

2026-GT-SV-001

GT 미국 실리콘밸리 거점

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

미국 양자정보과학(QIS) 정책 및 동향 분석

차례



1. 서론
2. 미 양자기술 정책 및 연구개발 체계
 - 2.1 National Quantum Initiative Act of 2018(국가양자이니셔티브법)
 - 2.2 National Quantum Initiative 프로그램과 범정부 거버넌스 체계
 - 2.3 DOE 국립 QIS 연구센터를 중심으로 한 연구개발 집행 체계
3. 핵심 기술 동향
 - 3.1 QIS 공통 기반 핵심 기술 동향
 - 3.2 양자컴퓨팅 핵심 기술 동향
 - 3.3 양자네트워크 핵심 기술 동향
 - 3.4 양자센싱·계측 핵심 기술 동향
 - 3.5 미국 내 관련 기업 기술 동향
4. 산업화 및 안보 관점에서의 활용 쟁점
 - 4.1 양자기술 산업화의 현실과 구조적 제약
 - 4.2 안보 및 경제안보 관점에서의 전략적 의미
5. 결론
6. 참고문헌

요약

- ➡ 양자컴퓨팅은 QIS의 핵심 구성 요소 중 하나로, 양자역학의 물리 법칙을 계산과 정보처리에 직접 적용해 기존 컴퓨팅 패러다임의 구조적 한계를 확장하려는 기술
 - ▶ 정보 표현 단위가 고전 비트가 아닌 큐비트라는 점에서 출발점이 다르며, 관측 이전 여러 상태가 동시에 성립하는 중첩 특성을 활용함으로써 동일한 물리 자원에서 표현 가능한 정보 공간이 크게 확장되는 구조
 - ▶ 이론적으로 N비트 고전 컴퓨터는 최대 N개의 연산을 병렬적으로 처리할 수 있는 반면, 양자컴퓨터는 2^N 에 해당하는 상태 공간을 동시에 다룰 수 있어 정보처리 방식의 질적 차이가 발생
- ➡ 범용 오류정정 양자컴퓨터의 실현 가능성과 기술적 타당성, 그리고 시간 프레임에 대해서는 단일 성과 지표에 근거한 판단이 아니라 다층적 기술 요소를 분리해 평가해야 한다는 접근이 강조
 - ▶ 범용 오류정정 양자컴퓨터는 오류 발생 가능성이 높은 다수의 물리 큐비트를 오류정정 기법을 통해 안정적인 논리 큐비트로 구성하고, 장시간 복잡한 계산을 신뢰성 있게 수행할 수 있는 시스템 의미
 - ▶ 이러한 시스템의 실현은 큐비트 수 증기뿐 아니라, 하드웨어 오류율 제어, 제어 정확도, 확장성, 소프트웨어 스택, 오류정정 코드, 알고리즘의 실질적 계산 우위 입증 등 복수 요소의 성숙을 동시에 요구
 - ▶ 이에 따라 기술 실현 시점과 정책적 기대는 하드웨어, 소프트웨어, 알고리즘별 벤치마크를 독립적으로 설정하고 단계별로 검증하는 방식으로 평가되어야 한다는 관점이 정책 및 학술 문서에서 반복적으로 제시
- ➡ 국가양자이니셔티브법은 프로그램 추진 체계를 표준화된 조문 구조로 제시하며, 대통령과 연방정부의 역할을 전제로 범정부 거버넌스 체계를 명문화
 - ▶ 법 조문상 핵심 구성 요소로 국가양자이니셔티브 프로그램, 국가양자조정국(NQCO, National Quantum Coordination Office), 국가과학기술위원회(NSTC, National Science and Technology Council) 산하 양자정보과학 소위원회(SCQIS, Subcommittee on Quantum Information Science), 국가양자이니셔티브 자문위원회(NQIAC, National Quantum Initiative Advisory Committee) 등이 포함
 - ▶ 법의 목적 조항은 양자 연구개발 가속을 경제 경쟁력과 국가안보 강화와 직접 연결하는 문장 구조를 취함
 - ▶ 법령과 후속 정책 문서에서는 양자 정책이 과학기술 정책과 안보 정책의 접점에서 운영되며, 투자 추적, 위협 평가, 수출통제 연계 등 경제안보 도구와의 결합이 제도적으로 포함
 - ▶ 경제 및 안보 관련 소위원회는 연방정부의 양자 분야 투자 추적, 경제안보 영향 평가, 해외 위협 및 방첩 리스크 분석, 수출통제 관련 정책 권고 등을 수행하는 구조로 규정
 - ▶ 이러한 체계는 기초연구 촉진과 기술 보호를 동시에 다루는 이중 목적의 정책 설계를 가능하게 하는 제도적 장치

➡ 결론 및 전략적 시사점

- ▶ 종합적으로 볼 때, 미국의 양자기술 정책은 기술 개발 정책을 넘어 과학기술, 산업, 안보, 경제안보를 연결하는 장기 국가 전략의 일부
- ▶ 양자기술은 단기적 경쟁 결과보다 중장기적 준비 수준의 격차가 국가 간 전략적 차이를 만들어낼 가능성이 큼
- ▶ 양자기술 정책은 특정 기술 분야에 대한 투자 판단을 넘어, 국가 연구개발 체계 전반의 설계 방향과 직결된 사안

01 서론

- ➔ 양자정보과학(Quantum Information Science, QIS)은 양자역학의 물리 법칙을 정보의 저장, 전송, 조작, 계산, 측정 전반에 활용하는 통합적 연구 분야로 정의
 - ▶ 정보처리의 기본 단위를 고전 비트가 아닌 큐비트로 사용하며, 중첩, 얽힘, 측정과 같은 양자역학적 특성을 정보처리의 핵심 자원으로 활용한다는 점에서 기존 정보기술과 근본적으로 구별
 - ▶ 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자네트워크, 양자센싱, 양자계측은 각각 상이한 응용 영역을 가지지만, 동일한 양자역학적 과학적 기반 위에서 상호 연계되는 기술 영역으로 분류
 - ▶ 정책 문서에서 정의되는 QIS 개념은 단일 기술 개발 과제가 아니라, 장기적 과학기술 인프라 구축과 국가 연구개발 역량 축적을 전제로 하는 포괄적 연구 영역으로 규정되는 경향
- ➔ 양자컴퓨팅은 QIS의 핵심 구성 요소 중 하나로, 양자역학의 물리 법칙을 계산과 정보처리에 직접 적용해 기존 컴퓨팅 패러다임의 구조적 한계를 확장하려는 기술
 - ▶ 정보 표현 단위가 고전 비트가 아닌 큐비트라는 점에서 출발점이 다르며, 관측 이전 여러 상태가 동시에 성립하는 중첩 특성을 활용함으로써 동일한 물리 자원에서 표현 가능한 정보 공간이 크게 확장되는 구조
 - ▶ 이론적으로 N비트 고전 컴퓨터는 최대 N개의 연산을 병렬적으로 처리할 수 있는 반면, 양자컴퓨터는 2^N 에 해당하는 상태 공간을 동시에 다룰 수 있어 정보 처리 방식의 질적 차이가 발생

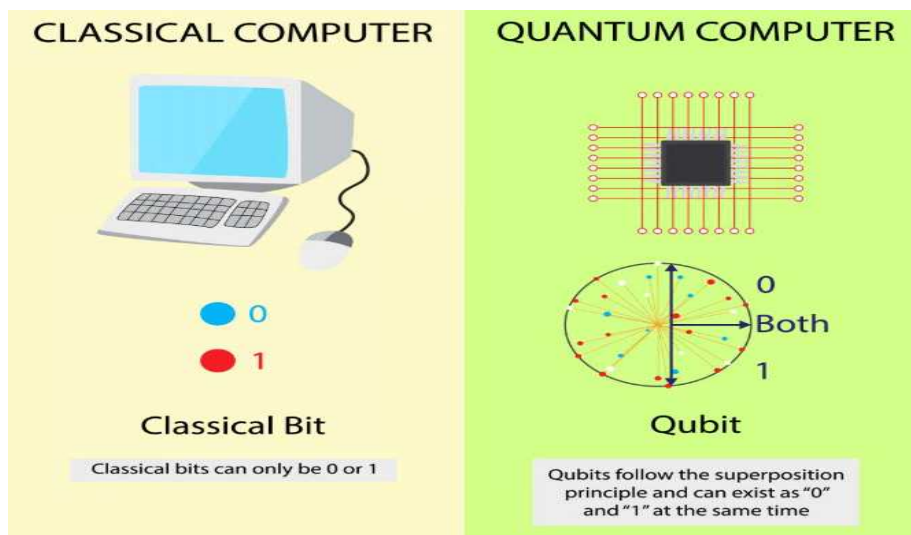


그림 1 기존 컴퓨터와 양자컴퓨터 정보 표현단위 차이

- ▶ 다수 큐비트 간 얽힘은 개별 시스템을 독립적으로 기술하기 어렵게 만들며, 이러한 상호 연결성이 양자 연산 핵심 자원
- ➔ 다만 양자컴퓨팅의 기대효과는 모든 계산 문제에 대해 범용적인 속도 향상을 제공하는 데 있지 않으며, 특정한 수학적 구조와 계산 특성을 가진 문제군에서 계산 효율을 개선할 수 있다는 가능성에 기반
 - ▶ 양자컴퓨팅은 고전 컴퓨팅을 대체하는 범용 기술이 아니라, 고전 컴퓨팅에서 계산 복잡도가 급격히 증가하는 영역을 보완하는 특화 계산 수단
 - ▶ 이에 양자컴퓨팅의 성과 평가는 전체 연산 성능이나 단일 벤치마크 수치가 아니라, 문제 유형별 적합성과 계산 구조의 일치 여부를 기준으로 이루어질 필요성 존재
- ➔ 양자컴퓨팅 개념이 제시된 배경에는 분자 수준에서의 전자 움직임과 원자 간 상호작용처럼 본질적으로 양자역학 법칙을 따르는 현상을 정확히 모사하기 위한 계산 수요가 자리함
 - ▶ 화학 반응, 에너지 준위 변화, 촉매 작용, 소재 특성 예측과 같은 문제는 전자 간 상호작용을 정밀하게 계산해야 하며, 고전 컴퓨터에서는 분자 규모가 증가할수록 계산량이 기하급수적으로 증가하는 한계 존재
 - ▶ 이러한 계산 복잡도 문제를 해결하기 위한 대안으로 계산 장치 자체가 양자역학적 원리를 따르는 양자컴퓨팅 개념이 이론적으로 제시되어 왔으며, 이는 신약 개발, 소재 과학, 에너지 연구 등 다양한 응용 분야와 직접적으로 연관
- ➔ 범용 오류정정 양자컴퓨터의 실현 가능성과 기술적 타당성, 그리고 시간 프레임에 대해서는 단일 성과 지표에 근거한 판단이 아니라 다층적 기술 요소를 분리해 평가해야 한다는 접근이 강조
 - ▶ 범용 오류정정 양자컴퓨터는 오류 발생 가능성이 높은 다수의 물리 큐비트를 오류정정 기법을 통해 안정적인 논리 큐비트로 구성하고, 장시간 복잡한 계산을 신뢰성 있게 수행할 수 있는 시스템 의미
 - ▶ 이러한 시스템의 실현은 큐비트 수 증기뿐 아니라, 하드웨어 오류율 제어, 제어 정확도, 확장성, 소프트웨어 스택, 오류정정 코드, 알고리즘의 실질적 계산 우위 입증 등 복수 요소의 성숙을 동시 요구
 - ▶ 이에 따라 기술 실현 시점과 정책적 기대는 하드웨어, 소프트웨어, 알고리즘별 벤치마크를 독립적으로 설정하고 단계별로 검증하는 방식으로 평가되어야 한다는 관점이 정책 및 학술 문서에서 반복적으로 제시
- ➔ 미국은 양자정보과학과 양자컴퓨팅을 경제 성장과 국가안보 차원의 핵심 전략 기술로 인식하고, 이를 연방정부 공동 프로그램으로 조직화해 법률 기반으로 제도화 실현
 - ▶ 국가양자이니셔티브는 연방정부 전반의 양자 연구개발 활동을 연결하는 관문 역할을 수행하는 프로그램으로 소개되며, 국가 차원의 기술 리더십 유지와 장기적 기술 응용 촉진을 목표로 명시
 - ▶ quantum.gov는 국가양자이니셔티브의 목적을 양자 연구개발 가속과 경제 및 국가안보 강화를 위한 연방 공동 프로그램으로 지정
 - ▶ 국가 전략 문서와 연차보고서 등 정책 산출물이 동일 포털에서 체계적으로 관리되는 구조를 통해 정책 연속성과 투명성이 확보

➡ 국가양자이니셔티브법은 프로그램 추진 체계를 표준화된 조문 구조로 제시하며, 대통령과 연방정부의 역할을 전제로 범정부 거버넌스 체계를 명문화

- ▶ 법 조문상 핵심 구성 요소로 국가양자이니셔티브 프로그램, 국가양자조정국(NQCO, National Quantum Coordination Office), 국가과학기술위원회(NSTC, National Science and Technology Council) 산하 양자정보과학 소위원회(SCQIS, Subcommittee on Quantum Information Science), 국가양자이니셔티브 자문위원회(NQIAC, National Quantum Initiative Advisory Committee) 등이 포함
- ▶ 법의 목적 조항은 양자 연구개발 가속을 경제 경쟁력과 국가안보 강화와 직접 연결하는 문장 구조를 취함
- ▶ 법령과 후속 정책 문서에서는 양자 정책이 과학기술 정책과 안보 정책의 접점에서 운영되며, 투자 추적, 위협 평가, 수출통제 연계 등 경제안보 도구와의 결합이 제도적으로 포함
- ▶ 경제 및 안보 관련 소위원회는 연방정부의 양자 분야 투자 추적, 경제안보 영향 평가, 해외 위협 및 방첩 리스크 분석, 수출통제 관련 정책 권고 등을 수행하는 구조로 규정
- ▶ 이러한 체계는 기초연구 촉진과 기술 보호를 동시에 다루는 이중 목적의 정책 설계를 가능하게 하는 제도적 장치

➡ 미국의 양자기술 연구개발은 개별 부처 단위의 분절된 과제가 아니라, 국립연구소, 대학, 산업을 하나의 생태계로 묶는 인프라형 연구개발 모델로 전개

- ▶ DOE Office of Science는 QIS의 정의와 함께 DOE 미션 기반 응용을 가속하기 위해 단독 연구자, 소규모 팀, 대형 다학제 센터를 병행 지원하는 다중 모달 방식의 연구개발 체계를 운용
- ▶ DOE 사용자시설, 테스트베드, 파운드리, 안정동위원소 등 장기 개발형 연구 인프라 투자는 QIS 생태계의 핵심 기반으로 제시
- ▶ DOE 국립 QIS 연구센터는 5개 센터 체계로 구성되며, 각 센터가 상이한 기술 목표와 적용 영역을 전면에 내세우는 구조
- ▶ 이러한 센터 기반 구조는 단기적 성능 경쟁뿐 아니라 인력 양성, 장비·공정 축적, 표준 및 데이터 기반 구축과 같은 장기 요소를 병렬로 축적하는 방식

➡ 본 보고서는 미국의 양자기술 동향을 기술 성과의 단순 나열이 아니라, 제도와 정책 구조, 기술 성숙도, 산업 적용 가능성을 연결하는 방식으로 전개

- ➔ 미국의 양자기술 정책 및 연구개발 체계는 단일 부처 또는 개별 연구 프로그램 중심이 아닌, 법률에 근거한 범정부 차원의 통합 구조로 설계
 - ▶ 양자정보과학과 양자컴퓨팅을 국가 전략 기술로 규정하고, 장기적 연구개발 인프라 구축을 위한 제도적 틀 우선적 마련
 - ▶ 정책 수립, 조정, 자문, 연구개발 집행 기능이 단계적으로 분리되어 설계되며, 각 기능이 상호 연계되는 구조
- ➔ 이러한 체계는 법률을 통해 정책의 기본 방향과 추진 원칙을 규정하고, 범정부 조정 기구를 통해 부처 간 역할을 정렬하며, 국립연구소와 연구센터를 통해 실제 연구개발을 집행하는 방식으로 구성
 - ▶ 법적 근거를 중심으로 정책의 연속성과 안정성 확보
 - ▶ 범정부 거버넌스 체계를 통해 중복 투자와 정책 분절 최소화
 - ▶ 공공 연구 인프라를 기반으로 장기적 기술 축적과 인력 양성 병행
- ➔ 미국의 양자기술 연구개발 체계는 단기 성과 창출보다는 기술 성숙도 축적과 생태계 구축을 전제로 한 구조적 접근이 특징
 - ▶ 기초연구, 응용연구, 인력 양성, 산업 연계를 하나의 정책 흐름으로 연결
 - ▶ 기술 불확실성이 큰 분야라는 점을 전제로 단계적 연구개발 경로 설정
 - ▶ 정책 기획과 연구 집행 간의 역할 분담을 통해 장기 전략의 유연성과 지속성 동시 확보
- ➔ 본 장에서는 이러한 미국 양자기술 정책 및 연구개발 체계를 법적 기반, 범정부 거버넌스, 연구개발 집행 구조의 세 축으로 구분해 설명

2.1 National Quantum Initiative Act of 2018

- ➔ National Quantum Initiative Act of 2018(국가양자이니셔티브법)은 미국의 양자정보과학 및 양자컴퓨팅 정책을 제도적으로 확립한 연방법으로, 국가 차원의 양자기술 추진 체계를 처음으로 법률에 명시한 사례
 - 해당 법은 양자정보과학과 양자컴퓨팅을 개별 연구 과제가 아닌 국가 전략 기술로 규정하고, 연방정부 전반의 연구개발 활동을 조정된 프로그램으로 추진하기 위한 법적 근거 제공
 - 정책 추진의 연속성과 안정성을 확보하기 위해, 행정부 교체와 무관하게 적용되는 제도적 틀로 설계
- ➔ 동 법은 115대 미국 의회에서 하원 법안 H.R. 6227로 발의되어, 입법 절차를 거쳐 2018년 12월 21일 Public Law 115-368으로 제정
 - 하원 과학우주기술위원회 소관 법안으로 발의되어, 위원회 심사와 본회의 절차 거침
 - 상원에서 만장일치 동의 통과된 후, 대통령 서명을 통해 법률로 확정
 - 입법 과정에서 양자기술의 과학기술적 중요성과 함께, 경제 경쟁력 및 국가안보적 함의 반복적 언급
- ➔ National Quantum Initiative Act는 단일 연구 사업의 신설을 목적으로 하는 법률이 아니라, 연방정부 차원의 양자정보과학 연구개발을 하나의 국가 프로그램으로 조직하기 위한 기본 법률로 설계
 - 법률은 National Quantum Initiative 프로그램의 목적과 추진 원칙 규정 후, 이를 실행하기 위한 거버넌스 구조와 기관별 역할을 단계적 명시
 - 정책 기획, 범정부 조정, 연구개발 집행, 외부 자문 및 성과 평가 기능을 제도적으로 분리해 규정하는 구조 취함
- ➔ 법률은 양자정보과학의 범위를 컴퓨팅에 한정하지 않고, 정보의 저장, 전송, 조작, 계산, 측정 전반을 포괄하는 연구 영역으로 정의
 - 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자네트워크, 양자센싱, 양자계측 동일한 정책 대상 범주에 포함
 - 이를 통해 개별 기술 단위가 아닌, 통합적 QIS 연구개발 체계 구축을 법률 차원 전제
- ➔ National Quantum Initiative Act는 대통령이 National Quantum Initiative 프로그램을 통해, 연방정부 전반의 양자정보과학 연구개발 활동을 조정하고 추진하도록 규정
 - 대통령은 범정부 조정 체계를 통해, 부처 간 협력과 정책 정렬을 유도하는 역할 수행
 - 이를 통해 단기 행정 과제가 아닌, 장기 국가 전략으로서의 정책 연속성을 확보
- ➔ 법률은 National Quantum Initiative 프로그램의 운영을 지원하기 위한 전담 조정 기구와 자문 체계 설치 근거 포함

- ▶ 국가양자조정국(NQCO)을 범정부 조정 기구로 규정하고, 부처 간 연구개발 활동의 정합성 확보를 주요 임무 설정
 - ▶ 국가과학기술위원회(NSTC) 산하 양자정보과학 소위원회(SCQIS)를 정책 협의체로 명시
 - ▶ 비정부 전문가로 구성된 국가양자이니셔티브 자문위원회(NQIAC)를 통해, 정책 성과 평가와 개선 권고 기능 수행
- ➔ 법률은 주요 연방 부처별 역할과 책임을 비교적 구체적으로 구분 명시
- ▶ 상무부 산하 국립표준기술연구소(NIST)는 양자 측정, 표준, 계측, 산업 연계 활동 담당
 - ▶ 국립과학재단(NSF)은 양자정보과학 기초연구, 교육, 인력 양성, 다학제 연구센터 운영 중심 임무로 설정
 - ▶ 에너지부(DOE)는 국립연구소를 기반으로 한 대규모 연구개발과, 국립 QIS 연구센터 운영을 담당하는 핵심 집행 기관
- ➔ National Quantum Initiative Act는 양자기술의 단기적 상용화를 직접적 법적 목표로 설정하지 않음
- ▶ 기술 불확실성과 성숙도 한계를 전제로, 단계적 연구개발 접근 채택
 - ▶ 기초연구, 응용 가능성 탐색, 인력 양성, 연구 인프라 구축을 병행하는 장기 전략을 법률 차원에서 정당화
- ➔ 또한 법률은 양자정보과학 연구개발을 경제 경쟁력 및 국가안보와 연계된 전략 영역으로 인식
- ▶ 과학기술 정책과 안보 정책의 접점에서, 양자 정책이 운영됨을 전제
 - ▶ 이후 정책 문서에서 투자 추적, 기술 보호, 수출통제 등 경제안보 도구와 연계될 수 있는 제도적 기반 제공
- ➔ 이러한 법적 구조는 미국의 양자기술 정책이 단기 성과 중심의 기술 개발이 아니라, 장기적 연구개발 인프라와 생태계 구축을 중심으로 설계되었음을 시사
- ▶ National Quantum Initiative 프로그램, 범정부 거버넌스 체계, DOE 국립 QIS 연구센터 운영의 제도적 출발점
 - ▶ 연차보고서, 전략 문서, 예산 편성 과정에서 일관된 정책 프레임으로 활용

2.1 National Quantum Initiative 프로그램과 범정부 거버넌스 체계

- ➔ National Quantum Initiative 프로그램은 National Quantum Initiative Act of 2018에 근거해 운영되는 범정부 정책 프로그램으로, 연방정부 전반의 양자정보과학 연구개발 활동을 하나의 전략적 틀 안에서 조정하는 역할을 수행
 - 법률에 의해 설정된 정책 목표와 추진 원칙을 실제 정책 수단, 예산, 연구개발 활동으로 전환하는 실행 프레임워크
 - 단일 부처 주도의 개별 사업이 아니라, 다수 연방 부처와 기관이 공동으로 참여하는 구조를 전제로 설계
- ➔ National Quantum Initiative 프로그램의 안정적 운영을 위해, 정책 조정, 자문, 협의 기능을 담당하는 다층적 범정부 거버넌스 체계가 법률에 따라 구성
 - 정책 기획, 조정, 연구개발 집행, 평가, 자문 기능을 분리하되, 상호 연계가 가능하도록 설계
 - 부처 간 중복 투자 방지, 정책 정합성 확보, 장기 전략 유지가 주요 목적
- ➔ 국가양자조정국(National Quantum Coordination Office, NQCO)은 National Quantum Initiative 프로그램의 중앙 조정 기구로 기능함
 - 연방정부 전반의 양자정보과학 연구개발 활동을 종합적으로 조율하는 역할
 - 각 부처와 기관의 연구개발 계획, 예산, 활동을 파악하고, 범정부 전략과의 정합성 점검
 - National Quantum Initiative 관련 연차보고서, 전략 문서, 로드맵의 작성 및 관리 기능 수행
 - NQCO는 연구개발 과제나 예산을 직접 집행하지 않는 조정 전담 조직으로 설계
 - 부처 간 협력 촉진, 정보 공유, 정책 정렬을 통해 프로그램의 일관성과 연속성 유지
- ➔ 국가과학기술위원회(National Science and Technology Council, NSTC) 산하 양자정보과학 소위원회(Subcommittee on Quantum Information Science, SCQIS)는 범정부 정책 협의체
 - 과학기술 정책 전반과 양자정보과학 정책 간의 연계 담당
 - 연구개발 투자 우선순위 설정과 장기 전략 논의를 위한 공식 협의 채널 역할
 - 경제안보, 기술 외교, 인력 정책 등 인접 정책 영역과의 연계 논의
 - SCQIS는 개별 부처의 법적 권한을 대체하지 않으며, 정책 합의 형성과 조율을 지원
 - 범정부 차원의 전략 정렬과 정책 일관성 확보에 중점
- ➔ 국가양자이니셔티브 자문위원회(National Quantum Initiative Advisory Committee, NQIAC)는 비정부 전문가 중심의 외부 자문 기구
 - 학계, 산업계, 국립연구소 등 다양한 배경의 전문가 참여

- ▶ National Quantum Initiative 프로그램의 추진 현황과 성과를 평가 및 개선 방향 권고
- ▶ NQIAC는 정부 내부 조직과 분리된 독립적 자문 기구
- ▶ 기술 성숙도, 산업 연계, 인력 양성, 국제 경쟁 환경 등에 대한 외부 관점을 제공
- ▶ 정책의 과학기술적 타당성과 현실성을 점검하는 역할

2.3 DOE 국립 QIS 연구센터를 중심으로 한 연구개발 집행 체계

- ➡ 미국 에너지부(U.S. Department of Energy, DOE)는 National Quantum Initiative Act of 2018에 근거 양자정보과학 연구개발 핵심 집행 기관
 - ▶ DOE는 국립연구소 기반 대규모 장기 연구개발 인프라를 운영하는 부처로서, QIS 분야에서도 기초연구와 응용 가능성 탐색을 병행하는 집행 구조
 - ▶ 정책 기획과 조정 기능은 범정부 거버넌스 체계에서 수행하고, DOE는 연구개발의 실제 집행과 인프라 구축을 담당하는 역할 분담 구조
- ➡ DOE Office of Science는 양자정보과학을 물리, 화학, 재료과학, 계산과학 등 기존 과학기술 분야와 연계되는 핵심 연구 영역으로 정의
 - ▶ QIS를 단일 기술 개발 과제가 아니라, 다학제 과학기술 인프라로 인식하는 접근
 - ▶ 단독 연구자, 소규모 연구팀, 대형 다학제 연구센터, 사용자시설 활용 등 다양한 형태의 연구 지원 수단을 병렬적으로 운용하는 집행 체계 구축
- ➡ DOE 국립 QIS 연구센터 체계는 단기 기술 성과 도출보다는 중장기 연구개발 인프라 구축과 기술 성숙도 축적을 주요 목표
 - ▶ 하드웨어, 소자, 알고리즘, 시스템 통합, 응용 검증, 인력 양성 등 복수 요소를 동시에 다루는 병렬적 연구 포트폴리오
 - ▶ 단일 연구기관 중심이 아닌 다수 국립연구소, 대학, 산업체가 참여하는 컨소시엄 구조를 기본 운영 모델
- ➡ DOE는 National Quantum Initiative 프로그램 하에서 5개의 국립 양자정보과학 연구센터 지정 운영
 - ▶ 각 센터는 상이한 기술 축과 응용 목표를 전면에 내세우되, 상호 보완적인 연구 범위를 통해 전체 QIS 생태계 구성
 - ▶ 연구 범위에는 양자컴퓨팅뿐 아니라, 양자통신, 양자네트워크, 분산 양자 시스템 관련 연구가 포함
- ➡ Q-NEXT(아르곤 국립연구소 주관)는 양자정보의 정밀 제어와 분배 핵심 목표
 - ▶ 양자 센서 네트워크, 안전 통신, 확장형 소자용 소재 개발을 주요 연구 축으로 제시

▶ 테스트베드 구축과 인력 양성을 병행하는 구조를 포함

➔ Quantum Science Center(오크리지 국립연구소 주관)는 하이브리드 양자 고성능 컴퓨팅 생태계 구축 목표

- 양자컴퓨팅과 고성능 컴퓨팅의 결합 구조를 중심으로, 확장형 오류 복원 기술 핵심 연구 과제

➔ Quantum Systems Accelerator(로렌스 버클리 국립연구소 주관)는 알고리즘, 디바이스, 공학 솔루션의 공동설계를 통해 과학 응용에서의 검증 가능한 양자 우위 달성을 목표

- 소자 설계와 알고리즘 개발을 분리하지 않고, 통합적으로 최적화하는 공동설계 개념을 중심으로 접근

➔ Superconducting Quantum Materials and Systems Center(페르미 국립연구소 주관)는 초전도 기반 양자소자 연구를 핵심 축으로 설정함

- ▶ 2차원 및 3차원 초전도 소자에서 디코히런스 메커니즘의 이해와 제거 주요 연구 과제
- ▶ 파운드리, 테스트베드, 공용 장비 구축 등 가시적 연구 인프라 산출 포함

➔ Co-design Center for Quantum Advantage(브룩헤이븐 국립연구소 주관)는 양자 하드웨어와 소프트웨어의 통합 설계 담당

- 계산 우위 달성을 위한 하드웨어, 소프트웨어 공동 최적화 접근이 중심 개념

3.1 QIS 공통 기반 핵심 기술 동향

➔ 양자정보과학(QIS)은 양자컴퓨팅, 양자네트워크, 양자센싱, 양자계측을 포괄하는 상위 개념으로, 공통의 물리 법칙과 공학적 구현 기반을 공유하는 연구 영역

➤ QIS는 정보의 저장, 전송, 조작, 계산, 측정 과정에서 양자역학적 특성을 정보처리 자원으로 사용하는 분야

- 중첩은 하나의 물리 시스템이 여러 상태를 동시에 가질 수 있게 하며, 얽힘은 멀리 떨어진 두 시스템 사이의 상관관계를 매우 강하게 만들어 고전적 방식으로 재현하기 어려운 정보 처리 구조 형성
- 간섭은 계산이나 통신 과정에서 유리한 경로는 강화하고 불리한 경로는 상쇄하는 방식으로 결과를 유도하는데 활용되며, 이 때문에 QIS 기술은 단순히 빠른 계산이 아니라 확률 진폭의 정교한 제어 문제
- 측정은 고전 시스템처럼 단순히 값을 읽는 행위가 아니라 상태를 변화시키는 과정이므로, QIS에서는 원하는 정보를 얻되 시스템을 과도하게 교란하지 않도록 설계하는 것이 공통의 핵심 과제

➔ QIS 공통 기반의 출발점은 양자 상태를 원하는 형태로 만들고, 필요한 시간 동안 유지하며, 원하는 방식으로 읽어내는 전체 과정의 공학적 실현

➤ 양자 상태 생성과 초기화 기술은 모든 QIS 응용의 품질을 좌우하는 시작점

- 계산, 통신, 센싱 등 응용 분야와 무관하게 모든 양자 시스템은 정의된 기준 상태에서 시작되며, 초기화가 불완전하면 이후 제어가 아무리 정교해도 결과의 신뢰성이 떨어짐
- 초기화는 단순히 0 상태로 맞추는 문제가 아니라, 다중 큐비트의 초기 상관관계, 환경 잡음이 초기 상태에 남기는 흔적을 함께 관리해야 하는 문제

➤ 양자 상태 제어는 양자 시스템을 외부 신호로 구동해 원하는 연산, 전송, 측정 과정을 수행하게 만드는 핵심 기술

- 초전도 플랫폼에서는 마이크로파 펄스, 이온과 원자 플랫폼에서는 레이저, 광자 플랫폼에서는 광학 소자와 간섭계가 대표적 제어 수단으로 사용되며, 제어 파형의 미세한 왜곡이 오류로 직결되기 때문에 제어 공학의 비중이 매우 큼
- 제어는 단순히 정확도 문제를 넘어, 시스템 규모가 커질수록 제어 채널 수가 증가하고, 채널 간 간섭과 교차결합이 발생해 확장성의 병목으로 작용할 수 있어, 제어 아키텍처 자체가 QIS 공통 기반의 핵심 주제

➔ 환경 잡음과 디코히런스는 QIS 전 분야에서 공통적으로 성능 한계를 결정하는 구조적 제약

- 양자 시스템은 외부 환경과의 미세한 상호작용에도 상태가 쉽게 흐트러지며, 이 현상이 계산, 통신, 센싱 모두에서 품질 저하로 나타남
- 디코히런스는 시간이 지남에 따라 중첩과 얽힘이 약해지는 현상으로 큐비트가 많아질수록 취약성이

누적되어 시스템 전체 신뢰도가 급격히 떨어짐

- 잡음의 원인은 열 잡음, 전자기 간섭, 재료 결함, 표면 결함, 제어 오차, 측정 오차 등으로 다양하며, 특정 플랫폼에서는 저온 환경 요구, 진공 요구, 차폐 구조 요구로 이어져 연구 인프라와 운영 비용의 주요 요인
- 따라서 QIS 공통 기반에서는 단순히 큐비트를 늘리는 것보다, 코히런스 시간, 제어 정확도, 측정 정확도, 안정적 운영 조건을 함께 개선하는 경로가 현실적인 기술 진화 방식

➡ QIS 공통 기반의 하드웨어 층은 큐비트 또는 양자 상태를 구현하는 물리 플랫폼 전반을 포함하며, 플랫폼 간 비교는 단일 성능 지표가 아니라 구현 제약과 시스템 구조의 차이까지 포함

- ▶ 초전도 회로, 이온 트랩, 중성 원자, 광자, 스핀 기반 시스템 등이 대표적 플랫폼으로 병렬적으로 연구
 - 초전도 기반은 반도체 공정과 유사한 제작 생태계를 활용할 수 있어 집적과 제조 측면에서 강점을 가지지만, 초저온 유지와 재료 결함 관리가 성능과 비용을 좌우하는 요소
 - 이온 트랩은 긴 코히런스 시간과 높은 연산 정확도를 강점으로 가지나, 장치 크기, 광학 제어 복잡성, 시스템 확장 시의 공학적 난제가 중요한 연구 과제
 - 중성 원자 플랫폼은 대규모 배열 구성 가능성이 강조되며, 레이저 및 광학 제어 기반의 집단적 연산 구조가 발전하고 있으나, 오류 모델과 제어 안정성에서 해결 과제 필요
 - 광자 기반은 상온 또는 상대적으로 완화된 환경에서 동작 가능성이 논의되고, 양자통신과 네트워크에 자연스럽게 연결되나, 광원, 검출기, 손실, 간섭 안정성, 집적 광학 구현이 성능 상한을 결정하는 요인
- ▶ 특정 플랫폼이 모든 응용에 보편적으로 우월하다는 전제보다는, 용도별 최적 플랫폼과 하이브리드 결합 가능성을 탐색하는 방향이 정책 및 연구 문서에서 강조
 - 예를 들어 계산 장치에서의 강점과, 네트워크 전송에서의 강점이 동일 플랫폼에 동시에 존재하지 않을 수 있으며, 이 경우 플랫폼 간 인터페이스 기술이 공통 기반의 핵심 과제

➡ QIS 공통 기반에서 공동설계 개념은 하드웨어와 소프트웨어를 분리해 최적화하는 접근의 한계를 보완하기 위한 핵심 방법론

- ▶ 공동설계는 물리 소자, 제어 방식, 오류 특성, 소프트웨어 스택, 알고리즘 설계를 동시에 고려해 전체 시스템 효율을 끌어올리는 접근
 - 물리적 제약을 무시한 알고리즘은 이론적으로 의미가 있어도 실제 장치에서 구현 불가능하거나 성능이 급격히 저하될 수 있으며, 반대로 하드웨어만 개선해도 이를 활용할 소프트웨어와 컴파일, 제어, 오류 모델링이 뒤따르지 않으면 실질적 성과로 연결되기 어렵다는 문제 제기
 - 최근 동향은 특정 하드웨어 특성에 맞춘 알고리즘 선택, 회로 최적화, 컴파일 전략, 제어 파형 설계가 함께 발전하는 방향으로 전개되며, DOE 국립 연구센터 체계에서도 이러한 통합 연구 구성이 강조되는 경향

➡ 오류 관리와 신뢰성 확보는 범용 오류정정 여부와 별개로, 현재 단계에서 성능을 현실적으로 끌어올리기 위한 공통 기술 축

- ▶ 물리적 오류율 감소, 오류 완화, 잡음 모델링, 검증 절차 구축 병렬적 추진
 - 오류 정정은 장기적으로 논리 큐비트를 안정화하기 위한 핵심 목표로 존재하지만, 그 이전 단계에서도

오류 완화 기법을 통해 제한된 규모에서 유의미한 결과를 얻는 전략이 널리 활용

- 오류 모델링은 장치의 오류가 무작위인지, 편향이 있는지, 시간에 따라 변하는지 등을 파악해 보정 전략을 세우는 과정이며, 이는 컴퓨팅의 회로 설계뿐 아니라 네트워크의 전송 프로토콜, 센싱의 측정 안정화에도 중요하게 작용
- 검증과 벤치마크는 단순히 성능을 홍보하기 위한 지표가 아니라, 서로 다른 플랫폼과 실험 결과를 비교하고 정책 투자 효과를 측정하기 위한 기반으로 기능하므로, 측정 표준화와 함께 공통 기반 요소

➡ 측정과 계측 기술은 QIS 공통 기반에서 단순한 부품이 아니라, 성능을 규정하고 결과의 신뢰성을 결정하는 핵심 계층

- ▶ 양자 상태 읽기 정확도, 반복 측정 신뢰성, 측정에 의한 교란 최소화가 공통 성능 지표
 - 측정이 부정확하면 계산 결과가 흔들리고, 통신에서는 오류율이 증가하며, 센싱에서는 분해능이 저하되므로, 측정 체계는 모든 응용의 마지막 단계이자 병목으로 작용
 - 측정 기술의 고도화는 하드웨어 설계 변경, 검출기 성능 개선, 신호 처리, 보정 알고리즘을 포함하는 시스템 문제로 전개되며, 특히 계측 체계의 안정성은 장기간 실험 운영과 산업화 관점에서 중요성 증가

➡ 시스템 차원에서는 단일 장치 성능보다, 확장성과 상호 연결성이 공통 기반 요소로 강조

- ▶ 다중 큐비트 시스템, 분산 양자 시스템, 네트워크 연계 구조가 공통 연구 주제
 - 양자컴퓨팅은 단일 장치 내부에서 큐비트를 늘리는 스케일업 문제로 나타나지만, 동시에 여러 장치를 연결해 분산형 구조로 확장하는 접근도 논의되며, 이 경우 네트워크 인터페이스와 동기화 문제가 공통 기반 과제
 - 양자센싱 역시 단일 센서 성능 향상뿐 아니라, 다수 센서를 네트워크로 묶어 더 큰 공간 규모에서 정밀도를 높이는 센서 네트워크 개념으로 확장될 수 있어, 연결성과 동기화가 공통 기반

➡ QIS 공통 기반 연구는 단기 성능 경쟁보다는, 장기적 기술 축적과 인프라 구축을 전제로 전개되는 경향

- ▶ 공용 테스트베드, 사용자시설, 표준화된 측정 프로토콜, 비교 가능한 벤치마크 구축이 중요 과제
 - 공용 인프라는 특정 기업이나 특정 연구팀의 성과에 종속되지 않고, 기술 전반의 반복 검증과 인력 양성을 가능하게 하며, 국가 차원의 기술 저변 확대 수단
 - 표준화와 벤치마크는 플랫폼 간 비교 가능성을 높여 투자 전략 수립과 정책 성과 평가에 활용 가능

➡ 미국의 QIS 정책과 연구개발 체계는 공통 기반의 중요성을 전제로 기술 동향을 관리하며, 응용 분야별 분절을 최소화하는 방향으로 연구 포트폴리오 구성

- ▶ 양자컴퓨팅, 양자네트워크, 양자센싱·계측을 분리된 기술이 아닌 상호 연계된 연구 영역
 - DOE 국립 QIS 연구센터 체계는 플랫폼, 측정, 오류, 공동설계 등 공통 기반을 축적한 후 계산, 통신, 센싱 응용으로 확장하는 구조를 채택하는 것으로 정리

3.2 양자컴퓨팅 핵심 기술 동향

➡ 양자컴퓨팅은 양자역학적 현상을 계산 자원으로 활용해 특정 계산 문제에서 고전 컴퓨팅과 질적으로 다른 계산 복잡도 특성을 보이는 차세대 계산 패러다임

- ▶ 핵심 가치는 모든 문제에 대한 범용적 속도 향상이 아니라, 고전 계산에서 계산량이 급격히 증가하는 특정 문제 구조에 대해 계산 효율을 개선할 가능성
 - 양자컴퓨팅은 고전 컴퓨터를 대체하는 기술이 아니라, 고전 컴퓨팅의 계산 병목 구간을 보완하는 특수 목적 계산 수단으로 정책 문서에서 반복적으로 규정
 - 기술 성과 평가는 단순한 연산 속도나 큐비트 수가 아니라, 문제 적합성, 오류 관리 수준, 재현 가능성, 스케일 확장 경로를 종합적으로 고려해야 한다는 접근

➡ 양자컴퓨팅은 단일 장치 기술이 아니라, 하드웨어-제어-소프트웨어-알고리즘-응용이 긴밀히 결합된 스택형 시스템 기술

- ▶ 하위 계층의 물리적 제약이 상위 계층의 계산 가능 범위와 성능을 직접적 제한
 - 물리 큐비트의 연결 구조, 오류 특성, 제어 정밀도는 회로 깊이, 실행 가능한 알고리즘, 문제 크기를 사실상 결정
 - 양자컴퓨팅은 개별 기술 돌파보다 시스템 전반의 동시 성숙이 요구되는 분야

➡ 하드웨어 측면에서 양자컴퓨팅은 다양한 물리적 큐비트 플랫폼이 병렬적으로 경쟁하는 다경로 기술 구조

- ▶ 초전도 큐비트, 이온 트랩, 중성 원자, 광자 기반 접근이 대표적 플랫폼으로 연구
 - 초전도 큐비트는 빠른 게이트 속도와 반도체 공정 기반 집적 가능성을 강점으로 가지며, 현재 대규모 실험 시스템이 가장 활발히 구축되는 플랫폼
 - 이온 트랩은 긴 코히런스 시간과 높은 연산 정확도를 제공하지만, 광학 제어 복잡성과 시스템 확장 시의 공학적 병목이 주요 과제
 - 중성 원자 플랫폼은 대규모 배열 구성 가능성과 병렬 연산 구조를 강점으로 가지며, 최근 확장성 관점에서 정책적 관심이 빠르게 증가
 - 광자 기반 접근은 통신과 네트워크 연계에 유리하지만, 손실 관리와 결정적 연산 구현이 성능 상한을 결정하는 요인

➡ 최근 양자컴퓨팅 기술 동향에서 주목되는 변화는 극저온 환경 의존도를 낮추려는 시도, 즉 상온 또는 비저온 양자컴퓨팅 접근의 부상

- ▶ 상온 양자컴퓨팅은 회식 냉동기와 같은 극저온 인프라 의존을 줄이거나 제거함으로써, 시스템 복잡성과 운영 비용을 낮추려는 방향

- 다이아몬드 NV 센터, 실리콘 결합 기반 스핀 큐비트 등은 상온 또는 비교적 완화된 환경에서 양자 상태를 유지할 수 있는 후보
- 이러한 접근은 대규모 범용 양자컴퓨터보다는, 특정 연산이나 센싱, 하이브리드 계산 가속기 형태로의 활용 가능성이 먼저 논의
- 정책 문서에서는 상온 양자컴퓨팅을 범용 컴퓨팅의 대안이라기보다, 양자기술의 접근성과 응용 범위를 넓히는 보완적 기술 경로

➡ 오류와 잡음 관리는 양자컴퓨팅 기술 진전의 핵심 병목으로 지속적으로 지적

- ▶ 물리 큐비트는 고전 비트 대비 오류 발생 확률이 높아, 계산 길이가 증가할수록 오류 누적 문제가 급격히 확대
- ▶ 오류율 감소, 잡음 모델링, 오류 완화, 오류 정정을 병렬적으로 연구
- ▶ 범용 오류정정은 장기 목표로 설정되지만, 현재 단계에서는 오류 완화 기법을 통해 제한된 문제에서 실질적 성과를 도출하는 접근이 현실적 경로

➡ 소프트웨어와 제어 계층은 양자컴퓨팅의 실질적 활용 가능성을 좌우하는 핵심 요소

- ▶ 컴파일러, 회로 최적화, 제어 파형 생성, 실행 스케줄링, 결과 후처리까지 포함하는 통합 스택 필요
 - 동일한 하드웨어에서도 소프트웨어 최적화 수준에 따라 실행 가능한 문제 크기와 성공 확률이 크게 달라짐
 - 최근에는 하드웨어 특성을 반영한 플랫폼 특화 컴파일, 오류 인지형 스케줄링, 자동화된 회로 최적화가 주요 연구 주제

➡ 알고리즘 측면에서는 범용 알고리즘보다는 응용 특화 알고리즘 중심의 발전 경향

- ▶ 분자 전자 구조 계산, 재료 시뮬레이션, 조합 최적화, 선형대수 문제 등이 대표적 적용 분야
 - 이들 문제는 고전 계산에서 계산량이 기하급수적으로 증가하는 구조를 가지며, 양자 알고리즘의 이론적 장점이 상대적으로 명확
 - 이론적 계산 우위가 실제 장치에서 구현 가능한지에 대해서는 실험적 검증과 벤치마크 축적이 필수적 과제

➡ 최근 양자컴퓨팅 연구에서는 하이브리드 계산 구조가 중요한 기술 트렌드로 부상

- ▶ 고전 고성능 컴퓨팅과 양자 장치를 결합해 역할을 분담하는 구조가 현실적 접근으로 평가
 - 양자 장치는 특정 계산 서브루틴을 담당하고, 고전 컴퓨터는 전체 계산 흐름과 최적화를 담당하는 방식

➡ 벤치마크와 성능 평가는 양자컴퓨팅 기술 논의를 구조화하는 핵심 도구

- ▶ 큐비트 수, 오류율, 코히런스 시간, 회로 깊이, 실행 성공률 등 주요 지표
 - 단일 지표를 과도하게 강조하는 접근에 대한 비판이 증가하고 있으며, 계층별 벤치마크 설정 필요성이 강조

- 정책 문서에서는 하드웨어, 소프트웨어, 알고리즘을 분리해 독립적으로 평가해야 한다는 관점이 반복적으로 제시

➡ 응용 검증 관점에서 양자컴퓨팅은 실험적 데모와 파일럿 수준의 문제 해결 단계에 위치한 기술로 평가

- 신약 개발, 촉매 설계, 소재 탐색, 에너지 시스템 분석 등에서 잠재적 활용 가능성 제시
 - 산업 현장에서 즉각적인 비용 절감이나 성능 개선으로 연결되는 사례는 제한적이며, 중장기 검증 단계에 머무
 - 정책 문서에서는 양자컴퓨팅을 단기 상용 기술이 아닌 장기 전략 기술로 분류

➡ 미국의 양자컴퓨팅 연구개발 전략은 단일 기술 경로에 대한 조기 선택을 피하고, 다양한 기술 옵션을 병렬적으로 유지하는 접근

- DOE 국립 QIS 연구센터 체계는 하드웨어 플랫폼 경쟁, 오류 관리, 공동설계, 하이브리드 계산, 응용 검증을 동시에 추진하도록 설계
- 기술 불확실성이 큰 단계에서 정책적 리스크를 분산하고, 장기적 선택지를 확보하려는 전략적 판단

3.3 양자네트워크 핵심 기술 동향

➡ 양자네트워크는 독립적인 통신 기술이라기보다, 단일 양자컴퓨터의 물리적 확장 한계를 보완하기 위한 계산 인프라로 재정의되는 추세

▶ 양자컴퓨팅은 큐비트 수 증가에 따라 오류 누적, 제어 복잡성, 냉각 및 인프라 부담이 급격히 커지는 구조적 한계

- 모든 계산 능력을 하나의 대형 장치에 집적하는 접근은 기술적·경제적 부담 빠르게 증가
- 이러한 한계를 완화하기 위한 대안으로, 다수의 중소규모 양자 장치를 네트워크로 연결해 계산 자원을 공간적으로 확장하는 개념 제시
- 이 관점에서 양자네트워크는 계산 성능 향상을 위한 보조 수단이 아니라, 양자컴퓨팅 아키텍처 자체의 일부

➡ 계산 관점에서 양자네트워크의 핵심 기능은 물리적으로 분리된 노드 간에 얽힘을 생성하고 이를 공유하는 능력

▶ 얽힘은 떨어진 큐비트들을 하나의 계산 자원처럼 동작하게 만드는 역할

- 단일 장치 내부의 얽힘은 비교적 짧은 거리와 안정된 환경에서 구현되지만, 네트워크 얽힘은 전송 손실, 시간 지연, 동기화 오차에 동시에 노출
- 네트워크를 통해 생성된 얽힘의 품질과 성공 확률은 분산 양자컴퓨팅에서 실행 가능한 알고리즘의 종류와 크기를 직접적으로 제한
- 양자네트워크의 성능 평가는 단순 전송 거리보다, 얽힘 생성 속도와 신뢰성에 초점

➡ 통신 메커니즘 측면에서 양자네트워크는 광자 기반 전송 중심

▶ 광자는 환경과의 상호작용이 상대적으로 적어 장거리 전송에 유리한 특성

- 단일 광자의 손실은 고전 통신처럼 증폭이나 재전송으로 보완할 수 없으며, 이로 인해 성공 확률이 거리 증가에 따라 급격히 감소
- 이러한 특성은 양자네트워크 설계를 대역폭 중심이 아닌, 손실 관리와 성공 확률 최적화 중심으로 전환
- 양자네트워크는 ‘얼마나 빨리 보낼 수 있는가’보다 ‘얼마나 확실하게 얽힘을 만들 수 있는가’가 핵심 성능 지표

➡ 양자 중계기 개념은 장거리 양자네트워크를 가능하게 하는 핵심 기술

▶ 중계기는 양자 상태를 직접 복제하지 않고, 구간별로 얽힘을 생성한 뒤 이를 연결하는 방식

- 양자 메모리, 고신뢰 측정, 정확한 시간 동기화, 오류 관리가 동시에 요구
- 중계기 기술이 성숙하지 않으면 네트워크는 단거리 실험 수준에 머무르게 되며, 분산 계산이나 광역 보안 통신으로 확장되기 어려움

- 정책 문서에서는 중계기를 양자네트워크 전체 성숙도를 좌우하는 가장 중요한 병목 중 하나로 반복적으로 지적

➡ 보안 관점에서 양자네트워크는 계산 기반 보안과 물리 기반 보안을 연결하는 새로운 보안 인프라

- ▶ 양자키분배(QKD)는 도청 시 양자 상태가 교란된다는 물리 법칙을 활용해 침입 여부를 탐지
 - 계산 능력이 향상되더라도 보안이 유지된다는 점에서, 알고리즘 기반 암호와 근본적으로 다른 특성
 - 실제 시스템에서는 장비 결함, 구현 오류, 사이드 채널 공격 등으로 인해 이론적 보안과 실제 보안 사이에 간극 존재
 - 정책 문서에서는 QKD를 기존 암호 체계의 완전한 대체가 아니라, 고가치 통신 구간을 보호하는 선택적 보안 수단

➡ 분산 시스템 관점에서 양자네트워크는 하이브리드 고전-양자 계산 구조를 전제로 발전

- ▶ 양자 장치는 계산적으로 어려운 부분 문제를 처리하고, 고전 컴퓨터는 전체 계산 흐름과 최적화를 담당
 - 네트워크는 단순 데이터 전달이 아니라, 계산 자원 간 얽힘을 공급하는 역할
 - 네트워크 지연과 얽힘 생성 비용은 계산 분할 전략에 직접적인 영향을 미치며, 이는 분산 양자컴퓨팅을 순수 계산 문제가 아닌 시스템 설계 문제
 - 결과적으로 양자네트워크는 양자컴퓨팅 성능을 결정하는 외부 요소가 아니라, 계산 스택 내부 요소

➡ 양자네트워크는 양자센싱·계측과도 직접적으로 연결

- ▶ 다수의 센서를 네트워크로 연결해 공간적으로 확장된 정밀 측정을 수행하는 개념이 연구됨
 - 센서 간 동기화와 상태 공유가 측정 정확도에 직접적인 영향
 - QIS 공통 기반에서 논의한 측정, 시간 동기화, 오류 관리 문제가 네트워크 환경에서 다시 등장

➡ 인프라 관점에서 양자네트워크는 기존 통신 인프라와의 공존을 전제로 발전

- ▶ 광섬유 기반 통신망, 위성 통신, 데이터센터 네트워크와의 혼합 운용이 현실적 경로
 - 완전한 양자 네트워크로의 전환은 비용과 운영 복잡성 측면에서 현실적 제약이 큼
 - 시험망, 테스트베드, 파일럿 프로젝트 중심의 단계적 구축 전략이 채택

➡ 기술 성숙도 관점에서 양자네트워크는 실험실 단계와 제한적 현장 실증 단계가 병존하는 영역

- ▶ 단거리 QKD와 실험적 얽힘 분배는 이미 구현 사례가 증가
 - 중계기 기반 장거리 네트워크와 범용 분산 양자컴퓨팅은 중장기 연구 과제
 - 정책 문서에서는 기대 효과와 기술 실현 시점을 분리해 관리해야 한다는 접근

3.4 양자센싱·계측 핵심 기술 동향

➡ 양자센싱·계측은 양자역학적 상태가 외부 환경 변화에 매우 민감하게 반응한다는 특성을 활용해, 시간, 주파수, 자기장, 전기장, 중력 등 물리량을 기존 기술보다 훨씬 높은 정밀도로 측정하려는 기술 영역

▶ 양자컴퓨팅이 계산 문제를 더 효율적으로 풀기 위한 기술이라면, 양자센싱·계측은 ‘얼마나 정확하게 측정할 수 있는가’라는 근본적인 계측 한계를 확장하는 데 목적

- 두 기술은 목표는 다르지만, 중첩, 얽힘, 간섭, 상태 붕괴와 같은 동일한 양자역학적 원리를 공통 기반으로 사용
- 정책 문서에서는 양자센싱·계측을 부수적 응용 기술이 아니라, 양자컴퓨팅, 양자네트워크와 나란히 배치되는 핵심 QIS 축

➡ 기존 고전 센서와 비교할 때, 양자센싱·계측의 가장 큰 차별점은 잡음에 의해 제한되던 측정 정확도의 물리적 한계를 넘어설 수 있다는 점

▶ 고전 계측 장치는 열 잡음, 전자 잡음, 기계적 진동, 환경 변화 등으로 인해 일정 수준 이상의 정밀도를 달성하기 어려움

- 반면 양자 센서는 단일 원자, 이온, 전자 스핀, 광자와 같은 미시적 양자 시스템을 직접 측정 자원으로 활용
- 외부 환경의 아주 작은 변화에도 양자 상태가 변하기 때문에, 미세한 신호를 감지하는 데 매우 유리
- 동시에 환경 교란에 취약하다는 특성도 함께 가지므로, 정밀한 제어와 안정화 기술이 필수적으로 요구

➡ 시간과 주파수 계측 분야는 양자센싱 기술 중 가장 먼저 성숙 단계에 진입한 영역

▶ 원자시계와 광격자 시계는 원자의 전자 에너지 준위 간 전이를 기준으로 시간 정의

- 이 방식은 기계적 진동이나 전자 회로에 의존하는 기존 시계보다 훨씬 안정적이며 장기적인 정확도 제공
- 이러한 고정밀 시간 계측 기술은 위성항법시스템, 통신 네트워크 동기화, 금융 거래 기록, 과학 실험 인프라 등 현대 사회의 핵심 시스템을 지탱하는 기반 기술로 활용
- 정책 문서에서는 시간 계측 기술을 단순 과학 장비가 아니라, 국가 핵심 인프라 안정성과 직결되는 전략 자산

➡ 자기장, 전기장, 중력, 가속도 측정에서도 양자센싱·계측 기술의 활용 가능성이 빠르게 확대

▶ 원자 간섭계, 스핀 기반 센서, 다이아몬드 NV 센터 등은 극히 약한 물리량 변화를 감지 가능

- 지하 구조 탐지, 자원 탐사, 잠수함 탐지, 국방 감시, 의료 영상, 환경 변화 모니터링 등 다양한 분야와 연결
- 외부 신호가 매우 약하거나 직접적인 접근이 어려운 환경에서 기존 센서 대비 우수한 성능을 발휘할 가능성

➡ 양자센싱·계측은 양자컴퓨팅과 달리 비교적 적은 수의 큐비트 또는 단일 양자 시스템으로도 실질적인

성과 도출 가능

- ▶ 범용 오류정정이나 수백·수천 큐비트 규모의 집적이 반드시 필요한 것은 아님
 - 기술적 진입 장벽이 상대적으로 낮고, 실험실 수준의 기술이 산업 및 현장 적용으로 이전될 가능성 큼
 - 정책 문서에서는 이러한 특성을 근거로 양자센싱을 ‘단기 가시적 성과 창출이 가능한 QIS 영역’으로 분류

➔ 양자센싱·계측은 양자컴퓨팅 성능 향상을 간접적으로 지원하는 역할도 수행

- ▶ 고정밀 센서는 양자컴퓨터의 환경 교란 요인을 정밀하게 측정하고 제어하는 데 활용
 - 자기장이나 전자기 잡음의 미세한 변화를 감지함으로써 큐비트 오류 발생 원인을 분석하고 제어 조건 개선
 - 센싱 기술은 계산 기술과 분리된 영역이 아니라, 양자컴퓨팅 스택의 안정성을 높이는 보조 인프라

➔ 네트워크 관점에서 양자센싱·계측은 분산 계측 시스템

- ▶ 다수의 양자 센서를 네트워크로 연결해 넓은 공간에 걸친 측정을 수행하는 개념
 - 센서 간 얽힘이나 상관관계를 활용하면 단일 센서로는 달성하기 어려운 측정 정밀도 확보 가능
 - 양자네트워크 기술이 센싱 응용으로 확장되는 대표적 사례

➔ 분산 양자센싱에서는 통신 안정성과 시간 동기화가 측정 성능 좌우 핵심 요소

- ▶ 센서 간 데이터 결합 과정에서 지연, 손실, 동기화 오류가 발생할 경우 전체 계측 정확도가 저하
 - 센서 성능뿐 아니라 네트워크 설계와 동기화 기술이 계측 시스템의 성능 제한
 - 이 구조는 양자센싱·계측을 단일 장비 문제가 아닌, 시스템 통합과 운영 문제로 확장

➔ 인프라 관점에서 양자센싱·계측은 기존 과학·산업 인프라와의 결합을 전제로 발전

- ▶ 실험실 환경뿐 아니라 산업 현장, 야외 환경, 이동 플랫폼 등 다양한 조건에서 안정적 작동 요구
 - 극저온이나 진공 환경이 필요한 경우 설치 비용과 운용 부담이 주요 제약
 - 상온 또는 완화된 환경에서 동작 가능한 센서 기술에 대한 정책적 관심 증가

➔ 기술 성숙도 측면에서 양자센싱·계측은 QIS 영역 중 가장 빠르게 실용화 가능 분야

- ▶ 일부 기술은 이미 상용 제품 또는 파일럿 시스템 형태로 활용
 - 네트워크 기반 분산 센싱과 극한 정밀 계측은 중장기 연구 과제로 분류
 - 정책 문서에서는 단기 응용과 장기 연구를 명확히 구분해 병행 추진할 필요성 강조

3.5 미국 내 관련 기업 기술 동향

➡ 미국의 양자기술 기업 생태계는 하드웨어 플랫폼 기업, 네트워크·보안 기업, 센싱·계측 기업, 응용·소프트웨어 기업으로 분화되며 동시에 IBM, Google 등 대형 플랫폼이 클라우드 접근과 개발 생태계를 제공하는 다층 구조

▶ 산업화 관점에서 기업 성패는 단일 데모 성과보다, 반복 가능한 공학적 개선 속도, 고객 워크플로우와 결합 가능성, 표준·검증 체계 편입 여부에 의해 판가름

- 하드웨어는 오류율, 연결성, 확장성, 제조 재현성
- 네트워크는 필드 배치 가능성, 상온 동작 여부, 운용 자동화, 기존 통신 인프라와의 정합성
- 보안은 포스트양자암호 전환 수요와 크립토 애질리티 구현 역량
- 센싱은 현장 신뢰성, 장기 드리프트, 교정·인증 체계, 국방·항공·산업 고객의 조달 채널 확보

가. 양자컴퓨팅 하드웨어 플랫폼 기업

➡ 2026년 기준 글로벌 양자컴퓨팅 하드웨어 시장은 단순 물리 큐비트 수 경쟁 중심의 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 단계를 넘어, 오류정정이 가능한 논리 큐비트 구현과 고성능 컴퓨팅(HPC) 인프라와의 결합을 중심으로 한 기술 경쟁 국면으로 전환되는 단계에 진입한 것으로 평가

▶ 초기 양자컴퓨팅 기술 경쟁은 물리 큐비트 수 확대 자체를 핵심 성과 지표로 삼는 경향이 강했으나, 최근에는 실제 계산 안정성과 오류 누적 제어 가능성이 주요 평가 기준

- 논리 큐비트 구현 가능성, 오류정정 자원 효율성, 시스템 확장 경로가 기술 성숙도의 핵심 요소

▶ 양자 하드웨어 스타트업과 빅테크 기업(Microsoft, AWS 등) 간 전략적 협력이 강화되며, 연구 장비 중심의 시스템이 데이터센터형 양자 인프라로 전환되는 과도기적 모습을 보임

- 양자컴퓨팅이 단일 장비 개발이 아닌 기존 HPC 환경과 통합되는 장기 인프라 기술로 재정의되는 흐름

➡ IonQ(트랩트 이온)

▶ 2015년 설립된 IonQ는 트랩트 이온 기반 양자컴퓨팅 플랫폼 기업으로, 높은 게이트 충실도와 긴 결맞음 시간이 핵심 기술

- 개별 이온 제어 정확도를 기반으로 회로 실행 안정성을 우선 확보하는 기술 경로를 채택

▶ 단순 물리 큐비트 수 대신 알고리즘 큐비트(AQ, Algorithmic Qubits)라는 성능 지표를 도입해 실질적인 계산 성능 강조

- 2025년 하반기 5세대 시스템 ‘Tempo’를 통해 AQ 64 수준을 달성하며 상업적 활용 가능성 제시
- 2026년 이후 바륨(Barium) 이온 기반 시스템을 통해 연산 속도와 확장성을 동시에 개선하는 로드맵 추진
- 대규모 확장 단계에서 광학레이저 제어 복잡성 증가와 오류정정에 필요한 자원 규모 확대가 상용화 일정의 주요 리스크

➡ Rigetti Computing(초전도)

- 2013년 설립된 Rigetti는 초전도 큐비트 기반의 하드웨어, 소프트웨어, 제조 공정을 통합한 풀스택 기업
 - 반도체 공정과 집적회로 기술을 활용한 칩 단위 스케일링을 핵심 기술
- 2024년 말 84큐비트 시스템 ‘Ankaa-3’를 출시하며 약 99.5% 수준의 2큐비트 게이트 충실도 공개
 - 성능 지표 개선과 함께 시스템 안정성 확보를 주요 기술 목표
- 자체 양자 전용 제조시설(Fab-1)을 통해 공정 내재화와 반복 실험 속도 확보
 - 극저온 운용 부담, 시스템 통합 난이도, 상장사로서의 재무적 지속성 확보가 중장기 확산의 주요 변수

➡ QuEra Computing(중성 원자)

- 2018년 설립된 QuEra는 하버드·MIT 연구 성과를 기반으로 한 중성 원자 플랫폼기업
 - 광격자(optical lattice)를 활용한 대규모 원자 배열 기술이 핵심 경쟁력
- 아날로그 및 디지털 양자 접근을 병행할 수 있는 구조적 유연성 보유
 - 조합 최적화, 물리 시뮬레이션 등 특정 문제군에서의 조기 활용 가능성 강조
- 256큐비트 시스템 ‘Aquila’를 통해 실험적 성과를 공개
 - 대규모 시스템 확장 시 원자 손실 관리, 동기화 제어, 반복 정밀도 확보가 기술적 병목

➡ Atom Computing(중성 원자)

- 2018년 설립된 Atom Computing은 이테르븀(Yb-171) 원자 기반 중성 원자 플랫폼
 - 핵스핀 기반 접근을 통해 수십 초 이상의 긴 결맞음 시간 확보
- 2023년 말 1,225개 원자 사이트를 포함하는 대규모 시스템 공개
 - 중성 원자 플랫폼의 스케일 잠재력을 실험적으로 입증
- Microsoft와의 공동 설계를 통해 논리 큐비트 및 오류정정 기술 검증 추진
 - 논리 큐비트의 실제 계산 성능을 산업 활용 수준으로 입증하는 과정이 향후 과제

➡ PsiQuantum(광자)

- 2016년 설립된 PsiQuantum은 실리콘 포토닉스 기반 광자 양자컴퓨팅을 통해 대규모 오류정정 시스템 구현이 목표

- 기존 반도체 제조 인프라(GlobalFoundries 등)를 활용한 대량 생산 전략
- ▶ 수백만 큐비트 규모 시스템을 장기 목표로 설정하며 중간 단계 성과 공개를 최소화하는 전략
 - 연구 단계에서 유틸리티 규모 인프라 배치 단계로의 전환 추진
- ▶ 대규모 자본 투입과 공정 통합 난이도가 상존
 - 중간 NISQ 단계 성과 부재에 따른 시장 수용성 불확실성이 리스크

➡ Quantinuum(트랩트 이온 + 소프트웨어, 미국/영국)

- ▶ 2021년 Honeywell Quantum Solutions와 Cambridge Quantum의 결합으로 설립된 풀스택 기업
 - 트랩트 이온 기반 하드웨어와 양자 소프트웨어(TKET)를 동시 보유
- ▶ Microsoft와 협력해 오류율이 대폭 개선된 논리 큐비트 시연 결과 공개
 - 암호화, 금융, 소재 과학 등 특정 산업 문제를 대상으로 한 패키지형 솔루션 제공
- ▶ 다수 제품군의 동시 고도화와 대형 시스템 운용이 요구
 - 운영 복잡성과 설치 규모가 중장기 기술 확산의 제약 요소

나. 양자네트워크·보안 기업

➡ 미국을 중심으로 한 양자 보안 및 양자네트워크 시장은 국가 주도의 포스트양자암호(PQC) 전환 정책이 본격화되면서 기술 도입의 선택성이 감소하고 제도 기반의 강제성이 확대되는 국면에 진입

▶ NIST의 PQC 표준 확정과 연방정부 조달 기준 반영을 계기로, 공공 부문과 핵심 인프라 영역에서 양자 내성 확보가 필수 요건

– 암호 기술의 성능 경쟁보다는 전환 가능성, 관리 체계, 운영 지속성이 핵심 평가 요소

▶ 네트워크 분야에서는 전용 양자망 구축보다는 기존 통신 인프라를 활용한 단계적 확장 전략 우세

– 점대점(P2P) QKD 실증을 넘어, 기존 IP 네트워크 상에서 작동하는 양자 인터넷 언더레이 구조와 상온 동작형 중계기 배치를 통한 전국망 확장 시도가 병행

➡ Quantum Xchange(양자 키 관리 및 보안 거버넌스)

▶ 2018년 설립된 Quantum Xchange는 특정 암호 방식에 종속되지 않는 양자 안전 키 관리 플랫폼 ‘Phio TX’를 중심 사업 전개

– QKD, PQC를 병행 활용할 수 있는 하이브리드 구조를 채택하며, 대역외(Out-of-band) 키 전달 아키텍처를 핵심 기술로 제시

▶ 기존 IP 네트워크 상에서 하드웨어 추가 없이 소프트웨어 중심으로 양자 내성을 강화하는 방향으로 기술을 고도화

– 2025~2026년을 전후해 기업 및 기관의 PQC 전환을 지원하는 관리형 플랫폼 기능 확장

▶ 워싱턴 DC-뉴욕-보스턴 구간 양자망 구축 경험을 기반으로, 암호 관리 정책과 운영 통제를 포함하는 ‘크립토 센터 오브 엑셀런스(CCoE)’ 개념 전면 제시

– 정부, 금융권 중심의 컴플라이언스 수요가 시장 진입 촉진 요인으로 작용하나, 물리 네트워크 확장 시 수반되는 투자 비용과 장기 ROI 입증에 과제

➡ Aliro Quantum(양자 네트워크 오케스트레이션)

▶ 2019년 설립된 하버드 스핀오프 기업으로, 양자 네트워크 운영체제인 ‘AliroNet’을 중심으로 소프트웨어 기반 생태계 구축 지향

– 서로 다른 제조사의 양자 컴퓨터, 네트워크 장비를 연결하는 벤더 중립적 제어 계층을 핵심 가치로 제시

▶ 양자 네트워크 설계, 시뮬레이션, 운영을 통합 지원하는 플랫폼 제공

– 하드웨어 기술 성숙 이전에도 네트워크 아키텍처 설계와 분산형 양자컴퓨팅(DQC) 개념 검증이 가능하도록 지원

▶ DOE 및 국립연구소와의 협력을 통해 분산형 양자컴퓨팅 네트워크 스택 실증 수행

– 2026년 이후 클라우드 기반 양자망 설계 API 공개를 통해 통신사의 양자 네트워크 진입 장벽을 낮추는 전략 추진

- ▶ 양자 리피터, 양자 메모리 등 핵심 하드웨어 성숙 속도가 소프트웨어 확산의 선행 조건으로 작용할 가능성 존재

➡ Qunnect(양자 네트워크 하드웨어 인프라)

- ▶ 2017년 뉴욕주립대 스핀오프로 설립된 기업으로, 상온(Room-temperature)에서 작동하는 양자 메모리와 얽힘 소스가 핵심 기술
 - 극저온 장비 없이 기존 통신용 광섬유를 그대로 활용할 수 있는 플러그앤플레이형 하드웨어 배치
- ▶ ‘Carina’ 제품군을 중심으로 메트로 및 지역 단위 양자망 구축에 필요한 중계 하드웨어 제공
 - 기존 통신 인프라와의 높은 호환성이 강점
- ▶ 2025년 말 뉴멕시코주에 개방형 양자망 ‘ABQ-Net’을 구축하며 필드 배치 역량 실증
 - 통신사 및 공공기관과의 협력 모델을 통해 상용 네트워크 환경 적용 가능성 검증
- ▶ 국가별 보안 규격 차이, 대규모 인프라 투자 경기 변동에 따른 사업 안정성 확보가 중장기 과제

➡ QuSecure(PQC 전환 및 암호 민첩성 플랫폼)

- ▶ 2019년 설립된 QuSecure는 조직 내 암호 체계를 자동으로 식별, 전환, 관리하는 ‘QuProtect’ 플랫폼을 중심으로 사업 전개
 - 양자컴퓨팅 위협에 대비해 기존 암호 알고리즘을 PQC로 무중단 전환하는 크립토 애질리티 개념 제품화
- ▶ 암호 자산 식별, 취약성 평가, 알고리즘 교체를 통합 관리하는 소프트웨어 중심 접근
 - 하드웨어 교체 없이도 양자 내성 확보가 가능하다는 점 강점
- ▶ 미국 국방부 및 연방정부 기관과의 계약을 통해 공공 부문 중심 시장 선점 달성
 - 2026년을 전후해 AI 기반 암호 위협 탐지 기능을 통합하며 포괄적 양자 보안 플랫폼으로 확장 중
- ▶ 다만 레거시 시스템과 호환성, 조직별 전환 속도 차이가 실제 구축 일정의 병목

다. 양자센싱·계측 기업

➡ 2026년 기준 양자센싱·계측 분야는 양자컴퓨팅 대비 기술 성숙도가 높아, 제한적이지만 실질적인 상업 매출이 발생하는 초기 시장 단계에 진입한 것으로 평가

- ▶ 특히 위치·항법·시각(Positioning, Navigation, Timing, PNT) 보안과 우주 자원 탐사를 중심으로 수요가 구체화
 - GPS 신호 교란, 위성 의존성 증가에 따른 대체 항법 및 고정밀 타이밍 확보 필요성이 금융, 통신, 국방 인프라 전반에서 확대
- ▶ 피코초(picosecond) 단위의 정밀 시간 동기화 GPS 불능(GPS-denied) 환경에서의 독자 항법

능력이 핵심 기술 요구

— 양자컴퓨팅보다 앞서 실용화가 가능한 영역으로 평가되며, 국가 전략 인프라와의 직접적 연계성 높음

➡ AOSense(원자 간섭계 기반 관성항법)

- ▶ 2004년 스탠퍼드대학교 연구진에 의해 설립된 원자 광학(Atom Optics) 전문 기업으로, 원자 간섭계(Atom Interferometry)를 활용한 초정밀 센싱 기술 핵심 역량
 - 원자의 파동성을 이용해 가속도, 회전율, 중력 변화를 정밀 측정하는 기술 경로 채택
- ▶ 냉각된 원자 구름을 제어하는 광학 시스템과 전자 제어계를 통합해 센서 모듈 구현
 - 최근에는 크기, 무게, 전력, 가격(SWaP-C) 최적화를 통해 실환경 배치 가능성 제고
- ▶ DARPA, NASA 등과의 장기 과제를 통해 GPS 없이도 작동하는 양자 관성 항법 장치(QINS) 실증
 - 기존 레이저 자이로 기반 시스템 대비 드리프트 누적 오차를 100배 이상 낮춘 성과 보고
- ▶ 국방 분야의 GPS 교란 환경, 지하 및 심해 자원 탐사용 중력계 시장에서 조기 활용 가능성 높음
 - 다만 야전 환경에서의 물리적 충격과 진동에 대한 내구성 확보, 국제 인증 및 표준화 절차가 양산화의 주요 병목

➡ Infleqtion(중성 원자 계열 종합 양자 센싱·계측 솔루션)

- ▶ 20년 이상 축적된 중성 원자 제어 기술을 기반으로 2022년 브랜드 전환을 완료한 기업으로, 양자 센싱, 계측, 통신, 컴퓨팅을 포괄하는 플랫폼 전략
 - 공통 하드웨어 기반인 'Quantum Core'를 활용해 복수 응용 제품을 병렬 개발
- ▶ 양자 시계(Tiqker), 양자 RF 수신기(Deschutes), 양자 컴퓨팅 시스템을 동시에 추진하는 기술 포트폴리오 보유
 - 단일 기술의 고도화보다 응용 분야별 조기 상용화를 중시하는 전략
- ▶ 2026년 2월 NASA의 양자 중력 기술기계(QGGPf) 미션 파트너로 선정되어, 우주 공간에서 지구 중력장을 측정하는 양자 센서 발사 예정
 - 양자 센싱 기술의 우주 환경 적용 가능성을 검증하는 최초 사례 중 하나
- ▶ 도심 광케이블망 환경에서 GPS 없이 기존 대비 약 40배 향상된 피코초급 시간 동기 성능 시연
 - 금융 거래 시스템, AI 데이터센터, 차세대 통신 인프라용 타이밍 서비스 시장 진입 가속
- ▶ 2026년 초 기업인수목적회사(SPAC)를 통한 나스닥 상장을 추진하며, 양자 센싱과 컴퓨팅을 동시에 상용화한 공개 기업으로 포지셔닝
 - 대량 생산 단가 절감, 현장 유지보수 인력 확보가 중장기 성장의 주요 과제

라. 응용·소프트웨어 및 대형 플랫폼

➡ 2026년 기준 양자 응용·소프트웨어 및 대형 플랫폼 시장은 하드웨어 성숙 이전 단계에서도 경제적 가치를 창출하는 ‘양자 실용성(Quantum Utility)’ 입증 국면에 진입

▶ 물리 큐비트 확대와 오류정정 실현의 불확실성이 지속되는 가운데, 소프트웨어 중심 접근을 통해 단기 수익 모델을 확보하려는 전략 확산

– AI, 고전 시뮬레이션, 물리 기반 모델을 결합한 하이브리드 소프트웨어가 주요 수단

▶ 대형 플랫폼 기업들은 오류정정 기술의 점진적 진전을 근거로 ‘검증 가능한 양자 우위’를 제시하며 산업계의 조기 도입 유도

– 하드웨어 단독 성능이 아닌, 전체 시스템과 응용 관점에서의 우위 입증이 핵심 메시지

➡ SandboxAQ(AI-양자 하이브리드 응용)

▶ 2022년 Alphabet에서 분사한 이후, 양자 기술과 AI를 결합한 LQM(Large Quantitative Models) 전략을 중심으로 사업을 전개

– 하드웨어 완성 이전 단계에서도 물리 기반 수치 모델링을 통해 실질적 산업 가치를 창출하는 접근

▶ 신약 개발, 배터리 소재 설계, 금융 리스크 모델링 등 계산 복잡도가 높은 영역이 주요 타겟

– 양자 알고리즘 개념을 AI 모델에 내재화함으로써 단기 적용 가능성

▶ 2026년 초 미 육군과의 협력을 통해 배터리 수명 예측 시간을 약 90% 단축하는 LQM 기반 시뮬레이션 성과 발표

– 동시에 포스트양자암호 전환 솔루션 ‘AQive Guard’를 통해 정부·금융권 암호 자산 관리 시장 선점

▶ 양자 하드웨어 성숙도와 무관한 매출 창출이 가능하다는 점이 강점이나, 시장에서 일반 AI소프트웨어 기업으로 인식될 경우 양자 산업 내 차별성 유지가 과제

➡ IBM Quantum(풀스택 생태계 및 표준화)

▶ 2016년 클라우드 기반 양자컴퓨팅 접근을 개방한 이후, 하드웨어, 소프트웨어, 사용자 커뮤니티를 아우르는 대규모 생태계 구축에 성공

– 양자컴퓨팅을 연구 장비가 아닌 산업용 플랫폼으로 포지셔닝

▶ 120큐비트 ‘Nighthawk’ 프로세서를 기반으로 2026년 말까지 ‘검증된 양자 우위(Verified Quantum Advantage)’ 달성을 공식 목표

– 단일 실험 성과가 아닌 반복 가능성과 산업 문제 적용 가능성을 강조

▶ 오픈소스 개발 도구 Qiskit을 사실상 표준으로 정착시키고, 250개 이상 기관이 참여하는 ‘IBM Quantum Network’를 통해 산업별 유스케이스 확산

- 금융 최적화, 화학 시뮬레이션, 물류 문제 등에서 실증 사례 축적
- ▶ 산업 고객의 초기 도입 관문 역할을 수행하나, 제시한 일정 내 실질적 ROI를 입증해야 한다는 시장의 검증 요구가 점차 강화

➡ Google Quantum AI(연구 중심 하드웨어 및 알고리즘)

- ▶ 2012년 이후 장기적 오류정정(QEC) 로드맵에 집중하며 연구 중심 전략
 - 단기 상용화보다 근본적 기술 한계 돌파를 우선시하는 접근
- ▶ 2025년 말 공개된 105큐비트 칩 ‘Willow’를 통해 표면 코드(Surface Code) 임계값 돌파
 - 큐비트 수 증가에 따라 오류가 지수적으로 감소하는 현상을 체계적 입증
- ▶ ‘Quantum Echoes’ 실험을 통해 기존 슈퍼컴퓨터로는 사실상 불가능한 계산을 수 분 내 수행하며 오류정정 기반 양자컴퓨팅의 가능성 제시
 - 이를 근거로 2029년까지 ‘유용한 오류정정 양자컴퓨터’ 구축 목표
- ▶ 기술적 기준점 역할을 수행하나, 산업 서비스로의 확산 경로가 상대적으로 제한적이라는 점에서 시장 점유율과의 연계는 별도 관리 필요

4.1 양자기술 산업화의 현실과 구조적 제약

➡ 양자기술의 산업화는 기존 정보통신기술이나 소프트웨어 산업과 달리, 시장 수요가 먼저 형성되고 기술이 빠르게 확산되는 방식이 아닌 공공 연구개발과 장기 인프라 구축이 선행되는 구조

▶ 양자기술은 단일 제품이나 알고리즘이 아니라, 장비·제어·환경·소프트웨어·운영 역량이 결합된 복합 시스템 형태로 구현

– 특정 기술 요소 하나의 성과만으로는 산업적 가치가 성립하기 어렵고, 전체 시스템 성숙도가 일정 수준 이상 도달해야만 제한적 활용이 가능해지는 구조

– 이러한 특성은 양자기술 산업화를 단기 상용화 경쟁이 아닌 장기 기술 축적 경쟁으로 규정하게 만드는 핵심 요인

➡ 기술 성숙도 제약은 양자기술 산업화의 가장 근본적인 제한 요소

▶ 양자컴퓨팅은 큐비트 오류, 잡음, 재현성, 장기 안정성 문제로 인해 계산 성능을 지속적으로 유지하는데 구조적 어려움

– 단일 실험적 성과나 데모 수준의 결과가 곧바로 산업 적용으로 이어지기 어려움

– 범용 오류정정, 대규모 시스템 통합, 장기 운용 신뢰성 확보는 중장기 연구 과제

▶ 양자네트워크 역시 얽힘 생성 성공률, 중계기 기술 성숙도, 네트워크 동기화 문제로 인해 광범위한 상용 적용에는 기술적 한계

▶ 양자센싱계측은 상대적으로 기술 성숙도가 높지만, 실험실 성능이 산업 현장 성능으로 그대로 이전되기 어렵다는 점에서 동일한 성숙도 제약

➡ 경제성 제약은 기술 성숙도와 별도로 산업 확산 속도를 제한하는 핵심 요인

▶ 양자컴퓨팅 하드웨어는 극저온 냉각 장비, 정밀 제어 전자계, 차폐·진공 설비, 전문 인력 등 고비용 인프라를 필수적으로 요구

– 장비 구매 비용뿐 아니라 설치·운영·유지보수에 따른 총소유비용이 매우 높게 형성

– 이러한 비용 구조는 양자컴퓨팅을 일반 기업의 내부 IT 자산으로 확산시키기보다는, 공공 연구시설이나 클라우드 기반 접근 모델로 한정시키는 요인

▶ 양자네트워크 및 QKD 역시 통신 인프라 개조, 전용 장비 설치, 키 관리 시스템 통합 등 추가 비용과 운영 부담이 수반

－ 산업화는 전면 도입이 아닌, 특정 고가치 구간이나 제한된 목적 중심의 선택적 적용 형태로 논의

➔ 제도·운영 제약은 양자기술 산업화에서 종종 간과되지만, 실제 도입 단계에서는 결정적 장애 요인

- ▶ 양자기술은 표준화, 인증, 성능 검증 체계가 아직 충분히 정립되지 않은 상태
 - － 산업 고객과 공공 기관은 단일 성능 지표보다 장기 안정성, 재현성, 책임 소재, 유지보수 체계를 중시
 - － 이러한 요구를 충족하기 위해서는 기술 성과 외에도 제도적·운영적 준비 병행 필요
- ▶ 수출통제, 투자 심사, 연구 협력 관리 등 경제안보 도구가 양자기술 영역에 점차 결합되면서, 기업 활동의 제약 요인으로 작용할 가능성 증가

➔ 제약 조건은 양자기술 산업화를 ‘기술 가능성의 문제’가 아니라 ‘도입 조건을 충족할 수 있는가의 문제’로 전환

- ▶ 기술이 존재하더라도 비용, 인력, 제도, 운영 체계가 뒷받침되지 않으면 산업적 활용은 제한
 - － 정책 문서에서는 단일 기술 성과보다, 기술경제·제도 조건이 동시에 성숙하는지를 평가하는 접근이 강조

➔ 양자기술 분야별로 산업화 경로는 상이하게 전개됨

- ▶ 양자컴퓨팅은 특정 문제군 중심의 제한적 활용과 하이브리드 계산 구조를 통해 점진적 산업 참여가 이루어지는 경향
- ▶ 양자센싱·계측은 비교적 적은 시스템 규모로도 성능 우위를 확보할 수 있어, 일부 영역에서 조기 상용화 가능성이 존재
- ▶ 양자네트워크는 보안 및 과학 목적 중심의 특수 인프라로써 제한적 산업화 경로가 현실적으로 논의됨

➔ 종합적으로 볼 때, 양자기술 산업화는 단기적 시장 확산을 목표로 하기보다 장기적 기술 옵션 확보와 생태계 구축을 전제로 접근할 필요

- ▶ 기존 ICT 산업과 동일한 속도와 방식의 상용화를 기대할 경우 정책적·재정적 실패 위험이 큼
 - － 반대로 기술 성숙도, 경제성, 제도·운영 조건을 단계적으로 충족시키는 접근을 취할 경우, 제한적이지만 안정적인 산업 생태계 형성이 가능
 - － 정책적 관점에서는 조기 성과 압박보다 장기적 기술 축적과 실증 기반 확대를 병행하는 전략이 합리적

4.2 안보 및 경제안보 관점에서의 전략적 의미

- ➔ 미국 정부는 양자기술을 특정 무기 체계나 단일 장비로 분류하기보다는, 정보 처리 방식 자체를 변화시켜 장기적으로 전략적 불균형을 초래할 수 있는 기반 기술로 인식하는 경향
 - ▶ 양자기술은 무기의 파괴력이나 사거리와 같은 전통적 군사 성능 지표를 직접적으로 향상시키기보다는, 정보의 계산, 저장, 전송, 측정 전반에 영향을 미쳐 지휘통제, 정보분석, 통신 신뢰성 등 안보 체계의 근간을 변화시킬 수 있는 기술로 평가
 - 미국 정책 문서에서는 양자기술을 개별 군사 장비 개발 과제가 아니라, 정보 우위 확보와 장기 기술 주도권 경쟁의 핵심 요소로 위치시키는 서술 구조
- ➔ 양자컴퓨팅의 안보적 파급 효과는 계산 성능 향상 자체보다 기존 암호 체계에 미칠 잠재적 영향에서 가장 명확하게 보임
 - ▶ 현재 국가 안보, 금융 시스템, 통신 인프라 전반에서 사용되는 공개키 암호 체계는 고전 컴퓨터 환경에서는 실질적으로 해독이 불가능하다는 전제를 기반으로 설계
 - 양자컴퓨팅은 특정 알고리즘을 통해 이러한 암호 체계의 수학적 기반을 약화시킬 가능성이 이론적으로 제기되어 왔으며, 이 가능성 자체가 안보 정책 차원에서는 이미 현실적인 위협 요인
 - 미국 정부는 대규모 범용 양자컴퓨터의 실제 실현 시점과 무관하게, 암호 체계 전환을 선제적으로 준비하지 않을 경우 장기적 정보 노출 위험이 누적될 수 있다는 점을 정책적으로 강조
- ➔ 포스트양자암호(Post-Quantum Cryptography, PQC) 전환을 단순한 기술 연구 과제가 아니라, 국가 차원의 안보 대응 과제로 위치시키는 배경
 - ▶ 미국 연방정부는 양자컴퓨팅이 실용화된 이후 암호 체계를 교체하는 것은 이미 늦을 수 있다는 판단 하에, 현존 시스템을 단계적으로 전환할 수 있는 준비 체계 구축을 정책 목표로 설정
 - 연방 기관을 중심으로 암호 자산 식별, 시스템별 전환 우선순위 설정, 크립토 애질리티 확보가 제도적 요구사항
 - 양자기술이 아직 실험 단계에 머물러 있음에도 불구하고, 안보 정책이 기술 성숙도를 앞서 선제적으로 작동하는 대표적인 사례
- ➔ 양자네트워크와 양자통신 기술은 기존 암호 체계를 전면적으로 대체하는 범용 해법이라기보다는, 특정 고가치 통신 환경에서 보안성을 보완하는 선택적 수단
 - ▶ 양자키분배(QKD)는 도청 시도가 물리적으로 탐지될 수 있다는 이론적 장점을 가지지만, 전용 장비 구축 비용, 네트워크 운용 복잡성, 거리 및 확장성 제약으로 인해 전면적 도입은 현실적으로 어렵다는 평가
 - 미국 정책 문서에서는 양자네트워크를 외교, 군사, 연구 네트워크 등 제한된 고보안 환경에서 활용 가능한 특수 인프라로 분류

— 양자통신을 기존 암호 기술의 경쟁자가 아니라, 다층 방어 체계의 일부로 통합하려는 전략적 판단을 반영

➔ 양자센싱과 양자계측 기술은 기존 안보 체계가 노출하고 있는 탐지, 항법, 시간 동기 분야의 구조적 취약점을 보완할 수 있는 기술로 주목

- ▶ 전자전 환경, GPS 교란, 위성 신호 의존성 증가 등으로 인해 기존 센서 기반 시스템의 신뢰성이 저하되는 상황에서, 양자센싱은 물리적 기준에 기반한 정밀 측정 능력을 제공할 수 있는 대안 기술
- 군사 및 정보 수요가 명확한 영역에서는 양자컴퓨팅보다 조기 실증과 제한적 배치가 가능하다는 점에서 정책적 관심이 집중됨

➔ 안보 관점 양자기술의 또 다른 핵심 쟁점은 기술 유출과 전략적 종속 위험 관리

- ▶ 양자기술은 특정 장비나 알고리즘 하나로 완결되지 않고, 인력, 소프트웨어, 제어 기술, 제조 공정이 결합된 복합 기술이기 때문에 단일 요소의 유출만으로도 장기적 기술 경쟁력이 훼손될 수 있음
- 미국 정부는 연구 협력 관리, 민감 기술 분류, 인력 이동 관리 등을 양자기술 정책의 중요한 구성 요소로 포함
- 양자기술은 수출통제 체계와 외국인 투자 심사 제도의 새로운 적용 대상 영역으로 점진적 편입

➔ 미국의 양자기술 정책에서는 연구개발 투자 정책과 경제안보 도구가 점차 결합되는 구조가 관찰

- ▶ 외국 자본의 전략적 투자, 기술 이전 경로, 국제 공동연구의 범위와 방식이 단순한 연구 협력 문제가 아니라 경제안보 판단의 대상
- 양자기술을 개방형 과학 협력의 영역으로만 유지하기 어렵다는 정책적 인식이 확산
- 동시에 기술 보호와 혁신 촉진 사이의 균형을 어떻게 유지할 것인가가 정책 설계의 핵심 과제

➔ 국제 경쟁 환경에서 양자기술은 단기간의 기술 성과 경쟁이 아니라, 장기적 준비 수준과 제도적 대응 능력을 둘러싼 경쟁의 성격

- ▶ 특정 국가가 조기에 압도적 기술 우위를 확보할 가능성보다는, 기술 성숙 시점에 대비해 누가 더 체계적으로 준비되어 있는지가 전략적 격차를 만들어낼 가능성
- 미국 정책 문서에서는 기술 완성 시점 예측보다는 전환 능력, 인프라 축적, 제도적 대응 체계를 중시하는 접근을 일관되게 유지함

➔ 종합적으로 볼 때, 양자기술의 안보적 의미는 기술이 언제 완성되는가보다, 완성되기 이전에 얼마나 체계적으로 대비했는가에 의해 결정되는 구조로 정리됨

- ▶ 양자컴퓨팅은 여전히 불확실성이 크지만, 암호 전환과 정보 보호는 이미 현재 진행형 안보 과제로 전환됨
- 양자네트워크와 양자센싱은 특정 안보 취약 영역을 보완하는 선택적 수단으로 활용 가능성이 제시됨
- 경제안보 관점에서는 연구개발 투자, 기술 보호, 국제 협력 관리가 통합적으로 작동하는 장기 전략 수립이 핵심 정책 과제로 도출

- ➔ 미국의 양자기술 전략은 단기적 기술 성과 확보나 개별 산업 육성 정책이 아니라, 장기적 기술 주도권 유지와 국가 차원의 전략적 대비를 목표로 설계된 구조적 정책 체계
 - 양자기술은 단일 기술 분야가 아니라 계산, 통신, 측정, 제어 전반을 포괄하는 양자정보과학(QIS)이라는 통합적 개념 하에서 다뤄지며, 이에 따라 정책 역시 개별 기술별 분절이 아닌 범정부 차원의 통합 구조로 운영
 - 기술 성숙 속도가 불확실하고 응용 시점이 상이한 양자기술의 특성 고려한 제도적 설계
- ➔ National Quantum Initiative Act of 2018을 중심으로 구축된 미국의 정책 체계는 법률, 프로그램, 거버넌스, 연구 집행 구조가 단계적으로 연결된 형태
 - 법률은 정책의 기본 방향과 원칙을 명확히 규정하고, 프로그램과 거버넌스 체계는 부처 간 역할 조정과 정책 연속성을 확보하는 기능
 - DOE 국립 QIS 연구센터를 중심으로 한 연구개발 집행 구조는 단기 성과 경쟁보다는 기술 성숙도 축적과 장기 인프라 구축을 목표로 설계
 - 행정부 교체나 예산 환경 변화에도 불구하고 양자기술 정책의 일관성을 유지할 수 있는 기반
- ➔ 기술 동향 분석 결과, 양자컴퓨팅, 양자네트워크, 양자센싱·계측은 동일한 과학적 기반을 공유하지만 산업화 경로와 성숙 속도는 상이
 - 양자컴퓨팅은 특정 문제군 중심의 제한적 활용과 하이브리드 계산 구조를 통해 점진적 산업 참여가 이루어질 가능성 높음
 - 양자네트워크는 보안과 과학 목적 중심의 특수 인프라로써 선택적 적용이 현실적 경로
 - 양자센싱·계측은 비교적 조기 실증과 제한적 상용화가 가능한 영역으로 평가되며, 안보 및 산업 응용에서 실질적 활용 가능성이 가장 먼저 가시화될 가능성
- ➔ 산업화 관점에서 양자기술은 기존 ICT 산업과 동일한 시장 논리를 적용하기 어려운 구조적 제약을 내포
 - 기술 성숙도, 경제성, 제도·운영 조건이 동시에 충족되지 않으면 산업적 활용은 제한
 - 미국 정책은 조기 상용화 압박보다는 공공 연구 인프라 구축과 생태계 형성을 우선하는 접근
 - 단기 수익 창출보다 장기적 기술 옵션 확보와 전략적 선택지 확장을 중시하는 정책 판단
- ➔ 안보 및 경제안보 관점에서 양자기술의 의미는 기술 실현 시점보다 대비 수준에 의해 결정되는 구조

- ▶ 양자컴퓨팅의 잠재적 암호 위협은 포스트양자암호 전환을 현재 진행형 안보 과제로 전환시키는 직접적 계기
 - 양자네트워크와 양자센싱은 특정 안보 취약 영역을 보완하는 선택적 수단
 - 기술 보호, 연구 협력 관리, 수출통제, 투자 심사 등 경제안보 도구가 양자기술 정책과 점진적으로 결합되는 흐름
- ➡ 미국의 양자기술 전략은 ‘언제 양자기술이 완성되는가’보다 ‘완성되기 전에 얼마나 체계적으로 준비하는가’를 핵심 판단 기준 접근
 - ▶ 기술적 불확실성을 전제로 하되, 준비 부족으로 인해 발생할 수 있는 전략적 리스크를 최소화하는 방향으로 정책 설계
 - 기술 성과 예측의 한계를 인정하면서도, 제도·인프라·인력·전환 체계를 선제적으로 구축하려는 현실적 대응 전략
- ➡ 종합적으로 볼 때, 미국의 양자기술 정책은 기술 개발 정책을 넘어 과학기술, 산업, 안보, 경제안보를 연결하는 장기 국가 전략의 일부
 - ▶ 양자기술은 단기적 경쟁 결과보다 중장기적 준비 수준의 격차가 국가 간 전략적 차이를 만들어낼 가능성이 큼
 - 양자기술 정책은 특정 기술 분야에 대한 투자 판단을 넘어, 국가 연구개발 체계 전반의 설계 방향과 직결된 사안

- National Quantum Initiative.** Official Government Portal. <https://www.quantum.gov>
- U.S. Congress.** National Quantum Initiative Act of 2018, Public Law 115–368, December 21, 2018. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227>
- U.S. Congress.** H.R. 6227 – National Quantum Initiative Act, 115th Congress (2017–2018).
- National Quantum Coordination Office (NQCO).** National Quantum Initiative Supplement to the President’s Budget. <https://www.quantum.gov>
- National Science and Technology Council (NSTC).** National Strategic Overview for Quantum Information Science. Executive Office of the President.
- NSTC Subcommittee on Quantum Information Science (SCQIS).** Quantum Information Science Research and Development Portfolio.
- National Quantum Initiative Advisory Committee (NQIAC).** Renewing America’s Quantum Leadership: Strategic Assessment and Recommendations. June 2023.
- U.S. Department of Energy,** Office of Science. Quantum Information Science Research and Development. <https://science.osti.gov/Initiatives/QIS>
- U.S. Department of Energy,** Office of Science. DOE National Quantum Information Science Research Centers. <https://nqisrc.org>
- National Quantum Information Science Research Centers (NQISRC).** About the DOE National QIS Research Centers. <https://nqisrc.org>
- U.S. Department of Energy.** Quantum Information Science at the DOE National Laboratories.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** Quantum Computing: Progress and Prospects. National Academies Press, 2019.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities. National Academies Press, 2018.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** Technical Assessment of the Feasibility and Implications of Quantum Computing.
- U.S. Government Accountability Office (GAO).** Quantum Computing: Federal Efforts to Advance Quantum Information Science.
- U.S. Department of Defense.** Quantum Science and Technology Strategy. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering.

National Institute of Standards and Technology (NIST). Post-Quantum Cryptography Project.
<https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

QuSecure. U.S. Government Quantum Timeline.
<https://www.qusecure.com/us-government-quantum-timeline/>

Preskill, J. **Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond.** Quantum, Vol. 2, 2018.

Arute, F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor.
 Nature, Vol. 574, 2019.

Cao, Y. et al. Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing. Chemical Reviews,
 Vol. 119, 2019.

IBM Research. The Quantum Computing Stack. IBM Technical Reports.

Monroe, C. et al. Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory
 and photonic interconnects. Physical Review A, 2014.

Wehner, S., Elkouss, D., Hanson, R. Quantum internet: A vision for the road ahead.
 Science, Vol. 362, 2018.

Kimble, H. J. The quantum internet. Nature, Vol. 453, 2008.

Pirandola, S. et al. Advances in quantum cryptography. Advances in Optics and Photonics,
 Vol. 12, 2020.

Gisin, N., Thew, R. Quantum communication. Nature Photonics, Vol. 1, 2007.

Giovannetti, V., Lloyd, S., Maccone, L. Quantum-enhanced measurements: Beating the
 standard quantum limit. Science, Vol. 306, 2004.

Degen, C. L., Reinhard, F., Cappellaro, P. Quantum sensing. Reviews of Modern Physics,
 Vol. 89, 2017.

Taylor, J. M. et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution.
 Nature Physics, Vol. 4, 2008.

Ludlow, A. D. et al. Optical atomic clocks. Reviews of Modern Physics, Vol. 87, 2015.

IonQ. Company Overview and Technology Roadmap. <https://www.ionq.com>

Rigetti Computing. Company Overview. <https://www.rigetti.com>

QuEra Computing. About QuEra. <https://www.quera.com/about>

Atom Computing. Company Overview. https://en.wikipedia.org/wiki/Atom_Computing

PsiQuantum. About PsiQuantum. <https://www.psiquantum.com>

Quantinuum. Introducing Quantinuum. <https://www.quantinuum.com>

Reuters. Honeywell-backed Quantinuum plans IPO. <https://www.reuters.com>

IBM Quantum. IBM Makes Quantum Computing Available on IBM Cloud.
<https://www.ibm.com/quantum>

Google Quantum AI. Google Quantum AI. https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Quantum_AI

SandboxAQ. SandboxAQ Launch Announcement. <https://www.sandboxaq.com>
Quantum Xchange. Corporate Overview. <https://quantumxc.com>
Aliro Quantum. Company Profile. <https://www.cbinsights.com/company/aliro-quantum>
World Economic Forum. Aliro Quantum - Technology Pioneer. <https://widgets.weforum.org>
Qunnect. Quantum Networking Technology Overview. <https://www.crn.com>
QuSecure. Post-Quantum Security and Crypto-Agility. <https://www.qusecure.com>
Accenture Newsroom. Accenture Invests in QuSecure. <https://newsroom.accenture.com>
AOSense. Company Overview. <https://aosense.com>
Inflection. ColdQuanta Rebrands as Inflection. <https://inflection.com>
Harvard Quantum Initiative. Research and Policy Perspectives. <https://harvardquantum.com>
Stanford Quantum Initiative. Research Activities and Achievements. <https://qc.stanford.edu>

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

미국 양자정보과학(QIS) 정책 및 동향 분석

발 행 일 2026년 3월

발 행 처 한국산업기술기획평가원 미국 실리콘밸리 거점

작 성 자 남기환

※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식 견해가 아님을 밝힙니다.

※ 본 자료의 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우 반드시 원문 출처를 명시하여야 합니다.

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

