

EMPIRICAL MEASUREMENT OF TECHNOLOGY SOVEREIGNTY

기술주권 수준의 측정 프레임워크와 국제비교

이정동 / 최성준 / 김경원 / 시새롬



IFS 워킹페이퍼 2024-01

기술주권 수준의 측정 프레임워크와 국제비교 Empirical Measurement of Technology Sovereignty

이정동^{a,b}, 최성준^c, 김경원^c, 시새롬^c
2024. 8

a 서울대학교 국가미래전략원, 과학과 기술의 미래 클러스터장

b 서울대학교 대학원 협동과정 기술경영경제정책 전공, 교수 (leejd@snu.ac.kr)

c 서울대학교 대학원 협동과정 기술경영경제정책 전공, 박사과정

인용 정보

이정동, 최성준, 김경원, 시새롬 (2024). 기술주권 수준의 측정 프레임워크와 국제비교 (워킹페이퍼 No. 2024-01). 서울대학교 국가미래전략원.

목차

초록	04
----	----

Abstract	05
----------	----

1. 서론	06
1.1. 기술주권 논의의 등장과 관련 정책	06
1.2. 기술주권의 현황을 파악하기 위한 정량적 분석의 필요성	08

2. 기술주권의 프레임워크와 구성요소	10
2.1. 기술주권의 정의	10
2.2. 기술주권의 구성요소의 해석	11
2.3. 기술주권과 국가정책	13

3. 기술주권의 조작적 정의와 필요 자료	16
3.1. 기술주권 구성요소의 정의	16
3.2. 필요 자료	18

4. 국가수준 기술주권의 정량적 분석결과	20
4.1. 혁신역량, 생산역량, 공급망 독립성	20
4.2. 국가별 기술주권의 상대적 위치	25
4.3. GDP 순위와 종합기술역량 및 공급망 역량 순위의 비교	26

5. 기술주권 프레임워크의 응용	27
5.1. 국가내 산업별 기술주권의 비교	27
5.2. 특정 산업에 대한 기술주권 상태의 국가간 비교	28

6. 요약 및 정책적 시사점	30
------------------------	-----------

참고문헌	32
------	----

Appendix	39
A. 생산역량(PC)과 현시비교우위(RCA), 경제복잡성지수(Economic Complexity Index, ECI) 및 적합성지수(Fitness Index, F)와의 관계	39
B. TC계산식에서 α 값의 의미 및 선택 기준	41
C. 반도체 산업의 공급망 구분을 위한 분류기준(Taxonomy)	43

초록

글로벌 공급망 위기 속에서 국가가 필요로 하는 산업을 영위할 수 있는지에 대한 관심이 높아지고 있다. 더불어 미-중간의 기술분쟁이 격화하면서 핵심산업을 지탱하기 위한 기술을 보유하고 있는지의 여부도 중요한 관심사가 되어왔다. 이러한 관심을 요약한 개념이 기술주권이다. 기술주권에 대한 각국 정부의 관심이 높아지면서 기술주권을 향상시키기 위한 여러가지 정책들이 발표되고 있는 중이다. 그러나 아직까지 기술주권 정책들의 근거는 정성적이거나 파편적인 증거들의 모음에 불과한 실정이다. 본 연구에서는 기술주권을 구성하는 핵심요소를 혁신역량, 생산역량, 그리고 공급망 독립성으로 정의하고, 그 각각의 수준과 종합적 수준을 측정할 수 있는 조작적 정의를 제시한다. 또한 기술주권의 각 요소들을 공개된 자료인 국제특허, 수출 및 수입량에 근거하여 측정하고, 국제적으로 비교한 결과를 제시한다. 본 연구에서 제시하는 기술주권 측정 프레임은 국가간 비교 뿐 아니라 한 국가내에서 여러 산업간의 기술주권 수준을 비교하는데도 적용이 가능하다. 또한 특정한 산업을 중심으로 국가간 비교도 가능하며, 본 연구에서는 그 예시로서 반도체 산업에 대한 기술주권의 국제비교 분석결과를 제시한다. 실증분석의 결과 각 국가의 기술주권 구성요소별로 강약점이 다르다는 점을 확인할 수 있다. 이는 기술주권 정책이 하나의 표준화된 패키지로 구성될 수 없고, 각 국가가 처한 맥락에 따라 차별적으로 구성되어야 함을 시사하고 있다.

Abstract

Amid the global supply-chain crisis, there is a growing interest in whether countries can sustain their needed industries. In addition, as the US-China technology competition intensifies, it has become important whether a country has the technologies to support its core industries. Technology sovereignty is a concept that summarizes these concerns. As governments' interest in technology sovereignty has increased, various policies have been announced to enhance technology sovereignty. However, the rationale behind these policies remains qualitative or a collection of fragmentary evidence. In this study, we define the core components of technology sovereignty as innovation capabilities, production capabilities, and supply-chain independence and propose operational definitions to measure their individual and aggregated levels. We measure each of these elements of technology sovereignty using publicly available data on international patents, exports, and imports and present the results of international comparisons. The framework for measuring technology sovereignty presented in this study can be applied not only to cross-country comparisons but also to compare the level of technology sovereignty across different industries within a country. In addition, cross-country comparisons can be made by focusing on specific sectors, and this study presents the results of an international comparison of technology sovereignty in the semiconductor industry as an example. The results of the empirical analysis show that each country has different strengths and weaknesses in various components of technology sovereignty. This suggests that technology sovereignty policies cannot be composed of one standardized package but should be differentiated according to the context of each country.

1. 서론

1.1. 기술주권 논의의 등장과 관련 정책

기술주권 논의가 급부상하게 된 것은 단기적으로 코로나 19 팬데믹(pandemic)과 러시아의 우크라이나 침공 위기 상황에서 글로벌 공급망의 혼란으로 인해 국가가 필요로 하는 상품을 구하지 못하는 상황이 중요한 계기를 제공했기 때문이다(Ivanov and Dolgui, 2020; Ivanov and Dolgui, 2021; Jagtap et al., 2022; Butollo et al., 2024). 각 국은 공급망 혼란 상황에서 국가의 핵심 산업을 보유하고 있는지, 또한 그 산업을 유지하기 위한 기술을 가지고 있는지에 대한 심각한 의문을 제기하게 되었다. 또한, 미-중간의 전략적 경쟁으로 지정학적 긴장이 높아짐에 따라(Liu and Woo, 2018; Schneider-Petsinger et al., 2019; Jisi & Ran, 2019; Danilin, 2020), 첨단산업의 보유여부, 그리고 그와 관련된 핵심기술을 보유하고 있는지에 대해 주목하게 되었다(Bauer and Erixon, 2020; Crespi et al., 2021; Edler et al., 2020; Csernaton, 2022; Edler et al., 2023). 즉, 요약하자면 국가가 필요로 하는 산업에서의 독립적 생산역량을 가지고 있는지, 또 이를 가능하게 하는 기술역량을 가지고 있는지에 대해 관심이 증가하고 있고, 이런 추세를 반영하여 부상한 개념이 기술주권이다.

학문적으로 기술주권은 오래전부터 논의되어 왔지만(Grant, 1983; Wriston, 1988) 그리 활발한 논의가 이루어지지는 않았다. 그러나 2020년 이후 조금씩 활발해지고 있는 중이다(Crespi et al., 2021; Edler et al., 2023; March and Schieferdecker, 2023). 학문적 논의가 성숙하지 않는데 비해 현실에서는 주요국들이 기술주권 관련 정책들을 연이어 발표하고 있다. 예를 들어 기술주권 논의에서 핵심이 된 반도체 관련 정책을 살펴보면, 미국은 2022년 「반도체 및 과학법(CHIPS and Science Act of 2022)」을 통해 국내 생산역량을 높이고 공급망 의존도를 낮추기 위해 보조금 지원, 수출 통제 등 다양한 수단들을 이미 적용하고 있다(Luo and Van Assche, 2023; Peters, 2023). 이에 대응하여 유럽연합(EU)에서도 「유럽 반도체법(European Chips Act of 2023)」을 통해 반도체 공급 부족 문제의 근본 원인을 제거하고 기술 선도국으로서 유럽의 위치를 강화하기 위해 R&D 자금 지원, 반도체 생산 역량에 대한 투자, 공급 부족 모니

터링 등의 정책방안을 발표한 바 있다(Dachs, 2023). 뿐만 아니라 중국에서는 2014년 국가 집적회로 산업투자기금(National Integrated Circuit Industry Investment Fund)을 조성하여 파운드리(foundries), 패키징 및 테스트(packaging and testing), 소재(material), 장비(equipment) 등 반도체 공급망의 모든 부문에 정부지원을 강화해왔고(Marukawa, 2023), 2024년에는 3440억 위안(475억 달러) 규모의 3단계 투자를 발표하였다. 또한, 2020년 「신시대 집적회로 산업 및 소프트웨어 산업 고품질 발전 추진 정책(Several Policies to Promote the High-Quality Development of the Integrated Circuit Industry and Software Industry in the New Era)」을 발표하여 미국 및 외국 반도체 회사들의 기술, IP, 인재, R&D 시설등의 중국 이전을 장려하기 위한 세제 지원, 지적재산권 보호 등 여러 부문의 혜택을 제공하여 반도체 기술에 대한 자립성 강화를 도모하고 있다(Sutter, 2021). 한국에서는 반도체 주도권 및 국가 경제안보의 확보를 위해 2024년 「반도체 메가 클러스터 조성방안」을 발표하였으며, 여기에는 연구 인프라 조성, 시설 투자에 대한 세액 공제, 팹리스 기업 육성, 글로벌 반도체 동맹 기반 공급망 강화 등의 세부정책들이 포함되어 있다.

이들 정책의 사례를 보면 몇 가지 공통점을 발견할 수 있다. 우선 각 국에서 발표되는 정책의 목표와 수단이 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 연구개발지원, 연구인프라 조성 등을 포함하는 전통적인 과학기술혁신 정책 뿐만 아니라 특정 산업의 생산역량을 강화하기 위한 산업정책들도 포함하고 있고, 나아가 수입 관세, 수출 통제 등과 같은 통상정책도 함께 포함되어 있다(Edler et al., 2023; Criscuolo et al., 2022; March & Schieferdecker, 2023; Butollo et al., 2024; Criscuolo & Lalanne, 2024). 이는 기술주권 정책이 기존의 독립적인 정책 영역들을 묶어주는 포괄적인(overarching) 개념이 되고 있음을 시사한다. 이와 관련하여 EU에서도 EU 관점의 기술주권정책을 리뷰하면서 연구, 산업 및 통상 정책의 일관성있는 정책 조합(policy mix)의 필요성을 주장하기도 한 바 있다(European Commission, 2021).

또한 각국에서 기술주권 정책을 발표하면서, 정책의 주된 대상이 되는 전략 및 신흥 기술을 발표하고 있는데, 타겟팅하는 기술 및 산업 분야가 유사하게 나타났다. 미국(Goodman & Roberts, 2022; The white house, 2024), 중국(Zenglein & Holzmann, 2019), EU(Ramahandry et al., 2021; Dortmans et al., 2022; European Commission, 2023), 캐나다(Araya & Mavinkurve, 2022) 등 여러 국가의 리스트를 비교해보면, AI, 바이오 기술, 첨단 제조, 양자 기술 등 유사한 분야를 선정하여 해당 분야를 중점적으로 지원하고 있다.

이와 같은 관찰은 각 국이 산업과 기술의 여러 분야에 대해 역사적으로 가져온 강점요소가 다르고

대외무역 환경 등 주어진 맥락이 상이함에도 불구하고, 각 국가의 정책이 유사한 정책 조합으로 수렴하고 있음을 말해주고 있다. 이는 기술주권 정책이 각국의 기술주권에 관한 엄밀하고 객관적인 근거에 기반한 것이라기 보다 다른 경쟁국가가 쓰고 있는 정책을 무비판적으로 벤치마킹하고 있는 것은 아닌지 의심을 하게 한다.

1.2. 기술주권의 현황을 파악하기 위한 정량적 분석의 필요성

기술주권의 개념이 정책 커뮤니티에서 본격적으로 논의되기 시작한 것은 미-중간의 분쟁이 수면위로 부상하기 시작한 2010년대 후반부터이다(Edler et al., 2020; Huotari et al., 2020). 아직까지 학문적으로 기술주권의 개념에 대한 합의가 완전히 자리잡고 있지 못한 상태임에도 불구하고(Edler et al., 2023), 관련 정책은 다수 발표되고 있고, 실제로 많은 국가재정이 투입되기 시작했다(VerWey, 2019; Sutter, 2021; Luo & Van Assche, 2023; Dachs, 2023; Marukawa, 2023; Butollo et al., 2024). 이는 전형적으로 현실의 정책이 이론을 앞서나가는 사례라고 할 수 있다.

엄밀한 개념적 정의와 분석이 갖추어지지 않은 채 정책이 앞서나가고 있는 이런 현상은 몇 가지 문제를 낳을 수 있다. 첫째, 문제의 심각성이 어느 정도인지를 파악하기 전에 정치적 목적에 의해 기술주권 정책이 추진될 경우 성급하거나 과도한 정책개입이 있을 수 있고, 이는 장기적으로 혁신생태계가 균형있게 진화되는데 장애물이 될 수 있다. 둘째, 비록 기술주권이 중요한 정책 아젠다임을 인정한다고 하더라도 정확한 분석이 선행되지 않을 경우 정책의 대상, 목표, 수단의 선택에 오류와 편향이 있을 수 있다. 이는 국가적 자원의 낭비로 이어질 수 있다. 이런 우려를 생각한다면 기술주권의 개념에 대한 공감대를 형성하고, 관련한 정량적 증거들을 수집하는 일이 시급한 과제라고 할 수 있다.

관련하여 지난 2010년 이후 과학기술정책의 정량적 근거를 찾기 위한 과학정책의 과학화(science of science policy)에 대한 관심이 증가하고 있는 점에 주목할 필요가 있다(Fealing et al, 2011). 과학정책의 과학화는 과학 및 기술 발전이 사회 및 경제에 미치는 영향이 날로 중요해지고 있으며, 정책 환경이 복잡해지고, 기술혁신 시스템 역시 복잡해지고, 불확실성이 높아지고 있다는 현실 관찰에 기반한 것이다(Marburger, 2011). 이런 배경하에 미국 국립과학재단(National Science Foundation)은 미국의 핵심기술이 차지하고 있는 경쟁력 현황을 정량적으로 분석하기 위해 국가핵심기술평가네트워크(National Network for Critical Technology Assessment) 프로젝트(NNCTA, 2023)를 시작하였다.

기술주권의 정량적 분석을 지향하는 본 연구는 최근 발전하고 있는 과학정책의 과학화의 트렌드를 따라 기술주권과 관련된 정량적 분석도구를 제시하고, 이를 이용한 객관적인 분석결과를 제시함으로써 증거기반의 혁신정책 수립에 기여하고자 한다.

기술주권의 정량적 분석과 관련해서는 그간 몇 가지 흥미로운 노력들이 진행되어 왔다. 예를 들어 랜드 호주 연구소(Dortmans et al., 2022)의 경우 호주 정부의 의뢰를 받아 호주의 기술주권에 중요한 전략기술을 선정하기 위한 프레임틀을 제시한 바 있다. 이 프레임틀에서는 특허 등 기술분야별 자료를 수집하고 정량적으로 분석하는 단계가 포함되어 있다. Caravella et al. (2021)은 기후변화 완화 기술 (climate mitigation technology)에 대해 기술주권 수준을 정량적으로 분석한 바 있고, da Ponte et al. (2023)은 다차원 종합지표를 바탕으로 5G 통신산업의 기술주권지수를 제시하였다. 또한 Caravella et al. (2024)는 태양광 산업을 중심으로 유럽차원의 기술주권을 정량적으로 평가하고, 업(up), 미들(middle), 다운(down) 스트림별로 유럽의 기술경쟁력과 수입의존도를 종합적으로 분석한 결과를 제시한 바 있다.

기존의 정량적 분석을 위한 노력들에도 불구하고, 특정 산업분야에 한정되거나(climate mitigation technology (Caravella et al., 2021), 통신 산업(da Ponte et al., 2023), 태양광 산업(Caravella et al., 2024)), 논문이나 특허 등 기술주권에 도움이 될 것이라고 생각하는 자료들을 임의적으로 선택하여 제시 (Puglierin & Zerka, 2022; da Ponte et al., 2023)하는 등의 한계가 있다. 본 연구에서는 첫째, 기술주권의 개념을 구성요소들간의 관계에 근거하여 종합적으로 살펴볼 수 있는 프레임틀을 제시하고자 한다. 둘째, 이 프레임틀에 근거하여 기술주권의 현재 상황을 국가간에 비교할 수 있도록 정량적 분석결과를 제시하고자 한다. 셋째, 본 연구에서 제시한 기술주권의 분석 프레임워크를 특정 산업에 적용하거나 한 국가 내에서 산업간 기술주권의 상대적 수준을 비교분석할 수 있음을 예시로서 보이고자 한다.

본 연구에서 제시하는 기술주권의 분석 프레임워크는 향후 기술주권 논의가 근거있게 진행되고, 맥락에 맞는 차별적인 기술주권 정책 수립에 기여할 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 2장에서는 기술주권의 정의와 구성요소, 그리고 이들을 종합한 기술주권 분석 프레임워크를 제시한다. 3장에서는 실증 분석을 위한 조작적 정의를 제시하고, 사용되는 자료를 소개한다. 4장에서는 국가차원의 기술주권 분석결과를 제시한다. 5장에서는 본 연구의 프레임워크를 활용하여 한 국가 내에서 산업간 기술주권 상태를 비교하거나 특정산업에 대하여 기술주권의 수준을 국제비교를 하는 사례를 제시한다. 마지막으로 6장에서는 분석의 결과를 요약하고, 정책적 시사점과 향후 연구과제들을 제시한다.

2. 기술주권의 프레임워크와 구성요소

2.1. 기술주권의 정의

기술주권은 국가가 필요로 하는 재화를 타국에 구조적으로 의존함이 없이 생산할 수 있는 기술을 스스로 보유하고 있거나 확보할 수 있는 역량을 의미한다(Grant, 1983; Edler et al., 2023). 이 개념에는 다음과 같은 몇 가지 중요한 고려사항들이 포함되어 있다.

첫째, 기술주권을 논할 때의 기술에는 여러가지 종류의 기술역량이 포함된다. 기술이 여러가지 형태로 존재한다는 점은 Dosi (1982, 1988), Lall (2000), Lee et al. (2019, 2021) 등 여러 연구자들에 의해서 오랫동안 주장되어 왔다. 이 가운데 논문이나 특허로 표현되는 과학기술관점에서의 혁신적인 아이디어를 만들어낼 수 있는 역량과 현장에서 생산을 위해 필요한 기술은 개념적으로 뚜렷하게 구분되어 왔다. 특히 생산과 결부된 기술역량의 경우 특허와 같이 명시적으로 표현되지 않는 노하우가 대부분이고, 생산을 많이 해본 경험이 축적됨에 따라 늘어나는 경향이 있다. 기술역량을 혁신역량과 생산역량으로 구분한다는 관점에서 Dosi (1982, 1988)는 이를 ‘아는 것(knowing)’과 ‘행하는 것(doing)’으로 구분하여 실증분석한 바 있고, Lee et al. (2019, 2021)는 실행역량(implementation capability)과 디자인 역량(design capability)으로 구분하여 국가적 차원에서 이 두 가지 종류의 기술역량을 측정하는 바 있다. 본 연구의 목적에 비추어보자면, 한 국가가 필요로 하는 기술을 보유하고 있는지 보려고 할 때는 과학기술적 혁신역량과 생산을 위해 필요한 생산역량을 동시에 고려하는 것이 중요하다.

둘째, 기술주권을 논의할 때는 세상에 존재하는 모든 기술이 아니라 그 국가의 생존과 번영을 위해 필요한 기술이어야 한다. 즉, 그 국가가 필요한 재화와 서비스를 생산하기 위해 필요한 기술 혹은 부족한 부분을 채우기 위해 수입에 의존할 수 밖에 없는 산업분야에서의 기술을 고려하는 것이 중요하다. 극단적인 예를 들자면 문명에서 떨어진 외딴섬에서 자급자족해야 하는 로빈슨 크루소에게는 음식을 익히는데 필요한 기술은 중요하지만, 화성탐사를 위한 우주발사체 기술은 비록 가지고 있다고 하더라도

기술주권의 관점에서는 의미가 없다는 뜻이다. 따라서 기술주권을 고려할 때는 산업과 연관된 기술을 식별하여 분석대상으로 해야 한다(Helfat & Raubitschek, 2000; Castellacci & Natera, 2013; Eum & Lee, 2022; Pugliese et al., 2019), 이는 실증분석의 관점에서 산업-기술 연관관계를 고려해야 한다는 점을 의미한다.

셋째, 기술주권을 분석할 때는 국제적인 공급망상의 구조적 의존성을 반드시 고려하여야 한다. 이는 그 국가가 필요로하는 상품을 특정 국가에 과도하게 의존하여 수입할 수 밖에 없다면, 비록 그 분야의 혁신역량이나 생산역량을 보유하고 있다고 하더라도 외생적 위기에 국가경제가 취약해질 수 밖에 없고, 주권적 자율성(autonomy)을 지키기 어렵기 때문이다. 즉, 종합적 기술역량이 높더라도 구조적 의존성이 높다면 전반적인 기술주권은 낮게 평가해야 한다는 것을 의미한다.

기술주권의 분석 프레임에 도출함에 있어 위의 세 가지 고려사항을 충실히 고려해야 한다.

2.2. 기술주권의 구성요소의 해석

지금까지의 논의를 참조하여 우리는 기술주권을 혁신역량(innovation capability)과 생산역량(production capability), 그리고 공급망 독립성(supply-chain independence)의 세 가지 구성요소를 기반으로 파악하고자 한다.

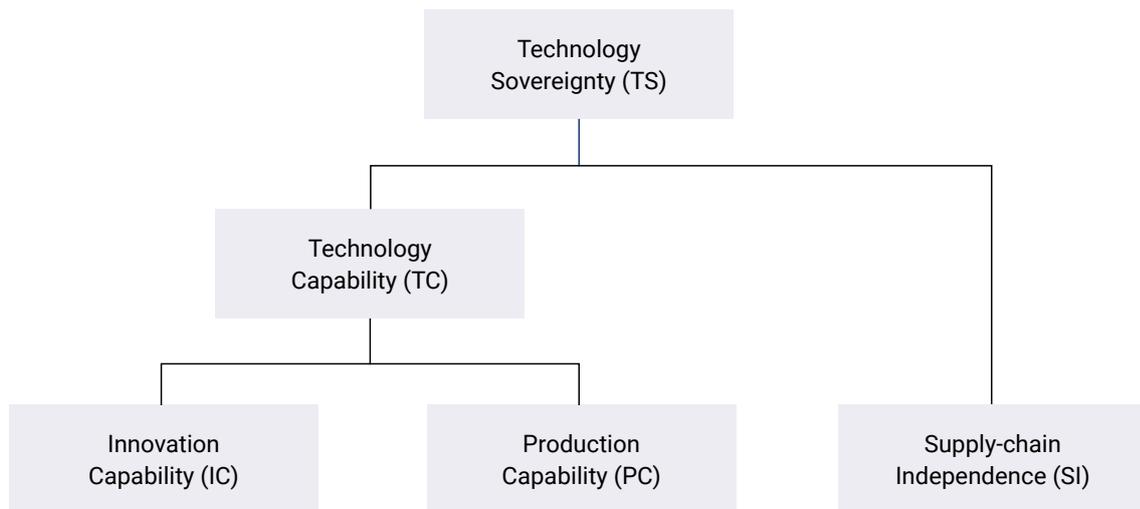
첫째, 혁신역량은 주로 과학기술적 관점에서 혁신적 아이디어를 제시할 수 있는 역량을 의미하고, 본 연구에서는 그 국가가 출원한 국제특허의 수로 파악한다. 둘째, 생산역량은 생산에 필요한 기술의 보유량을 의미하며, 본 연구에서는 수출물량으로 대표한다. 생산을 국내 생산을 포함하지 않은 수출실적으로 파악하는 이유는 생산되는 상품의 수준이 국제적 경쟁력을 만족할 수 있을 정도가 될 때 기술주권 분석에서 의미있게 다룰 수 있는 생산이라고 볼 수 있기 때문이다. 셋째, 공급망 독립성은 수입을 할 때 한 국가에 과도하게 의존하는 정도를 나타낸다.

참고로 세 구성요소 가운데 혁신역량과 생산역량은 특허수 및 수출량을 활용하므로 양적의미를 갖지만, 공급망 독립성은 특정 국가로부터의 수입량을 전체 수입량으로 나누어서 표현하므로 질적특성을 표현한다는 측면에서 다르다.

혁신역량과 생산역량을 동시에 고려하면 혁신적 아이디어를 국제경쟁력을 보유한 수출상품으로 만들어낼 수 있는 종합적인 기술의 수준을 파악할 수 있는데, 이를 종합기술역량이라고 정의할 수 있다. 본 연구에서는 혁신역량과 생산역량의 곱으로 종합적인 기술역량을 표현한다.

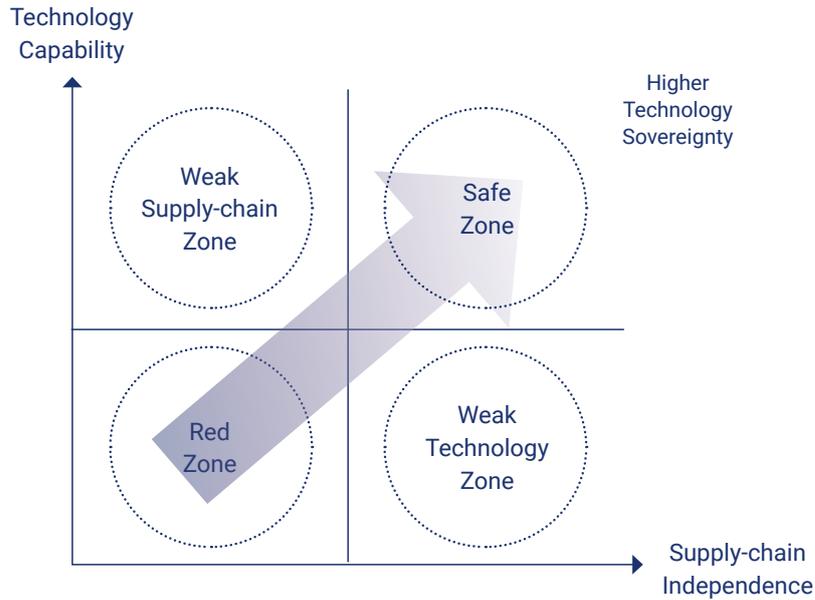
이상의 논의를 종합하면 아래의 [그림1]에서 표현된 기술주권 평가 프레임워크를 생각할 수 있다.

그림 1 기술주권과 구성요소들의 관계



[그림 1]에서 제시된 프레임워크를 활용하면 한 국가의 기술주권 상황을 크게 종합기술역량과 공급망 독립성의 정도에 따라 다음의 [그림 2]와 같이 2차원 평면상에서 직관적으로 파악할 수 있다. [그림 2]에서 1사분면은 공급망 독립성이 높고, 종합기술역량도 높아 기술주권이 높은 안전지대(safe zone)에 해당한다. 2사분면은 종합기술역량은 높지만, 공급망 독립성이 낮은 상태를 의미하며, 자국 생산역량이 부족해 수입에 의존할 수 밖에 없을 때, 특정 국가에 수입을 과도하게 의존하는 경우에 해당한다. 따라서 이 경우는 공급망 위험 지대(weak supply-chain zone)에 해당한다. 4사분면은 반대로 공급망 독립성은 높지만, 종합기술역량이 낮아 역시 기술주권 관점에서 문제가 있으며, 이 영역은 기술 위험 지대(weak technology zone)이라고 할 수 있다. 3사분면은 종합기술역량과 공급망 독립성 모두에서 취약성이 있어 기술주권이 극히 낮은 위험한 상태(red zone)를 의미한다.

그림 2 기술주권의 상태



2.3. 기술주권과 국가정책

기술주권의 3가지 구성요소들은 기술주권과 관련된 주요 정책과 매치된다. 첫째, 혁신역량과 관련해서는 연구개발을 지원하기 위한 각종 보조금 및 조세지원정책, 차세대 인재육성과 해외 인재 유치 정책, 과학기술인프라 구축 등 전통적인 과학기술 및 혁신정책이 포함된다. 둘째, 생산역량과 관련된 정책은 제조업 육성, 리쇼어링(reshoring), 노동인력확보, 클러스터 조성, 인증 및 표준, 시설투자에 대한 세액공제(tax credit), 대출(loans) 등 생산기반과 관련된 각종 정책으로서 특정 산업에 대한 국내 생산역량 강화를 위한 전통적인 산업정책이 포함된다. 셋째, 공급망 독립성과 관련해서는 양자 또는 다자간 무역협정(bi- or multilateral trade agreements), 수출 통제(export controls), 공급망 다각화 조치(supply-chain diversification measures), 외국 경쟁사에 대한 해외직접투자 제한(foreign direct investment restrictions for foreign competitors) 등 통상과 관련된 정책이 포함된다.

혁신정책, 산업정책, 그리고 통상정책은 지향하는 목표시점이 다르다. 혁신정책이 가장 장기적 시계를 가지고 있고, 산업정책은 중기, 그리고 통상정책은 정책의 목표시점을 상대적으로 가장 단기적으로 설정한다. 이를 요약하면 다음의 [표 1]과 같다.

표 1 기술주권의 구성요소와 정책의 매치

기술주권 구성요소	기술주권(TS)		
	종합기술역량(TC)		공급망 독립성(SI)
	혁신역량(IC)	생산역량(PC)	
정책	과학기술정책/혁신정책	산업정책	통상정책
시계(time horizon)	장기	중기	단기

미국, 유럽, 중국, 일본의 기술주권과 관련하여 발표된 정책은 앞서 제시한 프레임과 같이 과학기술정책, 산업정책, 그리고 통상정책을 복합적으로 활용하고 있음을 알 수 있다. 이를 미국, EU, 중국, 한국에서 발표되었던 반도체 산업 관련 정책을 예시로 세부정책을 분해하여 제시하면 다음의 [표 2]와 같다.

표 2 반도체 산업 관련 기술주권 정책의 세부정책 요소의 사례

국가	세부정책 요소		
	과학기술정책/혁신정책	산업정책	통상정책
미국 반도체 및 과학법	<ul style="list-style-type: none"> · 국립 반도체 기술센터 (NSTC), 첨단 패키징 제조 프로그램, 반도체 제작 연구소(Manufacturing USA Semiconductor Institute) 등에 대한 R&D 지원(110억 달러) · 반도체 기술의 대학 기반 프로토타이핑 및 랩 투 팸(lab-to-fab) 전환(20억 달러) 	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 반도체 시설 건립 지원 (390억 달러) · 국내 고속연 반도체 인력 개발(2억 달러) · 국내 반도체 공장 설립에 대한 25% 세액 공제 	<ul style="list-style-type: none"> · 국제 정보통신기술 보안 및 반도체 공급망 지원(5억 달러) · 자금 수혜기업이 중국 등 기타 우려 국가(countries of concern)에 반도체 제조 시설의 확장 금지 조치
EU 유럽 반도체법	<ul style="list-style-type: none"> · 가상 설계 플랫폼 구축을 통한 유럽의 집적 반도체기술 설계 역량 강화 · 차세대 칩의 프로토타이핑 및 테스트를 위한 파일럿 라인 구축 · 양자 칩 기술 및 엔지니어링 역량 개발을 위한 R&D 투자 	<ul style="list-style-type: none"> · 통합 생산 설비 및 개방형 EU 파운드리를 정의하고 각 회원국의 역내 최초로 인정받을 경우 보조금 심사의 패스트트랙 허가 신청 지원 · 역량 센터 네트워크 형성을 통한 반도체 분야 숙련 노동력 확대 지원 · 반도체 기금(Chips Fund) 운영을 통한 스타트업, 스케일업, 중소기업에 대한 자금 지원 	<ul style="list-style-type: none"> · EU 회원국 간 협력을 통한 반도체 공급망 모니터링과 위기 대응을 위한 정보 수집 및 대응 조치 평가를 위한 톨박스 수립

국가	세부정책 요소		
	과학기술정책/혁신정책	산업정책	통상정책
중국 신시대 집적회로 산업 및 소프트웨어 산업 고품질 발전 추진 정책	<ul style="list-style-type: none"> · 첨단 메모리, 컴퓨팅, 제조, 패키징/테스트, 반도체 기술 등의 분야에 대한 R&D 프로젝트 우선 투자 · 대학 내 집적회로 및 소프트웨어 전공학과 확대, 교육 실험실 및 인턴십 구축 	<ul style="list-style-type: none"> · 집적회로 생산기업에 대해 공정 난이도(28 nm~130 nm 이하)에 따른 차등적인 기업소득세 면제 (처음 2년~10년간) 	<ul style="list-style-type: none"> · 집적회로 생산, 첨단 패키징 및 테스트 기업에 대해 자체 사용 목적의 장비, 재료, 소프트웨어에 대한 수입 관세 면제
한국 반도체 메가 클러스터 조성방안	<ul style="list-style-type: none"> · 판교(AI 반도체), 수원(화합물 반도체), 평택(차세대 소자/첨단 패키징)에 3대 미래 반도체 기술 허브 구축 · 반도체특성화 대학원 확대, AI-시스템반도체 특화 교육 등을 통한 R&D 인력 양성 	<ul style="list-style-type: none"> · 반도체 R&D 및 시설투자에 대한 세액 공제(대 중견기업 15%, 중소기업 25%) · 팹리스 스케일업을 위한 금융 자금 지원(24조 원) 및 반도체 생태계 펀드 투자(3천억 원) 	<ul style="list-style-type: none"> · 한·미·일 간 공급망 조기경보시스템(EWS) 및 한·네 간 공급망 대화체 구축을 통한 공급망 위기 대응 · 반도체 장비 주요국과의 양자 및 다자 수출통제체제 구축

출처: The White House (2022), European Union (2023), 国务院(2020), 산업통상자원부 보도참고자료(2024. 1. 15.).

한가지 주목해야 할 점은 생산역량과 관련된 산업정책, 그리고 공급망 독립성과 관련된 통상정책은 경제안보(economic security)와 관련된 정책들에서 포함되는 내용과 같다. 이를 달리 표현하자면, 기술주권은 혁신역량과 경제안보역량의 합으로도 해석할 수 있고, 따라서 종합적으로 기술주권을 향상시키기 위한 정책은 혁신정책과 경제안보정책을 복합적으로 사용해야 한다는 점을 알 수 있다.

위의 예시에서와 같이 본 연구에서 제시하는 기술주권 프레임워크를 활용하게 되면 현실에서 진행되고 있는 기술주권과 관련된 각국의 정책 현황을 체계적이고 논리적으로 잘 이해할 수 있다. 특히 기술주권 정책이 좁은 의미의 과학기술혁신 관련 정책에 한정된 것이 아니라 산업정책과 통상정책을 포함하는 넓은 개념임을 이해할 수 있다.

3. 기술주권의 조작적 정의와 필요 자료

3.1. 기술주권 구성요소의 정의

기술주권 구성요소 중 첫 번째인 혁신역량(IC)은 그 국가가 국제특허를 타국에 비해 상대적으로 얼마나 많이 보유하고 있는지로 표현할 수 있다. I_{ci} 를 c 국가의 i 번째 산업분야의 특허수라고 하고, $I_i (= \sum_c I_{ci})$ 를 i 산업분야에서 모든 국가가 출원한 특허수의 총합이라고 할 때, c 국가의 i 산업에 대한 혁신역량 지표를 아래의 수식과 같이 정의한다.

$$(1) \quad IC_{ci} = I_{ci} / I_i$$

한 국가내에는 여러 산업이 있으므로, 집계를 하기 위해서는 가중치가 필요하다. 본 연구에서는 산업분야간의 상대적 중요성을 표현하기 위해 제품복잡성지수(Product Complexity Index, PCI)를 0과 1사이의 값으로 스케일을 조정하고 총합이 1이 되도록 확률분포로 재정규화한 \widehat{PCI}_i 를 가중치로 활용하여 아래와 같이 합산한다. PCI는 각 산업의 산출물을 생산하는데, 복잡하고 고급수준의 기술을 요구하는지, 즉 필요한 지식과 기술의 다양성 및 고유성(uniqueness)이나 정교성(sophistication)의 정도를 표현하기 위해 개발된 지표로서 기존의 국가간 산업경쟁력 비교 연구에서 많이 활용되어 왔다(Hidalgo & Hausmann, 2009; Felipe et al., 2012; Hausmann et al., 2014; Córcoles et al., 2014; Stojkoski et al., 2016; Le et al., 2022; Mealy & Teytelboym, 2022).

$$(2) \quad IC_c = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot IC_{ci})$$

혁신역량지표를 위와 같이 표현하면, 우리의 직관과 어울리게 i 산업분야에서 c 국가의 특허가 늘어날수록 IC_{ci} 가 높아져서 국가의 혁신역량, IC_c 가 높아지고, c 국가가 기존에 특허를 출원해본 적이 없는 새로운 분야에 특허를 출원하게 되면 역시 IC_c 가 높아지는 바람직한 지표의 성질을 얻을 수 있다.

두 번째, 생산역량(PC)은 생산기술의 정도를 표현하며 수출시장에 내어놓는 수출물량을 기준으로 평가할 수 있다. 이는 국내생산도 중요하지만, 수출시장에 나갈 수 있을 정도의 품질을 가진 상품을 생산할 수 있는 기술이 있어야 한다는 의미다. 생산역량은 혁신역량(IC)과 마찬가지로 X_{ci} 를 c 국가의 i 산업분야 수출량이라 하고, $X_i (= \sum_c X_{ci})$ 를 i 산업분야의 모든 국가의 수출물량 합이라고 할 때, c 국가의 i 산업에 대한 생산역량지수는 아래와 같이 정의된다.

$$(3) \quad PC_{ci} = X_{ci} / X_i$$

국가내 전산업에 걸쳐 합산할 경우에는 산업분야간에 중요성이 다를 수 있으므로, 산업분야의 제품복잡성 지수 PCI를 0에서 1사이의 값으로 스케일을 조정하고 총합이 10이 되도록 확률분포로 재정규화한 \widehat{PCI}_i 를 가중치로 활용하여 아래와 같이 합산한다.

$$(4) \quad PC_c = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot PC_{ci})$$

위와 같이 생산역량을 정의하면, c 국가의 i 산업분야에서 수출량이 늘어날수록 PC_c 가 높아지고, 새로운 분야에 수출을 시작하게 되는 경우에도 역시 PC_c 가 높아지는 직관과 어울리는 바람직한 성질을 얻을 수 있다. 이렇게 할 경우 기존의 현시비교우위지수(Revealed Comparative Advantage, RCA)의 합과 모종의 관계를 갖게되는데 이에 대해서는 Appendix A를 참조할 수 있다. Appendix A의 논의는 PC와 구조가 동일한 IC에 대해서도 동일하게 성립한다.

혁신적 아이디어를 제시할 수 있는 역량(IC)과 이를 상품으로 생산할 수 있는 역량(PC)의 곱의 형태로 종합기술역량(TC)을 정의할 수 있다. 이는 국가의 종합적 기술역량이 혁신역량과 생산역량으로 구성되었다는 기존 논의를 충실히 반영하는 것이다. 또한 두 역량 모두를 보유하고 있어야 종합기술역량이 높고, 둘 중 하나라도 부족한 상황이라면 단순 둘의 평균보다 종합기술역량이 할인된 방식으로 평가되어야 함을 의미한다. 아래의 종합기술역량 지표의 계산식은 혁신역량과 생산역량의 두 세부지표를 종합적으로 고려하면서 결과값 역시 0과 1사이의 값으로 정규화된 상태로 도출된다.

$$(5) \quad TC_{ci} = \sqrt{(IC_{ci} + \alpha)(PC_{ci} + \alpha)} - \alpha$$

위와 같이 정의할 경우 종합기술역량 지표 TC의 값은 IC와 PC의 기하평균과 산술평균 사이의 값을 갖는다. 본 연구에서는 α 값을 10^{-4} 으로 설정하는데, 이와 관련한 보다 상세한 논의는 Appendix B에서

찾아볼 수 있다.

각 산업별 TC를 한 국가내에서 합산할 경우 산업분야의 PCI를 0에서 1사이의 값으로 스케일을 조정하고 총합이 1이 되도록 확률분포로 다시 정규화한 \widehat{PCI}_i 를 가중치로 활용하여 아래와 같이 합산한다.

$$(6) \quad TC_c = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot TC_{ci})$$

세 번째 요소인 공급망 독립성(SI)은 생산역량이 부족하여 수입할 수 밖에 없을 때 특정 국가에 얼마나 의존하지 않는 정도를 표현하는 것으로 수입량을 기초자료로 하여 정의할 수 있다. M_{ci} 를 c 국가의 i 산업분야 수입량이라 하고, M_{ci}^1 를 c 국가의 i 산업 수입액 중 최대수입대상국으로부터의 수입액을 의미한다고 할 때 c 국가의 i 산업에 대한 공급망 독립성 지수는 아래의 수식과 같다.

$$(7) \quad SI_{ci} = 1 - \frac{M_{ci}^1}{M_{ci}}$$

각 산업별 SI를 한 국가내에서 합산할 경우 산업분야의 PCI를 0에서 1사이의 값으로 스케일을 조정하고 총합이 1이 되도록 확률분포로 다시 정규화한 \widehat{PCI}_i 를 가중치로 활용하여 아래와 같이 합산한다

$$(8) \quad SI_c = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot SI_{ci})$$

위와 같이 정의하면, c 국가의 i 산업내에서 최대 수입대상국에 대한 의존도가 낮아질 때 SI_c 가 높아지고, 새로운 산업에서 수입을 하기 시작하면 SI_c 가 낮아지는 직관적으로 바람직한 성질을 만족한다.

3.2. 필요 자료

기술주권의 정량적 측정을 위해서는 많은 산업과 기술분야에 걸쳐 자료가 필요하고, 특히 많은 국가의 자료를 체계적으로 활용할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 쉽게 업데이트 될 수 있는 자료에 근거하여야 한다. 이를 감안하여 본 연구에서는 기술주권의 세부구성요소들을 측정할 때 주기적으로 업데이트되는 공개자료로서 국가별 국제특허실적과 수출, 수입 자료만을 사용하기로 한다. 이는 분석결과의 재현성(replicability)을 위해서 중요하고, 향후 주기적으로 결과를 쉽게 업데이트하는데도 중요한 요건이다. 즉, 국제특허 및 수출입 자료는 공식기구에서 정기적으로 업데이트하기 때문에 기술주권 프레임워크를

시스템으로 구축할 경우 자동적으로 업데이트 된 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

혁신역량은 특허자료에 기반하는데, 유럽특허청의 특허통계정보(Patent Statistical Database, PATSTAT) 데이터를 기반으로 OECD에서 공개하고 있는 미국특허청(United States Patents and Trademark Office) 등록자료를 활용한다. 기술분류는 국제특허분류(IPC)의 4-digit 단위로 658개 종류로 구분하였다. 수출입 자료는 유엔 상품 무역 통계 데이터베이스(UN Comtrade) 데이터를 기반으로 국제경제연구센터(Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales, CEPII)에서 수집하여 공개하는 BACI 데이터 세트를 사용한다. 산업분류는 HS12(Harmonized System, 2012 ver.) 분류에 따라 집계된 6-digit 단위의 5198개 종류로 구분된다. 특정 산업별로 특허자료를 분류하고 취합하기 위해서 한국 특허청에서 발표한 산업품목-특허 연계표를 활용한다(특허청, 2023). 분석에 사용하는 산업분류의 상세 정도는 분석목적에 맞추어 더 집계된 소수의 분류로 하거나 더 상세한 다수의 분류로 할 수 있다.

본 연구의 실증분석은 원자료들에 포함된 모든 국가들을 대상(특허 100여개 국가, 수출입 250여개 국가)으로 이루어졌지만, 본 논문에서는 경제발전 수준과 기술주권 관점에서의 국제적 관심정도를 고려하여 국제통화기금(International Monetary Fund)에서 제공하는 데이터의 2002년을 기준으로 국내총생산(Gross domestic product, GDP) 상위 50개국을 대상으로 결과치를 시각화하여 제시한다. 특히 직관적 정보를 전달하기 위해 국가별 랭킹을 중심으로 제시하였다.

분석구간은 최근 글로벌 산업 및 기술 환경의 변화에 초점을 맞추기 위해 2012년도에서 2022년도까지로 한정하였다.

4. 국가수준 기술주권의 정량적 분석결과

4.1. 혁신역량, 생산역량, 공급망 독립성

혁신역량의 국가간 순위를 5년단위로 나타내면 다음의 [그림 3]과 같다. 2022년을 기준으로 할 때 혁신역량의 순위는 미국, 일본, 중국, 독일, 한국, 프랑스 순으로 나타나고 있다. 주목할만한 점은 중국이 2012년 9위에서 빠른 속도로 역량이 증가하여 2022년 3위에 이른 것이다. 이는 여러 자료에서 드러난 것처럼 중국의 국가적 과학기술투자가 급속히 늘고, 이에 따라 특허로 표현된 혁신의 성과 역시 빠르게 증가하였다는 기존의 관찰결과와 일치하는 것이다(Hu & Mathews, 2008; OECD, 2017; WIPO, 2023; Clay & Atkinson, 2023; CICC Research & CICC Global Institute, 2024).

생산역량을 분석한 결과는 다음의 [그림 4]와 같다. 예상과 같이 '세계의 공장'이라 불리는 중국은 2012년에 이미 가장 높은 생산역량을 갖춘 국가로 등장했고, 그 뒤를 이어 전통적으로 첨단 산업 관련 제조업에 강점을 가지고 있는 독일, 미국이 안정적으로 높은 순위에 위치하고 있다. 또한, 유럽국가들과 일본, 대만, 한국이 높은 순위를 유지하고 있다. 특이하게 새로운 생산기지로 떠오르는 베트남은 지난 10년간 생산역량에서 32위에서 19위로 큰 성장을 이룬 것을 확인할 수 있다. 이 역시 국가간 생산역량과 관련된 기존 연구의 관찰결과들과 일치하는 것이다(Li, 2018; IMF, 2022; Dhar et al., 2023).

공급망 독립성(SI)의 분석결과를 다음의 [그림 5]와 같다. 흥미롭게도 혁신역량(IC)와 생산역량(PC) 측면에서 높은 순위를 보였던 미국과 중국의 공급망 독립성 순위가 낮은 것으로 나타났고, 반면 독일은 공급망 독립성이 안정적인 것으로 나타났다. 한편 2022년을 기준으로 일본(28위), 한국(33위), 대만(31위)의 공급망 독립성이 낮은 것으로 나타났다. 이들 국가는 제조업, 특히 하이테크 산업의 혁신과 생산역량은 높지만, 중간재를 중국 등 특정 국가에 집중적으로 의존하는 공통된 특성을 가지고 있다. 따라서 이들이 코로나 사태나 무역분쟁 등으로 인한 수출입 규제 등 공급망의 혼란이 있을 때 특히 취약하다는 문제점을 가지고 있다는 기존 연구결과와 부합하는 것이다(Hertel et al., 2014; Martin et al., 2023).

그림 3 혁신역량(IC)의 국가간 순위(2012, 2017, 2022)

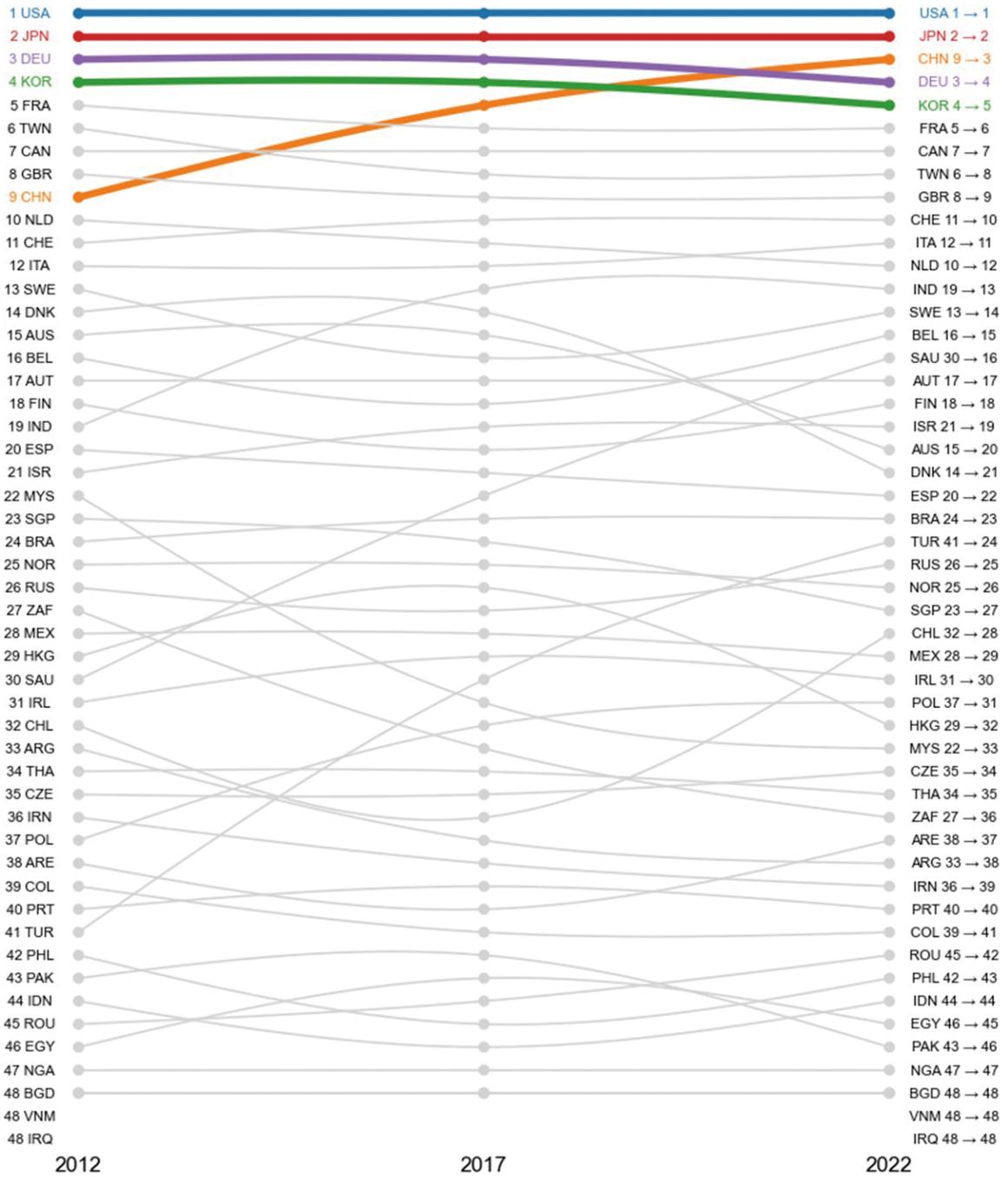


그림 4 생산역량(PC)의 국가간 순위(2012, 2017, 2022)

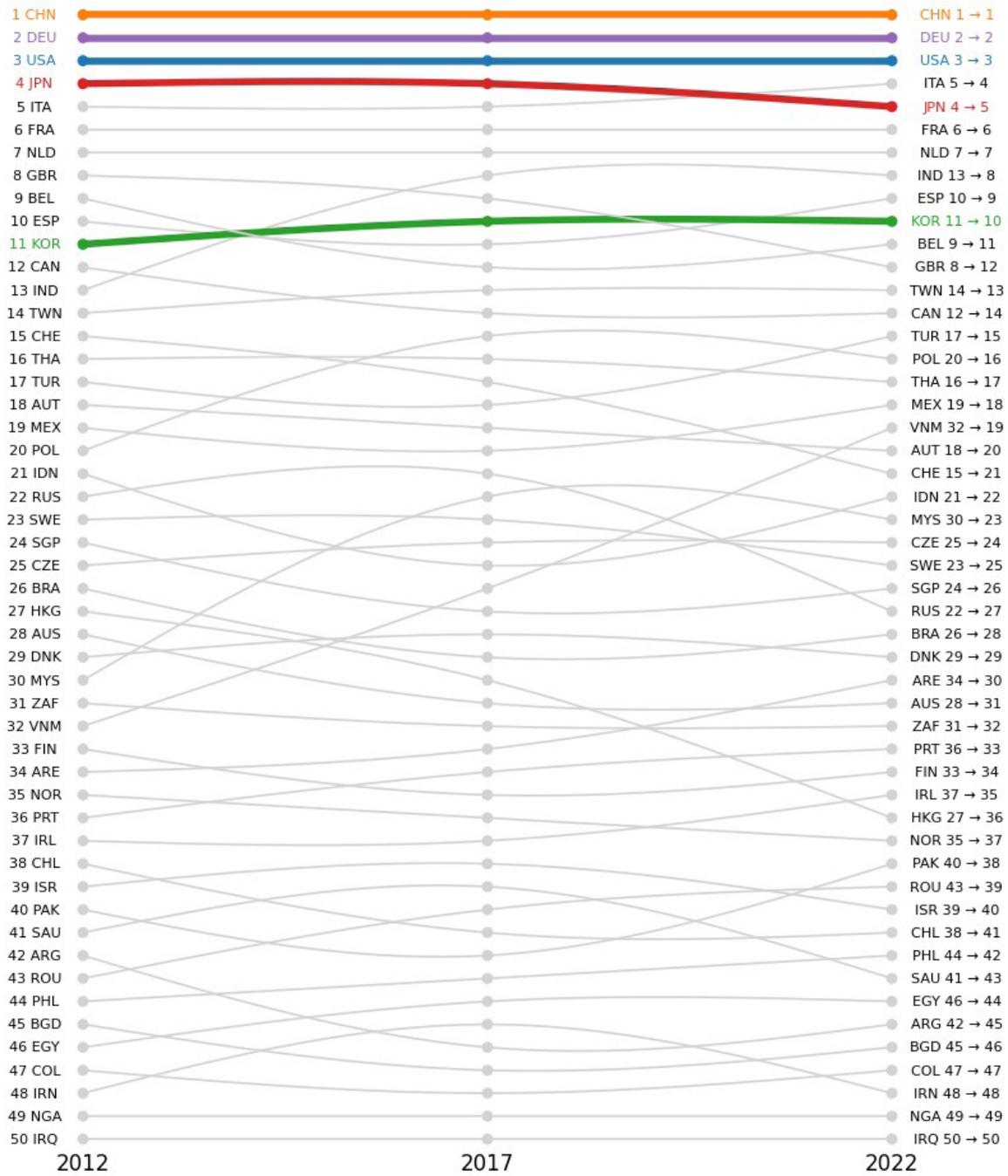


그림 5 공급망 독립성(S)의 국가간 순위(2012, 2017, 2022)

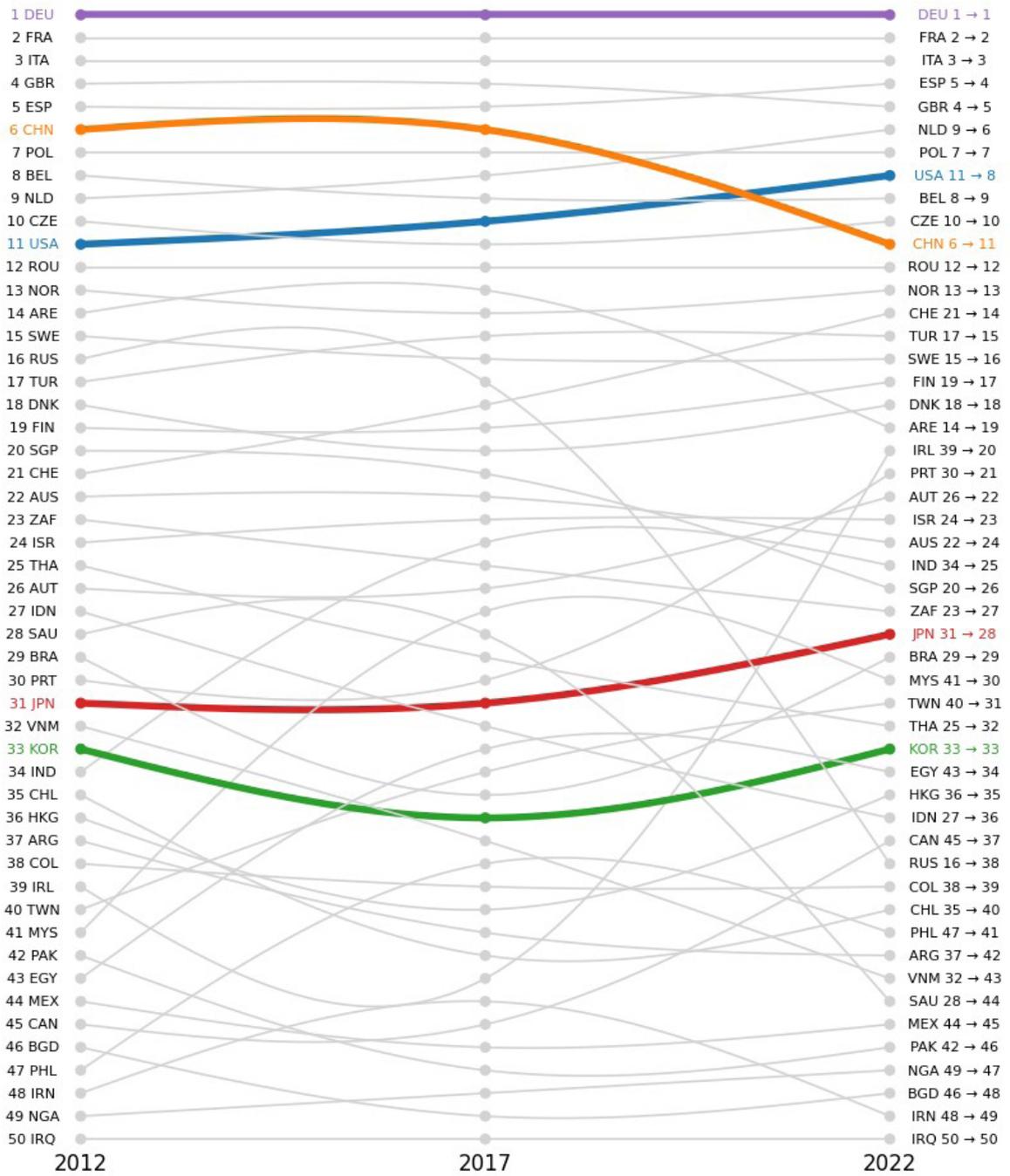
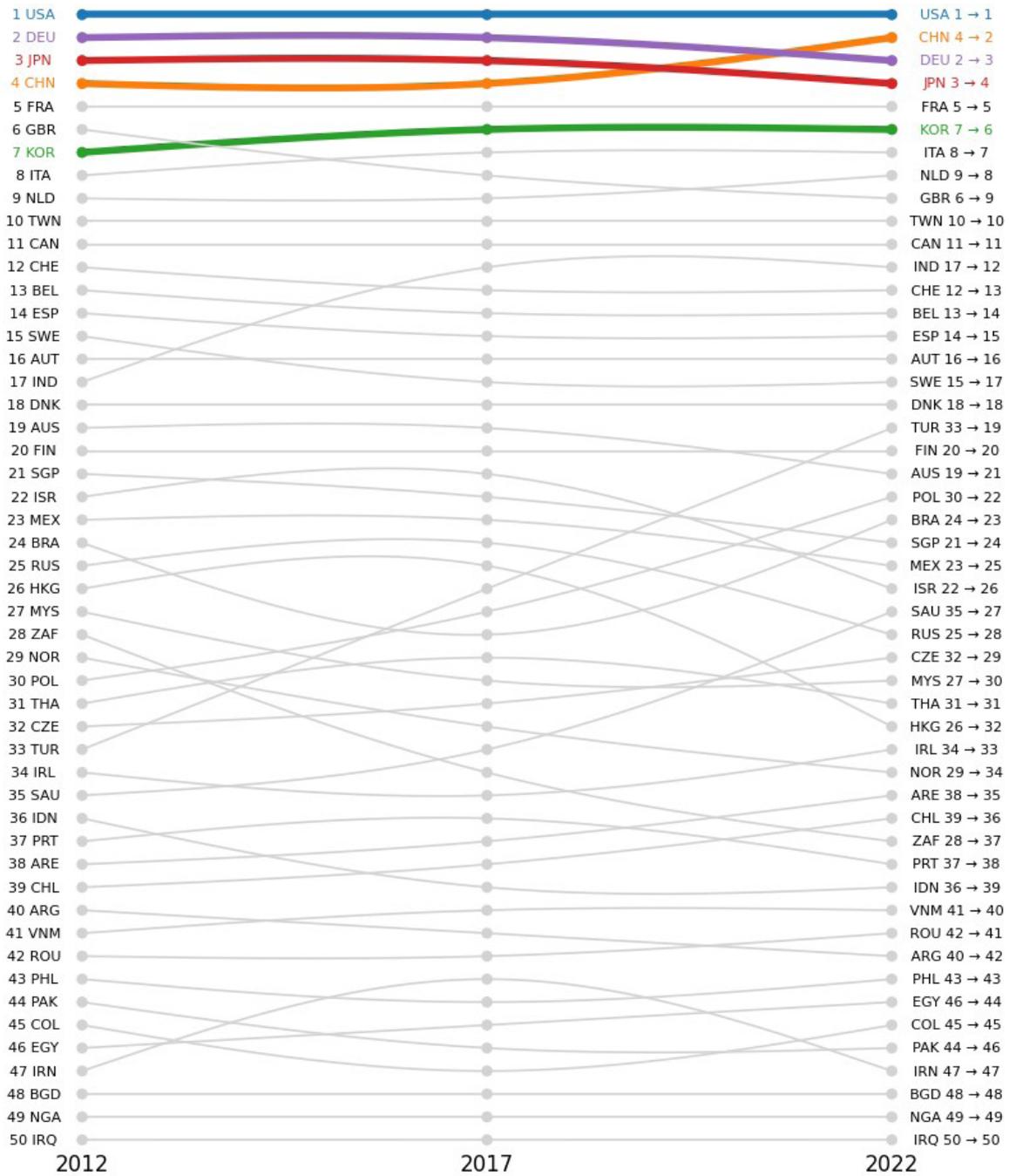


그림 6 종합기술역량(TC)의 국가간 순위(2012, 2017, 2022)

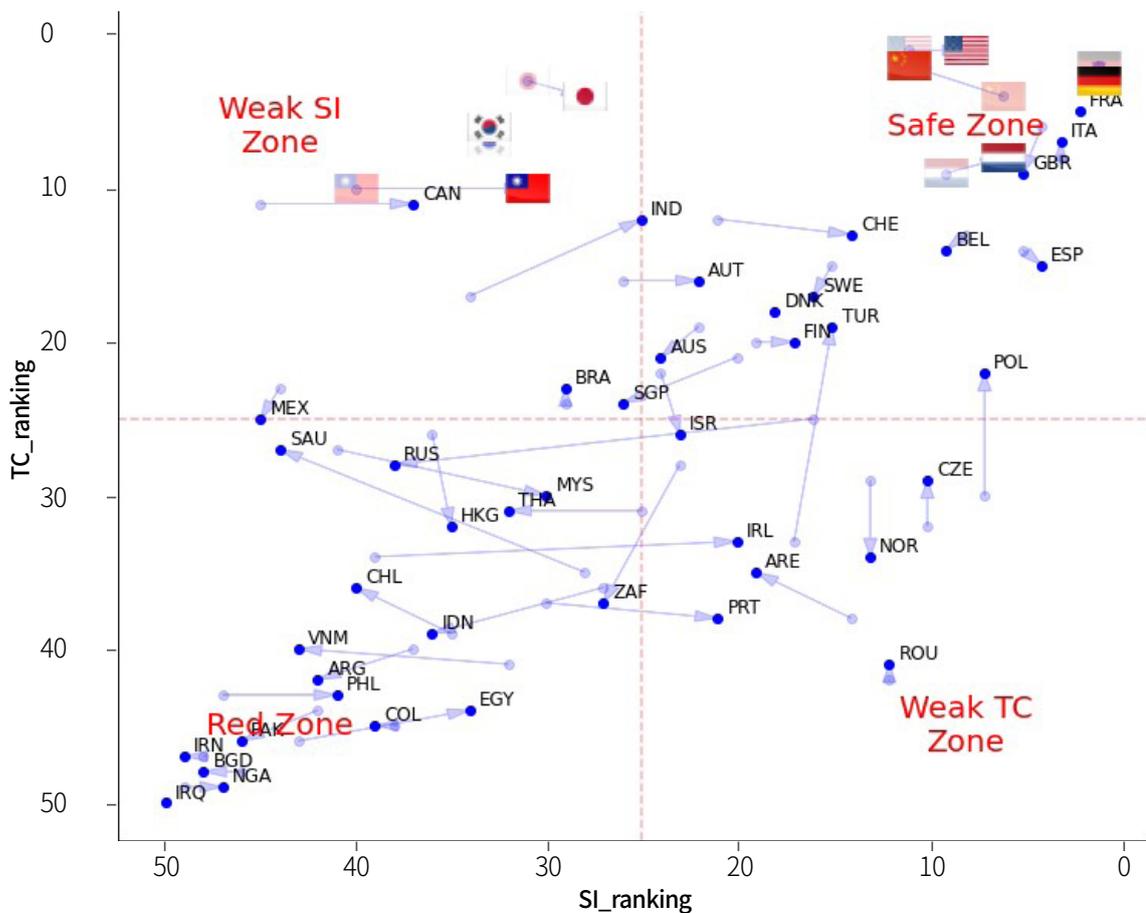


혁신역량과 생산역량을 복합지수로 표현한 종합기술역량 지수를 분석한 결과는 다음의 [그림 6]과 같다. 미국, 중국, 독일, 일본, 프랑스, 한국 등과 같이 혁신적인 아이디어를 상품으로 생산 가능한 국가들이 상위권에 위치하고 있다.

4.2. 국가별 기술주권의 상대적 위치

기술주권을 크게 종합기술역량과 공급망 독립성으로 구분하여 4사분면에 표시하면 다음의 [그림 7]과 같다. 우상향의 안전지대(safe zone)에 미국, 독일, 중국 등과 같이 높은 종합기술역량과 공급망 독립성으로 기술주권을 확보한 국가들이 위치하고 있다 반면, 한국, 일본, 대만 등은 종합기술역량은 높으나 공급망 역량이 낮아 공급망 역량 취약구역(weak SI zone)에 위치해 있다. 종합기술역량은 낮으나 공급망 역량이 높은 기술역량 취약구역(weak TC zone)에는 천연자원 수출을 많이 하거나(아랍에미레이트, 노르웨이 등), 조립생산 역량을 보유한 국가(체코, 루마니아 등)들이 위치해있다. 시간에 따른 국가 간 위치 변화를 보기 위해 2012년과 2022년을 비교하였는데, 종합기술역량이 높은 국가 중 특히 한국과 중국을 제외한 대부분의 국가들은 공급망 독립성이 소폭 좋아졌으나, 중국은 순위가 소폭하락하고 한국은 여전히 높은 종합기술역량 대비 공급망 독립성이 낮은 순위에 머물러 있음을 주목해볼 수 있다.

그림 7 종합기술역량(TC)과 공급망 독립성(SI)을 고려한 기술주권의 국가간 위치의 변화(2012, 2022)

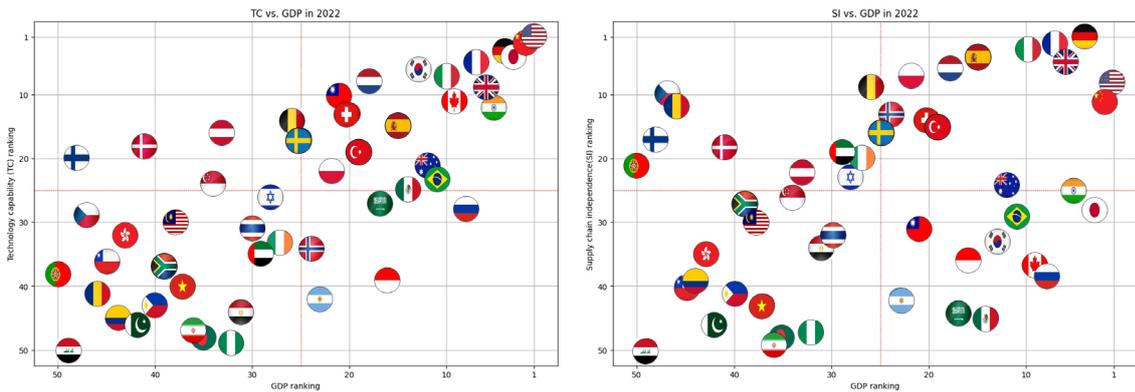


4.3. GDP 순위와 종합기술역량 및 공급망 역량 순위의 비교

기술주권의 핵심구성요소인 종합기술역량과 공급망 역량을 GDP 순위와 비교해보면 다음의 [그림 8]과 같다. 종합기술역량 순위와 GDP순위는 대체로 양의 상관관계가 있는 것으로 보인다. 그러나 사우디아라비아, 아르헨티나, 인도네시아, 브라질처럼 기술역량이 낮으면서도 GDP 순위가 높은 국가들이 있는데, 해외직접투자(foreign direct investment)에 기반한 수출이나 천연자원 수출의 비중이 높은 국가들이라는 공통점이 있다.

공급망 독립성 순위와 GDP 순위간의 관계는 좀 더 약하게 나타난다. 예를 들어 한국과 일본 등은 공급망 독립성이 낮음에도 불구하고 높은 GDP 순위를 보이고 있다. 이들 국가는 향후 공급망의 교란이 있을 경우 국가 경제에 다른 나라보다 더 큰 타격을 받을 가능성이 클 것임을 시사한다.

그림 8 기술역량(a) 및 공급망 독립성(b)과 GDP와의 관계(랭킹; 2022)



(a)기술역량과 GDP의 관계

(b)공급망 독립성과 GDP의 관계

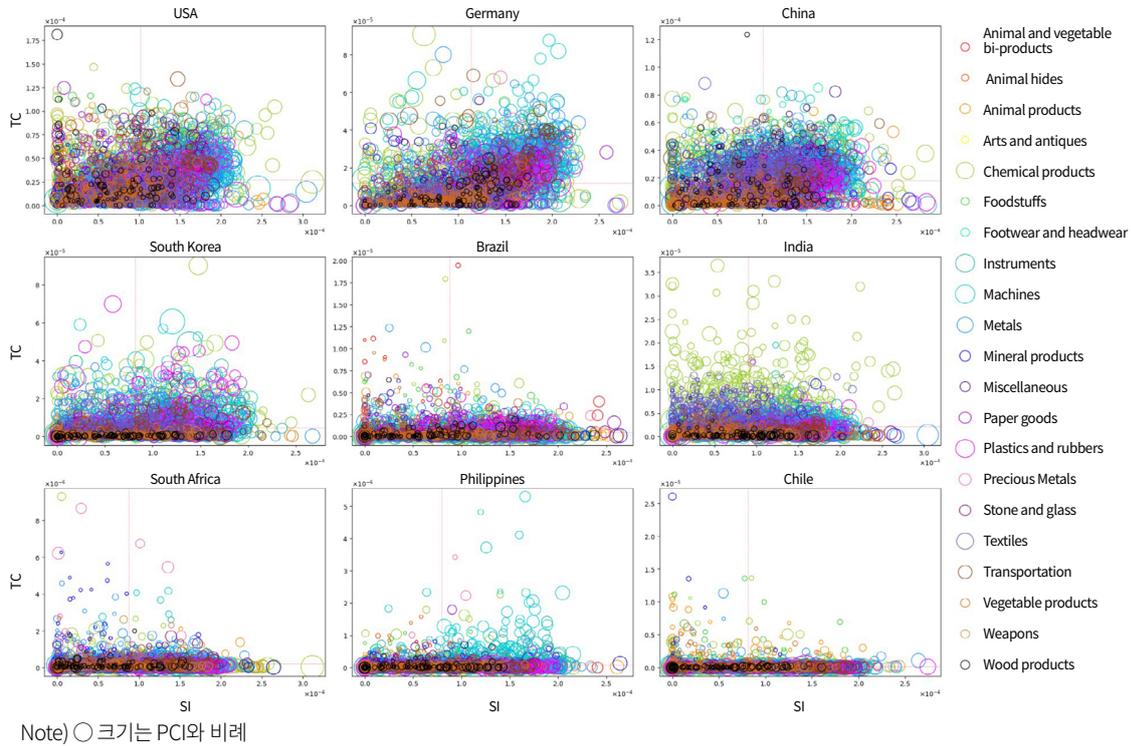
5. 기술주권 프레임워크의 응용

5.1. 국가내 산업별 기술주권의 비교

본 연구의 기술주권 프레임워크는 한 국가내에서 산업별로 어떤 산업이 특히 취약한지를 기술역량과 공급망 독립성을 비교 분석하는데 활용할 수 있다. 아래 [그림 9]에서는 국가내 산업별 기술주권을 큰 틀에서 비교 분석하기 위하여 HS code를 6자리에서 4자리로 변환하였다. 이를 통해 주요 국가에 대해 분석한 결과를 6자리 HS code보다 시각적으로 직관적이며 비교가 용이하게 제시하였다.

[그림 9]에서도 알 수 있듯이 국가마다 처한 국제교역망상의 맥락과 산업생태계의 특성에 따라 기술주권의 상태가 다르게 주어진다 것을 알 수 있다. 예를 들어 첫 번째 줄에 위치한 미국, 독일, 중국과 같은 경제 대국들은 다양한 산업에서 높은 종합기술역량을 보이고 있으며, 특히 PCI가 높은 제품들을 중심으로 높은 종합기술역량과 함께 공급망 독립성을 가지고 있는 특징을 보여주고 있다. 두 번째 줄에 위치한 국가 중 한국은 미국, 독일, 중국과 유사한 특징을 보이고 있으나, 나머지 두 국가인 브라질과 인도는 일부 산업에만 종합기술역량과 공급망 안정성을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 마지막으로 상대적으로 소득이 낮은 국가들은 대부분의 산업에서 종합기술역량과 공급망 독립성이 낮은 결과를 보여주며, PCI가 낮은 제품 중심으로 종합기술역량을 보유하고 있다는 문제점을 드러냈다. 이러한 분석결과는 모든 국가가 기술주권에 대해 관심을 가지고 있지만, 초점을 두어야 할 산업과 중점을 두어야 할 정책이 차별화되어야 함을 시사한다. 본 분석의 프레임워크를 정책처방 차원에서 활용하면 기술주권 관점에서 특히 관심을 두어야 할 타겟산업을 식별할 수도 있다.

그림 9 국가내 산업별 기술주권의 비교(2022; HS code 4-digit)

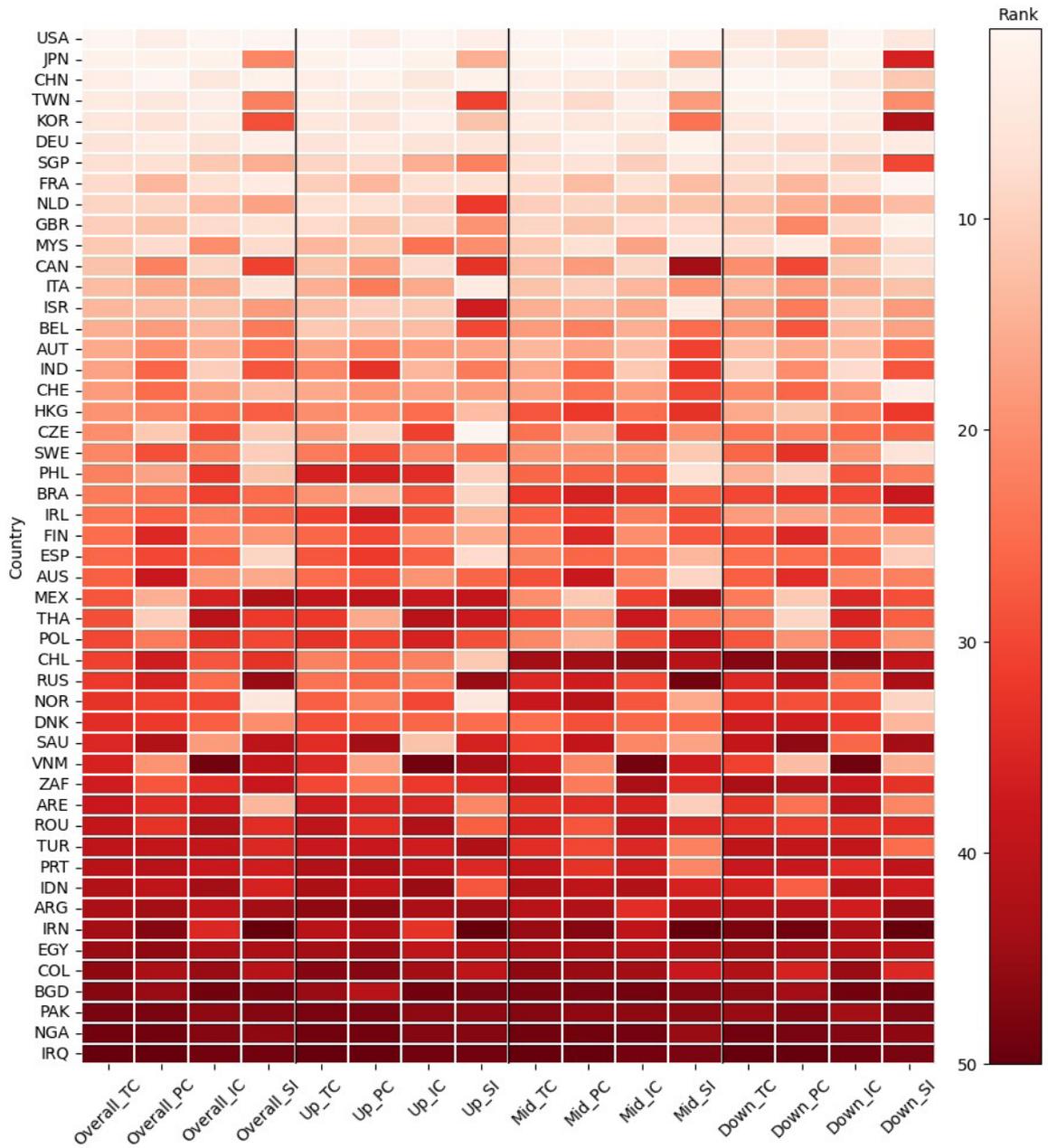


5.2. 특정 산업에 대한 기술주권 상태의 국가간 비교

본 연구에서 제시한 기술주권 프레임워크는 전산업이 아니라 특정 산업을 대상으로도 적용이 가능하다. 그 사례로서 반도체 산업을 예로 들면, Appendix C와 같이 반도체 산업의 글로벌 공급망 단계의 분류(taxonomy)를 활용하여 업스트림(Upstream: raw materials, inputs for wafers, silicon wafers, foundry inputs), 미드스트림(Midstream: equipment), 다운스트림(Downstream: final product)으로 나누어볼 수 있다(Bonnet and Ciani, 2023).

이를 바탕으로 기술주권 프레임워크를 공급망의 생산단계별로 적용하면 반도체 산업의 국가별 기술주권 수준을 비교해볼 수 있다. 한국의 반도체 산업의 경우를 예를 들면, 모든 단계에서 혁신역량, 생산역량, 기술역량은 높지만 공급망 독립성에는 취약점이 있음을 확인할 수 있다.

그림 10 반도체 산업의 공급망 단계별 기술주권 상태의 국가간 비교(2022)



Note) GDP 상위 50개 국가에 대해 반도체 산업의 공급망 단계별(overall, upstream, midstream, downstream) 기술주권 요소(IC, PC, TC, SI)에 대한 분석 결과를 순위로 표현

6. 요약 및 정책적 시사점

미중 기술경쟁이 심화되고, 글로벌 공급망의 혼란이 가중되면서 많은 나라에서 기술주권이 정책적 관심의 대상이 되고 있다. 이에 따라 혁신정책, 산업정책, 통상정책을 동원하여 기술주권을 향상시키기 위해 국가적 자원을 투입하고 있는 실정이다. 기술정책에 대한 정치적, 정책적 차원의 논의가 활발한데 비해 기술주권의 개념적 정의에 대한 공감대는 아직 분명하지 않다. 더구나 기술주권이 수준을 평가하기 위한 체계적인 프레임워크와 정량적인 분석시도는 충분히 이루어지고 있지 않은 상태다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 기술주권을 측정하기 위한 개념적 프레임워크를 제안하였다. 핵심은 기술주권이 혁신역량, 생산역량, 그리고 공급망 독립성의 세 가지 요소에 의해 결정된다는 점이다. 이 가운데 혁신역량과 생산역량은 종합적인 기술역량으로 합쳐서 표현할 수 있다. 이는 한 국가가 가진 기술역량이 새로운 혁신을 만들어내는 지식과 실제로 생산하는데 필요한 기술로 구성되어 있다는 기존 연구를 충실히 반영한 것이다. 본 연구의 프레임워크에 의하면 기술주권을 종합적인 기술역량과 공급망 독립성의 두 축으로 이루어진 이차원 평면상에 직관적으로 파악할 수 있다.

실증적인 측정을 위해서는 국제특허와 수출입 통계만을 활용하여 기술주권의 개별 구성요소를 측정할 수 있도록 조작적 정의를 제시하였다. 본 연구가 제시하는 조작적 정의들은 직관적으로 이해하기 쉬울 뿐만 아니라, 공개된 자료를 활용하므로, 제3자의 검증이 쉽고, 주기적으로 업데이트가 용이하다는 장점이 있다.

제시된 기술주권 프레임워크를 활용하여 국가간 기술주권의 구성요소별 비교와 전반적인 수준의 비교 결과를 제시하였다. 또한 프레임워크를 응용하여 특정 산업에 대해서도 적용할 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 반도체 산업을 대상으로 제시하였으나 모든 산업에 대해 개별적으로 적용이 가능하다. 한 국가내에 어떤 산업이 특히 기술주권 정책의 대상이 되어야 하는지를 식별하기 위해 산업간 비교 결과도 몇 개 국가에 대해 예시로 제시하였다.

분석의 결과 국가별로 기술주권의 수준이 다르게 나타난다는 점은 일차적인 관찰결과다. 그러나 보다 중요한 것은 기술주권을 결정하는 구성요인이 다르다는 점이다. 즉 기술주권을 높이기 위한 정책을 구상할때 장기적인 혁신정책, 중기적인 산업정책, 단기적인 통상정책 중 어떤 정책에 더 큰 관심을 두어야 하는지를 식별할 수 있다. 정책의 대상에 있어서도 국가가 처한 상황에 따라 더 큰 정책적 관심을 두어야 하는 산업이 다르게 나타나는 점도 기억해야 할 점이다. 같은 산업내에서도 업(up), 미들(middle), 다운(down) 스트림 등 어떤 생산사슬 부문에 특히 문제가 있는가 국가별로 다르게 나타나고 있다. 종합하면 국가별로, 산업별로, 공급망 단계별로 기술주권이 수준과 원인이 다르게 나타나고 있다는 점이 가장 중요한 교훈이다. 이는 기술주권에 관한 체계적인 프레임워크를 적용해 정량적으로 측정을 해본 다음에야 알 수 있는 사실이다.

언뜻 상식적으로 보이는 이 점은 현재 여러 국가에서 이루어지고 있는 기술주권 관련 논의에 중요한 시사점을 던지고 있다. 현재 많은 국가에서 발표되고 있는 기술주권 관련 정책은 대체로 비슷한 산업분야, 특히 유망하다고 알려진 소수의 산업분야를 대상으로, 유사한 정책 패키지를 서로 모방하는 방식으로 만들어지고 있다. 예를 들어 반도체 산업과 관련하여 미국, 유럽, 중국, 일본, 한국, 대만 등이 발표한 기술주권 관련 정책의 패키지를 비교해보아도 쉽게 알 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 본 연구에서 제시한 것과 같이 기술주권을 산업별로 망라해서 전체를 조망할 수 있는 체계적인 프레임이 없이 단편적인 증거에 의존하기 때문이다. 또는 분야별 전문가들 위원회의 의견을 상향식으로 취합하는 방식으로 정책을 만들기 때문에 전문가의 편향을 막을 수 없고, 분야간 중요성도 균형있게 비교할 수 없기 때문이다.

이러한 상황에서 본 연구의 프레임워크는 국가적 관점에서 기술주권의 분야별 수준을 파악하고, 그 원인을 차별적으로 분석함으로써, 기술주권 정책을 입안할 때 적절한 대상을 선정하고, 적절한 정책 수단을 선택하는데 객관적 증거자료를 제시할 수 있다. 이는 본 연구의 프레임워크가 증거기반 정책 수립의 중요한 도구가 될 수 있음을 시사한다.

본 연구의 프레임워크는 여러가지 관점에서 발전될 가능성이 있다. 국가간 의존도를 계산할때 정치적으로 우방국인이 아닌지의 여부를 조절변수로 반영함으로써 구조적 의존성을 우호적 국가간의 수입에 대해 차감하여 고려해줄 수 있다. 또한 특허 뿐 아니라 학술 논문 발표실적을 활용함으로써 과학-기술-생산간의 3차원 연계관계를 고려한 기술주권의 개념으로도 확장할 수 있다.

참고문헌

산업통상자원부. (2024. 1. 15.). (참고자료)“세계 최대·최고 반도체 메가 클러스터” 조성방안 발표. 대한민국 정책브리핑.

<https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156610676#pressRelease>

특허청(2023). 산업기술-특허(IPC,CPC)연계표.

<https://www.kipo.go.kr/ko/kpoContentView.do?menuCd=SCD0200273> (검색일: 2024. 4. 20.)

Araya, D., & Mavinkurve, M. (2022). *Emerging technologies, game changers, and the impact on national security*. Centre for International Governance Innovation.

<https://www.cigionline.org/publications/emerging-technologies-game-changers-and-the-impact-on-national-security/>

Balassa, B. (1965). Trade liberalization and “revealed” comparative advantage. *The Manchester School*, 33(2), 99-123.

<https://doi.org/10.1111/j.1467-9957.1965.tb00050.x>

Bauer, M., & Erixon, F. (2020). *Europe's quest for technology sovereignty: Opportunities and pitfalls* (ECIPE Occasional Paper No. 02/2020). European Centre for International Political Economy (ECIPE).

<https://hdl.handle.net/10419/251089>

Bonnet, P., & Ciani, A. (2023). *Applying the SCAN methodology to the semiconductor supply chain* (JRC Working Papers in Economics and Finance No. 2023/8). European Commission.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC133736>

Butollo, F., Staritz, C., Maile, F., & Wuttke, T. (2024). The end of globalized production? Supply-chain resilience, technological sovereignty, and enduring global interdependencies in the post-pandemic era. *Critical Sociology*. online publication.

<https://doi.org/10.1177/08969205241239872>

Caravella, S., Crespi, F., Cucignatto, G., & Guarascio, D. (2024). Technological sovereignty and strategic dependencies: The case of the photovoltaic supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140222.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140222>

Castellacci, F., & Natera, J. M. (2013). The dynamics of national innovation systems: A panel cointegration analysis of the coevolution between innovative capability and absorptive capacity. *Research Policy*, 42(3), 579-594.

<https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.10.006>

CICC Research, CICC Global Institute. (2024). Technological Innovation in China: Current State and Challenges. In *The Rise of China's Innovation Economy* (pp. 1-44). Springer, Singapore.

https://doi.org/10.1007/978-981-99-8231-8_1

- Clay, I., & Atkinson, R. D. (2023). *Wake Up, America: China Is Overtaking the United States in Innovation Capacity*. Information Technology & Innovation Foundation.
<https://itif.org/publications/2023/01/23/wake-up-america-china-is-overtaking-the-united-states-in-innovation-capacity/>
- Córcoles, D., Díaz-Mora, C., & Gandoy, R. (2014). Product sophistication: A tie that binds partners in international trade. *Economic Modelling*, 44, S33-S41.
<https://doi.org/10.1016/j.econmod.2013.12.009>
- Crespi, F., Caravella, S., Menghini, M., & Salvatori, C. (2021). European technological sovereignty: an emerging framework for policy strategy. *Intereconomics*, 56(6), 348-354.
<https://doi.org/10.1007/s10272-021-1013-6>
- Criscuolo, C., Gonne, N., Kitazawa, K., & Lalanne, G. (2022). *An industrial policy framework for OECD countries: Old debates, new perspectives* (OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 127). OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/0002217c-en>
- Criscuolo, C., & Lalanne, G. (2024). A new approach for better industrial strategies. *Journal of Industry, Competition, and Trade*, 24(6), 1-3.
<https://doi.org/10.1007/s10842-024-00416-7>
- Cristelli, M., Gabrielli, A., Tacchella, A., Caldarelli, G., & Pietronero, L. (2013). Measuring the intangibles: A metric for the economic complexity of countries and products. *PLoS one*, 8(8), e70726.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070726>
- Csernatoni, R. (2022). The EU's hegemonic imaginaries: From European strategic autonomy in defense to technological sovereignty. *European Security*, 31(3), 395-414.
<https://doi.org/10.1080/09662839.2022.2103370>
- Dachs, B. (2023). *The European Chips Act*. FIW Policy Brief (No. 58).
<https://hdl.handle.net/10419/274201>
- Danilin, I. V. (2021). The U.S.-China Technological War. *Russia in Global Affairs*, 19(4), 78-96.
<https://doi.org/10.31278/1810-6374-2021-19-4-78-96>
- Dhar, B. K., Tiep Le, T., Coffelt, T. A., & Shaturaev, J. (2023). US - China trade war and competitive advantage of Vietnam. *Thunderbird International Business Review*, 65(2), 255-263.
<https://doi.org/10.1002/tie.22325>
- Dortmans, P., Nicholson, J., Yeung, J., Black, J., Dewaele, L., & Knack, A. (2022). *Prioritising Critical Technologies of National Interest in Australia: Developing an Analytical Approach*. Rand Corporation.
<https://doi.org/10.7249/RRA1534-1>
- Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, 11(3), 147-162.
[https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)

Dosi, G. (1988). Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation. *Journal of Economic Literature*, 26(3), 1120-1171.

<http://www.jstor.org/stable/2726526>

Eum, W., & Lee, J. D. (2022). The co-evolution of production and technological capabilities during industrial development. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 454-469.

<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.07.001>

Edler, J., Blind, K., Frietsch, R., Kimpeler, S., Kroll, H., Lerch, C., ... & Walz, R. (2020). *Technology Sovereignty: from demand to concept* (No. 02/2020). Perspectives-Policy Brief.

<https://doi.org/10.24406/publica-fhg-300409>

Edler, J., Blind, K., Kroll, H., & Schubert, T. (2023). Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy. Defining rationales, ends, and means. *Research Policy*, 52(6), 104765.

<https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104765>

European Commission. (2021, May 5). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions: Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a Stronger Single Market for Europe's Recovery* (Report SWD(2021) 352 final).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2021:352:FIN>

European Commission. (2023, October 3). *Commission recommendation of 03 October 2023 on critical technology areas for the EU's economic security for further risk assessment with Member States* (Report C(2023) 6689 final).

https://defence-industry-space.ec.europa.eu/commission-recommendation-03-october-2023-critical-technology-areas-eus-economic-security-further_en

European Union. (2023, September 13). *Regulation (EU) 2023/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 establishing a framework of measures for strengthening Europe's semiconductor ecosystem and amending Regulation (EU) 2021/694 (Chips Act)*.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AAOJ.L_.2023.229.01.0001.01.ENG

Fealing, K. H., Lane, J. I., Marburger III, J. H., & Shipp, S. S. (Eds.). (2011). *The Science of Science Policy: A Handbook*. Stanford, CA: Stanford University Press.

Felipe, J., Kumar, U., Abdon, A., & Bacate, M. (2012). Product complexity and economic development. *Structural Change and Economic Dynamics*, 23(1), 36-68.

<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2011.08.003>

Fortunato, S., Bergstrom, C. T., Börner, K., Evans, J. A., Helbing, D., Milojevi, S., ... & Barabási, A. L. (2018). Science of science. *Science*, 359(6379), eaa0185.

<https://doi.org/10.1126/science.aao0185>

Goodman, M. P., & Roberts, B. (2021, October 13). *Toward a T12: Putting allied technology cooperation into practice*. Center for Strategic and International Studies.

<https://csis.org/analysis/toward-t12-putting-allied-technology-cooperation-practice>

- Grant, P. (1983). Technological sovereignty: Forgotten factor in the 'hi-tech' razzamatazz. *Prometheus*, 1(2), 239-270.
<https://doi.org/10.1080/08109028308628930>
- Hausmann, R., Hidalgo, C. A., Bustos, S., Coscia, M., & Simoes, A. (2014). *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. MIT Press.
- Helfat, C. E., & Raubitschek, R. S. (2000). Product sequencing: co - evolution of knowledge, capabilities, and products. *Strategic Management Journal*, 21(10 - 11), 961-979.
[https://doi.org/10.1002/1097-0266\(200010/11\)21:10/11<961::AID-SMJ132>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0266(200010/11)21:10/11<961::AID-SMJ132>3.0.CO;2-E)
- Hertel, T., Hummels, D., & Walmsley, T. L. (2014). The vulnerability of the Asian supply chain to localized disasters. In *Asia and Global Production Networks* (pp. 81-111). Edward Elgar Publishing.
<https://doi.org/10.4337/9781783472093.00009>
- Hidalgo, C. A., & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10570-10575.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0900943106>
- Hu, M. C., & Mathews, J. A. (2008). China's national innovative capacity. *Research Policy*, 37(9), 1465-1479.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.07.003>
- Huotari, M., Weidenfeld, J., & Wessling, C. (2020). *Towards A "Principles First Approach" In Europe's China Policy: Drawing lessons from the Covid-19 crisis* (No. 9). Mercator Institute for China Studies (MERICS).
- Stojkoski, V., Utkovski, Z., & Kocarev, L. (2016). The impact of services on economic complexity: Service sophistication as a route for economic growth. *PLoS one*, 11(8), e0161633.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161633>
- International Monetary Fund. (2022). *Direction of Trade Statistics*. Retrieved from
<https://data.imf.org/regular.aspx?key=61013712>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by the COVID-19 outbreak. *International journal of production research*, 58(10), 2904-2915.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). OR-methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic: Managerial insights and research implications. *International Journal of Production Economics*, 232, 107921.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107921>
- Jagtap, S., Trollman, H., Trollman, F., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Duong, L., Martindale, W., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M., Hdaifeh, A., Hassoun, A., Salonitis, K., & Afy-Shararah, M. (2022). The Russia-Ukraine conflict: Its implications for the global food supply chains. *Foods*, 11(14), 2098.
<https://doi.org/10.3390/foods11142098>
- Jisi, W., & Ran, H. (2019). From cooperative partnership to the strategic competition: a review of China-US relations 2009–2019. *China International Strategy Review*, 1, 1-10.
<https://doi.org/10.1007/s42533-019-00007-w>

- Lall, S. (2000). Technological change and industrialization in the Asian newly industrializing economies achievements and challenges. In L. Kim & R. R. Nelson (Eds.), *Technology, learning, and innovation: Experiences of newly industrializing economies* (pp. 13–68). Cambridge: Cambridge University Press.
- Le, T. T. M., Niem, L. D., & Kim, T. (2022). Economic complexity and economic development in ASEAN countries. *International Economic Journal*, 36(4), 556-568.
<https://doi.org/10.1080/10168737.2022.2142643>
- Lee, J. D., Baek, C., Maliphol, S., & Yeon, J. I. (2019). Middle Innovation Trap, *Foresight and STI Governance*, 13, 6–18.
- Lee, J. D., Baek, C., & Yeon, J. I. (2021). Middle innovation trap: Capability transition failure and stalled economic growth. In J. D. Lee, K. Lee, D. Meissner, S. Radošević, & N. S. Vonortas (Eds.), *The challenges of technology and economic catch-up in emerging economies* (pp. 100-122). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780192896049.003.0004>
- Li, L. (2018). China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. *Technological forecasting and social change*, 135, 66-74.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028>
- Liu, T., & Woo, W. T. (2018). Understanding the US-China trade war. *China Economic Journal*, 11(3), 319-340.
<https://doi.org/10.1080/17538963.2018.1516256>
- Luo, Y., & Van Assche, A. (2023). The rise of techno-geopolitical uncertainty: Implications of the United States CHIPS and Science Act. *Journal of International Business Studies*, 54(8), 1423-1440.
<https://doi.org/10.1057/s41267-023-00620-3>
- Marukawa, T. (2023). From entrepreneur to investor: China's semiconductor industrial policies. *Issues & Studies*, 59(1), 2350001.
<https://doi.org/10.1142/S1013251123500017>
- Marburger III, J. H. (2011). Why policy implementation needs a science of science policy. In K. H. Fealing, J. I. Lane, J. H. Marburger III, & S. S. Shipp (Eds.), *The Science of Science Policy: A Handbook* (pp. 9-22). Stanford, CA: Stanford University Press.
- March, C., and Schieferdecker, I. (2023), Technological sovereignty as ability, not autarky, *International Studies Review*, 25(2), viad012.
<https://doi.org/10.1093/isr/viad012>
- Martin, B. D., Baldwin, L. H., DeLuca, P., Sanchez, N. H., Hvizda, M., Smith, C. D., & Whitehead, N. P. (2023). *Supply Chain Interdependence and Geopolitical Vulnerability: The Case of Taiwan and High-End Semiconductors*. RAND Corporation.
<https://doi.org/10.7249/RRA2354-1>
- Mealy, P., & Teytelboym, A. (2022). Economic complexity and the green economy. *Research Policy*, 51(8), 103948.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>
- National Network for Critical Technology Assessment. (2023). Securing America's Future: A framework for critical technology assessment.
https://nncta.org/_files/documents/nncta-final-report.pdf

- OECD, European Union, and EC-JRC (2008), *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, OECD Publishing, Paris,
<https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- OECD (2017), *OECD Science, Technology and Industry Scoreboard 2017: The digital transformation*, OECD Publishing, Paris.
<http://dx.doi.org/10.1787/9789264268821-en>
- OECD (2023), *OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023: Enabling Transitions in Times of Disruption*, OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/0b55736e-en>
- Peters, M. A. (2023). Semiconductors, geopolitics and technological rivalry: the US CHIPS & Science Act, 2022. *Educational Philosophy and Theory*, 55(14), 1642-1646.
<https://doi.org/10.1080/00131857.2022.2124914>
- Puglierin, J., & Zerka, P. (2022). *European Sovereignty Index*. European Council of Foreign Relations.
<https://ecfr.eu/wp-content/uploads/2022/06/European-Sovereignty-Index.pdf>
- Pugliese, E., Cimini, G., Patelli, A., Zaccaria, A., Pietronero, L., & Gabrielli, A. (2019). Unfolding the innovation system for the development of countries: coevolution of Science, Technology and Production. *Scientific reports*, 9(1), 16440.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-52767-5>
- Ramahandry, T., Bonneau, V., Bani, E., Vlasov, N., Flickenschild, M., Batura, O., Tcholtchev, N., Lämmel, P., & Boerger, M. (2021). *Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty* (Study No. EPRS_STU(2021)697184). European Parliamentary Research Service.
[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_STU\(2021\)697184](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_STU(2021)697184)
- Schneider-Petsinger, M., Wang, J., Jie, Y., & Crabtree, J. (2019). *US-China strategic competition: The quest for global technological leadership*. Chatham House, The Royal Institute of International Affairs.
<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/CHHJ7480-US-China-Competition-RP-WEB.pdf>
- Sutter, K. M. (2021). *China's new semiconductor policies: issues for Congress*. Congressional Research Service, R46767,
<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46767>
- Tacchella, A., Cristelli, M., Caldarelli, G., Gabrielli, A., & Pietronero, L. (2012). A new metric for countries' fitness and products' complexity. *Scientific reports*, 2(1), 723.
<https://doi.org/10.1038/srep00723>
- VerWey, J. (2019). Chinese semiconductor industrial policy: Past and present. *Journal of International Commerce and Economics*, 1.
<https://ssrn.com/abstract=3441951>
- Wriston, W. B. (1988). Technology and sovereignty. *Foreign Affairs*, 67(2), 63-75.
<https://doi.org/10.2307/20043773>

World Intellectual Property Organization (WIPO) (2023). *Global Innovation Index 2023: Innovation in the face of uncertainty*. Geneva: WIPO.

<https://doi.org/10.34667/tind.48220>

The White House. (2022, August 9). *Fact sheet: CHIPS and Science Act will lower costs, create jobs, strengthen supply chains, and counter China*.

<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/>

The White House. (2024, February). *Critical and Emerging Technologies List: 2024 Update*.

<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2024/02/Critical-and-Emerging-Technologies-List-2024-Update.pdf>

The World Bank, World Development Indicators (2022). *High-technology exports (current US\$)*. Retrieved from

<https://data.worldbank.org/indicator/TX.VAL.TECH.CD>

Zenglein, M. J., & Holzmann, A. (2019). *Evolving Made in China 2025: China's industrial policy in the quest for global tech leadership*. Mercator Institute for China Studies.

<https://www.merics.org/en/report/evolving-made-china-2025>

国务院(2020), 《关于印发新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展若干政策》的通知,

https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-08/04/content_5532370.htm

Appendix

A. 생산역량(PC)과 현시비교우위(RCA), 경제복잡성지수(Economic Complexity Index, ECI) 및 적합성지수(Fitness Index, F)와의 관계

본 연구에서 정의된 생산역량은 RCA의 가중평균과 유사한 의미를 가진다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(A-1) \quad PC_c = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot \frac{X_{ci}}{\sum_c X_{ci}}) = \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot \frac{X_{ci}}{\sum_c X_{ci}} / \frac{\sum_i X_{ci}}{\sum_i \sum_c X_{ci}} \cdot \frac{\sum_i X_{ci}}{\sum_i \sum_c X_{ci}})$$
$$= \frac{X_c}{X} \sum_i (\widehat{PCI}_i \cdot RCA_{ci})$$

한편, RCA의 또다른 집계방식인 ECI는 다음과 같이 표현된다.

$$(A-2) \quad ECI_c = \frac{1}{\sum_i M_{ci}} \sum_i (PCI_i \cdot M_{ci})$$

여기서,

$$(A-3) \quad M_{ci} = \begin{cases} 1, & \text{if } RCA_{ci} \geq 1 \\ 0, & \text{if } RCA_{ci} < 1 \end{cases}$$

본 연구에서 사용하는 국가별 생산역량지수, PC_c 는 PCI로 가중된 RCA들의 총합에서 글로벌 생산 생태계에서 해당 국가가 차지하고 있는 비중이 곱해진 값으로 해석할 수 있다. 즉, 얼마나 다양하고 정교한 상품에 대해 높은 비교우위를 갖고 있는지와 해당 국가가 글로벌 생산 생태계에서 얼마나 많은 비중을 차지하고 있는지를 종합적으로 표현하는 지표이다.

ECI와 비교해보면, 0 or 1로 표현되는 이진 행렬(binary matrix)인 M_{ci} 대신 RCA 값을 그대로 반영함으로써 특정 상품에 대한 역량의 절대적 변화를 보다 민감하게 표현할 수 있다. 또한, 해당 국가의 다양성 즉, $M_c = \sum_i M_{ci}$ 로 나눔으로써 평균치를 측정한 ECI와 달리, PC는 해당 국가가 글로벌 생산 생태계에서 차지하고 있는 비중(X_c / X) 이 곱하여져 있어 해당 국가가 세계생산에서 차지하는 절대적 크기가 반영된 규모특성정보(extensive information)를 나타낸다고 볼 수 있다. 기술주권의 맥락에서 기술 개발의 자본집약적 및 규모의 경제 특성, 글로벌 기술 생태계에서의 영향력, 즉 점유율을 고려하면 PC와 같은 규모특성형태(extensive form)이 국가의 경쟁력을 측정함에 있어서 보다 적합한 형태라고 할 수 있다.

또한, 본 연구가 제시하는 PC는 기존의 0을 기준으로 표준화된 Hausmann & Hidalgo (2009)의 PCI를 양수 및 확률분포로 재정규화 함으로써, 아무리 복잡성 낮은 상품이라도 수출이 늘어나 RCA가 증가하면 PC도 조금이라도 증가하는 직관적 성질을 만족한다.

한편, PC는 Hidalgo & Hausmann (2009)의 경제적 복잡성 틀에서 더 일관성 있는 결과를 얻기 위해 비선형적 방법을 도입한 적합성 지수(Fitness Index, Tacchella et al., 2012)의 정의와도 관련이 있다. 참고로 적합성지수(Fitness Index), F의 정의는 다음과 같다.

$$(A-4) \quad F_c^N = \sum_i Q_c^N \cdot M_{ci} = \sum_i \frac{1}{\sum_c M_{ci} \cdot (1/F_c^{N-1})} \cdot M_{ci}$$

$$(A-5) \quad F_c^N(\text{weighted}) = \sum_i Q_c^N \cdot X_{ci} / X_i = \sum_i \frac{1}{\sum_c X_{ci} \cdot (1/F_c^{N-1})} \cdot PC_{ci}$$

본 연구에서 제시한 PC_{ci} 는 적합성지수(Fitness Index)를 규모특성지표(extensive metrics)로 만들기 위해 M matrix 대신 사용한 $W(=X_{ci} / X_i)$ 와 일치한다. 따라서, PC_c 는 가중된(weighted) Fitness index 와 유사한 수학적 형태를 가짐을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 정규화시킨 PCI 대신 적합도지수(Fitness Index)에서 정의된 제품복잡도(Product Complexity)를 도입하면 정확하게 Cristelli et al. (2013)의 규모특성지표(extensive metrics)가 된다.

위에서 간략히 살펴본 바와 같이 본 연구에서 제시하는 PC의 정의는 기존 연구에서 제시된 복잡성지수(Complexity Index)나 적합도지수(Fitness Index)의 정보를 대부분 포함하고 있음을 알 수 있다. 여기에 더하여 본 연구에서는 국가간 절대적 규모의 차이를 충실히 반영하고 있다는 장점이 있다. 위의 논의는 혁신역량을 나타내는 IC의 경우에도 동일하게 적용된다.

B. TC계산식에서 α 값의 의미 및 선택 기준

본 연구에서 정의하고 있는 종합기술역량 지표, TC는 파라미터 α 에 따라 복합지표(composite indicator)를 구축하는 대표적인 두 가지 방법(OECD et al., 2008)인 선형결합(linear method)과 기하결합(geometric method)을 모두 표현할 수 있다. IC와 PC를 집계(aggregation)하는데 있어서 α 가 0에 가까울수록 기하결합방법이 되며, α 가 양의 무한대로 수렴할수록 선형결합방법이 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음의 수식 (A-6)과 (A-7)과 같다.

(A-6) $i) \alpha = 0:$

$$TC_{ci} = \sqrt{(IC_{ci} + \alpha)(PC_{ci} + \alpha)} - \alpha = \sqrt{IC_{ci} \cdot PC_{ci}}$$

(A-7) $ii) \alpha = \infty:$

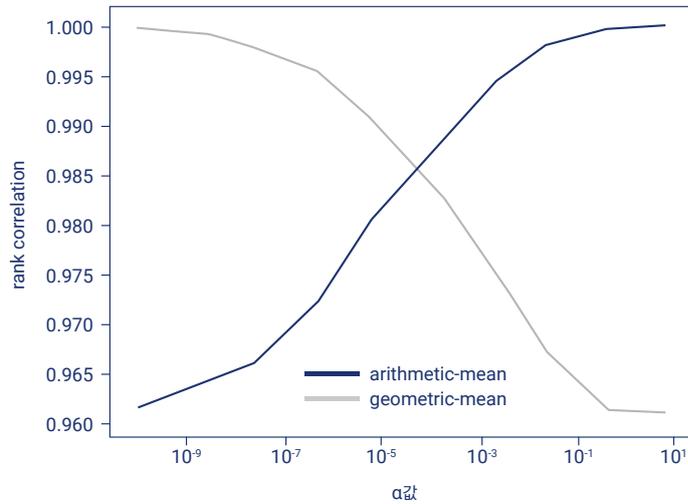
$$\begin{aligned} TC_{ci} &= \sqrt{(IC_{ci} + \alpha)(PC_{ci} + \alpha)} - \alpha \approx \sqrt{\alpha^2 + (IC_{ci} + PC_{ci}) \cdot \alpha} - \alpha \\ &= \alpha \cdot \sqrt{1 + \frac{IC_{ci} + PC_{ci}}{\alpha}} - \alpha \approx \alpha \left(1 + \frac{IC_{ci} + PC_{ci}}{2\alpha}\right) - \alpha = \frac{IC_{ci} + PC_{ci}}{2} \end{aligned}$$

선형집계 방법을 택한다면, 국가의 종합기술역량에 있어서 IC와 PC가 서로 완벽하게 대체될 수 있음을 가정하는 것이지만 이는 혁신역량과 생산역량이 완벽한 대체재가 아니므로 현실과 부합하지 않는다. 또한, 기하집계 방법을 택한다면, IC와 PC 두 역량 중 하나가 전혀 없을 때에 복합지표인 TC값이 0이 되어 다른 역량이 무용지물이 되기 때문에 현실성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 다음의 수식과 같이 상호배타적인 두 방법의 중간지점을 실증적으로 택하였다.

$$(A-8) \quad \sqrt{IC_{ci} \times PC_{ci}} \leq TC_{ci} = \sqrt{(IC_{ci} + \alpha)(PC_{ci} + \alpha)} - \alpha \leq \frac{1}{2}(IC_{ci} + PC_{ci})$$

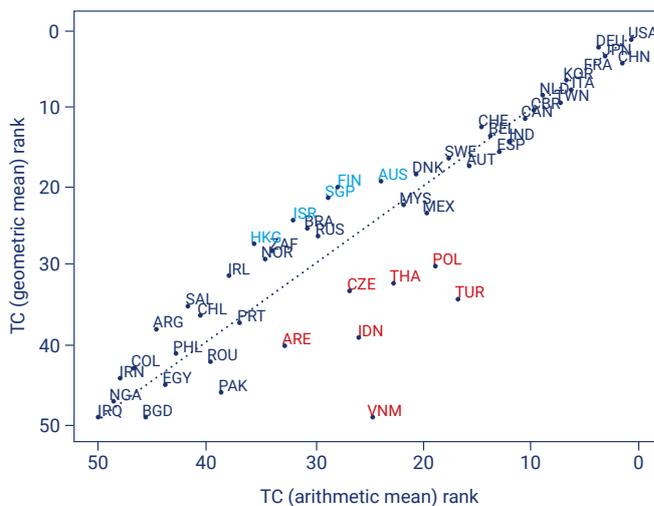
아래 [그림 A1]은 98개 국가(특히 데이터가 없는 국가들은 제외)의 TC값이 α 값에 따라 산술평균(푸른색) 및 기하평균(붉은색) 방법과 상관관계가 어떻게 바뀌는지를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 직관적 정보 전달을 위해 국가별 순위(rank)을 중심으로 결과를 제시하고 있어, 이 순위들의 상관관계를 바탕으로 두 방법의 중간 지점인 $\alpha=10^{-4}$ 를 기준으로 본문의 결과들을 제시하였다. 참고로 α 값이 변하더라도 순위의 상관관계는 0.96~1.00로 나타나 본 연구의 순위 결과가 α 값의 변화에 강건한 결과를 제시함을 알 수 있다.

그림 A1 α 값의 변화 따른 TC 순위의 상관관계 변화



참고로 α 값에 따라 TC 순위에 차이가 발생하는 국가들은 [그림 A2]에서 확인할 수 있듯이, IC 혹은 PC 중 하나로 쓸림이 있는 국가들이다. 예를 들면, 붉은색으로 표시된 폴란드(POL), 터키(TUR), 태국(THA), 인도네시아(IDN) 등의 국가들은 주로 PC는 상대적으로 높은 값을 갖고 있지만 IC는 그만큼 높지 않거나 거의 0인 경우가 많아 기하평균으로 TC를 계산할 때 순위가 상대적으로 많이 떨어지게 됨을 확인할 수 있다. 반대로 파란색으로 표시된 호주(AUS), 핀란드(FIN), 싱가포르(SGP), 이스라엘(ISR) 등과 같은 국가들은 IC 혹은 PC값이 0이 되지않고, 상대적으로 IC와 PC가 균등하여 기하평균으로 TC를 계산할 때 순위가 상대적으로 많이 올라가게 된다. 하지만, 20위 이내의 주요 국가들의 경우 순위 변동이 거의 없어 이 또한 α 값을 10^{-4} 이외의 값으로 선택하더라도 본 연구결과가 강건함을 보여준다.

그림 A2 두 가지 집계 방법(산술평균, 기하평균)의 TC 순위의 차이



C. 반도체 산업의 공급망 구분을 위한 분류기준(Taxonomy)

Categories	HS Code	Description
Upstream (Raw materials, inputs for wafers, silicon wafers, foundry inputs)	280461	Silicon with 99,99% purity
	282560	Germanium oxides, zirconium dioxide
	284920	Silicon Carbides Only
	285000	Hydrides, nitrides, and silicides
	370130	Photographic plates/film, sensitized, >255mm
	370199	Monochrome photography plates/film only
	370790	Preparation of chemicals for photographic uses
	381800	Chemical elements and compounds doped for use in electronics, in the form of discs, wafers, cylinders, rods, or similar forms, or cut into discs, wafers, or similar forms, whether or not polished or with a uniform epitaxial coating
	811299	Articles of niobium "columbium," gallium, indium, vanadium, and germanium, n.e.s.
	900120	Polarising material sheets and plates
	900190	Unmounted optical elements, excluding
	900219	Optical elements, excluding cameras
Midstream (Equipment)	903084	Electrical quantity measuring devices
	903082	Measuring semiconductor wafers/devices
	848690	Parts for semiconductor machinery
	848640	Machines for semiconductor manufacture
	848630	Machines for flat panel displays
	848620	Semiconductor device manufacturing machines
	848610	Machines for wafer manufacturing
	842199	Parts of machinery and apparatus for filtering or purifying liquids or gases, n.e.s.
	842139	Machinery and apparatus for filtering or purifying gases
	842129	Machinery and apparatus for filtering or purifying liquids
	841950	Heat-exchange units (excl. those used with boilers)
	841459	Fans
Downstream (Final products)	852351	Solid-state, non-volatile data storage devices for recording data from an external source
	852352	Cards incorporating an electronic integrated circuit and parts thereof
	852359	Semiconductor media
	853290	Electrical capacitors, fixed, variable, or adjustable(pre-set) parts
	854110	Diodes other than photosensitive or light-emitting diodes (LED)
	854129	Transistors, Other Than Photosensitive, Others

Categories	HS Code	Description
Downstream (Final products)	854140	Electrical apparatus: photosensitive, including photovoltaic cells, whether or not assembled in modules or made up into panels, light-emitting diodes (LED)
	854160	Mounted piezo-electric crystals
	854231	Electronic integrated circuits as processors and controllers, whether or not combined with memories, converters, logic circuits, amplifiers, clock and timing circuits, or other circuits
	854232	Electronic integrated circuits as memories
	854233	Electronic integrated circuits as amplifiers
	854239	Electronic integrated circuits (excl. such as processors, controllers, memories and amplifiers)
	854290	Parts of electronic integrated circuits, n.e.s.

주) Bonnet과 Ciani (2023)는 반도체 산업과 관련된 HS code를 원자재(raw materials), 실리콘 웨이퍼(silicon wafers), 웨이퍼 재료(inputs for wafers), 파운드리 재료(foundry inputs), 장비(equipment), 최종 제품(final products)로 구분하여 제시하였다. 이를 기반으로, 본 연구에서는 반도체 산업의 공급망 구분을 위해 업(up), 미드(mid), 다운(down) 스트림으로 다시 분류하여 제시하였다.



IFS 워킹페이퍼 2024-01

기술주권 수준의 측정 프레임워크와 국제비교

발행일	2024년 8월
발행처	서울대학교 국가미래전략원
저자	이정동(leejd@snu.ac.kr), 최성준, 김경원, 시새름
주소	서울특별시 관악구 관악로 1
전화	02-880-2893
팩스	02-882-2894
홈페이지	ifs.snu.ac.kr

이 연구내용은 연구자 개인의견이며 국가미래전략원의 공식견해와는 무관합니다.

