

# 신재생에너지와 화력발전의 후방산업생태계 비교 분석

: 산업연관기반 네트워크 접근

## A Comparative Analysis of the Backward Value Chains of Renewable Energy and Thermal Power

: An Input-Output Network Approach

박민석\* · 김정태\*\*

Park, Minseok · Kim, Jungtae

### Abstract

This study conducts a comparative analysis of the value chains of thermal power, which is gradually contracting under energy transition policies, and renewable energy, which is expanding, using an input-output network approach. Furthermore, cluster analysis is conducted to derive structural equivalence within the renewable energy value chain and to propose development strategies for the sector. The results indicate that the thermal power and renewable energy value chains consist of 11 and 66 industries, respectively, and that all 11 industries constituting the thermal power value chain are included in the renewable energy value chain. This finding suggests that the energy transition does not create a supply chain fundamentally distinct from that of thermal power but rather represents a process of structural reconfiguration that incorporates and expands the existing industrial base. Accordingly, transition support policies are required to facilitate the smooth redeployment of firms within the declining thermal power supply chain into the renewable energy sector. In addition, the cluster analysis identifies eight clusters within the renewable energy value chain, based on which policy measures are proposed to strengthen structural linkages among industries.

**주제어** 투입-산출 네트워크, 에너지 전환, 화력발전, 신재생에너지, 산업생태계

**Keywords** Input-Output Network, Energy Transition, Thermal Power, Renewable Energy, Value Chain

## 1. 서론

전 세계적인 기후위기 대응으로 시작된 에너지 전환은 거스를 수 없는 시대적 흐름으로 가속화되고 있다. 우리 역시 제11차 전력수급기본계획에 따라 탄소배출 문제가 심각한 화력발전을 단계적으로 폐쇄하고, 신재생에너지의 보급을 확대하는 정책 기조를 강화하고 있다(산업통상자원부, 2025). 그러나 국내 발전원별 전력생산 추이를 살펴보면, 2024년 화력발전은 전체 56.44%를 차지하였지만, 신재생에너지는 10.63%에 머무르고 있어(한국전

력공사, 2025), 화석연료에 대한 의존도가 여전히 높은 실정이다. 이처럼 높은 의존도에도 불구하고 신재생에너지로의 전환은 빠르게 진행될 것으로 보이며, 전력공급의 공백을 방지하고 국가 경쟁력 확보를 위해서는 신재생에너지의 체계적인 육성정책이 필요하다.

최근 사회과학 분야에서도 신재생에너지의 육성을 위한 다양한 연구가 수행되며, 크게 정책적 측면과 경제적 측면에서 논의되고 있다. 정책적 측면에서는 주로 신재생에너지 확대의 법·제도적 기반조성과 사회적 합의, 기술육성 등을 주제로 하며(정남철, 2022;

\* Ph.D. Student, Department of Community Development, Kongju National University (First Author: D20240053@smail.kongju.ac.kr)

\*\* Professor, Department of Community Development, Kongju National University (Corresponding Author: kjt2013@kongju.ac.kr)

이혜정 외, 2020; 이상범 외, 2019; 안상욱, 2016; 김종완·박상철, 2016; 허성운 외, 2016), 경제적 측면에서는 신재생에너지 확대가 경제에 미치는 파급효과가 화력발전으로 인한 효과에 못지않아 에너지 전환의 타당성을 입증하였다(임상수, 2023; Lee et al., 2022; 강지은 외, 2017; 권승문 외, 2016; 임슬에 외, 2014). 그중 경제적 측면의 연구는 산업연관분석을 활용하여 신재생에너지 확대의 필요성과 당위성을 제시하지만, 거시적인 파급효과의 총량을 추정하는 데 머물러 있어, 실질적인 육성정책 수립에 필요한 산업 간의 연계와 공급망 내 핵심산업을 식별하지 못한 한계가 있다.

특히 산업생태계 관점에서 에너지 전환은 기존 화력발전의 생산을 지원하는 후방산업의 연쇄적인 쇠퇴와 신재생에너지의 후방산업이 성장하는 구조적 전환을 의미한다. 현대 경제에서 산업은 개별적으로 독립하여 존재하는 것이 아니라, 복잡한 거래 관계를 통해 유기적으로 연결된 네트워크의 속성을 갖는다. 산업 간의 네트워크는 필연적으로 특정 공간과 지역을 기반으로 형성되므로, 이를 이해하는 것은 실효성 있는 국토 및 지역계획 수립의 핵심 전제조건이 된다. 무엇보다 후방산업은 발전 설비와 기자재 생산, 운영 및 유지보수과정에서 지역경제 및 고용과 밀접하게 연결되어 있다. 따라서 신재생에너지 전환정책은 개별 산업의 접근을 넘어, 감축되는 화력발전 공급망에 대한 지원전략과 확대하는 신재생에너지의 산업생태계를 육성하는 정책적 접근이 필요하다.

이러한 배경에서 본 연구는 투입-산출 모형에 사회연결망분석(Social Network Analysis)을 결합한 투입-산출 네트워크 방법론을 적용하여, 화력발전과 신재생에너지 후방산업생태계의 구조를 비교 분석한다. 구체적으로 한국은행에서 제공하는 가장 최신의 자료인 2023년 산업연관표를 기초로 레온티에프 역행렬 기반의 네트워크를 구축하고, 두 발전원의 생산을 지원하는 후방산업을 식별하여 연결 중심성과 네트워크 밀도를 비교하였다. 나아가 신재생에너지의 실질적인 확대와 육성방안을 모색하기 위해 군집화 분석을 수행하였고, 신재생에너지 산업생태계를 기능별로 구분하였다. 두 산업생태계의 구조적 비교는 쇠퇴하는 화력발전 연관 산업이 신재생에너지 산업생태계로 원활하게 전환될 수 있는 연착륙 방안을 제시할 것이다. 산업생태계 군집화 과정은 단순한 신재생에너지 보급확대를 넘어, 각 군집별 특성에 부합하는 맞춤형 육성전략과 산업 간 연계성의 강화 방안을 시사할 것이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장 선행연구 검토를 통해 투입-산출 네트워크의 방법론적 타당성과 연구의 의의 및 차별성을 구체화하였다. 3장에서 분석 방법을 설명하며, 4장 분석결과를 서술, 5장 연구결과를 토대로 에너지 전환에 대응하는 신재생에너지 육성방안의 시사점을 제시하였다.

## II. 선행연구검토

### 1. 에너지 전환정책 및 경제적 파급효과 연구

기후위기에 대응하는 탄소 중립(Net-Zero) 달성이 글로벌 과제로 대두되면서, 주요 선진국은 전통적인 화석연료 발전원을 단계적으로 감축하고 무탄소 전원인 신재생에너지의 도입을 가속화하고 있다. 이에 따라 신재생에너지의 육성은 국가 경쟁력 제고를 위한 핵심 분야로 부상하고 있으며, 사회과학 분야에서도 신재생에너지의 확대와 육성에 초점을 둔 연구가 수행되고 있다. 선행연구는 크게 에너지 전환의 제도적 기반, 사회적 수용성, 기술요인 등 전환의 이행환경을 다루는 정책적 측면과 신재생에너지 확대가 경제에 미치는 파급효과를 분석한 경제적 측면의 연구로 구분된다.

먼저 정책적 관점에서 안상욱(2016)은 미국과 EU의 사례를 통해 신재생에너지 확대정책의 잠재적 위험요인을 진단하였으며, 중국기업의 태양광 패널 독점과 같은 특정 국가의 산업주도권 편중 현상과 정부의 과도한 보조금 지출로 인한 재정부담 문제를 우려하였다. 유사하게 김종완·박상철(2016)도 주요국의 사례 분석을 통해 정부의 과도한 보조금 정책이 무분별한 기업의 난립을 초래하고, 시장의 신뢰성을 상실시켜 신재생에너지 산업발전을 저해할 수 있음을 시사하였다. 법률적 측면에서 정남철(2022)은 현행 법제의 한계를 지적하며, 신재생에너지 확대의 실효성을 담보하기 위해서는 구속력 있는 실행계획의 법적 근거 마련과 기후변화에 대응하는 컨트롤타워의 필요성을 제시한다.

정책 이행과정에서 발생하는 사회적 갈등요소인 주민 수용성과 관련하여, 이상범 외(2019)는 독일, 영국 등의 사례를 통해 재생에너지 발전시설로 인한 직·간접적인 주거환경 영향에 대한 주민보상과 이익공유를 위한 기준마련이 주민 수용성을 높이는 방안이라 제시하였다. 이와 관련하여 이혜정 외(2020)는 일반 국민과 발전소 인근 주민의 수용의사액(Willingness to Accept) 차이를 비교 분석하였다. 분석결과 발전소 인근 주민은 모든 발전원에서 일반 국민보다 낮은 수용성을 보였으며, 특히 주거환경 훼손의 우려가 큰 바이오매스 발전소에 대한 가장 높은 수준의 보상을 요구하는 것으로 나타났다. 신재생에너지 확대를 위한 주민 수용성의 확보를 위해서는 금전적 보상체계뿐만 아니라, 주거와 자연환경을 개선한 입지 계획이 동반되어야 함이 시사된다.

한편 기술적 차원에서 Gielen et al.(2019)은 에너지 효율과 재생에너지의 기술혁신이 글로벌 에너지 전환의 핵심 동력으로 설명하였으며, 기술의 진보가 기후위기 대응을 넘어 글로벌 GDP 성장과 고용 증대를 견인하는 사회경제적 기회임을 강조한다. 구체적인 기술육성 방향을 제시한 허성운 외(2016)는 신재생에너지 기술요인의 우선순위를 도출하고자 정부, 학계, 발전사업자 등 전문가 대상의 계층화분석(AHP)을 수행하였다. 분석결과 모든

전문가 그룹이 경제성 향상 기술을 최우선순위로 지목하였으며, 특히 신재생에너지의 발전단가가 화석연료 발전단가와 균형을 이루는 '그리드 패리티(Grid Parity)' 달성을 위한 발전단가 하락 기술을 산업육성의 핵심 요소로 인식하고 있음을 확인하였다. 종합하면 에너지 전환을 위한 정책적 논의는 제도적 기반과 사회적 합의뿐만 아니라, 신재생에너지 기술의 발전이 정책 목표달성을 위한 핵심과제임을 나타낸다.

정책적 논의와 더불어 경제적 관점의 연구는 주로 산업연관분석을 활용하여 신재생에너지 확대에 인한 거시적 파급효과를 분석하는 데 집중하였다. 임승예 외(2014)는 신재생에너지 부문에서 1원의 생산이 발생할 때, 국가 경제 전체에 약 2.178원의 생산과 0.708원의 부가가치가 유발되며 10억 원당 9,033명의 취업자가 발생하는 것으로 분석하여, 산업의 경제적 총량을 실증하였다. 권승문 외(2016)는 전·후방연쇄효과를 나타내는 감응도, 영향력 계수를 기준으로 산업의 위상을 진단하였고, 신재생에너지가 전·후방 연쇄효과가 모두 높은 '중간수요적 제조업형'의 특성을 보여 다른 산업과 연계성이 높은 산업임을 확인하였다. 강지은 외(2017)는 신재생에너지와 화력발전의 파급효과를 비교 분석하였다. 분석결과 신재생에너지는 화력발전보다 생산유발, 부가가치유발, 취업 유발효과 모두 높은 것으로 나타났으며, 이를 통해 에너지 전환의 경제적 타당성을 제시하였다. Lee et al.(2022)은 신재생에너지 가치사슬 산업을 세 가지 범주로 유형화하여 2010년, 2015년, 2020년의 시점별 파급효과를 분석하였다. 분석결과 시점이 경과함에 따라 초기 단계의 시설 투자비용과 고정비용은 감소하고, 생산 운영의 안정화와 효율성은 높아진 것으로 나타났다. 신재생에너지가 산업 전반에 걸쳐 수요와 공급이 확대하는 안정화 단계로 진입하였으며, 경제적 파급효과가 산업 전반으로 확산하고 있음을 제시한다.

반면 임상수(2023)는 화력발전이 신재생에너지로 전환하는 과정을 네 가지 시나리오로 설정하여 시나리오별 파급효과를 분석하였다. 분석결과 에너지 전환으로 산업 전체에 생산과 부가가치가 유발되는 경향을 보였으나, 시나리오에 따라 일부 산업에서는 오히려 성장이 위축되는 결과를 초래하였다. 신재생에너지의 확대가 거시적으로는 국가 경제성장을 견인하지만, 화력발전과 연계성이 높은 특정 산업군은 쇠퇴하는 불균형적 구조를 갖는 것을 시사한다.

경제적 관점의 논의는 산업연관분석을 활용하여 신재생에너지의 확대가 경제에 미치는 파급효과를 규명하는 데 집중되었다. 이는 국가 에너지 전환의 경제적 당위성을 입증하고, 신재생에너지 육성의 필요성을 제시하지만, 경제적 파급효과를 추정하는데 국한되어 있어 산업 간의 연계성과 구조적 변화를 파악하는 데 한계가 있다. 현대 경제는 공급망의 다변화와 기술융합, 글로벌 가치사슬의 확산 등으로 단순한 선형관계에서 벗어나 네트워크 속성을 지닌 복잡계 경제로 빠르게 변화하고 있다(박민석·

김정태, 2025: p.30). 이러한 맥락에서 화력발전의 단계적 폐쇄와 신재생에너지의 확대는 단순한 발전원의 교체를 넘어, 각 산업을 지탱하는 후방산업의 연쇄적인 쇠퇴와 성장을 의미한다. 따라서 기존의 총량적 분석을 넘어, 두 산업의 후방산업생태계 내 산업 간의 연계구조를 구체적으로 규명하고, 에너지 전환이 산업 연결망에 어떠한 구조적 재편을 초래하는지에 대한 논의가 필요하다.

## 2. 산업생태계의 네트워크 접근

최근 경제학 및 지역개발 분야에서는 산업생태계를 유기적인 복잡계로 인식하고, 산업 간의 연계성과 구조적 특성을 분석하기 위해 사회연결망분석(Social Network Analysis)을 접목한 연구가 활발하게 수행되고 있다. An et al.(2024)은 투입-산출 행렬의 각 산업부문을 네트워크의 노드(Node)로, 산업 간 재화와 서비스의 거래를 링크(Link)로 정의하여 두 방법론 간 수학적 타당성을 제시하였다. Weidong et al.(2022)에서는 이러한 융합적 접근이 산업구조의 연계성을 설명하는 강력한 이론과 응용력을 갖는 도구임을 강조하며, 에너지 및 광물 부문에 적용할 경우 탄소배출이나 환경보호와 같은 복합적 이슈의 구조적 연계성을 밝히는 데 유용함을 입증하였다. 투입-산출 네트워크의 활용은 주로 국가 전체의 거시적 산업구조의 변화를 살펴거나, 특정 산업생태계를 심층적으로 진단하기 위해 접근된다.

Foerster and Choi(2017)는 투입-산출 네트워크를 통해 1947년부터 2015년간 미국 산업의 구조적 특성을 규명하기 위해 네트워크 밀도와 산업의 중심성 지표를 사용하였다. 산업 간 상호연결 정도를 측정하는 밀도가 높은 경제 구조는 특정 산업에서 발생하는 충격이 다른 산업으로 확산할 가능성이 크고, 중심성이 높은 산업의 충격은 경제 전반에 높은 영향을 미칠 것으로 설명한다. Wang and Yang(2022)은 2002년부터 2017년까지 중국 산업구조의 네트워크 밀도 감소를 지적하며, 효율성 증대를 위한 산업생태계 육성의 필요성을 강조하였다. 이어서 제조업과 금속제품 산업의 위상은 높게 나타났지만, 연구개발 부문은 항상 낮게 평가되어 자원 배분의 최적화를 통한 산업 간 균형발전의 필요성을 역설하였다. 노재확(2024)은 2017년부터 2019년간 한국산업의 연관 관계를 분석하여, 생산 크기가 큰 주력산업의 생산 규모와 중심성 지표 간의 관계를 규명하였다. 분석결과 생산 규모와 중심성은 전반적으로 높은 상관성을 보였으나, 주변 산업과의 연결 정도와 연계 산업의 중요도에 따라 순위의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 산업의 육성 측면에서 개별 산업의 양적 성장도 중요하지만, 연계된 산업과의 동반 성장을 고려한 생태계적 관점의 접근이 필요할 것으로 시사된다. 이와 관련하여 Ramírez-Álvarez et al.(2024)은 산업의 속성과 유사성을 기반으로 에콰도르의 70개 산업을 5개의 네트워크 군집으로 유형화하여 군집의 중심 산업을

식별하고, 군집 간의 연계방안을 제시하였다. 산업육성 정책이 실효성을 갖기 위해서는 각 군집의 특성을 고려한 세분화된 접근이 선행되어야 함을 시사한다.

산업생태계를 심층적으로 분석한 연구로, 변장섭(2016)과 서영복·박찬권(2022)은 각각 해운물류업과 창고 및 운송 서비스업을 대상으로 산업 간 연계구조를 분석하였다. 이들은 분석을 통해 산업의 육성정책이 개별 산업에 대한 접근을 넘어, 네트워크 내에서 연계성이 높은 산업과 동반 성장을 도모하는 생태계적 관점이 중요함을 제안하였다. 더욱 미시적 관점에서 특정 지역의 특화 산업을 대상으로 한 연구도 주목된다. 박문수 외(2017)는 대경권 제조업과 서비스업 간의 연계성을, 정호진·임용석(2018)은 경상남도의 제조업과 정보통신 및 과학기술서비스업의 연계구조를 각각 분석하였다. 이들은 기존의 이분법적 구분에 기초한 산업육성 정책에서 벗어나, 두 산업생태계가 유기적으로 결합한 융합의 관점에서 지역산업 육성정책이 이뤄져야 함을 제시한다.

이상의 선행연구를 종합하면, 투입-산출 기반의 네트워크 분석은 산업의 단순한 양적 규모를 넘어 산업생태계 내에서 실질적인 영향력과 위상을 규명하는 데 유용한 도구인 것으로 확인된다. 화력발전에서 신재생에너지 전환되는 과정은 개별 산업의 쇠퇴와 성장을 넘어 연관된 산업구조가 동반적으로 변화하는 것을 의미한다. 이에 본 연구는 투입-산출 기반 네트워크 방법론을 적용하여 화력발전과 신재생에너지의 후방산업생태계를 각각 도출하고, 이를 바탕으로 쇠퇴하는 화력발전의 합리적 지원방안과 성장하는 신재생에너지 산업생태계의 동반 육성전략을 동시에 모색하고자 한다.

본 연구는 에너지 산업의 구조적 특성을 규명한 점에서 선행연구와 방법론적 궤를 같이하나, 분석대상과 목적 그리고 정책적 함의 도출 과정에서 다음과 같은 차별성을 갖는다.

첫째, 기존 연구는 대체로 대분류 혹은 중분류 수준의 산업 분류체계를 사용하여, 구체적으로 어떤 세부 산업과 밀접하게 연관되어 있는지 파악하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 한국은행에서 제공하는 가장 세밀한 산업 분류체계인 기본부문(380)을 활용하여, 에너지 산업과 연결된 산업생태계를 정밀하게 분석한다.

둘째, 기존 연구가 국가 전체나 단일 산업만을 분석했다면, 본 연구는 에너지 전환이라는 시대적 흐름에 맞춰 화력발전과 신재생에너지의 두 산업생태계를 비교한다. 이를 통해 두 산업생태계의 구조적 차이를 명확하게 살피고, 화력발전 산업의 역량이 신재생에너지 산업생태계로 원활하게 편입할 수 있는 연계적 전환 구조를 제시한 점에서 차별성을 갖는다.

셋째, 분석방법론적 측면에서 Ramírez-Álvarez et al. (2024)은 산업의 속성 유사성에 기반한 유형화 군집화 방식(K-Means)을 적용했다면, 본 연구는 산업 간의 연결 패턴에 초점을 둔 CONCOR 군집화 방식을 적용한다. 속성에 기반한 접근은 산업 간의 규모, 특성, 거리 등의 유사성을 기준으로 분류하기 때문에,

실제 산업 간 거래 관계와 네트워크 내 역할 구조를 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 이에 본 연구는 투입-산출 관계를 바탕으로 구조적 동위성(Structural Equivalence)을 도출할 수 있는 CONCOR 방법을 적용하여(김용학·김영진, 2016: p.168), 신재생에너지 산업생태계의 기능적 구조를 실증적으로 규명한다.

### III. 분석 방법

#### 1. 분석자료

분석자료는 2026년 현재 한국은행에서 제공하는 가장 최신자료인 2023년 국가산업연관표를 활용하였으며, 2023년 표는 실측표(2020년)를 바탕으로 간접추계 방식으로 작성되어 유통·마진을 제외한 생산자 출가가격인 생산자가격표를 제공하고 있다. 화력발전과 신재생에너지의 순수한 국내 산업생태계를 분석하기 위해 비경쟁수입형 국산거래표를 사용하였으며, 가장 세밀한 산업분류체계인 380개 부문으로 구분된 기본부문을 사용한다.

산업연관표상 전력 및 신재생에너지(중·소분류)에 포함된 기본부문은 수력, 화력, 원자력, 자가발전, 신에너지, 재생에너지 등으로 구분된다. 본 연구의 목적은 화력발전과 신재생에너지이므로, 신에너지와 재생에너지 부문을 신재생에너지로 통합하여 재구성하였다. 국내 에너지 전환정책의 목표가 신에너지와 재생에너지를 포괄하는 신재생에너지 확대에 있으며, 신재생에너지 생산량의 비율이 2023년 재생에너지 90.93%, 신에너지 9.07%로 큰 격차를 보인다(한국에너지공단, 2024). 상대적으로 비중이 작은 신에너지 부문을 별도로 분리할 경우 발생할 수 있는 네트워크 지표의 불안정성을 최소화하고, 산업생태계의 전체적인 구조를 명확히 분석하기 위해 두 부문을 통합하였다.

자가발전의 경우 부생가스와 같은 화석연료가 높은 비중을 차지하지만, 기업에서 필요로 하는 전력의 일부 또는 전부를 자체적으로 생산·소비하기 위해 발전기를 설치·가동하는 것으로(한국은행, 2024), 옥상형 태양광이나 소형 풍력 등 다양한 발전원이 혼재되어 집계된다. 따라서 발전원과 생산 목적이 상이한 자가발전을 화력발전과 통합할 경우 화력발전 산업생태계의 명확한 분석을 저해할 우려가 있으므로, 자가발전을 독립된 부문으로 분리 유지하여 최종적으로 379개 부문에 대한 분석을 수행한다.

#### 2. 분석모형

산업연관분석의 사회연결망분석(SNA)을 적용한 분석 방법은 5단계 순서로 진행되며, 일련의 분석과정을 정리한 내용은 <표 1>과 같다. 먼저, 379개 부문의 투입-산출표를 이용하여 국산 투입계수행렬( $A^d$ )을 도출한다. 식 (1)에서 투입계수  $a_{ij}^d$ 는  $j$ 산업 생산물 1단위 생산을 위해 직접 투입되는  $i$ 산업의 국산 중간투입액

Table 1. Analytical procedure

| Step | Method                                                                                                                                      |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Derive $L^d = (I - A^d)^{-1}$ based on the input-output table                                                                               |
| 2    | Set a threshold ( $f_{ij}$ ) by identifying the inflection point in the overall value distribution of the $L^d$ matrix                      |
| 3    | Extract the backward industries of thermal power and renewable energy based on $f_{ij}$ and construct their respective value chain matrices |
| 4    | Conduct cluster analysis on the renewable energy value chain                                                                                |

이며,  $z_{ij}^d$ 는 중간투입액,  $X_j$ 는 총산출액을 의미한다.

$$a_{ij}^d = \frac{z_{ij}^d}{X_j} \quad (1)$$

투입계수는 특정 산업의 수요변화가 타 산업에 미치는 직접적 인 효과만을 보여주지만, 실제 산업과 산업 사이에는 직·간접적 상호의존적 관계가 존재하여 변화의 충격이 무한히 파급된다. 본 연구는 1차 직접 투입구조를 넘어, 간접적 지원산업까지 포함된 파급효과의 총량적 구조를 살피기 위해 레온티에프 역행렬(Leontief Inverse Matrix)을 활용한다. 레온티에프 역행렬은 생산유발계수행렬로도 불리며, 여기서 생산유발계수는 1단위의 최종수요가 발생할 때 각 부문의 생산에 미치는 직·간접적 파급효과를 의미한다(Miller and Blair, 2009). 식 (2)에서  $I$ 는 대각요소가 1이 되고 그 밖의 요소가 모두 0인  $379 \times 379$ 의 단위행렬,  $A^d$ 는  $379 \times 379$ 의 국산 투입계수행렬이다.

$$L^d = (I - A^d)^{-1} \quad (2)$$

분석된 레온티에프 역행렬( $L^d$ )은 네트워크 관점에서 수만 개의 산업 간 연결로 구성된 고밀도 네트워크로 해석할 수 있다. 대부분의 산업 간의 연결(생산유발계수)은 매우 낮아, 산업 간 연결의 핵심적 특성을 보여주는 네트워크 구조를 도출하기 위해서는 생산유발계수를 일정 수준으로 제한할 필요가 있다. 투입-산출 네트워크 분석한 Liu(2019), 정호진·임용석(2018), 박문수 외(2017) 등은 X축을 생산유발계수로 Y축을 연결선 수로 한 분포 곡선의 변곡점을 임계값( $f_{ij}$ )으로 설정하였다. 그러나 이들 연구는 변곡점을 식별하기 위한 구체적인 수학적 최적화 기준을 명시하지 않아, 임계값 설정의 객관성과 재현성을 담보하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 분포곡선의 변곡점을 식별하는 기존의 접근법을 적용하되, 그 과정에서 발생할 수 있는 주관적·시각적 판단을 배제하기 위해 데이터 분포곡선의 기하학적 수직거리를 활용한 수학적 탐색법을 사용하였다. 구체적으로 <그림 1>과 같이 X축을 생산유발계수로, Y축을 연결선 수로 설정한 하향 분포 곡선에서 양극단을 잇는 가상의 기준 직선을 긋고, 곡선상의 지점에서 해당 직선에 내린 수직거리가 극대화된 지점을 수학적으

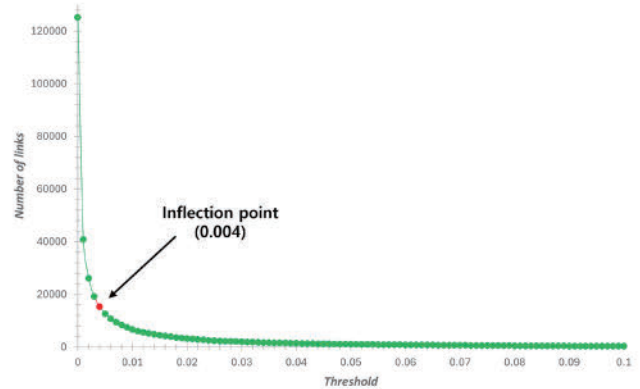


Figure 1. Distribution curve of output multipliers

로 산출하였다(Satopaa et al., 2011). 탐색결과 수직거리가 최대가 되는 지점의 생산유발계수 값은 0.004 지점으로 최적의 변곡점으로 도출되어  $f_{ij} \geq 0.004$ 의 값을 유효한 연결 관계로 가정하였다. 물론 임계값의 미세한 조정에 따라 분석에 포함되는 노드의 개수나 군집의 세부적 구조는 변동될 수 있다. 그러나 본 연구의 목적은 약한 연결로 인한 해석의 노이즈(Noise)를 차단하고 산업생태계의 중추적인 핵심 구조만을 식별하는 데 있다. 따라서 개별 산업별 자의적 기준 적용을 배제하고, 앞서 수학적으로 도출된 단일 최적점을 전체 네트워크의 전역 임계값으로 일괄 적용하였다.

다음으로 도출된 임계값( $f_{ij}$ )을 기준으로 화력발전과 신재생에너지의 산업생태계를 추출해야 한다. 이때 두 산업의 최종 산출물은 '전력'으로 동일하므로, 생산된 전력을 사용하는 전방산업 구조는 큰 차이가 나타나지 않는다. 반면 발전소의 운영 및 건설에 필요한 투입구조인 후방산업은 두 산업의 기술적 특성에 따라 명확하게 구분되기 때문에, 본 연구는 화력발전과 신재생에너지의 공급망인 후방산업을 추출하여 분석대상으로 한정한다. 구체적으로 최초 분석된  $379 \times 379$  레온티에프 역행렬( $L^d$ )에서 두 산업의 열벡터(세로)를 검토하여 투입의 생산유발계수가 임계값( $f_{ij}$ ) 이상인 산업을 식별하였다. 식별된 산업을 토대로 상호거래 관계를 재구성한 결과, 화력발전은 11개 산업으로 구성된  $11 \times 11$  행렬을 신재생에너지는 66개 산업으로 구성된  $66 \times 66$  행렬을 각각 구축하였고, 두 행렬로 SNA를 수행하였다.

SNA에서 각 산업은 노드(Node)로, 산업 간의 상호작용을 나타내는 선은 링크(Link)로 표현되며(An et al., 2024), 네트워크

내에서 다른 노드와 얼마나 직접 연결되어 있는지를 나타내는 연결 중심성(degree centrality)을 통해 산업 간의 관계와 산업의 영향력을 측정할 수 있다. 특히 투입-산출 네트워크의 연결 중심성은 연결의 방향에 따라 다른 산업에 영향을 주는 외향 연결(Out-degree)과 영향을 받는 내향 연결(In-degree)로 구분되며 식 (3)과 같이 설명된다.  $n$ 은 산업생태계의 산업 수,  $l_{ij}$ 는 레온티에프 역행렬을 구성하는 원소로서,  $j$ 산업의 최종수요가 1단위 증가할 때  $i$ 산업에서 직·간접적으로 유발되는 총산출을 의미한다. 따라서  $l_{ij}$ 는  $j$ 산업의 수요가  $i$ 산업에 미치는 생산유발효과를 나타내며, 네트워크 방향성에 따라  $i$ 산업에서  $j$ 산업으로의 산출 방향과  $j$ 산업에서  $i$ 산업으로의 유입 방향으로 구분된다.

$$D_{out}(i) = \sum_{j=1}^n l_{ij}, D_{in}(i) = \sum_{j=1}^n l_{ji} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

다음으로 상호 연결된 산업생태계 네트워크의 응집성은 네트워크 밀도로 표현되는데, 네트워크 내에서 가능한 총 연결과 실제 존재하는 연결의 비율로 설명된다. 네트워크 내 연결 관계의 수가 많을수록 네트워크 밀도는 커지며, 밀도는 0~1의 값으로 1에 가까울수록 산업 간의 연계가 활발하고 정보나 자원의 흐름이 효율적으로 이뤄지는 구조를 의미한다(Wang and Yang, 2022). 식 (4)에서  $n$ 은 네트워크의 노드 수,  $L$ 은 실제 존재하는 링크 수일 때,  $n(n-1)$ 은 네트워크에서 발생 가능한 최대 링크 수이다.

$$D = \frac{L}{n(n-1)} \quad (4)$$

기존의 레온티에프 역행렬기반 경제적 파급효과 분석이 산업 간의 연관 관계의 양적 크기를 측정하는 데 집중했다면, 본 연구의 투입-산출 네트워크 분석은 산업생태계 내 산업들의 질적 위

상과 구조적 취약점을 식별하는 데 효과적인 차별성을 갖는다. 이러한 관점에서 도출된 네트워크 지표는 화력발전과 신재생에너지 산업생태계의 구조적 특성을 비교 분석하는 기준으로 활용된다. 구체적으로 연결 중심성을 통해 산업 간의 관계구조를 파악하고, 공급망 내 중추적인 역할을 하는 산업을 식별한다. 네트워크 밀도의 비교는 두 산업생태계의 전반적인 응집력과 자원 배분 효율성을 진단할 수 있다. 마지막으로 신재생에너지의 실질적 확대와 육성방안을 모색하기 위해 CONCOR 군집화 분석을 수행하였다. 이를 통해 신재생에너지 공급망의 산업을 그룹화하고, 각 군집의 특성에 부합하는 맞춤형 지원전략과 군집 간의 유기적인 연계방안을 제시하고자 한다.

## IV. 분석결과

화력발전과 신재생에너지의 산업생태계를 각각 살펴보면, <표 2>는 화력발전 산업생태계의 분석결과이다. 표에서 연결 중심성은 다른 노드(산업)와 직접 연결된 정도를 나타내며, 다른 산업에 영향을 주는 외향(OUT) 중심성과 영향을 받는 내향(IN) 중심성의 값과 순위를 제시하였다.

화력발전 산업생태계의 경우 다른 산업에 영향을 주는 외향 연결이 높은 산업은 도소매 및 상품중개서비스, 도시가스, 시장조사 및 경영지원서비스, 일반음식점, 기타 사업지원서비스 순으로 분석된다. 화력발전은 성숙한 거대 장치산업으로 운영 및 보수를 위해 다양한 기계부품과 장비, 소모품 등이 지속적으로 투입되어야 한다. 도소매 및 상품중개서비스는 이러한 필요 물자를 전달하는 역할로 생태계 내 다수의 산업에 물리적 자원을 분배하는 조달 허브로 기능하여, 타 산업으로 향하는 외향 연결이 가장 높게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 2위의 도시가스는 LNG 복합화력 발전의 필수원료로 직접적인 투입 비중이 높기에 최상위를 차지하였다. 이외 산업은 대체로 생산공정에 직접 투입되는 제조나

Table 2. Degree centrality of the thermal power value chain

| Industry                                     | OUT   | Rank | IN    | Rank | Industry                                                                        | OUT   | Rank | IN    | Rank |
|----------------------------------------------|-------|------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|
| Thermal power<br>화력                          | 0.152 | 7    | 0.389 | 1    | Central bank and depository<br>institutions<br>중앙은행 및 예금취급기관                    | 0.165 | 6    | 0.083 | 10   |
| Heavy oil<br>중유                              | 0.029 | 10   | 0.156 | 8    | Other financial intermediaries<br>기타 금융중개기관                                     | 0.06  | 9    | 0.219 | 5    |
| Electric wires and cables<br>전선 및 케이블        | 0.023 | 11   | 0.227 | 4    | Market research and business<br>support services<br>시장조사 및 경영지원서비스              | 0.338 | 3    | 0.302 | 2    |
| City gas<br>도시가스                             | 0.371 | 2    | 0.051 | 11   | Other business support services<br>기타 사업지원서비스                                   | 0.198 | 5    | 0.193 | 6    |
| Road freight transport services<br>도로화물운송서비스 | 0.094 | 8    | 0.13  | 9    | Wholesale and retail trade and<br>commodity brokerage services<br>도소매 및 상품중개서비스 | 0.507 | 1    | 0.187 | 7    |
| Restaurants and food services<br>일반음식점       | 0.259 | 4    | 0.26  | 3    |                                                                                 |       |      |       |      |

원료의 유형보다는 산업생태계 전반에서 재화와 서비스, 기업활동을 지원하는 생산자 서비스 성격의 산업으로 분석된다.

반면 다른 산업으로부터 영향을 받는 내향 연결이 높은 산업은 화력, 시장조사 및 경영지원서비스, 일반음식점, 전선 및 케이블, 기타 금융중개기관 순으로 분석되었다. 화력 부문을 제외한 상위 산업은 대체로 대규모 발전업의 안정적 가동을 위한 운영지원 및 복리후생 등의 수요가 반영된 결과로 해석된다. 특히 시장조사 및 경영지원서비스와 일반음식점은 외향과 내향의 연결이 모두

높은 것으로 나타났으며, 네트워크 내에서 산업 간의 연결을 매개하는 핵심산업으로 파악된다. 네트워크에서 유일한 제조 부문인 전선 및 케이블의 경우 화력발전이 신규 플랜트 건설을 위한 활용보다는 노후설비의 교체나 전력망 유지보수의 수요에 기인한 것으로 보인다. 정리하면 화력발전 산업생태계는 신규 설비 확장보다는 기존 시설의 효율적 관리와 운영에 자원이 집중된 성숙기 산업구조를 갖는 것으로 해석할 수 있다.

다음으로 <표 3>은 신재생에너지 산업생태계의 분석결과로,

Table 3. Degree centrality of the renewable energy value chain

| Industry                                                         | OUT   | Rank | IN    | Rank | Industry                                                       | OUT   | Rank | IN    | Rank |
|------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|----------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|
| Renewable energy<br>신재생에너지                                       | 0.219 | 45   | 0.948 | 2    | Industrial boilers and steam generators<br>산업용 보일러 및 증기발생기     | 0.016 | 66   | 0.770 | 7    |
| Thermal power*<br>화력                                             | 1.520 | 4    | 0.443 | 42   | Stamped metal products<br>금속압형제품                               | 0.127 | 58   | 0.865 | 3    |
| Heavy oil*<br>중유                                                 | 0.130 | 57   | 0.392 | 48   | Metal treatment<br>금속처리                                        | 0.596 | 18   | 0.664 | 24   |
| Electric wires and cables*<br>전선 및 케이블                           | 0.319 | 34   | 0.863 | 4    | Machined metal products<br>금속처리 가공품                            | 0.712 | 12   | 0.721 | 16   |
| City gas*<br>도시가스                                                | 1.093 | 8    | 0.072 | 66   | Screws and wire products<br>나사 및 철선제품                          | 0.291 | 39   | 0.671 | 22   |
| Road freight transport services*<br>도로화물운송서비스                    | 1.019 | 9    | 0.619 | 29   | Other fabricated metal products<br>기타 금속제품                     | 0.189 | 51   | 0.674 | 21   |
| Restaurants and food services*<br>일반음식점                          | 1.291 | 5    | 0.618 | 30   | Discrete devices<br>개별소자                                       | 0.173 | 52   | 0.290 | 54   |
| Central bank and depository institutions*<br>중앙은행 및 예금취급기관       | 1.127 | 7    | 0.183 | 63   | Measuring and analyzing instruments<br>측정 및 분석기기               | 0.271 | 41   | 0.410 | 47   |
| Other financial intermediaries*<br>기타 금융중개기관                     | 0.300 | 37   | 0.513 | 34   | Motors and generators<br>발전기 및 전동기                             | 0.154 | 55   | 0.468 | 39   |
| Market research and business support services*<br>시장조사 및 경영지원서비스 | 2.595 | 2    | 0.733 | 12   | Transformers<br>변압기                                            | 0.053 | 63   | 0.694 | 20   |
| Other business support services*<br>기타 사업지원서비스                   | 0.939 | 10   | 0.438 | 44   | Batteries<br>전지                                                | 0.641 | 15   | 0.373 | 49   |
| Beans and pulses<br>콩류                                           | 0.044 | 65   | 0.293 | 53   | Other electrical equipment<br>기타 전기장비                          | 0.345 | 33   | 0.793 | 5    |
| Fresh meat<br>도축육                                                | 0.218 | 46   | 1.142 | 1    | Pumps and compressors<br>펌프 및 압축기                              | 0.117 | 60   | 0.723 | 14   |
| Fats and oils<br>유지                                              | 0.205 | 48   | 0.569 | 32   | Bearings, gears and driving elements<br>베어링, 기어 및 동력전달장치       | 0.127 | 58   | 0.782 | 6    |
| Prepared animal feeds<br>사료                                      | 0.587 | 19   | 0.513 | 34   | Motor vehicle parts<br>자동차 부품품                                 | 0.658 | 14   | 0.722 | 15   |
| Other wooden products<br>기타 목제품                                  | 0.052 | 64   | 0.740 | 9    | Contract Manufacturing<br>제조임가공서비스                             | 1.944 | 3    | 0.546 | 33   |
| Corrugated paper and paper products<br>골판지 및 골판지가공품              | 0.223 | 44   | 0.634 | 26   | Repair of industrial machinery and equipment<br>산업용 기계 및 장비 수리 | 0.260 | 42   | 0.278 | 57   |

다음 페이지에 계속(Continue on next page)

| Industry                                                                         | OUT   | Rank | IN    | Rank | Industry                                                                          | OUT   | Rank | IN    | Rank |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|
| Diesel oil<br>경유                                                                 | 0.741 | 11   | 0.127 | 65   | Materials recycling services<br>자원재활용서비스                                          | 0.416 | 29   | 0.624 | 28   |
| Basic aromatic chemicals<br>방향족 기초유분                                             | 0.405 | 31   | 0.203 | 61   | Warehousing and storage services<br>보관 및 창고서비스                                    | 0.410 | 30   | 0.734 | 11   |
| Other basic organic chemicals<br>기타 기초유기화합물                                      | 0.216 | 47   | 0.600 | 31   | Other services incidental to<br>transportation<br>기타 운송 관련 서비스                    | 0.611 | 17   | 0.627 | 27   |
| Industrial gases<br>산업용 가스                                                       | 0.469 | 24   | 0.499 | 36   | Transport services of parcels<br>소화물전문운송서비스                                       | 0.260 | 42   | 0.740 | 9    |
| Basic inorganic chemicals<br>기초무기화합물                                             | 0.310 | 36   | 0.264 | 58   | Accommodation<br>숙박                                                               | 0.099 | 61   | 0.457 | 41   |
| Synthetic resins<br>합성수지                                                         | 0.571 | 20   | 0.416 | 46   | Information services<br>정보제공서비스                                                   | 0.292 | 38   | 0.320 | 52   |
| Other chemical products<br>기타 화학제품                                               | 0.431 | 27   | 0.469 | 38   | Other IT services<br>기타 IT서비스                                                     | 0.522 | 21   | 0.442 | 43   |
| Primary plastic products<br>플라스틱 1차 제품                                           | 0.163 | 53   | 0.747 | 8    | Renting of non-residential buildings<br>비주거용 건물 임대                                | 1.129 | 6    | 0.283 | 56   |
| Steel bars and rods<br>철근 및 봉강                                                   | 0.149 | 56   | 0.729 | 13   | Legal and accounting services<br>법무 및 회계서비스                                       | 0.515 | 22   | 0.191 | 62   |
| Copper smelting, refining and alloy<br>products<br>동 제련, 정련 및 합금제품               | 0.679 | 13   | 0.148 | 64   | Engineering related services<br>공학 관련 서비스                                         | 0.425 | 28   | 0.356 | 50   |
| Primary copper products<br>동 1차 제품                                               | 0.462 | 25   | 0.699 | 19   | Scientific and technical services<br>과학기술서비스                                      | 0.396 | 32   | 0.227 | 60   |
| Structural metal products<br>구조물용 금속제품                                           | 0.059 | 62   | 0.641 | 25   | Other professional services<br>기타 전문서비스                                           | 0.313 | 35   | 0.472 | 37   |
| Wholesale and retail trade and<br>commodity brokerage services*<br>도소매 및 상품중개서비스 | 4.049 | 1    | 0.461 | 40   | Leasing of equipment and<br>intellectual property<br>장비·용품 및 지식재산권 임대             | 0.622 | 16   | 0.436 | 45   |
| Automatic regulating and<br>controlling instruments<br>자동조정 및 제어기기               | 0.194 | 50   | 0.666 | 23   | Services auxiliary to financial and<br>insurance services<br>금융 및 보험 보조서비스        | 0.272 | 40   | 0.284 | 55   |
| Electrical circuit switching and<br>connecting devices<br>전기회로 개폐 및 접속장치         | 0.200 | 49   | 0.700 | 18   | Landscaping, maintenance<br>services for business facilities<br>사업시설 유지관리 및 조경서비스 | 0.473 | 23   | 0.345 | 51   |
| Boards for electric distribution and<br>automatic control<br>배전반 및 전기자동 제어반      | 0.160 | 54   | 0.709 | 17   | Human resource provision and<br>employment placement agencies<br>인력공급 및 알선        | 0.436 | 26   | 0.232 | 59   |

\* Sectors overlapping with the thermal power value chain

외향 연결이 높은 산업은 도소매 및 상품중개서비스, 시장조사 및 경영지원서비스, 제조임가공서비스, 화력, 일반음식점 순으로 분석된다. 신재생에너지 산업생태계에서 화력은 높은 외향 연결 중심성을 보이는 것으로 나타나는데, 대형 발전사업자에게 총발 전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지로 공급하도록 의무화하는 신재생에너지공급의무화제도(RPS)로 공급의무를 지닌 화력 발전소가 신재생에너지 공급인증서(REC)를 구매하기에 나타난 결과로 해석된다. 이어서 화력발전 산업생태계에서도 나타난 도소매 및 상품중개서비스, 시장조사 및 경영지원서비스, 일반음식점 등은 신재생에너지 산업생태계에서도 최상위를 차지하였다. 이 중 보편적인 서비스를 제공하는 일반음식점을 제외하면, 나머

지 두 산업은 분류상의 명칭은 같지만, 실질적 품목과 서비스의 성질에서 화력발전과 약간의 차이가 있다. 먼저 도소매 및 상품중개서비스는 화력발전에서 거대 장치산업의 운영 및 보수를 위해 필요 물자를 전달했다면, 신재생에너지에서는 첨단소재나 태양광 모듈, 인버터, ESS(전력저장장치) 등 신규 발전원 구축을 위한 취급 품목이 재편된다. 시장조사 및 경영지원서비스는 발전소 운영을 위한 서비스에서 신재생에너지 단지 조성을 위한 타당성 평가나 주민 수용성 조사 등 개발 중심의 지식서비스가 더 해질 것으로 예측된다. 다음으로 제조임가공서비스로 볼 때 태양광·풍력·수력 등 발전 설비의 부품 제조 공정이 상당 부분 위탁가공형태로 이뤄지고 있음을 알 수 있으며, 외향 연결이 높은 산업은 기

존 화력발전 기반산업이 제공하는 품목과 서비스가 재편되고 새로운 제조 산업이 결합한 구조로 정리된다.

내향 연결에서는 도축육, 신재생에너지, 금속압형제품, 전선 및 케이블, 기타 전기장비 순으로 높게 분석된다. 특징적으로 신재생에너지보다 도축육의 내향 연결이 높게 나타났는데, 도축 과정에서 발생하는 부산물과 폐기물이 바이오가스 및 바이오매스 발전의 주된 원료로 사용되는 비중이 높기 때문으로 풀이된다. 다음으로 금속압형제품, 전선 및 케이블, 기타 전기장비 등은 운영 중심의 화력발전 산업생태계와 달리 태양광 구조물이나 풍력 등의 설치나 전력변환 장치 구축 등 신규 설비 건설을 위해 활용되는 성장기 산업의 특성을 보이는 것으로 해석된다. 그밖에 신재생에너지는 화력발전과 달리 다양한 제조업, 서비스업, 기초화학소재, 농축산업, 연구개발, 금융 등이 더해진 산업생태계로 구성된다.

화력발전과 신재생에너지 산업생태계의 네트워크 시각화 자료를 비교하면, 두 산업생태계의 구조가 명확하다. <그림 2>는 두 산업생태계 네트워크를 시각화하여 비교한 결과로, 여기서 네트워크 밀도는 산업 간의 응집력을 나타내는 지표이며 밀도가 높을수록 산업 간의 연계성이 더 높은 것을 의미한다. 화력발전의 네트워크 밀도는 0.02, 신재생에너지는 0.008로 화력발전 산업생태계가 더 높은 산업 간 연계성을 나타낸다. 이러한 결과는 앞선 연결 중심성과 같이 화력발전은 신규 건설이나 대규모 투자가 거의 없는 산업의 성숙단계에 있어, 전력생산 및 유지보수 중심의 고착된 거래 관계만 맺고 있는 것으로 해석된다. 반면 신재생에너지는 산업이 성장하는 단계에 있어, 투자나 건설, R&D 등 다양한 산업이 연결되어 비교적 낮은 네트워크 밀도를 갖는다.

주목할 점으로 화력발전의 산업생태계를 구성하는 11개 산업이 모두 신재생에너지 산업생태계에 포함된 것이다. 이는 신재생에너지가 화력발전과 단절된 이질적 산업생태계가 아닌, 기존 에너지 산업의 기반을 포섭하여 확장하는 구조적 재편임을 시사한다. 산업부문 분류체계 내에서 볼 때 화력발전 산업생태계에 대한 지원정책은 공급망 붕괴를 방지하는 것을 넘어, 이들이 보유한 기술과 인프라가 신재생에너지 공급망에 원활하게 편입할 수

있는 방향으로 제시되어야 한다.

다음으로 신재생에너지 산업생태계 66개 산업을 CONCOR 군집 분석을 수행하였다. 해당 군집화 방식은 산업 간 투입-산출의 상관관계를 반복적으로 계산하여, 산업생태계 내의 실질적인 거래 패턴과 기능적 하위구조를 명확하게 구분할 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 군집의 분할 수준(Level)을 3단계로 설정하여 8개의 군집으로 구분하였으며, 군집의 분해 수준 적합도를 비교한 결과는 <표 4>와 같다.

군집 내 평균 밀도는 군집에 속한 산업 간 연결의 응집도를 의미하며, 군집 간 평균 밀도는 다른 군집과의 연결 강도를 나타낸다. 그리고 대비비의 값이 클수록 군집 내부의 응집력은 크고, 군집 간의 연결은 낮아 구조적 분리가 뚜렷하게 이루어 짐을 의미한다. 2단계 분해 수준에서 군집 내 평균 밀도는 0.013으로 신재생에너지 전체의 네트워크 밀도 0.008보다 높은 수준으로 유의미한 군집화를 나타낸다. 3단계 분해 수준은 2단계보다 군집 내 평균 밀도, 대비비, 설명력( $R^2$ ) 모두 유의미하게 증가함으로, 3단계 분해 수준이 더 적절한 것으로 확인된다. 반면 4단계 분해 수준은 3단계에 비해 모든 수치가 유의미하게 증가하였으나, 일부 군집의 내부 밀도가 0으로 나타났다. 이는 군집을 지나치게 세분화하여 오히려 군집으로서의 의미를 잃는 과분할 상태이므로, 구조적 타당성을 저해하지 않고 신재생에너지 산업생태계의 계층적 분해 구조를 설명하는 데에는 3단계 분해 수준이 가장 최적화된 기준으로 판단된다. <그림 3>은 신재생에너지 산업생태계의 군집을 시각화한 자료로, 8개의 군집으로 구분된 구체적인 분석결과는 <표 5>와 같다.

Table 4. Comparison of fit by cluster decomposition level

| Level | Number of clusters | Within-cluster density $D_w$ | Inter-cluster density $D_b$ | $D_w / D_b$ | $R^2$ |
|-------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|-------|
| 2     | 4                  | 0.013                        | 0.008                       | 1.747       | 0.027 |
| 3     | 8                  | 0.018                        | 0.008                       | 2.416       | 0.070 |
| 4     | 16                 | 0.037                        | 0.008                       | 4.972       | 0.226 |

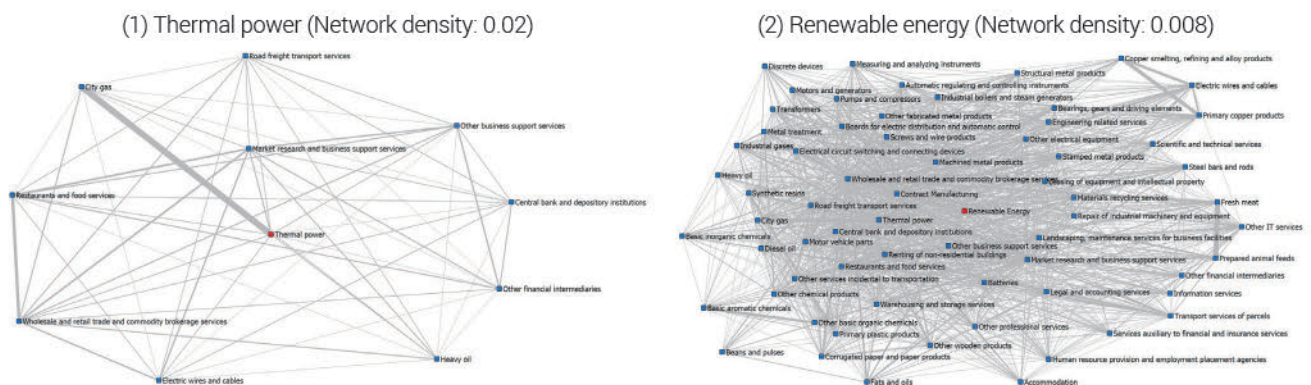


Figure 2. Network visualization of the value chains

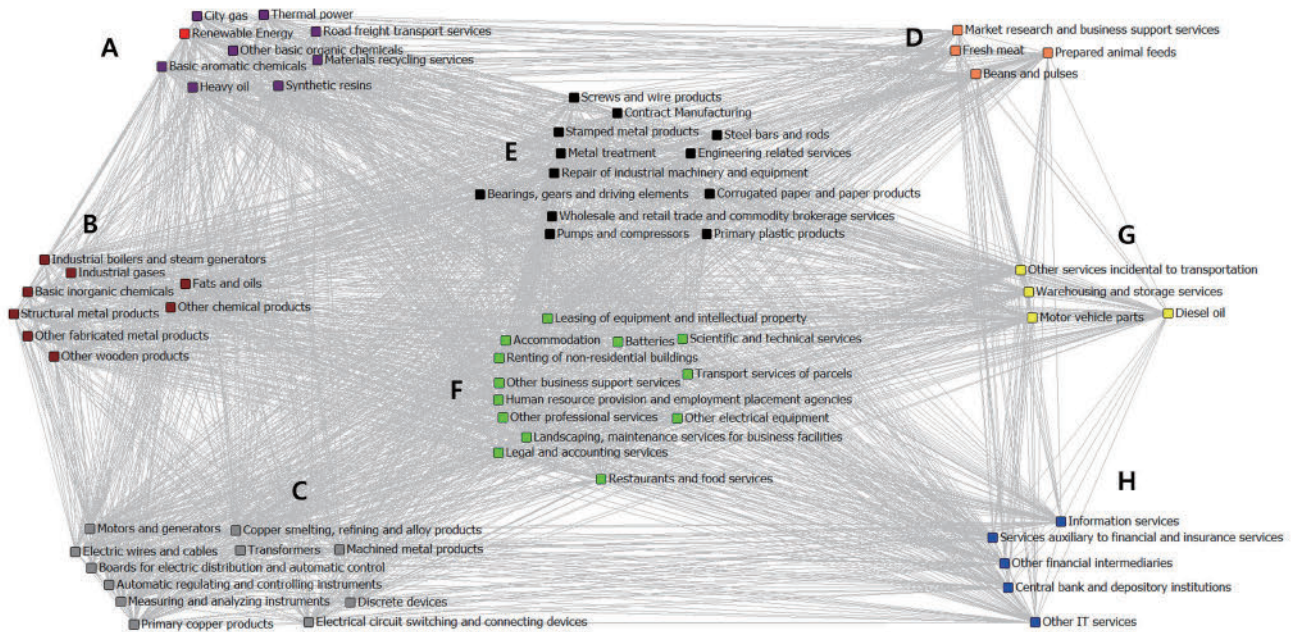


Figure 3. Cluster visualization of the renewable energy value chain

Table 5. Results of cluster analysis

| Cluster | N  | Industry type                                     | Density | OUT   | IN    | Role      | Most linked cluster (density) | Least linked cluster (density) |
|---------|----|---------------------------------------------------|---------|-------|-------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| A       | 9  | Energy supply and basic chemical materials        | 0.015   | 0.008 | 0.007 | Driving   | G(0.013)                      | H(0.004)                       |
| B       | 8  | Plant infrastructure and industrial equipment     | 0.004   | 0.003 | 0.010 | Dependent | E(0.011)                      | C, H(0.004)                    |
| C       | 11 | Power transmission and distribution facilities    | 0.014   | 0.003 | 0.008 | Dependent | E(0.009)                      | H(0.003)                       |
| D       | 4  | Bioenergy feedstock and business support services | 0.05    | 0.012 | 0.008 | Driving   | G(0.014)                      | C(0.006)                       |
| E       | 12 | Machinery components and engineering              | 0.016   | 0.010 | 0.009 | Driving   | D(0.012)                      | H(0.005)                       |
| F       | 13 | Professional services and R&D                     | 0.01    | 0.009 | 0.007 | Driving   | D(0.013)                      | B, C(0.005)                    |
| G       | 4  | Logistics and transportation support              | 0.012   | 0.009 | 0.010 | Dependent | D(0.014)                      | C(0.004)                       |
| H       | 5  | Financial and knowledge-based services            | 0.025   | 0.007 | 0.006 | Driving   | F(0.01)                       | C(0.003)                       |

군집에 속한 산업은 유사한 투입-산출 패턴을 공유하는 구조적 동위성을 갖는 산업들의 집합이다. 본 연구는 산업 간 구조적 유사성을 기능적 산업군으로 해석하기 위해, 각 군집에 포함된 산업들이 실제 신재생에너지 공급망 내에서 어떤 역할을 공동으로 수행하는지 교차 검증하여 각 군집의 유형을 정의하였다. 표에서 군집 밀도는 해당 군집에 속한 산업 간의 응집력의 수준을 의미한다. 그리고 군집 간 관계에서 외향(OUT)은 해당 군집이 전체 다른 군집에 미치는 평균 연계 강도를, 내향(IN)은 전체 다른 군집으로부터 영향을 받는 평균 연계 강도를 나타낸다. 이를 기준으로 외향 밀도가 내향 밀도보다 높으면 다른 군집에 영향력이 우세한 영향 확산형(Driving)이며, 반대의 경우는 영향 수용형(Dependent) 군집으로 정의할 수 있다. 또한 전체 군집에 대한 평균적 영향력을 넘어 특정 군집과 1대1 연계구조를 파악하기 위해, 각 군집의 연결 밀도가 가장 높은 군집과 가장 낮은 군집을 각

각 추출하였다.

먼저 다른 군집에 미치는 영향력이 우세한 영향 확산형 군집은 에너지 공급 및 기초화학 소재(A), 바이오 에너지 원료 및 경영지원(D), 기계부품 및 엔지니어링(E), 전문서비스 및 R&D(F), 금융 및 지식서비스(H) 등이 포함된다. 이들은 네트워크에서 자원, 에너지, 핵심부품, 서비스 등을 외부로 확산시키는 기능을 수행하며, 다른 산업의 생산을 촉진하는 확산 허브로 작동한다. 군집들의 내부 밀도를 살펴보면, 5개 군집 모두 전체 네트워크의 평균 밀도인 0.008보다 높아, 군집 내 산업 간 긴밀한 응집도를 갖는 것으로 나타난다. 특히 D 군집은 전체 8개 군집 중 가장 높은 0.05의 내부 응집도를 보인다. 이는 군집을 구성하는 산업에서 콩류가 사료의 원료가 되고 사료가 다시 도축육 생산의 필수재로 투입되는 가치사슬이 형성되며, 시장조사 및 경영지원서비스가 산업 간 조달·생산·유통 등을 매개하기 때문에 산업 간 상호의존성

이 극대화한 것으로 해석된다. 물론 현재까지 바이오 에너지의 비중은 높지 않지만, 투자가 확대될 때 성장의 파급효과가 큰 잠재력 높은 군집으로 평가할 수 있다.

5개의 확산형 군집의 다른 군집과의 연계성을 보면, A와 D 군집은 물류 및 수송지원(G) 군집에 가장 높은 연계성을 보인다. A와 D 군집의 주요 생산품인 기초화학 소재(A) 및 바이오 원료(D) 등은 전문적인 저장시설, 특수 물류 등을 필요로 하며, 이와 같은 이유로 G 군집에 강하게 연계되는 것으로 해석된다. 다음으로 E와 F 군집은 바이오 에너지 원료 및 경영지원(D)에 가장 높은 연계성을 나타내는데, D 군집의 바이오 원료 가공·생산에 E 군집의 자동화 설비와 F 군집의 기술 및 경영 컨설팅 등을 동반하기에 나타난 결과로 추측된다. 또한 D 군집에 시장조사 및 경영지원서비스가 다양한 사업체의 운영을 지원하여, 외부 군집과의 연계를 활발하게 촉진하는 것으로 해석된다.

그 외 금융 및 지식서비스의 H 군집은 성격이 유사한 전문서비스 및 R&D(F) 군집에 가장 긴밀하게 연계되었으나, A, E 군집 등에서 가장 연계가 낮은 군집으로 지목하였다. 이는 금융 및 지식산업이 물리적 연계보다는 자본과 정보를 매개하는 생산자 서비스의 성격이 강해 물리적 제조기반의 산업 군집과는 상대적으로 느슨한 연계구조를 형성하는 것으로 풀이된다. 한편, D, F, H 군집은 공통으로 전력 송배전 설비(C) 군집을 가장 낮은 연계 군집으로 지목하였다. 전력 송배전 설비는 전력망 구축단계나 송배전에 필요한 기계부품 산업과의 제한적으로 거래될 뿐, 다른 산업의 생산활동에 직접 투입되는 경우가 적어 상대적으로 고립된 군집을 형성하는 것으로 해석된다. 산업생태계의 동반 성장을 위해서는 공동 기술개발이나 표준화된 발전소 설계 등을 통해 고립된 군집과의 연계방안을 촉진해야 함이 제시된다.

반대로 내향 밀도가 높아 다른 군집에 영향을 받는 영향 수용형 군집은 플랜트 인프라 및 산업용 기자재(B), 전력 송배전 설비(C), 물류 및 수송지원(G) 등으로 나타난다. 영향 수용형 군집은 네트워크 구조상 외부 영향에 대한 의존도가 높으며, 대체로 다른 산업의 생산활동에 필요한 기반시설 구축, 설비, 물류 지원 등의 기능을 담당한다. 각 군집의 내부 밀도를 살펴보면, C와 G 군집은 전체 네트워크의 평균 밀도(0.008)보다 높아 군집 내 높은 응집도를 보이지만, B 군집은 0.004로 평균 밀도보다 낮은 수준을 보인다. 이는 군집 내 산업들이 상호 긴밀한 관계를 맺기보다는, 발전소 건설 및 운영지원의 공통된 기능을 수행하기 위해 기능적으로 유형화되었기 때문이다. 외부 연계성에서 B 군집은 전력 및 송배전 설비(C)와 금융 및 지식서비스(H) 군집을 가장 연계가 낮은 군집으로 지목하였으며, C 군집은 H 군집을, G 군집은 C 군집을 가장 낮은 연계 군집으로 지목하였다.

네트워크 전체로 볼 때, 전력 송배전 설비(C)와 금융 및 지식서비스(H) 군집은 대부분의 군집에서 가장 연계가 낮은 군집으로 지목되며, 군집 간 연계 밀도가 모두 전체 네트워크의 평균 밀도

(0.008)보다 낮은 0.003~0.006 사이의 값들로 나타났다. 이는 앞선 설명과 같이 C 군집은 전력망 구축단계 외에는 다른 군집과 상시적인 거래가 제한적인 폐쇄적 생태계를 형성하며, H 군집은 생산공정에 직접 활용되기보다는 비물리적 서비스의 특성으로 네트워크에서 생산기반의 군집과 구조적으로 분리된 위치에 있는 것으로 해석된다.

분석결과를 정리하면, 신재생에너지의 산업생태계는 에너지·바이오·기계·전문 서비스(A, D, E, F) 중심의 확산형 군집과 인프라·물류(B, G) 중심의 수용형 군집으로 구분할 수 있다. 특히 바이오 에너지 원료 및 경영지원의 D 군집은 내부 응집도가 가장 높으면서, 기계(E), 서비스(F), 물류(G) 등과 높게 연계되는 것으로 나타났다. 향후 네트워크 확장을 주도할 핵심적인 잠재허브로 기능할 가능성이 시사된다.

반면 전력 송배전 설비(C)와 금융 및 지식서비스(H) 군집은 다른 군집이 가장 낮은 연계 군집으로 지목하여 상대적으로 고립된 형태를 나타내었다. 신재생에너지가 빠르게 확대되고 있는 상황에서 특정 군집의 고립이 지속된다면, 생산된 에너지가 원활히 유통되지 못하거나, 투자가 지연되는 산업생태계의 병목현상이 작용할 우려가 있다. 또한 플랜트 인프라 및 산업용 기자재(B)는 군집 내 응집도가 평균보다 낮아, 산업 간의 유기적 협력보다는 개별 산업으로 흩어진 구조를 보였다. 군집 내 응집력이 약할 경우, 신재생에너지 시장이 확대되더라도 그 파급효과가 군집에 속한 국내 산업으로 온전히 흡수되지 못하고, 핵심부품과 기술 등을 해외에 의존하는 한계가 따를 수 있다.

따라서 신재생에너지 산업생태계 육성전략은 특정 주도산업의 양적 성장에 편중되기보다는 고립된 군집의 네트워크 연계를 촉진하는 방안이 시사된다. 아울러 내부 응집력이 약한 군집에 대해서는 산업 간 연계성을 높이고, 각 군집의 역할과 기능에 최적화된 맞춤형 전략을 수립하여 산업생태계 전반에 균형적 성장을 도모하는 접근이 제시된다.

## V. 결론

기후위기에 대응하기 위한 화력발전의 단계적 폐쇄와 신재생에너지 보급확대 정책은 빠르게 추진되고 있다. 에너지 전환정책은 단순한 발전원의 교체를 넘어, 두 에너지 산업의 공급망인 산업생태계의 연쇄적 쇠퇴와 성장의 구조적 재편을 의미한다. 에너지 전환은 국토 공간과 지역 경제를 기반으로 형성되기 때문에, 두 산업생태계의 구조적 특성을 살피는 것은 국토 및 지역계획 수립에 필수 전제조건이 된다. 이러한 배경에서 본 연구는 산업연관분석의 레온티에프 역행렬과 사회연결망분석(SNA)을 결합한 투입-산출 네트워크를 통해 화력발전과 신재생에너지 산업생태계를 각각 도출하여 비교하였다. 그리고 신재생에너지의 효율적인 육성방안을 모색하기 위해 신재생에너지 산업생태계를 군집

화하여 연계성 측면을 강조한 발전 방향을 제시하였다.

분석결과 화력발전의 11개, 신재생에너지는 66개의 산업으로 구성된 산업생태계가 도출되었고, 네트워크 밀도는 각각 0.02, 0.008로 화력발전의 산업생태계가 더 응집된 구조로 나타났다. 화력발전의 경우 신규 건설이나 대규모 투자가 거의 없는 성숙기 산업 단계에 있어, 공급망 산업들이 더 높은 응집도를 보이는 것으로 해석된다. 반면 신재생에너지는 산업이 성장하는 단계에 있어 새로운 투자나 건설 등이 활발하며 제조, 서비스, 기초화학소재, 농축산업, 연구개발, 금융 등이 더해진 산업생태계를 구성하기 때문에, 산업 간 응집도가 상대적으로 낮은 것이다. 주목할 점은 화력발전 산업생태계를 구성하는 11개 산업 모두가 신재생에너지 산업생태계에 포함된 것으로, 신재생에너지가 화력발전과 이질적인 공급망을 구성하는 것이 아니라, 기존 에너지 산업기반을 포섭하여 확장하는 구조임을 시사한다.

다음으로 신재생에너지 산업생태계의 군집화 분석결과 총 8개의 군집으로 분해되었다. 구성된 산업을 바탕으로 군집의 유형을 정의하였으며, 다른 군집에 주는 영향이 높은 군집을 영향 확산형, 반대로 다른 군집으로부터 받는 영향이 높은 군집을 영향 수용형 군집으로 구분하였다. 영향 확산형의 군집은 에너지 공급 및 기초화학소재(A), 바이오 에너지 원료 및 경영지원(D), 기계 부품 및 엔지니어링(E), 전문서비스 및 R&D(F), 금융 및 지식서비스(H) 등이며, 영향 수용형 군집은 플랜트 인프라 및 산업용 기자재(B), 전력 송배전 설비(C), 물류 및 수송지원(G) 등이다. 분석결과를 바탕으로 제시한 시사점은 다음과 같다.

첫째, 화력발전의 공급망이 모두 신재생에너지 산업생태계에도 온전히 포함된다는 점은 에너지 전환이 기존 공급망의 쇠퇴가 아니라, 새로운 산업이 결합하여 확장되는 구조적 재편임을 시사한다. 특히 두 산업생태계 모두에서 높은 외향 연결성을 보인 도소매 및 상품중개서비스와 시장조사 및 경영지원서비스는 에너지 전환에 따라 '첨단기자재 유통', '고도화된 지식서비스 제공' 등 실질적인 질적 변화가 요구된다. 따라서 기존 화력발전의 공급망 기업들이 질적 전환을 성공적으로 이행하여 신재생에너지 공급망으로 원활하게 편입할 수 있도록 돕는 맞춤형 정책지원이 마련되어야 한다. 구체적으로 기존 공급망 기업이 신재생에너지 공급사로 진입할 수 있도록 돕는 사업재편 금융·세제 지원이나 화력발전 유통업체 우선의 B2B 매칭 지원 등 실효성 있는 정책수단을 생각해볼 수 있다.

둘째, 군집화 분석결과 바이오 에너지 원료 및 경영지원(D) 군집은 전체에서 가장 높은 내부 응집도를 나타내었다. 군집에 속한 콩류, 사료, 도축육은 바이오 원료로 활용되며, 이를 사업화하는 시장조사 및 경영지원서비스가 결합하여 원료 생산부터 사업화에 이르는 견고한 가치사슬이 형성된 것으로 해석된다. 현재는 바이오 에너지가 차지하는 비중이 적고, 이들 원료의 투입 비중은 미미한 수준이지만, 강하게 응집된 내부 네트워크는 향후 바

이오 에너지 관련 투자가 확대될 때 집약적으로 성장할 것으로 예측된다. 또한 바이오 에너지 원료 및 경영지원 군집은 기계부품 및 엔지니어링(E), 전문서비스 및 R&D(F), 물류 및 수송지원(G) 등과도 가장 활발한 연계성을 나타낸다. 향후 바이오 에너지에 대한 투자가 확대될 때 산업생태계에서 자원의 흐름을 다른 산업에 파급할 수 있는 가장 잠재력이 높은 매개 군집으로 해석된다. 그러나 이해정 외(2020)의 연구에서 지적인 바와 같이, 바이오 발전소는 타 재생에너지원 대비 주민 수용성이 가장 낮은 기피시설로 인식되고 있다. 따라서 바이오 에너지 확대정책은 산업생태계의 육성뿐만 아니라, 환경성을 고려한 입지 선정, 주민참여 모델 도입, 이익 공유제 등을 통해 사회적 갈등을 예방하는 상생의 전략이 병행되어야 함이 시사된다.

셋째, 전력 송배전 설비(C)와 금융 및 지식서비스(H) 군집은 네트워크에서 상대적으로 낮은 연결성을 보이며 구조적으로 고립된 특성을 나타냈다. 허성운 외(2016)는 그리드 패리티(Grid Parity) 달성을 위해 기술요인의 발전을 통한 발전단가의 하락이 필수적임을 강조하였다. 그러나 발전 설비의 효율성 향상과 기술적 비용 절감이 이루어지더라도, 이를 뒷받침하는 전력망 인프라와 금융·자본 조달 체계가 충분히 연계되지 않으면, 기술적 성과가 시장 경쟁력으로 온전하게 이어지는 데 한계가 발생할 수 있다. 따라서 실질적인 그리드 패리티 달성을 위해서는 비용 절감을 위한 기술 육성과 더불어, 송배전 인프라의 선제적 확충과 금융 접근성을 높이는 연계 정책이 병행되어야 함을 시사한다.

마지막으로 플랜트 인프라 및 산업용 기자재(B) 군집의 산업 간 밀도는 전체 네트워크 평균의 절반 수준에 머무르는 낮은 응집도를 보였다. 특정 군집 내 이러한 낮은 결속력은 해외기업과의 경쟁에서 국내 공급망의 취약성으로 직결될 우려가 있고, 안상욱(2016)에서 지적한 특정 국가로의 산업주도권 편중 현상을 야기할 수 있다. 따라서 신재생에너지 확대가 국내 산업의 부가가치로 이어지기 위해서는 핵심 기자재의 국산화율 제고와 개별 기업 간의 기술협력을 강화하는 클러스터링 육성전략이 제시된다.

본 연구는 투입-산출 네트워크 분석으로 화력발전과 신재생에너지 산업생태계를 비교하고 군집화를 통해 신재생에너지 육성 방안을 제시하였다. 그러나 한국은행에서 제공하는 산업연관표의 부문 분류체계 내에서 결과를 해석하여 동일 분류에 포함된 산업들의 이질적인 속성을 완벽하게 분리하지 못한 한계가 있다. 그리고 신에너지의 제한적인 규모로 인해 재생에너지와 통합한 부문 분류는 각 에너지원의 고유한 공급망을 세밀하게 살피지 못하였고, 지역산업의 공간적 분포 특성을 반영하지 못한 점도 아쉬움으로 남는다. 후속연구는 동일 부문 내 산업의 속성을 반영할 수 있는 지표를 반영해볼 필요가 있으며, 신에너지와 재생에너지를 구분하여 각각의 산업생태계의 육성방안을 제시할 필요가 있다. 지역표를 활용하여 화력발전소가 밀집한 지역의 공간적 특성을 반영한 연구도 제시된다. 아울러 방법론적 측면에서 본

연구는 번복점을 식별하여 전역 임계값으로 분석 범위를 제안하였지만, 임계값 시나리오에 따른 네트워크 구조의 변동성을 검증하는 추가적 연구가 제시된다. 나아가 기존 화력발전의 공급망이 신재생에너지 생태계로 전환할 때 재화나 서비스의 변화를 추적할 수 있는 국가 차원의 면밀한 공급망 실태조사가 병행되어야 할 것이다. 마지막으로 본 연구에 활용된 2023년 국가산업연관표는 간접추계 방식의 연장표로 한국은행에서 생산자가격만을 제공하고 있어, 다른 가격체계의 결과와 급변하는 산업구조의 변화를 온전히 반영하지 못한 아쉬움이 있다. 향후 연구에서는 최신 실측 데이터를 반영한 동태적 분석으로 연구의 범위를 확장할 필요성이 있다.

그럼에도 본 연구는 기존 산업연관분석의 양적 파급효과에 국한되던 한계를 넘어, 네트워크 분석을 접목한 방법론을 통해 산업 간의 연결 관계와 산업생태계의 구조적 특성을 규명한 점에서 의의가 있다. 분석결과는 화력발전 공급망의 안정적 연착륙 방안과 신재생에너지 산업생태계의 구체적인 육성정책 방안을 제시하였다. 본 연구가 제시한 분석의 틀과 결과가 향후 산업생태계의 유기적 연결을 강조하는 맞춤형 에너지 전환정책 및 국토 공간 계획 수립의 실증적 근거자료로 활용되기를 기대한다.

## 인용문헌

## References

- 강지은·이중호·박중구, 2017. “한국 신재생에너지발전과 화력발전의 경제적 파급효과 비교분석”, 『에너지공학』, 26(3): 51-63.
- Kang, J.E., Lee, J.H., and Park, J.G., 2017. “A Comparative Analysis on the Economic Effects Between New and Renewable- and Thermal- Power Generation in Korea”, *Journal of Energy Engineering*, 26(3): 51-63.
- 권승문·김하나·전의찬, 2016. “신재생에너지산업의 경제적 파급효과 분석”, 『한국기후변화학회지』, 7(1): 59-68.
- Kwon, S.M., Kim, H.N., and Jeon, E.C., 2016. “A Study on the Economic Effects of Renewable Energy Industry”, *Journal of Climate Change Research*, 7(1): 59-68.
- 김종완·박상철, 2016. “의무할당제도 개선을 통한 신재생에너지 산업의 발전 전략: 태양광, 풍력에너지 중심”, 『에너지공학』, 25(4): 110-123.
- Kim, J.W. and Park, S.C., 2016. “Development Strategy of the Renewable Energy Industry through Improvement of Renewable Portfolio Standard: Focused on Photovoltaic and Wind”, *Journal of Energy Engineering*, 25(4): 110-123.
- 김용학·김영진, 2016. 『사회연결망 분석』, 서울: 박영사.
- Kim, Y.H. and Kim, Y.J., 2016. *Social Network Analysis*, Seoul: Pybook.
- 노재환, 2024. “네트워크 중심성으로 살펴본 우리나라 산업 연관관계”, 『지능정보연구』, 30(1): 201-217.
- Roh, J.H., 2024. “A Research on South Korea's Industrial Interrelationships through Network Centrality”, *Journal of Intelligence and Information Systems*, 30(1): 201-217.
- 박문수·이동희·최지아, 2017. “대구경북지역의 제조업과 서비스업간 연계성 분석: 지역 산업네트워크 구조를 중심으로”, 『한국지역개발학회지』, 29(1): 99-119.
- Park, M.S., Lee, D.H., and Choi, J.A., 2017. “Analysis on the Industrial Linkages between Manufacturing and Service Sector in Daegu and Gyeongbuk Region”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 29(1): 99-119.
- 박민석·김정태, 2025. “수산업 중심의 한 산업생태계의 전·후방 연계구조 분석: 산업연관표 기반 네트워크 접근”, 『해양정책연구』, 40(2): 25-53.
- Park, M.S. and Kim, J.T., 2025. “A Study on Forward and Backward Linkage Structures in the Fisheries Industry Value Chain: Network Analysis Using Input-Output Tables”, *Ocean Policy Research*, 40(2): 25-53.
- 변장섭, 2016. “산업연관표를 이용한 해운물류업의 산업간 연계구조 - 사회네트워크분석을 중심으로”, 『해운물류연구』, 32(3): 435-455.
- Byun, J.S., 2016. “Interindustrial Linkages of the Shipping and Logistics Industry: A Social Network Analysis Using Input-output Tables”, *Journal of Shipping and Logistics*, 32(3): 435-455.
- 산업통상자원부, 2025. 『제11차 전력수급기본계획(2024~2038)』, 세종.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2025. *The 11th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2024-2038)*, Sejong.
- 서영복·박찬권, 2022. “산업연관분석과 단위구조행렬을 활용한 물류산업의 산업간 연계구조와 사회연결망에 대한 연구: 창고 및 운송 관련 서비스업을 중심으로”, 『경영연구』, 37(3): 1-24.
- Seo, Y.B. and Park, C.K., 2022. “A Study on the Inter-Industry Linkage Structure and Social Network in the Logistics Industry Using Industry Linkage Analysis and Unit Structure Matrix: Focusing on Warehousing and Transportation Related Service Industries”, *Journal of Business Research*, 37(3): 1-24.
- 안상욱, 2016. “신재생에너지 확대 정책과 문제점: 미국과 EU 사례를 중심으로”, 『유럽연구』, 34(4): 213-235.
- Ahn, S.W., 2016. “Renewable Energy Policy and its problem: Cases of USA and EU”, *Journal of Contemporary European Studies*, 34(4): 213-235.
- 이상범·이영재·이병권, 2019. 『환경·주민수용성을 고려한 재생에너지 보급 활성화 방안 연구』, 세종: 한국환경가연구원.
- Lee, S.B., Lee, Y.J., and Lee, B.K., 2019. *Study on the Measures to Increase Renewable Energy Proportion in Consideration of Environment and Resident Acceptance*, Sejong: Korea Environment Institute.
- 이혜정·허성윤·우종률·이철용, 2020. “신재생에너지발전 사업에 대한 국민 및 지역 주민 수용성 비교 연구 - 태양광, 풍력, 바이오 발전을 중심으로”, 『한국혁신학회지』, 15(1): 29-62.
- Lee, H.J., Huh, S.Y., Woo, J.R., and Lee, C.Y., 2020. “A Comparative Study on Acceptance of Public and Local Residents for Renewable Energy Projects - Focused on Solar, Wind,

- and Biomass”, *Innovation Studies*, 15(1): 29-61.
14. 임상수, 2023. “화력발전의 신재생에너지 전환에 따른 경제적 파급효과 분석”, 『자원환경경제연구』, 32(2): 127-147.  
Lim, S.S., 2023. “An Analysis of the Economic Effects of the New and Renewable Energy Transformation of Thermal Power Generation”, *Environmental and Resource Economics Review*, 32(2): 127-147.
  15. 임슬예·박소연·유승훈, 2014. “신재생에너지 부문의 경제적 파급효과 분석”, 『한국에너지학회』, 23(4): 31-40.  
Lim, S.Y., Park, S.Y., and Yoo, S.H., 2014. “The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector”, *Journal of Energy Engineering*, 23(4): 31-40.
  16. 정남철, 2022. “2050 탄소중립의 실현을 위한 신재생에너지법제의 개선방안”, 『저스티스』, 190: 5-27.  
Jung, N.C., 2022. “Improvements of the Renewable Energy Legislation for the Realization of 2050 Carbon Neutral”, *The Justice*, 190: 5-27.
  17. 정호진·임용석, 2018. “경상남도 제조업과 정보통신/과학기술서비스업의 연계성에 대한 연구: 산업네트워크 구조를 중심으로”, 『지방정부연구』, 21(4): 161-180.  
Jung, H.J. and Lim, Y.S., 2018. “A Study on the Industrial Linkages between Manufacturing and ICT/Science Technologies Service Sectors in Gyeongsangnam-do Province: Focusing on the Industrial Network Structure”, *The Korean Journal of Local Government Studies*, 21(4): 161-180.
  18. 한국에너지공단, 2024. 「2023년 신재생에너지 보급통계」, 울산.  
Korea Energy Agency, 2024. *2023 New and Renewable Energy Supply Statistics*, Ulsan.
  19. 한국은행, 2024. 「2020년 기준년 산업연관표」, 서울.  
Bank of Korea, 2024. *2020 Benchmark Input-Output Tables*, Seoul.
  20. 한국전력공사, 2025. 「2025년도판 한국전력통계(제94호)」, 나주.  
Korea Electric Power Corporation (KEPCO), 2025. *2025 KEPCO Statistics (No. 94)*, Naju.
  21. 허성윤·조만석·이용길, 2016. “다기준의사결정 기법을 이용한 신재생에너지 기술 평가의 우선순위 결정”, 『한국혁신학회지』, 11(2): 155-184.  
Huh, S.Y., Jo, M.S., and Lee, Y.G., 2016. “Multiple Criteria Decision Making for Setting Priorities of Renewable Energy Technology Assessment”, *Innovation Studies*, 11(2): 155-184.
  22. An, P., Qu, S., Yu, K., and Xu, M., 2024. “Mapping Analytical Methods between Input-output Economics and Network Science”, *Journal of Industrial Ecology*, 28(4): 648-679.
  23. Foerster, A. and Choi, J., 2017. “The Changing Input-output Network Structure of the US Economy”, *Economic Review-Federal Reserve Bank of Kansas City*, 102(2): 23-49.
  24. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M.D., Wagner, N., and Gorini, R., 2019. “The Role of Renewable Energy in the Global Energy Transformation”, *Energy Strategy Reviews*, 24: 38-50.
  25. Lee, I., Jang, S., Chung, Y., and Seo, H., 2022. “Economic Spillover from Renewable Energy Industries: An Input-output Analysis”, *International Journal of Green Energy*, 19(8): 809-817.
  26. Liu, Y., 2019. “Business Analytics on the Chinese Service Industries: Business Models and Industrial Network Analysis”, Ph.D. Dissertation, Kyung Hee University.
  27. Miller, R.E. and Blair, P.D., 2009. *Input-output Analysis: Foundations and Extensions*, Cambridge University Press.
  28. Ramírez-Álvarez, J., Chungandro-Carranco, V., Montenegro-Rosero, N., and Guevara-Rosero, C., 2024. “Central Industries in the Ecuadorian Input-output Network: An Application of Social Network Analysis”, *Networks and Spatial Economics*, 24(1): 131-164.
  29. Satopaa, V., Albrecht, J., Irwin, D., and Raghavan, B., 2011. “Finding a ‘Kneedle’ in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior”, Paper presented at the 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 166-171, Minneapolis, USA.
  30. Wang, C. and Yang, H., 2022. “A Social Network Analysis in Dynamic Evaluate Critical Industries Based on Input-output Data of China”, *PLOS One*, 17(4): e0266697.
  31. Weidong, L., Jianwu, L., Bojie, W., and Mei, H., 2022. “Review of the Input-output Network and Its Application in Energy and Mineral Industries”, *Frontiers in Energy Research*, 10: 983911.

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| Date Received              | 2026-02-23 |
| Reviewed(1 <sup>st</sup> ) | 2026-04-13 |
| Date Revised               | 2026-04-27 |
| Reviewed(2 <sup>nd</sup> ) | 2026-05-27 |
| Date Accepted              | 2026-05-27 |
| Final Received             | 2026-07-10 |