

반도체 분야 국제공동연구 동향과 협력구조 분석

Trends and Collaboration Structures of International Co-authorship in Semiconductor Research

이보람 (B.R. Lee, boram@etri.re.kr)

김종민 (J.M. Kim, bok@etri.re.kr)

김원익 (W.I. Kim, woniks@etri.re.kr)

이지현 (J.H. Lee, jhlee@etri.re.kr)

김익균 (I.K. Kim, ikkim21@etri.re.kr)

지식정보서비스실 책임기술원/실장

지식정보서비스실 기술원

지식정보서비스실 책임연구원

미주연구협력센터 책임연구원/센터장

정보전략부 책임연구원/부장

ABSTRACT

This article examines research trends and international collaboration structures in four semiconductor subfields—DRAM, HBM, NAND, and system semiconductors—using SCOPUS publications from 2015 to 2024. It analyzes publication volume, Field-Weighted Citation Impact (FWCI), international co-authorship ratio, network centrality, and institutional cluster structures. The results reveal substantial differences among subfields. System semiconductors showed the largest publication volume and the highest growth rate, while their FWCI and international co-authorship ratio remained relatively low. HBM recorded only modest growth in publication volume, but its FWCI increased sharply after 2021, indicating the emergence of a high-impact research area. DRAM and NAND showed the maturity and continuity of established memory technologies. In memory-related fields, Korean actors formed strong industry-university-centered domestic clusters, whereas their brokerage roles in global collaboration networks differed by subfield. These findings suggest that international collaboration strategies in semiconductor research should be differentiated based on each subfield's technological characteristics, research impact, and network position, rather than relying on a uniform expansion-oriented approach.

KEYWORDS Bibliometrics, FWCI, International Collaboration, Network Centrality, Semiconductor, 계량서지학, 국제공동연구, 네트워크 중심성, 반도체

I. 서론

반도체는 인공지능, 클라우드, 자율주행, 국방, 우

주, 통신 인프라 등 전략기술 전반을 가능하게 하는 핵심 기반 기술이다. 최근 반도체 산업은 단순한 산업경쟁을 넘어 경제안보, 기술주권, 공급망 회복력,

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2026.J.410410>

* 이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임[No. RS-2024-00462903].



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2026 한국전자통신연구원

동맹정책이 교차하는 기술패권 경쟁의 핵심 영역으로 부상하였다. OECD는 반도체 가치사슬이 설계, 소재, 장비, 제조, 패키징, 시험 등 여러 단계로 세분되어 있으며, 각 단계가 특정 국가와 기업에 집중되어 있다고 설명한다[1]. 이러한 구조는 분업과 전문화에 기반한 효율성을 창출하는 한편, 특정 병목이나 지정학적 충격이 발생하면, 그 영향이 전체 산업으로 파급될 수 있는 구조적 취약성을 동반한다.

반도체를 둘러싼 국제 정치 경제 변화는 연구개발과 국제협력의 의미도 바꾸고 있다. Park은 반도체를 지경학, 기술 민족주의, 글로벌 가치사슬이 교차하는 영역으로 설명하였고[2], Aoyama 등은 일본, 한국, 대만이 미·중 경쟁 속에서 반도체 글로벌 생산 네트워크의 규제적 통제와 공간전략에 대응하고 있음을 보였다[3]. Kim과 Rho 역시 미·중 칩 전쟁을 경제-안보 연계의 관점에서 분석하며, 아시아 국가들이 반도체 공급망과 기술동맹 재편 속에서 복합적 선택에 직면해 있음을 논의하였다[4]. 이는 반도체 연구개발이 기술 내부의 문제가 아니라 국가 간 협력과 경쟁의 구조 속에서 이해되어야 함을 시사한다.

기존 반도체 분야 연구는 주로 산업발전 전략, 기술추격, 계량서지학 및 특허 기반 경쟁력 분석을 중심으로 축적되어 왔다. Chen과 Sewell은 한국과 대만의 반도체 기술발전 전략을 비교하였고[5], Rho 등은 중국 반도체 산업의 제한적 추격을 부문혁신 체제 관점에서 설명하였다[6]. Tsay 등과 Guan & Ma는 반도체 문헌의 지식구조와 국가별 연구생산성을 계량서지학적으로 분석하였으며[7,8], 국내에서는 김기윤과 이성주가 특허정보를 활용해 반도체 분야 국가 간 기술력과 협력 현황을 분석하였다[9].

최근에는 지정학적 갈등과 기술패권 경쟁이 연구개발 협력 구조에 미치는 영향에 대한 논의도 확대되고 있다. Charpin 등은 국가 간 정치적 이견이

국제 연구협력 가능성을 낮추며, 이러한 효과가 첨단기술 산업에서 더 강하게 나타난다고 분석하였다[10]. Valitova 등은 반도체 논문 공저 네트워크가 제재와 지정학적 압력 속에서 지역화된 군집 구조로 변화하고 있음을 보였고[11], Li 등은 미·중 긴장 속에서도 협력 규모뿐만 아니라 협력 파트너와 연구 주제의 구성이 변화할 수 있음을 제시하였다[12]. 이러한 연구들은 반도체 국제공동연구를 단순한 논문 생산량이나 협력 건수만이 아니라 협력 방향성, 중심기관, 브로커십, 군집 구조의 관점에서 분석할 필요가 있음을 보여준다.

그러나 기존 연구는 반도체 산업정책, 기술경쟁력, 특허성과, 국가별 생산성을 설명하는 데 강점이 있지만, 세부 기술 분야별로 기관 간 국제공동연구 구조가 어떻게 다르고 어떤 기관이 지식 흐름의 허브 또는 매개자 역할을 수행하는지를 충분히 보여주지는 못했다. 논문 수는 연구 규모를 보여주지만, 협력망 안에서 누가 누구와 연결되어 지식을 생산하는지, 특정 기관이 전역적 브로커인지 지역적 중심 노드인지는 별도의 네트워크 분석을 통해 확인해야 한다. 공저 네트워크는 과학협력 구조를 관찰하는 대표적 방법이며[13], 협력 네트워크는 지식 확산의 지리적·조직적 패턴을 설명하는 데 중요한 분석틀로 활용될 수 있다[14].

본고는 이러한 문제의식에서 DRAM, HBM, NAND, System 반도체의 4개 세부 분야를 대상으로 연구 규모와 영향력의 추이, 국제공동연구 비율, 기관 간 공저 네트워크 중심성을 함께 분석한다. 특히 삼각 매개 중심성(TBC: Triangle Betweenness Centrality)을 통해 전역적 지식 매개자와 매개 허브 기관을 식별하고, 최근접 이웃 중심성(NNC: Nearest Neighbor Centrality)을 통해 중심 허브와 연결된 지역적 영향력 및 군집 구조를 해석한다. 이를 통해 반도체 국제협력 전략을 분야별로 차별화하고, 한국의 협력 구

조 다변화 방향을 도출하고자 한다.

II. 데이터와 분석방법

본 분석에서는 서지데이터베이스 SCOPUS를 활용하여 2015~2024년 출판된 논문 데이터를 수집하였다. 분석 대상은 DRAM, HBM, NAND, System 반도체 네 분야이며, 분야별 핵심 키워드 조합을 Title, Abstract, Keyword 필드에 적용하여 Boolean 방식으로 검색하였다. 수집된 논문 데이터는 분야별 연구 규모와 영향력 변화를 파악하기 위한 연도별 추이 분석과 기관 간 국제공동연구 구조를 파악하기 위한 네트워크 중심성 분석에 활용하였다(표 1).

연구 규모와 영향력 추이 분석에는 분야별 전체 검색 결과를 기준으로 연도별 논문 수, FWCI, 국제공동연구 비율을 활용하였다. 논문 수는 각 분야의 연구 규모와 성장 추세를 파악하기 위한 지표로 사용하였다. FWCI는 분야, 문헌 유형, 출판연도 등을 보정하여 해당 논문군이 세계 평균 대비 얼마나 인용되었는지를 나타내는 정규화 영향력 지표이다. FWCI가 1이면 세계 평균 수준, 1보다 크면 유사 문헌군 평균보다 더 많이 인용되었음을 의미한다. 국제공동연구 비율은 논문에 포함된 저자 소속의 국가/지역 정보가 2개 이상인 경우 국제공동연구로

판정하고, 전체 연구 중 국제공동연구가 차지하는 비율로 산출하였다.

네트워크 중심성 분석은 기관 간 공저 관계를 기반으로 수행하였다. 이를 위해 분야별 논문 수 상위 53~56개 기관을 분석 대상으로 추출하고, 동일 논문에 둘 이상의 기관이 공동저자로 참여한 경우 기관 쌍을 하나의 링크로 정의하였다. 동일 기관 쌍이 여러 논문에서 반복적으로 함께 나타나는 경우에는 이를 링크 가중치로 누적하였다. 이를 통해 공저 기반 협력관계를 정량화하고 기관 간 연구협력 구조를 시각화하였다.

네트워크 분석에서는 두 가지 중심성 지표를 사용하였다. TBC는 한 노드가 다른 두 노드 간 삼각구조의 매개자 역할을 얼마나 자주 수행하는지를 정규화한 지표로, 기관 또는 분야 간 연구협력을 중재하는 매가 허브 기관을 찾는 데 적합하다. NNC는 특정 노드와 연결된 이웃 노드들이 얼마나 중심적인지를 반영하므로, 고중심 허브와 가까이 연결된 지역적 중심기관 또는 협력 파트너를 탐색하는데 유용하다. 또한, 공저 네트워크는 PFNET($q=0.9$) 방식으로 스켈레톤화한 뒤 PNNC 군집 분석을 수행하여 주요 연결과 군집 구조를 파악하였다.

본 분석은 기관 간 공동저자 관계를 협력의 관찰 가능한 지표로 사용한다는 장점이 있지만 한계도

표 1 데이터 수집 및 분석 설계

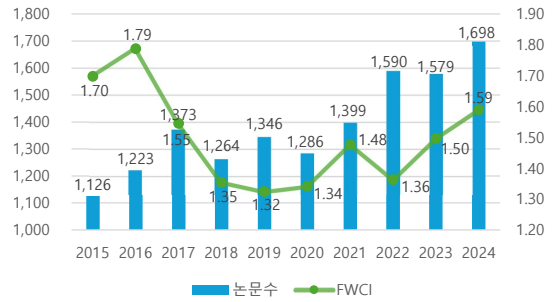
구분	내용
데이터원	SCOPUS(Elsevier)
분석 기간	2015~2024년(출판연도 기준)
분석 분야	DRAM, HBM, NAND, System 반도체
검색 방식	분야별 핵심 키워드 조합, Title·Abstract·Keyword Boolean 검색
기관 선정	분야별 논문 수 상위 53~56개 기관
네트워크 정의	동일 논문에 공동 참여한 기관 쌍을 링크로 정의 반복 공저는 가중치로 누적
분석 지표	논문 수, FWCI, 국제공동연구 비율, TBC, NNC
네트워크 처리	PFNET($q=0.9$) 스켈레톤, PNNC 군집 분석

있다. 첫째, 공저 관계는 협력의 존재와 빈도를 보여주지만 실제 기여도, 협력의 질, 기술이전 성과를 직접 측정하지는 못한다. 둘째, 상위 기관 중심으로 네트워크를 구축했기 때문에 주변부 기관이나 신규 진입 기관의 역할이 축소될 수 있다. 셋째, 논문 기반 분석은 특허, 국가 R&D 과제, 기업 간 공급망, 비공개 공동개발 활동을 반영하지 못한다. 따라서 본고의 결과는 반도체 연구협력 구조를 이해하기 위한 계량적 기초자료로 해석하는 것이 적절하다.

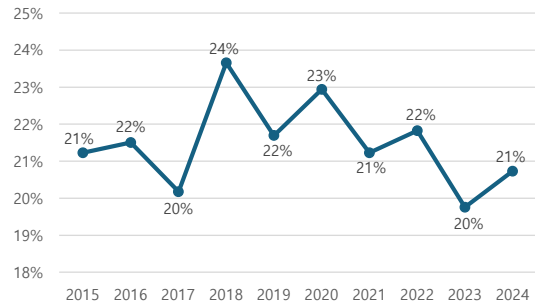
III. 분야별 연구 규모와 영향력 추이

2015년부터 2024년까지의 연도별 추이를 살펴보면, 4개 반도체 분야는 연구 규모, 인용 영향력, 국제 공동연구 비율 측면에서 서로 다른 변화 양상을 보이는 것으로 나타난다. 논문 수를 기준으로 할 경우 System 반도체 분야가 가장 큰 연구 규모를 형성하고 있으며, NAND 분야가 그 뒤를 잇고, DRAM과 HBM 분야는 상대적으로 작은 연구 규모를 보이는 구조이다. 그러나 FWCI와 국제공동연구 비율을 함께 고려하면 연구 규모가 반드시 인용 영향력 또는 국제협력 강도와 일치하지 않음을 확인할 수 있다(표 2). 이는 반도체 세부 분야별 연구 성과를 평가할 때 단순한 논문 생산량뿐만 아니라 질적 영향력과 협력 구조를 함께 고려해야 함을 시사한다.

DRAM 분야의 논문 수는 그림 1과 같이 2015년 1,126편에서 2024년 1,698편으로 증가하여 약



(a)



(b)

그림 1 DRAM 분야 연도별 연구 추이:
(a) 논문 수와 FWCI, (b) 국제공동연구 비율

50.8%의 성장률을 보인 것으로 나타난다. FWCI는 2016년 1.79로 가장 높은 수준을 기록한 이후 2019년 1.32까지 하락하였으나, 이후 점진적으로 회복되어 2024년에는 1.59에 도달하였다. 국제공동연구 비율은 분석 기간 동안 대체로 20%에서 24% 범위에서 비교적 안정적으로 유지되었다. 이러한 결과는 DRAM 연구가 성숙 분야로서 일정한 연구 기반을 유지하면서도, 세계 평균을 상회하는 인용 영

표 2 분야별 연구 규모·영향력·국제협력 요약(2015-2024)

분야	2015년 논문 수	2024년 논문 수	증가율	FWCI(평균)	국제공동연구 비율(평균)
DRAM	1,126	1,698	50.80%	1.5	21.50%
HBM	1,223	1,321	8.00%	1.46	20.40%
NAND	3,431	5,489	60.00%	1.26	20.90%
System	10,167	18,479	81.80%	1.1	19.40%

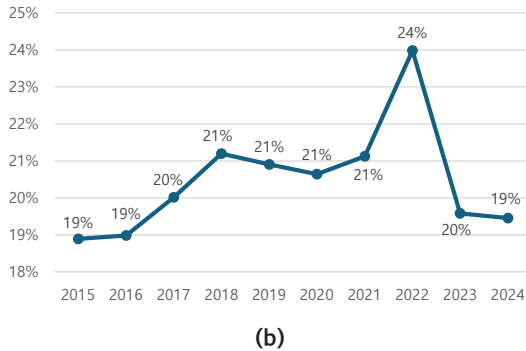
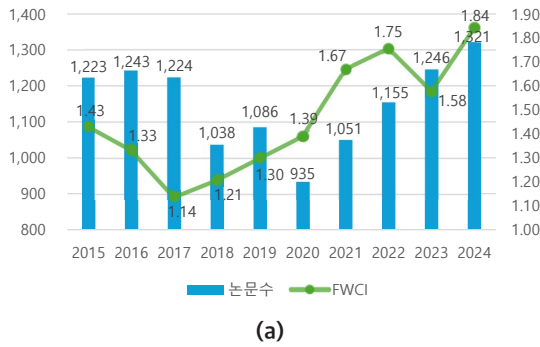


그림 2 HBM 분야 연도별 연구 추이:
(a) 논문 수와 FWCI, (b) 국제공동연구 비율

향력과 안정적인 국제협력 구조를 지속하고 있음을 의미하는 결과이다.

HBM 분야의 논문 수는 2015년 1,223편에서 2020년 935편까지 감소한 이후 2024년 1,321편으로 회복되는 양상을 보인다. 반면 FWCI는 2017년 1.14로 낮아진 이후 2021년 1.67, 2022년 1.75, 2024년 1.84로 상승하여 최근 인용 영향력의 개선이 가장 뚜렷한 분야로 해석된다. 국제공동연구 비율은 2022년 24.0%로 최고 수준을 기록하였으나, 2023년과 2024년에는 각각 20% 안팎으로 낮아졌다(그림 2). 즉, HBM은 양적 규모보다 질적 영향력의 상승이 두드러지는 부상 분야로 볼 수 있다.

NAND 분야의 논문 수는 2015년 3,431편에서 2024년 5,489편으로 증가하여 약 60.0%의 성장률을 보인다. FWCI는 대체로 1.18에서 1.40 범위에서

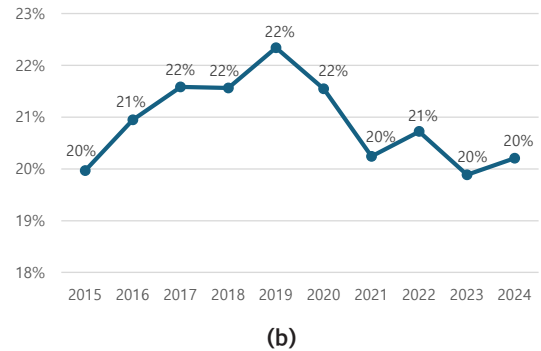
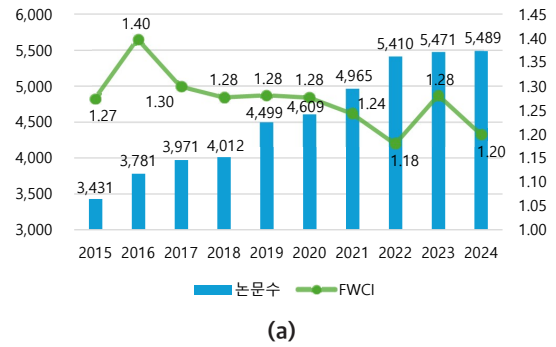


그림 3 NAND 분야 연도별 연구 추이:
(a) 논문 수와 FWCI, (b) 국제공동연구 비율

변동하며 비교적 안정적인 수준을 유지하였고, 국제공동연구 비율 역시 20%에서 22% 수준에서 큰 변화 없이 유지되었다(그림 3). 이는 NAND 분야가 대규모 연구 생산성과 안정적인 협력 기반을 갖춘 분야이지만, 인용 영향력 측면에서는 급격한 상승보다 일정 수준의 지속성이 강하게 나타나는 분야임을 보여주는 결과이다.

System 반도체 분야의 논문 수는 2015년 10,167편에서 2024년 18,479편으로 증가하여 약 81.8%의 성장률을 기록하였으며, 4개 분야 중 가장 큰 연구 규모와 가장 높은 양적 성장세를 보인다. 그러나 FWCI는 분석 기간 평균 약 1.10 수준으로 4개 분야 중 가장 낮으며, 2024년에는 1.04까지 하락하였다. 국제공동연구 비율 역시 2018년과 2020년 전후에 약 20% 수준을 보였으나, 이후 점진적으로 낮아져

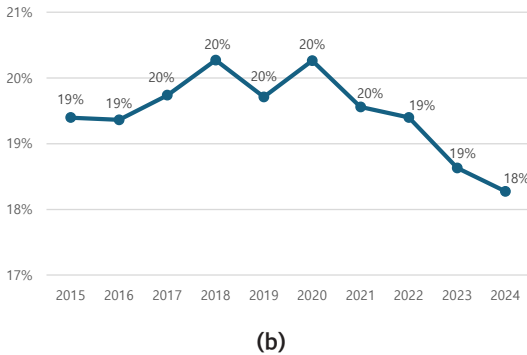
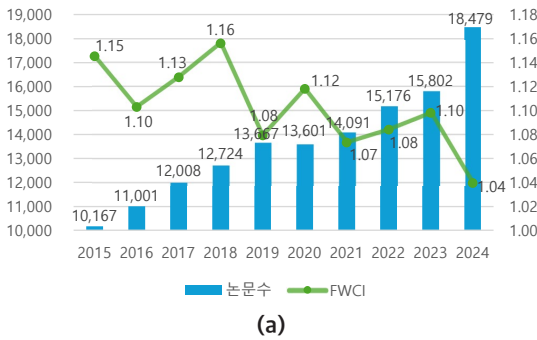


그림 4 System 반도체 분야 연도별 연구 추이:
(a) 논문 수와 FWCI, (b) 국제공동연구 비율

2024년에는 18.3%에 머물렀다(그림 4). 이는 System 반도체 분야가 연구 저변과 논문 생산량 측면에서는 빠르게 확대되고 있으나, 국제공동연구의 상대적 비중과 인용 영향력 측면에서는 제한적인 구조를 보이고 있음을 시사한다.

IV. 국제공동연구 네트워크 중심성 분석

분야별 국제공동연구 구조를 직관적으로 제시하기 위해 TBC 네트워크를 그림으로 배치하였으며, TBC 네트워크에서 가장 중심성이 높은 기관은 노트 안에 별표로 표시하였다. 또한, NNC 기반 군집 결과는 표 3에 요약하여, 분야별로 지역적 군집 구조와 한국의 네트워크상 위치를 비교하였다. TBC는 전체적으로 기관 및 분야 간 연구협력의 중재자 역할을 수행하는 메가 허브 기관을 식별하는 데 적합하고, NNC는 지역적 영향력을 측정하여 지역적 중심성이 높은 파트너 발굴에 활용된다.

표 3 분야별 NNC 기반 군집 구조 요약

분야	NNC 군집 특성	한국의 위치	시사점
DRAM	국가·기관 유형별 군집 분화 ※ 한국(삼성), 중국(CAS), 대만(NTU), 미국(NVIDIA) 등 국가별 대표 기관 중심의 군집	삼성 중심의 국내 산·학협력 군집 형성	- 지리적·제도적 근접성에 따른 군집화 뚜렷 - 산업·학술 군집의 병렬 존재(국가 간 연결 제한)
HBM	- 국가·지역별 군집 형성 - 내부는 소수 기관 간 특정 파트너 집중형 협력 구조 ※ 미국(Intel-Georgia Tech), 미국(AMD-UCSD), 싱가포르-대만(A*STAR-NTU) 등 폐쇄 군집	KAIST-삼성-SK 중심의 실용 연구 개발 군집 구축	- 부상 분야임에도 군집 간 연결성 부족 - 특정 파트너 간 폐쇄적 협력에 집중
NAND	주요 기관 중심의 다핵화 ※ CAS, 프랑스, CityU, Stanford-CNRS	국내 내부집중형 산·학협력 군집 형성 -SK-서울대-POSTECH -삼성-KAIST-성균관대	- 국가·지역별 군집화 뚜렷 - 한국 국내 결속력 강화 2~3개 기관 중심 소규모 폐쇄형 구조로 네트워크 확장성 제한적
System	글로벌 다핵화 구조 -중국: 연구기관 중심 대규모 밀집 -미국: DOE 중심 산·학·연 혼합 군집 -유럽: 공공연구기관 중심 개방형 군집	- 삼성 외 주요 연구기관 참여 제한적 - 글로벌 네트워크의 주변부(Peripheral) 위치	- 지역 중심기관 기반의 다핵화 구조 - 미·유럽의 강력한 개방형/중재 허브 기능 대비 한국의 영향력 제한적

1. DRAM 분야

DRAM 분야의 TBC 분석 결과(그림 5), 미국은 국가별 삼각 매개 중심성 기여도에서 전체의 50.6%를 차지하며 가장 높은 비중을 보였다. 중국은 17.9%, 한국은 15.6%, 프랑스는 6.3%, 스위스는 3.6%로 나타났다. 이는 미국 기관들이 DRAM 연구 네트워크에서 전역적 지식 매개자 역할을 주도하고 있음을 의미한다. Intel, Penn State, US DOE, Georgia Tech, UC San Diego, UIUC 등은 주요 고중심 노드로 식별되며, 산업체와 공공연구기관, 연구중심대학이 네트워크 중심부를 공동 형성한다.

한국은 삼성과 서울대학교가 전체 한국 TBC의 약 57%를 차지하는 산·학 양극 중심 구조를 보인다. 이는 한국이 DRAM 분야에서 강한 산업 기반과 연구중심대학의 협력 기반을 갖추고 있음을 보여주지만, KAIST, SK, 한양대학교 등 다른 기관의 중심성은 상대적으로 낮아 네트워크의 균형성과 다변화 측면에서 보완 여지가 있다. 중국은 CAS와 Tsinghua

University를 중심으로 높은 중심성을 보이지만, 협력관계가 중국 내 기관 간 연결에 국한되는 경향이 있어 국제 지식 흐름의 매개 기능은 제한적이다. 유럽에서는 CNRS, ETH Zurich, IMEC 등이 미국·한국 중심부와 유럽 주변부를 연결하는 구조적 브리지 역할을 수행한다.

NNC 분석에서도 DRAM 네트워크는 지역 기반에 따른 군집화가 뚜렷하다. 삼성 중심의 한국 군집, CAS 중심의 중국 군집, NTU 중심의 대만 군집, NVIDIA 중심의 미국 기술기업 군집, Grenoble-Alpes 및 프랑스·유럽 중심 군집 등이 독립적으로 분화되어 있다. 일부 국제 연결은 존재하지만 전체 네트워크에서 강한 국가 간 연결은 제한적이며, 산업체 중심의 군집과 학술 중심의 군집이 병렬적으로 형성된다. 따라서 DRAM 분야의 협력전략은 고중심 기관과의 직접 협력뿐만 아니라 한국 대학·공공연구기관의 국제 네트워크 편입을 확대하는 방향이 필요하다.

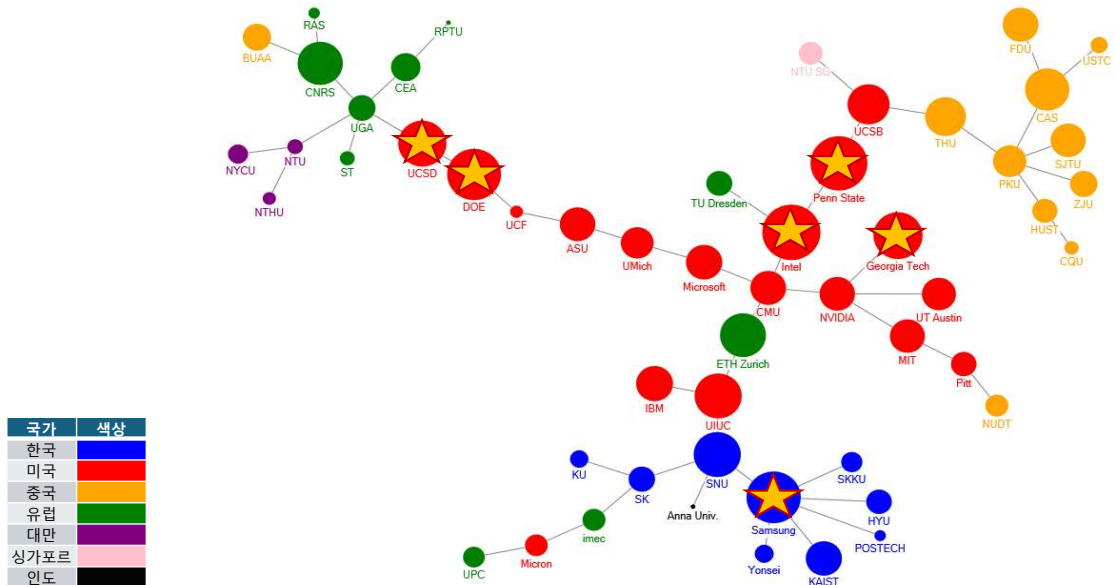


그림 5 DRAM 분야 국제공동연구 네트워크의 삼각매개 중심성(TBC)

2. HBM 분야

그림 6과 같이 TBC 분석 결과 HBM 연구 네트워크는 미국, 중국, 한국, 유럽을 중심으로 뚜렷한 클러스터를 형성한다. 특정 국가 또는 기관이 독점하는 구조라기보다 국가·지역별로 특화된 클러스터가 경쟁과 협력을 동시에 수행하는 다극형 구조에 가깝다. 가장 높은 영향력을 가진 기관으로는 Intel, Georgia Tech, CAS, IMEC 등이 식별되었다. 또한 삼성, NVIDIA, IBM, AMD, GlobalFoundries 등 주요 산업체가 학술기관에 준하는 중심성을 보이며 산·학협력 허브로 기능한다.

미국은 Intel과 Georgia Tech를 중심으로 UIUC, AMD, NVIDIA, Duke, UT Austin 등이 연결되는 강력한 산·학협력 네트워크를 형성한다. 이는 첨단 메모리와 패키징, AI 가속기, 고성능컴퓨팅 응용이 결합되는 HBM 분야에서 기업이 연구생태계의 허브로 기능하는 특징을 보여준다. 한국은 KAIST를

중심으로 삼성, SK가 밀접하게 연결되는 구조를 보이며, 상용화와 실용적 연구개발에 가까운 협력망을 형성한다. 중국은 CAS와 Shanghai Jiao Tong University를 중심으로 다수 자국 대학이 연결되는 대규모 내수 중심 연구망을 형성하고, 유럽은 IMEC이 KU Leuven, Chalmers 등과 연결되며 독보적 허브 역할을 수행한다.

NNC 분석에서는 국가·지역별 군집이 뚜렷하고, 이원적 연결 또는 폐쇄형 구조가 다수 존재한다. Intel-Georgia Tech, AMD-UCSD, A*STAR-NTU 등은 특정 파트너에 집중된 협력군으로 나타나며, 군집 간 연결성은 아직 충분히 확장되지 않은 것으로 해석된다. HBM은 논문 규모의 증가폭은 제한적이거나 2021년 이후 FWCI 상승이 두드러져, 향후 전략적 협력 대상 발굴의 중요성이 큰 분야로 볼 수 있다. 한국은 삼성·SK·KAIST 중심의 실용 연구개발 기반을 유지하되, 미국의 Intel·Georgia Tech 중심 산·학협력 허브, 유럽의 IMEC 중심 연구 네트

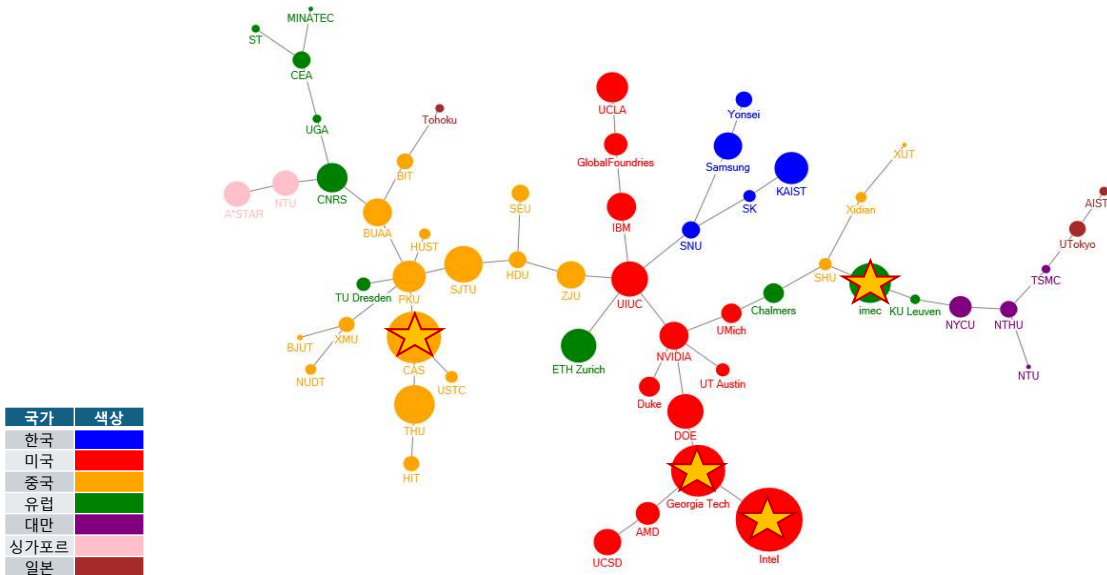


그림 6 HBM 분야 국제공동연구 네트워크의 삼각매개 중심성(TBC)

워크, 대만·일본 연계 군집과의 접점을 확대하여 HBM 분야의 국제 브로커십을 강화할 필요가 있다.

3. NAND 분야

그림 7과 같이 NAND 분야는 중국, 미국, 유럽의 3대 세력이 각축하는 구도가 뚜렷하다. 중국의 CAS는 전체 네트워크에서 가장 높은 영향력을 기록하며 핵심 중심 노드로 기능하고, Tsinghua University, Peking University, Fudan University, City University of Hong Kong 등도 높은 중심성을 보인다. 이는 중국이 단일 허브가 아니라 복수의 중심 노드가 존재하는 다핵형 구조를 형성하고 있음을 의미한다. 미국에서는 DOE, Penn State, MIT, Stanford, Purdue, UCSD, Georgia Tech 등이 높은 중심성을 보이며, Intel과 IBM 같은 산업체도 기술확산의 중간 허브로 기능한다.

한국은 삼성, SK, 서울대, KAIST, 성균관대, 한양

대, 연세대 등 주요 기관이 국내 산·학협력 구조를 형성한다. 특히 서울대학교는 국내 중심 대학으로서 다수의 국내 기관과 강한 결속을 보이고, 삼성은 글로벌 산업체 중 중상위권의 중심성을 보인다. 그러나 한국의 협력 구조는 국내 대학과 산업체 간 내부 집중성이 강한 반면, 중국·미국·유럽의 주요 연구 클러스터와의 직접 연결성은 상대적으로 제한적이다. 이는 NAND 분야에서 국내 산업체와 대학을 중심으로 한 결속력이 강하더라도, 이러한 내부 협력 기반이 국제공동연구 네트워크에서 브로커십으로 곧바로 연결되지는 않음을 시사한다.

NNC 군집 분석에서도 중국 CAS 중심 군집, 프랑스·유럽 중심 군집, 한국 산·학협력 군집 등 지역별·제도별 군집화가 관찰된다. 특히 SK-서울대-POSTECH, 삼성-KAIST-성균관대 등 국내 산업체와 대학 간 협력 군집은 한국 내 산·학협력의 결속을 보여준다. 반면 상당수 군집은 2~3개 기관으로 구성된 폐쇄형 소규모 협력군으로 나타나, 협력

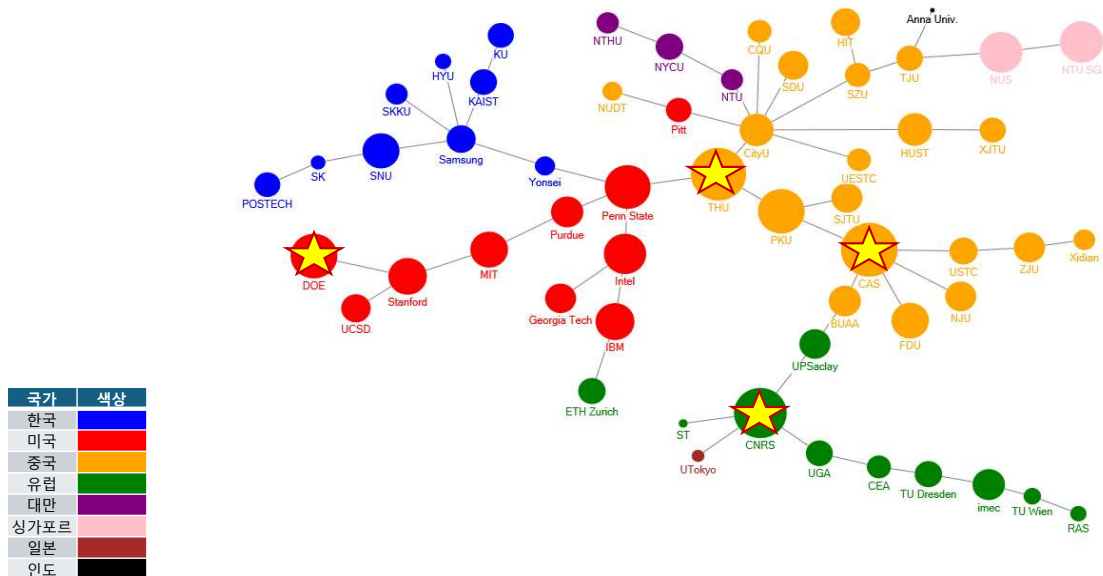


그림 7 NAND 분야 국제공동연구 네트워크의 삼각매개 중심성(TBC)

다양성과 네트워크 확장성 측면에서 보완이 필요하다. NAND 분야에서 한국의 전략은 국내 산·학협력의 결속을 유지하되, 미국의 연구중심대학·국가연구기관, 유럽의 CNRS·IMEC·ETH Zurich 등 주요 연구기관, 중국·홍콩의 다핵형 허브와의 선택적 연결을 강화하는 방향으로 설계될 필요가 있다.

4. System 반도체 분야

그림 8과 같이 System 반도체 분야에서 TBC 분석 결과 중심성이 높은 기관은 CAS, Tsinghua University, CNRS, UC Berkeley, DOE, Peking University 등으로, 중국·미국·유럽의 주요 연구기관이 네트워크 전반의 연결성과 매개성을 주도한다. 중국은 CAS, Tsinghua University, Peking University, Shanghai Jiao Tong University, Zhejiang University, Harbin Institute of Technology 등 다수 기관이 강한 중심성과 높은 연결성을 보이며, 국가 내외 연구협력 허브

역할을 수행한다.

미국은 DOE, UC Berkeley, Georgia Tech, Intel 등을 중심으로 독립적이면서도 영향력 있는 연구클러스터를 형성한다. DOE와 UC Berkeley의 연결은 기초연구와 응용기술을 잇는 협력 축으로 해석될 수 있다. 유럽은 CNRS를 중심으로 CEA, Paris-Saclay, Grenoble-Alpes 등이 협력 거점을 이루고, ETH Zurich, KU Leuven, IMEC 등과 함께 유럽 지역의 협력 축을 담당한다. 싱가포르의 NUS와 NTU도 높은 중심성을 보이나, 연결 노드 수는 제한적이어서 집중적 협력전략에 가까운 구조로 해석된다.

한국은 삼성 외 주요 연구기관의 존재감이 제한적이며, 공동연구 네트워크 내에서 주변 노드에 가까운 위치로 나타난다. 이는 System 반도체 분야에서 한국이 생산·산업 역량과 별개로 국제 학술공동연구 네트워크에서는 아직 충분한 중심성을 확보하지 못하고 있음을 의미한다. System 반도체는 설계, IP, EDA, 아키텍처, 센서, AI 반도체, 통신 및

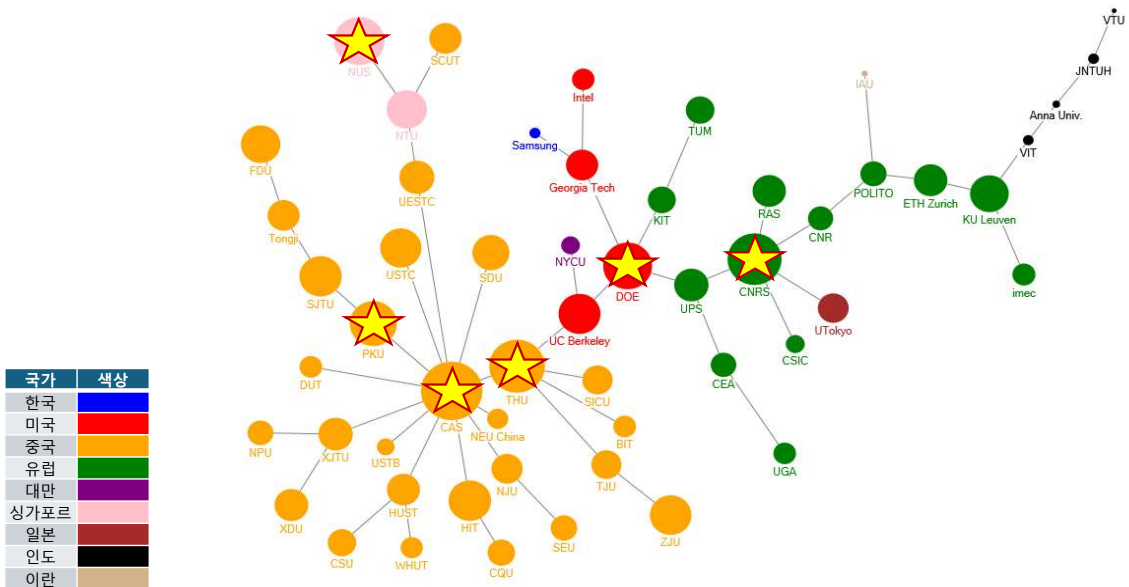


그림 8 System 반도체 분야 국제공동연구 네트워크의 삼각매개 중심성(TBC)

임베디드 시스템 등 하위 분야가 넓기 때문에 단일 대기업 중심의 협력 구조만으로는 국제 네트워크의 중심성을 확보하는 데 한계가 있다. 따라서 한국은 대학·출연연·팹리스·EDA·시스템 응용 기업이 함께 참여하는 다층 협력 기반을 확대하고, 미국·유럽의 핵심 연구기관과 장기 공동연구 프로그램을 구축할 필요가 있다.

V. 결론

본고는 2015~2024년 SCOPUS 논문 데이터를 기반으로 DRAM, HBM, NAND, System 반도체 분야의 연구 규모, FWCI, 국제공동연구 비율, 기관 간 공저 네트워크 중심성을 비교하였다. 분석 결과, 반도체 4개 분야는 연구 규모와 영향력, 협력구조에서 뚜렷한 차이를 보였다. System 반도체는 논문 수와 성장률이 가장 높았으나 FWCI와 국제공동연구 비율은 상대적으로 낮았다. HBM은 최근 FWCI가 크게 상승하며 기술 부상기의 특성을 보였고, DRAM과 NAND는 성숙한 메모리 분야로서 안정적 연구 기반과 일정 수준의 국제협력 구조를 유지하였다.

네트워크 중심성 분석에서는 분야별로 다른 협력 구조가 확인되었다. DRAM은 미국 중심의 전역 브로커십과 한국의 삼성·서울대 중심 구조가 두드러졌고, HBM은 미국·중국·한국·유럽의 다극형 산·학협력 구조를 보였다. NAND는 중국·미국·유럽의 3축 경쟁 속에서 한국의 내부집중형 산·학협력 구조가 나타났으며, System 반도체는 중국·미국·유럽 기관의 다핵형 중심성이 강하고 한국은 상대적으로 주변부에 위치하였다. 이러한 결과는 반도체 국제협력 전략이 분야별 기술 특성과 네트워크 위치에 따라 달라져야 함을 보여준다.

한국의 정책 방향은 분야별로 차별화될 필요가 있다. DRAM과 NAND에서는 기존 산업체·대학

중심 협력의 강점을 유지하되, 국제 브로커십을 강화하기 위한 해외 고중심 기관 및 유럽 브리지 기관과의 연결 확대가 필요하다. HBM에서는 영향력 상승기에 맞춰 첨단 패키징, AI 가속기, 고성능컴퓨팅 응용을 연결하는 다자 산·학협력 체계를 구축해야 한다. System 반도체에서는 대학·출연연·팹리스·EDA·시스템 응용기업이 함께 참여하는 국제 공동연구 기반을 확충하여 주변부 위치를 벗어나는 전략이 요구된다.

본 연구는 공저 기반 네트워크 분석을 통해 반도체 국제협력 구조를 계량적으로 파악했다는 점에서 의의가 있다. 다만 본고는 SCOPUS 논문 데이터에 기반하므로, 특허, 연구과제, 공급망, 인력교류, 비공개 기업협력 등 논문 외 협력 활동을 충분히 반영하지 못한다. 또한, 네트워크 중심성 분석은 분야별 논문 수 상위 기관을 중심으로 수행하였기 때문에, 신흥 기관이나 주변부 기관의 협력관계는 제한적으로 포착될 수 있다. 향후 연구에서는 특허 공동출원, 국제공동과제, 연구데이터 및 소프트웨어 산출물, 산·학·연 협약 정보 등을 결합한 다층 네트워크 분석으로 확장할 필요가 있다. 또한, 기간을 세분화하여 네트워크 구조 변화를 비교한다면, 국제협력의 변화 양상을 더 정밀하게 설명할 수 있을 것이다.

용어해설

DRAM Dynamic Random Access Memory의 약어로, 컴퓨터나 서버가 작업 중인 데이터를 임시로 저장하는 대표적인 메모리 반도체

HBM High Bandwidth Memory의 약어로, 여러 개의 DRAM을 수직으로 쌓아 데이터가 오가는 통로를 늘린 고성능 메모리

NAND 전원이 꺼져도 데이터가 유지되는 비휘발성 메모리 반도체

FWCI Field-Weighted Citation Impact의 약어로, 논문의 인용 영향력을 같은 분야, 같은 출판연도, 같은 문헌 유형의 세계 평균과 비교한 지표. FWCI가 1이면 세계 평균 수준이고, 1보다 크면 유사한 논문들보다 더 많이 인용되었음을 의미

삼각매개 중심성(TBC) Triangle Betweenness Centrality의 약어로, 협력 네트워크에서 여러 기관 사이를 연결하는 '다리' 역할을 어느 정도 수행하는지 보여주는 중심성 지표

최근접이웃 중심성(NNC) Nearest Neighbor Centrality의 약어로, 특정 기관이 영향력 있는 이웃 기관들과 얼마나 가깝게 연결되어 있는지를 보여주는 중심성 지표

PFNET Pathfinder Network의 약어로, 복잡한 네트워크에서 핵심적인 연결만 남기고 덜 중요한 연결을 줄여 전체 구조를 보기 쉽게 만드는 분석 방법

PNNC Pathfinder Network Nearest Neighbor Clustering의 약어로, PFNET으로 단순화한 네트워크에서 서로 가까이 연결된 기관들을 묶어 협력군집을 찾는 방법

참고문헌

- [1] OECD, "Mapping the Semiconductor Value Chain: Working Towards Identifying Dependencies and Vulnerabilities," OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, no. 182, 2025.
- [2] S. Park, "Semiconductors at the Intersection of Geoeconomics, Technonationalism, and Global Value Chains," Soc. Sci., vol. 12, no. 8, 466, 2023, doi: 10.3390/socsci12080466
- [3] Y. Aoyama et al., "Geopolitics and Geospatial Strategies: The Rise of Regulatory Supply Chain Controls for Semiconductor GPN in Japan, South Korea and Taiwan," ZFW - Advances in Economic Geography, vol. 68, no. 3-4, 2024, pp. 167-181. doi: 10.1515/zfw-2024-0046
- [4] Y. Kim and S. Rho, "The US-China Chip War, Economy-Security Nexus, and Asia," J. Chin. Political Sci., vol. 29, no. 3, 2024, pp. 433-460. doi: 10.1007/s11366-024-09881-7
- [5] C.F. Chen and G. Sewell, "Strategies for Technological Development in South Korea and Taiwan: The Case of Semiconductors," Res. Policy, vol. 25, no. 5, 1996, pp. 759-783. doi: 10.1016/0048-7333(95)00861-6
- [6] S. Rho et al., "Limited Catch-up in China's Semiconductor Industry: A Sectoral Innovation System Perspective," Millenn. Asia, vol. 6, no. 2, 2015, pp. 147-175. doi: 10.1177/0976399615590514
- [7] M. Tsay et al., "Journal Co-citation Analysis of Semiconductor Literature," Scientometrics, vol. 57, no. 1, 2003, pp. 7-25. doi: 10.1023/A:1023667318934
- [8] J. Guan and N. Ma, "A Bibliometric Study of China's Semiconductor Literature Compared with Other Major Asian Countries," Scientometrics, vol. 70, no. 1, 2007, pp. 107-124. doi: 10.1007/s11192-007-0107-3
- [9] 김기윤, 이성주, "한국 반도체 기술 네트워크 연구: 데이터 기반 접근법," 정부학연구, 제30권 제1호, 2024, pp. 89-116. doi: 10.19067/jgs.2024.30.1.89
- [10] R. Charpin et al., "The effect of geopolitical tensions on international research collaborations and its implications for global operations management," Int. J. Prod. Econ., vol. 268, no 109120, 2024. doi: 10.1016/j.ijpe.2023.109120
- [11] L. Valitova et al., "Fragmentation of global science and the role of BRICS: A bibliometric analysis of scientific publications on semiconductors," BRICS J. Econ., vol. 7, no. 1, 2026, pp. 5-47. doi: 10.3897/brics-econ.7.e176467
- [12] R. Li et al., "China-US scientific collaboration on sustainable development amidst geopolitical tensions," Humanit. Soc. Sci. Commun., vol. 11, no. 1448, 2024. doi: 10.1057/s41599-024-03948-9
- [13] M.E.J. Newman, "The Structure of Scientific Collaboration Networks," Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 98, no. 2, 2001, pp. 404-409. doi: 10.1073/pnas.98.2.404
- [14] J. Singh, "Collaborative Networks as Determinants of Knowledge Diffusion Patterns," Manage. Sci., vol. 51, no. 5, 2005, pp. 756-770. doi: 10.1287/mnsc.1040.0349