

피지컬 AI의 현황과 시사점

Current Status and Implications of Physical AI



- 이해수 소프트웨어정책연구소 AI정책연구실 선임연구원 | hs.lee@spri.kr
- 유재흥 소프트웨어정책연구소 AI정책연구실 책임연구원 | jayoo@spri.kr
- 안성원 소프트웨어정책연구소 AI정책연구실 실장 | swahn@spri.kr

Executive Summary

본 연구에서는 최근 부상하고 있는 피지컬 AI의 기술적·산업적 확산에 주목하여, 피지컬 AI의 정의와 특성, 유형 그리고 주요 사례 및 관련 이슈를 살펴보고 정책적 시사점을 제언하고자 하였다. 분석 결과, 피지컬 AI는 AI 기반 모델(두뇌), 컴퓨터 비전·센서(감각), 엣지 컴퓨팅 및 네트워크 인프라(연결), 제어 및 액추에이터(행동) 등의 첨단 기술 융합을 통해 인간처럼 현실 세계를 인식하고, 자율적으로 판단·행동함으로써 환경과 유기적으로 상호작용할 수 있는 시스템으로 정의된다. 주요 기술 수준과 형태에 따라 △ 휴머노이드형 △ 자율주행차형 △ 드론형 △ AGV & AMR형으로 분류되어 다양한 산업 환경에 특화된 형태로 활용되며, 산업 전반의 자동화·지능화 수요를 중심으로 새로운 융합 생태계를 형성하는 기반으로 작용하고 있었다. 다만, 피지컬 AI는 확산 과정에서 막대한 연산 자원과 개발 비용, 물리 환경 적용의 기술적 제약, 노동시장 구조 변화, 법적 책임과 윤리 기준의 미비 등 복합적인 장애 요인을 동반하고 있는 상황이다. 이를 해결하기 위해 미국, 중국, EU, 일본 등 주요국은 피지컬 AI를 국가 전략기술로 간주하고 다양한 정책을 선제적으로 마련해 경쟁력 확보에 나서고 있으며, 이에 발맞춰 우리나라도 피지컬 AI 경쟁력 강화를 위한 연구개발, 산업 생태계 및 인력양성, 법제 정비 및 국제 협력 차원에서 국가 전략을 수립해야 할 시점이다.

This study focuses on the recent emergence and expansion of Physical AI in both technological and industrial contexts. It examines the definition, characteristics, typologies, representative use cases, and associated challenges of Physical AI, ultimately deriving relevant policy implications. The analysis defines Physical AI as an integrated system that combines advanced technologies such as AI foundation models (cognitive control), computer vision and sensors (perception), edge computing and network infrastructure (connectivity), and control systems with actuators (mobility), enabling machines to perceive, reason, and act autonomously in the physical world. Based on key technological configurations and implementation forms, Physical AI can be categorized into humanoid-type, autonomous vehicle-type, drone-type, and AGV & AMR-type systems, each tailored to specific industrial environments and contributing to the formation of a new convergence ecosystem centered on the growing demand for automation and intelligence across industries. However, the diffusion of Physical AI entails a range of complex barriers, including high computational requirements, significant development costs, technical limitations in real-world deployment, structural impacts on the labor market, and a lack of legal accountability frameworks and ethical standards. In response, major countries such as the United States, China, the EU, and Japan are recognizing Physical AI as a strategic national technology and are actively formulating policies to secure technological leadership. In this context, Korea must also develop a national strategy encompassing R&D, industrial ecosystem development, talent cultivation, regulatory reform, and international cooperation to strengthen its competitiveness in the emerging Physical AI landscape.

I 피지컬 AI의 부상

● 피지컬 AI(Physical AI) 시대의 도래

- 인공지능이 디지털 영역을 넘어 현실 세계로 확장되는 기술 패러다임의 전환 속에서, 피지컬 AI(Physical AI)는 차세대 AI 기술 트렌드로 부상하며 산업적·기술적 주목도가 급격히 높아지는 추세
 - 피지컬 AI는 AI가 인식과 생성에서 행동과 실행으로 확장되는 전환의 흐름을 이끌며, 생성형 AI 이후 미래 AI 기술의 핵심 전환점으로 주목
 - 글로벌 IT 시장 조사 기관 Statista에 따르면, AI 로봇틱스(AI Robotics)* 시장 규모는 2020년 약 50억 달러에서 2025년 225억 달러로 350% 성장했으며, 향후 5년간 연평균 성장률(CAGR) 23.3%를 기록해 2030년에는 약 643억 달러(한화 약 85조 원)에 이를 전망(Statista, 2025)
 - * Statista에서 정의한 'AI Robotics'는 AI가 통합된 로봇 시스템을 의미하며, 이는 AI가 물리적 환경에서 자율적으로 작동하는 시스템을 지칭하는 '피지컬 AI'의 개념에 부합
- 피지컬 AI의 시장 잠재력에 대한 기대가 커지며, 국가적 대응과 민간 투자가 빠르게 확대되는 추세
 - 미국은 자국우선주의 기조 아래 피지컬 AI 관련 기술 자립 강화를 위한 리쇼어링(Reshoring), 관세정책 등을 적극 추진하고, 중국은 베이징시를 중심으로 100억 위안(약 2조 원) 규모의 피지컬 AI 산업 발전 기금을 조성('24*)했으며(베이징시경제정보화국, 2023), 일본은 '문샷(Moonshot) 연구 개발 프로그램'('20~'25)*을 통해 4억 4000만 달러(약 6404억 원)를 투자해 인간과 함께 행동하는 AI 모델 기반 로봇 개발을 추진(閣府, 2024)
 - * 실제 펀드 등록 기준년도
 - ** 과학기술을 통해 사회적 과제를 해결하기 위한 국가 지원 프로그램
 - 한국도 생성형·피지컬 AI 등 과학기술 트렌드를 반영해 12대 국가전략기술 체계와 임무중심 전략로드맵을 민관합동으로 개편·재정비(과학기술정보통신부, 2025. 3. 12.)
 - 제4차 지능형 로봇 기본계획('24)과 K-휴머노이드 연합('25)을 통해 2030년까지 민관합동으로 총 3조 원 이상을 투자, AI 기반 로봇과 핵심 기술 확보, 부품 국산화, 인력 양성 등 로봇 산업 전반의 경쟁력 강화를 추진(산업통상자원부, 2024, 2025)
 - 글로벌 빅테크 기업은 피지컬 AI에 대한 투자를 적극 확대하고 있으며, 마이크로소프트(Microsoft), 엔비디아(NVIDIA), 오픈AI(OpenAI), 아마존(Amazon) 등은 미국의 AI 로봇공학 기업 피규어 AI(Figure AI)에 약 6억 7,500만 달러를 투자했고(Reuters, 2024. 3.), 구글(Google)은 휴머노이드 로봇 개발사 앱트로닉(Apptronik)에 약 3억 5천만 달러를 투자하며 피지컬 AI 관련 기술 연구를 강화(TechCrunch, 2025. 2.)

● 피지컬 AI는 단순한 기술적 유행이 아니라, AI 기술이 물리적 환경과 결합하며 진화해 온 복합적 기술 진화의 결과물

- 피지컬 AI의 개념은 단기간 내에 등장한 것이 아니라, 로봇공학, AI, 센서 등의 기술이 융합되면서 점차 산업적·학술적 개념으로 정립되는 추세
 - (로봇공학 기술의 기초 확립) 노버트 위너(Norbert Wiener)가 1948년 제시한 사이버네틱스(Cybernetics)*는 로봇공학의 기초 철학을 제시했으며(Norbert Wiener, 1948), 이를 기반으로 1961년 디지털 제어가 가능한 최초의 실용 로봇인 유니메이트(Unimate)가 등장하면서 로봇공학 기술의 토대를 마련
 - * 인간과 기계의 제어·통신 원리를 다룬 이론으로, 로봇이 환경을 인식하고 반응하도록 만드는 자율적 피드백 제어의 철학적 기반으로 작용
 - (컴퓨터 비전 및 센서 기술의 발전) 1990년대부터 컴퓨터 비전과 센서 기술의 발전으로 로봇이 카메라, LIDAR, 초음파 센서 등을 통해 물리적 환경을 인식하고 데이터를 실시간으로 수집할 수 있게 되었으며, 이는 로봇의 반응성을 높이는 핵심 기반을 형성(Turing Post, 2024)
 - (강화학습의 발전과 물리적 시스템의 진화) 2010년대 초반 강화학습의 발전은 로봇과 알고리즘의 융합을 촉진하며 물리적 시스템의 자율성을 크게 향상시켰고, 이를 통해 자율주행차·드론 등에서 실시간 학습과 적응이 가능한 피지컬 AI의 기반이 마련(Roya Firoozi, et al., 2023)
 - (로봇공학 및 인간-기계 협업의 발전) 2010년대 후반부터 로봇 기술은 휴머노이드, 협동 로봇, 스마트 제조 등에서 발전하며 인간과의 협력을 중시하는 방향으로 진화했고, 이 시점에서 피지컬 AI는 단순 자동화를 넘어 사람과 안전하고 효율적으로 상호작용할 수 있는 지능형 로봇으로 발전(Junming Fan, et al., 2025)

● 피지컬 AI는 CES 2025를 통해 대중적인 개념으로 확산

- 엔비디아 CEO 젠슨 황은 CES 2025 기조연설을 통해 “AI의 다음 프론티어는 피지컬 AI”라고 선언(NVIDIA, 2025a)
 - AI가 텍스트와 이미지, 사운드를 만드는 생성형 AI를 거쳐 처리와 추론, 계획과 행동이 가능한 피지컬 AI의 시대로 들어서고 있다고 설명
 - 엔비디아는 다양한 실제 시나리오를 시뮬레이션하여 피지컬 AI 개발을 강화하도록 설계된 플랫폼인 ‘코스모스(Cosmos)’를 공개했는데, 일반적인 언어모델은 방대한 양의 책, 기사, 소셜 미디어 게시물을 기반으로 텍스트 생성 방식을 학습하는 반면, 코스모스는 물리적 세계의 이미지와 3D 모델을 생성하도록 설계*

* 예를 들어, 코스모스는 창고 내부의 선반에서 상자가 떨어지는 사실적인 비디오 영상을 생성할 수 있으며, 이를 사용하여 로봇이 사고를 인식하도록 학습 가능

- 피지컬 AI는 기술의 진화와 산업적 수요 확대 속에서 점차 주목받고 있으며, 향후 관련 산업의 본격적인 성장과 확산이 가속화될 것으로 전망
- ▶ 본 보고서는 최근 부상하고 있는 피지컬 AI의 기술적·산업적 확산에 주목하여, 피지컬 AI의 정의와 특성, 유형, 주요 사례 및 관련 이슈를 살펴보고 정책적 시사점을 제안하고자 함

II 피지컬 AI의 정의 및 분류

1. 피지컬 AI의 정의

- (학계) 아직 공식적 정의나 관련 연구가 미흡하지만, 지능이 물리적 실체 속에서 구현되는 통합적 시스템으로 이해되며, 이는 기존의 유사 개념을 확장하는 흐름 속에서 논의
 - 미리예프와 코바치(Miriyev & Kovač, 2020)는 디지털 AI의 물리적 대응물인 ‘피지컬 AI’를 소개하며, 피지컬 AI를 “지능형 유기체와 관련된 작업을 수행할 수 있는 물리적 시스템을 만드는 이론과 실제”를 지칭한다고 설명
 - 동 논문에서 피지컬 AI 개발은 재료공학, 기계공학, 컴퓨터과학, 화학, 생물학 등 다양한 학문 분야가 결합한 다학제 연구 분야로, 기존 하드웨어 기반 로봇에서 지능형 자율 로봇으로의 패러다임 전환을 위해 다양한 분야의 인력이 필요하다고 제시
 - 중국 하이난 대학의 잉보 리 외(Yingbo Li et al., 2021)의 연구에서 피지컬 AI는 디지털 AI의 확장 개념으로, “물리적 세계에서 자율적으로 작동하는 지능형 시스템”으로 정의
 - 저자들은 본 논문을 통해 피지컬 AI는 단순한 로봇 기술을 넘어, 센서·액추에이터·AI 알고리즘이 통합된 시스템으로서 현실 환경에서의 상호작용성과 적응성을 핵심으로 하며, 차세대 인공지능의 핵심 패러다임이 될 수 있다고 강조
 - 피지컬 AI 개념은 학계에서 기존의 체화된 AI(Embodied AI), 소프트 로보틱스(Soft Robotics), 사이버물리시스템(Cyber-Physical System, CPS), 적응형 AI(Adaptive AI) 등의 개념들과 밀접하게 연결

- 이 중, 피지컬 AI와 가장 근접한 개념은 '체화된 AI'로, 이는 AI가 물리적 또는 가상 환경 속에서 몸체(body)를 갖고 인지하고 행동하는 형태의 AI로 로봇공학과 인지과학에서 오랫동안 논의되어 온 개념(Liu, et al., 2024)
- CPS는 컴퓨터 알고리즘(사이버)과 물리적 시스템(센서, 액추에이터 등)이 통합된 시스템을 의미하며 스마트팩토리, 자율주행, 디지털 헬스케어 분야 등에서 활발히 연구되는 분야로, CPS가 시스템 통합과 실시간 제어에 중점을 둔다면, 피지컬 AI는 지능의 구현과 자율성 확보에 보다 초점(Oks, et al., 2024)
- 소프트 로보틱스는 유연한 소재로 구성된 생체모사형 로봇에 AI를 적용하는 기술로, 의료, 재난대응, 웨어러블 시스템 등에서 응용되며, 적응형 AI는 특정 환경 맥락에 따라 인식과 행동이 조정되는 지능 시스템으로, 물리적 현실과 지속적으로 상호작용하는 점에서 피지컬 AI와의 공통점을 공유(Zhao, et al., 2024)

● (연구계) 피지컬 AI에 대한 표준적인 정의보다는, 기술적 접근 방식과 다양한 응용 가능성 중심으로 논의가 진행

- EU의 AI 공동 연구·협력 단체 AI4EU*는 피지컬 AI에 관해 “물리적 환경과의 직접적인 상호작용이 수반되는 문제를 해결하기 위해 AI 기술을 활용”하는 것으로 설명(AI4EU, 2020)
 - * 2019년 1월 유럽연합 집행위원회의 H2020 프로그램 지원으로 설립된 AI4EU 컨소시엄에서 출발하여, 현재 Horizon Europe의 지원을 받아 유럽 AI 커뮤니티의 중심 허브이자 AI 지식, 기술, 서비스, 소프트웨어, 전문가를 찾는 모두에게 원스톱 서비스를 제공하는 유럽 주도 인공지능 연구·혁신 플랫폼
- 피지컬 AI는 현실 세계에서 문제를 해결하기 위해 주변 환경을 관찰하고 데이터를 수집하는 능력이 필요하며, 수집한 다양한 데이터를 분석·통합하여 로봇의 자동 판단·행동 지원 또는 인간의 일상 의사결정 지원
- 정책적으로는 피지컬 AI를 '구체적인 환경에서 작동하는 AI(Embodied AI 또는 Cyber-Physical AI)'로 정의하며, 순수 디지털 환경에서만 작동하는 AI와의 차이점을 강조
- 세계경제포럼(WEF)은 2025년 1월, 피지컬 AI를 “기계공학, AI, 센서, 연결성의 융합을 통해 현실 세계에서 자율적으로 작동하는 시스템(Physical autonomous systems)”으로 소개(WEF, 2025)
 - 디지털 영역에서 물리적 세계로 도약한 차세대 AI의 프런티어로 규정하며, 이러한 시스템들이 정형화되지 않은(unstructured) 환경에서도 복잡한 물리적 작업을 자율적으로 수행할 수 있는 능력을 갖춘 기술이라고 설명
 - 자율주행차, 자율주행 선박, 자율주행 트럭, 드론, 배달 로봇, 휴머노이드, 로보택시 등 다양한 활용 사례를 포함한다고 설명

● (산업계) 피지컬 AI를 정의하고, 그 실현을 위한 관련 기술 개발에 박차

- 엔비디아는 피지컬 AI를 “현실(물리적) 세계에서 복잡한 행동을 인식, 이해 및 수행할 수 있는 자율 시스템(로봇, 자율주행차, 스마트 공간 등)”으로 설명(NVIDIA, 2025e)
 - 피지컬 AI는 물리 세계에 대한 통찰을 생성하고 실행할 수 있다는 점에서 ‘생성 피지컬 AI(Generative Physical AI)’로도 불리며, 이는 기존 생성 AI를 확장해 3D 세계의 공간적 관계와 물리적 행동을 학습하고, 단순한 시각 재현을 넘어 현실의 물리 법칙을 반영하는 시스템
 - 과거 자율 기계가 주변 환경 인지와 상호작용에 한계가 있었던 반면, 피지컬 AI는 현실 세계와의 자연스러운 상호작용을 가능하게 함으로써, 복잡한 작업 수행 능력을 높이고 인간과의 협업을 더욱 효율적이고 직관적으로 만드는 데 기여
- 구글의 딥마인드(DeepMind)는 피지컬 AI를 직접적으로 정의하고 있지는 않지만, AI가 인간처럼 물리 환경에서 안전하고 유연하게 상호작용할 수 있도록 진화해야 한다는 관점에서, 디지털 AI를 물리 세계로 확장하려는 피지컬 AI로 전환 추구(DeepMind, 2025)
 - Gemini 2.0을 기반으로 하여, 여기에 물리적 행동(physical actions)을 새로운 출력 형태(output modality)로 추가한 고도화된 비전-언어-행동(VLA) 모델 Gemini Robotics이며 로봇을 직접 제어할 수 있도록 설계
 - 로봇이 새로운 환경, 사물, 언어 명령에 즉각 반응하고 다양한 실제 과업을 수행할 수 있도록 ‘체화된 추론(embodied reasoning)’ 능력을 부여하며, 이는 피지컬 AI가 현실 세계에서 자율성과 적응성을 갖춘 행동 실행 주체로 진화하는 방향성을 제시
- 미국의 AI 전문 인증기관 USAII(United States Artificial Intelligence Institute)*는 피지컬 AI를 “AI가 데이터 처리를 넘어 실제 세계에서 물리적 상호작용을 지능적으로 수행하는 기술”로 정의(USAII, 2025)
 - * USAII는 글로벌 AI 전문가 양성을 목표로 다양한 산업 맞춤형 인증을 제공하며, 실무 중심의 전문성 검증을 통해 미국 내 기업과 전문가들 사이에서 신뢰받는 대표적 AI 인증 기관으로 자리
- 단순한 로봇 자동화가 아니라 중력·마찰·불확실성 등 실제 물리 환경의 복잡성을 이해하고 조정할 수 있는 고도화된 AI 시스템으로 강조하며, 인간과 유사한 사고력뿐 아니라 신체적 동작까지 모방하는 ‘체화된 AI’의 진화된 형태로 설명

■ 표 2-1 - 피지컬 AI 정의 요약

구분		정의
학계	Miriyev & Kovač (2020)	• 지능형 유기체와 관련된 작업을 수행할 수 있는 물리적 시스템을 만드는 이론과 실제
	Yingbo Li(2021)	• 센서·액추에이터·AI 알고리즘이 통합된 시스템으로, 물리적 세계에서 자율적으로 작동하는 지능형 시스템
	Yang Liu(2024); SJ Oks(2024); Zikai Zhao(2024)	• 기존의 Embodied AI(체화된 AI), 소프트 로보틱스(Soft Robotics), 사이버물리시스템(Cyber-Physical System, CPS), 적응형 AI(Adaptive AI) 등의 개념들과 밀접하게 연결
연구계	AI4EU(2020)	• 물리적 환경과의 직접적인 상호작용이 수반되는 문제를 해결하기 위해 AI 기술을 활용
	WEF(2025)	• 기계공학, AI, 센서, 연결성의 융합을 통해 현실 세계에서 자율적으로 작동하는 시스템
산업계	NVIDIA(2025e)	• 현실 세계에서 복잡한 행동을 인식, 이해 및 수행할 수 있는 자율 시스템
	Google Deepmind (2025)	• AI가 인간처럼 물리 환경에서 안전하고 유연하게 상호작용할 수 있도록 진화해야 한다는 관점
	USAI(2025)	• AI가 데이터 처리를 넘어 실제 세계에서 물리적 상호작용을 지능적으로 수행하는 기술

출처: 소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

● 현재까지 피지컬 AI에 대한 통일된 정의는 부재한 상황이나, 산학연 각 분야에서는 공통적으로 ‘AI의 물리적 구현’, ‘물리적 인터페이스를 통한 실제 세계와의 상호작용’, ‘자율적 판단·행동’ 등을 핵심 요소로 강조

- 본 보고서에서는 이러한 핵심 요소를 바탕으로 피지컬 AI를 아래와 같이 정의하고 주요 기술과 유형을 분석

<피지컬 AI 정의>

AI가 물리적 실체 안에 구현되어 센서와 액추에이터 등을 통해 현실 세계를 인식하고, 자율적으로 판단·행동함으로써 환경과 유기적으로 상호작용할 수 있는 시스템

2. 피지컬 AI의 주요 기술

- 피지컬 AI는 기반 모델(Foundation Model), 컴퓨터 비전(Computer Vision), 엣지 컴퓨팅(Edge Computing), 자율 제어 기술 등 첨단 기술의 융합을 통해 물리적 세계에서 인간처럼 감지하고, 해석하며, 자율적으로 행동하는 지능형 물리 시스템으로 진화
 - 피지컬 AI는 기본적으로 AI 알고리즘(두뇌), 센서 및 컴퓨터 비전(감각), 엣지 컴퓨팅·네트워크 인프라(연결), 제어 및 액추에이터(행동)라는 네 가지 축을 기반으로 구성
 - 주요 기술들은 피지컬 AI를 구성하는 개별 핵심 요소로서 독립적으로도 중요한 역할을 수행하지만, 동시에 상호 유기적으로 결합되어 결과적으로 피지컬 AI의 통합적 구현과 실현을 가능하게 함
- (AI 알고리즘) 광범위한 데이터로부터 학습하고, 다양한 상황을 인식하여 자율적으로 판단·계획·추론하는 등 피지컬 AI의 지능적 의사결정을 담당하는 핵심 기술
 - 초기의 고정된 작업 수행 중심에서 벗어나, 피지컬 AI가 복잡하고 예측 불가능한 물리 환경속에서 자율적으로 판단하고 행동할 수 있도록 진화하는 데 핵심적인 전환점을 제공
 - 강화학습(Reinforcement Learning)은 시행착오 기반의 행동 최적화를 통해 피지컬 AI가 역동적 환경에서도 실시간 의사결정을 내릴 수 있도록 지원(Firoozi, et al., 2024)
 - VLA(Vision-Language-Action) 모델*과 연계 시, AI 알고리즘은 언어 명령을 해석하고 상황에 따라 적절한 행동 시퀀스를 생성하는 역할 수행(Guo, et al., 2025)
 - * 피지컬 AI가 시각 정보를 인식하고, 언어를 이해한 뒤, 실제 물리적 행동으로 연결되도록 설계된 자율적 지능 프레임워크
 - 최근 AI 기술은 오픈AI의 GPT, 구글의 Gemini, Anthropic의 Claude 등으로 대표되는 기반 모델(Foundation Model) 중심으로 재편되고 있으며, 이는 단일 입력을 넘는 멀티모달(Multimodal) 구조로 발전(Citi, 2024)
 - 트랜스포머(Transformer) 기반 모델은 라벨링된 데이터 없이도 방대한 비정형 데이터를 학습할 수 있어, 피지컬 AI가 시각·언어·음성·행동 정보를 통합적으로 이해하고 처리할 수 있는 기반을 제공
 - 최근 피지컬 AI 분야에서는 대규모언어모델(LLM) 연동뿐 아니라 로봇 특화 기반 모델(Robotics Foundation Model)을 자체 개발하여 적용하는 사례가 늘어나고 있으며, 대표적으로 엔비디아의 Isaac Groot, 구글 DeepMind의 Gemini-Robotics 및 Gemini-Robotics-ER, 피규어 AI의 Helix 모델 등이 해당

- 특히, 멀티모달 지원으로 텍스트, 음성, 이미지, 3D 공간 데이터 등을 함께 처리하여 피지컬 AI가 사람의 명령을 정교하게 이해하고, 상황 맥락에 맞는 행동 계획을 수립하도록 지원
- 기반 모델은 피지컬 AI의 작업 설명을 실행 가능한 코드로 변환하고 이를 물리적 동작으로 연결함으로써, 고급 로봇틱스 기술에 대한 접근의 민주화와 인간과의 직관적 상호작용, 복잡한 환경에서의 자율적 수행을 위한 기술적 토대를 마련

● (컴퓨터 비전 및 센서 기술) 피지컬 AI가 물리적 환경을 인식·이해하는 감각 기반 핵심 기술

- 컴퓨터 비전(Computer Vision)은 피지컬 AI가 현실 세계의 시각적 정보를 인지하고 해석할 수 있도록 하는 핵심 기술로, 객체 인식, 위치 추정, 장면 해석 등 시각적 인지의 기반을 제공(Liu, 2025)
 - 피지컬 AI가 주변의 사물과 사람을 식별·분류, 대상의 3차원 위치와 방향을 파악해 정밀하게 동작하며, 환경의 구조적·의미적 정보를 해석해 공간적 맥락을 형성함으로써, 장애물 회피, 경로 계획, 상황 인식 등 실시간 판단과 행동의 기반을 마련
 - 최근 컴퓨터 비전 분야에서는 단순 시각 정보 재현을 넘어서 물리 법칙(e.g. 중력, 마찰, 충돌 등)을 내재한 이미지·영상·3D 콘텐츠 생성 모델이 등장하고 있으며, 피지컬 AI가 실제 세계의 물리적 제약에 맞게 동작하도록 설계되어 타당한 상호작용을 수행하도록 하는 데 필수적인 역할 수행
 - 물체의 변형, 운동, 상호작용을 시뮬레이션하는 비전 시스템은 다양한 물리 현상을 예측할 수 있도록 하며, 이는 피지컬 AI가 환경을 사전에 이해하고 계획할 수 있게 하는 ‘세계 모델(World Model)’ 구축의 기반을 형성
- 센서 기술은 피지컬 AI가 현실 세계의 물리적 특성을 감지하고 반응할 수 있도록 하는 핵심 기술로, 환경 인식, 상태 추적, 정밀 제어 등 실시간 상호작용의 기반을 제공
 - 카메라, LIDAR*, 초음파 센서 등을 통한 물리적 환경 인식과 데이터 실시간 수집은 피지컬 AI의 반응성을 높이는 핵심 기반을 형성(Xu, et al., 2025)
 - * 레이저 빛을 이용해 물체까지의 거리를 측정하는 원거리 감지 기술
 - 시각, 거리, 자세, 힘 등 다양한 센서 데이터를 통합하는 센서 퓨전(Sensor Fusion) 기술은 피지컬 AI가 현실 세계를 더 정확하고 안정적으로 인식하고 반응할 수 있도록 하며, 정밀 제어, 실시간 판단, 예측 기반 시뮬레이션 등 고차원 지능 수행의 기반을 제공(Bohez, et al., 2017)

● (엣지 컴퓨팅 및 네트워크 인프라) 피지컬 AI의 실시간 연결과 분산처리를 가능하게 하는 핵심 기반 기술(Citi, 2024)

- 엣지 컴퓨팅(Edge Computing)*은 실시간 연결성과 네트워크 독립성을 확보하기 위한 분산처리 프레임워크로서 역할

- * 엣지 컴퓨팅은 데이터가 생성되는 지점 근처에서 연산을 수행하는 분산 처리 아키텍처로, 개별 디바이스 내부(On-Device)에서의 자율 연산부터 엣지 서버나 게이트웨이를 통한 로컬 처리까지 포함
- 데이터를 로컬에서 실시간으로 처리함으로써, 자율주행, 산업 현장, 원격 의료 등 지연 시간 감소 (Reduced Latency)가 필수적인 환경에서 피지컬 AI의 빠르고 정확한 반응을 가능하게 하는 데 기여
- 또한 데이터를 로컬 내에서 처리하기 때문에 네트워크를 통한 민감 정보 전송을 최소화하고 데이터 프라이버시 향상(Enhanced Data Privacy)에 도움*
- * 일례로 의료 로봇이 환자 데이터를 현장에서 처리할 때 엣지 컴퓨팅을 활용하여 환자 정보를 안전하고 기밀하게 보호
- 이외에도 네트워크 연결이 불안정하거나 단절될 수 있는 농촌, 재난 지역 등에서도 피지컬 AI가 클라우드 서버에 의존하지 않고 독립적으로 작동할 수 있도록 지원하여, 물리적 세계에서의 연결성 향상에 기여
- 신경처리장치(NPU, Neural Processing Unit)의 발전은 피지컬 AI 내 엣지 컴퓨팅의 실시간 연산 성능과 자율 처리 능력을 강화
 - AI 연산을 고속·저전력으로 수행할 수 있도록 설계된 전용 하드웨어로, 대형 기반 모델이나 멀티모달 AI의 실시간 실행을 가능하게 함으로써, 피지컬 AI가 클라우드에 의존하지 않고 현장에서 자율적으로 작동할 수 있도록 엣지 컴퓨팅을 실현하는 핵심 기반을 제공

● (제어 및 액추에이터) 피지컬 AI의 물리적 행동 구현과 환경 적응을 가능하게 하는 핵심 기반 기술

- 액추에이터는 AI의 판단을 실제 움직임으로 전환하여 피지컬 AI가 환경과 상호작용할 수 있도록 하는 핵심 구성 요소로, 사이버-물리 시스템(CPS, Cyber-Physical System) 관점에서 디지털 인지와 물리적 반응 간의 융합을 실현하는 연결 지점
 - * 사이버-물리 시스템(CPS)은 센서와 액추에이터를 통해 물리 세계와 디지털 시스템이 실시간으로 상호 작용하며 연동되는 통합적 시스템 아키텍처
 - 액추에이터(Actuators)는 피지컬 AI의 팔(arm), 그리퍼(gripper), 관절(joint) 등의 움직임을 생성하거나 제어하기 위해 사용되는 장치로, 동작의 힘을 생성하는 모터, 속도와 토크를 조절하는 감속기, 회전 위치와 움직임을 감지하는 엔코더, 정밀 제어와 안전 정지를 위한 브레이크, 전력과 제어 신호를 전달·조절하는 드라이버 등이 해당(한국전기연구원, 2017)
 - AI 기반 제어 시스템과의 고도 통합을 통해 피지컬 AI는 상황 인식 → 판단 → (액추에이터를 통한) 즉각적 조작 실행이라는 피드백 루프(feedback loop)를 구축하며, 재프로그래밍 없이 실시간 동작 조정과 환경 적응성을 확보(Bonsystems, 2025. 4.)
- 액추에이터의 기민성(dexterity) 향상은 피지컬 AI가 실제 환경에서 정교하고 자연스러운 상호작용을

수행하고, 안전성과 사고 예방을 동시에 확보하는 데 기여

- 모라벡의 역설(Moravec's paradox)*이 설명하듯, 지각이나 움직임처럼 사람이 자연스럽게 해내는 능력은 오히려 복잡한 사고보다 로봇이 구현하기 어려워 초기 액추에이터는 단순하고 반복적인 작업 수행에 한정

* 컴퓨터, AI, 로봇 등이 고차원적인 사고보다 오히려 인간의 기본적인 지각과 운동 능력을 구현하는 데 더 큰 어려움을 겪는 현상(Moravec, 1988)

- 최근 액추에이터는 단순 구동 장치를 넘어 생체 근육을 모방하는 소프트 액추에이터(soft-actuators)나 마이크로 액추에이터(micro-actuators)와 같이 높은 유연성과 섬세함을 갖춘 형태로 진화하고 있으며*, 물체의 재질, 크기, 민감도에 따라 가변 힘 적용(variable-force control)이 가능하도록 설계(TW, 2025)

* 실제로 테슬라의 Optimus, MIT의 로봇 손, Da Vinci 수술 로봇 등은 수십 개의 자유도(DoF)를 바탕으로 인간의 정교한 행동을 모사

- 액추에이터의 기민성 향상은 피지컬 AI가 사람의 동작과 의도를 상황에 맞춰 정밀하게 따라 하고 반응할 수 있도록 하여, 휴먼-로봇 인터랙션(Human-Robot Interaction)의 질적 수준 향상에 기여
- 이외에도 피지컬 AI의 산업 현장 및 일상 공간 활용에서의 안전 확보와 사고 예방에 핵심적으로 기여

3. 피지컬 AI의 주요 유형

● 선행연구에서는 피지컬 AI를 주요 기술 수준과 형태에 따라 다양하게 구분

- Citi Group은 피지컬 AI 관련 보고서*에서 피지컬 AI를 총 9가지 형태로 구분해 2050년까지 유형별 보급 수량을 전망(Citi, 2024)

* The Rise of AI Robots : Physical AI is Coming for You

- 대표적으로 ① 기반 모델, 컴퓨터 비전, 엣지 컴퓨팅, 자율 제어 기술이 고도로 통합되어 인간의 외형과 유사한 휴머노이드형(Humanoids), ② ADAS(Advanced Driver Assistance Systems)를 통해 자율적으로 주행하는 자율주행차형(Autonomous Vehicle), ③ 경량 AI와 실시간 공간 인식 능력을 바탕으로 비행 기능을 수행하는 드론형(Drone), ④ 자율이동 기술을 중심으로 물류·제조 현장에 특화된 AGV(Automated Guided Vehicle) & AMR(Autonomous Mobile Robot)형을 제시*

- 이외에도 산업·서비스 영역 중심의 수요 기반으로 세분화해 가정용 청소 로봇(Domestic Cleaning Robot), 돌봄 로봇(Caring Robot), 상업용 청소 로봇(Commercial Cleaning Robot), 식료품 배송 로봇(Food & Grocery Delivery Robot), 음식 서비스 로봇(Food Service Robot)을 추가*

* 이와 같은 피지컬 AI 유형은 다양한 물리적 형태로 구현될 수 있으며, 예를 들어 돌봄 로봇은 휴머노이드형, AMR형 등 여러 형태로 개발·운용

- 보고서에 따르면, 2050년까지 피지컬 AI 유형 중 자율주행차형이 18억 5,800만 대, 휴머노이드형이 6억 4,800만 대, AGV & AMR형이 1억 8,100만 대, 드론형이 1억 4,900만 대 보급될 것으로 전망

그림 2-1 - 피지컬 AI 유형별 보급 수량 전망(2024년~2050년)

	2024	2025	2030	2035	2050	CAGR
Autonomous Vehicle	27	34	126	380	1,858	17.4%
Domestic Cleaning Robot	286	326	541	793	1,188	5.3%
Humanoids	0	0	1	13	648	60.7%
AGV & AMR	2	3	9	28	181	17.7%
Drone	37	40	54	73	149	5.4%
Caring Robot	0	1	6	18	71	20.0%
Commercial Cleaning Robot	1	2	6	14	25	10.6%
Food & Grocery Delivery Robot	0	0	4	11	19	19.2%
Food Service Robot	0	0	3	10	15	17.2%
Caring Overlap	0	0	(1)	(5)	(18)	
Total	354	405	749	1,337	4,136	9.7%

출처: Citi(2024)

* Caring Overlap : 다른 유형 로봇이 돌봄 기능을 겸할 경우의 중복 집계를 조정한 항목

- Bank of America는 피지컬 AI 관련 보고서*에서 피지컬 AI를 생성형 AI가 물리 세계에서 작동하는 로봇들과 결합되어 인간처럼 감지·학습·판단하는 시스템으로 정의하고 크게 4가지 형태로 구분(Bank of America, 2024)

* Next Gen Tech: Robots

- 피지컬 AI 유형으로 ① 휴머노이드 로봇, ② 산업용 로봇 및 협업 로봇(Cobots), ③ 자율주행차, ④ 드론을 제시
- 구체적으로 ① 휴머노이드 로봇은 인간의 외형과 행동을 모방하는 서비스 로봇으로, 다양한 센서와 카메라·LiDAR 기반 내비게이션, 전기·전기유압식 액추에이터, 내장 AI 알고리즘을 통해 감지·판단·동작을 수행하며, 복잡한 비정형 환경에서도 자율적으로 임무를 수행할 수 있는 고도화된 물리 지능 시스템으로 정의
- ② 산업용 로봇은 머신비전과 AI 기술을 기반으로 제조 현장에서 유연 자동화(AGV) 및 자율이동(AMR)을 실현하며, 생산 공정 전반에 걸쳐 시각 인식, 품질 검사, 물류 최적화, 의사결정 자동화를 수행하고, 협업 로봇은 AI와 머신러닝 기반의 인식 기술을 활용해 인간과 나란히 작업하며, 공장과 창고 등에서 유연하고 안전하게 이동하며 복잡한 작업을 수행할 수 있는 소형 지능형 로봇

- ③ 자율주행차는 기존의 규칙 기반 및 지도 기반 접근과 달리 생성형 AI를 통해 주변 상황을 이해하고 즉각적으로 반응하는 체화된 지능(embodied intelligence)을 갖춘 차량을 의미하고, ④ 드론은 생성형 AI를 통합하여 방대한 데이터를 처리하고 자율 항법을 수행
- 이외에도 다양한 형태로 구현(embodied)된 피지컬 AI로 서비스형 로봇(예: 음식 조리, 커피 제조, 청소 등), 농업 로봇(Agricultural Robots) 등을 소개

● 본 보고서에서는 이상의 선행연구들에서 제안한 피지컬 AI의 주요 유형 분류를 참고하여, 피지컬 AI를 휴머노이드형, 자율주행차형, 드론형, AGV & AMR형 4가지로 구분하고 주요 개발 동향 및 사례를 탐색

- 서비스 영역이나 수요 기반에 따른 분류보다는 기술 수준과 구현 형태의 명확한 차이를 기준으로 피지컬 AI를 분류하여 사례 간 중복 없이 각 유형의 기술적 특성과 진화 방향을 일관되게 비교·분석하는 데 목적

■ 표 2-2 - 피지컬 AI 유형 구분

유형	기술 수준 및 형태
휴머노이드형	• 기반 모델, 컴퓨터 비전, 엣지 컴퓨팅, 자율 제어 기술이 고도로 통합된 형태로, 인간의 외형과 유사한 구조를 통해 걷고, 보고, 듣고, 말하며 스스로 판단하고 행동하는 최고 수준의 지능형 물리 에이전트
자율주행차형	• 도로 환경에 특화된 감지·판단 시스템과 AI 기반의 경로 해석, 고속 비전 처리, 정밀 제어 기술이 융합되어 고도로 복잡한 주행 시나리오를 자율적으로 수행할 수 있는 차량 기반 물리 시스템
드론형	• 공중 이동에 최적화된 경량 AI와 실시간 공간 인식 능력을 바탕으로, 장애물 회피, 위치 추적, 자율 비행 기능을 수행하며 지정된 임무를 고효율로 수행할 수 있는 비행형 피지컬 AI
AGV & AMR형	• AGV : 자기유도선, 마그네틱, QR코드 등 사전 정의된 경로를 따라 자재를 운반하는 정형 환경 특화형 자동화 차량으로, 최근에는 제한적 AI 기능(환경 인식, 충돌 회피, 속도 자동 조절 등)을 일부 갖추며 지능형으로 진화 • AMR : SLAM(Simultaneous Localization and Mapping), 컴퓨터 비전, LiDAR 기반 자율 경로 생성 및 장애물 회피 기능을 갖춘 피지컬 AI

출처: 소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

III 피지컬 AI 주요 개발 동향 및 사례

1. 휴머노이드형

- (현황 및 시장전망) 휴머노이드형은 인간형 로봇 구현을 목표로 하는 피지컬 AI 분야의 핵심 시장으로, AI 기술 고도화와 하드웨어 생태계 성숙에 따라 급격한 성장이 예상
- 모건 스탠리(Morgan Stanley)의 'The Humanoid 100'은 현재 휴머노이드 시장에 참여하거나 관련성이 높은 글로벌 상장 기업 목록으로, 휴머노이드 산업의 가치사슬(Value Chain)에 포함된 기업들을 분석하여 선정(Morgan Stanley, 2025)
 - ① 글로벌 분석가 팀과의 논의, ② 투자자들의 선호 기업 조사, ③ 자체 연구를 기반으로 휴머노이드 산업의 가치사슬 목록을 구성
 - 보고서에 따르면 현재 휴머노이드 산업에 직접 참여하고 있는 기업 비율은 52%이며, 나머지 48%는 가까운 미래에 진출할 가능성이 높거나 관련 기술을 보유한 기업들로 분석

■ 그림 3-1 - 글로벌 휴머노이드 100 목록

Brain							Integrators
Foundational Models	Data Science & Analytics	Simulation & Vision Software	Semis (Vision & Compute)	Semis (Memory)	Semis (Designers)	Semis (Fab)	
 Alphabet 	 	 Alphabet	 Qualcomm	 	 cadence		
Body							
Actuators & Actuator Parts	Sensors	Batteries	Semis (Analog)	Body, Wiring, Thermal	Diversified Automation		
Bearings SCHAEFFLER Screws HIWIN Gears / Reducers Nabtesco 	Complete Actuators INOVANCE ZHAOWEI Qianrui Encoders Rare-Earth / Magnets 	Radar & Lidar Melexis Force & Torque Cameras & Vision Sensors onsemi KEYENCE	Batteries LG Energy Solution 	Semis (Analog) onsemi Melexis 	Aluminum Castings Wires & Connectors Thermal	 	

출처: Morgan Stanley(2025)

- 모건스탠리는 휴머노이드 생태계를 세 가지 범주(Brain, Body, Integrators)로 구분하고 각 범주를 세부 유형으로 분류

- 두뇌(Brain) 범주의 기업은 인간형 자율성(훈련과 추론 모두 포함)을 구현하는 데 필요한 반도체 또는 소프트웨어/AI 모델을 공급하며, 세부적으로 기반 모델, 데이터사이언스 및 분석, 시뮬레이션 및 비전 소프트웨어 등을 포함(엔비디아, 구글, 메타, 마이크로소프트 등)
 - 신체(Body) 범주의 기업은 인간형 이동, 전기 분배, 감지 또는 구조를 가능하게 하는 부품을 공급하며, 세부적으로 액추에이터 부품, 센서, 배터리, 다양한 자동차 회사 등을 포함(ABB, 삼성전자, 하니웰, 소니 등)
 - 통합자(Integrators) 범주의 기업은 현재 완전한 휴머노이드 로봇을 직접 제작하거나 관련 자동화 플랫폼을 보유한 기업군으로, 세부적으로 자동차, 가전제품, 전자상거래 및 인터넷, 기존 로봇 회사, 휴머노이드 순수 플레이어를 포함(테슬라, 현대자동차, 유비테크, 네이버, BYD, 도요타 등)
- 시장조사기관인 마켓앤마켓(MarketsandMarkets)은 전 세계 휴머노이드 로봇 시장이 2024년 20억 3천만 달러에서 2029년 132억 5천만 달러로 성장할 것으로 예상(연평균 성장률: 45.5%) (MarketsandMarkets, 2024)
 - 휴머노이드 로봇은 의료, 소매, 제조업 등 다양한 산업에서 활용되며, 자동화, 인간과의 상호작용, 운영 효율성을 제공하며, 특히 환자 치료 및 재활 서비스에서 중요한 역할을 할 것으로 전망
 - 인공지능(AI), 머신러닝(ML), 자연어 처리(NLP), 컴퓨터 비전(CV) 등의 기술 발전이 휴머노이드 로봇 시장의 성장을 가속화하고 있으며, AI와 NLP가 적용된 로봇은 상호작용 체험, 공연, 테마파크 등 다양한 분야에서 활용되면서 산업 전반에 걸쳐 빠르게 확산 추세
 - 휴머노이드 로봇 생태계는 다양한 이해관계자의 협력을 기반으로 설계, 개발, 배포가 이루어지는 역동적인 네트워크로, 제조업체들은 최첨단 하드웨어 및 AI 기반 소프트웨어를 제공하기 위해 기술 개발을 주도
 - 연구기관은 실험적 연구를 통해 혁신을 추구하며, 부품 공급업체들은 고급 기능 통합을 통해 개발을 지원하며, 소프트웨어 개발자는 알고리즘, AI 모델, 제어 시스템을 개발하여 로봇이 복잡한 작업을 수행할 수 있도록 하는 핵심 역할을 담당
 - 골드만삭스(Goldman Sachs)는 휴머노이드 로봇 시장이 2035년까지 380억 달러에 도달할 것으로 예상 (2023년 예측치인 60억 달러에서 6배 이상 상향 조정)(Goldman Sachs, 2024)
 - 2024~2035년 동안 로봇 출하량은 4배 증가하여 140만 대에 도달할 것으로 추정되며, 자재 비용은 40% 감소하여 수익성이 향상 전망
 - 휴머노이드 로봇은 자동차 제조 역할의 10~15%를 수행할 전망이며, AI 가속화, 기술 혁신, 지출 투자의 확대가 시장 확대의 주요 원동력으로 제시

■ 미국의 휴머노이드형 피지컬 AI 개발 동향 및 사례

● 미국은 휴머노이드형 피지컬 AI 분야의 혁신을 선도(Grand View Research, 2024)

- 북미 지역의 2024년 휴머노이드형 로봇 시장은 전체 글로벌 시장에서 52.2%의 매출 점유율을 기록했으며, 특히 미국의 고도화된 AI, 로봇 기술, 경쟁력을 갖춘 민간 생태계가 시장을 주도
 - 고도화된 로봇 기술과 함께, 비전-언어모델(VLM), 자율 제어 알고리즘 등 혁신적인 AI 기술을 바탕으로 휴머노이드형 피지컬 AI를 개발하고 있으며, 다양한 산업 분야에 맞춘 서비스 제공에 목표
 - 구글, 마이크로소프트, 아마존, 테슬라 등 주요 빅테크 기업과 피규어 AI, Agility Robotics, Apptironik 등 스타트업 기업과의 협업을 통해 휴머노이드형 피지컬 AI 개발을 가속화

● (테슬라 - Project Optimus) Project Optimus를 통해 휴머노이드 로봇의 발전을 가속화

- 테슬라(Tesla)는 범용 휴머노이드 로봇 옵티머스(Optimus) 개발로 시장에 본격 진입
 - 2021년 테슬라의 'AI Day'에서 Bot Concept을 처음 공개한 후, 1년 뒤 첫 프로토타입인 '범블비(Bumblebee)'를 발표, 이후 기능을 지속적으로 개선하여 'Optimus Gen 1'과 'Optimus Gen 2'를 연이어 공개

■ 그림 3-2 - 테슬라 Optimus의 진화

Tesla Bot Concept (2021.8)	Bumblebee (2022.9)	Optimus Gen 1 (2023.3)	Optimus Gen 2 (2023.12)
			

출처: <https://www.tesla.com/AI>

- 옵티머스 로봇은 다른 휴머노이드와 차별화된 설계를 갖추고 있으며, 인간과 유사한 보행, 촉각 센서를 갖춘 머리, 질감과 무게를 감지할 수 있는 손과 손가락 등을 탑재
- 총 50개의 자유도(Degree of Freedom, DoF)*를 제공하며, 테슬라의 로보틱스 팀이 자체 개발한 액추에이터를 활용해 유연한 동작이 가능

* Degree of Freedom: 로봇의 위치와 자세를 결정하는 데 필요한 변수들의 개수

■ 표 3-1 - 테슬라 Optimus 기술 사양

기술 요소	설명
고용량 배터리 팩	• 옵티머스의 몸통 중앙에 위치한 2.3 kWh, 52V 배터리(테슬라 자체 제작 예정) • 모든 전자 부품이 단일 PCB(회로 기판)에 통합되어, 테슬라의 자동차 및 에너지 기술을 활용해 생산
FSD(full self driving) 기반 로봇 브레인	• 옵티머스의 몸통에 내장된 중앙 컴퓨터로, 테슬라의 완전 자율주행(FSD) 하드웨어 및 소프트웨어를 활용 • 비전 및 센서 입력을 기반으로 순간적인 의사결정 수행 • 무선 연결, 오디오, 안전 및 보안 기능 포함
테슬라 설계 액추에이터	• 액추에이터는 회전 및 선형 운동을 담당하며, 옵티머스의 관절 및 근육 역할 수행 • 테슬라가 자체 개발한 6가지 디자인(3개 선형, 3개 회전형)으로 구성된 28개의 구조적 액추에이터를 탑재 • 에너지 절약, 경량화, 비용 절감을 최적화하여 대량 생산 가능하도록 설계
생체 모방형 손	• 인간 손과 유사하게 설계된 옵티머스의 손은 6개의 액추에이터를 사용하여 11개의 자유도 제공 • 2세대(Gen 2)부터 모든 손가락에 촉각 센서가 장착되어 섬세한 물체도 안전하게 잡을 수 있음 • 최대 20파운드(약 9kg) 무게를 들 수 있으며, 도구 및 소형 부품의 정밀 조작 가능 • 차세대 모델에서는 자유도를 22로 확대할 계획
인간형 내비게이션 및 조작	• 테슬라의 FSD 신경망을 활용하여 주변 환경을 인식하고 경로를 탐색 • 내장된 카메라 및 센서를 통해 경로 및 움직임을 조정 • 목적지에 도착하면 사전 프로그래밍된 자연스러운 동작(예: 몸을 숙이거나 양손으로 물체 잡기)을 활용하여 작업 수행

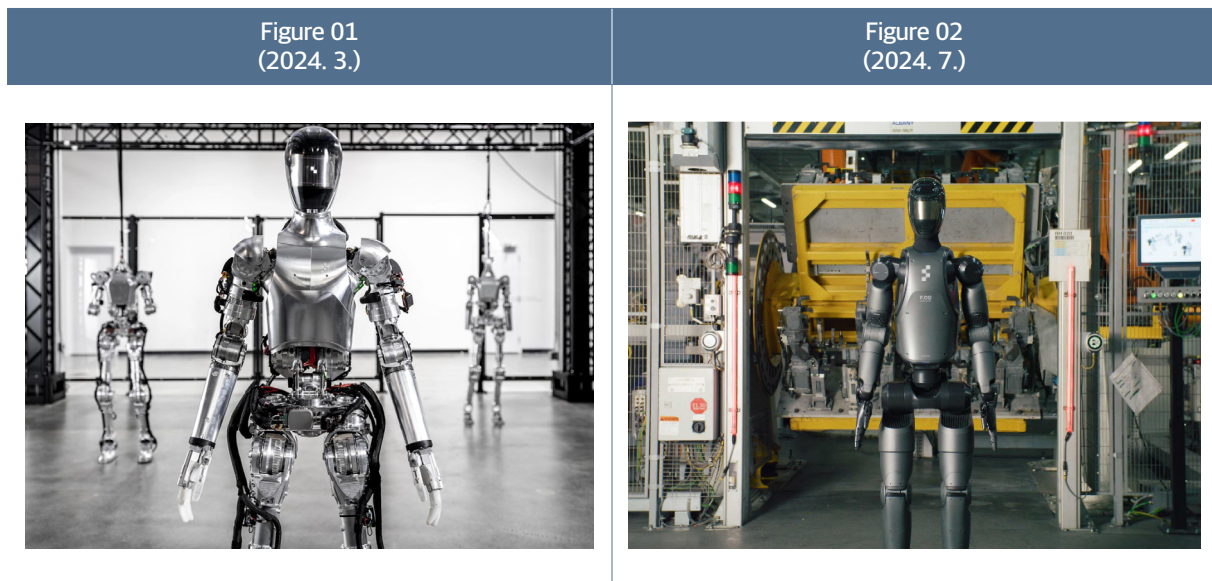
출처: <https://www.tesla.com/AI>; Morgan Stanley(2024)

● (피규어 AI - Figure) 휴머노이드형 피지컬 AI 개발을 선도하는 미국의 주요 스타트업

- 피규어 AI는 글로벌 노동력 부족 문제 해결을 목표로 하는 휴머노이드 로봇 스타트업으로, 2022년 브렛 애드콕(Brett Adcock)이 설립(Figure.ai, 2025)
 - 2024년 2월, 피규어 AI는 마이크로소프트, 엔비디아, 오픈AI 등 주요 빅테크로부터 26억 달러(약 3.5조 원)의 기업 가치를 인정받으며 6.75억 달러의 대규모 투자 유치(IEEE Spectrum, 2024. 2. 29.)
 - 테슬라 및 보스턴 다이내믹스 출신의 로보틱스 전문가들과 함께 AI 기반 범용 휴머노이드 로봇 개발을

- 추진하여, 2024년 3월 'Figure 01', 2024년 8월 'Figure 02'를 연이어 발표
- Figure 01은 20kg의 물체를 운반할 수 있으며 5시간 동안 연속 작동이 가능하고, 오픈AI의 챗GPT를 탑재하여 인간과 자연스럽게 대화를 나누는 것이 가능
 - Figure 02는 오픈AI와 협력해 훈련한 AI 모델과 연결된 마이크·스피커를 통해 음성 대화가 가능하고, 6개의 RGB 카메라로 주변을 인식해 시각적 추론을 수행하며, 사람과 동일한 5개의 손가락 구조와 16자유도(DoF)* 손을 통해 최대 25kg까지 운반
 - 또한 Figure 02는 Figure 01 대비 3배 향상된 연산과 AI 추론이 가능한 CPU와 GPU를 탑재하여 계획한 작업을 완벽히 자율적으로 수행
 - 한편, 2024년 1월 BMW와 파트너십을 체결하고 실제 자동차 생산 공정에 Figure 02를 시범 배치해 성공적으로 테스트를 완료(BMW Group, 2024)

■ 그림 3-3 - Figure의 진화



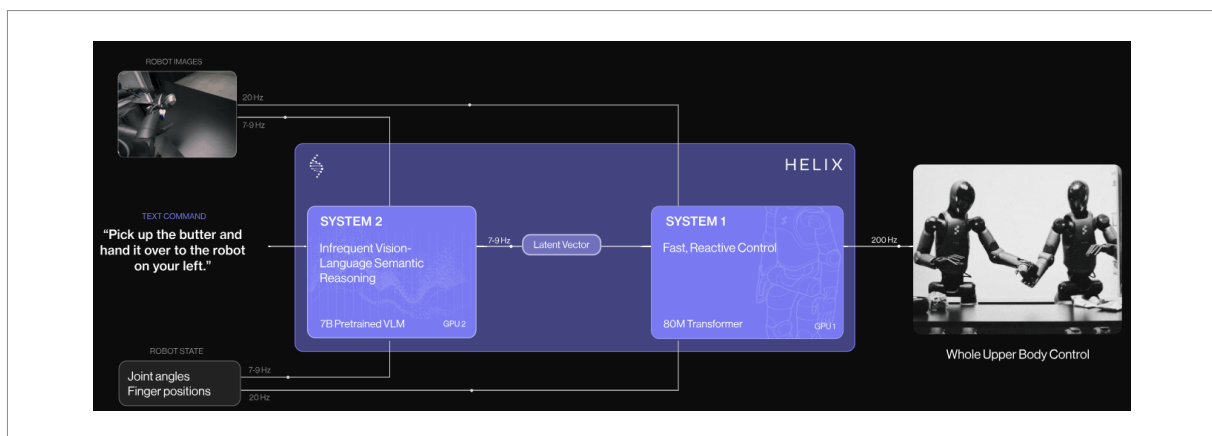
출처: <https://www.figure.ai/>

- 2025년 2월, 자사 로봇의 인식, 언어 이해, 제어 기능을 통합하여 기존 로봇공학의 한계를 극복하기 위해 시각-언어-행동(VLA, Vision-Language-Action) 모델 '헬릭스(Helix)'를 공개(Figure.ai, 2025. 2.)
 - 기존에는 로봇에게 새로운 행동을 가르치려면 전문가의 수동 프로그래밍이나 수천 번의 시뮬레이션이 필요했으나, 헬릭스는 로봇이 카메라로 수집한 시각 정보와 자연어 명령을 결합하여 이전에 접한 적 없는 물체도 실시간으로 조작
 - 작업별 미세조정 없이 단일 신경망으로 모든 동작을 학습하는 한편, 기기 내장형 저전력 GPU에서

실행할 수 있어 신속한 상용화를 지원

- 시스템 2(S2)와 시스템 1(S1)이라는 2개의 시스템을 통해 휴머노이드 로봇의 상반신 전체를 고속으로 정밀하게 제어
- S2는 초당 7~9회 속도로 작동하며, 장면과 언어를 이해하고 VLM 기반의 사전 지식을 활용해 고수준 목표에 대한 판단을 담당하고, S1은 초당 200회 속도로 작동하며 S2의 의미 표현을 정밀하고 연속적인 로봇 동작으로 실시간 실행하며 상호 보완적으로 작용

■ 그림 3-4 - 피규어 AI 헬릭스의 시스템 2와 시스템 1 작동 방식



출처: Figure AI, Helix: A Vision-Language-Action Model for Generalist Humanoid Control, 2025. 2.

● (엔비디아 - Gr00T, Cosmos) 휴머노이드 로봇을 위한 언어·행동 이해 기반의 범용 파운데이션 모델(GR00T)과 현실 기반 시뮬레이션 학습을 지원하는 월드 파운데이션 모델(Cosmos)을 통해 피지컬 AI 개발 생태계를 가속화

- 엔비디아는 Project GR00T를 통해 휴머노이드형 피지컬 AI 파운데이션 모델 구축을 추진
 - 2024년 3월 GTC에서 휴머노이드용 범용 기반 모델 'Project GR00T'를 발표하고, 1X Technologies, Agility Robotics, Apptронik, 피규어 AI 등 주요 휴머노이드 개발 기업과 협력해 GR00T 기반 생태계 확장을 위한 AI 플랫폼 및 시뮬레이션 툴을 제공(NVIDIA, 2024)
 - 이후 2025년 3월 GTC에서 휴머노이드 로봇을 위한 세계 최초의 개방형 기반 모델 '아이작 그루트 N1(Isaac GR00T N1)'을 공개했으며, 이 모델은 다양한 작업 수행이 가능한 사전훈련된 형태로 제공되고 목적별 추가 학습이 가능하도록 설계(NVIDIA, 2025c)
- GR00T 기반 휴머노이드 로봇이 3단계 계층의 컴퓨팅을 활용하여 동작하도록 설계(NVIDIA, 2024)
 - GR00T 기반의 휴머노이드 로봇은 고성능 AI 학습, 시뮬레이션 기반 강화 학습, 실시간 실행 및 센서

- 데이터 처리를 위한 3단계 컴퓨팅 아키텍처(NVIDIA DGX, NVIDIA OVX, NVIDIA AGX)로 구성
- GR00T는 대규모언어모델(LLM)을 활용하여 멀티모달 지시를 처리하며, 자연어, 비디오, 인간 시연 등의 입력을 학습하여, 휴머노이드형 피지컬 AI가 수행해야 할 다음 물리적 동작을 결정

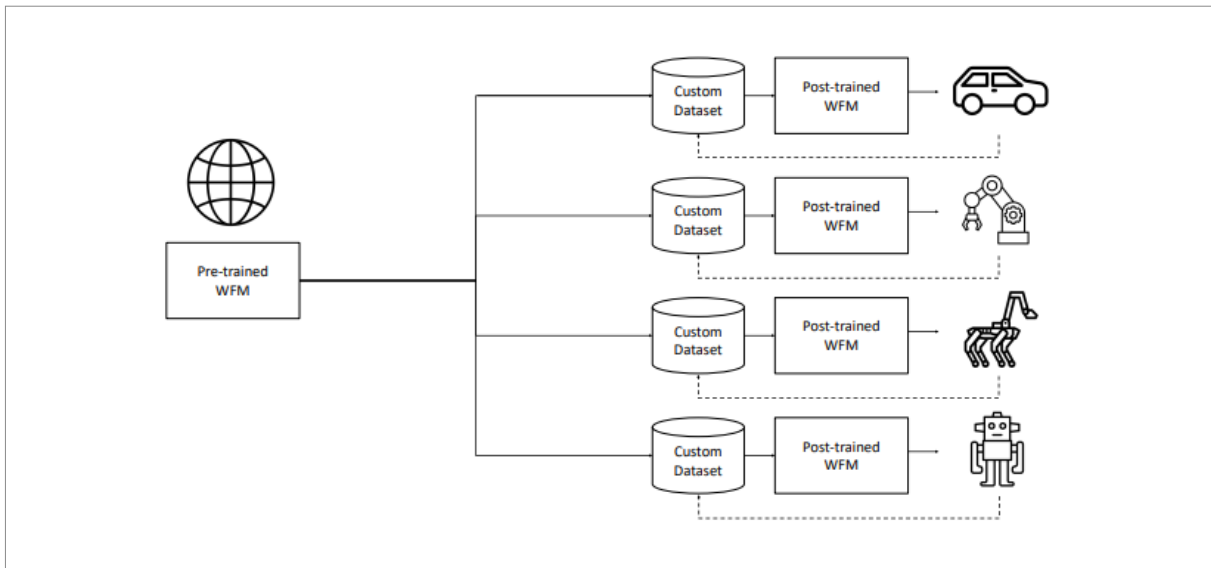
■ 표 3-2 - GR00T 기반 휴머노이드형 피지컬 AI의 3단계 컴퓨팅 구조

계층	설명
1. 최상위 계층(AI 모델) : NVIDIA DGX	• GR00T 기반 로봇의 최상위 계층으로, 로봇이 물리적 세계에 적응할 수 있도록 훈련하는 AI 모델을 운영 • 자연어, 비디오, 인간 시연(demonstration) 등 멀티모달 입력을 학습하여 로봇이 수행할 다음 동작을 결정
2. 중간 계층(디지털 트윈) : NVIDIA OVX	• 엔비디아 OVX 컴퓨터는 디지털 트윈 환경을 제공하며, 옴니버스(Omniverse, 가상 현실 시뮬레이션 플랫폼)에서 Isaac Sim*을 실행 * 젠슨 황(Jensen Huang)은 Isaac Sim을 “로봇이 되는 방법을 배우는 체육관”이라고 표현하며, 강화학습과 물리적 피드백을 활용한 로봇 학습이 이루어진다고 설명 • 로봇이 실제 환경에서 실험하지 않고도 다양한 움직임과 작업을 시뮬레이션할 수 있어 학습 속도를 획기적으로 높이고, 정확성과 안전성을 극대화
3. 하위 계층 (에지/실시간 컴퓨터) : NVIDIA AGX (Jetson Thor)	• 로봇 내부에는 엔비디아의 최신 Blackwell 아키텍처 기반으로 설계된 엔비디아 Jetson Thor 시스템온칩(SoC) 탑재 • 이 칩은 다양한 센서 입력을 종합적으로 처리하며, 장애물 감지, 경로 계획, 시각적 측위 기능을 수행하여 로봇이 주변 환경을 인식하고 이동할 수 있도록 지원 • Jetson Thor는 최상위 계층(DGX)의 GR00T AI 모델과 긴밀하게 연동되며, AI로부터 받은 지시에 따라 로봇을 제어하고, 실시간 센서 데이터를 피드백하여 최적의 움직임을 보장

출처: NVIDIA(2024); Morgan Stanley(2024)

- 엔비디아는 CES 2025에서 휴머노이드형 피지컬 AI의 개발 가속화를 위한 플랫폼으로 코스모스 월드 기반 모델(Cosmos World Foundation Model, 이하 Cosmos WFM)을 발표(NVIDIA, 2025b)
 - 피지컬 AI는 실제 환경에서 바로 학습하기 어렵기 때문에 자신의 정책을 시뮬레이션할 수 있는 디지털 트윈(정책 모델)과, 환경을 정밀하게 모사하는 디지털 세계 모델(월드 모델)이 함께 필요하며, Cosmos는 이러한 월드 모델 구축을 지원
 - Cosmos WFM은 2~60초 길이의 1억 개 이상 비디오 클립을 활용한 학습을 통해 AI가 물리적 환경을 정교하게 인식하도록 지원하며, 이를 바탕으로 다양한 산업 및 환경에 맞춘 맞춤형 세계 모델 구축이 가능하도록 설계
 - 대규모 비디오 데이터셋을 활용해 다양한 시각적 경험을 학습한 범용 세계 모델을 사전학습(Pre-training)하고, 이후 각 피지컬 AI 환경에 맞춰 세부 조정함(Fine-tuning)으로써 특화된 AI 모델을 구축하는 방식으로 설계

■ 그림 3-5 - 엔비디아의 Cosmos WFM 개념도



출처: NVIDIA, Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI, 2025b

● (이외 미국 주요 기업) 이외 미국의 주요 로봇 기업들은 휴머노이드형 피지컬 AI를 개발

- Agility Robotics, Apptronik, Boston Dynamics 등 미국의 주요 로봇 기업들은 물류, 제조, 국방 등 산업 현장의 인력 부족 문제 해결을 중심 목표로 삼고, 휴머노이드형 피지컬 AI를 실용화 단계로 빠르게 전환

■ 표 3-3 - 이외 미국 주요 기업의 휴머노이드형 피지컬 AI 사례

기업	주요 내용	대표 휴머노이드 로봇
Agility Robotics	• 설립 연도: 2015년 • Agility Robotics는 산업 및 물류 환경에서 '픽 앤 플레이스(Pick-and-Place)' 작업을 수행하는 휴머노이드 로봇 'Digit'을 개발 • 'Digit'은 망원경형 조류 다리 구조를 갖추고 있어 몸을 웅크리거나 높이 뻗어 물체를 집고 이동 가능	 Digit

Appttronik	• 설립 연도: 2016년 • Appttronik은 2016년 텍사스 대학교 오스틴 캠퍼스에서 분사하여 설립 • (NASA와의 협력) 2013년부터 NASA와 협력하여 'Valkyrie' 로봇 개발에 참여, 2022년에는 NASA와 협력을 확대하여 산업, 소매, 범용 휴머노이드 로봇 'Apollo' 개발 가속화 • (산업 적용 및 파트너십) 2024년 3월에 메르세데스-벤츠가 'Apollo'를 생산 라인에서 활용할 가능성을 검토하기 위해 파일럿 테스트 진행, 2024년 6월에 GXO와 협력하여 창고 자동화 테스트 진행 발표 • (자빌 협력) 글로벌 전자제품 위탁 생산업체인 자빌(Jabil)과 전략적으로 제휴 발표(2025.2.)	 Apollo
Boston Dynamics	• 설립 연도: 1992년 • Boston Dynamics는 MIT Leg Laboratory에서 분사하여 1990년대 초부터 로봇 기술 개발 • 2013년, 유압 구동(hydraulic-powered) 기반의 휴머노이드 'Atlas' 출시, 이후 10년 이상 지속적으로 개선되었으며, 2024년에는 새로운 전기 구동 버전으로 대체 • 2020년 12월 현대자동차그룹에 인수 (2021년 6월 인수를 완료) • Atlas는 달리기, 점프, 다중 팔다리를 활용한 균형 유지 등의 기능을 선보이며, 정교한 공학 기술 분야에서 선도적인 입지를 확보	 Atlas

출처: 각사 자료(<https://www.agilityrobotics.com/>; <https://appttronik.com/>; <https://bostondynamics.com/>)
소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

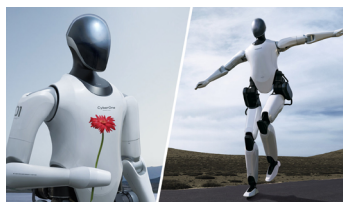
■ 중국의 휴머노이드형 피지컬 AI 개발 동향 및 사례

● 중국은 산업용 로봇 기반의 제조 역량과 빠른 사회 적용을 바탕으로 휴머노이드형 피지컬 AI를 실생활에 통합하며 상용화 전환을 선도

- 중국은 그동안 글로벌 휴머노이드 로봇 개발에서 상대적으로 조명을 덜 받아왔지만, 실제로는 로봇 핵심 부품 공급국이자 기술 생태계의 핵심 축으로 자리
 - AI 모델, 고정밀 센서, 제어 시스템, 배터리 등 휴머노이드형 피지컬 AI의 핵심 구성 요소에 대한 제조 능력과 공급망 경쟁력은 이미 세계 수준으로, 미국 경쟁사들과의 기술 격차도 좁혀지고 있는 상황

- MIT Technology Review(2025)에서 인용한 자료에 따르면, 글로벌 휴머노이드 로봇 제조업체 160개 중(2024년 6월 기준) 60개 이상이 중국에 위치해 미국(약 30개), 유럽(약 40개)을 앞서고 있으며, 이는 중국이 단순 부품 공급국을 넘어 독자적인 완성형 휴머노이드 로봇을 개발하고 양산할 수 있는 기업 기반을 빠르게 확장하고 있음을 시사
- 특히, 제조업 전반에 걸친 산업용 로봇 경험과 기술 축적을 바탕으로 휴머노이드 개발로 자연스럽게 연계하고 있으며, 10년 이상 세계 1위를 유지한 산업용 로봇 시장 지위와 전 세계 로봇 특허의 약 3분의 2를 보유한 기술력은 핵심 부품 내재화와 조기 상용화의 기반으로 작용(Allianz Global Investors, 2025)
- 이와 같이 중국은 휴머노이드형 피지컬 AI 개발에 적극적으로 나서며, 제조 규모와 원가 경쟁력을 바탕으로 향후 상용화 경쟁에서 유리한 고지를 선점할 가능성이 높은 상황
 - 실제로 2025 CES에서 엔비디아 CEO 젠슨 황과 함께 무대에 오른 14대의 휴머노이드 로봇 중 6대는 중국 기업의 제품이었으며, 이는 중국이 향후 글로벌 시장에서 휴머노이드형 피지컬 AI 공급 주도권과 상용화 경쟁력 모두를 강화해 나갈 가능성을 시사
 - 중국은 글로벌 휴머노이드 부품 공급망의 63%를 통제하고 있으며, 국제 경쟁사 대비 절반 이하의 가격으로 로봇을 생산할 수 있는 가격 경쟁력 확보(Morgan Stanley, 2024)
 - * 일례로, Unitree의 범용 휴머노이드 로봇 G-1의 가격은 경쟁사보다 훨씬 저렴한 1만 6,000달러(약 2,130만 원)로 책정
- 한편, 중국의 휴머노이드형 피지컬 AI는 실제 사회의 행위 주체로 통합되어 사람과의 실질적 상호작용을 기반으로 다양한 일상 및 서비스 환경에서 역할을 수행하는 단계에 진입
 - 중국의 휴머노이드 로봇은 단지 전시회나 생산 현장에만 머물지 않고, 호텔 체크인, 음식 서빙, 관광 안내, 사람과 공동 공연*, 마라톤 대회 참여 등** 일상생활 속 서비스 분야로 빠르게 확장(연합뉴스, 2025. 1. 30.; 조선일보, 2025. 4. 21.)
 - * 2025년 CCTV 춘절 특별방송에서 16대의 휴머노이드 로봇이 양코 춤(Yangko Dance)을 선보이며 대중의 관심을 집중
 - ** 2025년 3월 19일 중국 베이징에서 열린 세계 최초 휴머노이드 로봇 하프 마라톤 대회에 참여한 20여 대의 로봇 중 6대가 완주에 성공
 - 이상의 사례들은 중국이 단순한 기술 보유를 넘어, 피지컬 AI를 사람과 상호작용하는 형태로 실생활에 활용하는 단계로 진입했음을 보여주는 중요한 전환점으로 평가

■ 표 3-4 - 중국의 휴머노이드형 피지컬 AI 사례

기업	주요 내용	대표 휴머노이드 로봇
Fourier Intelligence	• 설립 연도: 2015년 • Fourier Intelligence는 간호 및 재활 중심 로봇 개발 • 2023년 중반, 범용 휴머노이드 로봇 'GR-1' 출시(최초로 대량 생산 및 상용 배송을 달성한 휴머노이드 로봇 중 하나) • 2024년 9월 하드웨어, 디자인, 소프트웨어 전반에 걸쳐 업그레이드된 'GR-2' 출시 • GR-2에는 12자유도의 손과 6개의 배열형 촉각 센서를 탑재하여 정밀한 작업 수행 및 실시간 그림 조정 가능	 GR-2
UBTech Robotics	• 설립 연도: 2012년 • UBTech Robotics는 휴머노이드 로봇 기업으로, 2023년 12월 기업공개를 완료하며 본격적으로 상업화 추진 • 2023년, 산업용 휴머노이드 로봇 'Walker S'를 공개 • Walker S는 41개의 서보 관절과 고급 센서 시스템을 통해 공장 조립 라인에서 정밀한 작업 수행이 가능하며, AI 기반의 작업 계획 능력 및 실시간 데이터 통신 기능을 탑재 • 2024년 중국의 대표 자동차 기업 동펑자동차(DongFeng Motor) 및 NIO와의 협력을 발표하고 Walker S의 실증 테스트 진행	 Walker S
Unitree	• 설립 연도: 2016년 • Unitree는 로봇 스타트업으로, 본래 소비자용 및 산업용 로봇을 개발하며, 4족 보행 로봇(로봇 개) 개발 집중 • 2023년, 첫 휴머노이드 로봇 'H-1' 공개 • 이후 향상된 유연성, 균형 제어, 조작 기능을 갖춘 'G-1' 발표 • 소형화 및 가격경쟁력을 앞세운 범용 휴머노이드 로봇 상용화 전략을 추구하며, G-1의 가격은 1만 6,000달러(약 2,130만 원)로 책정	 G-1
Xiaomi	• 설립 연도: 2010년 • Xiaomi는 중국 최대의 스마트폰 제조업체로, 2022년 8월 베이징 신제품 발표 행사에서 첫 번째 휴머노이드 로봇 'CyberOne'을 공개 • 단일 손으로 최대 1.5kg의 물체를 들 수 있으며, 자연스럽게 안정적인 보행 자세를 구현하기 위한 이족 보행 제어 알고리즘 탑재 • CyberOne은 소비자 가전제품 라인의 확장 모델로 개발되어, 개인용 동반자 역할을 하며 다양한 작업 및 가사 수행이 가능하고, 인간의 음성 톤을 분석하여 감정을 감지하고, 슬픔을 감지해 사용자를 위로하는 감정 반응 기능 탑재	 CyberOne

출처: 각사 자료(<https://www.fftai.com/>; <https://www.ubtrobot.com/en/>; <https://www.unitree.com/>; <https://www.mi.com/cyberone>)
소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

■ 이외 주요국의 휴머노이드형 피지컬 AI 개발 동향 및 사례

● 일본, 캐나다, 노르웨이, 한국 등도 휴머노이드형 피지컬 AI 개발 및 시장 진출

- 각국은 주요 민간 기업을 중심으로 휴머노이드형 피지컬 AI 개발과 시장 진출을 추진
 - 일본은 초기부터 인간형 로봇 개발을 선도해 왔으며, 최근에는 감성·돌봄 중심의 휴머노이드 개발 추진
 - 캐나다는 Sanctuary AI를 중심으로 휴머노이드 로봇에 인간 수준의 멀티모달 인지 및 상호작용 능력 구현을 목표로 하고 있으며, 글로벌 상업화를 적극 추진(Sanctuary AI, 2025)
 - 노르웨이의 1X Technologies는 고령화 사회 대응을 위한 정서적 상호작용 기반 돌봄 휴머노이드 개발 추진(1x.tech, 2025)
 - 한국은 네이버, 레인보우로보틱스, 로보티즈 등의 기업들이 휴머노이드 개발을 추진

■ 표 3-5 - 이외 주요국의 휴머노이드형 피지컬 AI 사례

기업	국가	주요 내용	대표 휴머노이드 로봇
Toyota		• 설립 연도: 1937년 • Toyota는 2017년 'T-HR3' 휴머노이드 로봇을 출시하며, 원격 조작을 통해 인간의 움직임을 그대로 모방할 수 있는 기술을 공개 • 2024년, Toyota는 T-HR3를 개량한 새로운 버전 'Punyo' 발표 • Punyo는 전신을 활용해 다양한 작업을 수행할 수 있도록 설계	 Punyo
Sanctuary AI		• 설립 연도: 2018년 • Sanctuary AI는 범용 휴머노이드 로봇 'Phoenix'를 통해 인간 수준의 지능을 갖춘 로봇 개발을 추진 • 2024년 4월, 세계 최대 자동차 부품 공급업체 중 하나인 Magna International과 파트너십 체결 • Sanctuary AI는 로봇이 인간과 안전하게 협력하며 다양한 작업을 수행할 수 있도록 하는 기술 개발에 집중하고 있으며, 제조업 등 산업 분야에서의 실질적 도입 가능성을 확대	 Phoenix

1X Technologies		• 설립 연도: 2014년(구 Halodi Robotics) • 2020년, ADT Commercial의 Everon과 협력, 미국 상업용 건물에 150~250대의 1세대형 휴머노이드 ‘EVE’ 배치(야간 경비 업무 수행) • 이후 Tiger Global, OpenAI, EQT Ventures 등으로부터 투자 유치 • 1X Technologies는 인간과 협력하여 노동을 수행할 수 있는 휴머노이드 로봇 개발에 집중하고 있으며, 향후 보행형 로봇 ‘NEO’의 상용화를 목표로 기술 개발 지속 • 2025년 1월, 차세대 가정용 휴머노이드로 ‘NEO Gamma’ 발표 - ‘NEO Gamma’는 소비자 친화적인 가정용 디자인, 다목적 전신 컨트롤러, 부드러운 커버로 안전성 향상, 범용 조작, 자체 개발 언어모델을 통합 등의 특징 보유	 NEO Gamma
Naver Labs		• 설립 연도: 1999년 • Naver Labs는 로보택시, 바퀴형 로봇을 개발했으며, 2020년에는 휴머노이드 로봇 ‘AMBIDEX’를 공개 • 일반적인 휴머노이드 로봇은 고출력 모터와 액추에이터를 사용하여 무거운 하중을 처리하지만, ‘AMBIDEX’는 ‘케이블 구동 메커니즘’을 채택하여 움직임을 구현 • 산업용 로봇과 유사한 수준의 정밀성과 제어력을 유지하면서도, 더욱 부드럽고 유연한 동작을 통해 인간 친화적인 로봇을 구현	 AMBIDEX
Rainbow Robotics		• 설립 연도: 2011년 • 2012년까지 휴보2의 양산 모델인 ‘휴보2 플러스’ 생산 및 미국, 일본, 싱가포르, 중국 등에 수출 • 휴머노이드 로봇 휴보(HUBO), 천문 마운트 시스템, 미디어 서비스 로봇 제이(JAY) 등 다양한 제품 제작 • 2023년 12월 삼성전자가 868억 원을 투자해 최대 주주 지위 확보 • 2025년에는 외과용 의료기기 제조 전문기업 ‘이롭’과 협력해 차세대 의료용 로봇 개발 추진	 HUBO2

Robotis		• 설립 연도: 1999년 • 스마트 액추에이터라는 고유의 하드웨어 기술을 기반으로 글로벌 휴머노이드 시장 진출 • 2025년 강화·모방학습 기반 휴머노이드 'AI Worker' 출시 • 숙련 인력의 동작 학습을 통해 고난도 작업을 수행할 수 있는 기능을 탑재해 기술적 완성도와 실용성 확보 • 다양하게 축적된 학습 데이터를 기반으로, 배선·용접·조립·검사·분류 등 작업을 지원	 AI Worker
---------	---	---	--

출처: 각사 자료(<https://punyo.tech/>; <https://www.sanctuary.ai/>; <https://www.1x.tech/>; <https://www.naverlabs.com/>; <https://www.rainbow-robotics.com/>; <https://www.robotis.com/>) 소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

2. 자율주행차형

● (현황 및 시장 전망) 자율주행차형은 피지컬 AI의 대표적 응용 분야로, AI·센서 기술 고도화와 글로벌 기업 간 협력 확대를 바탕으로 빠르게 성장하는 전략 시장으로 부상

- 자율주행차 산업은 센서 및 하드웨어 제조사, 소프트웨어 및 AI 개발사, 완성차 제조사, 서비스 제공사 등으로 구성된 복합적인 가치사슬을 형성
 - 테슬라는 자율주행 기술 분야에서 지속해서 혁신을 주도하고 있으며, 2024년 10월 테슬라의 CEO 일론 머스크는 완전 자율주행 로보택시인 '사이버캡(Cybercab)'을 공개
 - 구글의 웨이모(Waymo)는 2023년 미국 캘리포니아에서 무인 로보택시 서비스를 상업화하였으며, 2024년 8월, 주당 10만 건 이상의 유상 운행을 달성(TechCrunch, 2024. 8. 20.)
 - 현대자동차, 아마존의 Zoox도 자율주행 기술을 실제 도로에 시험 중이며, 우버(Uber)는 엔비디아와 AI 기반 자율주행 기술을 공동 개발*(Uber, 2025; Zoox, 2024. 6. 5.)
- * 2025년 1월, 우버는 엔비디아와 AI 기반 자율주행 기술을 지원하는 새로운 솔루션 개발을 위해 협업한다고 발표(Uber Investor, 2025. 1. 6.)

■ 그림 3-6 - 자율주행차 산업 주요 생태계



출처: MarketsandMarkets(2024. 12.)

- 시장조사기관들은 자율주행차 시장 규모가 향후 10여 년간 10% 이상의 고성장을 지속할 것으로 전망
 - 메타테크 인사이트(Metatech Insights)는 자율주행차 시장*이 2024년 1,865억 달러에서 2035년까지 6조 8,158억 달러에 이를 것으로 예상(2025년부터 2035년까지 연평균 성장률: 약 38.7%)(Metatech Insights, 2025. 2.)
 - * 상업용 자율주행차 시장은 자율주행차 및 기타 자동화 운송 시스템의 개발, 제조, 보급을 포함
 - 한편, GMI 인사이트(GMI Insights)는 자율주행차 시장이 2024년 1.8조 달러에서 2034년까지 5.1조 달러에 이를 것으로 예상(2025년부터 2035년까지 연평균 성장률: 약 11.1%)(GMI Insights, 2024. 2.)
 - 양 시장조사기관 모두 AI, 머신러닝, 고성능 정밀 센서 및 LiDAR, Radar, GPS 등 첨단 기술들의 발전이 자율주행차 시장 확대의 핵심 촉진 요인이라고 강조

● (테슬라 - Autopilot) 머신러닝과 심층 신경망 활용을 통해 완전 자율주행 실현 가속화

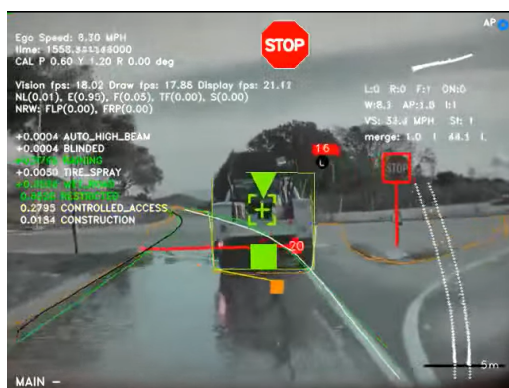
- 테슬라는 완전 자율주행 실현을 위한 AI 인프라·알고리즘·서비스 전략 전개
 - 완전 자율주행(Full Self-Driving, FSD) 기술 강화를 위해, 방대한 비디오 데이터를 처리하고 자사 머신러닝 모델을 훈련하는 데 최적화된 Dojo 슈퍼컴퓨터를 설계·구축하여 2023년 7월부터 본격 가동(TechCrunch, 2025. 2. 7.)
 - 향후 AI 제품과 자율주행 로드맵을 2024년 9월에 공개하였는데, 이 로드맵에는 FSD 소프트웨어의

주요 업데이트 일정과 기능 개선 사항이 포함되어 있으며, 특히 비전 기반 자율주행 기술의 발전에 초점을 맞춘(Tesla Mag, 2025. 9. 5.)

- 텍사스 오스틴에서 2025년 6월부터 운전자 개입 없이 차량이 자율적으로 승객을 운송하는 유료 서비스 '사이버캡(Cybercab)'을 시작할 계획이라고 발표했으며, 이는 자율주행 기술 상용화의 중요한 이정표가 될 것으로 전망(Business Insider, 2025. 4. 23.)

- 오토파일럿(Autopilot) 기능은 인식부터 차량 제어까지 다양한 과제에 대해 심층 신경망(deep neural networks)을 활용(Tesla, 2025)
 - 특히 카메라 단위의 신경망은 이미지로부터 의미론적 분할(Semantic Segmentation), 객체 감지 등을 수행하며, 버드아이뷰(Bird's-eye-view) 신경망은 이를 종합해 전체 시야를 통합적으로 구성
 - 심층 신경망은 테슬라의 수백만 대 규모 차량에서 실시간으로 수집되는 다양한 주행 데이터를 통해 복잡하고 다채로운 도로 환경을 학습
- 고정밀 표현(High-fidelity Representation) 및 궤적 계획(Trajectory Planning)을 위한 핵심 알고리즘을 개발 추진(Tesla, 2025)
 - 차량 센서 데이터를 시간적·공간적으로 융합하여 정확한 대규모 지상 데이터를 생성하고, 이를 통해 신경망이 정확한 환경 표현을 예측하도록 훈련
 - 이와 더불어 복잡한 실제 상황과 불확실성 속에서도 강력한 계획 및 의사결정 시스템을 구축

■ 그림 3-7 - 테슬라의 신경망 네트워크와 자율 알고리즘 활용 사례

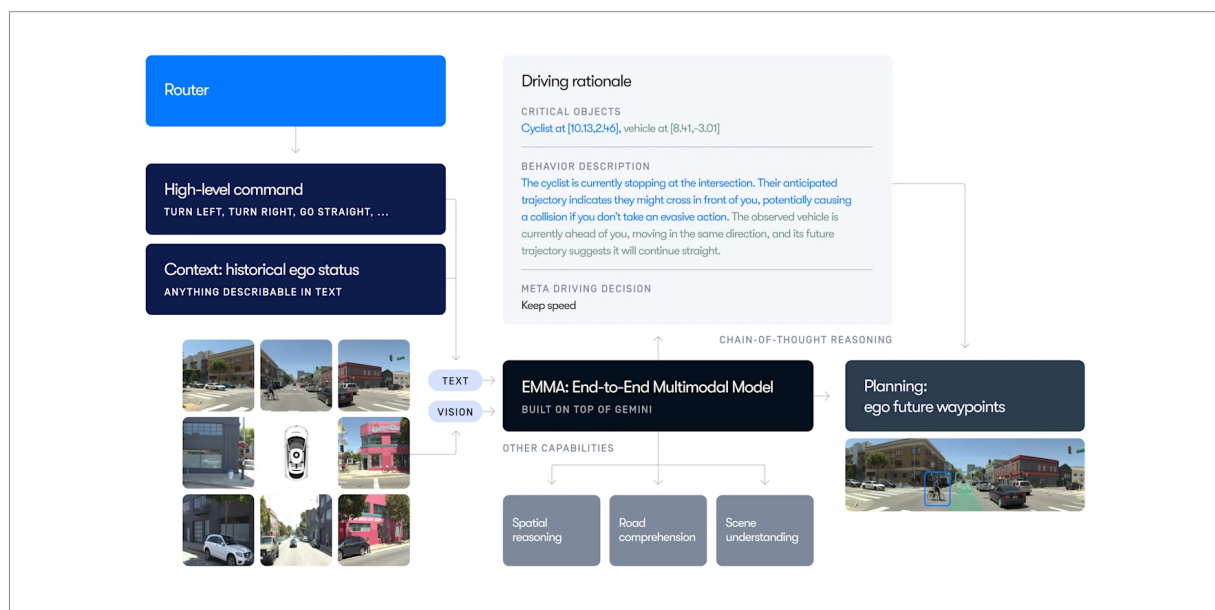


출처: www.tesla.com/AI

● (구글 - Waymo) 다양한 고성능 센서와 AI 모델을 활용하여 자율주행 차량의 미래를 구체화

- 구글의 자율주행차인 웨이모(Waymo)는 LiDAR, 카메라 등 다양한 센서를 결합하여 차량 주변의 복잡한 데이터를 수집하고, AI를 통해 보행자, 자전거, 차량 등 다양한 객체와 상황을 인식(Waymo, 2025)
 - 웨이모는 신호가 불안정할 수 있는 GPS 등과 같은 외부 데이터에만 의존하지 않고, 정밀 맞춤형 지도를 기반으로 실시간 센서 데이터를 AI와 통합하여 도로상의 정확한 위치를 파악
- 웨이모 연구진은 2024년 10월 자율주행을 위한 종단 간(end-to-end) 멀티모달 모델 'EMMA(End-to-End Multimodal Model for Autonomous Driving)'를 공개(Waymo, 2024. 10. 30.)
 - EMMA는 구글이 개발한 멀티모달 대규모언어모델(LLM)인 'Gemini'를 기반으로, 센서 데이터로부터 차량의 미래 주행 궤적을 직접 생성하는 통합된 피지컬 AI 모델
 - EMMA는 Gemini 모델의 광범위한 지식을 활용해 복잡한 도로 시나리오를 보다 정확히 이해할 수 있으며, 특히 공간 인지와 논리적 추론 능력을 요구하는 자율주행 환경에 최적화되도록 학습 및 미세 조정
 - 웨이모의 연구 결과에 따르면, EMMA는 주행 경로 예측, 객체 감지, 도로 그래프 이해 등 서로 다른 자율주행 관련 과제들을 하나의 모델에서 통합하여 학습함으로써 개별 과제에 특화된 모델보다 뛰어난 성능을 발휘
 - 웨이모 연구 총괄 Drago Anguelov는 EMMA가 자율주행 분야에서 멀티모달 모델의 강력한 성능과 적용 가능성을 입증했으며, 향후 일반화되고 적응력 있는 시스템 구축의 기반이 될 것이라고 주장

■ 그림 3-8 - 구글 Waymo의 멀티모달 모델 EMMA

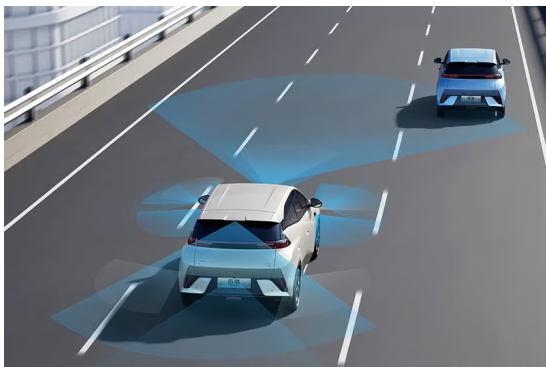


출처: <https://waymo.com/waymo-driver/>; Waymo(2024.10. 30.)

● (BYD - God's Eye) AI 기술과 고급 센서를 활용해 자율주행차를 개발하는 중국의 전기차 제조 기업

- 중국의 BYD는 전기차(EV) 분야에서의 성공을 바탕으로 자율주행차 기술 개발에 박차를 가하고 있으며, 단순 완성차 제조사를 넘어 첨단 자율주행 기술을 보유한 기업으로 변모(New Atlas, 2025. 2. 12.)
 - 첨단 지능형 운전자 지원 시스템(ADAS: Advanced Driver Assistance System)인 DiPilot의 다양한 버전*을 '신의 눈(God's Eye)'으로 명명하고, 2025년까지 자사의 모든 전기차에 이 기능을 기본 탑재하겠다고 발표
 - * 기본형 DiPilot 100, 중간형 DiPilot 300, 고급형 DiPilot 600으로 구분
 - 내장된 AI 의사결정 시스템과 전방위 실시간 센서 세트(카메라, 레이더, 초음파 등)를 통해 다양한 주행 상황에서 장애물 감지, 차선 유지, 차량 간 거리 유지, 자율 주차 등 고급 운전자 지원 기능을 수행

■ 그림 3-9 - 신의 눈(God's Eye)이 탑재된 BYD 전기차 사례



출처: newatlas.com

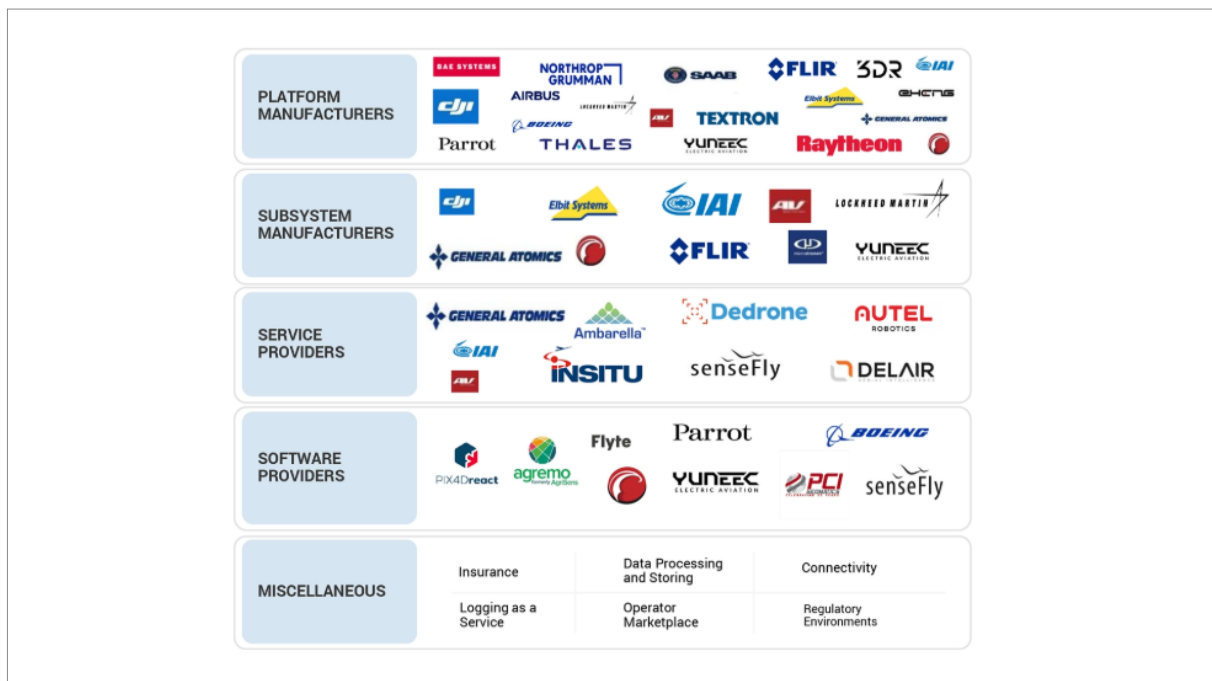
3. 드론형

● (현황 및 시장 전망) 드론형은 자율비행 기술과 AI·통신 인프라 발전을 바탕으로 다양한 산업에서 빠르게 확산

- 드론 산업은 크게 하드웨어 제조사, 소프트웨어 개발사, 서비스 제공사 등으로 구성되며, 군사용, 상업용, 소비자용 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용
 - 기업들은 AI 자율비행, LiDAR 센서, 5G 통신, 고해상도 카메라 등 첨단 기술을 적용해 드론의 활용 범위를 넓히고 있으며, 농업, 건설, 물류, 공공안전, 환경 모니터링, 군사·안보 등 다양한 산업 분야에서 드론의 활용이 더욱 확대

- AI 자율비행 기반 드론 시장 규모는 2030년까지 연평균 약 10% 수준으로 성장할 것으로 전망
 - 마켓앤마켓(MarketsandMarkets)은 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 시장이 2024년 302억 달러에서 2029년 485억 달러에 이를 것으로 예상(연평균 성장률: 약 9.9%)(MarketsandMarkets, 2024. 5.)
 - 리서치앤마켓(Research and Markets)은 상업용 드론* 시장이 2023년 55억 달러에서 2032년 177억 달러에 이를 것으로 예상(연평균 성장률: 약 12.3%)(Research and Markets, 2024. 12.)
- * 상업용 드론은 무인 항공기(UAV)의 한 유형으로, AI 기반 자율주행 기술을 통해 인간 조종사 없이 배달, 물류, 에너지, 농업 등 다양한 분야에서 효율적이고 안전하게 활용
- AI 및 자율비행 기술, 고성능 정밀 센서, 통신 인프라(5G/6G), 클라우드 기반 제어 시스템의 발전이 드론 시장 확대의 핵심 촉진 요인이며, 이는 드론을 단순한 항공 장비가 아닌 피지컬 AI로 전환시키는 기반

■ 그림 3-10 - 드론 산업(UAV) 주요 생태계



출처: MarketsandMarkets(2024. 5)

● (DJI - Matrice 4) AI 기반 자율비행과 지능형 임무 수행을 지향하는 중국의 드론 제조 기업

- DJI는 중국 선전에 본사를 둔 세계 최대의 민간 드론 제조사로, 글로벌 상업용 드론 시장에서 압도적인 점유율을 보유(DJI, 2025)
 - 초기에는 소비자용 촬영 드론을 중심으로 했으나, 이후 농업, 인프라 점검, 재난 구조, 공공안전 등 다양한 전문 산업 분야로 빠르게 진출

- DJI 드론은 강력한 안정성, 고정밀 비행 제어, 뛰어난 영상 처리 능력 등을 바탕으로 정밀 농업, 구조 작업, 전력선 점검, 건설 현장 모니터링과 같은 다양한 분야에서 필수적인 산업 도구로 자리
- 특히, DJI가 2025년 1월 출시한 DJI Matrice 4 시리즈는 단순 항공 촬영을 넘어, 고급 센서와 첨단 AI를 결합한 지능형 드론 플랫폼으로 발전
 - (AI 모델 내장) 드론에 AI 모델을 내장하여, 실시간으로 차량, 선박, 사람 등을 자동으로 감지·추적하며, 주변 환경에 따라 비행경로와 속도를 자동으로 설정하고 조정
 - (다중 지능형 센서) Matrice 4T 모델은 적외선 열화상 카메라, 광각 렌즈, 레이저 거리 측정기 등 다양한 센서를 탑재하여, 주야간을 불문하고 정밀한 데이터 수집이 가능
 - (향상된 야간 작동 능력) 자동 장애물 회피, 지능형 경로 변경, 도시의 저조도 환경에서도 향상된 선명도를 통해 다양한 운영환경에 적응
 - 이상의 기술적 혁신을 통해 DJI는 드론을 단순 원격조종 항공기에서 벗어나 자율적인 의사결정과 작업 수행이 가능한 항공 분야의 피지컬 AI 시스템으로 확장

■ 그림 3-11 - DJI의 Matrice 4 비행 사례



출처: dji.com; <https://enterprise.dji.com/kr/matrice-4-series>

- (스카이드ิโอ - Skydio X10) AI 기반 실시간 공간 인지와 자율 판단을 통해 피지컬 AI의 행동 수행과 환경 적응을 가능하게 하는 미국의 드론 제조 기업
- 미국의 스타트업인 스카이드ิโอ(Skydio)는 2014년 설립 직후부터 기존의 원격조종 방식과 차별화된, 자율적으로 주변 환경을 인지하고 판단할 수 있는 드론을 개발(Skydio Autonomy, 2025)

- 특히 컴퓨터 비전과 실시간 AI 프로세싱을 통해 GPS 신호가 없는 환경에서도 자율비행과 복잡한 임무 수행이 가능한 제품을 선보이며, 군사·공공안전·인프라 점검 등의 분야로 사업 영역을 빠르게 확대
- 스카이드ิโอ의 안보용 드론인 X10D는 미국 국방부, 연방기관, 소방·경찰 등 공공안전 기관에서도 적극적으로 도입되고 있으며, 우크라이나 전쟁에서 실전에 투입되어 그 성능과 신뢰성을 입증
- 스카이드ิโอ는 2023년 전문적인 자율형 드론 Skydio X10을 출시했으며, 2024년에는 오프라인에서도 작동 가능한 안보용 모델 Skydio X10D를 공개
 - Skydio X10은 엔비디아의 고성능 GPU 기반으로 구동되는 공간 AI 엔진(Spatial AI Engine)을 탑재해 주변 환경을 실시간으로 정밀하게 인식하고, 비행경로를 즉각적으로 계획 및 조정
 - 고성능 AI 기술을 탑재한 최신 자율 드론으로, 복잡한 환경에서도 인간 조종사 수준의 정확도와 안정성을 제공
 - 스카이드ิโอ의 예측형 AI 알고리즘은 10여 년간 축적된 비행 데이터를 기반으로 최적의 의사결정 수행
 - 비행 중 실시간으로 3D 지도를 작성하고 비행 종료 후 자동으로 가장 안전한 복귀 경로를 파악
 - 이와 같은 기술적 역량으로 스카이드ิโอ는 단순 항공 촬영 드론이 아닌, 실시간 환경 인지와 자율적 판단이 가능하며, 현대의 공중전에 활용되는 피지컬 AI 플랫폼으로 발전

■ 그림 3-12 - 스카이드ิโอ의 X10D 특성



출처: <https://www.skydio.com/skydio-autonomy>; <https://www.skydio.com/x10>

■ AGV & AMR형

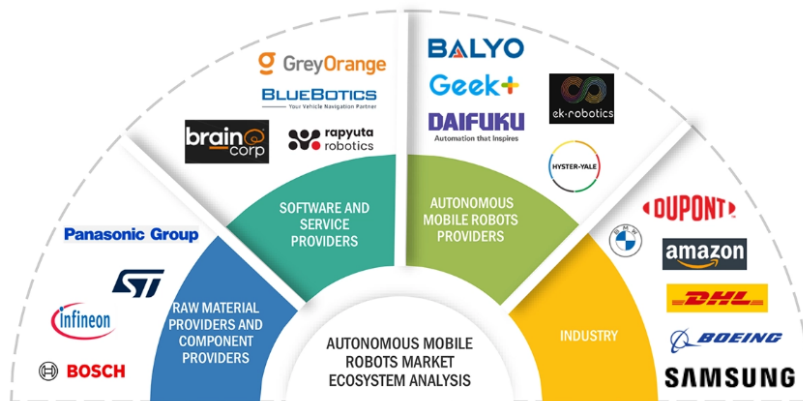
● (현황 및 시장 전망) AGV와 AMR은 산업 자동화를 주도하는 핵심 피지컬 AI 솔루션

- AGV와 AMR형 피지컬 AI는 AI·센서·통신 인프라 고도화에 따라 기술적으로 발전하고 있으며, 산업 생태계도 함께 확대되는 추세(MarketsandMarkets, 2024. 11.; MarketsandMarkets, 2024. 12.)
 - AGV(Automated Guided Vehicle)는 자기유도선, QR, 마그네틱 등 사전 정의된 경로를 따라 자재를 운반하는 자동화 차량으로 정형화된 공정 환경에 특화되어 있으며, 최근에는 제한적 AI 기능을 갖춘 지능형 AGV로 진화
 - AMR(Autonomous Mobile Robot)**은 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping), 컴퓨터 비전, LiDAR 기반 자율 경로 생성 및 장애물 회피 기능을 갖춘 피지컬 AI로, 비정형 환경에서도 동적 판단과 자율 이동이 가능
 - AGV & AMR 산업은 원자재·부품 공급자, 소프트웨어 및 통합업체, 제조사, 수요처로 구성된 생태계를 형성

■ 그림 3-13 - AGV & AMR 산업 주요 생태계



AGV Market Ecosystem



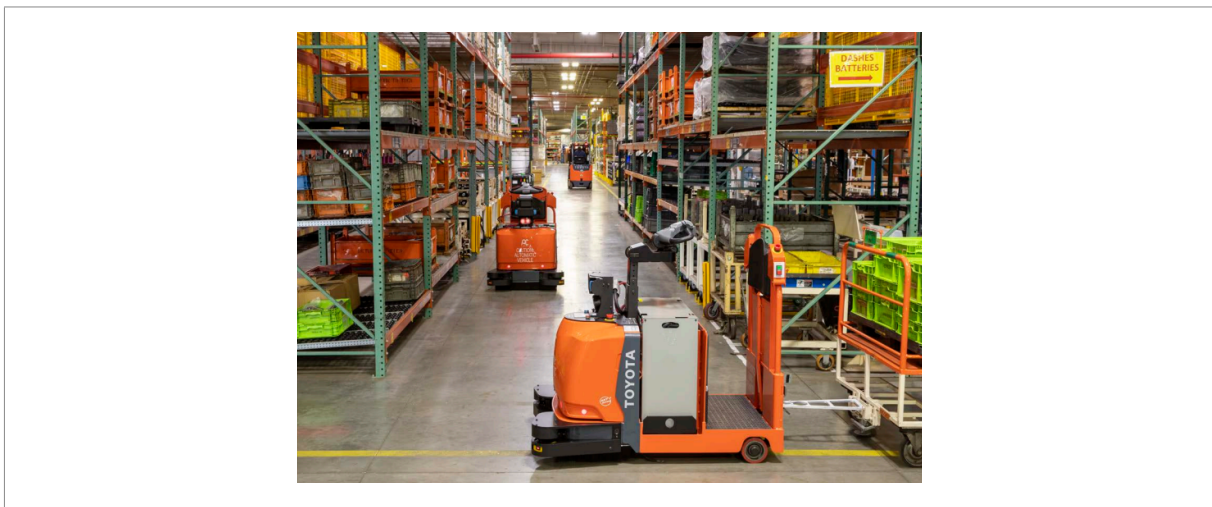
AMR Market Ecosystem

출처: MarketsandMarkets(2024.11); MarketsandMarkets(2024.12)

- AI 기반 물류·제조 자동화를 위한 AGV & AMR 시장은 산업 자동화 수요 증가와 스마트팩토리 확산에 따라 지속적인 성장세를 보일 것으로 전망
 - 마켓앤마켓은 AGV(Automated Guided Vehicle) 시장이 2024년 25.6억 달러에서 2029년 37.8억 달러에 이를 것으로 예상(연평균 성장률: 약 8.1%)했고, AMR(Autonomous Mobile Robot) 시장은 2023년 18억 달러에서 2028년 41억 달러에 이를 것으로 전망(연평균 성장률: 약 17.5%)
 - AMR의 성장률이 AGV보다 높게 전망되는 이유로는, AMR은 실시간 경로 생성과 장애물 회피가 가능한 높은 자율성과 유연성을 바탕으로 별도 인프라 없이 설치·운영이 가능하며, 물류·제조뿐 아니라 유통, 의료, 전자상거래, 서비스업 등 다양한 산업 분야로 적용이 빠르게 확산되고 있기 때문
- (TOYOTA - Center-Controlled Rider Automated Forklift) AGV형 피지컬 AI를 통해 스마트 물류 자동화를 선도하는 세계 최대 차량 제조업체
 - 도요타(Toyota)는 세계 최대 차량 제조업체 중 하나로, 최근 AGV 제품군에 AI 기능을 결합한 지능형 물류 솔루션을 적극적으로 확대
 - 반복적이고 예측 가능한 물류 흐름을 자동화하여 생산성 향상 및 작업자 안전 확보를 주요 목표로 설정, 센서·자동화 소프트웨어·중앙 제어 시스템(T-ONE 등)을 접목한 스마트 AGV 라인업을 전개(Toyota, 2025)

- 대표적으로 Center-Controlled Rider Automated Forklift 제품은 환경 인식, 충돌 회피, 속도 자동 조절 등을 위한 AI 기능을 탑재한 모델로서, 다중 AGV 동시 운용 및 물류 흐름 최적화에 기여
 - 해당 모델은 기본적으로 사전에 정의된 고정 경로를 주행하지만, 다양한 센서를 통해 작업 현장의 상황을 인식하고 제한적 판단을 수행할 수 있는 '준피지컬 AI' 시스템으로 평가되며, 도요타의 T-ONE 자동화 소프트웨어와 연계 시 더욱 유연한 작업 스케줄링과 경로 최적화가 가능

■ 그림 3-14 - TOYOTA Center-Controlled Rider Automated Forklift 실제 구동 모습



출처: <https://www.toyotaforklift.com/>

● (Diligent Robotics - Moxi) 의료 특화 AMR을 개발하는 미국의 대표적인 로봇 개발 기업

- 딜리전스 로보틱스(Diligent Robotics)는 2017년 설립된 미국의 로봇 기업으로 병원 환경에서 의료진을 지원하는 사회적 지능을 갖춘 AMR형 피지컬 AI 개발에 주력(diligentrobots, 2025)
 - 반복적이고 시간이 많이 소요되는 업무를 자동화하여, 의료진이 환자 돌봄에 집중할 수 있도록 돕는 것을 목표
 - 미국 내 23개 의료 시스템과 협력, 31개 병원과 파트너십을 체결해 전국적으로 서비스를 확장(2025. 2. 기준)
- 대표적으로 Moxi는 단순 반복 업무를 넘어 병원의 복잡한 환경 속에서 자율적으로 환경을 이해하고 학습하며, 인간과 자연스럽게 협력함으로써 업무 효율성을 극대화하는 피지컬 AI의 형태로 발전
 - (자율 이동 및 정교한 조작 능력) 사람의 도움 없이 스스로 객체를 잡고, 당기고, 열고, 안내하는 등 다양한 물리적 작업을 수행할 수 있는 유연하고 민첩한 로봇 팔(Compliant Arm)을 갖추고 있으며, AI

- 기반의 자율적인 주행과 장애물 회피를 통해 복잡한 병원 환경에서 스스로 목적지를 찾아 업무를 완수
- (사회적 기능) 엘리베이터 호출, 자동문 개폐와 같은 복잡한 사회적 작업을 독립적으로 수행할 수 있으며, 인간과 친화적인 상호작용을 위해 밝고 긍정적인 제스처를 취하며, 병원 직원과 환자의 정서적 친밀감과 수용성을 향상
 - (인간을 통한 지속적 학습) 병원 직원과 함께 근무하며 반복적인 상호작용을 통해 인간의 작업 방식과 병원의 업무 흐름을 지속 학습하고, 이를 바탕으로 변화하는 환경에 능동적으로 대응

■ 그림 3-15 - Diligent Robotics의 대표 AMR 'Moxi'의 주요 기능



출처: <https://www.diligentrobots.com/moxi>

IV 피지컬 AI 관련 주요 이슈

- (기술적 한계) 실제 환경에서 인간 수준으로 자율적으로 작동할 수 있는 로봇 개발은 매우 어려운 일이며, 피지컬 AI가 완전히 실현되기까지는 여전히 상당한 기술적 장벽이 존재(Citi, 2025; Firoozi, et al., 2023)
- (기반 모델의 범용성 및 실시간성 한계) AI 기반 인지·제어 모델의 일반화와 실시간 처리 능력 부족으로 자율성 확보에 제약
 - 현재의 기반 모델은 다양한 환경과 복합 과제를 일반화할 수 있는 인지·제어 통합 구조가 아직 충분히 구현되지 않았으며, 이는 데이터 다양성과 시공간 정보 통합 처리 능력 부족, AI·로봇공학에서의 정책 이식성(Policy Transfer)* 한계 등으로 인해 범용 자율성 구현에 구조적 제약을 초래
 - * 강화학습이나 로봇공학에서 하나의 환경이나 작업에서 학습된 정책(Policy)을 다른 환경이나 작업에 효과적으로 적용할 수 있는 능력
 - 대형 모델의 연산 부하는 피지컬 AI 내부 환경에서 실시간 작동하기에는 지나치게 무거워, 경량화와 효율성 중심의 아키텍처 재설계가 요구
- (시뮬레이션과 현실 간 격차) 현실 세계의 복잡성과 불확실성은 여전히 시뮬레이션만으로 극복하기 어려우며, 이는 피지컬 AI의 일반화된 인지·행동 능력 구현에 구조적 한계로 작용
 - 시뮬레이션에서 학습된 로봇의 행동은 현실 환경의 변화나 예외 상황에 민감하게 반응하며, 예기치 못한 상황 발생 시 이를 탐지하고 안전하게 대응하는 메커니즘이 아직 미흡
 - 인간 수준의 인지-운동 통합 능력을 구현하려면 다양한 맥락을 반영한 방대한 현실 세계 데이터가 필요한데, 로봇 분야는 아직까지 물리적 제약과 복잡성으로 인해 효과적인 자기지도학습(self-supervised learning) 기반 데이터 확보에 한계가 존재
 - 엔비디아의 Cosmos 등은 정교한 합성 데이터 생성과 환경 다양성 구현을 통해 시뮬레이션과 현실 간 격차를 줄이고자 하나, 여전히 현실의 모든 변수(e.g. 지형, 표면 마찰력, 재질 특성, 조도, 조명 변화, 날씨, 온·습도, 사회적 신호 등)와 불확실성을 완전히 반영하는 데에는 기술적 한계가 존재(NVIDIA, 2025d)
- (전력 및 에너지 효율 문제) 배터리 및 연산 효율성의 한계로 인해 로봇 운용 시간과 자율성에 제약
 - 배터리 용량 한계로 인해 단기간만 작동하거나, 고성능 모델은 전원 케이블이 연결된 상태에서만 작동 가능
 - AI 기능이 통합된 로봇의 경우, 연산 요구량이 급격히 증가하고 있어 배터리 에너지 밀도의 연간 개선 속도(5~8%)보다 AI 모델의 전력 수요 증가 속도가 더 빠르기 때문에 에너지 수요와 공급 간 격차가 더욱 확대될 우려

- 전력 및 에너지 측면의 제한사항은 로봇이 실제 환경에서 장시간 자율 운용되는 것을 어렵게 만들며, 이를 해결하기 위해서는 배터리의 에너지 밀도 향상과 더불어 고효율 액추에이터 및 연산 구조 최적화 기술의 병행적 발전이 필요
- (액추에이터의 내구성과 성능 문제) 무거운 작업이나 불규칙한 실외 환경에서 작동하는 피지컬 AI는 충격과 환경 변화에 견딜 수 있는 강인한 구조와 고성능 액추에이터 확보가 핵심 과제로 부각
 - 상업적 현장에서의 반복 사용과 충돌·진동 등의 외부 요인을 견디기 위해서는 내열성, 방진성 등을 고려한 재료 선택 및 설계 기술이 요구
 - 강력한 힘을 출력하면서도 경량화를 동시에 달성하기 위해서는 복합 소재, 탄소 섬유, 그래핀 기반 신소재 적용, 모듈화·유연구조 설계 같은 혁신적 접근이 필요
- (비용 문제) 피지컬 AI 시스템을 경제성 있게 구현하고 통합하는 것은 여전히 어려운 과제(Citi, 2025; Firoozi, et al., 2023)
 - 피지컬 AI의 대중적 확산을 제약하는 핵심 요인 중 하나는 높은 제조 비용으로, 로봇 제조와 파운데이션 모델 학습, 고성능 반도체 칩 운용에 이르는 전 과정에서 상당한 자본 투입이 요구
 - 제조에 이르는 전 과정은 고성능 부품 사용, 맞춤형 설계, 복잡한 시스템 통합, 전문 인력 확보, 그리고 지속적인 운영 및 유지 보수 비용 등으로 인해 상당한 자본 투자가 필요
 - 실시간 추론과 동적 행동 계획 등 고차원 연산을 수행하기 위해 필요한 수십억 개 파라미터 규모의 파운데이션 모델 학습 및 운용에는 막대한 연산 자원과 시간이 소요되며, 이에 따라 GPU, NPU, TPU 등 고성능 반도체 칩의 사용이 필수적
 - 특히 하드웨어, 소프트웨어, 고성능 반도체 칩 등 주요 구성 요소들이 상호 분리된 생태계에서 독립적으로 개발되는 경우가 많아 시스템 통합 비용과 기술 복잡성이 크게 증가
 - 피지컬 AI는 인간의 능력을 초월하는 다양한 작업을 수행할 수 있는 잠재력이 있으나, 상용화를 위해서는 단가 절감, 모듈형 플랫폼 설계, 고성능 연산 자원의 효율화 등 비용 구조 전반의 최적화가 핵심 과제
- (경제 및 노동시장 영향) 피지컬 AI는 전 산업 분야에서 노동생산성 향상을 견인할 수 있으나, 대규모 자동화로 인한 일자리 감소와 노동시장 충격에 대한 우려 또한 병존(Intahchomphoo, et al., 2024)
 - 인간이 수행하는 많은 업무를 대체할 수 있을 정도로 발전한다면, 일부 직군에서는 실직 가능성이 높아지거나, 재교육(Reskilling)이 필요해질 가능성이 높아질 것으로 예상

- 제조업과 서비스업은 물론 의료나 IT 등 고도의 지능적 업무가 포함된 분야까지 아우르며 인간의 다양한 직무를 대체할 것으로 예상
 - 모건 스탠리는 장기적으로 미국 내 직업의 약 75%, 근로자의 약 40%가 휴머노이드 로봇에 의해 대체될 수 있다고 분석했으며, 향후 다른 형태의 피지컬 AI 범주에도 점차 확대될 것으로 전망(Morgan Stanley, 2024)
 - 한편, 피지컬 AI 도입의 경제적 이득이 자본 소유자나 주주에게만 집중되고, 실직 노동자에 대한 보완책이 미흡할 경우 사회적 불평등 심화 및 디지털 격차 확대로 이어질 가능성도 존재
- **(윤리적·법적 과제) 피지컬 AI의 확산은 인간의 신체·공간·정보와 직접적으로 상호작용하는 기술 특성상 다양한 윤리적·법적 과제를 수반**
- 책임성과 안전성, 개인정보 보호, 인간-로봇 상호작용의 윤리성, 군사적 활용 가능성 측면에서 기존 법·제도와 사회적 합의로 해결하기 어려운 복합적인 쟁점을 동반(Upadhyay, 2025. 3. 6.)
 - 자율적으로 판단·행동하는 특성상, 사고 발생 시 법적 책임 주체(운영자, 개발자, 제조사 등)가 불분명해질 가능성 존재
 - * 일례로, 자율주행차의 사고 발생 시 차량 소유주, 제조업체, AI 알고리즘 개발자 중 누구에게 책임이 있는지 판단이 어렵고, 배송 로봇이 보행자와 충돌하거나 돌봄 로봇이 환자에게 손상을 입힌 경우에도 책임소재 논란 발생(소프트웨어정책연구소, 2025)
 - 피지컬 AI는 영상·음성·위치 등 실시간 데이터를 지속해서 수집하기 때문에, 민감한 개인정보 유출 또는 무단 저장의 우려 존재
 - 사람처럼 보이거나 행동하는 피지컬 AI의 사회적 역할이 확대될수록, 사용자 감정에 영향을 미치거나 인간 존엄성에 대한 침해 등 새로운 윤리적 이슈가 발생할 수 있음
 - * 예를 들어, 노인 환자가 인간형 로봇에게 정서적 애착을 갖도록 설계하는 기술의 윤리적인 적절성 여부, AI 감시 로봇이 특정 집단을 차별적으로 감시·추적하는 경우의 인권침해 등의 이슈 발생
 - 군사적 상황에서 자체 판단으로 공격을 수행할 경우, 인간 통제의 부재로 인한 오작동 위험, 국제법상 책임 공백, 그리고 민간인에 대한 무차별 피해 가능성이 주요 윤리적·법적 문제로 제기
- **(지정학적 경쟁과 기술 격차 심화) 피지컬 AI는 기존 AI 기술을 둘러싼 주요국 간 기술 패권 경쟁을 한층 심화시키고, 글로벌 경제구조의 불균형을 가중시킬 수 있는 촉매로 작용 (한국로봇산업진흥원, 2025; IFR, 2025, IITP, 2025)**
- 피지컬 AI는 미래 경제와 안보의 핵심 인프라로 부상하고 있으며, 미국·중국·EU·일본 등 주요기술 선도국은 자국 내 제조 기반 강화와 전략산업 육성을 위한 정책·투자 경쟁을 본격화

- 미국은 민간 중심의 생태계와 정부 지원을 통해 피지컬 AI 혁신을 주도하고 있고, 중국은 중앙정부 주도의 중장기 전략을 추진 중이며, EU는 기술 개발과 함께 윤리·사회적 책임을 병행하고, 일본은 경쟁력 회복을 위한 정책적 지원에 집중
- 한국은 피지컬 AI를 선도하는 주요국에 비해 대규모 투자가 부족하고, 연구소·스타트업 중심의 개발 구조와 HW 중심의 로봇 생태계, 세계적 수준의 AI 기술 기업 부재 등의 한계로 인해, 국가 차원의 전폭적인 지원과 생태계 차원의 역량 결집이 요구되는 시점
- 동남아, 아프리카 등 로봇과 AI 등 기반 기술 역량이 상대적으로 부족한 국가는 피지컬 AI의 개발 및 상용화에서 뒤처질 가능성이 높으며, 이러한 격차가 지속될 경우 국가 차원의 기술적 종속이 심화될 우려 존재

■ 표 4-1 - 주요국 피지컬 AI 관련 정책 동향

주요국 구분	주요 내용
미국	• 미국은 AI 분야의 경쟁력 있는 연구기관과 민간 생태계를 바탕으로, 그중에서도 빅테크와 스타트업 등 민간 기업 주도의 협력을 통해 피지컬 AI 분야의 혁신을 주도(IFR, 2025) - 국가과학재단(NSF)은 「지능형 로봇 및 자율시스템(IRAS)」 R&D 프로그램으로 2023년에 5,380만 달러, 2024년에 6,990만 달러를 지원 - 보스턴, 피츠버그, 실리콘밸리는 AI 기반 로봇 발전을 위한 클러스터 연합을 출범시키고(22), 클러스터 간 연계를 강화하며 AI 기반 모델·로보틱스 분야 투자 및 초기 기업 지원에 주력(SVR, 2022) - 트럼프 대통령 취임 후(25) 자국우선주의 기조 강화로 피지컬 AI 관련 기술 자립 강화를 위한 리쇼어링(Reshoring), 관세정책 등을 적극 추진 - 미국 정부는 AI 주권 확보를 위해 OpenAI, Oracle, SoftBank와 협력하여 최대 5,000억 달러 규모의 AI 인프라 프로젝트인 '스타게이트(Stargate Project)'를 발표, 대규모 데이터 센터와 전력 인프라를 건설해 고성능 연산 환경을 마련하고, 이는 대규모 연산 능력과 실시간 데이터 처리를 필요로 하는 피지컬 AI 기술의 연구, 개발, 상용화를 뒷받침
중국	• 중국의 피지컬 AI 정책은 중앙정부 차원의 중장기 지원육성 계획에 의해 추진 - 「중국제조 2025」(15)를 통해 AI 기술의 자립과, AI를 활용한 첨단 로봇 혁신을 우선순위로 설정했고, 이를 구체화하기 위해 「로봇산업발전규획(2016~2020)」을 수립해 로봇의 지능화에 핵심적인 역할을 하는 AI 기반 모델 고도화(NDRC, 2016) - AI 기술 및 응용 분야에서 세계 선진국 수준에 도달하기 위해 「차세대 AI 발전계획(2017~2030)」을 수립, AI 기반 모델을 로봇, 자율주행 차량, 스마트 제조 시스템 등에 적용함으로써 산업 전반의 지능화와 고도화를 적극 추진(중국 국무원, 2017) - 「지능형 로봇 중점 특별 프로그램」(22)를 통해 AI가 통합된 지능형 로봇에 대한 대규모 투자로 2022년에 4,340만 달러(3억 1,600만 위안), 2023년, 2024년에는 각 4,520만 달러 (3억 2,900만 위안)를 지원(IFR, 2025) - 공업정보화부 등 17개 부처는 2025년까지 머신러닝, 빅데이터 기술 등이 융합된 제조업 로봇 밀도를 2020년 보다 2배 늘리는 것을 목표로 하는 「로봇+활용방안」(23)을 발표(중국 국무원, 2023) - 베이징시를 중심으로 100억 위안(약 2조 원) 규모의 피지컬 AI 산업 발전 기금을 조성(24) (베이징시경제정보화국, 2023)

주요국 구분	주요 내용
EU	• 피지컬 AI의 기술 개발 및 산업 육성 지원 강화와 이에 활용되는 AI 모델의 윤리적 원칙 및 사회적 책임도 균형 있게 추진 - ADRA(AI, Data and Robotics Association) 프로그램¹⁾(21)을 통해 AI와 로봇틱스에 민간 협력으로 26억 유로 투자 - 후속 조치로 AI·데이터·로봇 인프라 및 생태계 강화에 중점을 두고 민간 파트너십 <DigitalEurope>과 지능형 로봇 관련 연구 및 혁신 프레임워크 프로그램 <Horizon Europe>를 이행(IFR, 2025) - 「AI Act」에 의거해 피지컬 AI에 활용되는 AI 시스템은 대부분 ‘고위험군’으로 분류되어 투명성, 설명가능성, 인간 개입 가능성 등 신뢰 가능한 AI 요건 충족 필요
일본	• 초기 산업용 로봇 선두였지만, 최근 AI 기술 발전에 따른 피지컬 AI 분야 전환 흐름에서 미국·중국 대비 경쟁력이 약화되며 AI 핵심 기술 내재화를 위한 정책 지원을 통해 경쟁력 회복을 모색 - 스스로 학습·행동하는 AI 로봇 혁신의 흐름에 발맞춰 「로봇 신전략」²⁾(15)을 수립해 2020년까지 1,000억 엔 이상을 투자(日本再生本部, 2015) - 경제산업성은 「로봇을 둘러싼 환경 변화와 향후의 시책 방향성」³⁾(19)을 통해 중장기적인 지능로봇 관련 연구개발 주제로 <AI 기반 판단·제어 기술을 중심으로 한 로봇의 가치 향상과 무인화> 등을 발표(METI, 2019) - 문샷(Moonshot) 프로그램을 통해 자율적으로 학습판단행동하며 인간과 공생하는 ‘차세대 AI 시스템’ 구현을 2050년 목표로 추진(閣府, 2024)
한국	• 정부는 국산 AI 반도체와 기반 모델, 전략기술 로드맵 재정비, 산학연 공동 로봇 기술 개발 등을 통해 피지컬 AI의 산업 경쟁력 강화를 추진 - 과학기술정보통신부는 「AI 컴퓨팅 인프라 확충 방안」으로 국산 AI 반도체와 대규모 데이터 센터 구축을 통해 피지컬 AI 시스템의 고속 연산·실시간 처리를 뒷받침(과학기술정보통신부, 2025. 2. 20.) - 국산 AI 반도체 기반 온디바이스 AI를 활용해 드론 관제, 로봇·자율주행차 등 물리적 시스템에서의 에이전트 서비스를 실증, 이는 피지컬 AI의 실시간 인지·제어 능력 향상에 기여(과학기술정보통신부, 2025. 3. 31.) - 제4차 지능형 로봇 기본계획⁴⁾(24)과 K-휴머노이드 연합⁵⁾(25)을 통해 2030년까지 민관합동으로 3조 원 이상을 투자, AI 기반 로봇과 핵심 기술 확보, 부품 국산화, 인력 양성 등 로봇 산업 전반의 경쟁력 강화를 추진(산업통상자원부, 2024, 2025) - 생성형·피지컬 AI 등 과학기술 트렌드를 반영해 12대 국가전략기술 체계와 임무 중심 전략 로드맵을 민관합동으로 개편·재정비(과학기술정보통신부, 2025. 3. 12.)

출처: 소프트웨어정책연구소 정리(2025.04.01.)

V

결론 및 시사점

■ 요약

● 피지컬 AI(Physical AI) 시대로의 전환

- AI가 디지털 영역을 넘어 현실 세계로 확장되는 기술 패러다임의 전환 속에서, 피지컬 AI(Physical AI)는 생성형 AI, AI 에이전트(AI Agent) 다음으로 차세대 AI 기술 트렌드로 부상하며 산업적·기술적 주목도가 급격히 높아지는 추세
- 피지컬 AI의 시장 잠재력에 대한 기대가 커지며, 글로벌 차원의 국가적 대응과 민간 투자가 빠르게 확대
- 피지컬 AI는 단순한 기술적 유행이 아니라, AI 기반 모델, 로봇공학, 고성능 센서 등의 기술이 융합되면서 지능의 물리적 구현을 가능하게 한 기술 진화의 집약체

● 피지컬 AI는 첨단 기술의 융합을 통해 물리적 세계에서 인간처럼 감지하고, 해석하며, 자율적으로 행동하는 지능형 물리 시스템으로 진화하고 있으며, 기술 수준과 형태에 따라 다양하게 구분되어 산업에 활용

- 피지컬 AI는 AI 기반 모델(두뇌), 컴퓨터 비전·센서(감각), 엣지 컴퓨팅 및 네트워크 인프라(연결), 제어 및 액추에이터(행동) 등의 주요 기술로 구성되며, 이들이 유기적으로 통합될 때 자율적 판단과 환경 적응이 가능한 물리 지능 시스템이 실현
- 주요 기술 수준과 형태에 따라 △ 휴머노이드형 △ 자율주행차형 △ 드론형 △ AGV & AMR형으로 분류되며, 각각의 기술 통합 방식과 구현 목표에 따라 서비스, 물류, 제조, 돌봄, 국방 등 다양한 산업 환경에 특화된 형태로 활용
- 이와 같은 피지컬 AI의 구현은 산업 전반의 자동화·지능화 수요를 중심으로 새로운 융합 생태계를 형성하는 기반으로 작용

● 피지컬 AI 확산 과정에서 기술·사회·제도·지정학적 경쟁 차원의 복합적 이슈가 대두

- 피지컬 AI는 막대한 연산 자원과 개발 비용, 물리 환경 적용의 기술적 제약, 노동시장 구조 변화, 법적 책임과 윤리 기준 미비 등 복합적인 확산 장애 요인을 동반

- 특히, 인간을 닮은 형태의 행동 주체로서 피지컬 AI가 현실에 등장함에 따라, 인간-로봇 간 관계의 변화, 책임 소재, 감정적 영향 등 복합적 사회 문제를 야기할 가능성 존재
- 동시에 미국, 중국, EU, 일본 등 주요국은 피지컬 AI를 국가 전략기술로 간주하고 다양한 정책을 선제적으로 마련해 경쟁력 확보에 나서고 있으며, 이는 피지컬 AI가 생성형 AI에 이어 미래 산업 패권뿐 아니라 안보·외교·표준 경쟁의 핵심 전장이 될 수 있음을 시사

■ 정책 시사점

● (국가전략) AI·로봇 융합 시대에 대응한 국가 차원의 피지컬 AI 전략 수립 필요

- 피지컬 AI는 아직 상업적 확산 초기 단계이나, 기술 발전 및 점진적인 생산 단가 하락에 따라 제조, 물류, 교통, 국방 등 다양한 산업 분야로의 빠른 확산이 예상
- 한국은 ICT 강점과 제조업 기반 등 산업적 특성을 반영한 국가적 차원의 피지컬 AI 전략을 수립하고, 산업 및 공공부문의 실증과 상용화를 적극 추진 필요
- AI 및 로봇 정책을 통합적으로 조율할 수 있는 ‘피지컬 AI 전략위원회’ 등을 신설해, R&D 투자, 규제 개선, 국제 협력 등을 총괄하는 거버넌스 체계 마련이 필요
 - * 구체적으로 기획·예산 편성·사업 수행이 가능한 협력과제 체계를 마련하고, 산업 현장 중심의 실증 연계형 과제(e.g. 물류로봇, 제조공정 자율화, 스마트시티 기반 피지컬 AI 등)를 함께 추진할 필요
- 미국·중국 등 피지컬 AI에 대한 대규모 투자 수준을 감안할 때, 한국도 지속적인 대규모 투자를 통해 핵심 기술 자립과 글로벌 경쟁력 확보를 뒷받침할 수 있는 전략적 재정 기반을 마련

● (연구개발) 산·학·연 협력을 통한 피지컬 AI 핵심기술 국산화 및 연구개발 강화

- 피지컬 AI를 구성하는 핵심요소기술(AI 기반 모델, 로봇 강화학습 알고리즘, 액추에이터 등)은 여전히 미국·일본·독일 등 해외 의존도가 높아, 글로벌 공급망 불안정성에 대비하기 위해 핵심 기술의 자립화가 시급
- 특히, 피지컬 AI의 두뇌 역할을 수행하는 기반 모델 측면에서 고성능·경량화된 행동 AI 모델과 이를 실시간으로 구동할 수 있는 온디바이스 AI 반도체 기술의 개발·확보가 시급

- 물리 환경을 예측·내재화할 수 있는 월드 모델은 피지컬 AI의 자율성과 계획 능력 향상을 위한 핵심 기술로, 국산화 및 선제적 연구개발이 요구
- 휴머노이드형, 자율주행형, 드론형, AGV & AMR형 등 피지컬 AI 분야를 포괄하는 연구개발 프레임 (e.g. 시뮬레이션 환경 조성 등)을 구축하고, 공동 R&D 및 오픈이노베이션 생태계를 중심으로 정부·산업·학계·연구기관 간 협력 강화 필요
- 연구 성과가 상용화로 이어질 수 있도록 실증 기반을 체계적으로 조성하고, 대규모 재정 지원과 세제 혜택, 초기 수요 보장 등 정책적 인센티브를 병행하며, 생태계 차원의 역량을 지속적으로 결집할 수 있는 전략적 지원 체계 마련이 필요

● (산업 생태계 및 인력양성) 피지컬 AI 산업 생태계 구축과 전문인력 양성 확대

- 스타트업과 중소기업이 자율주행차, 배송 드론, 서비스 로봇 등 다양한 피지컬 AI 기술을 자유롭게 실증할 수 있도록 테스트베드 및 규제 샌드박스 제도를 확대하고, 관련 규제를 완화하며 창업을 위한 재정 지원도 강화할 필요
- ‘피지컬 AI 얼라이언스’의 설립과 운영을 통해 대기업과 중소기업 간 협력을 촉진하여 대기업의 기술력과 스타트업의 혁신성을 결합하고, 유형별 특화 기술 개발과 실증 기반 확산을 동시에 추진할 수 있는 민간 주도형 생태계 조성 기반 마련
- 특히, 휴머노이드형에만 국한되지 않고 피지컬 AI의 다양한 구현 유형을 포괄하는 다층적 얼라이언스 (Multi-Layered Alliance)를 구성하여, 산업별 수요에 대응하는 기술 개발과 상용화를 체계적으로 연계할 수 있도록 지원 필요
- AI·로봇 분야의 경쟁력 강화를 위해 초·중·고 및 대학 교육 과정 확대, 산학협력 프로그램 활성화 등 최고 수준의 인재를 지속 양성하고, 근로자들을 위한 재교육 프로그램을 강화하여 노동시장 변화에 선제적으로 대응 필요
 - 피지컬 AI의 융복합적 특성을 고려하여 AI/기계·전기전자/인간-로봇 상호작용/윤리·안전 등 다학제 기반의 통합 교육 과정을 설계·확산하고, AI-로봇-시스템 통합 등 분야 간 경계를 넘는 트랙형 전공을 대학 및 특성화 대학원에 우선 도입할 필요
 - 산업현장 수요에 즉시 대응할 수 있도록 전문대학 및 기술사관학교 중심의 실습 기반 AI-로봇 통합 실무 교육 프로그램을 구축하고, 제조·물류·의료 등 각 산업 특화형 훈련 모델을 통해 직무 전환 및 고도화가 가능한 모듈형 재교육 체계 마련

● (법제 정비 및 국제 협력) AI·로봇 확산을 위한 법·제도 정비 및 글로벌 규범 정립 참여 확대

- 피지컬 AI 확산 과정에서 발생할 수 있는 로봇 안전 인증 기준, AI 윤리·안전성 확보, 자율 로봇에 대한 법적 책임 소재 명확화 등 법적·제도적 문제를 선제적으로 검토하고 개선 필요
- ISO, IEEE 등 국제기구가 주도하는 로봇 안전, 상호운용성, 개인정보 보호 표준 마련과 같은 국제 표준화 활동에 한국도 적극 참여하고 주요국과의 협력을 강화하여 글로벌 규제 조화 필요

참고문헌

- 과학기술정보통신부 (2025. 2. 20.), 인공지능 컴퓨팅 기반 확충을 통한 국가 인공지능 역량 강화로 인공지능 3대 강국 도약 실현
- 과학기술정보통신부 (2025. 3. 12.), 국가전략기술 육성에 '25년 6.8조 원 투자 및 기술패권 경쟁 주도권 확보에 집중
- 과학기술정보통신부 (2025. 3. 30.), 2025년 온디바이스 AI 서비스 실증·확산 사업
- 베이징시경제정보화국 (2023), 北京市政府投引基金于公北京机器人展基金管理机的公告
- 산업통상자원부 (2025), K-휴머노이드 연합 출범
- 소프트웨어정책연구소 (2025), 2024년 국내외 인공지능 산업 동향 연구
- 연합뉴스 (2025. 1. 30.), 中중제 갈라쇼 '휴머노이드 로봇 군무' 화제...장이머우 연출
- 정보통신기획평가원 (2025), 휴머노이드 로봇 시대, 글로벌 경쟁과 우리의 전략
- 조선일보 (2025. 4. 21.), 중국 로봇판 '딥시크 모먼트'... 세계 첫 마라톤 대회까지 열었다
- 중국 국무원 (2017), 院于印 新一代人工智能展的通知
- 중국 국무원 (2023), 工业和信息化部等十七部于印“机器人+”用行施方案的通知 工信部通(2022) 187
- 한국로봇산업진흥원 (2025), 글로벌 로봇산업 정책산업동향
- 한국전기연구원 (2017), 로봇/자동화용 스마트 액추에이터 개발
- AI4EU (2020), A simple guide to Physical AI
- Allianz Global Investors (2025), Created in China: Humanoid Robots
- Bank of America (2024), Next Gen Tech: Robots
- BMW Group (2024. 8. 6.), Successful test of humanoid robots at BMW Group Plant Spartanburg
- Bonsystems (2025. 4.), 로봇의 관절이 진화한다: 스마트 액추에이터
- Business Insider (2025. 4. 23.), Here's what we know about Tesla's robotaxi after Musk's earnings call
- Citi (2024), The Rise of AI Robots : Physical AI is Coming for You
- Daochang Liu, et al. (2025), Generative Physical AI in Vision: A Survey
- DeepMind (2025), Gemini Robotics brings AI into the physical world
- Figure AI (2025. 2. 20.), Helix: A Vision-Language-Action Model for Generalist Humanoid Control
- GM Insights (2024. 12.), Vehicle Networking Market Size
- Goldman Sachs (2024. 1. 8.), Humanoid Robot: The AI accelerant
- Grand View Research (2024), Humanoid Robot Market Size & Trends
- IEEE Spectrum (2024. 2. 29.), Figure Raises \$675M for Its Humanoid Robot Development
- IFR (2025), World Robotics R&D Program
- Intahchomphoo C, et al. (2024), Effects of Artificial Intelligence and Robotics on Human Labour: A Systematic Review
- Junming Fan, et al. (2025), Vision-language model-based human-robot collaboration for smart manufacturing: A state-of-the-art survey
- MarketsandMarkets (2024. 1.), Humanoid Robot Market Size, Share & Trends
- MarketsandMarkets (2024. 11.), Automated Guided Vehicle (AGV) Market Size, Share and Trends
- MarketsandMarkets (2024. 12.), Autonomous Mobile Robots (AMR) Market Size, Share and Trends

- MarketsandMarkets (2024. 12.), Self-driving Cars Market Size, Share & Growth Report
- MarketsandMarkets (2024. 5.), UAV (Drone) Market Size, Share, Trends and Growth Analysis
- Metatech Insights (2025. 2.), Autonomous Vehicles Market By Component
- Meti (2019), 로봇트による社革推進議 報告書
- Miriyev & Kovač (2020), Skills for physical artificial intelligence
- MIT Technology Review (2025), China's EV giants are betting big on humanoid robots
- Moravec, Hans (1988), Mind Children, Harvard University Press
- Morgan Stanley (2024), Humanoids: Investment Implications of Embodied AI
- Morgan Stanley (2025), The Humanoid 100: Mapping the Humanoid Robot Value Chain
- NDRC (2016), 机器人展 (2016-2020年) 布
- New Atlas (2025. 2. 12.), BYD to add self-driving smarts to all its electric cars
- Norbert Wiener (1948), CYBERNETICS
- NVIDIA (2024), NVIDIA Isaac GR00T Generalist Robot 00 Technology
- NVIDIA (2025a), CES 2025: AI Advancing at 'Incredible Pace,' NVIDIA CEO Says
- NVIDIA (2025b), Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI
- NVIDIA (2025c), NVIDIA Announces Isaac GR00T N1
- NVIDIA (2025d), Scale Synthetic Data and Physical AI Reasoning with NVIDIA Cosmos World Foundation Models
- NVIDIA (2025e), What is Physical AI?
- Research and Markets (2024. 12.), Commercial Drone Market Size, Share, Trend, Forecast, Competitive Analysis, and Growth Opportunity: 2024-2032
- Reuters (2024. 3. 1.), Robotics startup Figure raises \$675 mln from Microsoft, Nvidia, OpenAI
- Roya Firoozi, et al. (2023), Foundation models in robotics: Applications, challenges, and the future
- SJ Oks, et al. (2024), Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: A review, categorization and outlook
- Statista (2025), AI Robotics - Worldwide
- Steven Bohez, et al. (2017), Sensor Fusion for Robot Control through Deep Reinforcement Learning
- SVR (2022), MassRobotics, Pittsburgh Robotics Network and Silicon Valley Robotics Form U.S. Alliance of Robotics
- Clusters to Advocate for Growing Robotics Industry
- TechCrunch (2024. 8. 20.), Waymo is now giving 100,000 robotaxi rides a week
- TechCrunch (2025. 2. 13.), Apptroik, which makes humanoid robots, raises \$350M as category heats up
- TechCrunch (2025. 2. 7.), Tesla's Dojo, a timeline
- Tesla Mag (2024. 9. 5.), Tesla's Ambitious AI Roadmap: Major FSD Enhancements and Global Expansion
- Upadhyay (2025. 3. 6.), Navigating Liability in Autonomous Robots: Legal and Ethical Challenges in Manufacturing and Military Applications
- TOYOTA (2025), Intelligent automation software, T-ONE
- Turing Post (2024), Computer Vision's Great Leap Forward: From the 1990s to AlexNet
- TW (2025), Physical AI: Where gen AI, natural language, and robotics meet in the physical world
- Uber (2025), Driving autonomous forward
- Uber Investor (2025. 1. 6.), Uber Teams Up with NVIDIA to Accelerate Autonomous Mobility
- USAII (2025), Welcome to Physical AI - Innovation Beyond Imagination
- Waymo (2024. 10. 30.), Introducing Waymo's Research on an End-to-End Multimodal Model for Autonomous Driving
- WEF (2025), How we bring AI into the physical world with autonomous systems
- Yang Liu, et al. (2024), Aligning Cyber Space with Physical World: A Comprehensive Survey on Embodied AI
- Yanjiang Guo, et al. (2025), Improving Vision-Language-Action Model with Online Reinforcement Learning
- Yingbo Li, et al. (2021), Physical Artificial Intelligence: The Concept Expansion of Next-Generation AI
- Zhefan Xu, et al. (2025), LV-DOT: LiDAR-visual dynamic obstacle detection and tracking for autonomous robot navigation
- Zikai Zhao, et al. (2024), Exploring Embodied Intelligence in Soft Robotics: A Review
- Zoox (2024. 6. 5.), We're expanding testing to Austin and Miami
- 日本再生本部, (2015), "ロボット新略,"
- 閣府 (2024), ムーンショット目標3 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら習・行動し人と共生するロボットを現