

KISTI, AI와 HPC 기반으로 R&D 혁신을 선도하다.
KISTI leads the R&D Innovation based on AI and HPC.

S&T DATA

2025 Winter vol.11

피지컬 AI, 현실에서 실현되는 인공지능

*AI 생성 이미지

SPECIAL ISSUE

국내외 피지컬 AI 현황과 기술의 발전

피지컬 AI, 물리 세계를 인식하고 판단하여
행동하는 인공지능의 발전

디지털 트윈이 이끄는 자율이동로봇 산업의 혁신

도로 위 자율주행차, 하늘을 나는 드론,
도심을 누비는 배송로봇과 모빌리티 혁신

AI가 사람처럼 생각하고 행동하는 휴머노이드 로봇으로 진화하다

피지컬 AI 시대의 완성, 미래 핵심 기술의 확보

피지컬 AI 강국으로 가는 길, 국가 전략의 청사진

DEEP INSIGHT

피지컬 AI의 사회적 쟁점과 노동시장 영향

피지컬 AI: 우리에게 던지는 인문학적, 철학적 문제들

피지컬 AI와 노동시장 변화

Contents

S&T DATA

2025 Winter vol.11

KEY THEME

Physical AI,
From Virtual to the Real World



발행일 2025년 12월 17일
발행인 이식
발행처 한국과학기술정보연구원
www.kisti.re.kr
편집위원 김재홍 오동훈 이상욱 장진규
(가나다순) 조성배 최상국 최장원 황명권
기획/편집 KISTI 정책전략본부
최장원 황명권 이지민
대전 본원 대전광역시 유성구 대학로 245
T. 042-869-1234
서울 본원 서울특별시 동대문구 회기로 66
T. 02-3299-6114
디자인/제작 (주)디자인여백플러스

ISSN 2951-1062



CONTENTS

OPINION

- 피지컬 AI가 여는 로봇 전환의 시대 **04**
: 기술 혁신을 넘어 사회 혁신으로
김진오 한국시·로봇산업협회 회장, 로봇앤디자인 대표

LEADERS

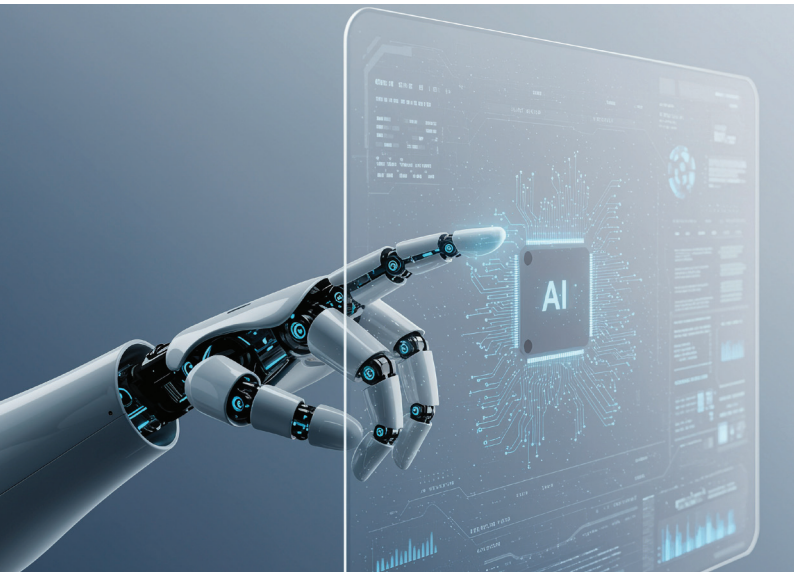
- 피지컬 AI, 인간의 가능성과 가치를 확장하다 **06**
데니스 홍 로봇공학자, RoMeLa연구소 소장

SPECIAL ISSUE

국내외 피지컬 AI 현황과 기술의 발전

- 피지컬 AI, 물리 세계를 인식하고 판단하여 **12**
행동하는 인공지능의 발전
김영훈 경희대학교 산업경영공학과 조교수

- 디지털 트윈이 이끄는 자율이동로봇 산업의 혁신 **16**
김도균 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 조교수



도로 위 자율주행차, 하늘을 나는 드론, 도심을 누비는 배송로봇과 모빌리티 혁신 최지웅 DGIST 전기전자컴퓨터공학과 교수	22
--	----

AI가 사람처럼 생각하고 행동하는 휴머노이드 로봇으로 진화하다 이이수 한국과학기술연구원 책임연구원	26
--	----

피지컬 AI 시대의 완성, 미래 핵심 기술의 확보 김창현 한국기계연구원 책임연구원	30
--	----

피지컬 AI 강국으로 가는 길, 국가 전략의 청사진 안성원 소프트웨어정책연구소 AI정책연구실장	36
---	----

DEEP INSIGHT

피지컬 AI의 사회적 쟁점과 노동시장 영향

피지컬 AI: 우리에게 던지는 인문학적, 철학적 문제들 홍성욱 서울대학교 과학학과 교수	42
---	----

피지컬 AI와 노동시장 변화 오삼일 한국은행 조사국 고용연구팀장	46
--	----

GLOBAL TRENDS

국내외 피지컬 AI 정책 동향 KISTI 정책전략본부 정책연구센터	52
---	----

BIZ INSIDE

로봇이 스스로 생각하는 공장, 제조의 두뇌를 만들다 다임리서치	56
---------------------------------------	----

로봇이 사람을 돕는 세상, 그 미래를 앞당기다 에이로봇	58
-----------------------------------	----

KISTI+	60
--------	----

피지컬 AI 시대, 사이버 보안 과제와 전략 방향

이지민 KISTI 정책연구센터 선임연구원
황명권 KISTI 정책연구센터 센터장
권태웅 KISTI 과학기술보안연구센터 선임기술원
이 준 KISTI 과학기술보안연구센터 센터장

피지컬 AI가 여는 로봇 전환의 시대

기술 혁신을 넘어
사회 혁신으로

김진오

한국AI·로봇산업협회 회장,
로봇앤디자인 대표



AI는 이제 데이터와 소프트웨어의 세계를 넘어 물리적 현실과 결합하며 ‘피지컬 AI(Physical AI)’라는 새로운 시대를 열고 있다. 인공지능이 언어와 이미지의 영역을 넘어 움직이고 느끼는 지능으로 확장되는 것이다. 자율주행차, 휴머노이드, 그리고 로봇 팩토리로 이어지는 이 흐름은 단순한 기술 발전을 넘어 산업의 구조와 사회의 질서를 재편하는 대전환이 되고 있다. 그리고 한국은 제조업 강국이자 고령화, 인력 부족, 생산성 정체라는 사회적 압력 속에서 최적의 실험장이 되고 있다. 피지컬 AI는 로봇의 활용 범위를 대폭 확장하게 도와주면서 이러한 문제를 해결하고 산업의 지속가능성을 담보하기 위해 반드시 필요한 기술 분야로 자리 잡았다.

가상에서 현실로, 피지컬 AI의 본질

피지컬 AI는 단순히 ‘AI가 탑재된 기계’가 아니다. 그 핵심은 가상 세계에서 학습과 시뮬레이션을 통해 현실을 재구성하는 능력에 있다. 과거의 AI가 언어·이미지 데이터에 머물렀다면, 피지컬 AI는 공간, 물리, 역학 정보를 통합해 현실에서 즉시 작동 가능한 로봇 지능을 만든다. 이런 피지컬 AI는 로봇의 활용 범위를 크게 확장할 것이다. 대표적인 변화는 다음 세 분야이다.

첫 번째, 휴머노이드는 우리가 만들어 온 산업용 로봇보다 훨씬 많은 자유도와 복잡성을 내재하고 있어서 기존 로봇에 적용되어

온 수학적 모델 기반의 인공지능만으로는 어렵다. 그래서 데이터 기반, 시뮬레이션 기반, 강화학습과 모방학습 기반의 새로운 피지컬 AI가 필요하다. 두 번째, 어려운 작업을 로봇이 하기 쉬운 또는 할 수 있는 작업으로 변경하는 데 시간과 노력이 많이 필요하기 때문에, 인간이 하는 작업을 그대로 로봇에게 시키려는 시도가 많이 진행되고 있다. 이 분야에서는 인간의 적응성과 유연성을 확보하려는 모방학습과 인간 수준의 지각, 학습, 언어, 판단, 행동 능력을 확보하려는 피지컬 AI가 등장하고 있다. 세 번째, 수많은 로봇과 기계들이 존재하는 공장 전체의 생산을 자율화하기 위해서는 그 복잡성을 다룰 수 있는 피지컬 AI의 역할이

중요해졌다. 가상 공간에서 모든 움직임을 예측 검증하는 디지털 트윈(Digital Twin) 기술과 공장의 구성 요소들을 통합하고 연결하는 지능이 포함된다.

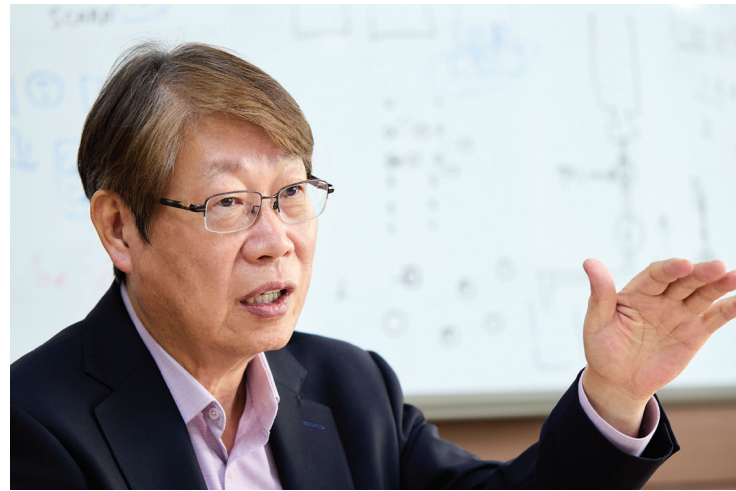
로봇학적 사고: 인간과 로봇, 수직에서 수평 관계로

위에서 언급한 세 가지 큰 변화 중에 휴머노이드와 모방학습은 로봇공학의 범위에 속한다. 이는 기술혁신 중심이며 고도화, 지능화를 추구하는 영역이다. 그러나 세 번째 변화는 로봇공학의 범위를 넘어서는 것이다. 로봇을 단순한 '도구'로 보는 공학적 관점에서 벗어나, 인간과 로봇이 함께 일하는 존재로 인식하는 '로봇학적 사고'가 필요하다. 로봇공학이 기능, 성능과 신뢰성 향상에 집중한다면, 로봇학은 인간-로봇-작업-공간-환경을 통합적으로 최적화하는 접근이다.

아마존 물류 공장이 대표적 사례다. 이런 물류창고에서는 로봇이 운반 작업(선반의 이동)은 잘 수행하지만, 정밀한 물품 피킹 작업은 하기 어렵다. 이때 로봇은 자신이 하기 어려운 작업을 '인간이 해줘야' 한다는 요청을 하는데, 로봇학에서는 이런 요청을 존중해 주고 로봇이 잘할 수 있는 작업에 집중하도록 해준다. 그래서 인간과 로봇이 역할을 분담하여 전체 작업을 완성하게 된다. 이렇게 인간과 로봇의 새로운 협업 모델을 만들어 내는 것이 로봇학적 사고의 핵심이다. 이 과정에서 인간은 창의적 판단과 문제 해결에 집중하고, 로봇은 반복적이고 정밀한 업무를 맡는다. 즉, '로봇다움'과 '인간다움'을 조화시키는 융합 설계가 핵심이다. 휴머노이드와 같은 로봇공학도 로봇학을 통해서 비로소 그 가치가 완성된다.

로봇학을 실현하는 아키텍처 혁신

로봇학을 실현하는 대표적인 방법론이 아키텍처 혁신(Architectural Innovation)이다. 존재하는 기술을 바탕으로 새로운 시장을 위해 인간-로봇-작업-공간-환경으로 구성되는 전체 시스템을 디자인하는 것이 목표다. 구성 요소들은 모두 다 최적 결합을 위한 변수가 된다. 인간의 역할이 바뀌고, 로봇의 역할이 재정의되며, 작업은 로봇이 수행할 수 있도록 재설계되고, 공간은 인간과 로봇에 적합하도록 재구성되거나 로봇에게 맞도록 최적화된다. 환경 역시 작업에 맞게 재설계되며 로봇은 이 환경에서 건널 수 있어야 한다. 여기서 로봇의 역할을 최대로 끌어 올리는 노력이 함께



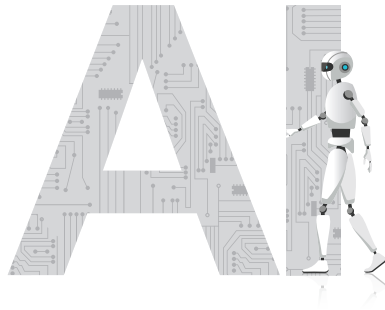
한국은 데이터와 제조, 문화와 기술이 융합된 독특한 토양도 갖고 있다. 이런 잠재력이 로봇을 기반으로 하는 사회 혁신으로 연결될 때, 피지컬 AI 시대의 진정한 선도국이 될 수 있다.

이루어진다. 이렇게 만들어진 인간-로봇-작업-공간-환경을 완전히 통합하기 위해서 피지컬 AI의 개발과 응용은 매우 중요하다. 이 로봇학의 구현은 기술 혁신의 최고 정점이면서 사회 혁신으로 연결되는 길목에 해당한다.

사회 혁신과 한국의 딥테크 경쟁력

경쟁력의 중심은 이제 '하이테크(High-Tech)'보다 '딥테크(Deep-Tech)', 즉 기술-제도-문화-사회가 복합적으로 얹힌 문제를 종합적으로 풀어내는 능력으로 이동하고 있다. 한국은 딥테크가 요구하는 종합적 문제 해결 능력, 그리고 다양한 영역을 융합하고, 사람과 기술, 제도와 시장을 하나의 시스템으로 엮어내는 능력을 보유하고 있다. 데이터와 제조, 문화와 기술이 융합된 독특한 토양도 갖고 있다. 이런 잠재력이 로봇을 기반으로 하는 사회 혁신으로 연결될 때, 피지컬 AI 시대의 진정한 선도국이 될 수 있다. 하나의 로봇이 탄생해서 사회 혁신까지 완성되는 긴 여정은 인내심과 용기 그리고 끊임없는 노력과 발전만으로 가능하다. 올바른 이해와 방향 설정을 바탕으로, 노력하고 버티는 기업과 국가가 반드시 승리한다. AI가 인간의 손끝을 넘어 물리 세계로 확장되는 지금, 우리는 기술의 진화를 사회의 진화로 이어갈 지혜를 모아야 한다.

피지컬 AI, 인간의 가능성과 가치를 확장하다



디지털 세계의 인공지능이 이제 현실로 걸어 나오고 있다. 피지컬 AI는 데이터 속 인공지능이 몸을 얻고, 실제 공간에서 스스로 판단하며 행동하는 새로운 진화 단계다. UCLA 로봇연구소 RoMeLa를 이끄는 데니스 홍 박사는 이러한 변화를 “인공지능이 세상과 부딪히며 성장하는 과정”이라고 말한다. 기술을 넘어 인간의 창의성과 감성을 탐구하는 그의 철학은 피지컬 AI 시대가 나아가야 할 방향을 제시한다.

UCLA 로봇연구소 RoMeLa에 대해 간단하게 소개 부탁드립니다.

UCLA의 RoMeLa(Robotics & Mechanisms Laboratory)는 지난 20여 년간 56종의 로봇, 그중에서도 16종의 휴머노이드 로봇을 개발하며 인간형 로봇 연구의 역사를 써왔습니다. 미국 최초의 성인형 휴머노이드 로봇 CHARLI, 오픈소스 기반의 DARwin-OP, 그리고 실제 축구를 하는 고성능 로봇 ARTEMIS 등이 대표적이지요. 저는 사람을 돕고 세상을 더 나은 곳으로 만들기 위해 로봇을 만듭니다. 로봇공학은 기술을 발전시키는 학문이 아니라 인간의 삶을 이해하고 개선하기 위한 수단이라고 믿습니다. 최근에는 로봇을 과학의 도구를 넘어 예술의 언어로 확장하려는 시도도 하고 있습니다. 인공지능이 세상을 계산하고 예측하는 시대일수록, 인간만이 느낄 수 있는 감정과 의미를 탐구하는 일이 중요하기 때문입니다. 저에게 예술은 기술의 끝이 아니라 그 너머에서 ‘무엇이 인간다운가’를 묻는 또 다른 방식의 탐구입니다. 결국 제가 만드는 로봇은 단순히 움직이는 기계가 아니라, 인간의 가능성과 본질을 비추는 존재입니다. 기술로 세상을 움직이고,

예술로 마음을 움직이는 것 — 그것이 저와 RoMeLa가 추구하는 방향입니다.

최근 AI의 중심축이 디지털에서 피지컬 AI로 이동하고 있습니다. 교수님은 피지컬 AI란 무엇이라고 정의하시나요?

피지컬 AI는 디지털 세계에 머물던 인공지능이 현실 세계로 걸어 나온 진화입니다. 이제 지능은 단순히 데이터를 계산하는 것을 넘어, 몸을 가지고 물리적 환경과 상호작용을 합니다. 디지털 AI가 텍스트나 이미지를 통해 세상을 ‘인지’했다면, 피지컬 AI는 중력과 마찰, 충돌을 통해 세상을 ‘경험’합니다. 예를 들어 물류창고에서 스스로 경로를 찾고, 건설 현장에서 사람과 협업하거나, 재난 현장에서 위험을 감수하는 로봇이 그렇습니다. 지능이 물리적 현실을 이해하고 적응하는 새로운 패러다임이지요. 결국 피지컬 AI는 인공지능의 또 다른 분야가 아닌, 지능이 현실의 복잡성과 불확실성을 스스로 다루는 다른 단계로의 진화이자, 인간과 기계의 경계를 다시 정의하는 전환점이라고 생각합니다.



데니스 홍

로봇공학자, RoMeLa연구소 소장

디지털 세계에 머무르던 AI가 물리적 세계로 확장되면서 마주치는 가장 큰 기술적 장벽은 무엇인가요?

가장 큰 벽은 '리얼리티 갭(Reality Gap)', 즉 연구실과 현실 사이의 간극이자 불확실성과 예측 불가능성의 간극입니다. 디지털 환경은 모든 조건이 통제되지만 현실은 예측 불가능한 변수(마찰, 조명, 기상, 장애물 등)로 가득하지요. 인간은 자연스럽게 이 변수에 적응하지만, 로봇에게는 복잡한 계산의 연속입니다. 이 갭을 극복하기 위해 알고리즘만이 아니라 하드웨어, 제어, 센서, 그리고 데이터 모두가 유기적으로 통합되어야 합니다. 그 예로 RoMeLa의 휴머노이드 아르테미스(ARTEMIS)는 실제 축구 경기장에서 넘어지고 다시 일어서며 균형과 접촉의 감각을 학습합니다. 또 인공 근육 구동기 BEAR(Backdrivable Electric Actuator for Robotics) 시스템은 로봇이 인간처럼 섬세하게 힘을 제어할 수 있도록 하고 있습니다. 피지컬 AI의 진보는 결국 알고리즘이 아니라 환경과의 관계를 얼마나 깊이 이해하느냐에 달려 있습니다.

그렇다면 이 과정에서 만나는 장벽을 극복하기 위해 어떤 접근이 필요할까요?

피지컬 AI의 가장 큰 과제인 '현실의 복잡성'을 해결하는 핵심은 실제 환경에서의 통합적 적응 능력을 기르는 것입니다. 알고리즘, 하드웨어, 센서, 데이터가 유기적으로 결합해 하나의 생명체처럼 반응하고 학습해야 하는 것이지요. 이를 위해선 로봇이 실제 환경에서 수없이 실패하고 배우는 실증 환경(Test Bed) 구축이 필수적이며, 완벽한 시뮬레이션보다 중요한 것은 실패와 회복의 반복을 통해 얻는 데이터입니다. 또한 안전성·신뢰성·유지보수성 등 운영적 측면을 함께 고려해야 합니다. 결국 연구실의 로봇이 산업 현장으로 나가기 위해 필요한 것은 '현실에 강한 지능'을 만드는 과정입니다.

피지컬 AI의 성능을 위해 필요한 현실 데이터와 데이터의 수집과 활용 과정에서 발생할 수 있는 문제점은 무엇일까요?

피지컬 AI가 실제 세계의 물리적 상호작용을 이해하기 위해서는 다층적인 물리 데이터가 필요합니다. 마찰, 충격, 온도, 중량, 관성, 표면 특성 등 현실 세상을 느끼고 대응하는 데 필요한 물리적 상호작용 데이터를 학습해야 합니다. 이를 위해 다중 모달



(Multimodal) 센서 데이터가 중요합니다. 시각·청각·촉각·관성 등의 정보를 종합해 실제 환경을 이해해야 복잡한 상황에서도 로봇이 안정적으로 판단하고 움직일 수 있게 됩니다. 그러나 현실 데이터는 수집이 어렵고 환경마다 조건이 달라 표준화가 쉽지 않습니다. 이러한 과제를 해결하기 위해서 정부와 산업계가 협력해 공유 가능한 개방형 데이터 인프라를 구축해야 합니다.

앞으로 피지컬 AI가 가장 먼저 상용화될 분야는 어디라고 보십니까? 또한 현재 상용화의 진행 단계와 한국이 가진 기술적 강점은 무엇인지, 그리고 실제 상용화가 될 경우 산업 현장에는 어떤 변화가 일어날 것으로 보시는지 궁금합니다.

물류, 제조, 건설, 재난 대응 등 물리적 접촉이 많은 산업이 피지컬 AI의 첫 시험장이 될 것이나 아직은 파일럿 단계이며, 안전성과

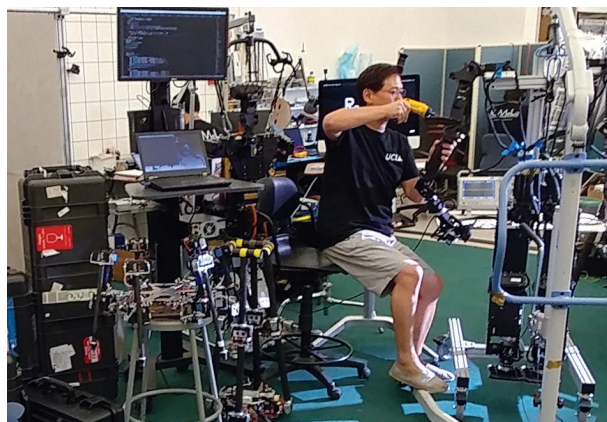
신뢰성 확보가 우선입니다. 장기적으로는 휴머노이드 로봇과 같은 범용 플랫폼이 피지컬 AI의 진화를 대표하게 될 가능성이 있습니다. 한국의 경우 정밀제어, 센서, 반도체, 배터리 기술에서 강점을 지니고 있어 분명한 기회가 있지만, 지금 중요한 것은 상용화 속도가 아니라 '어떻게 제대로 구현하느냐'이지요. 피지컬 AI는 단기간의 혁신이 아니라, AI가 현실의 복잡성을 배우며 서서히 성숙해 가는 여정이기 때문입니다. 그렇게 피지컬 AI가 상용화되면, 단기적으로는 위험 작업 대체, 반복 업무 자동화로 생산성과 안전성이 높아질 것입니다. 그러나 장기적으로는 산업 구조, 고용 형태, 인간의 일에 대한 인식까지 변화시킬 가능성이 있습니다. 생산성과 효율성이 높아지는 만큼, 시스템 오류나 사이버 보안 문제, 데이터 편향 등 또 새로운 형태의 위험과 리스크가 뒤따를 수 있습니다. 따라서 어떻게 책임 있게 설계하고 관리하느냐가 중요합니다. 결국, 기계가 사람을 대체하기보다 인간의 한계를 보완하고 역할을 재정의하는 것이 피지컬 AI이며, 진정한 혁신은 사람과 기계가 협력하며 서로를 이해하는 데서 비롯된다고 생각합니다.

그렇다면 피지컬 AI의 상용과 확산을 위해 정부와 기업, 연구기관은 어떤 역할을 해야 할까요?

피지컬 AI는 수많은 요소가 긴밀히 맞물려야 하기 때문에 무엇보다 생태계의 협력 구조가 중요합니다. 정부는 단기 성과 중심 지원보다, 실증 중심의 장기 인프라와 안전 인증 체계를 구축해야 합니다. 기업은 단순한 기술 도입보다 현장에 맞는 문제 정의와 운영 역량을 키워야 합니다. 스타트업은 실험과 혁신의 역할을 맡고, 연구기관은 과학적 기반을 제공해 이 시도가 지속되도록 연결해야 합니다. 또한 기술 안전성을 전제로 한 규제 샌드박스과 유연한 제도 적용이 필요합니다. 궁극적으로 정책은 기술 그 자체를 관리하기보다는, 사람과 기술이 함께 성장할 수 있는 환경에 초점을 맞춰야 한다고 생각합니다. 피지컬 AI의 발전은 국가 전략이 아니라 사회적 선택의 결과이기 때문입니다.

앞으로 교수님과 RoMeLa가 그리는 미래는 무엇인가요?

RoMeLa는 사람을 돕고 세상을 더 나은 방향으로 움직이는 기술을 만드는 것을 목표로 합니다. 이를 위해 최근 공개한 휴머노이드 아르테미스(ARTEMIS)의 오픈소스화를 시작으로 하드웨어와



피지컬 AI는 지능이 현실의 복잡성과 불확실성을 스스로 다루는 다른 단계로의 진화이자, 인간과 기계의 경계를 다시 정의하는 전환점입니다.

소프트웨어의 개방으로 지식과 기술을 공유하는 개방형 연구 생태계를 구축하고 있습니다. 연구 성과를 전 세계에 공유해 더 많은 연구자와 개발자들이 피지컬 AI 발전에 참여할 수 있도록 한 것이지요. 현재는 휴머노이드 손을 새로 개발 중이며, 이 역시 오픈소스로 공개할 예정입니다. 저는 기술의 경쟁보다 협력과 공유를 통한 성장이 진정한 혁신을 만든다고 믿습니다. 결국 우리가 추구하는 것은, 기술이 인간을 대신하는 세상이 아니라, 인간과 기술이 함께 배우고 성장하는 세상입니다. 그것이 피지컬 AI 시대에 우리가 지향해야 할 진정한 혁신이 아닐까요.

SPECIAL ISSUE

AI가 물리세계에서 실현되고 있는, 피지컬 AI 시대가 열렸다. 이미 상용화되었거나 실현 직전인 자율주행차나 배송 드론 등을 비롯해 스마트팩토리나 재난 현장까지 우리 사회 곳곳에서 그 모습을 쉽게 볼 수 있다.

S&T DATA 11호 Special Issue에서는 디지털 AI에서 피지컬 AI로 대전환이 일어나고 있는 현재의 기술 진화와 그에 따른 사회적·산업적 변화를 전망해 보고, 이를 기반으로 대전환의 시대에 우리에게 주어진 기회와 과제에 대해 짚어보고자 한다.

국내외 피지컬 AI 현황과 기술의 발전

김영훈 피지컬 AI, 물리 세계를 인식하고 판단하여 행동하는 인공지능의 발전

김도균 디지털 트윈이 이끄는 자율이동로봇 산업의 혁신

최지웅 도로 위 자율주행차, 하늘을 나는 드론, 도심을 누비는 배송로봇과 모빌리티 혁신

이이수 AI가 사람처럼 생각하고 행동하는 휴머노이드 로봇으로 진화하다

김창현 피지컬 AI 시대의 완성, 미래 핵심 기술의 확보

안성원 피지컬 AI 강국으로 가는 길, 국가 전략의 청사진



피지컬 AI, 물리 세계를 인식하고 판단하여 행동하는 인공지능의 발전

김영훈

경희대학교 산업경영공학과 조교수



1 피지컬 AI의 개념 및 인식적 기반

개념 정의 및 학계와 산업계에서의 인식 차이

피지컬 AI는 로봇이나 자율시스템이 물리적 환경을 인식(perceive), 이해(understand), 판단(reason)하고, 행동(act)할 수 있는 능력을 갖춘 인공지능을 의미한다. 예컨대 자율이동로봇, 제조 현장의 자동화기기, 스마트 시설 내 지능형 에이전트 등이 물리적 세계에서 '인식-판단-행동' 사이클을 갖는 형태로 여기에 속한다(NVIDIA, 2024).

학계에서는 전통적으로 로봇공학, 제어·컴퓨팅, 재료공학 등이 각기 물리시스템·센서·구동기 측면을 다뤘왔고, 산업계에서는 자동화·로지스틱스·스마트팩토리 적용 측면에서 '로봇+AI'라는 구조로 인식해 왔다. 이 둘 사이에는 용어의 차이와 인식의 갭이 존재한다. 즉, 학계에서는 물리시스템의 수학적 모델, 제어 이론, 컴퓨팅 아키텍처 등이 중심이었다면, 산업계에서는 응용·운영 측면에서 '얼마나 자동화·효율화 되었느냐'가 중심이었다(TechTarget, 2024).

인식-판단-행동 사이클 중심 구조

- **인식(Perception):** 센서(카메라, 라이다(LiDAR), IMU, 접촉/힘 센서 등)를 통해 물리환경의 상태를 획득한다.
- **판단(Reasoning):** 획득된 센서 데이터 및 가상센서·모델 정보를 바탕으로 환경을 해석하고, 목표 행동을 도출한다.

- **행동(Action):** 구동기(모터, 유압/공압 액추에이터 등)를 통해 실제 물리적 행위를 수행하고, 그 결과를 다시 센서가 모니터링하며 순환한다.

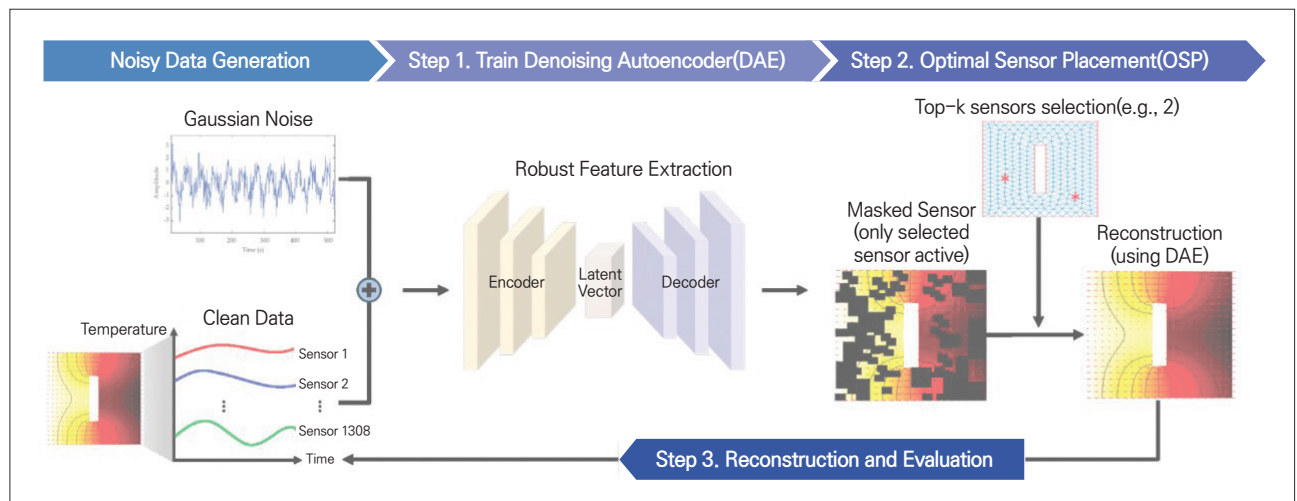
이 순환은 단순한 자동화 루프를 뛰어넘어, 환경 변화·불확실성·동적 변화 등을 고려하며 자율적으로 적응해 나가는 형태다(AI4Europe, 2025). 이런 관점에서 보면, 피지컬 AI는 기존의 데이터 기반 AI가 디지털 영역에서 처리해 온 '디지털 정형/비정형 데이터→디지털 결과 출력' 흐름을 넘어서, 물리세계의 법칙·물성·상호작용을 이해하고 처리하여 실제적 영향을 주는 지능 체계를 갖추게 된다(IBM, 2025). 이러한 구조적 관점이야말로 물리적 지능의 발전을 이해하는 핵심이며, 이후 구현기술 및 산업적 응용 또한 이 흐름 위에 전개된다.

2 피지컬 AI 구현의 핵심 기술

물리 동적 시스템 식별 및 가상 센서

물리적 환경에서 시스템의 동적 거동을 모델링하고 식별(System Identification)하는 것은 물리적 인식지능 구현의 기반이다. 예컨대 물체의 움직임, 마찰/충돌/힘/진동 특성 등을 센서 데이터로부터 모델링하고, 이를 기반으로 가상 센서(Virtual Sensor)를 통해 물리센서가 직접 가지지 못한 정보를 추론하는 기술이 중요하다.

그림 1 — 물리시뮬레이션 기반 가상센서 구축 개념도



출처: Yeo et al.(2025)

이러한 기술은 디지털 트윈(Digital Twin) 및 시뮬레이션-실험 통합 환경에서 특히 많이 사용된다(Agarwal, N. et al., 2025). 가상 센서를 통해 얻어지는 간접 데이터는 물리적 센서 비용·한계·실험 위험성을 줄이면서도 고차원의 정보(예: 내부 응력, 온도, 진동, 손상 상태, 잔여 수명 등)를 제공할 수 있다. <그림 1>은 최신 물리시뮬레이션 기반 가상센서 구축 개념을 설명하고 있다. 인공 신경망과 이산최적화 기법을 이용하면 최소한의 물리적 센서를 이용해 물리시뮬레이션 결과를 실시간으로 재구축할 수 있다.

데이터 융합 및 멀티모달 인식

센서 데이터(비전, 라이다, 온도/습도, 접촉/힘, 오디오 등)와 시뮬레이션/모델 기반 데이터(물리 모델 출력, 가상센서 결과 등)를 융합(Fusion)하는 기술이 필수적이다. 복잡한 물리환경에서는 단일 센서만으로 충분하지 않으며, 멀티모달 융합을 통해 인식의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있다. 일반적으로 멀티모달 융합 모형들은 학습 단계에서 멀티모달 데이터를 종합적으로 활용해 주어진 목표 달성 능력을 최대화하는 방식으로 최적화된다. 이를 통해 융합 모형들은 서로 다른 모달 데이터 간의 의미적인 충돌이 생기더라도 최적의 융합 결과를 도출하게 된다. 예컨대 제조라인에서 시각 정보와 접촉/힘 센서를 결합해 물체를 잡는 로봇팔이 더 정밀하고 정확하게 움직이는 식이다.

실험·시뮬레이션 및 모델 검증 기법

물리환경의 복잡성을 반영하기 위해서는 물리 기반 시뮬레이션(물성, 동역학, 충돌, 마찰 등)과 실제 실험 데이터를 함께 활용하는 검증 전략이 중요하다. 예컨대 디지털 트윈 모델을 구축하고, 센서 데이터를 통해 실제계 반응을 반영하며 주기적으로 모델을 업데이트하는 방식이 사용된다(Fraunhofer IESE, 2025). 또한, 시뮬레이션에서 생성된 합성데이터(Synthetic Data)를 인공지능 모형 학습에 활용하고, 현실 세계의 불확실성과 노이즈를

반영하는 강화학습(Reinforcement Learning) 방식이 물리적 지능 구현에 점점 더 많이 채택되고 있다(NVIDIA, 2024).

대규모 파운데이션 모델 및 물리지능 확장

최근에는 자연어·비전 모델에서 활용된 파운데이션 모델(Foundation Model) 개념이 물리세계 인식에도 적용되고 있다. 예컨대 NVIDIA Cosmos 플랫폼은 물리시뮬레이션 기반 합성데이터 생성 및 물리세계 학습을 지원하며, 물리세계를 인식·판단·행동으로 학습하는 ‘World Foundation Model(WFM)’ 개념이 등장하고 있다(NVIDIA, 2024). 이런 기술은 단일 로봇이나 실험 환경을 벗어나 다양한 물리환경을 처리할 수 있는 범용 물리지능으로 확장할 가능성을 열어준다. <표 1>은 최근 많이 사용하고 있는 LLM과 WFM을 몇 가지 속성의 기준으로 비교한 결과를 보여준다.

3 산업 및 정책 전망

산업 적용 사례

- **스마트 공장/물류창고:** 물류창고 AMR(Autonomous Mobile Robots) 및 로봇팔이 복합환경에서 유연하게 운용되며, 센서-인식-판단-행동 사이클이 반복되어 물류 처리를 자동화하고 있다.
- **자율이동차량(AV):** 자율주행차량이 주변 환경을 센서로 인식하고, 판단을 거쳐 물리적 제어를 수행하는 과정은 물리적 인공지능의 대표적인 사례다.
- **디지털 트윈 기반 예측정비 및 설비관리:** 예컨대 구조물 손상 탐지나 설비 잔여 수명 추정 등에 가상센서·디지털 트윈·머신러닝 융합이 적용되고 있다.
- **범용로봇 및 휴머노이드:** 최근 대형 AI 기업 및 로봇업체들이 물리세계 인자·조작이 가능한 로봇을 물리적 환경에 투입하기 위한 개발을 진행 중이다.

표 1 — LLM과 WFM의 개념적 비교

항목	LLM(Large Language Model)	WFM(World Foundation Model)
학습 대상	언어의 구조, 문법, 지식	공간, 시간, 물리 법칙
입력	텍스트 중심	비디오, Depth, 텍스트, 센서값 등
출력	자연어	장면 생성, 예측, 추론
활용 예	질의응답, 번역, 요약	시뮬레이션, 로봇 제어, 디지털 트윈

출처: 저자 작성



산업 전망

피지컬 AI는 향후 제조업·물류·헬스케어·스마트시티 등 여러 산업에서 차세대 지능형 물리시스템으로 자리매김할 가능성이 높다. 예컨대 산업운영 전문가들은 물리 AI가 자동화의 다음 분기점이며 로봇시스템이 인식·판단·행동을 통해 실제 인간 수준의 적응능력을 갖출 것으로 전망한다(Amazon, 2025). 또한, 대형 파운데이션 모델+시뮬레이션+합성데이터 기술이 결합해 물리 지능의 상용화 비용이 점차 낮아지고, 중소기업(SME)에도 접근성이 확대될 여지가 있다. 한국의 경우에도 제조업 강국으로서 로봇 및 스마트공장 도입이 활발하므로, 물리지능 적용을 통한 산업 경쟁력 제고 가능성이 크다.

정책·데이터 측면에서 고려 사항

- **데이터 확보 및 품질:** 물리환경 인식을 위한 센서데이터, 가상 센서/시뮬레이션데이터, 합성데이터 등이 핵심이다. 이들 데이터의 확보·표준화·신뢰성 확보가 중요하다.
- **안전·윤리·책임 문제:** 물리세계에서 로봇·시스템이 직접 행동하는 만큼, 안전성(충돌·손상 방지), 책임 문제(오작동 시 책임 소재), 윤리적 적용(인간과의 상호작용) 등이 중요하다.
- **표준화 및 평가체계:** 물리지능 시스템의 인식·판단·행동 능력, 적응능력, 신뢰성 등을 평가할 수 있는 표준화된 지표 및 테스트베드가 필요하다.
- **산업생태계·중소기업 지원:** 피지컬 AI 기술은 초기 개발비용이 크고 인프라 요구도 높으므로, 정부 차원의 지원(공유 인프라, 데이터 허브, 실험시설 등), 중소기업 진입장벽 완화 정책 및 지원이 필요하다.
- **사회적 수용성 및 일자리 변화:** 자동화 및 지능형 로봇이 활성화되면 기존의 단순노동 중심의 일자리가 줄어들 수 있다. 이에

따른 재교육·전환지원, 인간-로봇 협업 모델 설계 등이 관심받아야 한다.

데이터 거버넌스 및 생태계

피지컬 AI가 제대로 기능하기 위해서는 고정형 센서·이동형 센서·시뮬레이션 데이터·합성데이터가 유기적으로 결합해야 한다. 이 과정에서 데이터의 표준화(예: Open USD나 디지털 트윈 표준), 상호운용성, 데이터 품질·신뢰성, 프라이버시·보안 등이 키워드가 된다. 또한 물리지능 생태계에서는 장비 제조사, 로봇 제작사, 시스템 통합사, 데이터 서비스사, 시뮬레이션 엔진사 간의 협력이 필수적이며, 이를 기반으로 국내외 기술 표준과 플랫폼을 둘러싼 경쟁이 본격화되고 있다.

4 결론

본 고에서는 물리적 인식 지능(피지컬 AI)의 개념과 그 인식적 기반, 구현을 위한 핵심 기술 및 산업 적용 사례, 그리고 산업·정책·사회적 고려 사항을 요약해 제시하였다. 물리세계에서 ‘인식·판단·행동’하는 지능형 시스템은 더 이상 먼 미래가 아니며, 오늘날 시뮬레이션, 가상센서, 합성데이터, 파운데이션 모델 등이 이를 가능하게 하고 있다. 한국 역시 제조업·로봇 강국으로서 이 흐름에서 중요한 위치를 차지할 수 있으며, 데이터 거버넌스, 기술 생태계 구축, 인간-로봇 협업, 일자리 전환 대비 등 다학제적 준비가 요구된다.

참고문헌

- Agarwal, N. et al.(2025), "Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI." arXiv preprint
- AI4Europe(2025), "A Simple Guide to Physical AI"
- Amazon(2025), "Transforming the physical world with AI: the next frontier in intelligent automation"
- Fraunhofer IESE(2025), "Engineering Physical AI: How Digital Twinning and Simulation are Redefining Embedded Intelligence"
- IBM(2025), "The Age of Physical AI: Systems Trained on Real-World Constraints"
- NVIDIA(2024), "What Is Physical AI?" NVIDIA Glossary
- TechTarget(2024), "Physical AI Explained: Everything You Need to Know"
- Ye, Chaeyun and Lee, Ji-won and Kim, Jin-Gyun and Kim, Younghoon(2025), "Optimal Sensor Placement for Heat Transfer Digital Twin with Denoising Autoencoder and Discrete Optimization" Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5279709>

디지털 트윈이 이끄는 자율이동로봇 산업의 혁신

김도균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과 조교수



1 움직이는 지능, 피지컬 AI의 탄생

“뇌는 왜 생겼을까?”라는 물음에 신경생리학자 로돌포 리나스(Rodolfo Llinás)는 “뇌는 움직이기 위해 존재한다”고 답한다(Llinás, 2002). 그는 성체가 되어 한곳에 정착하면 뇌가 퇴화하는 멍게의 사례를 들어, 뇌의 기원이 신체의 움직임을 제어하기 위한 장치였음을 설명한다. 이 견해에 따르면 뇌는 단순한 신체 제어기관에서 출발해, 실제 행동에 앞서 결과를 머릿속에서 예측하고 시뮬레이션하는 시스템으로 진화했다. 다시 말해, 뇌는 움직임을 위해 미래를 예측하고 판단하는 능력을 갖추며 진화해 왔고, 이러한 능력이 생명체 지능의 핵심이라고도 볼 수 있다. 이런 시각에서 보면 AI의 진화도 같은 궤적 위에 있다. AI 역시 단순히 데이터를 처리하는 단계에서 벗어나, 미래 상태를 예측하고 그에 맞는 최적의 행동을 선택하는 피지컬 AI(Physical AI)로 진화하고 있는 것이다(Miriyev & Kovač, 2020). 현재 산업 현장에서는 이미 피지컬 AI가 탑재된 자율이동로봇이 활약 중이다. 이들은 단순 자동화를 넘어, 주변 환경을 감지하고, 다음 상황을 예상해 행동을 통제하는 예측기반 의사결정 시스템으로 계속해서 진화하고 있다.

2 산업 전반으로 확산하는 자율이동로봇 - AGV와 AMR

자율이동로봇은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. AGV(Automated Guided Vehicle)는 지정된 경로를 따라 이동하는 자동유도차이고, AMR(Autonomous Mobile Robot)은 라이다(LiDAR), 카메라

및 거리 센서 등을 활용해 공간과 주변 환경을 인식해 스스로 경로를 개척하는 자율형 로봇이다. 제조업과 같이 고정된 공정 구조가 있다면 AGV가 경제적으로 효율적이지만, 변동성이 큰 물류나 리테일 분야에서는 AMR이 빠르게 확산 중이다<그림 1>. 건설 현장은 지형 변화와 외부 변동성이 크고, 다양한 장비가 동시에 움직이는 만큼 복잡성이 특히 높다. 최근에는 스마트건설 실증사업을 통해 자율 중장비, 물류용 AMR, 드론 간 협업이 추진되고 있으며, 비정형 지형에서의 다중 로봇 협업과 상황 인지 기술이 새로운 성장축으로 부상하고 있다(Oyekanlu et al, 2020; Liu et al., 2024).

시장조사기관에 따르면 AGV의 글로벌 시장 규모는 2024년 25억 6천만 달러에서 2029년 37억 8천만 달러로 성장할 전망이다이며, 연평균 성장률(CAGR)은 8.1%에 이른다(Markets and Markets¹, 2024). 그러나 최근 제조·물류 현장은 주문 변동, 동선 변경, 사람과의 협업, 레이아웃 개편 등이 잦아지고 있어, AGV에서 AMR로의 전환이 가속화되고 있다. 『Markets and Markets』 보고서에 따르면 글로벌 AMR 시장은 2025년 22억 5천만 달러에서 2030년 45억 6천만 달러로 성장할 전망으로, 연평균 성장률이 15.1%에 달해 AGV보다 두 배 이상 빠른 성장세를 보일 것으로 예측된다(Markets and Markets², 2024).

지역별로는 아시아-태평양(Asia-Pacific) 지역이 가장 두드러진 성장세를 보인다. AMR시장은 2024년 전체 자율이동로봇 시장의 43.3%를 차지했으며, 2030년까지 연평균 31.2%의 높은 성장률을 보일 것으로 예상된다. 이는 한국·중국·일본을 중심으로 한 제조 자동화의 고도화와 전자상거래 시장의 급속한 확산이 맞물린 결과다. 특히 한국의 AMR 시장은 2024년 약 1억 4,340만

그림 1 — 아마존 물류센터의 자율이동로봇 AGV/AMR



출처: Amazon Robotics(<https://www.aboutamazon.com/news/tag/robotics>)

달러에서 2030년 3억 8,970만 달러로 성장할 것으로 예측되며, 연평균 17.9%로 글로벌 평균을 웃도는 확장세를 보일 것으로 예측된다(Mordor Intelligence, 2024; Grand View Research, 2024). AMR은 복잡한 공간에서도 스스로 상황을 인식하고 최적 경로를 찾아 주행할 수 있는 자율성 덕분에, 제조·물류를 넘어 의료·서비스·리테일 등 비정형 산업 영역으로 빠르게 확산하고 있다. 이러한 확산은 단순 운반을 넘어 작업 단위의 자동화와 협업 지능화로 발전하고 있으며, 대표적인 사례로는 자동 피킹 시스템(Goods-to-Person 로봇), 자율주행 지게차, 분류 로봇 등이 있다. 산업별 특성과 작업 환경에 따라 로봇의 적재 능력, 주행 방식, 운용 전략이 달라지면서, 기업들은 현장의 요구 조건에 맞는 최적 모델과 운영 구조를 선택·구축하는 방향으로 진화하고 있다.

3 자율이동로봇의 기술적 진화와 도전 과제

자율이동로봇이 물류와 제조 자동화의 핵심 주체로 부상한 배경에는 센서 융합, SLAM(동시 위치추정·지도화), 실시간 경로 계획 등 핵심 기술의 급속한 발전이 있다. LiDAR(레이저 스캐너), 카메라, IMU(가속·각속도계) 등 다양한 센서를 통합해 복잡한 환경에서도 장애물을 안정적으로 인식하고, DWA(Dynamic Window Approach)¹⁾나 MPC(Model Predictive Control)²⁾ 같은 동적 회피·경로 보정 알고리즘을 통해 스스로 최적의 경로를 탐색할 수 있다. 이러한 기술은 창고관리(WMS), 실행(WES), 관제(FMS) 시스템과 결합하며, 주문 변동이나 레이아웃 변경에도 생산성과 가동률을 유지할 수 있게 했다. 실제로 CJ대한통운은 군포센터에 AMR 128대를 도입해 일평균 3만 건의 주문을 처리하고 피킹 효율이 33% 향상했으며(Geek+, 2023), DHL Supply Chain은 AMR과 실행 플랫폼 통합으로 주문 정확도와 사이클 타임을 50% 이상 개선했다(Supply Chain247, 2023). AMR의 보급이 확산하면서 다양한 제조사나 모델 간 협업과 통합 운용이 새로운 과제로 부상했다. 이를 해결하기 위해 VDA

5050³⁾은 여러 브랜드의 AGV/AMR이 하나의 플릿 매니저와 통신할 수 있도록 제어 인터페이스를 표준화했다(VDA 5050, 2025). 한편 MassRobotics 표준⁴⁾은 복수의 로봇이 동일 공간에서 위치·상태 정보를 공유하도록 해, 상호 인식과 협업을 지원한다(MassRobotics, 2021). 두 표준은 제어(VDA 5050)와 정보 공유(MassRobotics) 측면에서 상호보완적으로 작동 가능하며, 산업 현장의 상호운용성을 높이는 기반이 되고 있다. 다만 로봇 간 의사결정 규칙과 동작 의미를 통일하는 단계까지는 아직 도달하지 못해, 완전한 상호운용성을 확보하기에는 한계가 남아 있다. 이와 함께 산업용 로봇과 자동화 시스템의 상호운용성을 확보하기 위해 통신·제어 표준화도 빠르게 진전되고 있다. OPC UA over TSN⁵⁾은 OPC Foundation이 제안한 산업용 이더넷 통신 규격으로, TSN(Time-Sensitive Networking) 기술을 기반으로 네트워크의 실시간성과 결정론적 통신을 보장하며, 다양한 제조사의 제어기와 설비가 공통 인프라 위에서 상호 호환되도록 설계되었다(OPC Foundation, 2018). 여기에 5G 초저지연 통신과 엣지 컴퓨팅의 결합은 산업 현장에서 발생하는 무선 지연과 변동성을 최소화하여, 실시간 제어·안전 대응 속도를 높이고, 로봇 및 설비의 협업 운용 신뢰성을 향상시키는 핵심 인프라로 평가된다(Jun, 2020).

더 나아가 안전·신뢰성 확보를 위한 제도적 기반도 빠르게 구축되고 있다. ISO 3691-4(무인 트럭 안전), RIA/ANSI R15.08(시스템 안전), ISO 13849-1 및 IEC 62061(기능 안전), IEC 62443(사이버보안) 등이 대표적이다. 이들 표준은 공통으로 운영 투명성과 안정성 검증 가능성을 핵심 원칙으로 삼아, 자율이동로봇의 안전성을 제도적으로 뒷받침하고 있다.

기술이 빠르게 발전했지만, 검증 체계의 미비는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 여기에 복잡한 산업 환경에서 로봇의 성능과 안정성을 객관적으로 평가할 공인 기준과 인증 체계도 아직 초기 단계다. 더욱이 고도화되지 않은 피지컬 AI의 한계는

1) 자율주행인지(DWA, Dynamic Window Approach): 로봇 공학에서 자율 이동 로봇의 로컬 플래닝(Local Planning)에 사용되는 대표적인 알고리즘 중 하나. 이 알고리즘은 로봇이 실시간으로 주변 환경을 고려하여 장애물을 회피하고 목표 지점으로 안전하게 이동할 수 있도록 경로를 계획

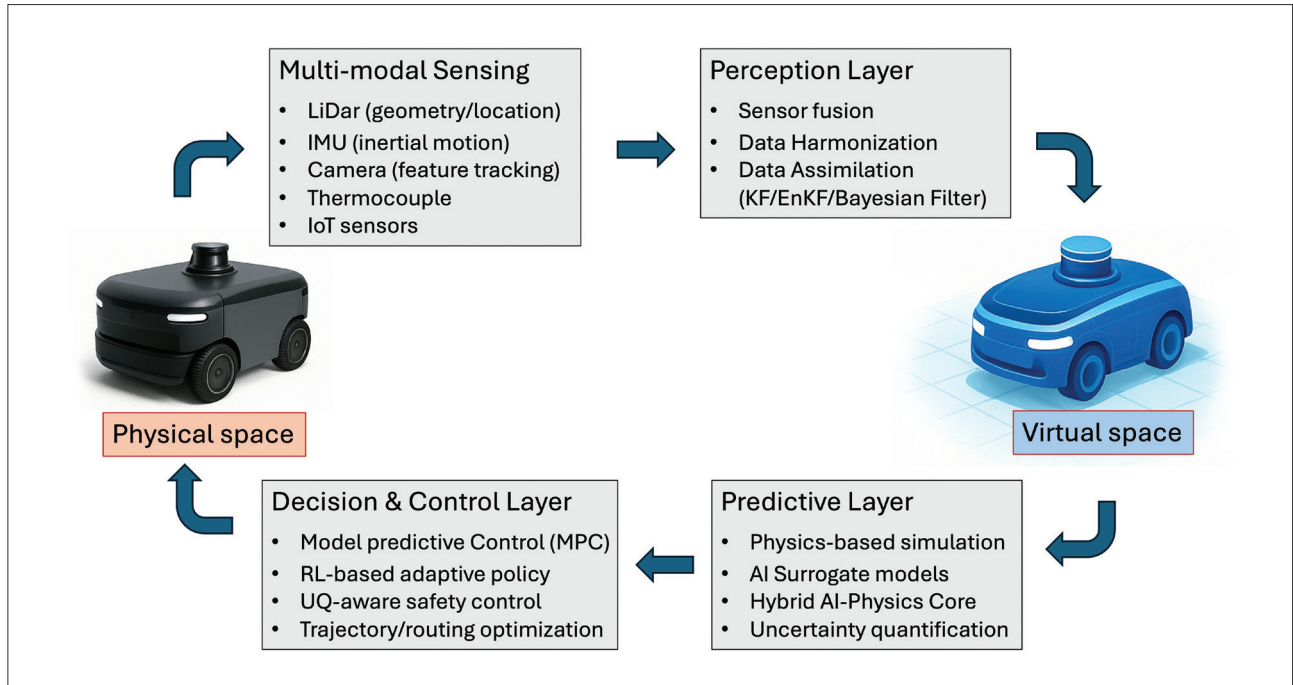
2) 모델예측제어(MPC, Model Predictive Control): 시스템의 미래 상태를 예측하고 최적의 제어 입력을 실시간으로 계산하는 제어기

3) VDA 5050: 자율주행 물류 로봇과 관제 시스템(상위 Fleet Management System) 간의 통신을 표준화한 국제 인터페이스 규격. 독일자동차산업협회(Verein der Automobilindustrie)와 독일기계설비산업협회(Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau)에서 공동 개발하여 독일 자동차 산업과 물류 자동화 분야에서 시작해 현재는 유럽, 아시아 스마트팩토리, 항만 자동화, 창고 로봇 시스템의 핵심 표준으로 자리 잡고 있음

4) MassRobotics 표준: 미국 매사추세츠 로봇 허브이자 독립적인 비영리 센터인 MassRobotics가 발표한 MassRobotics 상호운용성 표준. 다양한 유형의 로봇이 상태 정보와 작동 규칙 등을 조정하거나 정보를 공유하는 표준

5) OPC UA over TSN: 산업용 자동화에서 OPC UA 프로토콜을 TSN(Time Sensitive Networking) 기반의 이더넷 환경에서 구현하는 방식

그림 2 — Digital Twin closed-loop frame



출처: 저자 작성

그림 3 — NAVER 1784의 디지털 트윈 기반 로봇 운영 인프라

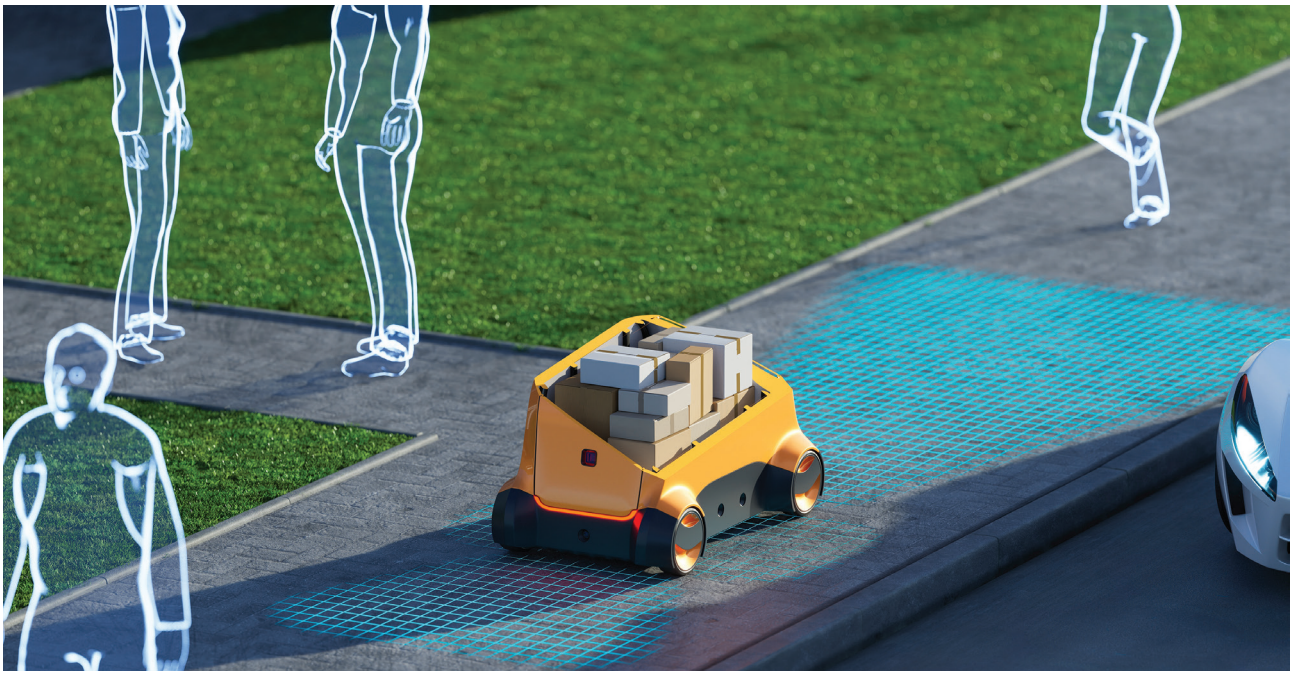


출처: NAVER Labs(<https://www.naverlabs.com>)

인간과 로봇이 공존하는 현장에서 안전 문제를 초래할 수 있다. 예기치 못한 장애물이나 환경 급변 시 인식 오류와 제어 불안정 이 나타나고, 금속 구조물이나 다층 공간에서는 통신 지연과 패킷 손실이 발생할 위험도 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해서는 단순 감속·정지 로직을 넘어 인간 행동을 예측하는 정교한 물리 모델과 함께, 책임 주체를 명확히 하는 제도적 장치가 병행될 필요가 있다.

4 디지털 트윈을 통한 산업 패러다임 변화

자율이동로봇 시스템은 센서 인지, 경로 계획, 제어, 통신 등이 실시간으로 맞물리는 고복잡도 구조로 되어 있다. 더구나 작업 환경은 수시로 변하고 사람과의 상호작용도 빈번해, 수많은 변수를 실제 실험으로 탐색하고 검증하기엔 시간과 비용이 막대하다. 이러한 한계를 극복하기 위한 핵심기술로 디지털 트윈(Digital Twin)이 주목받고 있다. 디지털 트윈은 현실의 설비·공장·



로봇을 단순히 가상 공간에 모사하는 수준을 넘어, 물리 공간과 가상 공간이 실시간으로 데이터를 주고받으며 동기화되는 양방향 구조를 갖는 현실세계의 가상 복제 공간이다(Thelen et al. 2022). 센서와 시스템에서 유입되는 데이터를 통해 물리 모델이 지속적으로 갱신되고, 그 모델이 계산한 미래 상태와 위험도는 다시 실제 시스템의 제어·운영에 반영되어 하나의 폐루프를 이루는 방식이다<그림2>. 이 구조는 설계-운영-검증을 분절된 단계가 아니라 하나의 연속된 과정으로 통합해, 실제 실험이 어려운 다양한 상황을 가상 공간에서 탐색하고 최적화할 수 있게 만든다.

생물의 뇌가 생존을 위해 움직임을 예측하고 판단하는 능력을 발달시켜 왔다면, 자율이동로봇의 디지털 트윈은 이러한 지능 구조를 가상 공간에서 확장해 로봇의 의사결정과 동작 선택을 지원하는 상위 지능층으로 기능한다. 디지털 트윈은 다양한 센서와 시스템에서 들어오는 이종 데이터를 실시간으로 통합해 현재 상태를 추정하고(perception layer, <그림2>), 물리 기반 시뮬레이션과 데이터 기반 AI 모델을 결합해 가까운 미래의 상태를 예측한다(predictive layer, <그림2>). 이 예측은 개별 로봇의 경로 재계획, 속도 조정, 충돌 회피뿐 아니라 다중 로봇의 동선 최적화, 작업 스케줄링, 에너지 관리 등 시스템 차원의 의사결정으로

이어진다(decision & control layer, <그림2>). 이후 이 결정이 다시 현실의 데이터로 되돌아와 모델을 업데이트하고 정책을 보정하는 순환 구조가 만들어지며, 이 과정을 통해 디지털 트윈은 단순한 시뮬레이터를 넘어 예측-판단-행동-학습이 순환하는 피지컬 AI의 실질적 구현체로 작동하게 된다.

이러한 기술적 기반 위에서 디지털 트윈 생태계는 빠르게 확장되고 있다. NVIDIA는 Omniverse라고 부르는 파운데이션 모델을 중심으로 공장·물류센터·로봇 운영 환경을 정밀하게 재현하는 산업형 디지털 트윈 엔진을 구축하고, 전주기 협업을 지원하는 플랫폼을 제공하고 있다(NVIDIA¹). 이러한 플랫폼 위에서 BMW는 Factory Explorer를 통해 설계·생산·로봇·비전팀이 단일 디지털 공장에서 협업할 수 있는 체계를 구축하고 있으며(NVIDIA², 2025), 현대자동차는 Omniverse 및 Cosmos 플랫폼을 기반으로 공정 설계·로봇 배치·작업 동선을 통합 검증하는 공장 디지털 트윈을 운영 계획 중이다(Hyundai Motor Group, 2024). Foxconn과 Wistron은 생산라인 혼잡도 분석과 로봇-인력 협업 검증에 디지털 트윈을 활용해 제조 효율을 높이고 있고, Amazon Robotics는 물류센터의 자율이동로봇 운영 전략을 대규모 가상 시뮬레이션으로 검증한 뒤 실제 운영에 반영하는 프로세스를 구축하였다(NVIDIA³, 2024; NVIDIA⁴, 2025;

NVIDIA⁵, 2025). 국내에서는 네이버가 1784 사옥에서 다양한 제조사의 자율이동로봇을 안정적으로 운용하기 위해, 디지털 트윈 기반 멀티 로봇 관제 플랫폼인 ARC(Autonomous Robot Control)를 구축하였다(NAVER 1784, <그림3>). ARC는 로봇 센서·시설물(엘리베이터·자동문)·사람 흐름 정보를 실시간으로 통합해 로봇의 위치와 상태를 관리하고, 이를 바탕으로 멀티 로봇 트래픽 제어, 충돌 방지, 대기열 관리 등을 자동화하는 시스템으로, 디지털 트윈과 실시간 관제 기술이 결합한 대표적 운영형 플랫폼이다.

디지털 트윈의 확산은 산업 운영이 더 이상 물리 세계에만 의존하지 않고, 가상 공간의 예측·검증을 일상적인 의사결정에 통합하는 새로운 패러다임으로 이동하고 있음을 보여준다. 생산라인 설계, 로봇 동작 계획, 안전 검증, 품질 분석이 단일한 디지털 공간에서 연결되면 개발 주기는 단축되고 운영의 안정성은 높아지며, 제품·설비·로봇·사람이 하나의 지능형 생태계처럼 협업하는 산업 구조가 형성된다. 이는 Industry 4.0의 자동화·연결을 넘어, 인간 중심성과 지속가능성, 회복탄력성을 중시하는 Industry 5.0으로의 전환을 뒷받침하는 중요한 기반이 된다.

그러나 이러한 변화가 산업 전반으로 확산되기 위해서 해결해야 할 과제도 적지 않다. 고정밀 물리 모델과 AI 모델을 결합한 하이브리드 예측 기술의 실시간 운용, 이중 데이터를 신뢰성 있게 통합·동기화하는 IIoT·엣지 컴퓨팅 인프라, 그리고 가상 검증 결과를 실제 안전·품질 인증에 반영하기 위한 제도적 기준은 아직 충분히 성숙하지 않았다. 따라서 디지털 트윈의 구현을 위해서는 물리·응용수학·기계·컴퓨터·전자제어가 만나는 학제 간 연구와, 산업 시스템 간 상호운용성을 높이는 국제 표준의 정착이 필수적이다. 또한 가상 검증을 공식 인증 절차의 일부로 수용할 수 있는 디지털 인증(Digital Qualification) 체계에 대한 대비도 시급하며, 이를 실행할 융합형 전문 인력을 양성하는 일이 국가 경쟁력의 핵심 과제가 될 것이다.

Industry 5.0이 지향하는 것은 인간·기계·환경이 조화롭게 협업하는 지능형 산업 생태계다. 디지털 트윈은 그 생태계를 설계하고 운영하는 핵심 인프라 중 하나로 자리해 가고 있으며, 자율이동로봇은 이러한 전환이 빠르게 드러나는 대표 사례다. 앞으로 디지털 트윈은 산업의 미래 방향을 결정짓는 중요한 기술 기반으로, 지능형 산업 생태계로의 진화를 촉진하는 중심축 역할을 하게 될 것이다.

참고문헌

- Borrelli, M. et al.(2025), "EU AI Act, Harnessing Digital-Twin Technology: How the innovative AI legislation provides regulatory safeguards to support the synergy between digital twin technology and general purpose AI systems," AI & Partners
- Geek+ (2023), Geek+ Official Blog, <https://blog.geekplus.com/ko/cj>
- Grand View Research(2024), "South Korea Autonomous Mobile Robots Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2024-2030." Grand View Research
- Hyundai Motor Group(2024), <https://www.hyundaimotorgroup.com/news/CONT0000000000167615>
- Jun, S.(2020), "Ultra-Low-Latency Services in 5G Systems." ETRI Journal
- Liu, Y., Wang, S., Xie, Y., Xiong, T., & Wu, M.(2024), "A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots." Sensors, 24(4), 1222
- Llinás, R. R.(2002), I of the Vortex: From Neurons to Self. MIT Press: Cambridge, MA
- Markets and Markets¹(2024), "Automated Guided Vehicle(AGV) Market Size, Share and Trends - 2024-2029". MarketsandMarkets
- Markets and Markets²(2024), "Automated Mobile Robots(AMR) Market Size, Share and Trends - 2025-2030". MarketsandMarkets
- MassRobotics(2021), AMR Interoperability Standard 1.0: Implementation Steps. MassRobotics
- Miriyev, A. & Kovač, M.(2020), "Skills for Physical Artificial Intelligence." Nature Machine Intelligence, 2, pp. 658-664
- Mordor Intelligence(2024), "Mobile Robots Market Size(2024-2030): Trends, Growth, and Forecasts." Mordor Intelligence
- NAVER 1784, <https://1784.navercorp.com>
- NVIDIA¹, <https://developer.nvidia.com/omniverse>
- NVIDIA²(2025), https://www.nvidia.com/en-us/customer-stories/bmw-group-develop/?utm_source=chatgpt.com
- NVIDIA³(2024), <https://www.nvidia.com/en-us/use-cases/industrial-facility-digital-twins/>
- NVIDIA⁴(2025), https://blogs.nvidia.com/blog/omniverse-digital-twins-taiwan-manufacturers-physical-ai/?utm_source=chatgpt.com
- NVIDIA⁵(2025), <https://resources.nvidia.com/en-us/omniverse-industrial-digital-twins/amazon-robotics>
- OPC Foundation(2018), "OPC UA Includes TSN: Field-Level Integration and End-to-End Interoperability." OPC Connect
- Oyëkanlu, E. A., Smith, A. C., Thomas, W., Mulroy, G., Hitesh, D., Liu, W.(2020), "A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications." IEEE Access, 8, Article 30357
- SupplyChain 247(2023), <https://www.supplychain247.com/paper/how-dhl-achieved-50-higher-order-accuracy-with-locus-robotics-amrs>
- Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B., Todd, M., Mahadevan, S., Hu, C., Hu, Z., "A Comprehensive Review of Digital Twin - Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies.", Struct Multidisc Optim 65, 354(2022), <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4>.
- VDA 5050 Version 2.1.0(2025), Interface for the communication between automated guided vehicles(AGVs) and a master control system. VDA

도로 위 자율주행차, 하늘을 나는 드론, 도심을 누비는 배송로봇과 모빌리티 혁신

최지웅

DGIST 전기전자컴퓨터공학과 교수



1

교통·물류 혁신의 현재: 자율주행차·드론·배송로봇의 상용화, 어디까지 왔다

자율주행 로보택시 분야에서는 미국과 중국이 완전 무인 로보택시 상용화에 가장 앞서 있다. 미국은 웨이모(Waymo)와 GM 크루즈(Cruise)가 샌프란시스코 등에서 레벨4 서비스¹⁾를 운영하며 막대한 주행 데이터를 축적했다(코리아비즈니스리뷰, 2025). 중국 역시 바이두(Apollo Go), 위라이드(WeRide) 등이 10여 개 도시에서 공격적으로 운영 중이다(CEO스코어데일리, 2025). 이는 양국 빅테크 기업들의 막대한 투자와 데이터 확보의 결과다. 반면 한국은 아직 제한된 시범 운행 단계로, 카카오모빌리티 등이 테스트 중이나 택시 면허 규제와 안전 우려로 상용화는 더딘

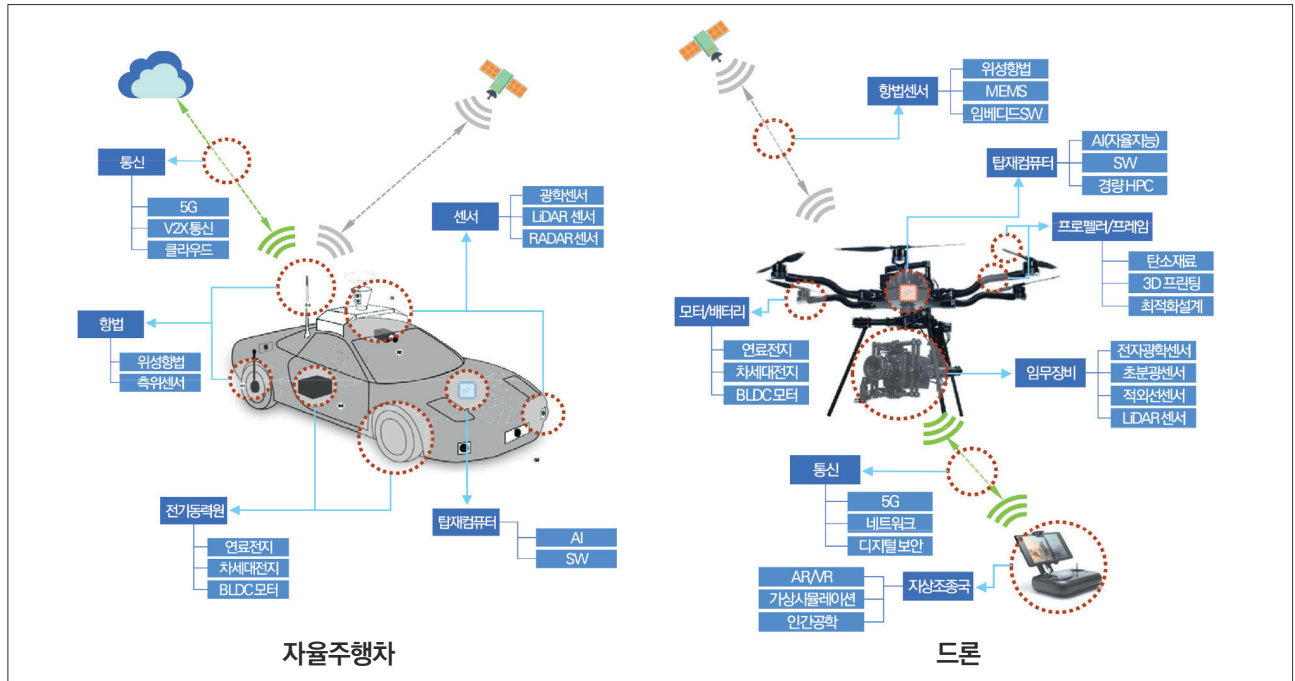
상황이다(코리아비즈니스리뷰, 2025; CEO스코어데일리, 2025). 정부가 2027년 레벨4 상용화를 목표로 하나, 선도국 대비 데이터 축적이 부족하여 갈 길이 먼 상태다.

드론 배송은 전 세계적으로 빠르게 현실화되고 있으며, 2032년에는 182억 달러 규모로 폭발적 성장이 예상된다(이코리아, 2025). 미국은 알파벳(구글) 산하의 Wing이 2019년 첫 승인을 받은 후 아마존, 월마트 등도 본격화하고 있다. 중국은 메이투안(Meituan)이 2024년까지 45만 건 이상 배송을 완료했으며, 정부 지원 아래 저고도 드론교통관리시스템(UTM)²⁾과 드론 제조 시장을 주도하고 있다(Chinadaily, 2005). 한국도 'K-드론배송' 프로젝트를 통해 2025년 166개 구역으로 시범 사업을 확대하고 2024년 1월 법적 기반도 마련했다(이코리아, 2025). 다만 아직

1) 레벨 4: 미국 자동차공학회(SAE)에서 정의한 운전자 개입 수준과 차량의 자율성 범위를 나타내는 자율주행 기술 등급(0단계~5단계) 중 5번째 단계로 특정 조건 및 제한된 지역 내에서 운전자 개입 없이 자율 주행이 가능하며, 비상 상황에도 차량이 스스로 대처 가능함

2) 저고도 드론교통관리시스템(UTM, Unmanned aircraft system Traffic Management): 고도 150m 이하의 저고도를 운항하는 자체 중량 150kg 이하의 무인기를 대상으로 안전하고 효율적으로 비행할 수 있도록 교통정보를 제공하고 관리하는 시스템

그림 1 — 미래형 무인이동체



출처: 과학기술정보통신부(2018), 무인이동체 기술혁신과 성장 10개년 로드맵

제한된 테스트 단계이며 시계 밖 비행(BVLOS)³⁾ 허용 등 규제 과제가 남아 있다.

자율주행 배달로봇은 라스트 마일(Last-mile) 배송 혁신을 이끌고 있다. 미국과 유럽에서는 스타십(Starship) 등의 소형 로봇이 카메라·라이다(LiDAR)·초음파 센서로 장애물을 피해 자율주행을 한다. 중국(JD닷컴, 알리바바)도 대학, 아파트 단지 등에서 고정밀 지도와 5G 원격 모니터링을 접목해 시범 운영 중이다. 한국(배달의민족, LG) 역시 실증을 진행했으며, 2023년 말 정부가 합법적 생활물류 수단으로 인정했다. 궁극적으로 자율주행차-드론-로봇이 연계된 통합 배송체계가 새로운 물류 패러다임으로 자리 잡을 것으로 예상된다.

2 자율주행을 움직이는 기술: 라이다부터 AI까지

자율주행 기술 발전의 배경에는 센서, 통신, 인공지능(AI) 제어 기술의 비약적 발전이 있다. 핵심 센서는 라이다, 카메라, 레이더

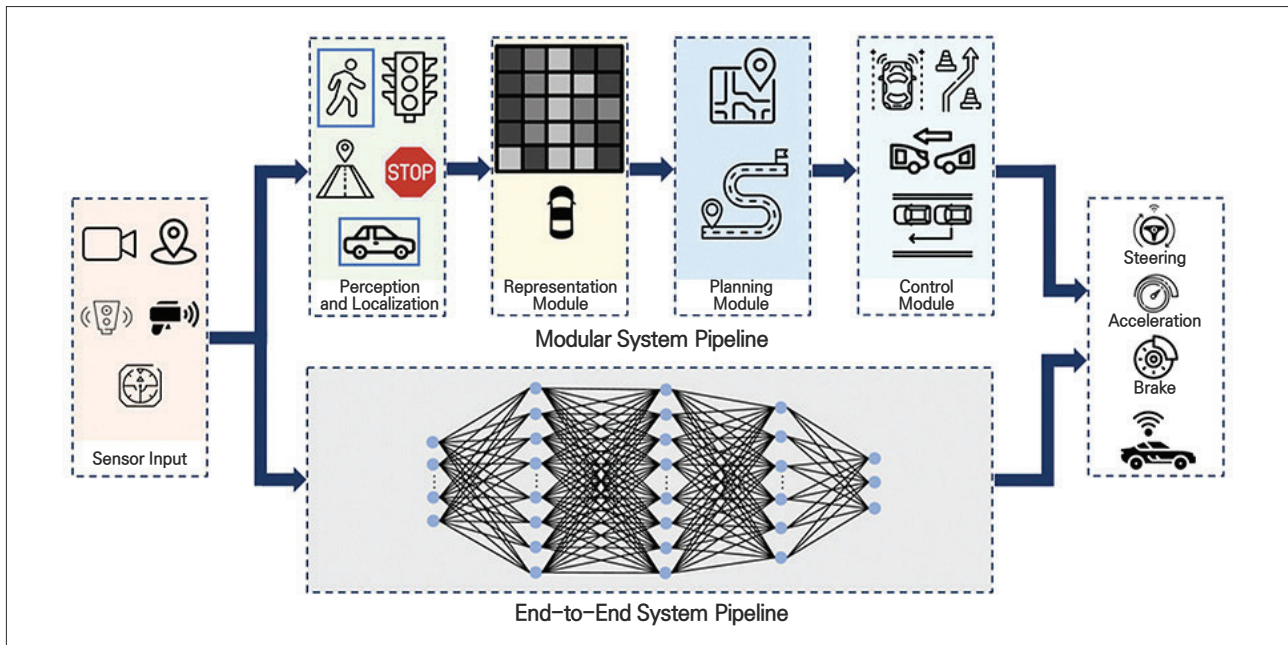
등으로, 라이다는 3차원 형상과 거리를 정밀 측정하나, 가격이 높아 테슬라는 카메라 8대만으로 자율주행을 구현하려 한다(한국경제, 2021). 카메라는 사물 인지에 강하나 야간/악천후와 거리 측정에 한계가 있다. 이에 따라 현재는 라이다+카메라+레이다를 결합하는 센서 퓨전(fusion) 방식이 주를 이룬다(엠에스리, 2023). 이러한 센서의 발전과 함께 기존의 규칙 기반 AI 기술의 한계를 극복하여 인식, 판단, 제어를 통합한 End-to-end(E2E) 자율주행 AI 기술이 미국과 중국 회사들을 중심으로 도입되고 이러한 연산을 구동할 수 있는 고성능 컴퓨팅(HPC)⁴⁾ 성능도 비약적으로 발전하면서 진정한 자율주행에 빠르게 다가가고 있다(안종현, 2025). 자율비행 드론과 배달로봇에도 유사한 센서 내비게이션 기술이 쓰인다. 드론은 GPS, 관성 측정 장비(IMU, 자이로스코프)⁵⁾ 카메라, 초음파 센서로 위치와 고도를 유지하며, 고급 기종은 라이다, 레이더 등을 추가해 도심 장애물을 회피한다(과학기술정보통신부, 2018). 미국 Skydio는 AI 컴퓨터 비전으로 고도의 자율비행

4) 고성능 컴퓨팅(HPC, High Performance Computing): 복잡한 연산 문제를 빠르게 해결하기 위해 병렬 처리를 기반으로 슈퍼컴퓨터와 컴퓨터 클러스터를 활용하는 기술

5) 관성 측정 장비(IMU, Inertial Measurement Unit): 가속도계와 회전 속도계, 자력계 등의 조합을 사용하여 물체의 특정한 힘, 각속도 및 주변 자기장을 측정하고 보고하는 전자 장치. 가속도계, 자이로스코프, 지자기 센서를 사용해 물체의 움직임을 측정

3) 시계 밖 비행(BVLOS, Beyond Visual Line of Sight): 드론 조종사가 시야 밖에서 조종하는 장거리 비행

그림 2 — 자율주행 구현을 위한 파이프라인 비교(위: 기존, 아래: E2E)



출처: 안종현(2025), 한국통신학회지(정보와통신) 제42권 제6호, 2025년 6월, End-to-End(E2E)가 만드는 새로운 자율주행 연구 동향

능력을 선보이기도 하였다. 배달로봇도 원리는 자율주행차와 유사하여, 카메라/라이다/초음파 센서로 환경을 인식하고, 내장된 AI 컴퓨터가 주행을 제어하며, 필요시 원격 관제를 수행하고, SLAM⁶⁾ 기법으로 스스로 지도를 생성한다.

이동수단을 원격 관리하고 교통 인프라와 연계하려면 통신 기술의 뒷받침도 필수적이다. 차량-사물 간 통신(V2X⁷⁾)을 통해 자율주행차는 도로에 설치된 신호등, 센서, 다른 차량과 실시간으로 정보를 주고받아 신호 주기를 실시간 조정하고 차량 속도를 제어하여 전체 차량의 흐름을 최적화하고 사고를 예방할 수 있다. 드론 분야에서는 도심에서 다수의 드론이 동시에 안전하게 비행하기 위해 UTM 시스템이 각국에서 구축되는 추세로, 한국은 이를 'K-드론시스템'이라는 이름으로 육성하고 있다. 또한 드론의 원격제어와 영상 모니터링에는 5세대 이동통신(5G)망을 활용하여 드론에 장착된 고화질 카메라 영상을 실시간으로 전송하고 동시에 여러 대의 드론을 정밀 제어하는 데 유리하다. 이렇듯 최첨단 센서와 초고속 통신망, 그리고 나날이 발전하는 AI

소프트웨어가 결합하면서 이전 세대와는 차원이 다른 지능형 모빌리티 시대가 열리고 있다.

3

모빌리티 혁신의 파급과 과제: 산업적 효과에서 사회적 수용까지

완전자율주행과 무인배송은 막대한 경제적 파급효과가 예상된다. 먼저, AI 시스템이 최적의 경로를 탐색하고 차량의 흐름을 제어해 교통 체증을 완화한다. 또한 인간 운전자의 부주의(졸음, 음주 등)로 인한 사고를 획기적으로 줄일 수 있다. 물류 영역에서는 전체 비용의 50% 이상인 라스트 마일 배송에 드론-로봇이 투입돼 인건비와 유류비를 낮추는 게임체인저가 될 수 있다.

새로운 시장 창출도 중요한 효과다. 글로벌 로봇택시 시장 규모는 2034년 1,900억 달러(약 264조 원)로 급성장이 예측되며, 센서·SW·플랫폼 등 연관 산업 성장이 기대된다(CEO스코어 데일리, 2025). 드론 산업 역시 물류 외 항공 촬영, 농업, 시설 점검 등 상업용 서비스 시장이 확대되고 있다. 배송로봇 산업도 새로운 생태계를 형성하며 AI 엔지니어, 원격관제사, 로봇정비사 등 신규 일자리를 창출하고 있다.

6) 동시적 위치 추정 및 지도 작성(SLAM, Simultaneous Localization and Mapping): 로봇이나 자율주행차가 주변 환경을 매핑하면서 동시에 자신의 위치를 파악하는 데 사용되는 기술

7) V2X(Vehicle-to-Everything): 차량이 다른 차량, 인프라, 보행자, 네트워크 등 모든 것과 연결되어 정보를 주고 받는 통신 기술

사회적 편익 측면에서 교통 약자의 이동권 개선, 도서 벽지 주민의 물류 접근성 향상 등이 기대된다. 물류비 절감은 소비자 후생 증대에 기여할 수 있다. 물론 운송업 종사자의 일자리 전환 등 단기적 사회적 비용이 발생하겠지만, 장기적으로는 신산업에서 더 많은 부가가치와 고용이 창출될 것으로 예상된다.

자율주행과 드론 기술은 여러 분야에 응용되며 우리 삶을 바꾸고 있다. 미래 도시에서는 자율주행 차량들이 실시간 교통관제 시스템과 연결되어 교통 흐름을 최적화할 것이다. 이 과정에서 AI는 차량의 두뇌 역할을 하며, 라이더·레이더·카메라 등에서 수집된 방대한 데이터를 실시간 분석해 도로 상황을 예측하고 에너지 효율적인 최적의 주행을 지원한다. 드론은 재난 상황에서 인명 구조와 피해 조사에 핵심 역할을 한다. AI는 드론이 수집한 열화상·영상 데이터를 실시간으로 판독해 조난자 위치를 빠르게 식별하고, 복수의 드론이 군집 비행을 수행할 수 있도록 비행 경로를 자동 조정한다. 또한 이동 기지국 드론에 AI 네트워크 제어 기술을 적용해 통신 사각지대를 해소하는 연구도 활발히 진행 중이다.

자율주행차·드론·로봇이 결합한 통합 물류망은 물류 혁신의 핵심이다. 예를 들어 물류센터 로봇이 상품을 준비해 자율주행차로 거점 이동 후, 드론이나 배달로봇이 최종 배송하는 식이며, 전 과정은 IoT 센서와 AI가 모니터링하며 재고와 동선을 최적화한다. 항만(무인 크레인, 야드트럭), 철도(자율주행 화물열차) 등 물류 전 영역의 스마트화가 추진되며 도시 인프라와 일상 서비스의 풍경을 바꾸고 있다.

이처럼 도로와 하늘, 실내와 실외를 막론하고 첨단 모빌리티 기술이 스며들면서 도시 인프라와 일상 서비스의 풍경을 서서히 바꾸어놓고 있다.

이렇게 모빌리티 혁신이 다가오고 있지만, 해결 과제도 적지 않다. 가장 큰 도전은 기술적 한계 극복이다. 자율주행 AI가 예기치 못한 극단적 상황(센서 오인식 등)에서 사고를 일으킬 우려가 있으며, 드론은 배터리 수명과 강풍 등 변수에 취약하다(한국경제, 2021). 배송로봇 역시 예상 밖 장애물 대응에 한계가 있다. 또한 자율주행차나 드론이 해킹당할 경우 대형 사고로 이어질 수 있어 강력한 사이버 보안 체계가 필수적이다. 기업들은 센서 융합, 페일세이프(Fail-safe)⁸⁾ 설계 등으로 신뢰도를 높이고 있다.

사회적 수용성과 윤리 문제도 과제다. 무인 기기에 대한 심리적 거부감, 드론 배송의 사생활 침해나 추락 사고 우려 등이 존재한다. 사고 발생 시 책임 소재(자율주행차, 배달로봇) 등 새로운 윤리적·법률적 쟁점에 대한 사회적 합의와 법·제도 정비도 필요하다. 자동화 확산으로 트럭·택시 기사, 배달원 등의 일자리 전환에 대비한 재교육과 지원 정책도 마련해야 한다.

마지막으로, 법·제도 및 인프라 정비가 뒷받침되어야 한다. 자율주행차나 드론 상용화를 위해 운행 허가, 보험, 안전 인증 기준 등 규제를 합리적으로 설계하고, 규제 샌드박스를 넘어 포괄적인 법 개정과 인프라 투자를 통해 민간 혁신을 뒷받침해야 한다. 구체적으로 자율주행 시범운행지구 확대, 정밀지도 인프라, 차세대 교통 신호 시스템 구축이 시급하다. 드론의 경우에도 UTM 도입, 드론포트와 충전 시설 설치 등이 필요하다. 이는 초기 비용이 크지만 신산업 발전의 필수 토대이며, 국제 표준 정립과 글로벌 협력에도 적극 참여해야 한다.

참고문헌

- 과학기술정보통신부(2018), 무인이동체 기술혁신과 성장 10개년 로드맵
- 사이언스타임즈(2024), “우주청, 이음5G 기반 DNA+드론 플랫폼 기술 시연회”, 2024.12.6.
<https://www.sciencetimes.co.kr/nscvrg/view/menu/250?searchCategory=222&nscvrgSn=259699>
- 안종현(2025), End-to-End (E2E)가 만드는 새로운 자율주행 연구 동향, 한국통신학회지(정보와통신) 제42권 제6호, 2025년 6월,
<https://www.kics.or.kr/html/?pmode=BITrends&page=1&smode=view&seq=4633&searchValue=&searchTitle=strTitle>
- 엠에스리(2023), “자율주행 센서 퓨전(라이더, 레이더, 카메라 장단점)”, 2023.2.19.
<https://blog.naver.com/lagrange0115/223021143937>
- 이코리아(2025), “드론 배송 상용화 코앞, 각국 실증 상황은?”, 2025.9.3.
<https://www.ekoreanews.co.kr/news/articleView.html?idxno=82003>
- 이투데이(2017), “무인이동체 기술 성장 10개년 로드맵…통근용 개인드론, 2024년 나온다”, 2017.12.8.
<https://m.eto.com.kr/news/view/1572139>
- 코리아비즈니스리뷰(2025), “한국 자율주행 기술, 글로벌 격차 좁히며 도약 준비”, 2025.9.3.
<https://www.koreabizreview.com/detail.php?number=6699&thread=22r07>
- 한국경제(2021), “라이더 vs 카메라…자율주행 눈싸움 치열”, 2021.6.25.
<https://www.hankyung.com/article/2021062582691>
- CEO스코어데일리(2025), “글로벌 로보택시 상용화 가속…韓, ‘타다 이후’ 규제에 발목”, 2025.9.15.
<https://www.ceoscoredaily.com/page/view/2025091516185963089>
- Chinadaily(2005), “Getting a drone to deliver your coffee at the Great Wall!”, 2025.3.24.
<https://www.chinadaily.com.cn/a/202503/24/WS67e0b04fa310c240449dc6c9.html>

8) 페일세이프(fail-safe): 시스템 등에 고장이 발생할 경우 그로 인해 더 위험한 상황이 되는 것이 아니라 더 안전한 상황이 되도록 하는 설계나 장치

AI가 사람처럼 생각하고 행동하는 휴머노이드 로봇으로 진화하다

이이수

한국과학기술연구원 책임연구원



1 휴머노이드 물리 시스템 특성과 피지컬 AI

휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 신체 구조를 바탕으로 다양한 환경에서 사람과 같이 작업을 수행하도록 설계된 로봇 시스템이다. 이들은 팔과 다리로 구성된 다관절 구조, 고정되어 있지

않고 이동이 가능한 형태, 보행과 균형 유지를 위한 전신 동역학을 반영한 정교한 제어기, 그리고 복잡한 감각-운동 피드백 체계를 가진다는 점에서 기존의 산업용 로봇과 구별된다. 인간이 일상적으로 수행하는 걷기, 물건 들기, 균형 유지, 조작 등의 동작은 단순한 운동 명령의 조합이 아니라, 중력·마찰·관성 같은

물리적 요소에 대한 지속적인 이해와 조절로 이루어진다. 휴머노이드의 핵심 기술인 피지컬 AI(Physical AI)는 이러한 물리적 세계를 해석하고 적응하는 능력을 기계가 실제 행동으로 구현하도록 만드는 지능 기술을 의미한다.

과거의 로봇 제어는 주로 모델 기반 최적제어나 규칙 기반 제어에 의존했는데, 이는 정형화된 공정에서는 뛰어난 성능을 보였지만 복잡하고 변화가 많은 환경에서는 한계를 드러냈다. 반면 피지컬 AI는 학습에 기반한 제어 기법을 통해 로봇이 컴퓨터 시뮬레이션 속 가상 세계 또는 실제 물리적 세계에서 경험을 축적하고 스스로 운동 전략을 개발하도록 만든다는 점에서 본질적인 진화이다. 특히 휴머노이드와 같이 고차원적이고 비선형성이 강한 시스템에서는 이러한 학습 기반 접근이 필수적이다. 피지컬 AI는 로봇이 '몸을 가진 지능'으로 성장하는 데 필요한 기반 기술로, 향후 인간과 동일한 수준의 기동성과 조작 능력을 구현하는 것을 목표로 한다.

2 휴머노이드 로봇 실현을 위한 기술

강화학습: 가상환경 속 시행착오를 통해 고난도 운동을 배우다

강화학습(Reinforcement Learning, RL)은 휴머노이드 로봇에게 고난도의 운동 능력을 부여하는 핵심 기법이다. 강화학습은 에이전트가 가상 시뮬레이션 환경에서 시행착오를 반복하며 보상 함수를 최대화하는 방향으로 정책을 학습하는 방식이다. 과거 실제 로봇에서 직접 시행착오를 수행하기에는 시간이 오래 걸리고 하드웨어 파손 위험이 컸었다. 하지만 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 위험하고 도전적인 동작에 대한 경험의 축적이 가능해졌다. 최근 실제와 유사한 물리법칙이 구현된 시뮬레이터 연산속도가 향상되면서 강화학습 효율이 대폭 향상되었다.

특히 GPU 병렬 시뮬레이션을 활용하면 개인 데스크톱 수준 컴퓨터에서도 수백~수천 개의 휴머노이드가 동시에 다양한 시나리오를 경험할 수 있어, 인간이 수년간 축적해야 하는 운동 경험을 몇 시간 또는 하루 안에 습득할 수 있다. 이를 통해 그동안 극복할 수 없을 것으로 여겨졌던 이족보행, 달리기, 점프, 회피, 균형 회복, 장애물 극복 등의 고난도 동작을 로봇이 손쉽게 익힐 수 있게 되었다.

강화학습 기반의 운동 제어는 또 하나의 강점을 가진다. 바로 환경 변화에 자동으로 적응하는 능력이다. 시뮬레이션 환경 속에서

로봇은 바닥의 마찰이 변하거나, 예기치 않은 충격이 가해지거나, 하중이 증가하는 등의 다양한 시나리오를 경험하며 일반화된 대응 전략을 발전시킨다. 이는 정해진 환경과 조건에서 최적의 움직임을 찾는 전통적인 모델 기반 제어로는 구현하기 어려운 특성으로, 현실 환경에서의 강건성을 크게 높인다. 덕분에 최근 휴머노이드는 사람 수준의 보행과 균형유지 능력을 갖추게 되었다. 이렇듯 강화학습은 앞으로 휴머노이드가 실제 산업 현장에 투입되기 위해 반드시 필요한 기동성과 복원력 확보의 핵심 기술이다.

모방학습: 전문가로부터 배워 사람처럼 일하다

강화학습이 물리적 운동 능력을 다진다면, 모방학습(Imitation Learning, IL)은 휴머노이드가 사람처럼 작업을 수행하도록 만드는 방향으로 활용된다. 모방학습은 인간 전문가의 시연 데이터를 통해 로봇이 작업의 구조와 절차를 직접 학습하는 방식이다. 이는 조립 작업과 같이 비정형화되고 복잡한 절차가 있는, 명확한 보상 신호 정의가 어려운 작업에서 유용하다. 특히 ACT(Action Chunking with Transformers)¹⁾와 Diffusion Policy²⁾ 등 시각 정보를 활용하는 모방학습 기법은 학습된 동작을 단순히 재생(replay)하는 것이 아니라 변화하는 주변 상황에 맞춰 행동을 생성하고 정교한 작업을 수행한다.

모방학습은 로봇이 참고하여 배울 수 있는 고품질의 시연 데이터 확보가 핵심이다. 모션 캡처(Motion Capture)와 모션 리타겟팅(Motion Retargeting)을 바탕으로 하는 사람 동작 모사, VR 장치를 활용한 로봇 동작 원격제어, 웨어러블(Wearable) 센서를 이용한 로봇 시연 데이터 수집 기술 등이 빠르게 발전하고 있다. 또한 최근에는 '모방 → 강화학습 → 자기지도학습'으로 이어지는 계층적 학습 구조가 주목받고 있다. 먼저 모방을 통해 초기 정책을 안정적으로 확보하고, 그 위에 강화학습을 통해 정밀도와 강건성을 보완하며, 장기적으로는 작업 맥락을 이해하는 고차원 추론 능력까지 학습하는 것이 하나의 흐름이다. 이러한 흐름은 휴머노이드가 단순한 기계적 반복을 넘어 실제 인간 작업자 수준의 조작 능력을 확보하기 위한 핵심 전략이다.

1) ACT(Action Chunking with Transformers): 로봇이 사람의 시연 데이터만으로도 복잡한 두 손 조작(리본 묶기, 투명한 소스 컵 열기 등)을 정교하게 모방할 수 있도록 설계된 인공지능 알고리즘

2) Diffusion Policy: 조건부 행동 생성 모델(Generative Model)의 한 종류. 데이터 샘플에서 점진적으로 노이즈를 추가하거나 제거하는 과정을 통해 원하는 행동을 학습하는 방법

VLA와 파운데이션 모델: VLM 기반 범용 작업 지능으로 진화

최근 로봇 연구의 중심에는 VLA(Vision-Language-Action) 모델과 로봇용 파운데이션 모델(Foundation Models)이 있다. 이들 모델은 VLM³⁾을 기반 표현 모델로 사용하고, 그 위에 행동 정책(Action Policy)을 결합하여 로봇이 일반화된 작업 지능을 갖도록 한다. 기존의 강화학습·모방학습 기반 지능은 특정 작업에만 제한적으로 최적화되어, 완전히 다른 작업으로 전환하면 다시 학습이 필요하다는 한계가 있었다.

VLA 모델은 시각 정보(vision), 언어 지시어(language), 행동(action)을 통합하여 로봇이 자연어 명령을 이해하고, 상황을 인식하며, 적절한 행동 시퀀스를 로봇 스스로 계획하도록 만든다. 즉, “저기 있는 파란 상자를 집어서 옆 선반에 올려줘”와 같은 복잡한 지시를 별도의 작업 설계 없이 수행할 수 있게 되는 것으로 앞서 소개한 강화학습, 모방학습과는 달리 VLM을 바탕으로 추론하고 일반화하는 지능이 더해진 개념이다. 이는 인간 작업자와 자연스럽게 협력할 수 있는 로봇 지능을 구현하는 데 필수적인 능력이다. 물론 학습되지 않은 동작이나 작업은 수행할 수 없기에 움직이고 작업을 하기 위해 모방학습과 유사한 방식으로 로봇 실험 데이터를 통해 학습시켜야 한다.

더 나아가 로봇 파운데이션 모델은 로봇 제어 데이터를 대규모로 학습해 범용 조작·이동 능력의 기초 모델을 만드는 것을 목표로 한다. 이는 언어 분야에서 GPT나 LLaMA가 수행한 것과 유사한 흐름으로, 한 번 구축된 모델이 다양한 로봇 플랫폼과 작업에 재사용되면서 학습 비용을 크게 절감하고 일반화를 높인다. 휴머노이드 분야에서도 이러한 방향성은 피지컬 AI의 대규모 확장을 위한 핵심 기술로 자리 잡고 있다.

데이터 피라미드와 월드 모델

휴머노이드 로봇을 위한 피지컬 AI가 성공하기 위해서는 대규모 고품질 데이터가 필수적이다. 최근 연구에서는 데이터를 계층적으로 구조화한 데이터 피라미드(Data Pyramid) 개념이 자주 언급된다. 가장 아래에는 인터넷에서 손쉽게 구할 수 있는 영상과 사진 등 저비용 웹(web) 데이터, 중간에는 빠르게 생산 가능한 컴퓨터 가상환경 속 로봇 시뮬레이션 데이터, 최상단에는 생산이 어려운 실제 로봇 실험을 통한 고신뢰 데이터가 위치하는 구조다.

로봇 학습에는 실제 실험 데이터가 가장 효율적이지만 확보가 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 데이터와 웹 데이터를 혼합하여 학습하게 된다. 피라미드 구조를 기반으로 한 적절한 데이터 혼합은 학습 효율을 높여주는 좋은 방안으로 여겨지나, 실험 데이터 의존성이 높아 근본적인 해결책은 아니다. 월드 모델(World Model) 기술이 로봇 데이터 부족 문제를 해결해 줄 대안으로 여겨진다. 월드 모델이란 현실 세계의 물리적 법칙, 공간, 시간, 상호작용 등을 이해하고 시뮬레이션할 수 있도록 구축된 파운데이션 모델의 일종이다. 월드 모델 속에서 로봇은 실제 세상과 유사한 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 이런 시뮬레이션 데이터를 양산하여 실제 실험 수준의 고품질 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 데이터 피라미드와 월드 모델의 결합은 휴머노이드 피지컬 AI의 스케일업과 신뢰성 확보의 핵심축이 될 것이다.

3 시각 중심 지능을 넘어, 힘과 물리의 이해를 향해

현재 많은 로봇 AI 시스템은 시각을 기반으로 한 인지에 집중되어 있지만, 실제 휴머노이드는 힘, 접촉 등 물리적 상호작용에 대한 이해가 필수다. 사람의 작업은 대부분 손끝의 미세한 힘 조절과 전신의 안정적 모멘텀 관리로 이루어지며, 이러한 능력을 갖춘 지능 없이는 복잡한 조립, 섬세한 조작, 안전한 협업이 불가능하다. 앞서 언급한 모방학습, VLA, 파운데이션 모델 등은 아직도 시각에 크게 의존하기 때문에 힘을 사용하는 법은 배우지 못한다. 시각에만 의존하므로 시각센서에 사각지대가 없어야 성능이 좋아지며, 환경의 모습, 조도, 광원, 카메라 위치 변화가 발생할 시 성능 저하가 뚜렷하게 발생한다. 같은 이유로 투명한 컵이나 유리 등을 조작하는 데 어려움을 겪는다. 시각에만 의존해 동작을 배우므로 학습된 로봇이 물이 가득 찬 물병이나 비어 있는 물병을 동일한 동작으로 조작하게 된다. 때문에 빈 물병을 조작하는 데이터로만 학습한 로봇은 큰 힘을 줘서 들어올려야 하는 가득 찬 물병을 조작하는 데 실패할 것이다.

따라서, 피지컬 AI는 앞으로 단순히 ‘보이는 것을 이해하는 지능’을 넘어서, ‘작용하는 힘과 물리적 결과를 예측하는 지능’으로 확장되어야 한다. 즉, 휴머노이드 로봇이 인간 수준의 능력을 갖추기 위해서는 시각·언어·행동 지능(VLA)과 물리·힘 기반의 지능이 결합한 형태로 진화해야 한다.

3) VLA 모델(Vision-Language-Action Model: 인공지능 로봇에 들어가는 생성형 AI의 일종으로 텍스트나 비디오, 시연(Demonstration)등의 정보를 통합해 행동을 스스로 생성하는 로봇 파운데이션 모델)



4 눈부신 발전, 그럼에도 산적한 숙제들

피지컬 AI의 발전 속도는 매우 빠르며, 최근의 연구 성과만 보더라도 휴머노이드 기술이 질적으로 새로운 단계로 진입하고 있음은 분명하다. 그러나 객관적으로 바라보면, 현재의 휴머노이드가 보여주는 능력은 ‘보행과 균형제어라는 첫 고비를 넘은 수준’에 머무르고 있다. 강화학습을 바탕으로 한 고속 보행, 동적 균형 유지, 낙상 복원 능력 등은 큰 진전이 있었지만, 작업 수행 능력은 사람 대비 크게 떨어진다. 마치 사람인 양 휴머노이드 로봇이 능숙하게 일하는 멋진 영상들이 하루가 멀다하고 새롭게 공개되고 있지만, 자세히 들여다보면 단순하고 단편적인 작업을 어린아이 수준으로 수행하는 정도에 불과하다. 휴머노이드가 아닌 다른 형태의 로봇은 더 잘할 수 있는 작업이기도 하다. 사람처럼 스스로 학습하고, 새로운 과제를 스스로 정의하며, 경험을 바탕으로 능력을 확장하는 수준의 일반화된 조작 지능은 아직 도달하기에는 먼 목표다.

더불어 인간 환경에 투입되는 휴머노이드는 단순히 ‘작동하는 로봇’이 아니라 물리적 영향력을 가진 피지컬 AI 기반 자율 시스템이라는 점에서 완전히 새로운 요구 조건을 갖는다. 향후 개발될 피지컬 AI는 인간에게 신체적·정서적 위협을 가하지 않고 신뢰할 수 있어야 하며, 윤리적 측면에서도 사람에게 해를 가하지 않으며, 프라이버시 보호, 데이터 활용의 투명성 등 새로운 규범적 논의가 요구된다. 마지막으로, 법·제도적 기준 역시 생활환경

속 휴머노이드 보급의 중요한 기반이 된다. 로봇이 사고를 일으켰을 때의 책임 소재, 로봇의 자율 수준에 따른 인증 절차, 상용화를 위한 규제 체계, 공공장소 및 가정 내 로봇 운용에 필요한 가이드라인 등 다양한 영역에서 제도적 정비가 필요하다. 이러한 요소들이 종합적으로 갖춰질 때 비로소 휴머노이드는 산업현장을 넘어 사람의 일상생활 속으로 자연스럽게 스며들 수 있을 것이다.

결국 휴머노이드 피지컬 AI의 미래는 단순히 알고리즘의 성능 향상에만 국한되지 않는다. 안전성·윤리·법제도라는 다층적 요구조건들의 동시 충족이 필요하다. 기술적인 진보가 아무리 빠르더라도, 사람들이 안심하고 로봇과 공존할 수 있는 환경이 마련되지 않는다면 휴머노이드의 대중적 도입은 요원하다. 앞으로의 연구와 산업 발전은 이러한 다양한 난제를 통합적으로 해결하면서 진정한 의미의 인간-로봇 공존 시대를 열기 위한 방향으로 나아가야 한다.

참고문헌

- Agarwal, Niket, et al.(2025), "Cosmos world foundation model platform for physical AI." arXiv preprint arXiv:2501.03575
- Bjorck, Johan, et al.(2025), "Gr00t N1: An open foundation model for generalist humanoid robots." arXiv preprint arXiv:2503.14734
- Gu, Zhaoyuan, et al.(2025), "Humanoid locomotion and manipulation: Current progress and challenges in control, planning, and learning." arXiv preprint arXiv:2501.02116
- <https://rodneymrooks.com/why-todays-humanoids-wont-learn-dexterity/>

피지컬 AI 시대의 완성, 미래 핵심 기술의 확보

김창현

한국기계연구원 책임연구원

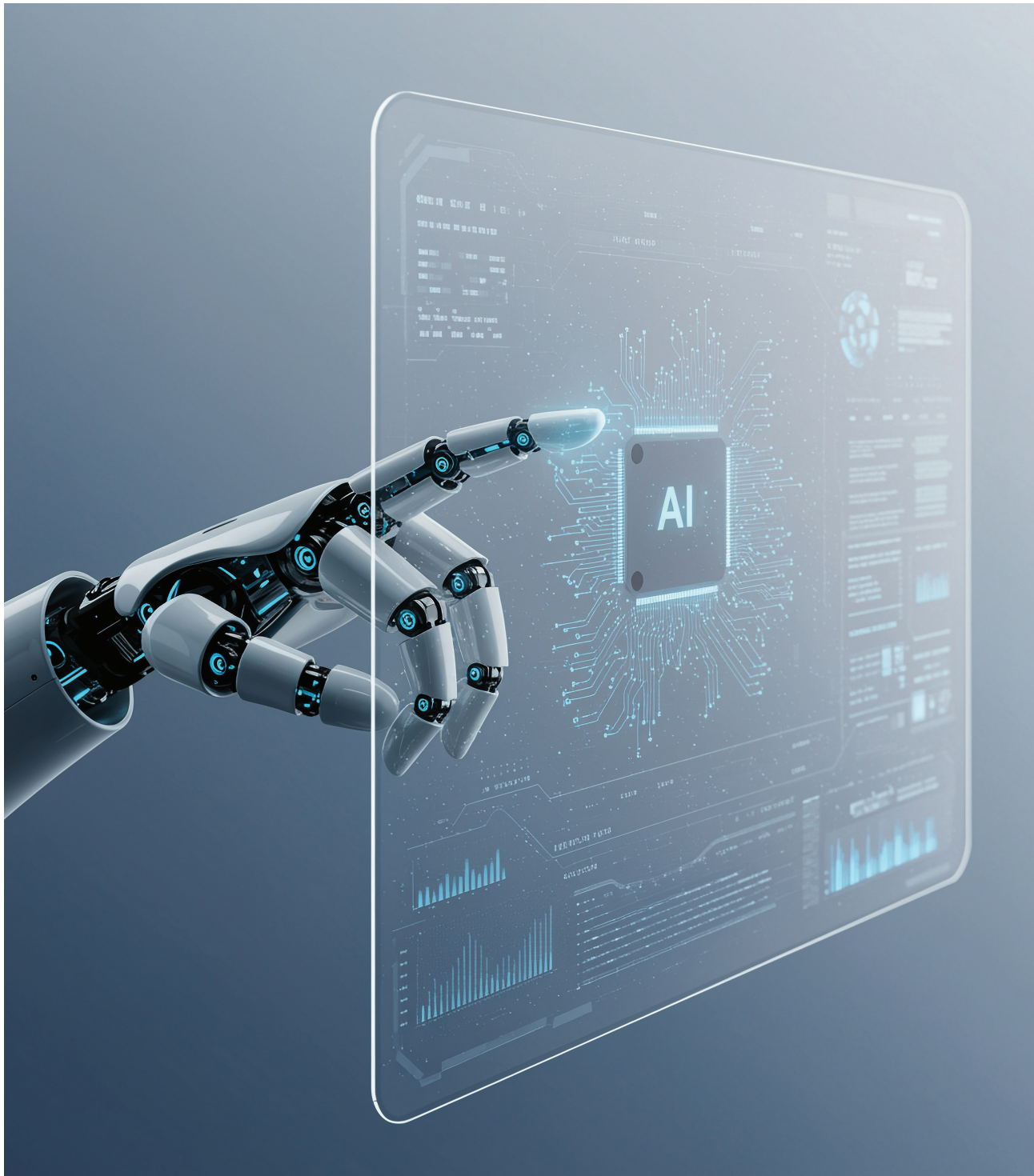


표 1 — 피지컬 AI 기반 핵심 기술과 확보 전략

기본 핵심 기술	확보 목적	핵심 구성요소	확보 전략
데이터·모델 주권 (소버린 AI)	국내 산업·현장 적합성 강화, 규제·보안 대응, 대외 의존 최소화	현장 로그/영상/이벤트 표준 데이터 구조, 비식별화/접근 거버넌스, 도메인 특화 모델(전자·자동차·식음료·제철 등), 평가 벤치마크	산업단지·물류거점 데이터센터 구축, 공통 데이터 구조·라벨링 가이드 제정, 샘플 공개 데이터셋 배포, 벤치마크 운영
저전력 엣지·연산 인프라	배터리·열 제약 하에서 멀티모달 실시간 추론·제어 달성, 학습 비용·공급망 리스크 분산	엣지 NPU/SoC(저전력 추론), RT 제어 MCU/FPGA, 다중 공급사 데이터센터 가속기(GPU/AI), 통신·동기화 스택	엣지 플랫폼 PoC(전력·열·지연 검증), 다중 공급사 학습 클러스터 도입, 전력·열 설계 가이드/레퍼런스 보드 공개
SW 플랫폼·인터페이스	상호운용성 확보기술 종속 회피, 전환 비용 최소화	ROS 2(미들웨어), Open USD(디지털 트윈/시뮬레이션), ONNX(모델 이식), K-Reference Stack(SDK/템플릿/샘플 앱)	인터페이스 권고안(메시지·파일 포맷) 공표, 레퍼런스 앱/SDK 공개, 상호운용 테스트베드 운영(공급사 혼합 검증)
신뢰성·안전·보안 체계	산업안전·책임·사이버 리스크 관리, 보험·공급 연계	기술 국제 규격, 안전·사이버 시험인증·보험 패키지	시험·인증·보험 3종 세트 상시화, 상호인정 파일럿, 사고·사이버 보안 표준 운영 절차

출처: 저자 작성

1 국가 전략 관점에서의 피지컬 AI 핵심 기술

피지컬 AI는 잘 만든 로봇이나 하나의 뛰어난 모델로 완성되지 않는다. 지능(모델), 몸(로봇, 엣지 하드웨어), 운영(데이터, 안전, 보안, 인증, 관제)이 하나의 사이클로 통합되는 융합 기술 기반의 산업 생태계이다. 경쟁의 무대는 단일 제품이 아니라 수직 스택 전체(연산칩-세계 모델-로봇 SW-시뮬레이션-다개체 운영-인증-안전)로 이동하면서, 기술 우위는 특정 부품의 성능이 아니라 스택의 결속도와 전환비용 관리 능력에서 결정된다. 국가 관점에서 이는 곧 데이터, 인력, 자본, 표준, 규제가 한 묶음으로 움직이는 주권 경쟁을 뜻하며, 누가 더 빨리 실증·표준화·확산의 고리를 돌려 사실상의 표준을 선점하느냐가 국익을 좌우한다. 국가 전략의 핵심은 바로 이 선순환을 국내에서 먼저 구현해, 기업이 빠르게 모방하고 확장할 수 있는 길을 여는 것이다.

한국은 세계 최고 수준의 제조·물류 집적도와 현장 데이터를 보유하고 있으며, 고령화와 안전 규제 강화로 자동화 수요가 구조적으로 확대되고 있다. 지금은 AI·로봇 안전 규제가 막 제도화되는 초기 단계로, 시험/인증 방식과 데이터 거버넌스를 선점하면 이후 해외 시장 접근 비용을 크게 낮출 수 있다. 다만 시간이 많지 않다. 향후 2~3년 안에 테스트베드와 가이드라인, 공급 제도를 연결하지 못하면 해외 플랫폼의 종속 위험이 커진다.

국가가 집중해야 할 기본 핵심 기술은 <표1>과 같다.

첫째, 데이터·모델 주권(소버린 AI)이다. 산업 현장에서 발생하는 영상/로그/이벤트를 표준 데이터 구조로 수집 및 비식별화하고, 이를 바탕으로 도메인에 특화한 세계 모델을 학습, 평가, 배포한다. 외산 범용 모델 대비 현장 적합성, 안전성, 책임성으로 차별화하며, 공공과제 산출물에는 공개 라이선스 원칙을 적용해 생태계를 키운다.

둘째, 저전력 엣지·연산 인프라다. 배터리와 열 제약 속에서 멀티모달 추론과 실시간 제어를 동시에 처리하는 엣지 AI¹⁾ 플랫폼(SoC/NPU)을 구축하고, 다중 공급사 기반의 데이터센터 학습·서빙 인프라를 병행해 공급망·비용 리스크를 분산한다.

셋째, 소프트웨어 플랫폼·인터페이스다. 공개 표준에 기반한 K-레퍼런스 스택을 공개해 공급사 종속을 줄이고, 상호운용성을 높이며 전환 비용을 낮춘다.

넷째, 신뢰성·안전·보안 체계다. ISO 10218/TS 15066, SOTIF, IEC 62443 등 국제 규격에 부합하는 시험·인증·보험 패키지를 상시화하고, 해외 상호인정을 추진한다.

1) 엣지 AI: 센서 또는 사물인터넷(IoT) 디바이스와 같은 로컬 엣지 디바이스(엣지 컴퓨팅)에 AI가 조합하여 서로 연결된 엣지 디바이스에서 직접 머신 러닝 작업을 실행하는 것

2 피지컬 AI 기반 핵심 기술 확보 전략

데이터·모델 주권(소버린 AI): 자체 데이터 수집과 모델 학습 생태계 구축 전략

데이터·모델 주권(소버린 AI)은 국내 산업이 스스로의 데이터와 AI 모델을 구축하여 현장 적합성을 높이고, 규제나 보안 요구에 선제적으로 대응하며, 대외 의존을 최소화하기 위한 기반 핵심 기술이다. 피지컬 AI의 성패가 공장과 물류 현장에서 수집되는 실제 데이터의 질과 활용도에 좌우되는 만큼, 우리 산업의 공정 특성, 품질 규정, 안전 기준을 그대로 반영한 자체 모델을 갖추는 일은 선택이 아니라 필수이다.

이를 위해 우선 현장 로그/영상/이벤트를 담아낼 표준 데이터 구조를 확립하고, 데이터 수집 즉시 비식별화, 접근 권한, 보존 주기 등 거버넌스를 적용해 법과 보안 요구를 동시에 충족시켜야 한다. 그 위에서 전자·자동차·식음료·제철 등 주력 업종별 도메인 특화 AI 모델을 구축하고 학습, 평가, 배포하는 운영 체계를 확립한다. 아울러 안전을 고려한 근접, 끼임, 미끄럼 등 위험 시나리오를 포함한 평가 벤치마크를 마련해 AI 모델 개선의 속도와 방향을 수치로 관리하는 것도 중요하다.

실행 전략은 현장 중심으로 단순하고 신속하게 간다. 우선 산업 단지와 물류 거점을 중심으로 데이터센터를 구축해 기업과 연구기관이 안전하게 데이터를 주고받고 활용하도록 한다. 업종 공통으로 적용 가능한 데이터 구조와 라벨링 가이드를 제정해 누구나 같은 기준으로 고품질의 데이터를 수집할 수 있도록 한다. 학습의 출발선을 높이기 위해 대표 현장을 엄선하여 샘플 공개 데이터셋을 배포하고, 공개/민간 공동 벤치마크를 상시 운영해 모델의 현장 적합성과 안전성을 투명하게 비교하고 검증한다. 이러한 방식으로 현장에 강한 주권형 데이터·모델을 빠르게 축적하고 고도화하는 국내 생태계를 구축할 수 있다.

저전력 AI 하드웨어와 엣지 AI 플랫폼: 현장 연산과 효율성 확보 전략

피지컬 AI는 배터리라는 한정된 자원 아래에서 카메라, 라이다(LiDAR), 촉각 등 다양한 센서 정보를 밀리초(ms) 단위로 재빨리 해석해 즉시 행동으로 이어가야 한다. 이러한 물리적 현장성의 핵심 기반이 바로 저전력 AI 하드웨어와 엣지 AI 플랫폼이다. 엣지 채택을 통해 결정 지연을 최소화해 시스템의 안전성을 강화하고, 통신 장애 상황에서 자체적으로 안전하게 대응할 수 있으며,

민감 데이터의 외부 전송에 따른 보안, 프라이버시 부담과 트래픽 비용을 동시에 줄일 수 있다. 다만, 모든 연산을 엣지에서 처리하면 비효율이 발생할 수 있기 때문에 학습, 재훈련, 대규모 시뮬레이션 같은 무거운 작업은 클라우드나 데이터센터로 보내어 처리하는 하이브리드 구조를 채택하는 것이 현실적인 해법이 될 수 있다.

장시간 안정적인 운용을 위해서는 저전력 AI 하드웨어를 개발하고 채택하는 것도 중요하지만, 효율적인 연산을 통해 전력 소모를 줄이고 온도를 낮추기 위한 열 설계도 필수적으로 고려되어야 한다. 양자화(Quantization)²⁾나 프루닝(Pruning)³⁾을 통해 AI 모델을 경량화하고, 가장 중요한 과업(예: 충돌 회피, 손가락 미끄럼 보정)에 연산 우선순위를 부여하며, 필요시 초당 프레임 수나 해상도를 탄력적으로 낮춰 연산량을 조절하는 식의 운영도 가능한 방식이다.

플랫폼 선택은 개발 속도와 종속 위험을 함께 고려해야 한다. NVIDIA의 Jetson과 같은 GPU와 NPU⁴⁾가 통합된 엣지 모듈을 활용하는 것이 개발 속도와 편의성 면에서 유리하지만, 단일 공급사나 개발툴에 묶이는 플랫폼 종속 위험을 동반한다. 따라서, 설계 초기부터 이중 하드웨어 병렬 구조를 기본 원칙으로 삼는 것이 바람직하다. 일반적으로는 CPU가 시스템 조율과 상위 제어를 담당하고, GPU/NPU/DSP⁵⁾가 비전·언어·정책 추론을 처리하며, MCU⁶⁾/FPGA⁷⁾가 하드 실시간 제어와 산업용 인터페이스를 맡는 역할 분담형 병렬 구조가 효과적이다. 이 구조는 보드 교체와 공급사 전환을 용이하게 하고, 작업 특성에 맞춰 연산을 유연하게 배치할 수 있어 전력 대비 성능도 올릴 수 있다.

소프트웨어 플랫폼 및 통합 아키텍처: 센서·제어·통신·설비 간 유기적 연동

피지컬 AI가 성공적으로 구현되기 위해서는 전체 시스템을 구성하는 센서, 제어, 통신, 설비 간의 유기적인 연동이 이루어져야

2) 양자화(Quantization): 디지털 신호의 정밀도를 고정밀 포맷에서 저정밀 포맷으로 변환해 계산 부담을 줄이는 것

3) 프루닝(Pruning): 검색할 가지는 줄이는 것으로, 바람직하지 않은 노드를 제외해 검색의 효율성을 높이기 위한 일종의 가지치기

4) NPU(Neural Processing Unit: 네트워크 처리 장치로 프로그래밍이 가능한 비주문형 반도체 칩

5) DSP(Digital Signal Processor): 디지털 신호 처리 장치. 디지털 신호 처리를 위해 특별히 제작된 마이크로프로세서

6) MCU(Microcontroller Unit): 마이크로 컨트롤러. 마이크로프로세서와 입출력 모듈을 하나의 칩으로 만들어 정해진 기능을 수행하는 컴퓨터

7) FPGA(Field Programmable Gate Array): 프로그래밍할 수 있도록 설계된 집적 회로 반도체



한다. 같은 공간에서 사람, 로봇, 설비가 동시에 움직이는 만큼, 공유된 시간축과 공통 언어로 정보를 교환하지 못하면 바로 충돌 회피 실패, 설비 대기, 재작업 같은 비용으로 이어진다. 따라서, 센서에서 들어온 신호가 지각-계획-제어로 이어지고, 그 결과가 로봇, 설비(PLC), 업무 시스템(MES, WMS)과 끊임 없이 주고받도록 하는 소프트웨어 플랫폼 및 통합 아키텍처가 필수적이다.

이때, 이기종 로봇/센서/설비/클라우드가 끊임 없이 이어져야 하고, 하드웨어가 바뀌거나 공정이 이동해도 프로그램과 데이터 파이프라인이 동일하게 동작해야 한다는 요구를 가진다. 이를 만족하려면 처음부터 상호운용성(Interoperability)과 전환용이성(Portability)을 목표로 한 개방형 소프트웨어 아키텍처를 채택해야 하며, 공개된 표준을 공통분모로 하여 상용 스택은 교체 가능한 모듈로 설계하는 것이 바람직하다. 이렇게 설계하면 공급사 종속을 줄이면서 필요한 구간에서 상용 솔루션의 생산성을 취할 수 있는 균형을 확보할 수 있다.

처음부터 새로운 거대한 프레임워크를 만드는 것보다 검증된 공개 표준을 채택하는 것이 설계-시뮬레이션-배포-운영-개선으로

이어지는 환류 체계를 빠르고 안전하게 구축할 수 있는 전략이다. 현재 로봇 미들웨어로 많이 사용되는 ROS⁸⁾, 디지털 트윈과 시뮬레이션을 위한 3D 모델링 표준 포맷인 Open USD,⁹⁾ 학습 프레임워크(PyTorch¹⁰⁾ 등)와 추론 엔진(TensorRT/TVM/ONNX Runtime 등) 사이의 공용 언어인 ONNX¹¹⁾를 먼저 고려하고 상용 SDK¹²⁾나 사내 플랫폼을 느슨하게 결합한다면 공급사 종속을 통제하면서 현장 확산 속도를 높이는 실전 해법이 될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 구조가 정착하면 새로운 로봇과 공정이 와도 수주 내 접속-학습-배포로 이어가는 조립식 확장성이 확보된다.

8) ROS(Robot Operating System): 로봇 소프트웨어 개발을 위한 오픈소스 프레임워크로 로봇 제어, 센싱, 통신, 시각화 등 다양한 로봇 응용 프로그램을 개발하는 데 사용

9) Open USD(Open Universal Scene Description): Pixar가 개발한 3D 그래픽 데이터의 상호운용성 및 협업에 특화된 오픈소스 프레임워크

10) 파이토치(PyTorch): 신경망 구축에 사용되는 소프트웨어 기반 오픈 소스 딥 러닝 프레임워크로, Torch의 머신 러닝(ML) 라이브러리와 Python 기반의 고급 API가 결합

11) ONNX(Open Neural Network Exchange): 딥러닝 모델을 다양한 인공지능 프레임워크 간에 호환성 있게 교환할 수 있도록 만든 개방형 표준

12) SDK(Software Development Kit): 소프트웨어 개발 키트. 개발자를 위한 플랫폼별 구축 도구 세트



양자 기술과 광 컴퓨팅: 고성능·고보안 연산을 위한 차세대 아키텍처

피지컬 AI가 확산하면서 세계 모델 학습, 멀티모달 추론, 대규모 시뮬레이션에 대한 수요가 동시에 커지고 있다. 데이터센터는 연산 밀도, 대역폭(서버 간, GPU 간), 전력(냉각 포함), 메모리/통신 병목에 직면해있다. 옛지 AI도 배터리/열 제약 탓에 더욱 미세한 최적화가 필요하다. 또한 해킹의 우려에 따른 데이터 보호를 위해 보안에 대한 중요성도 날로 커지고 있다. 이를 해결하기 위한 차세대 기술로 양자 기술과 광(포토닉) 컴퓨팅이 관심받고 있다. 양자 컴퓨팅은 중첩과 얽힘 같은 양자역학 특성을 활용해 아직 제한적인 용도와 규모지만, 조합 최적화(경로, 스케줄링), 재료/촉매 시뮬레이션, 샘플링 같은 문제에서 기존 대비 다른 스케일의 탐색 능력을 제공할 수 있어, 물류/공장/에너지 운영 최적화나 새로운 배터리/소재 탐색 등과 연결될 수 있다. 광 컴퓨팅은 전자식 신호를 광신호로 변환하여 전송하고 연산 일부를 광학적으로 처리하여 동일 전력에서 더 큰 대역폭과 낮은 지연을 기대할 수 있다. 또한, 서버와 GPU 사이 광 연결, 통합 광학 패키징 및 칩렛은 전송 전력을 높이고 발열을 줄이는 데 유효하다. 일부 벡터/행렬 연산을 광학적으로 처리하는 포토닉 가속기는 훈련 및 추론 과정의 특정 연산(예: 매트릭스 곱, 주파수 영역 처리)을

빠르게 만들 잠재력이 있다.

단기적으로는 광 컴퓨팅을 이용하여 현재의 문제인 대역폭, 전력, 지연을 줄여 대규모 시뮬레이션을 더 싸고 빠르게 실행하게 하고, 장기적으로 양자 기술로 미래의 난제인 최적화와 보안 전환을 해결하는 전략이 유망하다. 옛지 측면에서도 현재 포토닉/양자 칩을 직접 탑재하기보다는, 광 트랜시버¹³⁾/실리콘 포토닉스¹⁴⁾ 링크로 현장 데이터 트래픽의 전송 성능을 높이는 것이 현실적이다.

신뢰성·안전·보안 체계 구축 과제와 제도적 지원

피지컬 AI는 사람, 설비, 환경과 상호작용하는 기술이므로 성능만으로는 채택되기 어렵다. 시스템 신뢰성, 현장 안전, 사이버보안이 동시에 충족될 때만 기술이 확산할 수 있다. 즉, 현장에서 항상 같은 품질로 작동하고, 사람을 다치게 하지 않으며, 악의적 침해로부터 보호되도록 만드는 기술, 운영, 제도가 함께 마련되어야 한다.

13) 광 트랜시버: 전기 신호를 빛으로, 빛을 전기 신호로 변환하는 모듈

14) 실리콘 포토닉스(Silicon Photonics): 광 집적회로를 만들 수 있는 재료 플랫폼으로, 빛을 이용해 기존 반도체보다 더 적은 전력으로 더 빠르게 데이터를 주고받는 기술

그 시작으로 기업과 정부는 시험-인증-보험-공급을 연결하는 체계를 함께 구축해야 한다. 이는 곧 국민 안전을 지키면서도 산업 경쟁력을 키우는 가장 확실한 확산 전략이다. 시험은 기술 검증의 수단에서 끝나지 않고, 인증-보험-공급으로 이어져야 기업의 채택 비용을 낮출 수 있다. 정부는 상시 테스트베드를 설치하고, 신뢰성-안전-보안-성능 평가 항목과 합격 기준을 공개한다. 인증기관은 시험 방법과 결과를 표준화하여 상호인정이 가능하도록 운영해야 한다. 보험사는 시험/인증 결과를 기반으로 보험료를 차등 적용해 안전에 대한 투자 인센티브를 제공한다. 공공 공급 시 시험/인증/보험을 필수 제출물로 요구하여 시장의 최소 기준을 끌어올려야 한다.

추가로 책임 있는 AI 거버넌스를 위한 제도 도입도 필요하다. 멀티모달 모델과 정책 네트워크는 입력/출력, 신뢰도, 후처리 규칙을 모델 계약서로 명시한다. 학습 데이터셋은 출처, 라벨 규칙, 비식별화 방식, 사용 허가를 함께 보존한다. 의사결정 로그와 배포 이력, 운영 파라미터는 감사 가능한 형태로 저장한다. 사람의 안전이 걸린 기능에는 명확한 설명과 경고가 제공되어야 한다.

3 한국의 피지컬 AI 차별화 전략

글로벌 시장은 모델, 시뮬레이션, 엣지 컴퓨팅, 로봇 운용이 하나의 스택으로 묶이는 흐름이 뚜렷하다. 플랫폼 기업은 GPU/AI 반도체-세계 모델-로봇 미들웨어-디지털 트윈-다개체 운영을 수직 통합해 속도, 생산성, 개발자 생태계를 앞세우는 전략을 강화하고 있다. 산업 측면에서는 물류 피킹/분류/적재와 제조 라인의 조립/검사/라인보조가 실증의 중심축이며, 휴머노이드와 모바일 매니퓰레이터는 '특정 과업'부터 시작하여 단계적으로 적용되며 확산되고 있다. 규제와 표준은 안전, 사이버보안, 책임 있는 AI 프레임으로 수렴하면서 시험-인증-보험-공급을 잇는 절차 도입이 보편화되고 있다.

기술 개발 방식은 수직 통합형과 개방 생태계가 양립하여 이루어지고 있다. 수직 통합형은 단일 기업의 하드웨어, 모델, 툴체인을 일관되게 제공해 개별 성능의 개선이 전체 시스템 성능으로 바로 전환되는 장점이 있다. 반면 개방 생태계형은 ROS 2, Open USD, ONNX 등 개방 표준을 축으로 다수 기업이 협력해 기술 종속 위험을 낮추고 현장 다양성에 빠르게 적응할 수 있다. 실제 시장도 특정 도메인, 업무, 비용 구조에 따라 두 모델이 공존/

경쟁하는 양상이며, 데이터센터-엣지-현장 운영의 이식성과 전환 비용이 플랫폼 기업 선택의 핵심 변수가 되고 있다.

한국은 제조, 물류 산업 집적도가 높고, 동일 제품의 대량생산 및 짧은 전환주기가 일반적이어서 피지컬 AI 실증에 적합한 환경을 갖추고 있다. 전국적인 통합 물류, 배송 인프라와 높은 서비스 기대치, 비교적 엄격한 안전/품질 규범은 데이터 품질과 운영 성숙도를 끌어올리기에 유리하다. 반면, 플랫폼과 반도체에서의 공급망 의존, 대규모 공개 데이터와 오픈소스 축적의 상대적 부족, 시험-인증-보험-공급 간 절차 연결의 미비는 약점으로 지적된다.

한국이 피지컬 AI 시대에 주도권을 확보하려면 먼저 도메인 특화 세계 모델을 축으로 데이터 및 모델 주권을 세워야 한다. 전자자동차-식음료-철강 등 주력 산업에서 생성되는 데이터를 통합해 장기 축적하고, 이를 바탕으로 '한국형 도메인 세계 모델'을 지속 학습-평가-배포한다. 같은 알고리즘이라도 한국 현장의 공정/품질 규범이 모델 경쟁력으로 전환된다.

둘째, 개방 생태계형 전략으로 확산 속도와 이식성을 끌어올려야 한다. ROS 2-Open USD-ONNX와 같은 공개 표준을 기반으로 '레퍼런스 스택'을 문서, 샘플, 테스트 시나리오와 함께 공개해 개방 생태계를 촉진한다. 자동차, 전자, 물류는 물론 식음료, 의료, 서비스까지 상시 테스트베드를 운영해 다양한 반복 가능 응용을 실증하고, 국제 상호인정 파일럿을 확보하여 해외 진입 장벽을 낮춘다.

셋째, 장기적으로는 저전력 AI 하드웨어와 엣지 AI 플랫폼을 내재화하고, 더 먼 미래를 내다보고 양자나 광(포토닉) 컴퓨팅 같은 기초 기술에 선제 투자해, 최적화/시뮬레이션/보안 전환의 선택지를 확보한다. 이를 통해 한국은 기술 종속을 피하면서도 도입 속도, 운영 효율, 수출 경쟁력을 동시에 높이는 지속 가능한 피지컬 AI 전략을 갖추게 된다.

참고문헌

- Open Robotics(2025), ROS: Robot Operating System, <https://www.ros.org/>
- Pixar Animation Studios(2021), Open USD: Open Universal Scene Description, <https://openusd.org/release/index.html>
- The Linux Foundation(2019), ONNX: Open Neural Network Exchange, <https://onnx.ai/>

피지컬 AI 강국으로 가는 길, 국가 전략의 청사진

안성원

소프트웨어정책연구소 AI정책연구실장



1 논의 배경

산업 전반에 피지컬 AI(Physical AI)의 활용과 확산이 점차 본격화하고 있다. 피지컬 AI란 인공지능(AI)의 인지 및 판단 능력을 로봇 등의 물리적 실행력과 결합하여, 기계가 현실 세계를 인간 처럼 인식하고 자율적으로 행동함으로써 주변 환경과 유기적으로 상호작용하는 기술을 의미한다.

예를 들면, AI 기반모델(두뇌)이 컴퓨터 비전·센서(감각)를 통하여, 엣지 컴퓨팅 및 네트워크(연결)로 연결되고, 제어 및 액추에이터(행동)를 통해 동작하는 첨단 기술이 융합된 것으로, 대표적으로는 휴머노이드 로봇, 자율주행차, 스마트드론 등이 해당한다.

지난 CES 2025에서 엔비디아의 CEO 젠슨 황은 “다음 산업혁명은 피지컬 AI가 이끌 것”이라고 선언한 바 있다. AI는 이제 온라인 또는 시스템상의 정보 처리를 넘어 물리 세계의 행동 주체로 진화하고 있다. 그리고 그 중심에는 피지컬 AI가 있다. 이러한 패러다임은 제조, 물류, 안전 등 우리 경제와 산업 전반에 혁신을 불러올 게임 체인저로 평가받는다.

그러나 피지컬 AI 시대를 선도하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 과제가 있다. 피지컬 AI 시스템의 확산에는 막대한 연산 자원과 개발 비용이 필요하고, 복잡한 물리환경에서 기술 적용상의 제약도 만만치 않다. 또한 노동시장 구조 변화에 따른 사회적 대비와 법적 책임 및 윤리 기준의 미비로 인한 신뢰성 문제도 크게 부각된다.

이러한 장애 요인을 극복하고자 미국, 중국, EU, 일본 등 주요국은 피지컬 AI를 국가 전략기술로 지정하고 선제적 정책 지원에 나서고 있다. 우리나라도 연구개발(R&D), 산업 생태계 및 인력양성, 법제도 정비, 국제 협력을 아우르는 국가 전략 수립이 필요하다. 현재 정부도 피지컬 AI의 중요성을 인식하고 다양한 정책 및 사업을 추진하고 있다. '피지컬 AI 1등 국가'를 목표로 AI 대전환을 위한 15개 과제가 포함된 30대 선도 프로젝트를 추진(2025.8.)하고, 과학기술정보통신부 장관 주재의 '과학기술·AI 장관회의' 신설 추진, '피지컬 AI 글로벌 얼라이언스'를 출범하는(2025.9.) 등 범부처 차원의 추진체계를 구축하고 있다.

이제 우리는 데이터, 인프라, 인재, 기업, 나아가 실증 환경과 글로벌 협력까지 다양한 축을 균형 있게 강화하는 청사진을 마련해야 한다. 이에 본 고에서 핵심 과제를 중심으로 피지컬 AI 강국 도약을 위한 국가 전략 방향을 살펴보고자 한다.

2 피지컬 AI 강국 도약을 위한 국가 전략 방향

데이터 및 컴퓨팅 인프라 기반 조성

피지컬 AI 경쟁력의 첫 번째 토대는 데이터와 컴퓨팅 인프라다. 현실 세계를 학습하고 모방하려면 방대한 실측 데이터와 이를 처리할 수 있는 고성능 연산능력이 필수다. 그러나 국내 AI 데이터 환경에는 여전히 한계가 있다. 산업 현장의 방대한 현장 데이터는 산재해 있어 접근성과 공유가 어렵고, 데이터 비대표성이나 라벨링 오류로 인한 편향 문제도 남아 있다. 데이터 환경의 미흡은 피지컬 AI의 경쟁력 저하로 이어질 수 있다.

마침 정부는 대규모 데이터셋 구축을 추진하겠다고 밝혔다. 공공 데이터를 적극적으로 개방하고 민간의 데이터 활용 역량을 2030년까지 글로벌 Top 10 수준으로 끌어올리는 한편, 분야별 특화된 버티컬 AI(Vertical AI)¹⁾ 기술도 세계 최고 수준으로 확보하겠다는 목표를 세웠다(2025.8.). 이 목표는 산업 전반의 데이터를 수집·공유하는 데이터 허브를 구축하고, 품질 높은 표준 데이터셋을 확보하여 데이터 편향성을 국가 차원에서 해소하는 방향으로 실현되어야 한다.

동시에 컴퓨팅 인프라를 대폭 확충하여 연구나 기업 수요에

대응할 필요가 있다. 최근 정부는 AI 데이터센터 등 컴퓨팅 인프라 강화를 위해 2030년까지 민·관 협력으로 GPU 5만 장 이상을 확보하는 것(2025.8.)에서 20만 장을 확보하는 것으로 목표를 상향 설정(2025.10.)했다. GPU 확보가 주요 쟁점이었던 상황에서, 지난 10월 31일에는 글로벌 AI GPU 1위 기업인 엔비디아의 젠슨 황 CEO가 내한하여, 우리 정부와 기업에 최신 AI칩 26만 장을 우선 공급하기로 했다. 다행스럽게도 컴퓨팅 인프라 확보는 처음 목표했던 것보다 더 큰 규모로 수월하게 진행될 것으로 전망된다.

다른 모든 AI가 그렇듯 양질의 데이터 확보와 이를 뒷받침할 고성능 컴퓨팅 인프라는 가장 먼저 이룩해야 할 기반이다. 현 정부는 국정과제로 AI 활성화를 위한 데이터 확보 등에 투자를 적극 추진 중으로, 이 기회를 잘 살려서 SOTA(State of the Art)²⁾ 수준의 데이터센터를 다수 확보해야 한다.

융합형 인재 양성

두 번째로 중요한 부분은 인재 확보다. 특히 융합형 인재 양성은 피지컬 AI 시대의 성패를 좌우하는 요소다. 피지컬 AI를 실현하기 위해 기계·전자공학에 AI 소프트웨어 역량까지 겸비한 멀티스킬 인재에 대한 수요가 급증하고 있지만, 현재 인력풀이 충분하지 않은 상황이다.

이를 해결하기 위해 대학들은 교육과정을 융합인재 양성 트랙으로 개편하고, 기업 주도의 현장형 AI 로봇 교육, 해외 우수 인재 유치 프로그램 등을 추진하고 있다. 그 한 가지 예로 전북대학교는 KAIST, 성균관대학교 등과 연합하여 공동 교육 플랫폼을 구축, 대학 간 공동 교과목 개설과 학점 교류, AI 캡스톤디자인 등 실습 중심의 교육과정을 운영하며 산업 수요 맞춤형 인력을 양성할 계획을 발표했다(2025.8.). 정부도 AI 대학원 확대, 청년 AI 인재 양성 프로그램 등을 통해 매년 수천 명 규모의 AI 전문인력을 육성하고, 해외 석학 영입 및 국제 공동연구 펠로우십 등으로 글로벌 인재의 순유입을 도모하고 있다.

이러한 노력의 확산과 강화를 통해 산업계·학계·정부가 함께 협조하는 피지컬 AI 인재·기업 생태계를 신속하게 구축함으로써, 지속적인 기술 혁신과 일자리 창출의 선순환을 이룰 수 있다. 함께 인재 양성 투자를 대폭 늘려 대학-기업 협력교육 과정을

1) 버티컬 AI(Vertical AI): 특정 분야나 특정 타겟의 고객 수요에 특화된 AI 기술 및 서비스로, 해당 분야나 타겟에 맞춰 고유한 데이터와 전문 지식을 기반으로 설계되어 범용 AI와 달리 정확성과 실무 적용성이 높음

2) SOTA(State of the Art): 현재 시점에서 가장 발전된 기술, 최첨단 혹은 현존 최고 성능을 뜻하는 용어

확대하고, 첨단 AI 기자재를 갖춘 AI 실습센터를 구축하는 등 실무형 교육을 강화할 필요가 있다.

공공-민간 공동 R&D 생태계 조성

피지컬 AI 시대를 선도하는 것은 정부와 민간이 함께 혁신을 주도해야 유리하다. 공공-민간이 공동으로 R&D를 활성화하여 국가 역량을 결집해야 한다. 정부는 지난 2023년부터 피지컬 AI 경쟁력 강화를 위해 AI 기반 로봇산업에 2030년까지 3조 원 이상을 투입할 계획을 세우고(2023.12.), AI 반도체, 자율주행차, AI 팩토리 등 핵심 분야에 대규모 R&D 프로젝트를 추진 해왔다.

민간도 발맞춰 휴머노이드 로봇, 완전 자율주행차, 자율운항선박, AI 가전, 자율비행드론, AI 스마트팩토리, 온디바이스 AI 반도체 등 7개 선도 프로젝트에 집중하여 글로벌 경쟁력 확보에 나서기 시작했다(2025.8.). 이러한 선택과 집중 전략을 통해 기업들은 휴머노이드 로봇 분야 세계 3대 강국 진입, 완전 자율주행차 상용화, 완전 자율운항 선박 개발, 글로벌 AI 가전 1위 달성, 완전 자율비행드론 활용, 주력 제조업의 AI 팩토리 전환, 그리고 온디바이스 AI 반도체 생태계 구축이라는 도전적 목표를 향해 매진하고 있다. 공공과 민간의 유기적인 협력 생태계의 구축을 위해 산·학·연 거버넌스도 강화될 필요가 있는데, 앞서 언급한 ‘피지컬 AI 글로벌 얼라이언스’가 좋은 사례다. 과기정통부, 산업부, 중기부 등 관계 부처와 함께 300여 개 기관과 기업이 참여하는 협의체로 민관이 한 팀으로 움직이는 협력 모델을 제시했다.

이러한 협의체에서는 산학연 공동 R&D 플랫폼을 강화하여 중소기업과 스타트업까지 폭넓게 참여하는 컨소시엄형 연구개발(플래그십 프로젝트 등)을 추진해야 한다. 정부의 R&D 과제에 스타트업 참여를 확대하고, 대기업과 중소기업의 협업을 촉진할 제도적 장치를 마련하는 것도 중요하다.

디지털 트윈 기반 실증 및 안전 인증 체계 구축

피지컬 AI 기술의 현장 적용을 가속하려면, 충분한 실증(Test Bed) 기회를 제공하여 안전성과 유효성을 입증하는 과정이 필요하다. 자율주행차나 협동 로봇처럼 사람과 직접 상호작용하는 피지컬 AI는 철저한 안전성 검증과 인증 절차를 거쳐야만 상용화가 가능할 수 있다.

산업계는 실제 환경에서 AI를 시험하는 테스트베드와 가상 시뮬레이션을 결합한 디지털 트윈(Digital Twin) 실증 인프라의 중요성을 강조하고 있다. 디지털 트윈 기술은 물리적 테스트베드를 가상

공간으로 확장해 주는 역할을 한다. 가상 세계에 현실과 동일한 환경과 설비를 구현하면, 물리적 제약 없이 무한에 가까운 실험이 가능해진다. 이러한 이유로 미국, 일본 등은 일찌감치 피지컬 AI와 디지털 트윈을 연계한 국가 주도의 테스트베드 구축에 나섰고, 관련 생태계를 전략적으로 정비하고 있다.

현재 정부는 이러한 필요성에 따라 약 2,000억 원을 투입해 대구에 ‘국가 로봇 테스트필드’ 구축 계획을 발표하고(2024.1.), 기업들이 새로운 기술을 현실 환경에서 시험해 볼 수 있는 인프라 마련을 추진하고 있다. 이 대규모 테스트베드에서는 개발 초기에 발생할 수 있는 위험 부담을 낮추고, 규제 샌드박스 형태로 신기술의 실증 및 검증을 지원한다. 또한 인천, 전북 등 전국 5대 거점에 산업 특화형 실증 필드를 구축하려는 민간 주도의 움직임도 시작되고 있다.

그러나 이러한 실증 및 인증 인프라가 아직 충분히 갖춰졌다고 보기는 어렵다. 기존 산업용 시험장과 안전기준은 전통적인 기계·전기 제품 위주로 설계되어, 자율주행차나 협동 로봇 등 복잡한 AI 시스템을 평가하는 데 한계가 있다. 전국 각지의 테스트베드들도 이제 구축 초기에 있어 상호 연계와 활용도가 낮고, 중소기업의 접근성도 떨어진다. 또한 AI에 특화된 안전 인증 체계가 부재하여 기업들은 제품 상용화 전에 어떤 시험과 인증을 거쳐야 할지 불확실성을 느끼고 있다. 보안 측면에서도 연결된 로봇·드론 등이 사이버 공격에 노출될 위험이 커지고 있으나 이에 대한 표준화된 대응책은 미흡한 실정이다.

따라서 국가 차원에서 피지컬 AI 테스트베드 구축을 가속하여 기업들이 충분히 기술을 검증 및 개선할 수 있도록 지원해야 한다. 시뮬레이션-실증-현장 적용에 이르는 단계별 검증 체계를 정립하고, 각 단계 통과 시 인증을 부여하는 제도를 도입해 안전이 확인된 기술만 상용화되도록 하는 것도 좋은 전략이 될 수 있다. 또한 로봇·모빌리티 기기의 사이버보안 기준을 강화하여, AI 시스템에 보안 모듈과 침입 탐지 기능을 의무화하고 주기적으로 취약점 점검을 실시할 필요가 있다. 피지컬 AI에 대한 윤리 원칙과 책임 소재를 명확히 하는 법제도 측면의 기반 강화도 병행되어야 한다. 이로써 기술 실증부터 인증·보안까지 아우르는 종합적인 안전 관리 체계를 구축할 수 있다.

글로벌 공동연구 및 표준화 주도

피지컬 AI 시대의 주도권 경쟁은 국내에 국한되지 않는 글로벌 게임이다. 국제 협력을 강화하고 세계 표준을 선도해야만 기술



패권을 확보하고 우리 기업들의 글로벌 시장 진출을 가속할 수 있다. 이 때문에, 미국, EU, 중국 등도 자국 중심의 AI 규범과 기술 표준을 선점하기 위해 적극적으로 나서고 있다. 그 예로, EU는 기술 개발과 더불어 'AI Act(2024.5.)'와 같은 실효성을 갖는 윤리·사회적 책임 전략의 병행 추진을 통해 피지컬 AI가 향후 안보·외교·표준 경쟁으로까지 확산할 수 있음을 강조하고 있다.

다행히 대한민국은 세계 최고 수준의 제조업 기반과 ICT 인프라를 보유하여 글로벌 테스트베드이자 선도국으로 부상할 잠재력을 갖추고 있다는 평가를 받는다. 정부는 이러한 강점을 살려 우리나라를 '글로벌 피지컬 AI 허브'로 도약시키겠다는 비전을 밝힌 바 있다(2025.9.). 산·학·연·관이 모두 참여하는 '피지컬 AI 글로벌 얼라이언스'를 통해 해외 주요 기업·기관과의 개방형 협력 모델을 만들고, 국제 표준화 대응 전략과 정책 방향을 수립하여 글로벌 기술 패권 경쟁의 우위를 선점하는 전략을 추진 중이다.

우선 중요한 것은 국제 표준화 주도권 확보다. 피지컬 AI 분야는 안전성, 상호운용성, 데이터 프라이버시, 윤리 규범 등에 관한 글로벌 논의가 이제 막 시작되는 단계다. 우리나라가 이 논의에 선제적으로 참여하여 표준 제정에 기여할 수 있다면, 기술 리더십을 글로벌 규범 및 시장 영향력으로 연결할 수 있을 것이다. 앞으로 국제 표준화 활동에 적극 나서서 우리 기술이 글로벌 기준으로 채택되도록 주도해야 한다. ISO/IEC 등 표준화 기구의 논의 초기 단계부터 한국 전문가들이 의장단으로 참여하고, 다자 외교 채널에서도 AI 윤리·안전 규범 논의를 선도하는 전략도 필요하다. 또한 글로벌 공동연구를 확대할 필요도 있다. 미국, 유럽 등에 있는 해외 우수 연구기관과 양자 또는 다자 협력 프로젝트를 늘리고, 피지컬 AI 글로벌 얼라이언스를 해외 파트너까지 포괄하는 개방형 협력 플랫폼으로 발전시켜 공동 R&D를 활성화해야 한다.

우리 기업의 기술이 해외에 확산하도록 지원 전략을 마련하는 것도 중요하다. 국제 박람회와 해외 실증사업을 통해 K-피지컬 AI 성공 사례를 홍보하고, 개발도상국을 대상으로 스마트 제조 지원 사업 등과 연계하여 국내 솔루션이 세계에 진출하도록 하는 것도 좋은 전략일 것이다.

3 선제 대응을 위한 국가 전략의 의의

피지컬 AI는 단순한 기술 혁신을 넘어 대한민국 산업 경쟁력을 지킬 핵심 전략이다. 이를 위해 산업계·학계·정부가 힘을 모아 세계 최고 수준의 선도 국가로 도약해야 한다. 중앙정부의 신속하고 과감한 정책 실행이 뒤따를 때, 한국은 미래에 피지컬 AI 혁명을 주도하며 새로운 성장동력을 확보할 수 있을 것이다.

이제 우리는 AI 중심의 디지털 대전환이 물리 세계로의 대전환으로 진화하고 있는 시대에 진입했다. 정부와 민간이 함께 그리는 국가 전략은 대한민국을 피지컬 AI 시대의 글로벌 선도자로 자리매김하게 할 이정표이다. 이러한 국가 전략은 인구 감소와 저성장의 도전에 직면한 우리 경제에 혁신의 돌파구를 제공하고, 산업계에는 신성장동력 창출의 기회를 열어줄 것으로 기대된다.

참고문헌

- 경향신문(2025), "과학기술부총리 17년 만에 부활...AI 관계장관회의 설치"
- 과기정통부(2025), 「정부, 엔비디아 및 국내 대표기업과 AI 생태계 역량 강화를 위한 협력 방안 논의」, 보도자료
- 과기정통부(2025), 「움직이는 인공 지능 시대」 시작을 알리는 '물리적 인공지능 국제 연합체(피지컬 AI 글로벌 얼라이언스)' 출범」, 보도자료
- 관계부처합동(2025), 「AI 선도 프로젝트 추진계획 - AI 팩토리 분야」
- 국회미래연구원(2025), 「피지컬 AI 시대, 제조업 혁신 방안」, 연구보고서 제25-13호
- 기획재정부(2025), 「국가AI대전환을 위한 15대 선도 프로젝트」
- 산업통상자원부(2024), 「2024~2028년 로봇산업 육성을 위한 청사진 나왔다」, 보도자료
- 소프트웨어정책연구소(2024), 「글로벌 AI 신뢰성 정책 동향 분석」, 연구보고서 RE-171
- 소프트웨어정책연구소(2024), 「유럽연합 인공지능법(EU AI Act)의 주요내용 및 시사점」, 이슈리포트 IS-176
- 소프트웨어정책연구소(2025), 「피지컬AI의 현황과 시사점」, 이슈리포트 IS-202
- 소프트웨어정책연구소(2025), 「AI 신뢰성 및 윤리 제도 연구」, 연구보고서 RE-186
- 전자신문(2025), "“글로벌 피지컬 AI 허브 도약”...산·학·연·관 얼라이언스 출범"
- 전자신문(2025), "전북대, 미래모빌리티 피지컬AI 국가 실증사업 주도...KAIST·네이버·현대차 등과 협업"
- 지디넷코리아(2025), "국회서 선포된 '피지컬 AI' 비전...“한국의 새로운 성장 동력”"
- Citigroup(2024), "The Rise of AI Robots: Physical AI is Coming for You." Citigroup Global Perspectives & Solutions
- McKinsey & Company(2023), "The Future of Robotics and Physical AI." McKinsey Insights

DEEP INSIGHT

AI의 물리세계 구현이라는 현실은 그만큼 우리에게 다양한 현실적인 질문과 과제를 던져준다. 기계와 로봇, 인간 간의 경계와 정체성에 대한 통찰부터 여러 사회적 가치와 개념의 변화, 역할의 기준에 대한 논의, 그리고 치열한 국가 간의 소리 없는 전쟁에서 우리는 취해야 할 전략에 대한 고민까지 다양하다.

이에 S&T DATA 11호 Deep Insight에서는 피지컬 AI 시대에 대한 철학적·인문학적 통찰을 통해 이 시대에 대한 정의와 가치 기준부터 시작해 세계 무대에서 우리가 나아가야 할 청사진과 전략, 이를 위한 정책 방안 등에 대해 살펴본다.

피지컬 AI의 사회적 쟁점과 노동시장 영향

홍성욱 피지컬 AI: 우리에게 던지는 인문학적, 철학적 문제들

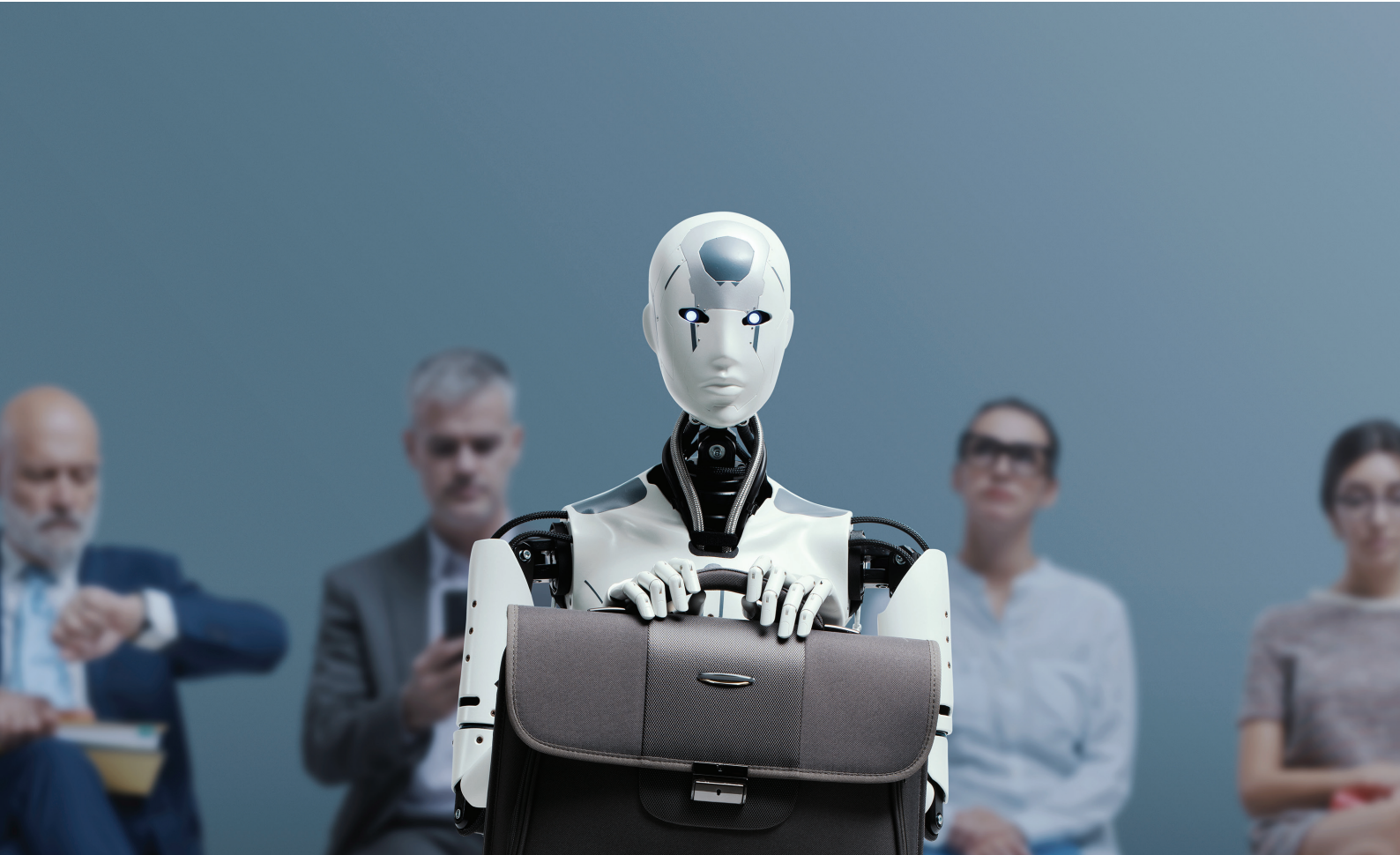
오삼일 피지컬 AI와 노동시장 변화



**Coexistence
with AI**

피지컬 AI: 우리에게 던지는 인문학적, 철학적 문제들

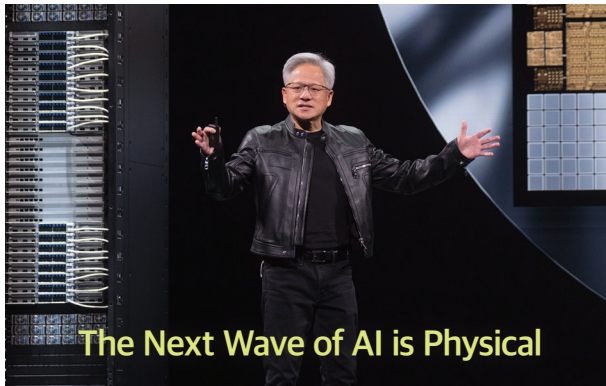
홍성욱
서울대학교 과학학과 교수



2024년 3월 18일 엔비디아 GTC(개발자 컨퍼런스) 기조 강연에서 젠슨 황 CEO는 인공지능의 다음 단계로 ‘피지컬(Physical) AI(물리적 AI)’를 제시했다. 그는 이제 AI가 소프트웨어적 차원에서 언어, 이미지, 데이터를 처리하는 가상적 AI(Virtual AI)를 넘어, 물리적 세계에서 감지하고, 배우고, 행동하고, 상호작용을 하는 물리적 AI로 진화해야 한다고 선포했다. 미래에 “로봇은 [실제

세계의] 마찰, 관성, 원인과 결과를 이해하는 존재가 될 것”이라며, 피지컬 AI가 산업과 일상 전반에 걸쳐 새로운 시장과 변화를 이끌 핵심 기술이 될 것이라는 전망이었다. 피지컬 AI로의 전환은 인공지능이 인간의 공간, 즉 공장, 병원, 가정 속에 들어와 함께 일하고 살아가는 새로운 시대, 즉 인공지능 패러다임 전환의 예고다.

그림 1 — AI의 다음 단계가 피지컬 AI임을 선포했던 젠슨 황



출처: Shutterstock

이후 피지컬 AI는 인공지능 업계만이 아니라 디지털 업계 전체의 화두가 되었다. 스탠포드 대학교 교수이자 ImageNet의 창안자인 페이페이 리(Fei-Fei Li)는 2024년에 ‘Large World Models(LWMs)’¹⁾이라는 개념 아래, 2D 이미지 및 언어 중심 AI에서 한 단계 나아가 3차원 물리 세계(3D Physical World)를 이해하고 생성할 수 있는 AI 시스템을 개발하는 스타트업 World Labs를 공동 창업했다. 이 스타트업은 2억 3천만 달러의 투자를 받아 화제가 됐다. 최근에는 빨래 개기, 그릇 구별해서 치우기 등 다양한 일을 수행하는 로봇의 두뇌를 제작한 기업 Physical Intelligence는 아마존 CEO 제프 베조스를 비롯한 투자자들로부터 4억 달러의 투자를 받았다. 이런 성과 이후 현재까지 ‘피지컬 AI’에 대한 언론 보도는 매주 수백 건씩 쏟아지고 있다.

1 피지컬 AI의 전사: 로봇과 AI 로봇(스마트 로봇)

피지컬 AI가 논의되기 전에는 로보틱스 1.0이라고 부를 수 있는 초보적인 로봇들, 그리고 그 뒤에 AI 로보틱스가 있었다. 로보틱스 1.0은 1960년대부터 2000년대 초반까지 산업용 자동화 시대를 주름잡은 로봇들이다. 이 시기의 로봇은 정밀제어와 프로그래밍이 된 궤적을 따르는 ‘기계적 자동화 장치’로, 지능은 기계

바깥의 인간 프로그래머에게 있었다. 이들 로봇은 사람이 하던 조립과 용접을 척척 해냈지만, 피드백 제어에 기반한 완벽한 기계였지 세계를 ‘이해’하는 존재는 아니었다. 이런 로봇에게는 철학적·인문학적으로 골치 아픈 문제는 거의 없었고, 다만 인간의 직장을 없앨 수 있다는 사회적 문제가 가장 큰 골칫거리였다. 2010년대 들어 등장한 AI 로보틱스는 머신러닝과 딥러닝의 결합을 통해 세상을 초보적으로 인지하는 스마트 로봇으로 발전했다. 자율주행차, 드론, 물류로봇은 시각 정보를 처리해 환경을 인식하고, 데이터 기반으로 행동을 조절할 수 있게 되었다. 장애물을 인식하고 판단해서 피해 가는 자율주행차에서 보듯이, 이 시기의 로봇은 비로소 인식→판단→행동의 인지 루프를 가지게 되었다. 그래서 이런 로봇들은 ‘스마트 로봇’이라고 불렸다. 그렇지만 이들 역시 여전히 과제에 특화된 지능에 머물렀는데, 그 이유는 이런 로봇이 인간의 언어와 상식, 맥락을 이해하지 못한 채, 인간에 의해 주어진 데이터를 가지고 제한된 상황에서만 학습된 행동을 반복했기 때문이다. 스마트 로봇은 ‘세계 속에서 이해하고 살아가는 지능’이 아니었다.

그렇지만 AI 로봇은 가상 공간의 계산 능력을 눈에 보이는 상호작용의 영역으로 확장함으로써 사회적 풍경을 변화시켰다. 제조업, 의료, 가사 등 다양한 분야에 도입된 로봇은 편리함과 효율성을 제공하지만, 동시에 노동 대체, 사생활 침해, 정서적 조작에 대한 불안을 낳았다. 로봇이 직장이나 가정에 들어올 때, 그들은 단순히 업무를 수행하는 존재가 아니라 데이터를 수집하고, 인간의 행동을 관찰하며, 사회적 관계를 재구성하는 행위자이기도 하다. 기계적 정밀성과 인간적 존재감이 결합한 이 혼종의 존재는 로봇 자동화로부터 누가 이익을 얻는지, 로봇이 생산한 데이터는 누가 통제하는지, 그리고 인간과 기계의 관계를 사회가 어떻게 규제해야 하는지에 대한 질문을 낳았다.

로봇은 원래 인간의 명령에 종속된 기술적 존재로서 윤리적, 법적 책임의 주체가 아닌 객체였다. 이런 인식에 변화를 준 것은 사회적 로봇(Social Robot)의 사용이었다. 공장 로봇과 달리 로봇 강아지 같은 사회적 로봇의 사용자들은 로봇에게 애착을 느끼고, 로봇을 죽어 있는 도구가 아닌 ‘사회적 타자’로 경험하는 경향을 보였기 때문이다. 그래서 이런 현상을 설명하기 위해 인격성의 연속성(Gradient Personhood)²⁾이나 관계적 윤리

1) 대형 세계 모델(Large World Models, LWMs): 3D 공간 세계를 이해하고, 생성하며, 상호작용할 수 있도록 설계된 인공지능 모델. 복잡한 물리적 상호작용과 공간적 특성을 정확하게 모델링하여 로봇과 차량이 다양한 환경에서 자율적으로 동작할 수 있도록 지원하기 때문에 로봇과 자율주행차의 차세대 발전을 위한 중요한 기술로 주목받고 있다.

2) 인격이 없다(0), 있다(1)의 개념이 아니라, 정도에 따라서 점진적이고 연속적인 스펙트럼 위에 존재한다는 관념

그림 2 — 요즘 기원 풍경. 인공지능과 바둑을 두는데, 상대의 돌은 로봇이 움직인다.



출처: ClipartKorea

(Relational Ethics)³⁾ 같은 새로운 개념이 등장했다. 또 자율주행차의 상용화가 가시권 내에 들어오면서 자율주행차가 일으킨 사고에 대한 책임의 문제가 부상되었다. 이런 맥락 속에서 2016년 유럽의회는 인간과 상호작용하는 로봇을 ‘전자적 인격체(Electronic Personhood)’로 보자는 제안을 내기도 했다.

AI 로봇은 마음, 행위, 그리고 도덕적 책임에 대한 오래된 개념들에 문제를 제기했다. 의식을 지니지 않지만, 로봇은 의식을 모방하고 인간의 공감과 신뢰, 애착을 유발한다. 이러한 모방은 ‘행동한다’거나 ‘결정한다’, ‘돌본다’는 것이 무엇을 의미하는지 근본적으로 되묻는다. 로봇 간병인은 윤리적인 존재인가, 아니면 윤리적 행위를 흉내 내는 코드화된 사물에 불과한가? 사회적 로봇의 등장은 도구적 행위와 도덕적 행위의 경계가 얼마나 취약한지를 드러냈던 것이다.

2 피지컬 AI가 낳는 새로운 인문학적 문제들

인공지능이 오랫동안 디지털 공간 안에서 언어와 데이터를 다뤄왔다면, 피지컬 AI는 그 지능이 마침내 현실의 물질세계로 확장된 형태다. 카메라, 자율주행차의 센서인 라이다(LiDAR), 마이크, 온도센서 등으로 세계를 감지하고, 이를 인식하고 추론하여 액추에이터(Actuator)를 통해 직접 행동하는 이 시스템은, 단순한

계산의 기계가 아니라 환경 속에서 몸을 가진 존재에 가깝다. 피지컬 AI는 인공지능이 ‘손 없는 두뇌’에서 ‘몸을 가진 지성’으로 변모하는 과정이다. 피지컬 AI는 ‘생각하는 뇌’가 아니라 ‘느끼고 움직이는 몸’을 지닌 지능으로, 감각과 행동이 하나의 순환으로 엮인 새로운 지적 존재를 예고한다.

이러한 특징은 피지컬 AI를 단순한 도구로만 볼 수 없게 만든다. 예컨대 가상 AI는 인간의 사고 영역을 모방하는 데 집중한다면, 피지컬 AI는 인간의 몸과 감각, 더 나아가 사회적 관계망 속에서 직접 작용할 것이기 때문이다. 피지컬 AI의 존재는 인간 정체성의 경계를 흔들며, 신체 경험의 확장 혹은 변형을 초래하고, 윤리적 책임과 사회적 의미를 새롭게 묻는다. 이런 문제에 대해서 인문학의 여러 분야가 학제 간 연구를 통해 설명과 답을 내어놓아야 한다. 여기에서는 피지컬 AI가 제기하는 인문학적, 사회적 문제를 여섯 가지로 나누어 살펴보겠다.

가장 먼저 등장할 수 있는 어려운 문제는 피지컬 AI의 도덕적, 법적 지위다. 세상을 스스로 학습하고 배우는 피지컬 AI는 기존의 로봇보다 동물이나 인간에 더 가깝다. 따라서 동물에 특별한 법적 지위가 부여되듯이, 피지컬 AI에 기존의 로봇보다는 더 높고, 심지어 살아 있는 동물과 비슷한 법적, 인격적 지위가 부여되어야 한다는 논의가 나올 수 있다.

두 번째는 책임의 문제다. 피지컬 AI는 환경을 감지하고, 움직임을 조정하며, 때로는 스스로를 수리하기도 한다. 분산되고 독자적으로 행동하는 것 같은 피지컬 AI가 사고를 일으켰을 때 책임 소재는 어떻게 되는가? 지능이 단순히 ‘생각’하는 것이 아니라 물리적으로 움직이며 인간과 공간을 공유할 때, 안전성·책임성·형평성의 문제는 훨씬 더 복잡하고 모호해진다. 자율 비행 드론, 자율주행차, 웨어러블 외골격과 같은 시스템이 확산하면서, 그 결정의 결과에 대한 위험과 책임이 점점 더 분산되고 추적하기 어려워질 것이다.

세 번째 문제는 신뢰의 문제다. 사람들은 이제 하나의 독립된 기계를 신뢰할지 말지에 대한 판단을 넘어 수많은 센서와 로봇, 자율 시스템이 상호 연결된 거대한 피지컬 AI의 네트워크를 상대로 신뢰를 구성해야 한다. 따라서 신뢰의 대상은 더 이상 특정한 ‘기계’가 아니라, 끊임없이 변화하며 인간의 직접적인 통제를 벗어난 ‘집합적 지능’이 된다. 이는 사회적·윤리적 차원에서 신뢰가 어떻게 생성되고 유지될 수 있는가에 대한 새로운 질문을 던진다. 피지컬 AI는 결국 ‘신뢰’의 구조 자체를 변형한다. 그것은 인간이 세계와 맺는 관계의 방식, 그리고 기술적 행위자에게 부여하는

3) 무엇이 옳은가라는 윤리적 질문에 대한 판단을 자율적 개인의 규범보다 관계의 질, 배려, 책임, 상호 이해 등에서 찾으려는 관점

책임과 권한의 경계를 다시 쓰게 만든다.

네 번째 문제는 사회적 격차와 통제의 문제다. 지능이 가정, 거리, 의료 등 일상 사물 속에 내장되면, 인간은 더 이상 AI를 '도구'로 사용하는 것이 아니라, AI가 스며든 환경 속에 거주하게 된다. 이러한 체화된 지능의 확산은 첨단 기술에 대한 접근성이 불평등한 현실에서 사회적 격차를 심화할 위험이 있다. 게다가 이런 강력한 기술이 정부나 기업에 의해서 독점될 때, 피지컬 AI는 무시무시한 감시의 기술로 변할 수도 있다. 피지컬 AI에 대한 사회적 거버넌스는 인공지능에 대한 거버넌스보다 훨씬 더 중요하고 심각한 주제들을 많이 포함한다.

다섯 번째 문제는 인간 인지의 재정의라는 철학적 문제다. 세상에 대한 인간의 인식이 육체와 분리된 두뇌의 작용이 아니라 세계와의 상호작용 속에서 발생한다는 '체화된 인지(Embodied Cognition)' 개념이 나온 지는 오래되었지만, 우리 대부분은 아직도 인간 사고가 두뇌에 의해서 이루어진다고 생각한다. 그런데 사물을 쥐는 법을 스스로 배우는 로봇 팔이나, 환경 피드백을 통해 비행경로를 학습하는 드론은 지능이 상황적이고(Situated) 체화되었으며(Embodied) 환경에 배태된(Embedded) 것이라는 관념을 다시 소환한다. 피지컬 AI는 지식이 내면의 재현물이 아니라, 환경 속에서 수행되는 행위, 즉 적응 수행(Performance of Adaptation)의 결과임을 제시하며, 이는 사람들의 상식에 도전할 것이다.

마지막 문제는 인간과 기계, 자연과 인공의 경계에 대한 것이다. 우리는 수만 년 동안 인간과 기계가 다른 존재라고 생각하고 살아왔다. 그런데 지능이 물질적 행위 능력을 획득할 때, 그것은 단순한 도구라기보다 살아있는 시스템에 가까워진다. 이런 경우 우리는 인간의 기술적 확장을 수행하는가, 아니면 새로운 생명

형태를 창조하는 것인가? 피지컬 AI가 감지하고, 움직이며, 결정할 수 있게 될수록 철학은 '인공적 마음'의 문제가 아니라 '인공적 존재(Artificial Existence)'의 문제를 고민해야 한다. 이는 모방의 문제가 아니라, 공존의 문제이기 때문이다.

3 맺는말

피지컬 AI의 등장은 21세기에 등장할 급격한 기술 진보의 새로운 단계이자, 인간 이해의 지평을 근본적으로 뒤흔드는 사건이다. 감각하고, 판단하고, 물리적으로 행동하는 기계는 단순한 도구가 아니라 인간과 함께 세계를 구성하는 또 하나의 행위자로 우리 세상에 들어올 수 있다. 이러한 변화는 우리에게 "인간이란 무엇인가?", "책임과 윤리는 어디까지 분산될 수 있는가?"라는 근본적인 질문을 다시 묻게 만든다. 피지컬 AI를 둘러싼 인문학적 성찰은 단지 기술의 미래를 예측하는 데 도움이 되기 위한 것이 아니라, 인간과 비인간이 공존하는 새로운 세계 속에서 우리가 어떤 존재로 거듭날 것인가를 성찰하기 위한 노력이다.

참고문헌

- Brooks, Rodney A.(2002), *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*. Pantheon
- Clark, Andy.(2025), "Extending Minds with Generative AI," *Nature Communications* 16: 4627, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59906-9>
- Clark, Andy.(1997), *Being There: Putting Brain, Body, and World Together Again*. MIT Press
- Dautenhahn, Kerstin.(2007), "Socially Intelligent Robots: Dimensions of Human-Robot Interaction." *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 362, no. 1480, pp. 679-704
- Giannoulis, E. *The Future of Humans and Emotional Machines: Narratives from Japanese Culture in the 21st Century*. Routledge, 2026 (forthcoming)
- Gunkel, D. J.(2023), *Person, thing, Robot A Moral and Legal Ontology for the 21st Century and Beyond*. MIT Press
- Hayles, N. Katherine.(1999), *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*. University of Chicago Press
- Latour, Bruno.(1992), "Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts." In *Shaping Technology / Building Society*, edited by Wiebe Bijker and John Law, MIT Press
- Pfeifer, Rolf, and Josh Bongard.(2006), *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*. MIT Press
- Suchman, Lucy.(2007), *Human-Machine Reconfigurations: Plans and Situated Actions*. Cambridge University Press
- Vallor, S. *The AI Mirror: How to Reclaim Our Humanity in an Age of Machine Thinking*. New York: Oxford University Press



피지컬 AI와 노동시장 변화

오삼일

한국은행 조사국 고용연구팀장



1 들어가며

AI 기술이 노동시장에 미치는 영향과 관련된 최근 논의는 주로 ChatGPT를 중심으로 한 생성형 AI(Generative AI)에 집중되어 있다. 그러나 AI의 또 다른 축인 물리적 AI(Physical AI), 즉 로봇 기술과 결합하여 자율적 판단과 행동을 수행하는 형태의 AI가 빠르게 확산하며 노동시장에 새로운 파급효과를 가져오고 있다. 과거 로봇은 사전에 프로그래밍이 된 규칙에 따라 단순 반복작업을 수행하는 수준에 머물렀으나, 최근의 피지컬 AI는 환경인식·판단·행동의 전 과정을 스스로 학습·조정할 수 있는 수준으로 발전하였다. 수술 로봇, 자율 용접 로봇, 농업용 드론, 서비스 로봇, 휴머노이드 로봇 등은 이미 산업 현장과 일상에 광범위하게 활용되고 있으며, 그 활동 영역과 자율성은 가파르게 확대되고 있다. 본 고에서는 이러한 피지컬 AI의 도입 현황과 확산 가능성을 살펴보고, 향후 노동시장에 미칠 구조적 변화를 분석한 후 이에 대응한 정책적 시사점과 노동시장 대응 전략을 제시한다.

2 자율로봇 도입 및 협업 현황

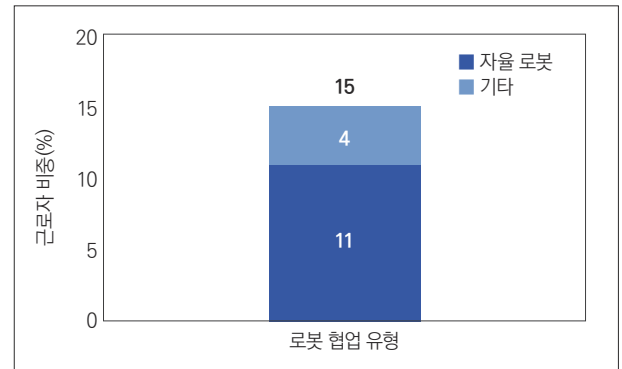
가계조사(서동현 외, 2025)에 따르면, 국내 근로자의 15%가 로봇과 협업하고 있으며, 그중 11%는 자율성을 갖춘 로봇과 협업하는

것으로 나타났다<그림 1>. 여기서 ‘협업’은 협동로봇(Cobots)과 같은 물리적 접촉뿐 아니라 동일 작업공간을 공유하며 상호작용하는 경우까지 포괄한다.

자율성은 작업 복잡도, 환경 적응 능력, 활동 범위 등을 기준으로 평가하였으며, 11%에 해당하는 자율로봇과 협업 중인 근로자는 향후 피지컬 AI에 의해 대체될 가능성이 높은 집단으로 분류할 수 있다.

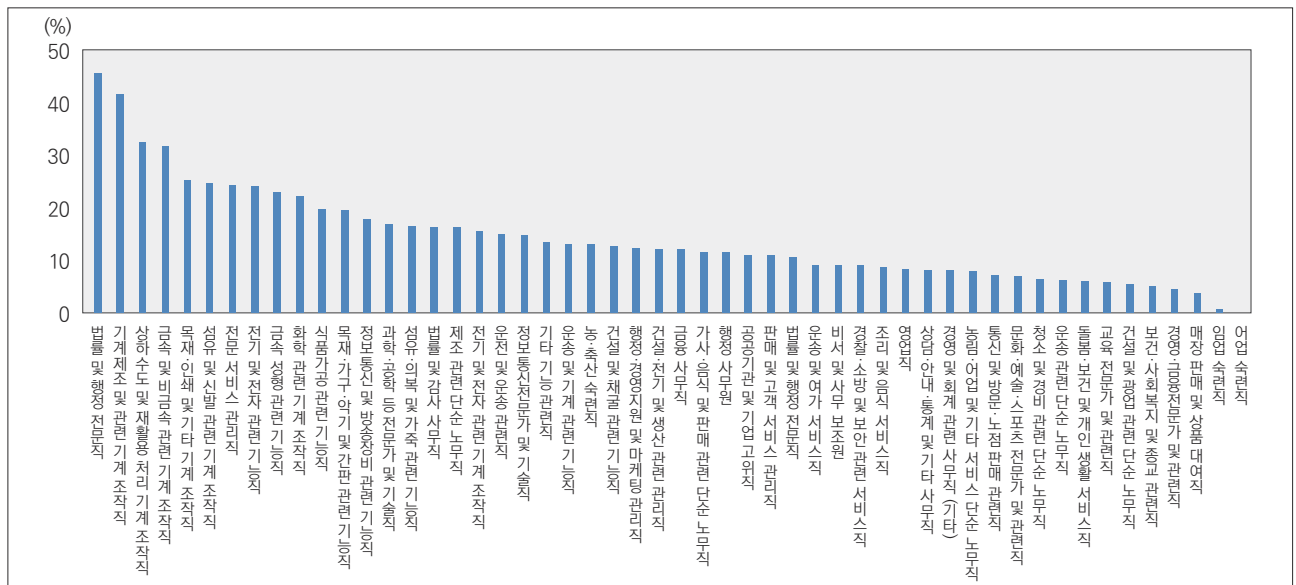
자율로봇 협업 근로자는 특정 직업군에 집중되어 있다. <그림 2>에서 보듯이 식품가공 관련 기계조작직(45%), 기계 제조 관련 직종(32%), 상하수도·재활용 처리 기계직(30%) 등 기계 조작·

그림 1 — 자율로봇과 협업하는 근로자 비중



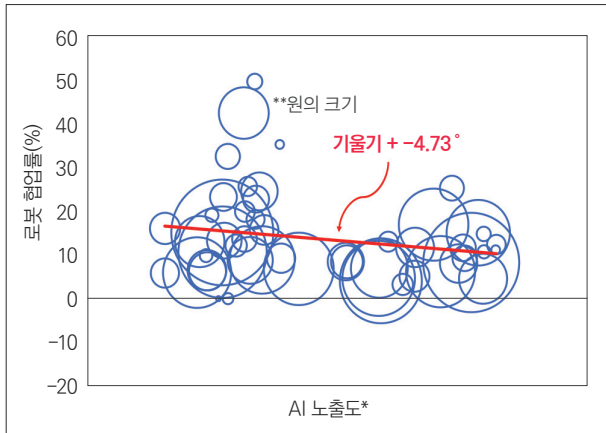
출처: 서동현 외(2025)에서 재인용

그림 2 — 직업별 자율로봇 협업 근로자 비중



출처: 서동현 외(2025)에서 재인용

그림 3 — AI 노출도와 로봇 협업을



*AI 노출도는 Felton et al.(2022) **원의 크기는 취업자 수 ***통계적 유의성: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

출처: 서동현 외(2025)에서 재인용

제조 중심의 블루칼라 직업군에서 협업 비중이 높다. 반면 전문 서비스, 법률·행정, 정보통신 전문가 등 지식 기반 직종에서는 협업 비중이 매우 낮다. 이는 피지컬 AI 도입이 주로 제조업, 물류, 건설 등 물리적 작업이 핵심인 산업에 집중되고 있음을 시사한다. 흥미로운 점은, 대규모 언어모델(LLM) 기반 AI의 노출도¹⁾와 로봇 협업을 간에는 통계적 상관관계가 거의 없다는 사실이다 <그림 3>. 이는 생성형 AI가 주로 인지적·언어적 작업을 대체하는 반면, 피지컬 AI는 자동화 가능한 물리적·공간적 작업을 겨냥한다는 점에서 서로 다른 영역의 기술임을 보여준다. 따라서 로봇 협업률은 기존의 'AI 노출도' 지표로는 포착되지 않는 독립적(orthogonal) 자동화 리스크를 반영한다.

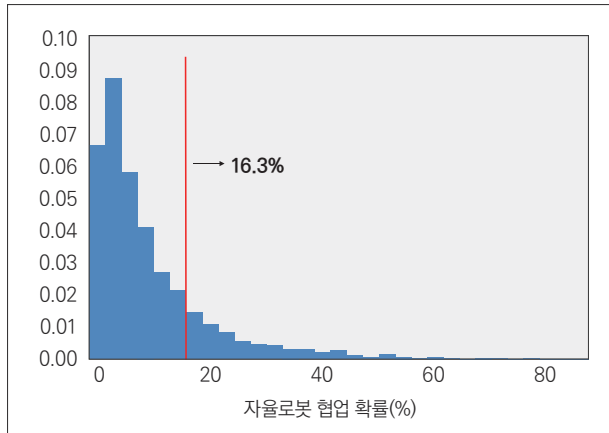
3 향후 로봇 협업 근로자 확대 전망

소프트웨어의 고도화와 하드웨어 비용의 하락은 자율로봇의 확산을 가속할 전망이다. 서동현 외(2025)는 개별 근로자의 특성(산업, 직무, 숙련도 등)을 이용해 로봇 협업 확률을 추정하는 시뮬레이션을 실시하였다.²⁾ 그 결과, 현재 비협업 근로자 중에서도

1) AI 노출도는 각 직무의 작업(task) 특성과 생성형 AI의 기능적 능력 간의 매칭을 통해 생성형 AI가 해당 직무의 작업을 얼마나 대체할 수 있는지를 나타냄

2) 먼저 개별 근로자 특성과 로봇 협업 여부 간 관계를 추정하고, 이를 바탕으로 이미 로봇 협업 중인 근로자들의 특성에 따른 예측값, 즉 협업 확률을 계산함. 그다음 이미 협업 중인 근로자들의 협업 확률 분포에서 중간값을 추출하여, 비협업 근로자 중 협업 확률이 해당 중간값보다 높은 비중을 계산함

그림 4 — 자율로봇 협업 확률



출처: 서동현 외(2025)에서 재인용

협업 확률이 높은 근로자군이 약 16.3%로 나타났으며, 이는 향후 로봇 협업 근로자 비중이 전체의 약 27%까지 확대될 가능성을 의미한다<그림 4>.

이는 AI 기술이 단지 지식노동의 영역을 넘어, 물리적·현장 중심 산업 전반으로 확산하고 있음을 시사한다. 즉, 자동화와 AI의 경계가 점차 모호해지면서 노동시장 구조 자체가 재편되는 전환기에 진입하고 있는 것이다. 이러한 변화에 대응하지 못할 경우, 특정 산업·직무 중심의 고용 위축과 숙련 불균형, 지역 격차가 심화할 위험이 있다.

4 정책 제언과 노동시장 대응 전략

피지컬 AI의 확산은 피할 수 없는 기술적 진보의 흐름이지만, 그 파급효과가 노동시장 전체에 균등하게 작용하지는 않는다. 일부 산업에서는 생산성과 안전성이 비약적으로 개선되는 반면, 다른 부문에서는 고용 축소나 숙련의 불일치가 심화할 가능성이 높다. 따라서 정책의 초점은 단순히 자동화를 늦추거나 억제하는 것이 아니라, 기술 발전이 가져올 효율성을 사회 전체의 포용적 성장으로 연결하는 데 두어야 한다.

무엇보다 근로자의 전환 역량을 강화하는 것이 핵심이다. 피지컬 AI에 의해 대체될 가능성이 높은 직무를 사전에 파악하고, 이들이 새로운 역할로 이동할 수 있는 경로를 설계해야 한다. 단순 반복 작업이나 위험노동을 수행하던 인력이 로봇을 관리·감독하거나



AI 기반 설비를 운영하는 역할로 전환할 수 있도록, 직업훈련 체계를 근본적으로 개편할 필요가 있다. 특히 현장 중심의 블루칼라 근로자들에게는 디지털 제어, 데이터 관리, 로봇 유지보수 등 실질적인 기술 역량을 갖추 수 있는 교육이 제공되어야 한다. 정부의 재교육 인프라를 산업별로 세분화하고, 기업이 자율훈련 프로그램을 운영할 경우 세제나 재정지원을 확대하는 방식도 고려할 만하다.

지역 불균형에 대한 대응도 중요하다. 로봇 자동화의 영향은 산업 구조와 입지에 따라 다르게 나타나며, 제조업 비중이 높은 지역일수록 고용 충격이 집중될 가능성이 크다. 이러한 지역에는 전환기 근로자를 위한 고용유지 보조, 지역 기반 창업지원, 서비스업 유입 촉진 등 맞춤형 대응이 필요하다. 반대로 로봇 도입이 더딘 돌봄, 의료, 문화·서비스 산업에서는 AI 보조형 일자리 창출이 가능하므로, 해당 분야를 새로운 고용 완충지대로 육성할 수 있다.

한편, 자동화로 인한 일시적 실직과 직업 전환에 대비해 사회안전망을 보완하는 일도 시급하다. 전직훈련 수당이나 고용보험 급여 기간을 유연하게 조정하고, 로봇·플랫폼 협업형 노동자 등 비전형 근로자에 대한 사회보험 적용 범위를 확대해야 한다. 이는 기술변화가 불평등 심화로 이어지는 것을 막기 위한 최소한의 제도적 안전장치가 될 것이다.

궁극적으로 피지컬 AI 시대의 목표는 '사람을 대체하는 기술'이 아니라 '사람을 보완하는 기술'을 확산시키는 것이다. 로봇이 인간의 신체적 한계를 보완하고, 인간은 로봇이 수행할 수 없는 판단·

감성·창의성을 더하는 형태의 협업 생태계를 구축해야 한다. 이를 위해서는 교육·훈련 시스템의 전면 개편, 산업 간 속도 차이를 고려한 단계적 대응, 기업의 사회적 책임을 내재화한 기술 거버넌스 등이 함께 마련되어야 한다.

결국 중요한 것은 기술의 속도보다 빠른 인력의 적응이다. 피지컬 AI의 확산은 불가피하지만, 그 방향을 사람 중심으로 설계한다면 이는 위기가 아니라 기회가 될 수 있다. 생산성 향상과 포용적 고용을 동시에 달성하기 위해서는 정부·기업·근로자가 함께 'AI-인간 협업의 새로운 표준'을 만들어가는 노력이 절실하다.

참고문헌

- 서동현·오삼일·김민정(2025), 「AI의 빠른 확산과 생산성 효과: 가계조사를 바탕으로」, BOK이슈노트 제2025-22호
- 안군원·구자현(2025), 「기술 혁신과 노동시장 변화」, 노동리뷰 2025년 10월호
- 오삼일·이수민·이하민·장수정·Zexi Sun·Xin Cindy Xu(2025), 「AI와 한국경제」, BOK이슈노트 제2025-2호
- Acemoglu, D.(2024), 「The Simple Macroeconomics of AI」, NBER Working Paper No.32478
- Bick A., Blandin A., Deming D.(2025), 「The Rapid Adoption of Generative AI」, NBER Working Paper No.32966

GLOBAL TRENDS & BIZ INSIDE

피지컬 AI 시대는 현재진행형이다. 이에 대한 각국의 정책 또한 다양하다. 이미 국가 차원에서 전략을 세우고 각종 지원을 앞세우는 나라부터 기존 산업을 기반한 전략과 장기적인 정책까지 다양하다. S&T DATA에서는 국내외 피지컬 AI 관련 정책과 주요 동향을 통하여 각 나라의 여러 대응을 전달한다.

또한 국내의 피지컬 AI 관련 기업과 산업 사례를 전한다. 특히 스스로 생각하는 로봇을 통해 우리 산업 전반의 경쟁력을 높이는 사례들을 통해 우리나라 피지컬 AI 기업들과 관련 산업의 미래를 가늠해 본다.

Global Trends

국내외 피지컬 AI 정책 동향

BIZ Inside

로봇이 스스로 생각하는 공장, 제조의 두뇌를 만든다
로봇이 사람을 돕는 세상, 그 미래를 앞당기다

KISTI+

피지컬 AI 시대, 사이버 보안 과제와 전략 방향





국내외 피지컬 AI 정책 동향

KISTI 정책전략본부 정책연구센터

GLOBAL TRENDS



미국

트럼프 행정부, 포괄적 AI 정책 로드맵인 「미국 AI 행동 계획」 발표

트럼프 행정부가 지난 7월 23일 「미국 AI 행동 계획(America's AI Action Plan)」을 공식 발표했다. 이 로드맵은 AI 분야에서 글로벌 리더십을 확고히 하고 중국 등 경쟁국에 대한 우위를 유지하기 위한 포괄적인 정책 로드맵으로 AI 혁신 가속화, AI 인프라 구축, 국제 외교 및 안보 리더십 등 3대 축을 중심으로 90여 개 연방 정책 조치를 포함하고 있다. 트럼프 대통령은 또한 이 로드맵의 실행을 위해 3건의 실질적인 행정 명령을 뒤이어 발동했는데 ①미국 AI 기술 스택의 수출 촉진 ②데이터센터 인프라에 대한 연방 인허가 절차의 신속화 ③연방 정부에서의 'Woke AI' 방지의 세 가지이다.

출처: The White House "White House Unveils America's AI Action Plan", <https://www.whitehouse.gov/articles/2025/07/white-house-unveils-americas-ai-action-plan/>

미국, AI 분야 빅테크와 스타트업 등 민간 기업 주도 협력으로 피지컬 AI 분야 혁신 주도

국제로봇연맹(IFR)¹⁾이 발행한 「세계 로봇 R&D 프로그램 2025」에 따르면 국립과학재단(NSF)²⁾은 「지능형 로봇 및 자율 시스템(IRAS)」³⁾ R&D 프로그램에 2023년에 5,380만 달러, 2024년에는 약 6,990만 달러를 지원했으며, 트럼프 대통령 취임 후 자국우선주의 기조 강화로 피지컬 AI 관련 기술 자립 강화를 위한 리쇼어링, 관세 정책 등을 적극 추진해 왔다. 또한 미 정부는 Open AI, SoftBank 등의 기업과 함께하는 스타게이트(Stargate Project)를 발표하였는데, 이 AI 인프라 프로젝트는 5,000억 달러 규모로 대규모 센터와 전력 인프라를 건설해 고성능의 연산 환경을 마련하는 것이 목표다. 그리고 이를 통해 대규모 연산 능력과 실시간 데이터 처리가 필요한 피지컬 AI 기술의 연구, 개발, 상용화를 뒷받침할 계획이라고 한다.

출처: 소프트웨어정책연구소 「피지컬 AI의 현황과 시사점」, https://spri.kr/posts/view/23873?code=data_all

1) 국제로봇연맹: IFR, International Federation of Robotics

2) 국립과학재단: NSF, National Science Foundation

3) 지능형 로봇 및 자율 시스템(IRAS, Intelligent Robotics and Autonomous Systems): 인공지능, 센서, 제어기술 등 첨단 ICT를 융합해 스스로 판단하고 행동하는 로봇 및 시스템



중국

2030년 AI 초강대국을 목표로 하는 'AI 플러스' 로드맵 발표

지난 8월 26일, 중국 국무원은 AI를 새 성장 동력으로 중점 육성하기 위해 과학기술과 소비, 거버넌스 등의 분야에 대한 AI의 접목을 가속화하고 국가 차원의 지원 강도를 높이는 내용을 담은 'AI 플러스(+)' 로드맵을 발표했다. 이 로드맵은 AI를 다양한 분야에 적용한다는 내용을 담은 정책으로, 기초 과학 연구 플랫폼과 중대 과학기술 인프라의 스마트화 수준을 높이고 개방적인 고품질 과학 데이터 셋을 구축해 AI를 매개로 학제 간 연구 활성화를 목표로 한다. 이에 따라 2027년까지 바이오 제조, 양자 과학, 6세대 이동통신(6G)과 같은 과학과 기술, 산업, 소비, 민생, 거버넌스, 글로벌 협력 등 6대 영역과 AI의 융합을 선도적으로 실현하겠다는 내용이 담겼다. 또한 철학·사회과학 분야와 함께 공업·농업·서비스업 등 전 산업에 걸쳐 인자·의사결정 등에서 AI의 활용폭을 높이고 인재풀을 넓힐 계획이 담겨있다고 중국 당국은 밝혔다.

출처: KBS "중국, 2030년 AI 초강대국 목표, 'AI 플러스' 로드맵 발표", <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=8341392>

2026년 예정 '15차 5개년 계획', 체화지능을 비롯한 첨단기술 산업 부흥 내용 담겨

중국의 중장기 경제성장 로드맵인 '14차 5개년 계획'이 마무리되는 올해 10월, 중국은 4중전회를 개최해 내년에 시작될 '15차 5개년 계획'을 위한 초안을 발표하였다. 이 초안이 담긴 '중국공산당 중앙위원회의 국민경제 및 사회발전 제15차 5개년 계획 제정에 관한 건의'에는 "미래산업을 선제적으로 배치해 양자기술, 바이오 제조, 수소·핵융합 에너지, 뇌-컴퓨터 인터페이스, 체화 지능(Embodied Intelligence), 6세대 이동통신 등을 신규 경제 성장점으로 추진"에 대한 내용이 담겨 있다. 여기에서 체화지능은 AI를 적용해 로봇 스스로 실제 환경과 상호작용 하도록 하는 기술로, 중국 정부는 이러한 첨단기술 산업을 부흥시켜 수조 위안 또는 그 이상의 대규모 시장을 창출해 경제대국으로 발전하는 동력으로 삼을 것이라고 한다.

출처: 머니투데이 "중국 다음 5년 '양자기술, AI+로봇' 육성, 강대국 경쟁 치열해질 것", <https://www.mt.co.kr/world/2025/10/24/2025102415242786944>





EU

EU, 유럽 내 AI 활용의 전략적 자율성 확보를 위해 AI 및 로봇 연구에 투자

EU는 미-중 간 무역 긴장 심화와 미국 빅테크 기업의 지배력 확대에 대응하여 여러 산업 부문에서 저조한 AI 활용을 높이기 위하여 로봇공학, 헬스케어, 제약, 에너지, 제조, 건설, 농식품, 자동차, 방위, 통신, 창작 등 11개 분야에서 호라이즌 유럽 프로젝트를 통해 예산 10억 유로를 투자할 예정이다. 이 중 로봇 관련 연구 과제는 크게 2분야로 나뉘는데 ①생산 라인에서 지능적 공작물 핸들링 ②스마트 제조를 위한 AI로 강화된 로봇이며, 분야별로 4개씩, 총 8개 과제로 나뉘어 연구가 진행되고 있다. 특히 스마트 제조를 위한 AI 강화 로봇 시스템은 AI와 로봇을 결합해 제조 현장에서 인간과 기계가 안전하게 협력할 수 있는 스마트 제조 시스템 개발을 목표로, AI 기반의 직관적 프로그래밍을 통해 숙련된 인력 없이도 로봇을 사용할 수 있도록 하며, TRL⁴⁾ 4단계에서 6단계까지 개발하는 것을 구체적인 목표로 하고 있다.



출처: 매일경제 “유럽 전략적 자율성 확보” EU, AI에 1조 6천억 투자”, <https://www.mk.co.kr/news/world/11437837> / KIST 유럽연구소 「이슈페이퍼」 2024.12.



독일

독일 연방교육연구부(BMBF)⁵⁾ 「로봇연구 실행계획(Aktionsplan Robotikforschung)」 발표 및 독일 로봇 연구소(Robotics Institute Germany) 설립 지원

독일의 연방교육연구부(BMBF)는 기존의 「로봇연구 실행계획(Aktionsplan Robotikforschung)」을 업데이트한 「로봇연구 실행계획 1.1」을 발표하며 AI 기반 로봇공학의 혁신적 잠재력 활용을 목표 중 하나로 설정하였다. 이 실행계획은 연구 및 숙련 인력 부문에서 국가 로봇 생태계 강화에 적극 기여하며 로봇공학 연구 지원을 전략적으로 수행할 방침을 세우고, 연구자와 자금 지원 기관 모두에 방향성과 중점 영역을 안내하는 로봇연구 프레임워크를 제공하려고 한다. 특히 BMBF는 로봇공학 연구 강화를 위해 ①기반기술 혁신 활용 ②첨단 로봇공학 연구 결합 ③전문인력 육성 ④지능형 로봇 활용 등 4대 실행 분야를 설정하였다. 또한 경제기후보호부(BMWK)⁶⁾와 역할을 분담하여 독일의 로봇연구 거점 간 네트워크 형성을 위하여 독일 로봇 연구소(Robotics Institute Germany) 설립을 공표하고, 국방부는 지능형 로봇 공학 분야에서 4년간 최대 2천만 유로의 사업비를 지원하기로 하였다.

출처: 한국로봇산업진흥원 「로봇 이슈브리프」, 2024.7. / 한국연구재단 「Global Insight」 Vol.129

4) TRL: 기술성숙도(Technology Readiness Level)의 약어로 특정 기술이 제품이나 시스템에 적용되기 전 단계에서 기술의 성숙도를 객관적으로 평가하는 기준

5) 연방교육연구부: BMBK, Bundesministerium für Bildung und Forschung

6) 경제기후보호부: BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



일본

일본, 문샷(Moonshot) 프로젝트를 통해 2050년까지 인간과 공생하는 '차세대 AI 시스템' 구현 추진

일본 정부는 2019년부터 본격적으로 추진한 문샷 프로젝트를 통해 '인간 행복'의 실현을 최종 목표로 삼고 총 4억 4천만 달러의 예산을 들여 사회·환경·경제 분야별로 각각 비전을 제시하며 다양한 R&D 프로젝트를 추진해 왔다. 이 프로젝트의 9대 세부 목표 중 하나가 '스스로 학습·행동하고 인간과 공생하는 AI 로봇'으로 저출산 및 고령화로 인한 인력 부족에 대처하고, 로봇 기술을 통해 인간의 전반적 웰빙(신체적·정신적·사회적 측면)을 증진하는 것을 최종 목표로 삼고 있다. 현재 2020년부터 2030년까지 진행 중인 연구로는 평생 동행하는 스마트 로봇, 사람과 융화하여 지식의 창조 경계를 넘나드는 AI 로봇, 달 표면 탐사 및 거점 구축을 위한 자가 재생형 AI 로봇 연구 등이 있다.

출처: 국가생명공학정책연구센터 "2050년을 대비한 일본 과학기술 정책, 문샷형 R&D", https://www.bioin.or.kr/board.do?cmd=view&num=328510&bid=issue&cate1=&cate2=&sdate=&edate=&s_key=&s_str=&cPage=



한국

AI를 통한 경제·민생 위기 극복과 글로벌 AI 3대 강국 도약을 목표로 하는 '인공지능 행동계획' 발표

지난 7월 26일 정부는 경제와 민생 위기 심화 가운데 AI를 통해 위기를 돌파하고 글로벌 AI 3대 강국으로 진입하기 위한 전략을 담은 '인공지능 행동계획(AI 액션플랜)'을 발표했다. 이 행동계획은 AI를 국가 성장의 핵심 동력으로 삼아 산업·사회 전반의 혁신과 국민 삶의 질을 향상하는 것을 동시에 추구하기 위함으로 구체적으로는 AI 혁신 생태계 조성, 범국가 AI 기반 대전환, 글로벌 AI 기본사회 기여를 3대 정책축으로 삼고 12대 전략 분야로 구성했다. 보다 자세한 대표 과제와 계획을 11월까지 수립하여 발표할 예정이며, 민관 협력 모델로 특수목적법인을 설립해 추진할 계획이다.

출처: KDI 경제교육·정보센터 "대한민국 인공 지능 행동계획(AI액션플랜) 추진방향", https://epts.kdi.re.kr/policTmsesSvc/them?SEARCH_CTE_SEQ=81145



로봇이 스스로 생각하는 공장, 제조업의 두뇌를 만들다

다임리서치



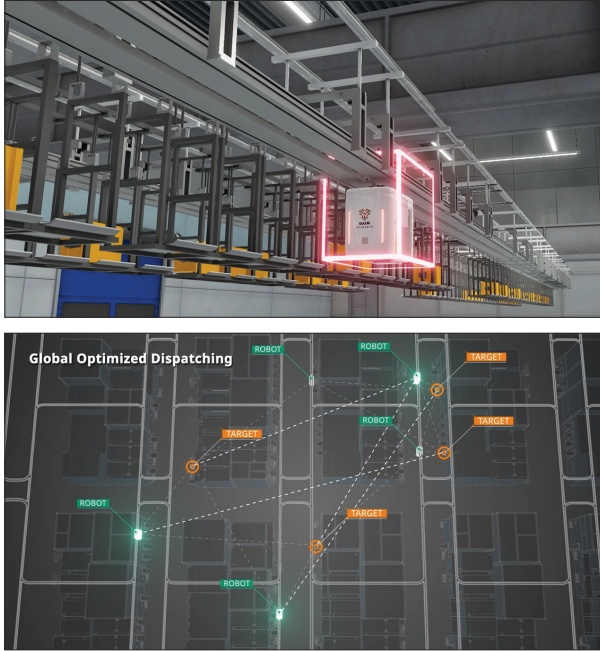
산업 현장은 이제 '자동화'를 넘어 '자율화'로 진화하고 있다. 수천 대의 로봇이 스스로 판단하고 움직이며, 공장이 스스로 최적의 의사결정을 내리는 시대. 그 중심에는 피지컬 AI를 현실에 구현하는 기업, 다임리서치(DAIM Research)가 있다. 이 회사의 이름은 Data+AI+Manufacturing의 합성어로, 데이터와 인공지능을 통해 '제조업의 두뇌'를 만든다는 철학을 담고 있다.

AI가 공장을 스스로 움직이게 하다

다임리서치는 2020년 KAIST 산업 및 시스템공학과에서 탄생했다. MIT에서 기계공학을 전공하고 미국 Micron Technology사에서 반도체 공정 매니저로 근무했던 장영재 대표는 학문과 산업이 연결되어야 한다는 생각을 바탕으로 KAIST 교수로 돌아온 뒤에도 '현장을 이해하는 교수, 현실을 배우는 학생'이라는 철학을 바탕으로 AI와 제조를 연결하는 연구에 몰두했다. 이후 'AI가 실제

공장을 스스로 움직이게 만들 수 있을까?'란 질문에 집중하며 본격적으로 연구에 몰두, 이렇게 시작된 자율제조 연구는 2019년 KAIST 10대 대표 기술로 선정됐다. 그리고 이를 산업 현장에 직접 적용하기 위해 설립된 기업이 다임리서치다. 다임리서치의 핵심 키워드는 '협업지능(Collaborative Intelligence)'이다. 로봇이 각각 똑똑한 것이 아니라, 서로 연결되어 협력하도록 만드는 지능으로 이를 통해 수천 대의 로봇이 마치 하나의 생명체처럼 움직이는 '대규모 로봇 군집 자율제조 소프트웨어'가 탄생했다.

디지털 트윈 기반 제조·물류 자율운영 최적화



스스로 판단하고 적응하는 공장으로 진화하다

다임리서치의 기술은 단순한 자동화를 넘어 ‘스스로 판단하고 적응하는 공장’을 만드는 데 초점을 맞춘다. xMS(이기종(異機種) 물류로봇을 하나의 두뇌로 통합 제어하는 AI 오케스트레이션 플랫폼), xDT(실제 공장을 1:1로 복제해 시뮬레이션하는 디지털 트윈 엔진), xSIM(설계·투자·운영을 데이터 기반으로 자동 검증하는 시뮬레이션 시스템)의 이 세 가지 기술이 유기적으로 작동하며, AI가 공장의 모든 상황을 실시간으로 학습하고 판단한다. 강화학습(Deep Reinforcement Learning)을 기반으로 로봇 간 충돌을 예방하고, 우선순위를 스스로 조정하는 자율제조 최적화 기술은 다임리서치의 핵심 경쟁력이다. 다임리서치의 또 다른 강점은 시뮬레이션이 곧 의사결정이 되는 구조로 가상공장에서 시뮬레이션한 결과를 실제 공장에 즉시 반영하는 ‘Sim-to-Real 클로즈드 루프’를 구현했다. 이는 단순히 자동화된 공장을 넘어, 예측·적응형 운영이 가능한 AI 생태계를 완성하는 기술이다. 덕분에 고객은 ‘공장을 자동화했다’가 아니라, ‘공장이 스스로 문제를 예방하고 개선하는 시스템으로 진화했다’는 변화를 체감한다. 다임리서치가 만드는 피지컬 AI는 현실의 제조 현장을 학습하고 진화시키는 ‘살아 있는 두뇌’다.

빠르게 성장하는 K-자율제조 선두

설립 5년 만에 다임리서치는 국내 자율제조 분야에서 가장 빠르게 성장한 기술기업으로 평가받고 있다. 국내 굴지의 대기업들을 중심으로 40개 이상의 제조 현장에 솔루션을 공급하고, 2024년 과기정통부 장관상, 2025년 INFORMS Analytics+ 글로벌 혁신상 2위를 수상했다. 그 밖에도 Series B 투자에 220억 원을 유치하며, 2차전자·반도체 공장을 대상으로 한 디지털 트윈 프로젝트를 다수 수행 중이다. 또한 현재 과기부의 ‘Physical AI 실증사업’과 산업부의 ‘산업AI 솔루션 실증확산지원 사업’ 등의 정부 프로젝트를 기획하고 동시에 수행하고 있다. 이는 창업 당시의 ‘AI로 제조를 자율화한다’는 비전을 그대로 이어가는 여정이다. 다임리서치는 R&D 기업이 아니라, ‘R&D로 움직이는 기업’으로서 KAIST, ETRI, 서울대와 포스텍 등 국내 대표 연구기관과의 협력을 이어가며 기술 생태계를 확장하고 있다. 이를 통해 단일 기술을 넘어, 국가 제조 생태계 전체의 인프라로 확장되는 플랫폼 모델을 만들어가고자 하는 것이다. 다임리서치는 앞으로 5년 이내에 국내 AI 자율제조 K-Model을 완성하고, 글로벌 시장에서는 ‘Palantir for Manufacturing’, 즉 제조 데이터를 지능화하는 세계적 플랫폼으로 자리 잡는 것을 목표로 하고 있다. AI가 산업 현장 속에서 실제로 사고하고 작동하는 것, 바로 그것이 다임리서치가 꿈꾸는 피지컬 AI의 미래다.



(주)다임리서치 장영재 대표

로봇이 사람을 돕는 세상, 그 미래를 앞당기다

에이로봇



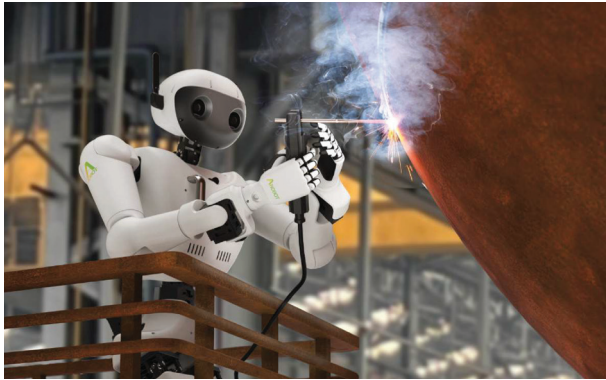
인구 감소와 고령화, 인력난은 산업 전반의 구조적 변화를 요구하고 있다. 사람 대신 위험하고 반복적인 일을 수행하며, 동시에 사람과 함께 협업할 수 있는 로봇의 필요성이 커지고 있다. 피지컬 AI 시대, ‘로봇이 사람처럼 생각하고 움직이는’ 현실을 구현하는 기업이 있다. 바로 에이로봇(AeiROBOT)이다. ‘모두를 위한 하나의 로봇(A Robot for All)’이라는 이름처럼, 에이로봇은 인간과 함께 움직이며 실질적인 가치를 창출하는 휴머노이드 플랫폼을 개발하는 혁신적인 스타트업이다.

연구실에서 산업 현장으로, 기술이 현실을 만나다

에이로봇은 2018년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 한재권 교수 연구팀(HERoEHS)의 스핀오프 형태로 시작한 기업이다. 한 교수는 재난구조 로봇 ‘돌망’, 로보컵(RoboCup)에서 활약한 AI 자율 축구 로봇 ‘앨리스(ALICE)’ 등으로 잘 알려진 로봇공학의 선구자다. 연구실에서 쌓아온 보행 제어, 전신 제어, 자율 인공지능 등 핵심 기술을 산업 현장으로 옮기겠다는 사명감이 창업의 출발점

이었다. 연구팀의 염윤설 대표와 한재권 CTO는 단순히 기술을 실험하는 단계에 머무르지 않고 실제 경제·산업 구조의 변화를 이끌기 위한 실행형 연구의 모델을 제시했다. 창업 이후 웰컴 로봇 ‘에이미(Aimy)’, 반려 로봇 ‘에디(Eddie)’ 등 다양한 휴머노이드 플랫폼을 선보이며 기술 상용화의 기반을 다졌다. 특히 2025년에는 100억 원 규모의 시리즈 A 투자 유치에 성공하며 글로벌 시장 진출의 발판을 마련했다. 그러한 에이로봇의 경쟁력은 ‘하드웨어와 소프트웨어의 수직 통합’이다.

앨리스(ALICE) 4의 구동 상상도



근육과 두뇌, 에이로봇의 피지컬 AI 기술

먼저 하드웨어 측면에서, 자체 개발한 리니어 액추에이터(Linear Actuator)는 로봇의 근육에 해당하는 핵심 부품이다. 기존의 감속기 기반 회전 모터와 달리 감속기를 제거하고 실시간 자속 지향 제어(Field Oriented Control) 기술을 적용한 드라이버를 자체 개발했다. 이를 통해 토크 제어의 정확성과 응답성을 극대화하고, 로봇이 사람과 자연스럽게 힘을 주고받는 물리적 상호작용이 가능해졌다. 이 기술은 단순히 정교한 제어를 가능하게 할 뿐 아니라, 부품 단가를 낮추고 양산 효율을 높여 로봇의 대중화 가능성을 현실로 만든다. 소프트웨어 측면에서는 엔비디아의 '아이작 그루트(Isaac GR00T)'를 활용해 로봇의 지능을 강화하고 있다. 이는 로봇용 파운데이션 모델(Robot Foundation Model)로, 자연어 명령 이해부터 작업 계획, 환경 인식까지 통합적으로 제어한다. 에이로봇은 이 기술을 자체 AI 시스템과 결합해, 로봇이 스스로 판단하고 행동할 수 있는 피지컬 AI 플랫폼을 구축했다. 이렇게 하드웨어와 소프트웨어를 최적화한 수직 통합 전략은, 로봇의 제어 정확도와 반응성, 에너지 효율을 극대화하여 최종 제품의 가격 경쟁력까지 확보하는 기반이 되었다.

이는 자체적인 혁신 기술 개발과 국내외 우수 연구 기관, 글로벌 기업과의 적극적인 협력을 통해 기술력을 강화한 덕분이다. 특히 한양대 HERoEHS 연구팀과 긴밀한 협력으로 연구팀은 첨단 기술의 개념 증명(PoC)과 학술적 검증을 담당하고, 에이로봇은 이를 실제 시장 환경에 맞춰 상용화함으로써 '지속 가능한 산학협력 생태계'를 구축했다. 또한 엔비디아의 인셉션 프로그램(NVIDIA Inception Program) 파트너로 선정되어 글로벌 AI 기술 협력망 속에서 기술 고도화를 가속하고 있다.

산업 현장에서 검증되는 로봇, 사람의 동료로 서다

에이로봇은 현재 휴머노이드 로봇 '앨리스(ALICE)' 시리즈를 제조, 조선, 건설 등 인력난이 심화된 산업 현장에 투입해 PoC(개념검증) 사업을 진행 중이다. 12월 첫째 주부터 HL만도, 아모레퍼시픽 등 대한민국을 대표하는 Tier-1과 K-뷰티 제조업 현장에서 학교(부산대, 부경대, 한양대)와 협력하여 현장 데이터를 수집하고 있고, SK텔레콤, SK AX와 함께 이들의 DX/AX를 지원하고 있다. 또한 '산업융합 규제 샌드박스' 과제에 선정되며 기술의 실증 단계를 본격화했다. 이를 통해 로봇이 단순히 실험실 안에서 움직이는 존재가 아니라, 사람 곁에서 실제 작업을 함께 수행하며 생산성을 높이는 협업 파트너로 자리 잡기 위한 도전을 해 나가고 있다. 이러한 행보는 정부가 추진 중인 'K-휴머노이드 연합' 등 국가 차원의 로봇산업 육성 정책과도 맞물려 있다. B2B 실증 사업을 통해 휴머노이드 로봇의 상업적 가치를 증명하고, 장기적으로는 코스트 컨트롤(Cost Control) 기반의 양산 체제 구축을 목표로 한다. 그리고 이를 통해 6천만 원대의 보급형 휴머노이드 출시를 추진 중이다.

에이로봇은 꿈꾼다. 로봇이 인간의 노동을 단순히 대체하는 것이 아니라, 함께 일하며 삶의 질을 향상시키는 파트너가 되는 세상을 꿈꾼다. 이를 위해 에이로봇은 부품 모듈화, AI 자율제어 고도화, 대규모 운용 데이터 학습을 지속하며 피지컬 AI 기술의 완성도를 높이고 있다. 피지컬 AI 시대, 에이로봇은 한국형 휴머노이드 기술로 '로봇이 사람을 돕고 함께하는 미래'를 현실로 만들어가고 있다.

AROBOT



(주)에이로봇 임윤설 대표

피지컬 AI 시대, 사이버 보안 과제와 전략 방향

이지민 KISTI 정책연구센터 선임연구원

황명권 KISTI 정책연구센터 센터장

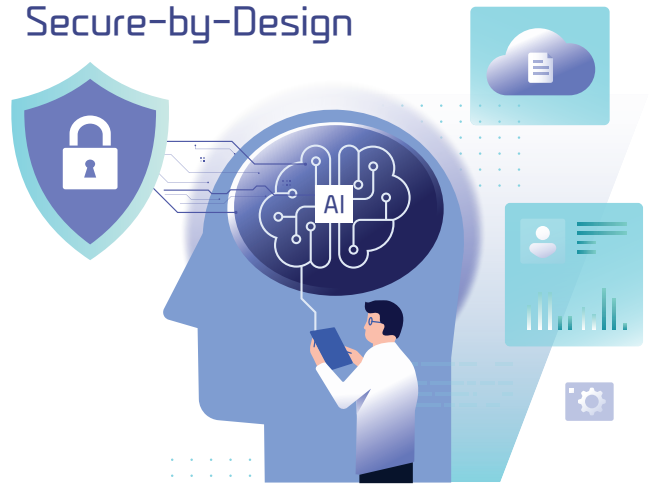
권태웅 KISTI 과학기술보안연구센터 선임기술원

이 준 KISTI 과학기술보안연구센터 센터장

CYBERSECURITY

디지털 영역에 존재하던 인공지능이 감각기관인 센서와 몸의 역할을 하는 구동기(액추에이터 등)를 통해 현실 세계와 직접 상호작용하는 피지컬 AI 시대로 전환되고 있다. 현실 세계에서 자율적으로 행동하는 피지컬 AI의 특성상, 사이버 공격의 대상이 될 경우 정보 유출에 그치지 않고 인명피해, 기반 시설 마비 등 현실 세계의 안전을 위협하는 심각한 결과를 초래할 수 있다. 이에 본고는 피지컬 AI 시대 사이버 보안 이슈에 주목하여, KISTI에서 수행하는 AI 기반 사이버 위협 탐지 연구를 통해 사이버 보안 전략 방향성을 모색하고자 한다.

Secure-by-Design



현실이 된 사이버 위협

2024년 미국 여러 도시에서 해커가 중국산 에코백스(ECOVACS) 디봇 X2 로봇청소기의 카메라와 원격 제어 기능을 탈취해 오작동을 유발한 사건이 보고되었다. 조사 결과 블루투스 연결 과정에서 인증-암호화 설계가 취약한 점을 해커가 악용한 것으로 밝혀졌다. 2025년에는 보안 기업 Alias Robotics 연구진(Mayoral-Vilches, Markis & Finsterre)이 중국 유니트리(Unitree) G1 휴머노이드 로봇의 저전력 블루투스 통신(BLE)¹⁾ 보안 프로토콜의 취약점을 발견했다. 연구 결과, 모든 로봇이 동일하게 하드 코딩된 고급 암호화 표준

(AES)²⁾ 키를 사용하는 구조로 설계되어 해당 키만 확보하면 로봇의 핵심 제어권을 손쉽게 탈취할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 또한 연구진은 해당 로봇에서 사용자의 명시적 동의 없이 외부 서버로 로봇 상태 및 센서 데이터를 지속적으로 전송한 것을 확인했다. 데이터 전송 과정의 보안 취약성으로 센서 데이터의 유출뿐만 아니라 조작까지 가능하다는 문제도 제기되었다. 이처럼 피지컬 AI가 사이버 공격에 노출될 경우 물리 제어 오남용뿐 아니라, 센서 데이터 조작으로 잘못된 판단도 유도할 수 있어 심각한 물리적 피해로 이어질 수 있다.

1) 저전력 블루투스 통신(BLE, Bluetooth Low Energy): 스마트폰, 웨어러블, IoT 기기 등에서 낮은 전력으로 데이터를 주기적으로 또는 간헐적으로 주고받을 수 있게 설계된 무선 통신 기술

2) 고급 암호화 표준(AES, Advanced Encryption Standard): 미국 국가표준기술 연구소(NIST)가 2001년에 채택한 대칭키 암호화 알고리즘으로, 민감한 데이터와 기밀 정보를 보호하는 데 널리 사용되는 국제표준 암호화방식

피지컬 AI 시대 사이버 보안 과제

피지컬 AI가 다수의 센서, AI 모델, 소프트웨어, 엣지 하드웨어 등 융합 기술 시스템으로 구성되는 특성상, 단일 취약점이 전체 시스템의 보안 위협을 초래할 수 있다. 또한 글로벌 제조 환경, 다양한 소프트웨어 스택 등 복잡한 피지컬 AI 공급망으로 신뢰 경계가 불명확한 점이 보안 취약점을 더 높인다. 기존의 중앙집중형이나 폐쇄망을 전제로 설계된 보안 모델로는 다중 공격 벡터를 방어하기에 충분하지 않아, 포괄적이고 융합적인 보안 전략이 필요하다. 따라서 피지컬 AI 시스템 자체를 안전하게 만들 수 있도록 설계해야 하며, 동시에 AI를 보안 수단으로 활용하여 사이버 위협을 탐지하고 선제적으로 대응하는 전략이 필수다. 또한 대중이 활용하는 제품의 경우에는 데이터 수집, 전송, 처리, 행동 등의 일련의 과정에 대해 테스트할 수 있는 검사 표준을 만들어 적용하는 것이 필요하다.

KISTI 사이버 보안 연구와 역할: 국가적 대응 노력

KISTI 과학기술보안연구센터는 AI를 기반으로 다양한 물리적 환경에서 발생하는 사이버 위협에 능동적으로 대응하기 위한 핵심 연구를 주도하고 있다. 특히 도로교통·해양선박 등 환경별 고유한 특성과 위협 패턴을 반영한 AI 기반 탐지 모델을 개발·최적화하여 사이버 위협 대응 역량을 강화하고 안정적인 운영 환경 구축을 목표로 하고 있다. 또한 다변화된 환경에서 나타나는 사이버 위협에 효과적으로 대응하기 위해 범부처 참여형 협력·공유 플랫폼을 구축하고, 기관 간 위협 정보의 통합·연계 및 공조 체계 강화를 적극 추진하고 있다. 아울러 KISTI는 2025 충청 사이버보안 콘퍼런스를 개최하여 충청권 산·학·연·관의 위기 대응 협력체계와 위협 인텔리전스 공유 기반을 강화하는 등 지역의 사이버 위협 대응력 제고에 기여했다. 더불어 ‘충청권 대학(원)생 사이버 위협 시나리오 공모전’과 ‘사이버보안 기업 홍보 부스’ 운영을 통해 지역의 보안 인재 양성은 물론, 대학(원)생들에게 진로 탐색 및 취업 연계의 기회를 제공하는 등 지속적인 육성 활동도 이어가고 있다.

피지컬 AI 시대 사이버 보안 전략 방향

피지컬 AI 자체의 보안을 높이기 위해서는, Secure-by-Design 원칙을 반영해 안전 및 보안 기능을 처음부터 시스템

설계에 통합해야 한다. 특히 휴머노이드와 같은 피지컬 AI는 얼굴 인식이나 행동 패턴 등 민감한 생체 인식 데이터를 취급하므로, 데이터 수집 단계부터 윤리적 원칙과 보안 기준이 엄격하게 적용되어야 한다. 예상치 못한 고장이나 오작동 상황에서 로봇이 안전하게 정지하거나 통제되도록 하는 Fail-Safe 메커니즘 병행도 필요하다. 아울러 피지컬 AI 개발·도입 전 과정에서 보안 요구사항을 명시하는 규제·표준 체계와 보안 취약점 검증을 위한 인증·시험 인프라를 구축함으로써 안전성과 신뢰성을 제도적으로 담보할 필요가 있다.

피지컬 AI를 노리는 사이버 공격으로부터 보안을 지키기 위해서는 AI 기반의 자율적인 사이버 방어 시스템을 구축해야 한다. 실시간으로 사이버 위협을 탐지하고, 즉각적으로 대응하는 능력을 최적화하여 방어 태세를 유지하는 것을 목표로 해야 한다. 나아가 글로벌 차원의 협력을 통해 피지컬 AI 전용 보안 도구와 국제 표준을 개발하여 전반적인 사이버 방어 수준을 향상해야 한다. 특히 복잡한 글로벌 공급망을 전제로 하는 피지컬 AI의 특성상, 소프트웨어 자재 명세(SBOM) 관리, 펌웨어 무결성 검증 등 공급망 보안을 강화하고 취약점 정보를 공유하는 체계적인 거버넌스가 요구된다. 마지막으로, 지속 가능한 보안 생태계 구축을 위하여, 사이버 보안 전문 인력을 체계적으로 양성하고 관련 교육 프로그램을 마련해야 한다.

참고문헌

- 보안뉴스(2025), “[한국정보보호학회 칼럼] 멀티 에이전트·피지컬 AI 시대의 첨단산업 융합보안”, <https://www.boannews.com/media/view.asp?idx=139257>
- 로봇신문(2025), “中 유니트리 로봇, 심각한 보안 취약점 발견”, <https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=42667>
- ABC News(2024), “Hackers take control of robot vacuums in multiple cities, yell racial slurs”, <https://www.abc.net.au/news/2024-10-11/robot-vacuum-yells-racial-slurs-at-family-after-being-hacked/104445408>
- Mayoral-Vilches, V., Makris, A., & Finisterre, K.(2025), Cybersecurity AI: Humanoid Robots as Attack Vectors. arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.14139>
- Checkpoint(2025), 2025 AI security report, <https://engage.checkpoint.com/2025-ai-security-report/>
- Control Engineering(2025), “How to Create a Physical AI Security, Safety Framework.”, <https://www.controleng.com/how-to-create-a-physical-ai-security-safety-framework/>
- CYBERCRIME MAGAZINE(2025), Cybercrime To Cost The World \$12.2 Trillion Annually By 2031, <https://cybersecurityventures.com/official-cybercrime-report-2025/>
- WEF(2025), Artificial Intelligence and Cybersecurity: Balancing Risks and Rewards

국가 과학기술 정보분야의
전문 연구기관으로서 임무
국가 과학기술 진흥과
산업의 발전에 기여 (정관 제1조)



AI와 HPC 기반으로
“R&D 혁신을 선도” 하는 기관

핵심가치

“WITH KISTI”

Widen

개방과 협력으로
선도형 R&D 생태계 확장



Innovate

최고 수준 인프라 및
연구역량 확보로 R&D 혁신



Transform

첨단 기술로 R&D
패러다임 전환



EnHance

연구몰입 환경 및 투명한
조직문화 개선으로 성과 제고

기관 운영 방향

세계 수준의 AI 컴퓨팅
자원 확충 및 연구역량 확보

개방·협력·교류를 통한 연구
생태계 주도 및 내부 문화 혁신

국가·사회현안해결을 위한
속도감 있는 지원체계 구축

외부

AI-HPC 기반 R&D로의 대전환 선도

장기미래상

내부

수월성과 지속성을 유지하는 연구원으로 변모



고유기능
강화

국민과 정부 기대에 부응하는
세계 최고
수준의 인프라 연구원



국가전략기술
역량 강화

기술패권 시대
국가 과학 기술경쟁력
확보의 한 축



국제협력
지역혁신
산업활용

국내·외 연구
협력 생태계 선도로
R&D 혁신사례 창출



연구문화

역동적이고 혁신적인
조직 및 연구문화 정착



KISTI SERVICE

KISTI는 국가 과학기술 데이터
최고책임기관으로서 1962년부터 지난 63년간
구축한 과학기술인프라를 기반으로 누구나 언제
어디서든 데이터를 활용할 수 있도록 다양한
서비스를 운영하고 있습니다.

국가과학기술지식정보서비스 ntis.go.kr
국가연구데이터플랫폼 dataon.kisti.re.kr
국가오픈액세스플랫폼 accesson.kisti.re.kr
건전학술활동지원시스템 safe.accesson.kr
국가전자정보공동구매컨소시엄 kesli.or.kr
한인과학기술자네트워크 kosen.kr
한국학술지인용색인서비스 koreascience.kr/ksci
KoreaScience koreascience.or.kr
한국DOI센터 doi.or.kr
국가슈퍼컴퓨팅센터 www.ksc.re.kr
슈퍼컴퓨팅M&S mns.kisti.re.kr
첨단사이언스교육허브개발 www.edison.re.kr
과학기술정보협의회 astinet.kr
데이터기반기술사업화지원플랫폼 kisti.smartk2c.or.kr
경쟁정보분석서비스 compas.kisti.re.kr
기술가치평가시스템 www.starvalue.or.kr
기술기회분석서비스 tod.kisti.re.kr
산업시장분석시스템 kmapsneo.kisti.re.kr
국가과학기술연구망 kreonet.net
과학데이터교육센터 kacademy.kisti.re.kr
KAFE kafe.or.kr

S&T DATA

SCIENCE & TECHNOLOGY DATA

개방과 협력을 철학으로 발간하는 S&T DATA는
AI와 HPC 기반으로 R&D 혁신을 선도하며
국가·사회 현안의 해결을 위한 과학기술 정책 방향을
수립하는 지침서가 되겠습니다.