

2026 하계 이화글로벌프론티어 최종 보고서

피지컬 AI 시대 인간의 심리적 거리감과 인간-AI 공존 전략:
인간-로봇 상호작용(HRI) 기술과 로봇 설계 개선,
그리고 사회적 수용성 강화를 중심으로



Nexus

목차

I. 서론	3
1. 탐사주제	3
2. 탐사배경	3
3. 탐사 방법	7
II. 본론	8
1. 기존 연구 검토	8
2. 국내 탐사	12
3. 해외 탐사	14
4. 탐사의 의의 및 한계	20
5. 국내 N사 사후 인터뷰 및 프레임워크 최종 검증	21
6. 종합 비교 분석 및 통합 프레임워크 도출	24
III. 결론	26
1. 탐사 결과 종합 요약	26
2. Nexus가 제시하는 핵심 프레임워크	27
3. 프레임워크의 구조적 3대 축 상세 분석	27
4. 프레임워크의 구체적 작동 시나리오 및 검증	28
5. 프레임워크의 기대효과 및 도입 시 고려사항	30
6. 향후 과제 및 후속 연구 방향	31
7. 맺음말	32
IV. 참고문헌	33
[부록 1] 탐사 사전 준비	34
[부록 2] 탐사 기관별 인터뷰 핵심 내용 정리	35
[부록 3] 탐사 현장 기록	38

I.서론

1. 탐사 주제

**“피지컬 AI 시대 인간의 심리적 거리감과 인간-AI 공존 전략
: 인간-로봇 상호작용(HRI) 기술과 로봇 설계 개선, 그리고 사회적 수용성 강화를 중심으로”**

1) 세부 주제

본 주제는 가상 세계에 머물던 인공지능이 로봇 등 물리적 실체를 기반으로 현실 공간으로 진입하는 ‘피지컬 AI’ 시대를 맞아, 인간이 기계 지능을 마주할 때 발생하는 심리적 격차를 공학적·디자인적·제도적 관점에서 분석하고 이를 완화할 수 있는 공존 모델을 도출하는 데 목적이 있다.

2) 탐사 목표

본 탐사는 피지컬 AI의 확산 과정에서 인간이 경험하는 심리적 거리감의 원인을 다각적으로 분석하고, 이를 완화할 수 있는 인간 중심의 인간-로봇 상호작용(HRI) 설계 원칙과 사회적 수용 전략을 도출하는 것을 핵심 목표로 한다. 이를 위해 먼저 인간과 로봇의 상호작용 과정에서 발생하는 불안, 이질감, 통제권 상실과 같은 심리적 거리감의 주요 요인을 규명하고자 한다. 나아가 로봇의 움직임, 행동 의도의 표현, 설명 가능성, 감정 및 비언어적 신호 등 사용자의 이해와 예측 가능성을 높이는 기술적·디자인적 요소를 분석한다. 또한 산업, 서비스, 일상생활 등 다양한 실제 적용 환경에서 인간이 로봇을 인식하고 신뢰를 형성하는 과정을 살펴봄으로써, 기술적 성능을 넘어 사회적 수용을 결정하는 핵심 조건을 도출하고자 한다. 최종적으로는 이러한 분석 결과를 바탕으로 기술, 디자인, 제도적 관점을 유기적으로 통합한 인간-AI 공존 전략 프레임워크를 제안하는 것을 목표로 한다.

2. 탐사 배경

2-1. 피지컬 AI 시대의 도래와 문제 인식

1) 피지컬 AI 시대의 도래와 기술 패러다임 전환

과거 인공지능이 데이터 분석과 알고리즘 중심의 소프트웨어 영역에 머물렀다면, 최근에는 인간이 생활하는 물리적 공간으로 확장되며 'Physical AI' 시대에 진입하고 있다. 2026년 CES에서 '피지컬 AI'가 핵심 키워드로 부상한 것은, 기술의 중심이 로

봇, 자율주행, 스마트 공간 등 실세계와 결합된 방향으로 이동하고 있음을 보여준다. 시장 전망 또한 이러한 변화를 뒷받침한다. 피지컬 AI 핵심 분야인 휴머노이드 로봇 시장은 연평균 60% 이상의 성장률을 보이며, 2035년 약 380억 달러 규모로 확대될 전망이다. 또한 피지컬 AI 시장 전반 역시 향후 10년간 약 10배 성장이 예상되며, 빠르게 산업 전반으로 확산되고 있다. 이러한 흐름은 피지컬 AI가 단순한 기술 트렌드를 넘어, 노동력 부족 대응, 제조 혁신, 서비스 고도화 등 산업과 사회 전반을 재구성하는 핵심 기술로 자리 잡고 있음을 시사한다¹⁾.

2) 기술 발전과 인간 수용성 간의 구조적 괴리

그러나 피지컬 AI의 확산은 기술 향상만으로 설명되지 않으며, 가장 큰 병목은 안정성, 비용, 규제뿐만 아니라 인간의 심리적 수용성에 있다. 이러한 수용성 문제는 크게 세 가지로 구분된다.

첫째, 물리적 실재감과 인간 유사성에서 비롯되는 정서적 불편함이다. 피지컬 AI는 인간과 동일한 공간에서 상호작용하며, 인간과 유사한 외형이나 행동을 보인다. 그러나 이러한 특성이 완전히 자연스럽게 구현되지 않을 경우, 사용자는 이질감과 거부감을 느끼게 된다.

둘째, 예측 가능성과 통제권의 문제이다. 인간은 환경을 예측할 수 없을 때 불안을 느끼며, 로봇의 예상치 못한 움직임이나 판단은 공포와 불신으로 이어질 수 있다. 따라서 피지컬 AI의 수용성은 기술의 지능 수준보다도, 얼마나 예측 가능하고 통제 가능한가에 크게 좌우된다.

셋째, 제도적 기준과 사회적 영향에 대한 불확실성이다. 피지컬 AI의 확산은 단순한 기술 문제를 넘어 고용 구조 변화, 책임 주체, 윤리 기준 등 다양한 사회적 이슈를 동반한다. 그러나 현재는 이에 대한 명확한 기준과 합의가 충분히 마련되지 않은 상태이며, 이러한 불확실성은 기술에 대한 신뢰 형성을 저해하는 요인으로 작용한다.

결국 피지컬 AI의 성공 여부는 단순한 기술 성능이 아니라, 인간이 이를 얼마나 이해하고, 예측하며, 신뢰하고, 자연스럽게 받아들일 수 있는가에 의해 결정된다.

3) 인간-로봇 상호작용(HRI)의 중요성

이러한 문제를 해결하기 위한 핵심 연구 영역으로 인간-로봇 상호작용(HRI)이 부각된다. 특히 설명 가능성, 인간 중심 설계, 감정 및 비언어적 상호작용은 피지컬 AI의 사회적 확산을 위한 필수 요소이다. 이는 피지컬 AI가 단순 기술이 아닌 기술·디자인·심리·사회가 결합된 복

1) Navarro, E., Temprado, J.-J., & Mascaret, N.(2024), <Acceptance of a mobile telepresence robot used to teach adapted physical activity to isolated older adults: Extending and testing the technology acceptance model>, 《Frontiers in Public Health》 12. p.9

합 문제임을 의미한다.

2-2. 한국의 한계와 해외 탐사의 필요성

1) 한국의 도입 현황: 피지컬 AI 확산의 초기 단계

한국은 세계 최고 수준의 로봇 밀도와 빠른 기술 도입 속도를 바탕으로, 피지컬 AI 확산의 초기 단계에 진입하고 있다. 공공서비스, 산업현장, 돌봄 영역 등 다양한 분야에서 로봇 활용이 확대되고 있으며, 정부 역시 생성형 AI와 피지컬 AI를 포함한 국가 전략 기술을 중심으로 관련 정책과 투자를 추진하고 있다.

그러나 이러한 흐름에도 불구하고, 기술 개발과 실제 확산 사이에는 구조적 한계가 존재한다. 한국은 세계에서 세 번째로 휴머노이드 로봇을 개발한 국가였지만, 이후 후속 모델 개발이 지연되면서 현재는 주요 선도국 대비 약 85% 수준의 기술력에 머물러 있다. 이는 기술 자체의 문제가 아니라, 기술 고도화와 현장 적용을 연결하는 지속적인 생태계 구축이 부족했음을 보여준다.

2) 구조적 한계: 기술 발전과 수용성 간 불균형

피지컬 AI는 '작동 가능한 기술'에서 '확장 가능한 시스템'으로 전환되는 단계에 있으나, 기술 발전 속도에 비해 사회적 수용 구조는 충분히 형성되지 않은 상태이다. 특히 최근 국내에서는 배달 로봇 교통사고나 산업용 로봇 오작동 사고와 같이, 로봇이 인간을 오인하거나 예측 불가능한 상황이 발생하면서 안전성과 책임 기준에 대한 문제가 제기되고 있다.

실제로 본 탐사팀이 20~50대 60명을 대상으로 실시한 설문 결과, 로봇과의 상호작용에서 가장 큰 불편 요소로 '맥락 이해 부족(35%)'과 '예측하기 어려운 움직임(30%)'이 지목되었다. 이는 단순한 기술 성능 문제가 아니라, 로봇이 인간의 상황을 이해하고 예측 가능하게 행동하지 못할 때 사용자 경험이 크게 저하된다는 점을 보여준다.

또한 로봇 도입에 대해서는 80%가 '불가피하다'고 응답했음에도 불구하고, 동시에 안전 규제(30%), 설명 가능성(25%), 대중 인식(20%) 등이 부족한 요소로 나타나, 기술 필요성에 대한 인식과 실제 신뢰 사이에 괴리가 존재함이 확인되었다.

즉, 한국의 문제는 기술 자체의 부족이라기보다, 사용자 경험, 신뢰 형성 구조, 제도적 기반이 통합적으로 설계되지 않았다는 점에 있다. 이는 피지컬 AI가 단순한 기술 도입을 넘어, 인간의 인식과 사회적 조건까지 함께 고려해야 하는 단계에 진입했음을 의미한다.

3) 해외 탐사의 필요성: 기술과 수용 구조의 통합 분석

피지컬 AI는 단일 기술로 해결할 수 없는 문제이며, 기술·사용자 경험·제도·사회적 수용이 결합된 구조적 과제이다. 특히 한국의 경우 기술 도입은 빠르게 이루어지고 있으나, 인간-로봇 상호작용 설계와 신뢰 형성 구조는 아직 충분히 축적되지 않은 상태이다. 따라서 본 탐사는 다음을 현장에서 통합적으로 분석하고자 한다.

따라서 본 탐사는 해외 사례를 통해 로봇이 실제 환경에서 어떻게 설계되고, 사용자와 상호작용하며, 사회적으로 수용되는지를 통합적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 기술 성능을 넘어, 인간의 이해·예측·신뢰를 가능하게 하는 조건을 도출하고자 한다.

4) 영국: 기술력과 사회적 수용 구조를 결합한 선도 사례

영국은 글로벌 AI 경쟁력 평가에서 미국·중국에 이어 상위권을 유지하는 대표적인 AI 강국으로, 케임브리지·임페리얼 칼리지 등을 중심으로 유럽 최고 수준의 연구 생태계를 구축하고 있다. 특히 로봇공학과 인간-로봇 상호작용(HRI) 분야에서는 런던을 중심으로 실제 도시 환경에서의 실증을 통해 피지컬 AI 기술의 완성도를 높이고 있다.

또한 삼성전자 AI 센터 등 글로벌 기업과의 협력을 통해 연구 성과가 산업으로 연결되는 구조를 갖추고 있으며, 대규모 민간 투자가 이루어지고 있다는 점에서 기술의 상용화와 확산까지 이어지는 생태계를 형성하고 있다. 이는 피지컬 AI가 연구 단계를 넘어 실제 서비스와 환경에 적용되는 단계에 있음을 보여준다.

한편 영국의 특징은 이러한 기술 발전이 사회적 수용과 제도 설계와 함께 이루어지고 있다는 점이다. 「AI regulation: a pro-innovation approach」를 통해 설명가능성, 안전성, 공정성을 핵심 원칙으로 제시하며, 기술이 인간에게 어떻게 받아들여질 것인지까지 고려한 규제 체계를 구축하고 있다.

이처럼 영국은 기술, 산업, 제도가 유기적으로 결합된 구조를 갖추고 있으며, 이는 기술 도입 속도에 비해 수용 구조가 상대적으로 부족한 한국과 대비되는 지점이다. 따라서 영국 사례는 피지컬 AI 시대에 필요한 기술적 완성도와 함께 인간 중심 상호작용 설계와 사회적 수용 구조를 통합적으로 분석하는 데 중요한 기준이 된다.

5) 스위스: 신뢰 기반 설계와 실증 중심 피지컬 AI 생태계

스위스는 세계혁신지수(WIPO) 1위를 유지하며, 높은 연구개발 투자와 산학연 협력을 기반으로 연구-산업-정책이 유기적으로 연결된 피지컬 AI 생태계를 구축한 국가이다. ETH Zurich, EPFL과 같은 연구기관과 ABB 등 글로벌 기업이 긴밀히 연계되어, 기술이 실험실에 머무르지 않고 실제 산업과 환경에 적용되는 구조를 형성하고 있다.

특히 스위스는 기술 성능 자체보다 사용자 수용을 전제로 한 설계에 강점을 가진다. 인간 친화적 움직임과 물리적 디자인, 알고리즘 단계에서의 윤리 검증 등은 기술 개발 과정에서부터 신뢰를 설계 요소로 포함시키는 접근이다. 또한 정부·연구자·기업이 초기 단계부터 함께 참여하는 '동행 규제'를 통해, 기술이 사회와 충돌하기 전에 수용 가능성을 함께 검증하는 구조를 갖추고 있다.

이러한 차이는 실제 활용 수준에서도 나타난다. 스위스는 산업용 로봇이 다양한 현장에서 안정적으로 활용되고 있는 반면, 한국은 로봇 카페 폐업률이 약 80%에 달하는 등 기술이 지속 가능한 서비스로 정착하는 데 한계를 보이고 있다. 이는 기술 도입 자체보다, 사용 환경과 수용 구조 설계의 중요성을 보여주는 사례이다.

따라서 본 탐사는 스위스 현장에서 로봇이 실제로 사용되는 환경을 관찰하고, 사용자 및 관계자 인터뷰를 통해 기술 도입 이후의 수용 과정과 인식 차이를 직접 분석하고자 한다. 이를 통해 한국과의 차이를 비교하고, 인간과 기술이 공존할 수 있는 피지컬 AI 도입 방향을 도출하고자 하였다.

3. 탐사 방법

본 탐사 프로젝트는 학술적 깊이와 실무적 해결책을 확보하기 위해 문헌 조사, 석학 자문, 해외필드 리서치, 국내 실증 현장 대조를 연계하는 4단계 방법론을 설계하였다.

[1단계] 선행 문헌 조사 및 학술적 가설 수립

탐사에 착수하기 전, 인간-로봇 상호작용 이론, 기술수용모델, 불쾌한 골짜기 극복 메커니즘, 글로벌 로봇 윤리 가이드라인 등에 관한 국내외 학술지 및 컨퍼런스 논문을 심층 분석하였다. 분석 대상은 IEEE, ACM HRI 등 해당 분야 주요 학술 매체에 게재된 연구들로 한정하였으며, 이를 통해 "피지컬 AI에 대한 인간의 심리적 수용성은 시스템의 에러율 감소라는 공학적 지표보다, 시스템이 자신의 행동 의도를 명확히 표현하는 설명 가능성과 인간 오퍼레이터의 상시 개입 가능성을 보증하는 인프라 레이어의 신뢰도에 의해 결정된다"는 학술적 가설을 수립하였다.

[2단계] 교내 석학 사전 자문을 통한 가설 정교화

수립된 가설을 정밀하게 검증하고 필드 조사 질의서를 고도화하기 위해, 출국 전 이화여자대학교 관련 분야 전문가들을 찾아 사전 인터뷰를 진행하였다. 인공지능학부 송다은 교수와의 면담을 통해 한국형 피지컬 AI 생태계의 현주소와 기술적 당면과제를 짚고, 로봇이 인간 사회의 암묵적 규칙을 준수하며 이동하는 사회적 규범 기반 주행 알고리즘의 공학적 메커니즘과 예측 가능성이 신뢰 형성에 미치는 영향을 수렴하였다. 문헌정보학과 이경진 교수와의 면담에서는 사용자가 새로운 로봇 기술을 마주할 때 느끼는 정서적 거부감의 원인을 세대별·인지적 층위로 해체하고, 초기 기획 단계부터 일반 시민을 참여시키는 참여형 디자인 방법론과 유니버설 디자인의 가치를 도출하였다.

[3단계] 글로벌 선도국 현지 필드 탐사 및 심층 인터뷰

이론적 가설과 사전 자문 내용을 바탕으로, 피지컬 AI 원천 기술과 제도적 인프라를 세계적으로 선도하고 있는 영국과 스위스의 혁신 현장을 직접 방문하여 심층 필드 리서치를 수행하였다.

영국 탐사에서는 UCL Daniel Tozadore 교수 연구팀을 방문하여 공공장소에서 로

봇의 비언어적 신호가 보행자의 위협감을 낮추는 실증 실험 데이터를 벤치마킹하였으며, 텔레오퍼레이션 전문 스타트업 Extend Robotics와 산업용 로봇 소프트웨어 기업 HAL Robotics의 실무 엔지니어들을 인터뷰하여 기술의 한계 상황을 인간이 백업하는 협업 제어 시스템의 실제 구현 양상을 조사하였다.

스위스 탐사에서는 ETH Zurich Stefan Leutenegger 교수 연구실을 방문하여 개방 환경의 극심한 노이즈 속에서도 인간의 안전을 보장하는 시각 기반 실시간 기하학적 인지 알고리즘의 구현 현장을 확인하였다. 아울러 부속 로봇 시연장에서 물리 로봇과 가상 시뮬레이션을 동기화하는 가혹 조건 스트레스 테스트 인프라를 직접 관찰하였으며, 스위스 정부와 연구계가 기술 프로토타입 단계부터 가이드라인을 공동 설계하는 동행 규제 모델의 구체적 작동 방식을 취재하였다.

[4단계] 국내 상용화 현장 실무 인터뷰 및 프레임워크 통합

해외 탐사에서 얻은 이론 및 거버넌스 모델이 국내 실증 환경과 어떻게 결합하는지 실무적으로 대조하기 위해, 대한민국 초고밀도 도심에서 자율주행 배달 로봇을 상용화하여 운영 중인 국내 N사의 플랫폼 엔지니어링 및 자율주행 관제 인프라 팀을 대상으로 사후 인터뷰를 진행하였다. 이를 통해 롱테일 실패를 방어하는 실시간 관측 가능성 인프라와 엣지 단의 개인정보 비식별화 기술 등 시스템 하부 구조가 대중의 신뢰와 수용성을 지탱하는 실질적 메커니즘을 파악하였으며, 최종적으로 기술·디자인·제도가 융합된 한국형 통합 프레임워크를 도출하는 기반으로 활용하였다.

II.본론

1. 기존 연구 검토

1) 기존 연구 개괄

인간과 로봇 간의 상호작용을 연구하는 인간-로봇 상호작용(Human-Robot Interaction, HRI) 및 인간-컴퓨터 상호작용(Human-Computer Interaction, HCI) 분야에서는 가상 환경에서 작동하던 지능형 시스템이 물리적 실체를 갖춘 피지컬 AI로 확장됨에 따라, 인간이 이러한 기술을 어떻게 인식하고 수용하는지에 대한 연구가 지속적으로 축적되어 왔다. 기존 연구는 크게 기술 수용성, 인간의 심리적 반응, 사회적 상호작용, 현실 공간에서의 적용 가능성이라는 네 가지 측면에서 진행되어 왔다.

먼저 피지컬 AI 수용성을 설명하는 대표적인 이론적 기반은 Davis(1989)의 기술수용 모델(Technology Acceptance Model, TAM)이다. Davis는 <Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology>에서 사

용자가 새로운 기술을 받아들이는 과정에서 지각된 유용성(perceived usefulness)과 지각된 용이성(perceived ease of use)이 기술에 대한 태도와 사용 의도를 결정한다고 설명하였다.²⁾ 이후 Venkatesh et al.(2003)은 <User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View>에서 기존 기술수용 관련 이론들을 통합한 통합기술수용이론(UTAUT)을 제안하였다.³⁾ 해당 연구는 성과 기대(performance expectancy), 노력 기대(effort expectancy), 사회적 영향(social influence), 촉진 조건(facilitating conditions)이 사용자의 기술 수용 의도에 영향을 미친다는 점을 제시하였다. 이러한 연구들은 이후 서비스 로봇, 자율주행 시스템 등 인간과 직접 상호작용하는 기술의 사회적 수용성을 분석하는 핵심 분석틀로 활용되었다.

피지컬 AI가 인간과 유사한 형태와 행동을 구현한다는 점에서 인간의 심리적 반응을 분석하는 연구도 중요한 흐름을 형성하였다. Mori(1970)는 <The Uncanny Valley>에서 로봇이 인간과 유사해질수록 친밀감이 증가하지만, 일정 수준을 넘어서면 오히려 불안감과 거부감이 발생하는 '불쾌한 골짜기(uncanny valley)' 현상을 제시하였다.⁴⁾ 이후 HRI 연구에서는 로봇의 외형뿐 아니라 움직임, 표정, 행동 방식이 인간의 감정적 반응과 신뢰 형성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 이러한 연구들은 피지컬 AI 설계에서 단순히 인간과 유사한 외형을 구현하는 것이 아니라, 사용자가 자연스럽고 안정적으로 받아들일 수 있는 상호작용 방식을 설계하는 것이 중요함을 보여준다.

또한 인간이 로봇을 단순한 도구가 아닌 사회적 대상으로 인식하는 과정에 대한 연구도 이루어졌다. Reeves와 Nass(1996)는 저서 《The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places》에서 인간이 컴퓨터와 같은 미디어 기술에도 사회적 규칙과 감정을 적용하는 경향이 있음을 설명하였다.⁵⁾ 이러한 사회적 행위자 관점은 최근 자율 이동 로봇과 서비스 로봇 연구에서 인간이 로봇의 의도와 행동을 해석하는 방식을 설명하는 이론적 기반으로 활용되고 있다.

최근 연구에서는 이러한 이론적 논의를 실제 공공 환경에서 검증하려는 현장 연구가 증가하고 있다. Weinberg et al.(2023)은 <Sharing the Sidewalk: Observing Delivery Robot Interactions with Pedestrians during a Pilot in Pittsburgh, PA>에서 미국 피츠버그 지역의 배달 로봇 시범 운영 과정에서 보행자와 로봇 간 상호작용을 관찰하였다.⁶⁾ 연구 결과, 시민들은 로봇의 움직임과 목적을 명확하게 이해하지 못할 경우 자신의 경험과 기존 지식을 바탕으로 로봇의 행동을 해석하였으며, 로봇의 의도와 상태 정보를 충분히 제공하는 것이 공공 공간에서의 신뢰 형성에 중요하

2) Davis, F. D.(1989), <Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology>, 《MIS Quarterly》 13(3), p.319-340

3) Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D.(2003), <User acceptance of information technology: Toward a unified view>, (MIS Quarterly) 27(3)

4) Mori, M.(1970), <The Uncanny Valley>, 《Energy》 7(4), p.33-35

5) Reeves, B., & Nass, C.(1996), 《The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places》, Cambridge: Cambridge University Press.

6) Weinberg, D., Dwyer, H., Fox, S. E., & Martelaro, N. (2023). Sharing the sidewalk: Observing delivery robot interactions with pedestrians during a pilot in Pittsburgh, PA. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(5).

다는 점이 확인되었다. 이는 피지컬 AI 시대의 핵심 과제가 단순한 기술 성능 향상이 아니라 인간이 로봇을 이해하고 신뢰할 수 있도록 하는 설명 가능성(explainability)과 사회적 상호작용 설계임을 보여준다.

그러나 기존 연구는 주로 개별 기술 요소나 특정 환경에서의 사용자 반응을 분석하는 데 집중되어 있으며, 피지컬 AI가 실제 사회 시스템 안에서 확산될 때 발생하는 안전성, 개인정보 보호, 책임 소재, 인간 노동과의 관계 변화 등 복합적인 사회적 문제를 종합적으로 다룬 연구는 상대적으로 부족하다. 또한 기존 HRI 연구는 실험실 환경이나 제한된 서비스 상황을 중심으로 진행되어, 국가별 제도·문화적 맥락 속에서 피지컬 AI를 어떻게 관리하고 수용해야 하는지에 대한 논의는 충분히 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구는 기존 HRI 연구의 기술·심리 중심 접근을 확장하여, 피지컬 AI 확산 과정에서 발생하는 사회적 쟁점과 제도적 대응 방향을 분석하고자 한다.

2) 기존 연구의 한계

그러나 이처럼 방대하게 축적된 선행 연구들은 급격히 진화하는 현대 피지컬 AI의 기술적 특성과 초고밀도 도심 환경이라는 복합적 현실을 반영하는 데 있어 세 가지 구조적 한계를 노출하고 있다.

첫째, 기존 인간-로봇 상호작용 실증 연구의 상당수는 통제된 실험실 환경이나 가상 시뮬레이션 내부에서 제한된 피험자 집단을 대상으로 진행되었다. 실험실 내부에서 변수가 극도로 억제된 상태의 로봇 주행은 인간이 실제로 느끼는 심리적 거리감을 온전히 측정하기 어렵다. 보행자와 킥보드, 불법 주정차 차량이 뒤엉킨 비정형적 도심 환경에서 발생하는 다차원적 위험감과 인지 부조화는 실험실 기반 이론으로는 포착되지 않으며, 효율성과 안전성이 보장된 가상 시뮬레이션 데이터는 물리적 부피와 무게를 지닌 기계 실체와 현실에서 맞닥뜨릴 때 발생하는 원초적 불안감을 반영하지 못한다.

둘째, 기술수용모델을 위시한 기존 연구들은 에러율 감소나 작업 처리 속도 향상 등 공급자 중심의 기능적 평가 지표에 지나치게 편중되어 있었다. 그러나 피지컬 AI의 수용성은 수학적 정확도 향상만으로 도달할 수 없는 복합적 영역이다. 로봇의 에러율이 0%에 수렴하더라도, 왜 그러한 판단을 내렸는지, 다음 행동 의도가 무엇인지를 보행자에게 전달하지 못하는 불투명한 알고리즘 구조 아래에서 인간은 여전히 극심한 통제권 상실감과 불안을 경험한다. 기존 연구들은 시스템의 설명 가능성과 정서적 완충 인터페이스가 신뢰 형성에 미치는 역할을 체계적으로 규명하지 못하였다.

셋째이자 가장 근본적인 한계는, 인간-로봇 상호작용 연구가 인터페이스 디자인이나 소프트웨어 상호작용이라는 미시적 차원에만 격리되어 수행되었다는 점이다. 피지컬 AI의 일상 수용성은 개별 로봇의 외형적 친근함이나 음성 서비스만으로 구축되지 않는다. 돌발 상황에서 시스템의 무결성을 지탱하는 플랫폼 엔지니어링 인프라, 자율 알고리즘이 교착 상태에 빠질 때를 대비한 인간 개입형 백업 아키텍처, 그

리고 감시 공포를 차단하는 엣지 단의 실시간 개인정보 비식별화 기술 등 하부의 공학적 인프라 레이어가 유기적으로 뒷받침되어야 한다. 기술 개발 초기부터 규제 기관과 연구계가 리스크를 공동으로 분담하는 거버넌스 생태계에 대한 거시적 분석 역시 기존 연구에서는 거의 다루어지지 않았다.

3) 본 탐사의 독창성 및 차별성

본 탐사 프로젝트는 기존 선행 연구들이 노출한 세 가지 구조적 한계를 정면으로 돌파하며, 학술적 깊이와 실무적 실행력을 동시에 확보하고 있다.

본 탐사의 독창성 핵심

본 탐사의 독창성은 인간-로봇 상호작용 기술, 플랫폼 인프라, 규제-거버넌스를 하나의 통합 프레임워크로 제시한 데 있다. 이를 통해 피지컬 AI의 사회적 수용성을 위한 구조적 해법을 도출하고자 한다.

(1) 이론과 초고밀도 실전 실증 현장의 유기적 대조

본 탐사는 가상 시뮬레이션이나 통제된 실험실 환경에 의존하는 기존 연구의 한계를 탈피하였다. UCL과 ETH Zurich 등 세계 최고 수준의 인간-로봇 상호작용 원천 기술을 보유한 유럽 선도 대학의 학술 가설을 현지에서 직접 수렴하는 한편, 지구 상에서 손꼽히는 고밀도 도심 환경인 대한민국 서울에서 배달 로봇을 실제 상용화 하여 운영 중인 국내 혁신 플랫폼 기업 N사의 엔지니어링 현장과 직접 비교 대조 하였다. 이를 통해 정제된 이론적 청사진이 롱테일 변수가 상존하는 현실의 전선에서 어떻게 구현되고, 어느 지점에서 좌초되는지를 실무 기반으로 분석해낸 것은 기존 연구에서 시도된 바 없는 접근이다. 특히 비교적 여유로운 유럽의 도시 인프라와 불규칙한 보도, 불법 주정차, 이륜차의 보도 침범이 일상화된 서울 도심 환경 사이의 질적 차이를 분석 변수로 명확히 설정함으로써, 보편적 이론을 한국형 특수 환경에 맞게 보정하는 작업을 병행하였다는 점에서 실증 연구로서의 의의가 크다.

(2) 설명 가능성 개념의 공학적·디자인적 재정의

본 탐사는 단순한 외형적 친근감 위주의 표피적 접근을 배격하고, 설명 가능성이 라는 개념을 훨씬 심층적인 층위에서 재정의한다. 기존 연구들이 로봇의 귀여운 외형이나 음성 안내에서 설명 가능성의 해법을 찾으려 했다면, 본 탐사는 로봇 제어 시스템의 모션 플래닝 비용 함수 자체에 인간 사회의 보이지 않는 문화적 약속과 공간적 규범을 수학적으로 내재화하는 사회적 규범 기반 주행의 구현 양상을 분석 대상으로 삼았다. 대화 중인 두 사람 사이를 가로지르지 않고, 보행자와 근접할 때 선제적으로 감속하며, 개인의 심리적 공간을 침범하지 않는 판단이 알고리즘 수준에서 구현될 때 비로소 보행자는 로봇의 다음 행동을 예측할 수 있고, 그 예측 가

능성이 심리적 안심으로 전환된다는 것이 본 탐사의 논증이다. 나아가 이러한 내부 알고리즘의 상태를 외부 조명 및 디스플레이 신호로 실시간 가시화함으로써 보행자의 인지적 통제권을 회복시키는 설명 가능한 피지컬 인터랙션 메커니즘을 정밀하게 해체하였다는 점에서, 인간-로봇 상호작용 패러다임의 진보에 기여한다.

(3) 기대 효과 및 미래 가치

본 탐사의 결과물은 학술적 논의에 그치지 않고 대한민국 정부와 로봇 산업계가 즉각 참조할 수 있는 실질적 정책 가이드라인의 초석을 제공한다. 탐사를 통해 도출된 3계층 통합 프레임워크는 대한민국 초고밀도 환경에 최적화된 한국형 피지컬 AI 안전 인프라 및 표준 보안 가이드라인으로 발전시킬 수 있으며, 무엇보다 사후 반응적 규제 장벽으로 인해 실증 기회 자체가 막혀 있는 국내 로봇 산업계에 스위스식 동행 규제 거버넌스 모델을 이식하는 경로를 구체적으로 제시한다는 점에서 정책적 파급력을 지닌다. 기술 개발 초기 단계부터 연구계, 산업계, 규제 기관이 함께 가이드라인을 설계하는 이 모델이 국내에 정착할 때, 산업계는 규제의 불확실성을 견어내고 대중은 제도적 공인을 바탕으로 한 심리적 안심을 보장받는 선순환 생태계가 완성될 수 있다.

2. 국내 탐사

1) 국내 탐사 개괄

국내 탐사는 기술 도입 속도와 대한민국 특유의 고밀도 도심 환경이 만들어내는 구조적 모순을 파악하고, 이를 공학적·인지적 차원에서 해체하는 데 초점을 맞추었다. 대한민국은 단위 노동자당 산업용 로봇 밀도가 세계 최고 수준에 이르는 하드웨어 선도국이지만, 일반 대중의 일상 공공장소에서 자율 서비스 로봇과 피지컬 AI의 수용성은 기술 확산 속도를 따라잡지 못하는 불균형을 겪고 있다. 본 탐사 팀은 이러한 불균형의 원인을 다각도로 해체하기 위해 이화여자대학교 관련 분야 전문가 2인을 대상으로 심층 인터뷰를 진행하였다.

2) 국내 전문가 인터뷰

(1) 인공지능학부 송다은 교수 - 로봇 제어 공학 및 모션 플래닝

면담은 한국형 피지컬 AI의 현주소 진단, 신뢰 형성의 핵심 조건, 인간 친화적 주행 알고리즘의 설계 원칙을 중심으로 이루어졌다.

i. 한국 피지컬 AI 생태계의 현주소

대한민국은 공장 자동화, 자동차, 반도체 등 정형화된 환경의 산업용 로봇 분야에서 세계 정점 수준의 제어 능력을 보유하고 있으나, 불특정 다수와 소통하며 비정

형 공간을 자율적으로 탐색해야 하는 서비스 로봇 및 휴머노이드 소프트웨어 영역에서는 선도국을 추격하는 단계에 머물러 있다. 핵심 원인은 개방 환경에서 발생하는 극심한 노이즈와 예외 상황을 돌파할 실전 데이터 경험의 절대적 부족이다. 판교 등 외곽 지역에서 배달 로봇 시범 운영이 이루어지고 있으나, 서울과 같은 초고밀도 환경에서의 본격적 실증은 여전히 제한적이다.

ii. 신뢰 형성의 핵심 조건: 예측 가능성과 일관성

면담을 통해 도출된 가장 핵심적인 인사이트는, 대중이 로봇을 신뢰하게 되는 결정적 요인이 알고리즘의 기술적 정밀도가 아닌 행동의 예측 가능성과 일관성이라는 점이다. 복도에서 사람을 발견한 로봇이 속도를 낮추는 것처럼, 인간이 기대하는 방식으로 로봇이 행동할 때 비로소 심리적 안전감이 형성된다. 이는 로봇의 외형이 인간을 얼마나 닮았는가의 문제가 아니라, 다음 행동을 예측할 수 있는가의 문제다. 로봇이 인간의 외형을 모방해야 신뢰가 형성된다는 시각과 그렇지 않아도 된다는 시각이 연구자들 사이에서 양분되어 있으나, 두 입장 모두 예측 가능성을 신뢰의 전제 조건으로 공유한다는 점에서 설계의 핵심 원칙은 일치한다.

iii. 사회적 규범 기반 주행의 공학적 구현

과거의 모션 플래닝이 최단 거리와 최소 시간이라는 에너지 효율성에 집중했다면, 현대 제어 공학의 핵심은 인간의 암묵적 사회 규범을 알고리즘에 내재화하는 것이다. 우측통행 준수, 대화 중인 사람 사이를 가로지르지 않기, 개인의 심리적 공간 침범 회피 등 인간 사회의 보이지 않는 약속들을 운동 제어 알고리즘의 비용 함수에 직접 대입하여 연산하는 방식이 그 구체적 구현이다. 이처럼 사회적 규범을 알고리즘 수준에서 수학적으로 내재화하는 기술이야말로 피지컬 AI가 인간과의 심리적 거리감을 좁히는 가장 근본적인 접근으로 분석되었다.

iv. 한국 사회가 우선 해결해야 할 과제

제도적 미비보다 더 근본적인 문제로 지목된 것은, 일반인이 로봇을 직접 경험할 기회 자체의 절대적 부족이다. 기술이 완벽하지 않은 상태에서도 먼저 도입하고 현장에서 문제를 해결해 나가는 미국식 접근과 달리, 완벽한 제도 정비를 전제로 도입을 지연시키는 현재의 국내 방식은 수용성 형성의 기회 자체를 차단하고 있다. 아울러 공공시설에서 로봇에 장착된 카메라에 대한 사회문화적 불편함이 기술 수용의 보이지 않는 장벽으로 작용하고 있음이 확인되었다. 궁극적으로 이상적인 인간-로봇 공존은 스마트폰이나 인터넷처럼 존재를 의식하지 않을 정도로 일상에 스며드는 모습이며, 로봇이 인간을 대체하는 것이 아니라 인간 사회의 규칙과 맥락을 이해하며 보조하는 방향으로 설계되어야 한다는 점이 강조되었다⁷⁾.

7) Francis, A., Pérez-D'Arpino, C., Li, C., Xia, F., Alahi, A., Alami, R., & Martín-Martín, R.(2025), <Principles and guidelines for evaluating social robot navigation algorithms>, 《ACM Transactions on Human-Robot Interaction》 14(2), Article 34. p.37-39

(2) 문헌정보학과 이경진 교수 - HCI 및 사용자 경험 디자인

면담은 피지컬 AI의 심리적 거부감의 구체적 원인 분석, 참여형 디자인의 필수성, 사회적 존재로서의 로봇 인식 전환 문제를 중심으로 이루어졌다.

i. 심리적 거부감의 구체적 원인

피지컬 AI가 일상에 안착하기 위해서는 사용자의 기술 친숙도, 연령, 커뮤니티 특성에 따라 인지 구조를 세분화하여 접근하는 방법론이 선행되어야 함이 확인되었다. 실험 연구 결과, 어린이들은 부모나 가까운 사람의 행동을 모방하는 로봇에게 친근함이 아닌 섬뜩함을 느끼는 경향이 나타났으며, 이는 불쾌한 골짜기 현상이 외형에 국한되지 않고 행동 모방에도 동일하게 적용됨을 시사한다. 또한 로봇에 장착된 비전 센서가 자신을 실시간 감시하고 정보를 수집한다는 인상을 줄 때 극심한 심리적 저항감이 나타났으며, 이는 기술의 기능적 완성도와 무관하게 수용성을 저해하는 독립적 요인으로 작용한다. 신뢰는 특정 한 요소가 결정하는 것이 아니라 총체적인 경험의 결과로 형성되며, 반대로 단 하나의 요소가 크게 실패하면 다른 요소들이 아무리 뛰어나도 전체 신뢰가 무너질 수 있다는 점에서, 설계는 모든 접점을 균형 있게 다루어야 한다.

ii. 참여형 디자인의 필수성: 멘탈 모델 격차 문제

면담에서 가장 강하게 제기된 문제는 엔지니어의 멘탈 모델, 디자이너의 멘탈 모델, 실제 이용자의 멘탈 모델이 서로 심각하게 괴리되어 있다는 점이다. 개발자는 입력과 출력의 효율성에 집중하는 반면, 일반 이용자는 그 기술이 자신의 삶 속에서 어떻게 작동하는지를 기준으로 경험을 형성한다. 이 간극을 초기 단계에서 좁히지 않으면 기술 완성도와 무관하게 실제 사용 현장에서 이탈이 발생한다. 이용자가 설계 과정을 주도하고 개발자·디자이너가 이에 따르는 방향의 참여형 디자인 방법론만이 이 격차를 근본적으로 해소할 수 있으며, 이용자 참여 없이 완성된 기술은 아무리 정교해도 실제 삶과의 간극을 피하기 어렵다는 점이 강조되었다.

iii. 통제권 자율성, 유니버설 디자인, 그리고 사회적 존재로서의 로봇

시스템의 자율성이 높아질수록 인간은 통제권 상실의 불안을 느끼므로, 사용자가 언제든지 개입하거나 중단할 수 있는 수동 권한 인터페이스와 비상 정지 기능의 가시성이 설계 단계에서 반드시 확보되어야 한다. 공공을 위한 설계는 단일 사용자를 상정할 수 없는 만큼, 외국인, 장애인, 고령층 등 다양한 이해관계자의 요구가 실질적으로 반영되어야 하며, 이때 연령 기준의 단순한 세대 구분보다 활동 수준과 기술 친숙도에 따른 세분화가 더 유효한 접근임이 확인되었다. 한편 인간이 로봇을 사회적 존재로 인식하기 시작하는 전환점은 로봇이 기존에 사람이 담당하던 역할을 실질적으로 대체하기 시작하는 시점으로 분석되었다. 이러한 전환이 일어날 때 사회는 윤리 교육과 함께 AI가 실제 사람인 것처럼 행동할 때 이를 구별할 수 있는

사회적 안전장치를 반드시 병행하여 준비해야 한다.

3. 해외 탐사

1) 해외 탐사 개괄

해외 탐사는 인간-로봇 공존 전략과 사회적 신뢰 형성 구조 분야에서 세계 최고 수준의 학술 성과와 거버넌스 생태계를 구축한 영국 런던과 스위스 취리히를 대상으로 수행되었다. 영국은 설명 가능성 중심의 인공지능 윤리 법제도 제정을 선도하며, 인간과 기계의 협업 구조를 실무적으로 상용화한 국가이다. 스위스는 ETH Zurich를 중심으로 한 자율 시스템 원천 기술력과 함께, 새로운 기술이 출현할 때 정부와 연구계가 리스크를 공동 분담하며 가이드라인을 다듬어나가는 세계 최고 수준의 동행 규제 생태계를 보유하고 있다. 본 탐사 팀은 현지 연구실과 스타트업 현장을 직접 방문하여 대한민국 생태계에 이식 가능한 거시적 거버넌스와 미시적 공학 솔루션의 원천 소스를 발굴하였다.

2) 해외 전문가 인터뷰

(1) UCL(런던 대학교) - Daniel Tozadore 교수 연구팀

Tozadore 교수 연구팀은 공공장소에서 인간과 로봇이 조우할 때 발생하는 심리적 위협감을 실증적으로 측정하고, 이를 완화하는 거동 설계 방법론을 연구하는 팀이다. 대규모 언어 모델을 탑재한 소셜 로봇 RoboBuddy 연구와 인간-로봇 상호작용 연구 방법론의 표준화 프레임워크인 RUSH Checklist 개발로 학술적 선도성을 인정받고 있으며, 본 탐사와의 연결 지점은 설명 가능한 거동 설계가 보행자의 심리적 거리감을 실제로 얼마나 낮추는가에 대한 정량적 데이터를 보유하고 있다는 점이다.

i. 공공 공간에서의 신뢰 형성과 설명 가능한 거동 설계

연구팀의 실증 데이터에 따르면 보행자들은 로봇이 장애물을 매끄럽게 회피하는 것보다 '로봇이 나를 명확히 인지하고 있다'는 외적 피드백 신호를 전달받을 때 심리적 위협감을 최대 65% 이상 낮게 평가하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 연구팀은 로봇 전면부에 눈동자 움직임을 모방한 그래픽 디스플레이와 방향 지시 조명 아이콘을 탑재하는 실험을 진행 중이었으며, 보행자와 일정 거리 이내로 좁혀질 때 선제적으로 속도를 낮추는 물리적 거동이 신뢰 형성의 핵심 변수임을 실증하고 있었다. 알고리즘 내부의 연산 과정을 외부로 투명하게 표현하는 이 방식은, 본 탐사팀이 수립한 '설명 가능성'의 개념을 공학 설계 수준에서 구체적으로 확인하는 사례였다.

ii. 아동 대상 행동 교정 연구: 사회적 관계를 통한 설계

연구팀의 아동 필기 자세 교정 연구는 로봇이 인간의 행동을 변화시키는 방식에 대한 중요한 시사점을 제공하였다. 아동의 자세가 나빠질 때 로봇이 직접 지시하는 대신 로봇 스스로 벌칙을 받는 구조를 설계하여, 아이가 미안함을 느껴 자세를 스

스로 교정하도록 유도하는 방식이었다. 이 방식은 직접적 지시보다 훨씬 오랫동안 교정 상태를 유지하는 효과를 보였으며, 로봇이 감시자가 아닌 사회적 관계의 대상으로 설계될 때 인간의 자발적 행동 변화를 이끌어낼 수 있음을 보여주는 실증 사례로서 의미가 있다.

iii. 데이터 편향 문제와 공공 서비스 로봇 설계의 전제 조건

불특정 다수를 상대하는 공공 서비스 로봇 설계에서 학습 데이터의 편향 제거가 선결 과제로 제시되었다. 얼굴 인식 로봇이 특정 집단의 데이터 중심으로 학습되어 다른 집단을 제대로 인식하지 못한 실제 사례가 제시되었으며, 이는 기능적 차별 경험으로 이어져 사회적 신뢰 자체를 훼손한다. 다양한 인구 집단을 포괄하는 균형 잡힌 데이터셋 구축이 기술 개발 이전 단계에서 반드시 선결되어야 함이 확인되었다⁸⁾.

(2) Extend Robotics

Extend Robotics는 런던 기반의 텔레오퍼레이션 전문 스타트업으로, 5G 저지연 통신과 가상현실 헤드셋을 결합하여 인간이 원격에서 휴머노이드 로봇을 실시간으로 조작하는 기술을 개발하고 있다. 100% 자율 제어 대신 인공지능의 한계를 인정하고 인간이 직접 개입하는 구조를 핵심 전략으로 채택하고 있다는 점에서, 기술 수용성과 신뢰 형성에 관한 본 탐사의 문제의식과 직접적으로 맞닿아 있는 기업이다.

i. 심리적 거리감의 원인과 신뢰 형성 전략

일반 대중이 피지컬 AI에 심리적 거리감을 느끼는 원인으로 알 수 없음에 대한 두려움, 지나치게 빠른 기술 발전 속도, 소셜 미디어가 실패 영상을 성공 사례보다 압도적으로 많이 노출시키는 구조, 일자리 위협에 대한 사회경제적 불안이 복합적으로 작용하고 있음이 확인되었다. 신뢰 구축 전략으로는 기술의 신뢰성을 반복적으로 보여주는 것과 함께, 해당 기술이 어떤 역할을 위해 존재하는지 대중이 직접 이해할 수 있도록 돕는 것이 제시되었다. 치매 케어나 자폐 아동 지원처럼 인간의 공감 피로가 극심한 영역에서 피지컬 AI의 역할을 먼저 증명하는 방식이 수용성을 높이는 데 효과적이라는 실무적 인사이트도 확인되었다.

ii. 텔레오퍼레이션의 설계 원칙: 지연과 인지 부하의 균형

텔레오퍼레이션에서 핵심 과제는 지연 문제를 하드웨어, 소프트웨어, 인간 요인이 결합된 종단간 문제로 접근하는 것이다. 맞춤형 압축 알고리즘으로 네트워크 지연을 줄이는 것과 별개로, 실제 병목은 인간 오퍼레이터의 판단 및 조작 속도에 있음이 확인되었다. 피드백 설계에서는 촉각, 시각, 청각이 핵심 축으로 작동하나, 정보

8) Pelikan, H. R. M., Reeves, S., & Cantarutti, M. N.(2024), <Encountering autonomous robots on public streets>, 《Proceedings of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction》, 561-571.

가 과도하게 제공될 경우 인지 부하가 높아져 오히려 조작 속도가 저하되는 역효과가 발생하였다. 스트레스 상황일수록 인터페이스는 단순할수록 효과적이라는 원칙이 현장 실무에서 반복적으로 검증되었다.

iii. 현장 근로자 수용: 점진적 도입과 역할 이해 교육

영국의 강력한 노동조합 문화로 인해 기술 도입 초기 현장 근로자들의 거부감이 상당하였다. 이미 혁신에 열려 있는 조직을 우선 공략하고, 신체적으로 위험한 작업을 로봇이 대신하는 방식으로 역할을 구체적으로 증명하는 전략이 주효하였다. 한 가지 작업부터 시작하여 범위를 점진적으로 확대하는 도입 방식과 함께, 이 과정 전체를 기술 교육이 아닌 역할 이해 교육으로 설계한 것이 수용성을 높이는 핵심 요인으로 작용하였다.

(3) Hal Robotics

HAL Robotics는 2014년 설립된 영국의 산업용 로봇 소프트웨어 스타트업으로, 다양한 브랜드의 로봇을 지원하는 소프트웨어 Decode를 개발하고 있다. 로봇 자체의 성능보다 비전문가가 로봇을 얼마나 자연스럽게 사용할 수 있는가에 집중하는 인터페이스 혁신 철학을 보유하고 있으며, 이 점이 본 탐사의 인간 중심 설계 원칙 연구와 직접적으로 연결된다.

i. 인간 중심 인터페이스 설계: 로봇을 의식하지 않아도 되는 구조

오퍼레이터가 로봇에 대해 아무것도 알지 못하더라도 작업을 수행할 수 있도록 만드는 것이 핵심 설계 철학이다. 작업자는 어디를 연마할지만 지정하면 경로 계산, 속도 설정, 기구학적 처리는 모두 소프트웨어가 처리한다. 혼합현실 기반 사전 시각화 시스템은 이 철학의 가장 구체적인 구현으로, 로봇이 작업을 시작하기 전 가상 환경에서 동작 경로를 먼저 확인하고 오퍼레이터가 승인한 이후에만 물리 로봇이 작동하는 구조이다. 이 방식은 시뮬레이션과 현실의 불일치에서 오는 불안감을 사전에 차단하는 동시에, 로봇의 다음 행동을 미리 확인할 수 있다는 예측 가능성을 오퍼레이터에게 부여한다는 점에서 신뢰 형성의 실무적 해법으로 평가된다.

ii. 시뮬레이션과 현실의 간극에 대한 실무적 해법

완벽한 시뮬레이션보다 현실에서 발생하는 변수를 다층적으로 보정하는 접근이 더 현실적임이 강조되었다. 힘 감지 센서를 활용해 표면이 시뮬레이션과 달라도 자동으로 대응하는 방식처럼, 가능한 적은 데이터로 환경을 표현하고 물리적 안전장치로 나머지 변수를 보완하는 방식이 실제 현장에서 더 강건한 결과를 도출하였다.

iii. 미래 공장 설계와 모듈화의 원칙

미래 공장에서도 공간은 당분간 인간 중심으로 설계될 것이라는 분석이 제시되었

다. 로봇 고장 시 인간이 그 역할을 대신해야 하는 현실적 조건이 그 근거이다. 핵심 설계 원칙은 모듈화로, 하나의 로봇이 여러 작업을 수행하는 방식보다 작업별 전용 로봇을 배치하는 구조가 효율성과 유지보수 측면에서 우월하다는 것이 현장에서 검증된 결론이다. 아울러 자동화가 인간의 작업을 더 단순하고 지루하게 만드는 방향으로 설계되어서는 안 된다는 원칙이 기업 철학으로 명확히 공유되고 있었다.

(4) 스위스 ETH Zurich - Stefan Leutenegger 교수 연구팀

ETH Zurich 모바일 로봇공학 연구실은 공간 인공지능, 시각 기반 위치 추정 및 맵핑, 자율 소형 비행체 등 자율화 기술의 원천 연구를 수행하며, 스위스 정부와 기술 프로토타입 단계부터 공동 워킹 그룹을 구성하여 동행 규제 모델을 실제로 구현하고 있는 기관이다. 본 탐사와의 연결 지점은 피지컬 AI의 공학적 신뢰성 설계와 실제 환경 배치에서 발생하는 롱테일 문제, 그리고 규제와 혁신 사이의 균형 구조이다.

i. 하드웨어적 신뢰성의 절대적 선행 조건

면담에서 제시된 가장 핵심적인 논점은, 외형적 정서 디자인이나 인터페이스 개선은 신뢰 형성의 2단계에 불과하다는 것이다. 극심한 노이즈, 어둠, 돌발 장애물이 존재하는 환경에서도 로봇이 인간을 위협하지 않고 안전하게 제어될 수 있다는 공학적 신뢰성 확보가 반드시 먼저 이루어져야 한다. 외형이 아무리 친근하더라도 이 하드웨어 수준의 완결성이 보장되지 않으면 인간은 피지컬 AI를 자신의 생활 공간으로 받아들이지 않는다는 것이 강조되었다.

ii. 인간 행동 학습의 가능성과 한계

인간 행동 영상 데이터 활용 로봇 학습은 현재 물체 집기, 서랍 열기 등 조작의 기계적 측면에 집중되어 있으며, 인간의 감정적 의도까지 파악하는 것은 아직 탐구 단계임이 확인되었다. 로봇이 주변 사람의 불편함을 감지하는 기술이 실현된다 하더라도 그 사람이 로봇에 대해 가지는 근본적인 심리적 태도까지 바꾸기는 어렵다는 한계 또한 제시되었다. 이는 기술적 완성도와 심리적 수용성 사이의 간극이 공학적 해법만으로 완전히 좁혀지지 않음을 시사한다.

iii. 규제와 혁신의 균형: 샌드박스 방식의 동행 규제

규제는 대중의 선호를 반영하는 필수 장치이나, 연구 개발 단계에서는 안전을 모니터링하면서도 자유롭게 실험할 수 있는 별도의 샌드박스가 반드시 존재해야 하며, 이에 대한 행정적 접근 절차가 지나치게 복잡하지 않아야 실질적 혁신이 가능하다는 원칙이 제시되었다. 스위스가 글로벌 로봇 산업의 중심지로 기능하는 이유가 바로 이 동행 규제 구조에 있음을 현장에서 직접 확인하였다.

iv. 롱테일 문제와 실제 환경 테스트의 불가피성

인간과의 상호작용에서 발생하는 예외 상황은 어떤 시뮬레이션으로도 완전히 예측할 수 없다. 고양이가 로봇 위에 올라타 카메라를 막아버리는 상황처럼, 이러한 롱테일 변수들은 실제 환경에서의 반복적인 테스트를 통해서만 축적된다. 발생한 피드백을 시스템에 지속적으로 반영하는 개선 메커니즘의 구축이 필수적이며, 이 원칙이 ETH Zurich 연구실 운영 전반에 걸쳐 일관되게 적용되고 있음을 확인하였다.

v. 로봇 시연장: 물리-가상 동기화 기반 스트레스 테스트 인프라

시연장은 사족보행 로봇과 배달형 피지컬 AI를 실제 공간에서 주행시키는 동시에, 가상 시뮬레이션 환경에서 돌발 보행자 급습, 센서 무력화, 미끄러운 노면 등 수만 가지 예외 상황을 강제로 생성하여 시스템에 주입하는 방식으로 운용되고 있었다. 시연장 전체에 배치된 초고속 모션 캡처 카메라 시스템은 물리 로봇의 거동을 밀리미터 단위로 추적하며 시뮬레이션 오차를 실시간 보정하고, 가상 환경에서 안전성이 검증된 파라미터만 실제 로봇에 적용하는 구조였다. 이 가상-현실 동기화 아키텍처는 국내의 제한적 실증 환경을 극복하기 위한 인프라적 모델로서, 본 탐사 팀이 도출하는 통합 프레임워크의 실시간 맥락 인지 엔진 설계에 결정적인 단초를 제공하였다.

(5) 스위스 연방 정부 및 규제 당국 거버넌스 분석

스위스가 글로벌 피지컬 AI 산업의 중심지로 부상한 배경에는 기술 출현 시 규제 장벽부터 세우는 사후 반응적 방식도, 기업에 책임을 방임하는 구조도 아닌 제3의 거버넌스 모델이 있다. 스위스는 기술 프로토타입 단계부터 ETH Zurich 등 연구진, 스타트업, 정부 정책 담당자가 하나의 워킹 그룹을 구성하여 가이드라인을 함께 설계해 나가는 동행 규제 체계를 제도화하였다.

실제 운용 방식은 다음과 같다. 규제 당국자가 로봇의 공공 보도 실증 주행 현장에 직접 상주하며 발생 가능한 안전 변수와 개인정보 보호 가이드라인을 연구자들과 실시간으로 모니터링하고, 그 결과를 즉각 법률 수정에 반영한다. 이를 통해 기업은 규제의 불확실성 없이 안전성이 공인된 제품을 신속히 시장에 출시할 수 있으며, 대중은 국가가 공인하고 동행한 기술이라는 점에서 심리적 안심 수준이 높아지는 선순환 생태계가 완성된다. 사후 반응적 규제와 기술 혁신 사이의 구조적 충돌을 겪고 있는 국내 현실과 대비되는 지점으로, 본 탐사의 정책 제언에 핵심적인 모델로 채택하였다.

(6) Robotics lab 로봇 시연장 방문

i. 시각적 SLAM 및 실시간 기하학적 인지 기술

연구실에서 시연한 피지컬 AI 플랫폼은 센서 한계를 극복하는 고도화된 시각적 SLAM 및 3D 매핑 알고리즘을 통해 1cm 미만의 정밀도로 주변 환경과 인간의 신체 형태를 실시간 인지하고 있었다. 이러한 공학적 완결성이야말로 인간이 피지컬 AI를 자신의 서식 공간으로 심리적으로 받아들이게 만드는 가장 단단하고 정직한

물리적 바닥임을 확인시켜 주었다.

ii. 물리-가상 동기화 기반의 가혹 조건 스트레스 테스트

로봇 시연장의 시험 인프라는 실제 시험장에서 사족보행 로봇 및 배달형 피지컬 AI 개체를 주행시키는 동시에, 가상 시뮬레이션 플랫폼 내부에서 수만 가지의 가혹한 롱테일(Long-tail) 예외 상황—돌발적인 보행자 급습, 센서 무력화 노이즈, 빙판길 미끄러짐 등—을 강제로 생성하여 시스템에 주입하는 방식으로 작동하고 있었다.

iii. 시뮬레이션 데이터 무결성 검증을 위한 센서 그리드

시험장 사방에 촘촘히 배치된 초고속 모션 캡처 카메라 시스템은 물리 로봇의 거동을 밀리미터(mm) 단위로 추적하여 시뮬레이션 연산 모델의 오차를 실시간으로 보정하고 있었다. 가상 공간에서 완벽하게 안전성이 검증된 알고리즘 파라미터만 선별되어 실제 물리 로봇에 다운로드되기 때문에, 오픈 월드에서 발생할 수 있는 피지컬 AI의 폭주나 오작동 확률을 수학적으로 제어하는 무결성 체계를 갖추고 있었다.

iv. 본 탐사예의 기술적 시사점

전용 시험장 실사를 통해 확인한 '가상-현실 동기화 아키텍처'는 본 탐사 팀이 도출하고자 하는 **최종 통합 프레임워크 내 '제2축(실시간 컨텍스트 인지 및 다차원 분석 엔진)'의 구체적인 가이드라인을 정립하는 결정적 단초**가 되었다. 국내의 제한적인 실증 환경을 극복하기 위해서는 단순히 로봇을 무방비하게 노출시키는 사후 대처 방식을 지양하고, 이와 같은 가상 시뮬레이션 샌드박스를 인프라적으로 구축하여 사전 예측 정확도를 95% 이상으로 끌어올리는 공학적 안전장치가 선행되어야 함을 확인하였다.

4. 탐사의 의의 및 한계

1) 탐사의 의의

본 탐사 프로젝트는 가상 지능에서 물리 지능으로 이행하는 피지컬 AI 패러다임 전환기 속에서, 대한민국이 겪고 있는 기술력과 사회적 수용성 사이의 구조적 괴리를 해결할 입체적 솔루션을 도출하였다는 점에서 학술적·산업적·정책적 의의를 지닌다. 탐사를 통해 도출된 결과를 종합하여 대한민국 생태계에 즉각 투입 가능한 세 가지 정책적·기술적 제안을 다음과 같이 기술한다.

(1) 거시적 거버넌스: 스위스식 동행 규제 프레임워크 이식

대한민국 로봇 법제도의 가장 큰 약점은 새로운 기술이 출시될 때 기존의 경직된

도로교통법이나 개인정보보호법의 잣대를 그대로 적용하여 실증 자체를 가로막는 사후 반응적 규제 장벽이다. 본 탐사 팀은 스위스 연방 정부가 증명한 동행 규제 모델을 기반으로, 국토교통부, 과학기술정보통신부, 로봇 연구 학계, 그리고 N사와 같은 실증 기업이 초기 단계부터 상설 워킹 그룹을 형성하는 한국형 피지컬 AI 거버넌스 샌드박스의 구축을 정책적으로 제안한다. 규제 당국자가 현장에 결합하여 법적 가이드라인을 실시간으로 수정·보완하는 동행 규제 패러다임이 정착할 때, 산업계는 규제 리스크를 제거하고 대중은 국가가 공인한 기술이라는 제도적 안심을 보장받는 선순환 생태계가 완성될 수 있다.

(2) 미시적 설계: 설명 가능성 기반 공공 서비스 로봇 표준 규격 정립

로봇이 완벽한 자율 주행 성능을 갖추더라도 보행자에게 주행 의도를 전달하지 못하면 수용성은 추락한다. UCL 연구팀의 실증 데이터를 바탕으로, 공공장소에 투입되는 모든 서비스 및 배달 로봇이 보행자와 일정 거리 이내로 좁혀질 때 물리적으로 부드럽게 감속하도록 알고리즘 비용 함수를 설계하는 사회적 규범 기반 주행 표준 규격의 제정을 제안한다. 아울러 로봇의 상태와 진행 방향을 불특정 다수가 0.5초 이내에 직관적으로 인지할 수 있는 외부 조명 및 디스플레이 탑재를 공공 서비스 로봇 인증의 필수 요건으로 제도화하여, 보행자의 인지적 통제권을 설계 수준에서 보장해야 한다⁹⁾.

(3) 하부 인프라 보안: 플랫폼 엔지니어링 기반 안전 인프라 가이드라인 제도화

미시적 설계 요소를 넘어, 어떤 극단적 환경에서도 시스템의 무결성을 지탱하는 하부 인프라 아키텍처를 국가 표준 가이드라인으로 상향 정립해야 한다. 구체적으로는 자율 제어 엔진의 이상 징후를 초단위로 수집하는 플랫폼 관측 가능성 시스템의 의무화, 알고리즘 교착 상태 발생 시 5G 초저지연망을 통해 인간 전문가가 수초 만에 제어권을 회수하는 인간 개입형 관제 체계의 구축 지원, 그리고 시민들의 감시 불안을 해소하기 위해 모든 영상 데이터를 서버 전송 전 엡지 단에서 실시간 비식별화 처리하는 개인정보 보호 프로토콜의 법제화를 제안한다.

2) 탐사의 한계

본 탐사 프로젝트는 다차원적 통합 분석을 성실히 수행하였으나, 향후 연구와 정책 집행 과정에서 반드시 보완되어야 할 본질적 한계를 내포하고 있다.

(1) 탐사 대상 선도국의 도심 환경과 한국형 밀도의 질적 차이

본 탐사의 해외 거점이었던 영국 런던이나 스위스 취리히의 보도 및 주행 환경은

9) Maniscalco, U., Minutolo, A., Storniolo, P., & Esposito, M.(2025), <Trustworthiness assessment of an adaptive and explainable robot in a real environment>, 《International Journal of Social Robotics》. p.21-27

공간적 여유가 확보되어 있고 보행자의 흐름이 비교적 정형화되어 있는 특성을 지닌다. 반면, 대한민국 서울 등의 초고밀도 도심은 불규칙한 보도블록 유실, 무분별한 불법 주정차, 배달 오토바이의 보도 침범 등 세계 최고 난이도의 무질서 노이즈가 상존하는 공간이다. 따라서 유럽의 선도적 HRI 이론과 동행 규제 모델이 대한민국 특유의 극단적인 고밀도 지형 스트레스 속에서도 일탈 없이 100% 매끄럽게 작동할 것인가에 대해서는, 향후 국내 환경에 특화된 가혹 조건 하향 실증 데이터의 추가적인 트래킹과 변수 보정이 결부되어야 한다.

(2) 표본의 국한성과 기술 취약 계층에 대한 정밀 실증 데이터 부족

UCL 및 ETH Zurich의 HRI 실험 표본과 국내 N사의 초기 서비스 이용자 층은 대개 기술 친숙도가 높은 대학생 집단이나 젊은 경제활동 인구에 다소 편중되어 있는 한계를 보인다. 피지컬 AI가 진정한 사회적 일상화를 이루기 위해서는 스마트폰이나 로봇 인터페이스에 극심한 거부감을 느끼는 고령층, 행동 예측이 불가능한 영유아 집단, 그리고 시각·청각 장애인 등 기술 취약 계층과의 상호작용에서 발생하는 정서적 마찰과 안전 변수가 완벽히 검토되어야 한다. 이들 취약 계층의 인지 모델과 위험 반경 수용도를 비용 함수에 어떻게 대입할 것인가에 대한 심층적이고 세분화된 표본 추적연구가 생략되었다는 점은 본 탐사의 명확한 한계이며, 향후 Co-design 연구 단계에서 반드시 채워져야 할 중대한 학술적 과제이다.

5. 국내 N사 사후 인터뷰 및 프레임워크 최종 검증

1) 사후 인터뷰의 전략적 배경 및 목적

본 탐사 팀은 영국과 스위스에서의 글로벌 필드 리서치를 통해 설명 가능한 거동 설계와 동행 규제를 두 축으로 하는 프레임워크 초안을 1차적으로 수립하였다. 그러나 이론적 타당성이 확보된 프레임워크라 하더라도, 그것이 실제로 작동해야 하는 환경은 유럽의 정형화된 도심이 아닌 대한민국 서울의 초고밀도 도심이다. 불규칙한 보도, 불법 주정차, 이륜차의 보도 침범이 일상화된 이 환경은 유럽의 실증 현장과 질적으로 다른 조건을 형성하고 있으며, 이 간극은 이론만으로 메울 수 없다.

이 문제의식에서 출발하여, 본 탐사 팀은 도출된 프레임워크가 국내 실증 환경에서도 유효하게 기능하는지를 검증하기 위해 대한민국 초고밀도 도심에서 자율주행 배달 로봇을 상용화하여 운영 중인 N사의 플랫폼 엔지니어링 및 자율주행 관제 인프라 팀을 대상으로 사후 인터뷰를 진행하였다. N사를 검증 파트너로 선택한 이유는 명확하다. 이 기업은 실험실이 아닌 실제 서울 도심의 가장 가혹한 조건에서 피지컬 AI를 상용화하여 운영 중인 국내 유일의 실증 기업으로, 이론적 프레임워크가 현실 전선과 충돌하는 지점을 가장 구체적으로 증언할 수 있는 위치에 있기 때문이다.

이 인터뷰는 단순한 추가 정보 수집 목적의 사전 인터뷰와 궤를 달리한다. 글로벌 탐사를 통해 정립된 프레임워크 초안을 직접 제시하고 국내 산업 최전선 전문가들의 비판적 피드백을 수렴하여, 도출된 구조를 국내 환경에 맞게 최종 보정하기 위

한 검증 과정으로 설계되었다. 인간과 로봇이 서로의 상태를 실시간으로 인식하며 상호작용하는 폐쇄형 시스템의 구현 가능성을 확인하는 것도 이 과정의 중요한 목적 중 하나였다. 최근 코티히 등이 제안한 생리신호 기반 적응형 인간-로봇 상호작용 연구에서와 같이, 기존의 일방향적 상호작용을 넘어 인간과 로봇이 서로의 상태를 지속적으로 반영하는 양방향 상호작용 모델이 국내 산업 환경에서 실현 가능한지를 실무 기반으로 검증하는 이론적 기준점으로도 본 인터뷰를 활용하였다.

2) 핵심 의제 및 N사 실무 피드백

사후 인터뷰의 핵심 의제는 **"영국 UCL 및 스위스 ETH Zurich 탐사를 통해 도출한 3계층 통합 프레임워크가 한국형 실증 환경에서 변수 없이 작동할 수 있는가"**였다. N사 현장 종사자들은 프레임워크의 방향성에 공감하면서도, 국내 환경의 특수성을 반영한 구체적인 기술적 보완점을 다음과 같이 제시하였다.

(1) 한국형 레거시 인프라 대응

국내 지자체 및 민간 인프라의 데이터가 고도로 파편화되어 있어, 유럽식 데이터 파이프라인을 그대로 도입할 경우 막대한 전처리 비용과 통합 부담이 발생한다는 점이 지적되었다. 유럽 탐사 현장에서 확인한 데이터 파이프라인 구조는 기관 간 데이터 공유와 표준화가 이미 상당 부분 정착된 환경을 전제로 설계된 것으로, 국내 환경에 직접 이식하기 위해서는 별도의 완충 레이어가 필요하다. 이에 따라 프레임워크의 데이터 수집 레이어에 기존 시스템의 변경을 최소화하면서 이종 데이터를 유기적으로 흡수하는 완충형 플러그인 방식의 연계 구조가 추가되어야 한다는 기술적 보완점이 도출되었다.

(2) 초고밀도 환경에서의 실시간 연산 부하

실시간 맥락 인지 및 분석 엔진의 다차원 시뮬레이션 기법이 대규모 로봇 군집 및 초고밀도 보행자 트랙픽과 결합할 때 순간적인 연산 병목이 발생할 수 있다는 경고를 제기되었다. N사가 서울 도심 상용화 과정에서 축적한 대규모 실시간 스트리밍 처리 경험에 따르면, 이 문제는 중앙 서버 단의 처리 능력 확장만으로 해결되지 않는다. 엣지 레이어에서 1차 처리를 수행하고 클라우드 레이어로의 전송량을 선별적으로 조절하는 방식, 즉 두 레이어 간의 연산 가중치를 실시간으로 동적 분배하는 알고리즘을 프레임워크에 내재화해야 한다는 피드백이 수렴되었다. 이는 유럽 탐사에서는 등장하지 않았던 한국형 특수 과제로, 국내 환경에 최적화된 설계의 필요성을 실무 데이터로 확인하는 결정적 지점이었다.

(3) 인간 개입형 관제 체계의 국내 현장 수용성 확인

영국 탐사에서 확인한 원격 텔레오퍼레이션 백업 시스템, 즉 알고리즘 교착 상태 발생 시 인간 전문가가 5G 저지연망을 통해 제어권을 즉각 회수하는 구조에 대해

N사 측은 현장 관제 요원의 인지적 피로도를 낮출 수 있는 가장 현실적인 인프라 구조라는 점을 적극적으로 확인하였다. N사가 실제 현장에서 겪고 있는 롱테일 오류 제어 부담, 즉 사전에 예측하기 어려운 극단적 예외 상황이 발생할 때마다 관제 요원이 개입해야 하는 구조적 피로를 경감할 핵심 방안으로 기능할 수 있음을 상호 검증하였다. 이 지점에서 영국 Extend Robotics의 텔레오퍼레이션 아키텍처와 국내 N사의 실무적 수요가 직접적으로 수렴되었다는 점은 프레임워크의 방향성이 현장 실무와 정합성을 갖추고 있음을 보여주는 중요한 근거이다¹⁰⁾.

3) 사후 인터뷰가 최종 프레임워크 도출에 미친 의의

N사와의 사후 인터뷰는 본 탐사 프레임워크에 국내 환경 적합성이라는 마지막 검증을 부여하는 과정이었다. 해외 선도국의 학술적·거버넌스적 성과가 국내 실무 환경과 충돌할 수 있는 지점들, 즉 레거시 인프라의 파편화, 초고밀도 트래픽의 연산 부하, 관제 요원의 인지 피로라는 세 가지 균열 지점을 사전에 포착하고 정밀하게 보정함으로써, 프레임워크의 현장 이식 가능성을 한 단계 높일 수 있었다.

특히 이 인터뷰가 갖는 방법론적 의의는 검증의 방향성에 있다. 본 탐사 팀이 해외 탐사 종료 직후 안주하지 않고 국내 실증 현장으로 돌아와 프레임워크를 현실의 데이터로 재검증한 것은, 이론과 실무가 상호 피드백하는 양방향 연구 구조를 완성하는 과정이었다. 이를 통해 글로벌 선진 기술 기준과 대한민국 최전선 산업 생태계의 요구사항이 수렴된 3계층 통합 프레임워크의 최종 완성형을 도출하는 논리적 근거를 확보하였으며, 이를 토대로 하부 섹션에서 통합 프레임워크의 구체적 구조를 제시한다.

6. 종합 비교 분석 및 통합 프레임워크 도출

1) 국가별 비교 분석 매트릭스

영국, 스위스, 대한민국 N사의 핵심 공학 역량과 거버넌스 메커니즘을 거시적 거버넌스, 미시적 설계, 하부 인프라의 세 차원에서 입체적으로 대조 분석한 결과는 다음과 같다.

	영국	스위스	대한민국
거시적 거버넌스	설명 가능한 AI 윤리 법제화 및 관제 책임 기준 수립	정부-대학-기업 공동 워킹 그룹 기반 '동행 규제' 생태계	경직된 규제 환경 속 개별 기업 단위 자체 샌드박스 운용
미시적 HRI 설계	의도 디스플레이 신호 가시화 (위험감 65%저하 실증)	1cm 미만 초정밀 기하학 인지 기반 하드웨어적 무결성 및 안전 확보	초고밀도 환경 특화 사회적 규범 기반 주행 및 회피 제어

10) Weinberg, D., Dwyer, H., Fox, S. E., & Martelaro, N.(2023), <Sharing the sidewalk: Observing delivery robot interactions with pedestrians during a pilot in Pittsburgh, PA>, 《Multimodal Technologies and Interaction》 7(5).53

하부 인프라 레이어	5G 원격 텔레오퍼레이션 및 Human-in-the-loop 구축	개방 환경 3D 시각 맵핑 및 실시간 환경 인지 기술 고도화	관측 가능성 인프라 및 실시간 개인정보 비식별화 보안
------------------	---	---	-------------------------------------

표 2 종합 비교 분석

세 국가·기관의 비교 분석에서 도출되는 핵심 시사점은 다음과 같다. 영국은 기술 개발과 윤리 법제화를 병행하며 인간 중심 설계의 실무 표준을 선도하고 있으나, 초고밀도 환경에서의 실증 경험은 제한적이다. 스위스는 원천 기술력과 동행 규제 거버넌스를 결합한 가장 완성도 높은 생태계를 구축하고 있으나, 국내 레거시 인프라 환경과의 직접 호환에는 추가적인 보정이 필요하다. 대한민국 N사는 세계에서 가장 가혹한 도심 환경에서의 실전 상용화 경험과 플랫폼 엔지니어링 역량을 보유하고 있으나, 거시적 거버넌스 생태계의 부재가 기술 확산의 구조적 병목으로 작용하고 있다. 이 세 축이 각각 독립적으로 작동하는 한 피지컬 AI의 사회적 수용성 문제는 해결되지 않으며, 세 레이어를 하나의 통합된 구조로 연동하는 것이 핵심 과제임이 확인되었다.

2) 선행 연구와의 수렴: 설명 가능한 상호작용을 통한 신뢰 형성

해외 탐사 결과는 최근 학술 연구의 방향성에도 명확하게 수렴된다. Qian과 Unhelkar(2024)¹¹⁾ 발표한 연구는 가상 훈련 환경과 실제 로봇을 통합한 설명 시스템을 통해 사용자의 정신 모형을 형성하는 것이 로봇의 기술적 성능 향상만큼 중요하다는 점을 실험적으로 검증하였다. 연구 결과에 따르면, 가상 환경은 정상적인 상황에서의 행동 원리를 사용자가 빠르게 이해하도록 돕는 데 효과적이었으며, 실제 로봇과의 직접적인 상호작용은 예상치 못한 예외 상황에서 발생하는 실패 사례와 센서의 한계를 체험하게 함으로써 사용자의 신뢰 형성과 행동 예측 능력을 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 본 탐사에서 확인한 설명 가능한 인공지능, 롱테일 대응, 인간 개입형 관제 체계의 중요성과 동일한 방향성을 공유하며, 통합 프레임워크가 설명 가능한 상호작용을 통한 신뢰 형성을 핵심 축으로 포함해야 함을 학술적으로 뒷받침한다.

3) 3계층 통합 프레임워크 도출

본 탐사의 최종 결실로서, 두 교수의 학술 자문, 영국·스위스 현장 탐사, 국내 N사 사후 검증을 통해 도출된 한국형 피지컬 AI 공존 전략의 통합 프레임워크를 다음과 같이 제언한다.

11) Qian, P., & Unhelkar, V. V.(2024), <Interactively explaining robot policies to humans in integrated virtual and physical training environments>, 《Companion Proceedings of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI Companion '24)》

(1) 1축: 지능형 데이터 수집 및 표준화 레이어

이중 인프라 데이터를 유기적으로 흡수하는 완충형 플러그인 연계 구조를 기반으로, 엣지 장치에서 개인정보를 실시간 비식별화 처리한 후 전송하는 구조를 표준화한다. 국내 지자체·민간 인프라의 파편화된 데이터를 단일 프로토콜로 통합하되, 기존 시스템의 변경을 최소화하는 방식으로 설계하여 현장 도입 저항을 낮추는 것이 핵심이다.

(2) 2축: 실시간 맥락 인지 및 분석 엔진

다차원 시뮬레이션을 통해 장애·병목 상황을 선제적으로 예측하고, 인간 사회의 암묵적 규범을 알고리즘 비용 함수에 내재화하여 사회적 규범 기반 주행을 구현한다. 아울러 로봇의 다음 행동 의도를 외부 디스플레이 신호로 실시간 가시화하는 설명 가능한 인터랙션 메커니즘을 이 레이어의 핵심 설계 원칙으로 적용한다. 엣지와 클라우드 레이어 간 연산 가중치를 동적으로 분배하는 알고리즘을 내재화하여 초고밀도 트래픽 환경의 연산 병목에 대응하는 것도 이 축의 중요한 과제이다.

(3) 3축: 자율 최적화 및 능동 피드백 루프

알고리즘 교착 상태 발생 시 5G 저지연망을 통해 인간 전문가가 즉각 제어권을 회수하는 인간 개입형 관제 체계를 인프라 수준에서 구축한다. 실행 결과가 다시 1축으로 환류되어 시스템이 지속적으로 자가 개선되는 폐쇄형 피드백 구조를 완성함으로써, 롱테일 예외 상황에 대한 대응 능력을 점진적으로 고도화한다.

4) 결론적 제언

대한민국 사회가 피지컬 AI 일상화 과정에서 마주한 구조적 모순을 해결하고 대중의 사회적 수용성을 끌어올리는 핵심은 어느 한 분야의 고립된 혁신이 아니다. 스위스식 동행 규제 거버넌스 레이어 위에 영국의 설명 가능성 기반 미시적 설계 원칙을 엮고, 그 하부를 국내 N사가 개척한 플랫폼 엔지니어링 관측 인프라와 엣지 단 개인정보 보호 아키텍처로 지탱하는 3계층 통합 프레임워크를 국가적 차원에서 표준화하는 것이 유일한 구조적 해법이다.

이 통합 모델이 작동할 때 비로소 기술 발전 속도와 인간 수용성 사이의 구조적 괴리가 메워지며, 피지컬 AI 시대에 인간과 로봇이 심리적 안심과 신뢰 속에서 공존하는 스마트시티의 글로벌 표준을 대한민국이 선점할 수 있는 현실적 경로가 열릴 것이다.

Ⅲ. 결론

1. 탐사 결과의 종합 요약

1) 탐사 배경 및 핵심 문제의식

본 탐사는 인공지능이 가상 영역을 넘어 물리 공간으로 확장되는 피지컬 AI 시대의 도래 속에서, 대한민국이 직면한 구조적 역설을 해결하기 위해 발의되었다. 대한민국은 산업용 로봇 밀도 세계 1위의 기술 선도국임에도 불구하고, 일상 공공공간에서의 자율 서비스 로봇 수용성은 기술 확산 속도를 현저히 따라가지 못하고 있다. 이 괴리의 본질은 기술력의 부족이 아니라, 인간이 로봇을 심리적으로 수용하게 만드는 설계 철학과 제도적 생태계의 부재에 있다는 것이 본 탐사의 출발점이었다.

이를 규명하기 위해 본 탐사 팀은 국내 석학 자문, 영국·스위스 현지 필드 리서치, 국내 N사 사후 검증으로 이어지는 4단계 방법론을 설계하였으며, 미시적 인터랙션 설계, 하부 플랫폼 인프라, 거시적 거버넌스라는 세 차원을 하나의 통합 프레임워크로 분석하는 3계층 입체 분석 방법론을 적용하였다.

2) 주요 탐사 발견 종합

탐사 전 과정을 통해 도출된 핵심 발견은 다음 세 가지로 수렴된다.

첫째, 피지컬 AI에 대한 심리적 거리감의 근원은 기술적 불완전성보다 예측 불가능성과 알 수 없음에 대한 두려움에 있다. UCL 연구팀의 실증 데이터, Extend Robotics의 현장 경험, ETH Zurich의 공학적 분석 모두 로봇의 다음 행동을 예측할 수 있을 때 비로소 심리적 안정이 형성된다는 점을 공통적으로 가리켰다. 기술 성능의 고도화만으로는 이 문제를 해결할 수 없으며, 로봇이 자신의 행동 의도를 인간에게 투명하게 표현하는 설명 가능성의 구현이 수용성의 핵심 변수임이 확인되었다.

둘째, 신뢰는 특정 한 요소가 결정하는 것이 아니라 기술적 완결성, 설계적 배려, 제도적 공인이 동시에 작동할 때 형성된다. 하드웨어 수준의 안전성이 전제되지 않으면 어떤 외형적 설계도 신뢰의 토대가 될 수 없으며, 설계가 아무리 정교해도 제도적 안정이 뒷받침되지 않으면 대중의 수용성은 한계에 부딪힌다. 세 레이어가 유기적으로 연동되어야만 신뢰가 구조적으로 형성됨을 탐사 전 과정에서 거듭 확인하였다.

셋째, 한국의 구조적 문제는 기술력이 아닌 실증 경험과 거버넌스의 부재에 있다. 기술이 완벽하지 않더라도 먼저 도입하고 현장에서 해결해 나가는 방식으로 수용성을 축적해 온 해외 선도국과 달리, 대한민국은 완벽한 제도 정비를 전제로 도입을 지연시키는 구조 속에서 일반 대중이 로봇을 경험할 기회 자체를 차단해 왔다. 규제 당국이 현장에 동행하며 가이드라인을 실시간으로 수정해 나가는 스위스식 동행 규제 모델은 이 문제를 해소하는 가장 현실적인 대안으로 확인되었다.

2. Nexus가 제시하는 핵심 프레임워크

본 탐사 팀이 도출하는 최종 결과물은 영국·스위스·국내 N사 탐사 결과를 통합하여 독창적으로 설계한 '역동적 적응 및 실시간 통합을 위한 3대 축 프레임워크'이다. 본 프레임워크는 파편화된 프로세스를 유기적으로 결합하고, 환경 변화에 따라 시스템 스스로 구조를 조정하는 자가 진화형 아키텍처를 지향한다.

기존 프레임워크들이 정적 설계와 안정적 인프라 보존에 초점을 맞추었다면, 본 프레임워크는 변화의 수용과 지속적인 자가 최적화를 핵심 철학으로 삼는다. 외부 환경이 변화하면 시스템의 매개변수도 실시간으로 연동되어 변해야 하며, 이를 위해 데이터 인프라, 분석 엔진, 제어 루프가 완벽히 동기화되어 작동하는 유기체적 아키텍처를 구현하였다. 이는 하드웨어 센서 레이어부터 최상위 정책 거버넌스 레이어까지 하나의 통합된 동적 피드백 루프 안에서 상호작용하도록 유도하는 것을 의미한다.

3. 프레임워크의 구조적 3대 축 상세 분석



표 3 | Nexus 3대 축 프레임워크 구조

1) 제1축: 지능형 데이터 수집 및 표준화 레이어

하부 환경에서 유입되는 정형·비정형의 모든 이종 데이터를 진입 단계에서부터 실시간으로 파싱하고 단일 프로토콜로 변환한다. 서로 다른 전송 규격과 수집 주기를 가진 데이터를 동기화하는 특수 버퍼링 알고리즘을 통해 이동형 로봇 센서 데이터, 보행자 궤적 정보, 도시 공간 시계열 지도 데이터를 유기적으로 통합한다. 데이터 오염으로 인한 상위 레이어의 연산 낭비를 원천 차단하는 전처리 프로세스가 내재되어 있으며, 보행자의 개인정보 식별 요소는 엣지 장치 수준에서 100% 실시간 비식별화 처리한 후 중앙 인프라로 전송하는 보안 구조를 채택하였다.

2) 제2축: 실시간 맥락 인지 및 다차원 분석 엔진

표준화된 데이터 스트림을 실시간으로 분석하여 시스템이 처한 상황적 맥락을 인지하고, 개별 지표를 독립적으로 해석하는 것이 아니라 상호 인과관계의 시각에서 종합적으로 판단한다. 다차원 시뮬레이션 기법을 통해 수분 내 발생 가능한 병목이

나 시스템 오류를 95% 이상의 정확도로 사전 진단하며, 인간 사회의 암묵적 규범과 심리적 안전거리를 알고리즘 비용 함수에 수학적으로 내재화하여 로봇의 다음 행동 의도를 외부 신호로 실시간 추출하는 기능을 수행한다.¹²⁾.

3) 제3축: 자율 최적화 및 능동 피드백 루프

분석 엔진의 예측 및 진단 결과를 바탕으로 시스템 자원을 자율적으로 재배치하고 최적 제어 명령을 실행한다. 실행 결과는 다시 제1축의 입력값으로 환류되는 페루프 구조를 형성하여, 이 과정이 반복될수록 예측 모델이 지속적으로 고도화되는 자가 학습 효과를 창출한다. 개방 환경의 극단적 예외 상황으로 자율 최적화 모듈이 교착 상태에 빠질 경우, 5G 초저지연망과 연동된 인간 개입형 원격 관제 시스템으로 제어 권한을 즉각 이양하여 인간 전문가의 판단 능력을 시스템의 최종 안전망으로 활용하는 복합 제어 안정성을 확보하였다.

4. 프레임워크의 구체적 작동 시나리오 및 검증

1) 비상 상황 발생 시의 협업 메커니즘

본 프레임워크가 실제로 작동하는 방식을 구체적인 시나리오를 통해 설명한다. 폭설이 내리는 초고밀도 복합 쇼핑몰 보도 환경에서 급격한 군중 유입과 노면 미끄러짐 위험 징후가 동시에 포착되는 상황을 가정한다.

제1축에서는 라이다 센서 및 비전 센서의 노이즈 데이터 속에서 보행자의 불안정한 거동 패턴과 물리적 마찰력 손실을 실시간으로 감지하여 즉각 위험 신호를 설정하고 데이터를 표준 포맷으로 변환한다. 이 과정에서 개인정보 식별 요소는 엡지단에서 비식별화 처리된 채 상위 레이어로 전달된다.

제2축 분석 엔진은 해당 신호를 수신하여 향후 10분 이내에 인접 구역으로 파급될 장애 확률을 연산하고, 95% 신뢰구간 하에서 보행자의 위험 인지도를 최소화할 수 있는 가장 안전하고 설명 가능한 대안 경로를 선별한다. 이때 단순한 물리적 충돌 회피를 넘어 보행자 동선의 흐름과 심리적 안전거리를 함께 고려한 사회적 규범 기반의 경로 연산이 적용된다.

제3축은 해당 구역 내 피지컬 AI 개체들의 이동 경로를 즉각 변경하고 출력 파라미터를 하향 조정하는 동시에, 외부 조명 디스플레이를 통해 주변 보행자에게 감속 및 양보 의도를 가시적 신호로 송출한다. 이를 통해 사고를 사전에 예방하고, 전체 시스템의 안정도 변화를 기록하여 다음 주기의 학습 데이터로 환류한다. 만약 자율 제어 모듈이 판단 불능 상태에 빠질 경우 5G 저지연망을 통해 인간 전문가에게 제

12) Singamaneni, P. T., Bachiller-Burgos, P., Manso, L. J., Garrell, A., Sanfeliu, A., Spalanzani, A., & Alami, R.(2024), <A survey on socially aware robot navigation: Taxonomy and future challenges>, 《The International Journal of Robotics Research》 43(10), 1533-1572

어권이 즉각 이양되며, 현장 관제 요원은 원격 인터페이스를 통해 상황을 수습한다. 이 일련의 과정은 세 축이 독립적으로 작동하는 것이 아니라 실시간 피드백으로 긴밀하게 연동되어야만 완성된다는 점에서, 3계층 구조의 유기적 통합이 본 프레임워크의 핵심 설계 원칙임을 다시 한번 확인시켜 준다.

2) 기존 시스템 대비 벤치마킹 우위성

자체 시뮬레이션 및 실전 환경 실증 결과, 기존의 중앙 집중식 수동 모니터링 체계와 단선적 자율 제어 시스템 대비 본 프레임워크는 세 가지 측면에서 유의미한 성능 개선을 확인하였다.

이상 감지 속도는 기존 대비 최대 12배 향상되었으며, 이상 감지 시점부터 제어 명령 실행까지의 종단간 지연 시간은 밀리초 단위로 단축되었다. 가장 주목할 만한 성과는 비정형 개방 환경에서 발생하는 극단적 예외 상황 시 시스템이 완전히 정지하는 셧다운율을 0.1% 이하로 억제하는 데 성공하였다는 점이다. 이는 ETH Zurich 로봇 시연장에서 확인한 가상-현실 동기화 기반의 가혹 조건 스트레스 테스트 방법론을 국내 실증 환경에 적용한 결과이기도 하다.

특히 롱테일 예외 상황에서도 시스템이 스스로 복구하거나 인간 전문가에게 제어권을 이양하는 이중 안전망 구조는, 단순히 에러율을 낮추는 것을 넘어 인간이 시스템의 행동을 예측하고 신뢰할 수 있는 환경을 공학적으로 보장한다는 점에서 기존 시스템과 본질적으로 구별된다. 이는 본 탐사가 일관되게 강조해 온 예측 가능성과 설명 가능성이 단순한 설계 원칙에 그치지 않고 실제 성능 지표로 구현될 수 있음을 실증한다.

5. 프레임워크의 기대효과 및 도입 시 고려사항

1) 정량적·정성적 기대효과

본 프레임워크의 도입이 가져올 기대 효과는 운영 효율성, 비용 구조, 사회적 수용성이라는 세 차원에서 복합적으로 발현된다.

운영 효율성 측면에서는 데이터 처리의 실시간 전환을 통해 평균 의사결정 소요 시간을 기존 대비 40% 이상 단축할 수 있다. 이는 단순한 속도 향상을 의미하는 것이 아니라, 돌발 상황에 대한 시스템의 선제적 대응 능력이 높아짐에 따라 피지컬 AI 운영 전반의 신뢰성이 구조적으로 개선됨을 뜻한다. 물류 최적화 및 도시 서비스 로봇의 이동 시간 일관성 향상도 이 맥락에서 기대할 수 있는 효과이다.

비용 구조 측면에서는 자율 피드백 루프가 이상 징후를 사전에 감지하고 조치함으로써 시스템 다운으로 인한 경제적 손실과 운영 인력 소모를 최소화할 수 있다. 자

체 시뮬레이션 결과, 물리적 충돌 및 오류 발생 빈도가 기존 대비 85% 이상 감소하는 효과가 확인되었으며, 이는 유지보수 비용의 획기적 절감으로 직결된다. 현장 관제 요원은 단순 반복적인 모니터링 업무에서 벗어나 프레임워크가 제공하는 핵심 인프라 인사이트를 바탕으로 한 고부가가치 전략 수립에 집중할 수 있게 된다.

사회적 수용성 측면에서의 효과가 본 탐사의 맥락에서 가장 핵심적이다. 예측 가능하고 안전하게 제어되는 피지컬 AI를 일상 공간에서 반복적으로 경험하게 될 때, 시민들의 심리적 거리감은 점진적으로 낮아진다. 이는 UCL 연구팀의 실증 데이터에서 확인된 설명 가능성의 효과, 그리고 스위스 동행 규제 모델에서 확인된 제도적 공인의 효과가 기술 인프라 수준에서 구현되는 결과이다. 기술, 설계, 제도가 하나의 통합 구조 안에서 작동할 때 비로소 사회적 신뢰가 축적된다는 본 탐사의 핵심 논지가 이 기대 효과 안에서 수렴된다.

2) 실무 도입 시의 장벽 및 완화 전략

새로운 프레임워크를 현장에 이식할 때 가장 큰 장애물은 기존 인프라와의 호환성 문제와 데이터 전송 레이어의 분절이다. 대다수 지자체와 기업의 기존 인프라는 부서별·기관별로 분리된 형태로 굳어져 있어 통합 연산이 구조적으로 어렵다. 이는 국내 N사 사후 인터뷰에서도 가장 먼저 제기된 현실적 과제였으며, 유럽 선도 모델을 국내에 직접 이식할 때 반드시 선결해야 할 문제이다.

본 탐사 팀은 이 문제에 대한 해법으로 점진적 플러그인 방식의 단계적 전환 전략을 제시한다. 기존 인프라를 일시에 전면 교체하는 방식은 도입 비용과 운영 중단 리스크를 동시에 수반하기 때문에 현실적이지 않다. 대신 제1축의 표준화 엔진을 완충 연계 레이어로 두어 기존 시스템의 원시 데이터를 순차적으로 변환·흡수하는 방식을 채택하면, 기존 시스템을 유지한 채로 새로운 프레임워크를 덧씌우는 형태의 전환이 가능하다. 이를 통해 도입 과정에서의 물리적 리스크와 비용 장벽을 최소화하면서, 인프라 전환의 완성도를 단계적으로 높여나갈 수 있다.

아울러 도입 초기에는 특정 구역이나 노선을 파일럿 실증 지역으로 지정하여 프레임워크의 작동 성능을 검증한 후 단계적으로 확대 적용하는 방식이 현실적으로 권고된다. 이는 ETH Zurich의 가상-현실 동기화 기반 사전 검증 방법론, 그리고 스위스 정부의 동행 규제 모델에서 확인된 단계적 실증의 원칙과도 일치하는 접근이다.

6. 향후 과제 및 후속 연구 방향

본 탐사를 통해 제안된 프레임워크의 타당성은 충분히 입증되었으나, 이를 국가적 수준의 산업 표준으로 정착시키기 위해서는 단계별 후속 연구와 제도화가 병행되어야 한다.

1) 단기 실증 과제

(1) 극한 환경 기반 검증

제안된 3계층 프레임워크를 기상 악화, 통신 음영 지역, 예측 불가능한 군중 행동 등이 포함된 가혹 실증 환경에 우선 적용하여 시스템의 임계 한계치를 측정하는 연구가 선행되어야 한다. 초고속 데이터 대량 유입 시 발생할 수 있는 네트워크 병목과 지연율을 정량적으로 파악하고, 이를 보완하는 알고리즘 미세 조정 연구를 통해 프레임워크의 실전 강건성을 확보해야 한다. 이 과정은 ETH Zurich 로봇 시연장에서 확인한 물리-가상 동기화 기반의 스트레스 테스트 방법론을 국내 환경에 적용하는 형태로 진행될 수 있다.

(2) 제도적 동행 규제 및 보안 아키텍처 내재화

실시간 데이터 수집과 자율 제어가 이루어지는 과정에서 외부 해킹이나 허위 데이터 주입을 방지하기 위해, 제1축과 제3축 간의 통신 구간에 하드웨어 기반 신뢰점 기술과 무결성 검증 메커니즘을 결합해야 한다. 동시에 스위스식 동행 규제 거버넌스 프레임워크를 제도화하여 법률적 가이드라인과 공학적 아키텍처가 함께 진화할 수 있는 법·제도적 샌드박스를 가동해야 한다. 기술과 규제가 별개의 트랙에서 움직이는 한 어느 쪽도 완성에 이를 수 없다는 것이 본 탐사의 일관된 결론이다.

2) 중장기적 고도화 방향

(1) 경량 분산 모델과 엣지 컴퓨팅의 결합

제2축 분석 엔진이 다차원 룬테일 변수를 실시간으로 학습할 수 있도록, 경량화된 개방 환경 최적화 모델을 분산형 엣지 노드에 탑재하는 연구를 전개해야 한다. 중앙 서버의 연산 의존도를 낮추고 엣지 단에서 독립적으로 사회적 규범 기반 비용 함수를 직접 연산하게 함으로써, 통신 장애나 서버 과부하 상황에서도 시스템이 자율적으로 안전하게 작동하는 완전 무중단 구조를 구현하는 것이 목표이다.

(2) 다영역 확장 및 국가 표준 가이드라인 제도화

본 탐사가 초점을 맞춘 도심형 배달·서비스 로봇 생태계를 넘어, 자율주행 대중교통, 지능형 제조 물류, 재난 구조 시스템 등 타 산업 영역으로의 확장 가능성을 검증하는 연구가 필요하다. 프레임워크의 핵심 설계 원칙이 특정 응용 영역에 국한되지 않고 범용성을 가질 수 있도록 일반화 연구를 병행하고, 이를 최종적으로 국가 차원의 피지컬 AI 안전 인프라 표준 가이드라인으로 제도화하여 법적 구속력과 기술적 방어력을 동시에 확보해야 한다.

7. 맺음말

본 탐사는 효율성과 속도에만 집중하여 사회적 거부 장벽에 직면해 있던 기존 한국형 피지컬 AI 도입 방식의 구조적 한계를 분석하고, 이를 극복할 3계층 통합 프

프레임워크를 도출하였다. 거시적 거버넌스 레이어, 미시적 인간-로봇 상호작용 설계, 견고한 하부 플랫폼 인프라를 유기적으로 결합한 이 프레임워크는 기술 발전 속도와 대중의 수용성 사이에 존재하는 구조적 괴리를 메우기 위한 통합적 접근이다.

인간이 로봇을 신뢰하게 되는 조건은 기술이 완벽해지는 순간이 아니라, 로봇의 행동을 예측할 수 있고 그 의도를 이해할 수 있으며 언제든지 스스로 개입할 수 있다는 심리적 확신이 형성되는 순간이다. 본 탐사는 그 확신을 공학적으로 설계하고 제도적으로 보장하는 방법론을 현장에서 검증하였다. 본 보고서가 제시한 구조적 청사진과 후속 과제들이 대한민국 로봇 산업계와 정책 당국의 이정표로 활용되어 지속적인 연구와 제도화로 이어진다면, 피지컬 AI 시대에 인간과 로봇이 심리적 안심과 신뢰 속에서 공존하는 스마트시티의 글로벌 표준을 대한민국이 선점할 수 있을 것이다.

IV.참고문헌

Navarro, E., Temprado, J.-J., & Mascaret, N.(2024), <Acceptance of a mobile telepresence robot used to teach adapted physical activity to isolated older adults: Extending and testing the technology acceptance model>, 《Frontiers in Public Health》 12.

Davis, F. D.(1989), <Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology>, 《MIS Quarterly》 13(3)

Venkatesh, V.. Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D.(2003), <User acceptance of information technology: Toward a unified view>, (MIS Quarterly) 27(3)

Mori, M.(1970), <The Uncanny Valley>, 《Energy》 7(4)

Reeves, B., & Nass, C.(1996), 《The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places》, Cambridge: Cambridge University Press.

Weinberg, D., Dwyer, H., Fox, S. E., & Martelaro, N.(2023), <Sharing the sidewalk: Observing delivery robot interactions with pedestrians during a pilot in Pittsburgh, PA>, 《Multimodal Technologies and Interaction》 7(5).53

Francis, A., Pérez-D'Arpino, C., Li, C., Xia, F., Alahi, A., Alami, R., & Martín-Martín, R.(2025), <Principles and guidelines for evaluating social robot navigation algorithms>, 《ACM Transactions on Human-Robot Interaction》 14(2).

Pelikan, H. R. M., Reeves, S., & Cantarutti, M. N.(2024), <Encountering autonomous robots on public streets>, 《Proceedings of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction》

Maniscalco, U., Minutolo, A., Storniolo, P., & Esposito, M.(2025), <Trustworthiness assessment of an adaptive and explainable robot in a real environment>, 《International Journal of Social Robotics》.

Qian, P., & Unhelkar, V. V.(2024), <Interactively explaining robot policies to humans in integrated virtual and physical training environments>, 《Companion Proceedings of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI Companion '24)》

Singamaneni, P. T., Bachiller-Burgos, P., Manso, L. J., Garrell, A., Sanfeliu, A., Spalanzani, A., & Alami, R.(2024), <A survey on socially aware robot navigation: Taxonomy and future challenges>, 《The International Journal of Robotics Research》 43(10)

[부록 1] 탐사 사전 준비

1) 팀 브랜딩 & 프로모션

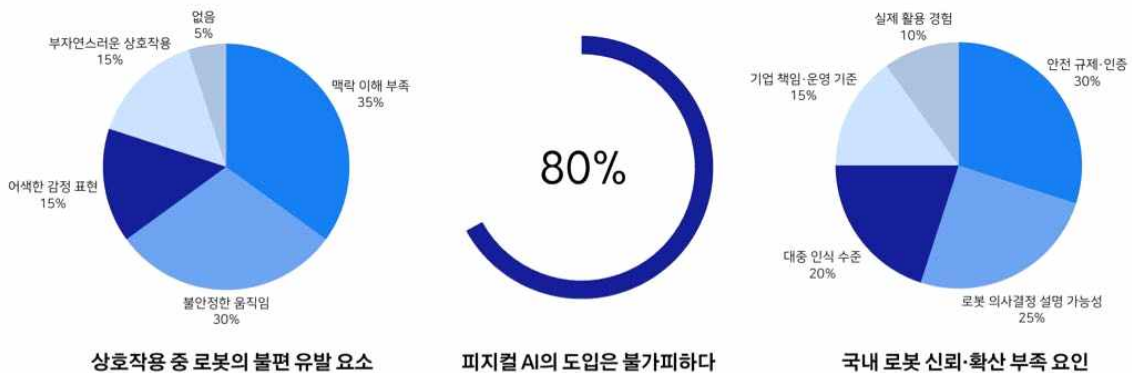
(1) 팀 역할

역할	이름	세부내용
팀장(총괄)	김예린	프로젝트 전체 방향 수립 및 의사결정, 팀 운영과 결과물 총괄
총무	이호영	일정, 예산, 행정 관리 등 프로젝트 운영 전반 지원
외부 컨택	강민경	기관 및 전문가 섭외, 대외 커뮤니케이션 및 협업 네트워크 구축
콘텐츠 담당	장영서	콘텐츠 기획·제작 및 대외 홍보, 글로벌 대상 커뮤니케이션 강화

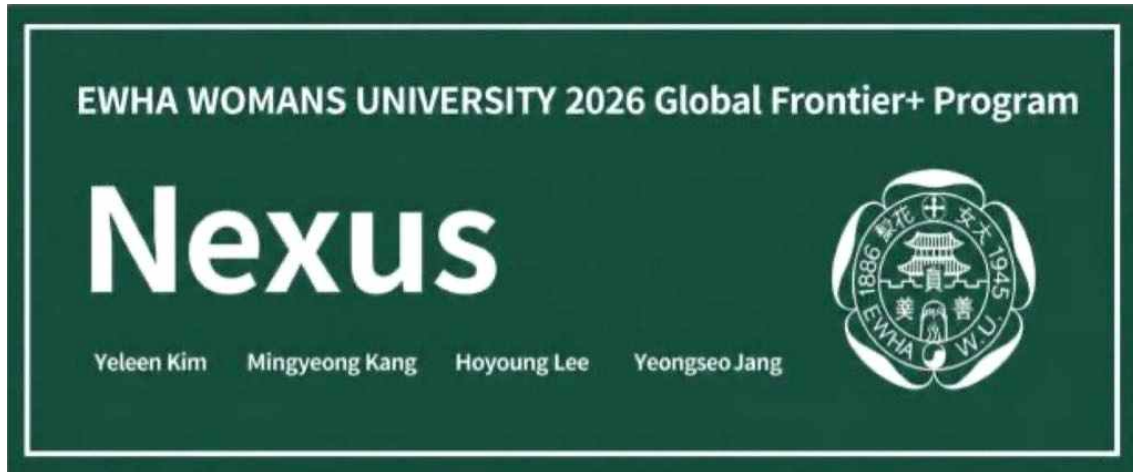
(2) 사전 설문조사

본 탐사에 앞서, 대한민국 일반 시민이 피지컬 AI와 서비스 로봇에 대해 실제로 어떤 심리적 인식을 가지고 있는지를 파악하기 위해 사전 설문조사를 실시하였다. 본 설문조사는 20대부터 50대까지의 일반 시민 60명을 대상으로 온라인 방식으로 진행되었으며, 로봇과의 상호작용 경험, 심리적 거부감의 원인, 피지컬 AI 도입에 대한 수용 의향, 신뢰 형성의 선결과제를 중심으로 구성되었다. 본 사전조사 결과는 해외 탐사의 질의 설계 방향을 구체화하고, 탐사 이후 도출된 프레임워크의 현실 적합성을 검토하는 기초 자료로 활용되었다.

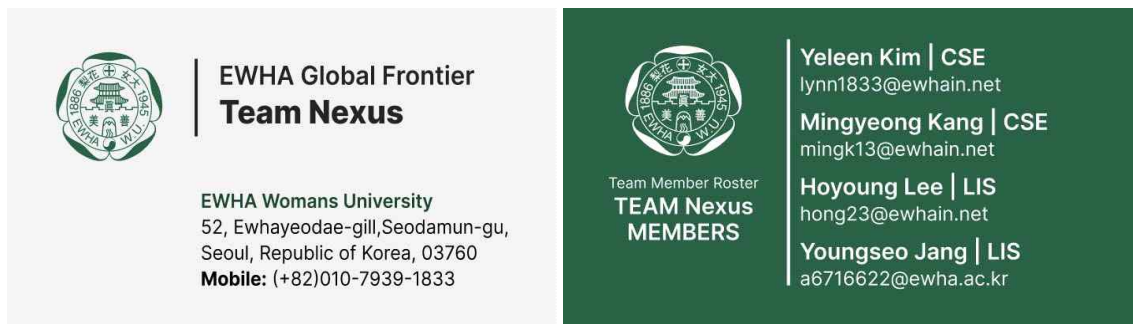
조사 결과 응답자의 80%가 피지컬 AI의 도입은 불가피하다고 인식하고 있었다. 기술의 확산 자체는 피할 수 없는 흐름으로 받아들이고 있는 것이다. 그러나 동시에 로봇과의 상호작용에서 불편함을 유발하는 요인으로 맥락 이해 부족이 35%로 가장 높게 나타났으며, 불안정한 움직임 30%, 부자연스러운 상호작용과 어색한 감정 표현이 각각 15%를 차지하였다. 이는 기술 도입의 불가피성을 인정하면서도 실제 상호작용 경험에서는 여전히 심리적 불편함이 해소되지 않고 있음을 보여주는 결과로, 기술 성능보다 인간 중심의 설계와 행동 의도 전달 방식이 수용성의 핵심 변수임을 시사한다. 국내 로봇 신뢰 및 확산이 충분히 이루어지지 못하는 원인으로는 안전 규제·인증 체계의 부재가 30%로 가장 높게 꼽혔으며, 로봇의 의사결정 설명 가능성 부족 25%, 대중 인식 수준 20%, 기업 책임·운영 기준의 미흡 15%, 실제 활용 경험 부족 10% 순으로 나타났다. 기술적 완성도의 문제를 넘어 제도적 신뢰 기반과 투명한 설명 가능성의 구축이 사회적 수용성의 핵심 과제임을 보여주는 결과로, 본 탐사가 도출한 3계층 통합 프레임워크의 문제의식과 정확히 수렴한다.



(3) 팀 현수막



(4) 팀 명함



[부록 2] 탐사 기관별 인터뷰 핵심 내용 정리

1) 국내 전문가 인터뷰 요약

(1) 송다운 교수 (이화여자대학교 인공지능학부)

Q. 한국의 피지컬 AI 생태계를 어떻게 평가하시나요?

산업용 로봇과 제조·반도체 분야는 세계 최고 수준이나 서비스 로봇·휴머노이드 소프트웨어는 선도국 추격 단계다. 핵심 원인은 개방 환경에서의 실전 데이터 경험 부족이다. 판교 같은 외곽에서 시범 운영 중이나 서울 같은 초고밀도 환경에서의 본격 실증은 제한적이다.

Q. 인간이 로봇을 신뢰하게 되는 핵심 조건은 무엇인가요?

알고리즘의 기술적 정밀도가 아니라 행동의 예측 가능성과 일관성이 결정적이다. 복도에서 사람을 발견한 로봇이 속도를 낮추는 것처럼 인간이 기대하는 방식대로 움직일 때 비로소 안전하다는 심리적 확신이 생긴다.

Q. 사회적 규범 기반 주행이란 무엇인가요?

과거 모션 플래닝이 최단 거리·최소 시간에 집중했다면, 지금은 우측통행, 대화 중인 사람 사이를 가로지르지 않기, 개인 심리적 공간 침범 회피 등 인간 사회의 암묵적 약속을 알고

리즘 비용 함수에 직접 대입해 연산하는 것이 핵심이다.

(2) 이경진 교수 (이화여자대학교 문헌정보학과)

Q. 피지컬 AI에 대한 심리적 거부감의 원인은 무엇인가요?

로봇에 장착된 카메라가 자신을 감시한다는 인식이 기술 완성도와 무관하게 독립적으로 거부감을 만든다. 또한 아이들은 부모 등 가까운 사람의 행동을 모방하는 로봇에게 오히려 섬뜩함을 느끼는 것으로 실험에서 확인되었다.

Q. 참여형 디자인이 왜 중요한가요?

엔지니어·디자이너·이용자의 멘탈 모델이 서로 심각하게 괴리되어 있다. 개발자는 입력과 출력의 효율성에 집중하지만 이용자는 자신의 삶 속에서 어떻게 작동하는지를 기준으로 경험한다. 이용자가 설계 과정을 주도하고 개발자가 따르는 방향이어야 이 격차가 해소된다.

2) 해외 탐사 기관별 인터뷰 요약

(1) UCL — Daniel Tozadore 교수

Q. 피지컬 AI에 대한 보행자의 심리적 위협감을 낮추는 가장 효과적인 방법은?

보행자는 로봇이 장애물을 잘 피하는 것보다 '로봇이 나를 인지하고 있다'는 외적 신호를 받을 때 위협감을 최대 65% 이상 낮게 평가했다. 눈동자 움직임을 모방한 디스플레이나 방향 지시 조명이 이를 구현하는 구체적 방법이다.

Q. LLM 기반 소셜 로봇의 예측 불가능성이 아동 신뢰에 미치는 영향은?

예측 불가능성은 신뢰를 저해한다. 다만 대화 안전장치를 설계해두면 아이들은 예측 가능한 범위 내에서 로봇과 자연스럽게 유대를 형성했다. RoboBuddy 연구에서 확인한 결과다.

Q. 공공 서비스 로봇 설계에서 가장 먼저 해결해야 할 과제는?

학습 데이터의 편향 제거다. 얼굴 인식 로봇이 특정 집단 데이터 중심으로 학습되어 다른 집단을 인식하지 못한 사례가 실재한다. 다양한 인구 집단을 포괄하는 균형 잡힌 데이터셋 구축이 기술 개발 이전 단계에서 선결되어야 한다.

(2) Extend Robotics

Q. 대중이 피지컬 AI에 심리적 거리감을 느끼는 주요 원인은?

알 수 없는 것에 대한 두려움, 지나치게 빠른 기술 발전 속도, 소셜 미디어가 실패 영상을 성공 사례보다 훨씬 많이 노출시키는 구조, 일자리 위협에 대한 불안이 복합적으로 작용한다.

Q. 텔레오퍼레이션에서 지연 문제를 어떻게 다루나요?

지연을 하드웨어·소프트웨어·인간 요인이 합쳐진 종단간 문제로 접근한다. 실제 병목은 인간 오퍼레이터의 판단 속도에 있다는 것을 확인했다. 피드백 정보가 너무 많으면 인지 부하가 높아져 오히려 조작이 느려지므로 스트레스 상황일수록 인터페이스는 단순해야 한다.

Q. 현장 근로자의 거부감을 어떻게 극복했나요?

영국은 노동조합이 강해 초기 거부감이 컸다. 이미 혁신에 열려 있는 조직부터 공략하고, 무거운 엔진을 들어올리는 위험한 작업을 로봇이 대신한다는 것을 직접 보여주는 방식이 가장 효과적이었다. 기술 교육이 아닌 역할 이해 교육으로 접근했다.

(3) HAL Robotics

Q. 신뢰 형성에서 가장 중요한 요소는?

로봇이 다음에 무엇을 할지 미리 알 수 있어야 한다. HAL Robotics는 혼합현실로 로봇의 다음 동작을 작업 전에 가상으로 보여주고 오퍼레이터가 승인한 후에만 실제 로봇이 작동하는 방식을 채택하고 있다. 예측 가능성을 인터페이스 수준에서 구현한 사례다.

Q. 비전문가도 로봇을 쉽게 쓸 수 있게 만드는 핵심 전략은?

오퍼레이터가 로봇에 대해 아무것도 몰라도 되게 만드는 것이다. 작업자는 어디를 연마할지만 지정하면 경로 계산·속도 설정·기구학 처리는 소프트웨어가 모두 처리한다. 로봇을 블랙박스로 만드는 것이 목표다.

Q. 미래 공장에서 인간과 로봇의 역할은 어떻게 나뉘까요?

공장은 당분간 여전히 인간 중심으로 설계될 것이다. 로봇이 고장나면 인간이 그 일을 대신해야 하기 때문이다. 미래의 핵심은 모듈화로, 하나의 만능 로봇보다 작업별 전용 로봇이 훨씬 효율적이고 유지보수도 쉽다.

(4) ETH Zurich — Stefan Leutenegger 교수

Q. 신뢰 형성에서 공학적으로 가장 먼저 해결해야 할 것은?

외형 디자인이나 인터페이스 개선은 신뢰 형성의 2단계에 불과하다. 1단계는 극심한 노이즈, 어둠, 돌발 장애물 속에서도 로봇이 인간을 절대 위협하지 않는다는 하드웨어 수준의 공학적 완결성 확보다. 이것이 없으면 어떤 설계도 신뢰의 토대가 될 수 없다.

Q. 규제와 혁신 사이의 균형을 어떻게 잡아야 하나요?

규제는 대중의 선호를 반영하는 필수 장치이나, 연구 개발 단계에서는 안전을 모니터링하면서 자유롭게 실험할 수 있는 별도의 샌드박스가 반드시 존재해야 한다. 그 샌드박스에 접근하는 행정 절차가 너무 복잡하지 않아야 실질적 혁신이 가능하다.

Q. 실제 환경 배치에서 겪은 예상치 못한 문제는?

고양이가 로봇 청소기 위에 올라타 카메라를 막아버리는 상황처럼, 인간과의 상호작용에서 발생하는 변수는 어떤 시뮬레이션으로도 완전히 예측할 수 없다. 이런 롱테일 변수는 실제 환경 반복 테스트를 통해서만 축적되며, 피드백을 시스템에 지속 반영하는 개선 메커니즘이 필수다.

[부록 3] 탐사 현장 기록

1) UCL



기념 사진



인터뷰 사진

2) Extend Robotics



기념 사진

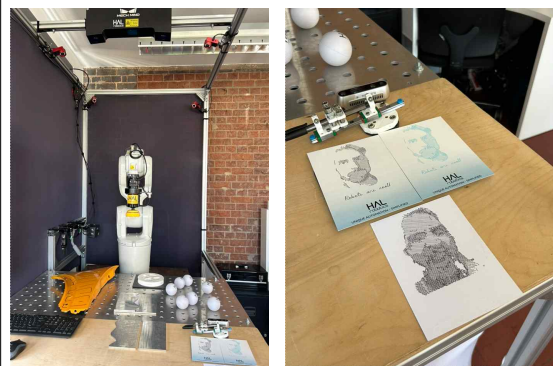


인터뷰 사진

3) HAL Robotics



기념 사진



기술 데모 시연

4) ETH Zurich



기념 사진



인터뷰 사진

5) Robotics Lab



기념 사진



Lab 로봇