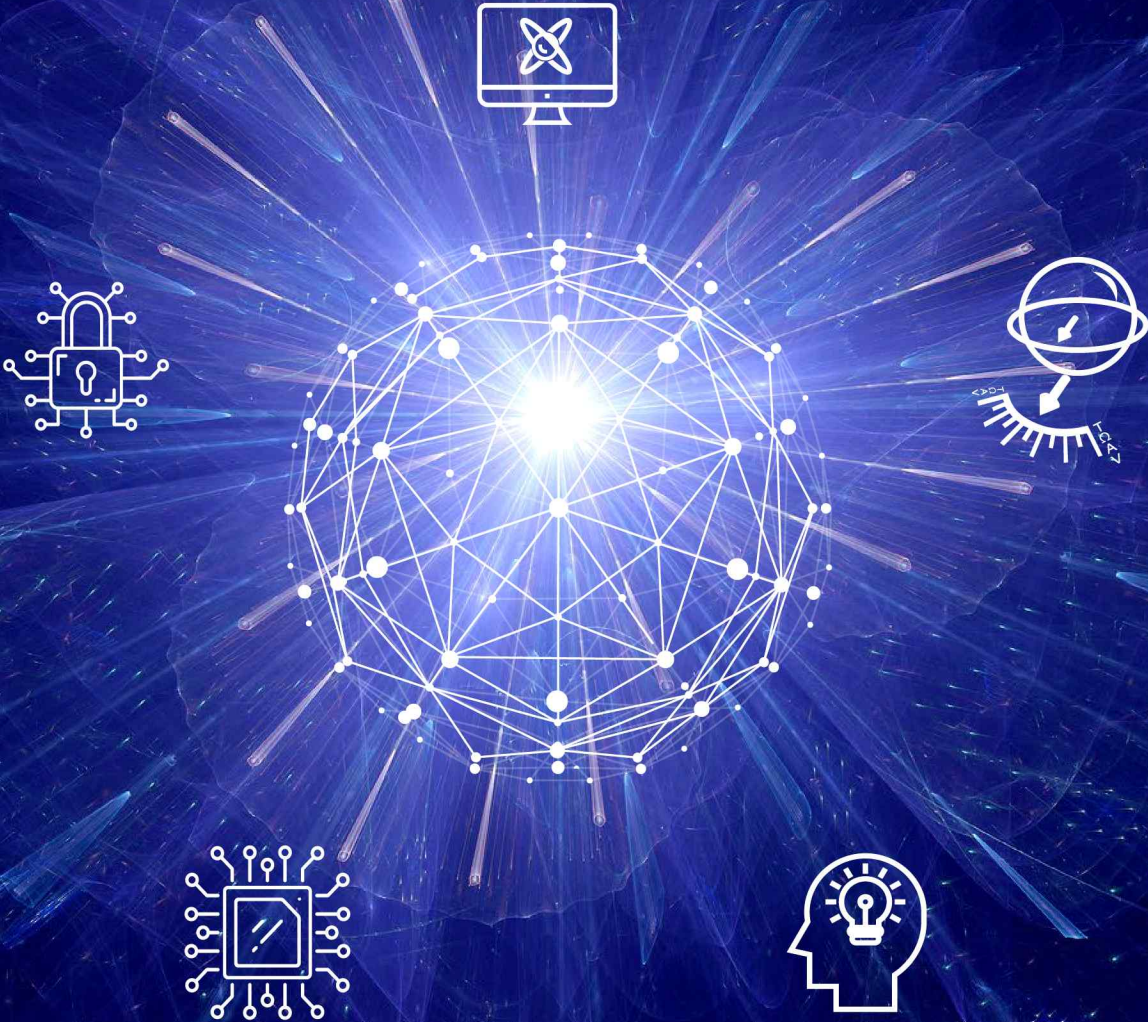


Europe Quantum Brief

영국 양자기술 인프라 고도화를 위한 제언



Europe Quantum Brief

영국 양자기술 인프라 고도화를 위한 제언

[발행일] 2024년 9월

[저 자] 송 예 인, 이 정 원

[발행인] 이 정 원

[발행처] 한-유럽 양자과학기술협력센터 (KE-QSTCC)

[주 소] Korea-Europe Quantum Science Technology Cooperation Center
Rue de la Science 14A
1040 Brussels, Belgium

[자 문] 정 민 기 (University Of Birmingham)

[문 의] 송 예 인
E-mail. janesong@k-erc.eu

※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 가공·인용할 때는 원문출처를 명시하셔야 합니다.

※ 본 자료는 KE-QSTCC 웹페이지(<https://k-erc.eu/ke-qstcc/>)를 통해서도 보실 수 있습니다.



01	양자 인프라 투자지원 필요성	1
02	양자 인프라 고도화를 위한 제언	3
03	결론 및 시사점	13
	참고문헌	14

01 양자 인프라 투자지원 필요성

◆ 향후 10년간 영국의 양자기술 인프라가 갖춰야 할 조건과 권고사항을 발표

- (개요) 영국왕립공학한림원은 영국 내 양자기술 인프라의 현황 및 강·약점을 독립적으로 검토하고, 양자기술 인프라에 대한 정부의 장기 투자지원을 권고하는 보고서 발간 (‘24.6)
※ Quantum Infrastructure Review (Royal Academy of Engineering, 2024)
 - 미래 양자기술 산업 활성화에 있어 인프라의 중요성을 인식, 기술개발 과정의 위험을 줄이고 상용화 촉진과 민간 투자유치를 위한 정부 투자지원에 대한 우선순위 검토
 - 양자기술 상용화에 필요한 인프라 투자와 성공적 운영에 필요한 시스템적 지원 요소를 식별하고, 타 분야와 시너지 모색 등을 고려하여 6가지 권고사항*을 제시
- * ① 기존 인프라의 접근성 향상 및 신규 시설 투자, ② 산업계 요구사항을 충족하는 인프라 운영 및 현재 인프라 개선, ③ 양자기술 인프라 활용 조정 기능, ④ 양자기술에 필요한 첨단제조 투자 장려, ⑤ 민관 협력 로드맵 기반의 양자기술 세부 투자 실행계획 수립 ⑥ 인재육성, 표준개발, 규제 등에 대한 정부 노력

◆ 양자기술 인프라 현황 분석을 기반으로 영국 정부의 투자지원 필요성을 제시

- (현황) 양자기술 R&D 부문의 글로벌 선두 주자로 강점을 가졌지만, 주요국의 국가 전략 수립 및 대규모 투자 등 글로벌 경쟁환경에서 상용화 선도국 도약으로의 기로에 놓임
- 국가양자전략(NQS, '23)을 통해 세계적인 수준의 양자기술 연구개발 역량을 토대로 기술 개념화 단계에서 응용·보급 단계로 전환을 위해 상용화에 주력
- 하지만, 시장 측면에서 양자기술의 혁신 잠재력은 불확실성이 높은 상황이며, 기업 관점에서 이러한 기술과 시장의 불확실성은 기업 초기 투자의 장벽으로 작용
- (필요성) 기존 연구개발의 선도적 입지를 유지하면서, 양자기술의 응용과 상용화 측면에서도 선두 주자가 될 수 있는 골든타임으로, 정부의 적극적인 투자지원을 요구
- 양자기술 상용화에 있어 영국이 직면한 양자기술 인프라 현황과 이슈(표1-1)를 분석하고, 이에 대응하기 위한 정부 투자지원의 필요성 및 기반 강화 조치를 강조
- 정부 지원은 영국의 리더십과 전략적 우위 확보, 학-연구계와 산업계 간의 격차 해소 등을 통해 기업의 기술개발 위험을 줄이고 상용화 및 민간 투자 유치를 촉진

표 1-1 양자기술 개발단계별 영국의 인프라 현황과 이슈

개발단계	현황 및 이슈
설계 (Design)	<ul style="list-style-type: none"> 전자설계자동화(EDA, Electronic Design Automation) 라이선스의 높은 비용과 미국 EDA 공급업체(vendors)의 지배력은 자금이 부족한 영국 중소기업에게 진입장벽으로 작용 특히, 높은 접근 비용이 드는 특정 물리적 프로토타이핑 및 제조시설의 PDK(Process Design Kit)가 영국 밖의 해외 시설에 있어 설계 진입장벽은 더욱 높음 영국 기업들은 국가 프로토타입 보조금을 받는 해외 경쟁업체에 비해 취약한 개발 여건
나노제조 프로토타이핑 (Nano-fabrication prototyping)	<ul style="list-style-type: none"> 학계-중규모 산업 제조 간 개방형 소량 프로토타이핑 시설에 대한 수요가 많으며, 주로 대학 시설과 혁신 센터에서 제조되고 있으나, 현재 산업표준을 충족하지 못하는 수준 영국 기업들은 해외에 있는 나노제조 프로토타이핑 시설을 이용 아시아와 같이 대규모 제조시설과 경쟁할 수 있는 인프라는 부족하지만, R&D 및 스타트업의 강점을 활용할 수 있는 중저가 대량생산 제조역량 확보 기회는 존재
화합물 반도체	<ul style="list-style-type: none"> 다른 소재에 비해 상대적으로 새로운 시장 창출 기회가 큰 분야로, 영국은 글로벌 시장에서 높은 점유율과 강점을 가지며, 산·학·연 전반적으로 강세 (특히 물질 증착 분야) 국립 에피택시 시설을 보유하고 있고, 주요 임무는 학술연구 지원이며 소량 생산에 중점
실리콘 포토닉스	<ul style="list-style-type: none"> 영국은 실리콘 포토닉스 R&D분야에서 글로벌 입지와 전문성을 갖추고 있고, 양자 응용 분야로 주목받고 있어서 비교적 적은 투자로 해당 분야에서 리더십 확보 가능 실리콘 포토닉스와 기존 CMOS 리소그래피 공급망과의 호환성으로 비용 효율성 높음
다이아 몬드	<ul style="list-style-type: none"> 양자컴퓨팅 및 자기 감지 분야에 필요한 공극 센터 다이아몬드 합성 기술 관련 전문성을 갖춘 산·학 생태계¹⁾를 보유
초전도체	<ul style="list-style-type: none"> 연구개발 단계의 전문성과 인프라를 보유²⁾하고 있으며 극저온 하드웨어 제조³⁾에 강세 연구개발을 실용적인 응용 분야로 전환하는 상업적 역량은 현재 제한적임
패키징 (Packaging)	<ul style="list-style-type: none"> 양자기술 관련 이종집적 통합기술은 아직 개발 초기 단계로 R&D, 파일럿, 테스트에 집중하고 있으며, 영국은 이종집적 통합을 포함한 최첨단 패키징 기술에 대한 상업적 역량 부족 영국 소재 양자기술 기업들은 해외의 패키징 인프라와 서비스를 정기적으로 이용하는 상황이며, 상용 패키징 역량 부족은 영국의 양자기술 제조에 있어 병목 현상을 초래

* 전자설계자동화(EDA): 인쇄회로기판(PCB) 및 집적회로(IC) 등 전자시스템의 설계 프로세스 간소화 및 자동화 툴

1) △ (산) Element Six 社, OPSYDIA 社, △ (학) Cardiff大 다이아몬드 파운드리, Bristol, Oxford, Warwick, UCL, Cambridge 대학 등
 2) △ (학) 영국 초전도체 및 양자시스템 센터(RHUL UK-CSQS), Glasgow大 제임스왓 나노제조센터(JWNC), Lancaster大, Bristol大 나노과학 및 양자정보센터(NSQI), Oxford大 양자재료 연구그룹, △ (국립시설) STFC Daresbury 연구소의 RF 테스트를 통한 초전도 연구, 국립물리연구소(NPL)의 테스트 활동 등
 3) Oxford Instruments, ICE Oxford, Chase Cryogenic 社 등

02 양자 인프라 고도화를 위한 제언

◆ 양자기술 인프라 투자 우선순위 분석 방법 및 6대 권고사항

- 양자기술 분야의 장기적인 성장을 지원하기 위해 산업계가 실제 활용할 수 있는 인프라 구축이 필요하며, 이를 위한 6가지 권고사항을 제언
 - 기존 물리적 인프라 개선 또는 신규 구축과 관련된 투자 우선순위는 ‘권고사항 1’에 포함되었으며, 성공적인 인프라 운영에 필요한 요소들은 ‘권고사항 2~6’에서 제시
- 특히, 권고사항 1(기존 인프라 접근성 개선과 신규 시설 투자)에서는 기술 인프라에 대한 전략적 투자 우선순위 결정을 위해 기술개발 단계별*로 분석하는 시스템적 접근 방식 적용
 - * (기술개발 3단계) ① 설계 - ② 나노제조 프로토타이핑 - ③ 패키징, 첨단 패키징 및 이종집적 통합
- 나노제조 프로토타이핑 기술개발 단계에서 4개 주요 양자 플랫폼*을 영국의 투자 우선 분야로 선정하고, 양자 플랫폼별 필요한 조치사항을 권고
 - * ① 화합물 반도체, ② 실리콘 포토닉스, ③ 다이아몬드, ④ 초전도체 등

표 2-1 ○ 영국 양자기술 인프라 고도화를 위한 6대 권고사항

구분	내용
권고사항 1 (인프라 투자)	기존 인프라에 대해서는 산업계의 접근성을 개선하고, 최소 하나 이상의 신규 인프라 시설에 대한 투자 및 구축으로 양자기술 상용화 개발을 지원
권고사항 2 (업계요구 충족)	산업계의 요구사항을 충족하는 인프라 운영 및 기존 인프라 개선
권고사항 3 (조정)	영국 양자기술 환경탐색을 위한 지침을 제공하고, 산업계의 인프라에 대한 접근 조정 및 활용을 촉진하는 양자기술 인프라 조정 기능 역할 창구를 마련
권고사항 4 (제조역량 통합)	산업계의 양자기술 및 기타 기술에 필요한 첨단 제조 역량에 대한 투자 장려
권고사항 5 (전략적 방향제시)	정부가 산학계와 협력하여 개발한 로드맵 등을 통해 양자기술에 대한 전략 방향 제시
권고사항 6 (인프라 Enabler)	정부는 인프라 운영을 위해 필요한 기술역량(skills)을 제공하고 환경에 미치는 영향을 포함한 책임감 있고 윤리적인 혁신을 보장하는 표준 및 규제 개발

[권고사항 1] 기존 인프라 접근성 향상과 신규 인프라 시설에 대한 투자지원

- 현재 개방형 인프라는 산업계 요구를 충족시키지 못해 인프라 접근성 개선이 요구되며, 달성하고자 하는 목표 수준에 따라 2가지 시나리오를 수립, 기술개발 단계별로 제시
 - 대규모 투자 없이 현재 입지 유지를 위해 기존 인프라 접근성을 개선하는 시나리오Ⓐ와 핵심 역량에 선제적인 투자로 특정 영역에서 선두 입지를 확보하는 시나리오Ⓑ로 구분

(1) 시나리오Ⓐ (대규모 투자 없이 현재 입지 유지)

- (시나리오Ⓐ) 기존 인프라를 개선하고 업그레이드하여 산업계 요구에 부합하도록 보장함으로써 현재 구축된 인프라 강점을 활용, 영국의 현재 입지를 유지하는 것을 목표로 하며, 본 보고서는 시나리오Ⓐ에 대한 전반적인 이행을 권고

표 2-2 • (시나리오Ⓐ) 현상 유지를 위한 기존 인프라 접근성 개선에 대한 방안

■ 설계 (Design)

- 전자설계자동화(EDA) 도구 및 PDK(Process Design Kits) 접근성 개선
 - 양자기술 설계에 대한 산업 요건을 충족하기 위해 ChipStart UK 등 프로그램을 활용 및 조정
 - 현재 학계에만 제공하고 있는 EuroPractice의 비용 할인을 산업계에도 확대하여 지원
 - 국가적 차원에서의 EDA 공급업체와 협상으로 라이선스 등에서 협상력 강화

■ 나노제조 프로토타이핑 (Nanofabrication prototyping)

화합물 반도체	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 대규모 에피택시(epitaxy)가 가능하도록 기존 개방형 접근 시설을 업그레이드 ▪ 산업계 접근성 및 표준 개선을 전제 조건으로 에피택시 및 첨단 나노제조 도구 도입 지원을 확대
실리콘 포토닉스	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 산업계 접근성과 표준 개선을 조건으로 기존의 개방형 시설 내 리소그래피 장비 등 산업계 관련 장비들을 업그레이드
다이아몬드	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 개방형 프로토타입 및 파일럿 라인의 역량 강화를 목표로 여러 산·학 기관에 분산되어 있는 기존 시설들을 조정하고 기존 소규모 제조 역량을 확장
초전도체	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기존 개방형 시설 내 산업용 첨단 나노제조 시설 및 테스트 장비(예: 극저온 및 RF용 시험 설비)를 업그레이드하여 양자 전용 PDK 개발이 가능한 시설로 고도화

■ 패키징, 첨단 패키징 및 이종집적 통합

(Packaging, advanced packaging, and heterogeneous integration)

- 패키징 관련 이슈를 해결하고 이종집적 통합기술 개발을 위한 공동 연구개발 프로그램 추진
- 산업 접근성 및 표준 개선을 조건으로 기존 개방형 시설 내 산업 관련 설비를 개선

■ 설계 (Design)

- (현황) 기존 반도체 설계 도구를 활용한 양자기술 설계 시, 풀스택 EDA 및 PDK에 대한 접근이 제한적이고, 미국 등 해외 시설에 의존하는 영국 기업에 고비용 부담으로 작용
- (권고사항) 영국에 기반을 둔 기업, 특히 중소기업이 EDA 도구에 접근 할 수 있도록 지원
 - 전자설계자동화 도구(EDA Tool) 및 PDK(Process Design Kits)에 대한 접근성을 향상하고, 영국에 기반을 둔 기업, 특히 중소기업이 EDA Tool에 접근할 수 있도록 지원
 - 영국 ChipStart UK* 프로그램 등을 활용해 산업용 양자기술 설계 요건을 충족
 - * 영국 정부가 지원하는 파일럿 프로그램으로 초기 단계 반도체 설계 스타트업에 설계 툴, 지식재산권 및 프로토타이핑에 대한 접근성을 포함해 설계에 필요한 도구(Tool), 전문성 및 네트워크 제공
 - 현재 학계에만 지원하는 EuroPractice를 산업계로 확대하여 EDA Tool에 대한 접근성 개선과 비용 절감을 지원, 중소기업의 재정적 장벽을 해소
 - 국가 차원에서 정부가 소규모 기업을 대신하여 EDA 공급업체와 직접 협상함으로써 라이선스 계약의 투명성을 높이고, 라이선스 및 수출통제로 인한 제약을 완화

■ 나노제조 프로토타이핑 (Nanofabrication prototyping)

- (현황) 영국 기업들은 해외 제조시설을 사용 중이며, 아시아처럼 대규모 제조 인프라는 없지만, R&D와 스타트업 강점을 살릴 수 있는 증거가 대량생산 제조역량 확보는 가능
- (화합물 반도체) 현재 화합물 반도체 분야에서 영국이 갖는 글로벌 경쟁력을 바탕으로 양자응용 분야의 신규 재료를 초기 단계에서 탐구하고 혁신, 활용의 기회로 이용
 - 동시에, 현재 에피택시 웨이퍼 생산 수준의 나노제조 역량을 디바이스와 중규모 에피택시 생산이 가능하고 산업계의 접근성과 표준을 충족하는 제조시설로 고도화
- (실리콘 포토닉스) 사우스샘프턴 대학, 글래스고 대학 등 R&D 및 소량 제조의 現 리더십을 활용, 산업계 접근성 및 표준을 개선하는 조건으로 기존 개방형 시설 장비* 고도화 지원
 - * 산업계 요구 충족에 필요한 리소그래피 장비, 자동화 기술 및 기타 필요 장비 구매 등을 지원
- (다이아몬드) 양자기술에서 본격 상용화 이전 단계에 있는 소재로 현재 영국 내 여러 산·학 기관에 분산된 기존 개방형 프로토타입 및 파일럿 라인 시설을 확장하고 조정
 - Element Six社과 같은 주요 시설을 확장하고, Cardiff 및 Bristol大와 같은 파운드리 시설을 통합하여 영국의 합성 다이아몬드의 생산 역량을 강화

- (초전도체) 양자 컴퓨터, 통신, 센싱에 광범위하게 사용되는 소재로, 현재 웨이퍼 규모로 생산하는 첨단 나노제조 시설과 테스트 장비(예: 극저온, RF 등)를 업그레이드하여 양자 전용 PDK 개발 등 산업용 인프라로 전환을 모색

■ **패키징, 첨단 패키징 및 이종집적 통합 (Packaging, advanced packaging, and heterogeneous integration)**

- (현황) 최첨단 패키징 기술에 대한 상업적 역량은 부족하나 일부 이종집적 통합기술 분야에서 여러 대학·연구기관*들이 핵심 전문성을 보유하고 있고, 영국 내 펀딩기관들은 유관 사업*을 통해 기술개발을 지원
 - * (학연현황) Strathclyde大의 재료 및 소자 플랫폼용 마이크로 전사(micro-transfer) 프린팅 공정 기반 기술, Sheffield大 에피택시 시설의 이종집적 통합을 위한 산업 호환 시스템('ASMPT Amicra') 도입, Cornerstone 파운드리와 실리콘 포토닉스와 화합물 반도체 레이저 이종집적 통합 연구
 - ** (지원사업) EPSRC 지원사업의 'Hetero-print' 보조금은 £5.5M (한화 약 96억 원)을 학계 공동 이종집적 통합을 위한 전사 프린팅 기술 연구에 지원, Innovate UK는 양자기술 조립 컨소시엄에 자금 지원
- (권고사항) 양자기술 전용 이종집적 통합 기술의 발전을 위한 공동 연구개발 프로그램을 개발하고, 기존 인프라의 산업용 장비를 업그레이드하여 접근성과 표준을 개선
 - 산업계 파트너의 참여를 촉진하여 인프라 개발 초기부터 확장성, 제조 가능성 및 시장 요건에 맞춰 개발

(2) 시나리오② (선제적 투자로 특정 영역에서 선두 확보)

- 핵심부문에 선제적 투자로 글로벌 선두 확보를 목표, 시나리오①의 사전 구현을 전제
- 영국이 특정 영역에서 선두가 되기 위한 다양한 대안을 제시, 주로 새로운 인프라 시설을 구축하거나 상업적 R&D에 적합한 시설과 운영 방식 설계를 제안
 - 기존 개방형 인프라에 대한 산업계의 접근성을 제고하고, 설계, 나노제조 프로토타이핑, 패키징·고급 패키징 및 이종집적 통합 전반에 걸쳐 기술개발 역량을 지원하기 위한 최소 하나 이상의 새로운 인프라 시설 구축에 우선 투자
 - 특히, 시나리오②에서는 다양한 방안을 제시하고 있으며, 이러한 방안들 사이에 전략적 선택과 연계가 필요하며, 대안 선택시 특성화된 5개 주요 결정요인*을 고려

* ① (영향력) 양자기술 범위를 포괄하는 인프라 구축, ② (현재입지) 현재 영국 기반의 강점과 특성, ③ (기회) 인프라를 통해 양자기술의 상업적 스케일업 등 영국의 비전 실현, ④ (부문간 관련성) 인프라와 다른 핵심 분야 및 관련 전략과의 연계성, ⑤ (미조치 위험) 투자지원 조치가 없을 시 발생할 수 있는 부정적 영향

표 2-3 (시나리오®) 선제적인 투자로 특정 분야의 선두적 입지 확보에 대한 방안

■ 설계 (Design)

- 영국혁신청(Innovate UK)과 국가양자기술프로그램(NQTP, '14)은 산업계와 협력하여 영국 프로토타입 인프라와 함께 사용 가능한 양자기술 전용 PDK(Process Design Kit) 개발을 지원하는 프로그램 수립

■ 나노제조 프로토타이핑 (Nanofabrication prototyping)

화합물 반도체	<ul style="list-style-type: none"> 인화물, 비소, 질소 등 양자기술 구현에 필요한 소재에 중점을 둔 신규시설 구축에 투자
실리콘 포토닉스	<ul style="list-style-type: none"> 양자기술 활용 요건을 충족하고 산업계 도입을 촉진할 수 있는 개방형 실리콘 포토닉스 시설 개발
다이아몬드	<ul style="list-style-type: none"> 양자 장치용 합성 다이아몬드 제조 전용 개방형 시설 구축
초전도체	<ul style="list-style-type: none"> 산업용 맞춤형·개방형 초전도체 파운드리 구축

■ 패키징, 첨단 패키징 및 이종집적 통합
(Packaging, advanced packaging, and heterogeneous integration)

- 양자기술 전용 이종집적 통합기술 파일럿 라인 및 첨단 패키징을 위한 개방형 센터 구축

■ 설계 (Design)

- 전자설계자동화(EDA) 도구와 함께 기술 단계(예: 프로토타이핑 및 제조)에 맞는 양자기술 전용 PDK(Process Design Kits) 개발을 위한 상용 및 개방형 시설 구축 필요
 - 기존 인프라에 PDK를 연계하여 설계 프로토타입 제작 프로세스를 간소화하고 양자기술 제조 요건을 충족할 수 있으며, 나아가 풀 스택 프로세스(예: 장치 모델링, 레이아웃, 제조, 패키징)를 제공하기 위해 PDK를 EDA에 통합 추진
 - 양자기술 전용 PDK 개발에 특화된 새로운 개방형 프로토타이핑 시설을 구축하고, 양자기술 제조 요건과 산업계 및 국제 표준에 맞는 설계로 연구 프로토타입에서 상업적 생산 규모 및 대규모 제조 파운드리로의 전환을 촉진
- Innovate UK* 및 NQTP는 산업계와 협력하여 영국 프로토타이핑 인프라에서 사용할 수 있는 양자기술 전용 PDK 개발을 지원하는 프로그램 수립 필요

* 영국연구혁신청(UK Research and Innovation, UKRI)에서 기업 혁신 지원을 담당하는 혁신기관

■ 나노제조 프로토타이핑 (Nanofabrication prototyping)

- (화합물 반도체) 신규 시설 구축으로 프로토타입 제작에서 대량 에피택시 및 나노제조로 전환하고, 특히 양자기술 소재용* 시설과 화합물 반도체 단일 파운드리를 구축
 - * (예시) 인화인듐(InP), 갈륨비소(GaAs), 질화갈륨(GaN) 등 주요 화합물반도체 소재
- (실리콘 포토닉스) 양자기술 응용을 위한 산업적 도입을 가속할 수 있는 개방형 시설을 구축, 이를 통해 산업계는 새로운 소자를 위한 프로세스 개발 가능
 - 국립시설의 자동화를 통해 해외 제조시설에 대한 의존도를 낮추고 영국의 기술 독립성 강화
- (다이아몬드) 양자소자용 합성 다이아몬드의 생산과 연구를 전담하는 독립적인 시설 구축*
 - * 신형 기술 분야임을 고려하여 투자 위험을 줄이기 위해 국제적인 관심과 활동을 모니터링해야 하며 2~5년 후에 시나리오 실행 권고
 - 새로운 시설은 합성 다이아몬드 생산과 부가가치 기술(예: 에칭, 패터닝, 결합 엔지니어링)을 통합하여 상업적 생산의 허브 역할 수행
- (초전도체) 산업용으로 설계된 새로운 초전도 파운드리를 구축*하여 다양한 초전도 재료에 대한 산업계의 접근성 향상
 - * 새로운 시설 구축에는 대규모 자본 투자와 시간이 필요하며, 독립적인 자체 시설 구축을 위한 비용 추정치는 미국의 초전도 양자 재료 및 시스템(SQMS) 센터 사례에서 벤치마킹 가능 (한화 약 1,500억 원)

■ 패키징, 첨단 패키징 및 이종집적 통합 (Packaging, advanced packaging, and heterogeneous integration)

- 양자기술 응용을 위한 이종집적 통합 기술 전용 파일럿 라인을 갖춘 첨단 패키징 센터 신설
 - 새로운 시설은 영국의 산·학계 전문성을 통합하는 우수센터로, 양자기술을 위한 이종집적 통합기술뿐만 아니라 포토닉스 및 통신 분야 등 다학제간 문제에 대한 전문가를 결집하여 양자기술 관련 요구사항* 충족 필요
 - * 산업계의 접근성 우선시, 최종 사용자의 요구사항에 맞춤화, 공정 및 장치 표준화, 국제 파운드리 PDK 모델에 통합, 고급 패키징 솔루션과의 호환성 보장, 품질 보증 모니터링, 관리 프레임워크 구축(예: 액세스 일정, 비용분담, 지식재산권 관리) 등
 - 이를 통해 소량 프로토타입 테스트 역량을 확보하여 산업 파트너 간 협력을 촉진하고 연구-상용화 간의 격차와 제조 장치에 대한 글로벌 격차 해소 가능

❖ [권고사항 2] 산업계 요구사항을 충족하는 인프라 운영 및 기존 인프라 개선

- (현황) 지난 10년간 개방형 양자 인프라는 초기 기술 개발에 집중하였던 대학과 대학 컨소시엄에 의해 운영, 이러한 대학 인프라 의존은 상용화가 필요한 기업에 병목현상* 유발
 - * 높은 접근 비용, 까다로운 계약(라이선스 등) 조건, 낮은 프로세스 신뢰도, 장비 노후, 기밀 유지 우려 등
- 양자 산업계가 사용자로 참여하는 인프라는 산업계의 요구사항에 충족되어야 하며, 기존 인프라의 경우 업그레이드 프로그램은 업계 요구사항을 충족하는 데 초점
 - 산업계의 접근성 향상과 요구사항을 충족하는 국내외 모범사례*를 벤치마킹을 할 필요
 - * (영국 내) Fraunhofer CAP, NPL, (영국 외) 아일랜드 Tyndall, 네덜란드 PHIX, 핀란드 VTT 등
- 신규 인프라 구축시에는 ① 미래 로드맵과 지속 가능성을 고려한 임무 제시, ② 안정적인 펀딩 구조 마련, ③ 장기 근속자 및 투자 결정 거버넌스 구축, ④ 적절한 품질 보증 및 인증 프로세스, ⑤ 확장가능한 공간 확보 및 장비 업그레이드 로드맵 등을 고려할 것을 권고

표 2-4 • 산업계의 인프라 접근에 대한 기준(Criteria)

구분	주요 내용
합리적인 액세스 비용	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 특정 요구와 생산 규모에 맞는 경쟁력 있는 비용 구조 ▪ 투명한 비용 모델(하위 계층별 요금, 선택 가능 서비스 등) ▪ 다양한 기업에 접근성을 제공할 수 있는 유연한 요금제(Multi-tier 옵션 등) ▪ 소규모 기업 접근성 지원 (예: 스타트업을 위한 쿼텀 특화 프로그램 등)
시설·장비에 대한 산업계 접근성 우대조건	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 이용약관이 명확한 라이선스 계약 ▪ 관리 프로세스 간소화 및 다수 사용자를 고려한 관리체계 (예; 일정, 접근 우선 순위, 유지보수 책임, 산업계의 액세스 전용 톨 및 프로세스 등)
실험실 외부 환경에서 테스트 가능한 산업등급 프로세스를 만족하는 인프라	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인증, 감사 등 상용 표준과 규제와의 호환성 ▪ 지적 재산 및 기밀 정보 보호를 위한 보안 및 기밀 서비스 ▪ 최소한의 서비스 표준 및 표준 운영 절차를 통해 산업 표준과 사양을 충족하는 품질, 신뢰성, 안정성을 보장
숙련된 인력의 인프라 배치	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인프라 사용 시 고객 지원 ▪ 인프라 활용에 필요한 교육 세션 제공
영국 내 인프라의 전략적 배치	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 영국의 여러 지역에 전략적으로 분산 배치하고, 대학 내 관련 시설과 공동으로 배치하여 지식 교류를 촉진

❖ [권고사항 3] 산업계에 양자기술 환경탐색 지침 및 인프라 활용 조정 기능 제공

- ‘One-stop shop’ 역할을 하는 양자기술 조정 창구(QT coordination function)*를 마련, 산업계에 양자기술 환경탐색에 대한 지침 제공과 인프라 접근성을 조율 및 촉진
 - * (후보기관) KTN QT Innovation Network, NQTP, UK Quantum, Office of Quantum 등
- (주요 조정 기능) 물리적 인프라 액세스 간소화, 협업 활성화, 재원 및 인프라 로드맵 등을 통해 자금 및 성장 기회에 대한 통합된 관점과 다음과 같은 조정 기능 제공
 - 자금 및 인프라 로드맵을 공유 등을 통해서 기업의 펀딩기회, 인프라 탐색 지원과 자금조달 기회, 규제 준수, 지식재산권, 시장진입 전략 등에 대한 자문 및 지원 서비스
 - NQTP 양자기술 허브 등 양자기술 생태계 전반에서 인프라 조율 및 산업계 참여 촉진
 - 영국 및 전 세계 인프라 접근 통로 역할과 역내 인프라의 설계 및 운영 방식에 대한 조언을 제공하고, 특히 ‘권장사항 1’ 내 기술개발 단계별 제시된 전략 추진을 지원
 - 국제 파트너와 협력하여 양자기술 관련 IP 및 데이터 보안 이슈를 제기하는 등 국가 안보와 관련된 강력한 국제적 합의와 안전장치를 개발
 - 산학연관을 연결하는 커뮤니티 및 네트워크를 구축하여 양자기술 생태계 전반에서 지식교환 및 혁신적 협업을 활성화
 - 반도체, 포토닉스 등 서로 다른 전략 기술·부문에 동등한 조정 역할로 참여 유도

❖ [권고사항 4] 첨단제조 역량을 갖춘 타 산업으로부터 양자기술에 대한 투자 장려

- (현황) 영국은 경쟁력 있는 제조역량(재료, 광학, 계측, 나노제조시설 등)을 갖추고 있으나, 제조산업(자동화, 로봇공학, 디지털 제조 등)에서 양자기술 첨단제조 역량에 대한 투자는 미흡
- 영국 ‘첨단제조계획(Advanced manufacturing plan)*’은 양자기술 부문의 요구사항을 다루지 않고 있어, 지원사업 예산 일부를 양자기술 분야에 투입할 것을 권고
 - * '25년~, 5년간 전략적 제조부문에 £4.5B (한화 약 8조 원) 규모의 투자 계획
- 특히, 양자기술, 반도체, 포토닉스 등 분야에서 첨단제조 수요가 공통으로 충족될 수 있는 부문에 산업 보조금 지원을 장려
- 다른 전략 및 기술 분야 리더십 그룹과 양자기술 기업 간 긴밀한 협업프로젝트로 투자 효과를 극대화하고, 학술 연구자에게도 산업 시설 접근성을 제공하는 사업모델을 도입

[권고사항 5] 민간 협력 로드맵 기반의 양자기술 세부 투자 실행계획 제시

- (현황) 복원력 있는 양자 생태계를 구축하려면 명확한 전략적 방향, 일관된 장기 비전, 전체적인 동기화가 필요하여 이를 기반으로만 신뢰성 있는 투자가 가능
 - 그간 국가양자기술프로그램(14), 국가양자전략(23) 등을 통해 적시적인 전략 방향을 제시하였으나, 전략 목표를 구체화한 실행 조치와 우선순위 설정의 추가 과정 필요
- (권고사항) 영국 정부는 산·학계와 협력하여 상호 공감하는 세부 비전을 수립하여 정부의 전략적 목표와 우선순위를 명확하게 제시하고, 정부의 자금조달 계획과 이를 실행하기 위한 시기 및 구체적인 조달 방식을 명시한 로드맵 수립을 권고

그림 2-1 과학·기술을 통한 전략적 우위의 종류, 6대 원칙 및 선제조건

- (우선순위 방법론) 산업역량, 국가안보, 주권문제 등을 고려한 시스템적 접근이 가능하며, 영국왕립공학한림원은 과학기술을 통한 전략적 우위를 달성의 6대 원칙* 제시



- ① (장기계획) 장기적인 전략 방향, 예산, 제도 등 산업을 위한 안정적인 시스템 지원, ② (민첩성 및 속도) 기회 활용과 위협 대응 등을 통해 글로벌 경쟁력 확보, ③ (리더십 및 역량) 전략 실현을 위한 신뢰할 수 있고 유능한 리더십, ④ (연결성 및 네트워크) 공공연구 지원 네트워크 및 정부-기업 인터페이스 개선 등, ⑤ (일관성) 일관된 전략 및 정책, ⑥ (실행조치) 전략 목표 달성과 결과 도출 가속화를 위한 개입 조치

※ [출처] Strategic advantage through science and technology (영국왕립공학한림원, '23.4)

◆ [권고사항 6] 기술 파이프라인 확보, 맞춤형 표준 개발, 규제 등 정부의 조력자 역할

- (현황) 양자기술 기업의 가장 큰 우려는 숙련된 인력 수급 부족이며, 양자기술을 개발하고 상용화*에 필요한 기술이 부족한 상황
 - * 제조시설과 클린룸 운용·유지 기술, 기존 시스템에 양자기술을 통합하는 기술, HW/SW 개발 인프라 등
- (기술 파이프라인 구축) 기술격차 해소를 위해 박사급 핵심인력 육성 프로그램*을 운영 중이나, 산업계 수요 충족을 맞추려면 글로벌 인재 유치를 위한 환경 조성도 중요
 - * 박사 교육 NQTP 프로그램: 펠로우십 프로젝트, PhD 프로젝트 및 학생 지원 등
- (표준개발) 기술의 시장 수용과 채택에 있어 표준은 매우 중요, 영국 내외 이해관계자 간의 협업을 통해 새로운 표준개발이 요구되며 이를 위해 다음과 같은 접근 방식을 추진
 - 제조업자, 운영자, 최종 사용자를 표준개발 초기부터 참여시켜 모든 이해관계자 간의 협력적 접근 방식을 추진
 - 미국 국립표준기술연구소(NIST), 국제전기통신연합(IUT-T) 등 국제 파트너와 적극적인 협력을 통해 표준을 형성하고, 글로벌 시장진출을 모색
 - 독립적이고 신뢰할 수 있는 기술 인증기관을 설립하고, 이를 지원하는 세부 전략 수립
 - 영국의 강점을 갖고 경제사회에 영향을 극대화할 수 있는 기술 분야의 표준개발에 집중, 이를 통한 챔피언 기업 육성으로 표준개발을 주도하고 산업계 참여를 촉진
 - 영국 정부와 영국 특허청(IPO)은 혁신 친화적인 프레임워크를 개발, 개발자를 위한 IP 보호를 지원하고 국제협력 등 공동 개발을 촉진
- (규제) 잠재적인 기술 오용의 윤리적 문제, 불평등한 기술 접근성, 공급망의 지속 가능성 및 환경적 영향 등 이슈에 대한 선제적 대응으로 책임감 있고 윤리적인 혁신을 추진

03 결론 및 시사점

- 영국왕립공학한림원은 영국의 양자기술 산업화 촉진을 위해 향후 10년간 필요한 인프라 요건을 검토, 영국의 현재 입지 유지 또는 강화에 필요한 시의적절한 투자 방향을 제시
 - 2014년 국가양자기술프로그램(NQTP)을 시작으로 영국은 양자기술 R&D에서 선두 주자로서 연구 강점과 스타트업 생태계를 갖추고 있지만, 현재 인프라는 산업계의 요구사항을 충분히 충족하지 못하고 있는 상황
 - 향후 영국 정부의 양자기술 인프라 투자 결정 시 전략적 우선순위를 설정할 수 있도록 영국 인프라의 강·약점 등 현황 분석을 기반으로 시나리오별 투자지원 대안을 제시
- 영국 내 산업계 친화적 인프라를 확보하고 운영하기 위해서는 정부가 주도하는 투자지원 조치가 필요하며, 이에 인프라 투자 방향과 성공적인 운영에 대한 6개 권고사항 제안
 - 기존 인프라의 접근성 개선과 함께 상용화 맞춤 신규 인프라 구축에 대한 적극적인 투자로 산업계의 접근성 제고와 요구 수준에 맞는 인프라 고도화를 권고
 - 양자기술 인프라 운영에 있어서 필요한 신규 인프라 운영 기준, 인프라 활용 조정 기능, 타 첨단제조 산업과의 연계, 세부 투자 로드맵, 표준개발 및 규제 등을 포함하여 제안
- 한국은 정부 주도로 양자기술 플랫폼별 개방형 양자 인프라 구축*을 시작하는 단계로, 영국처럼 국내 인프라 현황 분석에 기반한 투자 로드맵 수립이 필요
 - * 양자정보연구지원센터('19~, 성균관대), 개방형 양자공정 인프라 구축('24~, KAIST, UNIST) 등
 - 양자기술 상용화에 필요한 산업계 경쟁력 확보를 위해서는 '설계-나노제조 프로토타이핑-패키징' 기술개발단계 전반에 상호 연계된 비전과 실행전략이 필요
 - 우리 역시 반도체, 제조업 등 주력산업의 강점을 기반으로 양자기술 개발과 산업화에 필요한 인프라 역량을 강화하고, 첨단 제조 역량과의 연계 기회를 종합적으로 검토



Royal Academy of Engineering. (2024). *Quantum Infrastructure Review - An independent review of the UK's quantum sector's infrastructure requirements for the next decade*

UK (2014). *National Quantum Technologies Programme*

Royal Academy of Engineering (2023). *Position Paper on Strategic advantage through science and technology*

※ 본 보고서는 과학기술정보통신부에서 추진하는 양자기술 국제협력 강화사업의 지원으로 작성되었습니다.