

# Emerging Opportunities of Quantum Technologies in Electronics Industry

Miniaturized Quantum Devices, Lasers, Detectors, Atom/Ion Traps are Poised to Disrupt Aerospace/Defense, Civil Infrastructure, Geophysical Exploration, Transportation, Logistics, Robotics, Telecom, and Datacom Applications

## 전자산업에서 양자기술 분야의 떠오르는 기회

소형 양자 디바이스, 레이저, 검출기, 원자/이온 트랩은 우주항공/국방, 토목, 탐사, 교통, 물류, 로봇, 통신, 데이터 분야에 혁신을 가져온다

Frost & Sullivan

### Contents

I. Executive Summary .....	325
II. 양자전자 기술 조망 - 현황 리뷰 .....	326
III. 양자 관성 센서 .....	328
IV. 양자 중력 센서 .....	329
V. 양자 자력계 .....	331
VI. 양자 시계 .....	333
VII. 양자 컴퓨팅 .....	335
VIII. 양자 통신 .....	338
IX. 코로나바이러스와 양자 기술의 영향 .....	340
X. 생태계와 공급망 분석 .....	341
XI. 사례 - 파트너십/제휴 분석 및 최근 개발 .....	341
XII. 기술 로드맵과 성장 기회 .....	342

## I. Executive Summary

### ❓ 연구 범위

원자와 아원자 Sub-atom를 다루는 양자 기술 Quantum technology은 완전히 새로운 수준의 감도를 갖는 장치가 등장할 수 있게 만들어, 국방, 우주항공, 산업, 상업, 인프라, 교통 및 물류 분야에 큰 영향을 끼칠 수 있는 혁신 잠재력을 갖고 있다. 원자와 이온의 행동을 제어하고 예측할 수 있는 능력은 높은 정확도를 갖는 항법 Navigation, 지하 매장물의 정확한 위치 파악, 지형 및 천연자원 탐사 개선, 정확한 시각의 측정, 아주 복잡한 문제를 기존 컴퓨터에 비해 훨씬 빠르게 풀어내는 컴퓨터, 엄청난 수준으로 향상된 보안과 고속 데이터 통신, 기존에 불가능했던 수준의 고해상도 이미지 획득 등을 가능하게 하는 중요한 기회를 제공한다.

또한 화상 개선, 양자 암호화, 원자 증기나 광학적으로 냉각된 원자를 가진 초소형 증기셀 Vapor Cell 등에 사용될 수 있는 훨씬 작은 레이저, 원자의 포획과 냉각을 위한 원자/이온 트랩 및 회절 격자, 원자 포획 및 냉각, 광자 Photon 검출기 등의 발전을 유도하고 있다.

이 보고서에서 다루는 핵심 질문은 다음과 같다.

1. 양자기술의 전망
2. 전세계 기술 수용 시나리오 및 기술 수용을 위한 계획
3. 기술 개발의 핵심 분야
4. 기술 개발과 수용에 영향을 미치는 핵심 이해관계자
5. 최근 기술 계획
6. 양자 기술의 기술 로드맵

### Article Information

이 보고서는 Frost & Sullivan이 2020년 3월 발간한 “Emerging Opportunities of Quantum Technologies in Electronics Industry”를 Frost & Sullivan의 허가를 받아 한국전력공사가 번역 및 게재합니다. Frost & Sullivan과 한국전력공사는 원문 또는 한국어판의 저작권을 보유하고 있습니다. 한국전력공사와 Frost & Sullivan는 본 원고에 포함된 내용 또는 번역의 정확성을 보장하지 않습니다.

**❓ 핵심 요약 - 해양와 위성 분야 양자전자** Quantum Electronics

**응용 범위**

지금까지 양자 기술 시장은 초기에 잠수함이나 함정 등 군용 선박과 인공위성 등에 적용된 양자 시계에서 통신, 금융 거래, 데이터 센터, 전력망, 지리 탐구 및 개발 등으로 확대되고 있다.

향후 5년간 소형 칩 규모의 원자 시계가 통신 인프라 등에 확대 적용될 것이다.

**양자전자의 기회**

경제적인 소형 양자 중력 센서가 토목 분야에서 지하에 매장된 작은 물체의 탐지, 자원 탐사, 인공 위성을 이용해 잠수함이나 정확한 해저 지형의 탐사, 보안 검색대에서 숨겨진 물체의 탐색 등에 활용될 수 있다.

양자 관성 센서(가속계)는 우선 잠수함 운항이나 우주선, 인공위성과 같은 군수 분야에서 대규모로 활용될 것이다.

**집중 분야**

큐비트 Qubit 안정화, 결잃음 Decoherence, 여러 개 큐비트에 대한 효과적 측정 및 조작 등이 있다.

[역주] 큐비트: 양자컴퓨터의 기본 단위

초저온 큐비트와 달리, 양자 비트에 해당하는 각각의 이온이 전자계에 의해 제자리에 놓이게 되는 포획 이온 Trapped ion 컴퓨터는 포획 이온이 더 오랜 시간 동안 결잃음을 유지하며 실온에서 동작할 수 있는 장점이 있다.

**❓ 핵심 요약 - 항법 분야의 양자 자력계**

**기술 발전**

기존 자이로스코프나 가속계에 비해 양자 가속계와 자이로스코프는 훨씬 큰 감도를 가지고 있어, 초정밀 항법 분야에 사용될 수 있으며, 이 때 크기, 무게, 소비 전력 또한 줄어든다.

향상된 정확도와 높은 생산 신뢰성을 가진 칩 크기의 원자 시계는 GPS Global Positioning System의 정확도를 높이고 통신 시스템의 타이밍을 개선할 수 있는 기회를 제공한다.

**산업에 미치는 영향**

양자 관성 센서를 이용한 토목 공학 기술의 발전을 통해 지속가능한 도시를 만들 수 있다. 더 높아진 해상도를 통해 댐, 다리, 터널 등의 기초 조사를 향상시킬 수 있다.

높아진 해상도를 이용하여 파이프, 케이블, 싱크홀, 지하 저장고, 광산 갱도 등 지하 구조물을 정확하게 탐사함으로써 인프라 개발, 유지 보수, 도로 작업 등을 개선할 수 있다.

**기술 발전**

항법, 전류 감지, 뇌파 측정 등의 분야에서 질소 공동 센터

Nitrogen Vacancy Center를 가진 인조 다이아몬드를 이용한 양자 자력계에 관심이 모아지고 있다.

질소 공동을 가진 인조 다이아몬드에서 질소는 1개의 탄소 원자를 치환한다. 레이저를 이용하여 질소 공동 센터 주위를 회전하는 전자를 여기 Excite시키면 한 개의 광자를 방출한다.

**II. 양자전자 기술 조망 - 현황 리뷰**

**❓ 양자전자와 산업, 방위, 보안, 보건 시장의 혁신**

**양자전자**

양자 기술은 아원자 수준에서 물질의 행동을 관찰하는 양자 역학을 적용하여 센서, 원자 시계, 양자 컴퓨터, 통신, 영상 장비 등 초정밀 전자 장비를 만들 수 있다. 이를 통해 핵심적 방산, 보안, 산업, 상업, 건강 관련 시장의 파괴적 혁신과 변화를 가져올 수 있다. 양자 기술은 지금까지의 전자 장비보다 엄청나게 뛰어난 성능을 가질 것이다.

**양자 기술의 다양한 면**

양자 역학을 통해 양자 시스템을 원자 수준에서 이해할 수 있다. 양자 기술은 양자 얽힘 Entanglement 및 중첩 Superposition을 기반으로 원자와 아원자가 가진 작은 에너지 상태를 이용함으로써 현재의 장비보다 몇 배의 성능을 내는 새로운 장비를 만들게 된다.

[역주] 얽힘: 두 개의 원자가 연결되어 1개의 입자가 즉시 다른 입자에 영향을 끼치는 것

중첩: 양자의 어느 상태가 합쳐져 다른 양자 상태를 만들거나, 각 양자의 상태가 둘 이상의 서로 다른 상태가 모여 나타나는 것

양자 얽힘을 이용하여 양자 정보(원자, 광자, 전자)를 한 곳에서 다른 곳으로 전송할 수 있다.

양자 중첩은 둘 이상의 파도가 서로 겹치는 현상과 유사하다.

**❓ 양자전자의 적용**

양자 얽힘과 중첩 제어 기술은 센서, 컴퓨터, 통신, 영상 분야 등의 혁신과 전환 기회를 제공하여 점점 더 넓게 기존 기술을 대체할 것이다. 예를 들어 가속계, 자이로스코프 등 양자 관성 센서

를 이용하면 더 작은 칩을 이용한 초정밀 항법 장치가 가능해진다.

양자 중력 센서는 훨씬 더 깊은 지하를 탐색할 수 있게 만들어 스마트시티의 인프라를 개선할 수 있게 만들 것이다.

양자 자력계를 통해 의료 영상, GPS를 이용하지 않은 항법, 보안, 지리 및 광물 탐사 분야가 발전할 것이다.

양자를 이용한 시간 측정은 전례 없는 높은 정확도를 가지고 있어, GPS가 없는 환경에서의 휴대 통신 등 다양한 산업에서 점점 더 중요성이 커지고 있다.

양자 컴퓨터는 중첩 상태의 양자와 양자 비트를 이용하여 지금까지의 컴퓨터에 비해 훨씬 더 빠른 속도로 연산을 수행한다. 양자 컴퓨터는 아주 빠른 속도로(수 초 이내) 지금까지의 컴퓨터로는 불가능했던 패턴 인식이나 섞여 있는 대량의 데이터에서 특이점을 찾아내는 것이 가능하다.

양자 통신은 양자 암호키 분배 Quantum Key Distribution와 난수 생성기를 이용하여 사용자간 통신 데이터를 암호화하고 사이버 공격을 무력화한다.

## ② 양자전자의 확산을 유도하는 요인

### 초정밀 전자장비

양자 기술은 항법, 지질 탐사, 영상, 데이터 통신, 강력한 연산 분야 등에서 단광자 검출기를 활용함으로써 높아진 감도, 개선된 응답성, 작은 크기 등을 가진 센서, 영상 장비, 타이밍 장비 등의 확산을 가능케할 잠재력을 가지고 있으며, 이 가능성을 인식한 많은 자금 투자가 양자 기술에 몰리고 있다.

### 상황 인지 개선

개선된 레이저 및 검출 기술은 안개, 먼지 및 기타 위험 상황에서 높은 운영 능력을 필요로 하는 분야의 수요를 만족시킬 수 있다.

### 안전한 통신

데이터 암호화를 위한 양자 암호키 분배 등 양자 통신은 광자 검출 능력의 발달을 통해 안전한 개인간 통신을 보장할 것이다.

### 연산 능력의 향상

양자 컴퓨팅은 양자 검출기 발달, 레이저, 광학적 트랩 등을 활용하여 의학 및 재료 개발, 금융 거래, 물류, 사이버 보안 등의 분야에서 훨씬 빠른 연산 능력과 데이터베이스 검색 수요를 만족할 수 있다.

## ③ 양자전자 확산의 중요한 도전 - 소형화

### 소형화

양자 기술이 큰 규모의 시장 확대를 달성하는데 큰 걸림돌은

진정한 의미의 소형화된 양자 장비 또는 실제 활용에 있어 현 장비에 비해 훨씬 뛰어난 기능 및 소형화를 보여주는 양자 장비를 만드는 과정의 수많은 난제를 해결하는 것이다. 예를 들어 양자 관성 센서의 경우 크기는 줄이는 동시에 충분한 수의 원자를 포획하고 냉각할 수 있어야 하는데, 이런 양자 중력 센서는 지금까지 너무 크고 비쌌다. 양자 시계 역시 기능 개선, 높은 생산 수율, 정확도와 함께 작은 크기와 무게, 낮은 소비 전력이 필요하다.

### 진동 처리

양자 가속계는 비행기의 진동(소음)에 취약하다. 양자 자이로 스코프에서는 원자 속도를 늦추기 위한 고속의 원자와 레이저 냉각 원자를 이용하기 위한 저속 원자의 필요성 사이에 균형을 맞추어야 한다. 양자 관성 센서는 낮은 정확도로도 충분히 잘 사용되고 있는 MEMS 센서 및 항법 장치에 사용되는 고급 관성 센서(석영 가속계, 광섬유 자이로, 링레이저 자이로)와의 경쟁에 직면해 있다.

### 감도

불필요한 자계를 차단하지 않고도 동작할 수 있는 매우 민감한 양자 자력계를 만드는 데도 문제점이 존재한다. 양자 자력계는 가전 분야에 사용되는 저급 MEMS 자계 센서 및 자계의 특이점을 찾아내기 위한 Fluxgate 자력계, Photon Precession 자력계, Overhauser 자력계 등 고급 자력계와의 경쟁에 직면해 있다.

### 단광자 검출기의 검출 능력

개선된 감지 능력, 속도, 감도, 양자 효율을 가진 단광자 검출기를 개발하는데도 문제점이 있으며, 양자 암호키 분배의 송신단과 수신단 사이의 거리를 늘려야 할 필요성도 존재한다.

양자 암호키 분배에 사용되는 단광자 검출기는 모든 양자를 감지하는데 문제가 있을 수 있다. 또한 단광자 검출기는 초저온에서 동작하기 때문에 냉각 기능으로 인해 가격이 올라간다. 물론 노이즈에 덜 취약하고 실온에서 훨씬 민감한 단광자 검출기 및 얽힌 광자쌍 Entangled photon pair을 훨씬 잘 생성할 수 있는 라이더 Light detection and ranging, Lidar를 개발할 수도 있다.

### 규모의 확대와 범위

양자 컴퓨팅은 전자 상태를 조작하기 위한 냉각의 필요성으로 인해 매우 비싸다. 냉각된 양자 비트(큐비트)는 양자 얽힘이 풀리면 결을 잃을 수 있어 연산에 부적합하게 된다. 포획된 이온을 수 백 또는 수 천 큐비트로 확대한 것에도 문제점이 있어 매우 큰 데이터를 처리하는데 필요한 수 천 큐비트를 측정하고 조작할 방법 역시 필요하다. 또한 양자 컴퓨터를 위해 외부의 전자계를 차단해야 할 수도 있다.

### III. 양자 관성 센서

#### ❓ 높은 감도를 갖는 양자 자이로스코프 및 가속계

##### 양자 가속계와 자이로스코프의 중요성

양자 가속계 및 자이로스코프는 일반적인 자이로스코프나 가속계에 비해 훨씬 높은 감도를 제공한다. 양자 자이로스코프 및 가속계를 통해 초정밀 항법을 구현하는 동시에 크기, 무게, 전력소비를 줄일 수 있다.

수중이나 실내에서 효과적 사용이 불가능하고, 재밍 Jamming, 기상 또는 고층 건물 등에 의해 신호가 막힐 수 있는 GPS에 비해 양자 가속계 및 자이로스코프는 몇 배의 성능을 제공한다.

더 나은 위치, 방향 및 속도 측정을 위해 자이로스코프, 가속계, 자기계와 같은 센서가 비행기, 선박, 잠수함, 유도 미사일, 우주선 등 공중이나 지상 탑재체에 점점 더 많이 사용되면서, 작고 가벼우며, 전력소모가 낮은 센서에 대한 수요가 증가하고 있다. 하지만 양자 관성 센서는 여전히 덜 크고, 환경에 덜 민감하면서 동시에 더 넓은 동작 범위를 갖도록 제작되어야 한다.

##### 양자 장비를 위한 레이저

양자 센서에서 레이저는 원자의 양자 특성을 개선하기 위한 냉각 장치로 사용된다. 원자의 특성이 열 특성을 결정 짓는 수준에 이르기 전까지는 연속발전 Continuous wave 레이저가 주로 사용되어 왔다.

시료의 분광적 특성을 시험하기 위해 펄스 레이저도 사용할 수 있다.

냉각에 사용되는 레이저는 특정 값에 맞춰져 있어야 하며, 레이저의 굵기 역시 메가헤르츠 내지 그 이하이어야 한다.

원자 냉각과 가속 또는 속도 측정의 용이성을 위해 관성 센서에 사용되는 레이저는 높은 전력 공급, 낮은 노이즈, 넓은 범위의 조정 능력 등을 활용할 수 있다.

#### ❓ 전통적인 항법 시스템과 MEMS 센서를 파괴하는 양자 관성 센서

##### GPS 항법

양자 가속계 및 자이로스코프는 GPS 기반의 항법 시스템을 대체하여 위성을 사용하지 않는 방식을 제공할 수 있다. 양자 가속계는 덜 민감한데다 예러에 취약한 압전 방식이나 커패시터 가속계를 대체할 수 있다. 양자 관성 가속계는 인공위성을 사용할 수 없거나, 인공위성 기반의 항법 시스템이 없는 상황에서 최고의 가능성을 가진다. 에어 택시나 헬리콥터에도 사용될 수 있다. 향후 10년간 양자 가속계는 상대적으로 민간 항공 분야에 제한적인 기회를 가질 수 있다.

##### MEMS 관성 센서

MEMS 관성 센서는 낮은 가격과 높은 생산량을 내세워 큼직한 크기의 기계식 자이로스코프를 대체해 왔다. 양자 관성 센서는 MEMS 관성 센서를 대체할 수 있는 잠재력이 있다.

##### 기계식 자이로스코프 및 가속계

양자 관성 센서 또한 고성능 항법 시스템 분야에서 아직은 주력 기술인 기계식 자이로스코프 및 가속계를 대체할 수 있다.

##### 석영 가속계

양자 가속계 역시 택티컬 등급 Tactical Grade의 석영 가속계를 대체할 수 있다.

[역주] 택티컬 등급: 관성 측정 장치의 운전 중 오류, 즉 IRBS가 시간당 0.5도에서 5도 사이인 경우에 관성 측정 장치에 부여된 등급

##### 광학식 자이로스코프

가격, 크기, 소비전력 측면에서 장점이 있는 양자 자이로스코프는 택티컬 등급의 광학식 자이로스코프를 대체할 수 있다.

#### ❓ 양자 관성 센서의 적용 효과

##### 위치 측정

양자 가속계는 인공위성 없이도 긴 시간 동안 기차나 선박 등 큰 물체의 위치를 매우 정확하게 측정할 수 있다.

##### 자율 항법 장치

충분히 작고 값싼 양자 관성 센서는 지상, 수상 및 수중의 자율 운전체를 위한 항법, 수중 케이블 및 파이프라인의 유지보수, 원유 및 가스 채굴 등에 사용될 수 있다. 소형 양자 자이로스코프는 MEMS 자이로스코프에 비해 낮은 노이즈 특성을 보일 수 있다.

##### 국방

양자 관성 센서는 높은 가치를 가진 군용 잠수함 항법에 처음 활용될 것으로 예상된다. 우주 및 인공위성 분야에도 역시 단기간에 사용될 것이다. 또한 군용 항공기 같은 정밀 항공 분야에도 활용될 것이다.

##### 수송

선박이나 기차 같은 대형 운반체에 사용될 수 있다. 사고 및 충돌 방지를 위해서는 모든 기차의 위치를 알아야 하는데, 양자 관성 센서는 각 기차가 정확히 목적지에 도착할 수 있도록 경로를 최적화하는데 도움이 될 수 있다. 이를 위해 양자 관성 센서는 원자의 냉각과 원자 특성을 측정하는데 매우 강력하고, 노이즈가 낮은, 정밀하게 제어된 레이저를 사용할 수 있다.

## 가전

MEMS 가속계 및 자이로스코프는 휴대전화에 전화기 방향에 맞는 디지털 콘텐츠를 제공하는 데 사용되고 있다. 반도체 칩 크기의 양자 가속계는 훨씬 싼 가격으로 차량 항법, 보행자 추적, 실내 위치 측정 등의 기능을 제공할 수 있다.

## ③ 최근 개발 현황

### M Squared (영국)

2018년 M Squared Laser와 임페리얼 칼리지 대학교 Imperial College London는 선박이나 기차 등 대형 운반체용으로 냉각 레이저를 사용하는 이동 가능한 양자 가속계를 선보였다. 2019년 8월 M Squared는 Scottish Enterprise로부터 양자 분야 연구개발과 사업화를 가속하기 위해 350만불을 받았다. M Squared는 스트래스클라이드 대학교 University of Strathclyde에 새로운 양자 연구시설을 열었다. 주요 사업 분야로는 양자 중력계, 가속계, 인공위성을 사용하지 않는 항법 장치를 위한 스트론튬 격자 원자 시계, 금융 시간 기록, 심해 탐구, 양자 컴퓨팅을 위한 혁신적 레이저 등이 있다.

### 보쉬 Bosch (독일)

보쉬는 2018-2021년 유럽연합 EU의 MACQSIMAL (Miniature Atomic vapor-Cells Quantum devices for Sensing and Metrology Applications) 프로젝트에 참여하였다. MACQSIMAL 프로젝트는 양자 기반 센서의 개발을 목적으로 한다. 센서와 관련된 첨단 물리학 지식이 MEMS 원자 증기셀 플랫폼에 접목되었다. 보쉬는 드리프트 안정성 Drift stability을 개선하기 위해 패러데이 효과를 감지하는 데 원자 증기의 핵공명효과 Nuclear resonance effects를 활용하는 양자 자이로스코프 개발에 노력하고 있다.

### Airbus Blue Sky (독일)

영국 브라운호퍼 Fraunhofer, PA 컨설팅, 영국 브라운호퍼 연구원, ColdQuanta 등이 참여하는 High Bandwidth Inertial Atom Source (high-BIAS) 프로젝트에서는 우선 가속계, 자이로스코프, 관성 측정장치 등 관성 센서에 적용할 목적으로 원자간섭법 Atom interferometry을 이용하여 높은 대역폭을 가진 소형 초저온 원자 소스를 개발하고 있다. 소형의 고진공 시스템에 소형 레이저를 접목하여 크기, 무게, 전력 소비와 측정률 등의 문제를 해결했다. 초저온 원자 소스의 프로토타입은 가속치를 더 민감하고 빨리 측정하기 위해 많은 원자를 모을 수 있는 더 작은 새로운 센서의 개발에 기반이 될 것이다. 이 시스템은 항공 분야에 적용할 목적이다.

## 주요 기업

- ColdQuanta (미국)
- AO Sense (미국)
- Vector Atomic (미국)
- Muquans (프랑스)
- iXBlue (프랑스)

## ③ 양자 관성 센서와 확대되는 투자

### iXBlue Photonics (프랑스)

iXBlue Photonics는 유럽연합이 자금을 대는 Inertial Sensing Based on Quantum-Enhanced Levitation Systems (IOLev) 프로젝트에 참여하여, 양자 검출과 노이즈 감쇄 및 분리를 결합한 양자 부상 Levitation을 활용하는 혁신적 관성 항법 시스템을 개발하고 있다. 관성 항법 시스템은 위성 시스템 및 지진학 분야에 우선 적용될 예정으로, 산업체 수요를 맞추기 위해 저주파 범위의 관성 측정이 가능해질 것이다. 이 프로젝트를 통해 사물인터넷 장비의 관성 항법 분야가 진일보할 것이다.

### ColdQuanta (미국)

2019년 가을 ColdQuanta는 미항공우주국 NASA의 Civilian Commercialization Readiness Pilot Program (CCRPP)로부터 아주 작고 단단한 초저온원자 시스템의 개발에 1백만불을 받았다. 양자 통신, 양자 컴퓨팅, 시뮬레이션 등은 물론 양자 시계, 관성 항법, 라디오 주파수대 감지 등에 활용할 수 있는 소형 시스템을 개발할 것이다. 개발 목표는 휴대 가능한 양자 장비에 적합한 초소형의 초저온원자 시스템을 개발하는 것으로, 초저온 기기의 부피를 400 리터에서 40 리터로 줄이게 된다. 이 시스템은 지상부터 인공위성까지 다양한 플랫폼에 보급 가능한 원자 시계, 초저온원자 기반 센서, 관성 측정 장치를 제공할 예정이다.

### 탈레스 Thales (프랑스)

탈레스는 양자 센서, 양자 통신, 양자 컴퓨팅에 집중해 왔다. 사우스햄튼 대학교 University of Southampton와 협력하여 장시간의 항법이 가능하도록 만들기 위해 양자 물질파 Matter Wave 간섭을 활용하는 자이로스코프를 개발하고 있다.

## IV. 양자 중력 센서

### ③ 개요

양자 중력 센서는 중력 측정과 매질물 근처의 중력장 측정 등에 유례가 없는 정확도를 선사한다. 지금까지 지하 깊이 묻힌 물체를 정확하게 탐지하기 위한 양자 경사계 Gradiometer의 성능을 높이는데 깊은 관심이 있어 왔다. 양자 경사계는 노이즈 제거 기능을 통해 얇은 곳에 묻힌 물체를 현재에 비해 1.5-2배 정확하게 보여준다.

## 산업계의 영향

양자 중력 센서는 다음의 분야에서 더 자세하고 싸게 탐사를 할 수 있도록 하며, 더 깊은 곳에 묻힌 훨씬 작은 물체를 찾아낼 수 있다.

- 토목
- 정유, 가스 및 광물 탐색
- 항법
- 선박 또는 항공기를 이용한 측량
- 잠수함 탐지 등 국방

## 혁신 잠재력

크기, 가격, 소비 전력, 설치 시간 등의 감소와 높아진 내구성 등을 가진 양자 중력 센서는 원유, 가스, 광물 등의 지질 탐사나 철도 건설에 영향을 줄 수 있는 매장물 탐사 등의 분야에서 성장 기회를 갖게 될 것이다.

## 양자 중력 센서의 이점

- 더욱 자세하고 효율적으로 위험 매장물이나 천연자원을 탐사
- 인프라 개발을 위한 댐, 터널, 다리 등의 기초 탐사 개선
- 지진, 화산, 눈사태 등을 훨씬 빠르고 정확하게 탐지
- 지구 중력장에 대한 이해 확대를 통한 항법 개선

## ❓ 중력 탐지 - 양자 가속계의 초기 기회

가속계는 중력 측정에 사용된다. 따라서 중력 측정은 양자 가속계가 지금 당장 또는 단기간에 활용될 수 있는 분야이다.

중력계는 중력가속나 국지적인 중력장을 측정한다. 중력계는 인간 활동으로 인한 중력의 흔들림이나 변화를 측정할 수 있다. 중력계는 가속계보다 훨씬 민감하여 지구 중력의 미세한 변화도 측정할 수 있다.

MEMS 가속계가 현재 팔리는 중력계보다 크기나 비용 측면의 이점을 제공할 수 있지만, 원유나 가스 탐지에 사용되는 MEMS 가속계는 미세한 중력을 측정하기에는 적합하지 않다.

1,000불 이하의 양자 중력계는 레이저와 광간섭계를 사용하는 큼지막한 절대 중력계 및 서로 다른 지역들간 중력 가속도의 미세한 차이를 감지할 수 있는 스프링 기반의 상대 중력계 등을 대체할 수 있다. 스프링의 물리적 특성은 시간이 지나면서 변하기 때문에 스프링을 사용한 중력계는 주기적인 교정이 필요하다.

## ❓ 양자 중력 센서의 활용

### 잠수함 항법 장치

양자 중력계의 GPS를 사용할 수 없는 아주 값비싼 군사 자

원, 즉 잠수함 항법 장치 등에 우선 활용될 것이다. 양자 절대 중력계는 선박이나 항공기에 탑재하여 측지학 분야나 지구물리학 분야에서 활용될 수 있다.

## 지속가능한 도시

양자 중력 센서를 통해 토목 분야의 발전과 이를 통한 지속 가능한 도시를 만들 수 있다. 더 높은 해상도를 가진 장치를 이용함으로써 댐, 다리, 터널 등의 기초 조사를 개선할 수 있고, 파이프, 케이블, 지하 구조물, 싱크홀, 광산 등의 장애물을 더욱 정확히 탐지함으로써 인프라 시설의 개발, 유지보수 등을 개선할 수 있다.

## 지하 탐사

양자 중력계의 또 다른 활용처는 토목 분야의 지하 탐사, 원유 및 광물 탐사, 해저 구조물 위치 파악, 지하수면 감시 등과 같이 훨씬 정확하고 덜 비싼 조사 분야이다. 레이더와 전기적 측정 등 지하를 들여볼 수 있는 현존 기술은 상대적으로 크고, 얇은 곳에 있는 물체만을 탐지할 수 있어 2-3미터보다 깊은 곳의 파이프는 탐지 못할 수도 있다. 중력 센서는 매장되어 있는 물체나 공동에 의한 지구 중력의 변화를 측정함으로써 훨씬 더 깊이 들여다볼 수 있다.

## 지진 예측, 국방, 보안

고감도 중력 센서는 지진, 화산, 기타 지질학적 활동 등을 탐지하고 예측하는데 사용될 수 있다. 작고 값싸며 매우 민감한 양자 중력계는 국방과 보안 분야에도 활용될 수 있다. 컨테이너 무게로 인한 중력의 변화를 측정하여 차량에 의한 핵 위협을 감지하거나, 터널 내부의 반군을 추적하고, 땅에 묻어 놓은 무기를 찾아내고, 벽 뒤의 상황을 영상으로 만들기 위해 벽을 통해 중력 변화를 감지할 수 있다.

## ❓ 격차 분석: 기회와 걸림돌

### 기회

원유, 가스, 광물 등의 탐사, 건설 전 매립물 탐사, 철도 하부의 매립물 탐지 등이 값싸고, 작고, 더 민감한 중력 센서/중력계를 우선 활용할 것이다.

양자 중력 센서는 중력 가속도의 측정에 레이저와 광학 간섭계를 사용하는 커다란 재래식 FG5 절대 중력계를 대체할 수 있다.

### 걸림돌

현재 실험실에서 사용되는 양자 중력 센서는 장비를 켜 때 많은 시간이 소요되고, 전력 소비가 크며, 측정 및 제어 장비의 부피가 크데다 아직 현장에서 사용될 만큼 튼튼하지 않다. 중력 경사계는 지하를 측정할 수 없다.

양자 센서, 양자 암호키 분배, 양자 컴퓨팅 등의 활용에 가장 핵심적임 걸림돌은 결국 비용이다.

## 양자 중력 센서의 활용 전략

양자 중력 센서가 시장에 큰 영향을 끼치기 위해서는 센서 가격을 내려야 하며, 센서 옆을 지나가는 기차처럼 주변 환경에 영향을 받지 않으면서도 매우 민감한 양자 중력 센서를 비용 효과적으로 만들 수 있어야 한다.

더 많은 산업계 및 개발자의 참여를 통해 양자 중력 센서가 시장 진입에 필요한 시간을 줄일 수 있다.

## ② 최근 개발 현황

### AO Sense (미국)

2018년 AO Sense와 미항공우주국 고다드 센터 *Goddard Space Flight Centre*는 원자 간섭계를 이용하여 시간에 따라 변하는 중력장을 측정하는 소형 양자 중력 경사계의 프로토타입을 개발하였다. 펄스레이저가 원자 파형을 둘로 나누어 서로 다른 경로로 진행하도록 조작한다. 원자 파형은 중력의 영향을 받아, 두 파형이 다시 합쳐질 때 발생하는 간섭에 영향을 미친다.

### 글래스고 대학교 *University of Glasgow* (영국)

글래스고 대학교는 EPSRC Squeezed Light quAntum MEMS Gravimeter-SLAM Gravimeter 프로젝트에 참여하여, 최대 4배의 감도로 MEMS 중력계 출력을 측정하는데 활용되는 광자쌍 *Correlated photo pair*를 사용하는 양자 조임 광원 *Quantum squeezed light source*를 개발하고 있다.

### Gravity Pioneer Project (영국)

RSK Environment가 주도하고 있는 Gravity Pioneer Project에서는 광산 등 지하 매립물을 찾아내고, 싱크홀 규모나 인프라 상태를 점검하는데 사용되는 양자 중력계를 개발하기 위해 지난 2018년 12월 UK Research and Innovation으로 6백만 파운드(770만불)을 받았다고 발표하였다. 새로 만드는 양자 중력계는 기존에 비해 감도와 측정 속도가 각각 2배와 10배 개선되었다. Teledyne e2v, 영국 브라운호퍼, Altran, Geomatrix Earth Science, Magnetic Shields, UniKLasers, Silicon Microgravity, Optocap, QinetiQ, 버밍엄 대학교, 사우스햄튼 대학교 등이 공동 참여한다. 2년 이내에 프로토타입을 개발할 예정이다.

진공에서 자유 낙하하는 원자의 미세한 변화를 측정하기 위해 초저온원자 간섭, 루비듐 원자 및 레이저 등을 사용하는 중력 센서를 개발하여, 지하 공동, 파이프, 터널, 석유 및 가스 저장소 등이 있는지 점검하는데 적용할 수 있다.

### 주요 기업

- Muquans (프랑스): 양자 절대중력계를 공급한다.
- Teledyne e2v (영국): 지하 매립물을 찾아내는 양자 중력 센서를 개발 중이다. 5년내 양자 중력 센서를 상업화할 계획이다.
- Gooch & Housego (레이저)

- M Squared (영국, 레이저): 절대 온도 0도보다 살짝 높은 온도에서 양자 상태에 있을 때 나타나는 파동성-입자성에 따른 원자 간섭을 감지하는 원자 간섭계를 이용한 양자 중력계를 상용화 중이다. 센서는 중력 가속도에 비례한 위상 변화를 측정한다. 펄스 레이저를 정밀하게 비춰 초저온원자를 쪼개거나, 재결합함으로써 원자 간섭계를 만들어 위상 변화를 측정한다.
- UnikLasers (영국, 레이저)
- Optocap (영국, 레이저 모듈)
- BAE Systems (영국): 버밍엄 대학교와 공동으로 중력계 및 시계 등 초기 양자 센서를 개발 중이다.
- ColdQuanta (미국)

## V. 양자 자력계

### ② 개요

자력계는 지구의 자계 변화를 측정하여 지진 활동, 구조물, 자기나 화학적 차이에 따른 암석의 자기 이상 측정 등의 정보를 제공하는 지구물리학적인 조사에 주로 사용된다.

### 기술 분야

양자 자력 센서는 박테리아나 약 성분의 전달을 위한 자기성 입자의 추적, 암 세포를 구분하는 것 같은 의료 진료 등에 사용되는 초저온원자 자기 현미경 *Cold atom magnetic microscope*, 보건, 지리, 보안 등에 사용되는 이온 어레이 자기분포계 *Ion array gradient magnetometer*, 의료 영상이나 보안을 위한 열원자 자력계 *Thermal atom magnetometers* 등에 사용된다.

뇌의 전기적 활동에 의해 발생하는 자기장의 작은 변화를 측정하는 뇌 촬영법 분야에서는 실온 환경에서 사용가능한 양자 자력계에 대한 관심이 있어 왔다.

항법, 전류 감지, 뇌파 감지 분야에서 질소 공동 센터가 있는 양자 자력계에 대한 관심이 커지고 있다.

초정밀 항법과 위치 파악에 양자 자력계를 이용하는 것이 엄청난 관심을 끌고 있다. 하지만 자기 차폐물이 필요 없는 감도 높은 양자 자력계를 만드는 것과 해상도를 높이기 위한 양자 자력계용 신호 처리 장치를 만드는 데 문제가 있다.

## 연구개발 및 상업화 계획

서식스 대학교 University of Sussex 연구팀은 극저주파 및 마이크로웨이브 자계를 지금까지 선례가 없는 정도의 최고 감도로 측정하기 위한 이테르븀 Ytterbium 이온 자력계를 개발하고 있다.

전자 장비는 이온 마이크로칩/마이크로트랩 Ion microchip/microtrap을 통해 어느 한 주파수에 집중하면서 다른 주파수는 모두 제거할 수 있다. 이 장비는 공항 근처에서 날아다니는 드론의 존재, 속도, 방향 등을 감지하거나, 잠수함에서 적의 무기를 탐지하거나, 폭발물이나 마약을 검색하는데 활용될 수 있다.

연구자들은 실험실에서 프로토타입을 이미 개발했으며, 비전문가도 사용할 수 있는 장비를 공동 개발할 업체를 모색하고 있다. 장비는 2-3년 내에 상용화될 것이다.

중성 원자 트랩 Neutral atom trap이 정적인 저주파 직류장을 측정할 수 있다면, 이온 마이크로칩/마이크로트랩은 무선주파수나 마이크로웨이브파를 측정하는데 강점이 있다.

서식스 대학교는 소형 이온 트랩을 이용하여 양자 센서, 양자 컴퓨터, 시뮬레이터, 시계 등에 활용될 수 있는 개선된 기능을 구현하는데 연구를 집중하고 있다.

## 양자 자력계의 다양한 활용

### 보건

양자 자력계는 뇌 활동으로 인해 발생하는 자기장의 미세한 변화를 측정하는 뇌 촬영기법, 몸 안에 삽입하지 않고 심장을 관찰하는 웨어러블 다바이스 등에 활용될 수 있다.

### 지구물리적 탐사 및 항법

지구물리적 탐사, 원유 및 광물 탐사, GPS를 활용하지 않는 관성 항법 장치 등에 사용될 수 있다. 관성 항법 장치에서 자력계는 지구 자계의 방향을 측정하는 나침반으로 동작한다.

### 위치 측정

소형 초정밀 양자 자력계는 양자 중첩을 이용해 중력과 자계의 작은 변화를 감지하여 수 센티미터 이내로 위치를 파악할 수 있다.

### 가전

가속계 및 자이로스코프와 함께 관성 항법 장치에 사용된 양자 자력계는 게임이나 가상 현실과 같은 가전 분야에서 손이나 손가락의 움직임을 감지하여 좌표 정보를 제공할 수 있는 엄청난 능력을 가지고 있다. 1불 또는 그 이하의 양자 자력계는 휴대전화의 방향 감지나 나침반 프로그램 등에 활용될 수 있다.

## 정밀 위치 측정 분야의 양자 자력계

관성 항법 장치에서 자력계는 나침반처럼 동작하여 지자계의 방향을 측정한다.

소형 초정밀 양자 자력계는 중력 또는 지자계의 미세한 변화를 측정하여 수 센티미터 범위로 위치를 알아낼 수 있다.

질소 공동 다이아몬드 역시 자계 감지에 사용될 수 있다. 질소 공동 센터를 마이크로웨이브파에 노출 후 강도 하락의 차이를 측정함으로써 자계를 도출해 낼 수 있다. 실온에서 단일 질소 공동을 적용할 수도 있다. 다수의 질소 공동 센터를 사용하는 경우 매우 정확한 자계 방향 및 강도를 측정할 수 있다. 나침반 기반의 항법 및 전류 감지 등에 활용된다.

질소 공동 센터 인조 다이아몬드를 활용하는 소형 자력계는 항법 장치 등에서 지자계 이상점 탐지 능력을 높여 자계의 강도와 방향을 모두 측정할 수 있다. 질소 공동 센터 인조 다이아몬드는 뇌파를 이용한 기계 제어 등 다른 곳에도 활용할 수 있도록 개발 중이다.

## 양자 자력계 활용을 유인하는 기회

### 가전

양자 자력계의 초기 시장은 높은 감도를 활용하여 지진 활동, 광물, 금속, 지중 구조물이나 물체 등을 비용효과적으로 조사하는 분야가 될 것이다

양자 자력계는 지상이나 해상의 이상점이나 물체를 추적하고 찾아내기 위한 방법을 개선할 수 있다.

1차 및 2차 코일을 가진 Fluxgate 자력계가 항법 장치의 나침반에 많이 사용되고 있는데, 부피가 큰 데다 응답속도도 느리다.

### 보건

Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)를 대체하는 휴대용 뇌 촬영장치 등 보건의 분야는 양자 자력계의 중요한 연구개발 대상이다. 다소 장기에 걸쳐 제한적인 물량을 가진 틈새 시장이 될 것이다.

다른 활용법으로 비삽입 심장 감시 장비가 있는데, 심전도장비를 대체할 수 있다.

### 조사 및 항법

저가의 양자 자력계가 가진 잠재적 시장으로 가상 공간에서 사용자와 상호 반응하여 가상 공간을 돌아다닐 수 있도록 도와주는 제스처 인식 Gesture recognition 및 가상 현실 Virtual reality이 있다.

이방성 자기저항 Anisotropic magnetoresistance, AMR 방식의 자력계는 니켈-철 박막필름을 이용하여 전류와 자계 방향 사이의 각도에 따라 전기적 저항치가 변하는 것을 측정함으로써 휴대전화의 저가 관성 항법이나 방향 감지에 사용된다. 하지만 양자 자력계보다 감도가 떨어진다.

## ❓ 활용 확대의 걸림돌

### 감도

별도의 자계 차폐물 없이 동작할 수 있는 고감도 양자 자력계 개발 및 해상도를 높이기 위한 양자 자력계 어레이의 신호 처리 기술에 현재 문제가 있다.

### 소비자 가전 및 보건 분야의 기술 경쟁

제스처 인식이나 가상 현실 분야에서는 다른 감지 기술이 사용 중이다. ToF Time of Flight 센서, MEMS 기반 가속계 및 자이로스코프, 이방성 자기저항 센서 등이 휴대전화의 나침반으로 사용되고 있으며, 가상 현실 및 제스처 인식용 휴대장비나 웨어러블 디바이스에 활용 가능하다. 또한 양자 자력계는 터널자기저항 Tunnel Magneto Resistance, TMR 센서 및 SQUID 센서 등과 경쟁해야 할 수도 있다.

### 자계 이상점 탐지 분야의 기술

자기 이상점을 탐지하기 위한 방법으로 Fluxgate 자력계, 자계 강도는 측정하지만 방향은 측정할 수 없는 Photon Precession 자력계, Overhauser 자력계 등이 이미 활용되고 있다. 원유 탐사를 위해 현재 사용되는 Photon Precession 자력계는 해상도에는 아무 문제가 없으며, 가격만이 높을 뿐이다.

## ❓ 최근 개발 현황

### QuSpin Inc. (미국)

QuSpin은 스핀 편극된 루비듐 원자를 통과하는 레이저 측정 방식의 소형 광학 펌프 자력계 Optically Pumped Magnetometers, OPM를 개발하였다. 자력계는 자계를 매우 정확하게 측정할 수 있다.

OPM은 자기 뇌촬영에 사용되는 SQUID에 비해 더 높은 감도를 가지고 있으며, 냉각 장치 없이도 동작한다. (증기셀이 가열되지만 외부는 실온 정도로 유지된다.)

이를 이용해 실온에서도 작동하는 자기 뇌촬영 장치를 제공할 수 있어, 센서 위치 선정에 큰 유연성을 부여한다.

QuSpin의 자력계는 반도체 레이저와 실리콘 포토다이오드를 사용한다. 또한 복잡한데다 소형화하기 힘들었던 레이저 냉각도 필요하지 않다. QuSpin의 QZFM Quantum zero field magnetometer Gen-2는 고감도 벡터 자력계로 두 축 방향의 자계를 동시에 측정할 수 있다. 레이저와 광학 부품은 센서 내부에 빽빽하게 통합되어 있으며 센서는 전용 신호 처리 장치에 연결되어 자계 차폐실 내부에서 독립적으로 사용할 수 있다.

### Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics

2019년 4월 Fraunhofer-Gesellschaft는 IAF, IPM, IWM 등 다수의 브라운호퍼 계열사와 공동으로 Qmag Light house 프로젝트에 착수하였다. 목표는 실험실 수준의 고해상도 양자 자력계를 산업 활용이 가능하도록 만드는 것이다. 미세한 자계를 측정하기 위해 단전자를 이용하며, 이를 통해 나노 전자회로의 분석, 숨겨져 있는

내부의 균열 탐지, 자기공명촬영장치 소형화 등 새로운 활용 방법이 가능하게 될 것이다. 나노 전자회로를 최고 해상도로 측정하기 위해 다이아몬드 질소 공동 센터에 기반한 자력계 및 고감도 광학 펌프 자력계에 기반한 측정 시스템 등을 실증할 예정이다.

### 주요 기업

- Twinleaf (미국)
- 보쉬 (독일): 질소 공동 자력계를 개발 중으로, 기계 제어에 뇌파를 사용하는 방법을 검토 중이다. 보쉬는 Horizon 2020 ASTERIQS (Advancing Science and Technology through Diamond Quantum Sensing) 프로젝트에 참여하여 고순도 다이아몬드 질소 공동 센터에 기반한 양자 센서를 활용하려 한다.
- 록히드마틴 Lockheed Martin (미국): 질소 공동 인조 다이아몬드 자력계를 개발 중이다.
- Element Six (영국): 양자 자력계 개발을 위한 질소 공동 다이아몬드를 공급하고 있다.
- BAE Systems (영국)

## VI. 양자 시계

### ❓ 정밀한 시간 측정이 가능한 양자 시계

양자 시계는 세슘 원자, 알루미늄 원자, 루비듐과 같은 원자의 진동 주파수를 이용하는 전기적 발진기가 내부에 들어있는 매우 정확한 시계이다. 원자 수가 많아질수록 원자 시계의 정확도는 개선된다. 얽힘 원자의 수가 늘어날수록 원자 시계는 정확하다. 발진원이 원자 현상에 의존하므로, 석영의 생산 공정이 얼마나 정확한지에 따라 결정되는 석영 시계보다 원자 시계가 훨씬 정확하다.

### 양자 시계 분야의 연구개발

레이저 냉각 루비듐 마이크로웨이브 원자 시계는 안전하고 안정적인 시스템을 제공할 수 있다.

하지만 전자계 스펙트럼의 광학 부분과 관련된 전자적 전이를 사용하는 광학적 양자 시계는 마이크로웨이브 시계보다도 나은 정확도를 갖는다.

루비듐 원자와 레이저를 사용하는 소형 칩 규모의 광학 원자 시계는 항법 장치, 통신망, 인공위성의 예비용 등에 활용될 수 있

다. 이 시계는 세슘 원자를 이용해 마이크로웨이브 영역에서 동작하는 표준 원자 시계보다 훨씬 높은 주파수대에서 동작한다.

높은 정확도와 신뢰성을 가진 생산 공정에서 만든 칩 크기의 원자 시계는 GPS 시스템을 개선하고, 통신 시스템에 더 정확한 시간 정보를 제공할 수 있다.

MIT와 벨그라드 대학교 University of Belgrade의 연구자는 단광자를 이용하여 3,000개의 원자를 얽기 위해 약한 레이저 및 단광자 검출기를 사용하였다. 2개 이상의 광자가 얼마나 멀리 떨어져 있건 서로 영향을 줄 수 있도록 얽혀졌다. 대량의 원자를 얽을 수 있는 능력을 통해 훨씬 정확한 원자 시계와 강력한 양자 컴퓨터를 만들 수 있다. 연구자는 방출되는 광자의 전계가 들어오는 광자의 전계의 방향과 직각을 이루고 있는 영자 얽힘을 관찰했다.

### ❓ 양자 시계의 기회

많은 산업 분야가 인공위성을 이용한 항법과 시계에 많이 의존함에 따라 정확한 시계는 점점 더 중요해지고 있다. 인공위성을 이용한 항법은 응급 서비스, 항공, 수송, 철도, 농업, 금융 거래, 데이터 네트워크 등에 활용되고 있다. 이런 시스템들은 신호 방해, 태양풍, 인적 오류 등에 취약하다.

원자 시계가 양자 기술 중 가장 먼저 상업화되고 많이 활용되는 분야다.

원자 시계는 GPS 위성에서 사용된다 GPS는 양자 시계가 탑재된 인공위성에서 신호를 받고, 각 위성에서 받은 신호의 시간 차이를 측정하여 공간 내 위치를 찾아낸다. 인공위성에 사용되기 위해서는 더 작은 크기의 원자 시계가 필요하다.

관성 항법 장치는 항공기 유도, 미사일과 잠수함의 위치 파악 등을 위해 자이로스코프와 가속계 뿐만 아니라 시계도 사용한다.

### ❓ 활용 확대의 걸림돌

#### 부피

정확도 개선과 함께 크기, 무게, 소비전력, 가격 등의 하락, 강건성 Robustness 개선 등의 필요성이 있다. 원자 시계는 석영 시계보다 크거나 무거운 휴대용 장치에 활용하는 것이 제한된다.

#### 자계 취약성

원자 시계는 표유전계 Stray magnetic or electric field, 진동, 충격, 온도에 취약하다. 또한 측정 속도를 개선해야 한다.

#### 칩 크기의 원자 시계

칩 크기의 원자 시계는 세슘 시계의 정확도와 안정성을 달성하는데 문제가 있다. 또한 신뢰성 및 높은 생산 수율을 달성하는데도 문제가 있어 왔다. 칩 크기의 원자 시계 활용은 자기광 포획 Magneto-optical traps, MOT의 개발을 통해 확대될 수 있다.

### ❓ 양자 시계 활용

#### 국방

양자 시계는 우선 연구 및 상업적 목적의 인공위성에 사용될 수 있다. 칩 크기의 원자 시계는 잠수함이나 선박의 GPS 예비 시스템, 무인 항공기, GPS를 활용할 수 없는 환경에서의 항법과 같은 국방 분야는 물론 네트워크, 금융 거래, 수송 분야 등의 인공 위성을 이용한 항법 시스템 등에 사용될 수 있다. 또 다른 초기 적용 분야로 디지털 고주파 무전기, 재밍, 무인 항공기 등 국방도 있다.

#### 항법

양자 시계는 더욱 정확하게 물리적 핵심 자산을 찾아내 추적하거나, 핵심 자산과 데이터 통신을 수행하는데 사용될 수 있다.

칩 규모의 원자 시계는 임무 수행에 GPS 백업 시스템이 꼭 필요한 휴대용 항법 장치에 사용될 수 있다.

#### 유도 장치

칩 크기의 원자 시계는 해저 원유, 가스 및 광물 탐사를 위한 지진파 신호의 시간 측정과 같이 GPS 시간 신호를 사용할 수 없는 환경에서 활용될 수 있다. 또한 심해 다이빙, 광산, 지진 연구 등에도 사용될 수 있다. 무선으로 조작되는 급조 폭발물의 폭발을 막기 위한 휴대용 신호 방해 장치나 GPS 신호가 끊긴 상태에서도 무인 항공기를 더 멀리 그리고 오래 비행하도록 만드는 데 활용될 수 있다. 게다가 군용 무전기가 GPS 연결이 끊어졌을 때에도 여전히 동기화된 채로 남아 있어 빠른 시간내에 암호화된 신호를 복구할 수 있도록 해준다.

#### 통신

원자 시계는 주파수 및 위상 동기화에 활용될 수 있다.

#### 양자 컴퓨팅

레이저 광선을 이용하여 만들어진 광자를 사용하는 원자 격자 시계는 큐비트 게이트 제어 같은 양자 컴퓨팅에도 활용될 수 있다.

### ❓ 최근 개발 현황

#### National Institute of Standards and Technology (미국)

2018년 미국 국립표준기술연구원 National Institute of Standards and Technology는 몇 개의 레이저를 이용하여 수 천개의 이테르븀 원자를 냉각하고 광학 격자 트랩에 가둔 후 에너지 준위를 여기하는 방식의 광학 시계 두 개를 운영해 왔다. 두 개의 시계는 최고 수준의 세슘 시계에 보다 100배 더 정확하다. 또한 한 쌍의 광학 시계를 통해 국립표준기술연구소는 최고 수준의 마이크로웨이브 시계보다 100배에 달하는 정확도를 달성하였다. 2019년 국립표준기술 연구소는 세 개의 칩과 주변 전자 회로 등으로 구성되어, 류비듬

원자의 진동을 이용하여 훨씬 낮은 주파수로 동작하는 칩 규모의 원자 시계를 실증하였다. 이 시계의 동작에는 단지 275 mW 만이 전력이 필요하다. 이 원자 시계는 전통적인 발진기의 대체, 통신망과 항법 시스템, 위성의 예비용 시계 등으로 활용될 수 있다.

2004년경 칩 규모의 원자 시계 실증에 이어 국립표준기술연구소는 칩 규모의 원자 시계 기술을 제작사에 기술 이전하였다. Symmetricom은 2011년 첫 상업용 원자 시계를 선보였다. 이후 2013년 Symmetricom은 역시 칩 규모의 원자 시계를 제작하는 Micvorsemi사에 인수되었다.

국립표준기술연구소가 개발하고 Micvorsemi사가 공급하는 상업적 수준의 원자 시계는 Coherent Population Trapping CPT 시계를 칩 크기로 만든 시계이다. CPT 시계에서는 다이오드 레이저를 변조하여 필터로 동작하는 원자 증기를 통과하게끔 한다. 전송되는 빛의 변화는 변조 주파수를 원자의 공진에 맞추기 위해 사용된다. CPT 기반의 증기셀 주파수를 사용하는 마이크로웨이브 시계는 소형화가 가능하다.

### TMD Technologies (영국)

2019년 TMD Technologies는 스트래스클라이드 대학교, 글래스고 대학교, Kelvin Nanotechnology와 공동으로 원자 시계, 관성 센서, 자력계, 무선주파수 감지, 중력계 등과 같은 휴대용 초저온 원자 기술을 위한 휴대용 자기광 트랩을 개발하였다.

TMD Technologies는 바스 대학교 University of Bath 및 Chronos Technology와 협력하여 휴대용 원자 시계를 개발해 왔으며, 양자 섬유 시계 Quantum Fibre Clock 프로젝트에서는 현존 기술보다 훨씬 작고 가벼운 효율적인 원자 시계를 만들기 위해 세슘 증기를 채운 중공 광섬유를 사용했다. TMD Technologies는 칩 규모의 원자 시계 개발에는 집중하지 않고, 원자 시계의 성능 개선에만 집중해 왔다.

## ❓ 대학 협력 현황

### Teledyne (영국)

Teledyne e2v는 통신망의 기준시, 천문학, 철도 및 항공 등 교통, 보안 통신망 등의 국방, 발전 및 배전망 등 전력 산업 등을 위한 칩 규모의 원자 시계를 개발해 왔다. 일차적 목표는 소형화된 크기로  $10^{-12}$  보다 정확한 원자 시계를 개발하는 것이다.

MINAC 프로젝트에서는 National Physical Laboratory과 공동으로 위성 항법 시스템인 GNSS를 사용할 없을 때 휴대기기용 통신망 및 5G 기지국, 신뢰성 있는 에너지 공급 등에 적용할 수 있는 정확한 시간 동기화를 위한 소형 세슘 원자 시계의 프로토타입을 개발하고 있다. 또한 Teledyne e2v는 2018년 발표된 Kairos 프로젝트를 주도하고 있다. 이 프로젝트에서는 다양한 중요 인프라 서비스에 정확한 시간 정보를 공급하기 위해 레이저 냉각 세슘 원자를 이용하는 소형 원자 시계의 프로토타입을 개발할 계획이다.

### LocatorX (미국)

옥스퍼드 대학교 University of Oxford가 개발한 기술인, 주파수 발전을 위해 내면체성 풀러렌 Endohedral fullerene을 사용하는 반도체

소형 원자 시계 기술에 대한 독점적 권리를 가지고 있다.

### Muquans (프랑스)

Muquans는 레이저 냉각 원자의 양자 조작을 이용한 기준 시간 및 주파수 장치를 공급하고 있다. 양자 시계는 마이크로웨이브 공동 안에서 레이저를 이용해 절대온도로 1,000분의 몇 도까지 냉각된 큰 원자 구름의 Microwave Interrogation을 이용한다.

### Oscilloquartz (스위스)

Oscilloquartz는 차세대 통신망 및 항법 등에 정확한 시간 정보 제공을 위한 세슘 원자 시계를 공급하고 있다.

### AccuBeat (이스라엘)

AccuBeat의 나노 원자 시계 루비듐 원자 시계는 Coherent Population Trapping를 이용한다.  $41.1 \text{ mm} \times 35.3 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 의 크기와 75 g의 무게를 가지면 1.2 W 이하의 전력 소비를 가지고 있다. GPS 수신기, 무인 항공기, 자율 센서 등에 활용될 수 있다.

### AOSense (미국)

AOSense는 휴대용 광학 주파수 기준 장치(원자 시계) 및 자기 참조 주파수 장치를 설계했다. 마이크로웨이브 시계를 개선하기 위해 레이저 쿨링과 트랩을 적용할 수 있다. 5 W 이하의 전력을 소비하는 원자 소스 또한 개발했다. 소형 원자 시계는 인공위성에 활용될 수 있다.

## VII. 양자 컴퓨팅

### ❓ 전례가 없는 연산 능력

양자 컴퓨팅은 큐비트의 중첩 상태로 데이터를 부호화 한다. 지금까지의 컴퓨터는 비트 단위로 저장된 정보를 사용한다. 저장된 데이터는 결국 1과 0의 표현되는 일련의 동작을 거치게 된다.

### 양자 컴퓨팅의 기본 원리

전통적인 컴퓨터는 1이나 0으로 표현되는 비트 단위로 정보를 저장한다. 양자 컴퓨터는 중첩 상태의 양자 입자를 사용한다.

중첩 상태에서 입자는 동시에 두 방향으로 회전하면서 큐비트를 구성하여 1과 0을 동시에 표현할 수 있다. 입자는 동시에 두 개의 서로 다른 상태로 존재할 수 있다.

이론적으로 큐비트의 특별한 특성을 이용함으로써 양자 컴퓨터는 현존하는 슈퍼컴퓨터보다 훨씬 빠른 속도로 연산을 수행할 수 있다.

일반적인 양자 컴퓨터는 전통적 컴퓨터와 양자 컴퓨터의 능력을 결합하여 각 큐비트의 양자 수준에서 가능한 모든 동작을 지원한다. 모든 큐비트는 양자 얽힘 상태에 있으며, 큐비트의 상태는 바뀔 수 있다.

반면 아날로그 양자 시뮬레이터는 일반적 컴퓨터가 아닌, 물성 모사 같은 양자물리학의 특정 문제를 해결하기 위해 설계된다.

향후 10년간 특수목적용 양자 컴퓨터가 주로 사용될 것이다.

## ❓ 양자 컴퓨팅의 기회

양자 컴퓨팅은 컴퓨터의 연산 방법을 많이 바꿀 것이다.

양자 컴퓨터는 새로운 물질의 분자 상호반응에 대한 이해, 고효율 태양광 전지, 청정 에너지를 위한 촉매 개발, 비료 대체품의 개발 등에 활용될 수 있다.

양자 컴퓨팅의 초기 활용 분야로는 신물질이나 약물 개발을 위한 화학 반응 시뮬레이션 등의 양자 시뮬레이션, 인공지능 및 머신러닝의 개선, 물류 최적화 등이 있다.

양자 컴퓨팅이 금융 서비스, 에너지, 보건, 제약, 군사 분야에 활용될 기회가 늘고 있다.

## ❓ 활용 확대의 걸림돌

### 큐비트간 연결 부족

대형 양자 컴퓨팅을 만들어 양자 상태를 정확하게 조작하기가 힘들다. 이 요인으로 인해 큐비트간 연결성이 제한된다.

전자 상태를 조작하기 위해서는 전자의 움직임을 늦추기 위한 냉각 기술이 필요하다. 하지만 특정 양자 컴퓨터에서는 회로가 거의 절대온도 0도로 유지되어야 하는 반면, 트랩 이온은 실온에서도 동작할 수 있다. 트랩 이온을 이용한 방법은 이온을 잡아 두기 위해 진공을 사용한다. 실온에서 진공 상태가 유지되지만 이온 자체는 절대온도 0도에 가깝게 유지된다.

### 코히어런스 Coherencne 손실

양자 컴퓨터는 전통적 컴퓨터보다 느린데다, 냉각 필요성으로 인해 비쌌다.

초저온 큐비트는 노이즈, 열, 전자계 변동, 환경이나 제어선에 의한 진동이나 입자 회전 등으로 인해 코히어런스와 정보를 잃게 된다. 양자 코히어런스 상태에서 두 개의 파동원이 동일한 위상 차이 및 주파수를 갖는다.

큐비트는 코히어런스 보존을 위해 주변 환경에서 분리되어야 하는데, 이로 인해 양자 컴퓨팅의 확산이 제한될 수 있다.

## 알고리즘 재작업의 어려움

알고리즘은 양자 컴퓨팅의 발달을 막은 중대한 문제이다. 지금까지 쓰던 알고리즘을 쉽게 양자 컴퓨팅용 알고리즘으로 바꿀 수 없다.

동일한 구별 불가능성 Indistinguishable property을 갖는 단광자를 만들기도 힘들다. 이 문제는 두 개의 광학적 공동을 만들고 이를 통해 빛을 걸러내는 방법으로 완화할 수 있다. 한 개의 공동은 효율 높게 광자는 수집하고, 다른 하나는 구별 불가능성을 유지하면서 더 오랜 시간 동안 광자를 저장한다.

## 측정의 어려움

광학 양자 컴퓨터의 큐비트를 늘리는 데 사용되는 모드 Mode 상태와 단광자 수준에서 그들의 관계를 측정하기가 어렵다. 각 양자에 의해 나타나는 극성, 주파수, 시간, 위치 등의 각 모드를 단양자 검출기로 측정하기 위해서는 수 천개의 검출기가 필요할 수도 있으며, 한 개의 양자 컴퓨터에 1,200만불의 비용이 소요될 수 있다.

향후 5-10년 동안 양자 컴퓨터와 전통적 컴퓨터가 합쳐진 하이브리드 컴퓨터가 틈새 시장에서 가장 최적의 해답이 될 것이다. 양자 컴퓨터는 전통적 컴퓨터와 나란히 병렬 프로세서로 동작한다.

## ❓ 다양한 산업계의 양자 컴퓨팅 활용

<b>바이오의약</b>	분자 구조의 시뮬레이션 및 모델링
<b>재료</b>	물질의 특성 분석 및 개발
<b>최적화</b>	최적 방문 경로와 같은 복잡하고 해결에 오랜 시간이 걸리는 문제를 해결하기 위해 수 많은 변수의 조합을 다루거나, 장비의 설계, 가격, 성능 등을 최적화
<b>의약 개발</b>	약품 기전을 효과적으로 시뮬레이션하여 효과적이고 값 싸게 의약품 개발
<b>사이버 보안</b>	위협 조기 감지 및 잠재적 위험 완화, 데이터 보안과 암호화 개선
<b>물류</b>	물류회사의 경로, 일정, 물량 최적화
<b>인공지능</b>	인공지능을 이용하여 의학 연구, 금융 거래, 소비자 행동 등의 방대한 자료를 검색하고 핵심 정보를 추출

## ❓ 최근 개발 현황

### Jiao Tong University (중국)

단광자 신호 및 상관도를 측정하는 Correlation on Spatially Mapped Photon-Level Image (COSPLI) 기술을 개발하였다. 이를 통해 대형 광양자 컴퓨터의 양자 입자를 측정할 수 있다.

CCD 카메라는 단광자에 민감하지만, 신호가 노이즈에 의해 묻히게 된다. 연구자들은 노이즈를 줄여 CCD 카메라의 각 픽셀에서 단광자를 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 또한 COSPLI 기술을 통해 어느 모드의 광자 상관도를 공간에 매핑함으로써 CCD 카메라로 측정할 모든 모드의 상관도를 알 수 있다.

### 유니버시티 칼리지 런던 University College London, 케임브리지 대학교 University of Cambridge, 히다치 케임브리지 연구소 Hitachi Cambridge Laboratory (영국)

연구팀은 기존 실리콘 소재 전자 부품을 활용함으로써 훨씬 효과적으로 대량의 양자 컴퓨터를 생산할 수 있는 기술을 실증하고 있다. 절대온도 수 1/1000도에서 동작하는 다수의 양자 디바이스를 읽기 위해 CMOS 동적 액세스 구조가 적용되었다.

회로의 각 셀은 FET 트랜지스터와 양자점 디바이스를 가지고 있다. 큐비트에 소형 칩을 사용하고, 큐비트를 연결하기 위해 더 큰 칩을 사용할 수 있다.

### 주요 기업

- D-Wave Systems
- Rigetti Computing
- IBM
- Google
- 1QB Information Technologies
- 보쉬 (QuSoft, 암스테르담의 양자 소프트웨어 연구소 등과 협력하여 보쉬가 엔지니어링, 인공지능 및 기계학습 분야에서 양자 컴퓨팅을 어떻게 활용할 수 있는지 조사 중이다. 보쉬는 비용 효과적이고 신뢰성 높은 제품 생산을 이끌어낼 수 있는 최적화 등에 적용할 수 있을 것으로 예상했다.)

## ❓ 카고메 금속 분야의 양자 컴퓨팅

### 마이크로소프트 Microsoft (미국)

오차율을 줄이기 위해 재료 자체에 정보를 부호화할 수 있는 위상학적 접근법에 기반한 확장 가능한 기업용 양자 컴퓨터.

전자로 구성된 큐비트는 전자를 나눔으로써 데이터 중복 효과를 내 간섭에서 데이터를 보호할 수 있다. 마이크로소프트는 전자를 제어하기 위해 반도체 및 초전도 알루미늄을 사용하였다.

## MIT (미국)

2018년 MIT, 하버드 대학, 로렌스버클리 국립연구소 Lawrence Berkeley National Lab는 각 원자층이 카고메 Kagome 격자 구조로 만들어진 철과 주석층으로 구성된 전도성 크리스탈, 카고메 금속을 생산하였다. 크리스탈 내부의 층을 통해 전류가 흐르며, 전자는 격자 구조 내부에서 방향이 바뀌거나 휘어진다. 이 현상을 이용하여 초전도와 유사한 완전한 조건을 구현할 수 있다. 에너지 손실 없이 원자층을 통해 전기가 흐르는 카고메 금속은 양자 컴퓨터의 새로운 양자 회로에 활용될 수 있다.

## ❓ 질소 공동 다이아몬드와 양자 정보의 유지

### 서식스 대학교 (영국)

Microwave-based Noise Reduction in Trapped Ion Quantum Computers: 임페리얼 칼리지 대학교와 협력하여 트랩 이온 컴퓨터에 영향을 미치는 미주 전자계 Stray electromagnetic field나 전압 강하와 같은 노이즈를 줄일 수 있었다. 이를 통해 복잡한 문제를 풀 수 있도록 큐비트의 수를 늘린 대형 양자 컴퓨터를 만들 수 있다. 여기된 개별 원자(이온)의 양자 효과를 조작하고 트랩 이온 컴퓨터의 노이즈 영향을 줄이기 위해 무선주파수 및 마이크로웨이브 신호가 사용되었다.

### 질소 공동 다이아몬드 개발

질소 공동을 가진 인조 다이아몬드에서 질소 원자는 한 개의 탄소 원자 자리를 차지한다. 레이저를 이용하여 질소 공동을 회전하는 전자를 여기하여 단광자를 방출할 수 있다.

전자는 위와 아래 방향의 중첩 상태를 가질 수 있어 큐비트로 사용될 수 있다. 중요한 고유의 광학 흡수 및 방출 특성을 가지고 있다. 강건한 전자 회전 상태가 가능하고 실온에서 동작 가능하기 때문에 질소 공동 다이아몬드는 향후 10년 내로 양자 컴퓨팅에 활용될 것이다.

질소 공동 다이아몬드는 저노이즈 환경에서 더 오랜 시간 동안 양자 정보를 보존할 수 있다. 하지만 큐비트의 수는 반드시 이웃하는 탄소 원자 수와 동일하여야 하기 때문에 질소 공동 다이아몬드는 확장성의 문제를 가질 수도 있다.

## IonQ (미국)

이온 트랩 기반의 양자 컴퓨터를 개발하였다. 큐비트들 사이의 차이점이 운영성을 해칠 수 있는 초전도 큐비트와 달리 동일한 이온들을 적용함으로써 확장을 용이하게 한다. 79개의 이온 트랩 큐비트를 이용하는 양자 컴퓨터를 내놓았다.

### 주요 기업

- PSIQuantum
- Silicon Quantum Computing
- SparrowQuantum
- Xanadu
- Quandela
- 허니웰 Honeywell

## VIII. 양자 통신

### ❓ 양자 리피터 Repeater 및 양자 키 분배기

양자 통신은 양자 기술을 이용하여 1과 0으로 구성된 전통적인 정보의 안전한 전송을 제공하며, 양자 정보(큐비트)를 전송한다. 양자 암호화는 대칭 암호키의 분배에 양자 물리를 사용한다.

양자 정보의 전송은 광자나 원자 같은 물리적 큐비트를 이용하거나, 큐비트 또는 원자나 광자의 상태가 한 장소에서 다른 곳으로 물리적 입자의 이동없이 전달되는 양자 순간이동 Quantum teleportation을 이용한다.

#### 양자 리피터 및 양자 암호키 분배

양자 리피터는 장거리에 걸쳐 양자 얽힘과 큐비트 분배를 가능케하며, 많은 실활용에 필요하다. 양자 리피터를 활용하면 전송 거리가 리피터 사이에 해당하는 세크먼트 단위로 나뉘며, 손실이 줄어든다. 양자 얽힘은 양자 메모리로 순간 이동하여 장거리 연결을 쉽게 만든다. 양자 리피터는 양자 메모리가 중요하며, 양자 메모리의 저장 기간 및 효율 개선에 많은 관심이 집중되고 있다.

지금은 성숙되어 상업화 단계에 도달했지만, 초기 양자 통신 또는 양자 암호화 기술에서는 전통적인 데이터를 암호화하는 데 양자 암호키 분배가 적용되었다. 양자 암호키 분배는 메시지를 암호화 및 복호화하기 위해 통신 당사자들에게만 알려진 비밀키를 생성한다. 정보는 일반적으로 단광자에 부호화 된다. 불연속 변수 양자 암호키 분배 Discrete variable QKD에서는 양자 정보가 불연속 변수로 부호화 되고, 단광자 검출기가 수신된 양자의 상태를 측정한다. 연속 변수 양자 암호키 분배 Continuous-variable QKD에서 정보는 간섭 레이저의 진폭과 위상에 부호화 되며 수신단에서 호모다인 검출기 Homodyne detector를 통해 측정된다.

양자 암호키 분배는 난수 생성 능력에 의해 결정된다. 난수 생성기는 암호화된 정보의 송신에 필요한 비밀키로 작동하는 일련의 난수를 생성한다.

양자 암호키 분배를 이용하는 경우 거리와 정보율은 한 방향으로만 보낼 때 300 km 이상으로 발전해 왔다.

양자 암호키 분배는 향후 확실한 보안성을 보장해 줄 것이다. 전통적인 암호키 분배와 달리 양자 암호키 분배에서는 복제불가정리 Non-cloning theorem에 따라 암호키 분배 과정에서 보내지는 양자 신호를 도청할 수 없다.

양자 암호키 분배는 양자 인터넷 통신의 데이터 보안을 제공함으로써 강력한 양자 컴퓨터에 안전한 접근성을 제공할 수 있다.

### ❓ 양자 통신에 동력을 제공하는 기회

#### 인둠-갈륨-비소 단광자 검출기

Afterpulsing 효과가 없는 인둠-갈륨-비소 단광자 검출기는 양자 암호키 분배의 속도를 올릴 수 있다.

#### 단광자 검출기

실온에서 동작하는 단광자 검출기는 저전력, Discrimination sensitivity 개선, 낮은 암전류율 Dark current rate, 낮은 손실률 및 노이즈, 빠른 시분해능, 장거리 운영성 개선 및 고효율 등을 제공한다. 속도 및 효율 개선을 통해 단광자 검출기는 보안이 보장되는 통신 거리를 늘리고 통신 유연성을 확보할 수 있다.

#### 공개 암호키

양자 통신은 현존하는 보안 통신의 방법을 바꿀 수 있다. 취약한 난수 생성 능력, 양자 컴퓨터의 등장과 연산 능력의 향상, 새로운 공격 전략 등이 공개 암호키를 위협하고 있다.

#### 초전도 나노 와이어 단광자 검출기 (SNSPD)

만일 가격만 많이 낮출 수 있다면 단광자 검출기보다 낮은 노이즈, 높은 감도 및 효율을 갖는 초전도 나노 와이어 단광자 검출기가 특히나 연구 및 시험 분야의 양자 통신에 사용될 수 있다.

#### 데이터 연결 보호

양자 통신은 데이터 저장소의 데이터 연결은 물론 저장소의 데이터 보호를 개선할 수 있다.

#### 인공위성 기반 양자 암호키 분배

양자 암호키 분배의 거리는 광자의 비율을 줄이는 광섬유 손실이나 물리적인 공극 등으로 인해 수 백 킬로미터로 제한된다. 인공위성 기반 양자 암호키 분배를 이용하면 무시할 수 있는 손실 특징으로 인해 범지구적 규모의 양자 통신 네트워크를 구축할 수 있다. 예를 들어 범지구적 네트워크는 양자 상태의 전송을 위해 신뢰성 있고 효율적인 우주-지상간 통신 연결을 활용할 수 있다.

#### 양자 통신의 활용

- 국방 분야나 정부 등의 양자 암호화 솔루션은 해커나 기타 보안 위협으로부터 침입이나 데이터 절도를 방지할 수 있는 보안 통신 링크 등에 우선 사용될 수 있다.
- 지능형 전력망 등 중요 인프라
- 재해 복구
- 도박 기계
- 통신망
- 모바일 장비
- 데이터 저장
- 위상
- 데이터 센터나 기업 캠퍼스를 위한 LAN 확장
- 무인항공기 등 항공

## ❓ 활용 확대의 걸림돌

### 부채널 공격 Side-channel attack에 대한 취약성

양자 암호키 분배의 성능이 향상되고 있지만, 비트올은 여전히 문제점이다.

상용 양자 암호키 분배 시스템은 단광자 검출기의 운영 원리를 이용한 부채널 공격에 취약하다. 측정기에 독립적인 양자 암호키 분배 Measurement-Device-Independent-QKD, MDI-QKD를 사용하여 양자 암호키 분배의 보안을 높일 수 있지만, 기존의 양자 암호키 분배보다 구현하기가 어렵다. 검출기에 독립적인 양자 암호키 분배 Detector-Device-Independent-QKD, DDI-QKD는 다수의 큐비트를 부호화하여 단광자에 독립적으로 조작될 수 있어 훨씬 효율적으로 부채널 공격을 막을 수 있다.

완전히 장비로부터 독립적인 양자 암호키 분배 Device-independent QKD protocol는 궁극적인 보안 수준을 제공할 수 있겠지만 구현이 어렵고 암호키율이 낮은 문제가 있다.

### 강건한 양자 암호키 분배 프로토콜의 필요성

적절히 높은 데이터 전송률을 가진 장거리용 양자 암호키 분배를 개발하고 구현할 필요가 있다.

고속 양자 암호키 분배가 장거리 지점간 연결에서 발생하는 기본적인 제약이다. 제약을 극복한 장거리용 고속 양자 암호키 분배의 구현을 위해 양자 신호를 받아 양자 상태를 망가뜨리지 않고 다시 전송할 수 있는 양자 리피터와 양자 통신망을 개발해야 한다.

양자 암호화 및 양자 암호키 분배의 기술 확대를 위해 현존하는 통신 인프라에도 적용할 수 있어야 하며, 사용자와 사용자의 사업 형태 등을 고려한 보안 방법을 개발해야 한다.

실생활에 더 많이 사용되기 위해 양자 암호키 분배는 강건성 및 고성능과 함께 낮은 가격을 제공해야 한다. 불연속 변수 양자 암호키 분배의 정보 전달자 역할을 하며 실온에서 동작 가능한 단광자 검출기를 사용함으로써 이 문제점을 어느 정도 해결할 수 있다. 양자 암호키 분배는 원래 단광자 검출기와 함께 소개되었다. 칩 크기의 양자 암호키 분배 및 새로운 프로토콜을 이용하여 양자 암호키 분배 시스템의 가격을 낮출 수 있다.

## ❓ 최근 개발 현황

### IDQ Quantique (스위스), Fortinet (미국)

2020년초 IDQ Quantique과 Fortinet는 사설네트워크 VPN를 통해 전송되는 정보의 장기적 보안을 확보할 수 있도록 IDQ Quantique의 양자 암호키 분배를 Fortinet의 Security Fabric에 연결하는 협력을 시작한다고 발표했다. Fortinet의 FortiGate 차세대 방화벽은 유럽전기통신표준협회 ETSI의 암호키 규격을 준수하는 양자 암호키 전용 인터페이스를 제공할 것이다. 유럽전기통신표준협회는 안전한 양자 암호화 표준을 정의하였다. Fortinet의 Security Fabric은 사용자와 디바이스를 인식하여 네트워크에 연결하거나 차단하고, 사이버 공격에 자동으로 대응하는 사이버 보안 플랫폼이

다. 협력을 통해 표준 인터페이스 위에 안전한 양자 사설네트워크를 구축한 첫 상품이 될 것이다. 이 상품은 데이터 센터 연결이나 5G 통신망 등에 사용될 것이다.

## UNIQORN (유럽연합)

유럽연합이 주관하는 Revolutionizing the Quantum Ecosystem from Fabrication to Application Horizon 2020 프로젝트의 목표는 현재 미터 단위의 크기를 갖는 복잡한 시스템을 1/1000 단위의 칩에 통합하여 양자 통신을 가능케하는 광통신망 통합 기술을 개발하는 것이다. 프로젝트에서는 진정한 난수 생성과 암호키 분배에 사용되는 양자 통신망의 핵심 장비를 개발할 것이다. 핵심 장비로는 현재 대량 생산되고 있는 전자 장비와 유사한 기술 플랫폼에 적용될 수 있는 특수 목적의 광원, 검출기 기술 등이 있다. 이런 종류의 부품은 양자 얽힘 등 양자역학을 이용하는 소형 광학 시스템의 기초가 된다. 양자역학에 따르면 일부 위상의 전계 강도가 코히어런트 상태의 양자 불확실도보다 낮은 경우 빛은 압착 Squeezed 된다. 압착 광레이저는 기존의 레이저보다 낮은 양자 노이즈를 가지며, 광자가 없는 레이저에 비해서도 낮은 양자 노이즈를 갖는다.

## ❓ 양자 난수 생성기 개발 동향

### Q-DOS (Quantum key distribution for Drones with Optimal Size) light

Airbus가 주도하고 KETS Quantum Security, ID Quantique, 옥스포드 대학교, 브리스톨 대학교 등이 참여하는 Q-DOS light의 목표는 무인 항공기와 지상간 보안 데이터 통신망의 부재를 해결하기 위해 초고도 보안 데이터 전송을 위한 항공용 플랫폼에 양자 암호화 기능을 더한 소형 광학 통신 시스템을 개발하는 것이다. 고속 데이터 링크는 암호화된 메시지 전송을 위해 양자 암호키 분배를 사용할 예정이며, 도청 감지 기능을 통해 데이터 링크를 감시하게 될 것이다. 이 시스템은 7 kg 이하의 소형 드론에 탑재될 것으로, 매우 도적적인 크기, 무게, 소비 전력 기준을 만족하게 된다. Q-DOS는 BB84 프로토콜을 구현하기 위해 1,550 nm 단광자를 사용하는 혁신적 광웨이브가이드 기술을 적용한 양자 암호키 분배를 구현함으로써 1 km 거리의 드론과 지상간 안전한 0.5 Gbps의 고속 광데이터 링크를 제공할 것이다.

### 양자 난수 생성기

보쉬, ID Quantique, Quside 등이 참여하는 European Flagship Initiative QRANGE (quantum random number generators) 프로젝트의 목표는 양자 난수 생성기를 개선하여 싸고 빠르면서 보안 수준이 높은 양자 난수 생성기를 만드는 것이다. 소형의 저가 양자 난수 생성기는 두 개의 검출기 중 한 개가 양자를 측정하는 반투명 거울에 단광자를 보내는 방식이다. 고속 양자 난수 발생기는 무작위의 위상을 갖는 광펄스를 만들기 위해 반도체 레이저 및 디지털 회를 위해 펄스를 무작위 진폭을 갖는 펄스로 바꾸는 간섭계를 사용하여 개발될 것이다. 사용자는 실시간으로 시스템이 생성하는 양자 에너지를 지속적으로 감시하여 무작위성을 확인할 수 있다.

## 주요 기업

- MagiQ Technologies
- Quantum Xchange
- ID Quantique
- PicoQuant
- 레이션 Raytheon
- AT&T Foundry (큐비트의 양자 얽힘은 보전하면서 다중 노드간 통신을 위한 확장가능한 양자 네트워크를 구축하기 위해 캘리포니아 공대 California Institute of Technology와 협업 중이다.)
- Infineon Technologies
- 도시바
- 미쓰비시 전기
- NEC
- 휴렛 팩커드
- InfiniQuant
- IBM
- 마이크로소프트
- Quintessence Labs
- ISARA
- 보쉬
- Quside
- Single Quantum (SNSPDs)
- Sparrow Quantum
- KETS Quantum Security Ltd. (Chip-scale QKD)

## 코로나바이러스 감염증-19와 싸우는 양자 컴퓨팅

양자 컴퓨터는 연구자들이 미래의 잠재적 위협에 더 잘 대응하도록 도움을 줄 것이다. 양자 컴퓨터는 높은 성능을 이용해 코로나바이러스 감염증-19에 대응할 수 있으며, 치료 및 접근법을 발견하는데 필요한 시간을 상당히 줄일 수 있다.

### ❓ 코로나바이러스 감염증-19 연구를 위한 슈퍼컴퓨터의 이용과 양자 컴퓨팅의 활용

펜슬리어공대는 AiMOS (Artificial Intelligence Multiprocessing Optimized System) 슈퍼컴퓨터에 접근할 수 있도록 지원을 받고자 정부 기관, 대학, 산업체 등과 연락을 취하고 있다. 이 슈퍼컴퓨터는 1초에 80경( $10^{15}$ )번의 연산을 할 수 있는 엄청난 처리 능력을 가지고 있어, 복잡한 코로나바이러스 감염증-19 사태를 진정시키는 데 도움이 된다.

슈퍼 컴퓨터는 생물계 내부의 상호연결성 이해, 코로나바이러스 감염증-19의 위협을 이해하는데 도움을 되는 전염병 데이터의 연구, 동시에 효과적인 바이러스 격리 등에 도움이 될 것이다.

AiMOS는 IBM과의 파트너십을 통해 사용할 수 있게 될 것이다. 펜슬리어 공대 역시 연구 협력체가 슈퍼컴퓨터를 이용할 수 있도록 계속 작업 중이다.

### 분석자 관점

양자 컴퓨팅은 IBM과 같은 컴퓨팅 거인 등의 엄청난 노력에 힘입어 개발이 진행 중이다. 고성능 컴퓨팅 분야의 전 세계적 컨소시엄을 구성하기 위한 미 정부의 노력과 코로나바이러스 감염증-19의 영향을 추적하는 데 슈퍼컴퓨터를 사용할 수 있게 하려는 펜슬리어 공대의 노력은 양자 컴퓨터가 이런 대규모 감염증을 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있다는 증거가 된다. 코로나바이러스 감염증의 대규모 영향은 보건 분야의 발전 필요성 뿐만 아니라 감염 확산을 효과적으로 통제하는 데 도움이 될 수도 있는 양자 컴퓨팅 기술 개발의 필요성 역시 강조하고 있다. 감염증을 통제하기 위해 필요한 행동이 무엇인지 이해하기 위해 대량의 감염증 자료를 빠르게 처리함으로써 감염 확산의 효과적 통제는 이룰 수 있다.

## IX. 코로나바이러스와 양자 기술의 영향

### ❓ 코로나바이러스 감염증-19에서 얻은 기회

#### 코로나바이러스 감염증-19의 해독을 위한 더 많은 파워

2020년 3월 미국에서 아마존, 마이크로소프트, 구글, MIT, 뉴욕 펜슬리어 공과대학교 Rensselaer Polytechnic Institute, 미항공우주국, National Science Foundation, 미에너지부 산하 연구소 등이 참여하는 COVID-19 High-Performance Computing Consortium이 발족했다. 컨소시엄은 오크릿지 국립연구소 Oak Ridge National Laboratory의 초고성능 슈퍼컴퓨터를 사용하여 코로나바이러스의 치료 및 백신을 개발할 것이다.

## X. 사례 - 생태계와 공급망 분석

### ❓ 공급망 구성

#### 양자 관련 기업: IBM, 마이크로소프트, 알파벳(구글)

기업, 학계, 연구기관 등으로 구성된 IBM의 Q Network은 양자 컴퓨팅의 개선을 위해 협력하고 있다. 마이크로소프트는 미국, 유럽, 호주에 연구 시설을 가지고 있으며, 기업과 연구기관이 참여하는 Quantum Network을 통해 양자 컴퓨팅의 발전을 모색하고 있다. 구글은 슈퍼컴퓨터보다 빠르게 복잡한 문제를 풀 수 있는 양자 컴퓨터를 이미 구축하였다.

#### 새롭게 등장하는 기업

양자 센서, 양자 컴퓨터, 양자 통신 등 몇몇 양자 기술의 상업화를 위해 꾸준히 노력 중이다.

#### 부품 공급사

회절격자, 마이크로 트랩, 광자 크리스탈, 원자 증기셀, 단광자 검출기, 저노이즈 레이저, 광범위의 주파수 조정, 주파수 안정화, 박막 필름, 광자 회로, PCB Printed Circuit Board 등 제어용 전자부품을 개발하고 공급한다.

#### 교육계

연구기관은 양자 기술의 상업화에 핵심적 역할을 할 것이다. 양자 기술은 대부분 개발 단계, 시제품 제작, 시험, 평가 단계에 머물러 있으며, 집중적인 연구를 통해 개발될 것이다.

### ❓ 공급망의 기타 참여자

#### 양자 암호화 개발자

장거리 및 위성 통신 등 보안성 높은 양자 통신을 보장한다.

#### 양자 디바이스의 핵심 기술 개발자 및 공급자

단광자 검출기, 원자/이온 트랩, 마이크로트랩, 광자기 트랩, 적외선 카메라, DFB Distributed FeedBack 레이저, 센서, 3D 프린터 코일, 3D 프린터를 이용한 양자 부품 등을 개발하고 공급한다.

#### 기타

소프트웨어 개발자는 양자 컴퓨터에 명령을 보내고 연산 결과를 받기 위한 제어 소프트웨어를 제공한다.

투자자는 개발과 상업화를 가속하는 중요한 역할을 한다.

항공우주 및 방위산업 기업, 정유 회사, 환경 서비스, 보건, 철도 운송, 자동차, 통신사 등 사용자의 지원이 필요하다.

#### 정부 기관

정부로부터의 충분한 자금은 통신, 컴퓨팅, 센서, 영상 등 양자 기술의 발전에 도움이 될 것이다. 유럽연합의 Horizon 2020 EU Research and Innovation 프로그램 같은 정부 자금 및 계획, 인공 위성 기반의 양자 통신과 양자 컴퓨터에 집중되어 있는 아시아, 북미에서 양자 정보 과학 및 기술 연구 및 활용을 지원하기 위해 2018년 12월 발효된 US National Quantum Initiative ACT 등 정부의 지원 활동이 상당히 많다.

## XI. 사례 - 파트너십/제휴 분석 및 최근 개발

### ❓ 양자 인터넷과 양자 얽힘 분야의 개발

#### 구글 시카모어 Sycamore의 양자 우위 달성

구글은 2019년 10월 54비트 시카모어칩이 난수 생성과 관련된 문제를 전통적 컴퓨터로는 달성할 수 없는 200초만에 풀어낸 양자 우위 Quantum Supremacy을 달성했다고 발표했다. 가장 강력한 슈퍼 컴퓨터로도 이 문제를 푸는데 1만년이 걸린다고 한다.

구글이 개발한 시카모어 양자 컴퓨터는 전통적인 컴퓨터와 같이 2진 코드를 사용하고, 연산에 양자역학을 적용한다. 큐비트는 양자 얽힘과 중첩에 기반하여 아원자 입자처럼 동작하여 여러 상태를 동시에 가짐에 따라 전통적인 컴퓨터보다 훨씬 빠르게 동작할 수 있다는 큐비트의 원리에 기초한다.

#### 인터넷 혁신을 달성한 중국 연구팀

2020년초 중국의 연구팀은 50 km 떨어져 있는 양자 메모리의 양자 얽힘을 연결하기 위해 광섬유를 통해 두 원자 구름을 엮는데 성공하여 양자 인터넷 분야의 진전을 이뤄냈다.

양자 얽힘은 한 입자의 양자 상태가 변하면 다른 쪽에도 영향을 주는 것으로, 양자 인터넷에 큰 영향을 미쳐 정보기술을 혁신할 수 있다.

허페이 Hefei시의 University of Science and Technology of China는 양자 메모리의 저장소 역할을 하는 루비듐 원자 덩어리에 레이저 광선을 비춰 광자와 원자의 얽힘을 만들어 냈다.

얽힌 원자는 리피터로 작동하여 양자 메시지를 전달한다. 공동 강화 Cavity enhancement는 얽힘 과정에서 광자쌍 손실을 줄인다.

## ❓ 양자 컴퓨팅 개발과 파트너십

### 중국의 양자 모바일 스테이션

University of Science and Technology of China의 연구팀은 자동차 위에 설치할 수 있는 80 kg의 이동식 스테이션으로 구성된 양자 통신 위성 스테이션을 개발했다.

스테이션은 전송 전력을 줄임으로써 크기를 상당히 줄였으며, 초당 4,000-10,000 비트의 속도로 데이터를 전송할 수 있어 양자 분배기의 역할을 효과적으로 수행할 수 있다.

양자 암호키 분배기는 비밀키를 이용하여 메시지를 안전하게 암호화 및 복호화 할 수 있다.

### IBM과 브라운호퍼의 파트너십

2019년 IBM은 독일의 연구기업 Fraunhofer-Gesellschaft와 협력을 시작하였다. 이들은 협력을 통해 독일 내 IBM 시설에 설치 예정인 IBM의 양자 컴퓨터 Q System One를 중심으로 하는 연구 조직을 구성하려 한다.

이 연구는 슈퍼컴퓨터를 무색하게 만드는 양자 컴퓨터의 개발을 유도할 수도 있다.

IBM의 양자 컴퓨터는 20 큐비트를 가지고 있다. 이 양자 컴퓨터는 상업적 활용을 이끌어낼 목적으로 인공지능과 클라우드 컴퓨팅 분야로 뻗어 나가고 있다.

협 중이다. 2020년에서 2024년까지 향후 5년간 소형 양자 광학 시계는 더욱 발전하여 시장에 등장할 수 있다.

### 중기

향후 5년 중기 동안 양자 증력 센서, 양자 자력계, 양자 관성 센서, 양자 통신 등이 상업화될 것이다. 양자 자력계는 지구물리 탐사, 원유/가스/광물 탐사, 의료 영상(뇌 촬영법), 지상이나 해상의 특이점 파악, GPS가 필요 없는 항법, 가상 현실 및 제스처 인식과 같은 소비자 가전 등에 활용될 것이다. 향후 5-10년 기간 동안 질소 공동 다이아몬드가 항법, 전류 감지 등을 위한 고감도의 자계 센서에 사용될 것이다. 양자 관성 센서는 잠수함 항법 장치와 같은 고부가가치 국방 자산과 우주선/인공위성 등에 사용될 것이다. 더 큰 부피를 가진 양자 관성 센서의 프로토타입이 약 5년 후 항공기 관성 항법 장치에 적용될 것이다. 훨씬 작은 3축 양자 관성 센서의 상업화는 약 10년이 걸릴 것이다.

### 장기

양자 컴퓨팅은 상업화에 훨씬 더 긴 기간이 소요될 것이다. 큐비트 안정성 확보, 결잃음 방지, 많은 수의 큐비트를 효과적으로 측정하고 조작하는 방법 등이 주요 관심 분야가 될 것이다. 양자 비트에 해당하는 각 이온이 자기장에 의해 잡혀 있는 이온 트랩 방법은 초저온 큐비트와 달리 훨씬 오래 동안 안정적이며 실온에서도 동작할 수 있어 높은 잠재력을 갖는다. 양자 컴퓨터는 재료 개발 및 시뮬레이션, 수송 및 일정 최적화 등에 우선적으로 활용될 것이다.

IBM, 마이크로소프트, 구글 등 주요 기술 기업이 양자 컴퓨터 개발에 협력하고 있다. 2020년 3월 허니웰은 양자 규모로 세계에서 가장 강력한 양자 컴퓨터를 개발했다고 발표했다. 2019년 12월 인텔은 시스템 확장성의 확보를 위해 여러 큐비트를 사용하도록 만들어주는 Horse Ridge 냉각제어칩을 공개했다. 질소 공동 다이아몬드는 양자 상태를 초기화하고 상당한 시간 동안 중첩 상태를 유지할 수 있는 능력이 있어 향후 컴퓨터에 활용될 것으로 예상된다.

## XII. 기술 로드맵과 성장 기회

### ❓ 양자전자 로드맵

#### 단기

양자 기술의 초기 시장은 양자 시계의 것이다. 최초의 판매용 원자 시계인 Microsemi의 Rubidium Miniature Atomic Clock, MAC-SA.3Xm은 무선 기지국, 통신망 인프라, 정밀 시험 및 측정 장비 등에 사용되는 것을 목표로 하였다.

개선된 양자 시계의 핵심적 활용처로는 군사 및 위성위성이 있다. 미항공우주국은 미 방위고등연구계획국 DARPA가 개발한 칩 크기의 원자 시계를 국제우주정거장 ISS의 SHERES (Synchronized Position, Hold, and Reorient Experimental Satellites)에서 시험 중이다. 미항공우주국의 심우주 탐사에 사용될 소형 수은이온 심우주 원자시계 Deep Space Atomic Clock는 2019년 인공위성에 탑재되어 시

### ❓ 양자 기술의 활용 확대와 전략적 투자

#### 양자 컴퓨터에 대한 독일 정부의 투자

2019년 가을 독일 정부는 IBM과 6.5억불 규모의 2년짜리 계약에 서명했다. 이 계약에 따라 Fraunhofer-Gesellschaft는 독일 내 IBM의 양자컴퓨터인 IBM Q System One에 접근할 수 있게 되었다.

이 투자는 Fraunhofer의 연구를 독려하고, 양자 컴퓨팅 분야의 발전을 통해 독일의 기술 산업을 개선할 목적을 가지고 있다.

#### 양자 기술에 대한 네덜란드의 투자

2020년 네덜란드의 국무 및 기후정책 정무장관 State Secretary for Affairs and Climate Policy은 향후 4년에 걸쳐 양자 기술의 개발을 위한 2,340만 유로 규모의 전략적 투자 방안을 발표하였다.

QuTech (델프트 공대 Delft University of Technology, TU 델프트,

Netherlands Organisation for Applied Scientific Research 등이 공동 설립)가 설립한 Quantum Data NL foundation이 우선 자금을 관리하여 양자 기술 개발을 위한 네덜란드의 국가적 아젠다를 실행하는데 도움을 줄 것이다.

## Reference

- [1] TechVision Group of Frost & Sullivan, "Emerging Opportunities of Quantum Technologies in Electronics Industry," Frost & Sullivan, D963-TV, Mar. 2020.