (5)$$

상기의 적정화 문제의 일계필요조건은 다음과 같다.⁷⁾

3) 이에 대해서는 대표적으로 Considine and Larson (2006)의 연구를 참조할 수 있다.

4) 이와 같이 신재생발전의 역할을 제시하는 연구로는 Brock et al. (2015)의 연구가 대표적이다.

5) 신재생발전 증대가 온실가스 배출을 감축하면서도 전력생산을 증대시키는데 기여한다면 신재생발전이 매우 작은 상황에서도 신재생발전의 한계생산물이 0보다 커야한다. 이 조건을 수식으로 제시한다면 아래와 같다. $\lim_{R \rightarrow 0} \frac{\partial X}{\partial R} = \frac{\phi \beta K - \alpha E}{K^{1-\alpha} E^{1-\beta}} \geq 0$ 이며 이 조건을 만족하기

위해서는 $\phi \geq \frac{\alpha E}{\beta K} > 0$ 이다. 따라서 최소한 ϕ 의 값이 유의적으로 0보다 커야 신재생발전이 온실가스 배출을 감축하며 전력생산 증대에 기여할 수 있는 최소한의 역할을 기대할 수 있게 된다.

6) $\frac{r}{m} < \phi$ 은 배출비용당 자본비용이 신재생발전의 배출효율성 파라미터보다 작아야 함을 의미한다.

$$\alpha\lambda(K-R)^{\alpha-1}(E+\phi R)^{\beta}=r \quad (6)$$

$$\beta\lambda(K-R)^{\alpha}(E+\phi R)^{\beta-1}=m \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & [\beta\phi(K-R)-\alpha(E+\phi R)]\lambda(K-R)^{\alpha-1}(E+\phi R)^{\beta-1} \\ & = s\theta R^{\theta-1} \end{aligned} \quad (8)$$

이에 더하여 수요에 대해서 공급을 충족하는 조건도 만족한다. 즉,

$$p^{-\eta}Y^{\gamma}=(K-R)^{\alpha}(E+\phi R)^{\beta} \quad (9)$$

식 (6)과 (7)을 이용하여 λ 를 제거하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{K-R}{E+\phi R}=\frac{\alpha}{\beta}\frac{m}{r} \quad (10)$$

식 (10)을 다시 정리하면 다음과 같은 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{r}{m}(K-R)=\frac{\alpha}{\beta}E+\phi\frac{\alpha}{\beta}R \quad (11)$$

식 (11)의 좌변은 배출비용에 대한 상대적 자본비용으로 평가한 화석연료자본의 가치를 의미한다. 식 (11)을 추정함으로써 ϕ 의 추정치를 구할 수 있으며, $\phi=0$ 인지를 검정할 수 있다.

한편, 식 (6)과 (8)로부터 λ 를 제거하고, 식 (10)을 대입하고 이를 R 에 대해서 정리하면 다음과 같이 R 의 결정식을 구할 수 있다.

$$R=\left(\frac{\phi m-r}{s\theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}} \quad (12)$$

배출저감활동을 의미하는 R 은 비용 m 과 r 에 의해서 결정되는 것을 알 수 있으며, 생산함수 파라미터인 α 와 β 에 의존하지 않고 있다. R 은 배출저감 효율성 파라미터인 ϕ 가 크면 클수록 더 많은 저감활동을 하며, 저감비용 파

라미터인 s 와 θ 가 크면 클수록 더 적은 저감활동을 하게 된다. 주어진 파라미터 값에 대해서 배출비용인 m 이 높을수록 저감활동은 더 커지며, 자본비용 r 이 높을수록 저감활동은 줄어들게 된다. 이 모형에서는 배출저감활동인 R 은 전력가격이나 소득과 같은 수요 변수들에 의해서 영향을 받지 않는다는 것이 특징적이다.

식 (9)와 식 (10)을 결합하여 $K-R$ 에 대해서 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$K-R=\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{\beta}{\alpha+\beta}}\left(\frac{m}{r}\right)^{\frac{\beta}{\alpha+\beta}}p^{-\frac{\eta}{\alpha+\beta}}Y^{\frac{\gamma}{\alpha+\beta}} \quad (13)$$

한편, 식 (12)와 식 (13)을 이용하여 $R/(K-R)$ 의 식을 구성할 수 있다. 이를 표현하면 아래의 식 (14)와 같다.

$$\frac{R}{K-R}=\left(\frac{\phi m-r}{s\theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\frac{\beta}{\alpha+\beta}}\left(\frac{m}{r}\right)^{-\frac{\beta}{\alpha+\beta}}p^{\frac{\eta}{\alpha+\beta}}Y^{-\frac{\gamma}{\alpha+\beta}} \quad (14)$$

이에 양변에 로그를 취해주면 다음과 같은 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{R}{K-R}\right) &= \left[\frac{\beta}{\alpha+\beta}\ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)-\frac{1}{\theta-1}\ln(s\theta)\right] \\ &+ \frac{1}{\theta-1}\ln(\phi m-r)-\frac{\beta}{\alpha+\beta}\ln\left(\frac{m}{r}\right) \\ &+ \frac{\eta}{\alpha+\beta}\ln p-\frac{\gamma}{\alpha+\beta}\ln Y \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)를 이용하여 파라미터들의 추정값을 구할 수 있다. 이를 위해 $\phi m > r$ 의 가정을 이용하여 $\ln(\phi m-r)$ 의 근사 형태로 접근하면 다음의 식을 얻을 수 있다.⁸⁾

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{R}{K-R}\right) &= \left[\frac{\beta}{\alpha+\beta}\ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)-\frac{1}{\theta-1}\ln(s\theta)+\frac{1}{\theta-1}\ln(\phi)\right] \\ &+ \left[\frac{1}{\theta-1}-\frac{\beta}{\alpha+\beta}\right]\ln(m)-\frac{1}{\phi(\theta-1)}\left(\frac{r}{m}\right) \\ &+ \frac{\beta}{\alpha+\beta}\ln(r)+\frac{\eta}{\alpha+\beta}\ln p-\frac{\gamma}{\alpha+\beta}\ln Y \end{aligned} \quad (16)$$

7) 적정화 문제를 풀기 위한 Lagrangian 함수는 $\mathcal{L}=rK+mE+sR^{\theta}+\lambda(p^{-\eta}Y^{\gamma}-(K-R)^{\alpha}(E+\phi R)^{\beta})$ 이다.

8) $r=0$ 에서 테일러 확장을 이용하면, $\ln(\phi m-r)\approx\ln(\phi m)-\frac{1}{\phi m}r=\ln\phi+\ln m-\frac{1}{\phi}\frac{r}{m}$ 을 구할 수 있다.

식 (16)의 선형식을 이용하면 파라미터값들의 상대비를 추정할 수 있는 추정식을 구할 수 있다. 식 (16)으로부터 신재생발전 효율성 파라미터인 ϕ 를 추정할 수 있으며 어떤 추정값을 가지는지를 확인할 수 있다. ϕ 는 신재생발전 증대를 통해 기존의 화석연료 자본의 이용을 줄이고 온실가스 배출을 감축하더라도 더 많은 전력생산을 가능하게 하는 지를 나타내는 파라미터로 그 값이 크면 클수록 신재생발전의 효율성이 높다는 것을 의미한다. 따라서 ϕ 의 값이 어느 정도인지를 추정하는 것은 현재 전력생산에서 온실가스배출 감축에 대한 신재생발전이 어느 정도나 효율적인지를 확인하는 것이 된다. ϕ 의 값이 크다면 신재생발전은 온실가스배출에 대해서 효율적임을 의미한다. 특히, $\phi=0$ 이라면 신재생발전이 화석연료발전설비를 대체하기는 하였지만 온실가스배출에는 전혀 기여하지 못하였음을 의미한다. 또한, 식 (16)을 추정함으로써 θ 의 크기도 추정할 수 있다. 이 θ 의 값이 큰 값을 가진다면 신재생발전을 증가시킬수록 비용이 가속하여 증가하는 것을 의미하므로 신재생발전의 규모가 커진다고 해서 한계비용이 줄어들지 않고 증가하여 신재생발전의 규모효과를 누리지 못하고 있음을 시사한다. 또한, 식 (16)으로부터 η 와 γ 의 상대적인 부호도 추정할 수 있다. 이를 통해 화석연료 발전설비 대비 신재생 발전설비가 전력가격이나 국민 소득에 어떻게 영향을 받는지도 확인할 수 있다.

3. 자료와 실증분석

앞서 이론적 모형에서 발전회사의 전력생산은 기존의 화석연료 발전설비와 온실가스 배출을 생산요소로 사용

하며, 신재생발전은 동일한 전력생산 하에서 화석연료 자본 설비를 줄이면서도 온실가스 배출의 효율성을 높여 온실가스 배출을 줄이는데 기여하는 역할을 하는 것으로 전력생산함수를 설정하였다. 이러한 생산함수는 신재생발전이 온실가스 배출 감축에 얼마나 효율적인지를 분석할 수 있는 추정식을 제공한다. 이러한 생산함수를 가지고 발전회사가 비용을 최소화하는 적정화 문제를 통해 신재생발전의 온실가스배출에 대한 효율성을 추정할 수 있는 추정식을 도출할 수 있다. 여기서는 신재생발전의 효율성 파라미터를 추정하기 위한 자료를 서술하고 동자료를 이용한 추정 결과를 제시한다.

3.1. 자료

적정화 모형으로부터 도출된 식을 추정하기 위하여 5개 발전공기업의 자료를 이용하였다. 발전공기업을 대상으로 한 것은 5개 발전공기업이 원자력발전을 제외한 모든 발전원의 설비를 갖추고 있는 종합발전기업이어서 우리나라 전체 발전시스템에 매우 근접한 발전시스템을 갖추고 있어 신재생발전의 온실가스 배출 감축 효율성을 추정하는데 적합하다고 볼 수 있기 때문이다. 대상 기간은 배출권거래제가 시행된 2015년부터 2024년까지를 대상으로 하였다. 식 (11)과 (16)을 추정하기 위하여 사용된 자료는 R , $K-R$, E , r , m , p , Y 에 해당하는 자료이며, 이에 대한 설명은 Table 1에 제시하였다.

신재생발전의 온실가스배출에 대한 효율성에 대하여 살펴보기 위하여 상기의 표와 같은 자료를 이용하여 추정하고자 한다. 이를 위해서 우선 R 과 $K-R$ 을 측정하여야

Table 1. Description of variables

variable	description	obs	mean	std.dev.
R	Renewable energy generation capacity (1000 kW)	50	269	189
	Renewable energy generation (1000 kWh)	50	1,062	895
$K-R$	Fossil fuel power generation capacity (1000 kW)	50	10,282	891
	Fossil fuel power generation (1000 kWh)	50	47,714	8,784
E	Greenhouse gas emissions (1,000 CO ₂ ton)	50	36,207	8,278
r	User costs of capital per installed capacity in real (won/kW)	50	45,036	21,624
	User cost of capital per unit of power generation in real (won/kWh)	50	9,393	4,620
m	Greenhouse gas emission allowance costs per installed capacity in real (won/kW)	50	71,670	32,147
	Greenhouse gas emission allowance cost per unit of power generation in real (won/kWh)	50	15,213	5,941
p	Electricity unit price in real (won/kWh)	10	118.2	13.6
Y	Real per capita income (10,000 won)	10	4,025.6	263.2

한다. 여기서는 설비용량과 발전량 자료를 모두 이용하였다. 원래는 자본을 이용하여야 하므로 설비용량을 사용하는 것이 원칙이나 설비용량 자료는 발전소를 사용하지 않더라도 보유하고 있고 한 번 설치되면 매우 장기간 사용되므로 온실가스배출 변화에 대한 대응을 표현하는데 한계가 있다. 이를 보완하기 위해서 발전량 자료를 이용하였다. 발전량은 온실가스 배출과의 상호작용을 표현하는데 설비용량보다는 더 적절하다고 볼 수 있다. 따라서 설비용량과 발전량 모두에 대해서 살펴봄으로써 신재생발전의 온실가스 배출에 대한 효율성에 대한 추정에서 정밀한 접근이 가능할 것이다. 발전설비 용량과 발전량은『한국전력통계』자료를 사용하였다. E 로 사용한 온실가스배출량은 온실가스종합정보센터 할당대상업체 온실가스 명세서의 온실가스배출량 자료를 이용하였다. 자본의 사용자비용인 r 은 일반적으로 $r(t) = (i(t) + \delta)q(t-1)$ 의 식을 이용하여 측정하였다. 여기서 $i(t)$ 는 경상수익률을, δ 는 감가상각률을, $q(t)$ 는 설비자산의 취득가격을 의미한다. 자본의 사용자비용은 사후적 경상수익률과 감가상각률을 계산하여 측정하였다. 한편, 발전공기업의 재무제표와 감사보고서에서 제시된 유형자산에서 토지를 제하고 이를 설비용량으로 나누어 설비단가를 구하고 GDP 디플레이터를 이용하여 실질가치로 전환하여 설비자산의 취득가격 변수로 사용하였다. 경상수익률은 경상수익을 총발전설비용량 또는 총발전량으로 나누고 GDP 디플레이터를 이용하여 실질가치로 전환하였다. 여기서 경상수익은 영업이익과 금융원가에서 법인세비용을 차감한 것을 이용하였다. 감가상각률은 손익계산서의 감가상각비 자료를 이용하여 도출하였다. 온실가스 배출권가격은 KRX의 배출권시장 정보플랫폼에서 KAU 가중평균가격을 이용하였다. 전력가격(p)은 『한국전력통계』의 전력판매단가를 이용하였으며, 소득(Y)은 『국민소득계정』의 실질 1인당 GDP를 사용하였다.

3.2. 추정 및 추정결과

전력생산에서 신재생발전의 효율성 파라미터를 포함하는 전력생산함수를 구성하고 발전회사의 적정화를 통해 도출된 식 중에서 신재생발전의 효율성을 직접적으로 추정할 수 있는 식은 상기의 식 (11)과 (16)이다. 이 두 식을 추정하기 위하여 상기에 제시된 바와 같이 2015~2023년의 기간을 가진 5개 발전공기업 패널자료를 이용하였다. 5개 발전공기업은 동질의 상품인 전력을 생산하며, 전력

을 생산하는 근원적인 방식에서 차이가 없으므로 동일한 생산함수를 사용하는 것에 무리가 없으며, 비용을 최소화하는 적정화 방식에도 차이가 없는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 발전공기업 자체의 고유의 차이가 존재할 수 있으므로 패널 고정효과 추정방법을 사용하는 것도 허용해야 한다. 한편, 추정식의 오차항에서 이분산성이나 자기시차상관 등은 추정식에서 정보를 제공하지 못하므로 이를 통제할 수 있는 추정방식도 고려해야 한다. 따라서 고정효과와 확률효과 모형 추정방법을 기본적으로 사용하면서 오차항의 이분산성과 자기상관을 허용하는 GLS 추정을 추가하여 사용하였다. 또한, 각각의 추정식에 대해서 발전설비와 발전량을 이용하여 추정하였다. 이론모형에서는 자본의 개념을 이용하여 모형을 제시하였으나 발전설비 자료는 시간에 대한 연속성과 변동성에 제약이 존재하므로 의사결정 정보를 더 많이 담고 있는 발전량 자료를 이용하여 추정결과에 대한 강건성을 보완하였다.

우선, 식 (11)을 추정식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{r}{m}(K-R) = a_0 + a_1 E + a_2 R + u \quad (17)$$

여기서 u 는 식 (11)로 설명하지 못하는 0을 평균으로 하는 오차항을 표현한다. 식 (11)로부터 식 (17)의 E 와 R 의 추정계수는 각각 $a_1 = \frac{\alpha}{\beta}$, $a_2 = \phi \frac{\alpha}{\beta}$ 를 의미한다. 우선, 발전설비 자료를 이용하여 식 (17)을 추정한 결과는 Table 2에 제시되어 있다. Table 2의 (1)과 (2)열은 각각 고정효과(FE)와 확률효과(RE) 모형 추정의 결과를 제시하고 있으며, (3)과 (4)열은 각각 오차항의 이분산성을 고려한 고정효과와 확률효과의 GLS 추정 결과를 제시하고 있다. 또한 (5)와 (6)열은 각각 오차항의 자기상관을 고려한 고정효과와 확률효과의 GLS 추정결과를 제시하고 있다. 하우스만 검정의 χ^2 이 2.39로 5% 유의수준 하에서 유의적이지 않아 고정효과와 확률효과 추정 결과를 모두 제시하였다. 여기서 온실가스 배출에 대한 신재생발전의 효율성 파라미터인 ϕ 의 추정이 주요 관심이므로 계수의 추정값으로부터 $\phi = a_2/a_1$ 를 이용하여 $\hat{\phi}$ 를 추정할 수 있다. 이는 Table 2에 $\hat{\phi}$ 행에 제시되어 있다. 이를 살펴보면 추정방식에 따라 값의 변동이 심하여 -1.7~26.5의 범위에서 추정되고 있으나 통계학적 유의성에서 0과 다르지 않은 것으로 추정되고 있다. 따라서 신재생 발전설비 증대가 온실

Table 2. Estimation of equation (17) using power generation capacity data

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E	1.2508 (0.3623)***	0.5956 (0.2162)***	1.2754 (0.3180)***	0.5977 (0.2170)***	1.2093 (0.3484)***	0.6673 (0.2383)***
R	14.5917 (22.8785)	-1.0358 (10.2086)	26.5813 (15.3932)*	4.9590 (7.2245)	10.9961 (20.3462)	-0.6987 (11.4008)
$\hat{\phi}$	11.6652 (17.6214)	-1.7391 (17.1130)	20.8401 (12.7753)	8.2958 (12.2306)	9.0925 (16.3863)	-1.0470 (17.0694)
Wald χ^2		221.00 (0.0000)***	398.99 (0.0000)***	317.64 (0.0000)***	262.50 (0.0000)***	221.98 (0.0000)***
F	39.29 (0.0000)***					
Breusch-Pagan LM χ^2	15.958 (0.1009)	20.745 (0.0229)**	17.187 (0.0703)*	21.742 (0.0165)**	16.052 (0.0982)*	19.109 (0.0389)**
Hausman χ^2	2.39 (0.6646)					

(1): fixed-effects(FE) model; (2) random-effects(RE) model; (3): generalized least squares(GLS) FE estimation with a heteroscedastic error structure; (4) GLS RE estimation with a heteroscedastic error structure; (5) GLS FE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure; (6) GLS RE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure.

Standard errors in parentheses, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

Table 3. Estimation of equation (17) using power generation data

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E	1.3139 (0.3538)***	0.7363 (0.2171)***	1.3125 (0.3515)***	0.7385 (0.2409)***	1.3169 (0.3457)***	0.8338 (0.2374)***
R	-1.5088 (3.5300)	-0.9768 (2.1276)	-0.8169 (2.1530)	-0.1258 (1.3447)	-1.5328 (3.1269)	-1.1958 (2.2189)
$\hat{\phi}$	-1.1483 (2.7249)	-1.3266 (2.9114)	-0.6224 (1.6399)	-0.1704 (1.8278)	-1.1639 (2.4185)	-1.4340 (2.6953)
Wald χ^2		196.45 (0.0000)***	345.50 (0.0000)***	302.20 (0.0000)***	229.72 (0.0000)***	200.58 (0.0000)***
F	33.97 (0.0000)***					
B-P LM χ^2	18.844 (0.0423)**	23.869 (0.0080)***	18.033 (0.0544)*	21.620 (0.0172)**	18.853 (0.0422)**	22.440 (0.0130)**
Hausman χ^2	3.07 (0.5458)					

(1): fixed-effects(FE) model; (2) random-effects(RE) model; (3): generalized least squares(GLS) FE estimation with a heteroscedastic error structure; (4) GLS RE estimation with a heteroscedastic error structure; (5) GLS FE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure; (6) GLS RE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure.

Standard errors in parentheses, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

가스 배출을 감축하는데 효율적으로 기여한다고 보기도 어렵다.

Table 3은 발전량 자료를 이용하여 식 (17)을 추정한 결

과를 제시하고 있다. 여기서도 하우스만 검정 결과 유의적이지 않은 것으로 나타나 고정효과와 확률효과 모형 추정 결과를 모두 제시하였다. 추정 결과를 살펴보면 E 의

계수값은 유의적으로 추정되었으나 R 의 계수값은 유의적이지 않은 것으로 나타나 0과 다르지 않음을 제시하고 있다. 두 계수의 비율로 추정된 $\hat{\phi}$ 의 추정값은 Table 2와 달리 음(-)의 값으로 추정되었으나, 유의적이지는 않은 것으로 나타나 0과 다르지 않음을 확인할 수 있다. 이는 신재생 발전량의 증대가 온실가스 배출에 효율적으로 기여하지는 않았다고 해석할 수 있다.

이제 식 (16)으로부터 신재생 발전의 온실가스배출 효율성을 간편하게 추정하기 위해서 다음과 같이 재구성하여 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{R}{K-R}\right) = \left[\frac{\beta}{\alpha+\beta} \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) - \frac{1}{\theta-1} \ln(s\theta) \right] + \frac{1}{\theta-1} \ln(\phi m - r) - \frac{\beta}{\alpha+\beta} \ln\left(\frac{m}{r}\right) + \frac{\eta}{\alpha+\beta} \ln p - \frac{\gamma}{\alpha+\beta} \ln Y$$

여기서 $\phi m > r$ 을 이용하여 근사 형태로 접근하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

Table 4. Estimation of equation (18) using power generation capacity data

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln m$	0.1482 (0.3919)	0.1639 (0.3768)	-0.0592 (0.3061)	0.8541 (0.3441)**	0.1986 (0.3486)	0.4213 (0.3732)
$\left(\frac{r}{m}\right)$	0.1527 (0.2394)	0.1524 (0.2322)	0.2002 (0.1982)	0.1861 (0.2861)	0.1196 (0.2098)	0.0780 (0.2234)
$\ln r$	-0.1721 (0.2413)	-0.1724 (0.2340)	-0.2701 (0.1903)	-0.2856 (0.2806)	-0.1709 (0.2171)	-0.1740 (0.2453)
$\ln p$	-1.1733 (1.9436)	-1.0986 (1.8697)	-2.0665 (1.5296)	1.9943 (1.7849)	-0.6140 (1.7170)	1.1596 (1.7030)
$\ln Y$	10.8145 (1.3159)***	10.7927 (1.2761)***	11.0888 (1.0479)***	10.7665 (1.5811)***	10.4929 (1.2393)***	8.7146 (1.8796)***
$\hat{\phi}$	0.1563 (2.6910)	0.0552 (2.6014)	1.6445 (2.1111)	-3.0545 (5.1874)	-0.2320 (3.0431)	-3.1668 (10.1812)
$\hat{\theta}$	-40.8652 (727.4305)	-117.7646 (5619.8976)	-2.0359 (3.0780)	1.7589 (1.0657)*	36.0343 (459.4806)	4.0432 (5.3904)
$\left(\frac{\eta}{\beta}\right)$	6.8169 (14.3124)	6.3727 (13.4521)	7.6511 (7.4129)	-6.9825 (8.9697)	3.5925 (10.9708)	-6.6643 (12.8003)
$\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)$	62.8300 (91.3911)	62.6013 (88.1794)	41.0543 (30.5717)	37.6947 (39.7208)	61.3939 (80.9881)	50.0804 (74.0413)
$\left(\frac{\gamma}{\eta}\right)$	8.2167 (14.7187)	8.8233 (16.1476)	4.3657 (3.7566)	-6.3984 (5.2780)	16.0891 (46.7313)	-8.5147 (11.9313)
F	25.90 (0.0000)***					
Wald χ^2		137.48 (0.0000)***	306.14 (0.0000)***	104.94 (0.0000)***	201.03 (0.0000)***	39.00 (0.0000)***
B-P LM χ^2	9.668 (0.4701)	7.566 (0.6711)	8.324 (0.5972)	11.333 (0.3321)	10.356 (0.4099)	14.036 (0.1713)
Hausman χ^2	0.02 (1.0000)					

(1): fixed-effects(FE) model; (2) random-effects(RE) model; (3): generalized least squares(GLS) FE estimation with a heteroscedastic error structure; (4) GLS RE estimation with a heteroscedastic error structure; (5) GLS FE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure; (6) GLS RE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure.

Standard errors in parentheses, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

$$\begin{aligned}
\ln\left(\frac{R}{K-R}\right) &= \left[\frac{\beta}{\alpha+\beta} \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) - \frac{1}{\theta-1} \ln(s\theta) + \frac{1}{\theta-1} \ln(\phi) \right] & \ln\left(\frac{R}{K-R}\right) &= c_0 + c_1 \ln(m) + c_2 \left(\frac{r}{m}\right) + c_3 \ln(r) \\
&+ \left[\frac{1}{\theta-1} - \frac{\beta}{\alpha+\beta} \right] \ln(m) - \frac{1}{\phi(\theta-1)} \left(\frac{r}{m}\right) & &+ c_4 \ln p + c_5 \ln Y + u \\
&+ \frac{\beta}{\alpha+\beta} \ln(r) + \frac{\eta}{\alpha+\beta} \ln p - \frac{\gamma}{\alpha+\beta} \ln Y & \text{여기서 각 항의 계수는 다음과 같이 모수와 연결되어 있} \\
& & \text{음을 알 수 있다.}
\end{aligned}
\tag{18}$$

이를 선형의 추정식으로 정리하면 다음과 같은 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$\phi = -\frac{c_1 + c_3}{c_2}, \quad \theta = 1 + \frac{1}{c_1 + c_3}, \quad \frac{\eta}{\beta} = \frac{c_4}{c_3}, \quad \frac{\gamma}{\beta} = -\frac{c_5}{c_3}$$

Table 5. Estimation of equation (18) using power generation data

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln m$	0.8722 (0.5641)	0.8819 (0.5442)	0.9515 (0.4699)**	0.9372 (0.5512)*	0.8905 (0.4736)*	1.0152 (0.5041)**
$\left(\frac{r}{m}\right)$	0.4076 (0.3676)	0.4063 (0.3552)	0.4412 (0.3098)	0.5636 (0.3692)	0.3298 (0.3006)	0.2826 (0.3156)
$\ln r$	-0.4830 (0.3458)	-0.4799 (0.3340)	-0.6032 (0.2709)**	-0.8111 (0.3329)**	-0.5114 (0.2951)*	-0.5061 (0.3201)
$\ln p$	0.1803 (2.8169)	0.2224 (2.7180)	0.3861 (2.2954)	0.5625 (2.6930)	1.1212 (2.3076)	2.3189 (2.3572)
$\ln Y$	15.1606 (2.2921)***	15.1327 (2.2129)***	15.4976 (1.8985)***	15.8272 (2.2789)***	14.2700 (2.1199)***	12.7442 (2.6207)***
$\hat{\phi}$	-0.9547 (1.9855)	-0.9893 (1.9420)	-0.8707 (1.4214)	-0.2236 (1.1837)	-1.1495 (2.0630)	-1.8009 (2.9603)
$\hat{\theta}$	3.5691 (4.2512)	3.4874 (3.8447)	3.8707 (4.3812)	8.9335 (40.5776)	3.6375 (3.5578)	2.9635 (1.9836)
$\left(\frac{\eta}{\beta}\right)$	-0.3732 (5.8962)	-0.4634 (5.7423)	-0.6400 (3.8758)	-0.6935 (3.3947)	-2.1923 (4.8552)	-4.5810 (5.6842)
$\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)$	31.3858 (22.8664)	31.5277 (22.3252)	25.6902 (11.8349)**	19.5112 (8.3888)**	27.9018 (16.7069)*	25.1767 (16.8789)
$\left(\frac{\gamma}{\eta}\right)$	-84.0782 (1323.544)	-68.0263 (839.0159)	-40.1376 (242.5843)	-28.1333 (137.8442)	-12.7268 (27.6453)	-5.4958 (6.4082)
F	30.22 (0.0000)***					
Wald χ^2		161.69 (0.0000)***	302.94 (0.0000)***	163.24 (0.0000)***	182.08 (0.0000)***	73.606 (0.0000)***
B-P LM χ^2	16.245 (0.0928)*	16.241 (0.0929)*	15.430 (0.1171)	14.464 (0.1529)	17.485 (0.0643)*	19.210 (0.0377)**
Hausman χ^2	0.01 (1.0000)					

(1): fixed-effects(FE) model; (2) random-effects(RE) model; (3): generalized least squares(GLS) FE estimation with a heteroscedastic error structure; (4) GLS RE estimation with a heteroscedastic error structure; (5) GLS FE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure; (6) GLS RE estimation with a common AR(1) autocorrelation error structure.

Standard errors in parentheses, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

식 (18)을 추정한 결과는 Table 4와 Table 5에 제시되어 있다. Table 4는 발전설비 자료를 이용한 결과를 Table 5는 발전량 자료를 이용한 결과를 나타내고 있다.

Table 4의 발전설비 자료를 이용한 추정 결과를 살펴보면 소득($\ln Y$)의 계수만이 모든 추정방식에 대하여 5% 유의수준 하에서 유의적인 계수값이 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 발전설비 용량 자료가 시간에 대하여 변동성이 별로 없어 일정한 값을 가지는 경우가 많기 때문인 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 소득의 계수가 유의적으로 0보다 큰 양의 값을 가지는 추정 결과는 신재생 발전설비의 상대적인 규모는 소득의 증대에 따른 수요증대와 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 추정계수를 통해 신재생 발전의 효율성 모수인 ϕ 의 추정값을 보면 모든 추정방식에서 유의적이지는 않은 것으로 추정되고 있다. 추정값의 범위는 $-3.16 \sim 1.64$ 를 나타내고 있으나 모두 5% 유의수준 하에서 유의적이지 않은 것으로 나타나고 있다. 이러한 추정 결과에 따르면, 신재생 발전 설비 용량의 증대는 온실가스 배출 감축에 대해서 효율적이지 않다는 것을 의미한다.

Table 5는 발전량 자료를 이용한 추정결과를 제시하고 있다. 발전설비자료를 이용한 Table 4의 결과에 비해 계수의 유의성이 다소 높아졌음을 비교할 수 있다. 발전량 자료를 이용한 추정이 자료 적합도 측면에서 더 적절한 추정 결과라고 할 수 있다. 가격($\ln p$) 계수를 제외하고는 거의 대부분의 계수 추정에서 0과 같다는 귀무가설을 유의적으로 기각하는 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 신재생 발전의 온실가스 배출에 대한 효율성 모수인 ϕ 의 추정값은 0과 같지 않다는 귀무가설을 유의적으로 기각하지 못하는 것으로 나타났다. 추정된 모수값의 범위는 $-1.80 \sim -0.22$ 로 음(-)의 값을 가지지만 유의적이지는 않은 것으로 나타나고 있다. 이 추정값이 음(-)의 값을 갖는다는 것은 신재생발전량이 온실가스 배출에 대해서 효율적이지 않고 오히려 배출을 더하는 경향이 있음을 의미하지만 통계적으로 유의적이지는 않으므로 온실가스 배출 감축과 무관하다는 것으로 해석하는 것이 더 타당해 보인다. 이러한 추정 결과에 따르면, 신재생 발전 설비 용량의 증대는 온실가스 배출 감축에 대해서 효율적이지 않다는 것을 의미한다.

4. 결론 및 시사점

저탄소사회로의 전환에서 신재생발전은 매우 중요한

에너지원이며, 신재생발전 없이는 저탄소 전력생산으로의 전환은 가능하지 않다. 일반적으로 신재생발전은 전력생산에서 화석연료 발전을 대체하여 온실가스 감축에 기여하는 에너지원임에 틀림없다. 전력생산에서 저탄소 발전으로 전환하는 과정에서 신재생발전이 기존의 연료를 대체하고 온실가스를 감축하는 효율성을 평가하는 것은 쉽지 않은 과제이다. 다시 말해서 저탄소 전환과정에서 얼마나 효율적으로 화석연료발전을 대체하면서 온실가스를 감축하는지를 평가하는 것은 저탄소 전환과정을 신재생발전이 얼마나 효율적으로 이룩하고 있는지를 평가하는 것이라 할 수 있다. 우리나라에서도 전력부문에서 온실가스 배출을 감축하는 노력의 일환으로 신재생발전을 확대하려는 시도가 있었으며, 지속적으로 신재생 발전설비와 발전량이 증대되어 왔다. 그러나 이러한 신재생발전이 전환과정에서 효율적으로 이루어졌는지를 평가한 연구는 별로 많지 않다. 이러한 측면에서 본고에서는 전력생산에서의 저탄소 전환과정에서 신재생발전이 온실가스 감축을 얼마나 효율적으로 기여하고 있는지를 이론적인 모형을 통해서 그 효율성을 평가하는 틀을 제공하고, 이를 실증적인 추정을 통해서 우리나라 5개 발전공기업에서 신재생발전이 온실가스 감축을 얼마나 효율적으로 감축하였는지를 살펴보았다.

우선 전력생산에서 저탄소 전환은 화석연료발전을 신재생발전이 대체하면서 온실가스 배출이 전력생산에서 기여하는 부분을 상쇄하고도 남을 정도로 온실가스 감축에 기여하도록 생산함수를 설정하여, 전력회사가 비용을 최소화하는 적정화 과정을 통해서 발전하는 것을 가정하여 전력회사의 적정화 행태식을 도출하여 신재생발전의 온실가스 감축의 효율성을 제시할 수 있는 이론적 틀을 제공하였다. 이를 바탕으로 5개 발전공기업의 2015~2024년의 발전설비와 발전량 자료를 이용하여 신재생발전의 온실가스 감축 효율성을 추정하고 평가하였다. 추정결과에 따르면, 발전설비와 발전량 자료 모두에서 신재생발전의 온실가스 감축 효율성은 0과 다르지 않은 것으로 추정되었다. 이는 저탄소 전력생산 과정에서 신재생발전이 온실가스 배출 감축을 효율적으로 달성하고 있지는 않은 것으로 해석할 수 있다. 이러한 실증 분석 결과를 통해서 신재생발전이 온실가스 배출 감축에 효율적으로 기여할 수 있는 전력시스템과 인프라를 구축하는 것이 저탄소 전환과정에서 요구된다는 것을 시사한다.

사사

이 논문은 2023년도 부산대학교 인문사회연구기금의 지원을 받아 연구되었음.

References

- Blondeau J, Mertens J. 2019. Impact of intermittent renewable energy production on specific CO₂ and NO_x emissions from large scale gas-fired combined cycles. *J Cleaner Prod* 221: 261-270. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.182
- Brock W, Engstrom G, Xepapadeas A. 2015. Energy balance climate models. Damage reservoirs, and the time profile of climate change policy. In Bernard L, Semmler W (eds). *The Oxford handbook of the macroeconomics of global warming*. Chapter 3: p. 19-52.
- Considine TJ, Larson DF. 2006. The environment as a factor of production. *J Environ Econ Manage* 52: 645-662. doi: 10.1016/j.jeem.2006.07.001
- Do I, Lee S, Seo G-S, Kim S. 2023. An analysis of the effects of renewable energy intermittency on the 2030 Korean electricity market. *Energies* 16: 4189. doi: 10.3390/en16104189
- Kim JW, Kim HS. 2015. The effect of electricity generation through renewable energy on CO₂ emissions in Korea (in Korean with English abstract). *Korean Energy Econ Rev* 14(3): 185-201. doi: 10.22794/keer.2015.14.3.006
- Kim S. 2018. Decomposition analysis on GHG emissions of domestic electricity generation sector (in Korean with English abstract). *Korean Energy Econ Rev* 17(1): 241-264. doi: 10.22794/keer.2018.17.1.009
- Lee G, Kang JY. 2025. The impact of renewable energy sources on greenhouse gas emissions reduction - Focusing on solar and wind energy (in Korean with English abstract). *New Renewable Energy* 21(2): 60-70. doi: 10.7849/ksnre.2025.0005
- Schlömer S. 2014, Technology-specific cost and performance parameters, annex III of climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Taylor LD. 1975. The demand for electricity: A survey. *Bell J Econ* 6(1): 74-110.
- World Nuclear Association. 2024. Life-cycle emissions of electricity options, carbon dioxide emissions from electricity, energy and the environment; [accessed 2026 Jan 17]. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity>
- Yoo BC. 1996. The price elasticity on the electricity demand and the tariff adjustment devices. Korea Energy Economics Institute. Research Paper KEEI-96-04.