



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

과학 지도(Science Map)를 이용한
양자과학기술 분야 형성 및
발전과정 분석

2023년 8월

서울대학교 대학원

과학학과

홍명은

과학 지도(Science Map)를 이용한 양자과학기술 분야 형성 및 발전과정 분석

지도교수 박 상 욱

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

2023년 8월

서울대학교 대학원

과학학과

홍명은

홍명은의 석사 학위논문을 인준함

2023년 8월

위 원 장 _____ 이두갑 _____ (인)

부위원장 _____ 박상욱 _____ (인)

위 원 _____ 최현도 _____ (인)

국문초록

본 논문은 과학 지도(Science Map)를 이용해 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 분석했다. 양자과학기술은 물리학, 컴퓨터 과학, 공학, 수학 등의 다양한 학문과 관련 있는 학제간 연구 분야이이기 때문에 전통적인 학문 구조 내에서 형성 및 발전 과정을 관찰하기 어렵다. 따라서 이를 극복하기 위해 양자과학기술의 세부 분야인 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 관련 논문의 서지 정보를 과학 오버레이 지도를 시각화하여 관련 연구 활동의 상대적 위치를 분석하는 방법을 사용했다. 또 양자과학기술의 세부 분야 중 양자 통신 및 암호 분야를 연구기관 단위의 공동연구 네트워크로 시각화하여 해당 분야의 사회적 구조도 함께 확인했다. 분석 결과 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서의 지식 기반과 활용 분야는 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터에 속한 주제 범주였으며 두 클러스터의 비율은 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호가 약 2:1, 양자 센서가 약 5:1이었다. 초기에 다른 두 분야와 비교적 다른 분포를 보였던 양자 센서 분야는 시간이 흐름에 따라 다른 두 분야와 유사한 분포로 변화했다. 또, 각 세부 분야의 국가별 과학 오버레이 지도를 분석한 결과 양자 컴퓨터 분야는 미국, 중국, 한국이 모두 유사한 분포를 보였고, 양자 통신 및 암호 분야에는 선도 국가인 중국이 물리학 관련 주제 범주의 비율이 높았다. 양자 센서 분야에서는 한국의 기술 수준이 상대적으로 높음에도 불구하고 미국, 중국과 매우 다른 분포를 보였다. 공동연구 네트워크를 통해 양자 통신 및 암호 분야에서 중국 중심의 클러스터가 존재한다는 것을 발견했다. 해당 분야에서 중국은 독자적인 발전 경로를 가지며 중국 정부의 강력한 정책 지원과 내부 공동연구 네트워크 강화가 이러한 발전에 기여했다. 본 연구는 양자과학기술에 대한 학제간 연구 관점의 연구가 매우 부족한 상황에서 해당 분야를 분석하기 위한 관점을 제시하고 기초 자료를 제공한다는 의미를 갖는다. 더 나아가 정책 입안자가 양자과학기술 분야를 지원하기 위한 정책을 설계하거나 국내외 연구기관, 기업 등이 양자과학기술 분야의 발전 전략을 수립하고자 할 때 기초 자료로 활용될 수 있다.

주요어 : 양자과학기술, 학제간 연구, 과학 지도, 신흥 기술

학 번 : 2021-24338

목차

1. 서론	1
2. 이론적 배경 및 선행연구	7
1) 학제간 연구(Interdisciplinary Research)	7
2) 과학 지도를 이용한 학제간 연구 분석	9
3) 양자과학기술 형성 및 발전 과정 관련 선행연구	10
3. 연구 방법	11
1) 분석 방법	11
2) 데이터 수집 및 시각화	13
4. 분석 결과	15
1) 양자과학기술 세부 분야 과학 오버레이 지도	15
2) 국가별 양자과학기술 인지 지도	36
3) 양자 통신 및 암호 분야 형성 및 발전	49
5. 결론	55

<표 차례>

표 1 검색 쿼리 11
표 2 세부 분야별 주요 주제 범주 19
표 3 단일 주제 범주의 라오-스털링 지수 평균 (Porter&Youtie, 2009) 21

<그림 차례>

그림 1 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도 16
그림 2 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도 17
그림 3 양자 센서 과학 오버레이 지도 18
그림 4 1990년대 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도 23
그림 5 2000년대 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도 24
그림 6 2010년대 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도 25
그림 7 1990년대 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도 27
그림 8 2000년대 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도 28
그림 9 2010년대 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도 29
그림 10 1990년대 양자 센서 과학 오버레이 지도 31
그림 11 2000년대 양자 센서 과학 오버레이 지도 32
그림 12 2010년대 양자 센서 과학 오버레이 지도 33
그림 13 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도(미국) 36
그림 14 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도(중국) 37
그림 15 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도(한국) 38
그림 16 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(미국) 40
그림 17 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(중국) 41
그림 18 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(한국) 42
그림 19 양자 센서 과학 오버레이 지도(미국) 44
그림 20 양자 센서 과학 오버레이 지도(중국) 45
그림 21 양자 센서 과학 오버레이 지도(한국) 46
그림 22 1990년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크 49
그림 23 2000년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크 50

그림 24 2010년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크51

1. 서론

양자과학기술(Quantum Science and Technology)은 양자 기술, 양자 제어 및 양자 정보, 양자정보과학 등 여러 용어로 표현된다. 공통적으로 사용되는 ‘양자’는 양자역학을 의미한다. 양자역학은 20세기 초 고전 물리학 이론으로 해석할 수 없는 새로운 현상들을 설명하기 위한 물리학자들의 노력에서 시작되었다. 흑체 복사 실험의 결과를 해석하기 위한 플랑크(Max Planck)의 양자 가설과 광전 효과에 대한 아인슈타인(Albert Einstein)의 설명 등이 그 시초로 여겨진다. 이들의 이론적 시도는 각각 하이젠베르크(Werner Heisenberg), 보른(Max Born), 요르단(Pascual Jordan)의 행렬 역학과 슈뢰딩거(Erwin Schrodinger)의 파동 역학이라는 형태로 형식화되었다. 입자-파동 이중성, 중첩(superposition), 얽힘(entanglement), 불확정성 원리 등이 양자역학을 구성하는 주요 개념이다.

1935년 아인슈타인과 포돌스키(Boris Podolsky), 로젠(Nathan Rosen)이 양자 시스템 사이의 비국지적, 비고전적 상관관계에 대한 EPR 역설을 제시하면서 고전 정보 이론을 양자 얽힘에 적용할 경우 모순이 발생한다는 점이 밝혀졌다. 양자 얽힘과 관련된 이론 및 실험이 본격적으로 발전하면서 여러 물리학자들은 고전 컴퓨터로 양자역학 관련 현상을 시뮬레이션하는 데 한계가 있다는 사실을 발견했다. 리처드 파인만(Richard Feynman)은 MIT와 IBM이 개최한 계산 물리학(Physics of Computation) 학회에서 양자역학의 원리를 이용해 기존 컴퓨터보다 효율적으로 계산을 수행하는 양자컴퓨터의 개념을 제안했다. 데이비드 도이치(David Deutsch)는 이를 바탕으로 실질적인 양자 컴퓨터를 설계하고 범용 양자 컴퓨터(Universal quantum computer) 개념을 제안하는 논문을 발표했다.

물리학과 정보과학의 새로운 교차점인 양자 컴퓨터가 발전하면서 양자과학기술이 영향을 미칠 수 있는 범위 역시 확장되었다. 고전 컴퓨터

의 성능을 결정하는 반도체의 집적도가 터널링 효과로 인해 한계가 있다는 사실이 알려지면서 양자 컴퓨터는 고전 컴퓨터의 한계를 해결할 수 있는 돌파구로 여겨졌다. 양자 컴퓨터가 소인수분해 문제에 대해 고전 컴퓨터에 비해 압도적인 속도를 보일 수 있다는 사실이 쇼어(Peter Shor)가 제안한 알고리즘에 의해 증명되면서 기존 암호 체계의 한계가 드러났고, 양자 시스템을 이용한 통신 및 암호 체계가 그 대안으로 주목 받았다. 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호 등 양자과학기술을 구현하기 위해 원자, 전자, 광자와 같은 단일 입자로 구성된 양자 시스템을 설계하고 제어하기 위한 새로운 실험 도구와 이론이 개발되었다.

Dowling&Milburn(2003)은 새로운 양자과학기술의 등장을 “제2차 양자혁명”이라고 정의하며 그 차이를 최초의 양자 혁명에서는 이미 존재하는 것을 이해하기 위해 양자역학을 사용했다면 제2차 양자 혁명은 양자역학을 적극적으로 활용하여 양자 시스템을 능동적으로 설계 및 제어하는 기술을 의미한다고 설명했다. 양자역학의 등장은 “양자 혁명”이라고 불릴 정도로 다양한 분야에 큰 파급력을 미쳤다. 물리학뿐만 아니라 화학, 재료과학, 공학 등 다양한 분야가 양자역학의 영향을 받았다. 레이저, 트랜지스터, 원자력, 태양 전지, 핵자기공명(NMR) 장치 및 입자 가속기의 초전도 자석 등 양자역학을 기반으로 한 기술도 등장했다. 이러한 기술은 현대 사회를 뒷받침하는 핵심 기술의 역할을 수행하고 있다. 터널링 효과 등 입자 양상들의 양자적 거동을 이용하는 이러한 기술을 묶어 “1세대 양자 기술”이라고 부르기도 한다(Pritchard&Stephen, 2014). 양자과학기술 역시 양자역학의 파급력만큼 혹은 그 이상의 파급력을 가질 것이라는 예측이 반영된 용어이다.

본 연구의 “양자과학기술”은 양자역학의 원리를 이용한 “1세대 양자 기술”이 아닌 “2세대 양자 기술”이다. “2세대 양자 기술”은 물리학 및 정보과학의 교차점에서 탄생한 양자 정보 과학(Quantum Informatin Science)을 기반으로 하는 양자 컴퓨터, 양자 센서, 양자 통신 시스템을 등을 의미한다(Deustch, 2020). 양자역학과 관련된 모든 기술 대신 제2차

양자혁명의 새로운 양자과학기술을 분석 대상으로 삼아 최근 과학기술 분야의 유행어(buzzword)로 여겨질만큼 사회 전반의 주목을 받고 있는 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등의 과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 보다 명확히 드러내고자 한다.

양자과학기술은 과학기술 분야 전반에 혁신을 가져올 기술이자 미래 산업, 안보의 게임 체인저로 평가받고 있다. 양자 컴퓨터는 특정 연산에서 고전 컴퓨터보다 압도적으로 빠른 연산 속도를 갖기 때문에 항공우주, 화학, 의료 및 제약, 물류 및 운송 등 여러 분야의 최적화 문제를 해결할 수 있다. 또, 머신 러닝, 양자역학 시스템 시뮬레이션 등 여러 과학적 난제를 해결하고 암호화, 금융 등의 분야에서 새로운 경제적 기회를 창출할 것이라고 여겨진다(Srivasta, 2016). 현재 일반적으로 사용되고 있는 암호 체계가 고전 컴퓨터의 연산 능력의 한계에 의존하기 때문에 보안 분야에도 근본적인 변화를 야기할 것이다. 양자 통신 및 암호는 해킹이 불가능한 안전한 통신을 가능하게 하고, 양자 센서는 기존 센서보다 정밀도가 높고 측정 범위가 넓어 다양한 산업에 활용될 수 있다. 이러한 과학기술의 발전은 각 국가의 경제적, 정치적, 군사적 영향력에 큰 변화를 가져올 것이라고 예상된다. 따라서 여러 국가들이 양자과학기술 관련 정책을 수립하고 관련 연구에 투자하고 있다.

미국, 중국, EU, 독일, 영국, 캐나다, 일본, 러시아 등 일부 국가는 양자과학기술을 국가 전략 기술로 선정하고 적극적으로 지원하고 있다(Sigov et al., 2022) 미국은 세계 최초로 ‘국가양자이니셔티브’ 법안을 수립하고 관련 위원회를 구성하여 관련 연구개발 프로그램을 집중적으로 시행하고 있다(KISTEP, 2019). 국방부, 국립표준기술연구소, DARPA(민군겸용기술개발청), IARPA(고등정보기술개발청), NASA(미국 항공우주국), 등 다양한 정부 기관에서 양자과학기술과 관련된 연구개발 프로젝트를 진행해왔으며 최근에는 NSA(국가안보국), 에너지부(DOE) 등에서 추진하는 프로젝트가 가장 대표적이다(IITP, 2018). 중국은 2016년 ‘제13차 5개년계획’부터 양자를 전략 분야로 설정하고 양자 통신 관련 프로젝

트를 추진했으며 2021년 ‘제14차 5개년 계획’에는 양자정보, 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자과학 관련 프로젝트가 포함되었다(KISTEP, 2022). 유럽은 양자 플래그쉽 프로젝트를 통해 2018년부터 10년간 10억 유로 규모의 양자기술 개발 프로그램을 시행하고 있다(과학기술정보통신부 외, 2018). 한국에서도 2014년부터 양자정보통신 중장기 추진전략을 수립하고 양자정보통신 중장기 기술개발 사업의 예비타당성 조사를 시행하는 등 양자암호통신을 중심으로 꾸준한 정책시도가 있었다(KISTEP, 2019). 최근에는 양자과학기술 전반에 대한 R&D 투자를 확대하는 “양자기술 연구개발 투자전략”을 발표하는 등 관련 투자를 적극적으로 확대하고 있다.

양자과학기술은 사회 전반에 영향을 미칠 수 있는 게임 체인저로 여겨지기 때문에 각 국가의 정부들은 경쟁적으로 막대한 자금을 관련 연구에 투자하고 있다. 관련 정책을 설계하고 시행하기 위해 양자과학기술 분야의 형성에서부터 최근의 폭발적인 발전까지의 과정에 대한 이해가 필요하다. 혁신이라는 측면에서 양자과학기술은 엄청난 가능성을 갖고 있지만 여전히 수많은 도전과 불확실성이 존재하기 때문이다. 1980년대 후반에 본격적으로 형성되어 비교적 역사가 짧고 물리학, 컴퓨터 공학, 수학 등 다양한 학문 분야와 관련된 학제간 연구 분야라는 점 역시 더욱 문제를 복잡하게 만드는 요인이다. 따라서 본 연구는 양자과학기술의 형성 및 발전 과정을 분석해 관련 정책의 설계 및 시행을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구는 양자과학기술 분야를 분석하기 위해 다음 세 가지 특징에 주목했다. 첫 번째는 양자과학기술이 물리학, 컴퓨터공학, 화학, 수학 등 다양한 학문 분야와 관련된 학제간 연구 분야라는 것이다. 학제간 연구는 전통적인 학문 분류 내에서 발전 과정을 포착하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 논문의 서지 정보를 시각화하는 과학 지도(Science map) 방법론을 사용했다. 과학 지도는 학제간 연구의 성장을 관찰할 수 있는 대표적인 연구 방법론으로 해당 분야의 구조와 역학을 보일 수 있다. 전통적인 학문 분야의 구조를 시각화한 기초 과학 지도 위에 특정 논문의 정

보를 중첩하여 해당 연구 활동의 상대적 위치를 시각화하는 과학 오버레이 지도를 이용해 양자과학기술의 지식 기반과 활용 분야를 분석했다. 두 번째는 양자과학기술이 서로 다른 응용 분야 즉, 컴퓨터, 통신, 센서 등을 기준으로 분류되는 세부 분야로 구성되어 있다는 것이다. 각 분야는 지식 기반과 활용 분야를 공유하지만 차이 역시 분명하다. 각 분야의 경제적 가치, 영향력에 대한 기대부터 필요한 연구 자금, 인프라, 기초과학 역량 등 다양한 요인에서 그 차이가 드러난다. 이러한 차이 때문에 일부 국가에서는 특정 세부 분야에 우선순위를 둔 정책을 시행하기도 한다. 한국의 경우 초기에는 양자암호통신을 중심에 둔 정책이 주로 시행되었다(KISTEP, 2019). 마지막으로 세 번째는 다른 학제간 연구 분야에 비해 국가 사이의 장벽이 높다는 것이다. 양자과학기술은 대부분 국가에서 경제, 안보 분야의 혁신에 대한 기대로 정부의 집중적인 지원을 받으며 성장한 과학기술 분야이다. 양자 통신 분야에서 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있는 중국 역시 도청 위협을 막기 위해 관련 기술을 개발하고 인프라를 구축하는 사업을 시작했다. 최근 미국은 수출관리규정을 제정 및 개정하고 일부 중국 기업을 거래 제한 명단에 포함하는 등 양자과학기술이 중국으로 유출되는 것을 매우 경계하고 있다(KISTEP, 2022).

따라서 본 연구는 과학 지도를 이용해 양자과학기술 전체가 아닌 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서의 세 가지 세부 분야를 분석했다. 연구 활동의 상대적 위치를 이용해 기존 학제와 각 세부 분야의 관계를 확인할 수 있었다. 또, 미국, 한국, 중국에서 각 세부 분야가 형성되고 발전하는 과정을 비교하여 국가라는 요인이 양자과학기술에 미치는 영향을 관찰했다. 세 국가를 선택한 것은 양자과학기술 수준, 공동연구, 분야 대표성 등을 고려한 결과이다. 미국과 중국은 양자과학기술 분야의 선도 국가이며 한국 역시 15위권 정도로 높은 양자과학기술 수준을 갖고 있다. 비슷한 순위의 다른 국가들이 미국과의 공동연구 비율이 훨씬 높은 것과 달리 한국의 경우 미국과 중국의 공동연구 비율이 유사하다. 또,

미국은 양자 컴퓨터 분야를, 중국은 양자 통신 및 암호 분야를 대표하는 국가이며 한국은 다른 두 분야에 비해 양자 센서 분야의 기술 수준이 훨씬 높아 양자 센서 분야를 대표하는 국가의 역할을 할 수 있다.

2장에서는 학제간 연구, 과학 지도를 이용한 학제간 연구 분석에 대한 선행 연구를 검토하고 같은 관점에서 양자과학기술을 분석하기 위한 분석틀을 설계한다. 더불어 양자과학기술 등에 대한 기존 연구를 살펴보고 그 한계를 해결하기 위한 방법론을 제시한다. 3장에서는 과학 지도 방법론을 설명하고 분석 대상인 데이터 수집 방법을 소개한다. 4장에서는 인지 공간의 구조를 보일 수 있는 과학 오버레이 지도와 사회적 구조를 보일 수 있는 공동연구 네트워크 방법론을 사용해 양자과학기술의 형성 및 발전 과정을 분석하고 양자과학기술의 역사와 함께 논한다. 각 세부 분야에 대해 전체 과학 오버레이 지도와 1990년대, 2000년대, 2010년대의 과학 오버레이 지도를 시각화해 연구 활동의 상대적 위치를 포착하고 시간에 따른 변화를 관찰했다. 또, 국가별로 각 세부 분야의 과학 오버레이 지도와 양자 통신 및 암호 분야의 공동연구 네트워크를 시각화하고 관련 역사와 함께 논한다. 마지막으로 5장에서는 양자과학기술 분야 형성 및 발전 과정에 대한 분석 결과를 정리하고 정책적 함의를 제시하고자 한다.

본 연구는 양자과학기술에 대한 학제간 연구 관점의 연구가 매우 부족한 상황에서 해당 분야를 분석하기 위한 관점을 제시하고 기초 자료를 제공한다는 의미를 갖는다. 더 나아가 정책 입안자가 양자과학기술 분야를 지원하기 위한 정책을 설계하거나 국내외 연구기관, 기업 등이 양자과학기술 분야의 발전 전략을 수립하고자 할 때 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

1) 학제간 연구(Interdisciplinary Research)

학제간 연구란 단일 학문 분야만으로 해결할 수 없는 복잡한 문제를 해결하기 위해 서로 다른 학문 분야의 연구자들이 협력하는 연구 방식이다. 20세기 초 학문의 제도화로 인해 과학 분과(discipline)의 개념이 일반화되었다. 그러나 20세기 중반 환경 파괴, 빈곤, 의로 등 사회가 직면한 많은 문제를 단일 학문이나 연구 분야로 해결할 수 없다는 인식이 확산되면서 새로운 지식 탐구를 위해서 학문의 경계를 넘어서는 협력이 필요해졌다. 이에 따라 학제간 연구라는 명칭으로 학문 분야를 넘나드는 연구 방식이 주목받기 시작했다.

학제간 연구라는 용어가 공식적으로 처음 등장한 것은 1972년 작성된 대학 교육 및 연구에 대한 OECD 보고서이다(Apostel et al., 1972). 이후 다양한 국가 보고서 및 정책에서 학제간 연구라는 용어가 사용되었다. 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF)은 융합 기술을 나노 기술, 바이오 기술, 정보 기술, 인지과학 등 4개의 기술 분야의 기술간 혹은 기술 내 결합으로 정의하며 학제간 연구의 중요성에 주목하는 모습을 보였다(NSF, 2002). 이후 이 보고서는 미국의 국가 나노기술 이니셔티브 등 주요 정책에 핵심적인 영향을 미쳤다. 현재 학제간 연구의 정의로 가장 널리 사용되는 것은 IDR 촉진을 위한 보고서에 의한 것으로 “두 개 이상의 학문 또는 전문 지식 단체의 정보, 데이터, 기술, 도구, 관점, 개념 및/또는 이론을 통합하여 근본적인 이해를 증진하거나 단일 학문 또는 연구 실무 영역의 범위를 벗어나는 문제를 해결하기 위해 팀 또는 개인이 수행하는 연구 방식”이다 (NAEKI, 2005). 나노 기술, 바이오 기술, 기후 변화, 재료과학 등이 대표적인 학제간 연구 분야이다. 사회 문제 해결의 필요성이 증가하고 데이터 생산 기술, 컴퓨터 성능 등이 발전함에 따라 학제간 연구는 여전히 확산되고 있다(Klein, 2017).

학제간 연구의 증가와 함께 학제간 연구의 측정 및 평가, 촉진의 필요성이 증가

했고 이에 따라 관련 보고서와 논문 역시 증가했다. 하지만 학제간 연구와 관련 용어(multidisciplinary, transdisciplinary 등)는 여전히 느슨한 개념으로 남아있다. 다양한 유형학들이 제시되었으나 처음 학제간 연구라는 용어를 사용했던 보고서에서 제시된 다학제 연구와 학제간 연구의 분류가 여전히 가장 널리 사용되는 유형학이라고 한다(Klein, 2008). 다학제 연구와 구분되는 학제간 연구의 핵심은 다양한 층위의 상호작용에 있다. 이에 대해 일부 연구자들은 학제간 연구의 본질적인 특성으로 인해 학제간 연구를 단일한 개념으로 정의하기 보다는 복합적인 상호작용으로 이해해야 한다고 주장한다. Huutoniemi(2010)는 학제간 연구는 단일한 형태가 아니기 때문에 기존의 학문적 접근 방식을 연결시키고 대립시키는 다양한 방식으로 이해할 필요가 있다고 주장했다. Klein(2006)은 복합적인 상호작용으로서의 학제간 연구의 특성으로 인해 학제간 연구의 단일 표준을 정의하기가 어렵고, 학제간 연구 활동을 평가하는 것 역시 어렵다는 한계를 제시하기도 했다.

학제간 연구의 학문 분과(discipline)는 지식 기반, 구성원 및 네트워크, 학술적 제도로 구성된다(박상욱, 2012). 그러므로 학제간 연구 분야의 형성 및 발전 과정을 분석하기 위해서는 지식 기반에서 일어나는 인지적 현상과 구성원 사이의 네트워크가 형성되고 발전하는 사회적 현상, 학술제도와 인지적, 사회적 현상의 상호작용 등을 포괄적으로 분석해야 한다. Wagner(2011)는 학제간 연구(IDR)는 통합적으로 고려해야 하는 사회적, 인지적 현상이며, 여각기에는 연구를 통한 지식의 생산부터 과학 내 확산, 상업화를 통한 사회와의 만남에 이르는 전 과정을 분석하는 것이 포함되고, 정책과 문화의 영향 역시 고려되어야 한다고 주장했다. 또, Heimeriks et al.(2012)는 지식 생산의 역학을 적절히 포착하기 위해서는 연구, 과학, 사회의 공진화를 분석해야 한다고 주장했다. 양자과학기술 분야 역시 새롭게 등장하고 있는 학제간 연구 분야이기 때문에 해당 분야의 형성 및 발전 과정을 이해하기 위해서는 다양한 층위에서 벌어지는 상호작용을 복합적으로 분석해야 한다. 따라서 본 연구는 양자과학기술 분야의 지식 기반과 연구기관이라는 관련 사회적 구조 층위에서 벌어지는 상호작용을 함께 분석했다.

2) 과학 지도를 이용한 학제간 연구 분석

과학 지도(Science Map)란 저자, 인용, 연구기관, 저널 등 논문의 서지 정보를 이용하여 과학 분야의 구조와 역학을 분석하고 시각화하는 기법으로 분과, 분야, 저자, 키워드, 출판물의 관계를 보여주는 것을 목표로 한다(Chen, 2013). 이를 통해 과학의 구조와 진화에 대한 통찰을 제공하고, 연구 프로젝트의 성과를 평가하거나 영향을 측정할 수 있다. 또, 특정 분야의 인지 기반을 이해하고 새로운 분야의 상대적 위치를 파악하기 위해 사용되기도 한다(Leydesdorff, 2009). 주요 논문 사이의 관계를 분석하고 해당 분야 내에서 가장 중요한 저자, 저널, 논문을 탐지하는 등의 방식으로 활용될 수 있다(Moya-Anegon, 2004). 일반적으로 과학 지도는 노드와 링크로 구성된다. 노드는 출판물, 저자, 연구 기관, 저널, 카테고리 등이며 링크는 공동연구, 직접인용, 동시인용, 서지결합, 텍스트 동시사용, 서지결합 등의 연결관계를 기반으로 구축된다. 인용 기반 네트워크는 지식 기반의 융합을, 공동 연구 네트워크는 사회적 구조의 융합을 분석하기 위해 주로 사용된다.

새롭게 등장하는 학제간 연구 분야의 경우 전통적인 학문 분류를 따르지 않기 때문에 성장을 관찰하고 발전 과정을 이해하기 위해 과학 지도가 더욱 유용하다. 특히 학제간 연구의 측정 및 평가, 촉진 방안을 탐색하기 위해 사용되는 경우가 많다. 나노기술, 바이오 기술, 뇌인지과학, 기후변화 등 최근 등장한 학제간 연구 분야를 과학 지도를 사용하여 분석하는 다양한 연구가 수행되었다. Leydesdorff와 Goldstone(2014)는 1980~2011 사이에 Cognitive Science에서 출판된 논문을 science mapping 방법론으로 분석해 인지과학 분야의 시대별 변화를 추적했다. Hellsten과 Leydesdorff(2016)은 climate change에 출판된 논문의 인용 네트워크를 이용해 지식 기반이 확장되는 모습을 관찰했다. Lucio-Arias와 Leydesdorff (2007)은 저널 네트워크와 단어 분석을 통해 나노튜브 연구 과정을 분석했으며 Leydesdorff와 Zhou (2007)는 나노 기술의 관련 집합은 감소하고 핵심 집합은 증가했다는 점을 근거로 나노기술 분야의 codification이 증가했다고 주장했다.

다른 학제간 연구 분야와는 달리 양자과학기술 분야는 큰 기대를 받으며 빠르게

성장하고 있어 연구자와 정책 입안자 등의 관심이 집중되고 있음에도 불구하고 과학 지도 방법론을 이용한 연구가 매우 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 과학 지도 방법론을 이용해 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 분석해 양자과학기술이라는 새로운 분야에 대해 이해하고 더 나아가 학제간 연구 분야에 새로운 사례를 제공하는 역할을 하고자 한다.

3) 양자과학기술 형성 및 발전 과정 관련 선행연구

양자과학기술의 발전으로 해당 분야에 대한 관심이 폭발적으로 증가하면서 최근 몇 년 동안 양자과학기술의 미래 전망을 예측하기 위한 서지학적 관점의 연구 역시 다양하게 시도되었다. Tolcheev(2018)는 2000년 이후 제목, 초록, 키워드에 “양자(quantum)”라는 단어를 포함한 모든 논문을 분석해 양자 기술 개발 상황을 살펴보고 미래를 전망하고자 했다. 양자과학기술과 양자역학을 기반으로 한 기술을 포괄적으로 살펴보았다. Tolcheev의 연구는 양자역학 관련 현상 및 원리를 기반으로 한 기술을 모두 분석 대상으로 삼았기 때문에 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 포착하기 어렵다는 한계를 갖는다.

양자과학기술 분야의 발전을 위한 전략 수립, 기술 예측을 목표로 하는 연구들은 양자과학기술 세부 분야의 발전 과정을 분석하는 관점을 택했다. Okujnyk(2018)은 2001년부터 2017년까지 양자 암호 분야 논문의 서지 정보를 분석해 중국이 주도적인 역할을 수행한다는 사실을 밝혀냈다. Dhawan(2018)은 2007년부터 2016년까지 양자 컴퓨팅 연구의 출판물 생산량을 분석해 주요 국가, 연구기관, 저자, 저널 등을 식별했다. Scheidsteger(2021)는 양자과학기술을 양자정보과학, 양자컴퓨터, 양자통신, 양자 계측으로 나누어 각 분야의 발전 과정을 분석했으며 Liu et al.(2022)는 새로운 기술의 등장이라는 관점에서 양자 통신 분야의 형성 과정을 살펴보았다. Wang et al.(2021)은 과학 지도 방법론을 사용해 관련 논문의 서지학적 정보를 분석해 양자과학의 기술 발전을 보여주고 그 과정에서 미국, 중국, 프랑스 학술 기관 및 학자들이 선도적인 역할을 했다는 것을 보여주었다.

기존 연구의 한계를 극복하기 위해 본 연구는 다음과 같은 접근을 취한다. 우선 양자역학 관련 현상 및 원리를 기반으로 한 기술과 양자과학기술을 구분함으로써 보다 좁은 분야에 대한 통찰을 제공하고자 한다. 양자역학 기반 기술은 현재 주목 받고 있는 양자정보과학을 기반으로 한 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 포착하기에는 지나치게 포괄적이기 때문이다. 이를 위해 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서이라는 양자과학기술의 구체적인 세부 분야를 선정하고 해당 분야의 논문을 분석했다. 또, 기존 연구들은 대부분 기술 발전을 위한 전략, 기술 예측 등을 목적을 하는 연구가 대부분이기 때문에 물리학, 수학, 화학, 컴퓨터 공학 등 다양한 분야를 바탕으로 하는 학제간 연구 분야로서의 양자과학기술 분야의 특징을 포착한 연구는 아직 부족하다. 그러므로 본 연구는 과학 지도라는 방법론을 사용하여 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정을 분석하였다.

3. 연구 방법

1) 분석 방법

본 연구에서는 다양한 형태의 과학 지도 중 과학 오버레이 지도(Science overlay map)과 연구기관 단위의 공동연구 네트워크를 사용한다. 오버레이 매핑(overlay mapping)은 기초 지도(base map) 위에 특정 분야의 데이터를 중첩시키는 방법론으로 기초 지도의 종류에 따라 분류된다. 과학 오버레이 지도는 저널 클러스터링을 이용해 과학의 구조를 시각화한 과학 지도를 기초 지도로 하여 그 위에 과학적 산출물의 데이터를 매핑하여 중첩 지도를 그리는 방법론이다(Rafols et al., 2010).

논문 정보를 이용해 전체 과학의 구조를 시각화하고자 하는 시도는 1970년대부터 시작되었으나 알고리즘 및 계산 능력의 한계로 방법론에 따라 결과가 크게 달라지는 불안정성을 보였다. 이후 Klavans & Voyack(2009)는 분석 단위, 유사성 함

수, 클러스터링 알고리즘 등 다른 방법론으로 만들어진 과학 지도의 핵심 구조가 유사하다는 사실을 발견했다. Rafols와 Leydesdorff(2009)는 서로 다른 학술적 분류를 사용해도 유사한 전체 과학 지도를 얻을 수 있음을 보이고, 저널의 '분야'를 뜻하는 ISI 카테고리를 기본 단위로 하는 저널 인용 행렬을 구성해 전체 과학 지도를 시각화했다. 특정 학문, 저널, 연구 프로젝트 등 일부 데이터를 사용했던 이전 연구와는 다르게 출판된 모든 논문의 데이터를 사용해 전체 과학의 구조를 시각화한 것이다.

과학 오버레이 지도의 한계는 기초 지도가 저널 기반의 ISI 카테고리에 기반하기 때문에 논문의 과학 분야가 출판된 저널의 분야로 분류된다는 점이다. 예를 들어 물리학자와 컴퓨터공학자가 함께 양자컴퓨터 구현에 대해 연구한 논문이 물리학 저널에 실린다면 그 논문의 과학 분야는 물리학으로 분류될 것이다. 저널은 다양한 학문의 관점을 결합하기도 하고, 연구자들 역시 다양한 저널의 논문들을 읽기 때문에 이러한 방식의 분류는 부정확할 수 있다. 다만 이러한 불일치와 오류는 편향되지 않으므로 평균화되는 경향이 있다(Rafols & Leydesdorff, 2009). 그러므로 오류를 최소화하기 위해서는 충분히 많은 출판물 데이터를 사용해야 한다. 이러한 한계로 인해 과학 오버레이 지도는 특정 연구자의 연구 결과를 분석하기에는 부적절하다.

과학 오버레이 지도를 이용해 전통적인 학문 분류에 속하지 않는 연구의 발전을 관찰할 수 있다. 과학 오버레이 지도 방법론은 시간에 따른 변화를 묘사하고 추적하며 한 분야 내에서 증가하는 과학적 발전의 수를 분석하는 데 유용하다고 알려져 있다(Rafols et al., 2010). 이를 통해 특정 분야의 논문이 다른 과학 분야와 어떻게 관련되어 있는지 관찰할 수 있다. 특정 분야의 지식 기반을 인지 공간에 시각화해서 인지 지도라고 불리기도 한다. 이때, 인지 공간은 전통적인 학문 분류에 대응하는 개념으로 과학 지식의 인식론적 구조를 의미한다. 인지 지도에서 노드 크기는 노드가 나타내는 특정 분야에서 출판된 출판물의 수에 비례한다(Leydesdorff et al., 2013; Rotolo et al. 2013). 연구 조직 사이의 협업 활동, 벤치마킹, 시간적 변화 분석에 사용될 수 있다(Rafols et al., 2010). 과학 오버레이 지도를 이용해 새로운 과학기술 분야의 출현을 매핑하면 특정 주제가 관련된 주요 학문 분과에서 상호작용

하는 방식이나 행위자의 지식 생산 프로세스가 어느 영역에 위치하는지 등을 발견할 수 있다(Rotolo et al., 2013). 또, 하위 기간으로 나누어 시간에 따른 관심 분야의 진화를 보여주기 위한 종단적 연구에도 적용될 수 있다(Kalz&Marcus, 2014). 새롭게 등장한 기술의 다학제적 지식 기반을 하나의 분야(Porter&Youtiem 2009) 혹은 특정 하위 분야로 나누어 분석하는 데 사용된다. 본 연구 역시 양자과학기술 분야의 발전 과정을 분석하기 위해 1990년대, 2000년대, 2010년대로 기간을 나누어 시간에 따른 변화를 시각화하였다.

연구기관 단위의 공동연구 네트워크는 가장 성능이 우수하다고 알려진 거리 기반 매핑 방법 중 하나인 VOS(Visualization of similarity) 매핑 기법을 사용했다 (Van eck et al., 2007; Van eck et al., 2010). 클러스터링을 위해서는 Newman(2004)에 의해 제시된 모듈성 기반 클러스터링 기법을 사용했다. Vos viewer는 두 기법을 기반으로 한 통합 프레임워크를 제공한다(Wlaterman et al., 2010)

2) 데이터 수집 및 시각화

본 연구에 사용된 서지 데이터는 Clarivate Analytics (Philadelphia, PA, USA)에서 제공하는 Web of Science (WoS) database를 통해 수집했다. 사용한 검색 쿼리는 표1과 같다(Scheidsteger et al., 2021). 2023년 3월 25일에 WoS 온라인 버전을 통해 이루어졌으며 1980년부터 2023년검색은 까지 양자 컴퓨터 분야 37,502편, 양자 통신 및 암호 분야 22,271편, 양자 센서 분야 20,066편의 출판물이 검색되었다. 일부 분석에는 1990년대, 2000년대, 2010년대 출판물의 서지 데이터가 활용되었다.

표 1 검색 쿼리

세부 분야	검색 쿼리
양자 컴퓨터	(ts = (“quantum comput*” OR “quantum supremacy” OR “quantum error correction” OR “quantum annealer” OR (quantum NEAR/2

	<p>(automata OR automaton)) OR “quantum clon* machine*”) OR (ts = (“quantum hardware” OR “quantum device*” OR “quantum circuit” OR “quantum processor*” OR “quantum register*”)) OR (ts = (“quantum simulat*” AND (qubit* OR “quantum bit*” OR “quantum comput*”) OR “quantum simulator*”) OR (ts = “quantum simulat*” AND wc = (quantum science technology OR computer science theory methods))) OR (ts = “quantum algorithm*”) OR (ts = (“quantum software” OR “quantum cod*” OR “quantum program*”))</p>
양자 통신 및 암호	<p>(ts = (“quantum communication*” OR “quantum network*” OR “quantum optical communication” OR “quantum state transmission*” OR (“quantum memor*” OR “quantum storage*” NEAR/5 photon*) OR “quantum repeater*” OR “quantum internet” OR (“quantum teleport*” AND (“qubit*” OR “quantum bit*” OR “entangle*”)))) OR (ts = (“quantum crypto*” OR pqcrypto* OR “quantum key distribution” OR “quantum encrypt*” OR (“quantum secur*” OR “quantum secre*”) NOT (“quantum secreted” OR “quantum secretion”))))</p>
양자 센서	<p>(ts = ((quantum NEAR/10 metrology) OR (quantum NEAR/1 tomograph*) OR “atomic clock*” OR “ion clock*” OR “quantum clock*” OR “quantum gravimeter*”)) OR (ts = ((Quantum NEAR/1 Sensing) OR (Quantum near/1 Sensor*))) OR (ts = (“quantum imag*”) OR “ghost imag*”)) OR (ts = (“quantum control*” OR “control* of quantum” OR “control over quantum” OR “quantum optimal control” OR “quantum state control” OR “control* quantum”</p>

	OR “control* the quantum” OR “quantum coherent control”))
--	---

양자 컴퓨터 분야는 quantum computing, quantum hardware system, quantum simulation, quantum algorithms, quantum software 등의 기술 분야를 포함한다. 양자 통신 및 암호 분야는 quantum communication and networking, quantum cryptographym 등의 기술 분야를 포함한다. 마지막으로 양자 센서 분야는 quantum metrology, quantum sensing, quantum imaging, quantum control 등의 기술 분야를 포함한다.

데이터는 Pajek, Vos Viewer 소프트웨어를 사용하여 시각화했다. Rafols, et al.(2010)가 온라인으로 제공한 절차와 도구를 활용했다. 기초 지도의 데이터는 2015년까지의 서지 정보를 포함하도록 업데이트된 버전을 사용했다(Carley et al., 2017).

4. 분석 결과

1) 양자과학기술 세부 분야 과학 오버레이 지도

본 연구는 양자과학기술의 세부 분야 즉, 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 관련 논문의 서지 정보를 과학 오버레이 지도 방법론을 이용하여 시각화했다. 이를 통해 새롭게 등장하는 과학기술 분야인 양자과학기술이 전통적인 학문 구조에서 어디에 위치하는지를 포착할 수 있다. 과학 오버레이 지도의 각 노드는 관련 논문이 출판된 ISI 주제 범주로 관련된 연구 영역을 의미한다. 이는 해당 분야의 지식 기반을 분석하는 데 사용될 수 있다(Porter&Youtie, 2009; Emrouznejad&Marra, 2017). 또, 시간에 따른 과학 오버레이 지도의 변화를 관찰하면 연구 주제가 여

러 분야로 확산되는 과정을 분석할 수 있다(Kiss et al., 2009). 탄소 나노튜브 연구를 과학 오버레이 지도를 이용해 분석한 결과 초기에는 재료 과학과 물리화학 분야에서 높은 성장률을 보였던 반면, 최근에는 의료 응용, 생의학, 환경 등의 분야에서 가장 높은 성장률을 보이고 있어서 탄소 나노 튜브 연구의 핵심 주제가 응용 분야와 건강 및 환경, 안전 문제로 변화하고 있다는 사실을 포착했다(Rafols et al., 2010). 과학 오버레이 지도는 특정 분야의 진화를 동적으로 보여줄 수 있다는 장점을 갖는다. 양자과학기술 역시 물리학, 컴퓨터 공학, 수학 등 다양한 학문을 기반으로 하는 학제간 연구 분야로 전통적인 학문 분류를 따르지 않기 때문에 과학 오버레이 방법론을 이용해 논문의 서지 정보를 시각화하는 것이 형성 및 발전 과정 분석에 유용하다.

양자과학기술 전체가 아닌 세부 분야를 분석 대상으로 삼은 것은 각 세부 분야가 양자정보과학이라는 학문적 기반을 공유하지만 뚜렷하게 구분되는 특성이 존재하기 때문이다. 양자과학기술은 계층부터 통신, 시뮬레이션, 컴퓨팅 등 광범위한 응용 분야에 영향을 미칠 수 있다. 각 응용 분야는 양자과학기술을 사용하는 방식, 잠재적 영향, 해결해야 하는 과제 등 여러 층위에서 고유한 영역을 갖고 있다. 또 응용 분야의 특성으로 인해 발전을 위해 필요한 역량, 미래 기술 전망 역시 뚜렷한 차이를 보인다. 그러므로 정부, 기업 등 양자과학기술 발전을 위해 투자하는 기관은 특정 세부 분야에 투자를 집중하는 등 우선순위를 둘 수 있다. 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호 분야에 비해 양자 센서 분야에 대한 연구가 부족한 것 역시 이러한 차이가 드러나는 점이라고 할 수 있다.

이에 더해 세부 분야인 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등의 세부 분야의 분류 역시 불확실한 면이 있다. 초기 연구를 살펴보면 양자과학기술을 다양한 방식으로 분류해왔다는 사실을 알 수 있다. Dowling&Milburn(2003)은 양자 기술을 양자 정보 기술(Quantum information technology), 양자 전자기 시스템(Quantum electromagnetic systems), 양자 결맞음 전자공학(Coherent quantum

electronics) 등 기술의 학문적 기초를 기준으로 분류했다. 반면, Jaeger(2018)는 양자역학이 기술 분야에 미칠 영향을 양자 계측, 양자 암호학 등 새로운 세대의 양자 기술, 나노 기술, 양자 컴퓨터로 나누어서 제시했다.

최근 양자과학기술에 대한 사회적 관심이 증가하면서 응용 분야를 기준으로 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등의 분류가 가장 일반적으로 사용되고 있다(Fedorov et al., 2019; Yamamoto et al., 2019; Zhang et al., 2019; Raumer&Monroe, 2019). 양자과학기술의 기초 학문이라고 할 수 있는 양자정보과학을 더해 네 가지 세부 분야로 분류하기도 한다(Scheidsteger, 2021). 관련 정책 역시 주로 컴퓨팅, 센싱, 통신으로 양자과학기술을 분류하며 양자정보과학, 기초/기반 등 관련 기초과학을 더하거나 시뮬레이터와 컴퓨터를 분리한다. 본 연구는 응용 분야에 초점을 맞춰 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서라는 세 가지 세부 분야를 분석 대상으로 삼았다.

그림 1,2,3은 각각 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 분야 논문의 서지 데이터를 과학 오버레이 지도로 시각화한 것이다. 기초 지도는 WoS 주제 범주 227개의 노드로 이루어져 있으며 화학 및 물리학(3, 파랑), 공학 및 수학(5, 보라), 심리학 및 사회 과학(2, 초록), 생물학 및 약학(1, 빨강), 생태학 및 환경과학/공학(4, 노랑) 등의 주제로 클러스터링되어 있다(Carley et al., 2017). 괄호 안의 숫자는 각 클러스터의 id를, 색은 과학 오버레이 지도 색을 의미한다. 각 노드의 크기는 각 주제 범주의 저널에 게시된 양자과학기술 분야 논문의 비율에 비례한다.

그림 1 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도

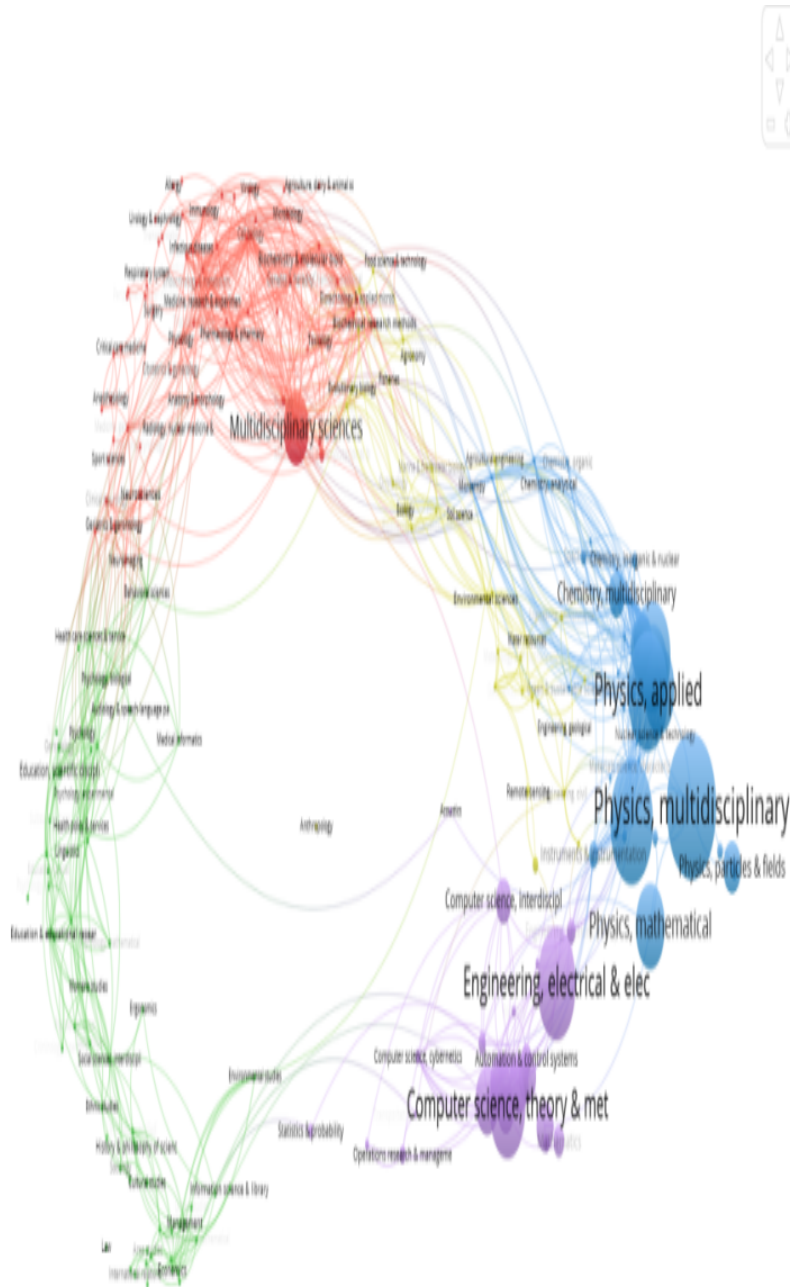


표 2 세부 분야별 주요 주제 범주

세부 분야	주제 범주(노드)	id
양자 컴퓨터	Physics, multidisciplinary	3
	Optics	3
	Physics, applied	3
	Engineering, electrical & electronic	5
	Physics, atomic, molecular & chemical	3
	Computer science, theory & methods	5
	Physics, condensed matter	3
	Materials science, multidisciplinary	3
	Physics, mathematical	3
	Multidisciplinary sciences	1
양자 통신 및 암호	Optics	3
	Physics, multidisciplinary	3
	Engineering, electrical & electronic	5
	Physics, atomic, molecular & chemical	3
	Physics, applied linguistics	3
	Computer science, theory & methods	5
	Physics, mathematical	3
	Computer science, information systems	5
	Telecommunications	5
	Multidisciplinary sciences	1
양자 센서	Optics	3
	Physics, multidisciplinary	3
	Physics, applied	3
	Physics, atomic, molecular & chemical	3
	Engineering, electrical & electronic	5
	Materials science, multidisciplinary	3
	Multidisciplinary sciences	1
	Physics, condensed matter	3
	Chemistry, physical	3
	Instruments & instrumentation	3

각 세부 분야의 과학 오버레이 지도에서 관찰되는 대부분의 노드는 화학 및 물리학, 공학 및 수학 클러스터에 속한다. 이는 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 관련 논문들이 대부분 화학 및 물리학, 공학 및 수학 분야의 저널에 출판되었다는 것을 의미한다. 각 세부 분야의 주요 주제 범주 역시 대부분 일치했다. 표2는 각 세부 분야별로 논문 출판 수가 많은 주제 범주를 나타낸 것이다. 다른 세부 분야의 주요 주제 범주와 겹치지 않는 주제 범주를 굵은 글씨로 나타냈다.

화학 및 물리학과 공학 및 수학 클러스터는 서로 인접한 클러스터이다. 이는 두 분야 사이의 인용이 비교적 활발하다는 것을 의미한다. 또, 각 세부 분야의 주요 주제 범주는 주로 두 클러스터의 경계에 가까운 주제 범주들이었다. 서로 인접한 두 클러스터에 대부분의 주제 범주가 속하고 경계에 가까운 주제 범주가 주요 주제 범주라는 것은 각 세부 분야가 이질적인 학문의 융합이라기보다는 학문적 교류가 활발하게 일어나는 학문을 기반으로 한 학제간 연구 분야라는 것을 의미한다.

세 분야를 비교해보면 양자 센서가 가장 이질적인 세부 분야라는 사실을 알 수 있다. 양자 컴퓨터와 양자 통신 및 암호의 경우 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터의 비율이 약 2:1인 반면, 양자 센서 분야는 화학 및 물리학과 공학 및 수학 클러스터의 비율이 5:1이다. 주요 주제 범주에도 양자 센서 분야의 경우 Computer science, theory & methods 대신 물리화학, 기기 및 측정 등의 주제 범주가 포함되어 있다.

학제성을 측정하기 위한 지표인 Rao-stirling 다양성(Stirling, 2007)은 양자 컴퓨터가 0.62으로 비교적 높았으며 양자 통신 및 암호가 0.59, 양자 센서가 0.58이다. 이 지수는 다종성(variety), 균등성(balance), 상이성(disparity) 등 여러 종류의 다양성을 포괄하여 측정할 수 있는 다양성 지수로 식(1)과 같다. p_i, p_j 는 구성 요소 수의 로그값, $d_{i,j}$ 는 두 분야의 인지적 거리를 의미한다.

$$D = \sum_{i,j} d_{i,j} \cdot p_i \cdot p_j \quad (1)$$

표3의 학제별 다양성과 비교해보면 양자과학기술 분야의 Rao-stirling 다양성은 Physics, Atomic, Molecular & Chemical와 비슷한 수준이다(Porter&Youtie, 2009).

표 3 단일 주제 범주의 Rao-string 다양성 평균

Subject category	1995	2005
Mathematics	0.28	0.29
EE	0.50	0.53
Physics, Atomic, Molecular & Chemical	0.56	0.60
Biotech	0.59	0.65
Neurosciences	0.61	0.64
Medicine, Research & Experimental	0.64	0.66

각 세부 분야의 발전과정을 분석하기 위해 1990년~1999년, 2000년~2009년, 2010년~2019년에 출판된 관련 논문의 서지 정보를 과학 오버레이 지도로 시각화했다. 그림 4부터 그림20는 화학 및 물리학(노랑), 공학 및 수학(분홍), 심리학 및 사회과학, 생물학 및 약학(빨강), 생태학 및 환경과학/공학(파랑) 등의 주제로 클러스터링 되어 있는 기초 지도(Carley et al., 2017)를 사용했으며 각 노드의 크기는 해당 주제 범주에 속한 저널에 출판된 논문 수에 비례한다.

(1) 양자 컴퓨터

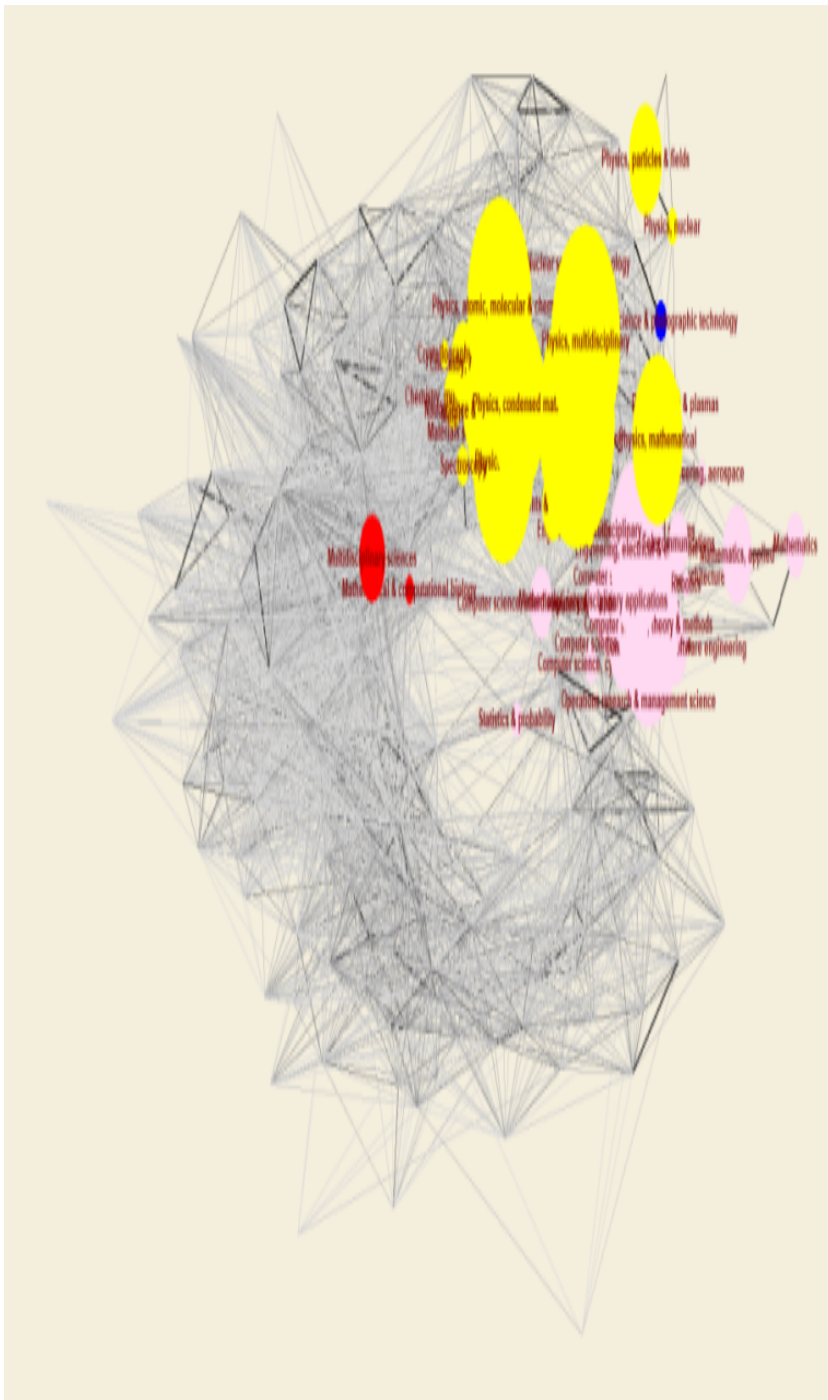
양자 컴퓨터는 양자역학의 원리를 이용하여 복잡한 계산을 수행하고 고전 컴퓨터에 비해 지수적으로 빠른 연산 속도를 보일 수 있는 새로운 컴퓨터이다. 고전 컴퓨터의 비트에 해당하는 큐비트(qubit)를 물리적으로 구현하는 하드웨어 시스템에서부터 양자 컴퓨터 구조에 맞는 알고리즘, 소프트웨어 등의 다양한 연구 주제로 구성되어 있다.

양자 컴퓨터의 역사는 하버드와 IBM이 공동 주최한 컴퓨터-물리학 컨퍼런스(1981)에서 시작되었다. 그 컨퍼런스에서 리처드 파인만은 물리학 시뮬레이션에서 고전 컴퓨터의 한계를 지적하며 양자 시스템을 이용한 새로운 컴퓨터의 개념을 제시했다. 1985년 데이비드 도이치는 파인만이 제시한 개념을 바탕으로 실질적인 양자 컴퓨터에 대한 설계를 발표했다. 기존 컴퓨터가 취약했던 소인수분해를 훨씬 빠르게 수행할 수 있는 쇼어 알고리즘이 발표된 이후 양자 컴퓨터는 물리학뿐만 아니라 컴퓨터 공학, 더 나아가 사회 전반에 큰 영향을 미칠 수 있는 기술이라는 기대를 받기 시작했다. 2010년대 이후 컴퓨터 공학이 빠르게 발전하면서 양자 컴

퓨터에 대한 기대 역시 더욱 커졌다. 무어의 법칙대로 회로 집적도가 증가할 경우 2020년대는 양자 터널링 현상으로 인해 더 이상 반도체의 성능이 증가할 수 없는 시점이 찾아올 것이라고 예측되었기 때문이다. 또, 머신러닝의 발전으로 기존 연산량보다 훨씬 많은 연산량이 필요해지면서 양자 컴퓨터의 필요성이 증가했다.

양자 컴퓨터 분야의 과학 오버레이 지도에서 양자 컴퓨터가 물리학과 컴퓨터 공학의 교차점에서 탄생한 과학기술 분야라는 것을 확인할 수 있다. 1990년대 양자 컴퓨터 분야 과학 오버레이 지도(그림4)에서 화학 및 물리학 클러스터에 속한 주제 범주는 응용물리, 응집물질물리, 수리물리 등 물리학 관련 주제 범주와 재료과학, 나노과학 및 기술, 물리화학으로 구성되어 있으며 공학 및 수학 클러스터에 속한 주제 범주는 컴퓨터 과학, 정보 시스템, 인공 지능 등 컴퓨터 공학 관련 주제 범주와 전기전자공학, 응용수학으로 구성되어 있다. 1990년대, 2000년대, 2010년대 양자 컴퓨터 분야의 과학 오버레이 지도를 비교해보면 초기의 주요 주제 범주가 이후에도 중요하게 작용하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 물리학, 컴퓨터 공학 관련 주제 범주들이 가장 높은 성장률을 보였다. 즉, 양자 컴퓨터 분야 연구 주제의 중심은 여전히 물리학과 컴퓨터 공학의 교차점에 놓여 있으며 다른 응용 분야로 확장되는 방식으로 변화한 것이다.

그림 5 2000년대 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도

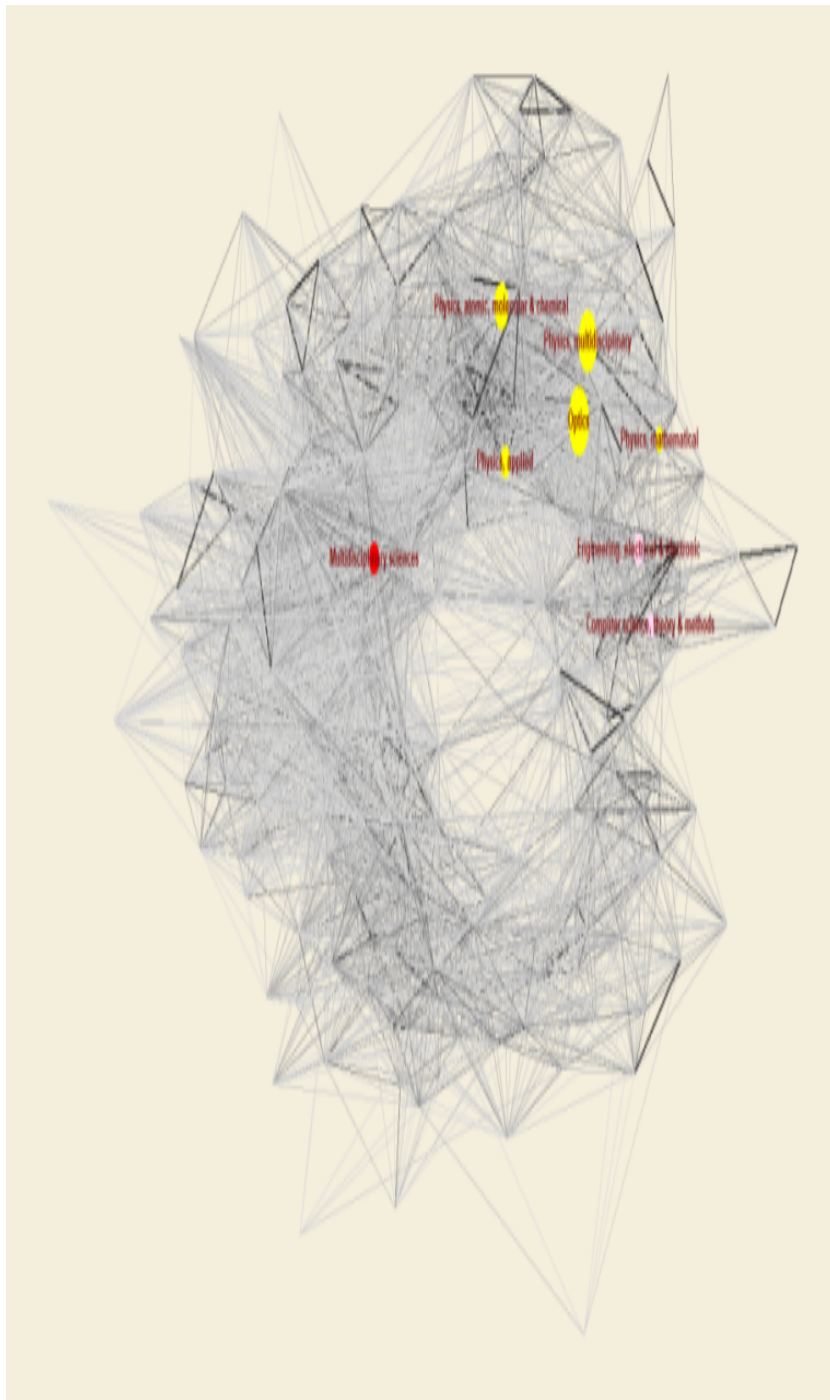


(2) 양자 통신 및 암호

양자 통신 및 암호 분야는 1984년 베넷과 브라사드가 양자 키 분배(quantum key distribution)를 바탕으로 한 BB84 프로토콜을 제시하면서 시작되었다. 고전 정보와 달리 양자 시스템에 저장된 정보는 100%의 확률로 정확하게 복제하는 것이 불가능하다. 즉, 양자 시스템을 통신 및 암호 분야에 적용하면 절대 보안을 제공할 수 있는 것이다. 1994년 양자 키 분배를 이용한 암호 시스템 구현에 성공하면서 양자 통신 및 암호 분야의 연구가 본격적으로 시작되었다. 1990년대 양자 통신 및 암호 분야 과학 오버레이 지도(그림7)를 보면 다른 세부 분야에 비해 해당 시기에 출판된 논문 수가 비교적 적다. 반면 2000년대와 2010년대는 양자 컴퓨터와 비슷한 수준으로 성장했다. 즉, 1990년대까지는 해당 분야가 본격적으로 발전하지 못했으나 1990년대 말부터 2000년대 초반 사이에 해당 분야가 폭발적으로 성장했다는 것이다.

다른 분야와 비교했을 때, 양자 컴퓨터와 양자 통신 및 암호 분야의 주요 주제 범주가 매우 유사하다. 반면 전체 노드의 수 즉, 관련 주제 범주의 수는 양자 컴퓨터보다 적다. 즉, 연구 주제가 다른 학문 분야로 확장되기보다는 물리학 관련 주제 범주와 컴퓨터 공학 관련 주제 범주 안으로 제한되어 있다고 할 수 있다. 또, 응집물질물리학, 재료과학, 나노과학 및 기술 등 양자 물질과 관련된 논문이 비교적 적고, 화학 관련 주제 범주 역시 비교적 논문이 적다.

그림 7 1990년대 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도



(3) 양자 센서

양자 센서는 양자 시스템의 성질(얽힘, 결맞음, 에너지 준위 양자화 등)을 이용하여 기존 센서보다 매우 높은 측정 정밀도를 제공하는 센서이다. 대표적인 예시로는 양자 시계가 있다. 기존의 원자 시계가 하이젠베르크의 불확정성 원리로 인해 제한된 정밀도를 갖는 것과 달리 양자 얽힘을 이용한 양자 시계는 더 높은 정밀도를 보일 수 있다. 또, 자기장 및 관성 센서의 경우 유럽 기업을 중심으로 상용화 단계에 도입했을 만큼 기술 수준이 높은 분야이다. 최근에는 양자 이미징 센서 등 새로운 기술 분야로도 확장되고 있다.

1990년대 양자 센서 분야의 과학 오버레이 지도를 보면 대부분이 화학 및 물리학 클러스터에 속한 주제 범주들로 구성되어 있다. 특히 컴퓨터 공학 관련 주제 범주의 비율이 다른 두 분야에 비해 매우 낮다. 하지만 2000년대, 2010년대의 과학 오버레이 지도를 보면 점점 다른 세부 분야와 비슷한 모습을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 컴퓨터 공학 관련 주제 범주의 비율 역시 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호와 비슷한 수준으로 증가했다. 이는 양자 시스템과 관련된 이론적, 실험적 발전이 진행됨에 따라 양자 센서 분야의 연구 주제가 다른 양자과학기술 분야와 유사하게 확장되었다는 것을 의미한다. 이는 양자 센서 분야가 기초과학에서 주로 연구되었던 초반과는 달리 더 많은 분야에 적용된 것과 동시에 해당 분야와 관련된 양자 제어 기술이 다른 세부 분야에도 사용되기 때문이라고 할 수 있다.

그림 10 1990년대 양자 센서 과학 오버레이 지도

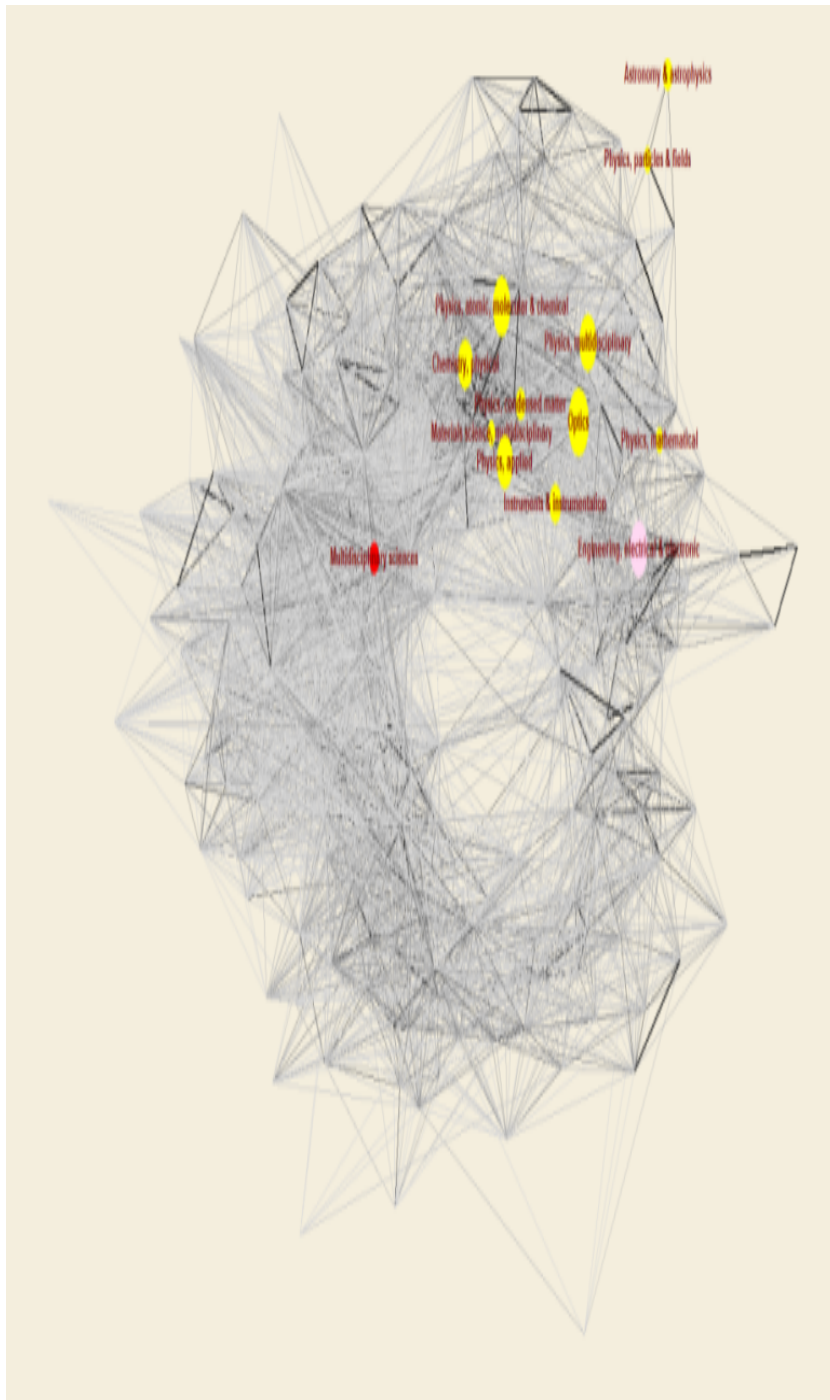
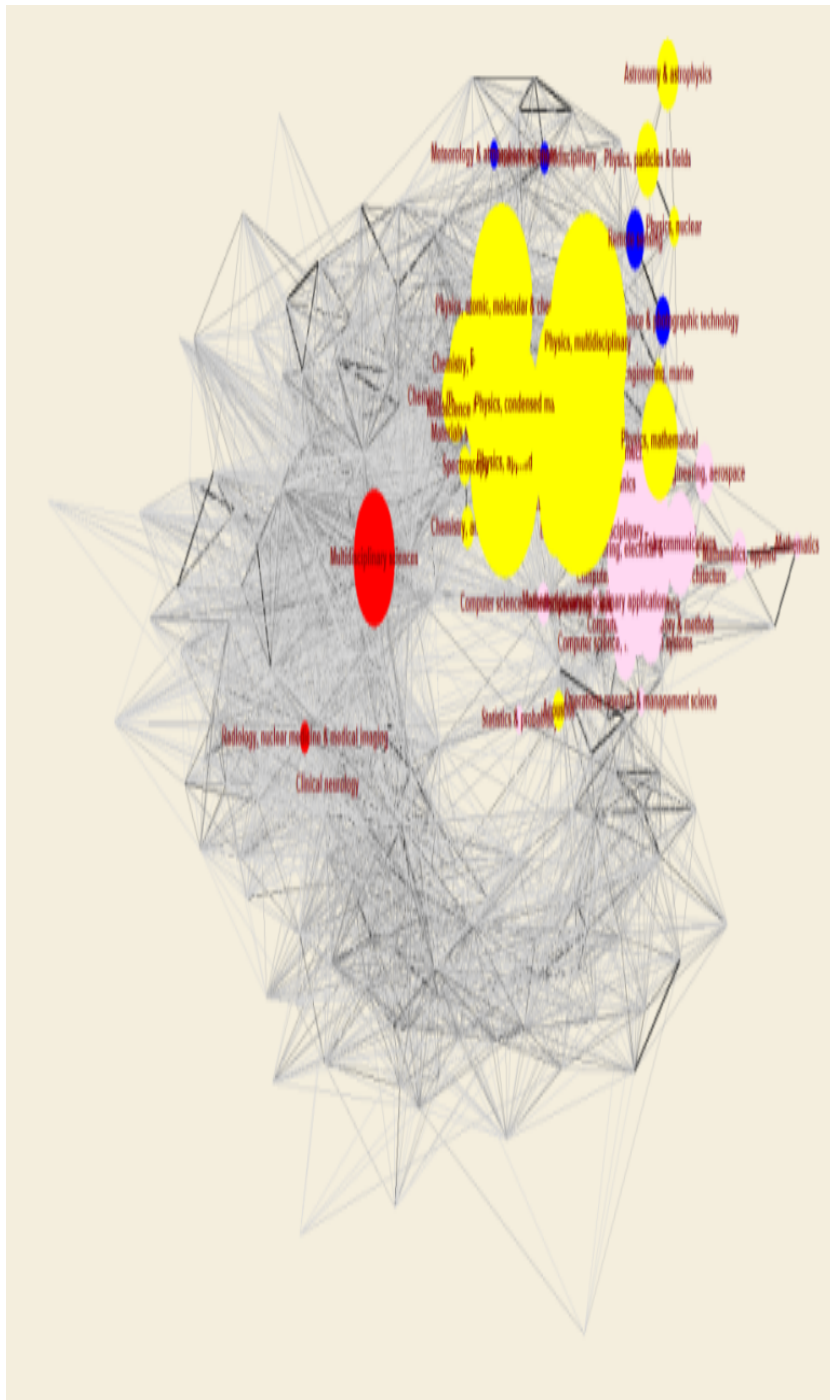


그림 12 2010년대 양자 센서 과학 오버레이 지도



각 세부 분야의 발전 과정을 종합적으로 살펴보면 양자과학기술 분야가 물리학과 컴퓨터 공학의 교차점에서 탄생했으며 연구 주제의 중심이 거의 이동하지 않은 채로 다른 주제 범주로 확장되어 왔다는 사실을 알 수 있다. 다만 초기에 연구 활동이 주로 물리학 분야에서 진행되었던 양자 센서의 경우 시간에 따라 다른 두 분야와 유사하게 연구 활동의 중심이 컴퓨터 공학 분야를 포함하도록 이동했다. 확장 정도를 비교해보면 양자 통신 및 암호가 다른 두 분야에 비해 연구 활동의 확산이 비교적 적었다.

2) 국가별 양자과학기술 과학 오버레이 지도

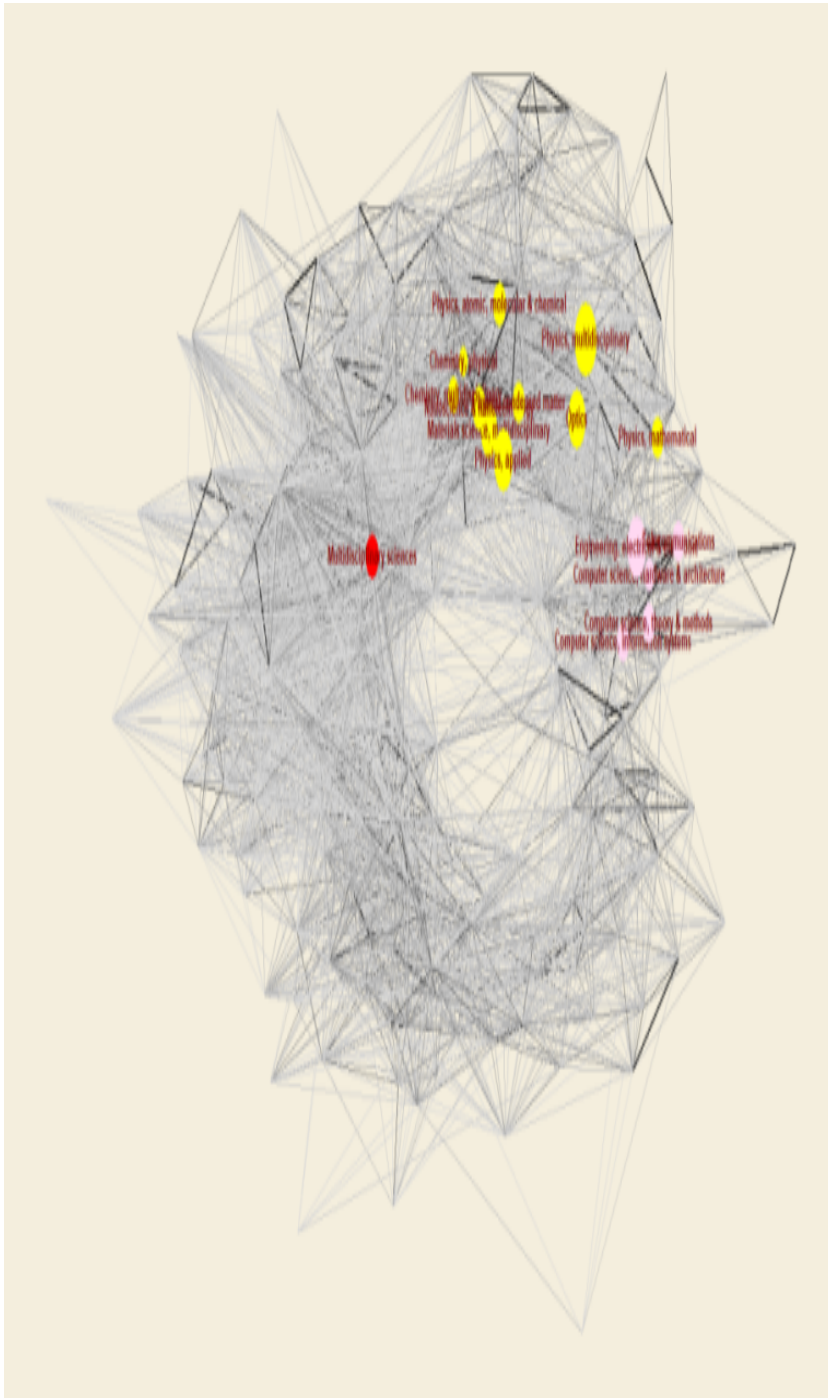
양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등을 포함하는 양자과학기술 분야는 다른 학제간 연구 분야에 비해 경제적, 군사적 가치에 대한 기대로 인해 국가 사이의 장벽이 높은 연구 분야이다. 경계가 모호한 학제간 연구라는 양자과학기술의 특징 역시 이러한 장벽이 국가별 양자과학기술의 차이로 이어지도록 만든다. 양자과학기술을 의미하는 용어가 다르게 사용되는 것은 국가별 양자과학기술의 차이가 드러나는 대표적인 사례이다. 미국은 양자정보과학, EU는 양자기술, 일본은 양자과학기술, 중국은 양자제어 및 양자 정보 등으로 해당 분야를 칭한다(KISTI, 2019). 다른 분야에 비해 국가 사이의 장벽이 높은 이유는 양자과학기술 분야가 창출할 경제적 가치에 대한 기대뿐만 아니라 군사적 가치에 대한 기대 역시 높기 때문이다. 따라서 본 연구는 국가별로 양자과학기술 세부 분야의 과학 오버레이 지도를 시각화하여 국가별 양자과학기술 세부 분야의 차이를 분석하고자 한다.

(1) 양자 컴퓨터

미국, 중국, 한국의 양자 컴퓨터 분야 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도를 보면 세부 분야의 전체 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도와 유사하게 화학 및 물리학, 공학 및 수학 클러스터에 대부분의 노드가 속해 있는 것을 알 수 있다. 주요 주제 범주 역시 세 국가 모두 세부 분야 전체의 주요 주제 범주와 유사하다. 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터에 속한 논문의 비율 역시 모두 전체 양자 컴퓨터 분야와 비슷하다.

활성화된 주제 범주의 다양성 즉, 연구 활동의 확산 정도에는 약간의 차이가 있었다. 활성화된 주제 범주가 미국은 129개, 중국은 103개, 한국은 56개이다. 다만 라오 스텔링 지수는 미국이 0.62, 중국이 0.6, 한국이 0.6으로 비교적 유사했다. 각 주제 범주를 보면 미국의 양자 컴퓨터 분야 과학 오버레이 지도에는 두 클러스터 이외에 심리학 및 사회과학 클러스터의 Education, Scientific disciplines와 생태학 및 환경과학/공학 클러스터의 Imaging science & photographic technology와 Remote sensing, 생물학 및 약학의 Neurosciences가 활성화되었다. 중국의 경우 생물학 및 약학의 Mathematical & computational biology와 Pharmacology & pharmacy가 활성화되었다. 반면, 한국은 다학제 과학 노드를 제외하면 모든 노드가 두 클러스터에 속한다.

그림 15 양자 컴퓨터 과학 오버레이 지도(한국)



(2) 양자 통신 및 암호

미국, 중국, 한국의 양자 통신 및 암호 분야 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도를 보면 세부 분야의 전체 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도와 유사하게 화학 및 물리학, 공학 및 수학 클러스터에 대부분의 노드가 속해 있는 것을 알 수 있다. 주요 주제 범주 역시 세 국가 모두 세부 분야 전체의 주요 주제 범주와 유사하다. 하지만 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터에 속한 논문의 비율은 미국이 1.8:1, 중국이 3.6:1, 한국이 2.3:1로 다른 세부 분야보다 큰 차이를 보였다. 미국과 중국의 과학 오버레이 지도를 비교해보면 컴퓨터 공학 관련 주제 범주는 미국과 중국이 비슷하거나 미국이 약간 더 크고, 물리학 관련 주제 범주는 중국이 미국보다 훨씬 크게 시각화되었다. 즉, 두 클러스터에 속한 주제 범주 중 물리학 관련 주제 범주에서 두 국가의 차이가 명확하게 나타난 것이다. 오른쪽 상단의 Astronomy & astrophysics, Physics, particles & fields와 Physics, nuclear 등의 노드 역시 중국이 더 컸다.

활성화된 주제 범주의 개수는 미국이 75개, 중국이 75개, 한국이 37개였다. 하지만 라오-스털링 지수를 계산해본 결과 미국의 양자 통신 및 암호 분야는 0.59인 반면 중국의 양자 통신 및 암호 분야는 0.54로 비교적 큰 차이를 보였다. 한국의 Rao-stirling 다양성이 0.57으로 미국, 중국의 중간에 해당했다. 라오-스털링 지수는 다중성, 균등성, 상이성을 통합하여 측정하는 지수로 미국과 중국의 주제 범주 수가 동일하여 다중성이 같음에도 불구하고 중국의 라오-스털링 지수가 낮다는 것은 두 국가의 양자 통신 및 암호 분야의 균등성, 상이성에서 큰 차이가 난다는 것을 의미한다. 양자 통신 및 암호 분야의 라오-스털링 지수 역시 0.59로 중국과 비교적 큰 차이가 난다.

그림 16 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(미국)

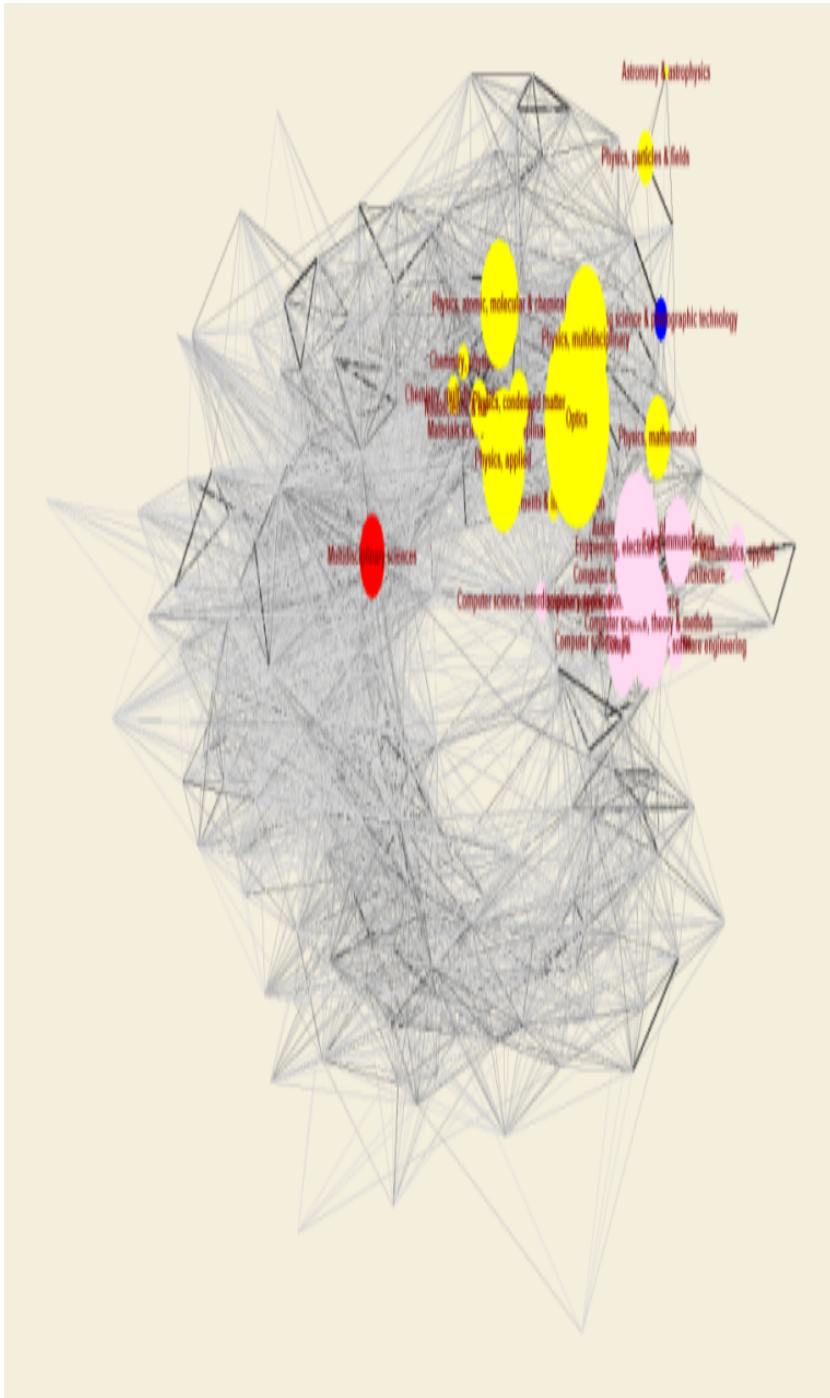


그림 17 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(중국)

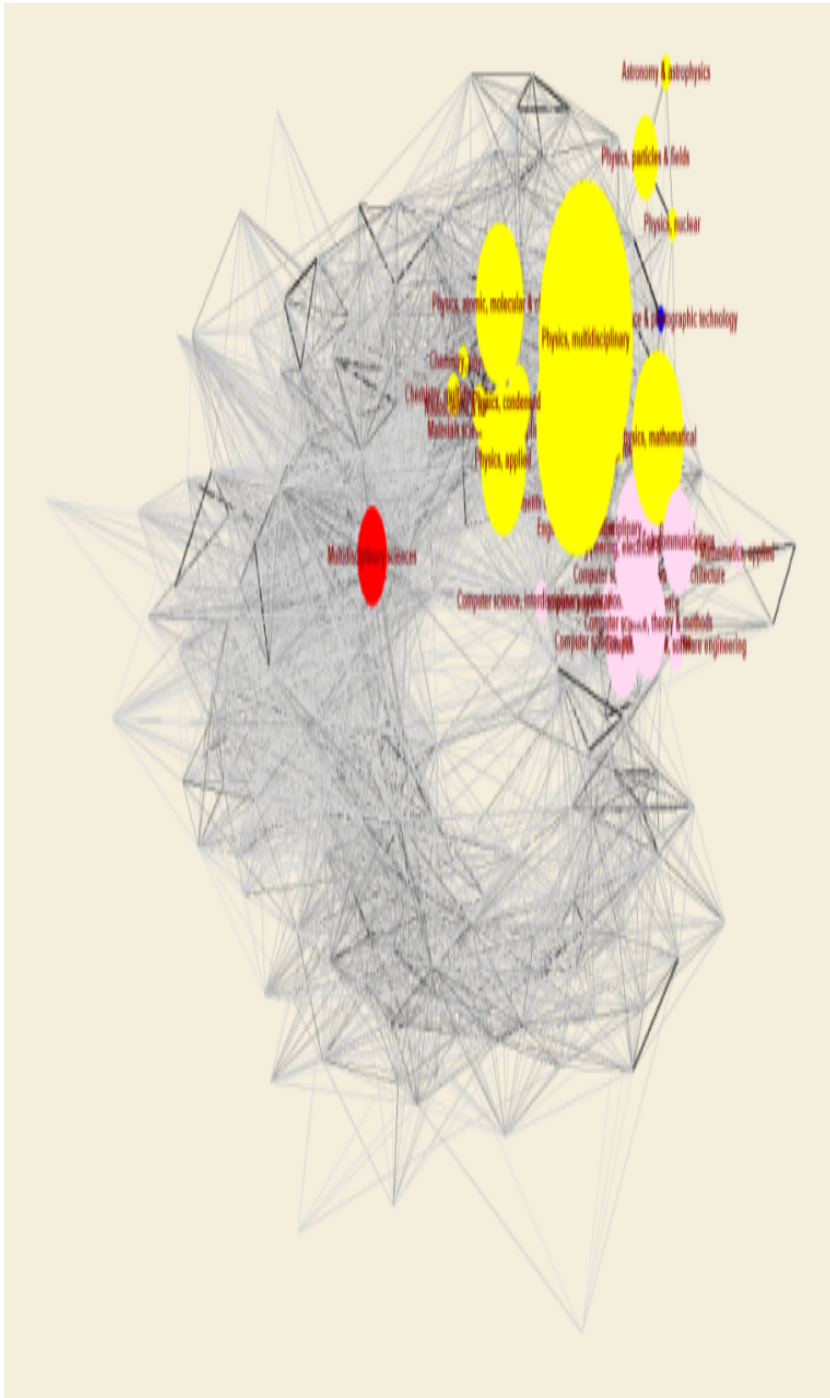
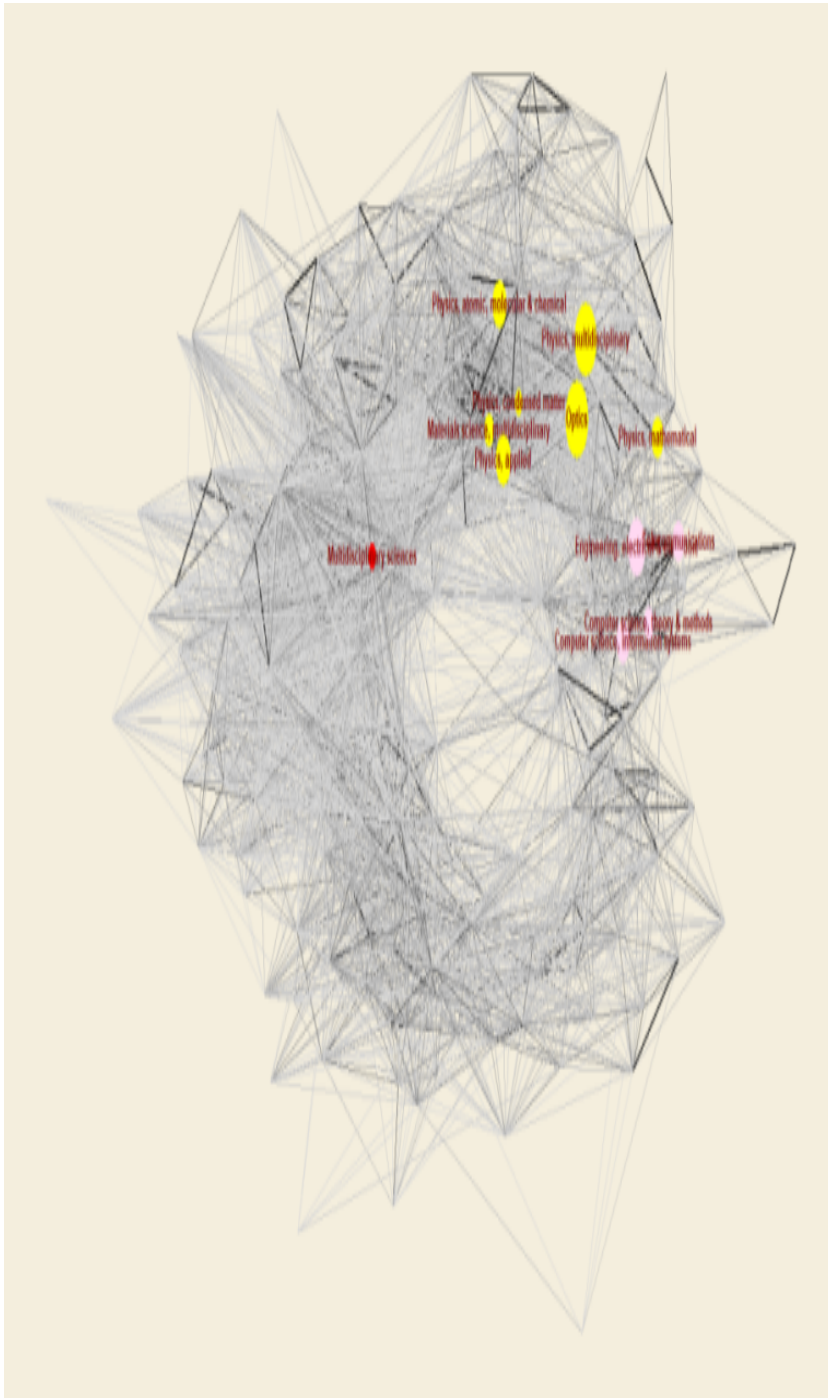


그림 18 양자 통신 및 암호 과학 오버레이 지도(한국)



(3) 양자 센서

미국, 중국, 한국의 양자 통신 및 암호 분야 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도를 보면 세부 분야의 전체 논문 정보를 시각화한 과학 오버레이 지도와 유사하게 화학 및 물리학, 공학 및 수학 클러스터에 대부분의 노드가 속해 있는 것을 알 수 있다. 주요 주제 범주 역시 세 국가 모두 세부 분야 전체의 주요 주제 범주와 유사하다. 하지만 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터에 속한 논문의 비율은 미국이 4.2:1, 중국이 3.7:1, 한국이 6.5:1로 비교적 큰 차이를 보였다.

활성화된 주제 범주의 개수는 미국이 118개, 중국이 90개, 한국이 46개이다. 미국과 중국의 과학 오버레이 지도를 비교해보면 미국의 과학 오버레이 지도에는 Radiology, nuclear medicine & medical imaging가 중국의 과학 오버레이 지도에는 Geosciences, multidisciplinary가 활성화되었다는 차이가 있다. 한국의 경우 생물학 및 약학의 Multidisciplinary sciences와 공학 및 수학의 Engineering, electrical & electronic을 제외한 모든 주제 범주가 화학 및 물리학 클러스터에 속했다. 전체 논문의 81%가 화학 및 물리학 관련 저널에 출판된 것이다. 라오-스털링 지수 역시 미국이 0.57, 중국이 0.58이고 한국은 0.51로 비교적 차이가 크다.

그림 20 양자 센서 과학 오버레이 지도(중국)

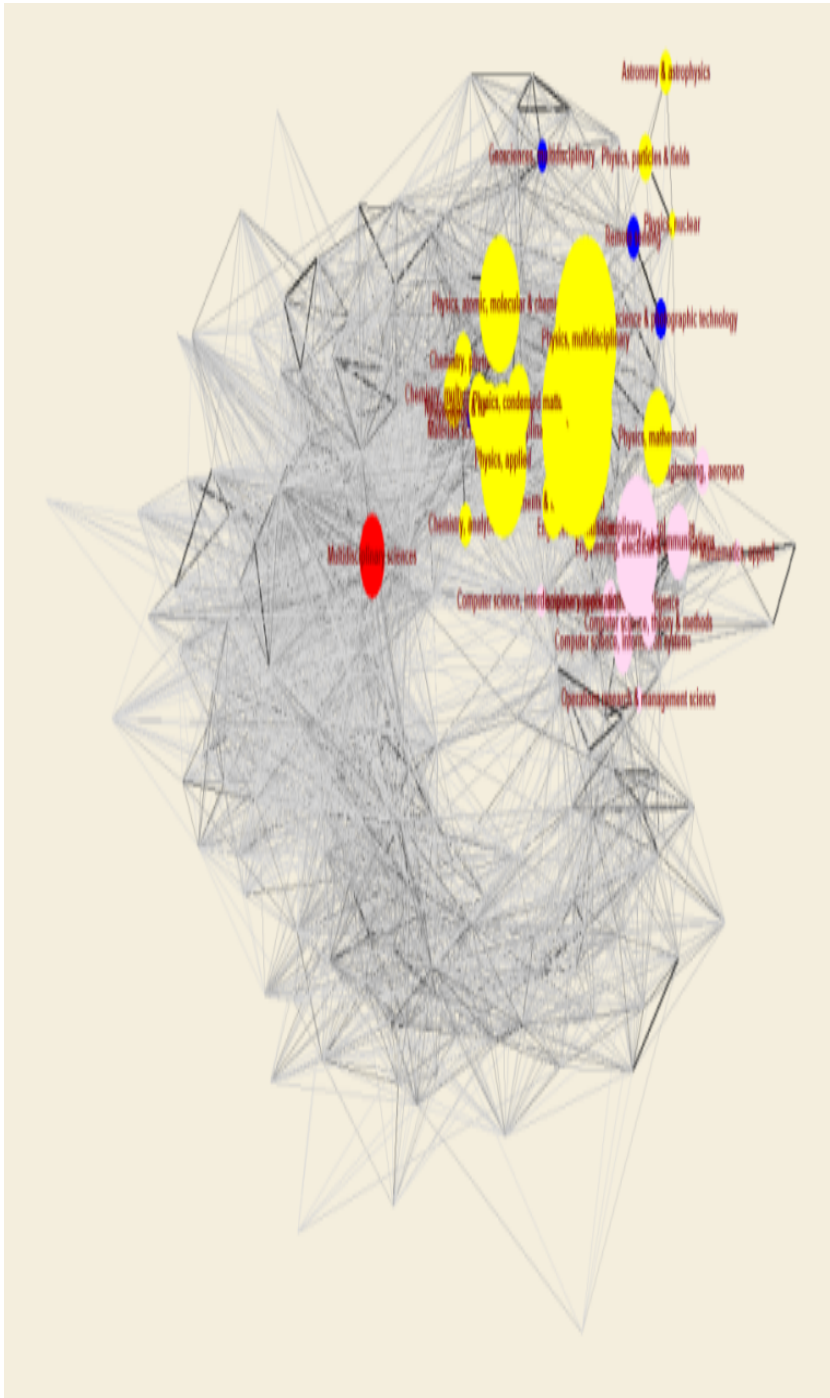
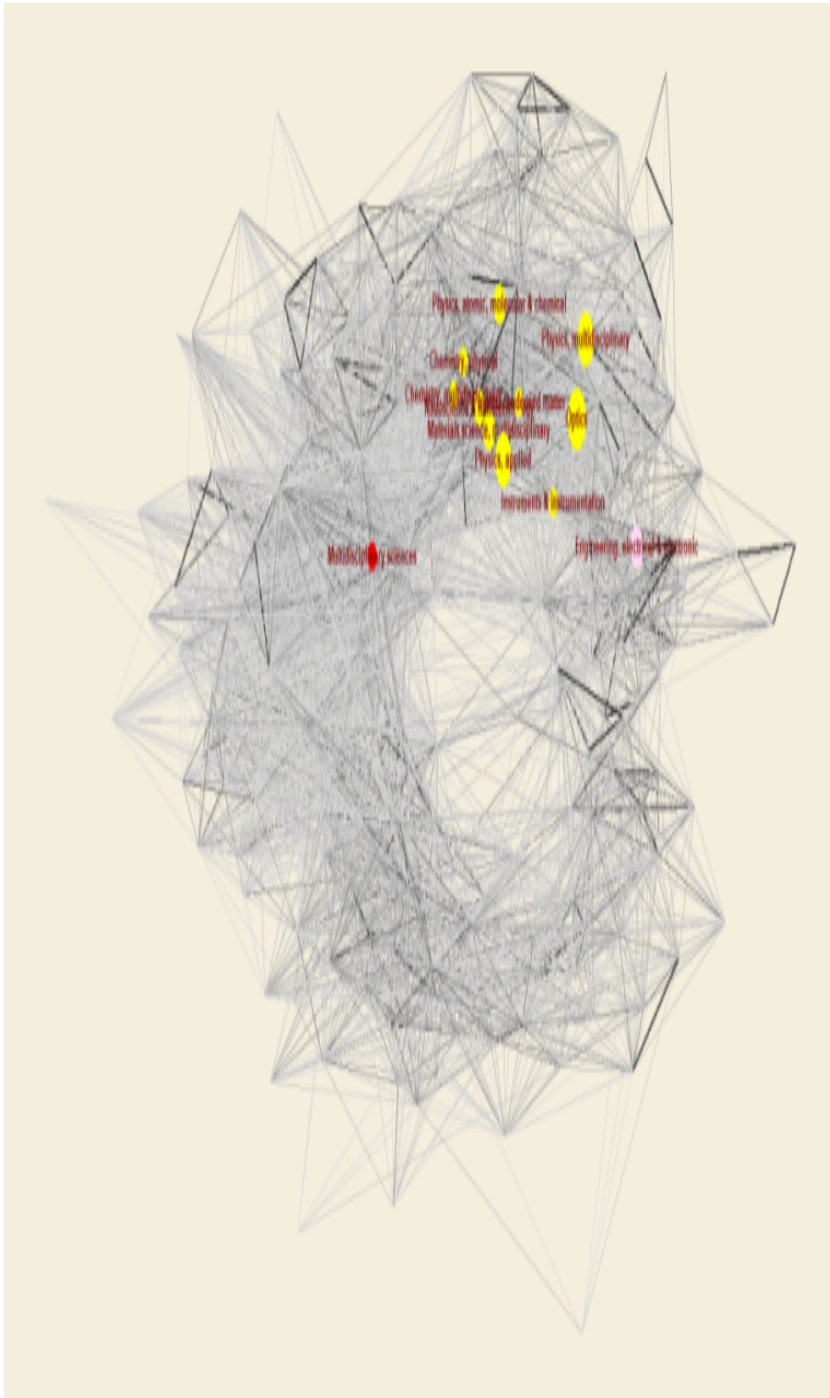


그림 21 양자 센서 과학 오버레이 지도(한국)



양자 컴퓨터 분야의 특징은 국가별 차이가 가장 적다는 것이다. 활성화된 주제 범주의 수는 차이가 났지만 전체 세부 분야와 세 국가의 주요 주제 범주, 클러스터별 비율, 라오-스털링 지수 등이 거의 동일했다. 다만 일부 노드가 미국과 중국의 과학 오버레이 지도에서만 시각화되었다. 이는 각 국가에서 양자 컴퓨터를 주로 활용하는 분야의 차이로 해석할 수 있다. 미국의 과학 오버레이 지도에만 활성화된 Imaging science & photographic technology와 Remote sensing 노드는 양자 컴퓨터 관련 과학기술이 양자 시스템 설계 및 제어 기술을 바탕으로 한 양자 이미징 센서, 이미지 처리 등에 많이 활용된다는 의미이다. 동일한 생물학 및 약학 클러스터에서도 미국은 Neurosciences가, 중국은 Mathematical & computational biology와 Pharmacology & pharmacy가 활성화되었다.

반면, 양자 통신 및 암호는 미국과 중국의 차이가 가장 크게 드러난 세부 분야이다. 미국과 중국의 클러스터별 비율이 1.8:1과 3.6:1으로 2배 가량 달랐다. 특히 중국의 물리학 관련 주제 범주의 크기가 미국에 비해 훨씬 컸다. 주요 주제 범주가 아닌 Astronomy & astrophysics, Physics, particles & fields와 Physics, nuclear 역시 중국이 미국보다 컸다. 중국은 2016년 최초의 양자 통신 위성인 목자호를 발사한 후 베이징에서부터 오스트리아 사이의 7600km 거리의 양자 통신을 성공시키는 등 해당 분야에서 가장 앞선 기술 수준을 갖고 있다.

마지막으로 양자 센서는 미국, 중국과 한국의 차이가 가장 크게 드러났다. 미국과 중국의 클러스터별 비율, 라오-스털링 지수는 전체 세부 분야와 유사했으나 한국은 클러스터별 비율이 6.5:1, 라오-스털링 지수는 0.51으로 큰 차이를 보였다. 흥미로운 점은 다른 분야에 비해 과학기술 수준의 차이가 오히려 적은 세부 분야임에도 불구하고 연구 활동의 상대적 위치는 가장 다르게 나타났다는 것이다.

3) 양자 통신 및 암호 분야 형성 및 발전

양자과학기술의 선도 국가인 미국과 중국의 차이가 가장 크게 드러난 양자 통신 및 암호 분야를 추가적으로 분석하기 위해 양자 통신 및 암호 분야 논문의 서지 정

보를 공동연구 네트워크로 시각화했다. 그림 22, 23, 24는 각각 1990년대, 2000년대, 2010년대의 양자 통신 및 암호 분야의 연구기관 단위의 공동연구 네트워크이다. 각 노드는 연구기관을, 두 노드 사이의 링크는 두 기관의 공동연구를 의미한다. 1990년대는 연구기관이 적어 출판물 수가 8편 이상인 연구기관 10개의 공동연구 네트워크를 시각화했으며 2000년대와 2010년대는 출판물 수가 30편 이상인 연구기관 중 링크의 강도가 강한 즉, 다른 연구기관과의 공동연구가 활발한 상위 50개 연구기관의 공동연구 네트워크를 시각화했다. 2000년대와 2010년대는 클러스터링을 조정해 두 클러스터로 나뉘질 수 있도록 했다.

1990년대 양자 통신 및 암호 분야의 공동연구 네트워크를 보면 영국의 브리티시 텔레콤(bt labs), 옥스퍼드 대학(univ oxford), 임페리얼 컬리지 런던(univ london imperial coll sci)와 유럽의 인스부르크 대학(univ innsbruck), 제네바 대학(univ geneva), 미국의 칼텍(caltech), 로스 앨러모스 국립 연구소(losalamos natl lab), 캐나다의 몬트리올 대학(univ montreal), 이스라엘의 이스라엘 공과 대학(technion israel inst technol) 등이 초기의 주요 연구 기관이다. 중국과학기술대(univ sci&technol china)와 타마가와 대학(tamagwa univ)은 네트워크에 연결되지 않은 상태로 존재한다. 1984년 베넷과 브라사드가 BB84 양자암호 프로토콜을 제안한 이후 1990년대는 양자 키 분배(QKD)을 물리적으로 구현하는 실험 연구가 활발하게 진행되었다. 브리티시 텔레콤은 1997년 5.4km 거리에서, 제네바 대학과 로스 앨러모스 국립 연구소는 2000년에 각각 20km, 48km 거리에서 양자 암호 통신채널을 구현하는 데 성공했다(Townsend, 1997; Tittel 2000; Hughes et al., 2000). 1990년대의 주요 연구기관은 여전히 양자과학기술 전반에서 활발한 연구 활동을 보이고 있다. 인스부르크 대학교와 옥스퍼드 대학은 이온 트랩 방식으로 20 큐비트의 양자 컴퓨터를, 중국과학기술대는 초전도 방식으로 10 큐비트의 양자 컴퓨터를 구현하는 데 성공했다.

그림 22 1990년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크

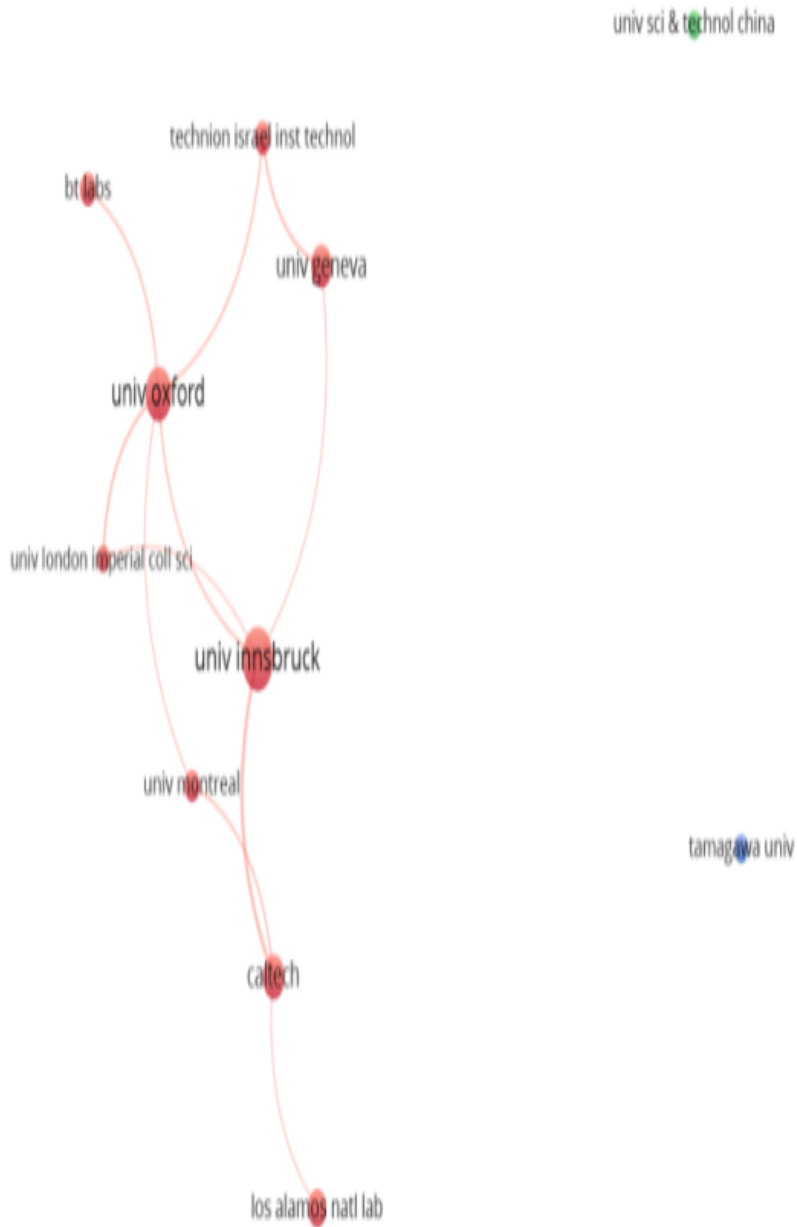


그림 23 2000년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크

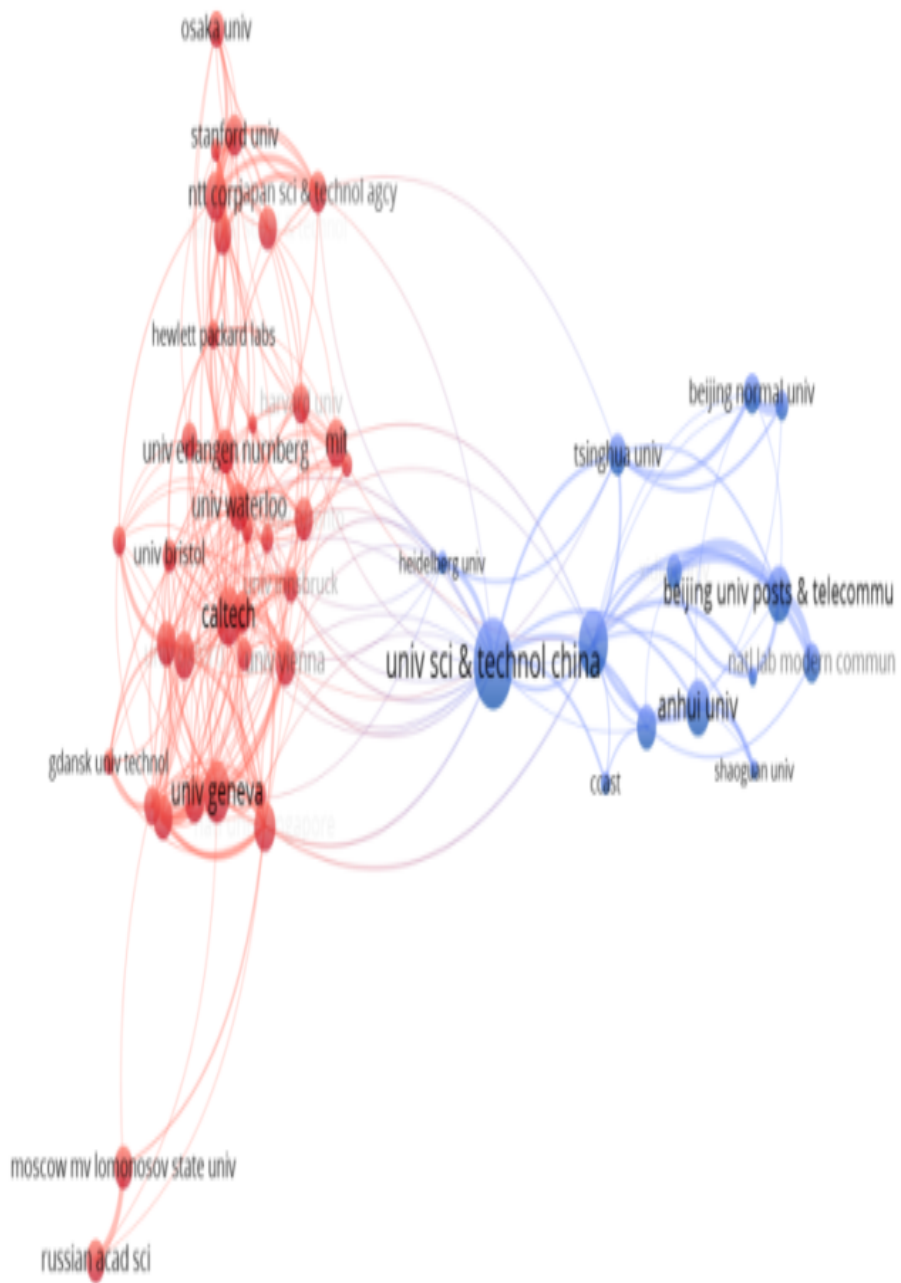
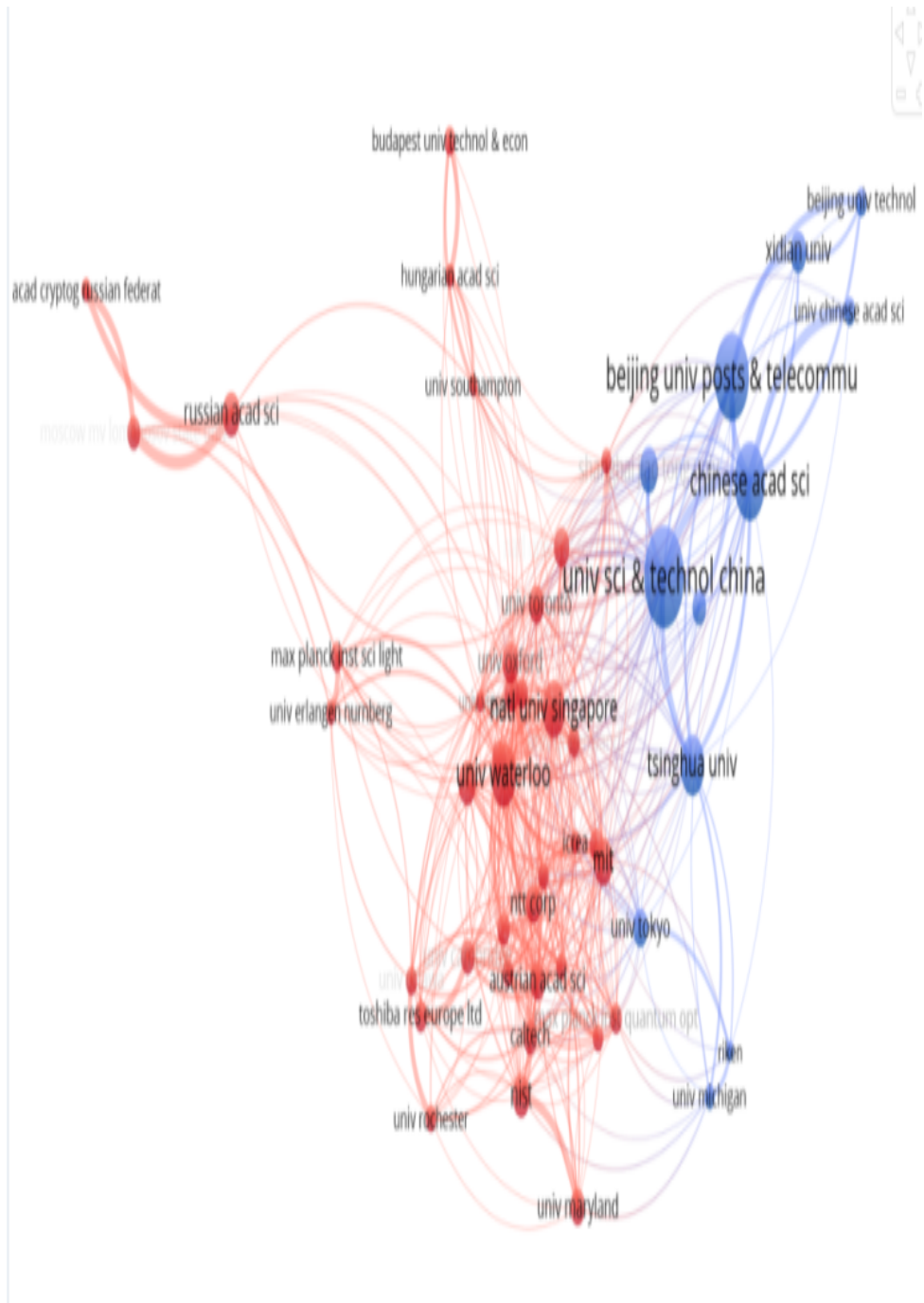


그림 24 2010년대 양자 통신 및 암호 분야 연구기관 단위 공동연구 네트워크



양자 통신 및 암호 분야가 본격적으로 성장하기 시작한 2000년대에는 다양한 연구기관이 새롭게 등장했다. 1990년대의 주요 국가였던 오스트리아, 영국, 캐나다의 경우 비엔나 대학(Univ vienna), 스탠포드 대학(stanford univ), 워털루 대학(univ waterloo) 등 양자과학기술 연구가 확산되는 모습을 보였다. 특히 미국의 경우 국립표준기술연구소(ntt corp), MIT(mit), hp(hewlett packard labs)등 다양한 형태의 연구 기관이 양자 통신 및 암호 분야 연구에 뛰어들었다. 독일, 러시아, 일본 등 새로운 국가의 연구기관들도 공동연구 네트워크에 연결되었다. 연구기관이 가장 많이 증가한 국가는 중국이다. 또, 새롭게 등장한 중국의 연구기관은 대부분 중국과학기술대학과의 공동연구를 통해 글로벌 공동연구 네트워크와 연결되었다.

그림 23과 같이 상위 50개 연구기관을 두 클러스터로 나누어보면 대부분 중국 연구 기관들로 이루어져 있는 클러스터1(파랑)과 나머지 연구기관의 클러스터2(빨강)으로 나뉘어진다. 중국과학원에 의해 새로 설립된 중국선진과학기술센터(ccast) 등의 연구소와 칭화 대학, 베이징 대학, 안휘 대학 등의 대학교로 이루어져 있다. 독일의 하이델베르크 대학(heidellberg univ) 역시 중국 연구기관 중심의 클러스터 1에 속한다. 하이델베르크 대학은 클러스터2와 인접한 영역에 위치한다. 로 2005년 중국 연구기관과 함께 13km 거리에서 무선 양자 통신에 성공했다. 이후 독일은 2007년 144km 무선 통신에, 중국은 2013년 96km 통신에 각각 성공했다. 또, 중국 양자과학의 아버지라고 불리는 판진웨이(Pan Jianwei) 역시 하이델베르크 대학에서 공부한 이후 중국과학기술대에 실험실을 열었다고 알려져 있다.

2010년대 양자 통신 및 암호 분야의 공동연구 네트워크를 동일한 방식으로 두 클러스터로 나누어보면 중국 연구기관 중심 클러스터와 나머지로 나누어지는 경향이 어느정도 유지된다. 다만 두 클러스터 사이의 링크가 증가했으며 공동연구 네트워크 사의 거리 역시 감소했다. 또, 클러스터1에 일본의 도쿄 대학(univ tokyo), 이화학연구소(riken), 미국의 미시간 대학(univ michigan) 등 의 연구기관이 포함되었다.

5. 결론

본 연구는 새롭게 등장한 학제간 연구 분야인 양자과학기술 분야가 형성되고 발전하는 과정을 이해하고자 한다. 이를 위해 양자과학기술의 세부 분야와 관련된 논문의 서지 정보를 과학 지도로 시각화하고 국가별로 분석했다.

양자과학기술은 물리학, 컴퓨터 공학, 수학, 화학 등 다양한 학문과 관련된 학제간 연구 분야이기 때문에 전통적인 학문 구조 내에서 형성 및 발전 과정을 관찰하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 논문의 서지 정보를 과학 오버레이 지도로 시각화했다. 과학 오버레이 지도는 전통적인 학문 분류에 대응되는 인지 공간에 논문의 서지 정보를 중첩시켜 관련 연구 활동의 상대적 위치를 분석할 수 있는 연구 방법론이다. 또, 양자과학기술의 세부 분야 중 하나인 양자 통신 및 암호 분야 논문의 서지 정보를 연구 기관 단위의 공동연구 네트워크로 시각화해 해당 분야의 사회적 구조를 함께 보였다. 두 종류의 과학 지도를 통해 학제간 연구의 형성 및 발전 과정을 인식론적 구조와 사회적 구조 관점에서 통합적으로 제시하고자 했다.

양자 시스템의 설계 및 제어를 이용한 양자과학기술의 학제성은 지식 기반 및 활용 분야에서 공통적으로 드러나는 특징이다. 예를 들어 양자 컴퓨터 분야의 지식 기반은 기초과학에서부터 응용 기술까지 다양한 분야로 구성되어 있다. 양자 컴퓨터를 만들기 위해서는 양자 시스템에 대한 이해를 위한 물리학부터 이를 제어하기 위한 전기전자 공학, 양자 시스템의 특징에 맞는 알고리즘을 설계하기 위한 정보과학, 양자 시스템을 물리적으로 구현하기 위한 재료과학 등 다양한 분야가 필요하며 연구 활동 내에서 각 분야의 경계 역시 모호하다. 또, 양자 컴퓨터는 빅데이터, 인공지능 등의 컴퓨터 공학 분야에 영향을 미치는 것을 넘어 최적화 문제, 시뮬레이션 등 대부분의 공학 분야의 발전에 기여할 수 있다. 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등 다른 세부 분야 역시 마찬가지이다.

하지만 각 세부 분야는 활용 분야라는 측면에서는 매우 다른 특성을 가질 수 있다. 양자 컴퓨터가 공학 전반에 파괴적 혁신을 가져올 것이라고 기대되는 것과는 달리 양자 통신 및 암호는 해당 분야 외의 영향력이 크지 않다. 양자 센서는 양자 컴퓨터와 마찬가지로 다양한 공학 분야에 기여할 수 있지만 양자 컴퓨터에 비해

그 파급력이 약하다. 구현하기 위해 필요한 양자 시스템 설계 및 제어 기술 수준에 차이가 있기 때문에 연구를 위해 필요한 과학기술 수준, 인프라, 투자 등도 분야별로 차이가 크다. 이 때문에 각 국가는 특정 세부 분야에 우선순위를 두고 지원 정책을 시행하기도 한다. 그러므로 본 연구는 양자과학기술 전체가 아닌 세부 분야인 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서를 각각 분석해 공통점과 차이점을 밝혔다.

또, 양자과학기술은 경제적, 군사적 가치에 대한 기대로 인해 국가별 장벽이 비교적 높은 연구 분야이다. 양자과학기술 분야는 초기부터 학계뿐만 아니라 사회 전반의 기대를 받아온 신홍 기술 분야이다. 최근에는 여러 국가들이 경쟁적으로 엄청난 규모의 정부 자금을 관련 연구에 투자하고 있다. 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등을 전략 기술로 선정하여 관리하기도 한다. 본 연구는 국가별 세부 분야 과학 오버레이 지도를 시각화하고 공동연구 네트워크에서 국가를 주요 분석 요인으로 삼아 국가라는 변수가 양자과학기술의 형성 및 발전 과정에 미친 영향을 보이도록 했다. 이를 위해 양자과학기술의 선도 국가인 미국, 중국과 최근 양자과학기술에 대한 투자를 급격하게 늘리고 있는 추격 국가인 한국을 분석했다.

분석 결과 세부 분야의 인지 지도가 매우 유사하며 시간에 따라 더욱 비슷해진다는 것을 확인했다. 각 세부 분야의 전체 논문 정보를 시각화한 결과 세부 분야의 연구 활동이 과학 오버레이 지도에서 차지하는 상대적 위치는 매우 유사한 분포를 보였다. 각 세부 분야의 연구 활동은 대부분 화학 및 물리학 클러스터와 공학 및 수학 클러스터에 속했다. 특히 주요 주제 범주는 대부분 물리학 관련 주제 범주 혹은 컴퓨터 공학 관련 주제 범주였다. 두 클러스터에 속한 논문 수를 보면 양자 컴퓨터와 양자 통신 및 암호 분야는 두 클러스터의 비율이 약 2:1, 양자 센서 분야는 두 클러스터의 비율이 약 5:1로 다소 차이를 보였다. 하지만 1990년대, 2000년대, 2010년대로 나눠 각 세부 분야의 시간에 따른 변화를 분석한 결과 1990년대 양자 센서 관련 논문은 대부분 화학 및 물리학 클러스터에 속했으나 시간이 흐름에 따라 컴퓨터 공학 관련 주제 범주의 비율이 증가하면서 다른 두 분야와 유사한 분포로 변화했다.

이는 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 등의 양자과학기술이 일반적인

로 알려진 것과 같이 물리학과 컴퓨터 공학의 교차점에서 탄생했으며 이후에도 두 분야를 중심으로 발전했음을 보여준다. 화학 및 물리학과 공학 및 수학 클러스터는 전체 과학 지도에서 서로 인접한 클러스터 즉, 분야 사이의 인용이 활발하게 벌어지는 학문 분야이다. 즉, 양자과학기술은 이질적인 학문이 아닌 교류가 활발한 두 학문을 기반으로 하는 학제간 연구 분야라는 것을 알 수 있다. 초기에는 다른 두 분야와 다소 다른 분포를 보였던 양자 센서 분야가 이후 유사한 분포로 변화한 것은 각 세부 분야의 발전 과정이 활용 분야라는 측면의 이질성보다는 지식 기반의 유사성에 더 큰 영향을 받았음을 의미한다. 센서에서 물리화학, 기기 및 측정, 통신에서 통신, 정보시스템 관련 컴퓨터 공학 등 다른 주제 범주들이 주요 주제 범주에 포함되었으나 대부분의 주요 주제 범주들은 거의 유사했다. 센서와 직접적인 관련이 떨어질 것으로 보이는 컴퓨터 공학 관련 주제 범주 역시 비교적 높은 순위를 차지했으며 1990년대, 2000년대, 2010년대에 각각 35위, 23위, 17위로 꾸준히 순위가 증가했다.

미국, 중국, 한국의 연구기관의 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호, 양자 센서 관련 연구 활동을 시각화한 인지 지도를 살펴보면 세부 분야별로 국가라는 요인이 다르게 작용한다는 사실을 알 수 있다. 양자 컴퓨터 분야는 국가별 차이가 가장 적어 미국과 중국의 과학 오버레이 지도에서만 활성화된 노드를 보면 각 국가에서 양자 컴퓨터 관련 과학기술이 주로 활용되는 분야를 확인할 수 있었다. 반면, 양자 통신 및 암호는 미국과 중국의 차이가 크게 드러나는 세부 분야이다. 특히 중국의 인지 지도에서 물리학 관련 주제 범주의 비율이 미국에 비해 훨씬 높았다. 마지막으로 양자 센서는 미국, 중국보다 양자과학기술 수준이 낮은 한국이 화학 및 물리학 클러스터의 비율이 전체의 81%에 해당하여 가장 이질적인 분포를 보였다.

양자 통신 및 암호 분야의 형성 및 발전 과정을 각 국가의 연구 활동의 상대적 위치가 다른 것은 기술 수준으로 설명할 수 없다. 즉, 세부 분야의 과학기술 수준은 클러스터별 비율, 라오-스털링 지수, 관련 주제 범주 수 등과 직접적인 관계를 갖지 않는다. 양자 컴퓨터의 경우 미국과 중국, 한국이 모두 비슷한 분포를 보였던 것과 달리 양자 통신 및 암호 분야에서는 선도 국가인 중국이 특정 학제의 비율이 높았다. 한국의 경우에도 양자 컴퓨터, 양자 통신 및 암호에 비해 양자 센서의 기술

격차가 더 작음에도 불구하고 양자 센서 분야에서 가장 이질적인 분포를 보였다. 각 세부 분야의 연구 활동이 시간이 지남에 따라 더욱 비슷해진 것과 달리 별 연구 활동의 분포는 기술이 발전함에 따라 비슷해진다고 예측하기 어렵다.

국가라는 요인을 사회적 공간에서 관찰하기 위해 1990년대, 2000년대, 2010년대 양자 통신 및 암호 관련 논문의 서지 정보를 연구기관 단위의 공동연구 네트워크로 시각화하고 변화를 관찰한 결과 주요 연구기관과 연구기관 사이의 관계를 확인할 수 있었다. 특히 중요 연구기관들을 2개의 클러스터로 나누었을 때, 중국 연구기관 중심의 클러스터와 나머지 연구기관의 클러스터로 나누어지는 것을 발견했다. 이러한 경향은 2000년대와 2010년대에 공통적으로 나타났으나 시간이 흐름에 따라 클러스터 사이의 링크가 증가하고 거리 역시 가까워졌다. 이는 중국의 양자 통신 및 암호 분야가 초기에는 비교적 외부, 특히 양자과학기술 분야의 선도 국가인 미국과의 교류 없이 독자적으로 형성되고 발전했다는 것을 의미한다. 중국 양자 통신 및 암호 분야의 특징은 보안을 제공하는 양자 통신 및 암호 관련 기술을 개발해야 한다는 목적으로 중국 정부가 시행한 양자 통신 중심의 양자과학기술 정책의 영향을 받았다. 또, 내부의 공동연구 네트워크를 강화해 연구의 양과 질을 높이는 전략 역시 유효했다. 다만 중국의 양자 통신 및 암호 분야가 완전히 독립적이라고 할 수는 없다. 다른 국가에 비해 미국과의 공동연구 비율이 낮고 독립된 클러스터를 구성하고 있으나 2000년대에는 독일, 오스트리아 등 유럽 국가와 공동연구를 비롯한 다양한 방식의 인적 교류를 통해 중국의 양자 통신 및 암호 분야가 탄생했다.

양자과학기술은 활용 분야와 창출할 것으로 기대되는 가치가 큰 만큼 필요한 기초과학 역량, 인프라, 연구 자금 역시 큰 과학기술 분야이다. 대부분의 국가들은 양자과학기술 분야를 통합적으로 지원하기 어렵다. 그럼에도 불구하고 양자과학기술이 과학기술계의 유행어(buzzword)로 떠오르면서 지원 정책 역시 급격하게 증가하고 있다. 세부 분야별로 필요한 투자와 미래 가치가 다르기 때문에 각 정부는 특정 세부 분야를 집중적으로 지원하는 정책을 시행하기도 한다. 중국의 경우 양자 통신 중심의 강력한 정책 드라이브를 바탕으로 빠르게 양자 통신 및 암호 분야를 성장시켰으며 이는 매우 효과적으로 작용했다. 중국과학기술대와 중국과학기술원을 중심으로 양자 통신 및 암호 인프라를 설계 및 구축하고 각 대학에서는 양자 컴퓨터

관련 기초 연구를 담당하는 방식으로 중국은 양자과학기술 분야 전체를 발전시킬 수 있었다. 이처럼 양자과학기술 관련 정책을 설계 및 시행하기 위해서는 각 국가의 기초과학 역량, 기술 인프라 등을 고려하여 세부 분야에 대한 우선순위를 설정할 필요가 있다. 하지만 동시에 각 세부 분야는 유사한 지식 기반과 공통된 활용 분야를 갖기 때문에 세부 분야 사이의 네트워킹이 활발하게 일어날 수 있도록 지원해야 한다.

본 연구는 전통적 학문 분류에 대응하는 인지 공간에 양자과학기술 세부 분야의 논문 정보를 시각화하여 양자과학기술 분야의 형성 및 발전 과정에 대한 새로운 관점을 제시했다. 다만 국가라는 요인이 세부 분야별 인지 지도에 미치는 영향을 분석하여 양자과학기술 분야에 대한 이해를 높이고자 했기 때문에 그 원인을 명확하게 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 기업, 연구소, 대학 등 연구기관의 형태, 특정 분야의 학문적 전통, 사회적 배경 등 다양한 요인이 잠재적 원인이 될 수 있을 것이다. 예를 들어 특정 국가의 물리학 분야 수준이 컴퓨터 공학 분야의 수준에 비해 매우 높다면 연구 활동의 위치가 전체 세부 분야에 비해 치우칠 확률이 높을 것이다. 또, 최근 유럽 연합이 상호주의를 강조하며 양자과학기술을 포함한 주요 기술이 중국으로 유출되는 것을 꺼리는 상황에서 국가별 세부 분야의 과학 오버레이 지도와 공동연구 네트워크의 변화를 관찰하는 것 역시 흥미로운 연구 소재가 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 양자 컴퓨터를 하드웨어, 소프트웨어, 시뮬레이션 등을 포괄하는 넓은 분류의 의미로 사용했으나 분류에 따라 양자 컴퓨터 분야를 더 세분화하여 양자 하드웨어, 양자 소프트웨어, 양자 시뮬레이션 등으로 구분하고 양자 컴퓨터를 quantum computing 분야만을 칭하기도 한다. 각 세부 분야가 아직 각 분야를 분석할만큼 충분한 논문이 출판되지 않았으나 이후 각 분야가 더 발전한다면 더 세부적인 분야를 나누어 세부 분야 즉, 부문별 특성을 추가적으로 확인해본 양자과학기술 분야에 대한 이해도를 더 높일 수 있을 것이다. 나노 기술에 대한 분석 역시 나노 기술 전체, 특정 세부 분야(sub-field), 특정 기술(탄소 나노 튜브) 등 여러 층위에서 복합적으로 이루어졌다.

본 연구는 과학 오버레이 지도를 사용했기 때문에 기초 지도와 동일한 한계를

찾는다. 즉, 특정 논문이 출판되는 저널이 해당 논문의 인지 지도를 해석하는 것이기 때문에 적절하지 않은 분류일 수 있다는 것이다. 다만 양자과학기술의 경우 다른 학제간 연구 분야와 달리 해당 분야를 대표하는 독자적인 저널이 없는 상황이기 때문에 현재 상황에서는 과학 오버레이 지도가 가장 적절한 도구라고 할 수 있다.

기술 발전을 위한 전략 수립 및 미래 예측을 목표로 했던 기존 연구들과 달리 본 연구는 학제간 연구 분야인 양자과학기술 분야의 인지 지도를 탐구했다는 의미를 갖는다. 또, 기존 연구들이 중국 연구기관이 양자과학기술 분야에서 중요한 역할을 수행한다는 사실을 발견하는 것에 그쳤던 반면, 본 연구는 중국 양자 통신 및 암호 분야 연구기관의 독자적인 발전과 인지 지도의 특이성을 발견했다. 다른 학제간 연구 분야와 달리 관련 연구가 많지 않은 상황에서 양자과학기술 분야를 분석하는 관점을 제시하고 기초 자료를 제공했다는 점이 본 연구의 의의이다. 본 연구의 결과는 양자과학기술 분야에 대한 지원 정책 및 연구 개발 사업이 활발하게 진행되는 상황에서 이러한 결과는 관련 정책 설계 및 시행의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히 양자과학기술 분야는 학제간 연구 분야로 지원 정책 및 연구개발 사업을 시행할 때 모호한 경계로 인한 어려움이 큰 분야이기 때문에 본 연구의 결과가 더욱 중요하다고 할 수 있다.

□ 참고 문헌 □

<국문 문헌>

- 과학기술정보통신부, 『양자기술 연구개발 투자전략(안)』 (2021).
- 과학기술정보통신부, 한국과학기술기획평가원, 『주요국 양자정보기술 지원정책 동향』 (2018).
- 양자정보연구지원센터, 『국가차원의 양자연구 집중지원 추진체계 분석』 (2022).
- 정보통신기획평가원, 『양자 컴퓨터 개발 동향과 시사점』 (2018).
- 정보통신기획평가원, 『양자 센서 연구 동향 및 활용 전망』 (2020).
- 한국과학기술기획평가원, 『범용양자컴퓨터』 (2019).
- 한국과학기술기획평가원, 『양자정보기술』 (2022).
- 한국과학기술정보연구원, 『양자컴퓨터 R&D 정책 현황과 전망』 (2019).
- 한국과학기술정보연구원, 『양자기술 과학·기술·산업분석』 (2022).
- 한중과학기술협력센터, 『한·중 양자정보기술 동향 비교』 (2022).

<영문 문헌>

- Apostel, Leo. "Interdisciplinarity Problems of Teaching and Research in Universities." (1972).
- Carley, Stephen, et al. "Visualization of disciplinary profiles: Enhanced science overlay maps." *Journal of Data and Information Science* 2.3 (2017): 68-111.
- Chen, Chaomei. "Science mapping: a systematic review of the literature." *Journal of data and information science* 2.2 (2017): 1-40.
- Dhawan, S. M., B. M. Gupta, and Sudhanshu Bhusan. "Global publications output in quantum computing research: A scientometric assessment during 2007-16." *Emerging Science Journal* 2.4 (2018): 228-237.
- Dowling, Jonathan P., and Gerard J. Milburn. "Quantum technology: the second quantum revolution." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 361.1809 (2003): 1655-1674.
- Deutsch, Ivan H. "Harnessing the power of the second quantum revolution." *PRX*

- Quantum* 1.2 (2020): 020101.
- Fedorov, A. K., Akimov, A. V., Biamonte, J. D., Kavokin, A. V., Khalili, F. Y., Kiktenko, E. O., ... & Zheltikov, A. M. (2019). *Quantum technologies in Russia. Quantum Science and Technology*, 4(4), 040501.
- Feynman, R. P. (2018). Simulating physics with computers. *Int. j. Theor. phys.*, 21(6/7).
- Hassija, Vikas, et al. "Present landscape of quantum computing." *IET Quantum Communication* 1.2 (2020): 42–48.
- Heimeriks, Gaston, and Loet Leydesdorff. "Emerging search regimes: measuring co-evolutions among research, science, and society." *Technology Analysis & Strategic Management* 24.1 (2012): 51–67.
- Hughes, Morgan, and Peterson "Quantum key distribution over a 48 km optical fibre network." *Journal of Modern Optics* 47(2–3) (2000): 533–547.
- Huutoniemi, Katri, et al. "Analyzing interdisciplinarity: Typology and indicators." *Research policy* 39.1 (2010): 79–88.
- Kalz, Marco, and Marcus Specht. "Assessing the crossdisciplinarity of technology-enhanced learning with science overlay maps and diversity measures." *British Journal of Educational Technology* 45.3 (2014): 415–427.
- Klavans, Richard, and Kevin W. Boyack. "Toward a consensus map of science." *Journal of the American Society for information science and technology* 60.3 (2009): 455–476.
- Klein, Julie Thompson. "Typologies of interdisciplinarity." *The Oxford handbook of interdisciplinarity* 2 (2017): 21–34.
- Klein, Julie Thompson, and William H. Newell. "Advancing interdisciplinary studies." *Handbook of the undergraduate curriculum: A comprehensive guide to purposes, structures, practices, and change* (1997): 393–415.
- Liu, Xiaoyu, et al. "The technological emergence of quantum communication: A bibliometric analysis." *Technology Analysis & Strategic Management* (2022): 1–17.
- Meyer, Martin, and Olle Persson. "Nanotechnology–interdisciplinarity, patterns of

- collaboration and differences in application." *Scientometrics* 42 (1998): 195–205.
- National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, and Institute of Medicine. 2005. Facilitating Interdisciplinary Research. Washington, DC: *The National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/11153>.
- NSF(National Science Foundation) (2002), Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, NSF/DOC–sponsored report, edited by Mihail C. Roco and William Sims Bainbridge.
- Olijnyk, Nicholas V. "Examination of China's performance and thematic evolution in quantum cryptography research using quantitative and computational techniques." *Plos one* 13.1 (2018): e0190646.
- Porter, Alan L., and Jan Youtie. "How interdisciplinary is nanotechnology?." *Journal of nanoparticle research* 11 (2009): 1023–1041.
- Pritchard, Jonathan, and Stephen Till. "UK Quantum Technology Landscape 2014." *Defence Science and Technology Laboratory, DSTL/PUB75620* (2014).
- Rafols, Ismael, Alan L. Porter, and Loet Leydesdorff. "Science overlay maps: A new tool for research policy and library management." *Journal of the American Society for information Science and Technology* 61.9 (2010): 1871–1887.
- Rafols, Ismael, and Martin Meyer. "How cross-disciplinary is bionanotechnology? Explorations in the specialty of molecular motors." *Scientometrics* 70 (2007): 633–650.
- Rotolo, D., I. Rafols, M. Hopkins, and L. Leydesdorff. "Scientometric Intelligence on Emerging Technologies: Scientometrics Overlay Mapping." *Journal of the Association for Information Science and Technology* 68 (2013): 214–233.
- Scheidsteger, Thomas, et al. "Bibliometric analysis in the field of quantum technology." *Quantum Reports* 3.3 (2021): 549–575.
- Sigov, Alexander, Leonid Ratkin, and Leonid A. Ivanov. "Quantum information technology." *Journal of Industrial Information Integration* 28 (2022): 100365.
- Srivastava R., Choi I., Cook T. et al.: 'The commercial prospects for quantum computing', *Networked Quantum Inf. Technol.*, 2016, 1, (1), pp. 1– 48
- Stirling, Andy. "A general framework for analysing diversity in science, technology and

- society." *Journal of the Royal Society interface* 4.15 (2007): 707–719.
- Tittel, Wolfgang, Johannes Brendel, Hugo Zbinden, and Nicolas Gisin. "Quantum cryptography using entangled photons in energy–time Bell states." *Physical Review Letters* 84.20 (2000): 4737.
- Tolcheev, Vyacheslav O. "Scientometric analysis of the current state and prospects of the development of quantum technologies." *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* 52 (2018): 121–133.
- Townsend, Paul D. "Quantum cryptography on multiuser optical fibre networks." *Nature* 385.6611 (1997): 47–49.
- Van Eck, Nees Jan, and Ludo Waltman. "VOS: A new method for visualizing similarities between objects." *Advances in Data Analysis: Proceedings of the 30th Annual Conference of the Gesellschaft für Klassifikation eV, Freie Universität Berlin, March 8–10, 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Van Eck, Nees–Jan, et al. "An experimental comparison of bibliometric mapping techniques." *The 10th International conference on Science and Technology Indicator*. University of Vienna, 2008.
- Wagner, Caroline S., et al. "Approaches to understanding and measuring interdisciplinary scientific research (IDR): A review of the literature." *Journal of Informetrics* 5.1 (2011): 14–26.
- Waltman, Ludo, Nees Jan Van Eck, and Ed CM Noyons. "A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks." *Journal of informetrics* 4.4 (2010): 629–635.
- Wang, Jiaxing, Lihua Shen, and Wuyuan Zhou. "A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from Scopus." *Technology Analysis & Strategic Management* 33.11 (2021): 1347–1363.
- Zhang, Qiang, Fuyou Xu, Long Li, Nai–Le Liu, and Jian–Wei Pan. "Quantum

information research in China." *Quantum Science and Technology* 4.4
(2019): 040503.

Abstract

Analysis of the Formation and Development Process of Quantum Science and Technology Field Using Science Map

HONG Myungeun

Graduate Department of Science Studies

The Graduate School

Seoul National University

This paper analyzed the formation and development process of quantum science and technology using a Science Map approach. Quantum science and technology encompass various disciplines such as physics, computer science, engineering, and mathematics, making it challenging to observe their formation and development within traditional disciplinary structures. To overcome this, the study utilized the method of visualizing the bibliographic information of papers related to quantum computing, quantum communication and cryptography, and quantum sensors using a Science Overlay Map, which helps analyze the relative positions of related research activities. Additionally, the paper visualized the field of quantum communication and cryptography as collaborative research networks among institutions, revealing its social structure. The analysis results showed that the knowledge base and application areas of quantum computing, quantum communication and cryptography, and quantum sensors were categorized into subject clusters related to chemistry and physics, as well as engineering and mathematics. The ratio between the two clusters was approximately 2:1 for quantum computing and quantum communication and cryptography, and about 5:1 for quantum sensors. The field of quantum sensors, initially exhibiting a different distribution from the other two fields, evolved over time to resemble the distribution of the other two fields. Moreover, analyzing the

country-specific Science Overlay Maps for each subfield revealed that the quantum computing field displayed similar distributions in the United States, China, and South Korea. In the quantum communication and cryptography field, China, a leading nation, exhibited a higher proportion of topics related to physics. Despite South Korea's relatively high technological level in the field of quantum sensors, its distribution differed significantly from that of the United States and China. Through collaborative research networks, the presence of a China-centric cluster in the field of quantum communication and cryptography was identified. China has pursued an independent development path in this field, with strong policy support from the Chinese government and enhanced internal collaborative research networks contributing to this development. This study presents a perspective for analyzing the interdisciplinary research aspect of quantum science and technology, which is currently lacking in research, and provides foundational data. Furthermore, it can serve as foundational data for policy makers designing policies to support the field of quantum science and technology, or for domestic and international research institutions and companies developing strategies for the advancement of quantum science and technology.

Keywords: Quantum Science and Technology, Interdisciplinary Research, Science Map, Emerging Technology