



공급망 분절화의 경제적 영향 분석방법론 연구: 핵심광물에 대한 적용

김영귀 · 최원석 · 조성훈 · 이현진 · 정민철

공급망 분절화의 경제적 영향
분석방법론 연구:
핵심광물에 대한 적용

중장기통상전략연구 24-02

공급망 분절화의 경제적 영향 분석방법론 연구: 핵심광물에 대한 적용

인 쇄 2025년 5월 7일
발 행 2025년 5월 16일
발행인 이시욱
발행처 대외경제정책연구원
주 소 30147 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 경제정책동
전 화 044) 414-1179
팩 스 044) 414-1144
인쇄처 (주)에이치에이엔컴퍼니(02-2269-9917)

©2025 대외경제정책연구원

정 가 7,000원
ISBN 978-89-322-7127-9 94320
978-89-322-7092-0 (세트)

대외경제정책연구원은 'ESG 경영' 방침에 따라
친환경 용지를 사용합니다.

국문요약

본 연구에서는 글로벌 공급망 분절화의 영향을 정량적으로 분석하기 위한 방법론을 검토하고, 이를 핵심광물 분절화 시나리오에 적용하여 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

선행연구는 크게 품목 또는 기업 단위에서 분석하는 '미시적 접근법'과 산업 또는 국가 단위에서 분석하는 '거시적 접근법'으로 구분할 수 있다. 미시적 접근법은 해당 품목이나 기업의 특성을 정확히 반영하여 현실성 높은 분석이 가능하다는 장점이 있으나, 개별 품목이나 기업의 공급망에 대한 정보 접근성이 낮아 실제 적용이 쉽지 않다는 한계가 있다. 거시적 접근법은 산업이나 국가 단위의 분석방법론을 세부 품목 단위의 공급망 분절화에 적용하려면 다소 무리한 가정이 필요하다는 한계가 있다. 소수의 핵심품목에서 발생하는 공급망 타격은 거시적 파급 영향이 지대함에도 불구하고 세부 품목 단위 분석기법은 거시적 영향을 정확히 분석하는 데 여러 가지 한계가 있다. 대표적으로 선행프로그래밍 기법을 이용하여 품목 단위 분석과 GDP를 연계하는 접근법이나 세부 산업 단위 자료를 토대로 불능투입산출분석을 통해 GDP에 미치는 영향을 추정하려는 방법이 있었으나, 이들은 경직적 투입산출 구조 등 다소 비현실적인 가정이 불가피하다는 한계가 있었다. 특히 첨단품목의 경우 복잡한 공급망 구조 내에서 품목 간의 연관성과 이러한 품목들이 최종 생산에 미치는 영향을 분석하기에는 많은 어려움이 존재한다. 이에 본 연구에서는 선행연구에서 제기하는 주요 쟁점과 파급 경로 등을 고려하여 미시적 접근에서는 기계학습(machine learning) 기법을, 거시적 접근에서는 일반균형모형인 OECD METRO 모형을 결합하는 분석방법론을 제안하였다.

미국, EU, 중국 등의 주요국은 핵심광물의 경제적 중요성을 인식하고 이를 정책적으로 관리하고 있다. 미국은 2020년 「에너지법」에 따라 국가 경제와 안보에 필수적이고 공급망 교란에 취약한 광물을 '핵심광물'에 포함하였다. EU는 2024년에 발효된 「핵심원자재법」에서 경제적 중요성과 공급망 리스크를 고려하여 '핵심원자

재'를 선정하였다. 중국은 핵심광물에 대한 명확한 법적 정의는 없으나, 수출통제 등을 통해 특정 광물의 수급 안정성 및 공급망에서 자국의 영향력을 확보 중이다. 그리고 한국은 2023년 '핵심광물 확보전략' 발표를 통해 국내 경제와 전략산업의 안정화를 위해 관리가 필요한 33종을 '핵심광물'로 지정하였으며, 특히 전기차, 이차전지, 반도체 산업과 관련된 '10대 전략 핵심광물'을 우선적으로 지정한 바 있다.

다만 한국은 주요국에 비해 부존 광물의 종류가 적은 편이며 채산성 또한 낮다. 국내 주력 산업에서 활용되는 광물 대부분을 수입에 의존하고 있는바, 한국의 핵심 광물 취약성을 분석하고, 지정학적 갈등으로 인한 핵심광물 공급망 리스크 시나리오를 개발하였다. 취약성 분석에서는 일차적으로 연간 수입액 백만 달러 이상, 특정국 수입의존도 50% 이상인 품목 중에서 무역특화지수를 고려하였다. 또 글로벌 공급망 편중도를 파악하고자 허핀달-허쉬만지수(HHI)와 국내 연간 수입액, 글로벌 연간 교역액을 비교하여 해당 광물의 국내 산업수요를 판단하였다. 분석 결과 코발트, 마그네슘, 망간, 리튬, 니오븀, 네오디뮴 등 이차전지와 전기차에 관련된 핵심광물의 글로벌 공급망 편중도가 심하였으며, 마그네슘을 제외한 나머지 품목의 국내 연간 수입액 또한 글로벌 연간 교역액의 5% 이상을 차지할 만큼, 이는 국내 산업 내 수요가 높은 광물이었다.

지정학적 갈등으로 인한 핵심광물 공급망 리스크를 살펴보고자 2017~23년 기간 7개국(한국·호주·캐나다·EU·영국·일본·미국)의 47개 핵심광물에 대한 대중국 수입 변화 사례를 조사하였다. Evenett and Fritz(2023)의 방법론을 기반으로 삼아 특정 기간 대중국 수입의 급격한 감소 빈도와 강도를 통해 공급망 리스크를 평가하였다. 갈륨, 흑연, 희토류 등의 품목에서 대중국 수입이 급격히 감소하는 패턴을 확인하였으며, 이는 중국과의 무역 갈등이나 수출 규제 등으로 발생할 수 있는 공급망의 교란 가능성을 시사한다.

주요국은 공급망 교란 가능성을 염두에 두고 핵심광물 공급망 전략을 수립하고

있는바, 이를 비교 분석하여 시사점을 도출하였다. EU는 2008년에 ‘원자재 이니셔티브’를 발표한 이후 핵심원자재 목록을 3년마다 갱신하고 있으며, 2023년 3월에는 EU 내 핵심 및 전략 원자재 생산 능력을 확대하기 위해 「핵심원자재법」 제정을 추진하였다. 2024년 5월에 최종 승인된 「핵심원자재법」의 주요 정책은 전략 프로젝트 선정, 핵심원자재 모니터링, 재활용 확대, 국제 협력 증진 등이며, EU는 다양한 국가와의 협력을 확대하는 한편, 특히 글로벌 게이트웨이 프로그램을 통해 개발도상국과 협력하여 핵심원자재를 확보하는 것을 목표로 추진 중이다.

미국은 2017년 행정명령 제13817호를 통해 핵심광물 목록을 작성하고, 2021년 행정명령 제14017호를 통해 공급망 조사를 지시하였다. 특히 2023년에는 30개의 행동전략을 발표하고, 북미 공급망 회복력을 강화하는 프로젝트에 착수하였다. 미국은 핵심광물의 조사 및 매핑을 통해 자원의 수량을 파악하고, 민간 및 정부 기관 간 협력을 강화하는 것을 목표로 한다. 한편 국제적으로는 한국, 일본, 인도 등과 협력하며, IPEF 협정을 통해 핵심광물 관련 협력 체계를 마련하고 있다. 한국은 2023년에 ‘핵심광물 확보전략’을 발표하고, 2024년에는 「국가자원안보 특별법」을 제정하여 핵심광물 공급망 안정화 전략을 구체화하였다. 주요 목표는 특정 국가에 대한 의존도를 낮추고, 재자원화를 통해 순환경제를 구축하는 것이다. 또한 해외 자원 개발을 위한 민간 협력 방안을 강화하고, 자원 개발 정보 제공을 통해 위기 대응 능력을 높이고자 노력하고 있다. 중국은 핵심광물 자원의 국가적 중요성을 인식하고 내부 자원 개발을 강화하는 한편, 대외적으로는 다양한 국가와 협력하고 있다. 특히 2024년부터 희토류 자원을 국가 소유로 규정하고, 자원 관리와 개발 수준을 높이기 위한 규제 강화를 추진 중이다. 또한 파키스탄·칠레·러시아 등과의 협력을 통해 글로벌 공급망에서 우위에 있으며, ‘지구화학’ 및 ‘글로벌 석회동굴’ 프로젝트와 같은 거대 과학 프로젝트를 통해 자원 개발 및 연구를 진행 중이다.

본 연구에서는 미시적 접근법으로서 기계학습 모형 중 여러 항목 간의 상관관계

와 시계열 특성을 고려할 수 있는 이중 단계 어텐션 기반 순환 신경망(DA-RNN)을 채택하였다. 다양한 핵심광물 수입액의 시계열 데이터를 기반으로 주력 수출품목(이차전지, 산화금속염, 자동차와 자동차 부품, 반도체, 선박)의 월별 수출을 예측하는 DA-RNN 모형을 구축하였다. 월별 수출입 자료를 이용하여 모형을 학습하고, 세 가지 핵심광물 분절화 시나리오(게르마늄, 흑연, 희토류)를 대상으로 시나리오별 주력 수출품목에 미치는 영향을 추정하였다. 게르마늄 수입에 제한이 발생할 경우 축전지(-3.9%), 산화금속염(-1.9%), 전자집적회로(-3.7%), 자동차 부품(-2.7%), 선박(-1.7%) 등 주요 품목의 수출액이 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 흑연 공급이 제한되면 축전지(-2.0%), 산화금속염(-6.4%), 전자집적회로(-3.6%), 자동차부품(-1.9%), 선박(-2.5%) 산업에서 수출이 감소하는 것으로 나타났다. 희토류의 경우는 축전지(-10.8%), 산화금속염(-7.6%), 전자집적회로(-1.6%), 자동차부품(-24.2%) 등 산업의 수출액을 크게 감소시키는 것으로 확인되었다.

위의 품목 분석 결과를 토대로 OECD METRO 모형을 이용하여 핵심광물 분절화에 따른 거시경제적 영향을 분석하였다. METRO 모형은 글로벌 무역 연계성과 무역정책에 초점을 맞춰 개발된 모형으로, 최종사용자(중간재, 민간소비재, 정부소비재, 자본재)를 세분화했다는 특징이 있다. 여기에서는 세 가지 시나리오를 대상으로 ① 분석 대상 핵심광물이 중국에서 수입되지 않음으로써 발생하는 거시경제적 효과를 METRO 모형에서 직접 분석하는 방식(접근법 1)과, ② 대중국 수입지연으로 인해 우리의 주력산업에 미치는 영향을 머신러닝 기법으로 분석한 후, 그 결과를 이용하여 METRO 모형에서 거시경제적 효과를 추정하는 방식(접근법 2)을 각각 적용하였다. 접근법 1의 조정 외생변수로 수입의 효율성을 선택하였으며, 접근법 2의 조정 외생변수로 생산의 중간재 효율성을 선택하였다. 중국산 핵심광물의 분절화로 인한 한국의 거시경제적 영향을 접근법 1에 따라 분석한 경우에는 핵심광물의 대체가능성을 아무리 낮춰도 그 효과가 미미한 것으로 나타났는데, 이는

해당 핵심광물의 중요성에도 불구하고 대중국 핵심광물 수입액이 전체 수입액에서 차지하는 비중이 낮기 때문에 풀이된다. 수입 규모가 미미할지라도 우리의 주력 수출품목 생산에 필수적인 핵심중간재라는 점을 고려하면 접근법 1에 기반한 추정 결과는 일반적으로 과소 추정되었을 가능성이 높다. 접근법 2에 따라 분석한 결과, 게르마늄 분절화는 한국의 실질GDP를 -0.15%(23.14억 달러) 변화시키고, 흑연과 희토류의 경우에는 실질GDP 변화율이 각각 -0.14%와 -0.89%에 이를 것으로 추정되었다. 동시에 한국과 공급망 구조가 밀접하게 관련되어 있는 중국과 아세안에도 부정적 영향을 적지 않게 끼치는 것으로 나타났다.

본 연구의 분석 결과를 토대로 다음과 같은 정책을 제안하였다. 첫째, 공급망 분절화 가능성 및 그 파급 영향에 대한 모니터링을 강화해야 한다. 현재 우리 정부는 경제안보상 중요 관리 품목에 대한 모니터링 체계를 갖추고는 있으나, 모니터링의 실효성을 높이려면 그 방식을 단계별로 더욱 체계화하고 정기적인 리뷰를 통해 현행화할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 핵심광물 선정과 취약성 분석, 공급망 분절화 가능성 분석, 분절화의 파급 영향 분석에 대한 다양한 기법을 제안한다. 또 여러 부처에 산재해 있는 공급망 플랫폼을 통합하고 컨트롤타워 역할을 수행할 기관을 선정하는 방안도 검토할 수 있다.

둘째, 공급망 복원력을 강화하기 위해 다양한 측면에서 기업지원책을 마련해야 한다. 그러려면 다원화된 조달 전략과 공급처 확보가 중요하며, 전략적으로 중요한 품목의 경우 연구개발 지원을 통해 대체 물질을 발굴하는 등 장기적인 마스터플랜을 마련할 필요가 있다. 기업 단위의 공급망 관리를 강화하기 위해 디지털 기반 관리 플랫폼을 구축하여 표준화된 데이터를 실시간으로 공유하는 시스템을 개발하는 방안을 고려할 수 있다. 특히 주력 수출산업의 공급망에 참여 중인 중소기업을 대상으로 2024년 공급망 3법 등에 준거하여 마련한 공급망안정화기금을 실효적으로 집행하기 위해 적극적인 홍보 방안을 검토할 필요가 있다.

셋째, 주요국과 상호 간의 정책을 조화할 수 있는 방안을 모색해야 한다. 주요국의 핵심광물 전략은 자국 내 생산 역량 강화 및 양자·다자 협력 확대를 통한 공급망 회복력 향상으로 요약할 수 있다. 핵심광물에 대한 과잉 안보화(over-securitization)를 막고 자원 부국에 대한 중복 투자를 피하려면 주요국 간 정책 방향을 상호 조율할 필요가 있다. 또 MSP와 같은 다자협력 플랫폼의 역할을 국가 간 정책 조정 권고로 확대하는 방안도 검토할 수 있다.

마지막으로 핵심광물을 공동으로 개발하기 위한 협력사업 확대를 검토할 필요가 있다. 주요 광물 자원을 확보하기 위해서는 다양한 국가들과 양자 및 다자 협력 관계를 구축해야 할 것이다. 이를 위해 전략적 협정 및 협력을 체결하고, 광물 탐사 및 개발 기술을 위한 국제협력을 강화해야 한다.

국문요약	3
제1장 서론	17
1. 연구의 배경 및 목적	18
2. 연구의 구성 및 내용	21
3. 선행연구와의 차별성	23
제2장 글로벌 공급망 분절화의 분석방법론	25
1. 미시적 접근	26
2. 거시적 접근	32
3. 핵심광물예의 적용	43
제3장 핵심광물의 현황 및 주요국의 핵심광물 공급망 전략	47
1. 핵심광물의 현황	48
가. 핵심광물의 정의	48
나. 한국 주요 핵심광물의 경제적 중요성	53
2. 한국의 핵심광물 취약성 분석	56
3. 핵심광물 공급망 분절화 시나리오 분석	62
가. 분석 개요	62
나. 광물 수입 현황	65
다. 분석 방법	69
라. 분석 결과	72
4. 주요국의 핵심광물 공급망 전략 비교 분석	80
가. EU	81
나. 미국	84
다. 한국	85
라. 중국	86
5. 소결	90

제4장 공급망 분절화의 미시경제적 영향 93

- 1. 분석 모형(DA-RNN) 및 자료 94
 - 가. 분석 모형 개요 94
 - 나. 데이터 및 실험설계 97
- 2. 주요 산업별 핵심광물 연관성 분석 결과 101
 - 가. 이차전지 산업 101
 - 나. 자동차 산업 104
 - 다. 반도체 산업 106
 - 라. 조선 산업 107
- 3. 공급망 분절화 시나리오에 따른 산업별 영향 108
 - 가. 공급망 분절화 시나리오와 실험방법 108
 - 나. 산업별 공급망 분절화가 미치는 영향 109

제5장 공급망 분절화의 거시경제적 영향 113

- 1. 분석 모형(OECD METRO) 및 자료 114
 - 가. 분석 모형 114
 - 나. 분석 자료 118
 - 다. 분석 시나리오 120
- 2. 거시경제적 분석 결과 127

제6장 결론 133

- 1. 요약 134
- 2. 연구의 한계와 후속연구 제안 143
- 3. 정책적 시사점 145
 - 가. 공급망 분절화 가능성 및 파급 영향에 대한 모니터링 강화 145
 - 나. 공급망 복원력 강화를 위한 기업지원책 마련 146
 - 다. 주요국과의 정책 조화 방안 모색 147
 - 라. 핵심광물 공동 개발을 위한 협력 사업 확대 148

참고문헌 149

부록	161
부록 1. 추가 품목들에 대한 공급망 분절화의 가능성 분석	162
부록 2. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 6개국의 대중국 수입의존도	168
부록 3. 공급망 분절화의 거시경제적 영향	174
Executive Summary	177

표 차례

표 2-1.	공급망에 대한 미시적 접근을 이용한 정량분석 대표 논문	30
표 2-2.	공급망에 대한 거시적 접근을 이용한 정량분석 대표 논문	42
표 3-1.	한국의 33종 핵심광물과 주요국 '핵심광물'의 비교	52
표 3-2.	한국의 10대 전략 핵심광물과 기술 수요	55
표 3-3.	핵심광물 및 주요 품목(2023년)	57
표 3-4.	핵심광물별 취약요소(2023년)	59
표 3-5.	핵심광물 주요 품목의 글로벌 연간 교역액 대비 국내 연간 수입액 및 허핀달-허쉬만 지수(HHI)(2022년 데이터 기준)	62
표 3-6.	7개국의 2021~23년 대세계 수입액 기준 10대 광물	66
표 3-7.	7개국의 2021~23년 대중국 수입의존도 기준 10대 광물	67
표 3-8.	7개국의 2021~23년 대세계 수입액 및 대중국 수입의존도 기준 10대 광물	68
표 3-9.	한국의 2021~23년 대세계 수입액 및 대중국 수입의존도 기준 10대 광물	69
표 3-10.	게르마늄·흑연·희토류에 대한 국가별 대중국 수입 비중 중간값 및 수입의존도	73
표 3-11.	게르마늄·흑연·희토류에 대한 공급망 분절화 기간 설정	80
표 3-12.	CRMA 구성	83
표 3-13.	중국의 주요 광물 협력 대상국과 관련 광물 생산량	88
표 3-14.	EU, 미국, 한국, 중국의 핵심광물 전략 비교	90
표 4-1.	산업별 수출액 영향(2024년 1~8월 누적)	110
표 5-1.	METRO 자료 재분류	118
표 5-2.	분석대상 시나리오와 접근법	121
표 5-3.	핵심광물의 대중국 산업별 수입 비중(2023년)	122
표 5-4.	공급망 분절화가 산업별 수출에 미치는 영향	123
표 5-5.	공급망 분절화가 산업별 생산에 미치는 영향	124

표 5-6. 접근법 1에 따른 한국의 대중국 iceberg cost 변화율	126
표 5-7. 접근법 2에 따른 한국의 산업별 중간재 효율성 변화율	126
표 5-8. 공급망 분절화에 따른 한국의 핵심광물 수입변화율	128
표 5-9. 공급망 분절화가 국내 거시경제에 미치는 영향	129
표 6-1. 미시적 접근 분석방법론의 강점과 한계	134
표 6-2. 거시적 접근 분석방법론의 강점과 한계	134
표 6-3. 공급망 분절화에 대한 단계별 대응 제안	146

부록 표 차례

부록 표 1-1. 추가 분석 대상 광물의 선정 결과	163
부록 표 1-2. 추가 품목들에 대한 국가별 대중국 수입 비중의 중간값 및 수입의존도	164
부록 표 3-1. 공급망 분절화가 주요국의 실질GDP에 미치는 영향	174
부록 표 3-2. 공급망 분절화에 따른 한국의 대주요국 화학 산업 중간재 수입 영향	175
부록 표 3-3. 공급망 분절화에 따른 한국의 대주요국 전자 산업 중간재 수입 영향	176

그림 차례

그림 1-1. 연구 흐름도	22
그림 3-1. 국내 핵심광물 취약도 평가 방법	57
그림 3-2. 국내 핵심광물 주요 품목별 취약도 평가	59
그림 3-3. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 수입 변동성 분석 결과	75
그림 3-4. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 한국의 대중국 수입의존도 추이	78
그림 4-1. DA-RNN의 구성 요소 및 메커니즘	96
그림 4-2. 산업별 모형 학습 및 분석 방법	98
그림 4-3. 학습곡선(이차전지 산업의 예시)	99
그림 4-4. 분석 결과 예시(이차전지 산업의 예시)	99
그림 4-5. 2차원 어텐션 행렬 예시(이차전지 산업의 예시)	101
그림 4-6. 핵심광물의 연관성 분석 결과(이차전지-HS 8507)	102
그림 4-7. 핵심광물의 연관성 분석 결과[산화금속염(양극재, 전구체)- HS 2841]	103
그림 4-8. 핵심광물의 연관성 분석 결과(자동차-HS 8703)	104
그림 4-9. 핵심광물의 연관성 분석 결과(자동차 부품-HS 8708)	105
그림 4-10. 핵심광물의 연관성 분석 결과(전자집적회로-HS 8542)	106
그림 4-11. 핵심광물의 연관성 분석 결과(선박-HS 8901)	107
그림 4-12. 공급망 분절화가 각 산업에 미치는 영향 추정 방법	108
그림 4-13. 산업별 수출액 영향(2024년 1~8월 누적)	109
그림 5-1. METRO 모형의 상품시장 구조	117
그림 5-2. 공급망 분절화에 따른 주요국의 실질GDP 변화	130

부록 그림 차례

부록 그림 1-1. 기준 2 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과	165
부록 그림 1-2. 기준 3 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과	166
부록 그림 1-3. 기준 4 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과	167
부록 그림 2-1. 호주의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이 ...	168
부록 그림 2-2. 캐나다의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이	169
부록 그림 2-3. EU의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이 ...	170
부록 그림 2-4. 영국의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이 ...	171
부록 그림 2-5. 일본의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이 ...	172
부록 그림 2-6. 미국의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이 ...	173

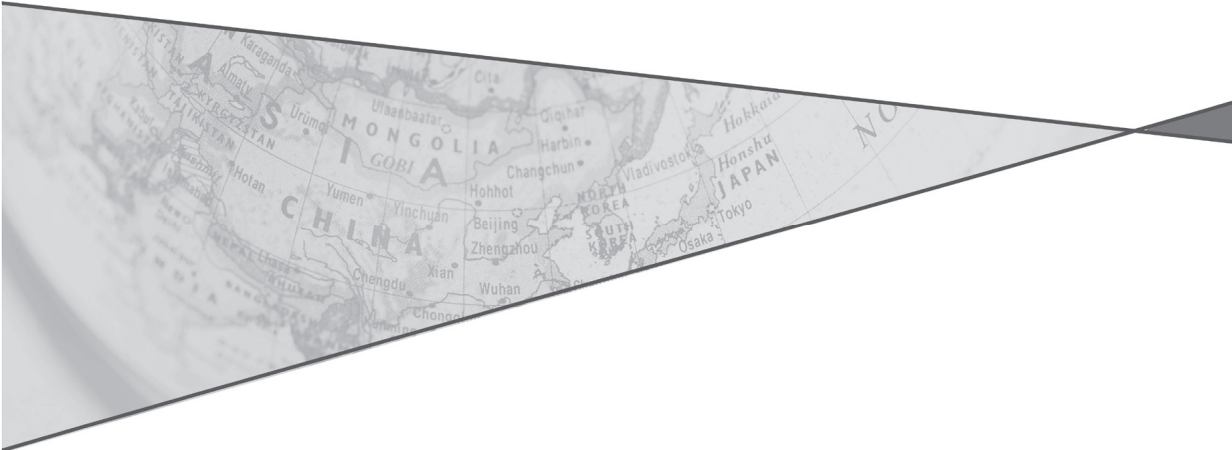
글상자 차례

글상자 3-1. HS 2017 → 2022 변환에 따른 광물 목록 조정	64
---	----

제1장

서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 구성 및 내용
3. 선행연구와의 차별성



1. 연구의 배경 및 목적

지금 세계는 경제적으로 격변기, 대분열의 시기를 지나고 있다. 특히 자국우 선주의의 심화, 미중 패권 경쟁의 격화, 지정학적 불안의 확대로 경제안보가 중요해지고 있으며, 이로 인해 글로벌 공급망이 빠르게 재편되고 있다.

글로벌 공급망은 코로나19 팬데믹 이전에도 어느 정도 조정 과정을 거쳤다. 다양한 요인들이 상호작용을 하면서 글로벌 공급망 재편에 영향을 미쳐 왔는데, 주요 요인으로는 ① 중국의 경제적 부상과 인건비의 상승, ② 세계화에 대한 반작용과 보호무역주의의 대두, ③ 자동화 확산으로 인한 선진국의 리쇼어링 확대, ④ 지역 무역 협정의 확대로 역내부가가치(RVC) 기준 충족을 위한 생산과정 재편, ⑤ 자연재해 등을 들 수 있다.

특히 코로나19 팬데믹을 겪으면서 안정적인 공급망이 중요해졌으며, 글로벌 산업계는 효율성이 떨어지더라도 더 안전한 생산 시스템을 선호하게 되었다. 그 결과 특정 국가에 대한 의존도를 줄이고 주요 산업에서 공급망을 단축하거나 공급원을 다변화하는 중이다. 또 최근에는 미중 전략경쟁이 격화되면서 미국과 중국은 상호 의존도를 낮추기 위한 다양한 조치를 도입하였고, 이러한 인위적 정책 개입으로 공급망의 무기화 가능성도 대두하고 있다.

우리는 이미 인위적 공급망 개입으로 인한 공급망 분절화의 가능성을 경험한 바 있다. 2019년에 일본은 한국을 화이트리스트에서 제외하고, 반도체 및 디스플레이 생산에 필수적인 3개 품목(고순도 불화수소, 플루오린 폴리이미드, 포토레지스트)에 대한 수출 규제를 강화하였다. 이러한 일본의 조치는 한국의 대법원 판결에 대한 보복 차원에서 이루어졌다는 평가가 있다. 또 다른 예로는 2010년 중국의 일본에 대한 희토류 수출제한이 있다. 중국이 조치를 취한 계기는 센카쿠 열도(다오위다오)를 둘러싼 분쟁이라고 알려져 있다. 희토류는 첨단 제품을 생산하는 데 필수적인 핵심광물이었으며, 중국은 전 세계 희토류 생산

점유율이 가장 높은 국가였다.

일본이 한국에 대한 수출규제를 도입했을 당시, 그 파급 영향에 대한 우려가 높았는데도 이에 대한 정량분석을 시도한 연구는 극히 드물었다. 연구의 대부분이 국산화와 대체품목 확보 가능성에 기반하여 정성적으로 영향을 판단하는데 그쳤다.¹⁾ 당시 일본 수출규제의 영향을 정량적으로 분석한 연구로는 정성춘 외(2019)를 들 수 있는데, 이 연구에서는 일본이 반도체 관련 3개 소재에 대한 수출규제를 강화함에 따라 한국의 반도체 생산이 10% 감소하는 경우를 시나리오로 구성하여 분석하였다.²⁾ 가상의 시나리오에 대한 분석이라는 점에서 수출규제의 실제 영향을 추정한 것이라고 평가하기는 어려우나, 국민경제 전반에 미치는 파급 영향을 정량적으로 분석하려고 시도했다는 면에서 평가할 만하다.

최근 경제안보의 중요성이 높아지고 글로벌 공급망의 분절화 가능성이 커지면서 분절화의 파급 영향에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 지금까지 수행된 연구들은 주로 전면적인 공급망 분절화에 따른 거시경제적 파급 영향에 초점을 맞추고 있다. 그러나 전면적인 공급망 분절화는 가능하지도 않고 현실적이지도 않다. 트럼프 1기 행정부에서도 대중 견제는 반도체 수출통제 등을 중심으로 진행되었으며 바이든 행정부를 거쳐 트럼프 2기에도 대상이 점차 확대될 것으로 보인다. 따라서 모든 산업과 품목에 걸친 분절화로 이어질 가능성은 높지 않을 것으로 전망된다. 가능성이 더 높은 시나리오는 미국이 특정 첨단 산업이나 품목에서 중국을 배제하고 중국은 이에 대응하여 핵심광물 등 자원을 무기화하는 것이다.

소수의 첨단산업과 이에 투입되는 핵심광물에 국한되어 공급망 분절화가 발생하는 경우에도 그 파급력은 경제 전반에 걸쳐 적지 않을 것으로 예상된다. 따라서 그 영향을 추정하려면 품목 단위의 미시적 접근과 경제 전반에 미치는 영향을 분석하는 거시적 접근을 동시에 고려할 필요가 있다.

1) 하나금융경영연구소 산업분석팀(2019); 국회예산정책처(2019).

2) 정성춘 외(2019).

이에 본 연구는 두 가지 목적을 달성하고자 수행되었다. 하나는 다양한 접근법과 가정, 시나리오에 기반한 선행연구들을 미시적 접근과 거시적 접근을 접목한 방법론으로 검토하고, 핵심광물 분절화 시나리오에 따른 경제적 영향을 정량적으로 추정하는 것이다. 분절화 시나리오에 대한 정량분석 방법론을 검토하고 적용함으로써 글로벌 공급망 정책에 대한 시사점을 도출하는 한편, 향후 특정 분절화 시나리오가 현실화될 경우 이에 대한 분석을 적시에 하기 위한 토대를 마련하고자 한다. 다른 하나는 OECD METRO 모형의 활용도를 검토하는 것이다. 그동안 통상정책의 거시경제적 효과를 분석하고자 본 연구원에서는 다양한 연산가능일반균형(CGE: Computable General Equilibrium) 모형을 활용해 왔으며, 널리 사용되는 퍼듀대학교의 GTAP(Global Trade Analysis Project) 모형을 주로 사용하였다. GTAP 모형은 많은 장점이 있으나, 표준 GTAP 모형의 경우 특정 국가로부터의 수입재에 대한 최종사용자를 별도로 구분하지 않기 때문에 특정 국가에서 발생하는 공급망 교란이 수입중간재를 통해 경제 전반에 파급되는 영향을 제대로 추정하기 어렵다는 한계가 있다. OECD METRO 모형에서는 최종사용자(중간재, 민간소비재, 정부소비재, 자본재)를 구분하고 있어 특정국과의 공급망 분절화 효과를 직접적으로 다룰 수 있다. 또 국제노동 이동, 환율, 역내부가가치 요건(local contents requirement), 실업 등 다양한 정책조치를 다룰 수 있도록 모형이 구성되어 있어, 이 모형은 정책의 영향을 분석하고 이를 기반으로 정책 제안을 도출하는 데 초점을 맞추고 있다. 이에 본 연구에서는 거시적 접근법으로서 OECD METRO 모형을 시범적으로 적용해 봄으로써 향후 다양한 정책분석에 본 모형의 활용 가능성을 점검하고자 한다.

2. 연구의 구성 및 내용

본 연구는 크게 6개의 장으로 구성된다. 제2장에서는 공급망 교란 또는 분절화의 영향을 정량적으로 분석한 선행연구를 방법론 중심으로 정리하고, 이를 토대로 본 연구에서 사용할 방법을 제안하고자 한다. 크게는 기업과 품목 단위에서 생기는 영향을 분석하는 미시적 접근과 산업 및 국가 단위에서 생기는 영향을 분석하는 거시적 접근으로 나누어 살펴보았다. 미시적 접근법은 산업공학이나 경영학 분야에서 주로 사용되어 왔으며, 거시적 접근법은 경제학 분야에서 활발하게 사용되어 왔다. 본 연구에서는 미시적 접근법과 거시적 접근법을 개괄한 후, 미시적 접근법에서는 기계학습(머신러닝 기법)을 활용하는 방식을, 거시적 접근법에서는 OECD의 METRO 모형을 이용한 연산가능일반균형접근법을 접목하는 방식을 제안한다.

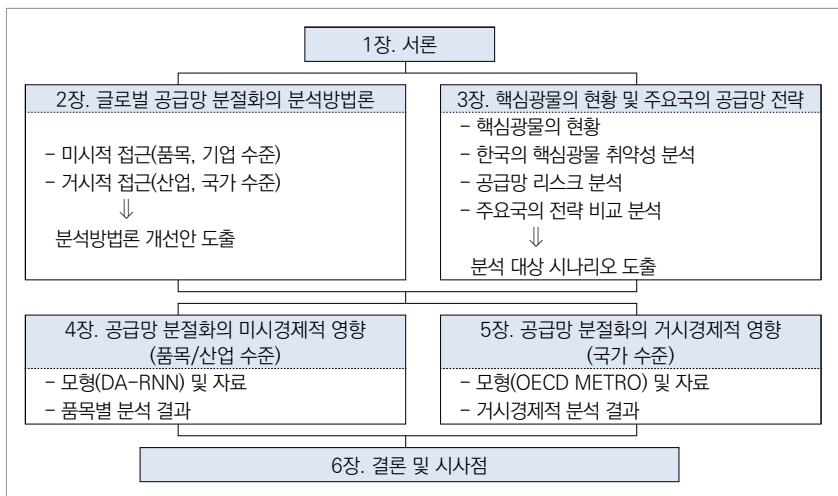
제3장에서는 분석 대상이 되는 핵심광물의 현황을 살펴보고, 이어 한국의 핵심광물 취약성과 핵심광물의 공급망 리스크를 분석한다. Evenett and Fritz(2023)에서 제시한 무역데이터 통계방법론을 활용하여 분석 범위를 한국의 핵심광물로 확대하고, 한국도 분석 대상으로 추가하여 공급망 분절화 가능성에 관한 분석을 진행하였다.³⁾ 또한 각국의 광물별 대중국 수입의존도의 변화를 통해 실제로 중국과의 교역에서 공급망 분절화(의도적 혹은 비의도적)가 발생한 것으로 간주할 수 있는 기간을 식별하고자 하였다. 본 연구의 목적은 제안된 방법론을 핵심광물 분절화 시나리오에 시범적으로 적용하는 데 있으므로, 이러한 분석 결과를 토대로 현실성 높은 몇 가지 핵심광물 분절화 가능성에 초점을 맞춰 시나리오를 구성하였다. 아울러 공급망 교란 가능성이 존재한다는 분석 결과를 바탕으로 주요국이 추진하고 있는 핵심광물 공급망 전략 파악이 중요하다는 점에서 관련 내용을 비교 분석하였다.

3) 본 방법론에 사용된 통계지표의 자세한 내용은 Evenett and Fritz(2023), pp. 33-35의 내용을 참고.

제4장에서는 핵심광물과 이를 투입재로 사용하는 주요 산업 간의 관계를 미시적 접근 분석방법론을 이용하여 살펴보았다. 특히 핵심광물의 경우 가공/제련 등 다양한 단계를 거치면서 여러 형태로 핵심 부품과 소재 등에 투입되는데, 기업 단위의 세부 자료에 대한 접근은 불가하므로 머신러닝 기법을 이용하여 핵심광물과 주요 산업 간의 관계를 분석하였다. 제3장에서 도출된 핵심광물 분절화 시나리오를 이용하여, 해당 핵심광물의 공급이 원활하지 못할 경우 우리나라의 주력 산업의 수출에 미칠 부정적 영향을 정량적으로 추정하였다.

제5장에서는 OECD METRO 모형에 대한 개관을 소개하고, 제4장에서 분석한 핵심광물 시나리오의 산업별 영향을 모형에 반영하여, 이로 인한 거시경제적 파급 영향을 도출하였다. 기존 선행연구와 비교하기 위하여 두 가지 접근법을 사용하였다. 하나는 기존과 같이 핵심광물의 수입이 원활하지 않은 시나리오를 직접 METRO 모형의 정책충격으로 입력하여 분석하였으며, 다른 하나는 제4장의 분석 결과를 이용하여 핵심광물로 인한 주력 산업별 수출감소율을 모형의 정책충격으로 입력하여 분석하였다.

그림 1-1. 연구 흐름도



3. 선행연구와의 차별성

본 연구는 선행연구와 비교하여 다음과 같은 차별성이 있다. 첫째, 핵심광물의 정의 및 전략을 주요국과 대비하여 비교 분석한 것은 균형적인 인식을 제고하는 관점에서 의미가 있다. 특히 중국과 같이 핵심광물의 정의와 전략을 쉽게 찾아볼 수 없는 상황에서, 국내의 핵심광물에 대한 개념과 인식은 주로 서구권에서 발전된 프레임워크에 의존하고 있다. 비교 분석을 통해 더 균형적인 시각에서 한국의 핵심광물 전략 방향을 가늠해 볼 수 있으며, 본 연구는 최근 3~4년 동안의 정책 발전 양상을 체계적으로 담고 있어 정책 결정 시 유용한 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 본 연구에서 적용한 이중 단계 어텐션 기반 순환 신경망(DA-RNN: Dual-stage Attention-based Recurrent Neural Network)은 다중 시계열 데이터를 기반으로 특정 시계열의 값을 추정하는 모형으로서 독립변수 간의 연관성과 독립변수가 종속변수에 미치는 지연 효과를 유연하게 포착할 수 있다는 장점이 있다. 이를 통해 특정 산업 공급망 내 다양한 생산요소가 최종재 생산에 미치는 관계를 파악하기 용이하다. 기존 인공지능망 기반 모델들이 주로 기업 단위의 공급망 리스크(예: 납품 지연, 재난 발생 등) 예측 또는 평가에 초점을 맞추어 활용되어 왔으나, 본 연구에서는 이를 확장하여 전체 산업 생산에 미치는 영향을 포괄적으로 분석할 수 있는 프레임워크를 제시하였다. 이는 글로벌 공급망 연구에서 인공지능망 기법의 유용성을 입증하는 학술적 기여를 하였으며, 특히 거시적 접근법과의 융합 연구를 통해 공급망 분절화의 영향을 더 구조적으로 파악할 수 있는 새로운 접근방식을 제안하였다는 점에서 의의가 있다. 본 연구는 공급망 관리 분야에서 인공지능망의 활용 범위를 확장하고, 기존 거시적 관점에서의 글로벌 공급망 분석 방법론을 발전시켰다는 점에서 학문적·실무적 기여가 있다고 판단된다.

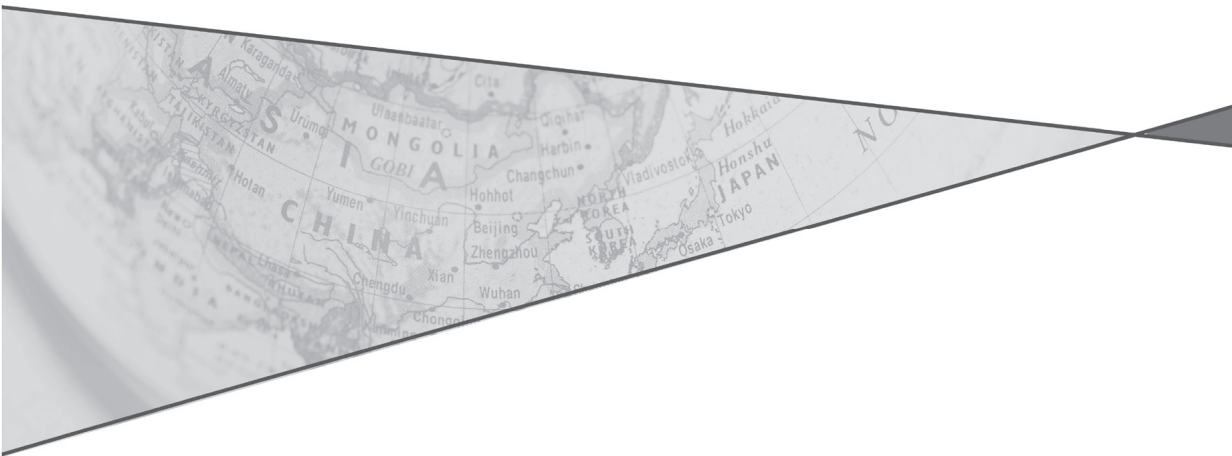
셋째, 국내에서 처음으로 OECD의 METRO 모형을 활용하여 정책의 효과를 분석한 연구라는 점에서 의의가 있다. 그동안 본 원에서는 CGE 모형을 이용한 정책효과 연구 시 주로 GTAP 모형을 널리 사용하였으나, 본 연구는 더 다양한 정책수요에 대응하고 GTAP 모형에 보완적으로 활용 가능한 METRO 모형의 활용 가능성을 검토한다는 점에서 선행연구와는 뚜렷한 차별성이 있다.

넷째, 첨단산업과 핵심광물에 대한 공급망 분절화의 영향을 더욱 입체적이고 현실적으로 분석 가능한 방법론을 제시한다는 점에서 의미가 있다. 그간 수행된 공급망 분절화 연구들은 거시적 관점에서는 전면적인 분절화를 가정하는 경우가 많았으며, 특정 품목이나 산업에서 나타나는 분절화를 다룬 연구들은 부분균형 또는 산업연관분석 접근법에 기반하고 있어 다양한 경제주체의 합리적 의사결정과 상호작용 등을 반영하지 못한다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 핵심광물의 복잡한 공급망 구조와 주요 수출산업 간의 관계를 규명하기 위하여 최신의 기계학습 방법론과 연산가능일반균형접근법을 접목함으로써 선행연구의 한계를 보완하고자 하였다.

제2장

글로벌 공급망 분절화의 분석방법론

1. 미시적 접근
2. 거시적 접근
3. 핵심광물예의 적용



코로나19 팬데믹 이후 공급망 타격으로 인한 파급 영향과 이에 대한 대응책에 관심이 쏠리고 있다. 특히 최근에는 지정학적 갈등으로 인한 글로벌 분절화 가능성이 높아지고 있어, 다양한 모형을 이용하여 그 파급 경로를 정량적으로 분석하는 연구가 수행되어 왔다.

이미 서론에서 논의한 바와 같이 과거 일본이 반도체 생산에 사용되는 핵심 소재 세 개에 대해 수출규제 조치를 도입했을 때, 그 파급 영향을 정량적으로 분석한 국내 연구는 드물었다. 최근 미국과 중국의 패권 경쟁이 격화되면서 첨단산업과 여기에 사용되는 핵심광물과 관련된 공급망의 분절화 가능성이 높아지고 있다. 일본 수출규제 조치와 유사하게 핵심광물의 수입중단은 우리 경제 전반에 걸쳐 적지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

이에 본 장에서는 공급망 분절화의 파급 영향에 관한 선행연구를 품목 또는 기업 단위에서 분석하는 미시적 접근법과 산업과 국가 단위에서 분석하는 거시적 접근법으로 나누어 살펴보고자 한다. 정량분석을 시도한 연구 위주로 분석 모형, 시나리오, 가정과 한계 등을 정리하고, 선행연구에서 제기하는 주요 쟁점과 파급 경로 등을 고려하여 본 연구에서 제안할 방법론에 접목하고자 한다.

1. 미시적 접근

공급망 분절화와 같은 공급망 리스크(supply chain risk)에 대해 미시적으로 접근한 연구는 경제학 분야보다 경영학이나 공학 분야에서 활발하게 수행되었다. 공급망 리스크관리(SCRM: Supply Chain Risk Management)에 관한 정량분석 연구는 다양한 방법론으로 분화하며 발전해 왔다. 이하에서는 Katsaliaki, Galetsi, and Kumar(2022)와 Bugert and Lasch(2018)의 연구를 토대로 공급망 분절화의 파급 영향을 정량적으로 분석한 연구들의 방법론에 대하여 서술하였다. Katsaliaki, Galetsi, and Kumar(2022)는 공급망 리

스크를 다룬 방대한 선행연구를 ① 공급망 리스크의 유형, ② 공급망 리스크의 파급 영향, ③ 공급망 충격 영향 분석, ④ 공급망 리스크 대응 및 회복전략으로 나누어 검토하였으며, 그밖에 공급망 회복력 비용-편익분석과 주요 모형화 기법 및 관련 IT 도구에 대하여 정리하였다. 이 연구에서는 공급망 리스크의 영향을 크게 매출 감소와 비용 상승으로 구분하였으며, 전자로는 생산 타격으로 인한 공급 부족 또는 지연 배송에 의해 발생하는 소비자의 불만, 브랜드 이미지 손상, 시장점유율 하락, 수익 저하 등을 꼽았고 후자로는 대체 공급선 발굴, 생산 일정 조정 등으로 인한 경영비용 상승, 생산성 하락 등을 꼽았다.

이러한 예시들에서 볼 수 있듯이 공급망 리스크관리에 관한 공학 또는 경영학의 접근방식은 주로 기업 또는 기업이 생산하는 특정 품목에 초점이 맞춰져 있으며, 공급망 분절화의 파급 영향 역시 기업 수준의 매출이나 비용 등에 초점이 맞춰져 있다. 이하에서는 품목 단위 공급망 분절화가 기업 수준을 넘어 산업 단위에 미치는 영향을 분석하는 방법론에 초점을 맞추어, 관련 연구에서 주로 활용되는 방법론을 간략히 소개하고 본 연구에서 적용한 분석 모형을 자세히 설명하고자 한다.

파급 영향을 분석하기 위하여 모형을 이용한 연구들을 주로 수학적 최적화(mathematical optimization), 시뮬레이션(simulation), 제어 이론(control theory) 등으로 분류하는 것이 가능하나, 여러 방법론을 결합하여 분석을 시도한 연구나 더 세부적인 접근법이 사용되는 경우도 있어 이하에서는 선행연구를 중심으로 널리 사용되는 접근법을 설명하였다.

최적화 모형은 다양한 매개변수의 조합을 수학적 방식으로 최적의 해를 도출하는 방법론이다. 주로 사용되는 접근법으로는 선형계획법, 혼합 정수계획법(MIP: Mixed Integer Programming) 등을 들 수 있다(Li, Zeng, and Savachkin 2013). SCRM 분야에서 최적화 모형의 주요 한계로는 공급망 분절화의 동적인 특성을 포착하기 어렵다는 점과 예상 수요나 공급업체의 신뢰성에 대한 가정이 필요하다는 점을 들 수 있다. 예를 들어 공급망 리스크에 대한

피해와 공급망 회복력 강화를 위한 비용 등을 정량적인 매개변수로 표현해야 한다. 이에 대한 보완책으로 불확실성을 고려하기 위하여 확률 분포를 추가한 확률적 계획법(stochastic programming)도 제안되었다(Torabi, Baghersad, and Mansouri 2015). 확률 분포를 도입함으로써 매개변수의 불확실성 등을 고려할 수 있으나, 이에 따라 변수와 제약 조건의 수가 기하급수적으로 늘어나 최적해를 구하기 어려워진다는 부담이 있으며 분포 추정을 위한 데이터를 구축하는 것 역시 대부분의 경우 쉽지 않다.

시물레이션 방법은 공급망의 복잡한 구조를 구현할 수 있다는 점에서 확률적 계획법보다 다소 유연하다는 장점이 있다. 세부 방법론을 기준으로 이산 사건 시물레이션, 시스템 다이내믹스, 에이전트 기반 모델링, 최적화 기반 시물레이션, 그래프 이론 기반 시물레이션 등으로 구분할 수 있다(Bugert and Lasch 2018). 다만 시물레이션의 정확도를 높이기 위해서는 공급망 구조를 더 자세히 구현해야 하며, 그 과정에서 필요한 데이터의 양과 범위가 늘어나게 된다는 어려움이 있다. 또 결과가 시물레이션에서 가정한 공급망 구조에 의존한다는 점도 고려할 필요가 있다.

이산 사건 시물레이션 방법론 중 SCRM 분야에서 널리 사용되는 방법론으로는 Petri Net를 들 수 있다(Bugert and Lasch 2018). Petri Net는 공급망 내 프로세스의 흐름을 노드로 구성된 그래프를 이용하여 시각적으로 표현하는 방식이다. 복잡한 공급망 구조 내에서 여러 프로세스가 동시에 진행되는 상황을 시각적으로 파악할 수 있으며, 공급망 설계 단계에서 공급망 구조의 일관성 등을 검증할 수 있다는 장점이 있다. 다만 다른 구조화 접근법과 마찬가지로 복잡한 Petri Net는 분석 과정에서 많은 자원이 필요하다. 일반적인 Petri Net의 경우 확률적 요소나 불확실성을 고려하는 것이 어렵기 때문에 불확실성을 기반으로 하는 베이지언 네트워크(BBNs: Bayesian Belief Networks)를 활용할 수 있다. 불확실성과 상호 의존성을 고려할 수 있다는 점에서 현실적인 측면이 있으나, 정확한 확률 추정이 전제되어야 하며 모형의 구조와 변수 간의 관계 설

정에 따라 모형이 복잡해진다는 단점이 있다.

시스템 다이내믹스는 공급망과 같은 시스템에서의 자원 흐름, 시간 지연, 피드백 등을 모형화하는 방식이다. 예를 들어 공급망 구조 속에서 소재나 부품 등이 투입되는 경로와 재고 등을 모형화하며, 높은 수요 또는 과잉 재고 등과 관련된 피드백에 대응하여 조정하는 과정도 반영할 수 있다. 특히 공급망에서 자원이나 정보가 전달되는 소요 시간에 대한 고려도 가능하다. 시스템 다이내믹스는 공급망의 복잡한 상호작용을 시각적으로 표현하고 공급망 정책이 장기적 성과에 미치는 영향을 분석할 수 있다는 장점이 있지만, 앞서 서술하였듯이 모형의 정확도와 구현난이도 간의 상충관계가 존재한다는 한계가 있다.

에이전트 기반 모형화(ABM: Agent-based modeling)는 공급망 구조를 독립적인 에이전트들의 집합으로 묘사하는데, 각 에이전트는 정해진 규칙에 따라 행동하게 되며 시스템 내 에이전트들 간의 상호작용을 통해 전체 시스템이 작동하게 된다. 이 접근법은 다양한 시나리오에 대한 에이전트들의 반응이 전체 공급망에 파급되는 과정을 살펴볼 수 있다는 장점이 있다(Xu, Wang, and Zhao 2014). 다만 마찬가지로 모형의 정밀도를 높이려면 에이전트 행태(behavior)에 관한 적절한 가정과 세부 데이터가 필요하며, 개별 에이전트에 대한 세부적 가정이 도입될수록 계산이 복잡해지고 전체 시스템의 결과를 예측하거나 통제하기 어려워지는 단점이 있다.

제어 이론은 시간의 흐름에 따라 공급망이 작동하는 방식을 분석할 수 있게 해 준다(Ivanov *et al.* 2016). 제어 이론에 기반한 제어 모델은 주로 수요변동처럼 특정 지표와 관련된 공급망 리스크 요인이 부상할 때마다 이에 맞춰 개발되면서 발전되어 왔다. 그밖에 널리 사용되는 방법론으로는 베이지언 네트워크나 의사결정 나무와 같은 그래프 이론이 있다. 이러한 방법론들은 수학적 구조를 통해 공급망의 상호작용을 묘사하고 예측 및 의사결정 시나리오를 기반으로 개체 간의 관계를 모형화하는 데 사용된다(Sokolov *et al.* 2016).

통계적 분석방법론은 통상적으로 모수적 접근법이 많이 활용되었으며, 과거

자료를 기반으로 분석하는 시계열 분석방법과 공급망 성과에 영향을 미치는 변수들을 고려한 회귀분석방법으로 구분할 수 있다. 과거 데이터를 정량적으로 분석하여 공급망 성과를 예측하거나 변수와의 관계를 설명할 수 있다는 장점이 있으나, 과거 데이터를 사용하기 때문에 구조적 변화가 발생하거나 관련 데이터를 충분히 고려할 수 없는 경우에는 분석의 정확도가 떨어지는 문제가 있다.

비모수적 접근법 중 최근 떠오르고 있는 방법론으로는 기계학습(machine learning) 방법론이 있다. 기계학습을 통해 공급망 구조의 패턴을 식별하고, 이에 기반하여 공급망 분절화의 파급 영향을 분석하는 방식이다. 기계학습 모형의 장점은 공급망 구조의 비선형성 및 복잡성을 고려할 수 있고, 예측의 정확도가 비교적 높다는 것이다. 다만 학습 과정에서 사용되는 데이터의 품질에 의존하며 과적합(overfitting)이 될 위험성이 있다. 또 복잡한 알고리즘으로도 출된 결과를 해석하는 것이 쉽지 않다는 한계도 있다.

표 2-1. 공급망에 대한 미시적 접근을 이용한 정량분석 대표 논문

선행연구	방법론	주요 내용
Amini and Li (2011)	최적화: 혼합정수 비선형 프로그래밍	<ul style="list-style-type: none"> - 제품 생산주기를 고려한 수요의 동태성을 고려하여 새로 출시하는 제품에 대한 다수의 공급자를 허용하는 하이브리드 모형을 제안 - 임의의 공급망 분절화가 발생할 경우 단일 공급자에 의존하는 것보다 여러 공급자를 고려하는 것이 공급망 성과에 유리
Snoeck <i>et al.</i> (2019)	최적화: 확률적 프로그래밍	<ul style="list-style-type: none"> - 위험회피적 의사결정자를 고려하여 공급망 분절화의 비용을 측정할 수 있는 2단계 확률적 프로그래밍 모형을 제안 - 화학 산업의 공급망 사례를 대상으로 장기와 단기 비용 최소화와의 상충관계를 보여줌.
Kochan <i>et al.</i> (2018)	시뮬레이션: 시스템 다이내믹스	<ul style="list-style-type: none"> - 본 연구에서는 전통적인 방식과 클라우드 기반의 정보공유를 가정한 방식의 두 가지 시스템 다이내믹스 모형을 구축하여 성과를 분석 - 클라우드 기반의 정보공유 시스템이 공급망의 지연이나 수요의 변동성에 대한 대응을 개선하는 것으로 나타남.

표 2-1. 계속

선행연구	방법론	주요 내용
Ivanov (2017)	시뮬레이션: 하이브리드 모형 (이산 사건 시뮬레이션 - 에이전트 모형)	- 본 연구에서는 이산 사건 시뮬레이션 모형의 각 구조에 에이전트 기반 모형을 접목
Ivanov (2018)	시뮬레이션: 이산 사건 시뮬레이션	- 스마트폰 공급망에 대한 상세한 대규모 이산 사건 시뮬레이션 모형을 구축하여 공급망 타격의 파급 영향을 완화하는 요인과 심화하는 요인을 분석
Hou <i>et al.</i> (2018)	시뮬레이션: 에이전트 기반 모형	- 에이전트 기반의 시뮬레이션 모형을 구축하여 각 기업은 신뢰도, 판매가격 또는 무작위로 공급업체를 선택하는 경우를 비교 - 분석 결과 신뢰에 기반한 기준이 공급망 타격에 가장 안정적으로 대응
Yang and Fan (2016)	제어이론 및 시간연속 시뮬레이션	- 제어이론과 시뮬레이션을 이용하여 세 개의 2단계 공급망 모형을 구축하고 각기 다른 정보관리 전략 (전통적 방식, 정보공유, 협력)을 평가 - 널리 사용되는 정보공유 전략이 전통적 방식보다 늘 안정적이지는 않다는 결론을 도출
Fang and Shou (2015)	게임이론	- 코로나 경쟁 중인 공급망 구조를 가정한 게임이론을 활용하여 공급망 불확실성과 경쟁강도가 주문량 결정에 미치는 영향을 분석 - 분석 결과 경쟁 중인 공급자의 신뢰성이 떨어지거나 자가공급의 신뢰성이 높아질수록 주문량이 증대
Nakatani <i>et al.</i> (2018)	그래프 이론	- 국산 및 수입 원자재를 이용하는 공급망 구조를 그래프 이론으로 분석 - 특정 시장에 대한 집중도가 높아짐에 따라 공급망의 취약성을 평가했는데, 일본의 사례에 적용한 결과 원자재에서의 보틀넥 현상을 식별
Brusset and Teller (2017)	통계분석: 구조방정식	- 구조방정식을 토대로 개념 모형에 나타난 공급망 역량, 복원력, 공급망 위험 간의 관계를 평가 - 공급망의 유연성과 각 단계 간 통합강도에 따라 복원력이 개선되는 것으로 나타남

자료: Katsaliaki, Galetsi, and Kumar(2022), pp. 993-994에 기초하여 저자 정리.

전술한 바와 같이 공급망 분절화의 파급 영향을 미시적으로 분석한 연구의 대부분이 특정 기업이나 품목을 가정하고 공급망 상류(부품, 소재, 원자재 공급자 등) 또는 하류(수요 등)에서 발생할 수 있는 공급망 교란 시나리오에 따른 파급

영향을 분석하여, 부정적 효과를 최소화할 수 있는 전략을 도출하고자 하였다.

최근 공급망의 복잡성 증가와 지정학적 변수로 인해 공급망 파급 영향을 파악할 때 새로운 방법으로 접근해야 한다. 공급망은 기술 발전에 따라 점점 더 복잡해지고 길어지며, 특정 부품의 부족으로 인해 전체 산업 생산이 차질을 빚을 수 있다. 또 지정학적 갈등과 그로 인한 수출통제 등으로 공급망에 다양한 변화가 일어난다. 이러한 영향을 정량적으로 파악하고 예측하려면 다양한 시계열(multivariate time series)의 정보를 고려할 수 있는 모형이 필요하다. 예를 들어 반도체 장비 수입에 분절화가 발생하면 반도체 산업에 단기적으로는 영향이 적을 수 있으나 장기적으로는 영향을 미칠 가능성이 높고, 웨이퍼의 경우 수입이 불안정해지면 단기간에 반도체 생산에 영향을 줄 수 있다. 반도체 산업의 공급망이 복잡해진 만큼 반도체 생산에 영향을 주는 품목은 다양해지고 공급망 분절화의 영향 또한 다양한 시간대에서 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 공급망의 특징을 반영하고자 항목 간의 상관관계와 시계열 특성을 반영할 수 있는 이중 단계 어텐션 기반 순환 신경망(DA-RNN) (Qin *et al.* 2017)을 활용하여 공급망 분절화의 미시적 영향을 분석하였다. DA-RNN은 다변량 시계열 예측에 널리 사용되는 모형이며 DA-RNN의 주요 특성과 데이터 등에 대한 설명은 제4장에서 자세히 다루었다.

2. 거시적 접근

산업이나 국가 단위에서 공급망 분절화의 파급 영향을 분석한 거시적 접근 연구들은 코로나19 팬데믹을 기점으로 본격적으로 수행되기 시작하였다. 코로나19 팬데믹으로 노동공급이 제한되면서 중간재 생산에서 차질이 발생하고 일부 국가에서는 필수 의료품의 수출을 제한하면서 글로벌 공급망 분절화의 영향을 추정하는 연구들이 등장하였다. 글로벌 금융위기 이전까지 전 세계적으로

자유무역이 진전되면서 글로벌 공급망 구조가 복잡다단하게 발전해 왔는데, 역으로 공급망 분절화가 진행되면 이미 형성된 공급망 구조를 통해 부정적 여파도 확산된다. 즉 자유무역의 긍정적 영향이 파급되는 경로를 따라 공급망 분절화의 영향도 파급되는 구조로 되어있다. 그간의 선행연구들은 ① 공급망 분절화 영향의 파급 경로와 ② 그 영향을 추정하기 위한 방법론 두 가지 측면에서 분류될 수 있다. 선행연구들에서는 공급망 분절화의 파급 경로로 ① 관세 등 보호무역조치로 인한 경제적 비용과 비효율성, ② 기술과 지식의 확산 억제로 인한 기술 분절화와 기술격차 확대에 의한 비용 증가, ③ 이 외에도 노동과 자본의 이동제한, 글로벌 공공재의 공급 부족, 보복조치와 정치적 불확실성 확대 등을 들고 있다. 정량 연구의 대부분이 보호무역조치와 기술의 확산제약에 초점을 맞추고 있다. 방법론의 측면에서는 크게 ① 계량분석, ② 일반균형 이론모형 분석, ③ 연산가능일반균형모형 분석, ④ 국제 투입산출모형 분석 등으로 구분할 수 있다.

유사한 접근법을 사용한 연구들의 경우 분석 대상 시나리오 외에는 대동소이하기 때문에, 이하에서는 주요 선행연구를 정리하되 향후 관련 연구에서 참고할 만한 요소를 식별하는 데 초점을 맞추고자 한다.

계량분석은 공급망 분절화의 정도를 측정한 설명변수가 분석 대상 종속변수에 미치는 영향을 다양한 계량분석 기법을 이용하여 추정하는 접근법이다. 계량분석 접근법에서는 공급망 분절화를 어떻게 정의하고 측정할 것인지가 연구의 차별성을 결정한다. 이 방법론은 글로벌 공급망이라는 관심 변수 이외에 여타 요인들을 정교하게 통제함으로써 인과관계를 추정할 수 있다는 강점이 있다. 다만 가용 자료의 한계, 모형 설정상의 문제 등으로 인과관계를 도출하기 어려운 상황이 종종 발생하며, 추정 결과가 과거의 자료에 기반하고 있다는 점에서 미래의 구조적 변화 등으로 인한 영향을 고려할 수 없다는 한계가 있다.

Bai *et al.*(2024)은 컨테이너 상선의 자동식별시스템(automatic identification system) 자료를 이용하여 항구의 혼잡도를 토대로 공급망 분절화 지수를 구축하였다. 글로벌 상품시장에서의 혼잡, 생산 및 가격의 공급망 충격에 대한 반응,

생산 여력을 연계하는 생산자와 도매업자 간의 탐색마찰을 이론적으로 모형화하였다. 이를 토대로 Structural VAR(Vector Auto Regressive) 모형을 구축하여 공급망 충격의 영향을 분석하였다. 분석 결과 코로나19로 인한 공급망 충격은 2021년 인플레이션에 직접적으로 영향을 미친 것으로 나타났다. 그러나 2022년 인플레이션은 전통적인 수요와 공급에서의 충격에도 영향을 받은 것으로 나타났다.

한국은행(2023b)은 코로나19 팬데믹과 러-우 전쟁 등에 따른 공급망 차질이 인플레이션을 자극하고 경제활동을 제약하는 요인으로 작용하고 있음을 지적하였다. 본 연구에서는 단기적으로는 중국의 리오프닝을, 중장기적으로는 공급망의 경제적, 지정학적 분절화를 글로벌 공급망의 주요 리스크로 꼽았다. 뉴욕연준의 방법론을 준용하여 국가별 공급망 압력지수를 구축하였으며 이를 이용하여 중국발 공급망 차질의 영향을 분석하였다. 뉴욕연준의 글로벌 공급망 압력지수(GSCPI: Global Supply Chain Pressure Index)는 잠재적인 공급망 교란에 관한 통합적인 정보를 제공하기 위한 목적으로 널리 사용되는 몇 가지 지표를 결합하여 구축된 지표이다.⁴⁾ 글로벌 운송비용은 Baltic Dry Index(BDI), the Harpex Index 그리고 U.S. Bureau of Labor Statistics(BLS)의 항공운송비용 등을 고려하였다. 또 중국, 유로 지역, 일본, 한국, 대만, 영국과 미국의 제조업에 초점을 맞춰 구매관리자지수(PMI: Purchasing Managers' Index)에 포함된 7개의 공급망 관련 요소들도 활용되었다. 국소투영법(local projection)을 이용하여 상해 봉쇄의 영향을 추정한 결과, 글로벌 무역은 1년간 0.3~0.5% 감소하고 글로벌 물가의 경우 소비자 물가는 0.2%p, 생산자 물가는 0.5%p 높아지는 것으로 나타났다.

Bontadini *et al.*(2022)은 글로벌 가치사슬과 고용 간의 관계를 분석하였다. 유럽 역내에서 거래되는 가치사슬에 참여하는 비중이 높아지는 것을 니어

4) Federal Reserve Bank of New York, "Global Supply Chain Pressure Index(GSCPI): Overview," 온라인 자료(검색일: 2024. 10. 16.).

쇼어링(nearshoring)으로, 아시아와 미주 간의 가치사슬에 참여하는 비중이 높아지는 것을 파쇼어링(farshoring)으로 명명하였는데, 공급망 분절화는 니어쇼어링이 높아지거나 특정 국가와의 파쇼어링이 낮아지는 것으로 이해할 수 있다. 이 연구에서는 GVC 최종 종착지 국가에서의 고용을 종속변수로 하는 회귀분석을 실시한 결과, 니어쇼어링은 고용에 긍정적인 영향을 미치지만 파쇼어링은 고용과 통계적으로 유의미한 관계가 없는 것으로 나타났다.

일반균형 이론모형 분석은 대외경제 부문을 포함한 경제의 일반균형을 이론에 기반하여 모형화한 후 정책의 효과를 분석하는 접근법이다. 본 접근법은 경제학 이론이라는 탄탄한 기반이 있는 접근법이다. 또 모형의 구성에 따라 공급망 분절화라는 구조적 변화가 경제에 파급되는 경로를 모두 고려할 수 있다는 장점이 있다. 다만 자료의 한계와 계산의 부담 등으로 이론 모형을 단순화함으로써 현실경제와 괴리가 있다.

Baqae *et al.*(2024)은 신냉전 2.0이라는 가상의 시나리오를 구성하여 G7 또는 서방국가들이 중국 및 그 동맹국들과 분절화되는 경우의 경제적 영향을 분석하였다. 이 연구는 Baqae and Farhi(2021) 모형을 이용하였는데, 이 모형이 단기경기변동에 의한 확장효과를 고려하지 못하고 있다고 지적하면서 모형 분석 결과에 이러한 영향을 추가로 고려할 필요가 있다고 설명한다. 단기경기변동은 명목변수의 경직성이 있는 상황에서 발생하는 확장효과를 의미한다. 모형 분석 결과 신냉전 2.0으로 독일의 GNE는 약 1.5% 감소할 것으로 추정되었다.

Góes and Bekkers(2022)는 지정학적 충돌의 영향을 분석하기 위하여 일반균형 모형을 구축하면서 동태적인 산업특화 지식의 확산을 추가로 고려하였다. Buera and Oberfiel(2020)을 토대로 수입중간재를 통해 국내 생산자가 새로운 아이디어에 접근할 수 있게 되는 것과 그 수준은 중간재를 수출하는 국가/산업의 생산성에 비례하는 것으로 가정하고 있다. 분석시나리오는 크게 두 개이며, UN 투자 행태를 토대로 서양과 동양 두 개의 블록으로 국가들을 재구성한 후 (1) 풀 디커플링(full decoupling): 상호 블록 간에 교역이 발생하지 않을

수준으로 교역장벽을 높이는 경우와 (2) 태리프 디커플링(tariff decoupling): 상대 블록에 32%의 관세를 부과하는 경우를 상정하였다. 일반적인 무역모형에 비해 본 모형에서는 지식확산 경로를 통해 무역충격의 부정적 영향이 확대되는 것으로 나타났다. 특히 고소득 국가에서 지식확산을 받는 저소득 국가들이 공급망 분절화에 따른 부정적 영향을 더 큰 받는 것으로 나타났으며, 단일 산업 모형보다 여러 산업 모형에서 지식확산의 상호작용을 통한 분절화의 효과가 더 크게 나타났다.

Attinasi, Boeckelmann, and Meunier(2023)는 Baqaee and Farhi(2023)의 모형에 기반하여 글로벌 공급망 분절화의 경제적 비용을 분석하였다. 이를 고려한 시나리오는 동서양 국가 간 지정학적 블록화와 FTA 등에 의한 블록화를 대상으로 일반적인 품목에 대해서까지 분절화가 이뤄지는 경우와 전략품목에서 분절화가 이뤄지는 경우를 구분하여 구성하였다. 이 연구는 특징적으로 단기와 장기로 구분하여 분석했는데, 단기에는 생산요소와 중간재의 대체가능성이 낮고 생산비용이 급격히 증가하게 되면서 장기에 비해 분절화의 비용이 약 5배 높다는 점을 발견하였다. 특히 중간재 교역을 낮추고 국내 생산에 대한 의존도를 높임으로써 무역 집약도가 높은 제조업에서 그 영향이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

Clancy, Smith, and Valenta(2024)는 공급망 불안에 대응하는 유럽의 개방형 전략적 자율성(open strategic autonomy)에 따라 리쇼어링의 영향이 달라지는데, 이를 글로벌 동태 일반균형 모형을 이용하여 분석하였다. 이 연구는 리쇼어링이 규제기준을 강화하면서 수입중간재를 국내산으로 대체하는 경우를 가정했으며, 동태모형을 활용함으로써 장기 효과와 중기 효과를 구분하였다. 이 연구에서는 리쇼어링에 따라 국내기업들의 시장지배력이 높아지면서 가격 마크업이 높아지는 경우와 더 낮은 국내중간재를 사용함에 따라 생산성이 저해되는 경우를 고려했으며, 유럽의 일방적 리쇼어링 정책에 대응하여 교역상대국이 보복하는 경우를 추가로 고려하였다. 분석 결과 유럽의 일방적 리쇼어

링 정책은 거래비용을 높임으로써 물가상승으로 이어지고 국내 생산에는 부정적인 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 보복시나리오의 경우에도 물가상승압력이 발생했으며 리쇼어링에 의해 일부 산업의 생산증가 효과도 침식하는 것으로 분석되었다.

Javorcik *et al.*(2022)은 Baqaee and Farhi(2019)와 Cakmakli *et al.*(2021)의 모형을 이용하여 공급망 진영화의 영향을 분석하였다. 시나리오에서는 우크라이나 공격에 대한 UN 일반총회 결의안에 찬성한 그룹과 반대한 그룹으로 진영을 구분하고 공급망의 프렌드쇼어링을 가정하였다. 분석 시 러시아에 대한 제재와 중국의 코로나19 봉쇄에 관한 시나리오도 같이 다뤘는데, 두 시나리오에서는 무역전환에 따라 일부 국가들이 반사이익을 기대할 수 있었으나 프렌드쇼어링의 경우 모든 국가들에 부정적인 영향을 미쳤다. 프렌드쇼어링으로 각 진영이 상호 20%의 무역비용을 추가로 부과하게 될 경우, 중국의 실질GDP는 약 1.5%, 동아시아 국가들은 1%, 태평양 지역과 사우디아라비아는 0.9% 정도 감소하는 것으로 추정되었다.

Aiyar, Presbitero, and Ruta(2023)는 프렌드쇼어링의 경제적 비용을 추정하였다. Baqaee and Farhi(2019)와 Cakmakli *et al.*(2021)을 토대로 국가 간 산업 간 연관관계를 고려한 일반균형 모형을 이용하였다. OECD의 2018년 ICIO 자료를 기반으로 UNCTAD와 TRAINS의 관세율 자료 등을 결합하여 이용하였다. 프렌드쇼어링은 UN의 투표 행태를 기반으로 국가 간 블록을 정의한 후 블록 1에 속한 국가와 블록 2에 속한 국가들이 서로 20%의 추가 관세와 20%의 추가적인 iceberg cost를 부과한다고 가정하였다. 분석 결과 공급망 진영화에 참여하는 모든 국가들에 부정적 영향을 미치는 것으로 관측되었다. 본 연구에서는 모형의 한계를 서술하고 있는데, 우선 자료의 가용성 때문에 39개 국가의 16개 산업만 고려하였으며 복잡한 무역마찰은 iceberg cost 형태로만 반영이 가능했다는 점을 지적하였다. 또 iceberg cost의 특성상 완전한 무역 단절을 가정할 수 없으며, 기존에 형성된 교역관계에서의 변화만 고려할 수 있

고 외연 확장 가능성을 배제하고 있다는 점도 한계로 꼽았다.

Balistreri, Böhringer, and Rutherford(2018)는 2018년 미국의 관세부과와 상대국의 보복조치의 영향을 분석하기 위하여 일반균형 모형을 이용하면서 국제무역을 세 가지 다른 방식으로 모형화하였다. 첫째는 전통적인 Armington 모형으로 규모에 대한 보수불변(constant returns to scale)을 가정하는 것이고, 둘째는 Krugman 모형으로 불완전 경쟁을 가정하되 모든 품목이 모든 국가에서 거래되는 상황을 가정한 것이며, 셋째는 무역의 외연적 확장(extensive margin)을 강조한 양자 간 대표기업(bilateral representative firms) 모형으로 이 가정하에서는 특정 국가에서 생산되는 제품이 모든 국가에 팔리는 것은 아니다. GAMS 프로그램을 이용하여 모형을 구동하여 분석한 결과, 양자 간 대표기업 모형에서 분절화의 효과가 훨씬 크게 나타났으며, 그다음으로 Krugman 모형과 Armington 모형 순이었다.

한국은행(2023a)은 글로벌 교역환경의 변화, 즉 향후 발생 가능한 경제 블록 간의 대립 양상 및 무역장벽의 확대 여부를 토대로 시나리오를 구성하여 그 영향을 분석하였다. 사용된 모형은 Antras-Chor(2018) 일반균형 모형이며, 고려한 시나리오는 ① 제한적 분절화, ② 분절화 심화, ③ 블록 간 대립 심화 및 블록 내 장벽 완화이다. 분석 결과 우리 수출은 글로벌 분절화로 여타 국가들보다 부정적 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 시나리오 1에서는 장기적으로 우리 수출이 2%가량 감소하며, 가장 심각한 시나리오 2에서는 우리 수출이 최대 10% 감소하는 것으로 추정되었다.⁵⁾

Eppinger *et al.*(2021)은 글로벌 가치사슬에서의 디커플링으로 해외에서 발생하는 공급충격에 덜 노출되게 만들어 그 부정적 영향을 줄일 수 있는지에 대한 답을 제시하고자 하였다. 이 연구에서는 Ricardian 방식의 Eaton and Kortum(2022) 모형을 기반으로 세 가지 선행연구 접근법을 접목하였다. 우선 Caliendo and Parro(2015)와 같이 국내 및 해외 투입산출 구조를 고려하고,

5) 시나리오 3은 시나리오 1과 시나리오 2 사이에 위치하는 수준의 분절화를 의미한다.

다음으로 Antras and Chor(2018)처럼 중간재와 최종재의 무역비용을 구분하였으며, 마지막으로 충격으로 인한 노동의 산업 간 이동이 불완전하다고 가정하였다. 이 연구에서는 디커플링에 따른 영향을 분석한 후, 디커플링 상황에서 공급망 분절화가 발생할 경우의 효과를 살펴보았다. 디커플링 상황으로는 모든 국가 간 중간재 교역이 중단되는 경우와 미국이 일방적으로 중간재 교역을 중단하는 경우를 상정하였다. 분석 결과 디커플링 상황에서는 공급망 충격의 부정적 영향이 다소간 완화되는 국가가 있을 수 있으나, 대부분의 국가들에서 디커플링으로 인한 경제적 비용이 훨씬 큰 것으로 나타났다.

연산가능일반균형(CGЕ: Computable General Equilibrium) 모형 분석은 일반균형 이론을 현실 경제의 자료와 접목하여 정책의 효과를 정량적으로 분석하는 접근법이다. CGE 모형은 일반균형 이론을 모형화하는 과정에서 계산상의 편의성과 모형의 안정성을 위해 다양한 가정을 도입하게 되는데, 도입한 가정에 따라 다양한 형태의 모형이 존재한다. CGE 모형은 일반적인 일반균형 모형보다 범용으로 활용된다는 점에서 경제주체의 행태 및 시장구조 등을 더 유연하고 상세하게 고려할 수 있다. 그러나 모형이 복잡할수록 필요한 데이터와 매개변수가 방대해져서 계산상의 부담이 커지고 외부 추정치에 의존해야 하는 한계가 있다.

Byers and Ferry(2019)는 대중국 25% 관세 부과가 미국에 미치는 영향을 REMI(Regional Economic Models, Inc.) PI(Policy Insight) 모형을 이용하여 추정하였다. REMI PI는 동태 CGE 모형의 일종으로 미래 경제의 초기 균형(baseline)을 계량경제 기법으로 추정하고, 정책의 도입으로 인한 영향을 시뮬레이션함으로써 초기 균형에서 어떻게 달라지는지를 추적하는 방식으로 작동한다. 미국의 관세 부과로 기업들은 중국 이외의 지역으로 생산기지를 이전하려고 하는데, 그 정도를 추정하기 위하여 우선 Boston Consulting Group (BCG)의 글로벌 제조업 비용 경쟁적 지수를 활용하였고 생산기지의 이전에 따른 비용이 이전 대상국가 생산비의 50%에 달한다고 가정하였다. 즉 중국에서

생산을 계속하는 경우에는 중국 내 생산비용에 미국의 관세가 추가되며, 제3국으로 생산기지를 이전할 경우에는 해당 국가에서의 생산비와 이전에 따른 고정비용을 지불하게 된다. 이 두 가지 경우를 비교함으로써 중국 내 기업이 생산기지 이전을 고려할 만한 국가들을 식별할 수 있었다. 분석 결과에 따르면 미국의 대중국 관세 부과로 기업들은 중국 이외의 39개국으로 생산기지를 이전하거나 미국으로 회귀하였고, 이로 인해 미국의 고용은 다소 증대하는 것으로 나타났다.

Isono and Kumagai(2023)는 러-우전쟁으로 촉발된 글로벌 분절화 가능성에 대한 우려가 높아진 가운데, 공급망 분절화가 아세안에 미칠 영향에 대하여 분석하였다. 분석 모형은 IDE/ERIA의 Geographical Simulation Model(GSM)로, 이 모형에서는 기업과 소비자의 의사결정을 고려한다. 예를 들어 제조업에 속한 기업은 이윤극대화를 위해 원자재를 어떤 국가에서 조달할지와 얼마나 생산하여 어느 지역에 판매할지 등을 최적화하는 의사결정을 한다. 이 연구에서는 미국과 중국이 상호 모든 품목에 대해 25%의 추가 관세를 부과하는 시나리오를 분석하였는데, 그 결과 미국과 중국에서는 부정적인 영향이 발생하는 반면 중국을 제외한 동아시아 국가들에서는 긍정적인 효과가 발생하는 것으로 나타났다. 공급망 분절화 시나리오, 즉 43개의 서방 국가와 3개의 아시아 국가(중국, 벨라루스, 러시아)가 상품과 서비스에 대하여 상호 25%의 관세상당치에 해당하는 비용을 부과할 경우, 공급망 진영화에 참여하는 국가에는 부정적인 영향이 나타나지만 여기에 참여하지 않는 아세안 국가에는 긍정적인 효과가 기대되는 것으로 나타났다.

OECD(2020)에서는 공급망 분절화의 파급 영향이 개방 수준에 따라 어떻게 다른지 비교 분석하였다. 분석에 사용된 모형은 본 연구와 동일한 OECD METRO 모형이다. 개방 수준을 나타내는 두 개의 글로벌 시스템(localized, interconnected)을 가정하고, localized 시스템을 구현하기 위해 수입품에 25% 관세를 부과하고 노동과 자본에 GDP의 1%p에 해당하는 보조금을 지급하여 새로운 균형을 만들었다. 공급망 분절화 시나리오로 모든 국가 간 양자 교

역에 10%의 무역비용이 높아지는 상황을 가정하여 분석하였다. 평균적으로 localized 시스템에서는 실질GDP가 0.82% 감소하는 반면, interconnected 시스템에서는 0.63% 감소하는 것에 그쳐 localized 시스템이 공급망 리스크에 더 취약한 것으로 분석되었다.

Plummer(2023)은 WTO의 Global Trade Model을 이용하여 세 가지 지정학적 분절화 시나리오(리쇼어링, 니어쇼어링, 프렌드쇼어링)를 분석하였고, 그 결과 글로벌 소득이 1% 감소하는 것으로 나타났다.

국제투입산출모형 분석은 여러 국가의 투입산출표를 국가 간 무역 네트워크에 따라 구축한 국제투입산출표에 기반한다. 공급망 분절화가 국제 산업연관관계를 통해 파급될 때 미치는 영향을 분석할 수 있는데, 이러한 접근법은 직관적이며 다양한 시나리오에 대해 계산상 추적이 가능한 방식이라는 장점이 있다. 다만 연산가능일반균형 모형처럼 정책의 효과를 예측하는 것이 아니라는 점과 가격이나 소득, 투입구조(생산기술) 등도 변하지 않는다는 점에서 단기효과를 포착하는 방식이라고 할 수 있다.

Escaith(2021)는 미중 통상분쟁의 영향을 분석하기 위하여 투입산출표에서 가상 추출 및 대체(Hypothetical Extraction and Substitution) 기법을 이용하였다. 이 기법은 경제의 투입산출 구조에서 특정 산업이나 품목이 제거되거나 다른 방식으로 대체될 경우의 영향을 분석하는 방법으로 공급망 분절화의 파급 영향 분석에도 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 WIOD(World Input-Output Database) 자료를 토대로 미국과 중국 간 교역이 중단되고, 이를 제3국에서의 수입으로 대체하거나 제3국으로의 수출로 전환되는 상황을 고려하였다. 특히 이 연구는 미국과 중국 간 통상분쟁이 양국 경제에 미치는 영향뿐 아니라 국제투입산출 구조를 통해 제3국에 미치는 영향을 분석하였다.

Liu, Liu, and Wang(2020)에서는 공간 더빈 확률변경 모형(stochastic frontier model)을 이용하여 미국과 중국 간 탈동조화의 영향을 분석하였다. 산업 간 기술 확산 및 공간적 상호의존성을 고려하기 위해 미국과 중국의 투입

산출구조에 기반하여 산업 생산성 및 기술 확산을 나타내는 공간적 가중치 행렬을 추정하였다. 추정모형은 Solow(1956) 성장 모델을 공간적으로 확장한 모형이며, 세계 KLEMS 자료를 이용하여 산업 수준에서의 생산성 증가와 기술 확산을 분석하였다. 분석 결과에 따르면 미국과 중국 간에는 산업 간 기술확산이 유의미하며, 미국은 R&D와 디자인, 중국은 조립 및 저부가가치 생산에서 우위에 있는 것으로 나타났다. 미국과 중국이 중간재 교역을 감소시키는 시나리오를 분석한 결과, 전기 및 광학장비 등 기술집약적 산업이 가장 큰 타격을 받으며, 이로 인해 미국과 중국의 GDP는 크게 감소하는 것으로 나타났다.

표 2-2. 공급망에 대한 거시적 접근을 이용한 정량분석 대표 논문

분류	선행연구	방법론	특징
계량분석	Bai <i>et al.</i> (2024)	구조 벡터 자기회귀(SVAR) 모델과 베이지언 추정	AIS(Automatic Identification System) 데이터를 사용하여 항구 혼합 지수를 구축
	한국은행(2023b)	국소추영법	뉴욕연준의 글로벌 공급망 압력지수를 이용하여 상해봉쇄의 영향을 추정
	Bontadini <i>et al.</i> (2022)	회귀분석	니어쇼어링과 파쇼어링 지수를 이용, 가치사슬이 고용에 미치는 영향을 추정
일반균형 분석	Baqae <i>et al.</i> (2024)	Baqae and Farhi(2021)	명목변수의 경직성을 고려하여 신냉전 2.0이 독일 경제에 미치는 영향을 분석
	Góes and Bekkers (2022)	일반균형모형	수입중간재를 통한 산업특화지식의 확산을 추가로 고려
	Attinasi, Boeckelmann, and Meunier(2023)	Baqae and Farhi(2023)	요소와 중간재의 대체가능성을 기준으로 단기와 장기로 구분
	Clancy, Smith, and Valenta(2024)	글로벌 동태 일반균형 모형	리쇼어링에 의한 기업의 마크업 상승과 국내산 대체에 따른 생산성 저하를 고려
	Balistreri, Bohringer, and Rutherford (2018)	일반균형모형	(1) Armington, (2) Krugman, (3) 대표기업 모형을 비교
	한국은행(2023a)	Antras-Chor(2018)	글로벌 분절화에 따른 한국 수출 영향 분석
	Eppinger <i>et al.</i> (2021)	Eaton and Kortum(2022)	디커플링 상황이 공급망 분절화의 악영향을 완화할 수 있는지 분석

표 2-2. 계속

분류	선행연구	방법론	특징
연산가능 일반균형 모형	Byers and Ferry (2019)	REMI(Regional Economic Models, Inc.) PI(Policy Insight)	미국의 대중국 25% 관세 부과 영 향을 분석하면서 기업의 이전비용 을 고려
	Isono and Kumagai (2023)	IDE/ERIA의 Geographical Simulation Model(GSM)	서방과 아시아(중국, 러시아 등) 상호 25% 관세 부과
	OECD(2020)	OECD METRO	두 개의 글로벌 시스템(localized, interconnected)하에서의 공급망 분절화 영향 비교
	Plummer(2023)	WTO's Global Trade Model	리쇼어링, 니어쇼어링, 프렌드쇼어 링 영향 분석
국제투입 산출모형	Escaith(2021)	WIOD 자료에 Hypothetical Extraction and Substitution 기법을 이용	미중 갈등이 미국, 중국뿐 아니라 제3국에 미치는 영향 분석
	Liu, Liu, and Wang (2020)	KLEMS 데이터에 공간 더빈 확률변경 모형(stochastic frontier model)을 이용	산업 간 기술확산 및 공간적 상호 의존성 고려

자료: 저자 정리.

3. 핵심광물예의 적용

앞서 살펴본 바와 같이 일반적인 공급망 분절화 또는 타격의 영향을 정량적
으로 분석하고자 다양한 접근법과 방법론을 활용하고 있다. 개별 품목 또는 기
업 단위의 분석방법론의 경우, 해당 품목이나 기업의 특성을 정확히 반영하여
현실성 높은 분석이 가능하다는 장점이 있으나, 개별 품목이나 기업의 공급망
에 대한 정보 접근성이 낮아 실제 적용이 쉽지 않다는 한계가 있다. 산업이나
국가 단위 분석방법론의 경우 세부 품목 단위의 공급망 분절화에 적용하기에는
한계가 있다. 예를 들어 거시적 접근법에서는 대분류 또는 중분류의 산업 자료

를 이용하므로, 세부 품목을 식별하기 위해서는 무리한 가정이 필요하다.

이러한 어려움 때문에 핵심광물 분절화가 경제 전반에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 드물다. 이하에서는 관련 선행연구를 소개하고 본 연구의 접근법을 서술한다.

Alvarez *et al.*(2023)에서는 상품 교역의 분절화 효과를 분석하기 위해 48개의 중요 에너지, 광물, 농산물 품목에 대한 새로운 자료를 구축하고 부분균형 모형 분석을 실시하였다. 48개의 품목에는 EU 또는 미국에서 제시한 핵심광물이 다수 포함되어 있다.

새로운 자료에서는 교역 물량을 생산에 투입할 때 사용하는 중량(metric ton)으로 변환하고, 광물 형태와 제련된 품목을 분리하였다. 분석대상 품목의 경우 단기적으로 공급 및 수요 탄력성이 매우 낮고, 생산은 소수의 국가에 집중되어 있는 반면 수요는 여러 국가에 걸쳐있다는 특징이 있다. 품목 단위의 수요 및 공급곡선과 시장의 균형식을 활용하여 모형을 구축한 후, 가상적인 분절화 시나리오를 적용하였다. 시나리오에서는 UN 투표 행태를 기준으로 미국-유럽 블록과 중국-러시아 블록으로 구분한 후, 각 블록 간에는 교역이 발생하지 않는 반면 블록 내에서는 교역비용이 변하지 않는다고 상정하였다. 분석 결과 에너지 및 농산물과 달리 광물의 경우 분절화 시나리오로 가격변동이 크게 나타났는데 이는 광물의 생산이 집중화되어 있고 블록 간에 불균형하게 분포되어 있기 때문이다. 이 접근법은 기본적으로 부분균형 모형에 기반하고 있다는 점에서 경제주체들의 합리적 의사결정 과정을 통한 대응을 고려하지 못한다는 한계가 있다.

Manley, Alonso, and Nassar(2022)는 광물의 공급단절에 대한 산업의 취약성을 분석하는 모형을 제안하였다. Levine and Yabroff(1974)의 선형프로그래밍 기법을 이용하여 각 산업의 생산과 부가가치 곱의 합산으로 측정되는 GDP를 극대화하는 함수를 상정하고 광물의 공급단절에 대응하는 생산변화를 추정하였다.

$$\begin{aligned}
 &Max \quad GDP_x = \theta'x \\
 &s.t. \quad (I - DB_d)x \geq f \\
 &\quad \quad x \leq \bar{x} \\
 &\quad \quad m'x \leq \bar{m}
 \end{aligned}
 \tag{식 2-1}$$

위 식에서 θ 와 x 는 각각 산업의 부가가치와 생산을, D , B , f 는 각각 시장접유율, 직접투입, 최소한의 최종재 사용량을 의미한다. m 은 산업생산에 투입되는 광물을 의미하며 \bar{m} 은 생산 또는 사용 가능한 최대치를 의미한다. 이 접근법은 투입산출구조에 기반하고 있으므로 사용 가능한 수준에서 최대로 세분화된 품목단위 접근이 가능할 수 있으나 모형의 특정상 여러 한계가 존재한다. 우선 생산요소 간의 대체가능성을 고려할 수 없다는 점에서 단기-중기의 영향 분석에 적합하다. 또한 405개에 이를 정도로 세분화된 산업자료를 사용했음에도 HS코드가 부여되는 세부단위의 품목단위 접근은 불가하며, 투입산출 구조에서 광물의 동질성을 가정하고 있다. 즉 음료수병 생산에 투입되는 광물과 자동차 산업에 투입되는 광물이 동일한 것으로 가정하는 것이다.

품목 단위의 공급망 구조분석에는 투입산출표(input-output table)에 기반한 모형화도 널리 사용된다. 투입산출표는 경제 내 여러 산업/상품 간의 상호 투입구조에 관한 정보를 담고 있으므로, 이를 통해 특정 산업/상품에서 문제가 발생했을 경우 그 여파가 다른 산업/상품에 어떻게 파급되는지 분석할 수 있다. 이러한 접근법을 불능투입산출(inoperability input output) 분석이라고 부른다. 이 접근법으로 특정 산업/상품에서의 변화가 여러 산업과의 상호작용 속에서 경제 전반에 미치는 파급 영향을 분석할 수 있다. 이 접근법은 투입산출표를 쉽게 구할 수 있다는 것이 장점이다. 다만 산업/상품 간 투입산출구조가 비율로 고정되어 있어 공급망의 대체가능성 등에 대한 유연한 분석이 어렵고, 시간의 개념이 없어 공급망 분절화의 파급 영향에 대한 장기적인 분석만 가능하다는 한계가 있다. 또 제공되는 투입산출표 정보에 의존하고 있으므로 투입산출표보다 더 세분화된 특정 산업이나 상품에 대하여 분석하는 것은 어렵다.

본 연구에서는 선행연구에서 제기하는 주요 쟁점과 파급 경로 등을 고려하여 미시적 접근에서는 기계학습(machine learning) 기법을, 거시적 접근에서는 일반균형모형인 OECD METRO 모형을 접목하고자 한다. 핵심광물 분절화는 반도체나 이차전지와 같은 첨단 품목의 생산에 타격을 줌으로써 경제 전반에 영향을 미친다. 제조 공정이 매우 복잡한 반도체와 이차전지와 같은 분야에서는 단일 기업이나 국가가 공급망의 모든 단계에서 최첨단 경쟁력을 유지하기 어렵기 때문에 자연스럽게 여러 국가와 품목이 얽힌 복잡한 공급망이 형성된다. 복잡한 공급망 내에서 품목 간의 연관성과 이러한 품목들이 최종 생산에 미치는 영향을 분석하기에는 많은 어려움이 존재한다(Manuj and Mentzer 2008; Bier, Lange, and Glock 2020).

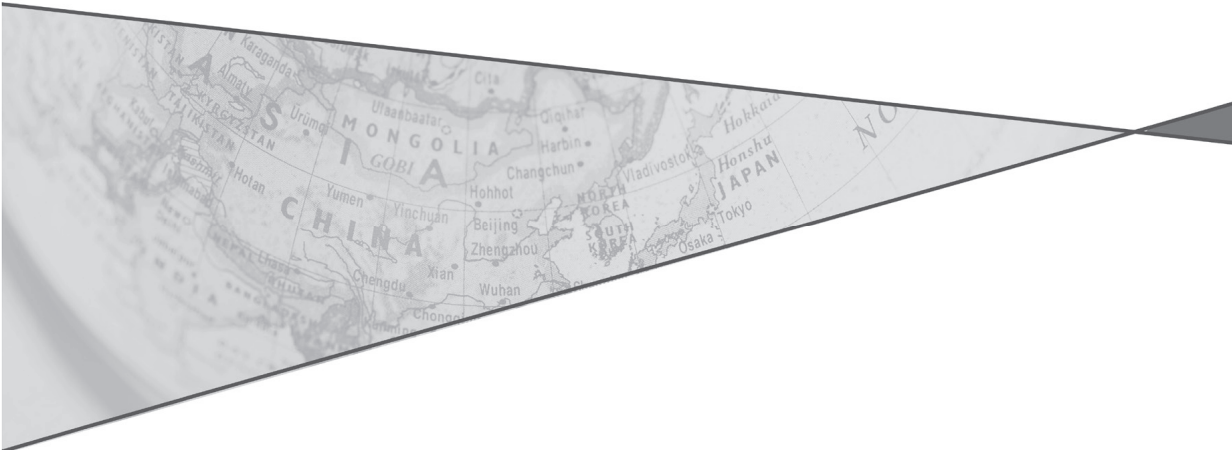
이러한 어려움을 극복하기 위하여 최근에는 장기간 축적된 통상 데이터를 활용하여 빅데이터 분석이나 기계학습 기법을 통해 복잡한 공급망을 분석하고자 하는 시도가 이뤄지고 있다(Katsaliaki, Galetsi, and Kumar 2022). 이에 본 연구에서는 품목 간의 상관관계와 시계열 특성을 반영할 수 있는 기계학습 모형을 활용하여 핵심광물이 반도체, 이차전지, 자동차 및 자동차 부품, 선박 등 국내 주요 산업별 대표품목 수출에 미치는 영향을 모형화하고 공급망 분절화 시나리오에 따른 파급 영향을 정량적으로 평가하고자 시도하였다. 또 OECD METRO 모형을 이용하여 기계학습에 의한 미시적 분석 결과를 거시적 모형에 접목하는 분석을 시도하는 한편, 핵심광물 분절화의 영향을 직접 거시적 모형에서 분석할 경우 그 영향을 비교하여 본 연구에서 제안하는 방법론의 강점을 강조한다.

본 연구에서 소개한 선행연구의 세부적인 접근방법론은 각기 나름의 장단점이 있으므로, 후속연구에서는 미시적 접근과 거시적 접근의 조합을 더 다양하게 검토할 수 있으리라 기대한다.

제3장

핵심광물의 현황 및 주요국의 핵심광물 공급망 전략

1. 핵심광물의 현황
2. 한국의 핵심광물 취약성 분석
3. 핵심광물 공급망 분절화 시나리오 분석
4. 주요국의 핵심광물 공급망 전략 비교 분석
5. 소결



1. 핵심광물의 현황

본 절에서는 미국·EU·한국·중국이 지정한 ‘핵심광물’의 정의와 분류 등을 살펴보고자 한다. 특히 한국이 지정한 ‘핵심광물’과 주요국이 지정한 ‘핵심광물’을 비교함으로써 각국이 공통적으로 중요하게 취급하는 광물은 무엇인지 분석하고자 한다. 또 이러한 핵심광물은 생산량이 한정되어 있지만 미래 첨단산업 생산에 투입된다는 점에서 가치가 커지고 있는바, 그 경제적 중요성을 강조하고자 한다.

가. 핵심광물의 정의

1) 미국

미국은 2020년 「에너지법(Energy Act of 2020)」에서 핵심광물은 미국 지질조사국 국장이 내무부 장관의 권한을 대행하여 중요하다고 지정한 광물이라고 정의하였고,⁶⁾ 핵심광물에서 연료 광물, 수자원, 토양자원 등은 제외한다고 밝혔다.⁷⁾ 특히 미국은 핵심광물 지정 시 △ 미국 경제 및 국가안보에 필수적이며, △ 공급망 교란에 취약하고, △ 제품을 제조할 때 부족하면 미국 경제 및 국가안보에 결정적인 영향을 끼칠 수 있다는 점을 고려한다.⁸⁾ 또 미국의 국방 및 국가안보에 전략적으로 중요하다고 간주되는 광물도 핵심광물 목록에 포함할 수 있다고 밝혔다.⁹⁾

6) EA-2020, Section 7002(a)(3)(A) 및 EA-2020, Section 7002(c)(1).

7) EA-2020, Section 7002(a)(3)(B).

8) EA-2020, Section 7002(c)(4)(A).

9) EA-2020, Section 7002(c)(4)(B).

2) EU

EU는 유사한 개념으로 핵심원자재(critical raw materials) 및 전략원자재(strategic raw materials)라는 용어를 사용한다. EU는 2024년에 발효된 「핵심원자재법(CRMA: Critical Raw Materials Act)」에서 원자재의 정의를 제시하였는데, 여기에서 원자재는 제조 중간 혹은 최종 단계 투입 물질을 의미한다.¹⁰⁾ 이 원자재 중 일정한 기준에 따라 선정된 원자재가 핵심 혹은 전략원자재가 된다. 전략원자재는 △ 원자재를 활용한 전략기술의 수, △ 관련 전략기술 분야 제조에 필요한 원자재의 투입량, △ 미래 세계 수요 증가를 고려하여 녹색 및 디지털 전환, 항공·국방 분야에 전략적으로 중요하다고 판단되는 원자재를 의미한다.¹¹⁾

핵심원자재는 원자재 중에서 경제적 중요성(산업 분야별 원자재 사용 비중, 관련 산업의 부가가치 비중, 원자재 기술 중요도 및 비용 관련 대체 가능 정도 등)과 공급망 리스크(수입의존도 및 수입집중도, 정부 거버넌스 지수, 재할용률, 공급망 내 대체 가능성 등)를 고려하여 선정된다.¹²⁾

EU의 전략원자재와 핵심원자재 개념은 미국의 핵심광물 개념과는 다르지만 「CRMA」에서 농업 원료 및 사료, 연료 물질을 모두 제외한 나머지를 원자재로 정의하는 것을 고려하면, 미국이 제시한 연료 광물, 수자원, 토양자원을 제외한 개념과 유사하다고 할 수 있다. 다만 EU에서는 천연고무, 점결탄(coking coal)과 같은 원자재도 평가 기준에 포함되는 반면,¹³⁾ 미국은 법 정의상 해당 원자재가 평가에서 제외되기 때문에 두 국가의 핵심광물, 핵심원자재 선정 목록에 차이가 생긴다.¹⁴⁾ 더욱이 미국은 핵심재료(critical material)를 더 상위 개념으로 제시하고 있는데, 여기에는 핵심광물 외에 공급망 교란 위험이 크고

10) CRMA-2024, Article 2(1), 재인용: 한선이 외(2024).

11) CRMA-2024, Annex I, Section 2.

12) CRMA-2024, Annex II, Section 2.

13) Grohol and Veeh(2023), p. 2.

14) 점결탄은 CMRA-2024(Annex II, Section 1)에서 핵심원자재로 최종 선정되었다.

단일 혹은 복수의 에너지 기술에서 필수적인 기능을 수행하는 비연료 물질이 포함된다.¹⁵⁾ 미국 에너지부는 내무부와 지질조사국과는 다른 핵심재료 목록을 발표하는데, 이 목록에 에너지 기술에 중요한 재료가 포함되기 때문에 전기강판(electrical steel)과 같이 핵심광물 평가 목록에 해당하지 않는 재료도 포함된다.¹⁶⁾

3) 한국

한국은 2023년 2월에 발표한 '핵심광물 확보전략'에서 핵심광물의 개념과 선정 목록, 비전 및 세부 전략을 밝혔다. 한국의 핵심광물에 대한 정의는 미국, EU의 정의와 크게 다르지 않은데, 한국은 가격, 수급 리스크 발생 가능성과 같은 공급망 교란 요인을 고려하여 국내 경제에 파급 영향이 크기 때문에 관리가 필요한 광물로 개념을 정의하였다.¹⁷⁾ 특히 한국은 경제안보를 위한 것이라고 명시하였는데, 이러한 점은 앞서 경제 및 국가안보 차원을 고려하는 미국의 정의와 유사하다. 또 선정된 핵심광물 중 한국 전략산업인 전기차, 이차전지, 반도체 분야 공급망 안정화를 위한 광물을 특별히 '전략 핵심광물'로 정의하였는데, 선정 기준을 보면 EU의 전략원자재 개념과 유사한 것을 알 수 있다.¹⁸⁾ 2024년 2월에 제정된 「국가자원안보 특별법」은 핵심자원에 대하여 정의하고 있는데, 여기에서는 석유, 천연가스와 같은 에너지 원료 및 핵심광물, 재생에너지 설비의 소재·부품을 포괄하며, 국민생활 및 경제에 파급 영향이 큰 자원을 의미한다.¹⁹⁾

15) EA-2020, Section 7002(a)(2).

16) Congressional Research Service(2025), p. 17.

17) 산업통상자원부(2023b), p. 4.

18) 위의 자료, p. 4.

19) 「국가자원안보 특별법」 제2조 제1항 '핵심자원' 정의 참고.

4) 중국

중국은 2024년 9월 현재 앞서 언급한 주요국에 비하여 ‘핵심광물’을 전면적으로 내세운 전략이나 법은 제정되지 않은 것으로 보인다. 다만 5년 단위로 발표하는 ‘전국광산자원계획’에서 주요광물의 매장량에 관한 정보를 업데이트²⁰⁾하는 등 관련 정보를 발표하였으나, 14·5 계획의 문건은 공개하지 않는 것으로 파악된다.²¹⁾

다만 중국은 2022년 1월부터 ‘수출 허가증 관리 품목 리스트’, ‘이중 용도 품목 및 기술 수출입 허가증 관리 리스트’ 등을 통해 주요 광물들의 수출을 통제중인데, 이 중 일부는 전방위적으로 사용되나 그 희소성으로 인하여 전략적 가치가 높다.²²⁾ 이에 중국이 ‘수출 허가증’과 ‘이중 용도 품목 수출 허가증’ 등 수출 규제를 통해 특정 광물의 수출을 제한하는 경우, 이러한 광물을 자국의 ‘핵심광물’로 간주하고 있다고 판단하였다.²³⁾ 대표적으로 2022년부터 수출 시 ‘이중 용도 품목 수출 허가증’이 필요한 광물인 비스무트(Bismuth, Bi)는 미국의 ‘핵심광물’과 EU의 ‘전략원자재’ 중 하나이다.²⁴⁾

한편 중국은 2023년에 핵심광물 수출통제를 두 차례 발표하였는데, 이러한 수출통제는 미국의 대중국 반도체 규제에 대한 대응이자 대중국 의존도가 높은 국가에 대한 영향력 확대를 위한 조치로 해석이 가능하다.²⁵⁾ 2023년 8월 1일에 중국정부는 갈륨과 게르마늄 관련 품목 30개에 대해 수출통제를 시행하였는데, 현재 중국은 전 세계 갈륨의 98%를 생산하고 있다. 2023년 10월 20일에 ‘흑연 관련 항목 임시 수출통제 조치의 개선·조정’에 관한 공고’를 통해 12월 1일부터 고순도, 고강도, 고밀도 흑연과 제품에 대한 수출통제를 발표하였는

20) 中国地质调查局(2012. 12. 6.), 「全国矿产资源规划 (2016—2020年)」, 온라인 자료(검색일: 2024. 6. 7.).

21) 全国矿产资源规划(2021—2025年)은 공개되지 않는 것으로 파악된다.

22) Dwivedi and Wischer(2023. 4. 12.), “Securing the Critical Minerals that America and Its Allies Lack,” 온라인 자료(검색일: 2024. 2. 20.).

23) 김경숙, 홍건식(2023, p. 11)도 중국이 2023년에 시행한 갈륨과 게르마늄, 흑연 수출통제 조치를 ‘핵심광물’ 수출통제 조치라고 평가하였다.

24) 中华人民共和国商务部, 中华人民共和国海关总署(2021), p. 62.

25) 김경숙, 홍건식(2023).

데, 중국은 리튬이온 배터리의 음극 소재인 흑연을 전 세계 물량의 80% 가까이 생산하고 있으며, 흑연 관련 제품은 중국이 세계 시장의 99% 이상을 장악하고 있는 품목이다.

그리고 중국정부는 2024년 6월에 「희토류 관리 조례(이하 조례)」를 발표하면서 희토류가 국가 소유임을 명시하였다.²⁶⁾ 본 조례에서는 17개의 광물(탄탄, 세륨, 프라세오디뮴, 네오디뮴, 프로메튬, 사마륨, 유로퓸, 가돌리늄, 터븀, 디스프로슘, 홀뮴, 에르븀, 툴륨, 이트륨, 루테튬, 스칸듐, 이트륨)을 희토류로 지정하였다.

5) 한국과 주요국의 '핵심광물' 비교

상술하였듯이 주요국과 한국의 핵심광물과 관련된 정책문건과 법안 등에서 핵심광물을 제시하고 있다. 이에 각국의 핵심광물 범위가 한국의 '핵심광물' 범위와 중복될수록 이를 확보하기 위한 전략과 분석이 필요하다는 판단하에 비교 분석을 실시하였다. [표 3-1]은 이 내용을 정리한 것이다.

표 3-1. 한국의 33종 핵심광물과 주요국 '핵심광물'의 비교

순번	핵심광물	미	EU	중	순번	핵심광물	미	EU	중
1	알루미늄	○	○	○	18	규소		○	○
2	안티모니	○	○	○	19	스트론튬		○	
3	비스무트	○	○	○	20	탄탈럼	○	○	○
4	연(탄소)				21	주석	○		○
5	크롬	○		○	22	타이타늄	○	○	○
6	코발트	○	○	○	23	텅스텐	○	○	○
7	구리		○		24	바나듐	○	○	○
8	갈륨	○	○	○	25	아연	○		○
9	흑연	○	○	○	26	지르코늄	○		○
10	인듐	○		○	27	팔라듐	○	○	○

26) 「稀土管理条例」 제4조에서 "희토류(자원)는 국가 소유이며, 어떠한 조직과 개인도 이를 수탈(侵占)하거나 훼손할 수 없다"라고 명시하고 있다.

표 3-1. 계속

순번	핵심광물	미	EU	중	순번	핵심광물	미	EU	중
11	리튬	○	○	○	28	백금	○	○	○
12	마그네슘	○	○	○	29	디스프로슘	○	○	○
13	망간	○	○	○	30	터븀	○	○	○
14	몰리브데넘			○	31	세륨	○	○	○
15	니켈	○	○	○	32	란탄	○	○	○
16	니오븀	○	○	○	33	네오디뮴	○	○	○
17	셀레늄			○	중복 광물 수	27	25	30	

주: 1) 중국은 2024년도 수출허가 품목 리스트, 이중 용도 수출통제 품목 리스트에 해당 광물에 해당하는 품목이 포함되면 ○으로 표시함.

2) 중희토류는 수출통제 대상에는 없으나, '전국광산자원계획(2016~2020)'에 따르면 희토류를 전략적 광물자원으로 지정하고 있어 이를 반영함(KOTRA 2023, p. 2).

3) 음영으로 처리한 핵심광물은 한국의 10대 전략 핵심광물에 속함.

자료: 1) 산업통상자원부(2023b)를 기반으로 저자가 중국의 2024년 수출허가 품목 리스트와 이중 용도 수출통제 품목 리스트에 기초하여 수정.

2) 광물 관련 HS코드는 Kowalski and Legendre(2023)를 참고.

중국은 한국의 핵심광물 33종 중²⁷⁾ 30종을 핵심광물로 지정하거나 수출통제 품목으로 지정하고 있는데 이는 미국, EU보다 많은 수로 특히 주목할 필요가 있다. 이러한 내용을 살펴보면 한국을 비롯해 미국과 EU가 선정한 '핵심광물'의 범위와 중국이 선정한 '핵심광물'의 범위가 대부분 유사하나 정확히 일치하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 본 장에서는 다른 국가들이 제시한 '핵심광물'과 혼동을 피하기 위해서 2023년 2월에 산업통상자원부가 발표한 '33종 핵심광물'에 해당하는 광물을 '한국의 핵심광물'로 명명하고자 한다.

나. 한국 주요 핵심광물의 경제적 중요성

한국의 경우 중국, 미국 등 주요국 대비 부존 광물의 종류가 적은 편이며 채산성 또한 낮다고 평가된다. 이로 인해 국내 금속광 자급률은 0.5% 수준으로 추정되며 금광 11%, 철광 0.3%, 아연광 0.5% 등 일부 광종을 제외한 대다수

27) 산업통상자원부(2023b), p. 4.

광종의 자급률은 0%²⁸⁾ 수준이다. 자급이 어려운 광물은 수입을 통해 산업에 조달되고 있으며 특히 국내 주력 산업인 이차전지, 자동차, 반도체, 선박 등의 분야에서 활용되는 광물의 대부분이 대외의존도가 높다.

이러한 배경으로 인해 국내 핵심광물의 종류는 광범위하게 지정되어 있다. 우리 정부는 핵심광물 33종을 선정²⁹⁾하고 이 중 10대 전략 핵심광물은 별도로 공급망 안정화 품목에 포함하여 2030년까지 특정 국가에 대한 수입의존도를 50% 이하로 낮추는 전략³⁰⁾을 추진 중이다. 이를 위하여 2024년 6월에 우리 정부는 공급망 안정화 위원회를 출범하고 10조 원 규모의 공급망 안정화 기금³¹⁾을 조성하였다. 공급망 안정화 위원회³²⁾는 국내 공급망 안정화 전략의 기본 방향을 설정하고 공급망 안정화 기금 운영을 포함한 공급망 관련 정책의 심의, 조정 등을 담당한다. 공급망 안정화 위원회에서 선정된 공급망 안정화 선도 사업자는 공급망 안정화 기금을 통해 대출·보증 등 금융지원을 받을 수 있다.

산업통상자원부에서 지정한 10대 전략 핵심광물은 니켈, 코발트, 망간, 리튬, 흑연, 희토류 등 5종으로 구성되어 있으며, 이는 주로 이차전지, 전기차, 반도체 등 국내 첨단전략산업에 활용되는 광물이다. 동 광물들은 세 가지 분야뿐만 아니라 드론, 로봇, 친환경 에너지 등 그린전환과 디지털 전환 및 연관된 첨단 산업에서도 필요하다는 점에서 경제적 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

28) 김유정 외(2022).

29) 산업통상자원부(2023b).

30) 산업통상자원부(2023a).

31) 2024년 9월에 공식 출범했으며 5조 원으로 시작하여 2025년부터 연간 10조 원 규모로 확대되었다. 정부보증 채권을 통해 자금을 조달하였으며 한국수출입은행에서 기금 운영을 담당하고 있다.

32) 경제부총리를 의장으로 총 25명의 민간 전문가로 구성되며, 하위조직으로 경제안보품목, 대외경제전략, 비축 등 분야에 대한 전문위원회가 있다(관계부처합동 2024).

표 3-2. 한국의 10대 전략 핵심광물과 기술 수요

핵심광물	주요 첨단 산업(기술)에서의 수요								
	3D 프린팅	드론	디지털	연료 전지	이차 전지	로봇	태양광 에너지	전기 모터	풍력 에너지
코발트	○	○	○	○	○	○			
흑연		○	○	○	○	○			
리튬		○	○	○	○	○			
망간	○	○	○		○	○			
니켈	○	○	○	○	○	○	○	○	○
희토류	디스프로슘							○	○
	터븀							○	○
	세륨			○					
	란탄			○					
	네오디뮴							○	○

주: 세륨과 란탄은 반도체 연마제에 주로 쓰여 디지털미디어 기술 수요에 포함하고, 디스프로슘과 터븀은 네오디뮴 영구자석(NeFeB) 생산을 위해 첨가되는 중희토류이므로, 네오디뮴 영구자석이 자주 쓰이는 전기모터와 풍력에너지(풍력발전 터빈) 산업의 주요 원자재로 분류함.

자료: Flach *et al.*(2022), pp. 6-7의 내용을 참고하여 한국의 핵심광물 10종 관련 내용을 발췌, 박가현, 김경훈(2023), p. 5의 내용에 기초하여 작성.

특히 지구 온난화 속도를 1.5도로 제한하는 넷제로 시나리오를 만족하기 위해 이러한 전략 핵심광물의 수요가 빠르게 증가할 것으로 판단된다.³³⁾ 특히 [표 3-2]에서 언급된 니켈·흑연·코발트·리튬 등은 2040년의 수요가 2023년 대비 각각 2.1배, 3.9배, 2.2배, 8.7배 증가할 것으로 예측되면서, 해당 광물을 확보하기 위한 주요국의 경쟁이 더욱 치열해질 것으로 판단된다.

이하에서는 우선 한국의 핵심광물 취약성을 분석하고, 이어 핵심광물 공급망에서 실제로 분절화가 발생한 사례가 있는지 살펴보기 위해 분석을 진행하고자 한다.

33) IEA(2024), p. 96.

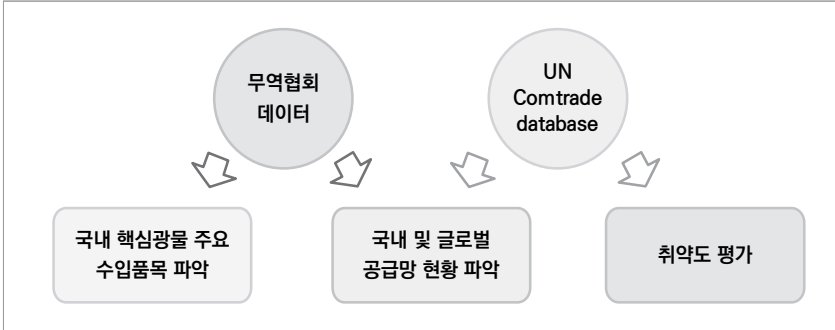
2. 한국의 핵심광물 취약성 분석

핵심광물은 대부분 화학적 안정성 등의 이유로 자연 상태에서는 순수원료 형태(예: 리튬광)로 존재하지 않는다. 또 유통·운반·활용 시 용이성을 위하여 최소한의 세정 및 정제 과정을 거친 화합물 형태로 수출되고 있다. 국내에서도 핵심광물마다 다양한 화합물 형태로 유통되고 있고 이에 따라 다양한 세부 품목코드가 존재하며 국가마다 핵심광물별 주요 세부 품목에 차이가 있다. 예를 들어 전 세계에 유통되는 리튬 중 원광 형태(스포듀민)로 유통되는 비율도 높으나, 국내 스포듀민 수입액은 산화, 수산화리튬 대비 1~2% 수준에 그친다.

본 연구에서는 핵심광물별로 국내 연간수입액을 기준으로 하여 주요 세부 품목을 판단하고 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 수입액과 주요 산업의 연관성을 고려하여 품목을 선정하였으나, 더 세분화(예: HS코드 10자리)된 단위에서 분석을 진행하거나 모든 관련 품목을 종합하여 분석할 경우 다른 결과가 나올 가능성이 있다.

전술한 바와 같이 본 연구에서는 핵심광물별 국내 연간수입액을 기준으로 주요 세부 품목을 판단하고, 선정된 주요 품목에 대하여 국내 수입 현황과 글로벌 교역 현황 등을 종합적으로 파악한 후 취약도를 평가하였다. 먼저 핵심원자재별로 해당 원자재를 검색하여 나온 관련 품목의 개별 국내 수입액을 조사하고 그중 가장 수입액이 큰 품목을 주요 품목으로 가정하였다. 예를 들어 검색을 통해 파악한 안티모니 관련 품목의 국내 총수입액은 7,213만 달러(2022년 기준)이며 이 중 약 51.4%(3,709만 달러)를 차지하는 ‘안티모니와 그 제품(HS 8110)’을 주요 품목으로 선정하였다. 다만 일부 품목의 경우 주요 산업에서의 중요도와 산업 연관성을 고려하여 품목을 선정하였다. 대표적인 예시로 실리콘의 경우 실리콘 관련 품목 중 수입액이 가장 많은 실리콘수지(HS 3910) 대신 반도체 웨이퍼 제작에 사용되는 고순도폴리실리콘(HS 280461)을 채택하였다.

그림 3-1. 국내 핵심광물 취약도 평가 방법



자료: 저자 작성.

우선 국내 핵심광물 33종 중 무역코드(HS Code)가 겹치는 항목을 통합(예: 희토류)하였고, 산업 내 중요성에 따라 일부 광물을 추가·제외하여 총 28종에 대한 주요 품목을 선정하였다.

표 3-3. 핵심광물 및 주요 품목(2023년)

(단위: 백만 달러, %)

순번	핵심광물	HS코드	연간 총수입액	관련 품목 전체 수입액 중 주요 품목의 비율
1	구리	74	7,048	54
2	니켈	75	1,904	72
3	알루미늄	76	8,200	99
4	주석	80	416	100
5	철	2601	8,082	99
6	아연	2608	1,768	92
7	몰리브데넘	2613	1,286	91
8	코크스	2704	87	100
9	크롬	2819	21	31
10	코발트	2822	89	32
11	희토류	2846	84	87
12	백금족	7110	1,624	78
13	텅스텐	8101	98	61
14	탄탈럼	8103	104	98

표 3-3. 계속

(단위: 백만 달러, %)

순번	핵심광물	HS코드	연간 총수입액	관련 품목 전체 수입액 중 주요 품목의 비율
15	마그네슘	8104	85	37
16	티타늄	8108	322	78
17	안티모니	8110	24	40
18	망간	8111	178	39
19	흑연	8545	227	40
20	형석	252921	16	55
21	실리콘	280461	210	6
22	리튬	282520	6,189	72
23	바나듐	282530	63	47
24	게르마늄	282560	41	79
25	스트론튬	283692	17	67
26	니오븀	720293	214	94
27	갈륨 & 인듐	811299	11	100
28	네오디뮴 영구자석	850511	482	100

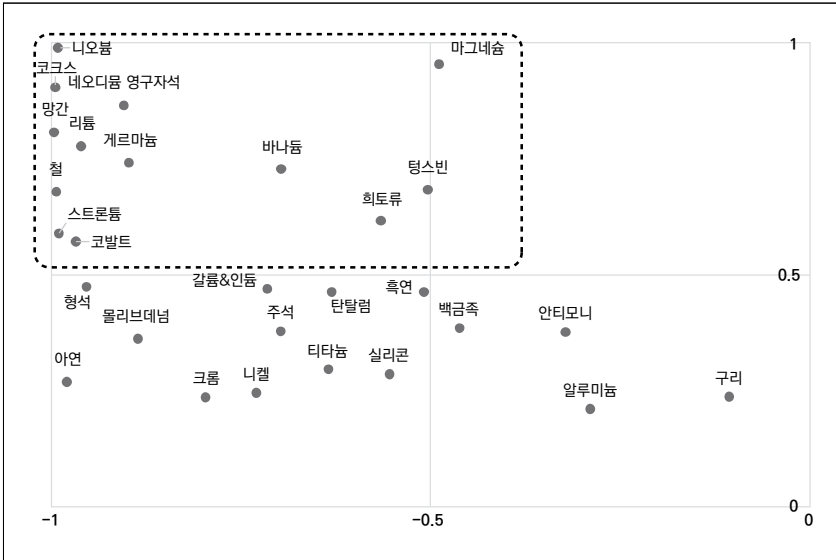
자료: 무역협회 데이터를 기반으로 저자 작성.

추가된 광물로는 최근 중국의 수출통제 대상이었던 게르마늄이나 반도체 산업에 활용되는 형석, 철강 제조에 활용되는 철광석, 코크스 등이 있다. 다만 연간 수입액이 천만 달러 미만인 비스무트, 셀레늄이나 특수합금에만 활용되는 지르코늄 등은 제외하였다.

취약성 분석 기준은 산업통상자원부의 소부장 공급망 안정품목의 기준³⁴⁾과 유사하게 연간 수입액 백만 달러 이상, 특정국 수입의존도 50% 이상인 품목 중에 '총교역액 대비 무역수지(무역특화지수, TSI)'를 추가로 고려하여 정하였다. '무역특화지수'는 연간 무역수지를 총수출입액으로 나눈 수치로, 수치가 작을수록 순수입 품목으로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 품목들의 취약성이 높다고 판단하였다.

34) 산업통상자원부의 소부장 공급망 안정품목의 기준을 연간 수입액 백만 달러 이상, 특정국 수입의존도 50% 이상, 산업에 미치는 영향, 대체가능성, 중·장기 조달 전망 등으로 정하고 있다.

그림 3-2. 국내 핵심광물 주요 품목별 취약도 평가



주: 가로는 무역특화지수, 세로는 최대 수입국으로부터의 수입 비중을 의미.
 자료: 저자 작성.

취약성 분석 결과 리튬, 망간, 코발트, 바나듐, 희토류, 텅스텐, 게르마늄, 네오디뮴, 니오븀, 코크스, 스트론튬, 철광석, 마그네슘의 취약성이 높은 것으로 나타났다. 추가로 몰리브데넘, 백금족, 탄탈럼, 안티모니, 흑연, 형석, 갈륨과 인듐도 상위 2개 의존국에서 수입하는 비중이 60% 이상으로 나타나 비교적 취약한 것으로 판단된다.

표 3-4. 핵심광물별 취약요소(2023년)

핵심광물	주요 품목 코드	주요 의존국 1위 (수입 비율)	주요 의존국 2위 (수입 비율)	총교역액 / 무역수지(TSI)
구리	74	칠레(23.3)	일본 (9.6)	-0.11
니켈	75	호주(24.5)	뉴칼레도니아(18.4)	-0.73
알루미늄	76	중국(21.2)	호주(11.7)	-0.29

표 3-4. 계속

핵심광물	주요 품목 코드	주요 의존국 1위 (수입 비율)	주요 의존국 2위 (수입 비율)	총교역액 / 무역수지(TSI)
주석	80	인도네시아(38.0)	중국(15.9)	-0.70
철	2601	호주(67.9)	브라질(13.5)	-0.99
아연	2608	멕시코(27.0)	볼리비아(16.9)	-0.98
몰리브데넘	2613	칠레(36.3)	멕시코(24.1)	-0.89
코크스	2704	중국(90.8)	일본(5.7)	-1.00
크롬	2819	일본(23.8)	미국(23.8)	-0.80
코발트	2822	중국(57.1)	벨기에(15.6)	-0.97
희토류	2846	중국(61.7)	프랑스(21.8)	-0.56
백금족	7110	남아프리카공화국(38.7)	일본(22.2)	-0.46
텅스텐	8101	중국(68.6)	일본(13.5)	-0.50
탄탈럼	8103	미국(46.2)	일본(26.9)	-0.63
마그네슘	8104	중국(95.7)	대만(2.6)	-0.49
티타늄	8108	미국(29.8)	중국(23.9)	-0.63
안티모니	8110	중국(37.5)	태국(29.2)	-0.32
망간	8111	중국(80.8)	인도네시아(18.6)	-1.00
흑연	8545	중국(46.3)	일본(30.9)	-0.51
형석	252921	중국(47.5)	멕시코(31.9)	-0.95
실리콘	280461	일본(28.6)	미국(24.8)	-0.55
리튬	282520	중국(78.0)	칠레(18.9)	-0.96
바나듐	282530	중국(73.0)	브라질(12.7)	-0.70
게르마늄	282560	중국(74.3)	미국(11.7)	-0.90
스트론튬	283692	독일(58.8)	스페인(23.5)	-0.99
니오븀	720293	브라질(99.1)	캐나다(0.9)	-0.99
갈륨&인듐	811299	중국(46.7)	러시아(43.6)	-0.71
네오디뮴	850511	중국(86.6)	필리핀(12.5)	-0.91

주: 취약 품목의 경우 색으로 강조 표시함. (주황색) 특정국 수입 비율이 50% 이상인 경우, (황색) 상위 2개 수입국의 수입 비중의 합이 60% 이상인 경우임.

자료: 무역협회 데이터를 기반으로 저자 작성.

모든 핵심광물 주요 품목의 무역수지가 적자로 나타났으며 주요 품목 중 78.6%는 총교역액 대비 무역수지(TSI)가 -0.5보다 큰 것으로 나타났다. 이는 핵심광물 주요 품목의 국내 수입액이 수출액의 3배 이상이라는 뜻으로 핵심광

물의 국내 자급률이 낮은 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

한국이 핵심광물을 가장 많이 의존하는 수입국은 중국이며, 15개의 핵심 품목을 중국에서 주로 수입하고 있어 대중국 의존도가 매우 높음을 알 수 있다. 중국은 한국의 핵심광물 수입에서 차지하는 비중이 절대적으로 높는데, 이는 한국 경제가 중국 경제와 밀접하게 연결되어 있고, 중국의 경제 상황이나 정책 변화에 따라 한국 경제가 큰 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 중국에 대한 지나친 의존은 이미 리스크 요인으로 인식되어 있으며, 따라서 다른 국가들과의 교역 확대를 통한 수입처 다변화 필요성이 강조되고 있다.

그 밖에 일본, 칠레, 미국, 호주 또한 각각 핵심광물 2개 품목의 주요 수입대상국이다. 특히 일본은 5개 품목에서 수입의존국 2위를 차지하고 있으며, 미국 또한 3개 품목에서 수입의존국 2위이다. 따라서 한국은 미일 양국과 긴밀한 공급망 협력을 지속해 나가야 한다.

다음으로 취약요소가 있는 광물 20종에 대해 글로벌 수출입 데이터를 활용하여 해당 광물들의 추가적인 취약요소를 확인하였다. 글로벌 공급망 편중도를 알아보기 위하여 허핀달-허쉬만지수(HHI)³⁵를 활용하였으며, 국내 연간수입액과 글로벌 연간교역액을 비교하여 해당 광물의 국내 산업수요를 파악하였다.

핵심광물별 허핀달-허쉬만지수를 살펴보면, 철광석, 코발트, 마그네슘, 망간, 흑연, 리튬, 스트론튬, 니오븀, 네오디뮴의 HHI가 2,500 이상으로 나타났으며, 특히 코발트, 마그네슘, 망간, 리튬, 니오븀, 네오디뮴 등 이차전지와 전기차에 관련된 핵심광물의 글로벌 공급망 편중도가 심한 것으로 판단된다. 해당 광물 중 마그네슘을 제외한 품목의 국내 연간 수입액 또한 글로벌 연간 교역액의 5% 이상을 차지할 만큼 이들은 국내 산업 내 수요가 높은 광물들로 판단된다.

35) 허핀달-허쉬만지수(Herfindal-Hershman Index): 비중의 제곱을 더한 값으로 최댓값은 10,000(100*100, 완전독점), 1,000 이하면 경쟁이 심한 시장, 2,500 이상이면 특정 기업/국가에 집중된 시장으로 구분한다.

표 3-5. 핵심광물 주요 품목의 글로벌 연간 교역액 대비 국내 연간 수입액 및 허핀달-허쉬만 지수(HHI)(2022년 데이터 기준)

(단위: %)

핵심광물	주요 품목 코드	글로벌 연간 교역액 대비 국내 연간 수입액	허핀달-허쉬만지수 (HHI)
철	2601	5.8	3557.24
몰리브데넘	2613	14.9	2156.13
코크스	2704	0.9	1794.92
코발트	2822	8.0	5040.19
희토류	2846	3.7	2005.49
백금족	7110	3.9	1364.21
텅스텐	8101	7.2	1232.92
탄탈럼	8103	11.7	2038.59
마그네슘	8104	3.2	4333.2
안티모니	8110	8.0	1678.56
망간	8111	16.1	4616.09
흑연	8545	3.6	2670.41
형석	252921	4.8	2173.19
리튬	282520	72.2	6059.59
바나듐	282530	19.5	2312.18
게르마늄	282560	8.8	1815.81
스트론튬	283692	121.7*	3247.53
니오븀	720293	7.0	5873.32
갈륨-인듐	811299	2.8	2164.22
네오디뮴	850511	7.9	4490.82

주: HHI는 값이 높아질수록 초록색→붉은색으로 강조함. * 두 데이터베이스의 집계 차이로 오차가 발생함.
 자료: UN Comtrade database(글로벌 연간 교역액)와 국내 연간 수입액(무역협회 데이터) 자료를 이용하여 저자 작성.

3. 핵심광물 공급망 분절화 시나리오 분석

가. 분석 개요

본 절에서는 과거 지정학적 갈등이 광물 공급망을 통해서도 전개되었던 사례를 분석하여 실제로 지정학적 갈등이 광물 공급망에 영향을 주었는지를 파악

하고자 한다.

Evenett and Fritz(2023)는 과거 센카쿠 열도(다오위다오) 영유권으로 인한 일본과 중국 간 갈등이 실제로 일본의 대중국 희토류 수입에 영향을 주었는지를 통계데이터를 활용하여 분석하였다. 본 선행연구에서는 무역 데이터를 분석하여 일본과 중국의 갈등이 일본의 대중국 희토류 수입에 영향을 주었는지는 명확하지 않다고 밝혔으나, 중국이 호주와의 갈등으로 인하여 대호주 희토류 수출을 통제했을 가능성이 있음을 제시하였다.

본 절에서는 지정학적 갈등으로 인하여 핵심광물의 공급망이 영향을 받았는지를 파악하고 그 불확실성을 점검하는 사례 연구를 진행한다. 먼저 Evenett and Fritz(2023)가 사용한 통계방법론을 활용하여 분석 범위를 한국의 핵심광물로 확대하고, 한국도 분석 대상으로 추가하여 사례 분석을 진행하였다.³⁶⁾ 더불어 각국의 광물별 대중국 수입의존도의 변화를 통해 실제로 중국과의 교역에서 공급망 분절화(의도적 혹은 비의도적)가 발생한 것으로 간주할 수 있는 기간을 식별하고자 하였다.

본 연구에서는 중국의 이중 용도 및 수출 허가증 품목에 언급된 광물과 OECD의 광물 목록을 매칭하여, 총 47개(HS 2022 6단위 기준 133개)의 분석 대상 광물을 선정하였다.³⁷⁾ 본 광물 목록에는 ‘한국의 핵심광물’이 아닌 광물도 존재하는데, 본 연구는 우선 모든 광물에 대한 수입 현황을 분석하고, 한국의 핵심광물 중 주요 품목에 대해서는 Evenett and Fritz(2023)의 방법론을 활용한 분석과 대중국 수입의존도 변화에 대한 분석을 진행하였다.³⁸⁾

분석 기간은 미국 트럼프 행정부가 시작된 2017년 1월부터 2023년 12월까지 84개월이며, 분석 대상은 한국 및 6개국(호주, 캐나다, EU, 일본, 영국, 미

36) 본 방법론에 사용된 통계지표의 자세한 내용은 Evenett and Fritz(2023), pp. 33-35의 내용을 참고.

37) 중국 및 OECD의 광물 목록에 기초하여 처음으로 도출된 품목은 51개(HS 2022 기준 149개)이나, 여기서 제재목(Sawn wood)은 제외하고, 또 HS 2017 → 2022 변환 과정에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 일부 품목을 통합하여(글상자 3-1 참고) 최종적으로 47개 품목으로 정리하였다.

38) 광물 공급망 리스크를 분석한다는 점에서 ‘한국의 핵심광물’뿐만 아니라 중국이 수출규제를 시행하고 있는 광물과 그린/디지털 전환에 필요한 광물들을 매칭하고 분석을 진행하였다.

국)의 대세계 및 대중국 월별 수입 자료이다. 분석 국가와 분석 시기를 구체적으로 설명하면 한국 외에 선정된 6개국은 경제 규모 및 대중국 수입 규모(혹은 수입의존도)가 상당히 크면서, 동시에 중국과 정치적으로 거리가 멀어 중국의 수출통제 등으로 인한 공급망 분절화(충격)가 발생할 가능성이 있는 국가들이다.³⁹⁾ 자료의 기간은 2020년과 그 전후 3년으로, 본 연구는 세계 경제의 큰 변혁기였던 코로나19 팬데믹 기간뿐만 아니라 미중 패권 경쟁에 영향을 미친 트럼프 행정부 시기도 함께 고려하고자 하였다.

글상자 3-1. HS 2017 → 2022 변환에 따른 광물 목록 조정

본 연구의 광물 목록은 HS 2022 버전을 기준으로 작성되었기 때문에, 분석기간(2017년 1월~2023년 12월) 중 2017~21년 기간의 HS(2017) 버전과 일치하지 않는다. 이에 따라 HS 2017 버전의 수입 자료는 HS 2022 버전으로 변환하여 활용한다.

그러나 HS 6단위 코드의 버전 변환은 신자료(예: HS 2022)를 구자료(예: HS 2017)로 1:1 또는 n:1 매칭하는 형태이다. 이를 역으로 변환(HS 2017 → 2022)한다면 1:n 매칭이 발생하며, 이때 n개의 HS(2022) 코드 중 어떤 코드에 수입액을 연계해야 하는지 판단이 어렵다. 따라서 핵심광물 목록 중 1:n 매칭이 발생하는 품목은 통합하여 하나의 품목으로 취급한다.

핵심광물 목록상 HS 버전 변환 시 1:n 매칭이 발생하는 품목은 총 5개이며, 이들은 최종적으로 아래와 같이 2개의 품목으로 통합된다.

- 1) 갈륨·게르마늄 혼합(Gallium, germanium etc.):
 목록상 3개 광물 → 1개 광물[HS(2022) 6개 ↔ HS(2017) 2개]

HS(2022)	광물 리스트	HS(2017)
811241	Rhenium	811292
811292	Gallium, germanium, indium, niobium (columbium), rhenium and vanadium	811292
811231	Hafnium	811292
811299	Gallium, germanium, indium, niobium (columbium), rhenium and vanadium	811299
811239	Hafnium	811299
811249	Rhenium	811299

39) Seong *et al.*(2024)은 2005~22년 유엔 총회(UNGA) 투표 기록의 분석을 통해 이러한 6개국과 한국을 중국과 정치적 거리가 먼 'Western group'으로 분류한 바 있으며, 이러한 선행연구의 결과에 기초하여 분석국가를 선정하였다. 자세한 내용은 해당 자료의 p. 9, Sidebar 1의 내용을 참고.

글상자 3-1. 계속

2) 리튬-붕산염-기타(Lithium; Borates; Helium-3; etc.):

목록상 2개 광물 → 1개 광물[HS(2022) 4개 ↔ HS(2017) 1개]

HS(2022)	광물 리스트	HS(2017)
284520	Borates	284590
284530	Lithium	284590
284540	Helium-3	284590
284590	Other	284590

핵심광물 목록상에는 리튬[Lithium; HS(2022)_284520]과 붕산염[Borates; HS(2022)_2845.20]만 포함되나, HS(2017)_284590은 상기한 2개 품목 외에도 HS(2022)_2845.40 및 HS(2022)_2845.90을 포함하여 총 네 가지 HS(2022)코드로 분화된다. 따라서 이를 모두 포함하는 범위에서 품목을 통합하여 정의한다.

나. 광물 수입 현황

한국을 포함한 7개국의 최근 3년간(2021~23년)⁴⁰⁾ 대세계 수입액을 기준으로 해서 각국의 10대 수입 품목을 살펴보면, 니켈(Nickel)과 기타(Other)⁴¹⁾는 7개국 모두에서, 점결탄(Coking Coal), 팔라듐(PGMs_Palladium),⁴²⁾ 로듐(PGMs_rhodium)은 6개국에서, 백금족 폐기물(PGMs_Metal waste & scrap), 백금(PGMs_Platinum), 은(Silver), 티타늄(Titanium)은 5개국에서 10대 품목에 속하는 것으로 나타났다. 한국의 10대 품목 중에서 4개국(7개국의 과반) 이상의 국가에서 10대 품목에 속하는 광물을 살펴보면, 점결탄, 니켈, 기타, 팔라듐, 로듐, 백금족 폐기물 등 6개 품목인 것으로 나타났다.

40) 전체 분석 기간은 2017~23년이지만, 주요 광물의 현황은 가급적 최근 기간의 수입에서 유의미한 품목으로 선정하기 위해 코로나19 발생 이후 최근 3년 기간을 대상으로 하였다.

41) HS코드: 2505.90(기타 천연모래), 2849.90(기타 탄화물), 3824.99(기타 화학공업생산물; 양극재 등).

42) PGMs는 백금족(Platinum Group Metals) 금속 또는 원소를 의미한다.

표 3-6. 7개국의 2021~23년 대세계 수입액 기준 10대 광물

호주	캐나다	EU	영국	일본	한국	미국
은	은	점결탄	은	점결탄	점결탄	로듐
기타	팔라듐	니켈	팔라듐	니켈	기타 카드뮴	은
알루미늄	점결탄	백금족 폐기물	로듐	로듐	도프 처리한 화학원소	기타
점결탄	기타	기타	백금	팔라듐	니켈	팔라듐
티타늄	로듐	팔라듐	점결탄	백금족 폐기물	기타	니켈
백금	티타늄	티타늄	기타	백금	팔라듐	백금
니켈	알루미늄	로듐	니켈	은	몰리브데넘	도프 처리한 화학원소
인산염	니켈	몰리브데넘	티타늄	실리콘	로듐	백금족 폐기물
실리콘	실리카	실리콘	백금족 폐기물	기타	백금족 폐기물	티타늄
크롬	망간	백금	알루미늄	크롬	크롬	실리콘

주: 음영 표시는 한국의 10대 품목 중 7개국의 과반에서도 10대 품목에 해당하는 품목임.

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

같은 방법으로 7개국에 대해 2021~23년 대중국 수입의존도⁴³⁾가 높은 10대 품목을 살펴보면 마그네슘(Magnesium)은 7개국 모두에서, 인조흑연(Graphite, artificial)은 6개국에서, 천연흑연(Graphite, natural)과 텅스텐(Tungsten)은 5개국에서, 안티모니(Antimony), 비스무트(Bismuth), 형석(Fluorspar), 갈륨·게르마늄 혼합(Gallium, germanium etc.), 게르마늄·지르코늄(Germanium, zirconium), 기타 흑연(Graphite)은 4개국에서 10대 품목에 해당되었다. 한국의 10대 품목 중에서 4개국 이상의 국가에서도 중국으로부터의 수입이 많은 10대 품목에 해당되는 광물을 살펴보면, 마그네슘, 인조흑연, 천연흑연, 텅스텐, 갈륨·게르마늄 혼합, 안티모니 6개 품목인 것으로 나타났다. 한편 한국의 대중국 수입의존도 10대 품목 중에서 토륨(Thorium)을 제외한 9개 품목이 ‘한국의 핵심광물’에 속한다.

한편 7개국에서 대세계 수입액을 기준으로 10대 품목에 속하는 광물(23개

43) 해당 품목에 대하여 7개국 각각의 대세계 수입액에서 대중국 수입액이 차지하는 비중이다.

품목)과 대중국 수입의존도를 기준으로 10대 품목에 속하는 광물(18개 품목) 사이에서 중복되는 품목을 살펴보면, 망간(Manganese), 알루미늄(Aluminium), 기타 카드뮴[Other(Cadmium)],⁴⁴⁾ 티타늄(Titanium) 4개 품목이다.

표 3-7. 7개국의 2021~23년 대중국 수입의존도 기준 10대 광물

호주	캐나다	EU	영국	일본	한국	미국
게르마늄·지르코늄	마그네슘	비스무트	비스무트	기타 흑연	기타 카드뮴	토륨
형석	안티모니	인조흑연	게르마늄·지르코늄	천연흑연	천연흑연	천연흑연
안티모니	텔루르·붕소	기타 흑연	탄탈럼	마그네슘	토륨	인조흑연
보크사이트	갈륨·게르마늄 혼합	마그네슘	형석	텅스텐	마그네슘	비스무트
텔루르·붕소	기타 흑연	게르마늄·지르코늄	천연흑연	형석	텅스텐	안티모니
활석	티타늄	셀레늄	텅스텐	비스무트	갈륨·게르마늄 혼합	희토류 원소
지르코늄	형석	텔루르·붕소	갈륨·게르마늄 혼합	게르마늄·지르코늄	망간	마그네슘
알루미늄	바나듐	망간	보크사이트	보크사이트	인조흑연	기타 흑연
인조흑연	천연흑연	갈륨·게르마늄 혼합	바나듐	활석	안티모니	탄탈럼
마그네슘	인조흑연	텅스텐	마그네슘	인조흑연	바나듐	텅스텐

주: 음영 표시는 한국의 10대 품목 중 7개국의 과반에서도 10대 품목에 해당하는 품목임.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

한국의 경우 대세계 수입액 기준 및 대중국 수입의존도를 기준으로 10대 품목이 중복되는 품목은 기타 카드뮴이 유일하다. 기타 카드뮴은 한국의 대세계 수입액을 기준으로 2위(2021~23년 평균 36억 달러)이고, 대중국 수입의존도를 기준으로 1위(95%)이다. 특히 7개국 전체의 기타 카드뮴 수입(42억 달러)에서 한국의 수입이 차지하는 비중은 무려 87%에 달하는 만큼, 기타 카드뮴은 한국의 수입에서 유독 중요한 품목이라고 볼 수 있다.

44) HS코드: 2825.90(기타 금속 산화물·수산화물·과산화물; 니켈-코발트-망간 수산화물 포함).

표 3-8. 7개국의 2021~23년 대세계 수입액 및 대중국 수입의존도 기준 10대 광물

(단위: 개, 백만 달러, %)

대세계 수입액 기준				대중국 수입의존도 기준			
품목	국가 수	대세계 수입액	대중국 의존도	품목	국가 수	대세계 수입액	대중국 의존도
니켈	7	16,307	1	마그네슘	7	1,495	62
기타	7	14,294	17	인조흑연	6	1,536	70
점결탄	6	79,949	1	천연흑연	5	494	67
팔라듐	6	17,548	0	텅스텐	5	751	41
로듐	6	16,797	0	비스무트	4	58	68
은	5	17,279	4	기타 흑연	4	279	54
백금족 폐기물	5	10,739	4	게르마늄·지르코늄	4	263	49
백금	5	8,533	0	안티모니	4	757	46
티타늄	5	6,946	20	갈륨·게르마늄 혼합	4	707	33
실리콘	4	5,833	16	형석	4	426	27
크롬	3	4,588	4	텔루르·붕소	3	115	39
알루미늄	3	4,056	11	바나듐	3	824	22
도프 처리된 화학원소	2	7,306	18	보크사이트	3	1,121	12
몰리브데넘	2	6,370	8	망간	2	2,638	34
기타 카드뮴	1	4,189	85	탄탈럼	2	565	30
망간	1	2,638	34	활석	2	384	29
인산염	1	1,591	4	토륨	2	1	2
실리카	1	551	2	기타 카드뮴	1	4,189	85
				희토류 원소	1	1,992	45
				셀레늄	1	307	26
				티타늄	1	6,946	20
				알루미늄	1	4,056	11
				지르코늄	1	300	7

주: 1) 음영 표시는 대세계 수입액 기준과 대중국 수입의존도 기준상에서 중복되는 품목임.

2) '0%'는 대중국 수입의존도가 0.5% 미만인 경우임.

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

표 3-9. 한국의 2021~23년 대세계 수입액 및 대중국 수입의존도 기준 10대 광물

(단위: 백만 달러, %)

대세계 수입액 기준				대중국 수입의존도 기준			
품목	대중국 수입액	대세계 수입액	대중국 의존도	품목	대중국 수입액	대세계 수입액	대중국 의존도
점결탄	186	19,659	1	기타 카드뮴	3,454	3,636	95
기타 카드뮴	3,454	3,636	95	천연흑연	109	117	93
도프 처리된 화학원소	713	2,415	30	토륨	0	0	92
니켈	78	1,703	5	마그네슘	89	105	84
기타	450	1,353	33	텅스텐	51	61	83
팔라듐	0	1,313	0	갈륨·게르마늄 혼합	69	85	81
몰리브데넘	202	1,064	19	망간	240	314	76
로튬	0	851	0	인조흑연	146	202	72
백금족 폐기물	101	810	12	안티모니	49	70	70
크롬	38	783	5	바나듐	88	135	65

주 1) 음영 표시는 대세계 수입액 기준과 대중국 수입의존도 기준상에서 중복되는 품목임.

2) '0'은 수입액이 50만 달러 미만인 경우, '0%'는 대중국 수입의존도가 0.5% 미만인 경우임.

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

다. 분석 방법

1) 공급망 분절화 가능성 분석

공급망 분절화의 가능성을 분석하기 위해 Evenett and Fritz(2023)의 방법론에 따라 해당 기간 내에 대중국 수입이 급격히 감소하는 빈도와 강도를 살펴본다. 이를 통해 특정 광물의 대중국 수입에 대한 변동성 정도를 측정하고, 나아가서 중국과의 교역에서 공급망 분절화가 발생한 것으로 간주할 수 있는 무역패턴이 있었는지를 식별하고자 한다.

한국을 포함한 7개국의 대중국 핵심광물 수입에서 급격한 감소가 나타나는 빈도와 강도를 계산하기 위해, 먼저 [식 3-1]과 같이 R_{itg} 를 계산하였다. 여기에서 S_{itg} 는 광물 g 에 대하여 수입국 i 가 7개국 전체의 대중국 수입에서 차지하는 월 단위(t) 비중을 의미하며, M_{ig} 는 수입국 i 의 분석 기간(84개월) 동안

S_{itg} 의 중간값을 의미한다.⁴⁵⁾ R_{itg} 계산 시 분모(M_{ig})가 중간값으로 고정되어 있는 만큼 R_{itg} 값의 절반(42개)은 일반적으로 1을 초과하게 되며, 나머지 절반(42개)은 1 미만의 값으로 나오게 된다.⁴⁶⁾

$$R_{itg} = \frac{S_{itg}}{M_{ig}} \quad \text{[식 3-1]}$$

여기에서 i 는 국가, t 는 월, g 는 품목(핵심광물)

다음으로 중간값(M_{ig}) 이하의 42개 R_{itg} 값들을 [0~0.1], [0.1~0.25], [0.25~0.5], [0.5~1] 4개 구간으로 분류한다. 예를 들어 [0~0.1] 구간에 속하는 경우는 중간값의 10% 이하 수준으로 수입이 이루어진 경우를 의미하며, 이는 다른 국가들과 비교해 급격한 수입 감소가 있었던 것으로 볼 수 있다. 마찬가지로 [0.1~0.25] 구간이나 [0.25~0.5] 구간에 속하는 경우도 중간값의 25% 이하 혹은 50% 이하로 수입이 이루어졌던 경우인 만큼, 이는 상당한 수준의 수입 감소가 있었다고 해석할 수 있다. 반면 [0.5~1] 구간에 속하는 경우 중간값의 50%를 초과하거나 중간값에 근접한 경우인 만큼, 이는 일반적인 수준의 변동에서 크게 벗어나지 않아 공급망 분절화(충격)가 있었다고 보기는 어렵다.

분석의 대상으로는 한국의 입장에서 중요한 광물을 우선적으로 분석하기 위해 ① ‘한국의 핵심광물’에 속하면서, ② 중국이 2023년에 수출 규제 대상으로 발표하였으며, ③ 2024년에 발표한 ‘희토류 관리 조례’에 해당하는 게르마늄, 흑연, 희토류 등 3종을 선정하였다. 특히 2024년 한국의 대중국 천연흑연 수입 의존도는 94.7%로 전년 대비 3.3%p 감소하였으나, 천연흑연은 여전히 대부분 중국에서 공급되고 있다. 또 같은 해 한국의 인조흑연 대중국 수입의존도는

45) 월 단위로 서구의 대중국 희토류 수입 총액에서 일본 수입액이 차지하는 비중을 분석하는 이유는 가격 변동에 수입의존도 변화를 통제하기 위해서인데 서구 수입업자(G7)들은 특정한 월에 중국산 희토류에 대해 동일한 가격에 직면하며, 만약 각 희토류의 가격이 두 배로 상승한다면 기록된 일본의 월별 수입 총액은 두 배로 증가하지만, 전체 서구 수입에서 일본 수입이 차지하는 비중은 바뀌지 않는다.

46) 다만 어떤 수입국(i)의 중간값(M)이 0값을 가지거나, 혹은 7개국 전체의 대중국 수입이 0인 광물의 경우에는 R 값 자체가 계산되지 않는다. 후자의 경우는 토륨(Thorium) 등 6개 품목이 해당한다.

97.3%로 오히려 전년대비 2.1%p 증가하였다. 따라서 한국의 흑연에 관련된 수입 다각화가 단기간에 이루어지기 어렵다는 점을 고려하여 흑연을 분석 대상으로 선정하였다.⁴⁷⁾ 이와 유사하게 한국의 대중국 게르마늄 관련 수입의존도가 높은 품목은 갈륨이 포함된 괴(塊), 웨이스트와 스크랩·가루(HS:811292), 기타(HS:811299) 품목으로 파악되었고, 2024년 현재 이들의 대중국 수입의존도는 각각 93.7%, 76.8%에 달한다. 이러한 수입의존도는 전년대비 각각 4%p, 26%p 증가하였다는 점을 고려하여 분석 대상으로 선정하였다.⁴⁸⁾ 마지막으로 중국의 희토류 생산량이 전 세계 생산량의 69.3%를 차지하는 등 중국이 국제 희토류 공급망에서 영향력을 미치고 있으므로 이 점을 고려하였다.⁴⁹⁾

이 광물들은 본 연구의 핵심광물 목록상 7개 품목[갈륨·게르마늄 혼합, 게르마늄·지르코늄, 기타 흑연, 인조흑연, 천연흑연, 희토류_세륨(Rare earth_cerium), 희토류 원소(Rare-earth elements)]에 해당한다.

2) 공급망 분절화 기간 분석

앞의 가능성 분석의 결과는 공급망 분절화로 간주할 수 있는 시점(월)들의 빈도와 수입 감소의 정도를 측정하는 데 적합하며, 이를 통해 품목들 간 혹은 국가들 간 수입의 변동성을 비교할 수 있었다. 그러나 공급망 분절화가 언제부터 얼마 동안 발생했는지, 나아가서 당시 어느 정도 수준으로 발생했는지 살펴보는 데는 한계가 있다. 따라서 국가별 시계열 자료를 활용하여 대중국 수입의 변동이 어느 시점부터 어느 시점까지 나타났는지 구체적으로 살펴볼 필요가 있다.

따라서 공급망 분절화가 나타난 기간을 분석하고자 한국을 포함한 7개국의 2017~23년(84개월) 품목별 대중국 수입의존도 추이를 직접적으로 살펴본

47) 천연흑연은 HS:2504109000, 인조흑연은 HS:3801101000을 기준으로 분석한 결과이다(무역협회 글로벌 무역통계서비스 K-stat, 검색일: 2025. 1. 22.).

48) 무역협회 글로벌 무역통계서비스 K-stat(검색일: 2025. 1. 22.)의 자료를 이용하여 저자 작성.

49) U.S Department of the Interior U.S Geological Survey(2024), p. 145에서 제시한 2022~23년 생산량 자료를 이용하여 저자 작성.

다.50) 이를 통해 실제 대중국 수입의 급격한 변동이 나타난 시점과 기간 그리고 빈도와 강도를 직접적으로 파악할 수 있으며, 아울러 추세적인 흐름이나 변동성 역시 파악할 수 있다. 나아가서 최종적으로는 만약 향후 중국발 공급 충격이 발생한다면, 7개국의 과거 대중국 수입 사례에 비추어 예상할 수 있는 공급망 분절화 기간(시나리오)을 식별하고자 한다.

분석 대상으로는 앞의 분석과 마찬가지로 한국이 중국에서 수출통제를 받을 가능성이 높은 것으로 판단되는 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목을 선정하였다.

라. 분석 결과

1) 공급망 변동성 분석

게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목 각각에 대해 84개월(2017~23년) 동안 7개국 전체의 대중국 수입에서 해당 국가의 수입이 차지하는 월별 비중(대중국 수입 비중)의 중간값을 계산하였는데, 그 결과는 [표 3-10]과 같다. 다만 어떤 국가의 월별 수입이 절반 이상 없었던 경우라면 중간값은 0이 되며, 또 경우에 따라 0에 가까운 미미한 값이 될 수 있어 주의가 필요하다. 추가적으로 [표 3-10]의 수입의존도는 84개월 동안 각국의 대세계 수입에서 대중국 수입이 차지하는 비중(대중국 수입의존도)을 계산한 결과이다. 이를 통해 어떤 국가의 대중국 수입액 규모가 다른 국가에 비해 작더라도 그 국가의 대중국 수입의존도 자체는 큰 경우를 식별할 수 있다.

특정 국가의 수입 비중 중간값이 높다는 것은 7개국 전체의 대중국 수입에서 해당 국가가 차지하는 비중이 높다는 의미이므로, 중국발 공급망 충격에 따른 영향도 더 클 가능성이 있다. 한편 수입의존도가 높다는 것은 해당 국가에서 그

50) 다만 본문에서는 한국의 대중국 수입의존도 추이를 중심으로 살펴보았으며, 나머지 호주, 캐나다, EU, 영국, 일본, 미국 등 6개국의 대중국 수입의존도 추이는 [부록 2]를 참고.

만큼 중국에 대한 의존도가 높다는 의미이므로 중국발 공급 충격이 발생했을 때 제3국산으로 대체할 수 있는 가능성은 더 낮다고 볼 수 있다.

각 품목들에 대한 분석 결과에 따르면 호주, 캐나다, 영국의 경우 7개국 전체 대비 대중국 수입 비중의 중간값이 1% 내외로 매우 낮지만, 대중국 수입의존도는 30% 이상 이상으로 높게 나타난다.

표 3-10. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 국가별 대중국 수입 비중 중간값 및 수입의존도

		(단위: %)						
품목	구분	호주	캐나다	EU	영국	일본	한국	미국
갈륨·게르마늄 혼합	중간값	0.0	1.0	29.1	5.3	21.8	22.6	18.5
	수입의존도	7.6	35.4	30.3	26.1	30.6	69.1	15.8
게르마늄·지르코늄	중간값	0	0.2	46.0	3.1	23.5	15.1	8.7
	수입의존도	77.7	3.0	51.5	41.5	62.3	51.0	22.9
기타 흑연	중간값	0.1	1.5	30.3	1.2	17.0	4.0	23.5
	수입의존도	16.6	23.1	57.8	16.8	95.7	36.0	44.3
인조흑연	중간값	0.2	0.4	46.8	0.5	12.3	23.4	20.1
	수입의존도	49.4	14.9	68.8	18.9	48.5	64.9	45.8
천연흑연	중간값	0.1	0.3	14.6	0.6	33.7	31.7	11.6
	수입의존도	47.9	31.0	32.7	37.4	91.5	89.3	58.4
희토류_세륨	중간값	0	0.1	23.8	1.7	40.6	9.1	15.0
	수입의존도	10.1	24.1	31.2	52.8	28.9	14.5	20.9
희토류 원소	중간값	0.2	0.7	18.1	0.9	49.6	11.2	17.5
	수입의존도	38.4	12.6	29.2	11.5	48.7	47.4	42.7

주: 1) 중간값은 2017~23년(84개월 각각) 동안 7개국 전체 대중국 수입에서 각국의 수입이 차지하는 비율들의 중간값이며, 수입의존도는 2017~23년(84개월 합산) 동안 각국의 대세계 수입액에서 대중국 수입액이 차지하는 비율임.

2) '0.0'은 중간값이 0.05 미만인 경우이며, '0'은 중간값이 0인 경우임.

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

다음으로 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목에 대해 국가별로 84개월 동안 대중국 수입이 상대적으로 감소한 빈도를 4개 구간별로 측정한 결과는 그림 3-3과 같다.

분석 결과를 살펴보면, 먼저 게르마늄 관련 2개 품목은 앞서 [표 3-8]에서 살펴본 바와 같이 수입액 규모가 큰 품목은 아니지만 7개국 중 4개국에서 대중국

수입의존도 기준 상위 10대 품목에 해당하는 중요 품목이다. 한국의 경우 ‘갈륨·게르마늄 혼합’이 대중국 수입의존도 10대 품목 중 하나로 수입의존도는 2017~23년 동안 69.1%에 달한다. 품목별로 살펴보면 ‘갈륨·게르마늄 혼합’은 호주와 캐나다에서 오랜 기간 중간값의 10% 이하 수준의 수입 감소가 있었던 것으로 나타났다. 다만 호주의 경우 중간값이 0.002%로 미미하고 대중국 수입의존도(7.6%) 역시 비교적 낮았는데, 그 영향으로 나타난 결과로 볼 수 있다. 이 외에는 한국, 영국, 일본이 상당한 변동성을 보였고, EU와 미국은 비교적 안정적인 양상을 보였다. 다음으로 ‘게르마늄·지르코늄’은 캐나다, 영국, 미국에서 상당한 수준의 수입 변동이 있었던 것으로 나타났다. 다만 캐나다는 중간값이 0.2%로 매우 작은 것에 따른 영향이며, 한국의 경우는 25~50% 수준의 변동이 주로 나타났다. 한편 호주의 경우 중간값이 0으로 R값이 계산되지 않으나, 호주의 대중국 수입의존도 자체는 77.7%로 크게 높았다.

흑연 관련 3개 품목은 많은 국가에서 대중국 수입의존도 10대 품목으로 꼽히는 중요 광물이다. 특히 6개국에서 10대 품목으로 선정되는 ‘인조흑연’은 [표 3-8]과 같이 7개국 합계 대세계 수입액이 연평균 15억 4,000만 달러(2021~23년 기준)에 달한다. 한국의 경우 ‘천연흑연’에 대한 대중국 수입의존도가 89.3%에 달하며, ‘인조흑연’의 대중국 수입의존도 역시 64.9%로 높다. 대중국 흑연 수입에 대한 변동성은 호주와 영국에서 3개 품목 모두 큰 것으로 나타났으며, 품목별로 살펴보면 ‘기타 흑연’은 미국, ‘인조흑연’은 EU, ‘천연흑연’은 캐나다에서 변동성이 크게 나타났다. 한국의 경우 25~50% 수준의 수입 감소가 빈번히 나타나기는 하였으나, 다른 국가에 비하면 수입이 상당히 안정적으로 이루어지고 있다.

희토류 2개 품목의 경우 미국을 제외하면 다른 국가에서는 10대 품목에 선정되지 않았고, 각국의 대중국 수입의존도 역시 과반이 되지 않는 등 매우 높은 편은 아니다. 다만 [표 3-8]에서 볼 수 있듯이 ‘희토류 원소’에 대한 7개국 전체의 대세계 수입액은 연평균 19억 9,000만 달러(2021~23년)에 달하며, 7개국 전체의 대

중국 수입의존도 역시 45%로 그리 낮지 않다. 한편 대중국 수입의 변동성은 오히려 '희토류_세륨'에서 크게 나타났는데, 특히 캐나다와 영국은 중간값의 10% 이하 수준의 수입 감소가 각각 10개월 및 22개월 동안 나타났고, 10~25% 수준의 수입 감소는 14개월 및 3개월 동안 나타났다. 또 중간값의 25~50% 수준의 변동은 호주를 제외한 대부분 국가에서 상당수 관측되었다. 반면 '희토류 원소'는 호주, 영국, 캐나다 등에서 비교적 변동성이 크게 나타났으나, 이 국가들에서 중간값은 모두 1% 미만으로 나타났다는 점을 참작할 필요가 있다.

추가적으로 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 품목들 외에 7개국 전체의 대중국 수입 관련 주요 광물들 그리고 한국의 대중국 수입에서 중요한 광물들에 대해서도 분석하였다. 이에 대한 품목 선정 및 공급망 분절화 가능성을 분석한 결과는 [부록 1]에 정리하였다.

그림 3-3. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 수입 변동성 분석 결과

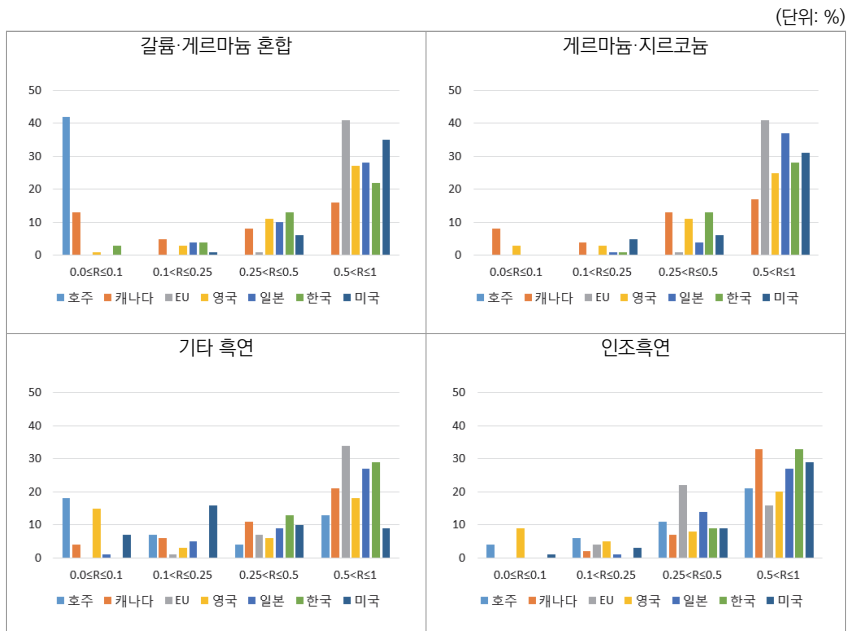
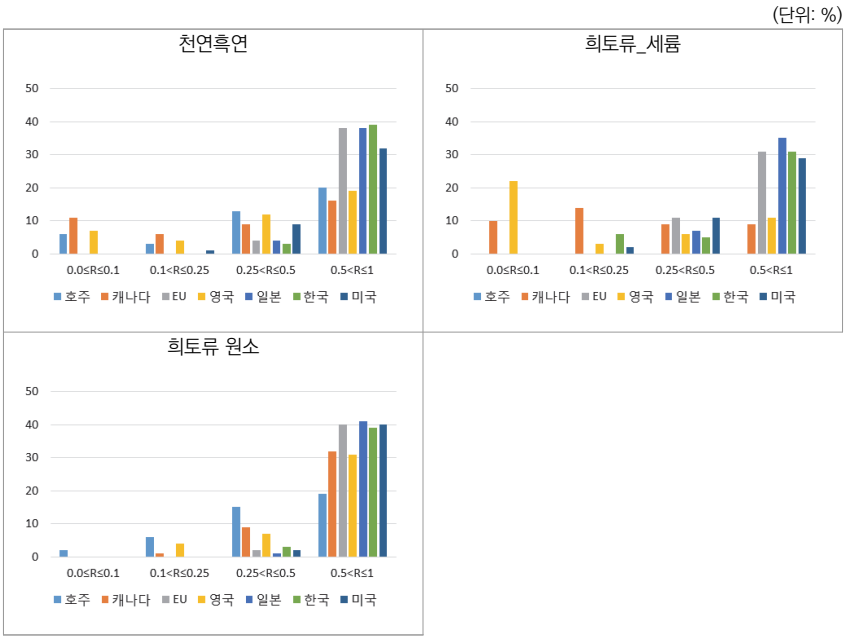


그림 3-3. 계속



주: 1) 총 84개월(2017년 1월~23년 12월)이 분석 대상으로, R값은 중간값 이하 42개에 대한 분포임.
 2) 호주의 경우 '갈륨·게르마늄 혼합'은 비중의 중간값(0.002%)이 극히 낮아 유의미한 결과로 보기 어려우며, '게르마늄·지르코늄'과 '희토류_세륨'은 중간값이 0으로 R값 자체가 계산되지 않음.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

2) 공급망 분절화 기간 분석

게르마늄, 흑연, 희토류 3종과 관련된 7개 품목 각각에 대하여 84개월(2017~23년) 동안 한국의 대중국 수입의존도 추이를 분석한 결과는 [그림 3-4]와 같다. 품목별로 살펴보면 먼저 게르마늄 관련 품목 중 '갈륨·게르마늄 혼합'은 2021년 중반을 기점으로 수입의존도가 50% 내외에서 80% 내외로 증가하는 등 큰 변화가 있었다. 특히 수입의존도 등락의 폭은 이전 기간에 더욱 컸는데 2019년 7~12월 및 2020년 9~12월 기간에 대중국 수입의존도가 크게 낮게(중간값의 25% 이하) 나타났다. 다음으로 '게르마늄·지르코늄'은 대중국 수입의존도 등락의 폭은 크지만, 전체 기간에 걸쳐 평균적으로 50% 수준을 유

지하였다. 기간별로는 2019년 6월부터 2020년 3월까지 대중국 수입의존도가 비교적 낮았으며, 2022년 2월과 9월에도 일시적으로 크게 낮아졌던 바 있다.

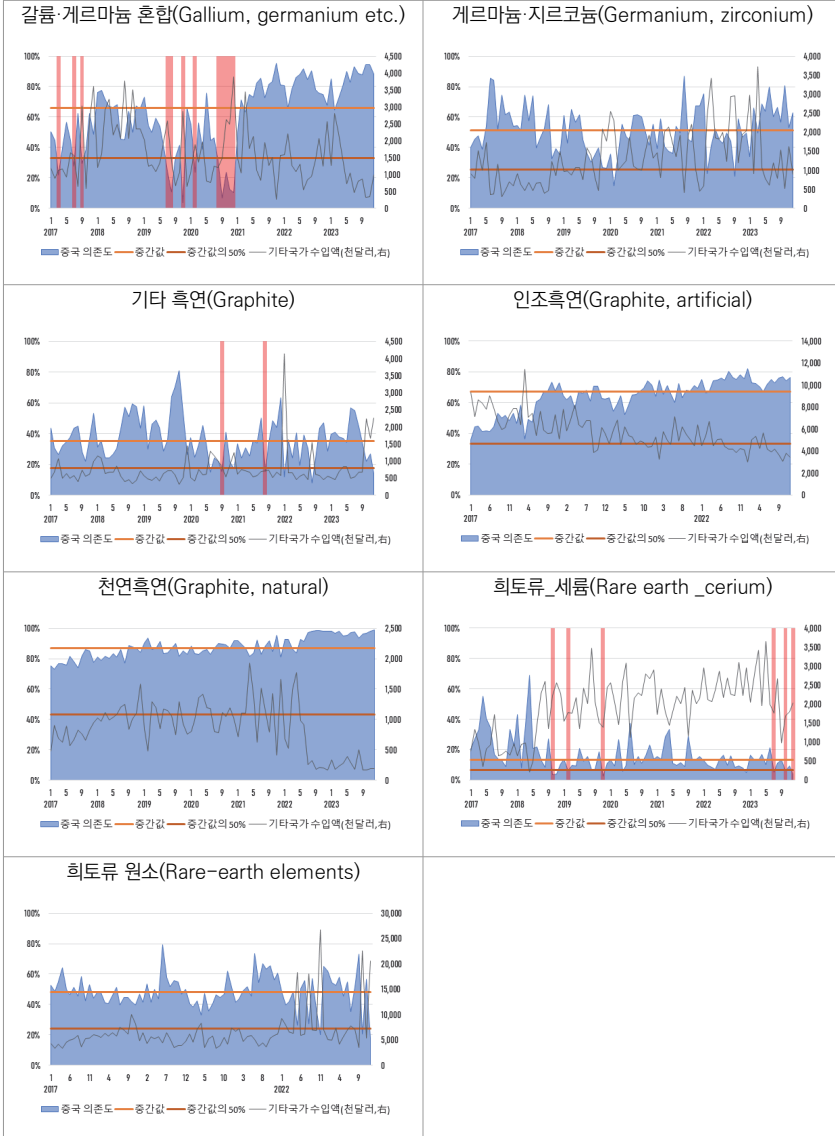
흑연 관련 품목 중 '기타 흑연'은 분석 기간 동안 평균값(36%) 수준을 유지하였으나, 상방과 하방 모두에서 대중국 수입의존도의 등락은 상당히 컸다. 기간별로 살펴보면 2020년 6~12월 기간에 대중국 수입의존도가 상대적으로 낮았으며, 2021년 8월과 2022년 1월에도 한시적으로 크게 낮아진 적이 있으나, 그 전후로는 높은 수준을 보이면서 전체적인 추이를 벗어나지는 않았다. 반면 '천연흑연'과 '인조흑연'은 모두 분석 기간에 전반적으로 대중국 수입의존도가 우상향하는 추세를 보였으며, 공급망 분절화 기간으로 볼 만한 큰 변동은 나타나지 않았다. 대중국 수입의존도가 증가하는 추세는 인조흑연에서 더욱 가파르게 나타났으나, 수입의존도의 경우 천연흑연이 2017년에 약 80%, 2023년에는 100%에 가까울 정도로 컸다.

희토류 관련 품목 중 '희토류_세륨'에 대한 한국의 대중국 수입의존도는 2017~23년 동안 14.5% 수준으로 높지 않은 편이며, 기간별로 살펴봐도 2017~18년 동안 한시적으로 높았던 기간을 제외하면 전반적으로 등락이 크지 않다. 다만 대중국 수입의존도의 중간값(13.3%)과 중간값의 25% 수준(3.3%) 내에서의 변동은 상당히 잦은 편이다. 이에 반해 '희토류 원소'에 대한 대중국 수입의존도는 2017~23년 평균이 47.4%로 높고, 기간별로 살펴보면 2022년 이전까지는 일부 상방으로의 큰 변동을 제외하면 안정적인 흐름을 보인다. 그러나 2022~23년에 들어서는 단발적으로 중간값의 25% 이하 수준에 이르는 수입 급감이 여러 차례 나타나면서 등락의 폭이 커졌다.

추가적으로 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목에 대하여 한국 외에 6개국 각각에 대한 대중국 수입의존도 추이를 분석한 결과는 [부록 2]에 정리하였다.

그림 3-4. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 한국의 대중국 수입의존도 추이

(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

이러한 수입의존도 추이를 분석한 결과는 중국과의 광물 교역에서 공급망 분절화(충격)가 발생한 것으로 판단할 수 있는 품목과 공급망 분절화 발생 후 교역이 평소 수준으로 회복하는 데 필요한 기간(공급망 분절화 지속 기간)을 식별하는 근거로 활용이 가능하다. 예를 들어 대중국 수입의존도가 일정 수준(예: 중간값의 50%) 이하로 하락하였다가, 다시 회귀하기까지의 기간을 공급망 분절화 기간으로 정의할 수 있다. 하지만 앞의 결과로 추론해 볼 때 수입 증감의 변동은 통상 1~2개월의 짧은 시차로 반복되는 경우가 많았다. 따라서 상당한 기간 동안 수입이 낮은 수준을 유지하는 양상을 식별할 수 있도록 설정해야 하며, 이렇게 해야 일반적인 변동과 실질적인 충격을 구분할 수 있다. 또 대중국 수입이 크게 감소하더라도 만약 이것이 다른 국가에서 수입하는 것으로 충분히 대체되었다면, 이는 수입국 입장에서 공급망 분절화 상황으로 보기 어려운 만큼 이러한 기간은 충격 기간에서 제외하는 것이 적절한 것이다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목들에 대한 7개국의 대중국 수입의존도 분석을 다음과 같은 기준으로 제시하고자 한다.

첫째, 2017~23년(총 84개월) 기간 중 대중국 수입의존도가 ‘중간값의 50% 이하’인 시점을 식별하였다. 둘째, 대중국 수입액의 중간값 대비 감소액(-)이 중국을 제외한 다른 국가들에서 수입액의 중간값 대비 증가액(+)으로 100% 대체되지 못한 시점을 식별하였다. 셋째, 상기 조건을 충족하는 충격 시점이 연속적으로 나타나는 기간을 식별하며, 비록 불연속적이라고 하더라도 ○개월 기간 내 시점들 중 70% 이상이 충격 시점에 해당한다면 ○개월을 충격 기간으로 간주하였다.⁵¹⁾ 넷째, 7개국 각각에 대해 게르마늄, 흑연, 희토류 관련 7개 품목 별로 충격 기간을 식별하되, 추세적 변화로 판단되는 경우는 제외하였다.⁵²⁾ 다섯째, 품목별 충격 기간에 대해서는 한국에서 식별된 기간을 우선시하고, 한국

51) 예를 들어 전체 6개월 기간의 경우는 충격 시점이 5개(83.3%) 이상이어야 하며(4개월은 66.7%로 70%를 하회), 9개월 기간의 경우는 7개 시점(77.8%) 이상이어야 한다(6개월은 66.7%로 70%를 하회).

52) EU의 인조흑연 수입에서 2017년 1월부터 2018년 6월까지와 미국의 기타 흑연 수입에서 2017년 6월부터 2019년 4월까지의 충격 기간 조건을 충족하나, 이는 추세적인 변화에 따른 결과로 보는 것이 적절하다(부록 그림 2-3 및 부록 그림 2-6 참고).

에서 식별되지 않은 경우 다른 국가에서 식별된 기간 중 나온 최댓값으로 하며, 이렇게 도출된 품목별 충격 기간을 단순평균하고 그 값을 반올림하여 3개 광종별 충격 기간을 설정하였다.

이러한 다섯 가지 기준을 공급망 분절화 기간 분석 결과에 적용하여 게르마늄, 흑연, 희토류의 충격 기간을 각각 4개월, 6개월, 5개월로 설정하였으며, 그 결과는 [표 3-11]과 같다. 이를 이용해 제4장과 제5장에서는 게르마늄, 흑연, 희토류에 대하여 이 기간만큼 공급망이 단절되는 시나리오의 영향을 분석하였다.

표 3-11. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 공급망 분절화 기간 설정

(단위: 개월)

품목[광종]	한국	호주	캐나다	EU	영국	일본	미국	충격 기간
갈륨·게르마늄 혼합	5	.	.	.	.	.	6	5
게르마늄·지르코늄	.	.	.	.	2	.	.	2
[게르마늄]								4
기타 흑연	.	.	3	.	.	.	.	3
인조흑연	.	3	2	.	4	.	7	7
천연흑연	.	.	9	2	.	.	.	9
[흑연]								6
희토류_세륨	.	.	2	.	3	2	5	5
희토류 원소	.	4	4	.	2	.	.	4
[희토류]								5

주: 게르마늄, 흑연, 희토류의 충격 기간은 각각에 속한 품목들의 충격 기간을 단순평균하고 그 값을 반올림한 값임.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

4. 주요국의 핵심광물 공급망 전략 비교 분석

앞의 분석 결과에서 알 수 있듯이 ‘한국의 핵심광물’이 주요국의 핵심광물과 많은 부분이 중복되고, 더욱이 첨단산업에서 매우 필요하다는 점(제1절), 한국 등 주요 선진국과 정치적으로 다른 입장을 지닌 중국과 ‘한국의 핵심광물’을 포함한(예: 갈륨, 흑연, 희토류) 여러 광물 교역에서 공급망 교란이 발생할 수 있

다는 점(제3절)을 제시한 바 있다. 이에 주요국이 추진하고 있는 핵심광물 공급망 전략을 비교 분석함으로써 한국이 취해야 할 방안에 대해서 살펴보고자 한다.

가. EU

EU는 2000년대 초중반 원자재 가격 변동성과 중국을 포함한 후발추격국 경제의 성장으로 세계 원자재 공급망의 불안정성이 높아질 것을 우려하여 2008년에 ‘원자재 이니셔티브(Raw Materials Initiative)’를 발표하였다.⁵³⁾ 2011년에 핵심원자재 최초 목록을 공개한 데 이어 3년마다 핵심원자재 목록을 공개하고 있으며,⁵⁴⁾ 2023년 3월에는 집행위원회에서 「CRMA」 초안이 나오면서 다섯 번째 목록이 공개되었다.⁵⁵⁾ 「CRMA」 초안이 공개된 이후 3차 협상 타결, 최종 승인 후 2024년 5월에 공식 관보에 게재되기까지 법안이 약 1년 2개월 만에 처리되어⁵⁶⁾ EU 내 일반 입법절차 평균 소요기간(1독회 16개월)에 비해 상당히 빠르게 진행된 것이다.⁵⁷⁾ 이후 EU 집행위원회에서는 전략 원자재 관련 프로젝트(이하 전략 프로젝트) 공모를 실시하여 2024년 5월 23일부터 8월 22일까지 총 170개 프로젝트에 대한 지원을 받았고, 2025년 1/4분기에 선정된 전략 프로젝트를 공개할 예정이다.⁵⁸⁾

「CRMA」는 핵심·전략원자재 관련 추출 및 정제, 가공, 재활용을 포함한 모든 공급망 단계에서 EU 역내 생산 능력을 확대하고 조달 능력을 강화하는 것을 목적으로 제정되었다.⁵⁹⁾ 동 법에서는 전략원자재 공급망에 대한 정책목표로 연간 최종소비량을 기준으로 최소 10%의 추출, 40%의 정제, 25%의 재활용을

53) European Commission(2008), "The Raw Materials Initiative: Meeting Our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe," p. 4, 온라인 자료(검색일: 2024. 10. 14.).

54) 조성훈(2023), p. 7.

55) Grohol and Veeh(2023).

56) European Parliament(2024), "European Critical Raw Materials Act: In 'A Europe Fit for the Digital Age'," 온라인 자료(검색일: 2024. 10. 15.).

57) 조성훈(2023), p. 10.

58) European Commission, "Strategic Projects under the CRMA," 온라인 자료 (검색일: 2025. 1. 2.).

59) 조성훈(2024)의 내용을 요약하였다.

EU 역내에서 수행하는 것을 설정하였고, 수입다변화를 통해 제3국 외부의존도를 65% 미만으로 줄이는 것을 제시하였다.⁶⁰⁾ 핵심원자재는 경제적 중요도와 공급망 리스크를 고려하여 34종이 선정되었으며, 전략 원자재는 17종이 선정되었다. 구리, 니켈과 같이 경제적 중요도는 높으나 공급망 리스크는 기준치에 비해서 낮은 경우 전략적 중요성을 고려하여 핵심원자재 및 전략원자재로 포함되었다.⁶¹⁾ 법령의 전체 구성은 [표 3-12]에 나와 있다.

「CRMA」의 주요 정책 분야는 △ 전략 프로젝트를 선정하여 행정적·재정적 지원 확대, △ 핵심원자재 모니터링 역량 강화, △ 폐기물 관리 및 재활용 확대, △ 양자·다자 협력을 통한 국제협력 확대 및 글로벌 게이트웨이 프로그램 활용 등이다. EU 집행위원회는 핵심원자재 위원회를 운영하면서 선정된 전략 프로젝트⁶²⁾에 대해 신속한 행정 서비스를 제공하기 위해 회원국별로 단일 소통 창구를 마련하고, 추출 단계는 27개월 이내, 정제, 재활용 단계는 15개월 이내로 처리하게 하였다. 핵심원자재 모니터링을 강화하고 공급망에서 막히는 부분을 파악하기 위해 EU 및 회원국의 핵심원자재 관련 지표뿐만 아니라 전략 비축량까지 파악하게 되며, 전략원자재 기반 전략기술 제조분야 대기업⁶³⁾의 경우 3년마다 취약성 검사를 실시하여 핵심원자재 위원회에 보고해야 한다. 「CRMA」에는 핵심원자재 관련 순환경제를 구축하기 위해 역내 지속가능제품 규정을 채택하여 자원 효율을 개선하고, 재활용 시스템을 구축하고 지원하는 등의 내용이 담겼다. 또 영구자석 정보 제공 요건을 강화하기 위해 영구자석 내 희토류 재활용 최소 비율 공개를 위한 위임법을 2031년 12월 31일 이전에 제정하는 내용을

60) CRMA-2024, Article 5-1.

61) Grohol and Veeh(2023), p. 3, 재인용: 조성훈(2024), p. 5; 장영욱 외(2023), p. 19.

62) 전략 프로젝트 선정 기준은 EU 역내 공급망 안보에 기여하고, 지속가능성과 실현가능성, EU 역내 혜택 및 제3국의 경제, 사회적 혜택까지 종합적으로 고려한다(CRMA-2024, Article 6-1). EU 집행위원회는 2024년 5월에 전략 프로젝트 신청을 개시하였고, 2024년 8월까지 170개 프로젝트의 신청을 받았다(European Commission(2024a), "Commission Receives High Number of Applications Responding to Call for Strategic Projects under the Critical Raw Materials Act(CRMA)," 온라인 자료, 검색일: 2024. 10. 15.).

63) 대기업은 "평균 고용인원 수 500명 이상 및 지난 회계연도 전 세계 순매출 1억 5,000만 유로 이상인 기업"을 말하며, 전략산업기술은 "에너지저장 및 전기자동차용 배터리, 수소 생산 및 유틸리티, 신재생에너지생산, 구동 모터, 히트펌프, 데이터 전송 및 저장, 이동통신 기기, 적층제조, 로봇, 드론, 로켓발사, 위성, 첨단 칩 관련 제반 시설 및 장비" 등을 의미한다(조성훈 2024, p. 10).

포함하였다. EU는 기존 FTA 규정을 개정하거나 자원부국과 전략 파트너십을 체결하여 양자 간 국제 파트너십을 확대하고, 「CRMA」에는 담기지 않았지만 핵심원자재클럽(Critical Raw Materials Club)과 같은 다자협의체를 제안하기도 하였다.⁶⁴⁾ EU는 개발도상국 기간시설 투자 수요와 EU의 민간투자 공급을 연결하는 기존 글로벌 게이트웨이(Global Gateway) 프로그램과 연계하여, 핵심원자재 관련 프로젝트를 우선적으로 지원할 수 있는 근거 조항도 마련하였다.⁶⁵⁾

표 3-12. CRMA 구성

장 분류	장 제목	주요 세부 절
1	총칙	-
2	핵심·전략원자재	-
3	역내 공급망 강화	[1절] 정책목표(benchmarks) [2절] 전략프로젝트 [3절] 허가승인 절차 [4절] 활성화 조건 [5절] 탐사
4	위험 모니터링 및 완화	-
5	지속가능성	[1절] 순환성 [2절] 인증 및 환경발자국 [3절] 이동 자유, 적합성 및 시장 감시
6	거버넌스	-
7	권한위임 및 위원회 절차	-
8	수정조항	-
9	최종조항	-
	부속서 1	[1절] 전략원자재 목록 [2절] 전략원자재 선정기준
	부속서 2	[1절] 핵심원자재 목록 [2절] 핵심원자재 선정기준
	부속서 3	전략프로젝트 선정기준 평가
	부속서 4	허가기준
	부속서 5	환경발자국(정의, 범위, 시스템 분류 등 제반 세부사항)

자료: 조성훈(2024), p. 6의 표를 CRMA-2024 내용에 맞춰 업데이트 및 수정하여 저자 작성.

64) European Commission. COM(2023), 165 final, p. 8; 2024년 4월부터 핵심원자재클럽은 광물안보파트너십(MSP: Mineral Security Partnership)의 일부로 통합되었다[European Commission(2024b), "EU and International Partners Agree to Expand Cooperation on Critical Raw Materials," 온라인 자료, 검색일: 2024. 10. 15.].

65) 조성훈(2024, pp. 4~13)의 내용을 요약하고 인용이 더 필요한 부분에 대해서는 보충하였다.

나. 미국

미국은 핵심광물 공급망의 경제 및 국가안보 중요성에 대하여 2010년대 이전부터 인식하였지만,⁶⁶⁾ 이를 국가 단위의 전략으로 채택하기까지는 상당히 오랜 시간이 걸렸다. 2010년 중국과 일본의 희토류 분쟁으로 인해 다양한 대응 방안 및 정책이 시도되었지만,⁶⁷⁾ 핵심광물 공급망에 대한 정책은 트럼프 정부 들어서 본격적으로 시행되었다. 트럼프 정부는 2017년에 핵심광물 공급망 중요성을 환기한 행정명령 제13817호를 발표하고 지질조사국은 2018년에 첫 핵심광물 목록을 작성하였다.⁶⁸⁾ 이후 2020년에는 「에너지법」이 통과되어 앞서 설명한 핵심광물 개념이 정립되었으나, 이 법은 국가 단위 정책을 발전시키기 위한 초석으로서 각 정부 부처와 기관에 핵심광물 공급망의 중요성을 환기하는 내용과 후속연구에 대한 내용으로 대부분 구성되어 있어서,⁶⁹⁾ 「CRMA」와 같이 포괄적 전략을 담은 법령이 아니다.

2021년에 바이든 정부는 행정명령 제14017호를 통해 100일 공급망 조사 지시를 하고 핵심광물 전략의 틀을 구체화하기 시작하였다. 후속 조치로 「인프라법(IJA)」과 「에너지법」에 기반하여 지구자원연결 이니셔티브(EMRI: Earth Mapping Resources Initiative), 핵심광물 목록 평가 고도화 등 핵심광물 조사 및 연구를 수행하였다.⁷⁰⁾ 이후 2023년 11월에 바이든 행정부는 미국 공급망 회복력 강화를 위한 30개의 세부 행동전략을 공개하였다. 핵심광물 관련 주요 내용으로 △ 국가과학기술위원회 내 핵심광물소위원회의 정부 부처 간 공급망 노력을 조명한 새로운 웹사이트 출범, △ 한-미-일 협력 목적으로 핵심광물

66) National Research Council(2008)의 연구가 대표적이며, 핵심광물 공급망 교란 가능성을 체계적으로 분석하였다. 재인용: 조성훈 외(2024), 2-1-라. 핵심광물.

67) McGroarty and Wirtz(2012); Congressional Research Service(2013); Congressional Research Service(2015) 등의 연구에서 2010년대 중-일 희토류 분쟁 관련 미국 내 후속조치에 대한 내용을 확인할 수 있다. Congressional Research Service(2015)를 보면, 당시에는 공급망 내 무기화 위협에 대해서 아직 심각하게 고려하지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 재인용: 조성훈 외(2024), 2-1-라. 핵심광물.

68) 최원석 외(2023), p. 80.

69) Congressional Research Service(2025), p. 8.

70) *Ibid.*, p. 8.

및 이차전지와 같은 분야 우선순위 품목 식별을 위한 조기경보 시스템 파일럿 출범, △ 인도·태평양 경제 프레임워크(IPEF) 공급망 협정에 기반한 미국 상무부 주재 반도체, 핵심광물 관련 시범 프로젝트 시작, △ 북미정상회담(NALS)을 통한 핵심광물 및 반도체, 필수품에 관한 북미 공급망 회복력 강화, △ MSP를 통한 지속가능하고 다양한 핵심광물 공급망 발전 가속화 등이 담겼다.⁷¹⁾ 핵심광물 소위원회(CMS: Critical Minerals Subcommittee) 웹페이지⁷²⁾에 따르면, △ 연구 및 개발 협력, △ 정보 수집, 분석, 결정 지원 조정을 통한 핵심광물 공급망 강화, △ 핵심광물 공급망 전반의 동맹국과 파트너국과의 국제협력, △ 미국 내 자원에 대한 수량화 및 매핑, △ 미국 내 지속적이고 책임 있는 광물 조달을 위한 행정 신속화, △ 핵심광물 분야 인력 양성 등의 활동을 수행하고 있다고 한다.

다. 한국

한국은 앞서 설명한 대로 2023년에 「핵심광물 확보전략」을 공개한 이후 2024년 2월에는 「자원안보특별법」을 제정하고 2024년 3월에는 ‘민관협력 해외자원개발 추진전략’을 발표하여 핵심광물 공급망 안정화 전략을 구체화하였다. 2024년 12월에 ‘제4차 광업기본계획(안)(2025~2034)’을 발표하고 국내 핵심광물 개발·생산 경쟁력을 제고할 수 있는 정책 방향을 논의하였다.⁷³⁾ ‘핵심광물 확보전략’에서 드러난 비전에서는 안정적인 핵심광물 공급망 확보와 첨단산업 강국 도약이라는 두 가지 가치를 연결하였다. EU의 정책 목표 설정과 유사하게 2030년까지 10대 전략 핵심광물 공급에 한하여 특정국 수입의존도를 50%대로 낮추고, 재자원화를 20%대로 높이는 것을 구체적 추진 목표로 제시하였다.

71) The White House(2023).

72) 웹페이지 주소는 <https://www.criticalminerals.gov/pages/activities>이다.

73) 산업통상자원부(2024b).

세부 전략은 크게 위기대응능력 강화와 핵심광물 확보 다각화, 핵심광물 관련 인프라 구축에 관한 것으로 분류되었고, 총 여덟 가지 전략이 제시되었다. 위기대응 능력을 강화하기 위해 세계의 광산 정보와 핵심광물 관련 공급망 수급을 매칭하여 최신 정보를 제공하는 핵심광물 수급지도를 개발하는 내용과 수급안정화지수를 통해 조기경보 시스템(EWS: Early Warning System) 구축 방향이 담겼다.⁷⁴⁾ 광해광업공단은 기존부터 이미 자원정보서비스를 제공하고 있었는데, 2023년부터 고도화를 추진하고 있다.⁷⁵⁾ 핵심광물 확보 다각화의 측면에서는 양자·다자 협력 참여 확대를 통한 자원협력 강화, 민간이 주도하고 공공 부문이 지원하는 방향의 국내외 자원개발 확대 내용이 담겼다. 재자원화를 통한 핵심광물 분야 순환경제를 구축하고, 비축량 확대를 통해 공급망 리스크에 대응하는 방안도 추진한다. 해외 자원개발과 관련해서는 ‘민관협력 해외 자원개발 추진전략’에 여덟 가지 세부 전략이 소개되어 있는데, 여기에는 재정 및 세제 지원 방안이 더욱 구체화되어 있고, 인력양성프로그램의 신설, 공기업 역할 확대 등의 내용이 더 담겼다. 「국가자원안보 특별법」과 연계하여 국가 자원안보 체계 고도화도 추진한다.⁷⁶⁾

라. 중국

중국은 우선 국내적으로 광물자원 개발의 효율성을 제고하기 위해서 2024년 2월에 ‘광물 자원 개발 및 이용 수준 조사 평가 방법(시행안)’을 발표하고, 자원 개발 관련 데이터 관리 강화를 위한 규정과 개발에 따른 책임 체계 구축에 관한 규정을 마련하였다. 또 조사 평가의 작업 내용, 책임 분담, 조사 대상, 조사 내용, 평가 지표, 평가 방법, 결과 보고, 시간 진행 등 구체적인 요구 사항을 제시

74) 산업통상자원부(2023b), pp. 8~9.

75) 「핵심광물 수급 리스크를 한눈에...자원정보서비스 ‘코미스’ 전면 개편」(2024. 3. 21.), 온라인 자료(검색일: 2024. 10. 13.).

76) 산업통상자원부(2024a), pp. 6~10. 더 자세한 내용은 한선이 외(2024)를 참고.

하면서 중국 내 광물 자원 개발 및 이용 수준에 관한 조사와 평가 제도를 상시화하여 자원의 전면적인 절약과 효율적인 이용을 촉진하는 것을 목표로 시행안을 추진하고 있다.⁷⁷⁾

중국은 아직까지 광물자원에 관한 법을 제정하지 않았으나, 2023년부터 「광물자원법(矿产资源法)」 제정을 추진 중이다. 동 법안은 광산업의 녹색 발전 촉진, 광물 자원 계획 수립과 개선, 광업권 관련 규정 보완, 탐사 및 개발 활동 규범화 그리고 광산 지역 생태 복원 강화 등을 포함하는 규정 등이 있는 것으로 파악된다.⁷⁸⁾

앞서 언급하였듯이 2024년 4월에 국무원은 「희토류 관리 조례」(국무원령 제785호)를 발표하고, 2024년 10월 1일부터 시행 중이다. 이 규정은 희토류 자원이 국가 소유임을 명시하고 있고, 어떤 조직이나 개인도 희토류 자원을 침해하거나 파괴할 수 없도록 하고 있으며, 국가가 희토류 산업 발전을 위한 통합 계획을 시행한다고 규정하고 있다. 또 어떤 조직이나 개인도 불법으로 채굴하거나 불법적으로 제련 및 분리한 희토류 제품을 구매, 가공, 판매, 수출할 수 없으며, 희토류 산업의 신기술, 신공법, 신제품, 신소재, 신장비의 연구 개발과 응용을 장려하고 지원한다고 규정하고 있다.

중국은 대외적으로는 광물자원과 관련된 다양한 양자 및 다자 협력을 추진하고 있다. 먼저 양자 협력 측면에서 사우디아라비아·파키스탄(구리)·카자흐스탄·벨라루스(구리·베릴륨)·세르비아(리튬)·튀르키예(스트론튬·크롬·티타늄·마그네슘·안티몬 등)·오스트리아 등 광물을 보유한 국가들과 지역 연구·지질 조사·광물 자원 개발 및 관리·광물 탐사 기술 방법·광업 투자 등을 진행 중이다.⁷⁹⁾ 특히 중국과 파키스탄은 공동 성명을 통해 중국 기업들이 파키스탄의 광업에 대해 투자 및 협력을 하도록 적극적으로 장려하였고, 광물 가공을 포함한 광산 산업 단지 조성을 추진하고 있다.⁸⁰⁾ 그밖에 러시아·아르헨티나·폴란

77) 中华人民共和国自然资源部 编(2024), p. 18.

78) 위의 자료, p. 25.

79) 위의 자료, p. 41.

드·우즈베키스탄·베트남·페루·나이지리아·베네수엘라·콩고(민주공화국)·벨기에·일본·이란·수리남·우루과이·세르비아 등의 국가들과 지구과학 협력 양해각서 또는 양자 협력 협정을 체결하였다.

표 3-13. 중국의 주요 광물 협력 대상국과 관련 광물 생산량

대상국	협력 내용 및 해당국의 주요 광물
사우디 아라비아	- 하이난 광업은 아즐란 앤드 브라더스(Ajlan&Bros) 그룹과 MOU를 체결하고, 사우디에 리튬염(LiPF6) 공장 프로젝트 건설 타당성을 공동 모색 중, 리튬 자원과 신에너지 금속 광물 위주의 산업기금을 조성 중
파키스탄	- 중국 기업들이 파키스탄의 광업에 대한 투자와 협력을 장려하고, 광물 가공을 포함한 광산 산업 단지 조성을 추진
카자흐스탄	- 전 세계 크롬 생산량의 14.4%를 생산하고 있으며, 카드뮴, 은 등을 생산 중 - 베이징 Jianlong 중공업(Beijing Jianlong Heavy Industry)과 Zijin Mining Group은 철강 및 희토류 채굴 분야에서 합작투자를 추진 중
벨라루스	- 중국과 공동으로 공동 지질조사 센터를 설립
튀르키예	- 마그네슘(화합물)과 펄라이트 전 세계 생산량에서 각각 8.2%, 28.5%를 차지 - 튀르키예와 중국은 희토류 원소와 같은 중요한 광물에 중점을 두고 광업의 모든 분야에서 국가 간 협력을 증진하기 위한 양해각서(MOU)를 체결
쿠바	- 쿠바는 중국의 수요가 큰 니켈과 크롬 등 광물을 보유
칠레	- 전 세계 레늄, 구리, 리튬 생산량의 53.1%, 23.5%, 25.2%를 차지하고 있으며, 이는 중국보다 생산량이 많음 - 칠레 안토파가스타 지역에 2025년부터 개발될 2억 3,300만 달러 규모의 리튬 채굴 투자 프로젝트 등을 중국 기업과 추진 중이며, 중국은 칠레 전문가들이 중국에 와서 관련 교육을 이수하는 교환 프로그램을 제공
브라질	- 탄탈륨의 주요 생산국 중 하나로, 전 세계 생산량의 16.8%를 차지, 중국 생산량은 3.6%로 파악됨

주: 전 세계 생산량에서 각국이 차지하는 비중은 2022년과 2023년 평균치를 의미함.

자료: 표 내용 순서대로 ① 「사우디 진출하는 중국 신재생에너지 기업들...」 중 정부는 저품질 태양광 속아내기」(2024. 8. 18.), ② 中华人民共和国自然资源部 编(2024), p. 41, ③ Akhmetkali(2024), "Kazakhstan Signs \$2.5 Billion in Deals with China during PM's Shanghai Visit," ④ Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus(2024), "China-Belarus Joint Geological Center to Open in 2024." ⑤ Mining.com(2024. 10. 18.), "Turkey, China Sign MOU to Collaborate on Rare Earth Mining, ⑥ China Briefing(2022. 11. 25.), "China-Cuba: Bilateral Trade and Investment Prospects," 온라인 자료(모든 자료의 검색일: 2025. 1. 9.). 각국의 광물 생산량은 U.S Department of the Interior U.S Geological Survey(2024), p. 50 내용에 기초하여 저자 정리.

80) Ministry of Foreign Affairs The People's Republic of China(2024), "Joint Statement between the Islamic Republic of Pakistan and the People's Republic of China," 온라인 자료(검색일: 2025. 1. 3.).

중국은 다자 차원의 광물개발 협력을 위해 ‘지구화학(化学地球)’ 및 ‘글로벌 석회동굴’과 관련된 거대과학(big science)을 통해서 협력 국가들과 지질 광물 파악을 추진하고 있다.⁸¹⁾ 먼저 중국이 주도적으로 추진하고 있는 ‘지구화학’ 프로젝트는 2023년에 페루, 쿠바 등 참여국들이 새롭게 추가되었으며, 이 계획을 통해 추진하고 있는 광물 조사 면적은 약 40만 제곱킬로미터에 달하는 것으로 파악된다.⁸²⁾ 그리고 중국은 ‘글로벌 석회동굴’ 프로젝트를 통해 크로아티아와 슬로바키아 대학과의 양해각서를 체결하였으며, ‘글로벌 석회동굴 과학기술 혁신 협력 이니셔티브’를 발표하였다. 이러한 협력에 기반하여 중국 국가표준화관리위원회는 ‘석회동굴 수자원 개발 및 이용 관리 기술 규정’이라는 국제 표준도 제안하였다.

국제기구를 통한 참여도 적극적으로 추진 중이다. 유엔에서의 광물 개발과 채굴로 인한 환경 파괴에 대한 논의에 참여함으로써 국제 광산 개발의 역량을 구축하고 있다. 중국은 이를 위해 유엔 자원 관리 전문가 그룹 제15차 연차 총회에 참석하여, 유엔 자원 분류 프레임워크(UNFC)와 유엔 자원 관리 시스템(UNRMS)의 개발 및 응용에 지속적으로 참여하고 있다. 중국 자연자원부(自然资源部)는 UN 유럽경제위원회와 함께 중국에 매장된 광물자원의 분류 기준과 유엔 자원 분류 프레임워크를 연계하는 공동 연구(업그레이드 버전)도 추진한 것으로 파악된다. 중국 자연자원부 내 전문가는 유엔 에너지 전환 핵심광물 그룹의 일원으로 활동하며, 핵심광물의 글로벌 공급망 관련 사업에 참여 중이고, 인산염 광물 개발 및 폐광 관리에 대한 녹색 저탄소 정책과 표준 연구를 통해 광업의 녹색 저탄소 역량을 구축하는 작업을 진행하는 것으로 파악된다.

이러한 주요국들의 핵심광물 전략의 주요 내용을 정리하면 [표 3-14]와 같다.

81) 빅 사이언스는 국제 연구팀과 최첨단 기술이 참여하는 대규모 정부 지원 과학 연구 프로젝트를 의미한다. Science Direct, "Science Direct Topics: 'Big Science'," 온라인 자료(검색일: 2025. 1. 9.).

82) 中华人民共和国自然资源部 编(2024), p. 42.

표 3-14. EU, 미국, 한국, 중국의 핵심광물 전략 비교

항목	EU	미국	한국	중국
정책목표	· 수출 10% · 정제·가공 40% · 재활용 25% · 특정국 수입의존도 65% 미만	-	· 특정국 수입의존도 50%대 · 재자원화 20%대	-
관련 법령	「CRMA」	「에너지법」 「IIJA」	「국가자원안보 특별법」	「희토류 관리 조례」
산업전략	「CRMA」*	행정명령 제13817호 행정명령 제14017호	「핵심광물확보 전략」 「민관협력 해외자원 개발 추진전략」 「제4차 광업기본계획(안)(2025~ 2034)」	『광물 자원 개발 및 이용 수준 조사 평가 방법(시행안)』
주요 세부전략	· 전략프로젝트에 대한 행정적·재정적 지원 확대 · 핵심원자재 모니터링 역량 강화 · 폐기를 관리 및 재활용 확대 · 양자·다자 국제협력 확대	· EMRI 구축 · 핵심광물 선정 기준 고도화 · 양자·다자 국제협력 확대 · CMS 역할 확대 및 정부 부처 간 공조 강화	· 핵심광물 수급지도 구축, EWS 고도화 · 양자·다자 국제협력 확대 · 국내외 자원개발 민-관 협력 확대 · 재자원화 통한 순환 경제 구축 · 인력양성 확대	· 양자·다자 국제협력: 개발도상국 중심의 다양한 연구 및 인적 교류 확대 · 법제화를 통한 국내 광물자원 관리 강화

주: * CRMA는 기본법(Framework Act)으로 더 구체적인 내용을 담은 이행 위임법 제정이 필요하지만 포괄적인 산업전략 방향성을 제시하고 있어 산업전략으로도 분류함.

자료: 본문 내용을 바탕으로 저자 작성.

5. 소결

본 장의 주요 결과는 다음과 같다. 먼저 한국의 핵심광물 중에서 주요국이 추진하는 핵심광물과 중복되는 품목 수가 많고, 그중에서도 중국이 수출을 통제하고 전략적으로 중요하게 평가하는 광물들과 가장 많이 중복되었다는 점을 알 수 있다. 또 이러한 핵심광물 중에서도 중국이 최근 지정한 핵심광물인 게르마

늄, 흑연, 희토류는 모두 ‘한국의 핵심광물’에 속하며, 이러한 광물들은 관련 무역 데이터를 분석한 결과 중국과의 교역에서 공급망 교란이 발생했을 가능성이 존재하였다. 이러한 점에서 해당 광물과 관련하여 공급망 교란이 발생했을 경우 한국에 미칠 수 있는 경제적 영향을 분석하는 연구가 매우 중요하다.

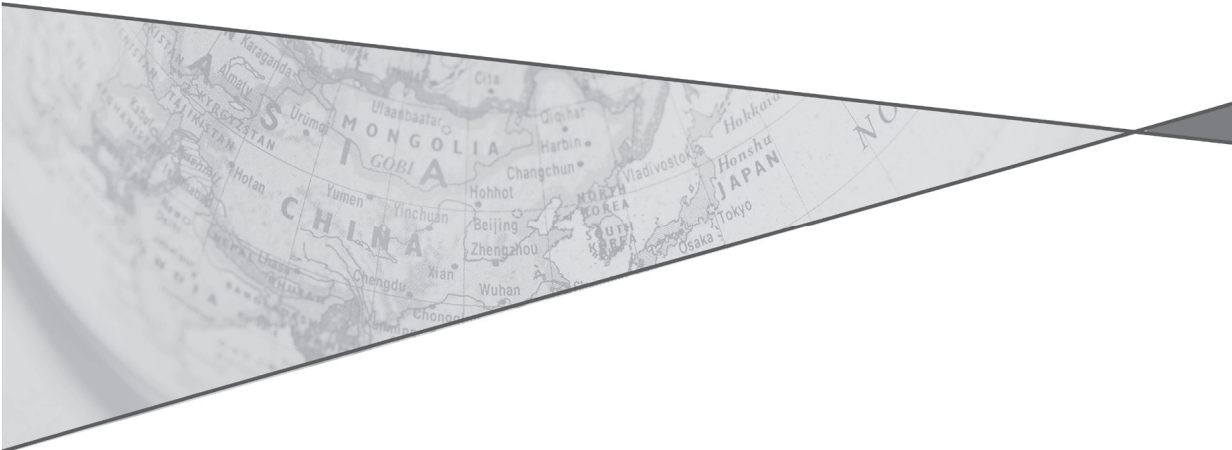
제3절의 내용을 통해 각국은 핵심광물 공급망의 중요성을 인식하고 다양한 전략을 추진하고 있음을 파악하였다. EU와 미국은 자국 내 생산 능력을 강화하고, 국제적으로 협력하는 방식으로 공급망 안정성을 확보하려는 노력을 기울이고 있으며, 한국은 민관 협력을 통해 자원 확보의 다각화 및 재자원화 정책을 추진 중이다. 중국은 국내 광물 자원의 효율적 개발과 동시에 국제 협력을 확대하며 공급망의 안정성을 강화하고 있다. 이러한 전략을 통해 각국은 경제와 안보를 위한 중요한 기초를 마련하고 있으며, 한국은 다른 주요국들의 전략을 참고하여 핵심광물 확보 및 공급망 안정화를 위한 정책을 더욱 강화할 필요가 있다.

이에 제4장과 제5장에서는 본 장에서 분석한 주요 광물(갈륨·게르마늄·희토류)의 공급망이 일정 기간 단절될 경우에 우리나라 주요 산업별 영향과 거시경제적 파급 영향을 분석하여 관련 정책 시사점을 제시하고자 한다.

제4장

공급망 분절화의 미시경제적 영향

1. 분석 모형(DA-RNN) 및 자료
2. 주요 산업별 핵심광물 연관성 분석 결과
3. 공급망 분절화 시나리오에 따른 산업별 영향



1. 분석 모형(DA-RNN) 및 자료

가. 분석 모형 개요

통계 모형을 활용하여 원자재(예: 핵심광물)의 변동성이 특정 산업의 최종재에 미치는 영향을 파악하는 것은 글로벌 공급망의 여러 특성으로 인해 어려움이 있다.

첫째, 기술 발전에 따라 산업의 공급망 구조가 길어지고 복잡해지며 전체 공급망 리스크가 증가한다. 이는 병목 현상과 밀접한 관련이 있다. 대표적인 예시로 2021년 자동차 반도체 부족 사태로 전 세계 자동차 생산이 차질을 빚었다. 이는 자동차의 전자화가 진행됨에 따라 자동차 산업에 반도체로 인한 공급망 리스크가 추가되는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 분석 모형은 다양한 변수를 포함하여 확장될 수 있어야 한다.

둘째, 공급망 리스크는 지정학적 요인에 매우 밀접하게 연관되어 있다. 최근의 지정학적 갈등은 글로벌 공급망에 즉각적인 변화를 일으키고 있다. 반도체 산업의 경우 미국의 「CHIPS and Science Act」로 주요 반도체 제조사들이 미국에 공장을 건설하고 관련 기업들도 미국으로 생산시설을 이전하고 있다. 이러한 변화를 즉각적으로 반영하기 위한 분석 모형은 조금 더 세분화된 시간 단위(예: 월 단위) 자료를 이용할 수 있어야 한다.

셋째, 공급망 리스크 발생 시 그 영향이 즉각적이지 않을 수 있으며, 이 경우 장기적인 모니터링이 필요하다. 특히 반도체, 자동차, 이차전지 등 산업 가치사슬이 긴 제품의 경우 원재료의 영향이 최종 제품에 미치기까지는 수개월이 걸릴 수 있다.

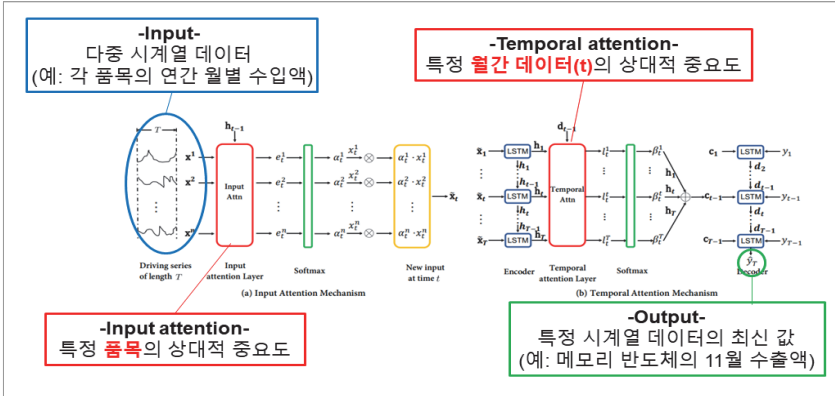
원자재의 변동성이 특정 산업의 생산 품목(예: 메모리)에 미치는 영향을 분석하는 방법은 다양하다. 가장 일반적인 방법은 문헌 연구와 전문가 인터뷰에 기초하여 중요 광물이나 생산요소를 도출하는 사고실험이다. Melin *et al.*(2021)은

문헌 연구와 사례연구를 통해 유럽 배터리 규제가 글로벌 공급망에 미치는 영향을 분석하였다. Scholten and Bosman(2016)은 재생에너지 시스템의 전 세계적 도입을 가정하여 잠재적인 지정학적 영향을 탐색하는 사고실험을 실시하였다. 이 연구는 전기가 주요 에너지원이 되는 미래의 가능성을 제시하며, 그리드 관리 및 관련 서비스 역량이 강한 국가가 더 큰 영향력을 미칠 수 있음을 시사한다. 이러한 연구는 정책 입안자들에게 유용한 통찰력을 제공하였지만, 그 영향을 정량화하는 것은 여전히 어려움이 있다. 이로 인해 재현성과 한국 반도체 공급망과 같은 특정 산업으로의 확장이 제한된다.

이러한 한계를 보완하고자 여러 증거 기반 연구에서 공급망 충격이나 리스크의 영향을 정량화하려는 시도가 있었다(Bogataj and Bogataj 2007; Montobbio and Sterzi 2013; Wang, Su, and Umar 2021). Carrara *et al.*(2023)은 에너지, 디지털화, 방위, 우주 분야의 목표 달성에 필요한 핵심 원자재를 확보하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구는 이러한 분야에 적용되는 15개 핵심 기술에 대한 공급망을 분석하고 국가 간 의존성을 파악하며, 향후 핵심 원자재 수요를 예측하였다. 해당 연구에서는 허핀달-허쉬만지수(Rhoades 1993)와 수입의존도를 이용하여 공급망 리스크를 추정하였다. 이러한 접근법은 공급망 취약성을 직관적으로 나타낼 수 있는 장점이 있다. 다만 현재의 공급망 취약성에 초점을 맞추고 있다는 측면에서 이러한 취약성이 어떻게 진화하고 지정학적 요인에 의해 영향을 받는지 설명하지 못한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 항목 간의 상관관계와 시계열 특성을 반영할 수 있는 이중 단계 어텐션 기반 순환 신경망(DA-RNN)(Qin *et al.* 2017) 모형을 채택하였다. DA-RNN은 다변량 시계열 예측에 널리 사용되는 모형이며, 유사한 연구로 한 지역의 건물 일일 전력 소비를 예측한 연구(Peng *et al.* 2021)가 있다. 이밖에 DA-RNN 모형은 담수화 시설 평가(Yoon *et al.* 2021)와 주가 예측(Chen, Lin, and Wang 2019) 등 다양한 분야에서 적용되었다.

그림 4-1. DA-RNN의 구성 요소 및 메커니즘



자료: Qin *et al.*(2017) 내 그림을 참고하여 저자 작성.

DA-RNN을 이해하려면 먼저 어텐션 메커니즘(Vaswani *et al.* 2017)을 이해해야 한다. 추상적으로 설명하면 어텐션은 특정 인스턴스와 다른 인스턴스 간의 관계 또는 특정 인스턴스의 값을 추정하기 위해 참조되는 각 인스턴스의 비율을 나타내는 값이다(하나의 특정 인스턴스에 대한 모든 어텐션의 합은 1이다). 예를 들어 어텐션 기반 번역 AI(예: 트랜스포머)를 훈련시킨 후, 프랑스어의 'européenne'과 영어의 'European' 사이의 어텐션 값이 높으면, 번역기가 프랑스어 문장에서 다른 단어보다 'européenne'을 더 많이 참조하여 'European'을 생성했음을 의미한다.

DA-RNN 모형은 '이중 단계 어텐션 기법'을 사용한다. 모형의 첫 번째 단계에서 입력 어텐션 레이어는 각 입력 시계열(항목)의 각 시간 단계에서의 관련 중요도를 추출한다(예: 메모리 수출 예측에 웨이퍼 수입이 얼마나 중요한가?). 두 번째 단계에서 시간적 어텐션 레이어는 모든 시간 단계에 걸친 인코더 은닉 상태의 관련 중요도를 추출한다(예: 이전 3개월의 수입 데이터가 메모리 수출 예측에 얼마나 중요한가?). 각 인코더 은닉 상태는 해당 시간 단계의 변수에 대한 압축된 정보로 간주된다(Qin *et al.* 2017).

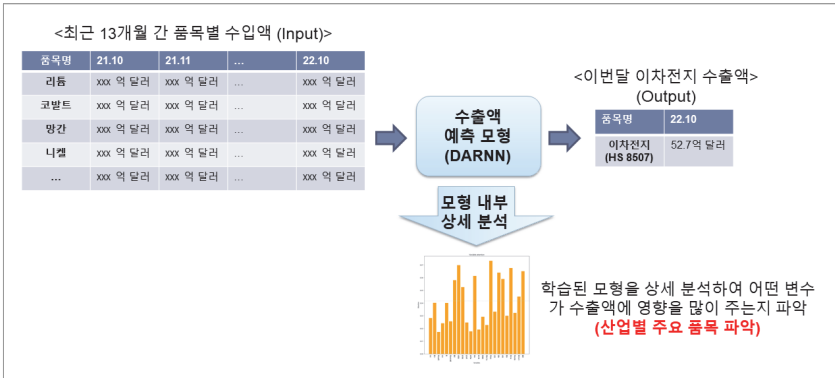
본 장에서는 우선 다양한 핵심광물 수입액의 시계열 데이터를 이용하여 특정 산업 대표 제품(예: 이차전지)의 월별 수출액을 예측하는 DA-RNN 모형을 구축하였다. 다음으로 모형이 각 수입 항목의 데이터를 어떻게 참조하여 다음 달의 월별 수출을 예측하는지 분석하였다. 마지막으로 학습된 모형을 활용하여 제3장에서 도출된 핵심광물 공급망 분절화 시나리오에 따른 산업 수출 변화를 측정하였다.

나. 데이터 및 실험설계

본 연구에서는 ‘무역통계 데이터’를 모형 학습에 사용하였다. 데이터베이스 내 각 항목은 세계 관세 당국이 사용하는 상품 분류의 표준화된 숫자 코드인 HS코드(Harmonized System Code)를 가지고 있다. KITA 데이터는 유엔 상품무역통계(UN Comtrade) 데이터베이스에 등록된 공식 데이터베이스로, 글로벌 공급망 분석 연구에서 자주 사용된다(Krammer 2017; Li *et al.* 2022).

본 연구에서는 28종 핵심광물 주요 품목의 월별 수입액을 독립변수로 설정하고, 반도체·자동차(부품 포함)·조선·이차전지(전구체 포함) 등 산업의 대표 품목(예: 전자집적회로, 선박, 자동차 등)의 수출액을 종속변수로 설정하여 수출액 추정 인공지능 모형을 학습시키고 모형 내 각 독립변수(핵심광물)의 산업별 연관성을 측정하였다. 분석을 위해 선정된 국내 주요 산업과 해당 품목은 다음과 같다. 반도체 산업의 경우 전자집적회로(HS 8542)를 선정하였으며 조선 산업의 경우 선박(8901)을 선정하였다. 이차전지 산업의 경우 완제품뿐만 아니라 소재(전구체, 리튬염)의 수출액 또한 크므로 이차전지(8507)와 산화금속염(2841) 품목을 분석 대상으로 선정하였다. 유사한 이유로 자동차 산업도 자동차(8703)와 자동차 부품(HS 8708)을 선정하였다. 실험에 2002년 1월부터 2023년 12월까지의 자료를 수집하여 활용하였다(총 264개의 데이터 포인트).

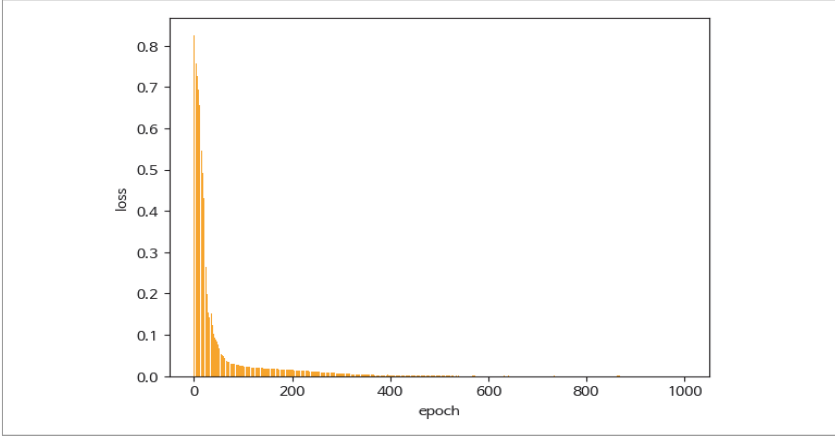
그림 4-2. 산업별 모형 학습 및 분석 방법



자료: 저자 작성.

DA-RNN 모형은 TensorFlow 프레임워크(Abadi *et al.* 2016)를 사용하여 구축되었으며, 모형의 학습을 위하여 Adam Optimizer(Kingma and Ba 2014)를 이용한 확률적 경사 하강법(SGD)을 활용하였다. 학습률은 0.001로 설정하였으며, 목적 함수로 평균 제곱 오차(MSE)를 사용하였다. 상대적으로 작은 데이터세트와 높은 학습률을 고려하여 배치 크기는 전체 학습 데이터세트 길이로 설정하였다(Kandel and Castelli 2020). 당월 핵심광물의 수입액부터 전년 동월의 핵심광물 수입액까지의 영향을 확인하고자 각 입력 인스턴스의 길이(지연 효과의 최대 길이에 해당)는 13개월로 설정하였다. 각 산업에 대해 마지막 1년의 데이터(2023년도 데이터)를 테스트 데이터로, 나머지를 학습 데이터로 사용하였다. 입력 어텐션(input attention)과 시간적 어텐션(temporal attention)의 은닉층 개수는 32개로 설정하였으며, 반복 횟수는 다양한 설정을 통해 실험한 결과와 학습곡선(그림 4-3 참고)을 토대로 하여 1,000회로 설정하였다.

그림 4-3. 학습곡선(이차전지 산업의 예시)



자료: 저자 작성.

실험 재현성을 보장하기 위하여 난수 시드를 고정하고 산업별 모형을 30개의 고유한 난수 시드를 사용하여 학습시켰으며, 이후 정확도가 가장 높은 상위 5개 모형의 어텐션 값을 추출하였다.

그림 4-4. 분석 결과 예시(이차전지 산업의 예시)

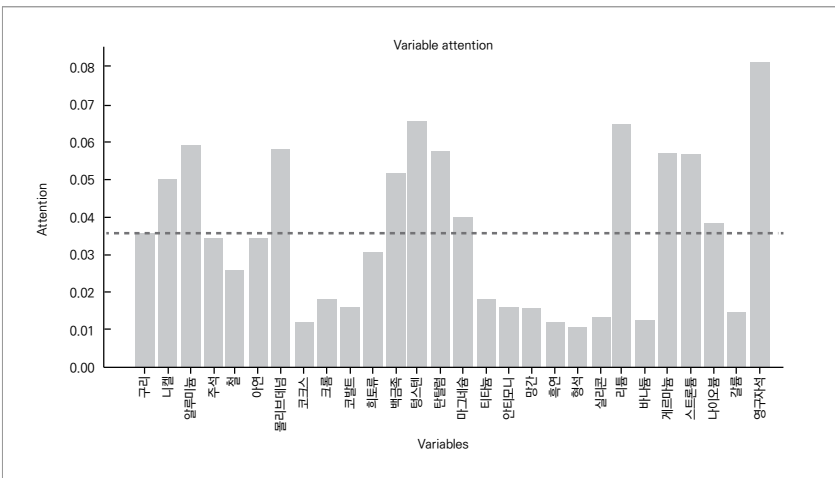
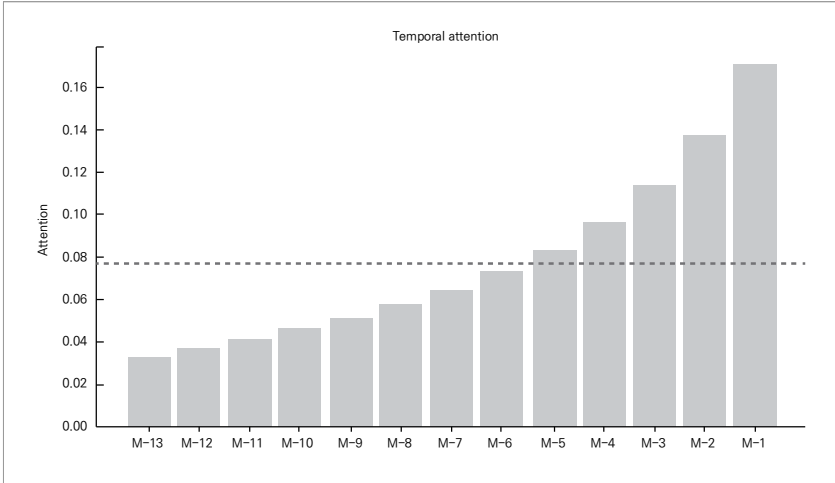


그림 4-4. 계속

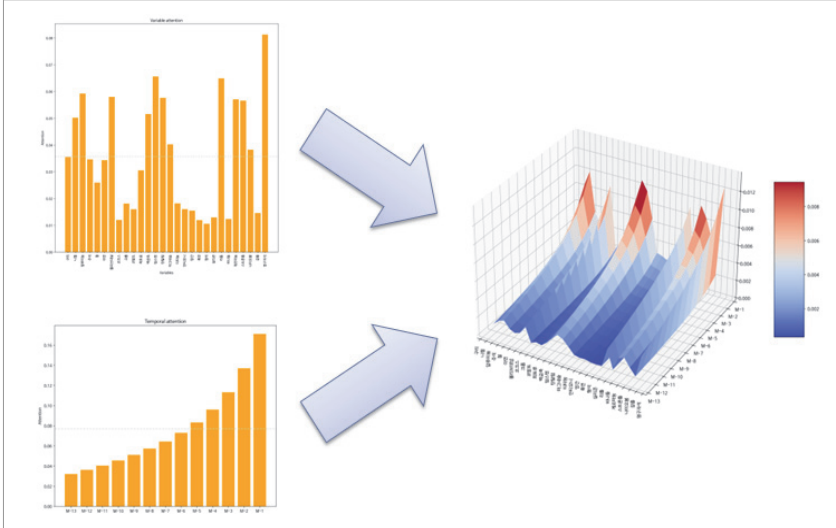


자료: 저자 작성.

[그림 4-4]와 같은 입력 어텐션(그림에서는 variable attention으로 표기)과 시간적 어텐션을 상위 5개 모형에 대해서 추출하였고, 추출된 입력 어텐션과 시간적 어텐션을 행렬 곱을 통해 하나의 2차원 행렬로 표현하여 각 변수와 지연 효과의 영향력을 분석하고자 하였다.⁸³⁾

83) 도출된 행렬의 수는 독립변수 개수(핵심광물 28종)와 총기간(13개월)이다(28×1 행렬 $\cdot 1 \times 13$ 행렬 $\rightarrow 28 \times 13$ 행렬).

그림 4-5. 2차원 어텐션 행렬 예시(이차전지 산업의 예시)



자료: 저자 작성.

최종적으로 적합성이 가장 높은 상위 5개 결과에서 생성된 5개의 2차원 행렬의 평균값을 사용하여 각 변수와 시간 기간의 전반적인 영향력을 나타내었다. 이는 과적합 우려가 있는 인공신경망 기반 기법을 사용함에 따라 특정 변수나 시간대에 어텐션이 편중된 결과가 나타나는 경우를 방지하기 위한 것으로, 그밖에 다양한 방법으로 결과물을 도출할 수 있다.

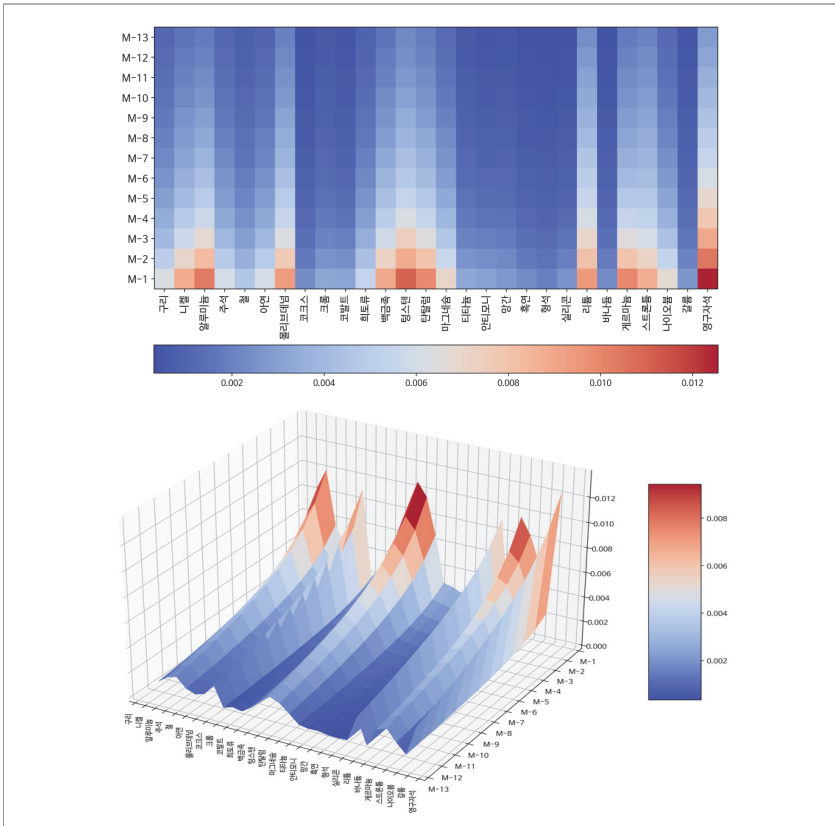
2. 주요 산업별 핵심광물 연관성 분석 결과

가. 이차전지 산업

분석 결과 이차전지(HS 8507)의 월별 수출액과 연관성이 높은 품목은 영구자석, 리튬, 텅스텐, 알루미늄, 니켈, 게르마늄 등으로 나타났으며, 대부분 당월

수입액의 영향이 제일 강하고 시간이 지남에 따라 영향력이 점차 감소하는 형태를 보였다. 대략 6개월까지는 당월 이차전지 수출액에 영향을 주는 것으로 나타났다.

그림 4-6. 핵심광물의 연관성 분석 결과(이차전지-HS 8507)

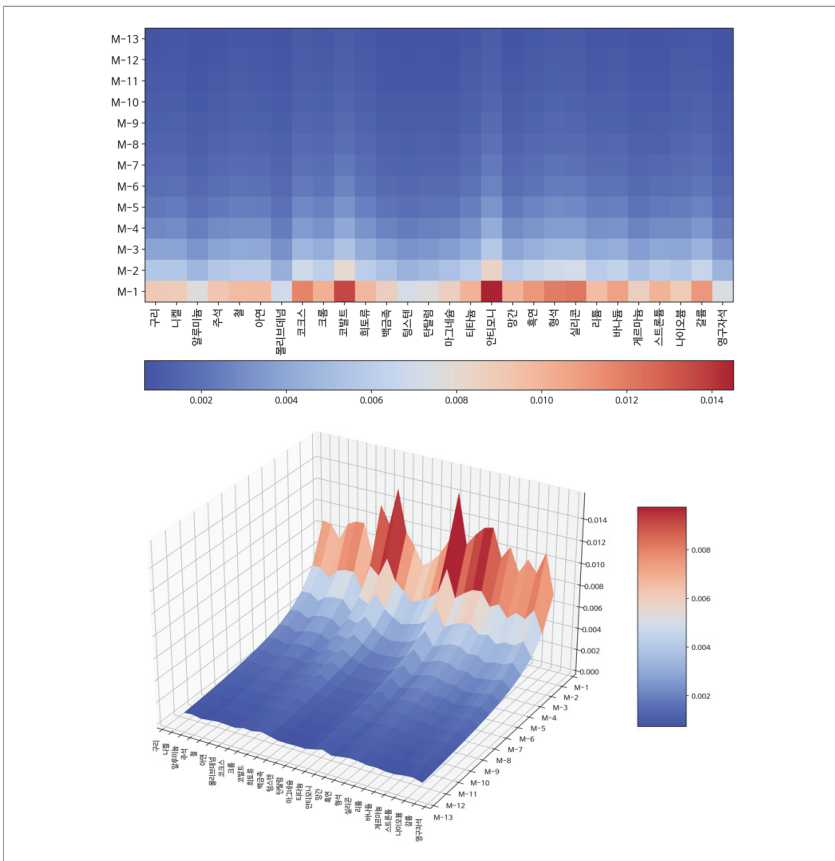


자료: 저자 작성.

산화금속염(HS 2841) 하위품목의 대부분은 양극재와 전구체(NCM 리튬염 등)로 구성되어 있어 이차전지의 핵심 소재에 해당하는 품목으로, 이차전지 산업 분석에 포함하였다. 실험 결과 안티모니, 코발트, 형석, 흑연 등이 연관성이

높았으며, 특히 코발트와 흑연은 이차전지의 핵심원자재로 쓰이고 있다. 핵심 광물의 영향이 전반적으로 있는 것으로 판단되며 가공기간이 짧은 소재의 특성에 따라 당월의 핵심광물 수입액의 영향력이 이차전지 완제품 대비 매우 강한 것으로 나타났다.

그림 4-7. 핵심광물의 연관성 분석 결과[산화금속염(양극재, 전구체)-HS 2841]

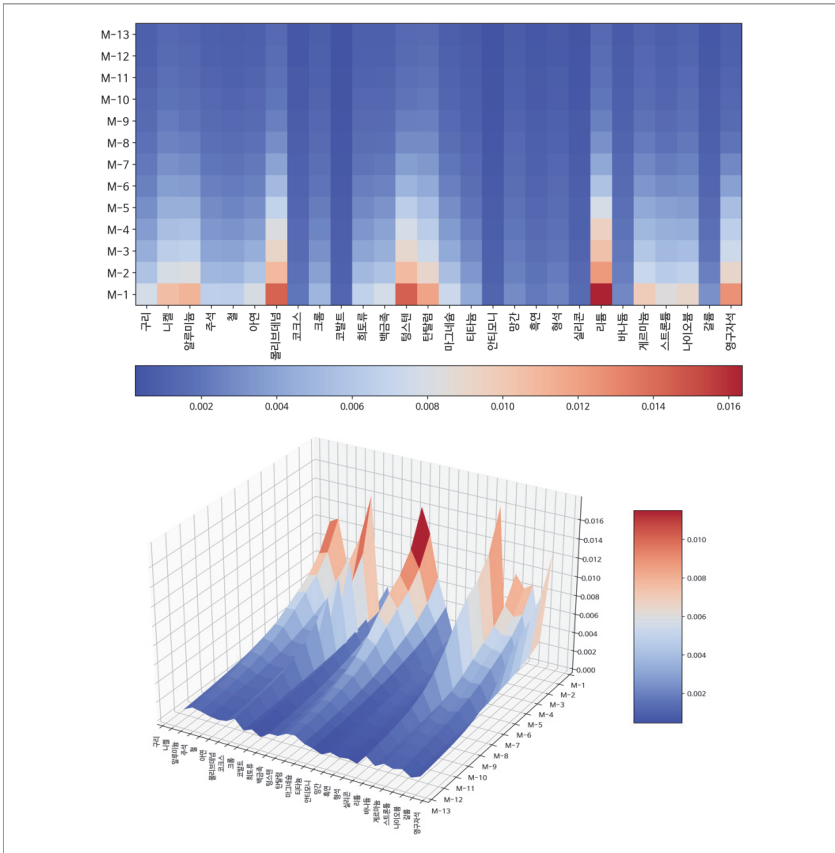


자료: 저자 작성.

나. 자동차 산업

자동차(HS 8703)의 월별 수출액과 연관성이 높은 품목은 리튬, 몰리브데넘, 텅스텐, 영구자석, 니켈 등으로 나타났으며, 당월 데이터의 영향력이 강하고 이후에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 앞의 이차전지 분석 결과와 다르게 일부 품목만 영향이 높게 나타났으며, 이는 자동차 완제품과 핵심광물 간의 직접적인 연관성이 높지 않아 경제 상황이나 환율 변화에 따른 수출입액 연동에 의한 것으로 추측된다.

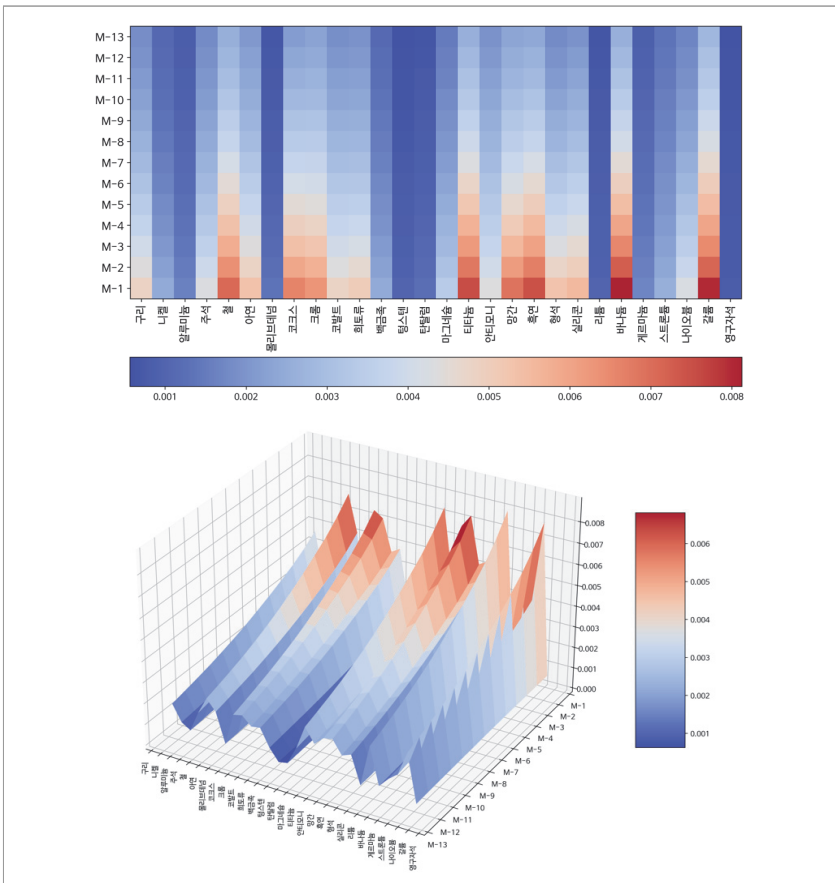
그림 4-8. 핵심광물의 연관성 분석 결과(자동차-HS 8703)



자료: 저자 작성.

자동차 부품(HS 8708)의 월별 수출액과 연관성이 높은 품목은 갈륨, 바나듐, 티타늄, 흑연, 철, 망간 등으로 나타났으며, 자동차 부품에 사용되는 광물을 중심으로 연관성이 높게 나온 것으로 판단된다. 당월 수입액의 영향이 제일 강하고 이후부터 점차 줄어드는 형태이나 다른 품목과 달리 상당히 오랜 기간 영향이 있는 것으로 보인다. 이는 자동차 부품에 따라 제작 기간이 다양하고 이러한 영향이 혼재됨에 따라 나타난 것으로 추측된다.

그림 4-9. 핵심광물의 연관성 분석 결과(자동차 부품-HS 8708)

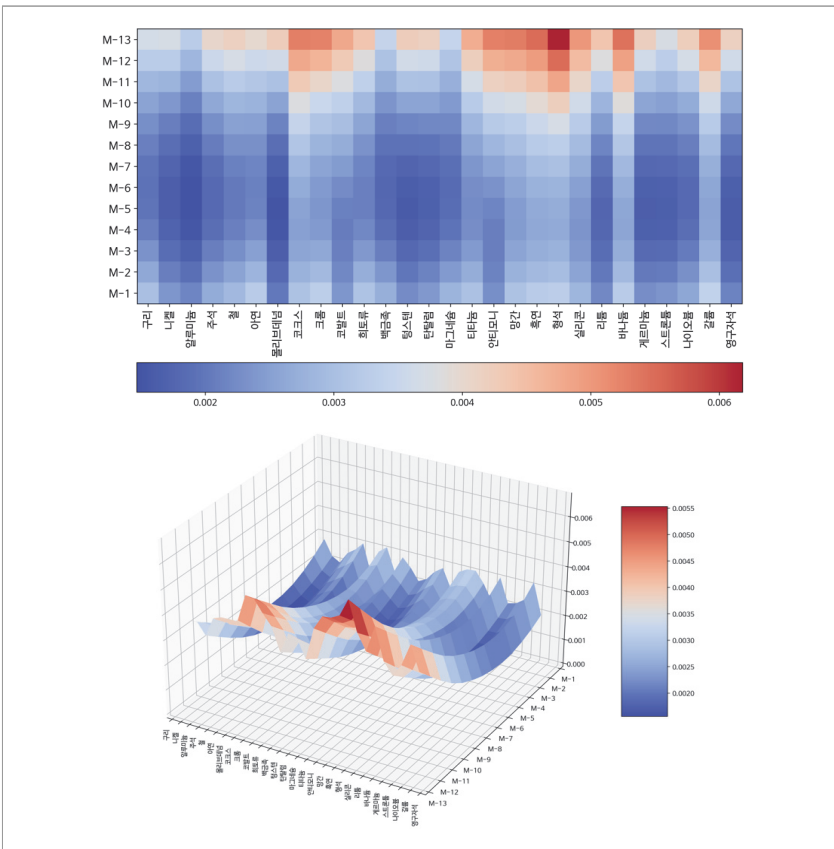


자료: 저자 작성.

라. 조선 산업

선박(HS 8901)의 월별 수출액과 연관성이 높은 광물은 형석, 흑연, 코크스, 갈륨, 망간, 크롬 등으로 나타났으며, 핵심광물의 영향이 전반적으로 있는 것으로 보인다. 다른 산업과 다르게 전년 동월 수입액의 영향이 강하고 중간에 점차 감소하다가 당월에 다시 커지는 것으로 나타났다. 이는 광물이 선박으로 제작 되기까지의 기간이 길기 때문으로 추측된다.

그림 4-11. 핵심광물의 연관성 분석 결과(선박-HS 8901)



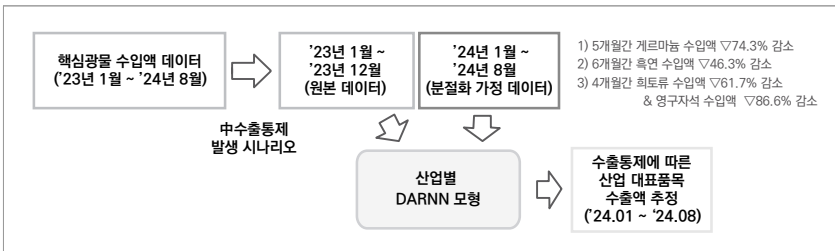
자료: 저자 작성.

3. 공급망 분절화 시나리오에 따른 산업별 영향

가. 공급망 분절화 시나리오와 실험방법

공급망 분절화 시나리오는 중국의 수출통제로 흑연, 게르마늄, 희토류(영구 자석 포함)의 수입이 2024년 1~8월 사이에 단기적으로 중단된 상황을 가정하였으며, 이에 따른 산업별 수출액 변화를 살펴보는 방식으로 영향을 추정하고자 하였다.

그림 4-12. 공급망 분절화가 각 산업에 미치는 영향 추정 방법



자료: 저자 작성.

앞의 분석에서 확인하였듯이 2023년 기준 한국의 흑연, 게르마늄, 희토류, 영구자석의 주요 품목의 대중국 수입 비중은 각각 46.3%, 74.3%, 61.7%, 86.6%였다. 본 분석에서는 우선 앞서 제3장의 분석에서 도출된 세 가지 분절화 시나리오를 대상으로 실험을 진행하였다. 첫 번째 시나리오는 2024년 1~8월 사이에 5개월간 게르마늄 수입액이 74.3% 감소한 경우, 두 번째 시나리오는 6개월간 흑연 수입액이 46.3% 감소한 경우, 세 번째 시나리오는 4개월간 희토류와 영구자석 품목의 수입액이 각각 61.7%, 86.6% 감소한 것으로 가정하였다.

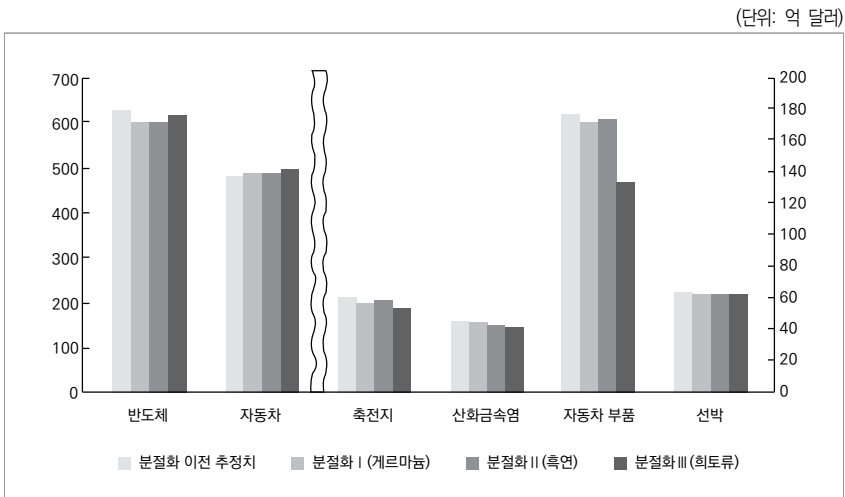
다음으로 공급망 분절화 시나리오에 따른 수입액 데이터를 학습된 산업별 인공지능 모형에 적용하여 산업별 수출액을 추정하였다. 산업별로 학습된 모형

중 가장 오차율이 낮은 모형을 사용하였으며 분절화가 발생하지 않은 실제 데이터를 활용하여 추정된 2024년 1월부터 8월까지의 수출액과 시나리오별로 추정된 2024년 1월부터 8월까지의 수출액을 비교하여 공급망 분절화의 영향을 분석하였다.

나. 산업별 공급망 분절화가 미치는 영향

[그림 4-13]과 [표 4-1]은 세 가지 분절화 시나리오가 주요 산업의 수출액에 미치는 영향을 나타낸다. [그림 4-13]에서 반도체와 자동차는 타 품목 대비 수출액이 커서 별도의 세로축으로 표시하였다.⁸⁴⁾

그림 4-13. 산업별 수출액 영향(2024년 1~8월 누적)



자료: 저자 작성.

84) 본 연구에서는 핵심광물이 중간재로 투입되는 주력 산업으로 자동차와 자동차 부품을 동시에 고려하였다. 핵심광물은 자동차 부품에 중간재로 투입되어 자동차에 영향을 미치게 된다는 점에서 자동차 부품만 분석 대상 산업으로 선택하였다. 선박의 경우 선박 부품을 별도로 구분하지 않았기 때문에 선박을 분석 대상 산업으로 선정하였다.

표 4-1. 산업별 수출액 영향(2024년 1~8월 누적)

(단위: 억 달러)

구분	분절화 이전 추정치	분절화 I (게르마늄)	분절화 II (흑연)	분절화 III (희토류)
축전지 (8507)	59.8	57.4 (-3.9%)	58.6 (-2.0%)	53.3 (-10.8%)
산화금속염 (2841)	45.2	44.3 (-1.9%)	42.3 (-6.4%)	41.8 (-7.6%)
전자집적회로 (8542)	624.8	601.5 (-3.7%)	602 (-3.6%)	615 (-1.6%)
자동차 부품 (8708)	176.5	171.8 (-2.7%)	173.2 (-1.9%)	133.9 (-24.2%)
선박 (8901)	63.9	62.8 (-1.7%)	62.3 (-2.5%)	62.6 (-2.0%)

자료: 저자 작성.

첫 번째 분절화 시나리오(게르마늄)의 경우 게르마늄 수입에 제한이 발생하면 축전지(-3.9%), 산화금속염(-1.9%), 전자집적회로(-3.7%), 자동차 부품(-2.7%), 선박(-1.7%) 등 전반적인 산업의 주요 품목 수출액이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 반도체 소재로 활용되는 주요 광물인 만큼 전자집적회로에 비교적 강한 영향을 미쳤다.

두 번째 분절화 시나리오(흑연)의 경우 흑연 공급이 제한되면 축전지(-2.0%), 산화금속염(-6.4%), 전자집적회로(-3.6%), 자동차 부품(-1.9%), 선박(-2.5%) 산업에서 수출이 감소하는 것으로 나타났다. 흑연은 이차전지의 핵심소재인 음극재에 활용되므로 산화금속염(예: 양극재)과 축전지 수출액에 직접적인 영향을 미치는 것이 확인되었다. 또 흑연은 합금 등에도 활용되므로 자동차부품 등 일부 산업에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

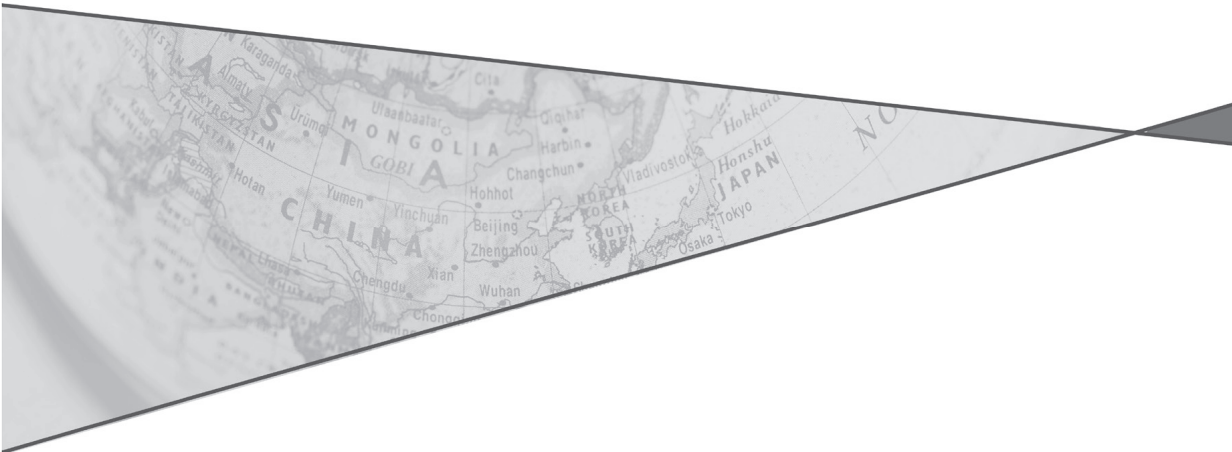
세 번째 분절화 시나리오의 경우 희토류와 영구자석은 대중국 의존도가 큰 품목인 만큼 앞의 시나리오들보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실험 결과 축전지(-10.8%), 산화금속염(-7.6%), 전자집적회로(-1.6%), 자동차 부품(-24.2%) 등 산업의 수출액을 크게 감소시키는 것으로 확인되었다. 특히 자

동차 부품은 -24.2%로 감소 폭이 가장 컸는데, 이는 희토류가 자동차 전자부품 및 고성능 모터에 필수적인 광물이기 때문으로 추정된다. 특히 영구자석은 전기차 모터의 핵심 소재로 영구자석 수입액 감소는 자동차 부품 수출에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 추정된다.

제5장

공급망 분절화의 거시경제적 영향

1. 분석 모형(OECD METRO) 및 자료
2. 거시경제적 분석 결과



1. 분석 모형(OECD METRO) 및 자료

가. 분석 모형

전술한 바와 같이 본 연구에서는 거시적 접근법과 미시적 접근법을 결합하여 공급망 분절화에 따른 경제적 영향을 분석한다. 제4장의 미시적 접근법에 기반한 추정 결과를 활용하여 제5장에서는 OECD METRO 모형을 이용하여 거시적 접근을 시도한다.

Johnson(2018)에 따르면 개별 상품에 대한 생산 단계가 여러 국가를 거치면서 글로벌 가치사슬을 측정하기 위한 자료와 방법론에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 글로벌 가치사슬을 측정하는 데 사용되는 자료를 기준으로 하면, 국가 수준의 투입산출표를 연계하여 추정하는 거시적 방식과 기업 수준의 투입재 조달자료를 이용하여 추정하는 미시적 방식으로 구분이 가능하다.

이 중 교역과 투입산출표를 연계하는 거시적 방식을 적용한 자료로는 퍼듀 대학교의 GTAP(Global Trade Analysis Project), ADB의 MRIO(Multi-Regional Input-Output Table), IDE-JETRO의 Asian Input-Output Table, WIOD(World Input Output Table), EXIOBASE와 the Eora Database, OECD의 ICIO(Inter-Country Input Output Table) 등이 대표적이다.⁸⁵⁾

글로벌 공급망을 분석하려면 전 세계 투입산출 구조를 포함하는 자료가 필요한데, 앞서 살펴본 바와 같이 여러 기관에서 다양한 자료를 제공하고 있다. 각국의 투입산출 구조와 교역자료를 종합하여 정리하기 위해서는 일부 무리한 가정을 해야 하는 측면이 있으며, 자료마다 다른 가정과 통합 방식을 이용하는

85) 개별 자료에 대한 내용은 각 기관의 공식 설명을 참고(<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>, <https://www.adb.org/what-we-do/data/regional-input-output-tables>, <https://www.ide.go.jp/English/Data/lo.html>, <https://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/>, <https://www.exiobase.eu/>, <https://worldmrio.com/>, <https://www.oecd.org/en/data/datasets/inter-country-input-output-tables.html>).

것으로 알려져 있다. 또 자료의 대부분이 실제 각국의 투입산출표보다는 더 통합된 수준의 대분류 산업 수준으로 구성되어 있는데, 이는 자료의 출처, 국가, 연도마다 산업의 분류방식 등이 상이하하여 이를 연계하는 과정에서 통합이 불가피하기 때문이다.

통상정책의 거시경제적 효과를 분석하는 데는 연산가능일반균형(CGE: Computable General Equilibrium) 모형이 널리 사용된다(Kim *et al.* 2024). CGE 모형은 일반적으로 경제주체들의 합리적 의사결정 구조를 묘사하는 방정식과 각 생산물 및 생산요소시장의 균형식으로 구성되어 있다. 그리고 모형은 이들 방정식과 균형식에 포함된 변수들의 값과 변수값의 변화에 따른 반응의 정도를 나타내는 매개변수값을 포함한다. 따라서 CGE 모형을 이용하면 정책의 효과가 경제변수 간의 복잡한 상호작용을 거쳐 경제 전체에 파급되는 영향을 추정할 수 있다.

통상정책 효과분석에 가장 널리 사용되는 CGE 모형은 퍼듀대학교의 GTAP 모형이다. GTAP 모형은 모형이 공개되어 있어 검증이 가능하고 널리 사용되면서 그 안정성과 유용성이 검증된 모형이다. 또 GTAP 모형에 대응하는 GTAP database는 160개국의 65개 산업을 대상으로 한 방대한 자료로서 여타 CGE 모형에도 널리 사용되고 있다. 다만 GTAP 모형은 다양한 통상정책 효과분석을 위한 범용 모형으로 모형에서 최종사용자를 구분하지 못한다는 한계가 있다. 즉 어떤 국가에서 수입된 제품이 중간재로 투입되는지, 최종재로 사용되는지를 구분하지 않는다. 글로벌 공급망을 분석하려면 중간재 투입구조에 대한 파악이 전제되어야 한다는 점에서 GTAP 모형은 구조적으로 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 OECD의 METRO 모형을 사용한다.⁸⁶⁾ METRO 모형은 글로벌 무역 연계성과 무역정책에 초점을 맞춰 개발된 모형으로, McDonald and Thierfelder의 GLOBE 모형을 토대로 최종사용자 시장(end user

86) 모형에 관한 개괄적인 설명은 OECD(2023), "METRO Version 4 Model Documentation," OECD TAD/TC/WP/RD를 참고하여 정리하였다.

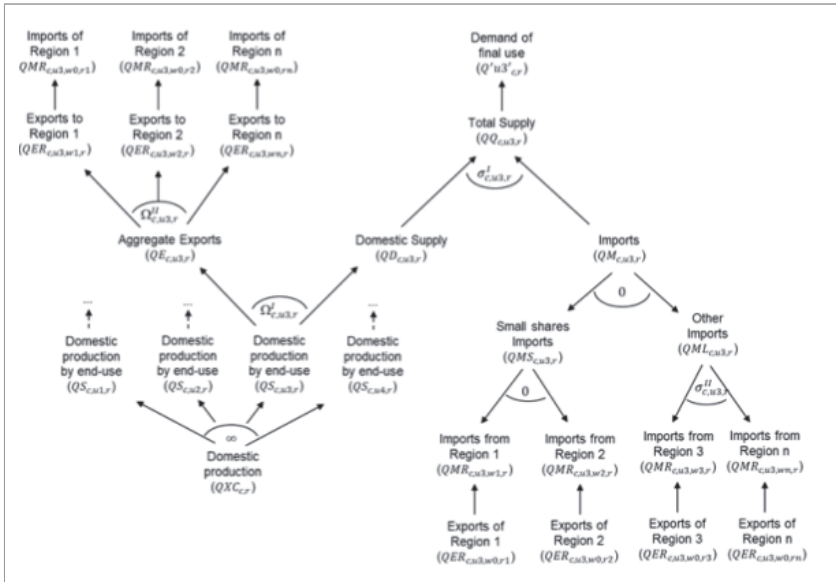
markets)을 세분화하였다는 특징이 있다. 현재 METRO 모형은 인하우스(in-house) 모형으로 OECD에서 관심 있는 이슈를 통합적으로 다룰 수 있게 구성되었다. ICIO-TiVA와의 결합을 통한 최종사용자(중간재, 민간소비재, 정부소비재, 자본재)를 구분하고 있으며 GTAP migration자료를 결합하여 국제노동 이동도 모형화하고 있다. 또 환율이나 실업 등 다양한 정책조치 등을 다룰 수 있게 모형을 구성하였으며 주로 정책의 영향을 분석하고 이를 기반으로 한 정책 제안을 도출하는 데 초점을 맞추고 있다는 점이 특징적이다. 그리고 METRO 모형이 기본모형에 다양한 정책효과 분석을 위한 모듈을 결합한 형태라는 점이 눈에 띈다. 모듈로는 자국산부품사용요건(LCR: Local Contents Requirement), 토지배분(LandCET: Land allocation), 지불의사(WTP: Willingness to Pay) 등이 있는데, 분석 대상 정책에 따라 각 모듈을 온/오프하여 구동할 수 있다.

전술한 바와 같이 OECD METRO도 CGE 모형이므로 각 경제주체들의 합리적 의사결정을 묘사하는 최적화 방정식 체계를 갖추고 있다. 가계는 Stone-Geary 함수를 토대로 효용을 극대화하는 선택을 한다. 따라서 생활에 필요한 최소한의 소비를 허용하는 구조이다. 가계는 복합재를 소비하는데 이 복합재는 3단계의 트리구조로 만들어진다. 복합수입재와 국내재가 CGE 함수를 통해 결합되어 복합소비재를 구성하는데, 여기에는 상대가격과 아밍턴 가정(제품 차별화)이 영향을 미친다.

국내 생산 역시 3단계의 트리구조로 이루어진다. 첫 번째 트리에서는 중간재와 부가가치를 레온티에프 또는 CES 기술을 통해 결합한다. 두 번째 트리에서는 여러 중간재를 레온티에프 함수를 통해 복합중간재로 결합하고, 부가가치는 토지, 천연자원, 복합노동 및 자본을 CES 함수로 결합한다. 세 번째 트리에서는 비숙련 노동과 자본 및 숙련노동을 복합생산요소로 결합한다. 즉 생산요소 및 국내재와 수입재 간에는 대체가능성을 가정하나 다양한 산업에서 조달되는 중간재는 레온티에프 함수를 이용함으로써 대체가 불가능하다고 가정한다. 이

는 특정 국가에서 수입하던 중간재를 다른 국가의 중간재로 일정 부분 대체가 가능하다는 것을 의미하며, 대체탄력성의 크기를 조정함으로써 대체 가능 정도 또는 대체에 걸리는 기간을 고려할 수 있다.

그림 5-1. METRO 모형의 상품시장 구조



자료: OECD(2023), p. 25.

생산 단계가 3단계의 트리구조로 이루어져 있으므로 정책의 충격이 생산구조의 하단에 영향을 미치는 경우에는 국내에서만 조정 과정을 거치게 되나, 상단에 영향을 미치는 경우에는 글로벌 시장에도 영향이 파급된다. 따라서 분석 대상 시나리오를 고려할 때 정책충격의 대상 변수에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

나. 분석 자료

METRO에 사용되는 자료는 기본적으로 GTAP자료에 기반한다. 여기에 최종사용자를 세부적으로 구분하기 위하여 OECD의 ICIO와 UN Comtrade 자료를 결합하여 구축한다. 최종사용자는 중간재, 민간소비, 정부지출, 투자로 구분한다. 현재 사용 가능한 GTAP의 가장 최신 버전인 V11은 160개 국가 또는 지역의 65개 산업에 대한 자료이나, METRO의 자료는 152개 국가 또는 지역의 65개 산업에 대한 자료이다.⁸⁷⁾

본 연구에서는 분석의 용이성을 위하여 152개 국가 또는 지역을 6개로, 65개 산업을 12개로 재분류하였다. 재분류 국가는 한국과 중국, 미국, EU와 아세안 그리고 나머지 국가군을 포함하는 기타 세계로 구성하였다. 산업은 분석 시나리오에 따라 농업, 천연자원, 음식료업, 서비스업을 최대한 통합하고 분석 대상 산업을 고려하여 제조업을 화학, 전자, 전기, 기계, 자동차, 수송기기, 기타 제조업으로 재분류하였다.

표 5-1. METRO 자료 재분류

국가 분류		산업 분류	
ASEAN	아세안	agri	농업
CHN	중국	extr	천연자원
EU	EU	food	음식료
KOR	한국	chem	화학
USA	미국	ele	전자광학기기
ROW	기타 세계	eeq	전기장비
glo	GLOBE	ome	기계
		mvh	자동차 및 부품
		otn	기타 수송기기
		otmu	기타 제조업
		otp	운송서비스
		ser	기타 서비스

자료: 저자 작성.

87) 본 연구에서 사용한 METRO 자료는 GTAP version 11에 기반하고 있으며, OECD에서 자료를 제공받았음을 밝힌다.

CGE 모형의 특성상 자료는 세부 품목 단위가 아니라 산업 단위로 구축될 수밖에 없다. 따라서 특정 품목에만 영향을 미치는 정책의 효과를 분석하고자 할 경우에는 특정 품목이 포함되는 산업에서 해당 품목이 차지하는 비중을 고려하거나 해당 품목을 산업에서 분리하는 접근법을 고려할 수 있다. 다만 산업을 세분화하려면 교역자료뿐만 아니라 생산 및 투입 관련 정보가 필요한데, 본 연구의 분석 대상인 핵심광물의 경우 교역자료 이외에는 추가의 가용 정보가 없으므로 분석 대상 핵심광물을 포함하는 산업에서 핵심광물이 차지하는 비중을 고려하는 접근법을 사용한다.

METRO의 최신자료는 2017년을 기준연도로 하고 있어서 2024년 이후의 공급망 분절화의 영향을 분석하는 데는 한계가 있다. 다만 METRO의 자료를 사용 가능한 거시경제 지표를 활용하여 업데이트하더라도 세부 산업별 교역구조를 반영할 수는 없다. 이는 METRO 모형에 투입되는 자료는 실제 자료를 토대로 모형 내 균형을 달성하도록 보정된 상태인데, 세부 산업별 양자 교역구조를 반영하는 새로운 균형을 찾는 것은 매우 어려운 일이기 때문이다. 따라서 거시경제적 지표만 업데이트할 경우 교역구조는 거시경제적 지표에 따라 비례적으로 변화하게 됨으로써 산업별 수출입 의존도 등은 달라지지 않는다. 한편 2018년에 트럼프의 대중국 관세 부과가 시작되면서 미중 간 교역구조는 큰 변화를 겪었으며 한국 역시 대외개방도가 높은 경제구조를 갖고 있어 미중 간 통상갈등의 영향을 받은 바 있다. 최근 중국의 대한민국 의존도는 하락한 반면, 한국의 대중국 의존도는 상승한 것으로 나타나는데, 경제안보와 공급망 안정화 이슈가 부상하면서 한국은 주요 품목에 대한 공급망 다변화를 추구하고 있다. 따라서 지금의 높은 대중국 의존도는 장차 완화될 가능성이 높으며, 현재 의존도가 높은 상당수의 품목은 중국의 가격경쟁력에 기인한 것이지 대체선이 부족하기 때문은 아니라는 점을 고려할 필요가 있다. 즉 미중 갈등이 본격화되기 이전인 2017년을 기준으로 하는 분석과 2024년 이후를 기준으로 하는 분석은 각각의 의미를 지닌다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 우선 2017년 기준연

도의 자료를 이용하여 분석하며, 2024년 이후를 기준으로 하는 분석은 후속연구로 남겨 둔다.⁸⁸⁾

다. 분석 시나리오

본 연구에서는 세 가지 시나리오를 대상으로 두 가지 접근법을 고려하였다. 세 가지 시나리오는 앞서 분석한 게르마늄(시나리오 1), 흑연(시나리오 2), 희토류(시나리오 3)의 대중국 수입이 각각 5개월, 6개월, 4개월 지연되는 경우에 그 영향을 상정한다. 두 가지 접근법은 ① 분석 대상 핵심광물이 중국에서 수입되지 않음으로써 발생하는 거시경제적 효과를 METRO 모형에서 직접 분석하는 방식(접근법 1)과, ② 대중국 수입지연으로 인해 우리의 주력산업에 미치는 영향을 머신러닝 기법으로 분석한 후, 그 결과를 이용하여 METRO 모형에서 거시경제적 효과를 추정하는 방식(접근법 2)이다.

전자는 대부분의 일반균형 분석 모형을 이용한 거시적 접근법에서 사용하는 방식으로, 이 경우 산업별 수입액에서 차지하는 비중이 낮은 핵심광물의 경우 그 분절화에 따른 파급 영향이 과소 추정될 위험이 있는바, 이를 모형을 통해 살펴보기 위해 고려하였다. [표 5-2]는 전술한 시나리오와 접근법의 조합을 보여 준다. 세 가지 시나리오를 각각의 접근법을 이용하여 분석하고 그 결과를 비교하고자 한다. 접근법 1에서는 단기와 장기의 효과를 구분하기 위하여 장기의 경우는 모형에서 가정한 대체탄력성 기본값을 그대로 사용하고, 단기의 경우는 대체가 용이하지 않다는 점을 고려하여 기본값의 10분의 1에 해당하는 값을 적용한다.

88) OECD METRO 모형을 이용하여 기준연도를 업데이트하면서 교역구조의 변화를 반영하는 실험은 별도의 연구 주제로 다를 필요가 있다.

표 5-2. 분석 대상 시나리오와 접근법

접근법	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
	게르마늄 대중국 수입 5개월 지연	흑연 대중국 수입 6개월 지연	희토류 대중국 수입 4개월 지연
접근법 1(거시모형)			
접근법 2 (미시모형+거시모형)			

주: 거시적 접근에서는 단기와 장기를 구분하며, 장기는 모형의 대체탄력성 기본값을 그대로 사용하고 단기는 장기 0.1배 값을 이용함.

자료: 저자 작성.

앞 장에서 살펴본 바와 같이, 2023년을 기준으로 한국의 흑연, 게르마늄, 희토류의 대중국 수입 비중은 각각 46.3%, 74.3%, 61.7%이다. 첫 번째 접근법에서는 METRO 모형 내 해당 품목이 포함된 산업에서의 대중국 수입을 감소시키는 상황을 고려해야 하므로 우선 품목과 산업을 매칭하였다. 희토류(HS 코드: 2846)와 게르마늄(282560)은 METRO의 화학 산업에, 흑연(8545)은 전자 산업에 포함된다. HS코드 6단위 대중국 수입통계를 METRO의 화학 산업과 전자 산업에 매칭하고, 이를 다시 UN BEC(Broad Economic Categories) 코드를 기준으로 중간재와 기타로 세분하였다.

[표 5-3]은 2023년 기준 대중국 화학 산업 및 전자 산업에서 대중국 중간재 수입과 분석 대상 핵심광물의 4~6개월 수입액을 정리한 것이다. 대중국 총수입액은 1년 기준이며, 핵심광물 수입액은 시나리오에 따라 4~6개월 기준으로 산정하였다. 이를 이용하여 대중국 화학 산업 및 전자 산업에서 핵심광물 수입이 차지하는 비중을 계산한 결과, 희토류는 0.063%, 게르마늄은 0.046%, 흑연은 0.142% 정도였다. 이를 기반으로 접근법 1에서는 대중국 중간재 수입 비중이 화학 산업에서 각각 0.063%, 0.046%, 전자 산업에서 0.142% 감소하는 경우를 시나리오로 가정하여 분석하였다.

표 5-3. 핵심광물의 대중국 산업별 수입 비중(2023년)

(단위: 백만 달러)

산업	최종수요	대중국 총수입액 (1년)	핵심광물 수입액 (4~6개월)	핵심광물
화학(chem)	중간재	21,967	13.8	게르마늄
	기타	250		
화학(chem)	중간재	21,967	10.0	희토류
	기타	250		
전자(eeq)	중간재	13,000	28.0	흑연
	기타	6,600		

자료: 저자 작성.

두 번째 접근법에서는 앞 장에서 분석한 결과를 토대로 중국에서 조달하던 희토류, 게르마늄, 흑연 등의 수입이 원활하지 못함으로 인해 우리의 주력 수출 품목인 축전지, 산화금속염, 전자집적회로, 자동차, 자동차 부품, 선박의 수출이 감소하는 경우를 고려하였다.

[표 5-4]는 분석 대상 품목의 HS코드를 기준으로 METRO 해당 산업에 매칭한 후, 해당 산업의 연간 총수출액과 분석품목 수출액을 정리한 것이다. 공급망 분절화에 따른 분석품목 수출감소액 추정치는 [표 4-1]에서 가져왔다. 제4장과 제5장은 사용한 분석자료가 다르기 때문에 금액을 직접 비교하기 어렵다는 점에서 제4장의 분석 결과인 변화율을 토대로 제5장에서 사용한 자료에 적용하였다.

분석 대상 품목은 축전지(HS코드: 8507), 산화금속염(2841), 전자집적회로(8542), 자동차(8703), 자동차 부품(8708), 선박(8901)이며, 이 중 산화금속염은 화학, 자동차 및 자동차 부품은 자동차/부품, 선박은 기타 수송기기, 전자집적회로는 전자광학기기, 축전지는 전기장비 산업에 속한다. METRO 산업별 총수출액에서 분석 대상 품목의 수출액을 별도로 분리하고, 공급망 분절화로 인한 분석 대상 품목의 수출감소액을 산출한 후 다시 이를 METRO 산업별 수출감소율로 환산하였다.

표 5-4. 공급망 분절화가 산업별 수출에 미치는 영향

(단위: 억 달러, %)

산업	총수출액	분석 대상 품목 수출액	시나리오별 수출변화율		
			게르마늄	흑연	희토류
화학	870.87	127.00	-3.9	-2	-10.8
자동차/부품	966.47	877.00	-1.9	-6.4	-7.6
기타 수송기기	315.77	167.00	-3.7	-3.6	-1.6
전자광학기기	1,514.03	861.00	-2.7	-1.9	-24.2
전기장비	422.89	98.30	-1.7	-2.5	-2

자료: 저자 작성.

다만 실제 분석에서는 수출감소율 대신 생산감소율을 적용하였다. 수출감소율의 경우 상대국을 특정할 수 없어 모든 교역상대국에 비례적으로 수출이 감소하는 것으로 가정해야 하므로 다수의 정책충격을 고려하게 되는데, 이 때문에 추정상의 계산부담은 커지는 반면 추정 결과에 미치는 영향은 제한적이다. 그리고 최종생산물의 경우 국내수요와 해외수요에 따라 생산방식이 다르지 않기 때문에 수출이 일정액 감소할 경우 해당 금액만큼 국내 생산이 감소한다고 가정하였다. 이를 위하여 앞 장에서 도출된 핵심광물별 주요 산업에서의 수출감소율을 수출감소액으로 환산한 후, 수출감소액만큼 생산 감소가 발생할 경우의 생산감소율을 계산하여 정책충격으로 사용하였다. 각 시나리오의 핵심광물 공급망이 지연될 경우 산업별 수출 감소는 8개월에 걸쳐 발생하는 것으로 가정하였다.⁸⁹⁾ [표 5-4]가 HS코드를 기반으로 한 교역자료를 METRO의 산업 분류에 매칭한 반면, [표 5-5]는 METRO 자료를 기반으로 정리한 것이다. 즉 [표 5-5]는 2017년 기준연도 METRO 자료이므로 실제 최근 교역자료를 기반으로 도출된 [표 5-4]보다 값이 작게 나타난다. 따라서 금액을 기준으로 정책충격을 도출할 수 없으므로 수출변화율을 토대로 METRO 자료에 적용하여 산업별 생산변화율을 산출하였다.

89) 이는 앞 장의 추정 결과에 기반한다.

표 5-5. 공급망 분절화가 산업별 생산에 미치는 영향

(단위: 억 달러, %)

산업	생산액	수출액	시나리오별 생산변화율		
			게르마늄	흑연	희토류
화학	1,433.20	658.79	-0.174	-0.089	-0.483
자동차/부품	1,567.65	670.30	-0.109	-0.366	-0.435
기타 수송기기	505.50	388.96	-1.004	-0.977	-0.434
전자광학기기	2,763.75	1,960.02	-0.726	-0.511	-6.507
전기장비	901.20	308.87	-0.090	-0.133	-0.106

주: 생산액과 수출액은 모형의 database에 기반하여 추출됨.

자료: 저자 작성.

정리하면 본 연구의 분석 대상 시나리오는 ① 대중국 게르마늄 수입이 5개월 지연되는 경우, ② 대중국 흑연 수입이 6개월 지연되는 경우, ③ 대중국 희토류 수입이 4개월 지연되는 경우 등 세 가지이다. 접근법은 ① 대중국 핵심광물 수입 감소, ② 핵심광물 수입 감소로 인한 주력품목의 생산 감소 등 두 가지이다.

정책충격은 각각 수입감소율과 생산감소율이 되는데, 수입과 생산은 모두 모형 내에서 그 값이 결정되는 내생변수이므로 외부적으로 정책충격을 부여하는 것이 불가능하다. 기본적으로 정책충격은 외생변수에 부여됨으로써 그 충격에 내생변수들이 반응하면서 새로운 균형에 도달하고 새로운 균형과 초기 균형을 비교함으로써 정책의 효과를 분석하기 때문이다. 따라서 내생변수에 정책충격을 부여하려면 내생변수를 외생화하는 과정이 필요하며, 정책충격의 대상이 되는 내생변수 대신 모형이 균형에 도달하도록 값이 변동되는 외생변수가 필요하다.

본 연구에서는 접근법 1의 조정 외생변수로 수입의 효율성을 선택하였으며, 접근법 2의 조정 외생변수로는 생산의 중간재 효율성을 선택하였다. 접근법 1에서 수입의 효율성은 iceberg cost로 측정하며, 수입의 감소율에 대응하는 iceberg cost의 증가율을 추정된 후 모형을 통해 iceberg cost가 증가할 때 생기는 경제적 영향을 추정하였다. 접근법 2에서도 생산의 감소율에 대응하는

중간재 효율성 저하율을 추정한 후, 이를 모형에 반영함으로써 경제적 영향을 추정하였다.

접근법 1에서는 시나리오별로 게르마늄, 흑연, 희토류의 대중국 수입이 감소하는 데 필요한 관세상당치의 상승분을 우선적으로 추정하였다. 모형 내 대체탄력성 수치를 그대로 가정하여 추정할 경우(이는 장기에 해당함), 대중국 수입 감소에 대응하는 관세상당치 증가율은 게르마늄의 경우 화학 산업에서 1.40%, 흑연의 경우 전자 산업에서 1.1%, 희토류의 경우 화학 산업에서 1.92%로 나타났다. 이를 iceberg cost로 환산하면 1에서 각각 0.999861, 0.999577, 0.99981로 하락하는 것을 의미한다.⁹⁰⁾

아래의 수식과 같이 수입가격(P)은 iceberg cost(IC)와 관세율(tariff), 환율(ER)의 결합으로 구성되며, iceberg cost는 1로 가정한다.

$$P_{w,c,u,r} = IC_{w,c,u,r} (1 + tariff_{w,c,u,r}) ER_{w,c,u,r} \quad [\text{식 5-1}]$$

관세율 변화를 iceberg cost로 변환하려면 다음과 같은 관계식을 이용한다. 관세율 변화에 따른 가격을 p^0 로, iceberg cost 변화에 따른 가격을 p^1 이라고 할 때 두 개의 가격이 동일하도록 관세율 변화에 대응하는 iceberg cost를 역산해 보면, 두 개 관세율의 함수로 표현할 수 있다.⁹¹⁾

$$\begin{aligned} P_{w,c,u,r}^0 &= P_{w,c,u,r}^1 \\ \Rightarrow IC_{w,c,u,r}^0 (1 + tariff_{w,c,u,r}^0) &= IC_{w,c,u,r}^1 (1 + tariff_{w,c,u,r}^1) \\ \Rightarrow IC_{w,c,u,r}^1 &= \frac{1 + tariff_{w,c,u,r}^0}{1 + tariff_{w,c,u,r}^1} \end{aligned} \quad [\text{식 5-2}]$$

90) iceberg cost란 1에 해당하는 상품량을 수출할 때 실제 상대국에 도착하는 상품량을 의미하는 개념이며, 추정된 관세상당치를 이용하여 모형 내 대중국 관세율을 상향 조정할 경우 대중국 수입은 감소하겠으나 그 과정에서 관세 수입이 증가하여 결과에 영향을 미치게 되므로 iceberg cost로 변환이 필요하다.

91) 실제 모형에서는 화학 산업과 전자 산업의 대중국 관세율은 각각 1.3%와 3.93%이다.

[표 5-6]은 관세상당치를 iceberg cost로 변환한 결과를 나타낸다.

표 5-6. 접근법 1에 따른 한국의 대중국 iceberg cost 변화율

(단위: %)

METRO 산업	게르마늄		흑연		희토류	
	단기	장기	단기	장기	단기	장기
화학	5.71	1.39			7.83	1.90
전자			11.26	4.23		

주: 1) 화학과 전자 산업의 대중국 관세율은 각각 1%와 4%임.

2) 단기와 장기는 각각 모형 내 수입재의 대체탄력성 수치를 0.1배와 1배 가정한 경우로, 단기에는 중국을 제외한 제3국산 핵심광물로 수입이 대체되기 어려운 경우를 상정함.⁹²⁾

자료: 저자 작성.

접근법 2에서는 핵심광물별로 대중국 수입이 원활하지 않아 우리의 주력 산업에서의 생산(수출)이 감소하는 상황을 다루었다. 모형에서는 이러한 생산(수출)의 감소가 각 산업의 중간재 효율성 감소에 기인하는 것으로 가정하였는데, 이는 해당 산업의 생산에 필요한 중간재를 더 비싼 가격에 조달하는 상황으로 이해할 수 있다. [표 5-7]은 접근법 2에서 핵심광물별 공급망 분절화가 주력 산업의 중간재 효율성을 어느 정도 감소시키는지를 추정한 결과이다.

표 5-7. 접근법 2에 따른 한국의 산업별 중간재 효율성 변화율

(단위: %)

METRO 산업	게르마늄	흑연	희토류
화학	-0.21	-0.16	-1.13
자동차/부품	-0.14	-0.22	-0.77
기타 수송기기	-0.35	-0.33	-0.99
전자광학기기	-0.29	-0.22	-2.24
전기장비	-0.17	-0.17	-0.88

자료: 저자 작성.

92) 단기는 장기의 대체탄력성의 0.1배를 적용했는데, Baqaee *et al.*(2024)은 선행연구의 대체탄력성을 정리하며 단기에는 0.5(Fajgelbaum *et al.* 2020), 장기에는 3-5(Head and Mayer 2014; Simonovska and Waugh 2014)를 제시하고 있어 대략적으로 단기가 장기의 10분의 1 수준이다. 해당 연구를 소개해준 심의위원(KIEP의 김현수 박사)에게 사사를 표한다.

2. 거시경제적 분석 결과

전술한 바와 같이 본 연구에서는 세 가지 공급망 분절화 시나리오를 대상으로 두 가지 접근법을 이용하여 그 거시경제적 효과를 추정하고 결과를 비교한다.

중국산 핵심광물의 분절화로 인한 한국의 거시경제적 영향을 접근법 1에 따라 분석한 경우에는 그 효과가 미미한 것으로 나타났으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 그 효과가 유의미한 것으로 나타났다. 게르마늄의 경우 접근법 1에 따라 분절화의 영향을 분석한 결과 실질GDP는 약 100만~425만 달러 감소하여 기준연도 대비 변화율은 거의 0%였으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 실질GDP가 23억 1,400만 달러(0.15%) 감소할 것으로 추정되었다. 흑연과 희토류의 경우에도 접근법 1을 이용한 경우 대체가능성을 아무리 낮춰도 실질GDP에 미치는 영향은 제한적인 것으로 추정되었으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 실질GDP 변화율이 각각 -0.14%와 -0.89%에 이를 것으로 추정되었다. 접근법 2의 분석 결과는 [표 5-9]에 정리하였다.

접근법 1을 이용하여 중국발 핵심광물 공급망 타격의 영향을 분석한 결과에서 그 영향이 미미하게 나온 이유는 해당 핵심광물의 중요성에도 불구하고 대중국 핵심광물 수입액이 전체 대중국 수입액에서 차지하는 비중이 낮기 때문이다. 전술한 바와 같이 수입 규모가 미미할지라도 우리의 주력 수출품목의 생산에 필수적인 핵심중간재라는 점을 고려하면 접근법 1에 기반한 추정 결과는 일반적으로 과소 추정되었을 가능성이 높다. 즉 핵심광물 등 특정 품목에서의 공급망 분절화 영향을 추정할 때 일반적인 CGE 모형을 활용한 접근법은 한계가 있음을 보여 준다.

접근법 1을 이용할 경우 모형은 공급이 단절된 중국산 핵심광물을 제3국산으로 대체함으로써 생산을 최적화하기 때문에, 분석 결과를 보면 중국산 핵심광물이 어떤 국가의 광물로 대체되는지를 파악할 수 있는 것처럼 이해된다. 하

지만 METRO 모형과 같이 거시경제적 접근법을 이용하는 경우 산업 분류가 대부분이기 때문에 특정 국가에서의 수입감소분은 여타 국가에서 동일한 비율로 대체되는 것이 일반적이다. [표 5-8]에서 보는 바와 같이 시나리오 1(게르마늄)의 경우 대중국 화학 산업 중간재 수입 감소에 대응하여 아세안, EU, 미국, 기타 세계로부터의 중간재 수입 증가는 대부분이 0.03~0.04%로 거의 유사하게 증가하는 것을 알 수 있다.

표 5-8. 공급망 분절화에 따른 한국의 핵심광물 수입변화율

(단위: %)

수입 상대국	화학(게르마늄)	전자(흑연)	화학(희토류)
아세안	0.04	0.12	0.05
중국	-0.13	-0.33	-0.17
EU	0.04	0.11	0.05
미국	0.03	0.11	0.05
기타 세계	0.04	0.11	0.05

자료: 저자 작성.

표 5-9. 공급망 분절화가 국내 거시경제에 미치는 영향

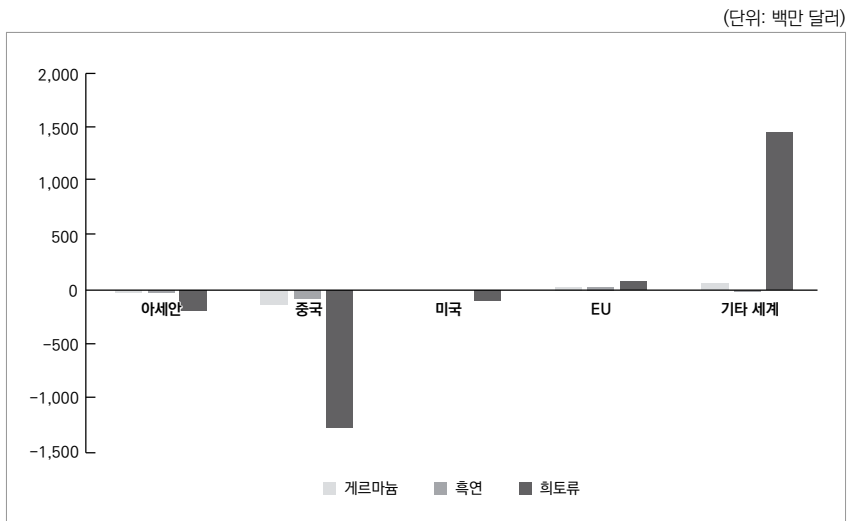
항목	기초자료	케르마늄			흑연			희토류		
		거시		장기	거시		장기	거시		장기
		단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기	
실질GDP	1,517,330	-4.25	-1.00	-2,314.13	-4.75	-1.75	-2,180.50	-5.88	-1.38	-13,437.38
최종국내수요	1,397,753	0.00%	0.00%	-0.15%	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-0.89%
민간소비	710,998	-7.88	-1.88	-1,990.13	-7.50	-2.88	-1,892.00	-10.88	-2.63	-11,464.38
정부지출	226,692	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-0.82%
투자수요	460,063	-4.00	-0.94	-1,016.00	-2.94	-1.13	-953.31	-5.50	-1.31	-6,030.50
수입	579,529	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-0.13%	0.00%	0.00%	-0.85%
수출	699,106	-1.31	-0.31	-294.17	-1.75	-0.66	-282.23	-1.80	-0.44	-1,619.34
국내생산	3,399,449	0.00%	0.00%	-0.13%	0.00%	0.00%	-0.12%	0.00%	0.00%	-0.71%
후생(EV)		-2.63	-0.63	-680.00	-2.88	-1.06	-656.41	-3.59	-0.88	-3,814.53
		0.00%	0.00%	-0.15%	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-0.83%
		-9.94	-2.44	-933.56	-14.63	-5.50	-807.63	-13.56	-3.31	-5,839.44
		0.00%	0.00%	-0.16%	0.00%	0.00%	-0.14%	0.00%	0.00%	-1.01%
		-6.19	-1.50	-1,257.44	-11.75	-4.44	-1,096.19	-8.50	-2.06	-7,812.31
		0.00%	0.00%	-0.18%	0.00%	0.00%	-0.16%	0.00%	0.00%	-1.12%
		-15.25	-3.75	-3,624.00	-15.25	-5.75	-3,501.00	-21.00	-5.00	-19,575.00
		0.00%	0.00%	-0.11%	0.00%	0.00%	-0.10%	0.00%	0.00%	-0.58%
		-4.01	-0.97	-1,012.01	-3.02	-1.14	-950.86	-5.50	-1.33	-6,010.16

자료: 저자 작성.

요컨대 핵심광물과 같이 중요도와 파급력은 크지만 수입액이나 수입 비중은 높지 않은 품목에서 발생하는 공급망 타격의 영향을 일반적인 거시경제 모형으로 분석하는 데는 여러 어려움이 존재한다.

이에 이하에서는 접근법 2를 이용하여 분석한 시나리오별 결과에 초점을 맞추고자 한다. [그림 5-2]는 핵심광물 공급망 분절화 시나리오별로 주요국의 실질GDP 변화액을 도시한 것이다. 모든 시나리오에서 국가별로는 중국이 가장 큰 타격을 받고 그다음으로는 아세안이 부정적 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 광물별로는 흑연의 분절화에 따른 글로벌 영향이 가장 작고, 그다음으로는 게르마늄이 작았으며, 희토류의 경우에는 중국의 성장에는 악영향을 미치지 만 기타 세계의 경제성장에는 오히려 긍정적인 것으로 나타났다.

그림 5-2. 공급망 분절화에 따른 주요국의 실질GDP 변화



자료: 저자 작성.

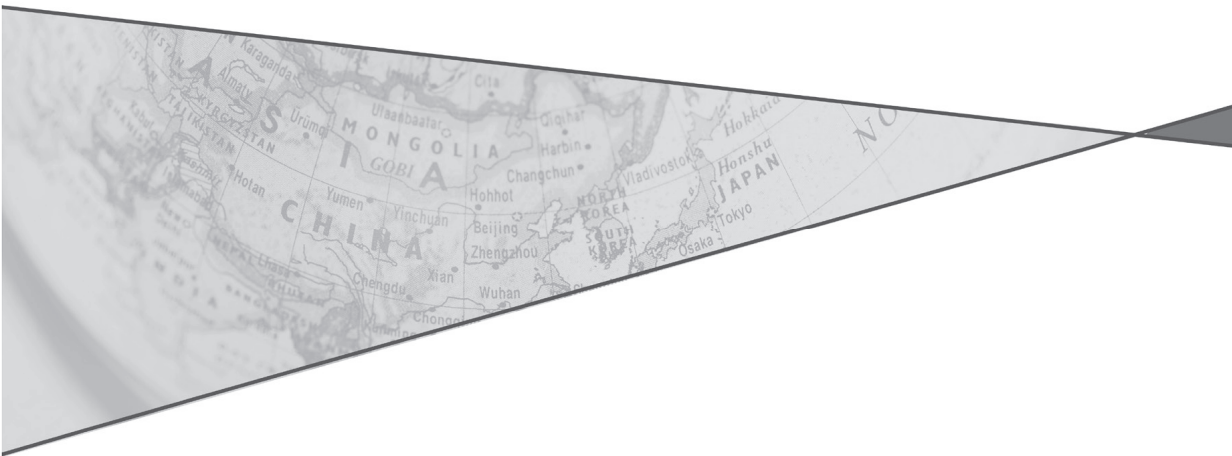
접근법 2에서는 핵심광물 분절화의 영향을 해당 광물의 대중국 수입 감소 대신 해당 광물을 이용하여 생산하는 주요 산업의 생산 감소를 통해 파급되는 영향을 추정하였다. 따라서 중국의 성장 감소는 해당 광물의 대한국 수출 감소에 기인한다고 보기 어렵다. 한국의 축전지, 전자직접회로 등의 생산이 감소하면서 여기에 투입되는 중국산 중간재에 대한 수요 감소와 해당 한국산을 중간재로 투입하여 생산되는 중국산 최종재의 생산 차질 등에 기인한 것일 가능성이 높다. 반면 기타 세계의 경우 한국산 또는 중국산을 대체하면서 반사이익을 얻는 것으로 보인다.

결론적으로 한국이 중국에서 수입하던 핵심광물의 공급이 원활하지 못할 경우, 한국 주력 산업의 생산이 감소하면서 한국의 실질GDP 등이 적지 않은 타격을 받을 것으로 추정된다. 동시에 한국과 공급망 구조가 밀접하게 관련되어 있는 중국과 아세안의 경우 다른 국가들에 비해 부정적 영향에 더 많이 노출될 것으로 예상되었다. 중국에서 수입하던 핵심광물의 공급이 의도치 않게 교란될 경우 글로벌 공급망 구조를 통해 중국에도 부정적인 파급 영향이 있다는 점에서 한국과 중국은 공급망 교란을 미연에 방지하고, 의도치 않은 교란의 피해를 최소화하기 위해 양국 간 공조를 굳건히 할 필요가 있다.

제6장

결론

1. 요약
2. 연구의 한계와 후속연구 제안
3. 정책적 시사점



1. 요약

본 연구에서는 글로벌 공급망 분절화의 영향을 정량적으로 분석하기 위한 방법론을 검토하고, 이를 핵심광물 분절화 시나리오에 적용하여 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

제2장에서는 공급망 분절화의 파급 영향에 관한 선행연구를 품목 또는 기업 단위에서 분석하는 미시적 접근법과 산업 또는 국가 단위에서 분석하는 거시적 접근법으로 나누어 살펴보았다. 정량분석을 시도한 연구 위주로 분석 모형, 시나리오, 가정과 한계 등을 정리하고, 선행연구에서 제기하는 주요 쟁점과 파급 경로 등을 고려하여 본 연구에서 제안할 방법론에 접목하고자 하였다. 개별 품목 또는 기업 단위의 분석방법론의 경우, 해당 품목이나 기업의 특성을 정확히 반영하여 현실성 높은 분석이 가능하다는 장점이 있으나, 개별 품목이나 기업의 공급망에 대한 정보 접근성이 낮아 실제 적용이 쉽지 않다는 한계가 있다. 또한 산업이나 국가 단위의 분석방법론을 세부 품목 단위의 공급망 분절화에 적용하는 경우에도 여러 한계가 있다. 예를 들어 거시적 접근법에서는 대부분 또는 중분류의 산업 자료를 이용하므로 세부 품목을 식별하려면 다소 무리한 가정이 필요하다. [표 6-1]과 [표 6-2]는 앞서 설명한 두 가지 접근법의 강점과 한계를 요약 정리한 것이다.

표 6-1. 미시적 접근 분석방법론의 강점과 한계

방법론	강점	한계
최적화 모형	· 직관적	· 분절화의 동적인 특성 포착 불가 · 수요/공급 업체의 신뢰성 가정 필요
시물레이션	· 복잡한 구조 구현	· 정확도와 데이터의 양과 범위 간 상충 · 결과가 공급망 구조 가정에 의존
시스템 다이나믹스	· 복잡한 상호작용의 시각적 표현 · 정책의 장기적 성과 영향 분석	· 모형의 정확도와 구현난이도 간 상충

표 6-1. 계속

방법론	강점	한계
에이전트 기반 모형화	· 에이전트 반응의 파급 경로 분석	· 에이전트 행태 가정과 세부 데이터 필요 · 세부적 가정 도입 시 계산의 난이도 및 결과 예측과 통제 어려움 가중
통계적 분석방법론	· 성과 분석 및 변수관계 설명	· 구조적 변화/데이터 부족 시 정확도 하락
기계학습	· 공급망의 비선형성/복잡성 고려 · 예측의 정확도	· 데이터 품질에 대한 의존성/과적합 위험 · 도출된 결과의 해석 어려움.

자료: 저자 정리.

표 6-2. 거시적 접근 분석방법론의 강점과 한계

방법론	강점	한계
계량분석	· 요인통제로 인과관계 추정	· 자료 한계, 모형 설정 문제 등 가능성 · 미래의 구조적 변화 등 고려 불가
일반균형 이론모형	· 경제학 이론 기반 · 경제 파급 경로 고려 가능	· 모형 단순화로 현실과 괴리
연산가능일반균형모형	· 범용으로 활용 가능 · 모형 유연화 및 상세화 가능	· 필요 데이터와 매개변수 방대 · 외부 추정치에 의존
국제 투입산출모형	· 직관적/계산상 추적 가능	· 가격/소득/생산기술 등 불변 가정

자료: 저자 정리.

본 연구에서는 선행연구에서 제기하는 주요 쟁점과 파급 경로 등을 고려하여 미시적 접근에서는 기계학습(machine learning) 기법을, 거시적 접근에서는 일반균형모형인 OECD METRO 모형을 활용하였고, 이를 결합하여 분석하였다. 핵심광물 분절화는 반도체나 이차전지와 같은 첨단 품목의 생산에 타격을 줌으로써 경제 전반에 영향을 미친다. 제조 공정이 매우 복잡한 반도체나 이차전지와 같은 분야에서는 여러 국가와 품목이 얽힌 복잡한 공급망을 형성하게 된다. 복잡한 공급망 내에서 품목 간의 연관성과 이러한 품목이 최종 생산에 미치는 영향을 분석하는 데에는 많은 어려움이 존재하는바, 이를 극복하기 위하여 본 연구에서는 품목 간의 상관관계와 시계열 특성을 반영할 수 있는 기계학습 모형을 활용하였다. 이를 통해 핵심광물이 반도체, 이차전지, 자동차 및 자

동차부품, 선박 등 국내 주요 산업별 대표품목 수출에 미치는 영향을 모형화하고 공급망 분절화 시나리오에 따른 파급 영향을 정량적으로 평가하고자 시도하였다. 또한 OECD METRO 모형을 이용하여 기계학습에 의한 미시적 분석 결과를 거시적 모형에 접목한 후 분석을 시도하는 한편, 핵심광물 분절화의 영향을 직접 거시적 모형에서 분석할 경우 그 영향을 비교하여 본 연구에서 제안하는 방법론의 강점을 강조하였다. 본 연구에서 소개한 선행연구의 세부적인 접근방법론은 각각의 장단점이 있는바, 후속연구에서는 미시적 접근과 거시적 접근의 조합을 더 다양화하여 검토할 수 있을 것이다.

제3장에서는 미국, EU, 한국, 중국이 지정한 ‘핵심광물’의 정의와 분류를 비교하고, 이들 광물의 경제적 중요성을 강조하였다. 미국은 2020년 「에너지법」에 따라 국가 경제와 안보에 필수적이고 공급망 교란에 취약한 광물을 ‘핵심광물’에 포함하였다. EU는 2024년에 발효된 「핵심원자재법」에서 경제적 중요성과 공급망 리스크를 고려하여 핵심원자재를 선정하였으며, 한국은 2023년 「핵심광물 확보전략」 발표를 통해 국내 경제와 전략산업의 안정화를 위해 관리가 필요한 광물을 ‘핵심광물’로 지정하였다. 중국은 핵심광물에 대한 명확한 법적 정의는 없으나, 수출통제 등을 통해 특정 광물의 수급 안정성과 공급망에서의 자국의 영향력을 확보 중이다. 한국은 주요국의 핵심광물 목록과 유사한 광물들을 지정했으나 일부 항목에서 차이가 있으며, 특히 한국의 33종 핵심광물 중 30종은 중국이 국가 차원에서 관리하는 광물들과 중복된다. 한국은 전기차, 이차전지, 반도체 산업과 관련된 ‘10대 전략 핵심광물’을 우선적으로 지정하고 있으며, 이러한 광물은 향후 수요 급증에 따라 경제적 중요성이 더욱 커질 것으로 예측된다. 특히 니켈, 리튬, 코발트, 흑연 등의 광물은 탄소 순배출 제로 시나리오 달성을 위한 주요 자원으로 떠오르고 있다. 따라서 이러한 광물의 확보 경쟁이 치열해짐에 따라 한국은 공급망 안정성을 위한 전략적 접근을 더욱 강화해야 한다.

한국의 경우 중국, 미국 등 주요국 대비 부존 광물의 종류가 적은 편이며 채

산성 또한 낮다고 평가된다. 이에 자급이 어려운 광물은 수입을 통해 조달하고 있으며, 특히 국내 주력 산업인 이차전지, 자동차, 반도체, 선박 등의 분야에서 활용되는 광물에 대한 대외의존도가 높다. 본 절에서는 한국의 핵심광물 취약성을 분석하고, 지정학적 갈등으로 인한 핵심광물 공급망 리스크 시나리오를 개발하였다.

취약성 분석에서는 일차적으로 연간 수입액 백만 달러 이상, 특정국 수입의존도 50% 이상인 품목 중에서 무역특화지수를 고려하였다. 또한 글로벌 공급망 편중도를 파악하고자 허핀달-허쉬만지수(HHI)와 국내 연간 수입액, 글로벌 연간 교역액을 비교하여 해당 광물의 국내 산업수요를 판단하였다. 분석 결과 코발트, 마그네슘, 망간, 리튬, 니오븀, 네오디뮴 등 이차전지와 전기차에 관련된 핵심광물의 글로벌 공급망 편중도가 심했으며, 마그네슘을 제외한 네 가지 품목의 국내 연간 수입액 또한 글로벌 연간 교역액의 5% 이상을 차지할 만큼 국내 산업 내 수요가 높은 광물이었다.

지정학적 갈등으로 인한 핵심광물 공급망 리스크를 살펴보고자 7개국(한국·호주·캐나다·EU·영국·일본·미국)과 대중국 수입에 관한 데이터를 기반으로 급격한 수입 변화가 발생한 사례를 조사하였으며, 대중국 수입의 급격한 감소빈도와 강도를 통해 공급망 리스크를 평가하였다. 본 사례 분석에서는 2017년부터 2023년까지의 대중국 수입 데이터를 분석하고, 한국을 포함한 주요 국가들의 대중국 수입 변동성을 분석하였다. 구체적으로 47개의 핵심광물(HS 2022 6단위 기준)을 대상으로 분석하였으며, 7개국(한국 포함)의 대중국 수입 데이터를 통해 각 국가의 대중국 수입의존도와 주요 광물들의 수입 패턴을 분석하였다. Evenett and Fritz(2023)의 방법론을 기반으로 특정 기간 대중국 수입이 급격히 감소한 빈도와 강도를 측정한 결과, 한국을 비롯한 여러 국가가 대중국 수입에서 중요한 광물들에 대해 상당히 높은 의존도를 보였고, 특히 카드뮴과 같은 품목은 대중국 의존도가 매우 높아 중요한 리스크로 나타났다. 또한 분석 대상인 국가들이 수입하는 갈륨, 흑연, 희토류 등 관련 품목에 대하여

대중국 수입이 급격히 감소하는 패턴을 확인하였으며, 이는 특정 국가들에서 중국과의 무역 갈등이나 수출 규제 등으로 발생할 수 있는 공급망의 교란을 시사한다. 따라서 본 연구는 중국의 수출 규제가 핵심광물의 공급망에 미치는 영향을 실증적으로 분석하며, 특정 품목에 대해 대중국 수입의존도가 높은 국가들은 향후 공급망 리스크에 취약할 수 있다는 점을 제시하였다. 이를 통해 공급망의 안정성을 확보하기 위한 정책적 대응이 필요하고, 이러한 핵심광물 공급망 교란을 통한 경제적 영향에 관한 분석방법론이 중요하다는 것을 시사한다.

한국을 포함한 주요 선진국들은 중국과의 정치적 갈등 속에서 공급망 교란 우려를 안고 있다. 따라서 제3절에서는 각국의 핵심광물 공급망 전략을 비교 분석하고 한국이 취해야 할 대응 전략을 도출하기 위한 특징 등을 분석하였다.

먼저 EU는 2000년대 초중반부터 원자재 가격 변동성과 중국 경제 성장에 따른 공급망 불안정을 우려하며, 2008년에 ‘원자재 이니셔티브’를 발표하였다. 이후 핵심원자재 목록을 3년마다 갱신하고, 2023년 3월에는 「핵심원자재법」 초안을 공개하면서 공급망 강화를 위한 법안을 제정 중이다. 이 법안의 주요 목표는 EU 내 핵심 및 전략원자재 생산 능력을 확대하는 것이며, 동 법안은 2024년 5월에 최종 승인되었고 EU는 이를 통해 추출, 정제, 재활용 등의 공급망 단계를 EU 내에서 강화하는 데 중점을 두고 있다. 「핵심원자재법」의 주요 정책은 전략 프로젝트 선정, 핵심원자재 모니터링, 재활용 확대, 국제 협력 증진 등이며, EU는 다양한 국가와 협력을 확대하고, 특히 글로벌 게이트웨이 프로그램을 통해 개발도상국과 협력하여 핵심원자재 확보를 목표로 추진 중이다.

미국은 핵심광물 공급망의 중요성을 2010년대 초부터 인식했으며, 트럼프 정부는 2017년 행정명령 제13817호를 통해 핵심광물 목록을 작성하고, 바이든 정부는 2021년 행정명령 제14017호를 통해 공급망 조사를 지시하였다. 특히 2023년에는 30개의 행동전략을 발표하고 북미 공급망 회복력을 강화하는 프로젝트를 시작하였다. 미국은 핵심광물의 조사 및 매핑을 통해 자원의 수량을 파악하고 민간 및 정부 기관 간 협력 강화를 목표로 하고 있다. 한편 국제적

으로는 일본, 한국, 인도 등과 협력하며 IPEF 협정을 통해 핵심광물 관련 협력 체계를 마련하고 있다. 미국의 이러한 전략은 한국이 핵심광물 확보에서 국가 간 협력을 확대하고 공급망 회복력을 강화하는 데 중요한 사례이다.

한국은 2023년에 '핵심광물 확보전략'을 발표하고, 2024년에는 「국가자원 안보 특별법」을 제정하여 핵심광물 공급망 안정화 전략을 구체화하였다. 한국은 핵심광물 확보를 위한 다각적인 전략을 제시하였으며, 주요 목표는 특정 국가에 대한 의존도를 낮추고 재자원화를 통해 순환경제를 구축하는 것이다. 또 해외 자원 개발을 위한 민관 협력 방안을 강화하고 자원 개발 정보 제공을 통해 위기 대응 능력을 높이고자 노력하고 있다. 한국의 핵심광물 확보전략은 EU와 미국의 전략과 유사하게 공급망 다변화, 재자원화, 해외 자원 개발 등이며, 이를 통해 한국은 글로벌 공급망에서 안정성을 확보할 수 있는 방향으로 나아가고 있다.

중국은 핵심광물 자원의 국가적 중요성을 인식하고 내부 자원 개발을 강화하는 한편, 대외적으로는 다양한 국가와 협력하고 있다. 특히 2024년부터 희토류 자원을 국가 소유로 규정하고 자원 관리와 개발 수준을 높이기 위한 규제 강화를 추진 중이다. 또한 중국은 파키스탄·칠레·러시아 등과의 협력을 통해 글로벌 공급망에서 우위에 있으며, '지구화학' 및 '글로벌 석회동굴' 프로젝트와 같은 거대 과학 프로젝트를 통해 자원 개발 및 연구를 진행 중이다. 중국의 대외 협력은 자원 확보뿐만 아니라 기술 개발과 시장 조성까지 미치고 있어 매우 포괄적이며, 한국은 이러한 중국의 전략을 참고하여 자원 확보와 기술 개발의 연계를 강화할 필요가 있다.

제4장에서는 전술한 바와 같이 기계학습 모형을 이용하여 핵심광물 분절화가 우리 주력 산업에 미치는 영향을 추정하였다. 핵심광물의 변동성이 특정 산업에 미치는 영향을 분석하는 것은 쉽지 않은데, 그 이유는 기술발전에 따라 공급망 구조가 복잡해졌고 분절화의 영향이 파급되는 데 걸리는 기간도 특정하기 어렵기 때문이다. 이에 본 연구에서는 항목 간의 상관관계와 시계열 특성을 반

영할 수 있는 이중 단계 어텐션 기반 순환 신경망(DA-RNN)을 채택하였다. 다양한 핵심광물 수입액의 시계열 데이터를 기반으로 특정 산업 대표제품(이차전지, 산화금속염, 자동차와 자동차 부품, 반도체, 선박)의 월별 수출을 예측하는 DA-RNN 모형을 구축하였다. 이어서 모형이 각 수입 항목의 데이터를 어떻게 참조하여 다음 달의 월별 수출을 정확하게 예측하는지 분석하였다. 마지막으로 학습된 모형을 활용하여 제3장에서 도출된 핵심광물(게르마늄, 흑연, 희토류) 공급망 분절화 시나리오에 따른 산업별 수출 변화를 측정하였다.

첫 번째 분절화 시나리오(게르마늄)의 경우 게르마늄 수입에 제한이 발생한다면 축전지(-3.9%), 산화금속염(-1.9%), 전자집적회로(-3.7%), 자동차 부품(-2.7%), 선박(-1.7%) 등 주요 품목의 수출액이 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 두 번째 분절화 시나리오(흑연)의 경우 흑연 공급이 제한되면 축전지(-2.0%), 산화금속염(-6.4%), 전자집적회로(-3.6%), 자동차 부품(-1.9%), 선박(-2.5%) 산업에서 수출이 감소하는 것으로 나타났다. 세 번째 분절화 시나리오의 경우 희토류와 영구자석은 대중국 의존도가 큰 품목인 만큼 앞선 시나리오들보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실험 결과 축전지(-10.8%), 산화금속염(-7.6%), 전자집적회로(-1.6%), 자동차 부품(-24.2%) 등 산업의 수출액을 크게 낮추는 것으로 확인되었다. 특히 자동차 부품은 -24.2%로 감소폭이 가장 컸는데, 이는 희토류가 자동차 전자부품 및 고성능 모터에 필수적인 광물이기 때문으로 추정된다.

본 연구에서는 핵심광물이 국내 주요산업에 미치는 영향을 살펴보고자 핵심광물의 수입액을 중심으로 독립변수를 설정하였다. 핵심광물 이외에 특정 산업의 경기, 국내외 경제 상황과 같은 외생적 변수나 소재, 부품, 장비 등 최종 생산품에 영향을 줄 수 있는 변수를 포함하지 않은 것은 연구의 한계로 볼 수 있다. 향후 핵심광물, 소부장 관련 품목, 국내 총수출입액 등의 변수를 포함하는 모형으로 확장하는 것을 후속연구에서 다뤄볼 수 있다. 다양한 요소를 추가하여 모형을 재설계할 경우 이번 분석에서 파악된 산업별 주요 광물을 독립변수

로 사용함으로써 모형의 복잡도를 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이번 분석에서 자동차, 선박과 같이 핵심광물의 수입부터 최종 생산품의 제조까지 긴 가공 단계를 거치는 산업은 설명이 다소 어려웠다. 그러므로 가치사슬이 긴 산업의 경우 핵심광물이 해당 산업의 중간재 생산에 미치는 영향과 최종재까지의 파급 영향을 단계적으로 파악하는 접근방식이 더욱 유효할 것으로 생각된다.

제5장에서는 제4장의 분석 결과를 토대로 OECD METRO 모형을 이용하여 핵심광물 분절화에 따른 거시경제적 영향을 분석하였다. METRO 모형은 글로벌 무역 연계성과 무역정책에 초점을 맞춰 개발된 모형으로, 최종 사용자(중간재, 민간소비재, 정부소비재, 자본재)를 세분화했다는 특징이 있다. 분석자료는 기본적으로 GTAP자료에 기반하되, 최종사용자를 세부적으로 구분하고자 OECD의 ICIO와 UN Comtrade 자료를 결합하여 구축한다. METRO의 자료는 152개 국가 또는 지역의 65개 산업을 포함하고 있으나, 본 연구에서는 분석의 용이성을 위하여 152개 국가 또는 지역을 6개로, 65개 산업을 12개로 재분류하였다.

본 장에서는 세 가지 시나리오를 대상으로 두 가지 접근법을 고려하였다. 세 가지 시나리오는 게르마늄(시나리오 1), 흑연(시나리오 2), 희토류(시나리오 3)의 대중국 수입이 각각 5개월, 6개월, 4개월 지연되는 경우에 그 영향을 상정한다. 두 가지 접근법은 ① 분석 대상 핵심광물이 중국에서 수입되지 않음으로써 발생하는 거시경제적 효과를 METRO 모형에서 직접 분석하는 방식(접근법 1)과, ② 대중국 수입지연으로 인해 우리의 주력산업에 미치는 영향을 머신러닝 기법으로 분석한 후, 그 결과를 이용하여 METRO 모형에서 거시경제적 효과를 추정하는 방식(접근법 2)이다. 본 연구에서는 접근법 1의 조정 외생변수로 수입의 효율성을 선택하였으며, 접근법 2의 조정 외생변수로는 생산의 중간재 효율성을 선택하였다. 접근법 1에서 수입의 효율성은 iceberg cost로 측정하며, 접근법 1은 수입의 감소율에 대응하는 iceberg cost의 증가율을 추정한 후 모형을 통해 iceberg cost가 증가할 때의 경제적 영향을 추정하였다. 접근

법 2에서도 생산의 감소율에 대응하는 중간재 효율성 저하율을 추정할 후 이를 모형에 반영함으로써 경제적 영향을 추정하였다.

중국산 핵심광물의 분절화로 인한 한국의 거시경제적 영향을 접근법 1에 따라 분석한 경우에는 그 효과가 미미한 것으로 나타났으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 그 효과가 유의미한 것으로 나타났다. 게르마늄의 경우 접근법 1에 따라 분절화의 영향을 분석한 결과 실질GDP는 약 100만~425만 달러 감소하여 기준연도 대비 변화율은 거의 0%였으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 실질GDP가 23억 1,400만 달러(0.15%) 감소할 것으로 추정되었다. 흑연과 희토류의 경우에도 접근법 1을 이용한 경우 대체가능성을 아무리 낮춰도 실질GDP에 미치는 영향은 제한적인 것으로 추정되었으나, 접근법 2를 이용한 경우에는 실질GDP 변화율이 각각 -0.14%와 -0.89%에 이를 것으로 추정되었다.

접근법 1을 이용하여 중국발 핵심광물 공급망 타격의 영향을 분석한 결과에서 그 영향이 미미하게 나온 이유는 해당 핵심광물의 중요성에도 불구하고 대중국 핵심광물 수입액이 전체 수입액에서 차지하는 비중이 낮기 때문이다. 전술한 바와 같이 수입 규모가 미미할지라도 우리의 주력 수출품목의 생산에 필수적인 핵심중간재라는 점을 고려하면 접근법 1에 기반한 추정 결과는 일반적으로 과소 추정되었을 가능성이 높다. 즉 핵심광물 등 특정 품목에서의 공급망 분절화 영향을 추정할 때 일반적인 CGE 모형을 활용한 접근법은 한계가 있음을 보여 준다.

접근법 2에 따른 분석 결과를 정리하면, 한국이 중국에서 수입하던 핵심광물의 수입이 원활하지 못할 경우 한국 주력 산업의 생산이 감소하면서 한국의 실질GDP 등이 적지 않은 타격을 받을 것으로 추정된다. 동시에 한국과 공급망 구조가 밀접하게 관련되어 있는 중국과 아세안의 경우 다른 국가들에 비해 부정적 영향에 더 많이 노출될 것으로 예상되는바, 한국과 중국은 공급망 교란을 미연에 방지하고 의도치 않은 교란의 피해를 최소화하기 위해 양국 간 공조를 굳건히 할 필요가 있다.

2. 연구의 한계와 후속연구 제안

본 연구에서는 첨단품목과 핵심광물 등에서 발생하는 공급망 분절화의 파급 영향을 정량적으로 추정하고자 미시적 접근과 거시적 접근을 조합하는 방법론을 채택하고 이를 핵심광물 분절화 시나리오에 적용하였다. 전술한 바와 같이 소수의 핵심품목에서 발생하는 공급망 타격은 거시적 파급 영향이 지대한데도 세부 품목 단위 분석기법은 거시적 영향을 정확히 분석하는 데 여러 가지 한계가 있다. 대표적으로 선형프로그래밍 기법을 이용하여 품목 단위 분석과 GDP를 연구하는 접근법이나 세부 산업 단위 자료를 토대로 불능투입산출분석을 통해 GDP에 미치는 영향을 추정하려는 방법은 있었으나, 이들은 경직적 투입산출 구조 등 다소 비현실적인 가정이 불가피하다는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 다양한 미시적 접근법을 검토하고, 이를 토대로 분석된 결과를 연산가능일반균형 모형에 접목하는 방안을 제시하였다. 다만 본 연구에서 사용한 미시적 접근법으로서 기계학습 방법론은 공급망 구조의 비선형성 및 복잡성을 고려할 수 있고 예측의 정확도가 비교적 높다는 강점이 있지만, 학습 과정에서 사용되는 데이터의 품질에 의존하며 과적합이 될 수 있다는 위험성이 있다. 또한 복잡한 알고리즘으로 도출된 결과를 해석하는 것이 쉽지 않다는 한계도 존재한다. 한편 연산가능일반균형 모형의 경우 다국가 투입산출표를 기반으로 하고 있어 자료의 기준연도와 시점상의 차이가 불가피하다. 또한 핵심품목의 분절화는 단기에 진행되는 데 비해, 연산가능일반균형모형은 완전경쟁이나 완전고용 등을 가정하고 있어 분절화의 장기효과 추정에 더 적합하다. 따라서 후속 연구에서는 다양한 미시적 접근법을 이용하여 분절화의 파급 영향 추정치가 분석방법에 따라 어떻게 달라지는지와 그 요인을 분석하고, 연산가능일반균형 모형에서도 노동시장의 경직성 등을 고려하여 단기 효과 추정을 위한 방안을 연구할 필요가 있다.

현재 제3장에서 제시한 핵심광물의 정의 개념 및 전략은 현재 각국의 산업 구조가 크게 변하지 않는다는 가정하에 유용한 정책 비교 분석 결과로 활용될 수 있을 것이다. 다만 핵심광물 공급망과 연관된 산업 구조가 크게 변할 경우 주기적인 평가를 통해 각국의 전략 방향이 달라지게 된다는 점을 염두에 두면서 본 연구 결과를 정책 전망에 활용해야 한다. 또 각국 정치·경제 상황 변화에 따라 기존 정책과 전략이 폐기되거나 방향 자체가 달라질 수 있기 때문에 주요국의 정책 전환 기초를 파악하기 위한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 중국과 같이 세부 전략이 공개되지 않는 경우에는 중앙 정부의 방향 분석 외에도 지방 정부 및 개별 관련 기업의 행동 양상을 긴밀히 파악할 필요도 있다.

아울러 향후 핵심광물 공급망 안정화에 실질적으로 기여할 수 있는 정부의 지원 거버넌스 체계, 투자 지원 패키지 등을 더 심도 있게 분석할 필요가 있다. 각국의 정책은 공급망 안정화를 위한 핵심광물 조달처 다변화, 투자 확대 등 유사한 정책 목표와 방향을 담고 있으므로 세부 전략을 실행하기 위한 하부 단계에서 주요국별로 어떻게 차이가 나는지를 분석해 보아야 한다. 특히 최근 핵심광물 업계 내 ESG 이니셔티브 강화와 책임 있는 광물 조달 등의 이슈가 향후 경제안보 분야에서 무역장벽으로 활용될 소지가 있다는 점에서도 비교 분석이 필요하다. 현재 분석 대상국인 미국, 중국, EU 외에도 MSP와 같은 핵심광물 개발 소협의체 및 다자협의체에 참여하고 있는 캐나다, 호주, 영국 등 핵심광물 주요 투자국의 정책 및 세부 실행전략에 대한 비교 분석이 더 심도 있게 이루어져야 한다.

3. 정책적 시사점⁹³⁾

가. 공급망 분절화 가능성 및 파급 영향에 대한 모니터링 강화

현재 정부는 핵심광물 등 경제안보상 중요 관리 품목에 대한 조기 경보시스템을 갖추고 모니터링을 진행하고 있다고 밝혔다. 이러한 모니터링의 실효성을 높이려면 모니터링 방식을 단계별로 더욱 체계화하고 정기적인 리뷰를 통해 현행화할 필요가 있다.

우선 한국의 핵심광물 취약성에 대한 엄밀한 분석을 통해 품목별 관리등급을 부여하는 등 관리와 모니터링을 체계화할 필요가 있다. 우리나라는 핵심광물을 부처별로 관리하고 지나치게 광범위한 정의 등의 문제점이 있어 사실상 선택과 집중의 관점에서 취약성을 다시 판단해 보아야 한다. 또 우리의 주력 수출 품목별로 투입되는 핵심광물을 식별하고, 핵심광물별로 적절한 재고 수준 및 취약성에 대한 재평가 시점을 부여하여 관리해야 한다. 이런 측면에서 산업통상자원부, 기획재정부, 중소벤처기업부 등 각 부처가 구축하고 있는 공급망 플랫폼의 통합을 통해 컨트롤타워 역할을 할 통합 플랫폼의 구축과 운영도 검토할 수 있다.

다음으로 주요국의 공급망 관련 정책에 대한 모니터링을 강화하는 한편, Evenett and Fritz(2023)의 방법론을 개선하여 주요국의 공급망 정책이 실제 공급망 분절화로 연계되는지를 적절히 판단할 수 있는 방법론을 개발할 필요가 있다. 실제 분절화의 가능성이 가시화된다면 이에 대한 시나리오를 구상하여 우리의 주력 산업과 경제에 대한 파급 영향을 분석하고 이를 토대로 대응책을 마련해야 한다. [표 6-3]은 본 연구에서 제안하는 공급망 분절화에 대한 단계별 대응 방안을 요약 정리한 것이다.

93) 유익한 정책을 제안하고 토론에 참여해 주신 황운중 교수에게 사사를 표한다.

표 6-3. 공급망 분절화에 대한 단계별 대응 제안

단계	사전	진행	사후
	핵심광물 선정/관리	분절화 모니터링	분절화 영향평가
대응	정기적 취약성 분석을 통한 품목관리 강화	주요국의 정책동향 및 분절화 정도 평가	시나리오별 파급 영향 분석을 통한 대응책 마련
방법론	Input-output, TSI, HHI 등	Evenett and Fritz(2023)	기계학습+METRO 모형

자료: 저자 정리.

나. 공급망 복원력 강화를 위한 기업지원책 마련

공급망 복원력을 강화하려면 우선 다원화된 조달 전략과 공급처 확보가 중요하며, 전략적으로 중요한 품목의 경우에는 연구개발 지원을 통해 대체 물질을 발굴하는 등 장기적인 마스터플랜을 마련할 필요가 있다. 특히 품목별 공급망 관리는 기업 단위에서 이루어지므로 공급망 리스크 예측을 위한 조기 경보 시스템 마련 등 정부가 정책적으로 공급할 수 있는 공공재에 집중하는 것이 바람직하다. 공급망 모니터링 강화와 위협의 조기 감지를 위해 디지털 기반 공급망 관리 플랫폼을 구축하여 표준화된 데이터를 실시간으로 공유할 수 있도록 시스템 개발을 지원하는 방안을 검토해야 한다.

다음으로 공급망 리스크 대비에 취약한 중소기업을 대상으로 지원책을 마련할 필요가 있다. 특히 주력 수출산업의 공급망에 참여 중인 중소기업에 대한 공급망 복원력 강화 방안에 초점을 맞추고, 중소기업이 글로벌 공급망에 통합되어 디지털 공급망 시스템을 쉽게 활용할 수 있도록 지원하는 방안을 마련해야 한다.

마지막으로 현재 우리 정부는 2024년에 제정된 공급망 3법 등에 따라 공급망안정화기금을 조성하여 주요 경제안보 품목의 수입다변화를 위한 기업에 정책자금을 집행하고 있는바, 사전에 홍보를 적극적으로 진행하여 정책의 실효성을 제고할 필요가 있다.

다. 주요국과의 정책 조화 방안 모색

주요국의 핵심광물 전략은 자국 내 생산 역량 강화 및 양자·다자 협력 확대를 통한 공급망 회복력 향상으로 요약할 수 있다. 다만 핵심광물에 대한 ‘과잉안보화(over-securitization)’를 막기 위해 국제 정책을 공조할 필요가 있다. 모든 국가가 핵심광물 공급망을 내재화하려고 시도하면 국제분업화의 이득이 희생된다. 내재화가 어려운 핵심광물 공급망의 경우 해당 자원 부국에 대한 중복 투자가 발생할 가능성이 크다. 각국 전략이 목표하는 바와 다른 방향으로 작용하여 특정국에 대한 차별 심화, 시장경쟁 저하 등의 문제를 야기할 수 있다.⁹⁴⁾ 이처럼 국제분업화 효율성을 저해하고 예기치 않은 부정적 효과를 방지하기 위해서라도 각국 전략이 중복되는 부분을 검토해야 한다. 특히 공급망 회복력 강화에 도움이 되도록 정책 방향을 상호 조율해야 한다. 앞서 MSP와 같은 다자협력 플랫폼에서 핵심광물 공급망에 대한 공동 자금조달 및 투자라는 역할에만 그치지 않고 정책 조정을 권고하는 역할도 해야 할 시점이다.

핵심광물 공급망이 분절화될 경우 연관 산업에 미치는 영향이 매우 크다는 점을 고려하면, 향후 각 핵심광물의 비축량 증가, 수입선 다변화, 비상 상황 발생 시 공공 지원 확대 등에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 보인다. 이에 정부는 민간 영역에서의 신속한 대응이 가능한 지점과 불가능한 지점을 선제적으로 파악하여 입장이 유사한 국가들의 공동 대응 메커니즘 구축 방안을 고민할 필요가 있다. 공급망 조기 경보시스템으로 분절화 상황에 대해 신속한 인식은 가능하지만, 사후 수습에 대한 국제 공동 대응 메커니즘은 아직 초기 단계의 논의에 머물고 있다. 특히 분절화 상황에서 각국이 따로 행동하게 되면 수요 급증에 따른 가격 폭등도 막기 어렵고, 실질적인 물량 확보가 어려울 수 있다. 한국과 산업 구조가 유사한 국가와 해당 문제점과 개선 방안을 수시로 공유하고 핵심광물 관련 네트워크를 공고히 구축하는 것이 필요하다.

94) Ward(2024, 10. 16.), "Former Korean Trade Chief: 'Oversecuritization' of U.S. Trade Policy Cedes Ground to China," 온라인 유료 구독 자료(검색일: 2025. 1. 3.).

라. 핵심광물 공동 개발을 위한 협력 사업 확대

주요국들은 국제적 차원에서 광물 자원을 안정적으로 확보하고자 양자 및 다자 협력을 강화하고 있으며, 다양한 국가와의 협력 확대와 대규모 과학 프로젝트를 통해 자원 개발 및 채굴을 적극적으로 추진 중이다. 이처럼 한국도 핵심 광물 공동 개발을 위한 협력 사업 확대를 추진해야 한다.

우선 한국은 세계 각지의 광물 자원을 확보하기 위해 다양한 국가들과 양자 및 다자 협력 관계를 구축할 필요가 있다. 특정 국가와의 양자 협정을 통해 자원 확보의 안정성을 높일 수 있고, 과도한 대중국 수입의존도를 낮출 수 있다. 특히 리튬, 구리, 니켈 등 필수 광물의 공급망을 안정화할 수 있는 전략적 협정 및 협력을 체결하고, 국가 차원의 연구 및 기술 협력을 통해 광물 탐사 및 개발 기술을 강화해야 한다.

다음으로 한국은 개발도상국에서 광물 자원을 개발하는 것과 함께 광산 산업 단지 조성, 광물 가공 기술 및 투자 등의 산업화 노력을 병행할 필요가 있다. 이에 한국은 자원 개발뿐만 아니라 자원의 부가가치를 높이는 기술 개발에 집중하고, 해외 광산 개발 및 가공 기술의 선도적 역할을 강화해야 한다.

마지막으로 한국은 광물과 관련된 국제 과학 프로젝트에 참여하거나 국제 협력을 위한 연구소를 독자적으로 설립하여 광물 자원 탐사 및 활용 기술을 공동으로 개발할 필요가 있다. AI 등 첨단 기술을 활용하여 광물 탐사 및 채굴에 관한 연구를 하는 것과 데이터에 기반하여 글로벌 협력 체계를 구축하는 것도 중요하다. 이에 향후 지속가능한 자원 개발을 다루는 국제적 논의에 참여하는 한편 친환경 기술 개발 및 관련 지원 정책을 수립하는 것을 중요한 정책과제로 설정해야 한다. 그러려면 한국은 광물 자원 관련 기술 인력을 양성하고, 국제적인 교환 프로그램을 통해 글로벌 기술 협력을 촉진하는 체계를 꾸준히 만들어 나가야 한다.

참고문헌

[국문자료]

- 관계부처합동. 2024. 「공급망안정화위원회 구성 및 운영계획」. (6월 27일)
- 국회예산정책처. 2019. 「일본의 수출규제가 국내 산업에 미치는 영향과 대응 방안: 시스템 반도체 산업을 중심으로」.
- 김경숙, 홍건식. 2023. 「중국의 핵심광물 수출통제와 시사점」. INSS 전략보고 243호. 국가안보전략원.
- 김유정, 이현복, 이화석, 유옥중. 2022. 『광산물 수급분석 2021-2022』. KIGAM보고서. 한국지질자원연구원.
- 박가현, 김경훈. 2023. 『희토류 영구자석의 공급망 현황과 시사점: 네오디뮴 영구자석(NdFeB)을 중심으로』. 한국무역협회 국제무역통상연구원(IIT).
- 산업통상자원부. 2023a. 「산업 공급망 3050 전략」. (12월)
- _____. 2023b. 「첨단산업 글로벌 강국 도약을 위한 핵심광물 확보전략」. (2월)
- _____. 2024a. 「민관협력 해외자원개발 추진전략」. (3월)
- _____. 2024b. 「제4차 광업 기본계획(안) (2025~2034)」. (12월)
- 장영욱, 조성훈, 오태현, 이현진, 김초롱. 2023. 「EU ‘그린딜 산업계획’ 후속정책의 주요 내용과 시사점」. KIEP 세계경제 포커스 23-05. 대외경제정책연구원.
- 정성춘, 김영귀, 이천기, 김승현. 2019. 「일본 수출규제 100일의 경과, 영향 및 향후 대응」. KIEP 세계경제 포커스 19-35. 대외경제정책연구원.
- 조성훈. 2023. 「유럽 핵심원자재법(CRMA)의 입법동향과 시사점」. KIEP 세계경제 포커스 23-01. 대외경제정책연구원.
- _____. 2024. 「EU 핵심원자재법(CRMA)의 주요 내용과 대응 방안」. 한국환경산업기술원 제16회 ESG ON 세미나 발표자료.

- 조성훈, 한형민, 최원석, 홍진희, 윤형준, 최재희, 김현정. 2024. 『자국 중심의 경제안보 전략 대응을 위한 프레임워크 구축 방안 연구』. 연구보고서 24-06. 대외경제정책연구원.
- 최원석, 한형민, 조성훈, 홍진희, 윤형준, 차정미. 2023. 『글로벌 경제안보 환경 변화와 한국의 대응』. 연구보고서 23-09. 대외경제정책연구원.
- 하나금융경영연구소 산업분석팀. 2019. 「일본 수출규제 강화에 따른 산업별 영향」. 하나금융경영연구소.
- 한국은행. 2023a. 「최근 글로벌 교역환경 변화의 배경과 영향」. BOK 이슈노트. _____ . 2023b. 「향후 글로벌 공급망 리스크와 시사점」. BOK 이슈노트.
- 한선이, 조성훈, 김예진, 김주혜, 서상현. 2024. 『한-아프리카 자원 협력을 통한 핵심광물 확보 전략』. 연구보고서 24-25. 대외경제정책연구원.
- KOTRA. 2023. 「中 핵심광물 확보전략과 시사점」. KOTRA 경상통상 리포트 23-4.

[중문자료]

- 中国地质调查局. 2012. 『全国矿产资源规划(2016—2020年)』. (12月 6日)
- 中华人民共和国商务部, 中华人民共和国海关总署. 2021. 『两用物项和技术进出口许可证管理目录(2022年)』. (12月 31日)
- 中华人民共和国自然资源部 编. 2024. 『中国矿产资源报告 2024』.

[영문자료]

- Abadi, M., A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, Z. Chen, C. Citro, G. S. Corrado, A. Davis, J. Dean, M. Devin *et al.* 2016. “Tensorflow: Large Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems.” arXiv preprint arXiv:1603.04467.

- Aiyar, Shekhar, Andrea F. Presbitero, and Michele Ruta. 2023. "Goeconomic Fragmentation: The Economic Risks from a Fractured World Economy." CEPR.
- Alvarez, J., M. B. Andaloussi, C. Maggi, A. Sollaci, M. Stuermer, and P. Topalova. 2023. "Goeconomic Fragmentation and Commodity Markets." IMF WP/23/201.
- Attinasi M. G., L. Boeckelmann, B. Meunier. 2023. "The Economic Costs of Supply Chain Decoupling." The European Central Bank WP Series No. 2839.
- Bai, J., R. J. Johnson, B. Malin, C. Kurz, N. Born, and S. Gilchrist. 2024. *The Causal Effects of Global Supply Chain Disruptions on Macroeconomic Outcomes*. NBER.
- Balistreri, E. J., C. Böhringer, and T. F. Rutherford. 2018. "Quantifying Disruptive Trade Policies." CESifo Working Paper No. 7382.
- Baqae, David, Julian Hinz, Benjamin Moll, Moritz Schularick, Feodoro A. Teti, Joschke Wanner, and Sihwan Wang. 2024. "What If? The Effects of a Hard Decoupling from China on the German Economy." KIEL Policy Brief.
- Bier, T., A. Lange, and C. H. Glock. 2020. "Methods for mitigating disruptions in complex supply chain structures: a systematic literature review." *International Journal of Production Research*, 58(6), pp. 1835-1856.
- Bogataj, D. and M. Bogataj. 2007. "Measuring the Supply Chain Risk and Vulnerability in Frequency Space." *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), pp. 291-301.

- Bontadini, F., V. Meliciani, M. Savona, and A. Wirkierman. 2022. "Nearshoring and farshoring in Europe: Implications for employment." Luiss SEP Working Paper.
- Bugert, Niels and Rainer Lasch. 2018. "Supply Chain Disruption Models: A Critical Review." *Logistics Research*, 11(5), pp. 1-35.
- Byers, N. and R. Ferry. 2019. "Decoupling from China: An Economic Analysis of the Impact on the U.S. Economy of a Permanent Tariff on Chinese Imports." *Business Economics*, 54(4), pp. 248-256.
- Carrara, S., S. Bobba, D. Blagoeva, P. A. Dias, A. Cavalli, K. Georgitzikis, M. Grohol, A. Itul, T. Kuzov, C. E. Latunussa *et al.* 2023. "Supply Chain Analysis and Material Demand Forecast in Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study." Publications Office of the European Union.
- Chen, Y., W. Lin, and J. Z. Wang. 2019. "A Dual Attention-Based Stock Price Trend Prediction Model with Dual Features." *IEEE Access*, 7, 148047-148058.
- Clancy, Daragh, Bonal Smith, and Vilem Valenta. 2024. "The Macroeconomic Effects of Global Supply Chain Reorientation." European Central Bank Working Paper Series No. 2903.
- Congressional Research Service. 2013. "Rare Earth Elements in National Defense: Background, Oversight Issues, and Options for Congress." R41744. (December 23)
- _____. 2015. "China's Mineral Industry and U.S. Access to Strategic and Critical Minerals: Issues for Congress." R43864. (March 20)

- _____. 2025. "Critical Mineral Resources: National Policy and Critical Minerals List." R47982. (February 21)
- Eppinger, P., G. Felbermayr, O. Krebs, and B. Kukharsky. 2021. "Decoupling Global Value Chains." CESifo Working Paper.
- Escaith, Hubert. 2021. "Withering Globalization? The Global Value Chain Effects of Trade Decoupling." MPRA Munich Personal.
- Evenett, Simon and Johannes Fritz. 2023. *The Scramble for Critical Raw Materials: Time to Take Stock?* The 31st Global Trade Alert Report.
- Flach, Lisandra, Isabella Gourevich, Leif Grandum, Lisa Scheckenhofer, and Feodora Teti. 2022. "Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten? Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien." Study Commissioned by the IHK Munich and Upper Bavaria.
- Góes, Carlos and Eddy Bekkers. 2022. "The Impact of Geopolitical Conflicts on Trade, Growth, and Innovation." WTO Staff Working Paper ERSD-2022-09.
- Grohol, M. and Constanze Veeh. 2023. *Study on the Critical Raw Materials for the EU - Final Report*. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. European Commission.
- IEA. 2024. *Global Critical Minerals Outlook 2024*.
- Isono, Ikumo and Satoru Kumagai. 2023. "ASEAN's Role in the Treat of Global Economic Decoupling: Implications from Geographical Simulation Analysis." Policy Brief No. 2022-10.
- Ivanov, D., B. Sokolov, I. Solovyeva, A. Dolgui, and F. Jie. 2016.

- “Dynamic Recovery Policies for Time-Critical Supply Chains under Conditions of Ripple Effect.” *International Journal of Production Research*, 54(23), pp. 7245-7258.
- Javorcik, B. S., L. Kitzmüller, H. Schweiger, and M. A. Yildirim. 2022. “Economic Costs of Friend-Shoring.” CESifo Working Paper No. 10869.
- Johnson, R. C. 2018. “Measuring Global Value Chain.” *Annual Review of Economics*, 10(1), pp. 207-236.
- Kandel, I. and M. Castelli. 2020. “The Effect of Batch Size on the Generalizability of the Convolutional Neural Networks on a Histopathology Dataset.” *ICT Express*, 6(4), pp. 312-315.
- Katsaliaki, K., P. Galetsi, and S. Kumar. 2022. “Supply Chain Distruptions and Resilience: A Major Review and Future Research Agenda.” *Annals of Operation Research*, 319(1), pp. 965-1002.
- Kim, Young gui, Jiheum Yeon, Hyuk-Hwang Kim, and Min-chirl Chung. 2024. “Estimating the Economic Effects of Potential US Tariff Policy Using CGE-GTAP Model.” ADB Consulting Report.
- Kingma, D. P. and J. Ba. 2014. “Adam: A method for stochastic optimization.” arXiv preprint arXiv:1412.6980.
- Kowalski, Przemyslaw, and Clarisse Legendre. 2023. “Raw Materials Critical for the Green Transition Production, International Trade and Export Restrictions.” OECD Trade Policy Paper.
- Krammer, S. M. 2017. “Science, Technology, and Innovation for Economic Competitiveness: The Role of Smart Specialization

- in Less Developed Countries.” *Technological Forecasting and Social Change*, 123, pp. 95-107.
- Li, Q., B. Zeng, and A. Savachkin. 2013. “Reliable Facility Location Design under Disruptions.” *Computers & Operations Research*, 40(4), pp. 901-909.
- Li, R., Q. Wang, X. Wang, Y. Zhou, X. Han, and Y. Liu. 2022. “Germany’s Contribution to Global Carbon Reduction Might Be Underestimated a New Assessment Based on Scenario Analysis with and without Trade.” *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121465.
- Liu, X., Q. Liu, and Z. Wang. 2020. *Measuring Productivity Growth and Technology Spillovers through Global Value Chains*. Nankai University.
- Manley, Ross L., Elisa Alonso, and Nedat T. Nassar. 2022. “A Model to Assess Industry Vulnerability to Disruptions in Mineral Commodity Supplies.” *Resources Policy*, 78, 102889.
- Manuj, I. and J. T. Mentzer. 2008. “Global Supply Chain Risk Management Strategies.” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(3), pp. 192-223.
- McGroarty, D. and Sandra Wirtz. 2012. *Reviewing Risk: Critical Metals & National Security*. American Resources Policy Network Report.
- Melin, H. E., M. A. Rajaeifar, A. Y. Ku, A. Kendall, G. Harper, and O. Heidrich. 2021. “Global implications of the EU battery regulation.” *Science*, 373(6553), pp. 384-387.
- Montobbio, F. and V. Sterzi. 2013. “The Globalization of Technology

- in Emerging Markets: A Gravity Model on the Determinants of International Patent Collaborations.” *World Development*, 44, pp. 281-299.
- National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Earth Resources, and Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy. 2008. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. National Academies Press.
- OECD. 2020. “Shocks, Risks and Global Value Chains: Insights from the OECD METRO Model.” (June 29)
- _____. 2023. “METRO Version 4 Model Documentation.” OECD TAD/TC/WP/RD.
- Peng, J., A. Kimmig, J. Wang, X. Liu, Z. Niu, and J. Ovtcharova. 2021. “Dual Stage Attention Based Long Short Term Memory Neural Networks for Energy Demand Prediction.” *Energy and Buildings*, 249, 111211.
- Plummer, Michael G. 2023. “Estimating the Costs of Geoeconomic Fragmentation to the Global Economy.” S. Aiyar, A. Presbitero, and M. Ruta eds. *Geoeconomic Fragmentation: The Economic Risks from a Fractured World Economy*. Paris & London: CEPR Press.
- Qin, Y., D. Song, H. Chen, W. Cheng, G. Jiang, and G. Cottrell. 2017. “A Dual-Stage Attention-Based Recurrent Neural Network for Time Series Prediction.” *Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-17)*, pp. 2627-2633.

- Rhoades, S. A. 1993. "The Herfindahl-Hirschman index." *Fed. Res. Bull.*, 79, 188.
- Scholten, D. and R. Bosman. 2016. "The geopolitics of renewables: exploring the political implications of renewable energy systems." *Technological Forecasting and Social Change*, 103, pp. 273-283.
- Seong, Jeongmin, Olivia White, Michael Birshan, Lola Woetzel, Camillo Lamanna, Jeffrey Condon, and Tiago Devesa. 2024. "Geopolitics and the geometry of global trade." McKinsey Global Institute.
- Sokolov, B., D. Ivanov, A. Dolgui, and A. Pavlov. 2016. "Structural Quantification of the Ripple Effect in the Supply Chain." *International Journal of Production Research*, 54(1), pp. 152-169.
- The White House. 2023. "FACT SHEET: President Biden Announces New Actions to Strengthen America's Supply Chains, Lower Costs for Families, and Secure Key Sectors." (November 11)
- Torabi, S. A., M. Baghersad, and S. A. Mansouri. 2015. "Resilient Supplier Selection and Order Allocation under Operational and Disruption Risks." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, pp. 22-48.
- U.S Department of the Interior U.S Geological Survey. 2024. *Mineral Commodity Summaries 2024*.
- Vaswani, A., N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin. 2017. "Attention is all you need." *Advances in neural information processing*

systems, 30.

Wang, K. H., C. W. Su, and M. Umar. 2021. "Geopolitical Risk and Crude Oil Security: A Chinese Perspective." *Energy*, 219, 119555.

Xu, M., X. Wang, and L. Zhao. 2014. "Predicted Supply Chain Resilience Based on Structural Evolution against Random Supply Disruptions." *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(2), pp. 105-117.

Yoon, N., J. Kim, J. L. Lim, A. Abbas, K. Jeong, and K. H. Cho. 2021. "Dual Stage Attention Based LSTM for Simulating Performance of Brackish Water Treatment Plant." *Desalination*, 512(5), 115107.

[온라인 자료]

「사우디 진출하는 중국 신재생에너지 기업들… 中 정부는 저품질 태양광 속아 내기」. 2024. 『인더스트리 뉴스』. (8월 18일). <https://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=54525>(검색일: 2025. 1. 9.).

한국무역협회. 글로벌 무역통계서비스 K-stat. <https://stat.kita.net/>(검색일: 2025. 1. 22.).

「핵심광물 수급 리스크를 한눈에...자원정보서비스 '코미스' 전면 개편」. 2024. 『에너지경제신문』. (3월 21일). <https://m.ekn.kr/view.php?key=20240321029059342>(검색일: 2024. 10. 13.).

中国地质调查局. 2012. 「全国矿产资源规划 (2016—2020年)」. (12月 6日). https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201705/t20170511_1196755.html(검색일: 2024. 6. 7.).

Akhmetkali, Aibarshyn. 2024. "Kazakhstan Signs \$2.5 Billion in Deals with China during PM's Shanghai Visit." (November 4). <https://astanatimes.com/2024/11/kazakhstan-signs-2-5-billion-in-deals-with-china-during-pms-shanghai-visit/>(검색일: 2025. 1. 9.).

China Briefing. 2022. "China-Cuba: Bilateral Trade and Investment Prospects." (November 25). <https://www.china-briefing.com/news/china-cuba-bilateral-trade-and-investment-prospects/>(검색일: 2025. 1. 9.).

Dwivedi, Shubham and Gregory D. Wischer. 2023. "Securing the Critical Minerals That America and Its Allies Lack." (April 12). <https://www.aspistrategist.org.au/securing-the-critical-minerals-that-america-and-its-allies-lack/>(검색일: 2024. 2. 20.).

European Commission. "Strategic Projects under the CRMA." https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/strategic-projects-under-crma_en(검색일: 2025. 1. 2.).

_____. 2008. "The Raw Materials Initiative: Meeting Our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe." COM (2008) 699 Final. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:en:PDF>(검색일: 2024. 10. 14.).

_____. 2023. "A secure and sustainable supply of critical raw materials in support of the twin transition." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023DC0165>(검색일: 2024. 10. 15.).

_____. 2024a. "Commission Receives High Number of Applications

- Responding to Call for Strategic Projects under the Critical Raw Materials Act(CRMA).” *News Article*. (August 23). https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/commission-receives-high-number-applications-responding-call-strategic-projects-under-critical-raw-2024-08-23_en(검색일: 2024. 10. 15.).
- _____. 2024b. “EU and International Partners Agree to Expand Cooperation on Critical Raw Materials.” *News Article*. (April 5). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1807(검색일: 2024. 10. 15.).
- European Parliament. 2024. “European Critical Raw Materials Act: In ‘A Europe Fit for the Digital Age’.” Legislative Train Schedule. (September 20). <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-europe-fit-for-the-digital-age/file-european-critical-raw-material-act>(검색일: 2024. 10. 15.).
- Federal Reserve Bank of New York. “Global Supply Chain Pressure Index(GSCPI): Overview.” <https://www.newyorkfed.org/research/policy/gscpi#/overview>(검색일: 2024. 10. 16.).
- Mining.com. 2024. “Turkey, China Sign MOU to Collaborate on Rare Earth Mining.” (October 18). <https://www.mining.com/turkey-china-sign-mou-on-rare-earth-mining/>(검색일: 2025. 1. 9.).
- Ministry of Foreign Affairs The People’s Republic of China. 2024. “Joint Statement between the Islamic Republic of Pakistan and the People’s Republic of China.” (October 16). https://www.mfa.gov.cn/eng/xw/zyxw/202410/t20241016_11508330.html (검색일: 2025. 1. 3.).
- Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the

Republic of Belarus. 2024. “China-Belarus Joint Geological Center to Open in 2024.” (July 23). <https://www.minpriroda.gov.by/en/news-en/view/china-belarus-joint-geological-center-to-open-in-2024-5916/>(검색일: 2025. 1. 9.).

Science Direct. “Science Direct Topics: ‘Big Science’.” <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/big-science>(검색일: 2025. 1. 9.).

UN Comtrade. <https://comtradeplus.un.org/>(검색일: 2024. 8. 14.).

Ward, Oliver. 2024. “Former Korean Trade Chief: ‘Oversecuritization’ of U.S. Trade Policy Cedes Ground to China.” (October 16). World Trade Online 유료 구독 자료. <https://insidetrade.com/daily-news/former-korean-trade-chief-oversecuritization-us-trade-policy-cedes-ground-china>(검색일: 2025. 1. 3.).

[법률 자료]

「국가자원안보 특별법」(시행 2025. 2. 7. 법률 제20196호, 2024. 2. 26, 제정). 제2조 제1항.

Consolidated Appropriations Act. 2021, Division Z, The Energy Act of 2020, Pub. L. 116-260 [“EA-2020”].

Official Journal of the European Union. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA relevance) [“CRMA-2024”].

부록

부록 1. 추가 품목들에 대한 공급망 분절화의 가능성 분석

본문의 분석 대상(기준 1) 외에 추가적인 공급망 변동성 분석의 대상은 한국, 호주, 캐나다, EU, 영국, 일본, 미국 등 7개국 전체의 대중국 수입의존도가 높은 품목, 그리고 한국의 대중국 수입의존도가 높은 품목으로 다음의 기준에 따라 총 15개 품목을 선정하였다.

먼저 7개국 모두에서 중요한 광물을 선정하기 위해 2017~23년(84개월) 동안 7개국 합계 대중국 수입의존도의 중간값이 50% 이상인 품목을 선별하였다(기준 2). 이에 해당하는 품목은 앞서 기준 1에서 이미 선정된 인조흑연과 천연흑연을 제외하고 안티모니, 비스무트, 마그네슘, 기타 카드뮴 등 4개 품목이다.

다음으로 한국의 대중국 수입에서 중요한 광물을 선정하기 위해 84개월 동안 한국의 대중국 수입의존도 중간값이 50% 이상인 품목을 선별하였다(기준 3). 마찬가지로 기준 1과 기준 2에서 이미 선정된 7개 품목(갈륨·게르마늄 혼합, 게르마늄·지르코늄, 인조흑연, 천연흑연, 안티모니, 마그네슘, 기타 카드뮴)을 제외하고, 최종적으로 형석, 망간, 활석, 텅스텐, 바나듐 등 5개 품목이 선정되었다.

마지막으로 한국의 대중국 수입의존도의 중간값이 30% 이상 그리고 50% 미만인 품목을 같은 방식으로 선정하였다(기준 4). 이는 수입이 분석 기간 전반에 걸쳐 이루어지지 않고 특정 기간에 부분적으로 일어났을 경우 중간값이 작을 수 있고, 또 중국에 대한 수입의존도가 40% 내외인 경우도 중국의 공급 충격에 충분한 영향을 받을 수 있기 때문이다. 실제로 앞서 기준 1과 기준 2에서 분석 대상 품목으로 선정되었던 비스무트, 희토류 원소, 기타 흑연 등 3개 품목이 한국의 대중국 수입의존도의 중간값이 30~50% 구간에 속하는 품목들이다.

기준 4에 따라서는 도프 처리된 화학원소, 코발트, 인산염, 셀레늄, 실리콘, 티타늄 등 6개 품목이 추가로 선정되었다.

부록 표 1-1. 추가 분석 대상 광물의 선정 결과

(기준 2) 7개국 합산 대중국 수입의존도 중간값 50% 이상	(기준 3) 한국의 대중국 수입의존도 중간값 50% 이상	(기준 4) 한국의 대중국 수입의존도 중간값 30~50%
안티모니	형석	도프 처리된 화학원소
비스무트	망간	코발트
마그네슘	활석(Talc)	인산염
기타 카드뮴	텅스텐	셀레늄
	바나듐	실리콘
		티타늄

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 표 1-2. 추가 품목들에 대한 국가별 대중국 수입 비중의 중간값 및 수입의존도

(단위: %)

기준	품목	구분	호주	캐나다	EU	영국	일본	한국	미국
2	안티모니	중간값	80.9	75.1	32.5	5.8	62.9	80.8	57.6
		수입의존도	77.6	69.1	34.6	12.3	62.8	77.3	57.3
	비스무트	중간값	31.6	3.3	79.9	0.0	74.1	35.8	61.5
		수입의존도	47.7	21.0	67.9	47.5	76.7	38.8	62.4
	마그네슘	중간값	54.8	69.6	49.8	16.4	87.3	82.4	44.1
		수입의존도	50.9	71.4	52.1	17.0	87.4	83.2	47.6
기타 카드뮴	중간값	4.9	0.9	28.0	4.9	30.5	91.7	11.4	
	수입의존도	7.4	10.6	30.2	9.9	33.3	94.0	14.2	
3	형석	중간값	100.0	0.0	6.1	42.2	77.5	63.5	0.3
		수입의존도	90.7	17.2	15.0	37.5	67.8	61.3	12.4
	망간	중간값	17.0	11.9	28.5	5.9	46.0	87.0	9.8
		수입의존도	11.3	12.9	30.7	8.8	48.2	81.9	12.0
	활석	중간값	72.1	0.4	13.2	8.7	71.9	52.6	1.0
		수입의존도	72.1	2.1	14.5	9.9	70.7	54.2	9.8
텅스텐	중간값	17.0	13.9	34.2	22.6	82.5	76.7	28.6	
	수입의존도	24.8	15.3	36.4	25.0	80.3	74.4	28.1	
바나듐	중간값	0.0	27.4	8.4	0.0	48.0	67.8	0.0	
	수입의존도	7.0	26.2	10.1	5.9	47.6	70.7	2.2	
4	도프 처리된 화학원소	중간값	5.1	7.4	6.6	6.8	15.5	30.4	7.6
		수입의존도	8.3	8.6	8.3	7.2	17.1	29.9	7.7
	코발트	중간값	8.1	0.0	11.6	2.8	5.7	47.4	2.1
		수입의존도	22.5	0.7	12.6	5.1	5.8	47.0	4.9
	인산염	중간값	0.1	0.0	0.5	0.0	3.6	31.6	0.4
		수입의존도	5.4	4.6	0.7	10.4	9.3	31.9	0.8
셀레늄	중간값	27.4	3.3	21.8	1.5	36.3	32.1	8.4	
	수입의존도	31.0	4.6	35.9	8.6	42.9	39.8	10.7	
실리콘	중간값	15.5	4.7	2.3	2.6	30.3	45.2	8.4	
	수입의존도	19.1	7.4	3.2	3.6	29.7	46.0	9.5	
티타늄	중간값	34.3	15.3	18.2	8.1	7.7	30.3	8.3	
	수입의존도	34.8	18.7	18.8	8.8	8.2	32.3	8.7	

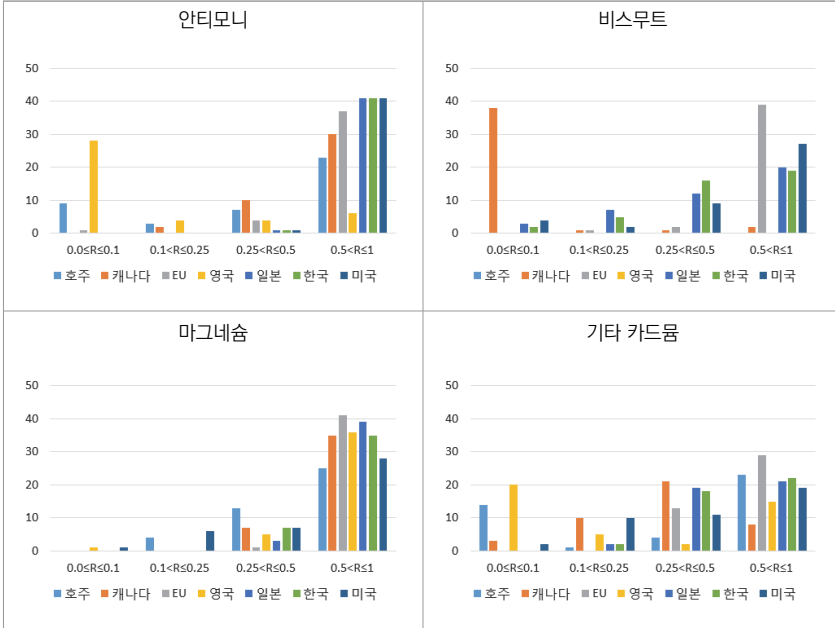
주: 1) 중간값은 2017~23년(84개월 각각) 동안 7개국 전체 대중국 수입에서 각국의 수입이 차지하는 비중들의 중간값이며, 수입의존도는 2017~23년(84개월 합산) 각국의 대세계 수입액에서 대중국 수입액이 차지하는 비중임.

2) '0.0'은 중간값이 0.05 미만인 경우이며, '0'은 중간값이 0인 경우임.

자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 1-1. 기준 2 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과

(단위: %)



주: 총 84개월(2017년 1월~2023년 12월)이 분석 대상으로, R값은 중간값 이하 42개에 대한 분포임.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 1-2. 기준 3 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과

(단위: %)



주: 총 84개월(2017년 1월 ~ 2023년 12월)이 분석 대상으로, R값은 중간값 이하 42개에 대한 분포임.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 1-3. 기준 4 품목에 대한 수입 변동성 분석 결과

(단위: %)



주: 총 84개월(2017년 1월 ~ 2023년 12월)이 분석 대상으로, R값은 중간값 이하 42개에 대한 분포임.
 자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 2. 게르마늄·흑연·희토류에 대한 6개국의 대중국 수입의존도

부록 그림 2-1. 호주의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이

(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 2-2. 캐나다의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이

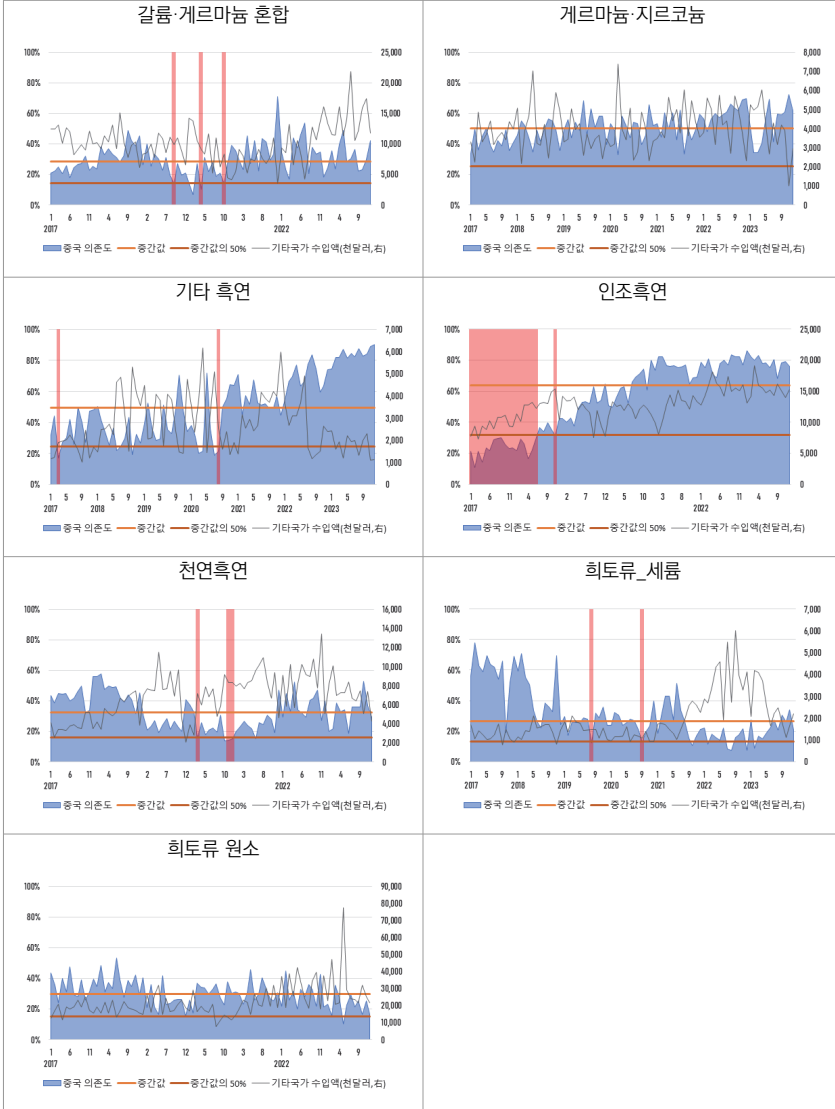
(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 2-3. EU의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이

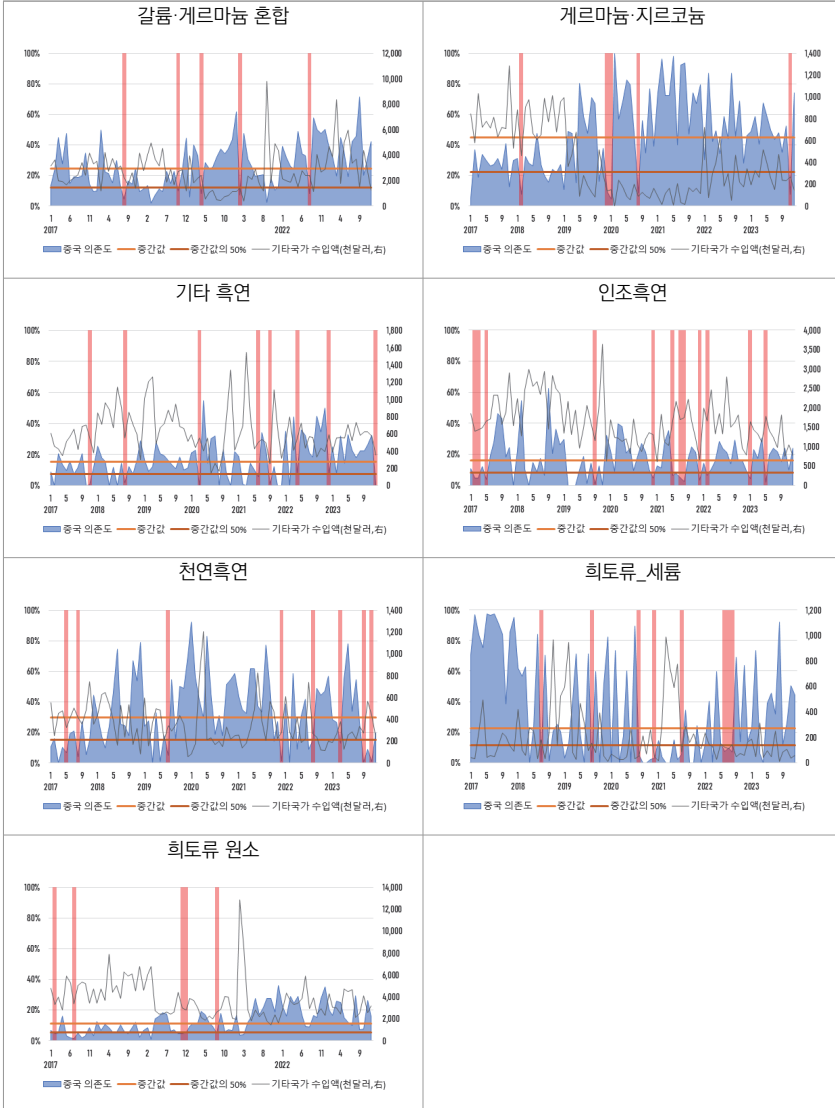
(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 2-4. 영국의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이

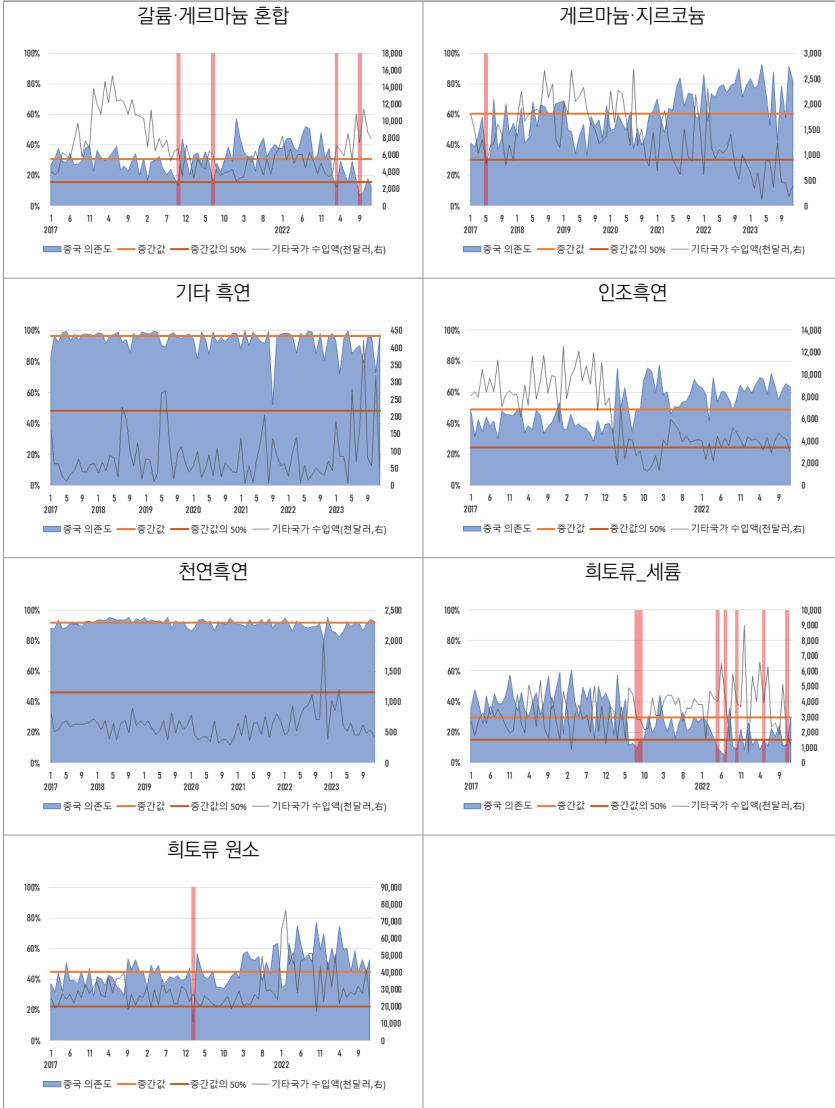
(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 그림 2-5. 일본의 게르마늄·흑연·희토류에 대한 대중국 수입의존도 추이

(단위: %)



자료: UN Comtrade 자료(검색일: 2024. 8. 14.)를 이용하여 저자 작성.

부록 3. 공급망 분절화의 거시경제적 영향

부록 표 3-1. 공급망 분절화가 주요국의 실질GDP에 미치는 영향

항목	기초자료	케르마보				흑연				회토류			
		거시		장기		거시		장기		거시		장기	
		단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기
이세안	2,752,658	0.50	0.00	-21.50	0.00	0.25	0.00	-18.00	0.00	0.75	0.00	-182.25	0.00%
중국	12,077,144	-2.00	0.00	-132.00	0.00%	-7.00	-3.00	-76.00	0.00%	-3.00	-1.00	-1,259.00	-0.01%
EU	14,712,928	0.00	0.00	13.00	0.00%	1.00	0.00	16.00	0.00%	0.00	0.00	72.00	-0.01%
한국	1,517,330	-4.25	-1.00	-2,314.13	0.00%	-4.75	-1.75	-2,180.50	0.00%	-5.88	-1.38	-13,437.38	-0.89%
미국	19,447,676	0.00	0.00	2.00	0.00%	0.00	0.00	-4.00	0.00%	0.00	0.00	-82.00	0.00%
기타 세계	29,665,532	4.00	2.00	52.00	0.00%	2.00	2.00	-16.00	0.00%	4.00	2.00	1,444.00	0.00%

자료: 저자 작성.

부록 표 3-2. 공급망 분절화에 따른 한국의 대주요국 화학 산업 중간재 수입 영향

(단위: 백만 달러)

항목	기초자료	케르마늄			흑연			희토류		
		거시		미시+거시	거시		미시+거시	거시		미시+거시
		단기	장기	단기	단기	장기	단기	단기	장기	단기
아세안	3,974.28	1.41	0.34	3.15	-0.02	-0.01	1.96	1.94	0.47	7.40
		0.04%	0.01%	0.08%	0.00%	0.00%	0.05%	0.05%	0.01%	0.19%
중국	8,651.89	-10.83	-2.63	7.36	0.00	0.00	4.58	-14.86	-3.60	22.62
		-0.13%	-0.03%	0.09%	0.00%	0.00%	0.05%	-0.17%	-0.04%	0.26%
EU	4,653.24	1.63	0.40	3.64	-0.02	-0.01	2.11	2.24	0.54	9.64
		0.04%	0.01%	0.08%	0.00%	0.00%	0.05%	0.05%	0.01%	0.21%
미국	5,415.81	1.89	0.46	4.04	-0.02	-0.01	2.40	2.59	0.63	9.92
		0.03%	0.01%	0.07%	0.00%	0.00%	0.04%	0.05%	0.01%	0.18%
기타 세계	15,516.55	5.46	1.33	11.88	-0.07	-0.03	7.15	7.49	1.82	27.79
		0.04%	0.01%	0.08%	0.00%	0.00%	0.05%	0.05%	0.01%	0.18%

자료: 저자 작성.

부록 표 3-3. 공급망 분절화에 따른 한국의 대주요국 전자 산업 중간재 수입 영향

(단위: 백만 달러)

항목	기초자료	게르마늄			흑연			희토류		
		거시		장기	거시		장기	거시		장기
		단기	미시+거시		단기	미시+거시		단기	미시+거시	
아세안	1,124.60	-0.01	0.00	-1.08	1.31	0.49	-0.49	-0.01	0.00	-9.53
		0.00%	0.00%	-0.10%	0.12%	0.04%	-0.04%	0.00%	0.00%	-0.85%
중국	4,413.54	0.00	0.00	-2.96	-14.43	-5.42	-1.28	0.00	0.00	-24.73
		0.00%	0.00%	-0.07%	-0.33%	-0.12%	-0.03%	0.00%	0.00%	-0.56%
EU	1,430.96	-0.01	0.00	-1.11	1.64	0.62	-0.54	-0.01	0.00	-9.12
		0.00%	0.00%	-0.08%	0.11%	0.04%	-0.04%	0.00%	0.00%	-0.64%
미국	878.34	-0.01	0.00	-0.70	1.00	0.38	-0.35	-0.01	0.00	-5.80
		0.00%	0.00%	-0.08%	0.11%	0.04%	-0.04%	0.00%	0.00%	-0.66%
기타 세계	3,137.53	-0.02	-0.01	-2.46	3.60	1.35	-1.12	-0.03	-0.01	-20.87
		0.00%	0.00%	-0.08%	0.11%	0.04%	-0.04%	0.00%	0.00%	-0.67%

자료: 저자 작성.

Executive Summary

A Study on Methodologies for Analyzing the Economic Impacts of Supply Chain Fragmentation: Application to Critical Minerals

Young gui Kim, Wonseok Choi, Sunghun Cho, Hyunjin Lee, and Minchirl Chung

The study examines methodologies for quantitatively analyzing the impact of global supply chain fragmentation and applies these approaches to scenarios involving critical minerals. It identifies two primary analytical approaches: microeconomic and macroeconomic. Microeconomic methods provide detailed insights at the item or firm level but face challenges due to limited access to specific supply chain data. Macroeconomic methods, while suitable for industry- or national-level analysis, often rely on unrealistic assumptions when applied to item-level fragmentation. Despite the significant macroeconomic effects of disruptions in critical supply chains, existing item-level analysis techniques struggle to capture these impacts accurately. For instance, efforts to link item-level analysis with GDP using linear programming or inoperability input-output analysis often encounter limitations due to rigid assumptions about input-output structures. High-tech items, in particular, pose challenges due to their complex supply chain interdependencies and their significant influence on final production.

To address these issues, the study proposes an integrated methodology combining machine learning techniques for microeconomic analysis with the OECD METRO model for macroeconomic evaluation. This approach considers key issues and transmission channels identified in previous research. The study also reviews critical mineral management policies in

major economies such as the United States, European Union, China, and Korea. The United States identifies critical minerals essential for economic and national security through legislative measures like the 2020 Energy Act and has implemented strategies to strengthen North American supply chain resilience. The European Union has updated its critical raw materials list every three years since 2008 and enacted the Critical Raw Materials Act in 2024 to expand production capacity and enhance international cooperation. China, despite lacking a clear legal definition of critical minerals, strengthens its resource management through export controls and cooperation with resource-rich countries. Korea designated 33 minerals as critical through its 2023 Critical Minerals Securing Strategy, prioritizing 10 strategic minerals essential for industries like electric vehicles and semiconductors. However, Korea's reliance on imports for most critical minerals highlights its vulnerability.

The study conducts a vulnerability analysis of Korea's critical mineral supply chains using indicators such as the Trade Specialization Index (TSI) and Herfindahl-Hirschman Index (HHI). It identifies high global supply chain concentration in minerals like cobalt, lithium, and neodymium, which are crucial for secondary batteries and electric vehicles. To assess geopolitical risks, it examines import trends from China across seven countries from 2017 to 2023. Sharp declines in imports of gallium, graphite, and rare earth elements suggest potential disruptions due to trade conflicts or export controls.

The study employs a Dual-Stage Attention-Based Recurrent Neural Network (DA-RNN) model to predict the impact of critical mineral

fragmentation on Korea's exports of key items like batteries and semiconductors under three scenarios involving germanium, graphite, and rare earth elements. The results show significant decreases in export values across all scenarios. For example, restrictions on germanium imports led to a 3.9% decline in battery exports, while rare earth element shortages caused a 10.8% drop.

Using the OECD METRO model, the study evaluates the macroeconomic impact of critical mineral fragmentation under two approaches: direct analysis of import disruptions (Approach 1) and integration of microeconomic results into macroeconomic simulations (Approach 2). The findings indicate that germanium fragmentation could reduce Korea's real GDP by 0.15%, while graphite and rare earth element disruptions could lead to decreases of 0.14% and 0.89%, respectively.

Based on these findings, the study recommends strengthening supply chain monitoring systems by integrating fragmented platforms across government agencies and establishing a centralized control tower. It also suggests diversifying procurement strategies, promoting R&D for substitute materials, and supporting SMEs through digital-based supply chain management platforms. Additionally, it emphasizes harmonizing policies with major economies to prevent over-securitization and redundant investments while expanding international cooperation for joint mineral exploration and development projects.

<책임>

김영귀

미국 미시간주립대학교 경제학 박사
대외경제정책연구원 무역통상안보실 무역협정팀 선임연구위원
(現, E-mail: ygkim@kiep.go.kr)

저서 및 논문

『한국의 FTA 15년 성과와 정책 시사점』(공저, 2019)
『디지털 통상규범의 경제적 효과 추정에 관한 연구』(공저, 2023) 외

<공동>

최원석

북경대학교 경제학 박사
대외경제정책연구원 무역통상안보실 경제안보팀 연구위원
(現, E-mail: wschoi@kiep.go.kr)

저서 및 논문

『글로벌 경제안보 환경변화와 한국의 대응』(공저, 2023)
『자국 중심의 경제안보 전략 대응을 위한 프레임워크 구축방안 연구』(공저, 2024) 외

조성훈

미국 Stony Brook University 경제학 박사
대외경제정책연구원 무역통상안보실 경제안보팀 부연구위원
(現, E-mail: scho@kiep.go.kr)

저서 및 논문

『글로벌 경제안보 환경변화와 한국의 대응』(공저, 2023)
『자국 중심의 경제안보 전략 대응을 위한 프레임워크 구축방안 연구』(공저, 2024) 외

이현진

고려대학교 국제대학원 박사과정 수료
대외경제정책연구원 세계지역연구1센터 북미유럽팀 선임연구원
(現, E-mail: hjeanlee@kiep.go.kr)

저서 및 논문

『주요국의 탄소중립과 그린성장전략에 관한 연구: EU, 미국, 중국, 일본을
중심으로』(공저, 2022)

『러시아-우크라이나 전쟁이 EU의 '개방형 전략적 자율성' 확대에 미친 영향: 에너지
전환, 인적 교류, 안보 통합을 중심으로』(공저, 2023) 외

정민철

서울시립대학교 경제학 석사
대외경제정책연구원 무역통상안보실 무역투자정책팀 전문연구원
(現, E-mail: mcchung@kiep.go.kr)

저서 및 논문

『반덤핑조치의 국제적 확산과 조사기법 다양화의 영향 및 정책시사점』(공저, 2021)

『무역 자유화와 소비자 후생효과: 품질 다양성을 중심으로』(공저, 2022) 외

KIEP 중장기통상전략 발간자료 목록

■ 2024년	24-01	동남아 주요 5개국의 통상전략과 경제성장 경로: 수출주도성장전략의 평가와 전망 / 김남석 · 이재호 · 신민금 · 김계국
	24-02	공급망 분절화의 경제적 영향 분석방법론 연구: 핵심광물에 대한 적용 / 김영귀 · 최원석 · 조성훈 · 이현진 · 정민철
	24-03	인도의 데이터 거버넌스 분석과 한-인도 협력에 대한 시사점 / 김정곤 · 이효진 · 강반디
	24-04	미중 무역 분쟁과 통상정책 변화가 한국 경제에 미치는 영향 / 광도원 · 편주현 · 어윤종
■ 2023년	23-01	인도의 중장기 통상전략과 한-인도 협력 방안 / 김경훈 · 김정곤 · 한형민 · 노운재
	23-02	호주의 중장기 통상전략과 한-호주 협력 방안 / 김남석 · 라미령 · 최인아 · 신민이 · 장한별
	23-03	멕시코의 중장기 통상전략과 한-멕시코 협력 방안 / 홍성우 · 김진오 · 박미숙 · 이승호
	23-04	남아프리카공화국의 중장기 통상전략과 한-남아공 협력 방안 / 한선이 · 강문수 · 김예진 · 박규태
	23-05	몽골의 중장기 통상전략과 한-몽골 협력 방안 / 정민현 · 강부균 · 민지영 · 정동연 · 김보라
■ 2022년	22-01	미국의 중장기 통상전략과 한-미 협력 방안 / 강구상 · 김혁중 · 김종혁 · 권혁주 · 박은빈 · 윤여준
	22-02	중국의 중장기 통상전략과 한-중 협력 방안 / 이승신 · 현상백 · 나수엽 · 김영선
	22-03	일본의 중장기 통상전략과 한-일 협력 방안 / 김규판 · 이형근 · 이정은
	22-04	EU의 중장기 통상전략과 한-EU 협력 방안 / 장영욱 · 조동희 · 이철원 · 박지현 · 오태현 · 이현진 · 김초롱
	22-05	아세안의 중장기 통상전략과 한-아세안 협력 방안 / 광성일 · 조승진 · 정재완 · 이재호 · 신민금 · 박나연 · 김소은
	22-06	중양아시아의 중장기 통상전략과 한-중양아시아 협력 방안 / 정민현 · 정동연 · 민지영 · 강부균

- 21-01 디지털플랫폼에 관한 최근 EU의 규제개편 및 우리나라의 통상친화적 제도 개선 방향 / 이한영 · 권병규 · 차성민
 - 21-02 디지털 전환에 따른 노동시장의 변화와 정책 시사점 / 광도원 · 이동은 · 편주현
 - 21-03 지역별 중장기 통상전략 및 대외경제 협력 방안 / 김준동 · 연원호 · 이규엽 · 문진영 · 장영욱 · 정지원 · 강구상 · 광성일 · 한형민 · 최원석 · 김정곤 · 정민현 · 강문수 · 이주관 · 권혁주 · 김은미 · 이예림 · 윤형준 · 윤여준
 - 21-04 미·중 전략경쟁하 WTO 다자체제의 전망과 정책 시사점 / 송유철 · 강인수 · 이호생
 - 21-05 글로벌 보조금 규제의 새로운 현상: 역외보조금·기후변화 보조금·환율보조금 / 이천기 · 강민지 · 김민주
- 20-01 WTO 상소기구의 기능 변화와 전략적 통상정책 / 예상준 · 엄준현
 - 20-02 경제의 서비스화에 대응한 중장기 통상정책의 방향 / 이시욱 · 최용석
 - 20-03 FTA가 중소기업의 고용과 혁신에 미치는 영향 / 구경현 · 조문희 · 김혁황 · 박혜리 · 이준호
- 19-01 WTO 개혁 쟁점 연구: 농업보조 통보 및 개도국 세분화 / 서진교 · 박지현 · 김민성 · 시타르타 미트라
 - 19-02 WTO 개혁 쟁점 연구: 분쟁해결제도 / 이재민
 - 19-03 WTO 개혁 쟁점 연구: 국영기업, 산업보조금, 통보 / 이천기 · 엄준현 · 강민지
 - 19-04 포용적 통상국가 실현을 위한 추진전략 연구 / 유재원 · 강문성 · 강인수 · 박성훈 · 송백훈 · 송유철 · 이호생 · 한홍열
 - 19-05 무역기술장벽(TBT)의 국제적 논의 동향과 경제적 효과 분석 / 장용준 · 김민정 · 최보영 · 현혜정
- 18-01 디지털 경제의 확산이 서비스 무역 비용에 미치는 영향 및 정책 시사점 / 김상겸 · 박순찬 · 박인원 · 오수현
 - 18-02 신남방지역 글로벌 가치사슬 확대를 위한 ODA 활용방안 연구 / 이홍식 · 강문성 · 김한성 · 송백훈 · 이창수
 - 18-03 데이터의 국가간 이동에 관한 규제정책의 통상법적 합치성 제고방안 연구 / 이한영 · 차성민
- 17-01 남북한 경제통합 분석모형 구축과 성장효과 분석 / 최장호 · 김범환
 - 17-02 통일 후 남북한 산업구조 재편 및 북한 성장산업 육성방안 / 홍순직 · 이석기 · 조봉현 · 이운식 · 정일영

■ 2016년

- 17-03 통일 후 남북한 금융·재정 통합방안 / 이상제 · 박해식
- 17-04 최근 국제통상 환경의 변화에 따른 한국의 새로운 통상정책 방향 / 박성훈 · 한홍열 · 송유철 · 강문성 · 송백훈
- 17-05 산업연관 관계를 고려한 무역구제조치의 경제적 영향 분석 / 이규엽 · 조문희 · 강준구 · 박혜리 · 엄준현
- 16-01 통일 후 남북한경제 한시분리운영방안: 경제적 필요성과 법적 타당성 / 임수호 · 최장호 · 민준규 · 이상민 · 최유정
- 16-02 통일 후 남북한경제 한시분리운영방안: 통화 금융·재정 분야 / 김영찬 · 김범환 · 홍석기 · 박현석
- 16-03 통일 후 남북한경제 한시분리운영방안: 노동 및 사회복지 분야 / 김진수 · 황규성 · Christina Hiebl
- 16-04 통일 후 남북한경제 한시분리운영방안: 국유자산 분야 / 박철수 · 조봉현 · 정일영
- 16-05 통일 한국 초기단계에서 미국의 대한반도 경제협력: 기회와 제약 / 니콜라스 에버슈타트
- 16-06 남북한의 무역자유화가 Global Value Chain(GVC)을 통해 일본경제에 미칠 영향분석 / 이누이 토모히코 · 권혁욱
- 16-07 통일 후 동아시아 가치사슬 변화에 따른 러시아의 대한반도 경제협력 전략 / 세르게이 루코닌

KIEP 발간자료회원제 안내

- 본 연구원에서는 본원의 연구성과에 관심 있는 전문가, 기업 및 일반에 보다 개방적이고 효율적으로 연구 내용을 전달하기 위하여 「발간자료회원제」를 실시하고 있습니다.
- 발간자료회원으로 가입하시면 본 연구원에서 발간하는 모든 보고서를 대폭 할인된 가격으로 신속하게 구입하실 수 있습니다.
- 회원 종류 및 연회비

회원종류	배포자료	연간회비		
		기관회원	개인회원	연구자회원*
S	외부배포 발간물 일체	30만원	20만원	10만원
		8만원		4만원
A	East Asian Economic Review	8만원		4만원

* 연구자 회원: 교수, 연구원, 학생, 전문가풀 회원

- 가입방법

홈페이지, 우편, FAX를 이용하여 가입신청서 송부(수시접수)
 30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 경제정책동
 대외경제정책연구원 연구조정실 학술정보팀
 연회비 납부 문의전화: 044) 414-1179 / FAX: 044) 414-1144
 E-mail: kieppub@kiep.go.kr

- 회원특전 및 유효기간

- S기관회원의 특전: 본 연구원 해외사무소(美 KEI) 발간자료 등 제공
- 자료가 출판되는 즉시 우편으로 회원에게 보급됩니다.
- 모든 회원은 회원가입기간에 가격인상과 관계없이 신청하신 종류의 자료를 받아보실 수 있습니다.
- 본 연구원이 주최하는 국제세미나 및 정책토론회에 무료로 참여하실 수 있습니다.
- 연회비기간은 가입일로부터 다음해 가입월까지입니다.

KIET 발간자료회원제 가입신청서

기관명 (성명)	(한글)	(한문)
	(영문: 약호 포함)	
대표자		
발간물 수령주소	우편번호	
담당자 연락처	전화 FAX	E-mail :
회원소개 (간략히)		
사업자 등록번호	종목	

회원분류 (해당란에 ✓ 표시를 하여 주십시오)

기 관 회 원 <input type="checkbox"/> 개 인 회 원 <input type="checkbox"/> 연 구 자 회 원 <input type="checkbox"/>	S 발간물일체	A 계간지

* 회원번호

* 갱신통보사항

(* 는 기재하지 마십시오)

특기사항



Long-term Trade Strategies Study Series 24-02

A Study on Methodologies for Analyzing the Economic Impacts of Supply Chain Fragmentation: Application to Critical Minerals

Young gui Kim, Wonseok Choi, Sunghun Cho, Hyunjin Lee, and Minchirl Chung

지금 세계는 자국우선주의의 심화, 미중 패권경쟁의 격화, 지정학적 불안 확대로 공급망 분절화의 가능성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 공급망 분절화의 영향을 정량적으로 분석하기 위한 방법론을 검토하고, 이를 핵심광물 분절화 시나리오에 적용하여 그 영향을 추정하였다. 분석 결과를 토대로 공급망에 대한 모니터링 강화, 복원력 강화를 위한 기업지원 대책, 주요국과의 정책 조화와 핵심광물 협력 확대에 관한 정책 방안을 제안하였다.



KIEP 대외경제정책연구원
Korea Institute for International Economic Policy

30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 경제정책동
T.044-414-1114 F.044-414-1001 • www.kiep.go.kr

ISBN 978-89-322-7127-9
978-89-322-7092-0 (세트)

정가 7,000원