IITP 정보통신기획평가원

ISSN 1225-6447 (Print)
ISSN 3058-3225 (Online)

2225호
2026. 11. 18.

주간기술동향

IITP Weekly AI · ICT Trends



- 「주간기술동향」은 과학기술정보통신부 「ICT 동향분석 및 정책지원」 과제의 일환으로 정보통신기획평가원(IITP)에서 발간하고 있습니다.
- 「주간기술동향」은 인터넷(http://www.itfind.or.kr)을 통해 서비스를 이용할 수 있으며, 본 고의 내용은 필자의 주관적인 의견으로 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.
- 정보통신기획평가원의 「주간기술동향」 저작물은 공공누리 "출처표시-상업적 이용금지" 조건에 따라 이용할 수 있습니다. 즉, 공공누리의 제2유형에 따라 상업적 이용은 금지하나, "별도의 이용 허락"을 받은 경우에는 가능하오니 이용하실 때 공공누리 출처표시 지침을 참조하시기 바랍니다.
(http://www.kogl.or.kr/info/license.do 참고)

예시) "본 저작물은 'OOO(기관명)'에서 'OO년' 작성하여 공공누리 제O유형으로 개방한 '저작물명(작성자:OOO)'을 이용하였으며, 해당 저작물은 'OOO(기관명), OOO(홈페이지 주소)'에서 무료로 다운받으실 수 있습니다."



2225호
2026-23

IITP

주간기술동향

IITP Weekly AI·ICT Trends

ISSN 1225-6447 (Print)
ISSN 3058-3225 (Online)

기획시리즈: 양자기술

고체점결함 기반 양자센서 소재 기술 동향

문효원_서울시립대학교 조교수

양자센서와 소재기술 2
고체점결함 기반 양자센서 3
다이아몬드 기반 점결함 양자센서 6
SiC 기반 점결함 양자센서 8
hBN 기반 점결함 양자센서 10
전망 및 결론 11

QAOA 알고리즘의 기술 동향

홍윤표, 길재준, 전석훈, 김병수_한국전자기술연구원

서론 14
QAOA의 구조와 성능 결정 요소 15
QAOA의 주요 병목과 기술 발전 18
결론 23

ICT 신기술

피지컬 AI의 월드 모델과 VLA가 만드는 예측형 로봇 지능 기술 동향

김말희, 허태욱_한국전자통신연구원

피지컬 AI의 개념과 등장 배경 26
피지컬 AI의 핵심 기술 요소와 기술 진화 28
피지컬 AI의 기술 수준과 산업 적용 34
피지컬 AI 관련 표준화와 안전 · 상호운용 동향 36
기술적 과제와 발전 방향 38
맺음말 39

Chapter 01

고체점결함 기반 양자센서 소재 기술 동향

문효원_서울시립대학교 조교수

고체점결함(solid-state point defect) 기반 양자센서는 결정 내 점결함에 국소화된 전자 스핀 상태가 외부 자기장 등에 의해 변화하는 특성을 이용해 상온에서 높은 공간분해능의 측정이 가능한 센서로서 다양한 분야에서 주목받고 있다. 점결함 양자센서의 성능은 결함 자체의 스핀 및 광학 특성뿐만 아니라 모체 소재의 성질에도 큰 영향을 받아 센서의 구현 방식과 적합한 응용 분야가 달라지며, 각 소재가 갖는 장점과 기술적 한계도 서로 다르다. 본 원고에서는 고체점결함 기반 양자센서에 주로 사용되는 소재들의 특성과 주요 동향을 살펴본다.

I. 양자센서와 소재기술

물리적 특성을 유지하는 최소 단위인 양자(quantum)를 활용하는 양자 시스템은 주변 물리량의 변화에 의한 영향을 받아 상태가 변화하며, 양자컴퓨팅 또는 양자통신을 위해서는 이를 억제하거나 제어하는 기술이 매우 중요하다. 양자센싱(quantum sensing)의 경우에는 오히려 이러한 고감도 및 양자적 특성을 활용하여 고전적으로 측정하기 어려운 정밀 측정을 가능하게 하는 기술로 주목받고 있다. 여기서 양자적 특성이란 꼭 중첩이나 얽힘만을 의미하는 것은 아니며, 이-준위 상태(two-level state) 등의 양자적 상태를 활용하는 것도 포함한다[1][2]. 양자센싱을 위해서는 먼저 사용하려는 양자 시스템을 사용자가 알고 있거나 제어할 수 있는 기본 상태로 초기화시킬 필요가 있다. 초기화된 시스템이 외부 신호와 상호작용하면 시간이 흐르면서 시스템의 에너지 또는 전이주파수가 변화하거나 양자상태 간의 위상차가 누적되며, 이를 측정하면 주어진 외부 물리량을 추정할 수 있다. 이 과정에서 우리가 원하지

* 본 내용은 문효원 교수(☎ 02-6490-2348, hyowon.moon@uos.ac.kr)에게 문의하시기 바랍니다.
** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

OPEN 공공누리 출처표시 상업용금지 공공저작물 자유이용허락

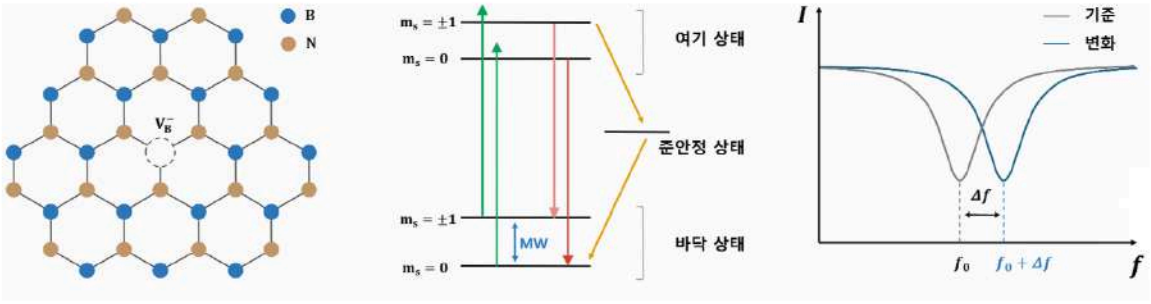
않는 다른 물리량에 의한 영향은 바람직하지 못하므로, 시스템이 선택적으로 특정 물리량에만 반응하거나 원하지 않는 물리현상을 억제할 수 있도록 주변 환경을 제어하는 것도 매우 중요하다.

양자센서는 원자, 고체점결함, 초전도 회로 등 다양한 플랫폼에서 구현될 수 있으며, 이에 따라 감도와 동작 온도, 공간분해능 등의 특성이 서로 다르다. 이 중에서 고체물질 내부에 존재하는 점결함의 전자 스핀 상태를 사용하는 고체점결함 양자센서의 경우, 양자상태가 원자 크기 수준의 국소화된 영역에 존재하여 센서를 매우 작게 구현하고 높은 공간해상도를 얻을 수 있으며 상온에서도 안정적으로 동작하고 레이저를 이용한 비접촉 광학 측정이 가능하여 많은 관심을 받고 있다. 다만, 고체점결함 구조는 인접한 핵스핀 또는 전자 등 다양한 잡음 원천이 존재하여, 결함 자체의 특성뿐만 아니라 주변의 소재 특성이 측정 감도에 영향을 미칠 수 있다[2][3]. 따라서 고체점결함 양자센서의 성능을 극대화하기 위해서는 모체 소재의 특성을 파악하고 제어하는 것이 필요하다. 본 고에서는 대표적인 고체점결함 기반 양자센서들을 중심으로, 센서 성능과 밀접하게 연관되는 소재 특성과 주요 기술 동향을 살펴본다.

II. 고체점결함 기반 양자센서

고체점결함(solid-state point defect)이란 결정성 고체물질을 이루는 규칙적인 원자 배열 중 일부에서 국소적으로 발생하는 결함으로, 원자가 빠진 자리가 비어 있는 공공(vacancy) 결함, 다른 원자가 격자 자리를 대신한 치환 결함, 또는 이들이 결합한 복합 결함 등으로 나눌 수 있다[그림 1(a)]. 원자핵 주위에 전자가 결합하여 원자 고유의 에너지 준위를 형성하는 것처럼 점결함 주변에서도 전자가 그 주변에 속박될 수 있다. 이렇게 국소화된 전자상태는 밴드갭 내부에 잘 정의된 전자상태 및 스핀 상태를 형성할 수 있어서 유사-원자(pseudo-atom)라고 불리기도 한다. 일부, 점결함에서는 전자 및 스핀 상태가 외부 물리량에 반응하여 그 에너지나 상태가 변화하는 것을 초기화, 제어, 측정을 통해 판독할 수 있어 양자 센서로서 동작할 수 있게 된다[2].

광검출 자기공명(Optically Detected Magnetic Resonance: ODMR)은 점결함의 스핀 상태를 읽는 대표적인 방법의 하나이다[그림 1(b)]. 일부 점결함에서는 바닥 상태(ground state) 및 여기 상태(excited state) 사이의 광학 전이와 함께 준안정 상태(metastable state)를



(a) 고체 물질 격자 내 점결함 구조 예시 (b) 광학적 스핀 제어 및 판독 예시 (c) 공명 주파수 변화를 이용한 센싱 개념도

〈자료〉 서울시립대학교 자체 제작

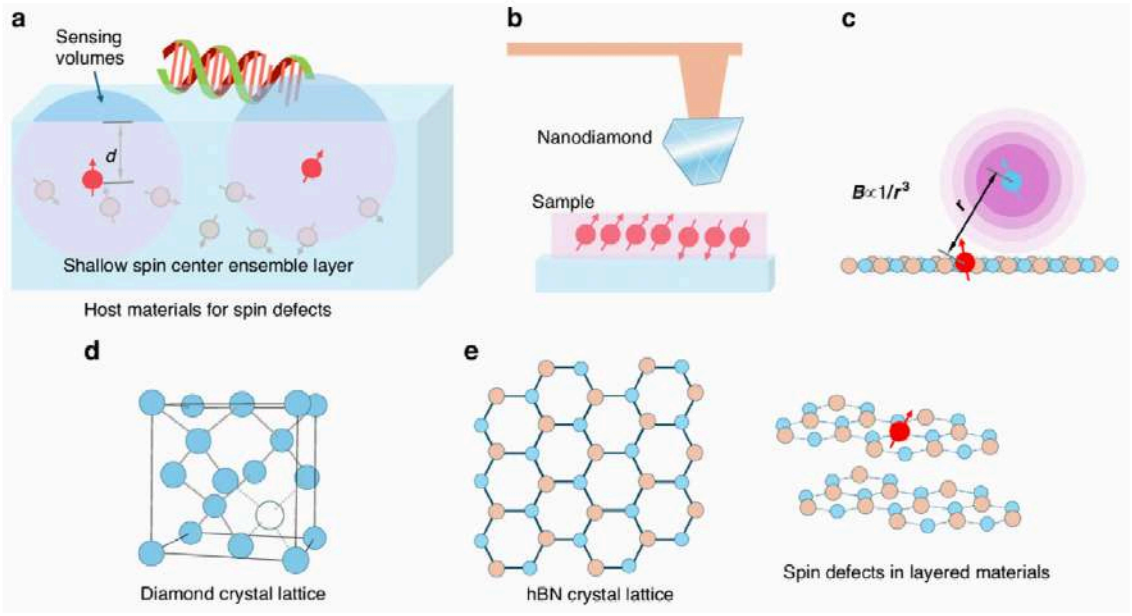
[그림 1] 고체 점결함 기반 양자센서의 기본 원리

거치는 비복사 전이가 존재하며, 비복사 전이 확률이 스핀 상태에 따라 다르다. 이를 이용하면 빛을 조사하여 전자 스핀을 특정 상태로 초기화시킬 수 있고, 스핀 상태에 따라 달라지는 광발광 세기를 측정하여 스핀 상태를 판독할 수 있다. 또한, 바닥 상태의 스핀 준위 사이에 공명하는 마이크로파를 가하면 스핀 전이를 유도할 수 있으며, 이때 나타나는 광발광 세기의 변화를 측정하여 공명 주파수를 확인할 수 있다[3]. 마이크로파 주파수를 변화시키면서 광신호를 측정하면 공명 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 외부 자기장이나 전기장, 온도, 변형 등이 스핀 준위의 에너지 차이를 바꾸면 공명 위치도 함께 이동한다[그림 1(c)][4]-[6]. 이때 공명주파수의 이동이 측정량에 대한 신호가 되며, 실제 센서의 감도는 추가적으로 공명선폭, ODMR 대비, 검출되는 광자 수와 측정 방식 등에 의해 결정된다.

공명주파수의 변화 외에도, 스핀 상태의 시간에 따른 변화를 통해 주변 환경에 대한 정보를 획득할 수 있다. 스핀의 시간적 특성은 점유 상태의 변화를 나타내는 에너지 완화시간 (T_1)과 위상 정보의 소실을 나타내는 결맞음 시간(T_2)로 구분할 수 있다. T_1은 외부 자극에 의해 평형에서 벗어난 스핀의 점유 상태가 다시 평형상태로 돌아오는 시간이며, T_2는 서로 다른 스핀 상태 사이에 형성된 위상관계가 유지되는 시간이다. 위상관계 측정을 위해서는 중첩된 스핀 상태를 자유롭게 시간을 진화시켜야 하는데(ramsey 측정), 이 경우, 주변의 국소 환경에 따른 자기장 변화 등으로 위상 정보가 본래의 결맞음 시간보다 빠르게 소실되어 T_2^*로 기술한다. 국소 환경에 의한 변화를 보상하기 위한 한 스핀 에코(Hahn spin echo) 측정에서는 중간에 스핀 반전 펄스를 가하여 느린 잡음에 의한 위상 분산을 줄여 결맞음 시간 T_2를 평가하며, 여러 개의 반전 펄스를 사용하는 동적 디커플링(dynamic decoupling) 방식을 통해

결맞음 시간을 더 연장시킬 수 있다[1]. 긴 T_1, T_2, T_2^*를 가지면 스핀 상태를 더 오래 유지하고 신호와의 상호작용 시간을 늘릴 수 있어서 높은 감도를 얻을 수 있다[7].

점결함 기반 양자센싱은 개별적인 점결함 하나씩을 이용하는 단일 결함 센싱과 많은 결함을 동시에 사용하는 앙상블 센싱로 구분할 수 있다. 단일 결함 센싱은 작은 유효 측정 부피와 높은 위치 선택성을 이용한 국소 센싱에 적합하며, 앙상블 방식은 다수의 스핀에서 발생하는 신호를 동시에 수집하여 신호량과 감도를 높이고 넓은 영역을 동시에 또는 병렬적으로 측정하는 데 유리하다[8]. 그러나 결함 밀도가 과도하게 증가하면 스핀 간 자기적 상호작용과 국소 변형, 전하 환경의 불균일성 등이 커져 공명선폭이 증가하거나 탈위상 특성이 악화될 수 있으므로, 결함 수의 증가가 항상 성능 향상으로 이어지는 것은 아니다[9]. 또한, 전자상태가 원자 크기로 국소화되어 있더라도 실제 공간분해능에는 결함의 깊이를 포함해 센서부터 측정 대상까지의 거리, 사용하는 빛의 파장 등이 영향을 미친다. 이러한 특성에 따라 [그림 2]와 같이 단일 결함을 이용한 탐침형 센서 또는 표면 근처의 결함층 앙상블을 이용한 근접 대면적 센서 등 다양한 측정 구조가 구현되고 있으며[10][11], 이처럼 센서 구조 구현 시 측정 목적에 맞게 결함의 위치와 깊이, 밀도와 균일성을 실제 소재에서 제어할 수 있어야 한다.



〈자료〉 H.-H. Fang et al., Light: Science& Applications, Vol.13, 303, 2024.

[그림 2] 점결함 양자센서의 국소 측정 방식과 공간분해능

III. 다이아몬드 기반 점결함 양자센서

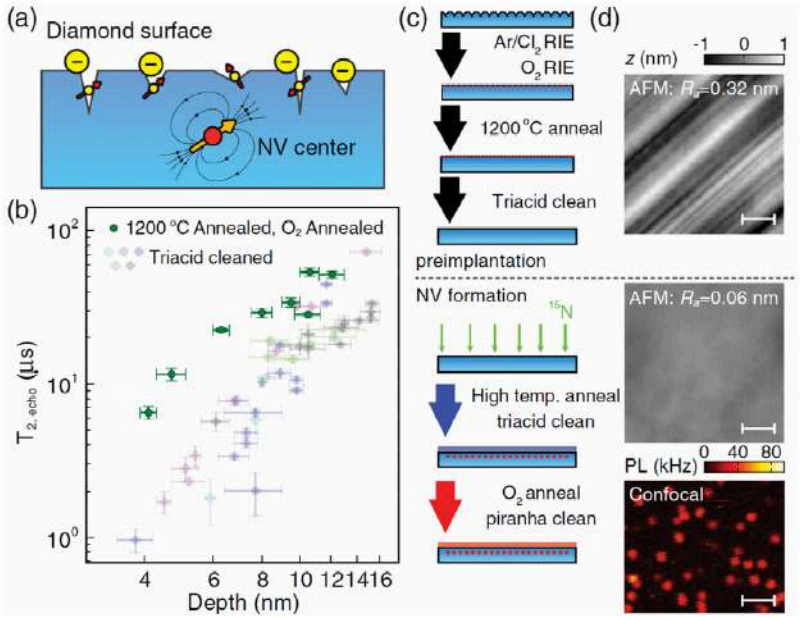
다이아몬드의 질소-공공(Nitrogen-Vacancy: NV)센터는 고체 점결함 가운데 가장 폭넓게 연구되어 온 대표적인 양자센서 플랫폼이다. NV센터는 다이아몬드 격자구조의 탄소 자리에 있는 치환형 질소와 바로 인접한 탄소 공공으로 이루어지며, 양자센싱에는 주로 음전하 상태인 NV^-가 이용된다. NV^-의 바닥 상태는 스핀 S=1을 가지며 외부 자기장이 없을 때 스핀 준위 사이에 약 2.87GHz의 제로 필드 분할(Zero-Field Splitting: ZFS)을 보인다. 상온에서 빛을 이용하여 이 스핀 상태를 초기화, 측정하거나 마이크로파로 제어할 수 있으며, 이를 이용해 자기장뿐 아니라 온도, 전기장과 변형 등 주변 환경의 변화를 측정할 수 있다[4]. 또한, 단일 NV를 이용한 나노스케일 센싱과 다수의 NV를 이용한 고감도 앙상블 측정을 모두 구현할 수 있어, 다이아몬드 NV는 고체 점결함 양자센서의 기준 플랫폼으로 자리 잡아왔다.

NV센터가 널리 사용되는 이유 중 하나는 다이아몬드 모체가 제공하는 우수한 스핀 환경이라고 할 수 있다. 다이아몬드 대부분을 구성하는 주성분인 12C 원자는 핵스핀을 갖지 않아 주변 NV센터에 영향을 크게 미치지 않고, 자연적으로는 약 1.1%가량만 포함된 13C 또는 치환형 질소(P1) 등의 상자성 결함들이 NV의 결맞음을 제한하게 된다[7]. 천연 다이아몬드보다 더 순수한 결함 주변 환경을 만들기 위해 고온 고압(High Pressure High Temperature: HPHT) 및 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition: CVD) 등의 성장법을 이용한 고순도 단결정 성장과 동위원소 불순물 제어 기술을 사용하기도 한다. 특히, CVD는 질소 농도와 동위원소 조성, 깊이 방향의 도핑층을 정밀하게 설계할 수 있다는 장점이 있으며, 실제로 ^{13}C 농도를 약 0.3%로 낮춘 CVD 다이아몬드의 단일 NV에서는 약 1.8ms의 상온 T_2와 약 4.3 nT/$\sqrt{Hz}$의 교류 자기장 감도가 보고되었다[12]. 최근에는 고밀도 NV 앙상블에서도 NV 농도와 전하 상태 등을 함께 관리하여 균일성과 배치 간 재현성을 높이는 방향으로 소재 기술이 확장되고 있다[9].

고품질 모체를 실제 센서로 전환하기 위해서는 필요한 위치와 깊이에 NV를 형성하는 결함 형성 과정이 중요하다. 성장 중 질소 도핑이나 질소 이온주입으로 질소를 도입하고, 전자 조사 등으로 공공을 생성한 뒤 이를 열처리하면 NV의 깊이와 밀도를 목적에 맞게 조절할 수 있다[7]. 특히, CVD 성장 중 수 nm 두께의 매우 얇은 질소 도핑층(δ-doping)을 형성하고 그 위의 고순도 다이아몬드 덮개층 두께를 조절하는 방법은 NV의 깊이를 성장

단계에서 제어할 수 있으며, 이러한 소재에서는 약 5nm 깊이에서도 100μs 이상의 T_2가 보고되었다[13]. 앙상블 센서를 위한 결함 생성 기술은 단순히 NV의 수를 늘리는 것보다 우수한 모체 환경을 유지하면서 깊이와 농도, 전하 상태를 재현성 있게 구현하는 방향으로 발전하고 있다.

이러한 소재 및 결함 제어를 바탕으로 다이아몬드 NV센서는 다양한 측정 구조로 발전해 왔다. 표면 가까이에 형성한 단일 NV를 나노필러나 원자힘현미경(Atomic Force Microscope: AFM) 탐침과 결합하면 시료를 주사하면서 국소 자기장을 나노스케일에서 측정할 수 있고, 얕은 NV 앙상블을 이용하면 넓은 영역의 자기장이나 전류 분포를 넓은 영역에서 영상화할 수 있다. 앙상블 센싱에서는 개별 결함의 최고 결맞음 시간뿐 아니라 소재 성장과 후공정을 통한 여러 점결함 간의 균일성이 센서 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다[9]. 최근에는 광여기(optical excitation)와 마이크로파 제어, 광검출 및 신호처리를 소형 광학 및 전자 시스템과 결합하는 연구도 진행되어 NV센서는 개별 스핀의 물성 실증을 넘어 광시야, 집적형 양자 센서로 응용 범위를 넓히고 있다[14].



〈자료〉 S. Sangtawesin et al., Physical Review X 9, 031052, 2019.

[그림 3] 얕은 다이아몬드 NV센터의 형성과 표면공정에 따른 결맞음 특성

센서를 측정 대상에 더욱 가깝게 배치하기 위해 단결정 표면의 얕은 NV뿐 아니라 NV가 포함된 나노 다이아몬드도 이용된다. 식각 공정 등을 이용해 형성된 나노 다이아몬드 입자는 원하는 위치에 분산하거나 표면에 부착하는 등 기능화가 용이하여 생체 및 화학 센싱 등에 활용되고 있다[10]. 다만, NV가 표면 약 10nm 이내로 가까워지면 표면 스핀과 전하 트랩 등으로 인해 전하 안정성과 T_1, T_2가 저하될 수 있다. 표면의 비중이 큰 나노 다이아몬드에서는 이러한 영향이 더욱 중요하며, [그림 3]과 같이 표면의 영향을 줄이고 얕은 NV의 성능을 향상시키려는 소재 연구도 지속되고 있다[15].

고체 점결함 양자센서 가운데 가장 성숙한 플랫폼으로 발전해 온 다이아몬드 기반 양자센서는, 모체 소재의 높은 굴절률과 넓은 투명 영역을 이용해 나노필러, 광도파로(optical waveguide)와 공진기를 제작하고 단결정 다이아몬드 막을 다른 광학 기판과 결합하는 하이브리드 집적 기술로도 응용되고 있다[14]. 이를 위해 현재의 우수한 소재 및 스핀 품질을 더 넓은 면적과 집적 구조에서도 균일하게 구현하는 대면적 단결정 성장 기술이 요구되며, 벌크 결정의 박막화와 박막의 전사 및 접합 기술을 고수율로 확장하는 것도 중요한 과제이다[14][16].

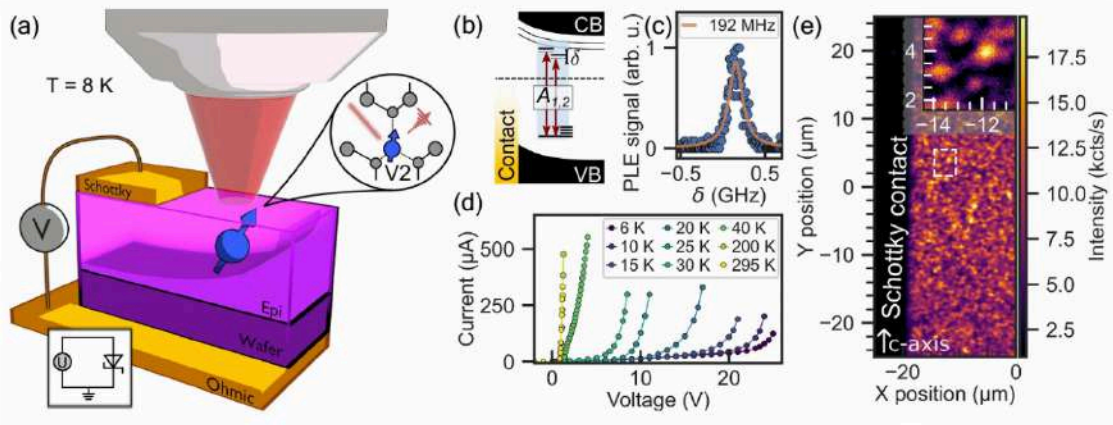
IV. SiC 기반 점결함 양자센서

탄화규소(Silicon Carbide: SiC)는 고품질 단결정 웨이퍼와 에피 성장(epitaxial growth) 기술이 잘 확립된 광대역 갭 반도체 소재이다. 양자센싱에 이용할 수 있는 스핀 결함이 관찰되는 3C, 4H, 6H 등의 다양한 결정형 중에서 주로 4H-SiC이 모체 소재로 자주 이용되며, 대표적인 스핀 결함으로는 실리콘 공공(V_{Si})과 실리콘과 탄소 공공이 결합한 중성 이중공공(divacancy: VV)이 있다. 다이아몬드 기반 점결함 형성과 유사하게 전자 조사나 이온주입 등을 이용해 결함을 인위적으로 형성할 수 있으며, 주입 에너지와 마스크 패턴을 이용하면 결함의 깊이와 측면 위치를 조절할 수 있다[17]. 모체의 동위원소 조성 역시 중요한 부분으로, 천연 SiC에는 핵스핀을 갖는 ^{29}Si와 ^{13}C가 포함되어 있어 결함 전자 스핀의 주변 환경에 영향을 미친다. 핵스핀이 없는 ^{28}Si와 ^{12}C의 비율을 99.8% 이상으로 높인 동위원소 정제 4H-SiC 에피층에서는 개별 핵스핀을 선택적으로 분리 및 제어할 수도 있음이 보고되었다[18]. 이러한 동위원소 제어는 실제 센싱 성능 향상으로도 이어져, 동위원소 정제된 4H-SiC의

V_{Si} 앙상블을 이용한 상온 자기장 센싱에서는 약 4.0nT/√Hz의 감도가 보고되었다[19].

SiC의 강력한 장점 중의 하나는 소재 제어 기술이 널리 쓰이는 반도체 소자기술과 직접 연결될 수 있다는 점이다. 고순도 에피층에 불순물 도핑, 전극 구조 형성 등을 통해 결함 주변의 전기적 환경을 초소형 소자 수준에서 제어할 수 있다[5]. 단일 VV를 p-i-n 접합 내부에 형성한 연구에서는 전압 인가를 통해 결함 주변의 전하 환경을 공핍(depletion)시켜 전하 변동에 의한 스펙트럼 확산(spectral diffusion)을 억제하여 자유전하와 변동성을 감소시켜 광발광 여기 분광(Photoluminescence Excitation: PLE) 단일 스캔 측정에서 20MHz의 선폭까지 관찰한 바 있다[20]. 이는 동위원소의 핵스핀 환경 제어뿐만 아니라 도핑과 접합 설계를 통한 전하 환경 제어도 결함의 광학적 안정성 및 성능 향상에 큰 영향을 미치는 중요한 기술이다.

이러한 반도체 공정기술은 광학 구조와의 집적으로도 확장되고 있다. SiC에는 광도파로와 공진기 등의 나노 광학 구조를 직접 형성할 수 있어 스핀 결함에서 방출되는 빛을 효율적으로 수집하거나 특정 광학 모드와 결합할 수 있으며, 이를 통해 광학적 판독과 신호 전달을 같은 소자 내에서 구현할 수 있다[21]. 또한, SiC의 도핑 및 전극 형성 기술을 이용하면 이러한 광학 구조에 전기적 제어 기능을 함께 집적할 수 있다. 최근에는 [그림 4]와 같이 SiC 내 결함을 쇼트키 접합(schottky junction) 내부에 배치하고 외부 전압을 인가하여 결함 주변의 전하 환경과 광학 전이를 조절하면서 동시에 광학적으로 상태를 읽어내는 구조가 구현되었다[22]. 이처럼 SiC 소재는 에피성장과 결함 형성, 전자제어 및 나노광학 기술까지 하나의



〈자료〉 T. Steidl et al., Nature Communications, Vol.16, 4669, 2025.

[그림 4] SiC 스핀 결함과 반도체 소자의 집적 및 전기적 제어

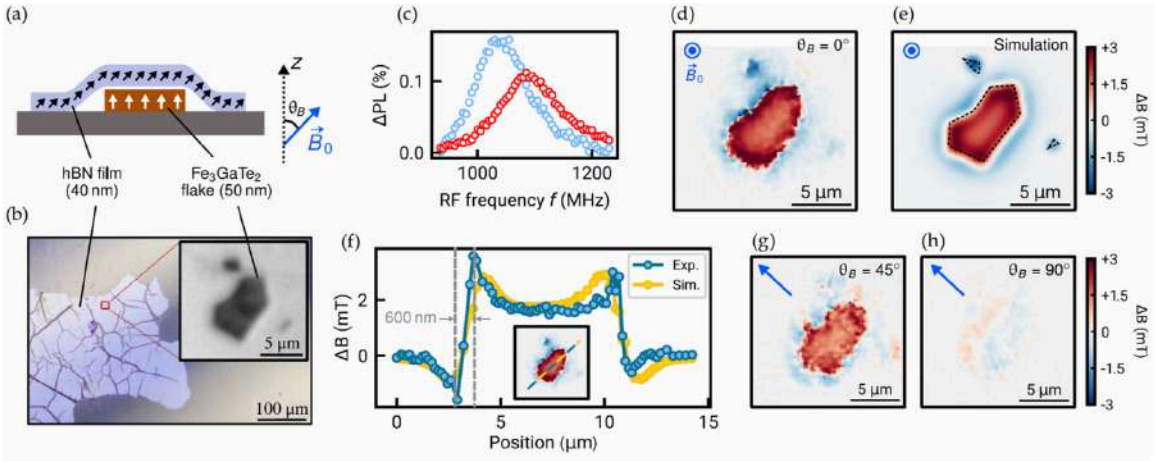
반도체 소재 플랫폼에서 연계할 수 있다는 장점이 있으며, 향후에는 이러한 공정 이후에도 결함의 스핀 및 광학 특성을 균일하고 재현성 있게 유지하는 기술이 중요할 것으로 보인다.

V. hBN 기반 점결함 양자센서

육방정 질화붕소(hexagonal Boron Nitride: hBN)는 약 6eV의 넓은 밴드갭을 갖는 이차원 절연체 물질로, 원자층 수준의 얇은 모체에 광학적으로 제어 가능한 스핀 결함을 형성할 수 있는 점이 특징이다. 대표적인 음전하 붕소 공공(V_B^-)은 S=1의 바닥 상태와 약 3.48GHz의 제로 필드 분할을 하며, 상온에서 광학적 초기화 판독이 가능하다[6]. 붕소와 질소의 안정 동위원소는 모두 핵스핀을 가지므로 이들의 조성은 결함의 스핀 환경에 영향을 주게 되지만, 그런데도 동위원소 조성 제어를 통해 초미세 공명 선폭을 감소시킬 수 있음이 알려져 있다[23]. 또한, 동적 디커플링을 이용한 앙상블 센싱에서는 상온에서 약 $1\mu T/\sqrt{Hz}$의 고주파 자기장 감도가 보고되었으며, 작은 측정 부피를 고려한 단위부피 정규화 감도는 다이아몬드 기반 NV 앙상블 센서와 유사한 오더로 평가되었다[24].

hBN은 이차원 물질의 특성으로 인해 층 내 원자가 강하게 결합하고 층간은 반데르발스 힘으로 결합하는 층상구조를 가지므로 수 층 또는 원자층 수준의 얇은 센서층을 형성할 수 있다[그림 5]. 또한, 형성된 센서층을 다른 이차원 물질이나 소자 위에 직접 전사 및 적층할 수 있어서 점결함과 측정 대상 사이의 거리를 최소화하거나 원자층 두께로 제어할 수 있다. 이를 활용하여 스핀 결함이 포함된 hBN을 이차원 자성체와 그래핀 소자에 결합하여 국소 자기장과 온도, 전류 분포를 공간적으로 영상화하는 반데르발스 양자현미경이 구현되었다[8][25]. 이 구조에서는 센서용 벌크 기판이나 별도의 탐침을 측정 대상에 접근시키는 대신 얇은 hBN 자체를 양자센싱층으로 배치할 수 있어, 측정 대상과 센싱 스핀 사이의 거리를 작게 유지하면서 대면적 측정을 진행할 수 있다. 또한, 수 nm 깊이의 얕은 결함을 이용해 외부 자기 잡음을 검출한 사례가 보고되었으며[26], 최근에는 광학적으로 주소 가능한 분자 스핀을 hBN 표면에 직접 결합하여 센싱 스핀을 표면 자체에 배치하는 접근도 제안되었다[27].

크기가 제한적이고 두께 제어가 어려운 개별 박리 시료를 넘어 유용한 소자로 확장되기 위해서는 넓은 면적에서 결정성과 두께가 균일한 hBN을 확보하는 것이 중요하다. 최근 2인치 규모의 단결정 단층 hBN을 성장하거나, 성장한 단층막 전체를 SiO_2/Si 기판으로 전사하는



〈자료〉 S. C. Scholten et al., Nature Communications, Vol.15, 6727, 2024.

[그림 5] hBN 스핀 결함을 이용한 반데르발스 자성체의 자기장 측정 이미지

공정도 실증되었다[28]. 다만, 대면적 hBN의 확보가 곧 균일한 양자센서층을 의미하는 것은 아니며, 실제 센서에서는 잔류 불순물, 변형과 같은 모체의 균일성뿐 아니라 스핀 결함의 종류와 밀도, 전하상태까지 함께 제어할 수 있어야 한다. hBN의 핵심적인 소재적 강점은 원자층 두께, 대면적 성장과 전사 및 반데르발스 적층을 결합하여 센싱 스핀을 측정 대상에 직접 통합할 수 있다는 점으로, 구조적 장점을 유지하면서 균일하고 재현성 있는 결함 및 스핀 환경 구현과 센서와 측정 대상 사이의 거리를 극소화시키는 표면 및 계면 제어 기술이 중요해질 것으로 보인다.

VI. 전망 및 결론

고체 점결함 양자센서는 외부 환경에 따른 스핀 상태의 변화를 이용한다는 공통된 원리를 가지지만, 실제 센서의 특성과 구현 방식은 결함이 형성되는 모체 소재와 공정에 따라 크게 달라진다. 다이아몬드는 우수한 스핀 특성과 축적된 제어 기술을 바탕으로 다양한 센서 구조로 발전해 왔으며, SiC는 반도체 성장과 나노공정을 이용해 결함 주변의 전기적, 광학적 환경을 소자 수준에서 제어할 수 있는 특징을 갖는다. hBN은 원자층 수준의 얇은 모체와 반데르발스 적층성을 이용하여 센서를 측정 대상에 가깝게 배치하고 다른 소재와 결합하기에 유리하다. 이처럼 각 소재가 제공하는 장점과 제약이 서로 다르므로 특정 감도나 결맞음시간과 같은

하나의 지표만으로 플랫폼을 비교하기보다는 측정 대상과 요구되는 감도 및 공간분해능, 동작 환경 및 센서의 구현 방식을 함께 고려할 필요가 있다.

향후 점결함 양자센서에서는 개별 결함에서 높은 성능을 구현하는 것과 함께, 원하는 위치와 깊이, 밀도로 결함을 재현성 있게 형성하고 전하 상태와 주변 스핀 환경을 안정적으로 유지하는 소재 및 공정 기술의 중요성이 더 커질 것으로 보인다. 특히, 실제 활용 가능한 센서 제작을 위해서는 측정 대상에 가깝게 배치하면서 표면에서 발생하는 잡음을 억제하고, 나노 가공이나 전극 및 광학 구조와의 집적 이후에도 스핀과 광학 특성을 유지하는 기술이 요구된다. 이러한 소재 기술을 확보함으로써, 향후 반도체와 자성 및 저차원 소재 등의 국소 물성 측정에서 표면, 계면 및 분자 주변의 미약한 자기적 환경 분석 및 불량소자 검출 등 산업계에서 유용하게 사용될 수 있기를 기대해 본다.

참고문헌

[1] C. L. Degen, F. Reinhard and P. Cappellaro, "Quantum sensing", Reviews of Modern Physics, Vol.89, 035002, 2017.

[2] G. Wolfowicz et al., "Quantum guidelines for solid-state spin defects", Nature Reviews Materials, Vol.6, 2021, pp.906-925.

[3] D. D. Awschalom et al., "Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins", Nature Photonics, Vol.12, 2018, pp.516-527.

[4] M. W. Doherty et al., "The nitrogen-vacancy colour centre in diamond", Physics Reports, Vol.528, No.1, 2013, pp.1-45.

[5] Q.-Y. Luo et al., "Fabrication and quantum sensing of spin defects in silicon carbide", Frontiers in Physics, Vol.11, 1270602, 2023.

[6] A. Gottscholl et al., "Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature", Nature Materials, Vol.19, 2020, pp.540-545.

[7] J. F. Barry et al., "Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry", Reviews of Modern Physics, vol. 92, 015004, 2020.

[8] A. J. Healey et al., "Quantum microscopy with van der Waals heterostructures", Nature Physics, Vol.19, 2023, pp.87-91.

[9] A. M. Edmonds et al., "Characterisation of CVD diamond with high concentrations of nitrogen for magnetic-field sensing applications", Materials for Quantum Technology, Vol.1, 025001, 2021.

[10] E. Janitz et al., "Diamond surface engineering for molecular sensing with nitrogen-vacancy centers", Journal of Materials Chemistry C, Vol.10, 2022, pp.13533-13569.

[11] H.-H. Fang et al., "Quantum sensing with optically accessible spin defects in van der Waals

layered materials", Light: Science & Applications, Vol.13, 303, 2024.
[12] G. Balasubramanian et al., "Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond", Nature Materials, Vol.8, 2009, pp.383-387.
[13] K. Ohno et al., "Engineering shallow spins in diamond with nitrogen delta-doping", Applied Physics Letters, Vol.101, 082413, 2012.
[14] R. Katsumi et al., "Recent progress in hybrid diamond photonics for quantum information processing and sensing", Communications Engineering, Vol.4, 85, 2025.
[15] S. Sangtawesin et al., "Origins of Diamond Surface Noise Probed by Correlating Single-Spin Measurements with Surface Spectroscopy", Physical Review X, Vol.9, 031052, 2019.
[16] V. Uwihoreye et al., "Recent progress on heteroepitaxial growth of single crystal diamond films", Electron, Vol.2, No.4, e70, 2024.
[17] J.-F. Wang et al., "On-Demand Generation of Single Silicon Vacancy Defects in Silicon Carbide", ACS Photonics, Vol.6, No.7, 2019, pp.1736-1743.
[18] A. Bourassa et al., "Entanglement and control of single nuclear spins in isotopically engineered silicon carbide", Nature Materials, Vol.19, 2020, pp.1319-1325.
[19] I. Lekavicius et al., "Magnetometry Based on Silicon-Vacancy Centers in Isotopically Purified 4H-SiC", Physical Review Applied, Vol.19, 044086, 2023.
[20] C. P. Anderson et al., "Electrical and optical control of single spins integrated in scalable semiconductor devices", Science, Vol.366, No.6470, 2019, pp.1225-1230.
[21] D. M. Lukin, M. A. Guidry and J. Vučković, "Integrated quantum photonics with silicon carbide: challenges and prospects", PRX Quantum, Vol.1, 020102, 2020.
[22] T. Steidl et al., "Single V2 defect in 4H silicon carbide Schottky diode at low temperature", Nature Communications, Vol.16, 4669, 2025.
[23] R. Gong et al., "Isotope engineering for spin defects in van der Waals materials", Nature Communications, Vol.15, 104, 2024.
[24] C. J. Patrickson et al., "High frequency magnetometry with an ensemble of spin qubits in hexagonal boron nitride", npj Quantum Information, Vol.10, 5, 2024.
[25] S. C. Scholten et al., "Multi-species optically addressable spin defects in a van der Waals material", Nature Communications, Vol.15, 6727, 2024.
[26] X. Gao et al., "Quantum sensing of paramagnetic spins in liquids with spin qubits in hexagonal boron nitride", ACS Photonics, Vol.10, No.8, 2023, pp.2894-2900.
[27] X. Zhou et al., "Optically Addressable Molecular Spins at 2D Surfaces", arXiv:2601.19988, 2026.
[28] T.-A. Chen et al., "Wafer-scale single-crystal hexagonal boron nitride monolayers on Cu (111)", Nature, Vol.579, 2020, pp.219-223.

Chapter
02

QAOA 알고리즘의 기술 동향
- 성능 향상을 위한 발전 방향 -

홍윤표_한국전자기술연구원 책임연구원
길재준_한국전자기술연구원 연구원
전석훈_한국전자기술연구원 선임연구원
김병수_한국전자기술연구원 센터장

QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm)는 조합 최적화 문제를 양자회로로 표현하고 양자 연산과 고전 최적화를 반복적으로 결합하여 근사해를 탐색하는 대표적인 변분 양자 알고리즘(Variational Quantum Algorithm: VQA)이다. 최근에는 생산 공정, 물류 및 항공기 화물 배치, 포트폴리오 구성 등 실제 산업 최적화 문제에 QAOA 기반 기법을 적용하려는 연구가 진행되고 있으나 제한된 회로 깊이에서의 탐색 성능, 파라미터 학습 비용, 제약조건 처리, 양자회로 및 QPU(Quantum Processing Unit) 실행 비용 등의 한계가 존재한다. 이를 개선하기 위해 초기 상태와 회로 구조 및 파라미터화를 변경하여 제한된 깊이에서 성능을 높이고, 기존 학습 결과를 활용해 파라미터 최적화를 효율화하고, 제약조건을 만족하는 해 공간을 탐색하며, 2-큐비트 게이트 수와 측정 비용을 줄이는 다양한 방법이 연구되고 있다. 본 고에서는 QAOA의 기본 구조와 산업 적용 사례를 살펴보고, 이러한 주요 병목을 해결하기 위한 최근 기술 발전 동향과 향후 발전 방향을 정리한다.

I. 서론

양자컴퓨터는 양자 중첩과 얽힘을 이용하여 기존 컴퓨팅 방식과 다른 연산을 수행하는 차세대 컴퓨팅 기술로, 최적화, 양자화학, 머신러닝 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 연구되고 있다. 그러나 현재의 양자컴퓨터는 제한된 큐비트 수와 높은 오류율로 인해 복잡하고 깊은 양자회로를 안정적으로 수행하기 어렵다. 이에 따라 제한된 양자 자원을 효율적으로 활용할 수 있는 양자-고전 하이브리드 알고리즘에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

* 본 내용은 홍윤표 책임연구원(☎ 031-785-6716, yp0215.hong@keti.re.kr)에게 문의하시기 바랍니다.
** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

OPEN 공공누리 출처표시 상업용금지 공공저작물 자유이용허락

대표적인 양자-고전 하이브리드 알고리즘인 QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm)는 조합 최적화 문제의 목적함수를 비용 해밀토니안으로 표현하고 비용 연산과 믹서(mixer) 연산을 반복하여 근사적인 최적해를 탐색하고 양자회로를 통해 후보 해의 확률 분포를 양자컴퓨터로 생성하는 알고리즘이다. 이후 측정 결과를 바탕으로 고전 컴퓨터에서 최적화 알고리즘을 통해 변분 파라미터를 갱신하는 과정을 반복하여 최적화를 수행하며 조절이 가능한 회로 구조를 기반으로 다양한 조합 최적화 문제에 적용할 수 있다.

최근에는 QAOA를 생산 공정, 물류 및 화물 배치, 금융 포트폴리오 구성과 같은 산업 최적화 문제에 적용하려는 연구도 진행되고 있다. 그러나 제한된 회로 깊이에서는 충분한 탐색 성능을 확보하기 어렵고 회로 깊이가 증가하면 게이트와 학습 파라미터가 증가하여 실제 QPU에서의 실행 부담도 커질 수 있다. 또한, 반복적인 파라미터 학습과 측정에 따른 실행 비용, 실제 문제에 포함된 다양한 제약조건의 처리, 제한된 하드웨어 연결 구조에서 발생하는 추가적인 회로 비용도 함께 고려해야 한다.

본 고에서는 QAOA의 기본 동작 구조와 산업 적용 사례를 살펴보고 제한된 회로 깊이에서의 회로 구조 개선, 파라미터 학습 효율화, 제약조건 처리, 양자회로 및 QPU 실행 비용 절감과 관련된 최근 기술 동향을 분석한다. 이를 통해 문제와 하드웨어 특성을 고려하여 QAOA의 성능과 실행 효율을 높이기 위한 주요 기술 발전 방향을 정리한다.

II. QAOA의 구조와 성능 결정 요소

QAOA는 조합 최적화 문제의 목적함수를 양자회로의 비용 해밀토니안으로 표현하고 비용 해밀토니안과 해 공간을 탐색하기 위한 믹서 해밀토니안을 반복적으로 적용하여 근사적인 최적해를 탐색하는 변분 양자 알고리즘이다. 조합 최적화 문제를 QAOA에 적용하기 위해서는 목적함수를 이진변수로 표현하고 양자회로에서 구현할 수 있는 비용 해밀토니안으로 변환해야 한다. 많은 최적화 문제는 이진변수의 다항식으로 정식화할 수 있으며 변수 간 상호작용이 2차 항까지 포함하는 경우 QUBO(Quadratic Unconstrained Binary Optimization), 3차 이상의 고차 항을 포함하는 경우 HUBO(Higher-Order Unconstrained Binary Optimization) 형태로 나타낼 수 있다. 이러한 이진변수 기반 목적함수는 각 이진변수를 Pauli-Z 연산자에 대응시켜 양자 해밀토니안으로 변환할 수 있으며 최적화 문제의 목적함수를 QAOA의 비용

해밀토니안으로 쉽게 변환할 수 있다. 예를 들어, 이진변수 $x_i \in 0,1$로 구성되고 변수 간 상호작용이 2차 항까지 포함되는 문제는 다음과 같은 QUBO 형태로 표현할 수 있다.

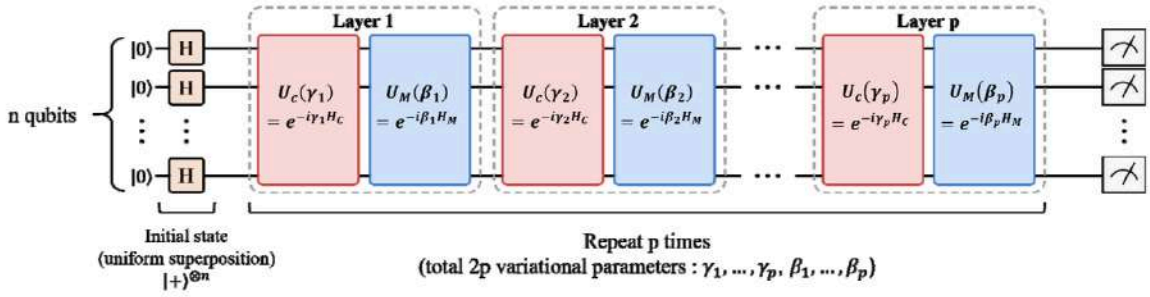
$$C(x) = \sum_i q_i x_i + \sum_{i<j} q_{ij} x_i x_j$$

여기서 q_i와 q_{ij}는 각각 개별 변수와 변수 간의 관계가 목적함수에 미치는 영향을 나타낸다. 이와 같이 구성된 목적함수는 Pauli-Z 연산자를 이용하여 비용 해밀토니안으로 변환할 수 있으며 고전 최적화 문제의 각 후보 해는 계산 기저 상태 $|x\rangle$에 대응하고 각 상태의 비용은 H_C의 고유값을 통해 표현된다. QAOA는 이와 같이 목적함수를 표현하는 비용 해밀토니안 H_C와 해 공간을 탐색하기 위한 믹서 해밀토니안 H_M을 이용하여 양자 상태를 변화시킨다. 비용 해밀토니안과 믹서 해밀토니안은 각각 하기의 수식을 이용하여 비용 연산자와 믹서 연산자를 구성하며 다음과 같이 표현한다.

$$H_C = \sum_{i,j} w_{ij} Z_i Z_j, \;\; U_C(\gamma) = e^{-i\gamma H_c}$$

$$H_M = \sum_i X_i, \;\; U_M(\beta) = e^{-i\beta H_M}$$

Farhi가 제안한 표준 QAOA[1]는 [그림 1]과 같이 일반적으로 모든 계산 기저 상태를 동일한 확률로 포함하는 균일 중첩 상태에서 시작한다. 이후 하나의 비용 연산자와 하나의 믹서 연산자를 순차적으로 적용하는 단위를 하나의 레이어(layer)로 정의하고 이를 p번 반복하여 QAOA 회로를 구성한다. 여기서 p는 회로를 구성하는 레이어의 수를 나타내며 일반적으로 p가 증가하면 더 다양한 양자상태를 탐색할 수 있어 해의 품질 향상을 기대할 수 있으며 작은 p에서는 품질은 떨어지지만 비교적 얕은 회로로 구성할 수 있다.



〈자료〉 한국전자기술연구원 자체 제작

[그림 1] 표준 QAOA 회로

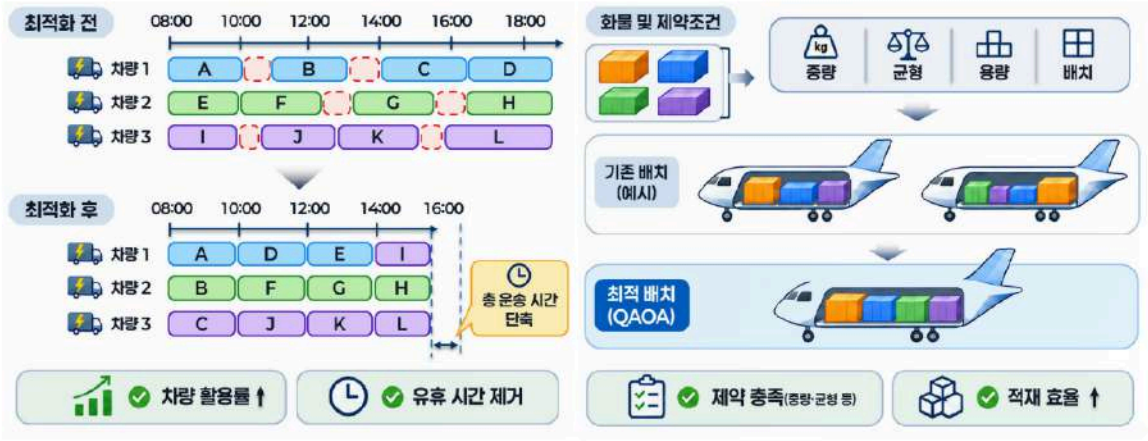
각 레이어에서 비용 연산자는 계산 기저 상태의 목적함수 값에 따라 서로 다른 위상을 부여하고 믹서 연산자는 상태 간 전이를 유도하여 각 후보 해의 측정 확률을 변화시킨다. 이때 비용 연산자와 믹서 연산자는 각각 변분 파라미터 γ와 β에 의해 제어되며 표준 QAOA에서는 레이어마다 두 개의 파라미터를 사용하므로 깊이 p에 대해 총 2p개의 파라미터를 최적화해야 한다. QAOA에서는 양자회로를 반복 측정하여 비용 해밀토니안의 기대값을 추정하고 고전 최적화 알고리즘은 이를 바탕으로 파라미터를 갱신하는 과정을 반복하여 목적함수의 기대값을 최소화하거나 최대화하는 파라미터를 탐색한다.

따라서 QAOA는 단순히 하나의 양자회로를 한 번 실행하여 해를 얻는 알고리즘이 아니라 양자회로 실행과 측정, 고전 연산을 통한 목적함수 평가와 파라미터 갱신을 반복하는 양자-고전 하이브리드 구조를 가진다. 이러한 구조에서는 양자회로의 구성뿐만 아니라 고전 시스템에서 수행되는 파라미터 최적화와 반복적인 QPU 실행 비용도 전체 알고리즘의 성능과 실행 효율에 영향을 미친다.

이러한 문제 표현 및 양자-고전 하이브리드 구조를 바탕으로 QAOA는 실제 산업 문제에도 적용할 수 있는데 물류 경로 및 자원 할당, 생산 스케줄링, 포트폴리오 구성 등 다양한 산업 분야의 조합 최적화 문제에 적용될 수 있다. 이 문제들은 여러 선택지 중 최적의 조합을 결정하는 이진 최적화 문제로 정식화할 수 있는 경우가 많아 앞서 설명한 QUBO나 HUBO 등의 표현을 통해 QAOA의 비용 해밀토니안으로 구성하기에 용이하다.

IonQ와 Einride[2]는 [그림 2(a)]와 같이 화물차 운송 과정에서 발생하는 일정 공백을 줄이고 차량 활용률을 높이기 위한 화물 운송 스케줄 최적화 문제를 다루었다. 해당 산업에서는 운송 취소 등으로 발생한 유휴 시간에 새로운 화물을 재배정하는 과정에서 화물 배정 간의 지리적 · 시간적 적합성을 고려하는 양자-고전 하이브리드 최적화 기법을 적용하여 익명화된 실제 운송 데이터를 바탕으로 배송 취소 상황을 모사한 시뮬레이션에서 양자 알고리즘으로 생성한 해를 기존 고전 최적화기의 초기해로 제공한 결과 초기해 없이 실행한 기준 방식 대비 배송 건수가 평균 1.7%, 특정 시나리오에서 최대 12.1% 증가하였다.

또 다른 예시로는 IonQ와 Airbus의 여러 화물을 항공기에 배치하는 과정에서 적재량과 화물 배치 등의 제약조건을 고려하는 항공기 화물 적재 최적화 문제가 있다[그림 2(b)]. IonQ는 해당 문제를 양자컴퓨터로 풀기 위해 QAOA를 기반으로 한 MAL-VQA[3]를 제안하고 IonQ의 Aria와 Forte QPU에서 12~28큐비트(qubit) 규모의 문제를 수행하여 최적해를



(a) 화물 운송 스케줄의 차량 및 화물 재배정 최적화 (b) 항공기 내 화물 배치 및 적재 최적화

〈자료〉 한국전자기술연구원 자체 제작

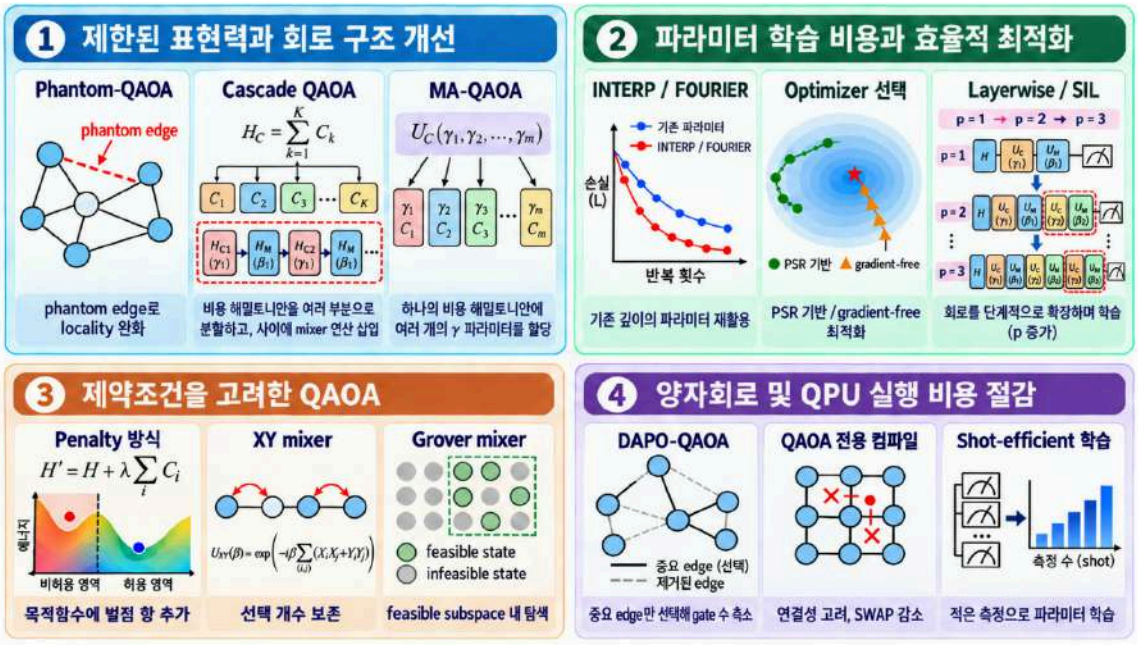
[그림 2] QAOA 기반 산업 최적화 적용 사례

확인하였다. 실제 양자 하드웨어에서 반복 최적화를 수행한 12큐비트 실험에서는 최적해의 측정 확률이 약 70%에 도달하였으며 시뮬레이터에서 학습한 매개변수를 실제 하드웨어에서 실행한 28큐비트 실험에서는 약 35%를 기록하였다. 이는 소규모 항공기 화물 적재 문제에 대한 개념 검증으로 제한된 양자 자원에서 해당 기법의 적용 가능성을 보였다.

이처럼 문제 표현의 용이성과 조절할 수 있는 회로 구조를 바탕으로 QAOA는 현재의 양자 하드웨어에서 산업 조합 최적화 문제를 다루기 위한 대표적인 변분 양자 알고리즘으로 연구되고 있다.

III. QAOA의 주요 병목과 기술 발전

QAOA의 성능을 높이기 위해서는 해의 품질과 이를 얻는 데 필요한 계산 자원을 함께 고려해야 한다. 일부 문제와 조건에서는 이론적 성능이 보장되지만, 다양한 문제에서 고전 최적화 기법 대비 이득을 확보할 수 있는지는 추가적인 검증이 필요하다. 특히, 제한된 회로 깊이에서는 충분한 탐색 성능을 얻기 어렵고 깊이를 늘리면 게이트 수가 증가하여 하드웨어 잡음의 영향이 커질 수 있으며 매개변수 최적화에는 반복적인 회로 실행과 측정이 필요하므로 문제 규모와 회로 깊이가 증가할수록 학습 및 실행 비용도 커진다. 제약조건이 있는 문제에



〈자료〉 한국전자기술연구원 자체 제작

[그림 3] QAOA의 대표적인 기법 예시

서는 이를 효율적으로 반영하면서 유효한 해를 탐색하는 방법도 요구된다.

이러한 과제들은 서로 연결되어 있어 회로의 표현력을 높이는 것만으로는 전체 성능의 개선을 기대하기 어렵다. 이에 최근 연구는 초기 상태와 회로 구조를 개선하여 제한된 깊이에서 탐색 성능을 높이는 동시에 매개변수 학습을 효율화하고 제약조건을 만족하는 해에 탐색을 집중하며 회로 실행에 필요한 자원을 줄이는 방향으로 발전하고 있다. 본 장에서는 이러한 기술 동향을 제한된 회로 깊이에서의 구조 개선, 파라미터 학습 효율화, 제약조건을 고려한 QAOA, 양자회로 및 QPU 실행 비용 절감으로 나누어 살펴본다[그림 3].

1. 제한된 표현력과 양자회로 구조 개선

표준 QAOA는 회로 깊이 p를 증가시킬수록 더 다양한 양자 상태를 표현할 수 있어 해의 품질 향상을 기대할 수 있다. 그러나 회로가 깊어지면 게이트 수와 회로 복잡도가 증가하여 양자 하드웨어의 오류에 더 큰 영향을 받을 수 있다. 최근에는 단순히 p를 증가시키기보다 제한된 회로 깊이에서 초기 상태에 유용한 정보를 제공하거나 문제 구조를 효과적으로 반영

하고 회로 구성과 파라미터화를 개선하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

먼저, 탐색의 시작점을 개선하는 방법으로 Warm-start QAOA[4]가 있다. 표준 QAOA는 문제의 해에 대한 사전 정보 없이 균일 중첩 상태에서 탐색을 시작하는 반면 Warm-start QAOA는 고전적인 최적화 과정에서 얻은 정보를 초기 상태에 반영한다. QUBO 문제를 연속적인 형태로 완화하여 얻은 해를 이용해 유망한 영역 주변에서 탐색을 시작하고 이에 적합한 믹서 연산을 함께 사용한다. 이를 통해 특히 낮은 회로 깊이에서 표준 QAOA보다 높은 품질의 해를 얻을 수 있다.

초기 상태뿐만 아니라 문제의 구조를 회로에 적극적으로 반영하는 방법도 연구되고 있다. 낮은 회로 깊이의 QAOA는 각 연산의 영향이 제한된 범위에만 전달되기 때문에 문제 그래프의 일부 국소적인 구조에 의존하여 해를 탐색하게 된다. Phantom-QAOA[5]는 이러한 한계를 완화하기 위해 실제 문제에는 존재하지 않는 팬텀 엣지(phantom edge)를 문제 해밀토니안에 추가하고 그 영향을 하나의 추가 파라미터로 조절한다. 이를 통해 동일한 회로 깊이에서도 기존 QAOA보다 더 넓은 연결 관계를 연산 과정에 활용할 수 있으며 MaxCut 문제에서 낮은 회로 깊이의 성능을 향상시킬 수 있다.

한편, QAOA 내부의 연산 순서를 변경하여 제한된 깊이에서 상태 변화보다 효과적으로 유도하는 방법도 제안되고 있다. Cascade QAOA[6]는 기존의 비용 연산과 믹서 연산을 반복하는 구조를 세분화하여 비용 해밀토니안을 여러 부분으로 나누고 각 비용 연산 사이에 믹서 연산을 배치한다. 이를 통해 추가적인 회로 부담을 많이 증가시키지 않으면서 양자상태를 더욱 세밀하게 변화시켜 표준 QAOA보다 높은 품질의 해를 얻을 수 있다.

마지막으로 동일한 회로 깊이에서 회로의 표현력을 높이기 위해 파라미터의 자유도를 확대하는 방법이 있다. MA-QAOA(Multi-Angle QAOA)[7]는 하나의 레이어에서 여러 비용 항과 믹서 항이 동일한 파라미터를 공유하는 표준 QAOA와 달리 각 항에 서로 다른 변분 파라미터를 부여한다. 이는 회로 깊이를 증가시키지 않고도 각 연산의 영향을 세밀하게 조절할 수 있으며, MaxCut 문제에서는 낮은 깊이로도 더 깊은 표준 QAOA와 유사한 성능을 얻을 수 있다. 다만, 최적화해야 하는 파라미터 수가 증가하므로 성능 향상과 학습 비용 사이의 상충관계를 고려해야 한다.

2. 파라미터 학습 비용과 효율적 최적화

표준 QAOA는 회로 깊이 p에 따라 2p개의 변분 파라미터를 최적화해야 하며 적절한 값을 찾기 위해 양자회로 실행과 목적함수 평가를 반복한다. 따라서 회로 깊이가 증가하면 최적화 대상과 탐색 공간이 함께 커지고 이에 필요한 QPU 실행 횟수도 증가할 수 있다. 이러한 학습 부담을 줄이기 위해 기존에 얻은 파라미터를 재활용하거나 파라미터 갱신 방식과 회로 학습 절차를 개선하는 다양한 방법이 연구되고 있다.

먼저, 이전 깊이에서 얻은 학습 결과를 다음 단계의 초기값으로 활용하는 방법이 있다. 이 방법은 깊이 p에서 최적화된 파라미터를 보간하여 p+1의 초기 파라미터로 사용하며 FOURIER[8]는 더 나아가 QAOA 파라미터가 깊이에 따라 비교적 규칙적으로 변화하는 특성을 이용해 소수의 푸리에(Fourier) 계수로 전체 파라미터를 표현한다. 이러한 방법은 회로 깊이가 증가할 때마다 파라미터를 처음부터 다시 탐색하는 부담을 줄여 높은 깊이의 QAOA를 더욱 효율적으로 최적화할 수 있도록 한다.

파라미터를 어떤 방식으로 갱신하는지도 학습 비용에 큰 영향을 미친다. 기울기(gradient) 기반 최적화에서는 PSR(Parameter-Shift Rule)을 이용해 양자회로의 측정 결과로부터 기울기를 계산할 수 있지만 각 파라미터의 미분값을 얻기 위해 추가적인 회로 실행이 필요하다. 반면, COBYLA나 Nelder-Mead와 같은 그래디언트 프리(gradient-free) 방법은 기울기를 직접 계산하지 않고 목적함수 평가 결과만으로 다음 파라미터를 탐색한다. 따라서 QPU 실행 비용과 문제 특성을 고려하여 적절한 최적화 방법을 선택하는 것이 중요하다.

회로가 깊어질수록 많은 파라미터를 동시에 최적화해야 하므로 학습 난이도와 반복 횟수가 증가할 수 있다. 이를 줄이기 위해 층별 학습(layerwise learning)은 얕은 회로에서 학습을 시작하고 학습이 진행됨에 따라 새로운 레이어를 추가하면서 최적화 범위를 점진적으로 확장한다. QAOA에서는 이러한 방식을 발전시켜 새로운 레이어를 항상 회로의 마지막에 추가하는 대신 성능 향상에 효과적인 위치를 선택하여 삽입하는 SIL(Smart Insert Layerwise) QAOA [9]도 제안되었다. 이를 통해 깊은 회로를 한 번에 최적화하는 부담을 줄이고, 단계적으로 회로의 성능을 개선할 수 있다.

3. 제약조건을 고려한 QAOA

실제 산업의 조합 최적화 문제에는 선택할 수 있는 항목 수, 예산, 자원 할당 등 다양한 제약조건이 포함된다. 표준 QAOA는 이러한 제약을 직접 보장하지 않기 때문에 제약조건을 위반하는 상태까지 함께 탐색할 수 있으며, 이는 불필요한 탐색 공간을 증가시켜 최적화 효율을 낮출 수 있다. 이를 개선하기 위해 제약조건을 목적함수에 반영하거나 제약조건을 만족하는 상태들 사이에서만 탐색이 이루어지도록 회로를 구성하는 방법이 연구되고 있다.

가장 일반적인 방법은 제약조건을 위반하는 해에 벌점을 부여하는 것이다. 기존 목적함수에 제약조건 위반 정도에 따른 벌점 항을 추가하면 표준 QAOA 구조를 크게 변경하지 않고도 제약조건을 반영할 수 있다. 다만, 벌점의 크기가 너무 작으면 제약조건 위반을 충분히 억제하지 못하고 반대로 너무 크면 원래 목적함수보다 벌점의 영향이 지나치게 커질 수 있어 적절한 값을 설정하는 것이 중요하다.

제약조건을 목적함수에 벌점 항으로 추가하는 대신 양자상태가 제약조건을 만족하는 범위 안에서만 변화하도록 믹서를 설계하는 방법도 있다. 대표적인 XY mixer[10]는 두 큐비트의 값을 서로 교환하는 형태의 전이만 허용하여 선택된 항목의 총 개수가 항상 일정하게 유지되도록 한다. 따라서 일정한 수의 항목을 선택해야 하는 문제에서는 탐색이 처음부터 끝까지 제약조건을 만족하는 해들 사이에서만 이루어진다. 다만, 보존되는 것이 선택 항목의 개수라는 한 가지 성질이므로 이 형태로 환원되지 않는 제약조건에는 직접 적용하기 어렵다.

Grover-Mixer QAOA[11]는 이러한 개별 설계 대신 제약조건을 만족하는 모든 해의 균일 중첩 상태를 기준으로 삼아 그 상태를 중심으로 진폭을 반사하는 방식으로 믹싱(mixing)을 수행한다. 제약조건 별로 상태 전이 규칙을 직접 설계하는 대신 공통적인 형태의 믹서를 사용할 수 있어 문제별 믹서 설계 부담을 줄일 수 있다. 다만, 복잡도가 사라지는 것이 아니라 믹서 설계에서 상태 준비로 옮겨가는 것이고, 또한 목적함수 값이 같은 해를 구분하지 않으므로 해 공간의 국소 구조를 활용하지 못한다.

4. 양자회로 및 QPU 실행 비용 절감

QAOA를 실제 QPU에서 실행할 때는 비용 해밀토니안을 구현하기 위한 다수의 2-큐비트 게이트(two-qubit gate)와 반복적인 측정이 필요하다. 문제 규모와 회로 깊이가 증가할수록

게이트 수와 QPU 실행 횟수도 함께 증가하므로 최근에는 회로 구성 단계부터 하드웨어 배치와 측정 과정에 이르기까지 실제 실행 비용을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다.

먼저, 알고리즘 수준에서는 비용 연산에 포함되는 2-큐비트 게이트 자체를 줄이는 방법이 제안되고 있다. DAPO-QAOA[12]는 모든 문제 항을 매 레이어에서 동일하게 사용하는 대신 이전 레이어에서 얻은 해와 주변 탐색 결과를 이용해 다음 레이어에서 사용할 문제 그래프의 엣지(edge)를 선택하고 이를 기반으로 비용 연산을 동적으로 구성한다. 전체 엣지를 항상 회로에 포함하지 않고도 탐색에 필요한 정보를 유지할 수 있으며, MaxCut과 NAE3SAT 실험에서 표준 QAOA보다 적은 2-큐비트 게이트를 사용하면서 높은 해 품질을 보였다.

회로를 구성한 이후에는 이를 실제 하드웨어에 어떻게 배치하느냐도 실행 비용에 큰 영향을 미친다. 실제 QPU는 큐비트 간 연결성이 제한되어 있어 논리적으로 연결된 큐비트를 물리적으로 인접시키기 위한 SWAP 게이트가 추가될 수 있다. 이를 줄이기 위해 QAOA 비용 연산의 2-큐비트 게이트들이 서로 교환 가능하다는 특성을 활용하여 게이트 실행 순서를 재배치하고, 하드웨어 연결 구조에 맞는 실행 경로를 구성하는 전용 컴파일 방법이 제안되었다[13]. 다양한 하드웨어 구조에서 QAOA 회로를 선형 깊이로 구성할 수 있으며, 기존 방법 대비 회로 깊이를 최대 3.8배 개선하고 게이트 수를 약 17% 줄일 수 있다.

하드웨어에 배치된 회로를 실제로 실행하는 단계에서는 반복적인 측정에 따른 비용도 중요하다. QAOA는 하나의 파라미터 조합을 평가하기 위해 동일한 회로를 여러 번 측정하며, 이러한 과정이 파라미터 학습 동안 반복된다. 측정 횟수를 늘리면 목적함수의 값을 더욱 정확하게 추정할 수 있지만 QPU 사용량도 함께 증가하므로, 제한된 샷(shot) 환경에서도 안정적으로 파라미터를 학습하거나 학습 과정에 따라 측정 횟수를 조절하는 방법이 연구되고 있다. 최근에는 이러한 방법이 실제 트랩 이온(trapped-ion) QPU에서도 검증되면서[14] QAOA의 전체 실행 비용을 줄이기 위한 연구가 이어지고 있다.

IV. 결론

QAOA는 조합 최적화 문제의 목적함수를 비용 해밀토니안으로 표현하고 양자 연산과 고전 최적화를 반복적으로 결합하여 근사해를 탐색하는 대표적인 변분 양자 알고리즘으로 비교적 단순하고 조절할 수 있는 회로 구조를 기반으로 다양한 조합 최적화 문제에 적용할

수 있으며, 최근에는 생산 공정, 물류 및 항공기 화물 배치, 포트폴리오 구성 등 실제 산업 문제에 QAOA 기반 기법을 적용하려는 연구도 진행되고 있다.

하지만 제한된 회로 깊이에서는 충분한 탐색 성능을 확보하기 어렵고 회로 깊이가 증가하면 게이트 수와 학습해야 하는 파라미터가 함께 증가하여 실제 양자 하드웨어의 오류와 실행 비용에 영향받을 수 있다. 또한, 적절한 파라미터를 탐색하기 위한 반복적인 QPU 실행과 측정이 필요하며 실제 최적화 문제에 포함된 다양한 제약조건을 효율적으로 반영하는 것도 중요한 과제로 남아 있다.

본 고에서는 이러한 한계를 개선하기 위한 최근 QAOA 기술 동향을 살펴보았다. 초기 상태와 문제 구조, 연산 순서 및 파라미터화 방식을 개선하여 제한된 회로 깊이에서 탐색 성능을 높이는 기법과 기존 학습 결과의 재활용 및 단계적 학습을 통해 파라미터 최적화 비용을 줄이는 방법을 검토하였다. 또한, 벌점 항과 제약조건을 보존하는 믹서를 활용한 탐색 공간 축소, 2-큐비트 게이트 수와 회로 깊이를 줄이기 위한 회로 구성 및 컴파일 최적화, 반복적인 측정에 따른 QPU 실행 비용 절감 기술을 분석하였다.

이러한 기술적 개선에도 불구하고 현재의 QAOA는 문제 규모가 커질수록 필요한 큐비트와 게이트 수가 증가하고 하드웨어 오류가 누적되어 대규모 산업 문제에 적용하는 데 한계가 있다. 따라서 향후에는 대규모 문제를 작은 부분 문제로 분할하고 부분해를 통합하는 확장성 확보 기술과 QPU의 연결성 및 오류 특성을 고려한 회로 최적화 기술이 필요하다. 또한, 해의 품질뿐만 아니라 전체 최적화 시간과 QPU 실행 비용을 함께 고려하고 고전 최적화 기법과의 연계를 통해 실제 산업 환경에서의 활용 가능성을 검증하는 것이 중요한 과제로 남아 있다.

참고문헌

[1] E. Farhi, J. Goldstone and S. Gutmann, "A Quantum Approximate Optimization Algorithm", arXiv:1411.4028, 2014.

[2] M. A. Lopez-Ruiz, D. Zhu, J. Hatzenbuhler, S. Zhao, C. Girotto, W. Aboumrad, J. Alm, J. Kompalla, M. Issler, A. Kaushik, and M. Roetteler, "Hybrid Quantum-Classical Optimization Workflows for the Shipment Selection Problem," arXiv:2604.11758, 2026.

[3] A. Kaushik, S. H. Kim, W. Aboumrad, M. Roetteler, A. Topi, and R. Ashworth, "Quantum Computing for Optimizing Aircraft Loading," arXiv:2504.01567, 2025.

[4] D. J. Egger, J. Mareček, and S. Woerner, "Warm-starting quantum optimization," Quantum,

Vol.5, Art. No.479, 2021.

[5] Q. Langfitt, R. Tate, and S. Eidenbenz, "Phantom Edges in the Problem Hamiltonian: A Method for Increasing Performance and Graph Visibility for QAOA," IEEE, 2025 International Conference on Quantum Communications, Networking, and Computing(QCNC), 2025, pp.40-49.

[6] Y. Hong, S. Jeon, and B.-S. Kim, "Cascade QAOA: Cost Hamiltonian Decomposition with Intermediate Mixing," IEEE, 2025 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering(QCE), 2025, pp.414-415.

[7] R. Herrman, P. C. Lotshaw, J. Ostrowski, T. S. Humble, and G. Siopsis, "Multi-angle quantum approximate optimization algorithm," Scientific Reports, Vol.12, Art. No.6781, 2022.

[8] L. Zhou, S.-T. Wang, S. Choi, H. Pichler and M. D. Lukin, "Quantum Approximate Optimization Algorithm: Performance, Mechanism, and Implementation on Near-Term Devices," Physical Review X, Vol.10, No.2, Art. No.021067, 2020.

[9] J. Gill, Y. Hong, and B.-S. Kim, "Smart Insert Layerwise learning QAOA for solving MaxCut problem," IEEE, 2025 IEEE/IEIE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia), 2025, pp.1-4.

[10] S. Hadfield et al., "From the Quantum Approximate Optimization Algorithm to a Quantum Alternating Operator Ansatz," Algorithms, Vol.12, No.2, Art. No.34, 2019.

[11] A. Bartschi and S. Eidenbenz, "Grover Mixers for QAOA: Shifting Complexity from Mixer Design to State Preparation," IEEE, 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), 2020, pp.72-82.

[12] Y. Wang, Z. Li, and L. Wan, "DAPO-QAOA: An algorithm for solving combinatorial optimization problems by dynamically constructing phase operators," arXiv:2502.04100, 2025.

[13] Y. Jin, J. Luo, L. Fong, Y. Chen, A. B. Hayes, C. Zhang, F. Hua, and E. Z. Zhang, "A Structured Method for Compilation of QAOA Circuits in Quantum Computing," arXiv:2112.06143, 2021.

[14] T. Hao, Z. He, R. Shaydulin, J. Larson, and M. Pistoia, "End-to-end protocol for high-quality quantum approximate optimization algorithm parameters with few shots," Physical Review Research, Vol.7, Art. No.033179, 2025.

Chapter
03

피지컬 AI의 월드 모델과 VLA가 만드는 예측형 로봇 지능 기술 동향

김말희_한국전자통신연구원 책임연구원
허태욱_한국전자통신연구원 실장

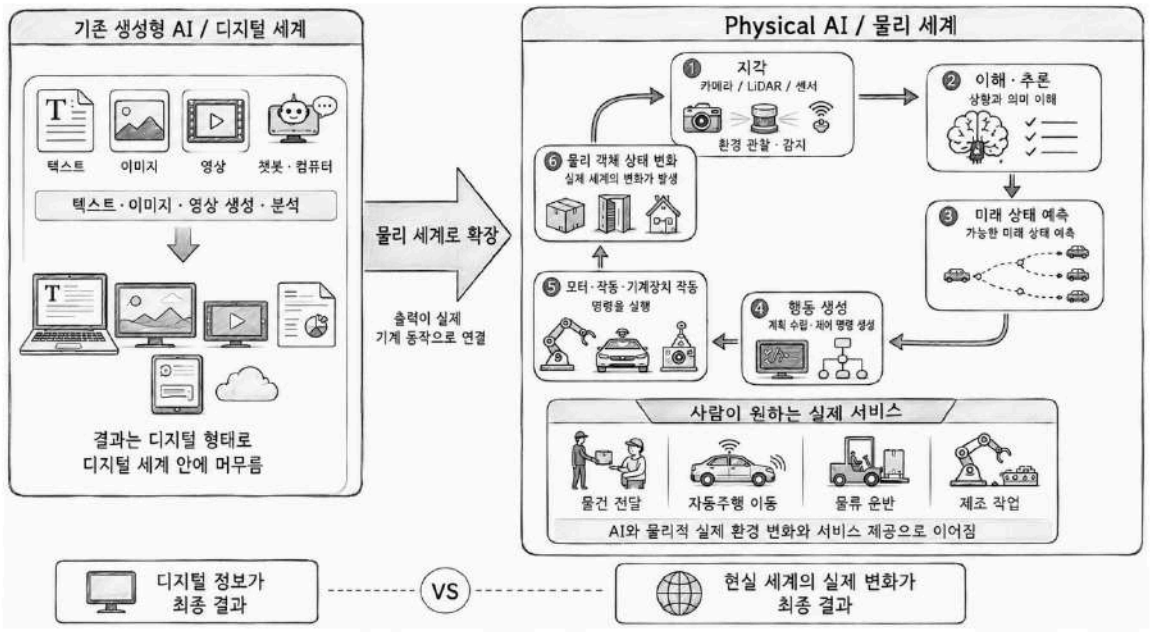
피지컬(Physical) AI는 AI의 인식 · 추론 능력을 로봇 · 차량 · 기계의 실제 행동으로 연결하는 기술이다. 최근 시각 · 언어 · 행동 모델(VLA), 월드 모델(World Model), 로봇 파운데이션 모델, 시뮬레이션 · 합성 데이터 기술이 빠르게 발전하면서 피지컬 AI의 적용 범위도 넓어지고 있다. VLA가 현재 관찰과 목표를 바탕으로 행동을 생성한다면, 월드 모델은 그 행동에 따라 미래 상태가 어떻게 달라질지 예측한다. 두 기능을 결합한 월드 액션 모델(WAM)은 이러한 흐름을 이어받아 예측형 물리 지능으로 발전하기 위한 새로운 연구 방향으로 주목받고 있다. 피지컬 AI는 자율주행 · 제조 · 물류처럼 구조화된 환경에서 이미 상용화와 현장 적용이 진행 중이다. 그러나 비정형 환경에 폭넓게 적용하려면 일반화, 실시간성, 안전성, 평가, 상호운용성 등의 과제를 해결해야 한다. 이에 본 고는 피지컬 AI의 핵심 기술과 산업 적용, 표준화 동향을 살펴보고, 반응형 피지컬 AI에서 예측형 물리 지능으로 나아가는 발전 방향을 전망한다.

I. 피지컬 AI의 개념과 등장 배경

아시모프의 『아이, 로봇』(1950)은 환경을 인식하고 판단해 '로봇 3원칙'에 따라 행동하는 로봇을 그렸다[1]. 오늘날 시각 · 언어 정보를 행동으로 연결하는 시각 · 언어 · 행동 모델(Vision-Language-Action: VLA)과 행동에 따른 변화를 예측하는 월드 모델이 발전하면서, 미래 상태와 행동을 함께 다루는 월드 액션 모델(World Action Model: WAM)이 새로운 연구 방향으로 부상하고 있다. 기능 안전과 이상 감시 기술도 피지컬 AI의 안전한 작동을 뒷받침한다. AI는 이처럼 디지털 정보 처리를 넘어 물리 세계를 지각하고 행동하는 기술로

* 본 내용은 김말희 책임연구원(☎ 042-860-1590, mariekim@etri.re.kr)에게 문의하시기 바랍니다.
** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.
***본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. RS-2025-02304333, AX기반 제조·서비스에서 전주기 제로터치를 달성하기 위한 디지털 혁신요소기술 개발)

OPEN 공공누리 출처표시 상업용금지 공공저작물 자유이용허락



〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 1] 피지컬 AI의 차별적 개념

확장되고 있다.

피지컬 AI는 로봇 · 자율주행차 · 자율이동로봇에 AI를 결합해 환경을 인식하고 행동하게 하는 기술이다. 디지털 정보를 주로 출력하는 생성형 AI와 달리, 피지컬 AI의 출력은 모터 · 차량 · 기계의 동작으로 이어진다[그림 1]. 관련 표준화 개념으로 ITU-T F.748.66의 체화형 인공지능(Embodied Artificial Intelligence: EAI)이 있다[2].

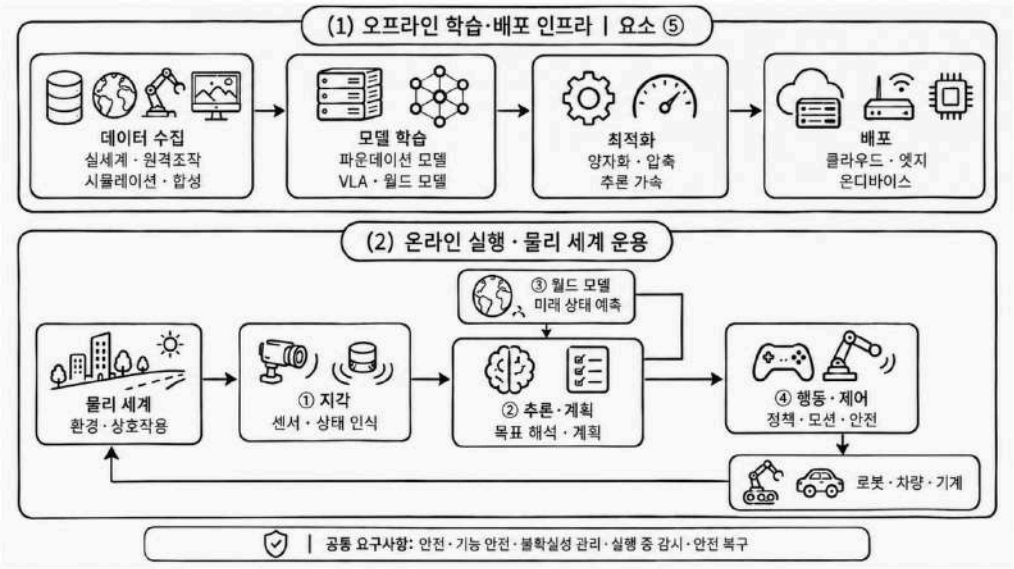
피지컬 AI의 부상에는 산업 수요와 기술 발전이 함께 작용했다. 제조 · 물류의 노동력 부족과 유연 자동화 수요, 자율주행의 예외 상황 대응 필요성이 환경을 이해하고 적응하는 지능에 대한 요구를 키우고 있다. 멀티모달 파운데이션 모델은 언어 · 시각 · 공간 정보를 통합하고, VLA와 로봇 파운데이션 모델은 이를 행동으로 연결한다. 월드 모델은 행동에 따른 미래 변화를 예측하며, 시뮬레이션 · 합성 데이터 · 원격조작은 부족한 로봇 데이터를 보완한다. 엣지 AI 가속기와 모델 최적화도 실제 배포를 지원한다.

본 고는 II장에서 핵심 기술을, III장에서 기술 수준과 산업 적용 사례를 살펴본다. IV장에서는 표준화 · 안전 · 상호운용 동향을 정리하고, V장에서 과제와 발전 방향을 전망한 뒤 VI장에서 맺음말을 제시한다.

II. 피지컬 AI의 핵심 기술 요소와 기술 진화

피지컬 AI는 ① 지각, ② 추론 · 계획, ③ 예측 및 월드 모델, ④ 행동 정책 · 제어, ⑤ 학습 · 배포 인프라가 결합한 시스템으로 보는 것이 적절하다. 이는 통일된 국제 분류체계가 아니라, 본 고의 분석 틀이며, 안전성 · 불확실성 관리 · 실행 중 이상 감지 · 검증은 전 계층의 공통 과제이다.

[그림 2]는 오프라인 학습 · 배포와 온라인 실행 폐루프의 연계를 보여준다. 실제 · 원격조작 · 합성 · 시뮬레이션 데이터로 모델을 학습 · 최적화한 뒤 클라우드, 엣지, 온디바이스에 배포하고, 실행 시에는 지각-추론 · 계획-행동 · 제어-피드백이 반복된다. 월드 모델은 필요할 때 후보 행동의 결과를 예측 · 검증하는 연계 모듈로 볼 수 있다.

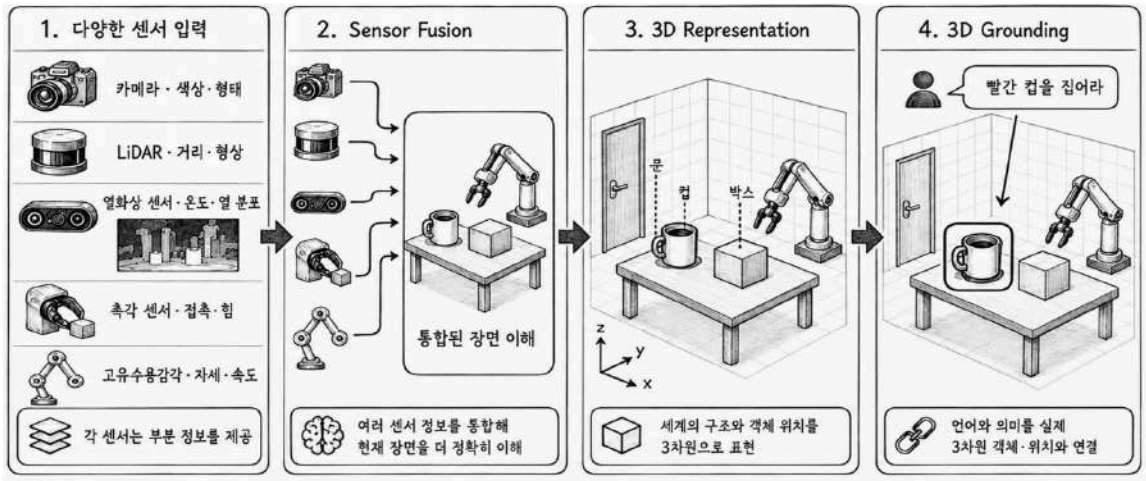


〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 2] 피지컬 AI 핵심 기술 요소의 연계와 학습 · 배포 · 실행 흐름

1. 지각(Perception)

지각은 카메라, 라이다(LiDAR), 깊이 · 촉각 센서, 고유수용감각 등에서 얻은 정보를 통합하여 환경과 로봇의 현재 상태를 하나의 표현으로 구성하는 과정이다. 최근 VLM(Vision Language Model)은 객체의 의미와 관계, 자연어 지시를 함께 이해하며, 로봇에서는 이



〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 3] 피지컬 AI의 지각: 센서 퓨전과 3D 그라운딩

정보를 결합하는 센서 퓨전(sensor fusion)과 언어 · 시각 표현을 실제 3차원 객체 · 위치에 연결하는 3D 그라운딩(grounding)이 중요한 역할을 한다[그림 3].

실 환경에서는 가림, 반사, 조명, 센서 지연, 물체 변형과 접촉 상태가 끊임없이 변한다. 따라서 지각은 단순 객체 인식을 넘어 현재의 물리 상태와 행동 결정에 필요한 정보의 불확실성까지 추정하는 방향으로 발전하고 있다.

2. 추론 · 계획(Reasoning & Planning)

추론 · 계획은 자연어 목표를 해석하고 장면 · 도구의 관계를 파악해 긴 작업을 실행할 수 있는 여러 단계로 분해한다. 공간 관계, 행동 가능성, 로봇의 도달 가능 범위와 작업 진행 상태를 함께 고려하며, 예상과 다른 상황에서는 계획을 수정하거나 복구 행동을 선택해야 한다.

Gemini Robotics-ER 1.6은 물리 환경을 이해하고 작업을 계획한 뒤, 필요한 도구나 하위 VLA를 호출하는 상위 추론 모델의 사례이다[3]. 이러한 구조는 이후 Gemini Robotics ER 2로 발전하면서 공간 · 시간 · 물리적 추론 능력이 더 확장되었다.

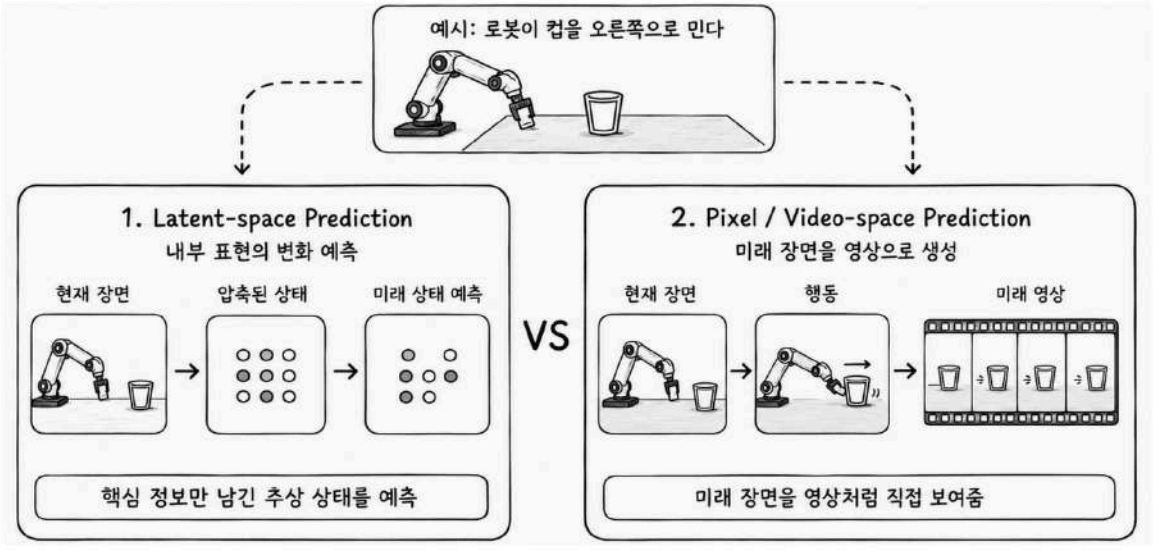
3. 예측 · 월드 모델(Prediction/World Model)

월드 모델은 현재 상태와 행동으로부터 미래의 환경 변화를 예측하는 모델이다. 초기 연구인

월드 모델은 압축된 내부 표현에서 시간적 변화를 학습하고, 이를 가상 시뮬레이션처럼 활용해 행동 정책을 학습할 수 있음을 보였다[4]. 이후에는 영상뿐 아니라 3차원 공간과 실제 물리 세계의 변화까지 예측하는 방향으로 발전하고 있다.

월드 모델의 구현 방식은 크게 잠재 공간 예측(latent-space prediction)과 화소 · 영상 공간 예측(pixel/video-space prediction)으로 구분된다. 잠재 공간 예측 방식은 영상 자체를 생성하는 대신에 행동과 환경 변화에 필요한 핵심 특징의 변화를 내부 표현 공간에서 예측하여 계산 효율을 높이며 JEPA(Joint Embedding Predictive Architecture) 계열이 대표적이다[5]. 반면, 화소 · 영상 공간 예측 방식은 미래 영상을 직접 생성해 환경 변화를 직관적이고 풍부하게 표현할 수 있지만, 계산 비용이 많이 들고 영상이 자연스러워 보이더라도 실제 물리 법칙을 정확히 반영한다고 보장하기 어려운 한계가 있다[그림 4].

Genie 3는 텍스트 입력을 바탕으로 사용자가 상호작용할 수 있는 환경을 생성하는 비디오 기반 월드 모델의 발전 사례이다[6]. 다만, 이러한 생성형 환경을 로봇 제어에 활용하려면 접촉, 가려진 객체의 지속성, 마찰 · 질량에 따른 움직임 등 실제 물리 세계의 특성을 충분히 반영해야 한다. 따라서 사실적인 영상을 생성하는 월드 모델과 물리 법칙을 정밀하게 계산하는 시뮬레이터는 구분할 필요가 있다.



〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

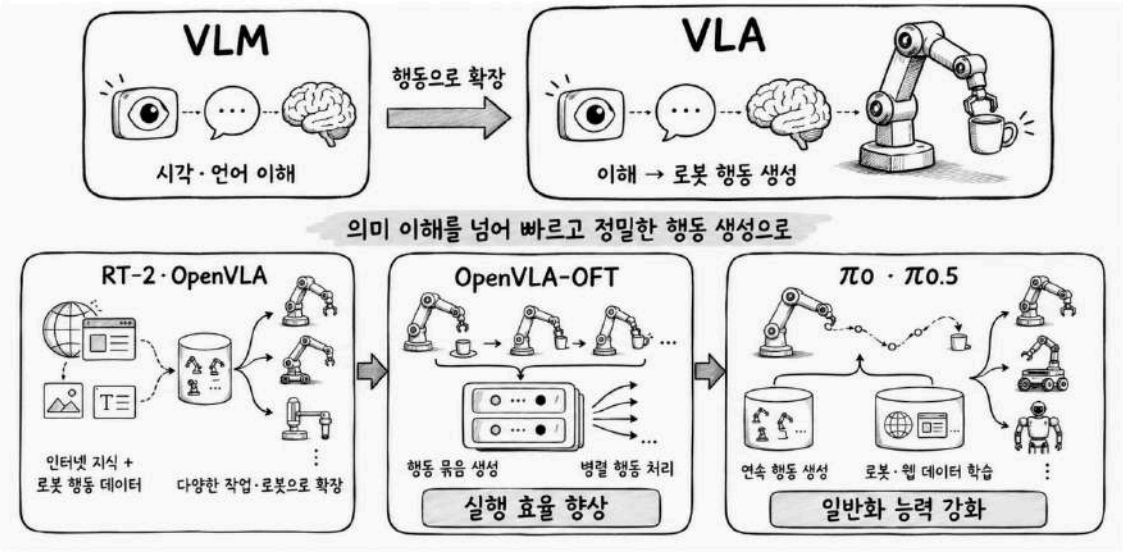
[그림 4] 월드 모델의 두 가지 구현 방식

4. 행동 정책 · 제어(Policy · Action · Control)

VLA는 VLM의 시각 · 언어 입력을 로봇 행동으로 연결된다. RT-2는 웹 규모의 시각 · 언어 지식과 로봇 행동 데이터를 함께 학습하는 방향을 제시했으며[7], OpenVLA는 공개형 7B 모델을 통해 다양한 작업과 로봇으로 확장할 가능성을 보여주었다[8].

최근 VLA 연구는 환경과 지시의 의미를 이해하는 능력뿐 아니라, 빠르고 정밀하게 행동을 생성하는 데 초점을 두고 있다. OpenVLA-OFT는 여러 행동을 묶어 한 번에 생성하는 행동 묶음 생성(action chunking)과 병렬 행동 처리(parallel decoding)를 통해 실행 효율을 높였고[9], $\pi 0 \cdot \pi 0.5$는 연속적인 로봇 행동 생성과 다양한 로봇·웹 데이터 학습을 통해 일반화 능력을 강화하였다[10][11][그림 5].

GR00T 1.7은 실제 시연 데이터와 시뮬레이션 데이터를 함께 활용하여 서로 다른 로봇으로의 확장과 복잡한 작업의 단계적 수행 능력을 강화한 공개 VLA이다[12]. Gemini Robotics 1.5와 Gemini Robotics-ER 1.6은 상위 모델이 환경 이해와 작업 계획을 담당하고, VLA가 실제 행동을 생성하는 계층형 접근의 사례이다[3]. 실제 로봇에서는 VLA가 생성한 행동을 그대로 모터에 전달하기보다, 모션 제어 · 충돌 회피 · 힘과 토크 제한 등 기존 제어 및 안전 계층을 거쳐 실행한다.



〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 5] VLA의 개념과 대표적인 구현 방식

5. 학습 · 배포 인프라(Learning & Deployment Infrastructure)

피지컬 AI는 로봇 행동 데이터 수집 비용이 많이 든다. 이를 보완하기 위해 원격조작, 사람 시점 영상, 다양한 로봇 · 시뮬레이션 · 합성 데이터를 함께 학습하며, GR00T 1.7과 π0.5가 사례이다[11][12].

시뮬레이션-현실 전이는 가상 환경에서 학습한 정책을 실제 로봇에 적용하는 기술이다. 환경 변수를 무작위로 바꾸고 실제 장비에 맞춰 시뮬레이션을 보정하며, 실제 · 합성 데이터를 함께 미세조정한다. 향후 물리 시뮬레이션과 생성형 월드 모델을 결합해 예외 상황 학습을 확대할 수 있다.

배포 때는 모델 규모와 응답 속도에 따라 클라우드 · 엣지 · 로봇 내 실행을 나누고, 복잡한 추론은 상위 계층에서, 행동 · 제어는 하위 계층에서 처리한다. 제미나이 로보틱스 온디바이스와 GR00T 1.7의 로봇 내 실행 · 배포가 이를 보여준다[3][12].

양자화, 지식 증류, 모델 압축, 추론 가속, 행동 묶음 · 병렬 생성을 활용하면 연산량과 지연시간을 줄일 수 있다[9][11][12]. 학습 · 배포 인프라는 데이터 생성부터 실시간 실행까지 전 과정을 아우른다.

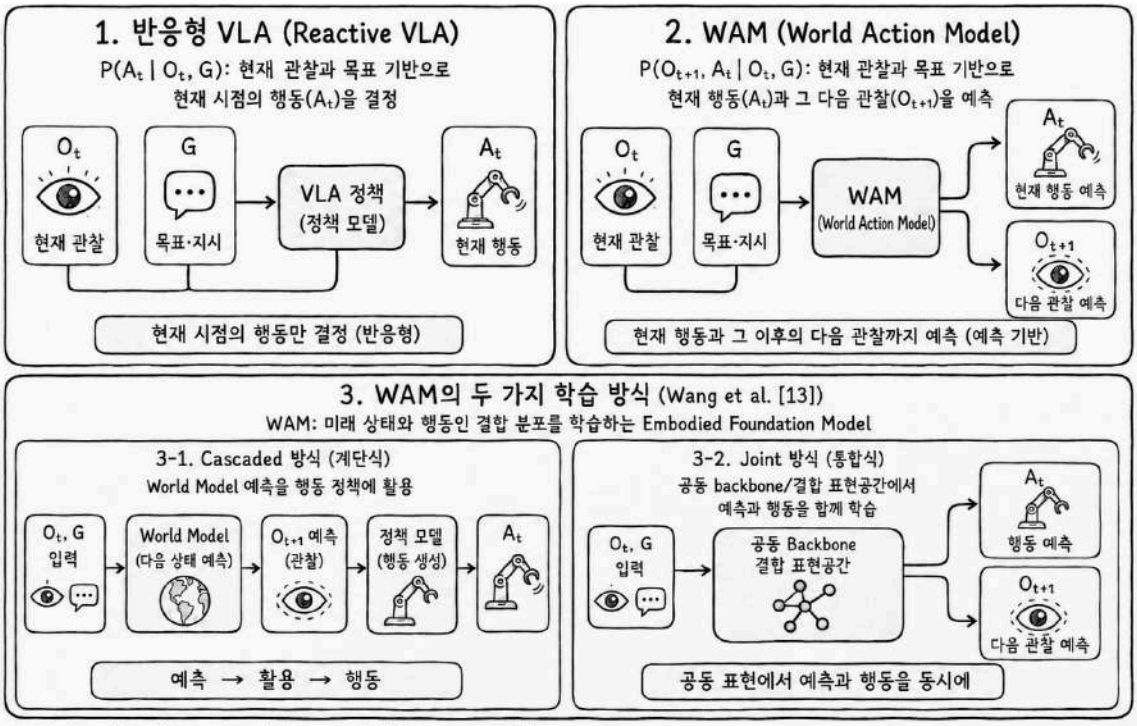
6. 기술 융합: 월드 모델과 VLA에서 월드 액션 모델로

VLA는 관찰과 목표에 따라 행동을 직접 생성하지만, 행동 결과로 나타날 미래 상태를 명시적으로 예측하지 않을 수 있다. 월드 모델은 미래 예측에 강하지만 연속 행동 생성은 별도의 과제이다. 두 접근을 결합한 월드 액션 모델(WAM)은 아직 표준화되지 않은 신흥

[표 1] Reactive VLA와 월드 액션 모델의 개념적 비교

구분	Reactive VLA	WAM(World Action Model)
기본 질문	현재 상황에서 무엇을 할 것인가?	이 행동으로 세계가 어떻게 변하며 어떤 행동이 적절한가?
대표 모델링	$P(A_t \mid O_t, G)$	$P(O_{t+1}, A_t \mid O_t, G)$ 또는 이에 준하는 결합 모델
미래 상태	명시적으로 모델링하지 않을 수 있음	미래 world state/video를 행동 정책과 함께 활용
장점	구조 단순, 빠른 행동 생성, 의미적 일반화	물리 동역학 정보 활용, 예측 기반 계획, 새로운 환경 일반화 가능성
주요 한계	물리 변화 · 예외 상황에 대한 일반화	계산량, 영상-행동 정합성, 물리 오류 검증
성숙도	활발한 실 환경 연구 · 일부 현장 배포	신흥 연구 단계

〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성



〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 6] WAM의 개념과 두 가지 학습 방식

연구 방향이다. [표 1]은 대표적인 시각 · 언어 · 행동 모델과 월드 액션 모델 연구를 바탕으로 반응형 VLA와 WAM의 개념적 차이를 비교한 것이다[7]-[14].

반응형 VLA는 $P(A_t|O_t,G)$, 즉 현재 관찰 O_t와 목표 · 지시 G를 바탕으로 현재 행동(A_t)을 결정한다. 반면, WAM은 $P(O_{t+1},A_t|O_t,G)$와 같이 현재 행동뿐 아니라 그 행동 이후의 다음 상태 O_{t+1}까지 예측한다. Wang 등은 WAM을 미래 상태와 행동의 결합 분포를 학습하는 체화형 기반 모델로 설명하고, 단계형과 공동형으로 구분한다[13]. 단계형은 월드 모델의 예측을 행동 정책에 활용하고, 공동형은 공통 기반 망이나 표현 공간에서 상태 예측과 행동을 함께 학습한다[그림 6].

DreamZero는 로봇 행동과 그 이후의 장면을 함께 예측하며, 실제 로봇 실험에서 새로운 환경과 로봇으로 확장될 가능성을 보였다[14]. 다만, 실패가 미래 영상 예측 오류와 밀접하게 연결되어 WAM의 성능이 월드 모델의 물리적 정확성에 좌우될 수 있다.

III. 피지컬 AI의 기술 수준과 산업 적용

1. 자율주행: 제한된 운행 범위에서의 상용화

자율주행은 피지컬 AI의 성숙한 응용 분야이다. 스탠퍼드 인공지능 지수는 웨이모(Waymo)가 2025년 미국 5개 도시에서 주당 약 45만 회 운행했다고 집계했다[15]. 웨이모는 2026년 2월 댈러스 · 휴스턴 · 샌안토니오 · 올랜도에서 일부 이용자를 대상으로 공개 운행을 시작했다[16].

이는 범용 물리 지능의 완성을 뜻하지 않는다. 자율주행은 도로 · 교통 규칙과 운행 지역이 명확하고, 원격 운영과 다수 차량의 운행 데이터 축적이 가능하다. 관리 가능한 운행 범위를 정하고 데이터를 쌓아 적용 지역을 넓히는 방식이 핵심이다.

2. 제조: BMW 생산라인의 휴머노이드 적용

BMW 그룹은 피규어 02가 약 10개월간 BMW X3 3만 대 이상의 생산을 지원했다고 밝혔다. 피규어 AI는 준비와 운영을 포함한 전체 배치 기간을 11개월로 설명했다. 이 시범사업은 차체 공장에서 반복 정밀 작업의 가능성을 확인했으며, 후속 모델 피규어 03은 부품 분류 · 이동 등 물류 작업으로 적용 범위를 넓히고 있다[17].

이 사례의 의미는 휴머노이드가 모든 작업을 대체했다는 데 있지 않다. 기존 공장에 범용적인 신체 구조를 활용해 가치가 높은 일부 작업을 유연하게 자동화할 가능성을 보여준다.

3. 물류: GXO와 애질리티 로보틱스의 상업 배치

GXO는 2024년 애질리티 로보틱스(Agility Robotics)와 계약해 디짓(Digit)을 창고에 배치하고, 토트 상자를 컨베이어에 올리는 작업을 맡겼다[18]. 애질리티 로보틱스는 2025년 상업 운용에서 토트 상자 10만 개 이상을 옮겼다고 발표했다[19]. 이 사례들은 작업 범위가 명확하고 안전 정지와 기존 시스템 연동이 가능한 업무부터 피지컬 AI가 확산됨을 보여준다.

따라서 초기 경제성은 사람을 전면 대체하기보다, 전용 자동화가 어렵거나 작업 변경이 잦은 공정에서 먼저 나타날 가능성이 크다.

4. 로봇 기반 모델과 통합 플랫폼

여러 로봇과 작업에 재사용할 수 있는 로봇 기반 모델 경쟁도 진행 중이다. 구글 딥마인드는 제미나이 로보틱스 2, 제미나이 로보틱스 ER 2, 제미나이 로보틱스 온디바이스 2를 통해 행동 생성, 물리 추론, 로봇 내 실행 기능을 나누어 제공한다[3]. 엔비디아는 GR00T 1.7의 학습 · 배포 체계와 코스모스 3를 통해 범용 로봇 지능과 월드 모델 기반 피지컬 AI 플랫폼을 확장하고 있다[12][20].

이는 작업마다 별도 정책을 만드는 방식에서 대규모 사전 학습 모델을 다양한 로봇과 작업에 맞게 추가 학습하는 방향으로의 변화이다. 다만, 실제 실행에서는 모델의 출력이 작업 관리, 동작 제어, 충돌 회피, 기능 안전 단계를 거친다. 따라서 모델의 적응 능력과 전체 시스템의 안전성은 구분해 평가해야 한다.

5. 한국 사례: 네이버 1784의 다중 로봇 운영

네이버 제2사옥 1784에서는 100여 대의 로봇을 클라우드로 제어해 운영한다. 자율주행 서비스 로봇 루키는 건물 내 여러 층을 오가며 택배 · 음료 · 식사를 배달하고, 로봇 전용 엘리베이터를 이용한다. 이는 실제 사무공간에서 로봇과 건물 인프라, 다중 로봇 관제, 배달 서비스를 통합 운영하는 국내 사례이다[21].

[표 2] 피지컬 AI 관련 주요 사례

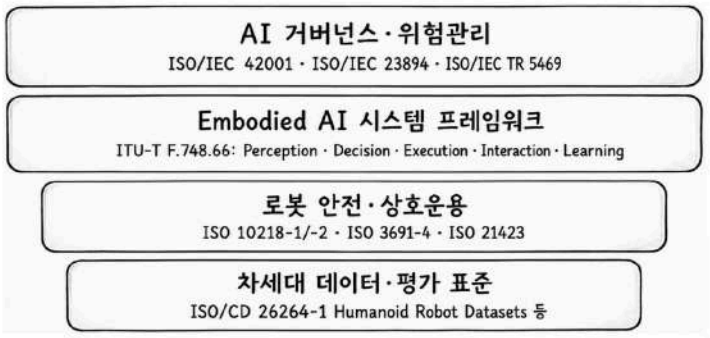
분야 · 사례	운용 환경과 주요 작업	배치 수준 · 확인된 실적	비교 분석
자율주행 · Waymo	미국 도시 도로에서 승객 운송. 서비스 지역과 운행 조건을 설정 운용	2025년 주당 약 45만 회 운행. 2026년 2월 기준 10개 광역권에서 상용 서비스 운영, 신규 4개 도시에서는 초대 이용자 대상 운행 시작[15][16]	가장 큰 운행 규모를 보이지만, 운행 지역과 조건을 정하고 단계적으로 확대하는 방식
제조 · BMW와 Figure	차체 공장에서 판금 부품을 용접 위치에 옮기는 반복 정밀 작업	Figure 02가 약 10개월간 BMW X3 3만 대 이상의 생산을 지원. Figure 03으로 물류 순서화 작업 적용을 추진[17]	기존 생산라인의 특정 작업을 대상으로 실증. 범용 대체보다 반복적 · 고부가가치 작업의 자동화 가능성을 보여줌
물류 · GXO와 Agility Digit	창고에서 토트 상자를 컨베이어에 올리는 반복 운반 작업	2024년 상업 계약에 따라 현장 배치. 디지털이 토트 상자 10만 개 이상을 이동[18][19]	작업과 성과를 처리량으로 측정할 수 있고, 기존 물류 흐름에 통합되는 작업부터 적용
스마트빌딩 · 네이버 1784	사무공간에서 택배 · 음료 · 식사를 배송하고, 층간 이동에 로봇 전용 엘리베이터 활용	약 100대의 로봇을 클라우드로 관제하며 여러 서비스를 운영[21]	국내 사례로, 로봇뿐 아니라 클라우드 관제와 건물 인프라를 함께 통합한 운영을 보여줌

〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[표 2]는 주요 사례에 대한 비교 분석표이다. 사례를 비교하면 자율주행은 정해진 운행 범위 안에서 서비스 규모를 확장하고 있으며, 제조와 물류는 반복 작업을 중심으로 현장 실증과 상업 배치를 진행하고 있다. 네이버 1784는 건물 내부의 관리된 환경에서 다중 로봇과 클라우드 관제, 건물 인프라를 통합해 서비스를 운영한다. 이는 피지컬 AI의 산업 성숙도를 로봇의 종류만으로 판단하기보다 운용 범위, 작업 특성, 인프라 통합, 현장 실적을 함께 고려해야 한다.

Ⅳ. 피지컬 AI 관련 표준화와 안전 · 상호운용 동향

피지컬 AI 확산에는 모델 성능뿐 아니라 안전, 책임, 상호운용, 데이터 품질의 공통 규칙이 중요하다. 현재 피지컬 AI 자체를 하나의 통합 분류체계로 정의한 국제표준은 없으며, 임베디드(Embodied) AI 프레임워크, 일반 AI 거버넌스, 로봇 · AMR(Autonomous Mobile Robot) 안전, 상호운용, 학습 데이터 표준이 병행되고 있다[그림 7].



* 피지컬 AI 표준화는 단일 규격이 아니라 다층 구조로 형성되고 있다.
〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

[그림 7] 피지컬 AI 관련 표준화의 다층 구조

1. 피지컬 AI와 밀접한 임베디드 AI 표준: ITU-T F.748.66

ITU-T F.748.66은 체화형 AI(EAI) 신체를 통해 현실 세계와 자율적으로 상호작용 · 적응하는 AI로 설명하고, 지각 · 판단 · 실행 · 학습 요구와 계층 구조를 제시한다[2]. 특정 모델이나 로봇 연결 규격이 아니라 물리 환경과 상호작용하는 AI의 상위 참조 틀이다. 본 고에서는

EAI와 피지컬 AI를 세분해 구분하지 않고 관련 표준으로 다룬다.

2. 수평적 AI 거버넌스와 기능 안전

ISO/IEC 42001:2023은 AI 관리체계, ISO/IEC 23894:2023은 위험관리 지침을 제공한다[22][23]. 피지컬 AI에서는 모델 오류가 충돌 · 설비 손상 · 인명 위험으로 이어질 수 있어 AI 위험관리와 기계 안전을 함께 적용해야 한다.

ISO/IEC TR 5469:2024는 안전이 중요한 시스템에서 AI와 기능 안전의 결합을 다룬다[24]. 안전 PLC, 충돌 검사, 힘 · 토크 · 작업 구역 제한, 비상정지에 최종 제어권을 두고, AI에는 불확실성 추정 · 이상 감시 · 안전 상태 복귀 기능을 결합하는 방식이 현실적이다.

3. 로봇 안전, AMR 상호운용, 휴머노이드 데이터 표준

ISO 10218-1/-2:2025는 산업용 로봇, ISO 3691-4:2023은 무인 산업차량 · 자율이동로봇의 안전을 다룬다[25][26]. 피지컬 AI에서는 행동 정책과 안전 제어기의 권한 분리가 중요하다.

ISO 21423은 여러 업체의 이동로봇과 차량군 관리시스템 간 통신 · 상호운용을, ISO/CD 26264-1은 휴머노이드 데이터셋의 품질 · 보안을 다룬다[27][28]. 데이터 형식 · 좌표계 · 행동 의미 · 출처 이력의 표준화가 과제이다[표 3].

[표 3] 피지컬 AI 관련 주요 국제표준 및 표준화 과제

구분	표준문서	주요 내용	2026년 상태
Embodied AI	ITU-T F.748.66	EAI 정의 · 프레임워크 · 주요 기능 요구사항	In force
AI 관리	ISO/IEC 42001:2023	AI Management System 구축·운영 요구사항	Published
AI 위험	ISO/IEC 23894:2023	AI 위험관리 지침	Published
기능 안전+AI	ISO/IEC TR 5469:2024	AI와 기능 안전의 결합 유형 · 위험요인	Published
산업/AMR 안전	ISO 10218-1/-2:2025; ISO 3691-4:2023	산업로봇 및 무인 산업차량 안전	Published(개정안 ISO/DIS 3691-4 개발 중)
AMR 상호운용	ISO 21423:2026	다중 벤더 AMR · fleet 통신과 상호운용	Published
휴머노이드 데이터	ISO/CD 26264-1	학습 · 검증 · 시험 데이터셋의 품질 · 보안 요구사항	Committee Draft

〈자료〉 한국전자통신연구원 자체 작성

4. 표준화 관점에서 남은 공백과 향후 과제

현재 표준은 관리체계와 기존 로봇의 안전 · 상호운용에 집중되어 대규모 사전학습 모델을 쓰는 피지컬 AI의 과제는 충분히 다루지 못한다. 주요 공백은 로봇 간 센서·행동 정보 표현, 월드 모델 · VLA · WAM의 예측 · 실행 평가, 계획 모델과 안전 제어기의 권한 구분, 데이터 출처 · 이력 관리이다.

향후 공통 정보 형식과 로봇 구조 · 좌표계, 실제 실행 성능평가, 데이터 이력 추적, AI 모델과 기능 안전 제어기의 실행 중 안전 보장을 표준화해야 한다. 국내에서도 관련 기술과 평가 기준을 국제표준에 맞추고, 공통 용어 · 참조모델 정립과 국제 표준화 논의에 조기 참여할 필요가 있다.

V. 기술적 과제와 발전 방향

첫째, 예측 기반 정책의 신뢰성은 월드 모델이 실제 물리 변화를 얼마나 정확히 반영하는지에 달려 있다. 미래 영상이 자연스러워도 마찰 · 접촉 · 가려진 객체의 지속성을 어길 수 있으므로, 시뮬레이터와 실제 센서 기록을 이용해 물리적 정확성을 검증해야 한다[6][13][14].

둘째, 다른 로봇으로 학습 지식을 옮기려면 관절 · 좌표계 · 센서 · 행동 정보를 공통 형식으로 표현해야 한다. 교차 신체 학습은 적용 범위를 넓힐 가능성이 있지만, 기종 간 행동 표현과 전이 성능의 비교 기준은 아직 부족하다[11][12].

셋째, 시뮬레이션 · 월드 모델 · 실제 운용을 잇는 데이터 순환이 필요하다. 시뮬레이터는 기본 물리 상황을, 월드 모델은 드물고 다양한 장면을 보완하며, 실제 결과는 두 모델을 보정하는 데 활용한다. 합성 데이터는 생성 이력과 물리적 타당성을 추적해야 한다.

넷째, 실시간 배포에서는 상위 추론과 하위 행동 · 안전 제어의 책임을 나눠야 한다. 클라우드 · 엣지 · 기기 내 실행은 지연 · 통신 단절 · 개인정보 보호를 함께 고려하고, 이상이 발생하면 안전 상태로 복귀하도록 설계해야 한다[3][12][24].

이러한 기술 과제는 산업 적용과 표준화에 맞물린다. 작업 범위와 실패 비용을 관리할 수 있는 제조 · 물류 · 자율주행 현장부터 예측 기능을 과업별로 실증하고, 데이터 · 성능 · 안전 · 상호운용 기준을 마련해 적용 범위를 넓히는 접근이 현실적이다[15]-[19][21][22]-[28].

이는 반응형 행동 생성에서 예측과 계획을 결합한 물리 지능으로 나아가는 기반이다.

VI. 맺음말

피지컬 AI는 현재 관찰에 반응해 행동하는 방식에서 행동 결과를 예측해 계획에 반영하는 방향으로 발전하고 있다. 월드 모델과 VLA의 결합, 월드 액션 모델(WAM)은 이 흐름을 보여주는 유망한 연구지만 아직 초기 단계이다[13][14]. 현장 확산에는 영상의 사실성뿐 아니라 예측의 물리적 정확성, 폐루프 성능, 실패 복구, 안전 제어의 검증이 필요하다.

산업 사례는 자율주행 · 제조 · 물류와 네이버 1784의 서비스 로봇처럼 운행 · 작업 범위를 정할 수 있는 곳에서 적용이 먼저 이루어짐을 보여준다[15]-[19][21]. 표준은 관리체계와 로봇 안전 · 상호운용의 기반을 제공하지만, 로봇 간 행동 표현, 예측 평가, AI 모델과 안전 제어기 간 권한 분리는 남은 과제이다[22]-[28]. 따라서 피지컬 AI는 한정된 고가치 작업의 실증과 공통 평가 · 안전 기준을 축적하며 적용 범위를 넓히고, 반응형 정책에서 예측과 계획을 결합한 물리 지능 단계적으로 발전할 전망이다.

참고문헌

[1] Isaac Asimov, "I, Robot," Gnome Press, 1950.

[2] ITU-T, "Requirements and framework for embodied artificial intelligence systems," ITU-T, Recommendation F.748.66, 2025.

[3] Google DeepMind, "Gemini Robotics," Google DeepMind, Model cards, 2025-2026.

[4] David Ha and Jurgen Schmidhuber, "World Models," arXiv:1803.10122, 2018.

[5] Yann LeCun, "A Path Towards Autonomous Machine Intelligence," OpenReview, 2022.

[6] Jack Parker-Holder and Shlomi Fruchter, "Genie 3: A new frontier for world models," Google DeepMind, Google DeepMind Blog, 2025. 8. 5.

[7] B. Zitkovich et al., "RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control," Proceedings of Machine Learning Research, Proceedings of the 7th Conference on Robot Learning, Vol.229, 2023, pp.2165-2183.

[8] M. J. Kim et al., "OpenVLA: An Open-Source Vision-Language-Action Model," Proceedings of Machine Learning Research, Proceedings of the 8th Conference on Robot Learning, Vol.270, 2025, pp.2679-2713.

[9] M. J. Kim, C. Finn, and P. Liang, "Fine-Tuning Vision-Language-Action Models: Optimizing Speed

and Success," Robotics: Science and Systems Foundation, Proceedings of Robotics: Science and Systems XXI, paper 17, 2025.
[10] K. Black et al., "π_0: A Vision-Language-Action Flow Model for General Robot Control," Robotics: Science and Systems Foundation, Proceedings of Robotics: Science and Systems XXI, paper 10, 2025.
[11] K. Black et al., "π0.5: A Vision-Language-Action Model with Open-World Generalization," Proceedings of Machine Learning Research, Proceedings of the 9th Conference on Robot Learning, Vol.305, 2025, pp.17-40.
[12] Edith Llontop and Brandon Neel, "Develop Humanoid Robot Policies End-to-End with NVIDIA Isaac GR00T," NVIDIA, NVIDIA Technical Blog, 2026. 7. 7.
[13] S. Wang et al., "World Action Models: The Next Frontier in Embodied AI," arXiv:2605.12090, 2026.
[14] S. Ye et al., "World Action Models are Zero-shot Policies," arXiv:2602.15922, 2026. 2. 17(DreamZero).
[15] Stanford Institute for Human-Centered AI, "Technical Performance," Stanford University, The 2026 AI Index Report, 2026.
[16] The Waymo Team, "Ready to Ride: Dallas, Houston, San Antonio, and Orlando," Waymo, Waymo Blog, 2026. 2. 24.
[17] Benedikt Torka, "BMW Group advances the use of Physical AI in production with Figure 03 project in Spartanburg," BMW Group, BMW Group PressClub, 2026. 6. 25.
[18] GXO Logistics, "Industry-first multi-year agreement with Agility Robotics," GXO Logistics, GXO News, 2024. 6. 27.
[19] Agility Robotics, "Digit Moves Over 100,000 Totes in Commercial Deployment," Agility Robotics, Agility Robotics News, 2025.
[20] Aditi et al., "Cosmos 3: Omnimodal World Models for Physical AI," arXiv:2606.02800, 2026. 6. 1.
[21] 네이버, 「로보틱스」, 네이버 주식회사, 네이버 로보틱스 웹페이지, 발행연도 미상, 접속일 2026.10.28.
[22] ISO/IEC, "Information technology—Artificial intelligence—Management system," ISO/IEC 42001:2023, 2023.
[23] ISO/IEC, "Information technology—Artificial intelligence—Guidance on risk management," ISO/IEC 23894:2023, 2023.
[24] ISO/IEC, "Artificial intelligence—Functional safety and AI systems," ISO/IEC, ISO/IEC TR 5469:2024, 2024.
[25] ISO, "Robotics—Safety requirements—Part 1: Industrial robots; Part 2: Industrial robot applications and robot cells," ISO, ISO 10218-1:2025 and ISO 10218-2:2025, 2025.
[26] ISO, "Industrial trucks—Safety requirements and verification—Part 4: Driverless industrial trucks and their systems," ISO 3691-4:2023, 2023.
[27] ISO, "Robotics—Industrial mobile robots—Communications and interoperability," ISO 21423:2026, 2026.
[28] ISO, "Humanoid robot datasets—Part 1: General requirements," ISO/CD 26264-1, 2026.

➢ 사업책임자: 이현재(디지털미래정책단 동향분석팀장)

➢ 참여연구원: 도승희, 허창회, 유영신, 김도현, 김지훈, 김형석, 장미래, 박진아

IITP 주간기술동향

통권 2225호(2026-23)

발 행 년 월 일 : 2026년 11월 18일
발 행 소 : 정보통신기획평가원
편집인겸 발행인 : 홍진배
등 록 번 호 : 대전 다-01003
등 록 년 월 일 : 1985년 11월 4일
인 쇄 인 : 위고디자인

IITP 정보통신기획평가원

(34054) 대전광역시 유성구 유성대로 1548(화암동 58-4번지)
전화 : (042) 612-8246, 8296 팩스 : (042) 612-8209

청렴韓세상

깨끗한 IITP, 신뢰받는 IITP

IITP 정보통신기획평가원

http://www.iitp.kr