

공간계량 방법론을 활용한 유럽의 전력수출입 결정요인 분석[†]

홍원준* · 이지훈** · 노주만*** · 조홍종****

요약 : 본 연구에서는 패널 공간더빈모형을 활용하여 유럽연합 회원국 26개 국가의 전력수출입 결정요인을 밝히는 것을 주요 목적으로 하며, 특히 전원별 발전량을 중심으로 설명하고자 한다. 이때 공간더빈모형을 활용함에 있어 단순히 인접기준 혹은 거리에 의해 가중치를 부여하는 방식이 아닌 전력 계통이 연계된 국가 간의 교역 비중을 기준으로 공간가중치 행렬을 구성하고자 한다. 또한 유럽 국가들의 전력계통은 직간접적으로 연결되어 지리적으로 멀리 떨어진 국가들 사이의 상호작용이 가능하므로, 이를 가중치행렬에 반영한다. 이를 바탕으로 분석한 결과, 원자력발전은 수출에는 양의 효과, 수입에는 음의 효과를 미치며 풍력·태양광 발전량의 증가는 전력의 계통 불안정성을 높여 수출과 수입에 모두 양의 효과를 미치는 것으로 분석되었다. 현재 국내의 지리적 여건상 타국과의 전력교역은 어려운 실정이다. 따라서 본 연구의 결과는 국내 에너지믹스 정책에 있어 시사하는 바가 있으며, 이전에 사용되지 않던 방식의 가중치행렬을 이용한 패널 공간더빈모형을 통해 전력수출입 요인을 분석했다는 데 의의가 있다.

주제어 : 유럽 전력 교역, 공간계량분석, 패널 공간더빈모형(SDM), 에너지믹스

JEL 분류 : F1, Q3, R1

접수일(2021년 5월 14일), 수정일(2021년 7월 1일), 게재확정일(2021년 7월 7일)

* 단국대학교 대학원 경제학과 석사과정, 제1저자(e-mail: 72201328@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 대학원 경제학과 석사과정, 공저자(e-mail: wlgns5749@gmail.com)

*** 단국대학교 대학원 경제학과 석사과정, 공저자(e-mail: jmnoh5724@dankook.ac.kr)

**** 단국대학교 경제학과 부교수, 교신저자(e-mail: hongcho@dankook.ac.kr)

Analysis of Determinants of Electricity Import and Export in Europe Using Spatial Econometrics

Won Jun Hong*, Jihoon Lee**, Jooman Noh***, and Hong Chong Cho****

ABSTRACT : The main purpose of this study is to identify the determinants of electricity import and export in 26 European Union countries using the Spatial durbin model(SDM). In particular, we would like to mainly explain it based on the amount of power generated by each energy source. Not just the usual way of constructing a weighting matrix based on contiguity, we adopt a weighting method based on the proportion of trade among countries with connected electricity systems. Moreover, the electricity systems of European countries are directly and indirectly connected, which is reflected in the weighting matrix. According to the results, nuclear power has a positive effect on exports and a negative effect on imports, and an increase in wind and solar power has a positive effect on both exports and imports by increasing power system instability. While Korea is unable to trade electricity due to geopolitical conditions, the results of this study are expected to provide implications for energy policies.

Keywords : Cross Border Electricity trading(CBET), Spatial econometrics, Spatial Durbin Model(SDM), Energy mix

Received: May 14, 2021. Revised: July 1, 2021. Accepted: July 7, 2021.

* Master's Degree, Department of Economics, Dankook University, First author(e-mail: 72201328@dankook.ac.kr)

** Master's Degree, Department of Economics, Dankook University, Co-author(e-mail: wlgns5749@gmail.com)

*** Master's Degree, Department of Economics, Dankook University, Co-author(e-mail: jmnoh5724@dankook.ac.kr)

**** Associate Professor, Department of Economics, Dankook University, Corresponding author(e-mail: hongcho@dankook.ac.kr)

I. 서론

1998년 러시아의 풍부한 에너지 자원을 활용하여 한국, 일본 및 중국 등으로 이어지는 전력망 연계 방안, 즉 동북아시아 슈퍼그리드에 관한 논의가 본격적으로 제기되었다. 2011년에는 소프트뱅크 창업자인 손정의 회장이 몽골의 광활한 대지를 활용하여 동북아 슈퍼그리드를 넘어 동남아 및 인도를 연결하는 아시아 슈퍼그리드를 만들자는 아이디어를 제시하며 주목을 받았다(윤성학, 2017). 슈퍼그리드란 국가 간에 연결된 대규모 전력망을 일컫는 것으로서, 에너지가 풍부한 나라에서 생산된 전력 자원을 에너지 수송 네트워크를 활용하여 에너지 자원이 부족한 다른 나라와 상호 공유하는 것을 의미한다. 만일 동북아시아 슈퍼그리드가 실현이 된다면, 각국의 실정에 맞는 효율적인 에너지 자원 이용과 안정적인 전력 공급을 통해 경제 및 산업 활성화와 더불어 낮은 전기 요금을 유지할 수 있다는 점으로 인하여 계통이 연계된 국가들에서 각국의 복리후생을 높이는 데 기여할 수 있다. 특히 한국에서는 최근 들어 국제적인 추세에 맞춰 탈원전 및 탈석탄 그리고 신재생에너지로의 전환을 골자로 하는 에너지 전환 정책을 지속적으로 추진하고 있어 주변국들과의 전력망 연계는 태양광 및 풍력과 같은 신재생에너지가 갖는 간헐성과 변동성 문제를 해결함으로써 계통 안정성 확보와 낮은 전력 요금 유지에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 2020년 12월에 발표된 제 9차 전력수급기본계획에서는 송·변전설비 주요 계획에서 동북아 슈퍼그리드 구축을 명시적으로 밝히고 있다.¹⁾ 하지만 한국의 경우 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 북한과의 정치적인 문제로 인하여 중국, 러시아 등과 지리적으로 단절되어 있어 동북아시아 슈퍼그리드가 실현될 가능성에 대해서는 여전히 회의적인 시선이 존재한다.

현재 전 세계적으로 진행되고 있는 대표적인 슈퍼그리드로는 2009년 독일, 프랑스, 영국, 네덜란드, 벨기에, 스웨덴, 노르웨이, 아일랜드 등 북해 연안 국가들의 합의를 통해 그 지역의 풍부한 풍력 및 수력 자원을 활용하는 북유럽 슈퍼그리드(Nord EU Supergrid)를 들 수 있으며, 이는 매우 성공적인 사례로 평가받고 있다.²⁾ 한편 슈퍼그리드 형성 이전부터 유럽에서는 이미 국지적으로 주변국들과의 전력망 연계를 통해 전력을 교역함

1) 산업통상자원부, 2020.12.28., 제 9차 전력수급기본계획(2020-2034).

2) 한국에너지신문, 2018.05.21., ‘동북아 슈퍼그리드’, 한·중·일·러 청정 전력망 연계 에너지 수급 안정성 확보.

으로써 각국의 상황과 여건에 맞게 효과적으로 에너지믹스(Energy Mix)를 구성하고 있다. 전력시장에서 초과공급 혹은 초과수요가 발생하게 되면 주파수 변동 및 배전계통 전압 상승, 대규모 정전과 같은 문제가 야기되기 때문에 전력시장은 실시간으로 수급균형을 달성해야 한다는 특성을 갖는다(김헌태·장성수, 2018). 한국의 경우 지정학적인 요인으로 인하여 현재로서는 주변 국가와 전력교역이 불가능하기 때문에 계통 안정성이 매우 중요한 요소로 부각되며, 이에 따라 기후적인 요인에 영향을 크게 받는 태양광 및 풍력과 같은 신재생에너지의 발전 비중을 급격하게 확대하기는 어려운 상황이다. 하지만 독일에서는 온실가스 감축과 환경에 대한 자국 내에서의 관심과 가치를 반영하여 신재생에너지의 비중을 지속적으로 확대하였으며, 이에 따라 발생 가능한 계통 안정성 문제는 주변국들과의 전력교역을 통해 해결할 수 있었던 것으로 사료된다. 또한 주변국들과의 전력교역은 유럽의 각 국가들이 자국의 자원보유 상황과 경제성을 고려한 최적의 에너지믹스를 선택하는 것에 기여할 수 있었다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 에너지믹스와 전력교역 간에는 높은 수준의 관련성이 있다고 할 수 있다.

본 연구는 유럽에서 배출권 거래제(EU-ETS)가 시행된 2005년 이후 유럽 국가들에서의 전력교역 결정요인을 발전원별 발전량을 중심으로 밝히는 것을 주요 목적으로 한다. 탄소배출권 시장의 형성 및 거래 활성화와 더불어 주변국들과의 자유로운 전력교역이 가능한 환경에서 의무적으로 온실가스 배출량을 줄여야 하는 국가들은 전력생산의 효율성을 더욱 제고시킬 수 있는 방향으로 전원믹스를 재편하고자 하는 유인이 발생할 수 있다. 다시 말해서, 발전 부문에 있어서 경제성과 친환경성은 동시에 달성하기 어렵다는 통념이 존재하며, 실제로도 일정 부분 그러한 경향이 있다. 하지만 전력교역 자유화와 탄소배출권 거래 도입은 앞서 언급한 일면 상충되는 두 가지 목표를 달성할 수 있도록 유도한다. EU-ETS가 시행되었음에도 불구하고 각 국가들은 자국의 경제성 있는 전원믹스는 유지하면서, 이에 대응하여 전력수출입의 크기를 조절하였을 가능성이 존재한다. 이에 따라, 탄소배출권 거래가 시작된 2005년 이후로 각국의 에너지원별 발전량이 유럽 전력교역에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 살펴보는 것은 추후 한국이 동북아시아 슈퍼그리드를 통해 주변국들과의 전력계통 연계를 실현하는 데 있어서 시사점을 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 유럽의 전력교역 결정요인을 분석하는 과정에서 에너지원별 발전량이 자국의 전력수출입에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보는 것은 역으로

현재 전력교역이 불가능한 한국에서 최적의 전원믹스 선택에 대한 간접적인 시사점을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

이때 전력교역을 살펴보기 위해서 추가적으로 고려해야 할 사항이 있다. 전력망 연계를 통해 전력을 수출입한다고 할지라도 유럽의 모든 국가들의 전력계통이 상호 연결되어 있는 것은 아니다. 예를 들어, 스페인은 프랑스와 포르투갈과 계통이 연계되어 있지만 프랑스는 벨기에, 룩셈부르크, 독일, 이탈리아, 스페인, 영국과 직접적으로 연계되어 있다. 하지만 특정 국가와 계통이 연계된 각 국가들은 또 다른 인접 국가들과 계통이 연계되어 있다는 점에서 유럽 전역이 직간접적으로 연결되어 있어 영향을 주고받을 수 있다고 생각할 수 있다. 이러한 점을 고려해볼 때, 분석을 위하여 지리적인 상관성을 반영하는 공간계량경제모형을 활용하는 것을 생각해볼 수 있다. 하지만 본 연구에서는 공간계량 방법론을 응용하여 지리적인 상관성보다는 계통연계 상관성을 반영하여 분석하고자 한다. 이는 전력수출입에 있어서 지리적인 근접성과 같은 요인보다는 직접적으로 특정 국가와 계통이 연계되어 있는지 여부가 더욱 핵심적이기 때문이다. 이를 통해 계통이 연결된 국가들이 자국의 전력교역에 미치는 영향을 모형에 반영할 수 있다는 점과 더불어 직접적으로 연결되어 있지 않은 국가들과의 관계를 파악할 수 있다는 점에서 의의가 있다고 할 수 있다. 결과적으로 계통연계 상관성을 반영한다면 전력수출입 결정요인을 더욱 명확히 추정할 수 있을 것으로 기대된다. 부가적으로 본 연구에서 공간계량 방법론을 활용하기 위하여 구성된 공간가중치행렬의 경우 통상적인 방식이 아닌 계통연계 및 전력교역량을 기준으로 하는 새로운 방식을 제시하였다는 점에서 기존의 공간계량 방법론을 활용한 연구들과 차별점이 존재하며, 추후에 다른 연구들에서 공간계량 방법론이 응용될 수 있는 여지를 제공한다는 점에서 기여점이 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 유럽 전력교역과 관련된 기존의 연구들을 광범위하게 검토하고, 선행연구들이 갖는 문제점들을 살펴본다. 3장에서는 유럽전력 시장 구조를 정리하고 전력 교역에 대한 가설을 수립한다. 4장에서는 본 연구에서 활용하는 공간계량 방법론에 대하여 개괄적으로 살펴보고, 전력교역 결정요인을 분석하기 위한 최적의 모형을 설정한다. 또한 분석에 사용될 패널 자료를 제시하고, 필요한 각종 검정을 실시한다. 5장에서는 4장에서 설정한 모형과 자료를 바탕으로 전력교역 결정요인에 대한 실증 분석 결과를 제시하고, 6장에서는 분석 결과를 바탕으로 결론 및 경제적 함의를 제시한다.

II. 선행연구

전력교역과 관련된 기존의 연구들은 주로 국가 간 전력망 연계를 통한 전력시장 통합 혹은 전력교역이 갖는 경제적 후생효과 및 편익을 분석하는 데 초점을 맞추고 있다. 국가 간의 전력계통망 연계가 효율적으로 각국의 에너지원을 활용하는 것에 있어서 도움이 될 수 있다고 주장한 Fuller(1971) 이후로 여러 지역을 대상으로 이 주제에 관한 다양한 실증분석이 진행되었다(Rogers and Rowse, 1989; Bowen et al., 1999; Yu, 2003; Pineau et al., 2004; Gnansounou et al., 2007; 이현주, 2013; Ochoa and van Ackere, 2015; Zakeri et al., 2018; Pariso and Pelagatti, 2019).

Schaber et al.(2012), Heide(2010), Aboumahboub et al.(2010), Child et al.(2019), Greenpeace and 3E(2008), Fichaux et al.(2009), Newbery et al.(2014, 2018) 등은 전력계통망 연계에 따른 전력교역이 간헐성과 변동성을 지닌 신재생에너지의 발전량 증가에 따른 전력수급 불균형의 위험을 감소시켜 전력계통의 안정성을 확보할 수 있으며, 전력교역국들 간의 비용감소 및 사회·경제적 편익을 증진시킬 수 있다는 점을 밝히고 있다. Greenpeace and 3E(2008), Fichaux(2009), Aboumahboub et al.(2010)는 국가 간 전력망 연계가 태양광과 풍력 같은 재생에너지의 발전량 증가에 따른 전력계통 운영의 안정성을 위하여 요구되는 대용량의 백업 전력을 감소시키는 효과가 있다고 주장하였으며, Heide(2010)는 전력교역국 간의 계절 최적화 믹스 전략을 통해 사회·경제적 편익 증진과 더불어 유럽 전체의 재생에너지 비중을 극대화시킬 수 있다고 주장하였다. 또한 Child et al.(2019)은 국가 간 전력교역이 재생에너지의 전력생산과 에너지 저장에 있어서 비용최소화를 가능하게 하여 전력생산 비용의 절감을 유도하고 재생에너지의 보급도 증진시킬 수 있다는 점을 제시하였으며, Newbery et al.(2014, 2018)은 유럽 전력시장 통합에 따른 경제적 편익을 수급불균형의 관점에서 정량적으로 평가하였다.

이들 연구 외에도 전력교역 활성화에 따른 교역국들 간의 경제와 정치 분야에서의 상호의존성 심화(Dassisti et al., 2012), 전력산업의 민영화에 따른 전력교역의 활성화 및 경제적 편익(Jacopo, 2014), 동북아 슈퍼그리드에 따른 국내 정산금 감소 및 투자 비용절감(김태현 외, 2015), 영국이 EU에서 탈퇴할 경우를 가정한 영국과 프랑스 및 네덜란드와의 전력 가격 차이 및 비용 추정(Montoya et al., 2020; Geske et al., 2020) 등 전력교역

과 관련한 다채로운 주제들이 존재한다. 하지만 앞서 언급한 연구들은 주로 전력계통 연계에 따른 전력교역이 갖는 편익 및 효과 혹은 전력교역 활성화 방안에만 집중하고 있으며, 국내외적으로 전력교역 결정요인을 직접적으로 규명하고 있는 연구로는 윤경수 외(2019), 윤경수(2021)를 제외하고는 찾기 어려운 상황이다.

윤경수 외(2019)와 윤경수(2021)는 EU 소속 국가들을 대상으로 하는 패널 GLS 모형을 활용하여 발전원별 비중, 발전원 집중도 등의 독립변수를 고려하여 전력 순수출 및 탄소배출량 대비 전력수입 결정요인을 분석하였으며, EU-ETS가 시행된 2005년을 전후로 유럽 전력교역에 있어서의 구조적인 변화를 식별하였다. 하지만 서론에서 언급하였듯 전력교역 결정요인을 분석하는 과정에서 계통연계를 바탕으로 하는 공간적 상관성이 핵심적인 요인이라고 판단되지만, 이들 연구에서는 이 요소를 모형에 제대로 반영하지 못하였으며, 이에 따라 추정에 있어서 편향이 발생했을 가능성이 존재한다. 다시 말해서, 윤경수 외(2019), 윤경수(2021)는 계통연계국에서의 전력생산량 대비 전력소비를 독립변수로 사용함으로써 계통연계국과의 관계를 일부 고려하고 있지만 직접적으로 계통이 연계된 국가 간의 상관성만을 반영함으로써 전력교역에 있어 유럽 전역에서의 직간접적인 영향력을 고려하고 있지 못하고 있다는 점은 한계로 남는다. Anselin(1988)에 따르면, 지역 간에 강한 공간적 상관관계(spatial correlation)가 존재하는 경우, 기존의 계량 분석 방법론을 적용하게 되면 추정의 편익(bias)과 불일치(inconsistent)가 발생한다. 이러한 사실을 고려할 때 전력교역에 있어서 계통연계를 활용한 공간적인 상관성을 모형에 반영하는 것은 반드시 필요한 작업이라고 판단된다. 부가적으로 이들 연구에서는 전력순수출 및 탄소배출량 대비 전력수입 결정요인을 분석함으로써 전력수출과 전력수입 각각이 갖는 근본적인 특성의 차이를 포착하지 못했다는 점 또한 한계로 남는다. 또한 이들의 연구에서는 북유럽 국가와 크로아티아, 오스트리아, 라트비아, 룩셈부르크 등의 국가에서 높은 비중을 차지하고 있는 수력발전을 고려하고 있지 않다는 문제점 역시 존재한다.

본 연구는 윤경수 외(2019), 윤경수(2021)의 연구를 확장시켜 계통연계를 고려한 공간계량모형을 활용하여 유럽 국가들에서의 전력수출입 결정요인을 분석하고자 한다. 특히 국가 간의 간접적인 연계까지도 모형에 고려함으로써 전력교역과 관련하여 유럽 국가 간의 간접적인 상호작용과 영향력을 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 사료된

다. 또한 전력수출과 전력수입 결정요인을 분할하여 모형화함으로써 수출과 수입의 근본적인 특성 차이를 포착한다는 점에서도 의의가 있을 것으로 기대되며, 기존 연구에서는 다루지 않았지만 유럽의 여러 국가들에서 높은 비중을 차지하고 있어 전력수출입에 큰 영향을 미칠 가능성이 있는 수력발전을 독립변수로 고려했다는 점 역시 기여가 있을 것으로 판단된다.

III. 유럽 전력 시장 구조 및 연구 가설

전력을 생산할 때 사용되는 에너지원으로는 여러 가지가 있으며, 주로 석탄, 천연가스, 원자력, 수력, 신재생에너지(풍력, 태양광 등)가 대표적인 에너지원으로 알려져 있다. 각각의 에너지원은 각기 다른 경제적, 기술적 특성을 가지기 때문에 한 국가의 전력 생산 능력과 전력 수급 불균형에 대처하는 능력은 에너지믹스를 어떻게 구성하는지에 따라 크게 달라질 수 있다. 서론에서도 언급하였듯 전력 수급 불균형이 발생했을 때, 이에 즉각적으로 대응하지 못한다면 대규모 정전이 발생하여 심각한 경제적 손실이 초래될 수 있다. 따라서 전력이 초과수요되는 상황이라면 예비력을 가동해 국내에서 자체적으로 생산하거나 국외에서 수입할 필요가 있다. 반대로 초과공급되는 상황에서는 전력 생산을 줄이거나 그러지 못할 경우 국외로 전력을 수출해야 할 것이다. 따라서 각 국가의 전원 구성은 전력 수출입과 밀접한 연관이 있다고 할 수 있다.

앞서 언급한 경제적 특성은 전력을 생산할 때 소요되는 비용(건설비, 연료비, 운영유지비 등)을 의미하며, 기술적 특성은 유연성(발전소를 가동시키고자 할 때 얼마나 빨리 가동시킬 수 있는가)과 제어 가능성(발전량을 자유롭게 제어할 수 있는가) 등을 의미한다.

연료비의 측면에서 봤을 때 수력발전과 풍력 및 태양광발전은 비용이 없다고 봐도 무방하다. 전통적인 전원 중 가장 저렴한 발전원은 원자력발전이다. 원자력발전의 연료로 쓰이는 우라늄은 그 자체로도 저렴하지만, 매우 적은 양으로도 큰 에너지를 발생시킬 수 있기 때문에 경제적인 발전원으로 널리 알려져 있다. IEA(2016)에 따르면 원자력발전의 발전량당 연료비는 약 5.26유로/MWh이다. 다음으로는 석탄, 천연가스 순인데 2015년 유럽 기준 석탄발전의 연료비는 약 5.63유로/MWh, 천연가스는 17.96유로/MWh이다(Ram et al., 2018). 하지만 2005년 EU-ETS 시행 이후, 탄소비용이 부과됨에 따라 이

산화탄소를 배출하는 석탄발전과 천연가스 발전의 실질적인 연료비용이 증가했다고 할 수 있다. Ram et al.(2018)에서는 2015년 유럽의 이산화탄소 비용을 7유로/ton of CO_{2eq}로 설정하였는데, 여기에 각 발전소의 이산화탄소 배출계수를 곱해주어 발전량당 탄소 비용을 계산할 수 있다. 석탄발전의 이산화탄소배출계수는 약 0.7498 ton of CO_{2eq}/MWh, 천연가스 발전은 약 0.3275 ton of CO_{2eq}/MWh이다(한국전력공사, 2018). 따라서 석탄발전의 실질적 연료비용은 약 $5.63 + 5.24 = 10.87$ 유로/MWh, 천연가스 발전의 실질적 연료비용은 약 $17.96 + 2.29 = 20.25$ 유로/MWh 정도로 가늠해볼 수 있다. 사실 연료비용과 탄소비용은 각 국가마다 그리고 시기마다 상이할 수 있지만 해당 장에서 이를 대략적인 수치로 소개하는 이유는 가설수립을 위한 각 발전원의 평균적인 연료비용을 비교하기 위해서이다. 최근 들어 이산화탄소 비용이 증가하여 7유로/ton of CO_{2eq}보다는 높아져 석탄발전소의 실질적인 연료비가 천연가스보다 증가했을 가능성이 있지만, 해당 연구의 범위인 2005년부터 2018년까지는 석탄발전의 실질적 연료비가 천연가스보다 저렴한 것으로 가정하는 것이 합당해보인다.

한편, 전력을 교역함에 있어서 고려되는 비용은 연료비뿐만은 아니다. 연료비가 전력을 한 단위 더 생산해내기 위해 발생하는 ‘한계비용’에 가깝다면, 이 외의 ‘고정비용’ 역시 고려할 필요가 있다. 건설비에는 보통 건설기간에 의해 발생하는 이자비용을 고려하지 않은 ‘Overnight Cost’ 개념이 사용된다. UNSPECIFIED(2008)의 보고서에 따르면 2007년 기준 앞서 언급한 발전소들 중에서 천연가스 발전소의 kW당 Overnight Cost가 635유로/kW로 가장 저렴하다. 다음으로는 육상풍력 1,140유로/kW, 석탄화력 1,265유로/kW, 해상풍력 2,000유로/kW, 대규모 수력 2,510유로/kW, 원자력 2,680유로/kW, 태양광 4,700유로/kW 순이다. 이 역시 국가별로, 시기별로 상이할 것이며 태양광발전의 건설비는 최근 들어 감소하였지만 그럼에도 불구하고 2005년부터 2018년까지 대체로 이와 같은 건설비를 가졌을 것이라고 가정한다. 앞서 소개한 건설비는 설비용량당 평균 비용을 나타낸 것이고, 발전량당 평균비용은 발전량이 많아질수록 낮아지게 된다. 따라서 연료비용이 낮다면, 발전량을 늘려 평균 고정비용을 낮출 수 있기 때문에 연료비가 낮고 건설비가 높은 것이 그 반대인 경우보다 전력교역에 있어 유리하다고 할 수 있을 것이다.

기술적 특성은 크게 유연성과 제어 가능성으로 나눌 수 있다. 유연성은 얼마나 빨리 발

전기를 가동할 수 있는지 정도로 이해할 수 있으며, 제어 가능성은 발전기를 수요에 맞게 임의로 켜거나 끌 수 있는지 여부를 의미한다. 5가지 발전원 중에서 가장 유연한 전원은 수력발전이며, 그 다음으로는 석탄, 천연가스, 원자력, 재생에너지 순이다. 재생에너지가 유연하지 못한 것은 제어 가능성과도 관련이 깊는데, 일조량이나 풍량 등의 기후조건을 인위적으로 조절할 수 없기 때문이다. 즉, 풍력 및 태양광발전은 원하는 시기에 원하는 만큼 전력을 생산하는 것이 불가능하다. 따라서 유연하지도 못하며, 제어 가능성 역시 떨어진다. 이는 재생에너지가 원자력과 같이 낮은 연료비와 높은 건설비를 가짐에도 불구하고, 임의적으로 발전량을 증가시키므로써 발전단가를 낮추는 비용우위를 가지지 못하게 하는 치명적인 단점이 된다. 재생에너지로 분류되는 수력과 풍력 및 태양광을 본 연구에서 다른 범주로 구분한 이유가 바로 이와 같은 기술적 특성의 차이 때문이다. 수력 발전은 스위치를 켜기만 하면 단 몇 분 이내에 전력을 생산할 수 있는 유연성을 지녔지만, 동시에 강수량의 영향을 많이 받기 때문에 강수량이 많은 계절과 그렇지 않은 계절의 생산성 차이가 존재한다. Bäckman(2011)에 의하면 덴마크의 화력 발전사와 스웨덴의 수력 발전사의 협력이 이루어진 가장 큰 이유가 바로 스웨덴의 수력발전이 갖는 계절성을 덴마크의 화력발전을 통해 보완하고자 한 것이라고 밝히고 있다.

그 밖에도 유럽의 전력교역을 분석하는 데 있어 시장의 형태에 대한 구분도 중요하다. 유럽에서 전력수출입은 연, 월 단위의 선물(Forward Contract)계약이 주를 이루고 있으며, 하루 전 시장(Day ahead Market)과 실시간 시장(Balancing Market)의 형태의 거래도 존재한다(노유립, 2017). 선물계약과 현물계약을 결정하는 요소는 각기 다를 것으로 생각되는데, 연 혹은 월 단위의 선물계약 체결에 있어 중요한 영향을 미치는 것은 기술적 특성보다는 비용적 특성일 가능성이 높다. 전력 생산 단가가 저렴할수록 수출 경쟁력이 생기고, 전력을 수입할 유인이 줄어들기 때문이다. 그런데 앞서 언급했듯, 고정비용이 높고 연료비용이 낮은 경우 발전량을 늘려 발전단가를 낮출 수 있으므로 높은 고정비는 수출을 증가시키고 수입은 감소시킬 가능성이 있음을 함께 고려해야 할 것이다. 비용적 측면보다는 그 중요성이 떨어질 수 있지만, 유연성 및 제어 가능성 역시 선물 시장의 전력 교역에 영향을 미칠 수 있다. 유연성이 떨어질 경우 무리하게 수출 선물 계약을 맺으면 계약일에 수요예측이 어긋났을 때 대응이 어려워지고 거래가 성사되지 않을 가능성이 크므로 수출 계약을 줄이고, 수입 선물 계약을 늘릴 가능성이 존재한다.

반면, 실시간으로 이루어지는 전력 수출입에 대해서는 유연성과 제어 가능성이 비용보다 중요한 요인이 될 것이다. 전력수급 불균형이 발생할 경우 대규모 정전이 발생하기 때문에 실시간 시장에서 전력수요자는 가격에 대해 비탄력적일 가능성이 높으며, 자국 혹은 외국에서 얼마나 즉각적으로 반응하여 전력을 생산해낼 수 있는지가 전력교역에 있어 중요할 것으로 생각된다. 따라서 전력 생산의 유연성이 높을수록 수출은 증가하고 수입은 감소할 것으로 예상된다. 또한 유연성 및 제어 가능성만큼은 아니지만 실시간 시장에서 연료비도 일정 부분 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 예상된다. 연료비용은 한계비용이라고 할 수 있으며, 실시간 시장에서의 낮은 한계비용은 또 다른 의미에서의 유연성을 제공할 수 있기 때문이다. 즉, 실시간 시장에서 연료비용이 낮으면 수출은 증가하고 수입은 감소할 것이다.

정리하자면 시장의 형태와 상관없이 비용우위가 있을수록 수출에는 양(+), 수입에는 음(-)의 영향을 미치고, 유연성 및 제어 가능성이 높을수록 수출에는 양(+), 수입에는 음(-)의 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이때 유럽 전역 교역에 있어 선물 시장의 비중이 더욱 높기 때문에 비용적인 요소가 더욱 중요하게 고려되어야 할 것이다.

한편, 제어 가능성이 떨어질 경우 수출에 양(+), 수입에 음(-)의 효과를 미칠 가능성이 존재한다. 예컨대 바람이 갑자기 많이 불어 풍력 발전량이 급증하게 되면, 계통 안정성을 위해 과잉 생산된 전기를 사용하거나 국외로 수출해야 할 것이다. 재생에너지 발전의 경우 보조금이 지급되는 경우가 많으며, 이에 따라 음의 가격(negative price)일지라도 이익을 실현할 수 있기 때문에 수출을 증가시킬 수 있다. 하지만 음의 가격(negative price)의 크기가 보조금보다 커질 경우에는 출력제한(curtailment)을 실시할 수 있다. 이 경우 전력 수입은 상대적으로 감소하게 될 것이다.

모든 에너지원은 수출과 수입에 양(+), 음(-)의 효과를 모두 가질 수 있다. 비용과 유연성, 간헐성의 측면 중 어떤 것의 효과가 더 큰지에 따라 수출과 수입에 대한 부호가 결정될 것이다. 석탄과 천연가스의 경우 어떤 효과가 더욱 큰지 명확하지 않기 때문에, 분석을 통해 이를 판별하는 데 중점을 두도록 한다. 한편 원자력발전의 경우 기저발전으로 사용됨으로써 유연성이 크게 문제가 되지 않을 수 있다. 따라서 저렴한 연료비와 높은 건설비가 수출에 양(+), 수입에 음(-)의 영향을 미칠 것으로 예상된다. 풍력 및 태양광발전의 경우 수출에 음(-), 수입에 양(+), 음(-)의 영향을 미칠 것으로 판단하는 것이 일반적

〈표 1〉 발전원별 특성에 따른 전원별 전력 수출입 영향 가설 정리

항목 \ 발전원	석탄	천연가스	원자력	풍력 및 태양광	수력
생산량당 연료비용(A)	중	상	하	최하	최하
용량당 건설비용(B)	중	하	상	상	상
비용 우위(A+B=C)	중	하	상	하	상
유연성/제어 가능성 ³⁾	중/O	상/O	하/O	최하/X	최상/O
수출(예상 부호)	(+) or (-)	(+) or (-)	(+)	(+) or (-)	(+)
수입(예상 부호)	(+) or (-)	(+) or (-)	(-)	(+) or (-)	(+)

이지만, 제어 불가능성으로부터 발생하는 양(+)³⁾의 수출효과가 크게 작용할 것으로 예상된다. 따라서 풍력 및 태양광발전 역시 분석을 통해 어떤 효과가 더욱 클 것인지 판별해 보고자 한다. 마지막으로 수력의 경우에는 연간 수출량과 수입량에 모두 양(+)³⁾의 효과를 미칠 것으로 예상되는데, 이는 앞서 언급한 계절성으로 인해 강수량이 많은 여름에는 높은 비용우위와 유연성을 바탕으로 수출을 증가시키지만 강수량이 부족한 겨울에는 수입이 증가하는 효과를 가지기 때문이다.

IV. 모형설정 및 자료소개

4장에서는 3가지 대표적인 공간계량모형(SAR, SEM, SDM)을 각 모형이 갖는 특징과 모형 간의 차이점을 중심으로 개괄적으로 살펴보고, 본 연구에서 활용하는 모형인 SDM 모형을 소개하고자 한다.

1. 주요 패널 공간계량경제모형의 종류

패널 공간계량모형에서 첫 번째로 생각할 수 있는 모형으로는 패널 공간시차모형(Spatial Lag Model, SLM 혹은 Spatial Autoregressive, SAR)이 있다. 이 모형은 종속변수가 공간적으로 연관된 다른 개체의 종속변수로부터 영향을 받는다고 가정하는 모형이다. 식 (1)은 패널 공간시차모형의 일반화 형태이다.

3) 출처: European Parliament(2016)

$$Y_t = \rho WY_t + \beta X_t + \mu + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N[0, \sigma_\varepsilon^2 I_n] \quad (1)$$

식 (1)에서 X 는 모형에서 고려하는 독립변수이며, β 는 그 계수 값이다. ρWY_t 는 다른 개체들의 종속변수가 공간가중치행렬(W)을 통해 가중치를 갖고 Y_t 에 미치는 효과를 반영하며, ρ 는 공간자기회귀계수(Spatial autoregressive coefficient)이다. 이 모형에서는 결국 종속변수가 내생적으로 공간적인 상관성이 존재한다고 가정한다. 마지막으로 μ 는 각 개체들이 갖는 고유한 특성을 반영한다.

두 번째로 고려할 수 있는 모형은 패널 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM)이 있다. 식 (2)는 SEM 모형의 일반화 형태이다.

$$Y_t = \beta X_t + \mu + \varepsilon_t, \varepsilon_t = \rho W\varepsilon_t + \eta_t, \eta_t \sim N[0, \sigma_\varepsilon^2 I_n] \quad (2)$$

식 (2)를 살펴보면, SEM 모형은 관측되지 않는 요소인 오차항(ε_t)이 iid(independent identically distributed)가 아닌, 다른 지역의 오차항과 공간적인 상관성이 있다는 점을 모형에 반영한다. 이에 따라, 종속변수의 결정요인 중에서 모형에서 누락된 부분이 공간적으로 자기상관 되어 있는 경우 SEM 모형을 활용할 수 있다.

세 번째 주요 공간계량모형으로는 종속변수가 공간적 자기상관이 존재하면서 동시에 인접 지역의 독립변수들에도 영향을 받는다고 가정하는 패널 공간터빈모형(Spatial Durbin Model, SDM)이 있다.

$$Y_t = \rho WY_t + \beta X_t + \theta WX_t + \mu + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N[0, \sigma_\varepsilon^2 I_n] \quad (3)$$

SDM 은 SAR과 SEM의 확장된 형태로, 종속변수가 다른 지역의 종속변수뿐만 아니라 기타 독립변수들에도 영향을 받을 수 있다는 가정 하에 독립변수들에도 공간가중치행렬을 부여한다. 여기서 θ 는 다른 개체들의 독립변수로부터 영향을 받는 정도를 나타내는 파라미터를 의미한다.

이때 공간계량방법론을 통해 추정된 각 계수의 값은 설명변수의 한계효과를 의미하지 않는다(LeSage and Pace, 2009). 이 계수값들은 공간적 자기상관계수(ρ)에 의해 발생

하는 피드백 효과가 혼재되어 있기 때문에 독립변수의 한계효과만을 의미하지 않는다. 즉, 특정 개체가 다른 개체에 미친 영향이 다시 자신에게 되돌아오는 피드백 효과(feedback effects)가 통제되어 있지 않다는 것이다. 따라서 다음의 방식을 통해 직접효과(direct effect)와 간접효과(indirect effect)를 분해할 수 있고, 이것이 올바르게 통제된 한계효과라고 할 수 있다. SDM을 기준으로 살펴보면 식 (3)은 다음과 같이 행렬식으로 다시 표현할 수 있다.

$$Y_t = (1 - \rho W)^{-1}(\beta X_t + \theta WX_t) + R_t \quad (4)$$

여기서 R_t 는 절편과 오차항을 의미한다. 다음으로 식 (4)에 기댓값을 취한 후, Y_t 의 기댓값을 k 번째 설명변수에 대해 편미분하면 다음과 같이 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial E(Y_t)}{\partial x_{1k}} \quad \dots \quad \frac{\partial E(Y_t)}{\partial x_{Nk}} \right] &= \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial E(Y_{t1})}{\partial x_{1k}} & \dots & \frac{\partial E(Y_{t1})}{\partial x_{Nk}} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial E(Y_{tN})}{\partial x_{1k}} & \dots & \frac{\partial E(Y_{tN})}{\partial x_{Nk}} \end{array} \right] \quad (5) \\ &= (I - \rho W)^{-1} \begin{bmatrix} \beta_k & \dots & w_{1N}\theta_k \\ \vdots & \dots & \vdots \\ w_{N\theta_k} & \dots & \beta_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (5)의 편미분 행렬식의 의미는 만약 한 지역 i 의 설명변수가 변하면, 그 지역의 종속 변수뿐만 아니라(직접효과), 인접 국가의 종속변수에도 영향을 미친다는 것이다(간접효과). 여기서 대각행렬의 값들은 직접효과를 나타내며, 대각행렬을 제외한 비대각행렬의 값들은 간접효과를 나타낸다. 직접효과는 어느 한 지역의 종속변수에 대한 독립변수의 변화 충격을 측정하며, 인접 지역을 거쳐 원래 충격이 발생했던 지역으로 돌아오는 피드백 효과까지 포함한다.

앞서 소개한 3가지 공간계량 방법론 이외에도 종속변수와 오차항 모두에 내생적인 공간적 상관성이 존재한다고 가정하는 SAC(Spatial Autoregressive Combined) 모형, 오차항의 자기상관 및 인접 지역의 독립변수에 영향을 받는 것을 가정하는 SDEM(Spatial

Durbin Error Model) 모형 등이 존재한다. 이와 같은 다양한 패널 공간계량모형을 연구의 목적 및 데이터의 특성에 맞게 설정한 후에는 도구변수법, 우도함수법(Maximum likelihood), GMM법(Generalized Method of Moments), Bayesian법 등을 활용하여 추정할 수 있다.

2. 공간가중치행렬

공간계량모형에서 가장 핵심이 되는 것은 공간가중치행렬을 구성하는 것이다. 공간가중치행렬은 공간적으로 더 가까운 지역 혹은 더 밀접한 연관성이 있는 지역에 높은 가중치를 부여하는 행렬을 일컫는 것으로서, 이를 활용하여 공간적인 상호연관성을 검증하거나 추정할 수 있다. 공간가중치행렬을 구성하는 방법은 다양하지만, 일반적으로 인접한 지역에 가중치를 부여하는 방법과 공간좌표를 이용하는 방법이 있다. 공간가중치행렬은 $N \times N$ 정방행렬이며, 대각행렬의 모든 원소는 모두 0으로 나타난다. 일반적으로 가중치는 행(row)을 기준으로 합이 1이 되도록 다시 정규화한다.

본 연구에서는 통상적으로 활용하는 공간가중치행렬을 구성하는 방식이 아닌 전력계통과 전력교역량을 기준으로 공간가중치행렬을 구성한다. 통상적인 공간가중치행렬의 문제점은 공간좌표를 기준으로 거리에 따라 연구자가 자의적 혹은 인위적으로 가중치 값을 결정하는 데 있다. 예를 들어, 인접한 지역에는 1의 가중치를 부여하고, 그렇지 않은 지역에는 0을 부여하는 방식이 대표적이라 할 수 있다. 또한 통상적인 공간가중치행렬 구성 방법을 활용하여 전력교역을 분석할 경우 국가 간 전력교역의 직간접적인 비중 차이를 반영할 수 없다는 문제점이 존재한다. 하지만 본 연구에서는 전력 계통 연계를 기준으로 국가 간 전력교역량 자료를 활용하여 공간가중치행렬을 구성하였기 때문에 객관성을 일정 부분 담보할 수 있으며, 현실에서 전력교역국 간의 관계 정도 차이를 모형에 반영할 수 있다는 장점이 있다. 또한 본 연구에서는 공간가중치행렬에 전력교역을 기준으로 가중치를 부여함으로써 계통이 연계되어 있지 않은 국가들과의 간접적인 연관성을 고려한다.

본 연구에서 활용하는 공간가중치행렬은 다음과 같은 과정을 통해서 얻어진다. 가령, a 국가의 전력 교역이 b 국가와 c 국가와 이루어진다고 하자. a 국가의 각 국가에 대한 전력교역 비중⁴⁾은 다음과 같이 얻을 수 있다. 즉, 행렬 A 의 (a, b) 성분을 다음과 같이 정의

할 수 있다.

$$A_{(a,b)} = \frac{(b \text{ 국가와의 전력교역량})}{(b \text{ 국가와의 전력교역량} + c \text{ 국가와의 전력교역량})}$$

$$A_{(a,c)} = \frac{(c \text{ 국가와의 전력교역량})}{(b \text{ 국가와의 전력교역량} + c \text{ 국가와의 전력교역량})}$$

a 국가의 전력교역 비중은 위와 같이 계산되며, 전력교역을 하지 않는 나머지 국가들에 대해서는 모두 0의 비중을 가지게 된다. 모든 국가에 대해 위와 같은 방식으로 비중을 계산하여 얻어진 행렬 A 는 “직접연계 가중치행렬”이 된다. 이 “직접연계 가중치행렬”을 기반으로 “간접연계 가중치행렬”을 도출하는 것이 다음 단계이다. 간접적인 영향까지 고려하는 이유는 직접적으로 연계되어 있지 않은 국가들 간에도 영향력이 존재할 수 있기 때문이다. a 국가와 d 국가는 직접적으로 교역하지 않지만, a 국가와 교역하면서 동시에 d 국가와도 교역하는 c 국가를 통해 두 국가는 간접적으로 영향을 주고받을 수 있다. a 국가의 d 국가 전력교역 비중은 다음과 같이 계산된다.

$$A_{(a,d)}^* = A_{(a,c)} \times A_{(c,d)}$$

만일 b 국가 역시 d 국가와 직접 연결되어 있다면 a 국가와 d 국가가 영향을 주고받을 수 있는 경로가 2가지가 되는 것이므로 각각의 비중을 더하여 계산한다.

$$A_{(a,d)}^* = (A_{(a,c)} \times A_{(c,d)}) + (A_{(a,b)} \times A_{(b,d)})$$

위와 같은 방법을 반복적으로 시행하여 대각성분을 제외하고, 0인 성분이 없어지게끔 한다. 즉, 유럽의 모든 국가들이 모두 영향을 주고받을 수 있음을 가정하는 것이다. <그림 1>에서 추측할 수 있듯이, 직접적으로 전력 계통이 연결되어 있지 않더라도 서로 영향을 끼칠 가능성이 있다. 이러한 과정을 통해 완성된 행렬을 W 라고 한다면, 행렬 W 의 원소 $W_{(i,j)}$ 가 얻어지기까지 많은 국가를 거칠수록 그 값은 작아질 것이다. 즉, 물리적인

4) 해당 전력 교역 비중은 전체 연구 기간에 대해 가중평균한 값이다.

〈그림 1〉 유럽지역 전력계통연계



출처: Zappa et al.(2019)

관점과 전력교역의 관점에서 거리가 멀수록 낮은 가중치를 부여받게 되는 것이다. 이로써 현실 국가들 사이의 관계를 반영함과 동시에 직접 교역하지 않는 국가들 사이의 간접적인 영향까지 고려할 수 있게 된다.

3. 모형설정

본 연구에서는 여러 가지 패널 공간계량 방법론 중에서 패널 공간더빈모형(SDM)을 활용하여 추정하고자한다. 앞서 언급하였듯 패널 공간더빈모형은 종속변수가 공간적 자기상관이 존재하면서 동시에 인접지역의 독립변수들에게도 영향을 받는다고 가정한다. 전력교역의 경우 공간적 자기상관이 존재할 뿐만 아니라 인접한 국가들의 독립변수에도 직간접적으로 영향을 받을 수 있다는 판단하에 SDM을 활용한다. 본 연구에서 설정한 전력교역 결정요인 SDM은 식 (6), (7)과 같다.

$$\text{전력수출: } \ln EX_t = \rho W \ln EX_t + \beta \ln X_t + \theta W \ln X_t + \mu + \epsilon_t, \epsilon_t \sim N[0, \sigma_\epsilon^2 I_n] \quad (6)$$

$$\text{전력수입: } \ln IM_t = \rho W \ln IM_t + \beta \ln X_t + \theta W \ln X_t + \mu + \epsilon_t, \epsilon_t \sim N[0, \sigma_\epsilon^2 I_n] \quad (7)$$

〈표 2〉 변수 설명 요약

변수명	변수 설명
$\ln EX_t$	로그 전력수출량
$\ln IM_t$	로그 전력수입량
$\ln Coal$	로그 석탄 발전량
$\ln Gas$	로그 천연가스 발전량
$\ln Nuclear$	로그 원자력 발전량
$\ln WindSolar$	로그 풍력·태양광 발전량
$\ln HY$	로그 수력 발전량
$\ln Indpop$	로그 1인당 산업용 총에너지 소비량
$\ln Exprice$	로그 실질 세전 전기 요금(용도 평균)

식 (6)과 (7)에서 좌변의 $\ln EX_t$ 와 $\ln IM_t$ 은 각각 유럽 국가들의 전력수출과 전력수입에 자연로그를 취한 것을 의미한다. 우변의 X_t 는 본 연구에서 고려하는 독립변수 벡터로서 5가지 에너지원의 발전량($\ln Coal$, $\ln Gas$, $\ln Nuclear$, $\ln WindSolar$, $\ln HY$)과 2가지 경제변수($\ln Indpop$, $\ln Exprice$)가 사용된다. $\ln Coal$, $\ln Gas$, $\ln Nuclear$, $\ln WindSolar$, $\ln HY$ 은 각각 각국의 석탄 발전량, 가스 발전량, 원자력 발전량, 태양광 및 풍력 발전량, 수력 발전량을 의미한다. 전력수출입에 있어서 각국의 에너지원별 발전량과 구성이 가장 중요한 영향을 미칠 것으로 판단되기 때문에 이를 반드시 고려할 필요가 있다.

다음으로 통제변수로 고려하는 $\ln Indpop$ 은 인구 1인당 산업용 총에너지 소비량에 자연로그를 취한 것을 의미하며, $\ln Exprice$ 는 가정용과 산업용 평균 실질 세전 전력요금에 자연로그를 취한 것을 의미한다. 인구 1인당 산업용 총에너지 소비량이 높을수록 그 국가에서는 전력에 대한 수요가 높아 전력수입이 증가할 가능성도 존재하지만, 동시에 국가 차원에서의 경제규모가 크기 때문에 전력설비가 충분하여 전력수출이 증가할 가능성이 있다. 가정용과 산업용 평균 세전 전력요금의 경우 요금이 높을수록 소비량이 감소하고, 그에 따라 발생하게 되는 여분의 전력량은 수출을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 동시에 상대적으로 주변국가의 전력요금이 저렴해지므로 전력수입 역시 증가할 가능성이 있다. 또한 세전 전력요금은 정책적 요인이 제외된 연료비 개념과 가깝기 때

문에, 전원별 전력생산 단가의 가중평균 합을 간접적으로 반영할 수 있다. 전력교역을 분석함에 있어 국가 간 연료비 차이를 제대로 반영하기 위해서는 도매요금을 사용하는 것이 적절할 것으로 예상되지만, 데이터 수집상의 문제로 인해 해당 연구에서는 도매요금의 대리변수로서 용도별 세전 평균 전기요금을 사용하였다.

이때 국가별 난방방식에 따라 전력 수요가 달라질 수 있기 때문에 이와 관련된 변수를 모형에 반영하지 않은 이유에 대한 의문이 제기될 수 있다. 하지만 유럽의 난방방식은 2000년에 가스가 43%, 전기가 6%였으며, 2018년에 가스가 44.6%, 전기가 5.9%였다. 즉, 가스난방의 비중이 전기난방에 비해 압도적으로 높으며, 시간이 지남에 따라 큰 변화가 나타나지 않았다.⁵⁾ 따라서 국가별 난방방식 차이를 모형에 반영하는 것이 결과에 유의미한 영향을 미치지 않을 것이라고 판단하여 분석에 포함하지 않았다.

다음으로 모형에 포함된 파라미터들을 살펴보면, ρ 는 계통이 연계된 인접 국가들의 수출과 수입의 영향력을 의미하며, θ 는 계통이 연계된 인접 국가들에서의 7가지 독립변수들의 영향력을 나타낸다. 마지막으로 시간에 따른 변화를 통제하기 위하여 시간 고정 효과를 활용한다.

4. 자료

모형 설정을 바탕으로 분석에 필요한 자료들을 수집하였다. 본 연구에서는 EU-ETS 도입 이후인 2005년부터 2018년까지의 유럽연합 회원국 26개 국가⁶⁾(벨기에, 불가리아, 체코, 덴마크, 독일, 에스토니아, 아일랜드, 그리스, 스페인, 프랑스, 크로아티아, 이탈리아, 라트비아, 리투아니아, 룩셈부르크, 헝가리, 네덜란드, 오스트리아, 폴란드, 포르투갈, 루마니아, 슬로바키아, 슬로베니아, 핀란드, 스웨덴, 영국)의 연간 전력수입량, 전력수출량, 석탄 발전량, 천연가스 발전량, 원자력 발전량, 풍력·태양광 발전량, 수력 발전량, 1인당 산업용 총 에너지 소비량 그리고 실질 세전 전력가격(용도 평균)을 활용한다. 실질 세전 전력가격의 경우 2010년을 기준 연도로 하는 GDP디플레이터를 활용하여 실질가치화하였다. 여기서 수출량과 수입량은 그 국가의 전체 수출량 혹은 수입량이 아닌, 분석에 사용되는 국가를 대상으로 이루어진 수출량 혹은 수입량만을 수집하였다. 예컨

5) Odyssee-Mure 프로젝트 홈페이지 참조

6) 몰타, 키프로스(규모가 매우 작은 섬나라) 제외

대, 크로아티아는 세르비아와 전력 교역을 하지만 본 연구에서 수집된 크로아티아의 자료에는 세르비아와의 수출입은 포함되지 않는다. 해당 자료들은 모두 유럽연합통계국 (Euro Stat)에서 얻을 수 있다.

<표 3>은 수집된 자료의 기초 통계량을 나타낸다. 수출과 수입의 평균은 비슷한 값을 가지며, 수출의 최댓값은 2018년의 프랑스에서 관측되었고 수입의 최댓값은 2005년 독일에서 관측되었다. 석탄발전과 원자력발전의 최솟값이 0인 것에서 확인할 수 있듯이 두 전원을 전혀 가지지 않는 유럽 국가들이 다수 존재한다. 룩셈부르크는 관측 기간 동안 석탄 발전량이 전무하며, 라트비아와 리투아니아는 대부분의 연도에서 석탄발전을 하지 않았다. 11개 국가(덴마크, 에스토니아, 아일랜드, 그리스, 크로아티아, 이탈리아, 라트비아, 룩셈부르크, 오스트리아, 폴란드, 포르투갈)에서는 관측 기간 중 원자력 발전량이 전혀 관측되지 않았으며, 리투아니아의 경우 2010년 이후로 원자력 발전량이 관측되지 않았다. 각 전원별 평균 발전량을 살펴보면 원자력, 석탄, 천연가스, 수력, 풍력·태양광 순으로 발전량이 높은 것을 확인할 수 있다. 원전의 경우 전혀 발전을 하지 않는 국가가 많음에도 불구하고 평균값이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 원자력발전의 발전비용이 상대적으로 저렴하기 때문에 기저발전으로 사용되는 경우가 많아 나타난 결과로 해석되며 원자력 발전량의 표준오차와 최댓값이 발전원들 중 가장 큰 것을 통해서도 확인할 수 있다.

〈표 3〉 기초 통계량

VARIABLE	obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Unit
EX	364	10293.97	13737.03	1.26	68275.79	GWh
IM	364	10375.91	8670.916	74	53493	GWh
Coal	364	32211.36	57659.08	0	297105	GWh
Gas	364	26144.65	41427.29	195.27	178269	GWh
Nuclear	364	34522.97	84123.47	0	451529	GWh
WindSolar	364	10195.05	20612.22	.04	155735	GWh
Hydro	364	14203.92	19769.87	13.42	79058	GWh
Indpop	364	.6310114	.3930505	.2417077	2.312188	Mtoe/1000명
Exprice	364	.0993515	.0227847	.048425	.166825	Euro

5. 패널자료 검증

1) 이분산 검정 및 자기상관성 검증

본 논문은 패널자료를 활용하기 때문에 자료 내에 이분산과 자기상관이 존재하는지 검증할 필요가 있다. 만약 선형 패널데이터에 이분산과 자기상관이 존재하는 경우 편의가 발생할 수 있으며, 추정량의 효율성이 낮아진다. 이분산이 존재하는지 판단하기 위해 Modified Wald 검정통계량을 사용했으며, 귀무가설은 이분산이 존재하지 않는다는 것이다. 검정결과 수출모형과 수입모형 모두 귀무가설을 기각했으며, 그룹 간 이분산이 존재하는 것으로 나타났다(Modified Wald test 검정통계량 = 24417.16, 4155.79, p-value = 0.00, 0.00).

또한 개체 간 상관성이 존재하는지를 확인하기 위하여 Wooldridge F-test를 통해 자기상관성을 검정하였으며, 귀무가설은 자기상관성이 존재하지 않는다는 것이다. 검정결과 수출모형과 수입모형 모두 귀무가설을 기각했으며, 개체 간 상관성이 존재하는 것으로 나타났다(Wooldridge F-test = 13.475, 28.701, p-value = 0.00, 0.00). 결과적으로 이분산과 자기상관이 존재하기 때문에 공간상관성을 고려하지 않는 단순선형패널모형 분석을 한다면, 패널일반화최소사승법(Generalized Least Squares, GLS)을 사용하는 것이 바람직하다.

2) 공간상관성 검증

일반적으로 공간계량분석에서는 공간 간의 상관관계를 가정하고 분석하기 때문에 서로 상관성이 있는가를 확인하는 것은 중요한 문제이다. 공간적 상관성이 있는 변수가 활용될 경우, 공간계량 방법론은 일반적인 패널데이터 분석에서 누락될 수 있는 요소를 고려함으로써 보다 면밀하게 분석할 수 있다는 장점이 있다. 통상적으로 공간상관성을 검정하는 방법으로는 Moran I가 있다. 그러나 패널데이터에서 이 검증방법은 적절하지 않고, 특히 $N > T$ 일 경우 Pesaran's CD 검증을 이용한다. Pesaran's CD 검증에서의 귀무가설은 공간상호영향이 존재하지 않는 것이다.

$$Pesaran's\ CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{\rho}_{ij} \right) \quad (6)$$

검정결과 수입변수의 검정통계량 값은 11.472였으며, 수출변수의 검정통계량 값은 1.779였다. 이에 따라 귀무가설을 기각할 수 있으며, 수입과 수출 모두 공간적 자기상관이 존재한다고 할 수 있다.

3) 모형적합도 검증

마지막으로 공간계량모형 중에서 어떤 모형이 가장 적합한지 판단하기 위해 LR (Likelihood Ratio) 검정을 수행한다. LeSage and Pace(2009)는 SDM을 기본 모형으로 설정하고 LR 검정을 통해 더 단순한 모형(SAR 또는 SEM)을 사용할 필요가 있다는 점을 지적했다. 따라서 SDM을 기본모형으로 설정하고 다음과 같은 검정을 실시한다. 우선, SDM과 SAR의 경우, 귀무가설 $H_0 : \theta = 0$ 으로 설정하고, 기각할 수 없다면 더 단순한 SAR모형을 선택한다. 다음으로, SDM과 SEM의 경우 귀무가설 $H_0 : \theta + \rho\beta = 0$ 으로 설정하고, 기각할 수 없다면 더 단순한 SEM을 선택한다. 그러나 위의 귀무가설을 모두 기각할 경우 SDM의 설명력이 가장 높다고 판단한다. 첫 번째 검정에서 수출모형과 수입모형 모두 귀무가설을 기각했으며($\chi^2 = 31.32, \chi^2 = 101.53, p\text{-value} = 0.00, 0.00$), 두 번째 검정에서도 마찬가지로 두 모형 모두 귀무가설을 기각하였다($\chi^2 = 24.06, \chi^2 = 81.27, p\text{-value} = 0.00, 0.00$). 이에 따라, 본 연구에서 활용하는 SDM이 해당 자료를 분석하기에 가장 적합한 모형인 것으로 판단된다.

V. 실증분석 결과

5장에서는 앞서 설정한 모형을 바탕으로 유럽연합 26개 국가들의 전력수출입 결정요인을 분석한다. 본 연구에서 중점적으로 다루게 될 모형은 SDM(2)⁷⁾이며, 비교를 위해 GLS 모형과 단순 평균 가중치 행렬을 사용한 SDM(1)⁸⁾을 이용한 분석결과를 함께 제시

7) 3장 1절에서 소개한 방법론으로 도출한 가중치 행렬

8) 계통연계 국가는 1, 비연계 국가는 0의 가중치를 부여한 후 정규화한 행렬

한다. SDM(1)에서는 직접적으로 계통이 연계된 국가들만의 영향력을 고려한 가중치행렬을 사용하였으며, SDM(2)에서는 계통이 연계되어 있지 않더라도 유럽 전역이 간접적으로 영향을 주고받는다라는 가정하에 도출한 가중치행렬을 사용하였다. 이 두 가지 모형 간의 결과 비교를 통해 계통이 연결되어 있지 않은 국가들의 간접적인 영향력을 가능해볼 수 있다는 점에서 의의가 있을 것으로 판단된다.

앞서 언급하였듯 공간계량모형에서는 직접효과와 간접효과를 통한 해석이 중요하다. 간접효과의 계수를 해석할 때는 “자국을 제외한 공간적 상관이 있는 국가의 독립변수 합이 1% 증가할 때 종속변수가 몇 % 변화한다”와 같은 해석이 이루어질 필요가 있다. SDM(2)의 경우 유럽의 전력계통이 유럽 전역에 직간접적으로 연결되어 있다고 가정하고 가중치행렬을 구성했기 때문에 공간적 상관이 있는 국가는 모든 국가가 될 것이다.

가중치행렬의 차이에 따라 SDM(1)과 SDM(2)의 간접효과 계수의 크기 차이가 다소 존재할 것으로 예상된다. 앞서 언급하였듯 간접효과의 의미는 자국을 제외한 다른 국가의 독립변수 총합의 1%가 변화할 때 종속변수의 변화율이기 때문에 모든 국가에 가중치가 부여된 SDM(2)의 간접효과가 직접 연계된 국가에만 가중치가 부여된 SDM(1) 모형에 비해 그 크기가 대체로 클 것으로 예상된다.

<표 4>는 유럽의 26개 국가를 대상으로 2005년부터 2018년까지의 전력수출 결정요인을 분석한 결과이다.

우선 GLS 모형에서의 계수의 부호는 유의성에서는 차이가 있지만 SDM(1)과 SDM(2)의 직접효과(Direct) 계수의 부호와 동일하게 나타났다. 하지만 간접효과(Indirect) 중에서는 천연가스 발전량이나 원자력 발전량 그리고 풍력·태양광처럼 직접효과와 그 부호가 반대인 경우가 존재했으며, 이는 GLS 모형에서는 포착되지 않는 효과이다. 즉, 공간계량 모형은 전력 교역을 분석함에 있어 GLS 모형에서는 포착할 수 없는 지리적인 영향을 고려할 수 있는 장점이 있다는 점을 확인할 수 있다.

자국의 석탄 발전량($\ln\text{Coal}$)과 전력수출 간에는 양(+)¹⁾의 관계가 도출되었다. 석탄발전은 기저발전으로 사용될 경우 간헐성 없이 전력을 안정적으로 공급할 수 있고, 원자력 발전 다음으로 비용우위가 높은 전원이기 때문에 전력수출을 증가시키는 결과가 도출된 것으로 사료된다. 석탄 발전량의 간접효과의 경우 부호는 다르지만 SDM(1)과 SDM(2)에서 모두 10% 수준에서 통계적으로 유의하지 않은 결과가 도출되었는데, 이는 수출을

〈표 4〉 전력수출 결정요인 분석

VARIABLES	GLS	SDM(1)					SDM(2)				
	β	β	θ	Direct	Indirect	Total	β	θ	Direct	Indirect	Total
lnCoal 석탄발전량	0.0799*** (0.0196)	0.0596** (0.0287)	0.0608 (0.0493)	0.0565* (0.0319)	0.0345 (0.0407)	0.0911*** (0.0344)	0.0647*** (0.0210)	0.1810 (0.1231)	0.0626*** (0.0224)	0.0533 (0.0587)	0.1159** (0.0551)
lnGas 가스발전량	-0.1986*** (0.0476)	-0.2584*** (0.0852)	-0.5236*** (0.1421)	-0.2191*** (0.0830)	-0.3785*** (0.1099)	-0.5976*** (0.1395)	-0.0125 (0.0677)	2.8239*** (0.5216)	-0.0968 (0.0677)	1.5177*** (0.3073)	1.4209*** (0.3154)
lnNuclear 원자력발전량	0.1453*** (0.0189)	0.1290*** (0.0168)	0.1371*** (0.0316)	0.1214*** (0.0165)	0.0858*** (0.0257)	0.2072*** (0.0294)	0.0764*** (0.0129)	-0.3398*** (0.0807)	0.0894*** (0.0123)	-0.2191*** (0.0455)	-0.1297*** (0.0468)
lnWindSolar 풍력·태양광발전량	0.1128*** (0.0258)	0.2192*** (0.0475)	0.2234*** (0.0783)	0.2043*** (0.0466)	0.1343** (0.0648)	0.3386*** (0.0756)	0.0456 (0.0426)	-1.2065*** (0.2742)	0.0812* (0.0421)	-0.6720*** (0.1694)	-0.5907*** (0.1693)
lnHY 수력발전량	0.0691*** (0.0260)	0.0790** (0.0401)	0.1231* (0.0657)	0.0672 (0.0416)	0.0907 (0.0619)	0.1579*** (0.0497)	0.2085*** (0.0343)	0.8446*** (0.1956)	0.1905*** (0.0313)	0.3301*** (0.1094)	0.5205*** (0.1175)
lnIndpop 1인당산업용 에너지소비량	0.1206 (0.0885)	0.2600* (0.1482)	-0.3498 (0.2331)	0.3042** (0.1495)	-0.3760** (0.1882)	-0.0718 (0.2209)	0.2542* (0.1357)	-5.1930*** (1.0324)	0.4115*** (0.1275)	-2.8728*** (0.5896)	-2.4613*** (0.6395)
lnExprice 세전전력요금	-0.0816 (0.0978)	-0.2260 (0.3615)	1.4459** (0.6522)	-0.3593 (0.3892)	1.3188** (0.5553)	0.9594* (0.5554)	-1.2618*** (0.3378)	-1.7771 (2.2094)	-1.2395*** (0.3317)	-0.1758 (1.0987)	-1.4154 (1.1806)
Constant	7.7799*** (0.7197)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mean of fixed-effects				4.9408			2.7257				
rho				-0.2930*** (0.0664)			-1.0379*** (0.2292)				
sigma2_e				1.0840*** (0.0816)			0.8744*** (0.0635)				

주: *는 $p < 0.1$, **는 $p < 0.05$, ***는 $p < 0.01$ 를 나타냄.

증가시키는 효과와 감소시키는 효과가 상충하기 때문이라고 판단된다. 직접효과와 비교했을 때 비용우위가 줄어든 것으로 생각되는데, 여러 국가에서 석탄 발전량이 증가할 경우 배출권 수요가 높아져 탄소배출권 가격이 올라갈 수 있기 때문이다. 탄소배출권 가격 상승에 따른 석탄발전 제약의 심화는 석탄발전을 증가시킨 국가들에 비해 상대적으로 자국의 수출 경쟁력을 강화시킬 수 있다.

자국의 천연가스 발전량(lnGas)의 증가는 통계적 유의성에는 차이가 있지만 SDM(1)과 SDM(2)에서 모두 자국의 수출을 감소시키는 것으로 나타났다. 천연가스 발전은 비용우위가 떨어지기 때문에 전력수출의 측면에서 경쟁력이 떨어진다고 할 수 있다. 또한

전력 교역에 있어 선물 거래가 주를 이루기 때문에 천연가스 발전의 장점인 유연성이 수출에 미치는 양(+)의 효과가 더욱 작게 작용한 것으로 판단된다. 한편 SDM(1)과 SDM(2)에서 간접효과의 부호가 각각(-)와(+)로 도출되었다. 이는 두 모형에서 사용된 가중치행렬의 범위가 다르기 때문으로 판단된다. SDM(1)의 경우 직접 계통이 연계된 국가만이 가중치행렬에 포함되어있기 때문에 그 범위가 한정적이라고 할 수 있다. 즉, 국지적인 관점에서 유럽의 전력계통을 바라본 것으로 해석할 수 있다. 반면, SDM(2)의 가중치행렬은 한 국가가 다른 모든 국가와 연계될 수 있게 구성하였기 때문에 전역적인 관점에서 유럽의 전력계통을 바라본 것으로 해석할 수 있다. 천연가스 가격은 다른 에너지원에 비해 비싸고, 가격 변동에 대한 민감성이 높기 때문에 행렬의 범위가 넓어질수록 자국을 제외한 국가에서의 비용열위 효과가 가중되어 자국의 수출 경쟁력을 강화시킨 것으로 해석할 수 있다.

원자력 발전량(lnNuclear)의 경우 앞서 설정한 가설대로 낮은 연료비 단가와 높은 건설비 단가에 의해 전력 수출에 양(+)의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 또한 SDM(2)의 간접효과에서는 음(-)의 부호가 도출되었는데, 유럽 전역에서 원자력 발전량의 증가는 그 국가들의 전력 대외 의존도를 낮추기 때문에 자국의 수출이 감소하는 효과를 가지는 것으로 보인다. 정리하자면 자국의 원자력 발전량은 수출과 양(+)의 관계를, 유럽 전역의 원자력 발전량 증가는 수출과 음(-)의 관계를 나타내고 있다. 이러한 특징은 직접적으로 계통이 연계된 국가만을 가중치행렬로 고려한 SDM(1)에서는 포착되지 않았다.

자국의 풍력 및 태양광 발전량(lnWindSolar) 증가는 SDM(1)과 SDM(2)에서 모두 자국의 전력 수출을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 재생에너지가 가지는 제어 불가능성으로부터 발생하는 양(+)의 수출효과가 다른 효과에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 반면, 간접효과에서는 두 모형이 반대의 부호를 보였다. 국지적인 관점(SDM(1))에서 볼 때, 계통이 직접적으로 연결된 인접 국가에서의 풍력·태양광 발전량의 증가는 그 국가들의 계통 불안정성을 높이고 전력수입 수요를 증가시킬 것이며, 그에 따라 자국의 수출이 증가할 수 있다. 하지만 전역적인 관점(SDM(2))에서 볼 때, 유럽 전역에서의 풍력·태양광 발전량 증가는 그 국가들 사이에 상호보완적 관계를 형성시킬 가능성이 있다. 풍력·태양광발전의 간헐성이 나타나는 시점이 각 국가마다 상이하기 때문에 상호보완적인 관계가 될 수 있다. 따라서 주변국들의 전력 수입 수요가 감소하게 되고 자국의 전력수출

이 감소한 결과라고 판단된다.

수력발전($\ln HY$)은 높은 비용우위와 유연성을 바탕으로 강수량이 많은 시기에 수출을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 GLS, SDM(1), SDM(2)에서 모두 동일한 결과도 출되어 강건성이 높다고 할 수 있다. 또한 간접효과 역시 모든 모형에서 유의한 양(+)의 부호를 보이는데, 이 역시 다른 국가에서의 수력 발전량이 증가할 때의 계절성을 보완하기 위해 자국의 수출량이 증가한 효과로 해석할 수 있다.

1인당 산업용 총에너지 소비($\ln Indpop$)의 경우 SDM(1)과 SDM(2)의 직접효과가 통계적으로 유의한 양(+)의 값인 것을 확인할 수 있다. 1인당 산업용 총에너지 소비의 증가는 국내 전력소비 증대로 인하여 수출이 감소할 가능성도 있으며, 동시에 국가 경제 규모 증가로 인한 전력 설비규모의 증가로 전력수출이 증가할 가능성도 존재한다. 본 연구에서는 후자의 효과가 더 크기 때문에 전력수출이 증가하는 방향으로 나타난 것으로 판단된다. 간접효과는 SDM(1)과 SDM(2)에서 모두 통계적으로 유의한 음(-)의 값이 나타났다. 유럽 전역에서의 1인당 산업용 총에너지 소비 역시 그 국가들의 경제 규모 증가로 생각할 수 있으며, 이는 전력생산의 효율성 증가로 귀결될 수 있다. 그 결과 전력 대외 의존도가 낮아져 자국의 수출량이 감소하는 결과가 도출된 것으로 사료된다.

마지막으로 실질 세전 전력가격($\ln Exprice$)의 직접효과의 경우 SDM(1)은 10% 수준에서 통계적으로 유의하지 않았지만, SDM(2)에서는 통계적으로 유의한 음(-)의 값이 도출되었다. 이는 자국의 전력 요금의 상승으로 인해 수출 경쟁력이 악화된 결과로 해석할 수 있을 것이다. 간접효과를 살펴보면, SDM(1)에서는 통계적으로 유의한 양(+)의 값이 도출되었다. 이는 인접한 주변 국가의 전력 가격이 증가할 때, 자국의 전력 수출이 증가한다는 직관적인 해석이 가능하다. 하지만, SDM(2)에서는 부호도 음(-)일 뿐만 아니라 통계적으로도 유의하지 않은 결과가 도출되었다.

다음으로 <표 5>는 유럽의 26개 국가를 대상으로 2005년부터 2018년까지의 전력수입 결정요인을 분석한 결과이다. 전력수출에서와 동일하게 비교를 위하여 GLS와 직접계통이 연결된 국가만을 가중치행렬로 고려한 SDM(1) 결과를 함께 제시한다.

먼저 석탄 발전량($\ln Coal$)의 경우 GLS 계수와 SDM(1)의 직접효과 추정치는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났고, SDM(2)의 직접효과는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 하지만 3가지 모형 모두에서 직접효과는 양(+)의 부호를 갖는 것으로 나타났

〈표 5〉 전력수입 결정요인 분석

VARIABLES	GLS	SDM(1)					SDM(2)				
	β	β	θ	Direct	Indirect	Total	β	θ	Direct	Indirect	Total
InCoal 석탄발전량	0.0060 (0.0163)	0.0391** (0.0192)	0.1242*** (0.0323)	0.0272 (0.0212)	0.0937*** (0.0269)	0.1209*** (0.0219)	0.0368** (0.0154)	0.5661*** (0.0867)	0.0280* (0.0155)	0.3626*** (0.0874)	0.3907*** (0.0863)
InGas 가스발전량	0.1144*** (0.0401)	-0.0805 (0.0567)	-0.4720*** (0.0912)	-0.0330 (0.0551)	-0.3766*** (0.0716)	-0.4096*** (0.0896)	0.1760*** (0.0493)	0.2775 (0.3754)	0.1695*** (0.0481)	0.1453 (0.2413)	0.3148 (0.2483)
InNuclear 원자력발전량	0.0085 (0.0112)	-0.0206* (0.0112)	-0.0761*** (0.0196)	-0.0118 (0.0108)	-0.0599*** (0.0173)	-0.0716*** (0.0187)	-0.0352*** (0.0093)	-0.4994*** (0.0567)	-0.0259*** (0.0094)	-0.3222*** (0.0667)	-0.3482*** (0.0704)
InWindSolar 풍력· 태양광발전량	0.1168*** (0.0213)	0.1628*** (0.0314)	0.0662 (0.0516)	0.1623*** (0.0308)	0.0071 (0.0425)	0.1694*** (0.0483)	0.0592* (0.0307)	-0.4803** (0.1976)	0.0683** (0.0299)	-0.3598** (0.1553)	-0.2915* (0.1585)
InHY 수력발전량	-0.0114 (0.0248)	0.0296 (0.0265)	0.1508*** (0.0432)	0.0119 (0.0282)	0.1242*** (0.0408)	0.1361*** (0.0317)	0.0685*** (0.0243)	0.4166*** (0.1408)	0.0616*** (0.0225)	0.2561** (0.1125)	0.3177*** (0.1214)
InIndpop 1인당산업용 에너지소비량	0.5335*** (0.0883)	0.6617*** (0.0998)	0.8024*** (0.1572)	0.5962*** (0.0976)	0.4980*** (0.1243)	1.0942*** (0.1369)	0.6957*** (0.0982)	0.2690 (0.7648)	0.7010*** (0.0907)	-0.0965 (0.5003)	0.6045 (0.5367)
InExprice 세전전력요금	0.0274 (0.0788)	0.2046 (0.2401)	2.1483*** (0.4375)	-0.0252 (0.2613)	1.7955*** (0.3673)	1.7703*** (0.3579)	0.4258* (0.2429)	0.4150 (1.5929)	0.4313* (0.2390)	0.1971 (1.0743)	0.6285 (1.1589)
Constant	7.2094*** (0.5445)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mean of fixed-effects				3.0931			2.7257				
rho				-0.3344*** (0.0634)			-0.5566** (0.2529)				
sigma2_e				0.4735*** (0.0357)			0.4539*** (0.0338)				

주: *는 $p < 0.1$, **는 $p < 0.05$, ***는 $p < 0.01$ 를 나타냄.

다. 이는 다소 경직적인 석탄화력발전의 기술적 특성과 더불어 탄소배출권 제약이 비용우위를 약화시켜 실시간 시장에서 전력 수급 불균형에 대응하는 능력이 떨어진 것으로 판단된다. 결국 자국에서의 석탄화력발전 증가는 수출과 수입을 모두 증대시키는 것으로 나타났지만, 계수의 크기상 수출을 증대시키는 효과가 더 큰 것으로 보인다. 다음으로 간접효과를 살펴보면 SDM(1)과 SDM(2) 모두에서 주변 국가의 석탄 발전량 증가는 자국의 수입을 증가시키는 것으로 나타났다. 석탄발전의 안정적인 공급능력과 비용우위가 선물 시장에서의 자국 외의 국가들의 수출을 증가시켜 자국의 수입을 증가시킨 것으로 판단된다.

천연가스 발전량($\ln\text{Gas}$)의 경우 GLS의 계수와 SDM(2)의 직접효과는 양(+)¹의 값이 도출된 것을 확인할 수 있다. 천연가스 발전은 비용열위를 가지기 때문에 천연가스 발전량의 증가는 대체로 전력수입 증가로 이어진다. 추가로 천연가스 발전기는 보통 피크 발전기로 사용되기 때문에 천연가스 발전량이 증가한다는 것이 그 자체로 기저부하를 넘어선 것이라고 할 수 있다. 이때 석탄발전이나 원자력발전은 이미 대부분 가동되고 있을 것이며, 추가로 가동될 수 있는 발전소는 보통 상대적으로 비용이 높은 천연가스 발전소이기 때문에 이 경우에는 다른 국가로부터 전력을 수입하는 것이 오히려 유리할 수 있다. 그 밖에도 유럽 전력교역에서는 선물시장의 비중이 높기 때문에 천연가스의 유연성으로부터 나타나는 수입에 대한 음(-)의 효과의 크기가 상대적으로 작게 나타난 것으로 이해할 수 있을 것이다.

천연가스 발전의 간접효과는 SDM(1)에서는 통계적으로 유의한 음(-)의 값이, SDM(2)에서는 통계적으로 유의하지 않은 결과가 도출되었다. 국지적인 관점(SDM(1))의 경우, 인접 국가에서의 천연가스 발전량 증가는 역시 비용열위에 의한 수출 경쟁력 하락으로 인하여 자국의 수입 감소로 이어진 것으로 판단된다. 한편 유럽 전역에서 천연가스 발전량이 증가할 경우(SDM(2)), 국지적으로 증가할 때보다 유연성이 강화되는 정도의 크기가 커지기 때문에 실시간 시장에서 자국의 전력 수입처가 상대적으로 많아진다고 볼 수 있다. 하지만 그만큼 수입 단가도 증가하기 때문에 수입을 감소시키는 효과가 혼재하게 된다. 이에 따라 SDM(2)의 간접효과가 통계적으로 유의하지 않은 결과가 도출된 것으로 판단된다.

원자력 발전량($\ln\text{Nuclear}$)의 경우, GLS와 SDM(1)의 직접효과 추정치는 10% 수준에서 통계적으로 유의미하지 않았다. 하지만 SDM(1)과 SDM(2)의 직접효과 추정치 모두 음(-)의 값으로 나타났다. 이는 원자력발전의 비용적 우위 및 안정성이 자국의 전력수입 수요를 감소시키는 것을 이해된다. 간접효과는 두 모형에서 모두 음(-)의 값이 도출되었으며, 통계적으로도 유의했다. 이는 원자력 발전을 하지 않는 11개 국가에 의해 주변국들에서의 원자력발전 증가가 수입에 미치는 음(-)의 효과가 과대평가되어 간접효과를 제대로 포착하지 못했을 가능성이 존재하기 때문으로 해석된다.

풍력 및 태양광발전($\ln\text{WindSolar}$)의 비용열위와 낮은 유연성 및 제어 불가능성은 직접효과가 양(+)²의 값을 가지는 것을 설명하기에 충분한 것으로 사료된다. 간접효과의 경

우 SDM(2)에서만 유의한 결과가 도출되었다. 풍력 및 태양광발전이 수출에 미치는 효과와 유사하게 자국을 제외한 유럽 전역에서 풍력 발전량과 태양광 발전량의 증가는 자국을 제외한 국가들 사이의 전력거래 활성화를 통해 간헐성을 보완해줄 수 있다. 이는 선물시장에서 상대적으로 타 국들 사이의 거래는 증가하는 반면 자국과의 거래는 감소하게 하여 수입이 감소하는 결과로 이어질 수 있는 것이다.

수력발전($\ln HY$)의 GLS 계수와 SDM(1)의 직접효과는 통계적으로 유의하지 않았지만, SDM(2)의 직접효과는 통계적으로 유의한 양(+)의 값이 나타났다. 수출에서보다 강건성이 떨어지기는 하지만 역시 가설에서처럼 수입을 증가시키는 결과가 도출되었다. 간접효과는 SDM(1)과 SDM(2) 모두 유의한 양(+)의 값이 도출되어 강수량이 많은 시기에 수력 발전량이 많아지는 주변국으로부터의 수입이 증가한 것으로 해석할 수 있을 것이다.

1인당 산업용 에너지 소비($\ln Indpop$)는 그 국가의 에너지 수요를 나타낼 수 있는 변수라고 할 수 있다. 에너지 수요가 높을수록 전력수요 역시 높아질 것이며, 그에 따라 전력수입도 늘어나게 될 것이기 때문에 두 변수 간의 양의 관계는 합리적이라고 볼 수 있다. 또한 주변 국가들의 1인당 산업용 총에너지 소비의 증가는 그 국가들의 경제 규모가 성장했다고 생각할 수 있으며, 그에 따라 자국에 전력수입이 필요할 때 안정적으로 전력을 공급해줄 수 있다. 하지만 간접효과에서는 SDM(1)에서만 유의한 결과가 도출되었다. 이는 SDM(2)에서 가중치행렬의 범위가 확장됨에 따라, 유럽 전역에서의 전력수요 증가가 갖는 자국의 수입감소 효과와 동시에 유럽 전역에서의 경제규모 확대에 따른 안정적인 전력 공급이 갖는 수입증가 효과가 상충되면서 나타난 결과로 보여진다.

마지막으로 세전 전력가격($\ln Exprice$)은 GLS와 SDM(2)의 직접효과에서 양(+)의 값이 나타났지만, GLS의 계수추정치는 유의하지는 않았다. 자국의 세전 전력 요금의 상승은 시장 전반적인 전력생산비용 증가의 결과이고, 상대적으로 전력을 저렴하게 생산할 수 있는 국가로부터 전력을 수입하는 것은 합리적인 의사결정이라고 할 수 있다. 간접효과에서는 SDM(1)에서만 통계적으로 유의한 결과가 도출되었으며, SDM(2)는 유의하지 않았다. 하지만 두 모형에서 모두 양(+)의 값이 나타났는데, 이는 실시간 시장에서 가격에 비탄력적으로 반응하는 효과 때문으로 판단된다.

추가적으로 공간적 자기상관계수인 ρ 는 수출 및 수입에서 모두 음의 값을 가지며 통

계적으로 유의하다. 자국을 제외한 주변국들에서의 수입 증가는 자국의 수입 감소를 야기하고, 주변국들에서의 수출 증가는 자국의 수출 감소를 야기한다는 것을 의미한다.

앞서 분석한 결과를 토대로 원자력과 태양광 및 풍력을 중심으로 현실사례를 간략하게 살펴보면, 실제로 유럽에서 발전량과 전력 수출량이 가장 많은 국가는 프랑스와 독일이다. 하지만 원자력 발전량이 많은 프랑스는 전력 수출량이 전력 수입량 대비 2018년 기준으로 약 7.3배이지만, 독일의 경우에는 약 1.4배이다. 두 국가가 유럽에서 가장 큰 규모의 발전량을 가졌음에도 불구하고 이러한 수입 대비 수출 비율이 크게 차이나는 이유는 결국 원전 및 재생에너지 비중 및 발전량 차이에서 기인하는 것으로 보인다. 이는 재생에너지 발전량이 증가할수록 수출량과 수입량이 모두 증가한다는 실증분석 결과와 일치한다.

VI. 결론 및 경제적 함의

본 연구는 발전원별 특성을 중심으로 유럽 국가들에서의 전력수출 및 수입 결정요인을 분석하는 것을 주요 목적으로 한다. 이에 따라, 2005년부터 2018년까지 각국의 연도별 전력수출, 전력수입, 연도별 주요 5개 에너지원(석탄, 원자력, 천연가스, 풍력·태양광, 수력)별 발전량, 연도별 1인당 산업용 총에너지 소비량, 연도별 세전 전력가격 패널 자료를 활용하여 26개 EU 소속 유럽 국가들을 대상으로 분석하였다. 이때 전력교역에 있어서 유럽 국가들에서는 계통이 직접적으로 연결되어 있는 국가들과 그렇지 않은 국가들이 존재한다. 하지만 특정 국가와 계통이 연결된 국가는 또 다른 인접 국가들과 계통이 연결되어 있다는 점에서 유럽 전역이 직간접적으로 계통이 연계되어 있으며, 특정 국가는 간접적으로 연결된 국가로부터 영향을 받을 수 있다고 생각할 수 있다. 이와 같은 점을 고려하여 본 연구에서는 공간계량 방법론을 활용하여 26개 국가들이 전력수출입에 있어서 직간접적으로 영향을 받을 수 있도록 전력교역량을 기준으로 가중치행렬을 구성하고, 이를 바탕으로 패널 공간터빈모형(SDM)을 활용하여 분석하였다.

분석 결과에 따르면, 유럽 국가들을 대상으로 한 전력수출입 결정요인 분석에서 대체로 공간계량 방법론을 적용하는 것이 통계적으로 더욱 유의미한 것으로 나타났다. 특히 계통연계 국가들만을 고려하여 가중치행렬을 구성한 것이 아닌 유럽 전역으로 간접적

인 영향을 확장시킨 가중치행렬의 계수 값들이 대체로 더욱 통계적으로 유의하였다. 이를 통해 전력교역에 있어서 인접한 계통연계 국가들뿐만 아니라 간접적으로 유럽 전역이 영향을 주고받는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구에서 제시한 새로운 가중치행렬 구성 방식은 거리를 활용하여 공간적인 상관성을 반영하는 통상적인 가중치행렬을 넘어서 공간계량 방법론이 확장 및 응용될 수 있는 여지를 제공하였다는 점에서 의의가 있다고 사료된다.

분석 결과를 세부적으로 살펴보면, 발전원에서는 상대적으로 연료비 단가가 낮고 안정성이 높은 석탄과 원자력 발전량의 증가는 자국의 전력수출을 증가시키는 것으로 나타났다. 수력 역시 강수량이 많은 계절에 한해 수출을 증가시키는 것으로 나타났다. 천연가스의 경우 상대적으로 높은 연료비 단가로 인하여 자국에서의 천연가스 발전량의 증가는 전력수출을 감소시키는 것으로 나타났다. 하지만 연료비 단가와와는 관계없이 간헐성과 변동성이 높은 태양광 및 풍력 발전량이 자국에서 증가하게 되는 경우 계통안정성 문제로 인하여 대체로 수출이 증가하는 것으로 나타났다. 다음으로 1인당 산업용 총에너지 소비량의 증가는 국가 규모의 증대에 따른 설비규모의 증대의 효과가 더 크기 때문에 자국의 잉여 전력이 수출됨으로써 전력수출이 증대되는 것으로 확인되었으며, 마지막으로 자국의 세전 전력가격의 상승은 전력수출을 통계적으로 유의하게 감소시키는 것으로 나타났다. 한편 전력수입에 있어서는 연료비 단가가 낮고 안정적으로 생산이 가능한 원자력 발전량의 증가만이 자국의 전력수입을 감소시키는 것으로 나타났다. 반면, 자국에서의 천연가스, 석탄, 태양광 및 풍력, 수력 발전량의 증가는 전력수입을 증대시키는 것으로 나타났다. 마지막으로 자국에서의 1인당 산업용 총에너지 소비량과 세전 전력가격의 상승은 전력수입을 증가시키는 것으로 나타났다.

현 정부의 에너지 전환정책은 깨끗하고 안전한 에너지로의 전환이라는 국제적인 추세에 맞춰 발전부문에 태양광과 풍력과 같은 친환경 에너지의 발전비중을 확대시키고, 석탄과 원자력에 대한 의존도를 낮추는 것을 핵심으로 한다. 하지만 유럽의 전력수출입에 관한 분석 결과를 토대로 생각해볼 때 원자력만이 수출 증대 및 수입 감소를 통해 전력순수출을 증가시킴으로써 해외 전력 의존도를 낮출 수 있을 것으로 보인다. 반면, 태양광과 풍력 발전량의 증가는 전력수출과 수입을 모두 증대시키는 것으로 나타났으며, 이는 신재생에너지 발전원이 갖는 계통 불안정성의 문제를 유럽에서는 전력교역을

통해 해결하였다는 것을 암시한다. 또한 천연가스 발전량의 증가는 천연가스 발전이 가지는 높은 유연성에도 불구하고 비용적 열위에 의해 수출 감소 및 수입 증가로 해외 의존도를 심화시키는 것으로 나타났다. 이러한 점으로부터 미루어 볼 때 동북아시아 슈퍼그리드가 실현됨으로써 전력교역이 성사되지 않는 한 탈원전 및 신재생에너지로의 전환을 급격하게 진행할 경우 전력수급 불균형에 따른 여러 문제가 발생할 수 있음을 인지할 필요가 있다. 또한 LNG 형태로 국내에 수입하고 있는 천연가스 발전의 증대는 전력교역이 불가능한 상황에서 결과적으로 전력요금 상승을 수반할 수밖에 없을 것으로 보인다. 결국 전력교역이 불가능한 한국에서는 친환경성뿐만 아니라 경제성 및 안정성도 중요하다는 점을 유럽 전력교역 분석을 통해 확인할 수 있다.

이와 같은 시사점에도 불구하고 본 연구가 갖는 한계점을 지적할 필요가 있다. 전력교역이 대부분 연 혹은 월 단위의 선물 계약의 형태로 이루어질지라도, 데이터 수집의 한계로 인해 계절별 혹은 시간별 전력교역 차이까지는 살펴보지 못했다는 점은 명백한 한계로 남는다. 또한 재생에너지와 관련된 국가별 기후 조건 혹은 전력수요와 관련하여 국가별 산업 특성 등을 고려하지 못한 점 역시 한계점이라고 할 수 있다. 이러한 한계점들은 후속연구에서 보완할 계획이다.

[References]

- 김태현·신한솔·김형태·이성우·한상현·김욱, “국가간 계통연계가 우리나라 전력계통 운영에 미치는 영향”, 대한전기학회 2015년도 제46회 하계학술대회, 「대한전기학회」, 2015, pp. 253~254.
- 김형태·장성수, “3020 신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력계통 안정화 핵심기술 개발 방향”, 「전기학회논문지」, 제67권 제2호, 2018, pp. 149~157.
- 노유림, “2017년 해외 전력산업 동향”, 한국전력거래소, 2017. 11.
- 산업통상자원부, “제9차 전력수급기본계획(2020~2034)”, 2020. 12. 28, 산업통상자원부 공고 제2020-741호.
- 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.
- 윤성화, “동북아 슈퍼그리드 전략 비교 연구”, 「러시아연구」, 제27권 제2호, 2017, pp. 201~225.
- 이현주, “패널 GLS 분석을 통한 중국의 전력수요 결정요인 분석”, 「동북아경제연구」, 제25권 제3호, 2013, pp. 171~204.
- 한국에너지신문, “동북아 슈퍼그리드, 한·중·일·러 청정 전력망 연계 에너지 수급 안정성 확보”, 2018. 5. 21.
- 한국전력공사, “균등화 발전원가 해외사례 조사 및 시사점 분석”, 2018. 1.
- 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.
- Anselin, L., “Model validation in spatial econometrics: a review and evaluation of alternative procedures,” *International Regional Science Review*, Vol. 11, No. 3, 1988, pp. 279~316.
- Bäckman, A., *The Nordic electricity system as a common-pool resource*, Uppsala university, 2011.
- 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.
- 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.
- Dassisti, M., and L. Carnimeo, “Net modelling of energy mix among European Countries: A proposal for ruling new scenarios,” *Energy*, Vol. 39, No. 1, 2012, pp. 100~111.
- European Parliament, *Understanding electricity markets in the EU*, European Parliamentary Research Service, 2016.
- 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.
- Geske, J., R. Green, and I. Staffell, “Elecxit: The cost of bilaterally uncoupling British-EU

- electricity trade,” *Energy Economics*, Vol. 85, 2020, 104599 p.
- 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: Avison 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.
- International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2016*, IEA, 2016.
- Jacopo, T., “Privatisation and cross-border electricity trade: From internal market to European Supergrid?,” *Energy*, Vol. 77, 2014, pp. 635~640.
- LeSage, J., and R. K. Pace, *Introduction to Spatial Econometrics*, CRC press, 2009.
- Montoya, L. G., B. Guo, D. Newbery, P. E. Dodds, G. Lipman, and G. Castagneto Gisse, “Measuring inefficiency in international electricity trading,” *Energy Policy*, Vol. 143, 2020, 111521 p.
- Newbery, D., G. Strbac, G. Pudjianto, and P. Noël, *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.
- ODYSSEE-MURE, <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/heating-energy-consumption-by-energy-sources.html>, Accessed 25 June 2021.
- Pariso, L., and M. Pelagatti, “Market coupling between electricity markets: theory and empirical evidence for the Italian-Slovenian interconnection,” *Economia Politica*, Vol. 36, 2019, pp. 527~548.
- 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.
- Ram, M., M. Child, A. Aghahosseini, and D. Bogdanov, “A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 199, 2018, pp. 687~704.
- 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.
- UNSPECIFIED, *Energy sources, production costs and performance of technologies for power generation, heating and transport. Commission staff working document accompanying the communication on a second strategic energy review*, EU Commission - SEC Document, 2008.
- 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.
- Zappa, W., M. Junginger, and M. van den Broek, “Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?,” *Applied Energy*, Vol. 233-234, 2019, pp. 1027~1050.