

신·재생에너지원별 온실가스 감축에 미치는 영향 분석 - 태양광과 풍력을 중심으로 -

이기배¹⁾ · 강주영^{2)*}

The Impact of Renewable Energy Sources on Greenhouse Gas Emissions Reduction - Focusing on Solar and Wind Energy -

Gibae Lee¹⁾ · Juyoung Kang^{2)*}

Received 4 February 2025 Revised 11 March 2025 Accepted 31 March 2025 Published online 12 June 2025

ABSTRACT In this study, the impact of solar and wind power generation on greenhouse gas (GHG) emissions was analyzed using panel data from 16 metropolitan local governments, excluding Sejong City, between 2010 and 2021. The analysis was conducted using a pooled mean group estimation model. The results indicated that a 1% increase in gross regional domestic product (GRDP) led to a 4.256% increase in GHG emissions; however, once GRDP surpassed a certain threshold, the trend reversed, with emissions decreasing by 0.585%. A 1% increase in energy consumption caused a 0.328% rise in GHG emissions. An increase of 1% in solar and wind power generation resulted in a 0.041% and 0.119% decrease in GHG emissions, respectively. This suggests that solar power generation would need to be increased by 24.39% to reduce GHG emissions by 1%, whereas wind power would need to be increased by 8.4%. In essence, increasing wind power demonstrates an approximate 2.9-fold greater effectiveness in reducing GHG emissions by 1% compared to increasing solar power.

Key words Greenhouse gas emissions(온실가스 배출량), Pooled mean group estimation(PMG 추정), Solar power generation(태양광 발전), Wind power generation(풍력 발전)

Nomenclature

V : wind speed, m/s

D : rotor diameter, m

Subscript

WTGS : wind turbine generator system

L,R : left, right

1) Ph.D candidate, Global Convergence Management, Ajou University

2) Professor, Global Convergence Management, Ajou University

*Corresponding author: jykang@ajou.ac.kr

Tel: +82-31-219-2910

1. 서론

지속 가능한 개발의 개념은 최근 전 세계의 정책 의제에
서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 그중에서도 지구

온난화 문제에 대해서는 많은 과학적 연구와 교토의정서 합의 등을 통해 광범위한 전 세계적 합의가 이루어졌다고 볼 수 있다. 2015년 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 채택된 파리 협정(Paris Agreement)에서는 모든 국가들이 지구의 평균 온도가 산업화 이전 대비 2°C 이상 상승하지 않도록 하고 가능한 1.5°C 이상을 넘지 않는 것을 추구하며, 이산화탄소 순 배출량 0을 목표로 하여 자체적으로 온실가스 배출 목표를 정하고 실천하자고 합의하였다. 그럼에도 불구하고 2023년 발간된 IPCC 6차 보고서에 따르면 인간의 활동에 의한 기후변화의 가속화로 최근 10년간 전례 없는 수준의 기온 상승과 폭염 및 가뭄 등의 극한 기후 현상이 나타났고, 현재 온실가스 배출 경로가 지속되면 세기말까지 1.5°C 목표를 초과할 가능성이 매우 높은 상황이다.

이러한 상황에서 지구 온난화 문제의 해결을 위한 온실가스 감축 이슈는 대다수 국가의 환경 정책에 빠르게 반영되고 있으며, 이에 따라 화석 에너지 중심에서 신·재생에너지 중심으로의 발전 전환이 급속하게 이루어지고 있다. 우리나라는 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 2030년 배출전망치 대비 37%를 감축하는 것으로 유엔에 제출하였다. 정부는 제출한 감축 목표의 달성을 위하여 다양한 분야에서 온실가스 감축 노력을 기울이고 있는데, 신·재생에너지 공급의무화제도(renewable portfolio standard, RPS)와 RE100을 비롯한 신·재생에너지 보급 확대를 통한 온실가스 감축 정책도 목표 달성에 중요한 역할을 하고 있다.

이에 따라 최근 신·재생에너지와 온실가스 감축에 대해 관심이 커지면서 신·재생에너지 발전이 온실가스 감축에 미치는 영향에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 이에 관련된 대부분의 연구가 신·재생에너지 전체 발전량에 대한 온실가스 감축 효과만을 분석하였기 때문에, 온실가스의 효율적 감축을 위한 신·재생에너지원별 보급 정책에 대한 시사점을 제공하여 정책 수립을 위한 기초자료로 활용되는 데는 부족함이 있었다. 따라서 본 연구의 목적은 우리나라 신·재생에너지의 발전원별 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 이를 위하여 우리나라 2021년 재생에너지 발전 비중의 63.9%가량을 차지하는 태양광(56.6%)과 풍력 발전(7.3%)이 온실가스 배출에 미치는 영

향을 분석하고, 온실가스 감축을 위한 신·재생에너지의 효율적 보급에 대한 시사점을 제공하고자 한다.¹⁾ 이를 활용하여 가장 효율적인 온실가스 감축을 위한 최적의 지역별 신·재생에너지원별 보급 정책의 수립이 가능할 것이다.

연구의 목적을 달성하기 위하여 본 연구는 2010년부터 2021년까지 세종시를 제외한 16개 광역자치단체의 패널데이터를 이용하여 Pesaran *et al.*(1999)^[1]의 PMG(pooled mean group) 추정 방법을 사용한다.²⁾ 패널데이터를 이용한 분석은 횡단면이나 시계열 데이터에 비해 시간에 걸친 지역별 이질성을 명시적으로 감안할 수 있기 때문에, 순수 횡단면 또는 시계열 데이터에서 관찰될 수 없는 효과를 더 잘 탐지하고 측정할 수 있는 장점이 있다. 패널분석 중 특별히 PMG 추정법은 절편에 대해서만 횡단면 간 차이를 허용하고 다른 모든 추정 계수 및 오차항의 분산은 동일함을 제약하는 기존 패널 추정법과 달리, 장기 추정 계수만 횡단면 간 동일함을 제약하고 그 외 절편과 단기 추정 계수, 오차항의 분산 모두 횡단면 간 차이를 허용한다는 장점을 가진다. 따라서 본 연구는 효율적인 온실가스 감축을 위한 기초자료의 제공을 목적으로 PMG 추정법을 이용한 패널분석을 통하여 태양광과 풍력 발전이 온실가스 감축에 미치는 영향을 각각 분석한다.

본 연구의 구성은 II 장에서는 관련 선행 연구의 소개 및 본 연구와 선행 연구의 차별성을 제시하고, III 장에서는 실증 분석 모형과 사용된 패널자료에 관해 설명한다. IV 장에서는 태양광과 풍력 발전이 온실가스 배출에 미치는 영향에 대한 실증 분석 결과를 제시하고, 마지막 V 장에서는 실증 분석 결과를 바탕으로 결론을 정리하고 정책적 시사점을 제공하기로 한다.

2. 선행 연구

온실가스 감축에 관해 관심이 커지면서 인류의 생산활동

1) 태양광과 풍력 발전을 중심으로 분석을 진행한 것은 재생에너지 중 수력 및 바이오, 폐기물은 자치단체 및 연도별로 발전량 데이터가 존재하지 않는 경우가 많아 분석에서 제외하였기 때문이다.
2) 세종시의 경우 2010년~2012년 지역내총생산 데이터가 존재하지 않고, 분석 대상 전 기간 풍력 발전량 데이터가 존재하지 않기 때문에 분석에서 제외하였음.

에 따른 소득과 에너지 소비, 환경 친화 에너지 등이 온실가스 감축에 미치는 영향에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이들 연구의 출발은 경제 성장과 에너지 소비, 그리고 경제 성장과 온실가스 배출량 간의 관계를 밝히는 데서 시작되었다. 한 국가의 경제 성장과 에너지 소비 간의 관계를 분석한 연구는 Kraft and Kraft(1978)^[2]의 연구가 시발점이 되었다. 이들 연구에서는 에너지 소비와 국내총생산(GNP) 사이의 인과관계 분석을 통해 미국의 경제 성장이 에너지 소비를 증가시키는 증가를 유발하였다는 인과관계를 입증하였다. 이 연구를 시작으로 경제 성장과 에너지 소비에 관한 많은 연구에서 경제 성장과 에너지 소비 간 인과관계를 입증하였다.^[3~14]

또한 전 세계적으로 경제 성장에 따른 환경오염 문제가 이슈가 되면서 경제 성장과 환경오염에 관한 실증 분석 연구가 다수 진행됐는데, 이들 연구는 환경 쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설을 이용한 연구가 주를 이룬다. EKC 가설은 한 국가의 경제가 성장함에 따라 에너지를 더 많이 소비하게 되고 이에 따라 환경오염 수준이 증가하지만, 국가의 소득이 일정 수준을 초과하면 환경오염에 대한 경각심으로 인한 환경 보호 노력으로 환경오염 정도가 감소하기 시작한다는 가설이다. 즉, 일반적으로 경제가 성장 초기 단계에는 환경의 질이 악화되다가 일정 소득 수준이 지나면서 환경의 질이 개선된다는 것이다. EKC 가설에 대한 실증 분석은 최근까지 상당히 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그 가설이 성립됨이 확인되었다.^[15~25] 이들 모형과 함께 최근까지 경제 성장-에너지 소비-환경오염의 연관성을 하나의 모형에 반영하여 분석한 연구도 다수 진행되어 왔다.^[2,3,7,26~33]

보다 최근에는 경제 성장에 따른 에너지 소비의 증가가 환경오염을 증가시킬 것이라는 단순 가설에서 벗어나, 신·재생에너지 발전에 따른 온실가스 저감 효과도 모형에 반영하여 실증 분석이 진행되고 있다. 김재화·김현석(2015)의 연구에서는 신·재생에너지 발전이 CO₂ 배출에 미치는 영향을 분석한 결과, 신·재생에너지 발전량이 1% 증가함에 따라 0.17%가량 감소함을 보였다.^[34] Saidi and Omri(2020)는 15개 주요 신·재생에너지 발전 국가에 대해 신·재생에너지 발전이 CO₂ 배출에 미치는 영향을 분석하여, 신·재생에너지 발전과 CO₂ 배출 간 장기적인 인과관계를 밝히지는

못하였지만, 단기적인 영향이 존재함을 밝힌 바 있다.^[35] Kim(2021)의 연구에서는 신·재생에너지와 원자력 발전의 CO₂ 배출 저감 효과를 분석한 결과, 신·재생에너지와 원자력 발전량 1% 증가는 각각 0.2%와 0.34%의 CO₂ 배출량 저감 효과가 있는 것으로 확인되었다.^[36]

그러나 이들 선행 연구에서는 경제 성장-에너지 소비-신·재생에너지 발전-환경오염 간의 분석을 진행함에 있어 신·재생에너지 총발전량을 사용하였기 때문에 신·재생에너지원별 환경오염에 대한 영향의 분석은 이루어지지 않았다. 이에 따라 신·재생에너지 발전 총량에 대한 온실가스 감축 효과만이 분석되어 신·재생에너지의 발전원별 온실가스 감축 효과를 알 수 없었다. 이에 본 연구는 신·재생에너지원별 온실가스 감축 효과를 분석하기 위한 시발점으로, 우리나라 재생에너지 발전 중 가장 일반적이면서 큰 비중을 차지하는 태양광과 풍력 발전이 온실가스 배출에 미치는 긍정적 효과를 분석한다는 점에서 선행 연구들과 차별성을 가진다.

3. 분석 모형 및 사용자료

3.1 분석 모형

최근 환경 경제학 분야에서는 경제 성장과 환경오염 간의 관계를 추정하려는 많은 연구가 진행되어왔다. 이 분야 연구의 초기에는 대부분이 경제 성장과 에너지 소비가 환경오염에 미치는 영향을 분석하는 데 초점을 맞추었다.^[27,30,37~42] 이후 신·재생에너지가 전 세계에서 신규 발전 용량의 거의 3분의 2를 차지하고 있는 상황에서 실증 연구들은 경제 성장과 에너지 소비, 그리고 이와 함께 신·재생에너지가 CO₂ 배출에 미치는 영향도 분석하는 데 집중하고 있다.^[34,35,43,44]

본 연구는 Apergis and Payne(2010)^[44]의 연구에서 사용된 실증적 분석체계를 도입·확장하여 경제 성장과 신·재생에너지 발전이 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하였다. 특별히, 본 연구에서는 2021년 총 재생에너지 발전 중 64%가량을 차지하는 태양광과 풍력에너지 발전이 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 따라서 본 연구에서 장기적 균형 관계의 추정을 위하여 식 (1)과 같은 추정모형을 사용하였다.

$$\ln GHG = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GRDP + \alpha_2 (\ln GRDP)^2 + \alpha_3 \ln EC + \alpha_4 \ln SUN + \alpha_5 \ln WIND + \epsilon \quad (1)$$

여기서 $\ln GHG$ 는 i 광역단체의 t 기 온실가스 배출량의 자연 로그 값을 나타내며, $GRDP$ 는 i 광역단체의 t 기 지역내총 생산을 의미한다. EC 는 i 광역단체의 t 기 에너지 소비량을 나타내고 SUN 과 $WIND$ 는 각각 i 광역단체의 t 기 태양광 및 풍력 발전량을 의미하며, ϵ 는 오차항을 나타낸다.

이 연구는 환경 쿠즈네츠 곡선(EKC) 가설을 기반으로 소득 성장과 온실가스 배출량 간에 역 U자형 관계가 존재한다고 가정하였다. 보다 구체적으로 설명하면, 경제 발전의 초기 단계에서는 소득 수준이 낮아 국민이 환경 보호보다는 소득 증가에 더 관심을 두기 때문에 환경오염 물질의 배출이 경제가 성장함에 따라 급격히 증가하는 양상이 나타난다. 그러나 경제 성장이 지속되어 소득 수준이 일정 수준 이상으로 높아진 후에는 국민이 경제 성장보다는 환경 보호에 더 관심을 가지게 되어 환경오염 물질의 배출이 감소하는 현상이 나타나게 된다. 이러한 두 가지 효과의 결합은 소득과 오염 수준 간에 역 U자형 관계가 존재한다고 가정한다. 따라서 식 (1)에서 α_1 과 α_2 의 부호는 각각 정(+)과 부(-)의 부호를 가질 것으로 예상할 수 있다($\alpha_1 > 0, \alpha_2 < 0$). 경제 성장에 따른 에너지 소비의 증가는 온실가스 배출을 증가시키는 경향이 있으므로, 에너지 소비와 온실가스 배출 간에는 정(+)의 관계가 성립함을 예상할 수 있다($\alpha_3 > 0$). 또한, 태양광과 풍력 발전은 재생에너지 발전원으로 이들 발전을 통해 생산된 전력 소비의 증가는 화석연료 발전량을 감소시켜 온실가스 배출을 저감하고 환경의 질을 향상시킬 것이므로, α_4 와 α_5 는 부(-)의 부호를 가질 것으로 예상된다($\alpha_4 < 0, \alpha_5 < 0$).

식 (1)은 온실가스 배출량과 그 결정 변수 간의 장기적인 균형 관계를 나타낸 식이다. Pesaran *et al.* (1999)의 PMG 추정에서는 장기적인 균형 관계와 설명변수의 변화에 따른 효과가 장기적 균형으로의 조정되는 속도를 추정하면서 단기 동태 균형도 동시에 이루어져야 하는데, 이를 추정하기 위하여 식 (1)은 자기 회귀 분배 시차(autoregressive distributed lag, ARDL) 형태의 식 (2)와 같이 재정의 될 수 있다.

$$\ln GHG = \sum_{j=1}^p \gamma_{ij} \ln GHG_{i,t-j} + \sum_{j=0}^q \delta_{ij} \ln X_{i,t-j} + \theta_i + \mu \quad (2)$$

여기서 $\ln X_{i,t-j}$ 는 설명변수의 (4×1) 벡터인 $\ln X_{i,t-j} = [\ln GRDP, (\ln GRDP)^2, \ln EC, \ln SUN, \ln WIND]$ 를 의미하며, θ_i 는 횡단면 고정 효과를 나타내며, μ 는 평균이 0이고 분산이 σ_i^2 이며 독립적인 분포를 가지는 오차항을 의미한다. 식 (2)의 오차 수정(error-correction) 버전은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Delta \ln GHG = \rho_i (\ln CO_{2,t-1} - \alpha_{0i} - \alpha_i' \ln X) + \sum_{j=1}^{p-1} \gamma_{ij}^* \Delta \ln GHG_{i,t-j} + \sum_{j=1}^{q-1} \delta_{ij}^* \Delta \ln X_{i,t-j} + \theta_i + \mu \quad (3)$$

여기서 $\rho_i = -\left(1 - \sum_{j=1}^p \gamma_{ij}\right)$; $\alpha_i = -\left(\sum_{j=0}^q \delta_{ij} / \rho_i\right)$;

$$\gamma_{ij}^* = -\sum_{m=j+1}^p \gamma_{im}, \quad j=1, 2, \dots, p-1;$$

$$\delta_{ij}^* = -\sum_{m=j+1}^q \delta_{im}, \quad j=1, 2, \dots, q-1 \text{ 와 같이 도출된다.}$$

식 (3)에서 이산화탄소 배출량과 설명변수 간에 장기적 공적분 관계를 의미하고 합계(Σ)를 따르는 차분 형태로 표현된 계수들은 단기적 관계를 나타내며, 시차(lag)의 길이 p 와 q 는 AIC(Akaike Information Criterion) 최솟값에 의해서 결정된다. ρ_i 는 오차 수정 계수를 나타내는데, 이는 설명변수의 변화에 따른 장기 균형으로의 조정 속도를 의미한다.

3.2 사용자료

내용을 본 연구에서는 2010년부터 2021년까지 세종시를 제외한 16개 광역자치단체의 온실가스 배출량과 그에 영향을 주는 요인 간의 관계를 분석하였다. 16개 광역자치단체는 서울특별시와 부산광역시, 대구광역시, 인천광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시 등 6개 광역시 및 경기도, 강원 특별자치도, 충청북도, 충청남도, 전북 특별자치도, 전라남도, 경상북도, 경상남도, 제주특별자치도를 포함한다. 따라서 16개 지역 및 12개 시계열을 포함한 총 192개의 패널데이터를 사용하여 분석을 진행하였다. 각 광역자치단체의 온실가스 배출량 데이터는 온실가스 종합정

보센터에서 제공하는 2023년 지역 온실가스 배출량(2010-2021) 시범 산정 결과 데이터를 수집하여 사용하였다. 지역내총생산 자료는 통계청 국가통계포털(KOSIS)을 이용하여 획득하였으며, 에너지 소비량 데이터는 에너지경제연구원 에너지 소비량 데이터는 에너지경제연구원 에너지 소비량 데이터를 수집하여 사용하였다. 태양광과 풍력 발전량 자료는 한국에너지공단 신·재생에너지 센터의 신·재생에너지 보급실적 조사 자료에서 획득하였다. 모든 자료는 통계청의 국가통계포털(KOSIS)에서 제공하는 지

역별 인구수로 나누어 1인당 개념을 사용하였으며, 각 변수에 로그를 취하여 분석을 진행하였다. 분석에 사용된 변수에 대한 설명과 자료의 단위, 출처 등을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 분석 기간 지역별 자료의 특성을 살펴보면, 1인당 총 온실가스 배출량의 경우 평균적으로 충청남도의 배출량이 가장 많았고 그 뒤를 전라남도과 울산광역시가 있고 있으며, 서울특별시의 1인당 평균 온실가스 배출량이 가장 작은 것으로 나타났다.

1인당 평균 지역내총생산은 울산광역시가 가장 높고 그 뒤를 충청남도과 서울특별시가 있고 있으며, 대구광역시의 1인당 평균 지역내총생산이 가장 낮은 것으로 나타났다. 1인당 평균 에너지 소비량은 울산광역시, 전라남도, 충청남도 순으로 많은 것으로 나타났으며, 서울특별시가 가장 낮은 것으로 나타났다.

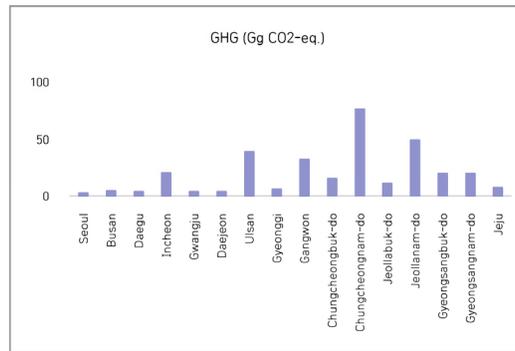
1인당 태양광 발전량의 경우 전라남도, 전북 특별자치도, 충청남도 순으로 높은 것으로 나타났고, 서울특별시가 가장 낮은 것으로 나타났다. 마지막으로 풍력 발전량은 제주 특별자치도와 강원 특별자치도, 경상북도, 전라남도의 순으로 높은 것으로 나타났으며, 나머지 지역은 발전량이 아주 미미한 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 태양광 및 풍력 발전량의 2010년부터 2021년 변화 추이를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 풍력 발전량은 지속적이고 완만한 추세로 증가하는 것을 알 수 있으며, 태양광 발전량은 정부의 태양광 발전 보급 정책으로 인해 2017년 이후 매우 빠른 속도로 증가하였음을 알 수 있다.

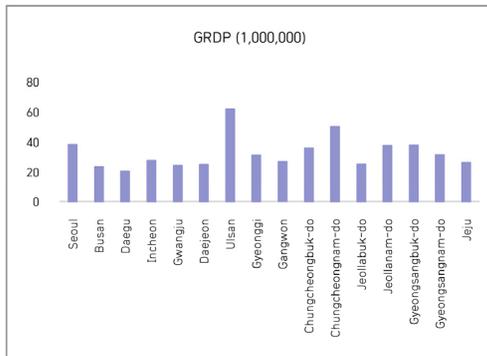
Table 2는 분석에 사용된 변수 자료의 기술 통계량을 보여준다. 16개 광역 자치 단체의 1인당 온실가스 배출량의 평균은 19.70 Gg CO₂-eq.이며, 표준편차는 20.13이다. 1인당 지역내총생산과 지역내총생산 공급의 평균은 각각 3천2백69만 원과 11억 8천5백62만 원이며, 표준편차는 각각 10.85와 873.27이다. 1인당 에너지 소비량의 평균은 6.12 toe이며, 표준편차는 6.98로 나타난다. 1인당 태양광 및 풍력 발전량의 평균은 각각 0.23 MWh와 0.08 MWh이며, 그 표준편차는 각각 0.43과 0.18로 나타난다.

Table 1. Description and source of usage variables

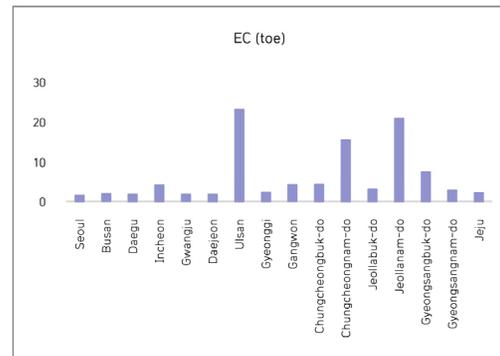
use variable	unit	variable name	Sources
greenhouse gas emissions per capita	Gg CO ₂ -eq.	<i>GHG</i>	General Greenhouse Gas Information Center Results of pilot calculation of greenhouse gas emissions in the region ^[45]
gross regional domestic product per capita (2015=100)	1,000,000	<i>GRDP</i>	National Statistical Office (KOSIS) ^[46]
the square of gross regional product per capita (2015=100)	1,000,000	$(GRDP)^2$	National Statistical Office (KOSIS) ^[46]
energy consumption per capita	toe	<i>EC</i>	Korea Energy Economics Institute Regional Energy Statistical Yearbook ^[47]
the amount of solar power generated per person	MWh	<i>SUN</i>	Korea Energy Agency Renewable Energy Center Survey on Renewable Energy Supply Performance ^[48]
the amount of wind power generated per person	MWh	<i>WIND</i>	Korea Energy Agency Renewable Energy Center Survey on Renewable Energy Supply Performance ^[48]



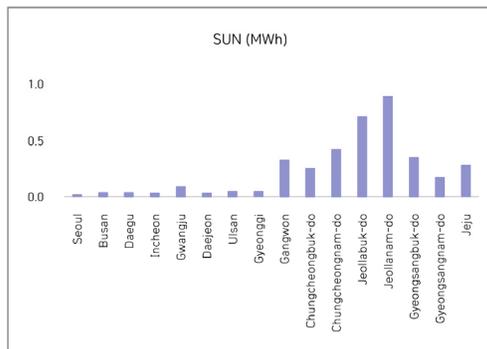
(a) GHG (Gg CO₂-eq.)



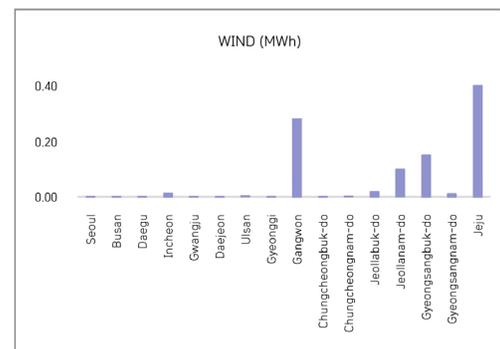
(b) GRDP



(c) EC



(d) SUN



(e) WIND

Fig. 1. Data for each region during the analysis period

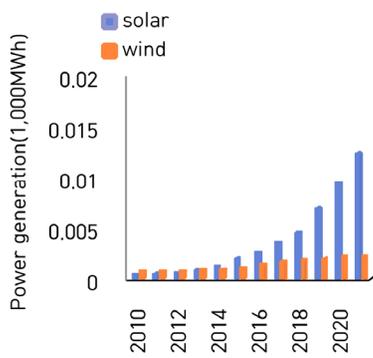


Fig. 2. Solar and wind power generation during the analysis period

Table 2. Descriptive statistics for used data

Variable	average	standard deviation	minimum value	maximum value
GHG	19.70	20.13	2.22	85.95
GRDP	32.69	10.85	17.56	62.98
(GRDP) ²	1185.62	873.27	308.49	3966.90
EC	6.12	6.98	1.38	26.76
SUN	0.23	0.43	0.00	2.84
WIND	0.08	0.18	0.00	0.86

4. 실증 분석 결과

본 연구에서 사용된 PMG 추정법은 사용자료의 시계열 과정이 $I(0)$ 을 따르는지 또는 $I(1)$ 를 따르는지에 상관없이 일정 추정량을 제공한다. 다만, 사용자료의 시계열이 $I(2)$ 이상의 과정을 따르면 PMG 추정을 수행할 수 없다. 따라서 PMG 추정법을 사용하기 위해서는 단위 근 검정을 통해 사용자료의 시계열 과정이 $I(0)$ 또는 $I(1)$ 을 따르는지 확인이 필요하다. 본 연구에서는 Im-Pesaran-Shin (IPS)와 Levin-Lin-Chu (LLC) 패널 단위 근 검정법을 사용하여 사용자료의 단위 근 존재 여부를 검정하였다. Table 3은 위 두 가지 검정법을 이용한 단위 근 검정 결과를 보여준다.

IPS 패널 단위 근 검정 결과에서는 $\ln GHG$, $\ln GRDP$, $(\ln GRDP)^2$ 변수의 수준 값은 단위 근이 존재한다는 귀무가설을 기각하지 못하여 단위 근이 존재하는 것으로 나타났다. 이 변수들의 1차 차분 값은 모두 단위 근이 존재한다는 귀무가설을 기각하는 것으로 나타나 해당 변수들은 과정을 따르는 것을 알 수 있다. 그 외 $\ln EC$ 와 $\ln SUN$, $\ln WIND$ 의 경우, 그 수준 값에 대해 IPS 패널 단위 근 검정 결과 5% 이내 통계적 유의수준에서 단위 근이 존재한다는 귀무가설을 기각하므로 $I(0)$ 과정을 따른 변수임을 알 수 있다. LLC 패널 단위는 검정 결과에서도 $\ln GHG$, $\ln EC$ 와

Table 3. Unit root test results using two test methods

Variable	IPS		LLC	
	level value	First-order difference value	level value	First-order difference value
$\ln GHG$	0.701 (0.759)	-7.563 (0.000)***	-1.916 (0.028)**	-11.150 (0.000)***
$\ln GRDP$	1.787 (0.963)	-7.989 (0.000)***	-0.745 (0.228)	-11.207 (0.000)***
$(\ln GRDP)^2$	2.199 (0.986)	-8.048 (0.000)***	-0.248 (0.402)	-11.285 (0.000)***
$\ln EC$	-2.572 (0.005)***	-7.583 (0.000)***	-6.584 (0.000)***	-10.884 (0.000)***
$\ln SUN$	2.564 (0.995)***	-5.476 (0.000)***	-2.593 (0.005)***	-8.917 (0.000)***
$\ln WIND$	-1.646 (0.050)**	-5.902 (0.000)***	-10.450 (0.000)***	-9.217 (0.000)***

주: 괄호 안은 p -통계값을 나타냄. ***, **는 각각 1% 및 5% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

$\ln SUN$, $\ln WIND$ 변수는 $I(0)$ 과정을, $\ln GRDP$, $(\ln GRDP)^2$ 변수는 $I(1)$ 과정을 따르는 것으로 나타났다. 따라서 두 검정 결과 모든 사용 변수의 시계열이 $I(0)$ 또는 $I(1)$ 과정을 따르므로 PMG 분석에 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

또한 PMG 추정을 위해서는 사용 변수 간에 패널 공적분 관계가 성립되어야 하는데, 이를 검정하기 위하여 본 연구에서는 Pedroni(1999)^[49]가 제안한 7개 패널 공적분 검정을 시행하였고, 그 결과는 Table 4에서 볼 수 있다.

Pedroni패널 공적분 검정 결과, 패널 v -통계치를 제외한 6개의 통계치가 5% 이내 유의수준에서 통계적으로 유의미하여 변수 간 공적분 관계가 성립하지 않는다는 귀무가설을 기각하므로, 분석에 사용된 변수 간에 공적분 관계가 성립하고 있다고 볼 수 있다. 다만, 패널 v -통계치가 유의하지 않은 것으로 나타나 변수 간 공적분 관계에 대해 확인할 수 없다. 이럴 경우 추정된 오차수정계수가 통계적으로 유의하며, -1에서 0 사이의 값을 가지면 변수 간 공적분 관계가 성립된다는 결론을 얻을 수 있다.^[50,51] 따라서 Table 5의 PMG 추정 결과의 오차 수정항 계수를 보면 그 추정값

Table 4. Panel cointegration test results

Pedroni test	Statistics
Panel v -Statistics	-1.07
Panel rho-Statistics	2.75***
Panel t -Statistics	-5.50***
Panel ADF-Statistics	-2.43**
Group rho-Statistics	4.54***
Group t -Statistics	-8.17***
Group ADF-Statistics	-2.40**

주: ***, **는 각각 1%와 5% 유의수준에서 통계적으로 유의미함을 나타냄.

Table 5. PMG estimation results

Variable	Estimated coefficient	z -Statistics
$\ln GRDP$	4.256	7.75***
$(\ln GRDP)^2$	-0.585	-8.22***
$\ln EC$	0.328	6.86***
$\ln SUN$	-0.041	-4.58***
$\ln WIND$	-0.119	-6.74***
Error corection term	-0.447	-3.77***

주: ***는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미함을 나타냄.

이 -0.447이고 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하므로, 변수 간에 공적분 관계가 성립함을 확인할 수 있다. 따라서 변수 간 공적분 관계가 성립하므로 PMG 추정법을 사용한 분석 결과는 Table 5에 정리되어 있다.

온실가스 배출량 추정에 사용된 모든 변수가 1% 통계적 유의수준에서 유의하며, 분석 모형 분야에서 설명한 예상 부호와 일치하는 것으로 분석되었다. 추정 결과를 변수별로 더욱 자세하게 살펴보면, 지역내총생산($\ln GRDP$)과 지역내총생산의 제곱($(\ln GRDP)^2$)에 대한 추정 계수는 각각 양(+)의 부호와 음(-)의 부호를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 지역내총생산이 일정 수준에 미치지 이전까지는 온실가스 배출량이 증가하다가 일정 수준 이상에 도달하면 그 이후 온실가스의 배출이 감소하는 양상으로 전환된다는 EKC 가설이 성립하고 있음을 의미한다. 이들 변수에 대한 추정 계수는 지역내총생산이 1% 증가함에 온실가스 배출량이 4.256%씩 빠르게 증가하다가 총생산이 일정 수준의 임계점을 지나면 지역내총생산이 1% 증가함에 따라 온실가스 배출량이 0.585%씩 감소함을 알 수 있다. 이 추정값을 가지고 온실가스 배출량이 감소세로 전환되는 임계 수준의 1인당 지역내총생산을 계산하면, 3,793만 원 ($= \exp\left(-\frac{4.256}{2 \times (-0.585)}\right) = 37.93$) 수준인 것으로 분석되었다. 분석 기간 간 1인당 지역내총생산의 평균이 임계 수준보다 높은 광역자치단체는 울산광역시와 충청남도, 서울특별시 정도이고 경상북도와 전라남도가 임계점 수준에 있으며, 그 외 지역은 1인당 지역내총생산이 임계점보다 낮은 것으로 나타났다. 에너지 소비량 변수($\ln EC$)의 추정 계수는 0.328이며 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 이는 에너지 소비량이 1% 증가할 때 온실가스 배출은 0.328% 증가함을 의미한다.

본 연구의 주요 관심 변수인 태양광과 풍력에 대한 추정 결과는 다음과 같다. 태양광($\ln SUN$)과 풍력 발전($\ln WIND$)의 추정 계수는 각각 -0.041과 -0.119이며, 모두 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 이들 추정 계수는 태양광과 풍력 발전량이 각각 1% 늘어나면, 그에 따라 온실가스 배출량은 각각 0.041% 및 0.119% 감소함을 의미한다. 다르게 말하면, 태양광과 풍력 발전이 온실가스 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 태양광 발전은 24.39%

($=1/0.041$), 풍력 발전은 8.4%($=1/0.119$) 증가해야 함을 의미한다. 즉, 1%의 풍력 발전량 증가가 1%의 태양광 발전량 증가에 비해 약 2.9배의 온실가스 감축 효과가 있다고 할 수 있다. 다만, 효율적인 신·재생에너지 보급 정책의 수립을 위해서는 태양광의 설치 및 발전 비용과 풍력의 설치 및 발전 비용의 차이뿐만 아니라 지역별 일조량 및 풍량까지 고려하여야 할 것이다.

마지막으로 오차수정항의 추정 계수는 -0.447이며 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타나, 앞서 설명한 대로 사용된 변수 간 공적분 관계가 성립됨을 확인할 수 있다. 또한 오차수정항의 추정 계수는 외부 충격으로 인한 설명변수의 변화로 장기적 균형 관계가 깨진 후 단기 조정과정을 통해 다시 장기 균형으로 회복되어가는 조정 속도를 의미한다. 즉, 외부 충격으로 인한 장기 불균형이 발생할 때 다시 장기 균형을 회복하는데 약 2.2년($=1/0.447$) 정도 소요됨을 의미한다.

5. 결론 및 시사점

지속 가능한 개발의 개념은 최근 전 세계의 정책 의제에서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 그중에서도 지구 온난화 문제의 해결을 위한 온실가스 감축 이슈는 대다수 국가의 환경 정책에 빠르게 반영되고 있으며, 이에 따라 화석 에너지 중심에서 신·재생에너지 중심으로의 발전 전환이 급속하게 이루어지고 있다. 그러나 최근 다양한 연구에서 신·재생에너지 발전의 증가가 온실가스 감축에 미치는 영향에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있음에도 불구하고, 신·재생에너지원별 온실가스 저감 효과의 분석은 지금까지 거의 진행되지 않은 것으로 확인된다. 신·재생에너지원별 온실가스 감축 효과의 분석은 효율적인 온실가스 감축을 위한 최적의 지역별 신·재생에너지원별 보급 정책의 수립이 가능하게 한다. 이에 본 연구는 우리나라 2021년 재생에너지 발전 비중의 63.9%가량을 차지하는 태양광과 풍력 발전, 그리고 그 외 다수의 연구에서 온실가스 배출 요인으로 포함되는 지역내총생산 및 에너지 소비가 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하고 그 시사점을 제공하고자 수행되었다. 이를 위하여 2010년부터 2021년까지 세종시

를 제외한 16개 광역자치단체의 패널데이터를 사용하여 Pesaran *et al.*(1999)의 PMG 추정을 진행하였다.

분석 결과, 지역내총생산과 지역내총생산의 제곱에 대한 추정 계수를 통해 EKC 가설이 성립하고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 일정 수준까지는 지역내총생산이 1% 증가함에 온실가스 배출량이 4.256%씩 빠르게 증가하다가, 총생산이 일정 수준의 임계점을 지나면 지역내총생산의 1% 증가가 0.585%의 온실가스 배출량 감소를 가져오는 것으로 나타났다. 에너지 소비량의 경우 1% 증가가 0.328%의 온실가스 배출량 증가를 유발하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 주요 관심 변수인 태양광과 풍력 발전량의 경우, 각각 1% 증가함에 따라 온실가스 배출량은 0.041% 및 0.119% 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 온실가스 배출량의 1% 감축을 위해 태양광 발전은 24.39%, 풍력 발전은 8.4% 증가해야 함을 의미한다. 즉, 1%의 온실가스 감축을 위해서는 풍력 발전의 증가가 태양광 발전의 증가에 비해 약 2.9 배의 효과가 있음을 시사한다.

본 연구는 신·재생에너지원별 온실가스 감축 효과를 분석하기 위한 시발점으로, 우리나라 재생에너지 발전 중 가장 일반적이면서 큰 비중을 차지하는 태양광과 풍력 발전이 온실가스 배출에 미치는 영향을 최초로 분석했다는 점에서 학문적 의미가 있다. 기존의 선행 연구들은 신·재생에너지가 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하는 데 신·재생에너지 총발전량을 사용하였기 때문에 신·재생에너지원별 환경오염에 대한 영향을 분석하지는 못하였다. 반면, 본 연구는 우리나라의 주된 신·재생에너지원인 태양광과 풍력 발전의 온실가스 감축 효과를 분석한 연구의 시작이라는 학문적 의미가 있다. 또한 실증 분석을 통해 도출된 태양광 및 풍력 발전이 온실가스 감축에 미치는 각각의 영향을 바탕으로 지역별 지리적 환경 등을 고려한 보급 비용 대비 온실가스 감축 효과를 도출함으로써 지역별 태양광 및 풍력 발전의 효율적 보급 정책 수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있다는 점에서 실무적으로도 시사하는 바가 크다 할 것이다.

다만, 더욱 효율적인 지역별 신·재생에너지 보급 정책의 수립에는 에너지원별 발전을 위한 설치 및 발전 비용 차이 뿐만 아니라 지역별 일조량이나 풍량 등 지리적인 요인들도 함께 고려되어야 할 것이다. 이를 위해서는 신·재생에너지

원의 설치 비용과 지역별 일조량 및 풍량 등을 고려한 발전 비용을 도출하고 이를 비교 분석하는 과정이 필요한데, 이에 관한 연구는 향후 진행될 연구의 몫으로 남겨둔다.

References

- [1] Pesaran, M.H., Shin, Y., and Smith, R.P., 1999, "Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels", *J. Am. Stat. Assoc.*, **94**, 621-634.
- [2] Kraft, J., and Kraft, A., 1978, "Note and comments: On the relationship between energy and GNP", *J. Energy Dev.*, **3**(2), 401-403.
- [3] Glasure, Y.U., and Lee, A.R., 1998, "Cointegration, error-correction, and the relationship between GDP and energy: the case of South Korea and Singapore", *Resour. Energy Econ.*, **20**(1), 17-25.
- [4] Masih, A.M.M., and Masih, R., 1998, "A multivariate cointegrated modelling approach in testing temporal causality between energy consumption, real income and prices with an application to two Asian LDCs", *Appl. Econ.*, **30**(10), 1287-1298.
- [5] Soytaş, U., and Sari, R., 2003, "Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets", *Energy Econ.*, **25**(1), 33-37.
- [6] Wolde-Rufael, Y., 2005, "Energy demand and economic growth: the African experience", *J. Policy Model.*, **27**(8), 891-903.
- [7] Akinlo, A.E., 2008, "Energy consumption and economic growth: evidence from 11 African countries", *Energy Econ.*, **30**(5), 2391-2400.
- [8] Ozturk, I., and Acaravci, A., 2010, "CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in Turkey", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(9), 3220-3225.
- [9] Payne, J.E., 2010, "Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth", *J. Econ. Stud.*, **37**(1), 53-95.
- [10] Sadorsky, P., 2012, "Energy consumption, output and trade in South America", *Energy Econ.*, **34**(2), 476-488.
- [11] Hamdi, H., and Sbia, R., 2013, "Dynamic relationships between oil revenues, government spending and economic growth in an oil-dependent economy", *Econ. Model.*,

- 35, 118-125.
- [12] Omri, A., 2014. "An international literature survey on energy-economic growth nexus: evidence from country-specific studies", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 38, 951-959.
- [13] Gozgor, G., Lau, C.K.M., and Lu, Z., 2018, "Energy consumption and economic growth: new evidence from the OECD countries", *Energy*, 153, 27-34.
- [14] Rathnayaka, R.M.K.T., Seneviratna, D.M.K.N., and Long, W., 2018, "The dynamic relationship between energy consumption and economic growth in China", *Energy Sources Part B: Econ. Plan. Policy*, 13(5), 264-268.
- [15] Grossman, G., and Krueger, A., 1991, "Environmental Impacts of the North American Free Trade Agreement", NBER Working Paper No. 3914, https://www.nber.org/system/files/working_papers/w3914/w3914.pdf.
- [16] Shafik, N., 1994, "Economic development and environmental quality: an economic analysis", *Oxf. Econ. Pap.*, 46, 757-773.
- [17] Agras, J., and Chapman, D., 1999, "A dynamic approach to the environmental Kuznets curve hypothesis", *Ecol. Econ.*, 28(2), 267-277.
- [18] Heil, M.T., and Selden, T.M., 1999, "Panel stationarity with structural breaks: carbon emissions and GDP", *Appl. Econ. Lett.*, 6(4), 223-225.
- [19] Friedl, B., and Getzner, M., 2003, "Determinants of CO₂ emission in a small open economy", *Ecol. Econ.*, 45(1), 133-148.
- [20] Dinda, S., and Coondoo, D., 2006, "Income and emission: a panel data-based cointegration analysis", *Ecol. Econ.*, 57(2), 167-181.
- [21] Managi, S., and Jena, P.R., 2008, "Environmental productivity and Kuznets curve in India", *Ecol. Econ.*, 65(2), 432-440.
- [22] Kim, H.S., and Baek, J., 2011, "The environmental consequences of economic growth revisited", *Econ. Bull.*, 31(2), 1198-1211.
- [23] Baek, J., and Kim, H.S., 2013, "Is economic growth good or bad for the environment? Empirical evidence from Korea", *Energy Econ.*, 36, 744-749.
- [24] Yao, S., Zhang, S., and Zhang, X., 2019, "Renewable energy, carbon emission and economic growth: a revised environmental Kuznets curve perspective", *J. Clean. Prod.*, 235, 1338-1352.
- [25] Chen, Q., and Taylor, D., 2020, "Economic development and pollution emissions in Singapore: evidence in support of the environmental Kuznets curve hypothesis and its implications for regional sustainability", *J. Clean. Prod.*, 243, 118637.
- [26] Yu, E.S.H., and Choi, J.Y., 1985, "The causal relationship between energy and GNP: an international comparison", *J. Energy Dev.*, 10(2), 249-272.
- [27] Soytaş, U., and Sari, R., 2006, "Energy consumption and income in G-7 countries", *J. Policy Model.*, 28(7), 739-750.
- [28] Ang, J.B., 2007, "CO₂ emissions, energy consumption, and output in France", *Energy Policy*, 35(10), 4772-4778.
- [29] Lean, H.H., and Smyth, R., 2010, "CO₂ emissions, electricity consumption and output in ASEAN", *Appl. Energy*, 87(6), 1858-1864.
- [30] Baek, J., and Kim, H.S., 2011, "Trade liberalization, economic growth, energy consumption and the environment: time series evidence from G-20 economies", *East Asian Econ. Rev.*, 15(1), 3-32.
- [31] Omri, A., 2013, "CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth nexus in MENA countries: evidence from simultaneous equations models", *Energy Econ.*, 40, 657-664.
- [32] Zaghoudi, T., 2017, "Internet usage, renewable energy, electricity consumption and economic growth: evidence from developed countries", *Econ. Bull.*, 37(3), 1612-1619.
- [33] Soukiazis, E., Proenca, S., and Cerqueira, P.A., 2017, "The interconnections between renewable energy, economic development and environmental pollution: a simultaneous equation system approach", *Energy J.*, 40(4), 1-24.
- [34] Kim, J-H., and Kim, H.S., 2015, "The Effect of Electricity Generation through Renewable Energy on CO₂ Emissions in Korea", *Energy Econ. Res.*, 14(3), 185-201.
- [35] Saidi, K., and Omri, A., 2020, "The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries", *Environ. Res.*, 186, 109567.

- [36] Kim, H.S., 2021, "Comparison of cost efficiencies of nuclear power and renewable energy generation in mitigating CO₂ emissions", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **28**(1), 789-795.
- [37] Liu, X., 2005, "Explaining the relationship between CO₂ emissions and national income—the role of energy consumption", *Econ. Lett.*, **87**(3), 325-328.
- [38] Zhang, X.P., and Cheng, X.M., 2009, "Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China", *Ecol. Econ.*, **68**(1), 2706-2712.
- [39] Soytaş, U., and Sari, R., 2009, "Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: challenges faced by an EU candidate member", *Ecol. Econ.*, **68**(6), 1667-1675.
- [40] Apergis, N., and Payne, J.E., 2009, "CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America", *Energy Policy*, **37**(8), 3282-3286.
- [41] Jalil, A., and Mahmud, S.F., 2009, "Environment Kuznets curve for CO₂ emissions: a cointegration analysis for China", *Energy Policy*, **37**(12), 5167-5172.
- [42] Halicioglu, F., 2009, "An econometric study of CO₂ emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey", *Energy Policy*, **37**(3), 1156-1164.
- [43] Menyah, K., and Wolde-Rufael, Y., 2010, "CO₂ emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US", *Energy Policy*, **38**(6), 2911-2915.
- [44] Apergis, N., and Payne, J.E., 2010, "A panel study of nuclear energy consumption and economic growth", *Energy Econ.*, **32**(3), 545-549.
- [45] Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 2023, "2023 Regional Greenhouse Gas Emission ilot Estimation Results (2010-2021)", <https://www.gir.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=6752&fileSeq=1>.
- [46] Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2024, <https://kosis.kr/>.
- [47] Korea Energy Economics Institute, 2024, "Regional Energy Statistics Yearbook", https://kesis.keei.re.kr/board.es?mid=a20301030000&bid=0048&act=view&list_no=1063.
- [48] Renewable Energy Center, Korea Energy Agency, 2024, "Renewable Energy Supply Performance Survey", https://nr.energy.or.kr/NREST_HP/CST/home.do.
- [49] Pedroni, P., 1999, "Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors", *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, **61**(S1), 653-678.
- [50] Banerjee A., Dolado, J.J., and Mestre, R., 1998, "Error-correction mechanism tests for cointegration in a single-equation framework", *J. Time Ser. Anal.*, **19**(3), 267-284.
- [51] Kremers, J.J.M., Ericson, N.R., and Dolado, J.J., 1992, "The power of cointegration test", *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, **54**(3), 325-348.