

# 주요국의 양자센싱 기술 국방 분야 활용 및 개발 동향

이주경 국방기술진흥연구소 전력지원체계연구센터 책임연구원

## 1. 머리말

최근 세계 주요국들은 국방 전력 혁신을 위해 양자센싱(Quantum Sensing)에 주목하고 있다. 양자센싱은 양자역학 원리를 활용해 기존 센서로 포착하기 어려운 미세 신호를 초정밀 측정하는 기술이다. 원자간섭계, 다이아몬드 NV 센터, 초전도 양자 소자 등을 통해 기존 관성항법, 레이더, 자력계의 민감도와 정확도 한계를 극복할 수 있다. GPS 교란 환경에서도 정확한 위치를 제공하는 양자항법, 기존 소나보다 정밀한 양자자기센서, 지하 은닉 시설을 탐지하는 초정밀 중력 센서 등은 전장 환경을 크게 변화시킬 잠재력이 있어 미국, 중국, 영국 등이 민·군 협력을 통해 양자센싱 실용화를 촉진하고 있다. 한국 또한 관련 기관과 기업이 협력해 양자항법, 양자레이더, 초정밀 중력계 시제품 실증을 목표로 양자과학기술 로드맵을 추진 중이다. 최근 5년 간 글로벌 양자센싱 기술 동향, 주요국의 기술적 도전 과제 및 향후 발전 방향을 분석한다.

## 2. 양자센싱 기술 개요와 군사적 응용 가능성

양자센싱은 양자역학 원리를 활용해 기존 센서의 한계를 뛰어넘는 초정밀 측정 기술을 의미한다. 자기장, 중력장, 가속도, 회전 등을 양자 현상으로 정밀하게 측정하며, 기존 센서의 민감도 한계를 크게 넘어선다. 특히, 원자간섭계 기반 가속도계 및 자이로스코프, 양자자력계, 양자중력계 등은 극미세 신호 탐지능력을 갖춘다. [그림 1]과 같이 양자얽힘을 활용한 양자영상 기술이 현재 스텔스 물체 탐지용 양자레이더 연구에 활용되고 있다[1].

이렇게 양자센싱 기술의 군사적 응용성은 매우 높다. PNT(위치·항법·시각, Positioning, Navigation, Timing) 분야에선 GPS 교란 시에도 정밀한 위치추적과 초정밀 시간 동기화가 가능하다. ISR(정보·감시·정찰, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) 분야에선 미약한 자기신호 탐지로 잠수함을 식별하거나, 중력 변화를 통해 지하 시설 탐지가 가능해진다. 핵물질 특유신호 탐지로 핵잠수함이 나 원자로의 원격 탐지도 가능하다[2][3]. 미국 의회조사국은 양자센서가 적 잠수함, 지하 시설 및 핵물질 탐지 능력을 크게 향상시킬 것으로 전망했다. 양자센싱은 향후 전장의 핵심기술로 주목받고 있다[4].

## 3. 미국 양자센싱 기술개발 현황

미국은 최근 국방 분야에서 양자센싱 기술을 전략적으로 추진하고 있다. 2023년 DoD(미국 국방부, United States Department of Defense)는 양자과학기술을 핵심 국방 기술로 선정했고[4],



출처: Krelina, M. (2021). Quantum technology for military applications. EPJ Quantum Technology, 8(24).

[그림 1] 다양한 양자 기술 시스템을 활용한 양자전 개요

DARPA(미국 국방고등연구계획국, Defense Advanced Research Projects Agency)는 실전 적용을 목표로 RoQS(Robust Quantum Sensors) 프로그램을 추진 중이다. RoQS는 환경 교란에도 성능이 유지되는 군용 양자센서 개발을 목표로 한다. 또한, DARPA는 QuSeN(Quantum Sensing of Neutrinos) 프로그램을 통해 중성미자 탐지센서를 개발해 핵물질 탐지 능력을 높이고 있으며, 압착광(Squeezed Light)을 이용한 초정밀 광학 센서 연구도 진행 중이다[6].

각 군도 양자센서를 적극적으로 도입하고 있다. 미공군은 샌드박스AQ(SandboxAQ)와 협력해 GPS 없이 지구 자기장을 활용한 양자항법 시스템을 시험했고[7], 미 육군과 해군 역시 양자관성항법과 자기장항법 연구를 지원하고 있다. DIU(국방혁신단위, Defense Innovation Unit)는 2025년부터 양자관성센서, 중력계, 자력계 시제품을 실험 중이며, 록히드마틴(Lockheed Martin)과 함께 양자관성항법장치(QulNS)를 개발해실전 플랫폼에 적용 중이다[8].

방산 기업도 양자센싱 분야에서 성과를 내고 있다. 노스롭그러먼(Northrop Grumman)은 양자센서를 잠수함 탐지 시스템 연구에 활용하고 있으며, 레이시온 테크놀로지스(Raytheon Technologies)는 압착광 광학 센서를 개발 중이다. DoD는 소형 원자시계 양산으로 전략적 활용을 높이는 동시에 자기장 기반 탐지 기술을 전략 플랫폼에 우선 적용 중이다. 미국은 정부와 민간협력을 통해 GPS 대체 항법, 잠수함 탐지 등에서 양자센싱 기술을 신속히 발전시키고 있다[3].

#### 4. 군사 무기체계 및 장비 적용 사례

최근 5년간 주목할 만한 적용 사례로 잠수함 탐지(수중전), GPS 대체 항법(지상·항공), 스텔스 탐

지(공중전), 지하 시설 탐지(ISR) 등이 두드러진다.

#### 4.1 잠수함 탐지 및 수중전 적용

잠수함은 은밀성이 생명인 전략자산으로, 양자센싱은 새로운 잠수함 탐지 방법을 제시한다. 전통적으로 대잠수함전에선 소나(음향)나 MAD(자기이상 탐지기, Magnetic Anomaly Detector) 등을 사용해 왔는데[3], 양자센싱은 이보다 훨씬 높은 민감도로 미세한 자기장 변화나 중력 변화를 포착함으로써 잠수함을 원거리에서 탐지할 잠재력이 있다[9]. 미국은 앞서 언급한 초고감도 양자자력계를 이용한 해양 감시를 연구 중인데, 특히 미세한 지구 자기장 변화를 정밀 측정해 잠수함 선체가 일으키는 특이한 징후를 포착하는 양자자기맵 탐색기법을 시험했다[3]. 2024년 미 공군 C-17 시험에선 자기장 기반 항법이 시연됐는데, 동일한 기술을 역으로 활용해 해역의 자기 지도와 실시간 측정치를 비교함으로써 움직이는 잠수함의 위치를 역추적하는 구상이 현재 논의되고 있다.

중국은 이러한 양자자기센서를 이용한 대잠수함 탐지망 구축에 관심을 보여 왔다. 중국 측 활동은 대체로 비공개이나, 서방 정보에 따르면 중국은 양자자력계와 중력계 기술을 잠수함 탐지에 응용하는 연구를 진행 중인 것으로 추정된다[9]. 랜드 연구소(RAND Corporation) 보고서에 따르면 서방에 공개된 중국 양자센싱 테스트 사례는 많지 않지만, 잠재적으로 해양에 배치된 양자센서 어레이로 잠수함을 추적하는 개념을 연구하고 있을 가능성이 있다[9]. 한편, 캐나다 해군 등도 양자센싱을 활용한 수중 탐지 가능성에 주목하고 있으며, 중력장 센서를 통한 수중물체 탐지 아이디어 등을 검토하고 있다[10].

또 다른 접근으로, DARPA의 QuSeN 프로그램은 핵추진 잠수함 원자로에서 나오는 중성미자를 감지해 잠수함을 원격으로 식별하는 미래 기술을 목표로 연구를 진행 중이다[5]. 중성미자는 물질과 상호작용이 극도로 약해 탐지가 어렵지만, 성공 시 바닷속 잠수함을 장거리에서 비간섭적으로 식별할 수 있는 혁신적인 능력이 된다. 현재는 연구 단계이나, 이처럼 양자센싱은 중성미자, 중력 등 비전통적 현상을 활용한 대잠수함 탐지로 응용 폭을 넓히고 있다.

#### 4.2 GPS 대체 및 양자항법

GPS 대체 항법은 현대전에서 양자센싱의 가장 실용적 응용분야 중 하나이다. GPS 신호 교란이나 위성 파괴 상황에 대비해 자기장, 중력, 관성 등의 자체 측정으로 항법을 수행하려는 것이다. 미국, 영국, 프랑스 등이 이 분야에서 앞서가고 있다.

미국은 DIU의 QuiNS 같은 양자관성항법 장치를 개발해 위성에 의존하지 않는 항법을 구현하고 있으며[7], 자기장항법처럼 지구 자기 지도와 양자자력계로 위치를 추정하는 기술도 시험 중이다[3]. 이는 GPS 재밍 상황에서 항법 정확도를 유지해 전투기, 선박, 미사일 등이 교란 없이 작전토록 한다. 특히, 전략핵잠수함의 경우 상시 GPS 수신이 불가능하므로 관성항법에 의존해 왔는데, 원자 간섭계 기반 관성센서는 드리프트 누적오차를 획기적으로 낮춰 수중 항법 정밀도를 높일 전망이다[11].

영국은 2023년 해군 시험선 XV 패트릭 블랙킷(XV Patrick Blackett)호에 양자항법 센서를 탑재해 해상 시험을 성공적으로 수행했다. 이 센서는 임페리얼 칼리지 런던이 개발한 초저온 원자 간섭

계 가속도계로, 배의 움직임을 실시간 측정해 자체 위치 계산을 수행한다. 영국 해군 연구부대(NavyX)는 이 양자나침반(Quantum Compass)을 통해 GPS 없이 글로벌 위치 파악이 가능함을 시연했고, 특히 잠수함이 수중에서 활용할 경우 항법 정확도 향상에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다[12]. 또한, 영국은 국가 양자 기술 프로그램을 통해 항공기와 지상 차량용 양자관성항법기 개발도 지원하고 있어, 향후 전 영역에 걸쳐 GPS 대안체용 계획을 발표하며, 양자 기술을 활용한 자력항법·관성항법 능력을 해군에 도입할 것을 예고한 바 있다. 유럽 전반으로 보면, EU(유럽연합, European Union) 양자플래그십(Quantum Flagship) 프로그램을 통해 iNAV 등 양자 항법 연구가 진행 중이며, 독일, 이탈리아 등도 국방에 활용할 양자 IMU(Inertial Measurement Unit) 개발에 참여하고 있다.

한국에서도 GPS 재밍 대응 양자항법을 미래 국방혁신 기술로 삼고 있다. 2024년 출범한 민·관·군 양자정보협의회에서 GPS 교란 시 정밀항법이 가능한 양자중력센서 기반 양자항법을 핵심 과제로 선정했고, KRISS(한국표준과학연구원, Korea Research Institute of Standards and Science)를 중심으로 초정밀 양자 PNT 기술 개발이 추진되고 있다. KRISS 국방양자센터는 냉각 원자 기반 중력계와 원자시계를 통합한 양자 IMU를 개발해 군용 유도무기 관성항법 정확도를 향상시키는 것을 목표로, 2020년대 후반 실용화를 노리고 있다[13].

#### 4.3 스텔스 표적 탐지

스텔스기 탐지는 오래된 군사적 숙제로, 중국을 비롯한 여러 국가가 양자레이더를 잠재적 해법으로 연구해 왔다. 양자레이더는 양자얽힘 광자쌍을 이용해 반사 신호를 더 잘 구분해 내는 레이더 개념이다. 이론상으로 얽힌 광자 한 쌍 중 하나를 목표 방향으로 보내고, 다른 하나는 기준(Reference)으로 남겨두면, 목표에서 매우 약하게 반사돼 돌아오는 광자의 얽힘 특성을 비교해 잡음 속에서 스텔스기를 검출할 수 있다는 것이다. 중국은 이 개념을 적극적으로 홍보하며 “양자레이더로 미국 스텔스기를 무력화할 것”이란 주장을 해 왔고, 2018년경 CETC(중국 전자과기집단공사, China Electronics Technology Group Corporation)에서 수 km 거리 탐지 실험에 성공했다는 보도가 나왔다고 전해진다. 실제 중국은 에어쇼 등에서 대스텔스 대응책으로 양자레이더를 언급하고 있으며, 세계 최초 프로토타입을 개발했다고 주장하고 있다[9].

그러나 미국 및 서방 전문가들은 양자레이더의 현실적 한계에 대해 회의적이다. 미첼 항공우주연구소(Mitchell Institute for Aerospace Studies) 헤더 페니(Heather R. Penney) 연구원은 “양자 레이더 개념은 멋지지만 실용성이 떨어진다”며, “수많은 얽힘 광자를 생성해 이를 유지하기는 극도로 어렵고, 얽힘된 기준광자를 저장하거나 측정하는 과정에서 얽힘이 깨질 우려가 있다”고 지적했다. 페니 연구원은 이에 더해 “목표에서 돌아온 광자와 기준 광자를 다시 짝지어 비교하기 위한 정확한 동기화도 난제”라고 설명했다. 미국방과학위원회(Defense Science Board) 역시 2022년 보고서에서 “양자레이더가 군사적으로 유용할지 의문”이라는 입장을 표명해, 미군은 현재 양자레이더를 연구 우선순위에서 제외한 상태다. 대신 미국과 동맹국은 상대적으로 구현이 용이한 양자자력계, 양자중력계 등으로 스텔스기 탐지 가능성을 모색 중이다. 예컨대 스텔스기는 레이더 반사는 적지만, 비행기는 강한 자기 신호(엔진, 전자장비 등)나 중력적 질량 분포 변화를 야기할 수 있으므로, 양자센서 어레이를 통한 간접 탐지 아이디어가 연구되고 있다[9].

중국 양자레이더 주장에 대해 서방은 회의적이지만, 프랑스, 캐나다, 오스트리아 등 대학 연구진에선 소규모 실험을 통해 전통 레이더 대비 20% 신호 증강 등의 결과를 보고한 바 있다. 아직 획기적 돌파구는 아니지만 물리적 가능성이 보인다는 평가도 있고, 향후 기술이 발전하면 실용화 여지도 배제할 수 없다[9]. 현재 양자레이더는 개념 검증 수준에 머물러 있고, 단기간 내 실전 배치는 어려울 것으로 보임에도 스텔스 기술의 위협에 대응하려는 국가들은 양자센싱을 포함한 다각도의 노력을 기울이고 있으며, 광자 기반 양자이미징, 장거리 광자탐지 등 연관 연구가 지속되고 있다.

한국도 스텔스 탐지용 양자레이더 연구 의지를 표명하고 있다. 2024년 양자정보협의회에선 스텔스 물체를 탐지할 양자레이더 개발을 검토 과제로 삼았으며[13], 한화시스템, LIG넥스원 등 국내 방산 기업도 관련 핵심기술 확보에 관심을 보인다. 아직 구체적 시제품 소식은 없으나, 초고감도 양자센서와 광학 기술을 접목한 미래 레이더로서 연구개발 방향을 설정한 상태다.

#### 4.4 지하 시설 및 지형 탐지

양자센싱은 중력장이나 중력 구배(Gravity Gradient)를 정밀 측정함으로써, 지하 빈 공간이나 매설물을 식별하는 새로운 수단을 제공한다. [그림 2]와 같이 2022년 영국 버밍엄 대학 연구진은 냉각 원자 간섭계 기반 중력구배센서를 이용해 건물 아래 매설된 2m×2m 터널을 성공적으로 탐지해 큰 주목을 받았다[15][16]. 이 실험은 세계 최초로 실외 환경에서 양자 중력센서로 지하 구조물을 찾아낸 사례이며, 기존 GPR(지하 레이더, Ground Penetrating Radar)이 실패하는 조건에서 중력 변화만으로 탐지에 성공한 것이다. 중력은 지하 매질 밀도 변화에 영향을 받는데, 양자 중력센서는 두 개의 냉각 원자구름을 이용한 쌍중력계 구성으로 진동 잡음을 상쇄하고 미세한 중력 변화만 추출해낸다[17]. 이 기술은 군사적으로 적 지하벙커, 지하터널, 매설 무기고 등을 원격 탐지하거나, 지뢰 및 IED 탐지에 활용될 수 있어 관심이 크다. DSTL(영국 국방과학기술연구소, Defence Science and Technology Laboratory)은 해당 기술을 군용으로 발전시키는 프로그램을 진행중이며, 향후 공병 작전 등에서 활용을 모색하고 있다.



출처: Laser Focus World Vovrosh, J. (2022, Apr 21). Quantum gravity gradient sensor detects outdoor tunnel. LaserFocusWorld

[그림 2] 양자 기술 기반 중력구배 센서

## 5. 한국의 양자센싱 기술개발 및 적용 현황

한국은 양자센싱을 포함한 양자 기술을 미래 국방게임체인저로 지정하고, 정부 부처와 군이 협력해 기술개발에 착수한 상태다. 2022년 정부는 '대한민국 양자과학기술 전략'에 국방·치안 분야 도입 추진을 명시했고, 국방부도 양자 기술을 10대 국방전략기술로 선정해 관심을 가져왔다. 이러한 배경하에 2024년 6월 과학기술정보통신부와 국방부는 공동으로 '민관군 양자정보협의회'를 출범시켜 양자센서 국방 적용을 본격화했다. 이 협의체는 과학기술정보통신부 네트워크정책실장과 국방부 기획조정실장이 공동의장을 맡고, ADD(국방과학연구소, Agency for Defense Development)·방위사업청·육해공군·ETRI(한국전자통신연구원, Electronics and Telecommunications Research Institute)·KRISS·KIST(한국과학기술연구원, Korea Institute of Science and Technology) 등 정부·공공기관, SK텔레콤·한화시스템·LIG넥스원·GQT(QT기업) 등 산업체, KAIST(한국과학기술원, Korea Advanced Institute of Science and Technology)·고려대 등 학계 30여 기관이 참여해 산·학·연·군 역량을 결집하고 있다. 이 협의회는 양자암호통신의 군사용 적용, 양자센서 기반 항법·레이더 개발 등을 핵심 의제로 삼고 제도 개선과 연구개발을 추진 중이다[13].

ADD는 양자센서 원천 기술의 국산화 연구를 주도하고 있다. 2022년 ADD 임신혁 박사팀은 원자 스핀 자이로스코프를 6년 간 연구해 시제품 개발에 성공했다. 이 양자자이로는 제논, 루비듐 등 기체 원자의 스핀 상태 변화를 측정함으로써 자세 변화를 감지하는 센서로, 향후 GPS가 없는 지역에서 관성항법에 활용하거나 인공위성에 탑재할 수 있는 기술이다. ADD는 해당 양자센서 시제품을 국내 무기체계나 위성에 탑재하는 실험을 진행했으며, "현재 성능은 미국 선도기술 대비 약 50% 수준이지만 전량 독자기술로 개발했다는 점에서 큰 의의가 있다"고 발표했다[18]. 이는 미국 등 일부만 보유한 기술을 자력으로 확보한 사례로 평가되며, ADD는 추후 지속 개발을 통해 성능을 높여갈 계획이다. 이 밖에도, ADD는 양자광학 기반 초감도 센서, 양자 기반 초미량 물질 탐지기 등 다양한 연구 과제를 대학·출연연과 협력 수행하고 있다.

KRISS는 2023년 11월 대전에 국방 양자컴퓨팅·센싱 기술 특화연구센터(국방양자센터)를 개소해, 2029년까지 244억 원을 투입한 대형 과제를 시작했다. 이 사업에서 KRISS와 9개 대학은 국방 양자컴퓨팅, 원격관측 한계 돌파 양자수신기, 초정밀 양자 PNT, 유도·탐지용 소형 복합 양자센서 등 4개 분야를 연구한다. 이중 초정밀 양자 PNT 분야에선 위성 미의존 PNT를 위한 초저온 원자 진공계통과 차세대 원자시계 등을, 유도·탐지용 복합 양자센서 분야에선 전장 상황에 따라 여러 종류의 양자센서를 결합해 운용할 수 있는 모듈형 센서가 개발되고 있다. 예컨대 하나의 무기 플랫폼에 소형 원자시계+자이로+자력계 등을 통합, 유도무기의 관성항법 향상 혹은 화학·방사능 물질의 미량 탐지까지 가능토록 하는 것이 그 목표다[14].

산업계에서도 양자센서 기술 투자가 시작됐다. SK텔레콤은 통신사지만 양자센서 스타트업 투자를 통해 양자 RFID·바이오센싱 기술을 일부 확보했고, 한화시스템과 LIG넥스원은 국방전자 분야 경험을 바탕으로 양자레이더 관련 기술동향을 추적하고 있다. 학계에선 KIST가 2023년 분산형 양자센서 기술을 개발했으며, 이를 통해 공간적으로 분리된 센서들 간 양자얽힘을 활용해 단일 센서 한계보다 높은 정밀도를 달성하는 연구를 선보였다. 이러한 기술은 향후 배열형 양자센서망 구축에 핵심이 될 수 있다[19]. 또한 KAIST 물리학과 등에서 다이아몬드 NV 센터를 이용한 초미세 자기장 센싱 연구를, 고려대 등에서 양자광학 센싱연구 등 기반 연구를 활발히 진행하고 있다.

한국은 정부 주도 협의체 구성, ADD와 KRISS를 축으로 한 연구개발, 산학 연계 프로젝트 등을 통해 양자센싱 국방 적용 역량을 키우고 있다. 아직 미국·중국 등에 비해 초기 단계지만, 원자스핀자이로 국산화, 세계 최고 수준 양자중력센서 보유 등 일부 성과도 나타나고 있으며[13], 2030년대 초반까지 국방 실증 적용을 목표로 발전 전략을 수립하고 있다.

미국 역시 냉각원자 중력계 개발을 국방차원에서 지원해왔다. ARL(미국 육군연구소, Army Research Laboratory)은 2020년대 초반 이동식 양자중력계 프로젝트를 실시해, 차량에 탑재 가능한 수준으로 중력계 소형화 연구를 했다. DARPA 양자센서 프로그램들도 지하 구조 탐지를 주요 목표 중 하나로 상정하고 있으며, 앞서 CRS 보고서는 양자센서로 지하 구조물 탐지 능력 향상을 언급한 바 있다. 양자 중력센서가 실용화될 경우, 인공위성이나 드론에 탑재해 적 지하시설 지도화도 가능할 전망이다.

독일과 유럽 국가들도 양자중력계 연구를 활발히 연구하고 있다. 독일 퀀트너스(Quantus) 프로젝트, 프랑스 MIGA 프로젝트 등은 지하 빈 공간 탐지, 지하자원 탐사목적의 양자중력센서를 개발 중인데, 이 중 상당 기술이 국방과 연계될 수 있다. 예를 들어, 독일은 지하 터널 탐지 기술을 국경 보안이나 군사시설 경계에 활용하는 방안을 검토하고 있으며, 프랑스는 지하시설 파괴용 표적 식별에 중력센서를 적용할 가능성을 연구한다.

한국은 지하 갱도 탐지 분야에서 활용을 모색 중이다. 아직 양자센서 관련 직접적 성과는 없지만, ADD가 지중 레이더 및 중력탐지 기술을 연구하면서 양자센싱 접목 가능성을 평가하고 있다. 또한, KAIST 등에서 중력 자이로에 대한 기초연구를 진행 중이며, 추후 국방 응용이 기대된다.

## 6. 맺음말

중국은 양자센싱 분야에서 대규모 투자를 통해 양자레이더와 자기센서를 전략적으로 육성하고 있다. 특히, 양자레이더를 대스텔스 기술로 홍보하며 실험적 프로토타입을 개발 중이며[20], 다이아몬드 NV센터 기반 양자 자기센서를 통한 고감도 신호 수신 연구도 진행하고 있다[21].

영국은 국가 양자기술 프로그램을 통해 양자센싱 기술을 국방에 적극 활용하고 있다. 특히, 양자중력센서와 양자 관성항법 분야에서 성과를 거두고 있으며, 군사 플랫폼 적용을 확대하고 있다[17].

독일과 유럽 국가들은 EU 차원에서 양자센싱 기술을 지원하고 있다. 독일군은 양자자이로스코프와 센서를 잠수함 등 군사 분야에 적용하는 연구를 수행중이며[22], 프랑스와 일본, 캐나다도 다양한 군사 응용 연구를 진행하고 있다[9].

기술적 도전 과제는 양자센서의 환경 내구성 확보와 동적 범위 확장, 빠른 반응 속도 향상이며, 센서 모듈화, 위성 탑재, 네트워크 연동 등이 향후 발전 방향이다[1]. 국제표준화와 전문 인력 양성도 중요한 과제다. 향후 10년 내에 국방 분야 양자센싱 기술의 실전 적용이 확대될 것으로 전망된다.

[참고문헌]

- [1] Krelina, M., "Quantum technology for military applications. EPJ Quantum Technology, 8(24). (2021). <https://www.epjquantumtechnology.springeropen.com>
- [2] DARPA, "Taking quantum sensors out of the lab and into defense platforms", DARPA News Release, 2025, Feb 7 ,<https://www.darpa.mil>
- [3] Harper, J. "DARPA eyeing new quantum sensing program", DefenseScoop, 2024, Dec 30, <https://www.defensescoop.com>
- [4] 데일리시큐, "양자과학기술을 미래 국방 게임체인저로..'민관군 양자정보협의회' 공식 출범" , 2024.06.27. <https://www.dailysecu.com/news/articleView.html?idxno=157257>
- [5] DARPA, "QuSeN: Quantum Sensing of Neutrinos (Program Summary)", 2024. <https://www.darpa.mil>
- [6] Quantum Computing Report, "DARPA and RTX Develop Next-Generation Quantum Sensors Using Squeezed Light for Defense and Commercial Use", December 6 2024. <https://quantumcomputingreport.com>
- [7] Bernacchi, G., "Lockheed to Develop Quantum Navigation System for US. The Defense Post", 2025, Mar 14, <https://www.thedefensepost.com>
- [8] DIU, "DIU's Transition of Quantum Sensing (TQS) Field Testing To Begin Across Five Critical Areas", 12 March 2025, <https://www.diu.mil>
- [9] Freedberg, S. "China's investing billions in quantum R&D, but is Beijing making some bad bets?", Breaking Defense, 2024, Feb 5, <https://www.breakingdefense.com>
- [10] Hill, G. "Quantum Radar Is Stealth Radar: Examining the Potential Impact on the Defence Team", Joint Command and Staff Programme Service Paper, 48, 2022.
- [11] Hayley Dunning, "Quantum sensor for a future navigation system tested aboard Royal Navy ship", 26 May 2023, <https://www.imperial.ac.uk>
- [12] Austin J. Alexander Written with AI, "Quantum Navigation Revolution: A Game Changer for The Royal Navy", Jun 15, 2023, <https://medium.com>
- [13] Dailysecu, 길민권, "양자과학기술을 미래 국방 게임체인저로..'민관군 양자정보협의회' 공식 출범", 데일리시큐, 2024, 6.27, <https://www.dailysecu.com>
- [14] ohmynews, "미래 '국방 양자' 원천기술 확보 나선다... 2029년까지 244억 투입", 24.01.23, <https://omn.kr/276ef>
- [15] Michael Holynski, "Applied quantum: Seeing the invisible with precision sensing and timing", 24 February 2025, <https://www.birmingham.ac.uk>
- [16] quantumensors, "Sensor breakthrough announced in Nature paves way for groundbreaking map of world under Earth surface", 23rd February 2022, <https://www.quantumsensors.org/>
- [17] Laser Focus World Vovrosh, J. "Quantum gravity gradient sensor detects outdoor tunnel. LaserFocusWorld", 2022, Apr 21 , <https://www.laserfocusworld.com>
- [18] 이원희, "'참고할 논문도 없었다'...美도 감추던 '양자센서' 독자개발 성공기 ', 머니투데이,

2022, 11.15., <https://www.unicornfactory.co.kr>

[19] "여러 곳에 흩어진 정보 한번에 측정...'분산형 양자센서' 나온다," chosunbiz, 2024.01.16.

<https://biz.chosun.com/sciencechosun/technology>

[20] "중국, 1만2,900km 양자통신 성공...세계 최장거리 기록", 조선일보, 2025.03.22.

<https://www.chosun.com>

[21] Unicornfactory, "중국의 양자 기술, 어디까지가 실제고 어디까지가 허상인가?", The Wire China 번역, 2023. <https://www.breakingdefense.com>

[22] Cecilia Sykala, "Chinese Quantum Radar, recently completed tests By China Electronics 14 (military)", Detects Stealth Aircraft, & nuclear submarine, 2022. 10. 3, <https://x.com>

※ 출처: TTA 저널 제220호