

Quantum-AI 융합: 계산과 지능의 공진화 프레임워크

허필선

본 보고서는 ETRI ICT전략연구소 기본사업인
“ICT 기술전략 및 기술정책 연구”를 통해 작성된 결과물입니다.



◆ 요약 ◆

인공지능(AI)과 양자(Quantum)는 각각 산업 전반의 혁신을 이끄는 핵심 기술로 발전해 왔으나, AI는 연산-데이터-에너지 측면의 구조적 한계에, Quantum은 하드웨어 구현과 산업화의 제약에 직면하고 있다. 이러한 한계는 상호보완적 관계를 형성하며, 두 기술 간 융합의 필요성을 높이고 있다. Quantum-AI 융합은 단순한 기술 결합을 넘어 계산(computation)과 지능(intelligence)의 결합을 통한 새로운 기술 패러다임으로 이해될 수 있다. 특히, Quantum for AI(Q→A)와 AI for Quantum(A→Q)의 이중 구조를 중심으로 기술 간 상호작용이 확대되면서 새로운 문제 해결 방식과 기술 발전 경로가 형성되고 있다.

본 보고서는 Quantum-AI 융합의 전개 과정을 병렬적 발전(Parallel Development), 보조적 결합(Assistive Coupling) 및 공진화적 통합(Co-evolutionary Integration)의 3단계 진화 프레임워크로 구조화하였다. 이를 통해 Quantum-AI 융합의 구조와 진화 과정을 체계적으로 설명하고, 기술 간 상호작용과 융합 생태계 관점에서의 정책적 시사점을 제시하였다.

📖 들어가며

AI와 양자기술은 미래 산업 경쟁력을 좌우할 핵심 전략기술로, 최근에는 상호 결합을 통해 새로운 혁신 영역을 창출하는 유망 융합 분야로 주목받고 있다. 본고는 기술 진화의 관점에서 Quantum-AI 융합의 전개 구조와 함의를 고찰한다.

- 최근 기술 발전은 개별 기술의 고도화를 넘어 서로 다른 기술 간 결합과 상호작용을 중심으로 전개되는 양상을 보이는 경우가 많음
 - 예를 들어, AIaaS(AI+클라우드) 확산, 디지털 헬스케어(바이오+데이터) 발전, 자율주행차(센서+통신+AI)의 상용화 등은 기술 융합(technology convergence)이 새로운 산업과 시장을 형성하는 대표적 사례임
 - 이런 흐름 속에서 인공지능(AI)과 양자기술(QC)이 각각 서로 다른 계산 원리(비트 vs 큐비트)와 기술적 특성(SW·데이터 중심 vs HW·물리구현 중심)을 기반으로 발전해 온 미래 산업 경쟁력을 좌우할 핵심 전략 기술로 부상
 - ※ AI: Artificial Intelligence, QC: Quantum Computing
 - 최근에는 두 기술의 관계가 단순한 병렬적 발전을 넘어 상호 결합하면서 새로운 혁신 영역*을 창출할 수 있는 유망 융합 분야로 주목
 - * 양자컴퓨팅을 활용한 AI 성능 고도화, AI 기반 양자시스템 최적화 등
 - ※ 이는 양자 계산 원리에 기반한 HW 중심 연산 체계와 학습 기반 SW 중심 지능 구현 방식이 결합함으로써, 문제 해결 방식과 기술 발전 경로가 근본적으로 변화하는 것을 의미
- 이러한 배경 하에 본고에서는 Quantum-AI 융합을 기술 진화의 관점*에서 분석하고, 그 전개(진화) 구조와 함의를 체계적으로 고찰함
 - * 기술을 시간에 따른 변화와 경로 의존적 발전 과정으로 이해하며, 기술 간 상호작용과 산업·정책 환경과의 관계 속에서 진화한다는 점을 강조(Nelson & Winter, 1982; Dosi, 1982; Etzkowitz & Leydesdorff, 2000).

📖 성장하는 AI, 부상하는 Quantum

□ AI 산업의 성장과 한계

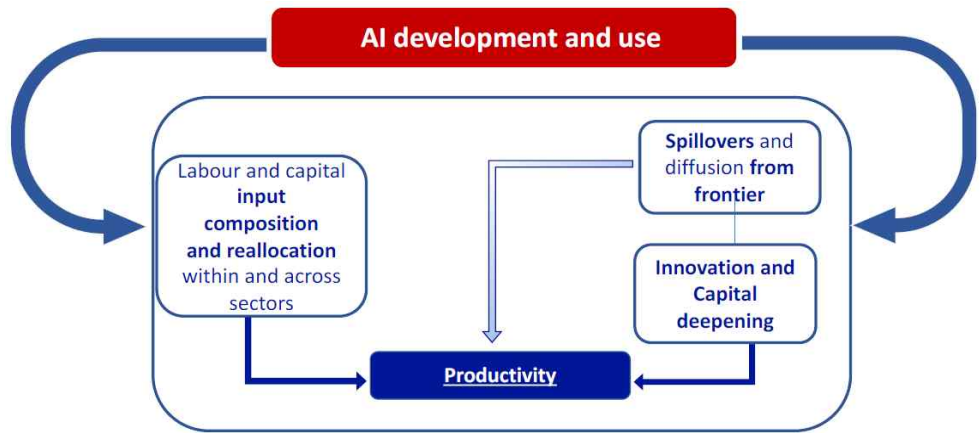
- 지난 10여 년간 인공지능(AI)은 단순한 기술 혁신을 넘어 산업 구조와 경제 시스템 전반을 재편하는 핵심 범용 기술(General Purpose Technology, GPT)로 부상(Bresnahan & Trajtenberg, 1995; OECD, 2024.4)

AI는 데이터·알고리즘·컴퓨팅 인프라의 결합을 기반으로

발전하는 소프트웨어 중심의 범용기술로, 최근 시장 규모 확대와 투자 증가, 기업 도입 확산을 통해 산업 전반으로 빠르게 확산되고 있다.

- 특히 딥러닝 기반 접근법은 기존 규칙 기반 AI의 한계를 극복하며 데이터와 연산 자원을 중심으로 한 새로운 기술 발전 경로를 형성
- 그 결과, AI는 제조, 금융, 의료 등 다양한 산업에서 생산성 향상과 새로운 가치 창출을 견인하는 핵심 기술로 확산되는 중
- ※ AI의 발전과 활용은 1) 노동/자본의 구조 변화, 2) 혁신 및 자본 변화, 3) 기술 확산 등의 경로를 통해 생산성을 높임(OECD, 2024.4)

▶ AI와 생산성 ◀

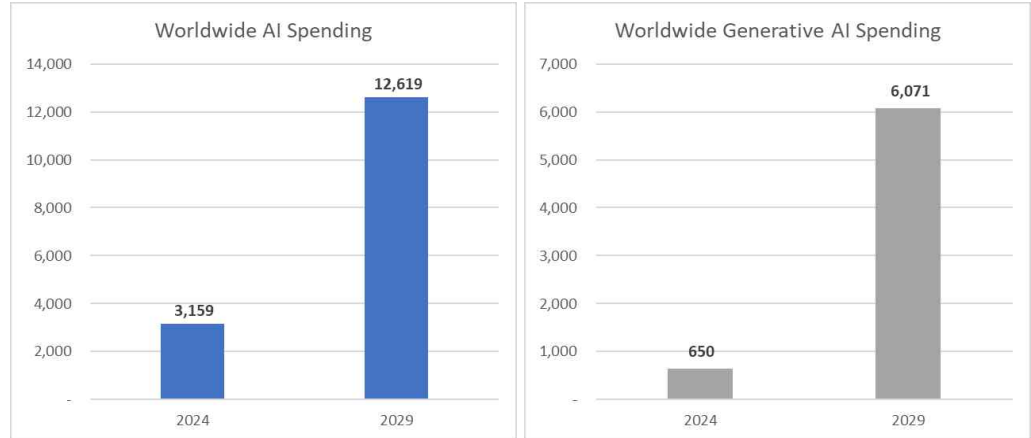


* 출처: OECD (2024.4)

- AI는 본질적으로 소프트웨어 중심의 기술 체계로, 데이터(Data), 알고리즘(Algorithm), 그리고 이를 실행하는 컴퓨팅 인프라(Computing)의 결합을 통해 작동하는 구조를 가짐
 - 데이터는 학습의 기반을 제공하고, 알고리즘은 이를 통해 패턴을 추출하며, 컴퓨팅 자원은 이러한 과정을 가능하게 하는 실행 환경을 구성
 - 이러한 구조적 특성은 전통적인 물리 기반 기술(반도체, 로봇, 통신 인프라 등)과 구별되는데, AI는 물질적 제약보다는 정보 처리와 학습 구조에 의해 성능이 결정되며, 특히, 확장성(scalability)과 재사용성(reusability)이 높은 특성을 지님
 - 그 결과 AI가 다양한 산업에 빠르게 확산될 수 있는 기반이 되었으며, 동시에 특정 자원(데이터, 연산)에 대한 의존성을 심화시키는 구조적 특징으로 나타내게 됨
 - 최근 AI 발전은 데이터, 알고리즘, 컴퓨팅 인프라의 동시적 고도화에 의해 가속화되고 있으며, 특히 대규모 데이터 축적과 고성능 컴퓨팅 인프라의 확장은 기술 발전을 견인하는 핵심 동인으로 작용(Kaplan et al., 2020.1)
 - ※ Kaplan et al. (2020)은 신경망 언어 모델의 성능이 모델 크기(parameter 수), 데이터 규모, 및 연산량(compute)의 증가에 따라 체계적으로 향상된다는 스케일링 법칙(scaling laws)을 제시
- AI 산업의 성장은 기술 확산을 넘어 시장 규모 확대와 이를 견인하는 산업적 투자 증가, 기업의 AI 도입 등 측면에서 정량적으로 뚜렷하게 확인됨
 - 글로벌 AI 시장(지출 기준)은 '24년 약 3,159억 달러에서 연평균 성장률 31.9%의 고성장세로 '29년 1조 2,619억 달러 수준으로 성장할 것으로 전망(IDC, 2025.9)

- ※ 미국이 전 세계 인공지능 시장의 발전을 주도하며 시장 규모의 55% 이상을 차지('25년 기준)
- 특히, 전 세계 생성형 AI 시장이 '24~'29년간 연평균 56.3% 성장하여 '29년에는 6,071억 달러에 이를 것으로 예측되며, 이는 전체 시장의 48.1%를 차지(IDC, 2025.9)

▶ 글로벌 AI 시장 규모 ◀



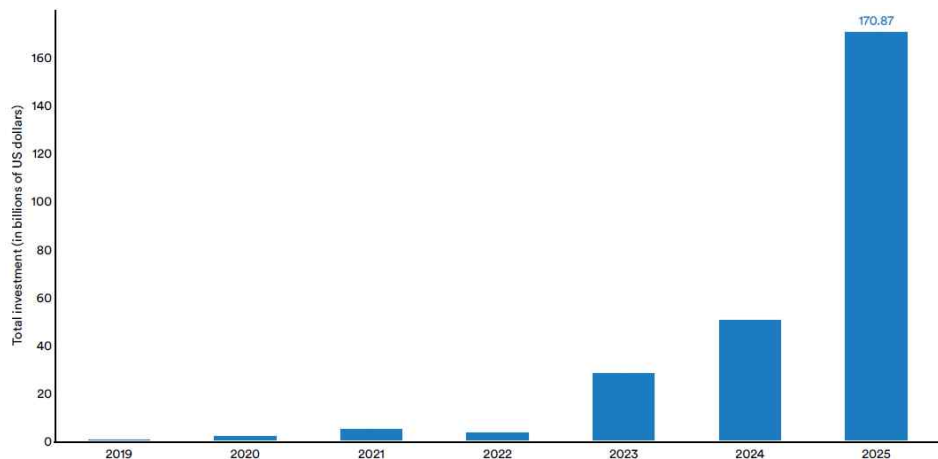
* 출처: IDC(2025.9)

- '22년 생성형 AI의 등장 이후*, 기업들의 AI 관련 투자는 급격히 증가하고 있으며, '25년 기준 생성형 AI 관련 투자 규모는 약 1,709억 달러로('24년 대비 200% 이상 증가)에 달한 것으로 보고(Stanford AI Index Report, 2026.4)

* 생성형 AI는 GAN('14), Transformer('17) 등 선행 기술을 기반으로 발전해 왔으나, '22년 ChatGPT 출시 이후 대중화 및 산업적 확산이 본격화된 것으로 평가

※ AI 분야 글로벌 기업 투자(corporate investment)는 '25년 기준 5천8백억 달러에 이릅니다

▶ 글로벌 AI 투자 추이 - Corporate's private investment in generative AI ◀



* 출처: Stanford University HAI (2026.4)

- 기업의 AI 도입률('25)은 과거 55%('23), 78%('24)에서 88%로 증가하고, 생성형 AI 활용도 각각 33%, 71%에서 79%로 확대되며, 조직의 실제 업무 활용에 지속적으로 확대
- ※ AI 활용은 IT·금융 등 디지털 친화 산업에서 앞서 나타나는 가운데 산업 간 격차가 존재하며, 동시에 IT·마케팅·서비스 등 기능에서 약 30~50% 수준으로 집중되는 등 특정 산업·기능 중심으로 확산되는 중

▶ 산업 및 기능별 AI 활용 ◀

Industry	Human resources	IT	Knowledge management	Manufacturing	Marketing and sales	Product and/or service development	Risk, legal, and compliance	Service operations	Software engineering	Strategy and corporate finance	Supply chain/ inventory management
Advanced industries	18%	40%	29%	26%	29%	30%	7%	22%	32%	16%	25%
Business, legal, and professional services	20%	21%	58%	1%	46%	33%	15%	32%	13%	22%	4%
Consumer goods and retail	22%	32%	28%	13%	51%	21%	11%	34%	19%	9%	22%
Energy and materials	22%	39%	33%	21%	33%	28%	17%	32%	30%	20%	19%
Financial services	17%	36%	38%	0%	36%	28%	43%	38%	23%	12%	3%
Health care, pharma, and medical products	25%	30%	46%	11%	38%	36%	13%	25%	21%	18%	21%
Media and telecom	28%	38%	34%	5%	45%	32%	17%	46%	33%	17%	6%
Technology	28%	56%	46%	9%	49%	49%	18%	45%	58%	20%	10%

% of respondents (function)

* 출처: Stanford University HAI (2026.4)

AI 산업은
모델·데이터·연산의 확대에
기반한 스케일 성장,
플랫폼화를 통한 생태계
확장, 그리고 범용기술
특성에 기반한 산업
전반으로의 확산을
중심으로 성장하고 있다.

- 앞서 논의한 기술적 특성과 산업적 성장과 확산 양상을 종합할 때, AI 산업은 다음의 핵심 성장 메커니즘(growth mechanism)을 중심으로 전개되는 중
 - (스케일 기반 성장 메커니즘) 트랜스포머 아키텍처*의 등장 이후 AI 모델의 규모는 급격히 확대되었으며, 최근 대규모 언어모델은 수천억 개 이상의 파라미터 기반으로 구축
 - * 입력 데이터 간 관계를 Attention 메커니즘을 통해 병렬적으로 학습하는 딥러닝 구조로, 대규모 데이터와 연산 자원을 활용한 모델 확장을 가능하게 한 핵심 기술(Vaswani et al., 2017)
 - 이와 함께 학습 데이터 규모는 수십억~수조 토큰 수준으로 확대되었으며, 모델 학습에 투입되는 연산 자원은 최근까지도 연간 4~5배 수준으로 고성장(Epoch, OpenAI, 2024)
 - 이러한 모델·데이터·연산의 동시적 스케일 확장은 모델 성능이 이들 요소의 확대에 따라 향상된다는 스케일링 법칙에 의해 이론적으로 뒷받침됨(Kaplan et al., 2020)
 - ⇒ AI 발전이 점차 인프라 주도의 자본 집약적 성장 구조로 전환되고 있음을 의미
 - (플랫폼화 기반 생태계 확장 메커니즘) AI는 개별 애플리케이션을 넘어 클라우드 기반 서비스로 제공되며*, 모델이 API 형태로 표준화됨에 따라 하나의 플랫폼 인프라로 전환
 - ※ OpenAI API, Microsoft Azure OpenAI Service, Google Vertex AI, Amazon Bedrock 등
 - 이러한 플랫폼화는 다양한 기업과 개발자가 동일한 AI 모델을 기반으로 서비스를 구축할 수 있도록 하여 기술의 재사용성과 확산을 촉진
 - 그 결과, AI는 특정 기업의 기술을 넘어 다수의 참여자가 상호작용하는 생태계를 형성 하며 산업 전반으로 확산되고 있음
 - ⇒ AI가 개별 기능을 수행하는 기술을 넘어 범용 인프라(enabling infrastructure)로 전환 되고 있음을 의미
 - (범용성 기반 확산 메커니즘) AI는 범용 기술(GPT)의 특성을 가지며, 특정 산업에 국한 되지 않고 다양한 산업과 업무 영역으로 빠르게 확산되는 특징을 보임
 - GPT로서 AI는 기존 기술 및 생산 구조와 결합하여 보완적 혁신(complementary innovation)을 유도하고, 이를 통해 산업 전반에 걸쳐 생산성 향상과 비용 절감을 동시에 촉진하는 구조를 형성

⇒ 이러한 확산은 단순한 기술 도입을 넘어, 기존 업무 프로세스의 재구성 및 지식 생산 방식의 변화를 수반하는 구조적 변화를 의미

※ 최근 실증 연구에 따르면 생성형 AI 도입은 실제 업무 환경에서 평균적으로 약 15% 수준의 생산성 향상을 가져오는 것으로 나타남(Brynjolfsson et al., 2025)

⇒ 결국 AI의 범용성은 기술 간 결합을 넘어 산업 전반으로의 확산을 가속화하며, 이는 노동시장 구조와 기업 경쟁력, 나아가 산업 구조 변화로 이어지는 확산 메커니즘으로 작동

▶ AI 산업의 핵심 성장 메커니즘 ◀

메커니즘 특징	스케일 기반 성장 (scale-driven growth)	플랫폼화 기반 확장 (platform-driven expansion)	범용성 기반 확산 (generality-driven diffusion)
핵심개념	모델·데이터·연산의 동시적 확대	API 제공 및 서비스화	산업 전반으로 확산되는 범용 기술
작동원리	스케일 증가 → 성능 향상	플랫폼 구축 → 생태계 형성	기술 적용 → 산업 확산
기대효과	성능 고도화 자본 집약화	활용 확산 네트워크 효과	생산성 향상 산업 구조 변화

AI 산업은 스케일 확대, 데이터 중심 학습, 고전 컴퓨팅 기반 발전을 통해 성장해 왔으나, 비용·에너지 부담 증가, 데이터 의존성, 계산 복잡도 한계 등 구조적 병목에 직면하고 있다.

● AI 산업의 성장 메커니즘은 AI의 급속한 발전을 견인하는 동시에, 이러한 발전을 가능하게 한 기술 패러다임*에 내재된 구조적 한계를 보이고 있으며, 이는 상호 연관된 3가지 병목(structural bottlenecks)으로 나타남

※ 고전 컴퓨팅 환경에서 대규모 데이터와 연산 자원을 기반으로 통계적 학습을 수행하고, 모델·데이터·연산 규모의 확장을 통해 성능 향상을 달성하는 현재의 AI 발전 구조를 의미

- (스케일 기반 성장의 한계) AI 성능 향상이 모델 크기와 연산량 증가에 의존하는 구조는 점차 한계에 직면하고 있으며*, 대규모 모델 학습 과정에서 발생하는 막대한 전력 소비와 탄소 배출 문제는 지속 가능성 측면에서 중요한 제약 요인으로 작용(Strubell et al., 2019; Patterson et al., 2021)

* 모델 학습에 소요되는 비용은 기하급수적으로 증가하는 반면, 성능 개선의 한계 효용은 점차 감소하는 경향을 보임

- OpenAI, Google, Meta 등은 수백억에서 수천억 개 이상의 파라미터를 갖는 초거대 모델을 개발하기 위해 대규모 데이터센터와 고성능 컴퓨팅 인프라를 활용하고 있으며, 모델 학습에 소요되는 비용 또한 급격히 증가

⇒ 이는 성능 향상이 구조적으로 더 많은 자원을 요구하는 방향으로만 이루어지는 '확장 의존적 발전 경로(scale-dependent trajectory)'를 형성함을 의미하며, 효율성 기반 혁신보다는 자원 투입 기반 경쟁을 강화하는 경향을 초래

⇒ 그 결과, AI 산업은 점차 소수의 대규모 자본과 인프라를 보유한 기업 중심으로 재편되는 자본 집약적 구조로 전환

- (데이터 중심 패러다임의 제약) 현재 AI는 대규모 데이터에 기반한 통계적 학습 구조에 의존하고 있으며, 데이터 품질과 분포에 매우 민감

⇒ 이는 데이터 편향(bias), 일반화 실패 등에 대한 취약성으로 이어지며, 특히 의료, 국방 등 고신뢰성이 요구되는 영역에서 적용을 제한하는 요인으로 작용

- (고전 계산 패러다임의 근본적 제약) 현재 AI는 고전 컴퓨팅 아키텍처에 기반하고 있기 때문에 조합 최적화, 분자 시뮬레이션, 복잡계 탐색 등과 같은 문제에서는 계산 복잡도의 한계를 근본적으로 극복하기 어려움
 - ⇒ 이는 특정 문제 영역에서 AI의 적용 가능성을 구조적으로 제한하는 요인이며, 새로운 계산 패러다임의 필요성을 제기(Indiveri et al., 2015)
- 상기 병목들은 데이터·알고리즘·컴퓨팅 확장 중심의 현행 AI 발전 패러다임에 내재된 구조적 한계의 산물
 - ⇒ 이는 기존 발전 경로의 지속 가능성에 대한 근본적 질문을 제기하는 동시에 새로운 계산 원리 및 기술 패러다임의 필요성을 시사

▶ AI 산업 성장의 구조적 병목 ◀

특징	병목	스케일 기반 한계 (Scale Ceiling)	데이터 중심 제약 (Data Bottleneck)	계산 패러다임 제약 (Computational Constraint)
구조적 원인		모델·데이터·컴퓨팅의 지속적 확장에 의존	대규모 데이터 기반 통계적 학습 구조	고전 컴퓨팅 아키텍처 기반 계산 구조
기술적 한계		연산량 및 비용 급증 효율 감소	데이터 편향 일반화 실패	계산 복잡도 한계
산업적 영향		자본집약 구조 및 시장 집중	고신뢰 산업 적용 제한	문제 해결 범위 제한

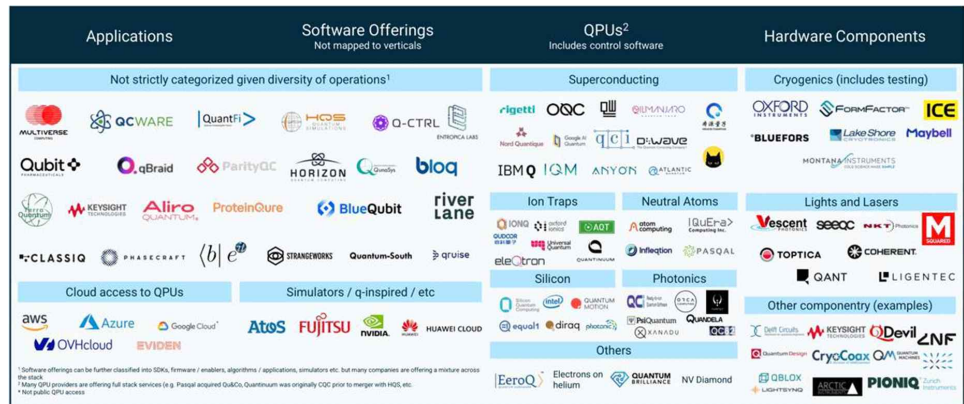
□ Quantum 기술의 부상과 제약

Quantum 기술은 양자역학적 원리를 활용하는 하드웨어 중심의 기술 체계로, 기존 컴퓨팅 패러다임을 확장할 수 있는 차세대 범용기술로 주목받고 있다. 최근에는 하드웨어 개발과 클라우드 기반 서비스 확산을 바탕으로 산업화 단계로 진입하고 있다.

- 양자기술(Quantum technology)은 양자역학적 원리(중첩, 얽힘, 간섭 등)를 정보 처리 및 계산에 활용하는 기술로, 물리적 시스템 상에서의 구현과 안정성 확보가 핵심이 되는 하드웨어 중심의 기술 체계
 - 기존 고전 컴퓨팅 패러다임을 근본적으로 확장할 수 있는 차세대 범용 기술로 주목
 - 특히, 양자컴퓨팅(Quantum computing)은 특정 문제 영역에서 고전 컴퓨터 대비 지수적 또는 다항식 수준의 계산 우위를 제공할 수 있는 잠재력을 보유
 - 이러한 특성으로 인해 양자기술은 인공지능, 신소재, 암호, 물류 최적화 등 다양한 분야에서 게임체인저(game changer)로 평가되며, 주요국과 글로벌 기업을 중심으로 전략적 투자와 기술 경쟁이 본격화되는 중
- 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨팅과 달리 양자 상태(qubit)를 기반으로 작동하며, 이는 정보 표현 및 연산 방식에서 근본적인 차이를 형성
 - 고전 비트(bit)가 0 또는 1의 값을 갖는 반면, 큐비트(qubit)는 중첩(superposition)을 통해 동시에 여러 상태를 표현할 수 있음
 - 또한, 얽힘(entanglement)을 통해 다수의 큐비트 간 상관관계를 형성함으로써, 특정 계산에서 병렬적 탐색이 가능
 - 이러한 특성은 고전 컴퓨팅의 직렬적 계산 구조를 넘어서는 새로운 계산 패러다임을 의미하며, 특히 조합 최적화, 분자 시뮬레이션, 암호 해독 등 고복잡도 문제에서 강점을 가질 것으로 기대

- 양자 기술은 이론적 가능성 단계를 넘어 실험 및 활용 단계로 진입하고 있으며, HW 성능 향상과 클라우드 플랫폼 확산을 중심으로 기술 기반이 빠르게 구축 중
 - IBM, Google, IonQ, Rigetti 등 글로벌 기업들은 수십~수백 큐비트 수준의 양자 프로세서를 개발하며 하드웨어 경쟁을 가속화
 - 동시에 IBM Quantum, AWS Amazon Braket, MS Azure Quantum 등 클라우드 기반 양자컴퓨팅 서비스가 등장하면서 양자 기술은 접근 가능한 플랫폼 형태로 전환
 - 이러한 플랫폼화는 연구자 및 기업이 실제 양자 하드웨어를 활용하여 알고리즘을 실험할 수 있는 환경을 제공하며 관련 산업 생태계 형성을 촉진

▶ 양자 컴퓨팅 가치사슬 생태계 ◀



* 출처: The Quantum Insider (2025.12)

- 기술 기반 확충과 함께 양자 컴퓨팅의 산업 적용 가능성이 확대되면서 시장 형성 및 산업화가 본격화되고 있음
 - 글로벌 양자컴퓨팅 시장은 아직 초기 단계이나 향후 10~20년간 고성장이 예상되며, 특히 제약, 화학, 금융, 에너지 분야에서 활용 가능성이 높은 것으로 평가
 - 주요 기업들은 분자 시뮬레이션 기반 신약 개발, 금융 포트폴리오 최적화, 물류 경로 최적화 등 다양한 산업 적용 사례에서 양자 기술의 가능성을 탐색 중
 - 또한, 정부 차원의 대규모 투자도 확대되고 있으며, 미국, EU, 중국 등은 국가 전략 기술로서 양자 기술을 집중 육성 중
- 이러한 흐름을 종합할 때, 양자 컴퓨팅 기술은 다음과 같은 핵심 발전 메커니즘을 중심으로 전개되고 있는 것으로 분석
 - (계산 패러다임 전환 메커니즘) 양자기술은 고전 컴퓨팅의 비트 기반 연산을 양자 상태 기반 연산으로 전환함으로써, 특정 문제에서 계산 복잡도를 구조적으로 낮출 수 있는 가능성을 제시(Au-Yeung et al., 2024)
 - ⇒ 기존 계산 한계를 돌파할 수 있는 새로운 기술 경로를 형성
 - (하드웨어 중심 기술 진화 메커니즘) 양자 컴퓨팅 기술은 초전도, 이온트랩, 광자 기반 등 다양한 물리적 구현 방식이 경쟁적으로 발전하는 초기 단계에 있으며 (AbuGhanem, 2025)), 기술 진전이 아직까지 주로 하드웨어 성능(큐비트 수, 오류율 등)에 의존하는 구조

양자컴퓨팅은 계산 패러다임 전환, 하드웨어 중심 기술 진화, 플랫폼 기반 생태계 형성을 중심으로 발전하며 새로운 계산 가능성과 산업 적용 기반을 확대하고 있다.

- ⇒ 기술 발전이 물리적 구현 안정성, 오류 제어 등 HW 공학적 난제 해결이 중요
- (플랫폼 기반 생태계 형성 메커니즘) 클라우드 기반 양자컴퓨팅 서비스의 제공 및 확산은 양자 기술에 대한 접근성을 높이고(Nguyen et al, 2024), 관련 알고리즘 및 응용 연구를 촉진
- ⇒ 초기 단계임에도 불구하고 개발자 및 산업 참여를 유도하는 생태계 형성

▶ Quantum 기술의 핵심 발전 메커니즘 ◀

특징	계산 패러다임 전환 (Computational paradigm shift)	HW 중심 기술 진화 (HW-driven Technological evolution)	플랫폼 기반 생태계 형성 (Platforme-based ecosystem formation)
핵심개념	양자 상태 기반 연산	물리적 구현 기술 경쟁	클라우드 기반 서비스 접근
작동원리	중첩·얽힘 활용 → 계산 복잡도 감소	큐비트·오류율 개선 → 성능 및 안정성 향상	QCaaS·SDK 확산 → 산업 생태계 형성
기대효과	계산 한계 극복 가능성	HW 중심 성능 경쟁 구조 형성	QC 기술의 활용 확산 및 산업 적용 확대

양자컴퓨팅은 계산 우위의 잠재력에도 불구하고 하드웨어 구현 제약, 기술·활용 생태계의 미성숙, 산업화 및 경제성의 불확실성이라는 구조적 병목에 직면하고 있다.

- 양자는 고전 컴퓨팅의 계산 한계를 극복할 수 있는 잠재력에도 불구하고, 기술·산업적 측면에서 다음과 같은 구조적 한계(structural bottlenecks)에 직면
 - (하드웨어 구현의 근본적 제약) 현재 양자컴퓨터는 NISQ* 단계에 머물러 있으며, 큐비트 수 확장과 오류율(error rate) 제어가 동시에 요구되는 구조적 난제를 안고 있음
 - * Noisy Intermediate-Scale Quantum
 - 안정적인 대규모 양자컴퓨터 구현을 위해서는 양자 오류 정정(QEC; Quantum error correction)이 필수적이거나, 이를 위해서는 추가적인 큐비트 자원이 대규모로 요구
 - ⇒ 결과적으로 하드웨어 확장이 단순한 규모 확대가 아닌 오류 제어와 자원 효율성 문제를 동반하는 비선형적 발전 경로를 보임
 - (기술 및 활용 생태계 미성숙) 양자컴퓨팅 기술은 알고리즘, 소프트웨어, 개발 도구, 표준, 전문 인력 등 전반적인 기술 및 활용 생태계가 아직 초기 단계에 머물러 있음
 - Shor, Grover 등 일부 양자 알고리즘이 이론적 우위를 보이거나, 실제 산업 문제에 적용 가능한 알고리즘은 여전히 제한적이 상황
 - 특히, NISQ 환경에서는 노이즈와 자원 제약으로 이론적 성능을 충분히 구현하기 어려움
 - 또한, 개발 도구 및 표준화 체계의 미비, 전문 인력 부족 등으로 인해 기술 개발과 활용 확산이 제약
 - ⇒ 이에 따라 양자 컴퓨팅은 범용적 활용보다는 특정 문제 중심의 제한적 적용 단계에 머물며, 기술 확산 기반이 미흡한 상황
 - (산업화 및 경제성의 불확실성) 양자컴퓨팅은 높은 구축 비용과 불확실한 성능 이점으로 인해 단기적 경제성 확보에 제약 존재
 - 현재의 활용은 실험/실증 수준에 머물러 있으며, 명확한 상업적 가치 창출 사례는 제한적
 - ⇒ 이는 기술적 기대와 산업적 현실 간 괴리를 심화시키며, 상용화 및 투자 확대를 제약하는 요인으로 작용

▶ Quantum 기술 발전의 구조적 병목 ◀

특징 \ 병목	하드웨어 구현 제약 (Hardware Constraints)	기술 생태계 미성숙 (Immature technological ecosystem)	산업화·경제성 불확실성 (Industrial & Economic Uncertainty)
구조적 원인	NISQ 단계 양자 상태의 환경 민감성	초기 기술 축적 단계 개발 환경 및 인력 부족	고비용 구조 성능 불확실성
기술적 한계	디코히런스·오류율 문제 QEC로 인한 자원 부담	알고리즘 적용·검증 제약 개발 도구 및 표준 미흡	성능 검증 부족 시스템 안정성 한계
산업적 영향	시스템 확장 지연 기술 발전 속도 둔화	특정 문제에 제한적 활용 기술 확산 지연	상용화 지연 투자 불확실성 확대

AI와 Quantum 기술은 각각의 구조적 한계를 보완할 수 있는 상호 보완적 관계를 가지며, 이러한 특성은 두 기술의 융합을 기술 발전의 내재적 요구로 부각시키고 있다.

□ Quantum-AI 융합의 등장

- AI와 Quantum 기술은 각각 독자적인 발전 경로를 형성해 왔으나, 동시에 앞서 논의한 것과 같은 내재적 한계와 구조적 병목에 직면
 - AI는 고전 컴퓨팅 기반의 데이터·알고리즘 연산의 결합을 통해 산업 전반에 확산되는 범용 기술(GPT)로 발전해 온 반면, Quantum은 양자정보이론 기반의 물리적 시스템 구현을 중심으로 발전해 옴*
 - * 최근에는 HW 성능 개선과 클라우드 기반 접근성 확대를 통해 활용 단계로 확장되는 중
 - AI는 스케일 확대의 비용·효율 한계, 데이터 의존 구조의 제약, 그리고 고전 계산 패러다임에 따른 복잡도 한계 등 구조적 병목에 직면
 - 반면, Quantum은 하드웨어 안정성, 오류 제어, 알고리즘 및 생태계 미성숙 등으로 인해 산업적 확산과 활용에 제약 존재
- AI와 Quantum 기술이 직면한 구조적 한계는 상호 보완적인 특성을 가지며, 이는 두 기술 간 융합이 단순한 선택이 아니라 기술 발전의 내재적 요구에서 비롯된 필연적 흐름임을 시사
 - AI는 Quantum 기술을 통해 기존 계산 패러다임의 한계를 보완하고, 고복잡도 문제 해결 능력을 확장할 수 있음 ⇒ AI 계산 패러다임의 확장
 - Quantum 기술은 AI를 통해 하드웨어 제어, 오류 보정, 알고리즘 탐색 등에서 효율성을 확보하며 기술 성숙도를 가속화할 수 있음 ⇒ Quantum 기술 구현·성숙 가속화
 - 즉, 양자는 계산 패러다임의 혁신을, AI는 학습·최적화·자동화 능력을 제공함으로써 상호 보완적 기술 구조를 형성 ⇒ 다중 기술 기반 융합 생태계로 전환

📄 기술 융합과 Quantum-AI 융합

□ 융합(Convergence)이란?

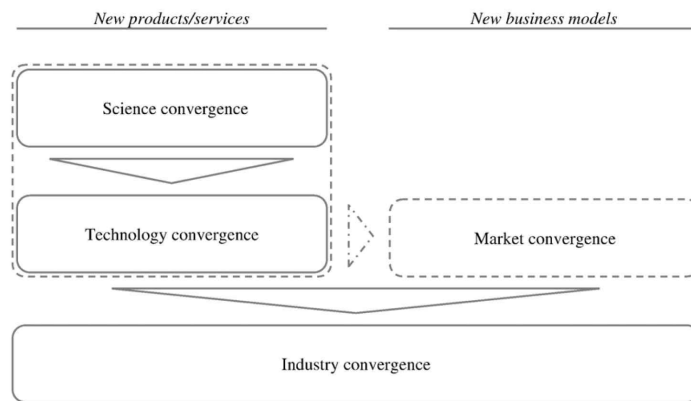
- 융합(convergence)은 서로 분리되어 발전해 온 기술 및 산업 영역 간 경계가 약화 되면서, 이들 간 결합과 상호작용을 통해 새로운 기능과 가치, 그리고 구조적 변화가 발생하는 과정을 의미(Curran & Leker, 2011)

융합은 서로 다른 영역 간 결합과 상호작용을 통해 새로운 기능과 가치,

그리고 구조적 변화를 창출하는 동태적 과정이다.

- 이는 단순한 결합을 넘어, 이질적 영역 간 상호작용을 통해 새로운 체계(system)가 형성 되는 동태적 변화 과정으로 이해할 필요
- 융합은 과학·지식, 기술, 시장, 산업 전반에 걸쳐 나타나는 다층적 현상으로*, 층위 내부(intra-layer) 및 층위 간(inter-layer) 상호작용이 구조적 변화를 유도
 - 과학·지식 수준에서는 이론/연구 영역 간 결합이 발생하며 기술 수준에서는 이질적 기술 간 통합이 이루어지고 시장/산업 수준에서는 제품·서비스 및 산업 구조 재편이 나타남
 - 나아가 기술-산업(technology-industry) 융합 등과 같은 층위 간 융합으로 확대됨
 - 융합은 개별 기술의 발전에 국한되는 단순한 기술 현상을 넘어, 지식-기술-시장-산업을 연결하는 구조적 변화 과정으로 이해할 필요

▶ 융합의 순차적 프로세스 ◀



* 출처: Curran & Leker (2011)

□ 기술 발전의 핵심 메커니즘: 기술 융합

기술 융합은 이질적 기술 간 결합과 상호작용을 통해 새로운 혁신을 창출하고, 기술 체계와 산업 구조의 변화를 유도하는 기술 발전의 핵심 메커니즘이다.

- 기술 융합은 융합 현상 중에서도 서로 다른 기술 간 결합과 통합을 통해 새로운 기술 및 혁신을 창출하는 과정을 의미(Kodama, 1992)
 - 이는 단순한 기능적 결합(combination)이나 기존 기술의 확장(extension)이 아닌 이질적 기술 간 통합(integration)을 통해 비연속적 혁신을 유도하는 특징을 가짐
 - 따라서 기술 융합은 단순한 기술 발전의 한 유형이 아니라 기술-산업-경제를 연결하며 기술 체계와 산업 구조의 변화를 유도하는 핵심 변화 메커니즘으로 이해 가능
- 기술 융합은 개별 기술의 성능이 아니라 기술 간 결합과 상호작용을 통해 형성되는 관계와 구성 방식에 관한 것으로 다음 같은 구조적 특징을 가짐
 - (이질성 기반 결합) 서로 다른 원리와 특성을 가진 기술 간 결합을 통해 기존 기술로는 구현하기 어려운 새로운 기능 창출하여 비연속적 혁신을 유도(Fleming, 2001)
 - (상호보완성) 기술 간 기능적 보완을 통해 개별 기술의 한계를 극복하고 시스템 수준의 성능 향상을 가능하게 함
 - (재조합성) 기술은 구성 요소의 결합과 재구성을 통해 발전하며, 기술 융합은 이러한 특성을 기반으로 지속적인 혁신 창출 기반으로 작용(Arthur, 2009)

- (구조 재편성) 기술 융합은 산업 구조 및 가치사슬의 변화를 유도하며, 산업 간 경계 약화와 새로운 산업 영역 형성으로 이어짐
- 위와 같은 특징은 기술 융합이 기술 발전의 새로운 경로임을 설명하는 중요한 이론적 틀(theoretical framework)을 제공
- 특히, AI와 Quantum과 같이 서로 다른 계산 원리와 기술 체계를 기반으로 하는 기술 간 결합은 기존 기술 융합의 구조적 특성을 기반으로 설명될 수 있음
- 나아가, 그 통합 방식과 상호작용 구조 측면에서 기존 기술 융합과 차별적인 특성도 보일 수 있으며, 이에 대한 정밀한 분석이 요구

Quantum-AI 융합은 서로 다른 계산 원리와 기술 체계를 가진 AI와 Quantum 기술의 통합으로, 이질성·상호보완성·재조합성·구조 재편성을 통해 새로운 계산 및 문제 해결 가능성을 창출하는 기술 융합의 한 형태이다.

□ Quantum-AI 융합의 특성

- Quantum-AI 융합은 양자기술(QC)과 인공지능(AI)이 상호 결합하여 새로운 문제 해결 방식과 계산적 접근을 창출하는 기술 융합의 한 형태로 정의 가능
 - QC의 압도적 연산 능력과 AI의 뛰어난 학습/추론 능력 간 융합을 의미하며, 두 분야 모두에 상당한 이점을 줄 것으로 예상되는 기술적 시너지(Klusck et al., 2024)
 - 두 기술 사이의 단순 병렬적 결합이 아니라, 서로 다른 계산 원리(비트vs큐비트)와 기술 체계(SW·데이터 중심 vs HW·물리구현 중심)를 기반으로 한 기술 간 통합을 통해 새로운 계산 및 문제 해결 가능성을 형성하는 과정
 - 기술 융합 관점에서 볼 때, Quantum-AI 융합은 기존 기술 융합의 구조적 특성을 공유하여, 이를 통해 두 기술 간 결합과 상호작용 구조를 설명할 수 있음
 - (이질성 기반 결합) 고전 컴퓨팅(비트) 기반 AI와 양자역학(큐비트) 기반 Quantum 기술은 서로 다른 계산 패러다임을 기반으로 함
 - (상호보완성) Quantum은 고복잡도 문제에서의 계산 능력 확장을 통해 AI의 문제 해결 성능을 향상시킬 수 있으며, AI는 학습·최적화·제어 기능을 통해 Quantum 시스템의 구현과 효율성을 개선
 - (재조합성) 두 기술은 알고리즘, HW, SW 등 다양한 구성 요소의 결합과 재구성을 통해 새로운 조합 형태를 형성하고, 이를 통해 새로운 응용 가능성을 창출
 - (구조 재편성) 기존 고전 컴퓨팅 중심의 기술 구조를 양자-고전 하이브리드 구조로 전환시키거나 양자 시스템의 고도화를 유도하며, HW-SW 간 관계*와 산업 가치사슬의 재편을 유도
- * AI는 SW 중심의 학습최적화 기술이며, Quantum은 HW 중심의 계산 기술로 이들 간 융합은 SW와 HW 간 역할과 상호작용 구조를 형성

📖 Quantum-AI 융합의 의의와 전개

□ Quantum-AI 융합의 중요성

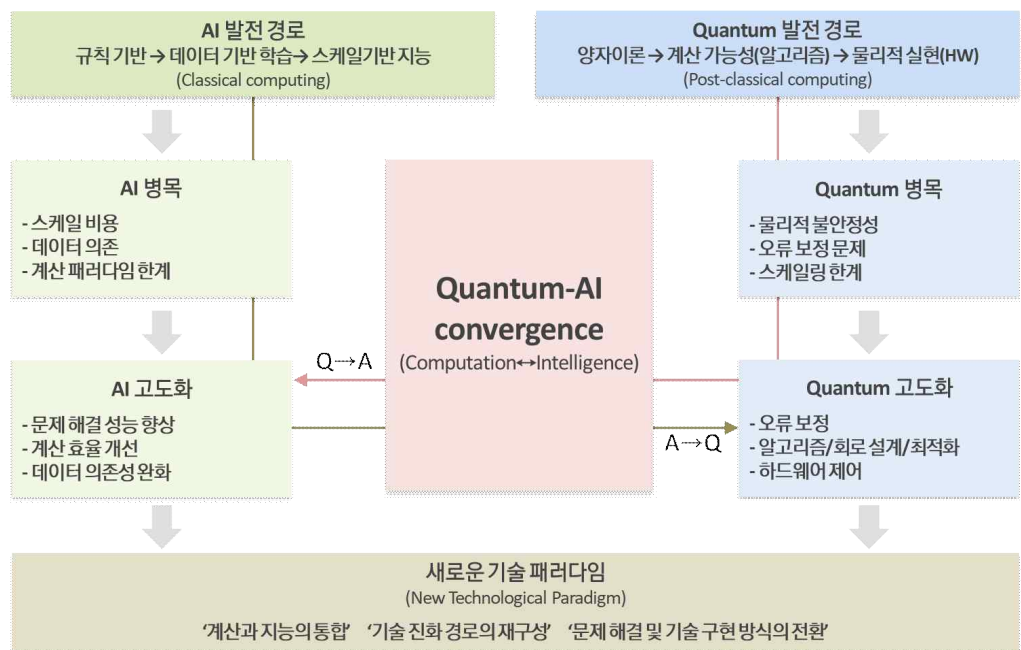
- Quantum-AI 융합은 기술 간 단순 결합을 넘어, 계산과 지능의 결합을 통한 새로운 기술 패러다임(new technological paradigm)*으로 평가

Quantum-AI 융합은 계산과 지능의 통합을 통해 새로운 기술 진화 경로를

형성하며, 문제 해결 방식과 기술 구현 체계의 전환을 유도하는 구조적 혁신이다.

- * 기술 패러다임이란 특정 기술 영역에서 문제 정의, 해결 방식, 기술 발전 경로를 규정하는 지배적 설계 원리와 지식 체계를 의미(Dosi, 1982)
- 기존 기술 융합이 주로 기능적 결합(functional integration) 또는 응용 중심 결합(application-level integration)에 머물렀다면*, Quantum-AI 융합은 계산 원리와 지능 구현 방식이라는 근본적 층위에서의 결합이라는 점에서 차별적
- * 예) 기능결합: 자율주행(센서+통신+AI), 응용 결합: 디지털 헬스케어(바이오+데이터+AI)
- 이는 두 기술 축의 상호작용을 통해 기술 체계 전반의 재구성을 유도할 가능성을 내포
- 즉, 연산 패러다임과 학습-추론 메커니즘이 통합되면서, 기술 성능이 개별 기술이 아닌 상호작용 구조에 의해 결정되는 새로운 기술 체계로 전환됨을 의미
- Quantum-AI 융합은 새로운 기술 진화 경로(technological evolution path)를 형성
 - 기존 AI는 고전 컴퓨팅 기반에서 모델-데이터-연산에 대한 ‘스케일 확장(scale-up)’ 중심으로 발전해 온 반면, Quantum-AI 융합은 새로운 계산 원리를 도입함으로써 ‘패러다임 전환(paradigm shift) 가능성을 제시
 - Quantum-AI 융합은 기존 AI의 확장 경로와 Quantum 기술의 실현 경로를 연결하는 교차 지점으로서 기술 간 상호작용(Q→A, A→Q)을 기반으로 발전 경로를 형성
- Quantum-AI 융합은 문제 해결 방식과 기술 구현 체계를 전환시키는 구조적 혁신(structural innovation)에 해당
 - Quantum-AI 융합은 양자 계산의 효율적 탐색 능력을 활용함으로써, 기존 AI로는 접근이 어려웠던 고복잡도 문제 영역에 대한 새로운 해결 가능성을 제시
 - 동시에, AI는 Quantum 시스템 안정성과 효율성을 개선하는 데 활용되어 Quantum 기술의 실제 활용 가능성을 제고

▶ Quantum-AI 융합: 계산과 지능의 결합을 통한 패러다임 전환 ◀

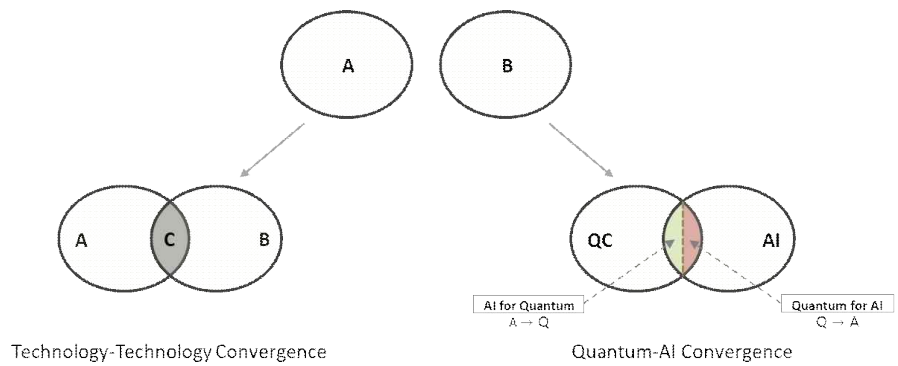


Quantum-AI 융합은 Quantum for AI(Q→A)와 AI for Quantum(A→Q)의 이중 구조를 기반으로 전개되며, 기술 간 상호 피드백을 통해 성능과 시스템 구조를 지속적으로 변화시키는 동태적 특성을 가진다.

□ Quantum-AI 융합의 구조와 전개

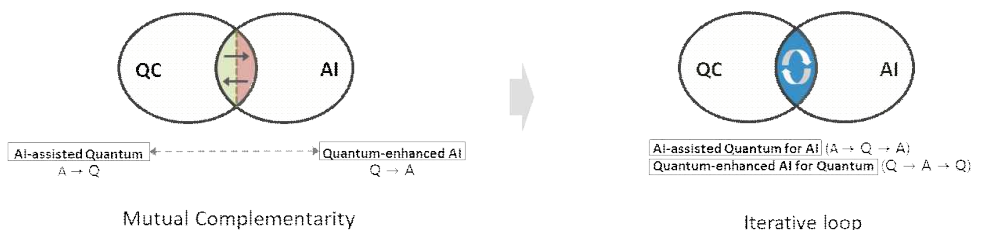
- Quantum-AI 융합은 Quantum for AI(Q→A)와 AI for Quantum(A→Q)의 이중 구조(bidirectional structure)를 중심으로 각기 서로 다른 역할을 수행하면서 상호 보완적으로 결합
 - (Quantum for AI; Q → A) Quantum은 AI의 학습 및 최적화 과정에서 고복잡도 탐색 및 계산을 수행하는 보조 연산 자원으로 활용
 - ※ 중첩, 얽힘 등과 같은 양자역학적 원리를 활용하여 새로운 AI 모델을 개발, 주요 분야: QML(Quantum Machine Learning), 조합 최적화 등
 - (AI for Quantum; A → Q) AI는 Quantum 시스템의 회로 설계, 파라미터 조정, 오류 보정 등에 활용되어 양자 HW(시스템)의 기술 구현과 성능 향상에 기여
 - ※ 신뢰성 있는 양자 컴퓨팅과 알고리즘 설계를 위해 추론-학습 같은 AI 방법론을 활용, 주요 분야: 회로 설계, 파라미터 최적화, 오류 보정(QEC; Quantum Error Correction) 등

▶ 기술 융합과 Quantum-AI 융합 ◀



- 이중 구조를 기반으로 형성되는 Quantum-AI 융합은 기술 간 상호작용이 심화됨에 따라 기술 성과와 시스템 구조에 미치는 영향이 확대됨
 - Quantum for AI 융합은 양자 연산 기능이 결합된 양자-고전 하이브리드 AI 시스템 형성을 통해 AI의 문제 해결 능력과 성능을 향상 ⇒ 다시 양자에 적용 가능
 - AI for Quantum 융합은 AI 기반 제어/최적화 기능이 결합된 양자 시스템 형성을 통해 안정성과 효율성을 개선 ⇒ 다시 AI에 적용 가능
 - 이러한 두 방향은 독립적/병렬적으로 작동하는 것이 아니라, 반복적 순환(iterative loop)을 통해 시스템의 성과와 구조를 지속적으로 변화시키면서 통합되는 특성을 가짐

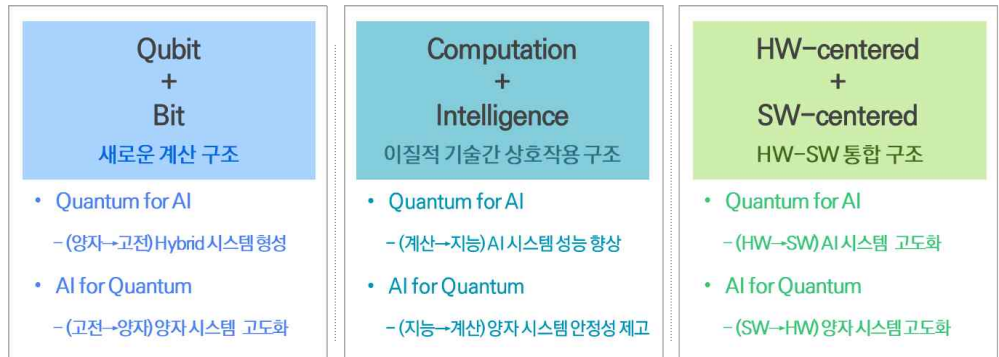
▶ Quantum-AI 융합의 상호작용 ◀



Quantum-AI 융합은 계산 패러다임 간 결합, 계산과 지능의 통합, HW-SW 통합 구조를 통해 기존 기술 융합과 구별되는 구조적 특징을 나타낸다.

- Quantum-AI 융합은 동일한 계산 체계 내 기능/응용 수준의 결합에 머문 기존 기술 융합과 구별되는 다음과 같은 구조적 특징을 나타냄
 - 첫째, 서로 다른 계산 패러다임(Qubit 기반 양자 계산 vs Bit 기반 고전 계산) 간 결합을 기반으로 새로운 계산 구조를 형성
 - ※ 양자-고전 Hybrid 시스템을 형성하거나(양자→고전), 양자 시스템이 고도화됨(고전→양자)
 - 둘째, ‘계산(computation)’과 ‘지능(intelligence)’의 결합을 통해 이질적 기술 축 간 상호작용을 중심으로 하는 구조적 특징을 보임
 - ※ AI 시스템의 성능이 향상되거나(계산→지능), 양자 시스템의 안정성이 제고(지능→계산)
 - 셋째, HW 중심 기술인 Quantum과 SW 중심 기술인 AI 간 결합을 통해 HW-SW 통합 구조를 나타냄
 - ※ AI 및 양자 시스템이 고도화됨(HW→SW, SW→HW)

▶ Quantum-AI 융합의 구조적 특징 ◀



- 이러한 구조와 전개 메커니즘을 기반으로 Quantum-AI 융합은 시간의 흐름에 따라 단계적으로 진화하며, 다음 장에서 진화 프레임워크로 체계화함

 Quantum-AI 융합의 진화 프레임워크

□ 프레임워크의 필요성

Quantum-AI 융합은 기술 간 상호작용을 통해 단계적으로 진화하는 공진화 시스템으로, 이를 설명하기 위한 진화 프레임워크가 필요하다.

- Quantum-AI 융합은 기술 간 단순 결합이 아닌 상호작용을 중심으로 시스템 구조가 형성·진화하는 동태적 과정(dynamic process)으로 이해할 필요
 - Quantum for AI(Q→A)와 AI for Quantum(A→Q) 간 이중 구조는 기술 간 일회적 결합이 아니라, 반복적 상호작용을 통해 기술 간 관계, 시스템의 성능/구조를 변화시킴
- 이러한 동태적 특성을 체계적으로 설명하기 위해서는 기술 융합의 진화 과정을 단계적으로 구조화한 프레임워크가 필요
 - Quantum-AI 융합은 초기의 병렬적 결합에서 출발하여, 상호 보완적 관계를 거쳐 궁극적으로는 기술 간 경계가 약화되는 통합 구조로 발전할 것으로 전망됨
 - 이는 단순한 성능 향상의 연속이 아니라, 기술 간 역할과 시스템 구성 방식이 함께 변화하는 구조적 전환을 포함

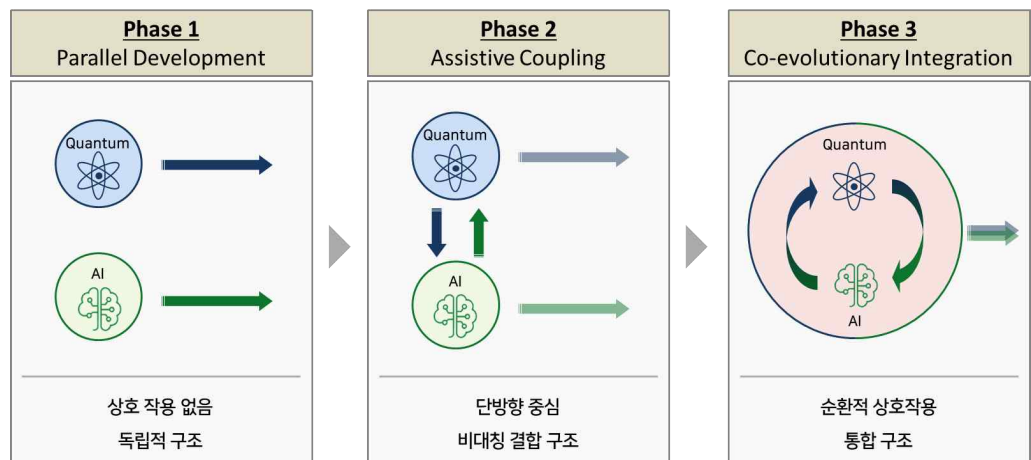
- 따라서, Quantum-AI 융합을 이해하기 위해서는 기술 간 상호작용의 수준과 방식에 따른 진화 단계를 구분하고, 이를 통해 변화의 방향성과 구조를 분석할 필요
- 이러한 접근은 복잡계 및 기술 진화 이론 등에 기반하여, Quantum-AI 융합을 하나의 공진화적 구조(co-evolutionary structure)로 해석할 수 있음
 - 복잡 적응 시스템(complex adaptive systems) 이론에서는 구성 요소 간 상호작용과 반복적 순환 구조를 통해 시스템이 스스로 변화하고 적응하는 과정을 강조 (Holland, 1992; Kauffman, 1993)
 - 또한, 기술 진화 이론에서는 기술이 일정한 경로(trajectory)를 따라 단계적으로 발전하며, 상호작용을 통해 새로운 기술 체계로 전환되는 과정을 설명 (Dosi, 1982; Nelson & Winter, 1982)
 - 나아가, 공진화(co-evolution) 관점에서는 서로 다른 기술 간 상호 의존성과 상호 영향을 통해 기술 구조가 재구성되는 과정을 설명 (Arthur, 2009)
- 이에 본 장에서는 Quantum-AI 융합의 진화 과정을 체계적으로 설명하기 위해 단계별 진화 프레임워크를 제시하고, 각 단계의 특징과 구조적 차이를 분석

Quantum-AI 융합은 기술 간 상호작용이 심화됨에 따라 독립적 발전에서 보조적 결합을 거쳐 공진화적 통합으로 진화하며, 시스템 구조가 점진적으로 통합·재편되는 특성을 보일 것이다.

□ Quantum-AI 융합의 진화 단계 및 특징

- Quantum-AI 융합의 진화는 기술 간 상호작용의 수준과 방식에 따라 단계적으로 진화하는 구조를 나타낼 전망
 - 각 단계는 Quantum과 AI 간 결합 수준, 역할 관계, 상호작용 방식의 차이에 따라 구분되며, 기술 간 관계가 점진적으로 심화되는 방향으로 전개
 - 특히, 초기에는 기술 간 독립성이 유지되지만, 이후 상호 보완적 관계를 거쳐 궁극적으로는 상호 의존적 관계를 기반으로 통합되는 방향으로 발전
- 결론적으로 Quantum-AI 융합은 병렬적 발전 → 보조적 결합 → 공진화적 통합으로 진화하며, 시스템 구조가 점진적으로 통합 및 재편되는 특성을 보일 전망

▶ Quantum-AI 융합의 진화 단계 ◀



Parallel Development
 단계는 AI와 Quantum이
 독립적으로 발전하며
 기술적·산업적 상호작용
 없이 각각의 역량과 산업
 기반을 축적하는 단계이다.

(1단계) Parallel development (병렬적 발전) : 독립적 구조 + 상호작용 없음

- Quantum과 AI가 각각 독립적인 기술 축으로 존재하며, 별도의 발전 경로를 따라 성장하는 단계
- 기술 간 직접적인 상호작용이나 영향 관계가 존재하지 않으므로 Q→A 또는 A→Q와 같은 방향성도 형성되지 않음
- 기술 및 산업 생태계가 분리된 상태로 유지되며, 각 기술은 독자적인 역할과 가치 사슬을 형성
- 상호 융합보다는 개별 기술의 성숙과 역량 축적이 중심이 되는 단계

☛ 독립적 발전 단계로, Quantum과 AI 간 기술적 및 산업적 상호작용 및 융합 관계가 아직 형성되지 않은 상태

- ※ Quantum은 아직 도입기(introduction stage)로 일부 산업에서 시범적 적용이 시도 되는 HW 중심 기술
- ※ AI는 이미 성장기(growth stage)에 있으며, 다양한 산업에서 응용과 확산이 활발히 진행 중인 SW 중심 기술

☛ 각각의 기술 역량과 산업 기반을 축적하는 단계이며, 이 과정에서 향후 기술 간 연계 및 융합이 전개될 수 있는 기반이 형성됨

항목	AI	Quantum
성장 단계	성장기 (확산 중)	도입기 (산업 진입 초기)
산업 활용	다양한 산업에서 실질적 확산	일부 산업에서 시범적 적용
기술 초점	데이터 기반 학습·인지	물리 기반 계산·제어
산업 내 역할	응용 중심 기술	기반 중심 기술

Assistive Coupling 단계는
 Quantum과 AI 간
 상호작용이 시작되어 한
 기술이 다른 기술의 성능
 향상을 지원하는
 비대칭적·단방향 결합
 구조가 형성되는 단계이다.

(2단계) Assistive Coupling (보조적 결합) : 비대칭적 결합 구조 + 단방향 중심

- 한 기술이 다른 기술의 성능 향상을 지원하는 방식으로 결합되는 단계
 - Quantum은 AI의 학습 및 최적화 과정에서 계산 자원으로 활용되며, AI 응용산업의 하위 모듈로 결합되어 산업적 활용성이 확대(간접적 산업 진입 경로 확보) : Q→A
 - AI는 Quantum 시스템의 설계제어·오류보정 등을 지원하지만, 이는 Quantum 기술 내부의 효율화에 국한되어 산업적 파급력은 제한적 : A→Q
- 기술 간 상호작용이 시작되지만 영향력과 산업적 파급효과는 비대칭적으로 나타남
- 기술 간 결합은 기능 수준을 넘어 시스템 수준으로 확장되기 시작하나, 완전한 통합 구조에는 이르지 않음(주기술+보조기술)

☛ 1단계 Parallel development와 달리 Quantum과 AI 기술 간 상호작용이 나타나지만, 여전히 한 기술이 다른 기술을 지원하는 비대칭적 관계가 중심

☛ 두 기술 간 상호보완 관계가 형성·확대되기 시작하는 단계로, 향후 공진화적 통합으로 발전하는 Quantum-AI 융합의 본격 형성기

구분	Quantum for AI	AI for Quantum
관계 방향	Quantum → AI	AI → Quantum
산업 연계성	높음 (응용 확장)	낮음 (기술 지원 중심)
역할	AI 성능 향상	Quantum 구현 지원

Co-evolutionary Integration 단계는 Quantum과 AI가 상호 의존적으로 결합하여 함께 진화하는 단계로, 양방향 상호작용을 통해 통합된 시스템 구조와 새로운 산업 생태계를 형성한다.

(3단계) Co-evolutionary Integration (공진화적 통합) : 통합 및 재편 구조 + 순환적 상호작용

- Quantum과 AI가 상호 의존적으로 결합되어 함께 진화하는 단계
- Q→A와 A→Q 간 상호작용이 반복적으로 작용하는 순환 구조(iterative loop)가 형성되며, 두 기술은 서로의 발전에 직접적인 영향을 미침
 - 이 과정에서 기술 간 역할 구분이 점차 약화되며, 계산과 지능이 통합된 형태의 시스템 구조로 발전
 - Quantum for AI와 AI for Quantum의 구분이 사라지고, 하나의 산업 생태계가 등장
- 성능 향상과 함께 시스템이 지속적으로 재구성되는 동태적 특성이 나타남

- ☛ 2단계 Assistive coupling와 달리 양방향 상호 작용 및 의존성이 형성확대되며, 기술 간 경계가 약화된 통합 구조로 발전하여 새로운 융합 산업 생태계를 형성
- ☛ Quantum은 AI 산업의 하위 기술이 아닌 AI와 함께 산업 생태계를 재구성하는 핵심 축으로 성장
- ☛ AI는 Quantum 기반 연산을 흡수하며, 확장형 지능 산업으로 진화

구분	Co-evolutionary Integration
관계 구조	양방향 상호작용 및 상호의존 (Quantum ↔ AI)
상호작용 방식	반복적 · 순환적 피드백 구조
시스템 구조	통합형 양자-고전 하이브리드 시스템
역할 구조	계산과 지능의 기능 통합 (경계 약화)
산업 구조	Quantum-AI 통합 생태계 형성

Quantum-AI 융합은 기술 간 관계가 독립에서 상호 의존으로 심화되고, AI와 Quantum의 산업 성장이 동기화되면서 공진화적 생태계로 발전하는 과정이다.

- Quantum-AI 융합의 진화는 기술 관계의 심화이자 산업 성장의 동기화 과정
 - AI는 SW 중심 성장기 기술, Quantum은 HW 중심의 도입기 기술이지만 진화 단계를 거치면서 서로의 성장 구조를 내포하며 공진화적 생태계를 형성하게 됨

▶ Quantum-AI 융합 단계별 비교 ◀

구분	1단계	2단계	3단계
명칭	분리적 발전 (Parallel Evolution)	보조적 상호작용 (Assistive Coupling)	공진화 융합 (Co-evolutionary Integration)
기술 관계	독립 발전	단방향 보완	상호 내포 / 상호 의존
산업 성장 단계	AI: 성장기(S/W 중심) QC: 도입기(H/W 중심)	AI 주도 QC 종속	AI-QC 동반 성장
응용 산업 연계성	AI 높음 QC 낮음	Quantum for AI 높음 AI for Quantum 낮음	상호 통합
핵심 특징	병렬 발전 융합 기반 형성	기술 융합 시작확대 산업 비대칭	기술-산업 공진화 통합 생태계

Quantum-AI 융합 진화 프레임워크는 융합의 구조와 전개를 설명하고, 현재 수준을 진단하며, 미래 발전 경로와 정책·산업 전략 수립을 지원하는 통합적 분석 및 의사결정 지원 틀이다.

□ 프레임워크의 의의와 활용 가능성

- 상기에서 제시한 프레임워크는 Quantum-AI 융합을 단순한 기술 결합이 아닌, 기술 간 상호작용의 진화 과정으로 구조화한 통합적 분석 틀을 제공
 - Quantum-AI 융합은 고정된 기술 구조가 아니라, 상호작용 수준과 방식에 따라 지속적으로 변화하는 동태적 시스템에 해당
 - 이에 따라 본 프레임워크는 기술 간 관계를 Parallel Development → Assistive Coupling → Co-evolutionary Integration의 단계적 진화로 구조화
- 특히, 본 프레임워크는 단일 기능이 아닌 이해-진단-전략을 포괄하는 다층적 활용 구조를 가짐
 - 기술 융합의 구조와 전개를 설명하는 분석적 기능(Analytical)
 - 현재 수준과 성숙도를 평가하는 진단적 기능(Diagnostic)
 - 향후 발전 경로와 정책·산업 전략을 설계하는 전략적 기능(Strategic)
- ☞ Quantum-AI 융합을 설명하는 이론적 틀을 넘어, 기술 발전의 현재와 미래를 연결하는 통합적 의사결정 지원 프레임워크로 기능
- Quantum-AI 융합의 진화 프레임워크는 다음과 같이 크게 분석 틀, 진단 기준 및 전략 수립 프레임워크 차원의 활용성이 있음

▶ Quantum-AI 융합 진화 프레임워크의 활용 ◀



- ① **Analytical Tool** : Quantum-AI 융합의 개념·구조·전개를 설명 (이해/분석)
 - Quantum-AI 융합의 구조와 전개를 기술 간 관계와 상호작용 관점에서 체계적으로 설명
 - 특히, 기술 간 관계가 독립 → 보조 → 공진화로 심화되는 과정을 통해 융합의 질적 변화를 설명
 - 이를 통해 Quantum-AI 융합을 단순한 기술 결합이 아닌, 상호작용 구조에 의해 성능과 기능이 결정되는 진화적 시스템으로 이해 가능
- ② **Diagnostic Criteria** : Quantum-AI의 현재 수준과 성숙도를 평가 (위치/진단)
 - Quantum-AI 융합의 발전 수준을 단계별로 식별할 수 있는 진단 기준을 제공
 - ※ Quantum-AI 관련 특정 기술, 시스템, 산업 적용이 어느 단계에 위치하는지 판단 가능
 - 단순 성능이 아니라 상호작용 수준, 결합 구조, 시스템 통합성을 기준으로 평가
 - 단계별 진단을 통해 기술 발전의 병목과 과제를 구조적으로 도출 가능

- Parallel Development: 기술 간 점점 부족, 실험적 적용 중심
 - Assistive Coupling: 비대칭적 결합, 부분적 시스템 통합
 - Co-evolutionary Integration: 상호작용 구조 설계, 통합 아키텍처 필요
- 이는 기술 수준 평가를 넘어, 융합의 성숙도와 진화 단계에 대한 체계적 판단 기준으로 활용 가능
- ③ **Strategic Planning Framework** : 발전 경로 설계 및 정책 방향 제시 (방향/전략)
- Quantum-AI 융합의 단계별 특성에 기반하여 전략 수립의 방향성을 제공
 - Parallel Development: 기술 간 점점 발굴 및 실험적 융합 확대 등
 - Assistive Coupling: 성능 향상을 위한 최적화 및 적용 확대 등
 - Co-evolutionary Integration: 통합 시스템 설계, 상호작용 메커니즘 구축 등
 - 특히, 정책 및 산업 측면에서는 다음과 같은 시사점 도출 가능
 - ✓ 개별 기술 중심 지원에서 융합 구조 설계 중심 전략으로 전환 필요
 - ✓ Hybrid 시스템, AI 기반 Quantum 제어 등 융합형 R&D 확대
 - ✓ 장기적으로는 기술 간 공진화 구조를 전제로 한 산업 생태계 구축 필요

📄 결론 및 시사점

□ 주요 내용 및 핵심 통찰

- 본 고에서는 Quantum-AI 융합을 단순한 기술 결합이 아닌 Quantum과 AI가 상호작용을 통해 함께 발전하는 기술산업적 공진화 과정으로 규정
 - AI의 연산 병목과 Quantum의 구현 병목이 만나는 지점에서 발생하는 상호보완적 융합
 - ※ Quantum-AI 융합은 각각의 병목을 보완하기 위해 필연적으로 요구되는 발전 경로
- Quantum-AI 융합은 계산 패러다임과 지능 구현 방식이 결합되는 새로운 기술 패러다임으로 이해할 필요
 - 기술 융합의 일반적 특성*을 모두 포함하면서도 기존 융합과 차별화된 특성 보유
 - * 이질성 기반 결합, 상호보완성, 재조합성, 구조 재편성
 - 두 기술은 서로 다른 계산 원리와 기술 체계를 기반으로 하며*, Quantum은 계산 능력의 확장을, AI는 학습·추론·최적화 능력을 상대방에게 제공
 - * 비트 기반 고전 연산 vs 큐비트 기반 양자 연산
 - ** SW-데이터 중심 기술 체계 vs HW-물리구현 중심 기술체계
 - 계산과 지능이 결합된 통합적 기술 체계로 진화하면서 새로운 산업 생태계를 형성
- 본 고는 Quantum-AI 융합의 전개 과정을 구조화하는 통합적 프레임워크를 제시
 - 3단계 발전 경로 : 병렬적 발전 → 보조적 결합 → 공진화적 통합
 - ※ 현재는 병렬적 발전 단계에서 보조적 결합 단계로 이동하는 초기 국면에 해당

Quantum-AI 융합은 상호보완적 결합을 바탕으로 기술과 산업의 공진화를 촉진하며, 계산과 지능이 통합된 새로운 기술-산업 생태계로 발전할 것으로 전망된다.

- (1단계: 병렬적 발전) AI와 Quantum이 각자의 기술 궤적에서 병렬적으로 발전하며 향후 상호 융합의 기반을 축적하는 단계
 - (2단계: 보조적 결합) 한 기술이 다른 기술의 성능 향상을 지원하는 비대칭적 결합 단계로, Quantum for AI와 AI for Quantum이 본격적으로 나타나는 단계
 - (3단계: 공진화적 통합) Quantum과 AI가 상호 의존적으로 결합되어 계산과 지능이 통합된 시스템 구조로 발전하는 단계
- 분석의 핵심 통찰은 Quantum-AI 융합이 기술 간 상호작용을 통해 기술의 공진화를 촉진하고, 이에 따라 산업 구조의 재편과 성장 경로의 동기화를 유도한다는 점
- 기술 관계 측면에서는 Quantum과 AI가 독립적 관계에서 보조적 관계를 거쳐 궁극적으로 상호의존적 통합 관계로 심화
 - 산업 성장 측면에서는 이미 성장기에 진입한 AI와 아직 도입기에 머물러 있는 Quantum이 점차 동일한 산업 생태계 안에서 함께 성장하는 방향으로 수렴

□ 정책적 시사점

- Quantum-AI 융합은 기술 간 상호작용 구조와 산업 생태계의 재편을 수반하는 변화로 기존의 기술별 분절적 정책을 넘어서는 새로운 정책 프레임워크를 요구
 - 기존 기술 육성 정책은 상호작용을 반영하지 못해 융합 기술의 발전을 구조적으로 제약
 - 따라서, AI 및 Quantum 정책은 단일 기술 육성이 아니라 두 기술 간 ‘접점·인터페이스·피드백’ 차원에서 Quantum-AI 융합을 촉진하는 방향으로 전환할 필요
 - Quantum-AI 융합은 초기 단계로 기술 표준과 산업 구조 형성에 대한 주도권 확보가 가능

▶ Quantum-AI 융합 정책 방향 ◀

정책 방향 : ‘개별적 기술 육성 정책’ → ‘기술 간 상호작용 촉진 정책’	
<p>‘접점(Touchpoints)’</p> <p>Quantum과 AI가 함께 쓰이는 문제/산업 영역</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ QML, 조합 최적화, 분자 시뮬레이션 등 융합 효과가 높은 분야를 중심으로 집중적 R&D 및 실증 ▪ 물류, 금융, 제약 등 Quantum-AI 융합 적용 가능성이 높은 산업 분야에서 파일럿 프로젝트 확대 추진
<p>‘인터페이스(Interfaces)’</p> <p>Quantum과 AI를 연결해 실제로 작동하게 하는 구조</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅(QPU+CPU/GPU for AI) 환경 구축 및 테스트베드 조성 ▪ Qiskit, Cirq 등 개발 프레임워크 기반의 통합 개발 환경 지원으로 Quantum-AI 융합 기술 개발 촉진 ▪ 클라우드 기반 Quantum-AI 플랫폼 구축을 통한 접근성 및 활용성 확대
<p>‘피드백(Feedback)’</p> <p>Quantum↔AI 간 상호 강화 순환 구조</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 공동 연구 확대 : Quantum 기술 개선과 AI 성능 향상을 연계하는 융합 연구를 통해 상호 발전 가속 ▪ 데이터-플랫폼 공유 : 연구성과와 개발자원의 공동 활용을 통해 Quantum-AI 혁신의 확산 및 재사용 촉진 ▪ 산·학·연 협력 강화 : 연구개발, 실증, 사업화의 연계를 통해 융합 성과가 지속적으로 창출·확산되는 생태계 조성

Quantum-AI 융합은 기술 간 상호작용과 공진화를 촉진하기 위해 개별 기술 육성 중심 정책에서 접점·인터페이스·피드백 중심의 융합 촉진 정책으로의 전환을 요구한다.

- [1] Arthur, W. B. (2009). *The nature of technology: What it is and how it evolves*. New York, NY: Free Press.
- [2] Au-Yeung, R., Camino, B., Rathore, O., & Kendon, V. (2024). Quantum algorithms for scientific computing (arXiv:2312.14904v4). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2312.14904>
- [3] Bresnahan, T. F., & Trajtenberg, M. (1995). General purpose technologies: Engines of growth? *Journal of Econometrics*, 65(1), 83–108.
- [4] Brynjolfsson, E., Li, D., & Raymond, L. R. (2025). Generative AI at work. *The Quarterly Journal of Economics*, 140(2), 889–942.
- [5] Curran, C. S., & Leker, J. (2011). Patent indicators for monitoring convergence: Examples from NFF and ICT. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(2), 256–273. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.021>
- [6] Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, 11(3), 147–162. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)
- [7] Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From national systems and “Mode 2” to a triple helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4)
- [7] Fleming, L. (2001). Recombinant uncertainty in technological search. *Management Science*, 47(1), 117–132. <https://doi.org/10.1287/mnsc.47.1.117.10671>
- [8] Holland, J. H. (1992). Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1), 17–30.
- [10] IDC. (2025, September). *IDC's Worldwide AI and Generative AI Spending Guide Taxonomy, 2025: Release V2, 2025*
- [11] Indiveri, G., & Liu, S.-C. (2015). Memory and information processing in neuromorphic systems. *Proceedings of the IEEE*, 103(8), 1379–1397. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2444094>
- [12] Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., Brown, T. B., Chess, B., Child, R., Gray, S., Radford, A., Wu, J., & Amodei, D. (2020, January). Scaling laws for neural language models. arXiv preprint arXiv:2001.08361.
- [13] Kauffman, S. A. (1993). *The origins of order: Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press.
- [14] Klusch, M., Lässig, J., Müssig, D., Macaluso, A., & Wilhelm, F. K. (2024). Quantum artificial intelligence: A brief survey. *KI – Künstliche Intelligenz*, 38, 257–276. <https://doi.org/10.1007/s13218-024-00871-8>
- [15] Kodama, F. (1992). Technology fusion and the new R&D. *Harvard Business Review*, 70(4), 70–78
- [16] Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Harvard University Press.
- [17] Nguyen, H. T., Krishnan, P., Krishnaswamy, D., Usman, M., & Buyya, R. (2024). Quantum cloud computing: A review, open problems, and future directions (arXiv:2404.11420). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11420>

- [18] OECD. (2024, April). The impact of artificial intelligence on productivity, distribution and growth: Key mechanisms, initial evidence and policy challenges.
- [19] Patterson, D. et al. (2021). Carbon Emissions and Large Neural Network Training. arXiv preprint arXiv:2104.10350.
- [20] Sevilla, J., & Roldán, E. (2024, May 28). Training compute of frontier AI models grows by 4–5× per year. Epoch AI. <https://epoch.ai/publications/training-compute-of-frontier-ai-models-grows-by-4-5x-per-year>
- [21] Stanford University Human-Centered Artificial Intelligence (HAI). (2025, April). The artificial intelligence index report 2025.
- [22] Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2019) (pp. 3645–3650).
- [23] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In I. Guyon et al. (Eds.), Advances in Neural Information Processing Systems (Vol. 30). Curran Associates, Inc. <https://papers.nips.cc/paper/7181-attention-is-all-you-need>

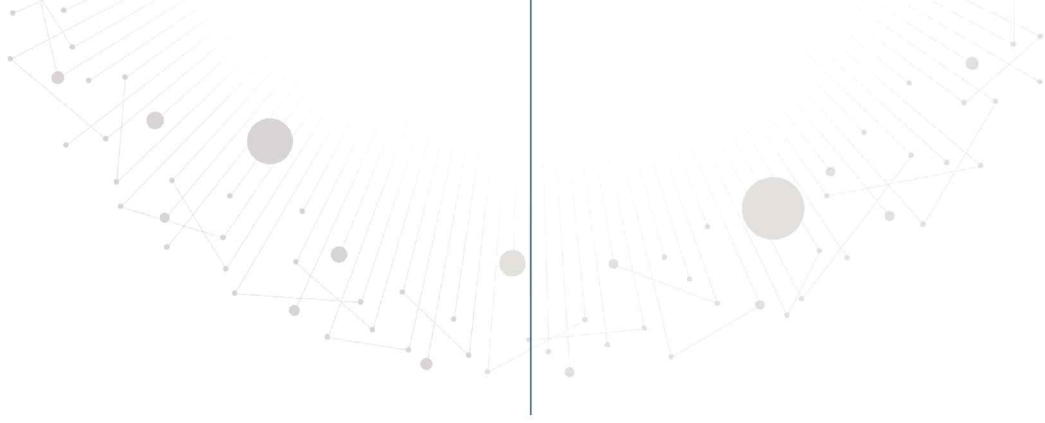
저자소개

허필선 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 책임연구원
e-mail: f3style@etri.re.kr Tel. 042-860-5396

Quantum-AI 융합: 계산과 지능의 공진화 프레임워크

발행인 한 성 수
발행처 한국전자통신연구원 ICT전략연구소
발행일 2026년 6월 30일





www.etri.re.kr

본 저작물은 공공누리 제4유형:

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.



ETRI Electronics and Telecommunications
Research Institute

34129 대전광역시 유성구 가정로 218
TEL.(042) 860-6114 FAX.(042) 860-6504

