

유럽 내 탄소배출권거래제 도입에 따른 연결계통국가들의 전력교역 상황을 고려한 탄소배출량 결정요인분석

윤경수* · 홍원준**

요약 : 본 연구는 유럽지역 내 20개 연결계통국가들을 대상으로 2000년부터 2014년까지의 패널 자료를 구성하여 유럽이 2005년에 도입한 배출권거래시장을 기점으로 표본기간을 전과 후로 나누어 탄소배출량 결정요인을 이분산과 자기상관의 문제를 고려한 패널 GLS 방법으로 추정하였다. 종속변수로는 개별국가들에서의 탄소배출량이 사용되었으며, 설명변수로는 발전원별 발전량 비중, 이웃 국가들의 전력수급률, 자원보유국의 전력생산량, 발전원집중도, 산업부문에서의 1인당 총에너지 사용량, 전력가격에서의 세금, 1인당 전력 순수출량, 1인당 국토면적의 크기 등이 사용되었다. 추정결과에 의하면, 2005년을 기점으로 전과 후 모두에서 원전과 재생에너지 발전량 비중, 발전원집중도, 1인당 국토면적의 크기 등은 탄소배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타난 반면 석탄 발전량 비중, 이웃 국가들의 전력수급률, 자원보유국의 전력생산량, 산업부문에서의 1인당 총에너지 사용량 등은 탄소배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이외 가스 발전량 비중과 전력가격에서의 세금은 2005년 이전에 대해서만 각각 탄소배출량에 음(-)과 양(+)의 영향을 미쳤으며, 1인당 전력 순수출량은 2005년 이후에 대해서만 탄소배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 저탄소 녹색성장으로의 탄소배출량 절감을 위한 거시적인 대응전략을 제시하며 전력교역시장을 고려한 중장기 전원믹스 최적화 방안과 그 역할에 대한 의미와 가치를 시사하고 있다.

주제어 : 탄소배출량, 전력교역, 전원믹스, 배출권거래시장, 발전원집중도

JEL 분류 : F18, N74, Q01, Q48, Q54, Q56

접수일(2022년 3월 14일), 수정일(2022년 3월 31일), 게재확정일(2022년 3월 31일)

* 한국원자력연구원 경제박사, 제1저자, 교신저자(e-mail: yoonks@kaeri.re.kr)

** 단국대학교 경제학과 박사과정, 공저자(e-mail: 16hong@dankook.ac.kr)

Analysis of Determinants of Carbon Emissions Considering the Electricity Trade Situation of Connected Countries and the Introduction of the Carbon Emission Trading System in Europe

Kyungsoo Yoon* and Won Jun Hong**

ABSTRACT : This study organized data from 2000 to 2014 for 20 grid-connected countries in Europe and analyzed the determinants of carbon emissions through the panel GLS method considering the problem of heteroscedasticity and autocorrelation. At the same time, the effect of introducing ETS was considered by dividing the sample period as of 2005 when the European emission trading system was introduced. Carbon emissions from individual countries were used as dependent variables, and proportion of generation by each source, power self-sufficiency ratio of neighboring countries, power production from resource-holding countries, concentration of power sources, total energy consumption per capita in the industrial sector, tax of electricity, net electricity export per capita, and size of national territory per capita. According to the estimation results, the proportion of nuclear power and renewable energy generation, concentration of power sources, and size of the national territory area per capita had a negative (-) effect on carbon emissions both before and after 2005. On the other hand, the proportion of coal power generation, the power supply and demand rate of neighboring countries, the power production of resource-holding countries, and the total energy consumption per capita in the industrial sector were found to have a positive (+) effect on carbon emissions. In addition, the proportion of gas generation had a negative (-) effect on carbon emissions, and tax of electricity were found to have a positive (+) effect. However, all of these were only significant before 2005. It was found that net electricity export per capita had a negative (-) effect on carbon emissions only after 2005. The results of this study suggest macroscopic strategies to reduce carbon emissions to green growth, suggesting mid- to long-term power mix optimization measures considering the electricity trade market and their role.

Keywords : Carbon Emission, Electricity Trade, Power mix, Emission Trading System, Concentration of Power Sources

Received: March 14, 2022. Revised: March 31, 2022. Accepted: March 31, 2022.

* Ph.D. in Economics, Korea Atomic Energy Research Institute, First author, Corresponding author (e-mail: yoonks@kaeri.re.kr)

** Ph.D. student, Department of Economics, Dankook University, Coauthor(e-mail: 16hong@dankook.ac.kr)

1. 서론

최근 5년 동안 지구의 온도는 1850년 이후로 가장 높았다. 이에 따라, 세계 각국의 기후위기 대응 움직임이 가속화되고 있다. 2015년 파리협약에서 195개국이 지구 평균 기온의 증가폭을 산업화 이전을 기준으로 2°C 이하로 유지하며, 1.5°C까지 제한하기 위해 함께 노력하기로 약정한 이후, 온실가스 순배출을 0으로 만드는 “탄소중립”을 선언하는 국가들이 빠르게 늘어나고 있다. 현재까지 탄소중립을 법제화한 국가는 우리나라를 포함하여 Germany, France, UK, Japan 등 총 16개국이 있으며, 정책으로서 문서화한 국가는 58개국이며 대표적으로 China, USA가 있다. 그 외에 공식적으로 선언하거나 서약한 국가는 21개국이다. 또한, 주목할만한 점은 탄소중립을 법제화한 16개국 중 11개국이 모두 유럽 국가이며, 이 중 Germany, Portugal, Sweden은 대부분의 국가에서 2050년 혹은 그 이후로 목표연도를 설정한 것과 달리 2045년으로 설정하였다는 것이다. 유럽 내 주요국들을 중심으로 탄소국경조정세가 논의되고 있는 가운데, 온실가스배출량 9위인 우리나라) 역시 다양한 측면에서 대응방안을 모색할 필요가 있다.

한편, 2019년 기준 전 세계 온실가스 배출의 약 43%²⁾는 전환부문³⁾에서 발생하였다. 따라서 전환부문에서의 효율적이고 효과적인 온실가스 감축은 탄소중립 목표 달성을 위한 필수요소이다. 하지만, 여전히 전 세계 전력생산의 60% 이상이 온실가스를 발생시키는 화석연료에 의존⁴⁾하고 있으며, 풍력 및 태양광 발전의 비용 및 간헐성으로 인한 계통 불안정성⁵⁾ 문제 등으로 인해 다수의 국가들이 전환부문에서의 온실가스 감축에 상당한 어려움을 겪을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 유럽의 전력생산은 단 35%만이 화석연료에 의존하고 있으며, 풍력 및 태양광 등을 통한 발전 비중이 약 21%에 달한다.⁶⁾ 또한, 유럽의 재생에너지 발전량은 전 세계 재생에너지 발전량의 약 30%를 차지하는 데, 이는 유럽의 전체 발전량이 전 세계 발전량에서 차지하는 비중이 약 15%⁷⁾인 것을 고려

1) 2020년 기준으로 598MtonCO₂이다. (Global Carbon Atlas: <http://www.globalcarbonatlas.org/>)

2) 전체 3,190만 Gton, 전환부문 1,400만 Gton 배출되었다. (IEA: <http://www.iea.org>)

3) 전기 및 열을 생산하는 부문을 말한다.

4) 2019년 기준으로 화석연료로부터 16,967.5 TWh, 전체 27,001 TWh가 생산되었다. (BP, 2021)

5) 재생에너지 발전은 원하는 시기에 원하는 양만큼 발전하는 것이 불가능하다. 따라서 과소·과잉 생산될 수도 있으며 이 경우 주파수 변동을 야기해 계통 불안정성을 높일 수 있다.

6) 2019년 기준 화석연료 1,517.3 TWh, 재생에너지 840 TWh, 유럽 전체 발전량 3,992.1 TWh이다. (BP, 2021)

한다면 상당히 유의미한 수치인 것을 알 수 있다.

이처럼 유럽지역이 가변재생에너지자원을 보다 빠르게 보급·활성화하며 글로벌 탄소중립을 선도할 수 있었던 데에는 국가 간 전력계통연계를 통한 전력교역⁸⁾활성화가 주요한 요인으로 작용했을 것이라는 판단이다. 유럽지역은 오래전부터 전력교역시장을 형성하여 이를 활용한 국가 간 전력교역이 가장 활발하게 운영되고 있는 지역이다. 최근 유럽에서는 국가 간 전력교역을 통해 가변재생에너지원의 간헐성 문제도 일정 부분 해소하며 무탄소 전원의 이용 극대화 방안으로서 전력교역이 보다 활성화되고 있다.⁹⁾ 탄소중립 목표 달성을 위한 전환부문에서의 온실가스 감축이 필수적인 상황이라는 점에서, 유럽지역을 대상으로 전력교역량 변수를 활용한 탄소배출량 결정요인을 분석하는 것은 국내외적으로 가치 있는 연구라고 할 수 있다.

유럽지역을 분석 대상으로 선정한 또 다른 이유는 유럽이 세계에서 가장 먼저 탄소배출권 시장을 도입한 지역이기 때문이다. 유럽연합은 2005년 유럽 탄소배출권 거래제(EU-Emission Trading System)를 도입하여 온실가스 총배출량을 규제하고 배출권의 시장 거래를 통해 효율적인 온실가스 감축을 도모하고 있다.¹⁰⁾ 온실가스배출량 결정요인을 살펴봄에 있어 전력교역과 탄소배출권 거래제 도입을 동시에 고려하여 분석할 수 있다는 것은 학술적으로 더욱 많은 시사점을 제공할 수 있는 장점을 지닌다.

한편, 국제사회는 기후위기를 극복하고 지속가능한 친환경 경제활동을 정의하는 녹색분류체계(Taxonomy)의 법제화에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 유럽의 EU Taxonomy를 필두로 우리나라도 K-Taxonomy에 관한 논의가 활발히 진행되고 있으며, 천연가스와 원자력을 친환경 자원으로서 고려할 것인지에 대한 사안이 이슈화되고 있다. 이는 곧 국가의 장기 에너지믹스(Energy Mix)의 방향성을 결정하는 과정이라는 할 수 있다. 즉, 기후위기 대응을 선도하는 유럽지역을 중심으로 각 발전원별로 탄소배출량에 미치는 영향을 실증분석하는 본 연구는 매우 시의적절하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전력교역을 중심으로 2000년부터 2014년까지의 유럽 20개 국

7) 2019년 기준 전 세계 재생에너지 발전량은 2,789.2 TWh이다.(BP, 2021)

8) 우리나라 역시 제9차 전력수급기본계획과 2050년 탄소중립 시나리오(안)에서의 동북아 슈퍼그리드 구축을 명시하고 있다.

9) 보다 자세한 내용은 II장 선행연구에서 다룬다.

10) 도입 초기에는 발전부문과 에너지집약 산업에서 배출되는 온실가스만을 대상으로 하였으며, 95% 배출권이 무상할당되었다. 이 기간의 불이행 과태료는 톤당 40유로였다.(European Commission)

가의 데이터를 활용하여 탄소배출량 결정요인을 밝히고자 한다. 이때, 표본 기간을 유럽이 배출권거래제를 도입한 2005년 전후로 구분한다. 이로써 탄소배출권 거래제 도입 전후로 각각의 결정요인이 탄소배출량에 미치는 영향이 어떻게 변화하는지를 살핀다. 설명변수로는 국가별 전원구성, 발전원집중도, 인구 1인당 국토면적¹¹⁾과 같은 전환부문의 주요 변수를 고려한다. 이는 전력교역과 배출권거래제 도입의 효과를 통제된 후에도 온실가스 배출 감소에 기여할 수 있는 변수를 식별한다는 데에 목적이 있으며, 국내외의 에너지믹스(Energy Mix) 정책에 시사점을 제공하고자 한다. 뿐만 아니라 기존 개별국가단위의 전력수급 여건만을 고려하는 연구들과 달리, 선행적으로 연결계통국가들을 선별하여 나라별·전원별 특성을 분석한 후 다자간 유기적인 전력교역관계를 고려해 보다 실효성 있는 증장기 저탄소 발전원 믹스 최적화 방안을 탐구·도출하는 데 주안점을 두고 있다. 이에 국가단위의 전력교역시장을 다루는 본 연구는 지역·지자체 단위의 전력교역시장(스마트그리드, 분산전원, 제주-내륙 간 HVDC연계 등)으로 확대·응용할 수 있다는 점에서 우리나라와 같은 독립계통국가에서도 지속적인 관심과 연구를 수행할 필요성을 지닌다.

이어지는 II장에서는 본 연구와 관련된 참고문헌을 정리하여 기존 연구대비 차별성을 밝힌다. III장에서는 기초통계량 분석과 모형설정 및 추정결과와 추정결과에 대한 해석을, 마지막 IV장에서는 요약 및 정책적 시사점을 제시한다.

II. 선행연구

Fuller(1971)가 전력계통 연계를 통한 국가 간 전력교역이 효율적인 에너지 활용에 도움이 된다고 밝힌 후에 전력교역의 사회적 편익에 관한 연구가 다양한 지역에 대해 실시되었다(Rogers and Rowse, 1989; Bowen et al., 1999; Yu, 2003; Pineau et al., 2004; Gnansounou et al., 2007; Heide, 2010; Ochoa and van Ackere, 2015; Zakeri et al., 2018). 더 나아가 Greenpeace and 3E(2008), Fichaux et al.(2009), Aboumahboub et al.(2010)는 국가 간 전력계통연계를 통한 전력교역이 재생에너지 발전이 가지는 간헐성 문제에 대

11) 해당 변수는 ① 자원 보유 여력, ② 대용량 발전설비(원전·석탄화력) 보급, ③ 원전의 사용후핵연료 관리 등의 측면에서 고려한다.

비하기 위한 불필요한 설비투자를 줄일 수 있다고 주장하였다. Child et al.(2019)은 국가 간 전력교역이 태양광 및 풍력 발전과 같은 간헐성 전원에 필연적인 에너지저장 비용을 감소시킴과 동시에 재생에너지 보급에도 긍정적인 영향을 미친다는 시나리오 분석결과를 제시한 바 있다. Schaber et al.(2012)와 Newbery et al.(2014, 2018)은 계통 안정성 확보 측면에서 전력교역이 편익을 발생시킬 수 있다고 주장하였다.

한편, 유럽의 전력교역 결정요인에 관한 국내 문헌은 윤경수 외(2019),¹²⁾ 윤경수(2020),¹³⁾ 홍원준 외(2021) 등이 있으며, 국가 간 전력교역시장 내 개별국가들의 전력교역 상황에서의 유형을 고려하여 중장기 발전원 구성의 최적화 방안 도출 및 전력교역국으로서의 유형별 역할, 전원별 특성을 고려한 전력교역 활성화에 긍정적으로 도움이 되는 발전원 등 연구를 수행하였다. 특히 윤경수(2020)의 연구는 발전원별 전력생산량 비중, 발전원 집중도, 에너지 보유국의 전력생산량, 전력망이 연계된 이웃국가들에서의 전력자급률 등 전환부문의 변수를 포함하는 동시에 유럽의 2005년 배출권거래제 도입 시점을 기점으로 표본기간을 전과 후로 나누어 전력교역 결정요인을 보다 정밀하게 분석하고자 했다. 그 결과 원전과 재생에너지는 국가 간 친환경 전력교역을 보다 활성화시키는 데 긍정적이며 발전원간 연계성을 증진시키는 방안이 모색되어야 한다는 점을 시사하고 있다.

다음으로는 배출권 거래제가 전력시장 혹은 탄소배출량에 미친 영향에 대한 연구들을 소개한다. Laing et al.(2014)은 배출권 거래제 도입이 시장에 미친 영향에 대해 연구한 문헌들을 정리하였으며, EU-ETS의 도입이 탄소배출량 감소에는 효과가 있었지만 투자를 증가시켰다는 실증적인 증거를 찾을 수 없었다는 결과를 도출하였다.

Delarue et al.(2008)은 실증적 데이터를 통해 EU-ETS의 시행이 석탄발전에서 천연가스발전으로의 전환을 이끌며 탄소배출량 감소를 이끌어냈다는 사실을 확인하였다. Amor et al.(2011)은 전력교역이 온실가스 배출에 미치는 순효과를 포착하기 위해 2006년부터 2008년까지의 캐나다 퀘벡의 인접한 지역과의 1시간 단위의 전력교역 데이터를 사용하여 퀘벡의 수력발전을 통한 전력수출이 그 주변 지역의 이산화탄소 배출량을

12) 발전원집중도가 증가할수록 전력생산 과정에서의 규모의 경제효과 극대화로 인하여 전력의 순수출이 증가한다는 것을 밝힘

13) 발전원집중도가 증가할수록 전력생산의 효율성이 극대화되어 전력생산에 필요한 자원투입을 최소화할 수 있어 친환경 전력교역을 보다 활성화시키는 데도 긍정적인 영향을 미친다는 것을 밝힘

2,830만 톤만큼 줄었음을 실증적으로 보였다. Qu et al.(2018)은 전(全) 세계적으로 국가 간 전력교역이 활성화됨으로써 발전부문에서의 온실가스배출량의 추정이 복잡해지고 있다는 문제 제기와 함께, 그 해법으로서 전력계통 시뮬레이션 방식을 사용하여 137개의 국가 혹은 지역에 대해서 전력교역이 온실가스배출량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 전력교역이 활발하거나 국가 간 발전원 구성 차이가 클수록 전력교역이 이산화탄소배출 절감에 미치는 효과가 크다는 결과를 도출하였다.

Wang et al.(2019)은 2008년부터 2015년까지 GDP, 발전원 구성, 에너지 효율성, 전력 구조, GDP 대비 전력 효율성, 송전구조 등 6가지 변수들을 사용하여 중국의 탄소배출량 결정요인을 분석하였다. 이에 2011년 이후부터 중국 내 송전망 구조가 효율화되면서 전체 탄소배출량이 감소하게 되었다는 결과를 도출하였다.

전력계통망에 대한 기술적인 접근법을 활용하여 국가 간 전력교역의 사회적 편익을 연구하거나 배출권거래제 도입에 따른 온실가스배출량 절감효과를 밝혀내는 연구는 이제 보편화되어 쉽게 찾아볼 수 있다. 하지만 국가 간 전력교역시장 내 개별국가들의 전력 교역량 정보를 활용하여 배출권거래제 도입시점을 전후로 탄소배출량 결정요인을 면밀하게 분석하는 동시에 발전원별 역할을 규명하는 연구는 미미하며 도입기 수준으로서 그 차별성을 지닌다.

III. 모형설정 및 추정결과

1. 기초통계량 분석

<표 1>은 1990년부터 2014년까지 20개 연구대상국들의 전력 순수출입 변화추이를 정리한 것이다. 전체 기간 동안에 전력 순수출을 유지한 국가는 France가 유일하다. 반면에 전체 기간 동안 전력 순수입을 유지한 국가로는 Finland, Hungary, Italy, Luxembourg, Netherlands, UK 등이 있었다.

그리고 전반적으로 전력을 순수출한 국가로는 Czech와 Poland, Slovenia 등이 있었으며, 반대의 경우에는 Belgium과 Greece, Portugal 등이 있었다. 최근에 들어서 전력 순수출을 하고 있는 국가로는 Germany와 Spain 등이 있었고, 전력 순수입을 하고 있는 국가로는 Ireland와 Austria 등이 있었다. 마지막으로 전체 기간 동안에 국가 간 전력교역 상

<표 1> 국가별 전력 교역유형 변화 추이

NO	국가 명	기간별 전력 교역유형 구분
1	Austria	·1990-2000 순수출(1991-92, 1996 순수입), 2001년부터 순수입
2	Belgium	·순수입(1990, 1991, 2009 순수출)
3	Czech	·순수출(1995 순수입)
4	Denmark	·전력교역 혼잡
5	Finland	·순수입
6	France	·순수출
7	Germany	·전력교역 혼잡, 2003년부터 순수출
8	Greece	·순수입(2000 순수출)
9	Hungary	·순수입
10	Ireland	·전력교역 혼잡, 2002년부터 순수입
11	Italy	·순수입
12	Luxembourg	·순수입
13	Netherlands	·순수입
14	Norway	·전력교역 혼잡
15	Poland	·순수출(2014 순수입)
16	Portugal	·순수입(1999 순수출)
17	Slovenia	·순수출(2003, 2006, 2007 순수입)
18	Spain	·1990-91, 1997, 2004-2014 순수출, 1992-96, 1998-2003 순수입
19	Sweden	·전력교역 혼잡
20	UK	·순수입

황이 수시로 뒤바뀌어 정의 내리기 쉽지 않았던 국가로는 Denmark와 Norway, Sweden 등이 있었다.

<그림 1>은 2000년부터 2014년까지 앞선 <표 1>에서 언급된 개별국가들에서의 자국내 자원(석탄, 가스, 원유) 및 원전을 활용한 발전량 비중이 발전원집중도¹⁴⁾와 어떠한 관계를 보이는지 살펴본 것이다.¹⁵⁾ 가로축과 세로축은 각각 개별국가들에서의 발전원집중도(HHI)와 자원 및 원전 발전량 비중을 의미한다.

14) 발전원집중도(HHI)는 개별국가들에서의 원전, 석탄, 가스, 유류에 대한 전력생산비에 대한 제곱 값의 합을 의미한다.

15) 표기된 그림은 변수들 간의 단순한 분포를 보여주는 것임을 참고하여야 한다.

(그림 1) 자원 및 원전 발전량 비중과 발전원집중도(HHI) 간의 관계



여기서 실질적으로 자국 내 원전설비를 보유하고 있지 않은 국가들은 Austria, Denmark, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, Norway, Poland, Portugal 등이 있는 것으로 나타났다. 이 중에서 Ireland와 Norway를 제외한 나머지 국가들의 경우에는 발전원집중도가 증가할수록 자원을 활용한 발전량 비중이 우상향하며 증가하는 것으로 나타났다. Norway는 전체 표본기간에서의 자국 내 전력공급에서 수력이 차지하는 비율에 대한 평균값이 약 98%를 보이고 있었으며¹⁶⁾ Ireland는 발전원집중도 증가에 따른 자원을 활용한 발전량 비중이 왼쪽으로 90°회전한 역U자의 형태를 보이는 것으로 나타났다. 특히 Ireland의 경우에는 해당 기간 내 발전원집중도의 평균값은 3618이었으며 이것의 최솟값과 최댓값은 각각 2014년 3023, 2010년 4550으로서 전체의 변동 폭은 -17%

16) 자원 및 원전에 대한 발전량 비중과 발전원집중도(HHI) 간의 관계를 살피고자 하였다는 점에서 수력과 재생에너지에 대한 발전량 비중이 발전원집중도에서 고려되지 않았으며 이로 인하여 Norway의 분포가 '0' 값에 매우 근접하게 나타났다.

와 +25%로 제한적인 것으로 나타났다. 또한 Ireland는 친환경 전원구성으로의 전환을 본격화하면서 기존의 석탄과 유류를 활용한 발전비중을 2000년부터 2014년까지 각각 36%에서 20%로, 25%에서 1%로 크게 낮추는 동시에 수력을 포함한 재생에너지 발전비중은 2000년 1%에서 2014년 22%로 크게 확대시켜 왔다. 게다가 Ireland는 친환경 재생 에너지원으로서 변동성이 존재하는 태양광과 풍력에 의한 발전비중을 2000년 1%에서 2014년 20%까지 크게 증대시키면서 전력계통의 불안정성을 완화시키고 전력품질을 유지시키기 위하여 유연성 전원으로서의 가스복합 발전비중을 2000년 39%에서 2014년 50%까지 증대시켜왔다. 바로 이러한 측면들이 복합되어 영향을 주고받으면서 Ireland의 발전원집중도와 자원을 활용한 발전량 비중의 분포가 꺾임현상을 보이게 된 것으로 분석된다.

반대로 자국 내 원전을 보유하고 있는 국가들의 경우를 살펴보면 먼저 Belgium, France 그리고 Sweden은 자원 보다 원전을 활용한 전력생산비중이 더 높은 것으로 나타났다. 모두에서 발전원집중도 증가와 함께 자원 및 원전을 활용한 발전량 비중의 추세도 대체로 증가하는 것으로 파악되었다. 다만 France와 Sweden의 경우는 발전원집중도 증가에 따른 자원을 활용한 발전량 비중의 증가세가 미미한 것으로 나타났다. 이는 France의 경우에서는 자국 내 전력생산비에서 원전이 차지하는 발전비중이 약 77%로 매우 높은 수준이 유지되고 있는 반면 석탄과 가스, 유류 등 자원이 차지하는 발전비중은 약 10% 미만이라는 점에서 변동 폭의 제한이 존재한데 따른 것으로 여겨진다. 다음으로 Sweden의 경우에서는 자국 내 전력생산비에서 원전과 자원이 차지하는 발전비중은 각각 약 44%와 약 3%로 France와 마찬가지로 발전원집중도 증가에 따른 자원을 활용한 발전량 비중의 변동 폭이 매우 제한적인 반면 여기서 이용되고 있는 발전원집중도 값의 산출에 영향을 주지 못한 수력을 포함한 재생에너지의 발전비중은 약 53%로 높다는 점이 작용되었기 때문으로 분석된다. 하지만 Belgium의 경우에서는 원전을 활용한 전력생산비가 약 55%로 France와 Sweden의 중간에 위치하고 있으나 이들과 달리 자원을 활용한 전력생산비가 약 38%로 월등히 높다는 점에서 발전원집중도 증가에 따른 자원을 활용한 발전량 비중의 증가세가 보다 뚜렷하게 나타난 것으로 보인다. 다만 Belgium의 경우를 보다 면밀히 살펴보면 2000년부터 2014년까지 발전원집중도와 더불어 원전과 석탄, 유류¹⁷⁾ 등을 활용한 발전비중은 대체로 감소해왔으나 수력을 포함한 재생에너지

를 활용한 발전비중은 반대로 증가해온 것으로 분석되었다. 따라서 양간의 관계분포에서 기저발전으로서의 원전과 석탄이 발전원집중도와 밀접한 관계를 지니고 있는 것으로 생각해볼 수 있다.¹⁸⁾

다음으로 Czech, Germany, Netherlands, Spain 그리고 UK는 발전원집중도가 증가할수록 원전보다 자원을 활용한 전력생산비가 더 높은 것으로 나타났다. 여기서 Germany와 Spain은 발전원집중도가 증가할수록 원전과 자원을 활용한 발전비중이 함께 증가하는 것으로 나타난 반면 Czech는 발전원집중도가 증가할수록 자원을 활용한 발전비중은 증가하지만 원전을 활용한 발전비중은 감소하는 것으로 나타났다. 이외 Netherlands와 UK는 발전원집중도가 증가할수록 자원을 활용한 발전비중은 증가하지만 원전을 활용한 발전비중은 정체되는 것으로 나타났다.

이외에도 Finland, Hungary 그리고 Slovenia의 경우에는 시간경과에 따른 자원 및 원전을 활용한 전력생산비의 변화가 크지 않고 대등하여 발전원집중도 변화에 따른 분포가 중첩된 형태를 보이고 있다. 다만 발전원집중도 증가에 따라 Finland는 자원은 증가하고 원전은 감소했으며 Hungary는 자원은 감소하고 원전이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 Slovenia는 발전원집중도 증가와 함께 자원과 원전 발전비중이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 특히 Hungary의 경우는 시간이 경과됨에 따라 발전원집중도가 오히려 증가하고 있는 것으로 나타나면서 대다수의 다른 국가들에서 친환경 발전원 구성에 따른 전력생산체제 다변화로 인한 발전원집중도의 감소세와는 정반대되는 모습을 보이고 있었다.

<그림 2>는 <표 2>에서의 개별국가들에 대한 연도별 1인당 국토면적의 크기를 전체 표본기간 내 평균으로서의 내림차순 정렬한 후 원전, 석탄 그리고 수력을 포함한 재생에너지 발전량 비중을 기준으로 100% 누적세로막대의 형태로 나타낸 것이다.¹⁹⁾ 이를 통하여 지리적인 제약요인이 존재하는 양수 및 수력을 포함하여 단위면적당 발전가능용량이 여타 발전원 대비 적은 가변재생에너지와 대용량 발전설비로서 국민의 안전성과 환경성

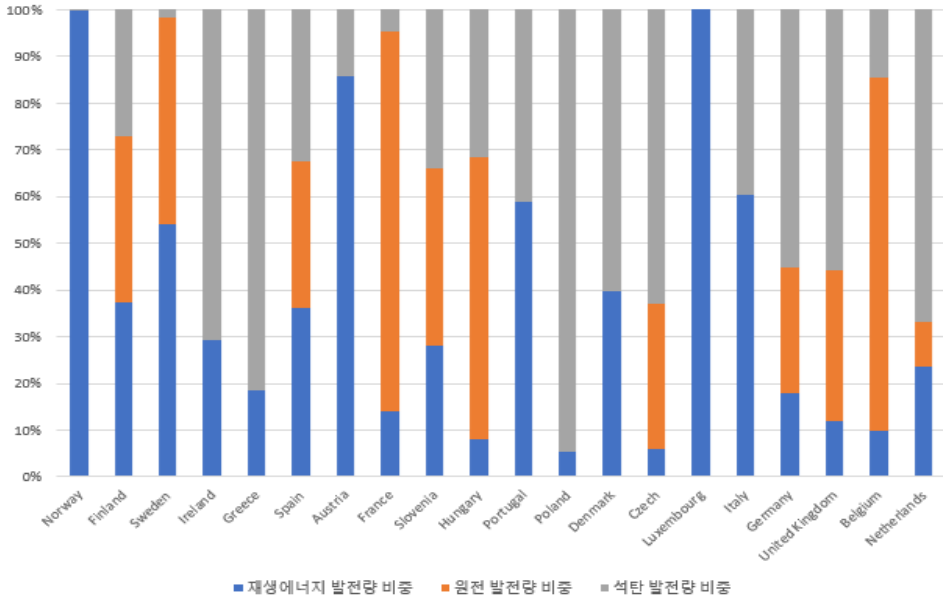
17) Belgium의 경우, 자원을 활용한 발전비중에서 유류가 차지하는 비중은 약 1% 미만인 것으로 조사되었다.

18) 최근 우리나라도 지속가능한 친환경 녹색성장으로의 에너지전환 목표를 달성하기 위하여 원전과 석탄의 발전량 비중을 동시에 감축시켜 나아가는 정책을 중장기적으로 추진하고 있다는 점에서 앞으로 Belgium의 경우를 보다 면밀히 살펴볼 필요가 있겠다.

19) 같은 방식으로서 수력을 제외한 태양광·풍력 등과 같은 재생에너지 발전량 비중으로서 재산정하여 나타내더라도 육안상으로 유의미한 변화에 대한 구분은 할 수 없었다는 점에서 추가적인 별도의 그림표기는 생략하도록 한다.

에 밀접한 연관성을 가진 원전과 석탄 발전설비의 보급 및 이용률 현황을 국가별 1인당 국토면적의 상대적인 크기에 대비하여 어떠한 차이를 보이는지 면밀히 살펴보고자 한다.

〈그림 2〉 국가별 1인당 국토면적 대비 발전원별 발전량 비중



〈표 2〉 국가별 1인당 국토면적의 크기(내림차순, 면적단위: km²)

NO.	국가 명	1인당 국토면적	NO.	국가 명	1인당 국토면적
1	Norway	68183.19	11	Portugal	8787.18
2	Finland	63848.13	12	Poland	8161.84
3	Sweden	48956.22	13	Denmark	7870.02
4	Ireland	16425.42	14	Czech	7613.23
5	Greece	12007.90	15	Luxembourg	5330.23
6	Spain	11417.45	16	Italy	5126.36
7	Austria	10142.75	17	Germany	4409.22
8	France	10053.36	18	UK	3948.41
9	Slovenia	10021.29	19	Belgium	2862.43
10	Hungary	9258.69	20	Netherlands	2549.11

먼저 1인당 국토면적의 크기를 상위 10개국과 하위 10개국으로 집단을 나누어 <그림 2>를 면밀히 살펴본다면 대체적으로 수력을 포함한 재생에너지와 원전을 활용한 발전량 비중의 경우에는 상위 10개국 내에 포함되는 나라들에서 하위 10개국 내에 포함되는 나라들보다 많은 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 석탄을 활용한 발전량 비중의 경우에는 하위 10개국 내에 포함된 나라들에서 상위 10개국 내에 포함된 나라들보다 많은 것을 확인할 수 있다.

이는 1인당 국토면적이 클수록 지리적인 제약요인이 존재하는 수력과 양수 같은 발전원의 보급을 보다 촉진시킬 수 있는 잠재적인 개발가능지역 발굴이 용이했다는 것을 의미한다. 또한 이와 함께 예기치 못한 사고 발생 시 국민안전에 있어 대규모의 사회·경제적인 문제를 촉발할 수 있으면서도 대용량 송전설비의 건설과 증장기 핵폐기물에 대한 처리·저장·관리감독 등의 측면에서 추가적인 부지를 확보해야 하는 원전설비를 사회적 비용을 최소화하며 상대적으로 보급을 활성화할 수 있었을 것으로 고려된다. 반면에 전력생산 단위당 미세먼지와 탄소배출량이 여타 발전원들과 비교하여 많을지라도 원전과 마찬가지로 대용량 발전설비이면서 예기치 못한 사고 발생에 따른 기술적인 통제가 용이하다는 측면에서 자국의 에너지안보 유지와 경제효율적인 전력수급의 안전성도 도모할 수 있는 석탄발전에 대한 사회적 수용의지가 상위 10개국 보다 하위 10개국에서 좀 더 큰 경향을 보이는 것으로 나타났다.

<표 3>은 앞선 <그림 2>에서의 분석결과를 수치화하여 요약해 본 것으로서 양수 및 수력을 재생에너지 발전량 비중에 포함하였는지 여부에 따라 상위 10개국과 하위 10개국의 재생에너지와 원전, 석탄 발전량 비중이 어떠한 차이를 보이는지 보다 면밀하게 살

<표 3> 1인당 국토면적의 크기에 따른 발전원별 발전량 평균 비중(%)

	1인당 국토면적	재생에너지 발전비중	원전 발전비중	석탄 발전비중
수력을 포함한 재생에너지 발전비중	상위 10개국	3.36	4.64	1.28
	하위 10개국	1.94	2.24	5.58
수력을 미포함한 재생에너지 발전비중	상위 10개국	1.31	8.83	2.44
	하위 10개국	2.44	4.27	10.61

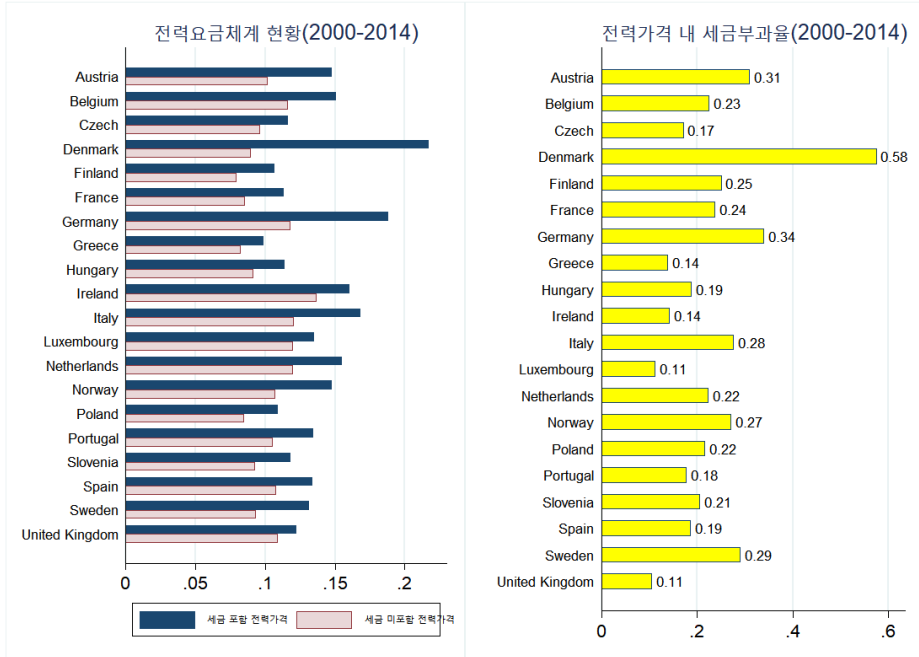
펴볼 수 있다. 먼저 원전의 경우는 수력을 포함해 고려하였는지 여부와 관계없이 상위 10개국에서 하위 10개국보다 높은 것으로 나타났으며 모두에서 하위 10개국 대비 2.07배 이상 높은 것으로 분석되었다. 반면 석탄의 경우는 원전과 달리 수력을 포함해 고려하였는지 여부와 관계없이 하위 10개국에서 상위 10개국보다 높은 것으로 나타났으며 모두에서 상위 10개국 대비 4.35배 이상 높은 것으로 분석되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같은 전원구성 추이를 보여주며 그 해석도 유사할 것이다.

하지만 재생에너지의 경우에서는 수력발전을 포함하였는지 여부에 따라 그 결과가 뒤바뀌는 것을 확인해볼 수가 있다. 다시 말해서 수력을 포함한 재생에너지의 경우는 상위 10개국이 3.36으로 하위 10개국에서의 1.94보다 1.73배 높게 나타난 반면 수력을 포함하지 않은 재생에너지의 경우는 하위 10개국이 2.44로 상위 10개국에서의 1.31보다 1.86배 높은 것으로 나타났다. 이는 1인당 국토면적의 크기가 상대적으로 작은 하위 10개국들에서 전력생산 단위당 미세면적의 탄소가 많이 배출되는 석탄설비의 활용이 상대적으로 많다는 점에서 자국 내 친환경 전원믹스로의 한계점 극복을 위한 가변재생에너지의 보급을 정책과 법제도적으로 보다 적극 추진한 배경이 작용되었다는 분석이다. 이외에도 유럽이 2005년에 도입한 탄소배출권 거래시장의 영향으로 환경비용 인상에 대한 중장기 압박에 있어서도 상위 10개국들보다 하위 10개국들에서 보다 높을 수밖에 없으며 이에 대한 자구책을 마련하는 데 있어 가변재생에너지의 자국 내 보급 활성화가 적절한 대응전략으로 수용되었을 것이라 분석된다.²⁰⁾

<그림 3>에서는 2000년부터 2014년까지의 국가별 전력요금체계와 전력가격 내에서의 세금부과율 현황에 대한 정보를 나타낸다. 이것으로 세금을 포함한 전력가격의 경우에는 Denmark, Germany, Italy, Ireland, Netherlands 등의 순으로 높다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 달리 세금을 포함하지 않았을 경우에는 Ireland, Italy, Netherlands, Luxembourg, Germany 등의 순으로 전력가격이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전체 국가들에 대한 전력가격 내에서의 세금부과율에 대한 평균값은 약 25% 정도인 것으

20) 2000년부터 2014년까지 우리나라의 1인당 국토면적의 평균값은 2046으로서 하위 10개국 중에서도 그 값이 가장 작은 Netherlands보다도 작으며 기간에 따른 발전원별로 수력을 포함한 재생에너지와 원전, 석탄 발전량의 평균 비율(%)은 각각 1.50, 32.95, 41.43으로서 원전 대비 석탄 비중이 높은 하위 10개국과 같은 특성을 보이고 있는 것으로 나타났다. 다만, 우리나라의 가변재생에너지에 대한 평균 비율(%)이 0.62라는 점에서 상위 10개국에서의 특성을 보이고 있다는 점에서 이를 개선하기 위한 앞으로의 많은 노력이 필요해 보인다.

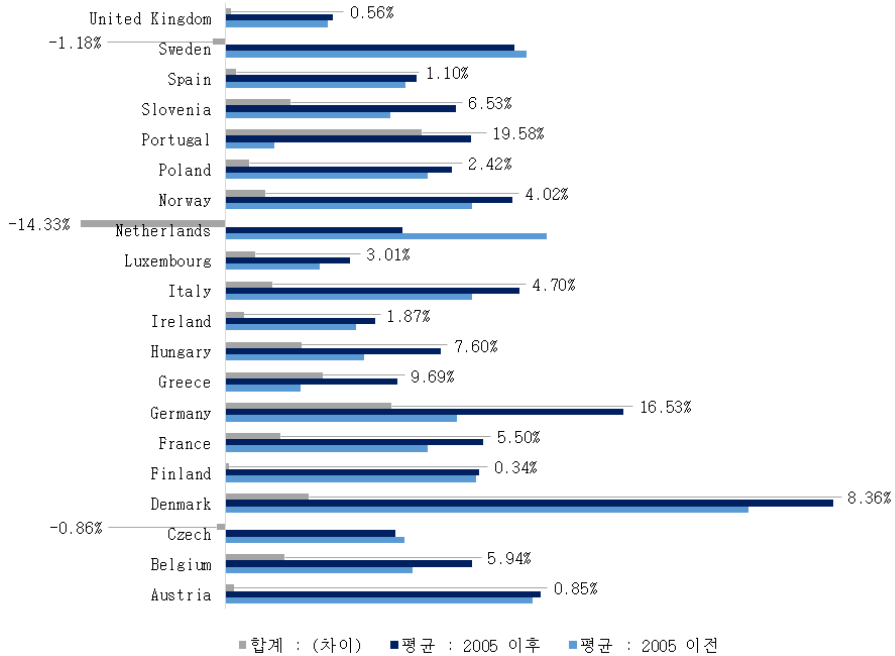
<그림 3> 국가별 전력가격에서의 세금 부과 추이



로 파악되었다. 여기서 Denmark의 경우가 58.79%로 전력가격에서의 세금 비중이 가장 높은 것으로 나타났으며 다음으로 Germany, Austria, Sweden, Italy, Norway, Finland, France 등의 순으로 전체 평균을 초과하는 세금부과율을 지닌 것으로 파악되었다.

이어서 <그림 4>는 유럽이 2005년에 도입한 탄소배출권 거래시장을 전후하여 국가별로 전력요금체계 내에서의 세금이 차지하는 비율에 대한 변화가 어떠한지를 보다 구체적으로 살펴보기 위한 것이다. 먼저 모든 개별국가들에 대한 전력가격에서의 평균 세율은 2005년을 기점으로 전과 후 각각 20.58%와 24.69%인 것으로 조사되었다. 이를 개별국가들로 세분화하여 살펴본다면 우선 Denmark의 경우는 전력가격에서 세금이 차지하는 비율이 2005년을 전후하여 모두에서 다른 국가들보다 가장 높은 수준에 있는 것으로 분석되었으며 그 값이 각각 52.08%와 60.44%로서 2005년 이후로 보다 상향된 것을 확인할 수 있었다. 반면에 2005년을 기점으로 그 전과 후에서 전력가격에서 세금이 차지하는 비율이 가장 낮았던 국가로는 각각 4.86%의 Portugal과 10.75%의 UK인 것으

〈그림 4〉 국가별 전력가격 내에서의 세금부과율 변화 추이(기준: 2005년 전후)



로 조사되었다. 또한 Czech와 Netherlands, Sweden을 제외한 다른 국가들에서는 배출권 거래제가 도입된 2005년을 기점으로 이전 대비 이후에 대한 전력가격의 세율이 대체로 증가했음을 확인해 볼 수 있다.

추가적으로 각 국가별로 전력가격에서 세금이 차지하는 비율에 대하여 탄소배출권 거래시장이 도입된 2005년을 기점으로의 전과 후 격차를 살펴보았으며 그 값을 표기하였다. 이를 통하여 배출권 거래시장의 도입을 전후하여 전력가격체계에서의 친환경 부담금을 비교적 많이 도입한 나라가 어디인지를 살펴볼 수 있을 것이다. 먼저 개별국가들에서의 전력가격 내 평균적인 세율은 2005년을 전후하여 각각 20.58%와 24.69%인 것으로 나타났으며 두 기간 간 격차는 4.11%로 대체로 2005년 이전 대비 이후에 증가한 것으로 분석되었다.

여기서 Belgium, Denmark, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Portugal 그리고 Slovenia 등은 두 기간 간의 평균적인 격차 이상으로 전력가격에서의 세율 인상을 추

진해 온 것으로 파악되었다. 특히 Germany와 Portugal의 경우에는 16.53%와 19.58%로 2005년 이전 대비 이후의 세율인상이 매우 두드러진 것으로 나타났다. 이는 두 국가에서의 전원구성에서 자원(석탄, 유류, 가스)이 차지하는 기간 평균값이 각각 62.21%와 62.71%로 높으며 이 중에서도 석탄 발전비중이 50.3%와 30.1%로 절반 이상을 차지하고 있다는 점에서 친환경으로의 연료전환에 보다 적극적인 모습을 보이는 것으로 풀이된다. 더구나 이들은 프랑스와 인접해 육로케이블을 활용한 전력교역이 가능하다는 점에서 재생에너지원 보급을 보다 활성화시킬 수 있는 지리적인 이점도 가질 수 있다.

반면에 Austria, Finland, Ireland, Luxembourg, Norway, Poland, Spain 그리고 UK 등은 2005년 이전 대비 이후에 전력가격 내에서의 세율인상은 추진되어 왔으나 그 정도가 평균 이하인 것으로 분석되었다. 이외의 Czech, Netherlands, Sweden 등에서는 다른 국가들과 달리 2005년을 기점으로 그 이후에 오히려 전력가격체계 내에서의 세율이 감소한 것으로 나타났다. 특히 Netherlands의 경우는 그 감소의 폭이 -14.33%로 가장 높았다. 이는 자원을 활용한 전력생산비가 전체의 88%를 차지하고 있으며 그중에서도 가스비중이 56%로 높은 상황에서 친환경 에너지전환으로의 추가적인 연료전환을 위한 조세 압력의 구조적인 한계가 있다는 점이 고려된 것으로 풀이된다.

2. 추정모형 설정 및 가정

본 연구는 유럽지역 내에서의 20개 연결계통국가를 대상으로 2000년부터 2014년까지의 패널 자료를 활용하였다. 따라서 추정방법으로 패널 자료 분석방법을 적용하였다. 패널 자료에 대한 선형회귀모형의 추정방법으로 패널 형태를 고려하지 않고 OLS를 적용하는 경우도 있는데 이를 합동 OLS 모형이라고 부르며 아래와 같은 수식으로 정의된다.

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \epsilon_{it}, i = 1, 2, \dots, n \text{ 및 } t = 1, 2, \dots, T. \quad (1)$$

위의 식에서 n 은 국가의 수로서 $n=20$, T 는 표본기간으로서 $T=15$ (2000년부터 2014년까지)이며 본 연구에서 사용된 자료는 균형 패널 자료이다. 합동 OLS 모형에 의한 추정량이 올바른 추론에 따른 분석결과이기 위해서는 i 와 t 에 대해서 기본적으로 충족되

어야 하는 가정들이 있다. 이것으로서는 모든 패널 개체에 대해 모든 시점에서 오차항의 기댓값이 0이며, 패널 개체와 시간에 따라 오차항의 분산이 동분산(homoskedasticity)이어야 하며, 패널 개체의 오차항은 서로 상관관계가 없어야 하며, 동시에 한 개체의 서로 다른 시점의 오차항 사이에도 상관관계가 존재하지 않아야 한다. 마지막으로 오차항과 설명변수 사이에 상관관계가 존재하지 않아야 한다.²¹⁾

이상의 기본 가정들 중에서 오차항에 이분산이나 자기상관이 존재하는 경우 OLS 추정량의 표준오차에 영향을 주어 비효율적인 추정량이 될 수 있다. 또한 식 (1)에서 패널 개체의 관찰되지 않는 이질성(unobserved heterogeneity)이 오차항 ϵ_{it} 에 포함되는 경우, 오차항과 설명변수 사이에 상관관계가 존재할 가능성이 있다. 이런 경우에 누락된 변수로 인한 편의(omitted variable bias)가 생기고, 그에 따라 OLS 추정량은 일치 추정량(consistent estimator)이 되지 못한다. 따라서 패널 자료가 동분산성을 충족시키지 못할 경우 이분산성을 가정한 상태에서 추정하는 패널 GLS(Generalized least squares) 방법을 사용해야 한다. 패널 GLS 방법은 이분산성과 자기상관이 동시에 존재하더라도 이를 통제한 후 추정을 할 수 있는 장점을 지닌다. 이외에도 동시적 상관관계의 문제가 유발될 수 있으나 본 연구에서는 명확히 구분된 다른 나라들을 대상으로 탄소배출량, 자원 그리고 발전량 등의 자료를 활용하고 있기 때문에 별도로 이것은 고려하진 않기로 한다.

3. 추정모형의 변수설명

본 연구는 유럽지역 내에서의 연결계통국가들에 대한 전력교역 상황을 고려한 탄소 배출량 증감의 결정요인을 분석한다. 연구대상국은 전체 20개이며 OECD만을 회원국으로 하고 있는 Norway를 제외하곤 모든 국가들이 OECD²²⁾와 EU²³⁾의 회원국이다. 반면 유럽지역에 있더라도 전력계통이 독립되어 있어 국가 간 전력교역을 물리적으로 할 수 없는 Iceland, Cyprus, 그리고 Malta 등과 같은 국가들은 연구대상국에서 제외하였다. 또한 Switzerland의 경우는 전력교역량 정보를 확인할 수 없었다는 점과 Bulgaria, Croatia, Estonia, Latvia, Lithuania, Macedonia, Romania, Serbia, Slovak 그리고 Turkey

21) 자세한 내용은 민인식·최필선(2016a, 2016b)을 참고하도록 한다.

22) OECD, <<https://www.oecd.org/about/members-and-partners/>>, (2019)를 참조하였다.

23) EU EUROSTAT, <<https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>, (2019)를 참조하였다.

등은 2000년부터 2014년까지의 표본기간 동안 전력가격에서의 세금 자료가 불연속적이거나 균형적이지 못하였다는 점에서 연구대상국에서 제외되었다. 본 연구에서 사용되고 있는 각각의 주요 변수들 중에서 탄소배출량은 World Bank 자료를 활용한 것이며 이외에도 전력교역량과 전력가격에서의 세금 자료는 EU의 EUROSTAT에서, 에너지 자원의 보유현황 자료는 BP에서, 그리고 나머지 변수들은 IEA에서 발간된 자료를 활용한 것이다.

<표 4>는 2000년부터 2014년까지 앞선 <표 1>에서의 연구대상국들의 연도별 자료를 종속변수와 독립변수로 구분하여 나타낸 것이다. 종속변수는 개별국가들에서의 탄소배출량을 의미한다. 독립변수로는 먼저 개별국가들의 발전원별 발전량 비중으로서 각 발전원별 전력생산량을 전체 발전량으로 나눈 값이다. 본 연구에서 고려하고 있는 발전원은 원자력, 석탄, 가스 그리고 수력이 제외된 재생에너지 등이다.²⁴⁾ 이를 통하여 각각의 발전원별 발전량 비중의 증감이 개별국가들에서의 탄소배출량에 어떠한 영향을 미치는지 면밀하게 살펴볼 수 있을 것이다.

둘째, 국가 간 전력계통망이 연계되어 전력교역을 할 수 있는 상황일지라도 자국뿐만 아니라 이웃한 개별국가들의 전력수급상황에서의 안정성에 따라 전력교역물량은 크게 좌우될 수 있으며 이것으로 인한 자국 내 발전부문에서의 전력생산에 따른 탄소배출량의 변화가 있을 수 있다. 따라서 개별국가별로 이웃하고 있는 각 국가들에서의 전력수급률을 변수로 고려해본다.

셋째, 유럽은 지구온난화 대응을 선도하며 저탄소 녹색성장을 위한 다자간 노력을 아끼지 않고 있으나 자국 내 원유, 석탄, 천연가스 등과 같은 부존자원을 보유하고 있는 국가들의 경우는 이것을 활용한 전력생산에 있어 단위당 발전단가에서 비교우위를 지니며 자원을 활용한 전력생산 의존도를 영위하고자 할 것이며 한편으로는 자국의 전력 수요 대비 전력을 과잉생산하여 이것을 수출하고자 할 것이다. 그 과정에서 많은 양의 탄소가 자국에서 배출하게 될 것이라 짐작해볼 수 있다. 따라서 이를 실증적으로 분석하여 보다 면밀히 검증해 보고 이러한 가정이 참으로 밝혀진다면 이 같은 문제를 개선하기 위한 정책적인 대응방안도 탐구하여 보고자 한다.

24) 본 연구에서 수력을 제외한 이유는 수력을 활용한 전력생산은 소수 국가에 국한되며 발전용 댐의 경우 용수공급과 홍수조절 등 다목적 기능으로서 사용되고 있기 때문이다.

〈표 4〉 변수설명

변수 구분	변수 명	정 의	단 위
종속	CO ₂	탄소배출량(kt)	Thousand
독립	nuclear	원자력발전량/전력(총)생산량	%
	coal	석탄발전량/전력(총)생산량	%
	gas	가스발전량/전력(총)생산량	%
	renewal ¹⁾	재생에너지발전량/전력(총)생산량	%
	near	이웃한 계통연계 국가들의 ‘전력생산량/전력소비량’비중 합	%
	res	자원보유국의 전력생산량	GWh
	HHI	발전원집중도	0~10,000
	IndPop	산업부문 총에너지 소비량/인구수	TOE/명
	Aeptax	세후 전력가격 - 세전 전력가격	CURRENCY: Euro
	TAreaPop	전체 국토면적/인구수	km ² /명
	ELEtradePop[1]	전력수출입량의 합/인구수	GWh/명
	ELENetexportPop[2]	(전력수출량 - 전력수입량)/인구수	GWh/명

주: 1) 수력을 제외한 재생에너지 발전량을 의미함

2) 독립변수[1]과 [2]는 추정모형(1)과 (2)에서 각각 구분하여 고려함

넷째, 발전원집중도 변수는 허핀달-허쉬만 지수²⁵⁾(HHI)를 응용한 것으로서 그 값이 클수록 해당 국가는 특정 발전원에 대한 이용률 및 의존율도 높다는 것을 의미하게 된다.²⁶⁾ 발전원집중도의 증가는 전력생산에 있어 규모의 경제효과를 증진시켜 보다 경제적으로 효율적인 전력생산이 가능하도록 유도하여 전력생산에 사용되는 자원의 이용효율성을 극대화시킴으로써 전력생산 대비 탄소배출량을 최소화시킬 수 있을 것이라고 본다. 더구나 국가 간 전력교역시장이 더욱 개방되고 활성화될수록 각국은 선택가능한 발전원 중에서 전력생산에 있어 비교우위가 존재하는 자국 내 발전원에 대한 집중도를 증진시키고 이외의 부족전력은 자국의 발전단가보다 저렴한 수준으로의 전력 순수입에 의존함으로써 자국 내 전력수급 효율성을 제고시킬 수 있다. 마찬가지로 전력 순수출국

25) 한 시장에서의 집중도 및 지배력을 파악하는 지표 중 하나로 사용되고 있다.

26) 발전원집중도는 6개 에너지원별(원자력, 석탄, 가스, 유류, 수력, 재생) 발전량 비중의 제곱 합으로 정의되며 한 가지 발전원에만 의존하는 경우 발전원집중도의 값은 10,000이 된다.

의 경우에서도 비교우위에 있는 발전원에 대한 집중도를 극대화시킴으로써 타 국가들 대비 전력생산체계에서의 가격경쟁력을 확보해 자국의 전력수요량 대비 초과생산한 전력을 수출하여 국제수지 개선과 같은 경제편익을 도모해 나아갈 수 있다. 이러한 국가 간 전력교역 상황을 고려하여 궁극적으로 발전원집중도가 탄소배출량 증감에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

다섯째, 개별국가들에서의 산업부문에서 사용되는 총에너지 소비량을 인구수로 나눈 것을 의미한다. 자국의 경제성장으로 인하여 추가되는 전력수요량을 국가 간 전력교역시장을 활용하여 전력수입에만 의존할 수 있다면 경제성장 대비 자국 내 탄소배출량의 증가는 최소화시킬 수 있겠으나 그럼에도 불구하고 경제성장에 따른 자국 내 에너지와 전력의 수요 증가는 자국의 탄소배출량을 증가시키는 요인으로서 작용하게 될 것으로 기대된다.

여섯째, 유럽은 저탄소 녹색성장과 탄소중립의 목표를 달성하기 위하여 지금까지 태양광과 풍력 등 친환경 발전설비에 대한 기술개발, 투자 그리고 보급을 활성화하는 정책을 적극적으로 펼쳐왔다. 동시에 전력가격 내에서의 친환경세도 미국발 세계금융위기가 촉발했던 2008년과 2009년을 제외하곤 계속 인상시켜 왔다.²⁷⁾ 이러한 친환경세로의 새로운 패러다임 구조변화의 흐름이 그리드패러티²⁸⁾ 시기를 앞당겨 주어 가변재생에너지원의 급진적인 보급 활성화에 긍정적으로 작용되고 있다. 하지만 기대수명이 아직 남아 있는 기존의 발전설비를 조기 폐쇄하는 것은 그 기회비용이 매우 크고 변동성 전원에 대한 백업발전설비의 신규 도입에도 많은 시간과 비용이 필연적으로 요구되고 있다는 측면이 공존되고 있다. 따라서 전력가격체계 내에서 부과되는 세금의 증가가 유럽 내 탄소배출량 증감에 지금까지 어느 정도의 어떠한 영향을 미쳐 왔는지를 살펴보는 것이 필요한 시점이라고 판단된다.

일곱째, 개별국가들에서의 국토면적의 크기를 연도별 인구수로 나눈 값으로 1인당 국토면적의 크기 값을 의미한다. 다른 발전원들과 비교하여 단위면적당 발전가능용량이 적은 태양광과 풍력 같은 친환경 가변재생에너지원의 보급 활성화에는 많은 양의 유휴부지가 확보될 수 있어야 할 것이다. 또한 국토면적이 클수록 지리적으로서의 개발가능계

27) 자세한 사항은 윤경수(2020)를 참고하도록 한다.

28) 태양광·풍력 등 대체에너지로 전기를 생산하는 데 드는 발전원가가 원유 등 화석연료 발전원가와 같아지는 시점을 의미한다.

약이 존재하지만 전력생산 단위당 탄소배출량이 매우 적은 수력과 양수의 보급을 보다 활성화할 수 있을 것이다. 이외에도 기존의 대용량 발전설비로서 안전성과 환경성 측면에서의 밀접한 연관성을 지닌 원전과 석탄의 이용·활용 측면에 있어 국가별로 인구밀집 지역에서 떨어진 유희부지의 확보가 용이할수록 사회적인 갈등과 비용을 최소화하며 지속적으로 운영해 나아갈 수 있다. 특히 전력생산 대비 온실가스 배출량이 적으면서도 단위당 발전단가가 다른 발전원들 대비 저렴한 원전의 경우는 핵폐기물을 저장하는 유희부지의 확보를 중장기적으로 고려해야만 한다. 따라서 1인당 국토면적의 크기가 실증적으로 탄소배출량에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴볼 필요가 있다.

여덟째, 각 국가의 전력 수출입량(=전력교역량)에 대한 합을 인구수로 나눈 값으로서 1인당 전력교역량을 의미한다. 국가별로 단위당 발전단가와 환경비용부담이 다르다는 점에서 전력요금에 대한 격차가 발생할 수 있으며 자국의 효율적인 전력수급 안정화를 극대화시키는 방향으로 국가 간 전력교역이 활성화될 수 있다. 따라서 이러한 개별국가들에서의 전력교역활동이 궁극적으로 탄소배출량에는 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

마지막으로 각 국가들에서의 전력 순수출량을 인구수로 나눈 값으로서 1인당 전력 순수출량을 의미한다. 이를 통해서 국가 간 전력교역 유형에 따른 탄소배출량에 미치는 영향을 살펴볼 수 있을 것이다. 다만 해당 변수는 전력교역량(전력수입량+전력수출량) 정보의 일부를 내포하고 있어 1인당 전력교역량과의 상관관계가 높게 나타날 수밖에 없다. 따라서 이후 실증분석 과정에서는 모형을 나누어 1인당 전력교역량과 1인당 전력 순수출량을 변수로 한 각각의 추정을 진행하는 것으로 한다.

4. 상관관계, 다중공선성, 이분산 그리고 자기상관에 대한 가설검정

<표 5>는 유럽 내 연결계통국가들의 탄소배출량 결정요인을 살펴보기 위한 추정모형에 사용된 각 변수 사이의 상관계수²⁹⁾가 제시되고 있다. 그 결과 먼저 탄소배출량과 자원보유국의 전력생산량에 대한 상관계수의 값이 0.91로 가장 높으며 강한 양(+)의 상관관계에 있는 것으로 나타났다. 이는 자원(석탄·천연가스·유류)을 활용한 전력생산의 경우 그 과정에서 많은 양의 탄소배출이 필연적으로 발생한다는 점이 해당 분석에서도 반영된 것으로 여겨진다.

29) 일반적으로 변수 간 상관계수가 0.5 이하일 경우에 대체로 상관관계가 낮은 것으로 본다.

다음으로 가스 발전량 비중은 1인당 전력 순수출과의 관계에서 0.67로 음(-)의 상관관계에 있는 것으로 나타났다. 이는 다른 발전원들과 비교해 단위당 발전단가가 비싼 가스 복합의 경우에는 이를 활용한 전력생산의(순)수출에 있어 가격경쟁력이 떨어질 수밖에 없다는 것이 분석에서도 반영된 것으로 보인다.

또한 재생에너지 발전량 비중은 전력가격에서의 세금과의 관계에서 0.76으로 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 이는 유럽이 저탄소 녹색성장을 위하여 태양광과 풍력 같은 친환경 재생에너지원에 대한 시장보급을 더욱 활성화시키기 위하여 관련 법제도의 개선과 더불어 연료전환을 위한 세제개편 및 기존 전력요금에서의 탄소세 도입 등 환경비용부담을 직·간접적으로 인상시켜왔기 때문으로 풀이된다.

이외에도 1인당 산업부문에서의 총에너지 소비량은 1인당 전력교역량과 1인당 국토면적과의 관계에서 각각 0.51과 0.67로 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 1인당 국토면적이 클수록 제조업 기반의 고부가가치 경제성장을 할 수 있는 유희부지의 확보가 원활하며 해당 산업구조의 형성을 보다 쉽게 도모할 수 있게 된다. 이로 인하여 자국 내에서의 에너지와 전력의 수요가 복합적으로 한층 증가하게 된다. 특히 추가적인 자국 내 전력수요 증가분에 대하여 국가 간 전력교역시장을 활용한 전력수입에 대한 의존도를 점진적으로 증진시키는 한편 이에 상응하여 신규 발전설비에 대한 자국 내 건설은 최소화할 수 있다.

마지막으로 여타의 변수들에선 변수 간 상관관계가 모두 매우 낮은 것으로 나타나 독립변수들 사이에서의 다중공선성 문제가 통계적으로 유의미하다고 볼 수 없다.³⁰⁾³¹⁾³²⁾ 그러나 이분산과 자기상관 검정에서는 모두 존재하는 것으로 나타났다.³³⁾ 이에 따라 탄소배출량 결정요인의 추정을 위하여 이분산과 자기상관의 존재를 고려한 패널 GLS 모형을 추정방법으로 사용하였다.

30) 다중공선성 검정을 위해 VIF(공차와 분산 팽창요인)가 10을 초과하면 다중공선성이 심하다고 볼 수 있는데 모든 변수들의 VIF가 2 미만으로 추정되어 다중공선성 문제가 없는 것으로 나타났다. (박완규, 홍성표, 2009).

31) 추정모형(1)에서 사용된 모든 독립변수들에 대한 다중공선성(VIF)을 검정해본 결과 각각의 변수에 대한 VIF 값이 5를 넘지 않았으며 Mean VIF 값은 3.19로 나타났다.

32) 추정모형(2)에서 사용된 모든 독립변수들에 대한 다중공선성(VIF)을 검정해본 결과 각각의 변수에 대한 VIF 값이 5를 넘지 않았으며 Mean VIF 값은 3.17로 나타났다.

33) 추정모형(1)과 (2) 모두에서 각각의 이분산성과 자기상관성 여부를 살펴보기 위하여 Likelihood ratio test (Assumption: R_model nested in UR_model)와 Wooldridge test 검정을 시행하였고 그 결과 모두에서 귀무가설이 기각되었다. 구체적인 검정결과를 제시하는 것은 편의상 생략하겠다.

〈표 5〉 각 변수별 상관관계(Pairwise correlations) 측정결과

변수	CO ₂	nuclear	coal	gas	renewal	near	res	HHI	IndPop	Aeptax	TAreaPop	ELTradePop	ELNetexportPop
CO ₂	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nuclear	0.1146*	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
coal	0.2469*	-0.2666*	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
gas	-0.0462	-0.3764*	-0.2822*	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
renewal	-0.0642	-0.2450*	-0.0314	0.0978	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-
near	0.3464*	-0.1513*	0.0169	0.3794*	0.3377*	1,000	-	-	-	-	-	-	-
res	0.9106*	0.2816*	0.0731	-0.1288*	-0.0810	0.1902*	1,000	-	-	-	-	-	-
HHI	-0.1155*	0.1404*	-0.0047	-0.0389	-0.3582*	-0.2991*	0.0174	1,000	-	-	-	-	-
IndPop	-0.3119*	0.0669	-0.4360*	0.0890	-0.0588	0.0173	-0.3189*	0.01780*	1,000	-	-	-	-
Aeptax	0.0594	-0.1654*	0.0017	-0.1283*	0.7592*	0.0274	0.0790	-0.1001	-0.1138*	1,000	-	-	-
TAreaPop	-0.3240*	0.0440	-0.3294*	-0.3669*	-0.0640	-0.1375*	-0.2284*	0.2265*	0.6722*	-0.0329	1,000	-	-
ELTradePop	-0.3932*	-0.1169*	-0.3493*	0.4124*	-0.0125	-0.1864*	-0.3384*	0.3801*	0.5079*	-0.0314	0.0516	1,000	-
ELNetexportPop	0.1985*	0.2208*	0.2889*	-0.6709*	-0.1202*	-0.2784*	0.2505*	-0.1157*	-0.4508*	0.1393*	0.0780	-0.7261*	1,000

주: *는 95% 신뢰수준을 의미한다.

5. 추정결과 및 분석

<표 6>은 이분산성과 자기상관의 존재를 가정한 패널 GLS 모형의 추정결과를 나타낸다. 원전, 석탄, 가스, 재생에너지 등 발전원별 발전량 비중과 이웃국가들의 전력수급률(near), 천연자원을 보유한 국가들에서의 전력생산량(res), 발전원집중도(HHI), 1인당 산업부문에서 사용되는 총에너지 사용량(IndPop), 전력가격 내에서의 세금(Aeptax),

<표 6> 추정결과: 패널 GLS 분석

	종속변수: CO ₂	
	Model(1): coef(se)	Model(2): coef(se)
nuclear	-48,752.907*** (15,994.000)	-52,868.672*** (16,280.807)
coal	70,661.955*** (14,344.143)	90,516.275*** (14,123.738)
gas	7,131.028 (13,660.587)	13,425.539 (14,185.415)
renewal	-99,763.298*** (33,079.177)	-100,231.584*** (33,231.514)
near	86,773.384*** (26,680.886)	69,866.515*** (24,351.746)
res	0.975*** (0.030)	1.010*** (0.030)
HHI	-2.748* (1.640)	-5.169*** (1.602)
IndPop	53,741.593*** (8,140.863)	37,487.355*** (7,464.530)
Aeptax	133,887.575 (97,416.112)	122,059.703 (96,285.329)
TAreaPop	-1.503*** (0.254)	-1.037*** (0.237)
ELEtradePop	-39.992*** (9.188)	-
ELENetexportPop	-	-28.908*** (10.241)
_cons	-52,707.167* (30,192.484)	-41,030.285 (29,096.677)

주: 1) ***, **, 그리고 *는 1%, 5%, 그리고 10% 유의수준을 각각 의미한다.

1인당 국토면적의 크기(TAreaPop) 그리고 1인당 전력교역량(ELTradePop) 혹은 1인당 전력 순수출량(ELNetexportPop) 등이 종속변수로 사용된 탄소배출량에 대한 독립변수로 사용되었다. 두 가지로 구분된 추정모형에 대한 분석결과를 살펴보면 각 변수별로 통계적으로의 유의미성과 부호 값이 서로 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.³⁴⁾

먼저 원자력 발전량의 비중은 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 탄소배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 원전이 다른 발전원들 대비 전력생산과정에서의 탄소배출량이 매우 적다는 점이 주요하게 작용되었기 때문으로 분석된다. 아울러 원전은 단위당 발전단가도 저렴해 원전보유국들에서 원전에 대한 이용률을 증가시킬수록 전력교역 상황에서의 가격경쟁우위를 기반으로 전력의 (순)수출량을 함께 증가시킬 수 있다. 이것이 궁극적으로 유럽지역 내 저탄소화에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 석탄 발전량의 비중도 1% 유의수준에서 통계적인 유의미성을 지니고 있었으나 탄소배출량에는 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 석탄의 경우에는 전력생산과정에서 발생하는 탄소배출량이 다른 발전원 대비 많다는 점이 반영된 것으로 보인다. 이러한 측면에서 탄소중립(Net-Zero) 목표 달성을 위하여 석탄발전총량을 제한하는 법제도적인 보완 및 환경비용부담이 강화되는 방향으로의 추이가 앞으로도 전개될 것으로 전망된다. 하지만 석탄은 원전과 마찬가지로 설비의 기대수명이 길며 단위당 발전단가가 비교적 저렴한 대용량 발전설비라는 점에서 자국의 전력수급 안정화에 대한 기여도가 높아 중장기 발전원 믹스를 단계적으로 추진하는 체계를 구축하는 방안이 함께 모색되어질 필요가 있다.

셋째, 가스 발전량 비중은 탄소배출량에 미치는 영향이 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 다만 가스의 경우도 엄밀히 석탄과 같은 천연자원을 활용한 전력생산이라는 점에서 전력생산과정에서 탄소배출이 발생하게 된다. 가스는 단위당 발전단가가 다른 발전원 대비 비싸기 때문에 원천적으로 원전과 석탄에 대한 대체전원으로서의

34) 추정모형을 1과 2로 구분하여 분석을 시행하였음에도 주요 변수들에 대한 부호 값이 통계적인 유의미성을 유지한 상태에서 유사하게 나타나고 있으며 추가적으로 추정모형 2에 대한 Chow Test 결과에 있어서도 이 같은 상태가 유지되고 있어 해당 추정모형이 강건하다는 것을 간접적으로 나타내고 있다.

역할에는 경제적인 한계가 존재할 수 있겠으나 태양광과 풍력 같은 가변재생에너지원의 보급이 활성화되면서 백업전원으로서 가스발전의 활용이 함께 증가되고 있는 상황 이므로 가스발전이 탄소배출량에 미치는 영향에 대한 모니터링이 계속되어야 한다고 본다.

넷째, 재생에너지 발전량 비중은 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 탄소배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유럽은 2005년을 기점으로 배출권거래제를 도입하면서 전력생산과정에서 온실가스³⁵⁾를 거의 혹은 아예 배출하지 않는 태양광과 풍력 등 친환경 재생에너지원의 보급을 본격적으로 활성화시켜 왔으며³⁶⁾ 이러한 재생에너지원이 탄소배출량을 감소시키는 주요한 역할을 수행한 것으로 분석된다. 게다가 재생에너지 발전량 비중에 대한 계수 값을 석탄 발전량 비중에 대한 계수 값과 비교하여 본다면 석탄에 따른 탄소배출량 증가 대비 재생에너지에 따른 탄소배출량 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 이로써 저탄소 녹색성장을 위해선 재생에너지원의 보급을 지금보다 활성화시킬 수 있는 다양한 방안들이 앞으로도 지속해서 모색되어질 필요성이 제기 된다.

다섯째, 이웃 국가들에서의 자국 내 전력수급률은 1% 유의수준에서 유의미하게 탄소배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 국가 간 전력계통망이 연계되어 있는 상황에서 이웃한 개별국가들에서의 자국 내 전력수급 안정화는 교역되는 전력의 (총)물량을 제약시키며 각 국가별로 전력생산체계에서의 비교우위가 존재하는 발전원에 대한 이용극대화가 실현되지 못하게 될 수도 있다. 즉 이웃 국가들에서 전력수급(율)이 안정화될수록 전력교역시장이 폐쇄된 독립계통구조로 보다 변화되면서 에너지안보 유지 차원에서의 전원구성 다변화에 따른 전력생산에 필요한 자원의 비효율성으로 인한 탄소배출량이 증가하게 된다. 무엇보다 이러한 개별국가들에서의 전력수급 안정화에 따른 독립계통으로의 전력시장 구조변화는 태양광과 풍력 등 가변재생에너지원을 백업하는 유연성 전원(가스복합, ESS, 양수, 수력, 수요자원, 연료전지, V2G 등)의 과잉설비투자를 유발시켜 사회적 비용을 증가시키는 요인으로 작용될 수 있다.

35) 온실가스(Greenhouse Gases)는 6대 온실기체로서 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 등을 의미한다.

36) 자세한 사항은 윤경수(2019)를 참고하도록 한다.

여섯째, 원유, 석탄 그리고 가스 등 천연자원을 보유하고 있는 국가들에서의 전력생산량 증가가 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 탄소배출량을 증가시키는 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 부존자원을 가진 국가들은 그렇지 않은 국가들에 비해 전력생산에 필요한 자원을 손쉽게 공급받을 수 있으며 그 물류비용도 현저히 작다는 등의 이점을 지닐 수 있다. 이로써 자원 보유국들은 부존자원을 활용하여 보다 경제적이고 안정적인 전력생산을 하면서 전력교역시장에서의 전력가격에 대한 비교우위를 지니며 전력수출에 따른 경제편익을 극대화할 수 있다. 반면에 이들로부터 생산된 전력을 수입하는 국가들에서도 자국 내 전력생산단가보다 저렴하게 전력을 수입함으로써 경제편익을 충분히 공유할 수 있다. 다만 이러한 부존자원을 지닌 대부분의 국가들이 자원을 활용한 전력생산에 의존하고 있어 탄소배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 자원을 보유한 국가들이 기존 발전설비에 대한 좌초자산(전환비용)이 최소화되면서도 보다 친환경적으로 전력생산이 가능하도록 동기를 부여하고 유인하는 다자간 협의가 필요할 시점이라고 판단된다.

일곱째, 개별국가들의 발전원집중³⁷⁾도 증가는 두 가지 추정모형 모두에서 통계적인 유의미성을 지니며 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다만 해당 변수는 다른 변수들과 달리 1인당 전력교역량 변수를 포함하고 있는 추정모형(1)과 1인당 전력 순수출량 변수를 포함하고 있는 추정모형(2)에서 각각 10%와 1%로 통계적인 유의수준에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 추정모형(2)에서의 계수 값이 -5.169로 추정모형(1)에서의 계수 값 -2.748보다 큰 것을 확인할 수 있다. 개별국가들은 전력생산에 있어 비교우위가 존재하는 특정한 발전설비에 대한 규모의 경제효과를 극대화하여 단위당 발전단가를 최대한 낮추고자 하며 그 과정에서 발전원집중도는 증가하게 된다. 뿐만 아니라 이러한 규모의 경제효과가 극대화될수록 전력생산에 투입되는 자원의 이용효율성이 함께 극대화되면서 전력생산 단위당 탄소배출량도 최소화될 수 있다. 무엇보다 전력 순수출국들은 순수입국 대비 전력생산의 가격경쟁력이 높아 전력교역을 보다 활성화시키는데 기여도가 높다. 따라서 전력 순수출량을 변수로 포함시킨 추정모형의 경우가 전력교역량을 변수로 포함시킨 추정모형의 경우에서 보다 발전원집중도 증가에 따른 탄소배

37) 발전원집중도는 허핀달-허쉬만 지수(HHI)를 응용한 것으로서 그 값이 클수록 특정 발전원에 대한 이용률뿐만 아니라 전력생산의 의존율도 높다는 것을 의미한다.

출량 감소 효과가 더 크게 나타난 것으로 분석된다.

여덟째, 개별국가들의 1인당 산업부문 총에너지 소비량은 1% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 탄소배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 자국의 산업경기 활성화에 따른 추가적인 에너지소비와 더불어 전력수요 증가분이 탄소배출량을 더욱 증가시키는 요인으로 작용될 수 있다는 것으로 해석될 수 있다. 하지만 국가 간 전력교역시장의 활성화를 통하여 자국의 전력수요의 추가적인 증가분을 수입에 의존함으로써 이에 상응하는 전력생산 및 신규 발전설비의 도입을 회피하여 탄소배출량의 증가 폭을 전략적으로 제한하여 환경비용부담을 최소화시킬 수 있다고 본다.

아홉째, 전력가격에서의 세금은 탄소배출량에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 유럽의 전력거래시장의 경우는 각 국가들 간의 단일전력시장의 형성을 위하여 소매시장을 개방해 자유로운 송전망 이용 및 계통운영 분할을 통한 전력 자유화를 추진하고 있다는 점이 반영된 것으로 분석된다. 유럽은 장기간 역내 전력시장의 통합을 추진하여 오면서 선도시장(연속거래), 하루전시장(옥션), 당일시장(옥션+연속거래) 및 밸런싱시장을 융·복합적으로 운영해 오고 있다.³⁸⁾³⁹⁾ 이러한 측면에서 전력가격에 대한 변수가 통계적으로 유의미한 결과로서 도출되기 위해선 지금의 연간 데이터가 아닌 시간별 혹은 일별 데이터를 활용하는 방안이 필요할 것으로 생각된다. 다만 최종적으로 세금이 포함되어 있는 전력판매단가는 국가 간 전력교역 상황에서의 단위당 전력가격에 좀 더 직접적인 영향을 미치며 전력의 수출입과 같은 전력교역 유형을 결정하게 된다. 또한 전력가격에서의 세금은 친환경으로의 에너지(연료)전환과 태양광·풍력 같은 변동성을 지닌 재생에너지원의 보급 및 기술개발(R&D), 에너지이용효율합리화 등을 활성화시키기 위한 재원으로 활용될 수 있으며 간접적으로 탄소배출량 감소에 영향을 줄 수 있다.

열째, 1인당 국토면적의 크기는 매우 높은 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 탄소

38) 자세한 사항은 전력거래소(2017.11.) 자료를 참고하도록 한다.

39) 우리나라의 에너지시장은 CBP(Cost Based Pool)를 기반으로 한 하루 전 시장으로만 제한되어 있다는 점에서 가격발전계획과 운영발전계획 간의 편차가 존재하며 예비력·송전제약·열 제약 등 실제통여건이 적절히 반영되지 못하여 시장가격의 심각한 왜곡을 발생시키는 비효율적인 전력시장구조를 가지고 있다. 이에 실제통기반의 하루전시장으로의 전환과 함께 당일·실시간시장의 도입을 추진하고 있으며 가변재생에너지원에 대한 출력변동성 대응을 위하여 백업전원(Back-up)의 적절한 가치를 보상하기 위한 보조서비스시장을 도입하는 개선방안이 추진되고 있다.

배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 1인당 국토의 면적이 클수록 지리적·지형적으로 제약요인이 존재하는 수력과 양수 같은 발전설비의 잠재적인 개발가능성이 증진된다. 또한 단위면적당 발전가능용량이 적어 많은 양의 국토면적이 요구되는 태양광과 풍력 같은 가변재생에너지원의 보급도 보다 활성화시키는 데 용이하다. 무엇보다 자국 내에서 인구밀집지역을 벗어난 유휴부지의 확보가 용이할수록 단위당 전력생산 대비 탄소배출량이 적으면서도 다른 발전원 대비 발전단가가 저렴하지만 예기치 못한 사고 발생 시 사회·경제적인 피해복구비용에 있어 그 부담이 매우 큰 원전설비를 도입하여 운영하는 데 따른 사회적 비용을 최소화할 수 있다. 이로써 전력생산 대비 탄소배출량이 많은 기존 자국 내 석탄발전설비에 대한 대체전원의 도입과 보급을 비교적 원활히 추진할 수 있게 됨으로써 탄소배출량 감소에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있었던 것으로 분석된다.

마지막으로, 1인당 전력교역량과 1인당 전력 순수출량은 모두 1%의 유의수준으로 통계적인 유의미성을 지니며 탄소배출량에 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 1인당 전력교역량의 계수 값은 -39.992로서 1인당 전력 순수출량의 계수 값인 -28.908 보다 큰 것으로 나타났다. 이로써 국가 간 전력교역이 활성화될수록 탄소배출량 감소의 효과는 더 커지며 국가 간 전력교역 유형에 있어서도 전력 순수입 대비 순수출이 탄소배출량 감소에 보다 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 통해서 다른 국가들보다 전력생산을 효율화할 수 있는 국가에서의 전력생산량 극대화로 인한 전력의 순수출량 증가가 탄소배출량을 최소화하는 데 도움이 된다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 국가 간 전력교역시장이 자유화될수록 전력생산에 있어 비교우위가 존재하는 발전원에 대한 활용이 더욱 증가됨으로써 전력생산체계에서의 규모의 경제효과는 극대화될 수 있다. 이러한 규모의 경제효과는 전력생산을 위하여 투입되는 자원의 이용을 보다 최적화하여 단위당 탄소배출량을 직·간접적으로 최소화시킨다. 따라서 국가 간 전력교역에 따른 경제편익이 전력의 가격경쟁력을 지니며 수출하는 국가와 자국보다 싸게 생산된 전력을 수입하는 국가 모두에 존재할 수 있다는 측면에서 지속가능한 저탄소 녹색성장의 목표를 달성하기 위해 현행 개별국가 단위로 탄소배출량 감축의무를 부여하고 있는 파리협약의 한계점이 전력교역국들 간 연합적인 다자간 노력이 전개될 수 있도록 하는 제도 개선의 필요성이 제기된다.

〈표 7〉 추정결과: Model(2)에 대한 Chow test 분석

모형	Model(2)	
	(1) 2005년 이전	(2) 2005년 이후
nuclear	-131,685.927***	-97,040.393***
	(23,334.869)	(18,328.410)
coal	111,342.384***	69,553.534***
	(21,317.370)	(17,722.376)
gas	-45,174.163*	-23,148.934
	(24,207.054)	(17,230.923)
renewal	-648,824.033***	-153,221.943***
	(118,264.580)	(45,671.379)
near	291,879.407***	105,067.732***
	(56,745.957)	(39,878.582)
res	1.155***	1.006***
	(0.036)	(0.029)
HHI	-17.913***	-11.738***
	(2.506)	(1.922)
IndPop	85,030.645***	43,651.817***
	(14,393.181)	(9,461.647)
Aeptax	1133907.383***	137,124.565
	(236,989.980)	(127,719.643)
TAreaPop	-1.726***	-1.372***
	(0.347)	(0.259)
ELENetexportPop	-11.102	-26.295*
	(17.083)	(15.884)
_cons	-239,252.833***	-23,680.906
	(62,854.367)	(43,504.135)
Obs	100	200
국가 수	20	20
Chow 검증	chi2(12) = 20.06 (Prob > chi2 = 0.0660)	

주: 1) 괄호 안의 값은 표준오차를 의미한다.

2) ***, **, 그리고 *는 1%, 5%, 그리고 10% 유의수준을 각각 의미한다.

<표 7>은 유럽이 2005년에 도입한 탄소배출권 거래시장을 기점으로 표본기간을 그 전과 후로 나누어 기존의 여타 설명변수들과 함께 1인당 전력 순수출량이 종속변수로 사용된 탄소배출량에 어떠한 영향을 미치는지 보다 면밀하게 살펴본 것이다. 먼저 해당 분석결과를 보면, 2005년 이전에는 1인당 전력 순수출 변수를 제외하곤 사용된 모든 설명변수들에서의 통계적인 유의미성이 존재하는 것으로 나타난 반면 2005년 이후에는 가스 발전량 비중과 전력가격에서의 세금 변수를 제외한 설명변수들에서만 통계적인 유의미성이 존재하는 것으로 나타났다. 이에 2005년을 전후하여 분석결과와의 미묘한 차이가 존재하는 것으로 분석되었다.

또한 해당 분석결과를 앞선 <표 6>에서의 1인당 전력 순수출량 변수를 고려한 추정모형과 비교하여 살펴본다면 2005년 이후의 경우에서는 사용된 설명변수별 통계적인 유의미성과 부호 값이 동일하게 나타났으나, 2005년 이전의 경우에서는 가스발전비중과 전력가격 내에서의 세금변수가 통계적으로 유의미하고 1인당 전력 순수출량은 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타나면서 차이를 보였다.

먼저 발전원별로 원전과 재생에너지의 경우는 2005년을 기점으로 전후 모두에서 탄소배출량 절감에 매우 높은 수준으로 통계적인 유의미성을 지니며 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 대용량 기저발전원으로서 활용되고 있는 원전설비에 대한 경직성을 완화시키는 응용기술적용과 더불어 재생에너지와의 연계성을 강화하는 융·복합적인 대응방안이 모색되어질 필요가 있다. 뿐만 아니라 원전과 재생에너지원은 에너지수입의존도 개선에 따른 에너지자립 및 에너지안보 유지·발전에 도움이 되면서도 자주적으로 탄소중립 목표 달성을 극대화시키는 긍정효과가 있는 만큼 중장기 활용방안이 모색되어야 할 시점이라고 판단된다.

이와 달리 석탄의 경우는 매우 높은 통계적인 유의수준에서 탄소배출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 석탄발전의 경우 여타 발전원 대비 단위당 탄소배출량이 많다는 측면이 반영된 것으로 분석된다. 이러한 이유로 유럽에서도 석탄발전에 대한 조기폐쇄와 함께 추가적인 설비도입을 고려하지 않는 추세이다. 다만 석탄의 경우도 원전과 마찬가지로 단위당 발전단가가 저렴해 기저발전원으로서 활용되어 왔다. 따라서 석탄발전 설비의 설계수명 및 대체발전원별 준공 기간을 적절하게 고려하지 못한 연료전환은 좌초 자산의 문제를 유발하며 전기요금 인상 등 추가적인 사회적 비용 부담이 유발될 수 있다.

가스의 경우는 2005년을 기점으로 이전에는 통계적인 유의미성을 지니면 탄소배출량을 감소시키는 것으로 나타났으나 이후에는 통계적인 유의미성을 보이지 않고 있다. 이는 지구온난화 방지를 선도해 온 유럽은 사실상 배출권거래제 도입 이전부터 석탄발전에 대한 연료전환을 추진해 왔기 때문으로 분석된다. 즉, 석탄발전에 대한 연료전환기에는 석탄 대체 가스 발전량 비중의 증가가 탄소배출 절감에 통계적으로 유의미하게 분석될 수 있겠으나 가스발전도 결국은 천연자원을 활용한 전력생산으로서 그 과정에서 탄소가 발생한다는 한계로 탄소배출량 절감효과가 점차 제한될 수 있다는 의미이다. 따라서 지속가능한 탄소중립을 위해선 자원을 활용한 전력생산을 최소화시키는 중장기 전원믹스 전략이 체계적으로 마련되어야 할 것이다. 또한 가변재생에너지원의 간헐성·변동성 대응을 위하여 백업전원으로서 가스발전의 활용이 고려되어야 한다면 CCUS, 연료전지 등 탄소저감 기술이 융·복합되는 시스템 구축이 반드시 필요하다.

이외의 이웃 국가들에서의 자국 내 전력수급률, 부존자원을 가진 국가들에서의 전력생산량, 발전원집중도, 1인당 산업부문 총에너지 소비량,⁴⁰⁾ 전력가격에서의 세금, 1인당 국토면적의 크기 등의 설명변수들에 대한 반복해석을 피하고자 앞선 <표 6>에서 논의한 것으로 대체하는 것으로 한다. 다만 1인당 전력 순수출량 변수는 본 연구에서 중요하게 다루고 있는 만큼 추가적인 해석을 해보고자 한다.

마지막으로 1인당 전력 순수출량 변수의 경우 2005년 이전에는 통계적인 유의미성을 보이지 않으나 2005년 이후에는 탄소배출량 절감에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 유럽 내 전력수요가 많은 주요 선진국을 중심으로 개별국가들에서의 가변재생에너지원 보급이 2005년 이후로 본격화되면서 간헐성에 따른 전력계통운영상의 불안정성을 해소하고자 국가 간 전력교역이 보다 활성화되었기 때문으로 풀이된다. 따라서 국가 간 전력교역의 활성화가 가변재생에너지원에 대한 수용력을 증진시켜 탄소배출량 절감에 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석된다.

40) 2005년을 기점으로 이전 대비 이후 탄소배출량 증가에 대한 영향이 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 친환경 산업구조(FEMS, 재생에너지 자체 보급 활성화 등) 개선의 노력이 통계적으로도 유의미하게 분석되었다는 판단이다.

IV. 요약 및 정책적 시사점

본 연구에서는 유럽의 20개 국가들을 대상으로 2000년부터 2014년까지의 유럽 내 탄소배출권 거래제도가 도입된 2005년을 기점으로 표본기간을 양분하여 탄소배출량 증감에 영향을 미치는 결정요인들을 실증 분석하였다. 여기서 제시하는 추정결과는 전체 표본기간 동안에서의 각 변수들이 탄소배출량 증감에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 패널 GLS 분석을 시행한 것과 유럽 내 탄소배출권 거래제가 도입된 2005년을 기점으로 국가 간 전력교역 상황에서의 전력교역 유형에 따른 탄소배출량 증감에 미치는 영향이 어떠한지를 살펴보기 위하여 Chow test 분석을 시행한 것으로 구분된다. 모든 추정분석의 경우에서 활용된 주요 변수들에 대한 부호 값과 통계적인 유의성이 매우 유사하게 유지되고 있다는 점에서 해당 추정모형이 강건하다는 것을 간접적으로 살펴볼 수도 있다.

각각의 주요 추정결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 발전원별로 원자력과 재생에너지의 발전비중 증가는 탄소배출량을 감소(-)시키는 것으로 나타난 반면 석탄의 발전비중 증가는 탄소배출량을 증가(+)-시키는 것으로 나타났다. 이외에도 가스의 발전비중 증가는 전체 표본기간을 대상으로 한 추정분석에서는 통계적인 유의미성이 나타나지 않았으나 배출권거래제가 도입된 2005년을 기점으로 전후 분석한 경우에는 2005년 이전의 경우에서만 통계적인 유의미성과 함께 탄소배출량을 감소(-)시키는 미미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 친환경으로의 온실가스배출제한과 같은 사회이슈가 고착화되고 법제도가 마련되기 이전부터 유럽에서는 자체적으로 석탄을 가스로 전환하는 많은 노력을 전개하여 왔으며 그 과정에서 전력생산 단위당 탄소배출이 석탄 대비 적은 가스복합의 탄소배출량 절감에 대한 기여도가 통계적으로도 분석되었다는 판단이다. 하지만 가스복합의 경우도 전력생산과정에서 필연적으로 탄소가 배출된다는 점에서 그 기여도가 점차 상쇄되어 2005년 이후에서의 통계적인 유의미성은 보이지 못한 것으로 판단된다. 전원별 실증분석 결과를 종합하여 살펴본다면, 원자력과 재생에너지원을 활용한 친환경 무탄소 에너지전환이 탄소배출량 절감에 긍정적으로 유의미하다는 것을 확인해 볼 수 있다. 우리나라의 경우는 자국 내 부존자원이 없으면서도 전력계통망이 유럽과 달리 독립되어 있지만 선진 원자력 기술력을 보유하고 있다는 점에서 원전설

비를 활용한 전력생산에 있어 비교우위가 있으며 가변재생에너지원과의 연계(수전해 방식, 열저장 등) 발전기술을 확보할 수 있는 기술 잠재력도 함께 보유하고 있다. 따라서 원자력과 가변재생에너지원의 이용을 극대화하여 탄소중립 사회 구현을 현실화하는 법제도 및 기술지원의 선행이 필요한 시점이다.

다음으로, 이웃한 개별국가들에서의 전력자금률, 자원보유국들의 전력생산량, 1인당 산업부문 총에너지 소비량 등의 증가는 탄소배출량을 증가(+)시키는 것으로 나타났다. 글로벌 사회의 온실가스 배출(총)량 절감을 위해선 지금의 파리협약과 같은 개별국가단위로의 의무를 부여하는 것도 필요하지만 나라별 특성을 고려한 다자간 자원이용에 대한 협의체를 구성하여 자원이용 및 전력생산(교역)에 있어 공동의 목표를 정립하고 함께 이행하도록 하는 추가적인 방안도 반드시 모색되어야 할 것이다. 그리고 기존 에너지사용량이 많은 산업부문 혹은 자원보유국들의 천연자원(원유, 석탄, 가스 등) 대외수출 및 전력생산 의존도를 낮추어 친환경으로 구조변화를 이끌어내는 과정에서의 경제 타격과 비용부담을 최소화시켜주는 글로벌 사회의 많은 관심과 협력방안이 논의되어야 할 때이다.

반면에, 1인당 국토의 절대면적이 크고 발전원집중도와 국가 간 전력교역량 등이 증가할수록 탄소배출량을 감소(-)시키는 데 긍정적인 것으로 나타났다. 이는 지정학적인 특이점을 살려 단위면적당 전력생산량은 작지만 친환경적인 가변재생에너지(태양광, 풍력)원의 보급을 활성화하거나 무탄소 발전원으로서의 원전 보급을 사회적 비용을 최소화하며 비교적 쉽게 확대·활용할 수 있는 여건이 탄소배출 절감에 긍정적으로 작용되었다는 판단이다. 그리고 발전원별로 규모의 경제를 활용한 전력생산의 효율극대화는 단위당 발전단가를 낮춰 국가 간 전력교역시장을 보다 활성화하는 데 긍정적인 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 전력생산 과정에서의 자원투입량을 최소화시켜 단위당 탄소배출량 절감에 긍정적인 효과를 미친다. 이 같은 효과성은 전력의 시장규모가 확장되고 세분화될수록 증진되므로 국가 간 전력교역체제하에서의 발전원집중도의 증가는 탄소배출량 절감에 보다 긍정적이게 된다. 아울러 유럽 내 탄소배출권거래제 도입으로 환경비용을 고려한 개별국가단위의 자국 내 전력의 부족(수입)분과 과잉(수출)분에 대한 전력교역이 제약적으로 이루어지고 있다는 점에서 전력교역국들 간의 전력수급 효율화에 따른 탄소배출량 절감의 선순환 시장구조가 유지·발전하게 된다. 이외에도 국가 간 전력

교역의 활성화가 전력생산에 필요한 자원배분을 효율화하여 전력생산 단위당 탄소배출량 절감에 긍정적으로 도움이 된다는 것을 제시한다. 따라서 본 연구의 결과를 국가 단위 전력교역으로만 국한하기보다는 지역 간 전력교역(분산전원·스마트그리드)으로 응용하여 생각해 볼 필요성이 존재한다.

마지막으로, 전력가격에서의 세금이 차지하는 총액은 1인당 전력 순수출량 변수와 함께 유럽이 탄소배출권거래제를 도입한 2005년을 기점으로 표본기간을 전후로 구분한 추정모형에서의 2005년 이전에 대해서만 통계적으로 유의미한 것으로 분석되었다. 국가 간 전력망이 연계되어 있는 상황에서 한정된 일부의 선진국에서만 전력가격체계 내 환경비용 부담을 가중시키는 것은 전력교역국들 간 전력의 상대가격 격차를 다변화시킬 뿐만 아니라 단위당 발전단가가 저렴해 가격경쟁력을 보유한 자원보유국으로부터의 전력수입의존도를 증가시키게 된다. 특히 유럽과 같이 전력시장구조가 개방된 곳일수록 이러한 전력교역 양상은 뚜렷하게 나타난다. 따라서 자국 내 전력수입량 증가에 따른 전력생산량 감소로 정량지표상으로 탄소배출량 감소효과는 나타날 수 있다. 하지만 선진국 대비 친환경적인 발전기술력이 저조한 자원보유국에서의 자원을 활용한 전력생산 증가분으로 인하여 유럽 내 탄소배출총량은 오히려 증가하게 된다. 따라서 탄소배출량의 효과적인 감축방안을 모색하기 위해선 국가 간 전력교역 상황과 전력시장의 개방(자유도) 정도가 함께 고려되어야 하며 친환경으로의 다자간 법·제도적 차원의 협력방안이 동시에 이행되어야 정책효과를 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 국가 간 전력교역의 활성화가 탄소배출량에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 개별국가들에 대한 연도별로의 전원별 발전량 비중 및 전력교역량 정보를 주요 변수로 활용하여 실증 분석하였다. 이로써 개별국가 단위의 저탄소화를 위한 전력수급 여건만을 고려하는 기존 연구들과 차별성을 지니며 보다 실효성 있는 탄소중립 목표 실현을 위한 중장기 발전원 믹스 최적화 방안을 탐구·도출하는 데 주요한 시사점을 남긴다. 하지만 유럽의 경우, 실시간 전력거래 제도를 운영하고 있어 실질적으로 국가 간 전력교역이 분 혹은 시간단위로 이루어진다. 따라서 추후 연구에서는 보다 면밀한 실증분석을 위하여 좀 더 작은 시간단위의 전력교역량 정보를 활용하는 것이 모색되어질 필요성이 제기된다. 이러한 시도를 통하여 국가별로 상이한 일출과 일몰시간대, 기후, 계절성 등을 고려하는 것이 가능해지며 본 연구의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

[References]

- 민인식·최필선, 『패널데이터분석STATA』, 한국STATA학회, 2016a, pp. 79~99.
- 민인식·최필선, 『기초통계와 회귀분석』, 한국STATA학회, 2016b, pp. 58~185.
- 박완규·홍성표, 『Gujarati의 계량경제학(개정5판)』, MC Graw-Hill Korea, 2009, pp. 393~397.
- 윤경수, “탄소배출권 거래제 도입과 탄소배출량을 고려한 유럽의 국가 간 전력교역 결정요인 분석”, 박사학위논문, 숭실대학교, 2021.2.
- 윤경수·박창수·조성봉, “유럽의 탄소배출권 거래시장 도입에 따른 연결계통국가들의 전력 순수출 결정요인 변화 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제28권 제3호, 2019, pp. 385~413.
- 전력거래소, “2017년 해외 전력산업 동향(유럽연합)”, 2017.11.
- 홍원준·이지훈·노주만·조홍중, “공간계량방법론을 활용한 유럽 전력 수출입 결정요인 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제30권 제3호, 2019, pp. 435~469.
- Aboumahboub, T., K. Schaber, P. Tzscheuschler, and T. Hamacher, “Optimization of the utilization of renewable energy sources in the electricity sector,” *Recent Advances in Energy & Environment*, 2010, pp. 196~204.
- Ahamada, I., and D. Kirat, “The Impact of Phases II of the EU ETS on Wholesale Electricity Prices,” *Revue d'économie politique*, Vol. 125, 2015, pp. 887~908.
- Amor, M. B., P. Pineau, C. Gaudreault, and R. Samson, “Electricity trade and GHG emissions: Assessment of Quebec’s hydropower in the Northeastern American market (2006–2008),” *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 1711~1721.
- Bowen, B. H., F. T. Sparrow, and Z. Yu, “Modeling electricity trade policy for the twelve nations of the Southern African Power Pool (SAPP),” *Utilities Policy*, Vol. 8, No. 3, 1999, pp. 183~197.
- BP, Stats Review 2005 Full Report, (2005-2016).
- BP, Statistical Review of World Energy, 2021.
- Child, M., C. Kemfert, D. Bogdanov, and C. Breyer, “Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe,” *Renewable Energy*, Vol. 139, 2019, pp. 80~101.
- Delarue, D., K. Voorspools, and W. D’haeseleer, “Fuel Switching in the Electricity Sector under the EU ETS: Review and Prospective,” *Journal of Energy Engineering*, Vol. 134, No. 2,

- 2008, pp. 40~46.
- EU EUROSTAT, <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- European Union, https://europa.eu/european-union/about-eu/countries_en#28members (2019)
- Fichaux, N., and J. Wilkes, *Oceans of Opportunity : Harnessing Europe's largest domestic energy resource*, EWEA(European Wind Energy Association), 2009.
- Fuller, R. B., *The world game: integrative resource utilization planning tool*, Southern Illinois University in Carbondale, 1971.
- Global Carbon Atlas : <http://www.globalcarbonatlas.org/>(2022)
- Gnansounou, E., H. Bayem, D. Bednyagin, and J. Dong, "Strategies for regional integration of electricity supply in West Africa," *Energy Policy*, Vol. 35, 2007, pp. 4142~4153.
- Greenpeace and 3E, *A north sea Electricity Grid[R]evolution: Electricity Output of Interconnected Offshore Wind Power: A vision of Offshore Wind Power Integration*, Greenpeace, 2008.
- Heide, D., L. von Bremen, M. Greiner, C. Hoffmann, M. Speckmann, and S. Bofinger, "Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe," *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 11, 2010, pp. 2483~2489.
- IEA, 'Electricity Information: Overview (2018 Edition)'
- IEA, 'Key World Energy Statistics 2018'
- IEA, 'World Energy Balances 2018'
- Laing, T., Misato Sato, Michael Grubb, Claudia Comberti, "The effects and side-effects of the EU emissions trading scheme," *WIREs Climate Change*, Vol. 5, 2014, pp. 509~519.
- Newbery, D., G. Strbac, G. Pudjianto, and P. Noel, *Benefits Of An Integrated European Energy Market*, Booz&co, 2014.
- Newbery, D., M. G. Pollitt, R. A. Ritz, and W. Strielkowski, "Market design for a high- renewables European electricity system," *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 91, 2018, pp. 695~707.
- Ochoa, C., and A. van Ackere, "Winners and losers of market coupling," *Energy*, Vol. 80, 2015, pp. 522~534.
- OECD, <https://www.oecd.org/about/members-and-partners/> (2019)
- Pineau, P. O., A. Hira, and K. Froschauer, "Measuring international electricity integration: a comparative study of the power systems under the Nordic Council, MERCOSUR, and

- NAFTA,” *Energy Policy*, Vol. 32, No. 13, 2004, pp. 1457~1475.
- Qu, S., Y. Li, S. Liang, J. Yuan, and M. Xu, “Virtual CO₂ Emission Flows in the Global Electricity Trade Network,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 52, 2018, pp. 6666~6675.
- Rogers, J. S., and J. G. Rowse, “Canadian interregional electricity trade: Analysing the gains from system integration during 1990~2020,” *Energy Economics*, Vol. 11, No. 2, 1989, pp. 105~118.
- Schaber, K., F. Steinke, and T. Hamacher, “Transmission grid extensions for the integration of variable renewable energies in Europe: Who benefits where?,” *Energy Policy*, Vol. 43, 2012, pp. 123~135.
- Wang, H., W. Wang, S. Liang, C. Zhang, S. Qu, Y. Liang, Y. Li, M. Xu, and aZ. Yang, “Determinants of Greenhouse Gas Emissions from Interconnected Grids in China,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 53, 2019, pp. 1432~1440.
- Yu, X., “Regional cooperation and energy development in the Greater Mekong Subregion,” *Energy Policy*, Vol. 31, No. 12, 2003, pp. 1221~1234.
- Zakeri, B., J. Price, M. Zeyringer, I. Keppo, B. Mathiesen, and S. Syri, “The direct interconnection of the UK and nordic power market,” *Energy*, Vol. 162, 2018, pp. 1193~1204.

[부록]

〈부록 표 1〉 유럽지역 내 개별국가들의 이웃 국가 및 전력계통망 연계 현황

No.	국가 명	연구 대상 국가	
		육로 연계 국가	해로 연계 국가(해상, 해저)
1	Austria	Czech Republic, Germany, Hungary, Slovakia, Slovenia, Italy	
2	Belgium	Netherlands, Germany, Luxembourg, France	
3	Czech Republic	Germany, Austria, Slovakia, Poland	
4	Denmark	Germany	Sweden, Norway
5	Finland	Norway, Sweden	Estonia
6	France	Belgium, Luxembourg, Germany, Italy, Spain	UK, Ireland
7	Germany	Denmark, Poland, Czech, Austria, France, Luxembourg, Belgium, Netherlands	Sweden
8	Greece	Macedonia, Bulgaria, Turkey	Italy
9	Hungary	Slovakia, Austria, Romania, Serbia, Croatia, Slovenia	
10	Ireland		UK, France
11	Italy	France, Slovenia, Austria	Greece
12	Luxembourg	Belgium, Germany, France	
13	Netherlands	Germany, Belgium	UK, Norway
14	Norway	Finland, Sweden	Denmark, Netherlands
15	Poland	Lithuania, Slovakia, Czech Republic, Germany	Sweden
16	Portugal	Spain	
17	Slovenia	Italy, Austria, Hungary, Croatia	
18	Spain	France, Portugal	
19	Sweden	Norway, Finland	Denmark, Poland, Germany
20	United Kingdom		Ireland, France, Netherlands

주: Ireland에서 ‘해로 연계 국가’의 France는 공사 중에 있으며 상업운영을 하고 있지 않음.

<부록 표 1>은 본 연구에서 고려하고 있는 연구대상국들의 이웃 국가들에 대한 정의를 보여준다. 먼저 ‘육로 연계 국가’란 개별국가들의 지도상 육로로 연결된 이웃 국가와 같으며 육로케이블로 전력계통망이 상호간 연계되어 있다는 것을 의미한다. 다음으로 ‘해로 연계 국가’란 지도상으로 바다가 있지만 해상과 해저 등의 케이블로 국가 간 전력계통망이 연계되어 있다는 점을 추가적으로 고려해 본 연구에서 이웃 국가의 범주로서 포함시킨 것이다.⁴¹⁾

41) 자세한 내용은 윤경수(2019)를 참고하도록 한다. 해당 논문에서는 유럽 내 30개국의 연계유형별 국가들을 구분하는 표를 제시한다.