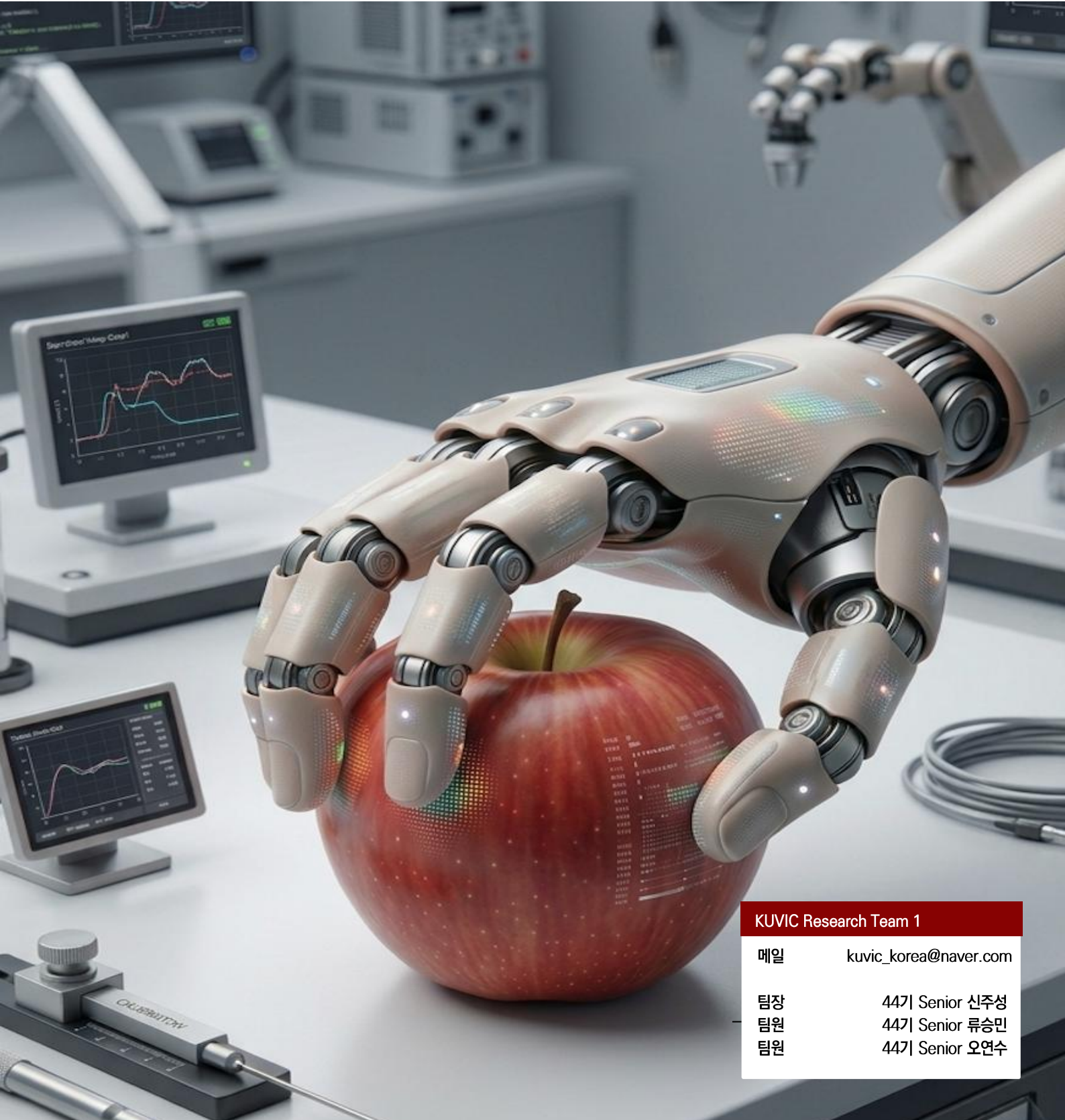


Industry Indepth | 2026.06.08

[로봇] (비중확대)

Touch My Body



KUVIC Research Team 1

메일 kuvic_korea@naver.com

팀장 44기 Senior 신주성

팀원 44기 Senior 류승민

팀원 44기 Senior 오연수

CONTENTS

Summary	3
Key Chart	4
로봇 산업 밸류체인	5
촉각센서 기술	16
산업 전망	24
Company Analysis	28
로보티즈	

Summary

Visual은 촉각센서를 필요로 한다

VLA(Vision-Language-Action) 모델이 등장하면서 소프트웨어 측면의 발달은 고도화되고 있다. 그러나 로봇이 실제 현장에서 정교한 작업을 수행하기 위해서는 시각 정보만으로 충분하지 않다. 카메라는 물체가 손에서 이미 빠져나간 이후에야 이를 인식한다. 사람이 눈을 감고도 물체를 온전하게 잡을 수 있는 것은 촉각의 역할 덕분이다. 손가락에 가해지는 압력이 지나치면 힘을 줄이고, 미끄러짐이 감지되면 반사적으로 파지력을 높이는 것이다. 이는 시각 정보 없이도 촉각적으로 이루어지는데, **휴머노이드가 산업 현장에서 전방위적으로 투입되기 위해서는 이러한 같은 원리로 작동하는 촉각센서가 반드시 필요하다.** 촉각센서가 없다면 로봇은 물체를 보고 그것을 바탕으로 추론할 수는 있어도, 직접 물체를 만지면서 인지할 수는 없다. 비정형 물체를 다룰 때, 시각 기반 추론은 한계에 직면한다. 실제로 **촉각센서가 탑재된 경우 비정형 물체 파지 성공률이 46%에서 98%까지 상승**하고, 파지 성능 역시 기존 대비 52% 향상된다는 연구 결과가 존재한다.

2026년은 휴머노이드 상업화의 원년이 될 것으로 전망되지만, 상업화 속도를 결정 짓는 것을 결국 하드웨어이며, 촉각센서 기술이 병목을 발생시킬 수 있는 주요한 부분이다.

촉각센서가 만들어내는 데이터의 가치

촉각센서는 하드웨어 부품을 넘어서 데이터 생산 장치로 이용될 것이다. 훈련을 통해 압력·마찰·미끄러짐·접촉 위치 등의 정보를 실시간으로 수집하고, 이를 AI 모델 학습에 직접적으로 활용할 수 있다. 시각 데이터는 이미 공개된 데이터가 풍부한 반면, **촉각 데이터는 시뮬레이션으로 구현하기 어렵고 실제로 센서를 통한 훈련으로 수집해야 한다는 점에서 희소성이 크다.** NVIDIA의 GROOT 플랫폼이 촉각 데이터 확보를 핵심 과제로 제시한 것도 유사한 맥락이다. 피지컬 AI 시장의 경쟁은 하드웨어에서 시작하여 로봇이 학습한 데이터 경쟁으로 전개될 것으로 보인다. 특정 모델의 센서로 AI 신경망을 한 번 훈련시키면, 센서 교체 시에는 교체된 모델에 맞춰 재학습이 필요하기 때문에 초기 기술력 선점이 중요하다.

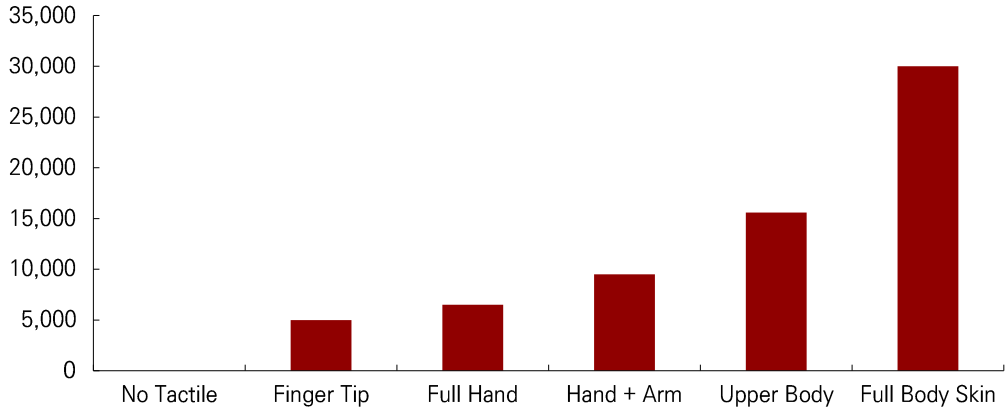
하드웨어 선점이 곧 시장 선점으로

촉각센서 생산 시 필요한 복합 소재와 이온성 젤 등의 소재는 기존 전자부품 공급망과의 공유가 제한적이며, 유연성과 내구성을 동시에 만족시키는 고밀도 적층 공정은 짧은 시간에 복제하기 어렵다. 배터리나 모터와 같은 부품이 타 산업의 공급망을 공유할 수 있는 것과 달리 촉각센서는 사실상 휴머노이드 전용 시장이다. 이는 **소재와 공정의 특수성으로 인해 유사한 원가로 동일한 품질을 구현하기 어렵다는 것**을 의미한다. 기술 선점 기업은 이러한 시장 환경 속에서 기술 격차를 바탕으로 시장 내에서 독점적 지위를 가질 수 있을 것이다.

본 리서치 팀이 추정한 촉각센서 TAM은 2025년 \$9M에서 2029년 \$384M까지 성장할 것으로 전망된다. 커져가는 시장을 선점하는 기업은 단순히 부품 공급에서 경쟁 우위를 지니는 것을 넘어, 촉각 데이터를 축적하고 이를 AI 학습에 재투입하는 선순환 구조를 통해 가치 창출의 수혜까지 입을 수 있을 것이다.

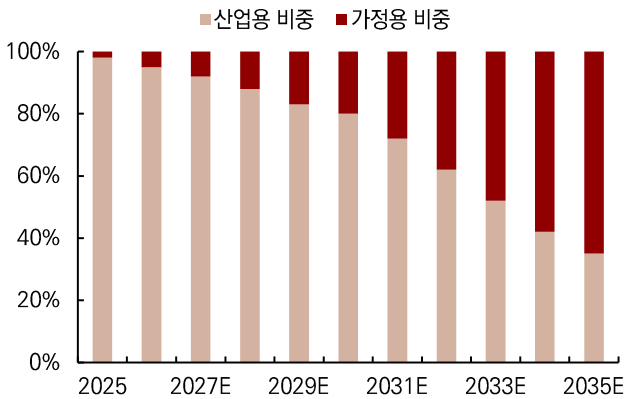
Key Chart

주요 그림 1. 휴머노이드 촉각센서 확산 - 발전 단계별 채널 수 (손끝 → 전신)



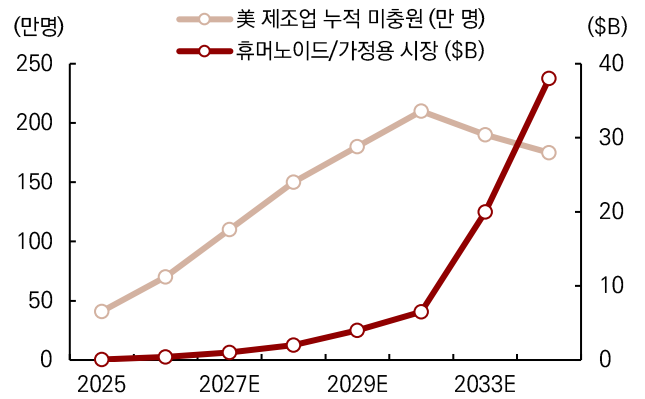
자료: KUVIC 리서치 1팀

주요 그림 2. 휴머노이드 출하 비중: 산업용 vs. 가정용



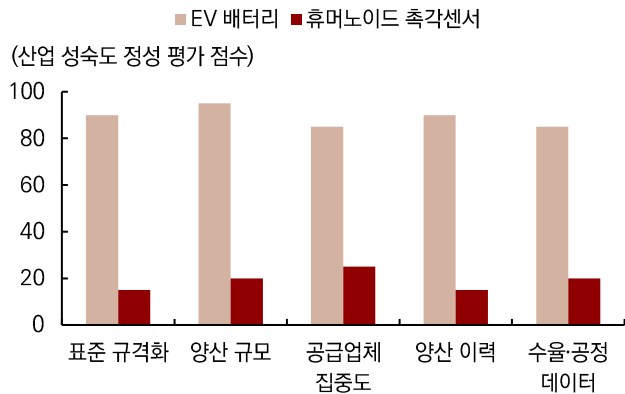
자료: Goldman Sachs, KUVIC 리서치 1팀

주요 그림 3. 제조업 인력 감소와 휴머노이드 시장 성장 전망



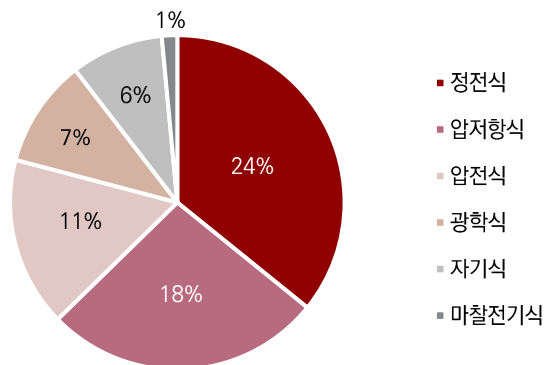
자료: Goldman Sachs, Deloitte, KUVIC 리서치 1팀

주요 그림 4. 공급망 성숙도 비교-EV배터리vs.휴머노이드 촉각센서



자료: IEA, KUVIC 리서치 1팀

주요 그림 5. 촉각센서 유형별 시장 점유율 (2026)



자료: Fortune Business Insights, KUVIC 리서치 1팀

로봇 산업 밸류체인

업스트림 - 미드스트림 - 다운스트림

밸류체인에 집중

로봇 산업의 핵심
밸류는 부품
공급망에 존재

휴머노이드 산업은 단순히 하나의 완성 로봇을 판매하는 시장이 아니라, 핵심 부품 공급망부터 완성 로봇 제조, 실제 산업 현장 적용까지 이어지는 복합적인 밸류체인 산업이다. 현재 시장의 관심은 테슬라 옵티머스와 같은 완성형 휴머노이드에 집중되어 있지만, **실제 산업의 가치와 병목은 그보다 상위 단계인 부품 공급망에서 발생**하고 있다. 특히 액추에이터·감속기·촉각센서와 같은 핵심 부품의 성능과 원가가 휴머노이드의 경제성을 결정하며, 이를 기반으로 완성 로봇 OEM이 제품을 생산하고, 최종적으로 제조·물류·서비스·가정용 시장으로 확산되는 구조를 형성한다. 따라서 휴머노이드 산업을 이해하기 위해서는 **업스트림(핵심 부품) → 미드스트림(로봇 통합·OEM) → 다운스트림(응용 시장)의 관점에서 각 단계별 가치 창출 구조와 병목 구간을 살펴볼 필요가 있다.**

인기 많은 업스트림

표 1. 범주형 비교(산업용 vs. 휴머노이드)

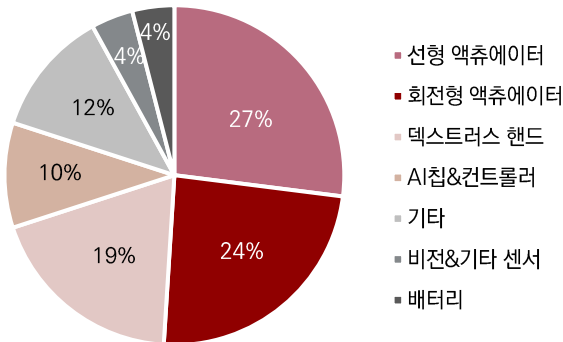
구분	산업용 로봇	휴머노이드
자유도	6~7	30~50
액추에이터 수	6~8	28~50+
감속기 수	6	20~40+
센서 수	제한적	수백~수천
적용 환경	고정 작업	범용 작업

자료: Bank of America Institute, Goldman Sachs, KUVIC 리서치 1팀

업스트림은 로봇을
구성하는 부품 영역

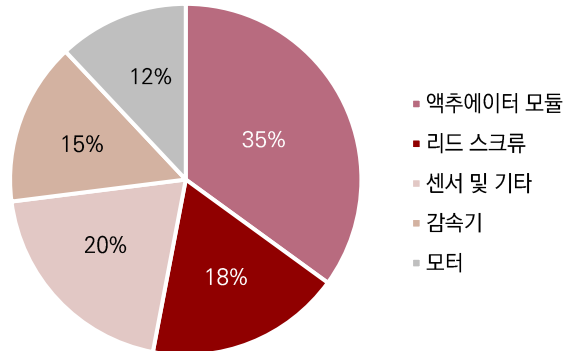
휴머노이드 밸류체인에서 가장 높은 부가가치가 발생하는 구간은 업스트림이다. 업스트림은 로봇의 신체와 두뇌를 구성하는 핵심 부품 영역으로, **액추에이터·감속기·구동나사와 같은 구동계 부품, 촉각·힘센서 및 카메라 등 인지 센서, AI 반도체와 컴퓨팅 모듈, 배터리와 경량소재** 등을 포함한다. 완성 로봇의 성능과 원가 대부분이 이들 부품에 의해 결정되기 때문에 현재 휴머노이드 산업의 경쟁력은 사실상 업스트림 공급망에서 결정된다고 볼 수 있다. 특히 휴머노이드가 산업용 로봇 대비 훨씬 많은 자유도를 요구하면서 단위 로봇당 부품 사용량 역시 급격히 증가하고 있다.

그림 1. 휴머노이드 로봇 전체 BOM 구성 (모듈별)



자료: BofA Global Research, KUVIC 리서치 1팀

그림 2. 테슬라 Optimus 기준 부품군별 BOM 구성

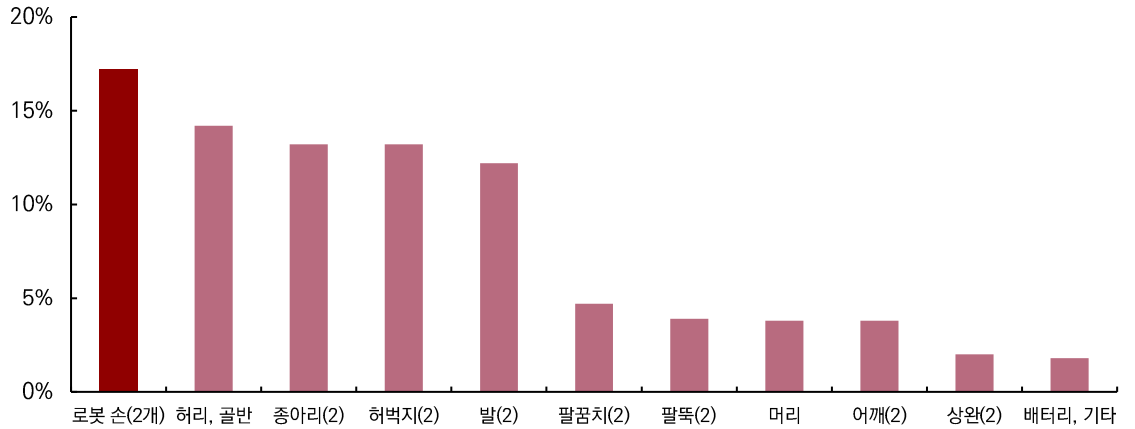


자료: 36Kr, Tesla, KUVIC 리서치 1팀

가장 큰 비중 차지하는 액추에이터

로봇 부품 내에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 액추에이터다. 액추에이터는 전기 에너지를 실제 움직임으로 변환하는 로봇의 근육 역할을 수행하며, 관절 수 증가에 따라 원가가 기하급수적으로 상승한다. **업계에서는 액추에이터와 감속기·구동나사를 포함한 구동부가 전체 BOM의 30~50%를 차지하는 것으로 추정한다.** 최근에는 기존 산업용 로봇 중심의 정밀 감속기 시장이 휴머노이드 수요 증가로 새로운 성장 국면에 진입하고 있으며, 고정밀 유성 롤러 스크류 역시 생산능력 부족으로 대표적인 공급 병목 구간으로 부상하고 있다. **향후 휴머노이드 보급 확대의 최대 수혜는 완성 로봇 업체보다도 이들 핵심 부품 공급사에서 발생할 가능성이 높다.**

그림 3. 옵티머스 Gen-2 부위별 BOM 원가 비중



자료: 테슬라, Morgan Stanley, KUVIC 리서치 1팀

업스트림 - 촉각센서와 데이터, 새로운 병목의 시작

휴머노이드는 센서와 데이터 중요

기존 로봇 산업이 모터와 감속기 중심의 기계공학 영역이었다면, 휴머노이드 시대에는 센서와 데이터의 중요성이 급격히 높아지고 있다. 카메라 기반 비전 시스템은 이미 높은 수준까지 발전했지만, 실제 산업 현장에서 요구되는 비정형 물체 파지와 인간 수준의 정교한 작업 수행은 여전히 한계를 보이고 있다. 이는 로봇이 물체를 보는 것과 만지는 것 사이에 존재하는 정보 격차 때문이며, 이를 해결하는 핵심 부품이 촉각센서다.

표 2. 범주형 비교(산업용 vs. 휴머노이드)

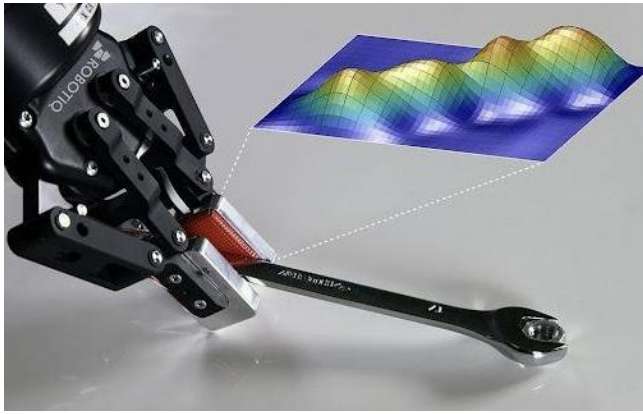
기능	비전 데이터	촉각 데이터	햅토크 데이터
물체 형상 인식	우수	제한적	제한적
접촉 여부 판단	제한적	우수	우수
접촉 위치 파악	제한적	우수	제한적
미끄러짐 감지	제한적	우수	일부 가능
파지 안정성 판단	보조적	핵심	보조적
비정형 물체 조작	보조적	핵심	보조적
공개 데이터셋 규모	풍부	제한적	제한적
시뮬레이션 구현 난이도	낮음	높음	중간

자료: NVIDIA, DexMimic, GelSight Robotics, KUVIC 리서치 1팀

기존 센서와는 차별화가 필요한 촉각센서

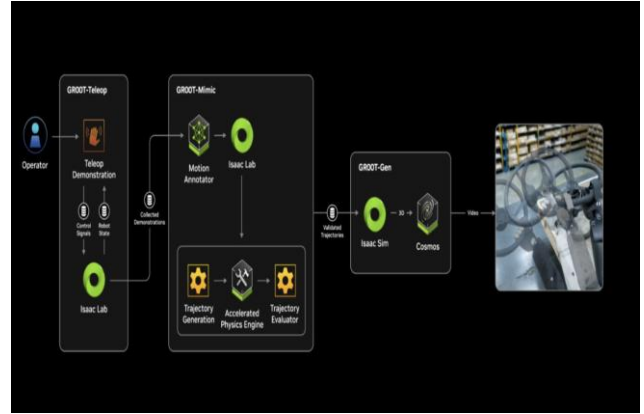
촉각센서는 단순 하드웨어가 아닌 데이터 생산 장치라는 점에서 기존 센서와 차별화된다. 압력, 마찰력, 미끄러짐, 접촉 위치 등의 정보를 실시간으로 수집해 AI 모델 학습에 활용할 수 있기 때문이다. **최근 엔비디아의 GROOT 플랫폼 역시 시각 데이터뿐 아니라 촉각 데이터 확보를 핵심 과제로 제시하고 있으며, 향후 휴머노이드 경쟁력은 얼마나 많은 촉각 데이터를 확보하느냐에 의해 결정될 가능성이 높다.** 따라서 촉각센서는 단순 부품 시장이 아닌 데이터 플랫폼 시장으로 진화할 수 있으며, 산업의 새로운 병목 구간으로 평가된다.

그림 4. 로봇 그리퍼 탑재 촉각센서의 표면 압력 분포 실시간 감지



자료: KUVIC 리서치 1팀

그림 5. 엔비디아 GROOT 기반 학습 파이프라인



자료: KUVIC 리서치 1팀

미드스트림 - 휴머노이드 OEM의 통합 경쟁

표 3. 주요 휴머노이드 개발사 및 양산 계획 (2026년 기준)

국가	기업	대표 모델	특징	공개 자유도/액추에이터
미국	Tesla	Optimus Gen 2	자체 AI(FSD) 대량생산 역량	28개 액추에이터
미국	Figure AI	Figure 02	Open AI 협업, BMW 파일럿	손 16 DoF 공개
미국	Appteronik	Apollo	NASA 기술 기반	공식 전체 DoF 미공개
미국	Agility Robotics	Digit	가장 상용화 진전	양팔+양다리 구조
미국	Boston Dynamics	Electric Atlas	최고 수준 동적 제어	세부 스펙 비공개
중국	UBTECH	Walker S	중국 공장 실증 확대	산업용 특화
중국	Unitree Robotics	G1	저가형 플랫폼	23~43 DoF(모델별 상이)

자료: 각 사 발표, 언론 종합, KUVIC 리서치 1팀

미드스트림은
부품을 완성
로봇으로 통합

미드스트림은 업스트림에서 공급된 수백 개의 부품을 하나의 완성 로봇으로 통합하는 영역이다. 대표적으로 테슬라 옵티머스, Figure, Appteronik, UBTEch 등 휴머노이드 OEM이 이에 해당한다. 이들의 경쟁력은 단순 조립 능력이 아니라 기계·전장·소프트웨어·AI를 하나의 시스템으로 통합하는 능력에서 발생한다. 자동차 산업이 엔진·변속기·차체를 통합하는 산업이었다면, **휴머노이드 산업은 AI와 물리 HW를 통합하는 산업으로 볼 수 있다.** 특히 미드스트림 기업들은 단순 제조업체가 아니라 데이터 운영 기업의 성격을 동시에 가진다. 로봇이 현장에서 수행한 작업 데이터를 지속적으로 수집하고 AI 모델을 업데이트함으로써 성능을 개선하기 때문이다. **향후 휴머노이드 산업은 스마트폰 산업과 유사하게 HW 판매보다 운영체제와 데이터 생태계의 중요성이 높아질 가능성이 크며, 이에 따라 선도 OEM 기업의 시장 집중도 역시 빠르게 확대될 것으로 전망된다.**

미드스트림 - 로봇 손의 중요성

높은 기술적
난이도의 로봇 손

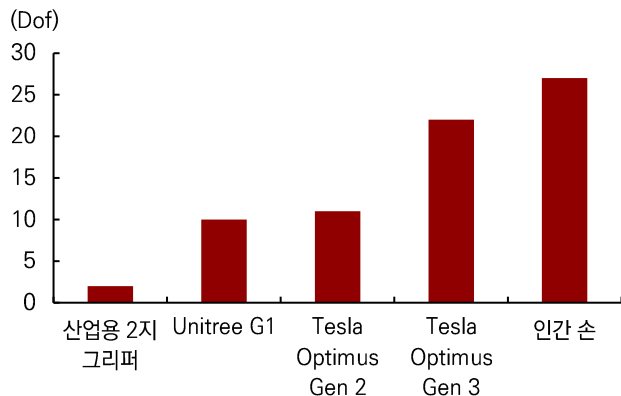
미드스트림 영역에서 가장 높은 기술 난이도를 가진 모듈은 **로봇 손**이다. 인간의 손은 20개 이상의 자유도와 수천 개의 촉각 수용체를 통해 다양한 물체를 정교하게 조작할 수 있는데, 이를 기계적으로 구현하는 것은 휴머노이드 개발의 마지막 과제로 평가된다. 실제 산업 현장에서 요구되는 대부분의 작업은 이동이 아니라 물체 조작에 집중되어 있으며, 이는 로봇 손의 성능에 의해 결정된다. 최근 엔비디아가 레퍼런스 플랫폼으로 제시한 Sharpa Hand 역시 다수의 촉각센서와 소형 액추에이터를 집적한 구조를 채택하고 있다. 이는 향후 휴머노이드 산업의 경쟁이 단순 보행 능력이 아니라 손의 정밀 조작 능력 중심으로 이동하고 있음을 의미한다. **결국 로봇 손은 액추에이터·감속기·촉각센서·AI 알고리즘이 집약된 최종 통합 모듈로서, 향후 휴머노이드 성능을 결정짓는 핵심 차별화 요소가 될 전망이다.**

그림 6. 로봇 핸드 촉각센서 감지 활성화 예시



자료: KUVIC 리서치 1팀

그림 7. 로봇 손 자유도 비교



자료: Tesla, SVRC, KUVIC 리서치 1팀

다운스트림 - 제조·물류 중심의 초기 시장 형성

다운스트림은 제조업, 물류산업 중심으로

다운스트림은 완성된 휴머노이드가 실제 경제적 가치를 창출하는 응용 시장이다. 초기 시장은 자동차 공장과 제조라인, 물류센터와 창고 등 반복 작업이 많고 작업 환경이 비교적 통제된 영역에서 형성될 것으로 전망된다. 이러한 환경은 인간 작업자의 행동을 데이터화하기 쉽고, 로봇이 수행해야 할 작업 역시 표준화되어 있기 때문이다. 따라서 초기 휴머노이드 시장은 제조업과 물류산업을 중심으로 확대될 가능성이 높다.

특히 글로벌 제조업체들은 인건비 상승과 노동력 부족 문제를 동시에 겪고 있으며, 이는 휴머노이드 도입의 강력한 경제적 유인을 제공한다. 현재 시장이 주목하는 이유 역시 인간형 로봇이 기존 자동화 설비를 대체하는 것이 아니라, 사람을 위해 설계된 기존 생산 환경에 그대로 투입될 수 있다는 점에 있다. 이는 휴머노이드가 기존 산업용 로봇보다 훨씬 큰 TAM을 확보할 수 있는 근거로 작용한다.

그림 8. 산업 현장 중심의 로봇 활용 사례



자료: KUVIC 리서치 1팀

그림 9. 가정용 서비스 로봇 활용 사례



자료: KUVIC 리서치 1팀

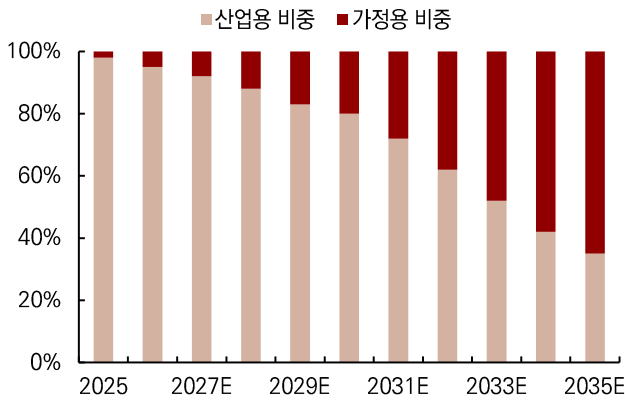
다운스트림 - 가정용 로봇으로의 확장

가정용 시장이 최종 목적지

장기적으로 휴머노이드 산업의 최종 목적지는 가정용 시장이다. 제조와 물류 환경은 통제된 공간이지만, 가정은 수많은 비정형 물체와 예측 불가능한 상황이 존재한다. 따라서 가정용 로봇은 제조용 로봇 대비 훨씬 높은 수준의 인지·판단·조작 능력을 요구하며, 촉각센서와 AI 모델의 발전이 필수적이다. 결국 가정용 시장 진입 여부가 휴머노이드 산업의 최종 성공을 결정하는 핵심 변수로 작용할 전망이다.

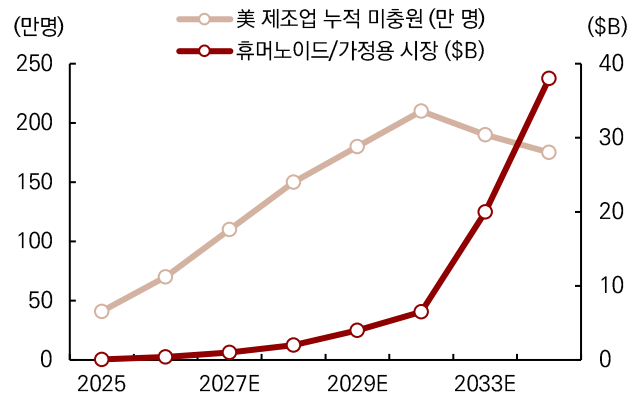
중요한 점은 **다운스트림의 수요 확대가 다시 업스트림 공급망 성장으로 연결된다는 점**이다. 휴머노이드 보급 확대는 액추에이터·감속기·촉각센서 생산량 증가를 유발하고, 이는 규모의 경제를 통해 부품 단가 하락을 가져온다. 이후 낮아진 원가는 다시 새로운 응용 시장 개화를 촉진하는 선순환 구조를 형성한다. 따라서 휴머노이드 산업은 단순 로봇 산업이 아니라 업스트림 부품, 미드스트림 통합, 다운스트림 응용 시장이 동시에 성장하는 플랫폼 산업으로 이해할 필요가 있다.

그림 10. 휴머노이드 출하 비중: 산업용 vs. 가정용



자료: Goldman Sachs, KUVIC 리서치 1팀

그림 11. 제조업 인력 감소와 휴머노이드 시장 성장 전망



자료: Goldman Sachs, Deloitte, KUVIC 리서치 1팀

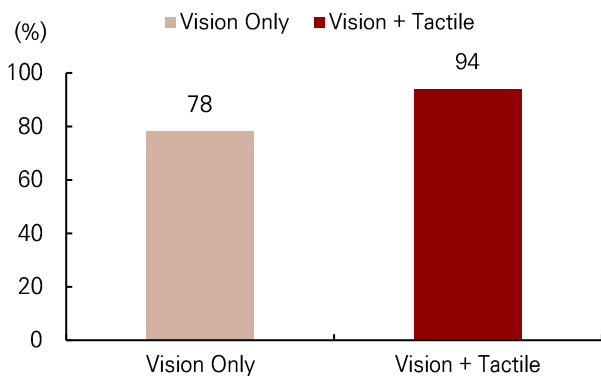
촉각센서는 왜 병목인가?

시각 중심 인지 구조의 한계

단순 시각 정보만으로는 한계 존재

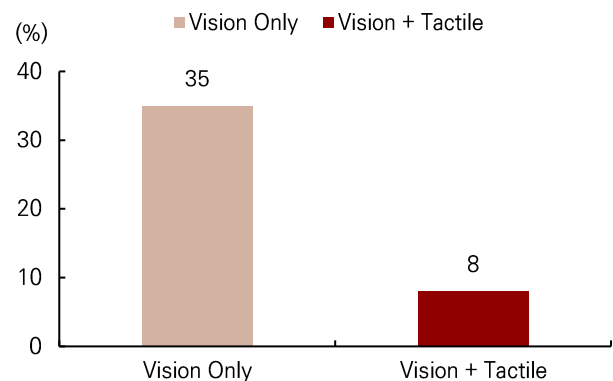
현재 대부분의 로봇은 카메라와 AI 모델을 기반으로 주변 환경을 인식하는 구조를 사용한다. 카메라가 영상을 수집하면 AI가 물체의 위치와 형태를 추론하고, 이를 바탕으로 제어가 모터에 명령을 전달하는 방식이다. 이러한 구조는 물체를 보는 것에는 강점을 가지지만 실제 물체와 접촉하는 순간 발생하는 힘, 압력, 마찰과 같은 물리적 정보를 직접 인지하지 못한다는 근본적 한계를 갖는다. 예를 들어 로봇이 종이 컵을 집을 상황을 가정하면, 카메라는 종이컵의 위치와 형상을 인식 가능하나 현재 손가락이 얼마만큼의 힘을 가하고 있는지는 알 수 없다. 즉, 강한 힘을 가하면 컵이 찌그러지고, 반대로 힘이 부족하면 컵을 떨어뜨릴 가능성이 존재한다. 인간은 이러한 문제를 손끝 촉각을 통해 실시간으로 조절하지만, 기존 로봇은 시각 정보만으로 이를 추론해야 하기 때문에 높은 계산 비용과 오류 가능성을 수반한다. 특히 **휴머노이드가 수행해야 하는 작업은 산업용 로봇과 달리 비정형 환경에서 발생하는데 특정 공간에서는 물체의 위치와 상태가 지속적으로 변하기 때문에 단순한 시각 정보만으로는 안정적인 작업 수행이 어렵다.**

그림 12. 촉각센서 추가 시 파지 성공률이 약 16%p 상승



자료: Meta AI DIGIT, KUVIC 리서치 1팀

그림 13. 촉각 피드백 활용 시 물체 낙하율이 약 70~80% 감소



자료: VTAM, KUVIC 리서치 1팀

촉각센서는 보고 판단에서 만지고 인지로 전환

이러한 한계를 해결하기 위해 휴머노이드 산업은 최근 시각 중심 구조에서 촉각 중심 구조로 빠르게 전환되고 있다. 촉각센서는 손가락과 손바닥에 부착되어 접촉 압력, 전단력, 미끄러짐, 진동 등의 정보를 실시간으로 수집한다.

촉각센서를 활용한 만지고 인지하는 것의 중요성

즉, 기존 구조가 ‘카메라 → AI 추론 → 제어 명령’이었다면, ‘**촉각센서 → 직접 물리정보 획득 → 촉각 제어**’ 구조로 변화하는 것이다. 이는 인간의 손과 매우 유사한 방식인데 인간 역시 물체를 잡을 때 시각보다 촉각 정보를 우선 활용한다. 컵을 집을 때 힘이 부족하면 손끝에서 즉시 미끄러짐을 감지하고, 힘이 과하면 압력 증가를 인식하여 자연스럽게 힘을 조절한다. 최근 엔비디아의 GR00T 플랫폼, 테슬라 Optimus, 현대차 Atlas 차세대 모델 등 주요 휴머노이드 개발 기업들이 촉각 기반 조작 능력을 핵심 기술로 제시하는 이유도 여기에 있다.

표 4. 주요 휴머노이드 기업 촉각 기술 도입 현황

기업	모델	촉각 적용
NVIDIA	GR00T + Sharpa Hand	○
Tesla	Optimus Gen2	○
현대	Atlas Next Gen	○
Figure AI	Figure 02	개발중
Agility Robotics	Digit	개발중

자료: NVIDIA, DexMimic, GelSight Robotics, KUVIC 리서치 1팀

비정형 물체 파지가 촉각센서를 필요로 한다

비정형 물체 파지에서의 촉각센서 쓰임

촉각센서의 중요성이 가장 크게 드러나는 영역은 비정형 물체 파지다. 기존 산업용 로봇은 자동차 부품, 반도체 웨이퍼와 같이 위치와 형태가 일정한 물체를 반복적으로 다루기 때문에 촉각 정보의 필요성이 크지 않았다. 반면 휴머노이드가 다루어야 하는 대상은 옷, 과일, 종이상자, 전선, 비닐봉지 등 형태와 강성이 모두 다른 비정형 물체들이다.

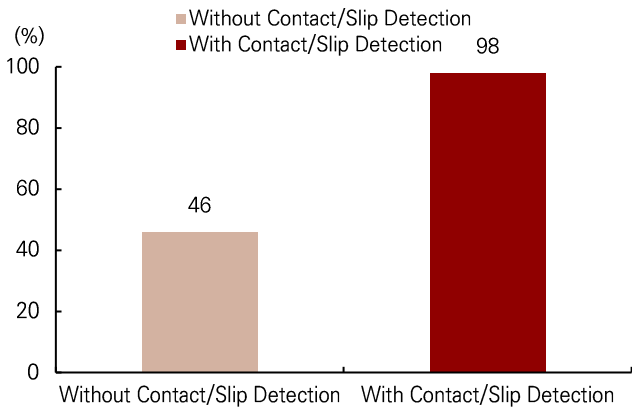
예를 들어 계란을 집는 작업은 단순한 물체 인식 문제가 아니다. 로봇은 계란이 깨지지 않을 정도의 압력을 유지하면서도 떨어뜨리지 않을 만큼의 힘을 동시에 가해야 하며 이는 접촉 순간 발생하는 압력 분포와 마찰 상태를 실시간으로 측정해야만 가능하다. 따라서 휴머노이드의 상용화가 본격화될수록 촉각센서는 선택적 부품이 아니라 필수 부품으로 자리잡을 가능성이 높다. **카메라를 로봇의 눈이라고 한다면 촉각센서는 로봇의 손끝 신경망에 해당하는 셈인 것이다.**

실제 연구 결과 역시 이러한 필요성을 뒷받침하는데 Hong Kong Polytechnic University 연구진은 서로 다른 형상의 물체 10종을 대상으로 실시간 파지 실험을 수행한 결과, 접촉 감지 및 미끄러짐 예측 기능이 없는 경우 평균 파지 성공률이 46%에 그친 반면, 해당 기능을 적용한 경우 98%까지 상승하는 것으로 나타났다.

촉각센서 활용 시 기존 대비 52% 향상된 파지 능력

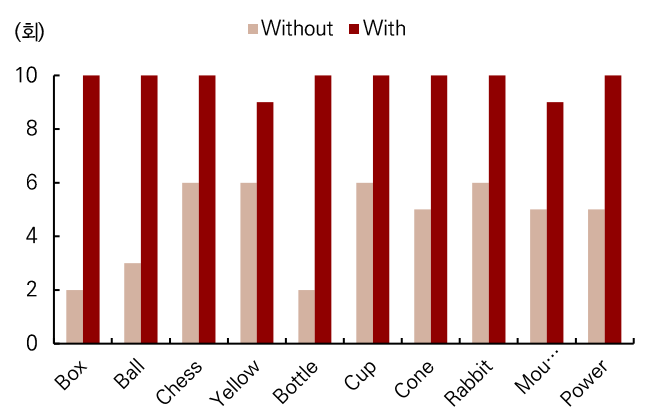
특히 Box, Ball, Bottle 등 다양한 형상의 물체에서 성공 횟수가 일관되게 증가했으며, 이는 **비정형 물체 파지 과정에서 촉각 정보가 단순 보조 센서가 아닌 핵심 제어 변수로 작용함을 시사한다.** 또한 동일 연구에서는 촉각 기반 접촉·미끄러짐 예측 알고리즘 적용 시 파지 성능이 기존 대비 52% 향상되는 결과를 보고하였다. 결국 휴머노이드의 경제적 가치는 단순 이동 능력이 아니라 다양한 물체를 인간 수준으로 안정적으로 조작할 수 있는 능력에서 발생하며, 이러한 관점에서 촉각센서는 휴머노이드 상용화를 좌우하는 핵심 부품으로 자리잡을 가능성이 높다.

그림 14. 촉각 기반 접촉·미끄러짐 감지 적용에 따른 파지 성공률



자료: Towards Learning to Detect and Predict Contact Events on Vision-based Tactile Sensors (2020), KUVIC 리서치 1팀

그림 15. 물체 형상별 파지 성공 횟수 비교



자료: Towards Learning to Detect and Predict Contact Events on Vision-based Tactile Sensors (2020), KUVIC 리서치 1팀

촉각센서가 공급 병목 될 수 있는 이유

유연성과 내구성을 동시에 만족하는 전용 소재 필요

대규모 공급망 활용
어려운 촉각센서

촉각센서는 인간 피부처럼 유연하게 변형되면서도 수백만 회 이상의 반복 접촉을 견뎌야 한다. 이를 위해서는 탄성 고분자, 압전소재, 전도성 복합소재 등 기존 전자부품에서 사용되지 않던 특수 소재가 필요하다. 문제는 이러한 소재가 스마트폰이나 자동차 전장 시장과 같은 대규모 공급망을 활용하기 어렵다는 점이다. 배터리와 모터는 EV 산업이 구축한 공급망을 활용할 수 있지만, 촉각센서는 사실상 휴머노이드 전용 시장에 가깝다. 따라서 수요가 급증할 경우 소재 공급 단계부터 병목이 발생할 가능성이 높다.

표 5. 촉각센서 핵심 소재군과 대규모 공급망 활용 가능성

소재군	대표 소재	촉각센서 내 역할	대규모 공급망 활용 가능성	병목 요인
탄성 고분자	PDMS, 실리콘 엘라스토머	유연 기판, 유전층, 응력집중구조층	제한적	의료, 소비자 실리콘과 일부 공유하나 센서급 미세구조 가공은 별도 공정
압전 고분자	PVDF, PVDF-TrFE	자기발전형 동압 감지층	낮음	분극 등 전용 공정 필요, 대량 양산 공급망 부재
무기 압전세라믹	PZT	고감도 압전 소자	낮음	취성으로 유연소자 부적합, 납 함유 규제 리스크
전도성 복합소재	CNT, 그래핀, AgNW	전도층, 압저항 감지층	낮음	분산, 코팅 균일도가 수율 좌우, 소재 규격 표준 부재
이온성 젤 / 하이드로젤	이온성 젤, 이온 하이드로젤	초고감도 정전용량형 감지층	매우 낮음	신규 소재로 장기 안정성, 양산성 미검증, 공급망 미형성

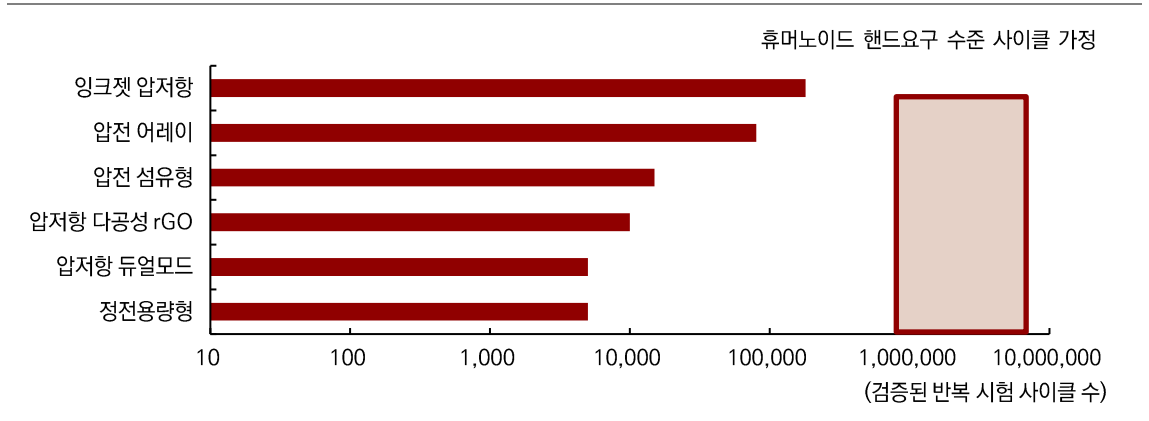
자료: Zhu et al. Soft Science, OAE Publishing, KUVIC 리서치 1팀

소재 확보 능력과
공정 안정성이
경쟁력으로 작용

특히 촉각센서에 사용되는 소재들은 EV 배터리나 스마트폰 부품처럼 이미 구축된 대규모 공급망을 활용하기 어렵다는 특징이 있다. 표에서 확인할 수 있듯이 촉각센서 구현을 위해 특화된 소재들은 범용 전자 부품 대비 수요 규모가 작고 공급업체 수가 제한적이다. 또한 균일한 감도와 내구성을 확보하기 위해 분산·코팅·적층 등 추가 공정이 요구되며 소재 규격 역시 아직 표준화 단계에 도달하지 못한 상황이다. 휴머노이드 시장이 성장하려면 센서 업체들은 단순 조립 역량보다 소재 확보 능력과 공정 안정성이 경쟁력으로 부각될 가능성이 높다.

특히 촉각센서 소재군은 공통적으로 EV·스마트폰이 구축한 Tier-1 부품 공급망과 직접 연결되지 않는다는 특징을 가진다. 특히 압전 고분자와 전도성 나노복합소재는 분극·분산·코팅 등 전용 공정에 수율이 좌우되어, 소재 단계부터 휴머노이드 전용 공급망을 새로 구축해야 한다. 더 근본적인 제약은 고민감도와 고내구성이 소재 수준에서 상충한다는 점인데 학계가 발표한 대표 프로토타입들의 검증 내구성(반복 시험 사이클)에 의하면, 대부분이 수천~수십만 회 수준에 머물러 휴머노이드 핸드 요구하는 수백만 회 이상 수준과 큰 격차를 보인다.

그림 16. 발표 촉각센서 프로토타입의 검증 내구성 vs. 휴머노이드 핸드 요구 수준



자료: KUVIC 리서치 1팀

제조공정의 표준화 미성숙 단계

표 6. 제조공정 표준화 성숙도 비교

지표	EV 배터리 셀	EV 모터	MEMS	촉각센서
표준화 수준	높음	높음	높음	낮음
자동화 수준	높음	높음	높음	낮음
소재 단순성	중간	낮음	중간	낮음
내구성 검증 체계	높음	높음	높음	낮음
양산 가능성	높음	높음	높음	낮음
공정 수 표준화	높음	높음	높음	낮음

자료: KUVIC 리서치 1팀

소재 확보 능력과 공정 안정성이 경쟁력으로 작용

촉각센서는 수천~수만 개의 압력 감지 셀을 얇고 유연한 기판 위에 집적해야 한다. 이는 반도체 공정과 플렉시블 전자공정이 결합된 형태로 제조 난이도가 매우 높다. 현재 산업 내에서는 센서 구조, 배열 방식, 인터페이스 규격에 대한 표준이 아직 확립되지 않았다. 따라서 업체별 설계가 크게 다르며 대량생산 경험도 제한적이다. 배터리 산업이 수십 년 동안 축적한 양산 노하우를 보유한 반면 촉각센서는 아직 초기 산업 단계에 머물러 있다는 점에서 향후 공급 확대 과정에서 수율과 생산능력이 주요 병목으로 작용할 가능성이 높다.

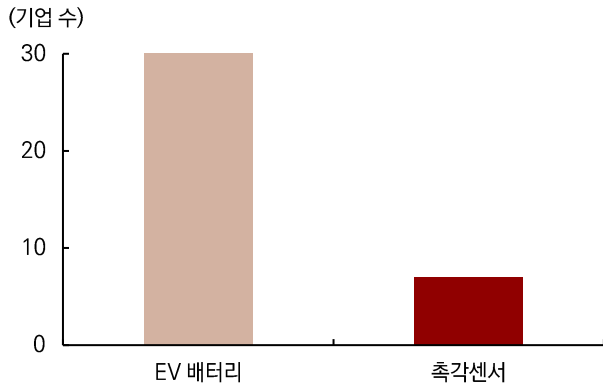
표 7. 4대 트랜스듀싱 메커니즘 비교

메커니즘	변환 원리	대표 소재	약점	양산 적합성
압저항	압력 → 저항 변화	CNT/그래핀 복합, 전도성 폴리머	신호드리프트	중간
정전용량	압력 → 정전용량 변화	PDMS 유전층 + 금속 전극	셀 간 크로스토크	중간
압전	동압 → 전하 발생	PVDF(-TrFE), PZT	정적 압력 측정 곤란	낮음
마찰전기	접촉대전 → 전하 발생	마찰 소재생(폴리머/금속)	습도 등 환경 민감, 내구성 한계	낮음

자료: KUVIC 리서치 1팀

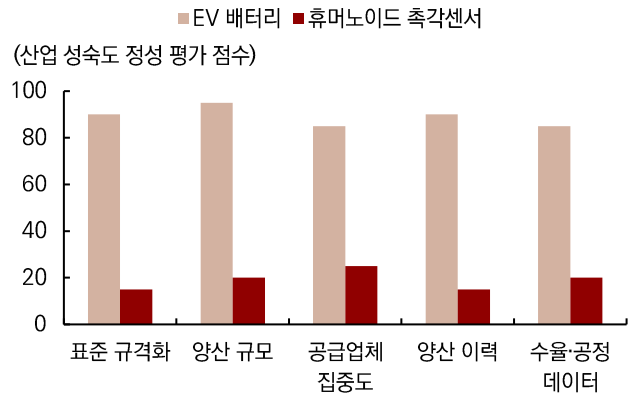
특히 리튬이온 배터리가 사실상 단일 전기화학 메커니즘과 표준 셀 포맷으로 수렴한 반면, 촉각센서는 4종의 상이한 변환 원리가 여전히 경쟁하고 있다. 어떤 방식이 표준이 될지 정해지지 않은 상태에서 업체별로 구조·배열·인터페이스가 제각각이며, 이는 곧 부품 호환성·양산 학습효과·수율 데이터 축적을 모두 지연시킨다는 한계로 인해 공급 차원에서 널리 쓰이지 못하고 있는 것이다.

그림 17. 연간 1Gwh 이상 생산 가능 기업 수 비교



자료: SNE Research, IEA, KUVIC 리서치 1팀

그림 18. 공급망 성숙도 비교-EV 배터리 vs. 휴머노이드 촉각센서



자료: IEA, KUVIC 리서치 1팀

휴머노이드 양산 경쟁 본격화

휴머노이드 양산을 위해서는 촉각센서 탑재 확대 필요

휴머노이드 산업은 현재 단순 기술 검증 단계를 넘어 실제 양산 경쟁 단계로 진입하고 있다. 그동안 업계의 핵심 경쟁력이 이동성과 시각 기반 인지에 집중됐다면, 최근에는 실제 작업 수행 능력이 차별화 요소로 부상하고 있다. 특히 제조·물류 환경에서 요구되는 비정형 물체 파지, 취급, 조립 작업은 비전 데이터만으로 한계가 존재하며, 접촉 압력·전단력·미끄러짐 등 물리적 상호작용 정보를 실시간으로 획득할 수 있는 촉각센서의 중요성이 높아지고 있다. 휴머노이드가 인간 노동을 대체하기 위해서는 결국 보는 능력보다 만지고 조작하는 능력이 중요해질 수밖에 없으며, 이는 촉각센서 탑재 확대의 구조적 배경으로 작용할 전망이다.

촉각센서 채택 확대 국면 진입

NVIDIA의 GROOT 생태계 확장

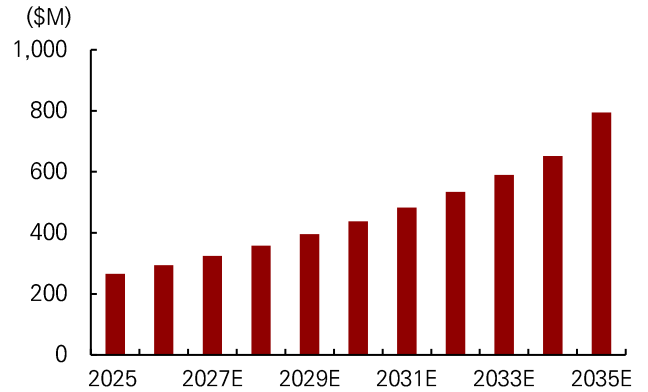
이를 보여주는 대표 사례가 NVIDIA의 GROOT 생태계 확장이다. NVIDIA는 COMPUTEX 2026에서 공개한 GROOT N1.5 및 Isaac 플랫폼을 통해 휴머노이드 학습 과정에서 촉각 데이터를 활용한 조작 성능 고도화를 강조했으며, Sharpa AI의 촉각 기반 로봇 핸드를 주요 레퍼런스 사례로 제시했다. 이는 단순 HW 소개를 넘어 엔비디아가 차세대 피지컬 AI 학습 체계에서 촉각 데이터를 핵심 입력 변수로 인식하고 있음을 의미한다. 과거 LLM 경쟁이 GPU 확보 경쟁으로 이어졌듯, 향후 피지컬 AI 경쟁은 실제 환경에서 축적되는 촉각 데이터 확보 경쟁으로 전개될 가능성이 높다. 특히 촉각 데이터는 카메라 영상과 달리 공개 데이터셋이 부족하고 센서 구조에 따라 데이터 특성이 달라지는 만큼, 센서 업체가 데이터 확보 측면에서도 높은 진입장벽을 형성할 수 있다는 점에 주목할 필요가 있다.

그림 19. 휴머노이드 로봇에 탑재된 Sharpa Wave 촉각 5지형 손



자료: NVIDIA, KUVIC 리서치 1팀

그림 20. 로봇용 유연 촉각센서의 글로벌 시장 전망



자료: Intel Market Research, KUVIC 리서치 1팀

공급, 수요 양측에서
촉각센서 중요성
동시 확대

수요 측면에서도 글로벌 OEM들의 움직임이 확인되고 있다. 현대자동차그룹 산하 BD는 차세대 Atlas를 자동차 제조 현장에 투입하기 위한 양산 프로젝트를 진행 중이며, 공식적으로 접촉 감지와 힘 제어를 핵심 기능으로 제시하고 있다. 자동차 조립 공정은 공차가 작고 부품 손상 비용이 높아 단순 비전 인식만으로는 안정적인 자동화가 어렵다. 따라서 Atlas의 상용화는 촉각 기반 조작 기술의 실질적 수요 발생을 의미한다. 엔비디아가 AI 학습 플랫폼 차원에서 촉각 기술을 채택하고, 현대차가 실제 산업 현장 투입을 전제로 촉각 기능을 요구하고 있다는 점은 공급(플랫폼)과 수요(OEM) 양측에서 촉각센서의 중요성이 동시에 확대되고 있음을 보여주는 사례로 판단된다.

표 8. GR00T 도입에 따른 로봇 AI 학습 패러다임 변화

구분	기존	GR00T
센서 체계	Vision 중심	Vision + Tactile
입력 데이터	카메라 기반	멀티모달
물체 인식 방식	위치 인식	접촉 인식
AI 학습 데이터	이미지 중심	행동 + 촉각 데이터

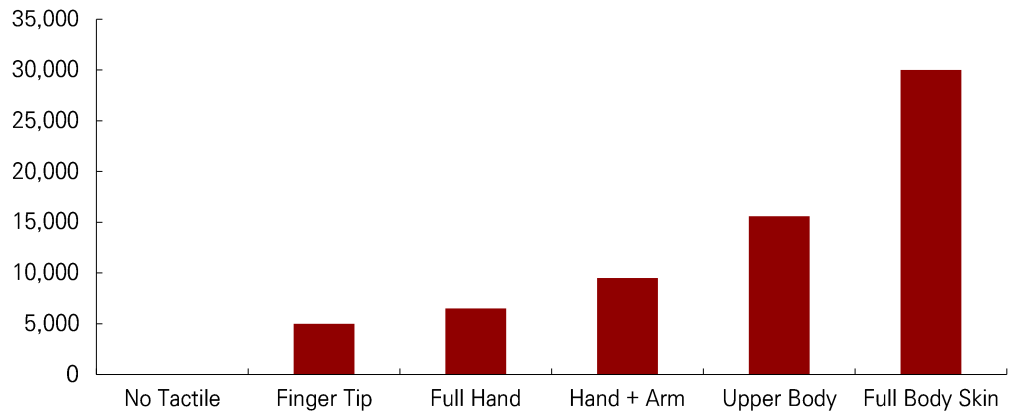
자료: NVIDIA, KUVIC 리서치 1팀

촉각센서 활용 범위
확대 전망

이러한 흐름은 향후 휴머노이드 보급 과정에서 촉각센서 탑재량이 구조적으로 증가할 가능성을 시사한다. 과거 스마트폰 산업에서도 초기에는 통화와 문자 기능이 중심이었으나, 사용자 경험 고도화와 기능 확장 과정에서 카메라가 전·후면 멀티카메라 체제로 발전하며 기기당 센서 탑재량이 지속적으로 증가했다. 휴머노이드 역시 초기에는 손끝이나 그리퍼 중심의 제한적 촉각 인식이 적용되겠지만, 산업 현장에서 보다 정교한 조작과 안전한 인간-로봇 협업이 요구될수록 손바닥, 손가락 관절부, 팔, 상체 등으로 적용 범위가 확대될 가능성이 높다.

특히 접촉 위치와 압력 분포를 정밀하게 인식하기 위해서는 센서 면적 확대뿐 아니라 센싱 채널 수 증가가 필수적이다. 결국 휴머노이드 시장의 성장 국면에서는 단순한 로봇 출하량 증가를 넘어 로봇 1대당 촉각센서 탑재 면적과 채널 수가 동시에 증가하는 방향으로 산업이 진화할 가능성이 높으며, 이는 촉각센서 업체들의 장기적인 수요 확대 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

그림 21. 휴머노이드 촉각센서 확산 - 발전 단계별 채널 수 (손끝 → 전신)



자료: KUVIC 리서치 1팀

촉각센서 기술

로봇이 촉각이라는 걸 알까?

휴머노이드 로봇이 물체를 안정적으로 조작하기 위해서는 시각 정보뿐만 아니라 접촉 상태를 실시간으로 인지하는 촉각센서가 필수적이다. 로봇 조작의 실패는 대부분 물체와 접촉한 이후에 발생한다. 물체를 향해 손을 뻗는 단계에서는 비전 센서가 중요하지만, 잡는 순간부터는 미끄러짐이나 파손을 방지하기 위한 미세한 접촉력 조절이 핵심이 된다. 특히 형태가 쉽게 변하는 비정형 물체를 다룰 때는 힘의 방향과 접촉 면적 변화를 실시간으로 감지하여 손가락 힘을 제어해야 한다. 이러한 점에서 촉각센서는 휴머노이드 로봇의 정밀 조작 능력을 결정하는 핵심 부품이자 로봇 상용화의 주요 병목 지점이다.

감지 방식에 따른 기술 구분

그림 22. 촉각센서 유형별 시장 점유율 (2026)

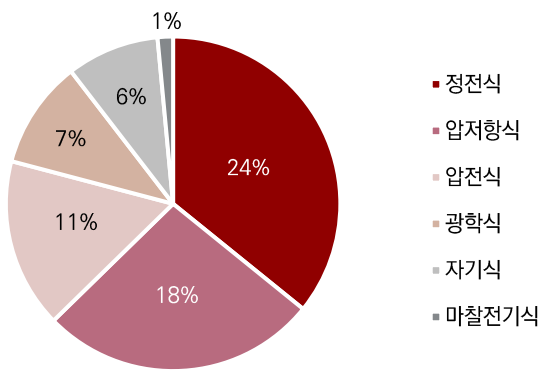
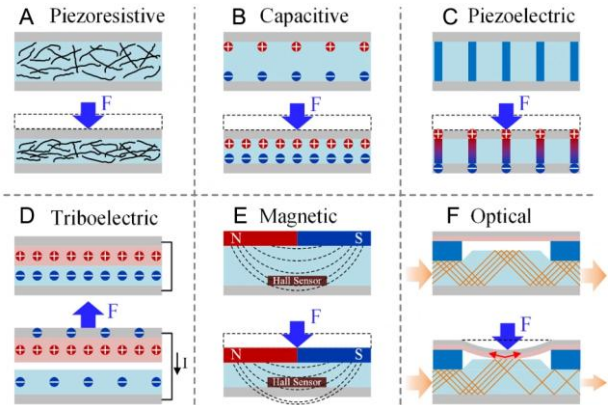


그림 23. 촉각센서 유형별 구조



자료: Fortune Business Insights, KUVIC 리서치 1팀

자료: Nano-Micro Letters, KUVIC 리서치 1팀

현재 촉각센서 기술은 감지 원리에 따라 압저항식, 정전용량식, 압전식, 마찰전기식, 자기식, 광학식 등으로 구분된다. 이들 방식은 모두 **외부 힘이나 접촉에 의해 센서 내부의 물리적 상태가 변하고, 그 변화를 전기적 또는 광학적 신호로 변환한다**는 공통점이 있다. 그러나 각 방식은 민감도, 응답속도, 내구성, 비용, 소형화 가능성, 3축 힘 감지 여부에서 서로 다른 특징이 있고, 각각의 기술이 어떤 로봇 조작 문제를 해결할 수 있고 어떤 한계를 갖는지를 구분하여 분석하였다.

표 9. 촉각센서 구분

구분	압저항식	정전용량식	자기식	광학식	압전식	마찰전기식
작동 원리	외부 힘에 의해 소재가 변형되며 전기저항이 변화	두 전극 사이 거리-유전율 변화로 정전용량이 변화	힘에 따른 자기장 변화 ·자성체 위치 변화를 감지	힘에 따른 빛의 경로, 세기, 반사 변화 등을 감지	압력이 가해질 때 전하가 발생하는 압전 효과 이용	접촉-분리 과정에서 발생하는 전하 이동을 이용
장점	단순한 구조, 높은 민감도	낮은 전력 소비, 비접촉 힘 감지 가능	높은 공간 해상도, 3차원 힘 분리	높은 공간 해상도, 빠른 응답 속도	자가발전 가능, 빠른 응답 속도, 단순한 구조	자가발전 가능, 빠른 응답 속도, 단순한 구조
단점	낮은 환경 안정성	낮은 공간 해상도, 전자기 간섭에 취약함	자기장 의존성, 신호 복잡도 높음	복잡한 광학 시스템, 높은 신호 복잡도	정적 힘 측정 불가능, 낮은 내구성	정적 힘 측정 불가능, 소재 열화 문제
응용 분야	의료용·의수산업용 그리퍼	다점 터치의료 모니터링	수중 로봇, 극한 환경 센싱	증강현실 터치, 의료용 내시경	동적 움직임 모니터링, 자가발전 센싱	웨어러블 센싱 기기, 자가발전 센싱

자료: Nano-Micro Letters, KUVIC 리서치 1팀

정전식 센서 - 표준 솔루션

전극 간 거리 변화로
변화된 정전 용량의
크기로 촉각 정보를
읽는 정전식 센서

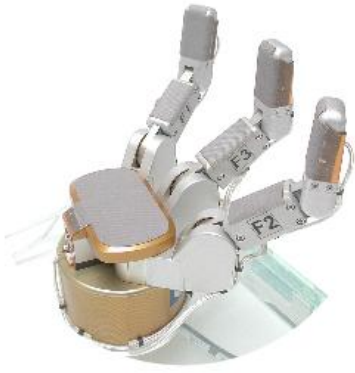
정전용량식(Capacitive) 촉각센서는 두 전극 사이의 거리, 겹치는 면적이 변하면서 정전용량이 달라지는 원리를 이용한다. 힘이 가해지면 두 전극 사이의 유전체가 눌리고, 전극 간 거리가 줄어들면서 정전용량이 증가하기 때문에 이 변화량을 측정하여 압력의 크기를 추정하는 방식이다. 정전용량식 센서는 소비 전력이 낮고 민감도가 높으며, 정적인 힘도 감지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 미세구조 설계를 통해 감도와 감지 범위를 조절할 수 있어 로봇 피부나 그리퍼 표면에 적용하기 좋은 후보 기술로 평가된다. 예를 들어 다공성 구조나 피라미드형 유전체 구조를 적용하면 작은 힘에도 민감하게 반응하는 센서를 만들 수 있다. 다만 정전용량식 센서는 주변 전자기 환경, 습도, 배선 구조의 영향을 받기 쉽다. 로봇 손처럼 모터, 회로, 케이블이 밀집한 환경에서는 노이즈 관리가 중요하며, 손 전체에 고밀도 센서를 배치할수록 신호 간섭과 배선 복잡도가 증가한다.

정전식 촉각센서의 상용화 사례로는 PPS(Pressure Profile Systems)를 들 수 있다. PPS는 정전식 촉각센서와 압력 매핑 시스템을 개발하는 기업으로, 두 전극 사이의 압축 가능한 유전체가 외부 압력에 의해 변형될 때 정전용량이 변하는 원리를 활용한다. PPS는 이 원리를 이용해 센서 패드와 배열형 센서를 제작하며 접촉면 전체의 압력 분포를 2차원 행렬 형태로 시각화할 수 있도록 하며 하드웨어와 소프트웨어가 결합된 통합 솔루션을 제공하는 B2B 대표 기업이다. 대표 제품인 RoboTouch는 로봇 그리퍼나 휴머노이드 손에 내장될 수 있는 정전식 촉각센서 기술로, 바렛 핸드(Barrett Hand)에 센서를 통합하였다. 손바닥과 손가락 마디마디에 수십 개의 정전식 센싱 엘리먼트를 덮고, 외부 노이즈를 막기 위해 손가락 끝단에 초소형 전용 프로세서(PSoC)를 달아 아날로그 신호를 깨끗한 디지털 신호로 변환해 메인 로봇 두뇌로 쏘주는 시스템 아키텍처이다.

PPS의 TactArray와 Conformable TactArray는 정전식 센서의 장점을 더 분명하게 보여준다. TactArray는 얇은 시트 형태의 압력 매핑 센서로, 최대 8,192개의 감지 요소를 구성할 수 있으며 접촉면의 압력 분포를 시각화하는 데 활용된다. Conformable TactArray는 약 1mm 두께의 유연한 센서로, 곡면이나 불규칙한 형상에도 감싸 붙일 수 있고 10Pa 수준의 낮은 압력 변화도 감지할 수 있다. 이러한 특성은 로봇 손이나 그리퍼처럼 곡면 구조를 가진 장치에 정전식 센서가 적용될 수 있음을 보여준다.

다만 정전식 센서는 주로 압력 분포와 접촉 패턴을 측정하는 데에만 강점을 가진다. 로봇이 물체를 얼마나 넓은 면적으로, 어느 정도의 압력으로 잡고 있는지는 파악할 수 있지만, 물체가 어느 방향으로 미끄러지는지, 전단력이 어떻게 작용하는지를 직접적으로 측정하는 데는 한계가 있다.

그림 24. PPS 촉각센서가 통합된 Barrett Hand



자료: PPS, KUVIC 리서치 1팀

그림 25. TactArray 압력 정전식 센서 패드



자료: PPS, KUVIC 리서치 1팀

압저항식 센서 - 가장 쉽고 가성비

저항의 감소로 인해 변화한 전류량으로 촉각 정보를 읽는 압저항식 센서

정전식 센서와 함께 현재 산업에서 가장 두드러지게 활용되는 **압저항식(Piezoresistive) 촉각센서**는 외부 힘이 가해졌을 때 전도성 소재 내부의 입자 간 거리가 변하면서 전기저항이 달라지는 원리를 이용한다. 외부에서 압력이 가해지면 유연 소재가 눌리면서 전도성 입자들이 밀착하고, 저항이 감소함에 따라 이를 촉각 정보로 읽어내는 것이다. 저항 감소량에 비례해서 전류 변화량이 얼마나 증가하는지를 실시간으로 측정해 가해진 힘의 크기와 위치를 산출한다. 일반적으로 전도성 폴리머, 탄소나노튜브, 그래핀 복합소재 등 **점탄성을 띄는 소재들**이 사용된다. 압력이 가해지면 전도성 입자들이 가까워지고 전류가 더 잘 흐르면서 저항값이 변화하여 이를 감지하는 촉각센서 방식이다.

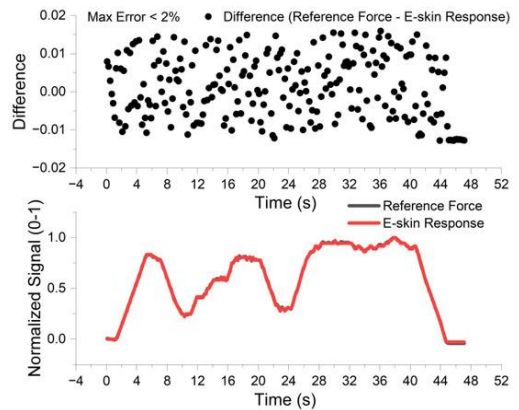
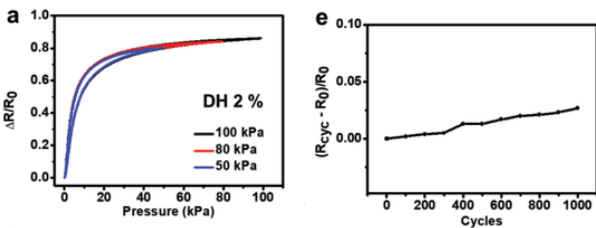
구조가 단순하고 제조 단가가 낮아 **상용화가 비교적 쉽다**는 장점이 있다. Tekscan의 FlexiForce와 같은 필름형 힘 센서는 얇고 가벼워 로봇 그리퍼, 자동화 장비, 의료용 로봇 수술 장비 등에 부착하기 용이하다. 또한 물체를 잡고 있는 동안 지속적인 압력 모니터링이 가능하기 때문에 로봇이 얼마나 세게 잡고 있는지를 파악하는 데 유용하다.

높은 출력 피로도, 낮은 구조 회복력

그러나 압저항식 센서는 **같은 힘이 가해져도 시간이 지나거나 반복 하중이 누적되면 출력값이 달라지는 드리프트 현상**이 발생한다는 문제점이 있다. 또한 힘을 주면 내부에서 고분자 사슬과 전도성 입자들이 서로 달라붙게 되는데, 힘을 주고 나서 점탄성과 내부 마찰 때문에 압력 받기 전의 **원래 구조로 바로 돌아오지 못하는 히스테리시스**가 발생한다. [그림 26] 중 a)의 X축은 가해진 압력, Y축은 저항 변화율인데 압력을 줄 때의 선과 뺄 때의 선이 완전히 포개지지 않고 미세하게 벌어져서 앞서거 같은 루프를 그리고 있는 것을 볼 수 있다. e)의 X축은 압력을 가한 횟수이고, Y축은 초기 기준점 대비 저항값의 오차 누적이다. 그래프의 선이 수평을 유지하지 못하고 1,000번을 향해 갈수록 우상향한다. 즉, 고분자 소재의 피로도가 누적되면서 아무것도 누르지 않은 영점 자체가 위로 올라가는 드리프트 현상을 확인할 수 있다.

그림 26. 히스테리시스 루프와 드리프트 현상

그림 27. 샘플링 후 동적 힘 추적의 정확성



자료: Advanced Science News, KUVIC 리서치 1팀

자료: MDPI, KUVIC 리서치 1팀

히스테리시스, 드리프트를 해결하는 혼합 주파수 시스템

이와 같이 압저항식 센서가 근본적으로 마주할 수밖에 없는 문제점들을 해결하기 위한 연구가 오랫동안 이어져오고 있으며, 최근에는 인공지능을 활용한 오차 보정이나 엣지 컴퓨팅 기반의 설계를 구축하는 연구가 발표되었다. 2026년 3월 상하이 공업대학교 Wang and Dou는 유연 **압저항식 촉각센서 배열에서 발생하는 데이터 처리 지연과 신호 표류 문제를 완화하기 위해 혼합 주파수 샘플링 시스템**을 제안하였다. 이 시스템은 34개의 압저항식 감지 지점을 가진 유연 촉각센서 배열과 FPGA 기반 실시간 데이터 수집 장치를 결합한 구조이다. 핵심은 모든 감지 지점의 데이터를 동일한 속도로 읽는 것이 아니라, 신호 변화가 빠른 채널은 높은 주파수로, 변화가 느린 채널은 낮은 주파수로 읽도록 **채널별 중요도에 따라 다른 주파수를 배정하는 것**이다.

실험 결과, 빠른 600Hz 진동 신호는 2kHz 샘플링에서 정확히 복원되었고, 느린 2Hz 파지 신호는 100Hz만으로도 충분히 측정되면서 데이터 중복을 90% 줄였다. 또한 무작위 하중 조건에서 센서 응답 값과 기준 힘 신호의 최대 오차가 2% 미만으로 나타나, 이 방식이 데이터 처리량을 줄이면서도 힘 추적 정확도를 유지할 수 있음을 보여준다. [그림 27]은 혼합 주파수 샘플링 시스템이 실제 동적 하중을 얼마나 정확하게 추적하는지를 보여준다. 아래 그래프는 무작위로 변화하는 하중 조건에서 기준 힘 신호와 전자피부 센서의 응답값을 0~1 범위로 정규화하여 비교한 것이다. 검은색 선은 실제 기준 힘이고, 빨간색 선은 촉각센서 배열이 읽어낸 응답값이다. 두 선이 거의 겹쳐 나타난다는 점은 센서 시스템이 시간에 따라 변화하는 힘을 큰 지연 없이 안정적으로 따라가고 있음을 의미한다.

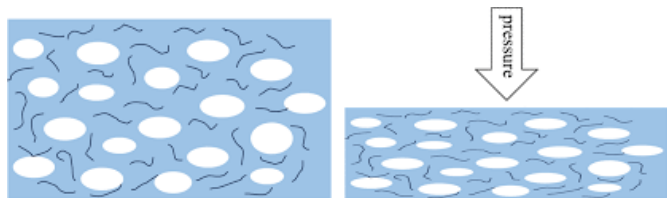
이 연구는 촉각센서의 병목을 해결하는 방향이 단순히 센서 소재를 개선하는 데만 있지 않음을 보여준다. 수많은 감지 지점에서 발생하는 데이터를 언제, 얼마나 자주 읽을 것인지 조절하는 시스템 설계만으로도 데이터 처리 지연과 신호 드리프트의 영향을 완화할 수 있다. 따라서 혼합 주파수 샘플링은 향후 휴머노이드 손처럼 수천 개의 촉각 채널을 실시간으로 처리해야 하는 시스템에서 중요한 설계 방향을 제시한다는 의의가 있다.

다공성 구조,
S/W 오차 보정으로
한계점 보완

이 외에도 엘라스토머가 가진 점탄성의 한계를 극복하기 위해 내부에 미세한 공기 구멍이 가득한 **다공성 구조**를 도입하거나, **딥러닝·인공지능을 활용한 소프트웨어적 오차 보정 시스템**을 개발하고 있다. 따라서 압전저항식 센서 시장은 저렴한 가격을 유지하며 양산성을 확보함과 동시에 물리적인 오차를 상쇄시키는 방향으로 진화해 나갈 전망이다.

그림 28. 다공성 구조를 가진 압저항 소자

그림 29. Tekscan의 FlexiForce 센서



자료: Journal of Sensor Science and Technology, KUVIC 리서치 1팀

자료: Tekscan, KUVIC 리서치 1팀

광학식 센서 - 정밀한 하이엔드

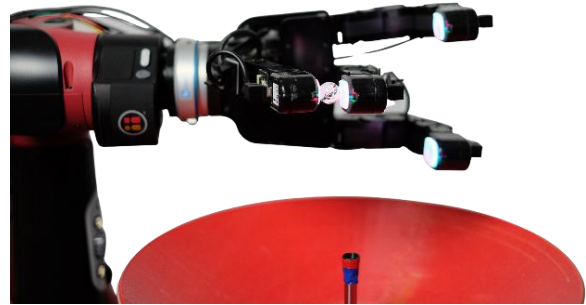
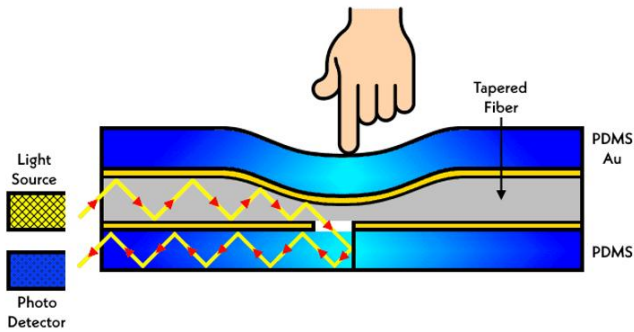
카메라로 이미지
변화를 읽는
광학식 센서

광학식(Optical) 촉각센서는 외부 힘이 가해졌을 때 빛의 경로, 세기, 반사 패턴 또는 이미지가 변하는 것을 이용해 접촉 정보를 읽는다. 대표적인 형태는 **카메라 기반 촉각센서**로, 부드러운 젤 또는 엘라스토머 표면이 물체와 접촉해 변형되면 내부 카메라와 조명이 그 변형을 촬영하고 이를 통해 접촉 위치, 접촉 면적, 표면 형상, 질감, 3차원 깊이 정보를 추정한다. 그렇기 때문에 **어떤 형태로 눌렀는지와 물체 표면이 어떻게 생겼는가까지 이미지 형태로 파악**할 수 있다는 점에서 타 방식의 촉각센서들과 차별화된다.

GelSight 센서는 MIT에서 파생된 기술로, 투명한 탄성체 표면에 내부 조명과 카메라를 결합한 구조다. 물체가 센서 표면을 누르면 탄성체가 물체의 표면 형상에 맞게 변형되고, 카메라는 그 변형된 표면을 이미지로 촬영한다. 이후 영상 처리 알고리즘을 통해 3차원 표면 형상, 접촉 위치, 힘, 미끄러짐 등의 정보를 추정한다. 로봇 그리퍼 끝단에 평면 형태로 센서를 장착하여 고해상도 3D 표면 매핑에 탁월하다.

그림 30. 광학식 촉각센서 구조

그림 31. GelSight의 3D 촉각센서



자료: Electrical Technology, KUVIC 리서치 1팀

자료: GelSight, KUVIC 리서치 1팀

비싸고 두꺼워서
로봇 손 상용화는
어려운 상황

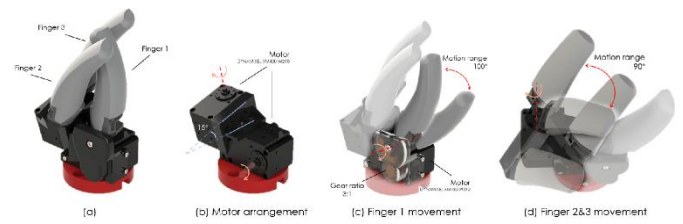
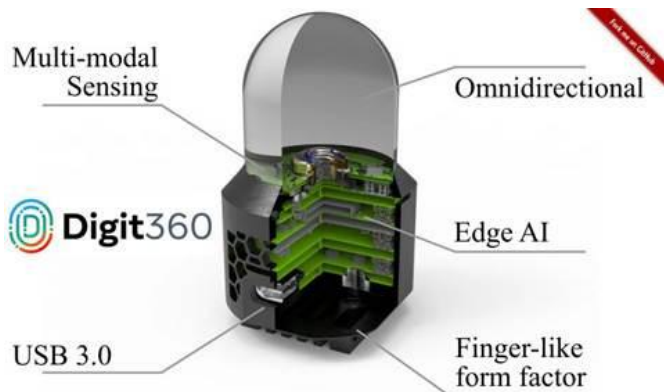
광학식 센서는 이러한 패턴을 이미지로 읽어낼 수 있기 때문에, 압력값 하나만 제공하는 단순 센서보다 더 풍부한 촉각 정보를 제공한다. 그러나 광학식 촉각센서는 여전히 한계가 분명하다. 가장 큰 문제는 구조가 복잡하다는 점이다. **카메라, 조명, 젤, 반사층, 하우징이 필요하기 때문에 센서가 두꺼워져 압저항식이나 정전식 센서처럼 얇은 필름 형태로 손 전체에 붙이기 어렵다.** 또한 촉각 정보가 이미지 형태로 나오기 때문에 데이터 처리량이 크고, 실시간 조작에 적용하려면 영상 처리 및 인공지능 알고리즘이 필요하다. 젤 표면의 오염이나 마모, 조명 조건의 안정성, 센서 캘리브레이션 역시 실제 로봇 적용에서 고려해야 할 문제이다. 따라서 광학식 촉각센서는 정밀 조작형 센서로서 매우 높은 가능성을 가지지만, **로봇 손 전체에 적용하기에는 아직 통합 난이도가 높다.** GelSight Svelte와 GelSight360은 손가락 크기의 단일 카메라 센서로 넓은 커버리지와 곡면 통합 문제를 해결하려는 연구 방향을 보여준다. 센서 성능 자체는 매우 높지만, 이를 휴머노이드 로봇 손 전체에 저비용·고내구·실시간 처리 가능한 형태로 통합하는 것은 여전히 어려운 과제로 남아 있다.

실시간 영상 처리와
표준화된 해석 체계
필요

광학식 센서의 현재 한계점은 다음과 같다. 첫째, **실시간 영상 처리 부담이 크다.** 광학식 센서는 출력이 단순 전압값이 아니라 이미지 데이터이기 때문에 접촉 정보를 얻으려면 영상 처리나 인공지능 모델이 필요하다. 2025년 arXiv의 비전 기반 촉각센서 리뷰에서는 이러한 센서가 카메라 모듈과 조명 모듈을 통해 촉각 이미지를 생성하며, **센서마다 감지 원리와 해석 방식이 달라 표준화된 비교와 해석이 어렵다**는 점을 주요 과제로 정리했다. 둘째, **조명 설계와 이미지 품질 문제가 있다.** 광학식 센서의 성능은 내부 조명, 반사층, 젤 소재, 카메라 배치에 크게 영향을 받고, 조명 조건이나 젤 표면 상태에 따라 재구성 정확도가 달라질 수 있다.

그림 32. Digit 360 구조

그림 33. GelSight Svelte Hand



자료: GelSight, KUVIC 리서치 1팀

자료: GelSight, KUVIC 리서치 1팀

이러한 한계를 해결하기 위해 최근에는 센서 구조를 확장하거나 광학 설계를 개선하는 연구가 진행되고 있다. GelSight Svelte는 하나의 카메라와 곡면 거울을 이용해 인간 손가락 길이에 가까운 넓은 감지 영역을 확보한 사례로, 손끝 중심 촉각센서의 한계를 보완하려는 시도이다. 메타시와 함께 개발한 GelSight360은 손끝과 유사한 전방위 곡면 구조를 사용해 여러 방향에서 발생하는 접촉을 감지하고 3차원 깊이 지도를 생성할 수 있도록 설계되었다. 또한 GelLight 연구는 카메라 기반 촉각센서의 이미지 품질과 3차원 복원 정확도가 내부 조명 설계에 크게 좌우된다는 점에 주목해 조명 모델링과 최적화 방법을 제안하였다. 이처럼 광학식 촉각센서의 최근 연구개발은 넓은 커버리지, 곡면 통합, 이미지 품질 안정화, 실시간 해석 가능성을 확보하는 방향으로 진행되고 있다.

자기식 센서 - XYZ 세 방향 다 감지한다

3축의 힘을 모두 측정하여 엄밀한 촉각 분석 가능

자기식(Magnetic) 촉각센서는 힘이 가해졌을 때 자석 또는 자성체의 위치가 변하고, 이로 인해 달라지는 자기장 분포를 감지한다. 일반적으로 유연한 탄성체 안에 작은 자석을 넣고, 그 아래에 홀 효과(Hall effect) 센서나 3축 자기장 센서를 배치한다. 이 원리를 이용하면 수직 방향 힘뿐 아니라 X축과 Y축 방향의 전단력까지 측정할 수 있다. 홀 효과는 물질에 전류가 흐르고 있을 때 그 주변에 자기장(자석)을 가까이 가져가면 전자의 흐름이 한쪽으로 쏠리면서 전압이 발생하는 물리적 현상이다. 이 현상을 이용해 만든 아주 작은 반도체 칩을 홀 센서(Hall Sensor)라고 한다.

대표 사례는 XELA Robotics의 uSkin이다. uSkin은 유연 탄성체 내부의 변형을 자기장 변화로 읽어내는 3축 촉각센서이다. 각 감지 지점이 수직력과 전단력을 동시에 측정할 수 있도록 설계되어 있어서 힘이 어느 방향으로 작용하는지까지 파악할 수 있다. 이는 물체가 손안에서 어느 방향으로 미끄러지거나 회전하는지도 감지할 수 있다. XELA uSkin의 LEAP Hand에는 손 하나에 18개 모듈과 총 368개의 감지점이 들어가는 구조가 제시되어 있다. 이를 양손에 적용하면 휴머노이드 1대당 736개의 촉각 감지점이 필요하다.

자기장 신호의 왜곡과 높은 가격의 문제

로봇 손과 관절에는 구동 모터가 존재하는데, 모터가 돌아갈 때 발생하는 외부 자기장이 센서 내부 자석의 미세한 자기장 신호를 덮어버려 데이터를 무용지물로 만든다. LEAP Hand처럼 고해상도를 구현하기 위해 좁은 면적에 수백 개의 자석을 배치하면, 인접한 자석들끼리 서로의 자기장 영역을 침범한다. 이로 인해 하나의 홀 센서가 옆 자석의 움직임까지 읽어버려 X, Y, Z축 힘을 분리해내기가 어려워진다. 또한 고밀도 3축 촉각센서는 일반 압력센서보다 단가가 높기 때문에, 로봇 손 전체에 적용할 경우 비용 부담이 커질 수밖에 없다.

그림 34. 자기식 촉각센서 구조

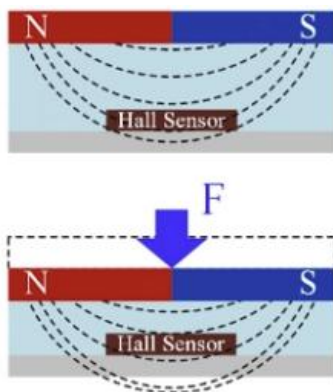


그림 35. LEAP Hand의 구동 방식



자료: Nano-Micro Letters, KUVIC 리서치 1팀

자료: XELA Robotics, KUVIC 리서치 1팀

올해 1월 미국화학회에 게시된 바에 의하면, 이 문제를 해결하기 위해 유연 자성 필름의 한쪽 면에 여러 N극과 S극 패턴을 프로그래밍하는 단면 다극 자화 전략을 제안했다. 이 방식은 **접촉 위치마다 서로 다른 자기장 변화가 나타나도록 설계해, 센서가 압력 위치와 접촉 변화를 더 잘 구분할 수 있게 한다.** 즉, 자기식 센서의 핵심 문제인 **신호 간섭과 위치 구분 한계를 자성 필름의 구조 설계로 완화한 연구**라고 볼 수 있다. 다만 다극 자화 패턴을 로봇 손 전체에 대량 적용할 수 있는지, 반복 변형 후에도 자기장 패턴이 안정적으로 유지되는지, 외부 자기장 환경에서 신호가 얼마나 안정적인지는 추가 검증이 필요하다. 이는 **자기장 패턴을 프로그래밍해 감지 위치와 신호를 구조적으로 분리하는 방식**으로 해결하려 한 것에 의의가 있다.

이처럼 각 촉각센서 방식은 서로 다른 trade-off를 가진다. 압저항식은 저렴하고 구현이 쉽지만 드리프트와 내구성 문제가 있고, 정전용량식은 민감도와 저전력 측면에서 유리하지만 습도와 노이즈에 취약하다. 압전식은 빠른 응답속도를 가지지만 정적 압력 측정에 약하고, 자기식은 3축 힘 감지에 강하지만 자석·자기장 간섭과 비용 문제가 있다. 광학식은 고해상도 3D 촉각 이미지를 제공하지만 구조가 복잡하고 손 전체 통합이 어렵다. 따라서 **현재 촉각센서 산업의 핵심 문제는 어떤 기술이 가장 우수한지가 아니라, 로봇 손에 필요한 여러 조건을 동시에 만족하는 기술이 아직 부족하다**는 데 있다.

촉각센서의 기술 층위

정밀 조작형과 안전·계측형

앞서 살펴본 압저항식, 정전식, 광학식, 자기식 촉각센서는 각각 작동 원리와 장단점이 다르지만, **로봇 산업에서의 역할을 기준으로 보면 크게 두 가지 층위로 구분할 수 있다.** 하나는 로봇이 인간 손처럼 물체를 섬세하게 조작하기 위한 정밀 조작형 센서이고, 다른 하나는 넓은 면적에서 접촉 유무나 압력 분포를 확인하기 위한 안전·계측형 센서이다. 이러한 구분은 단순히 센서 픽셀 수나 감지점 수를 기준으로 한 분류보다 더 적절하다. 비전 기반 광학식 센서의 카메라 픽셀과 압력 배열 센서의 taxel은 같은 단위로 비교하기 어렵기 때문이다. 따라서 센서가 실제로 어떤 정보를 감지하고, 로봇 조작에서 어떤 역할을 수행하는지를 기준으로 촉각센서 기술을 층위화하였다.

표 10. 기술별 Tier 구분 표

구분	Tier 1: 정밀 조작형	Tier 2: 안전·계측형
목적	손가락 접촉점에서 3D 힘, 미끄러짐, 질감을 동시에 측정하여 섬세한 파지와 조작을 수행	넓은 면적에서 접촉 유무, 압력 분포, 충격을 감지하고 공정 계측 및 안전 제어를 수행
측정 축	3축 이상	1축 중심
측정 정보	X/Y/Z 방향 힘, 전단력, 미끄러짐, 질감, 표면 형상	수직 압력, 압력 분포, 접촉 여부, 충격
커버리지	주로 손가락 끝 중심, 일부 손 전체 확장	손바닥, 팔, 전신 등 대면적 적용 가능
핵심 기능	미끄럼 방향 감지, 질감 재현, 정밀 파지	압력 분포 맵, 충격 감지, 안전 모니터링
대표 기술	자기식 3축 센서, 광학식 촉각센서, 다차원 촉각센서	압저항식 압력 매핑, 정전식 압력 매핑, 단순 force sensor
대표 기업	XELA, PaXini, GelSight	Tekscan, Unitree Dex 기본형, PP

자료: 산업 자료, KUVIC 리서치 1팀

정밀 조작형 센서:
섬세한 파지의
고차원 촉각센서

Tier 1에 해당하는 **정밀 조작형 센서는 로봇 손의 섬세한 파지를 가능하게 하는 고차원 촉각센서**이다. 수직 방향 압력뿐 아니라 X축과 Y축 방향의 전단력, 미끄러짐, 접촉 위치 변화, 질감, 3차원 표면 형상까지 파악하는 것을 목표로 한다. **XELA의 자기식 3축 촉각센서, PaXini의 다차원 촉각센서, GelSight의 광학식 촉각센서**가 이 층위에 해당한다. 이들은 로봇이 형태와 강도가 다른 물체를 안정적으로 잡고 조작하는 데 필요한 정보를 제공한다. 특히 물체가 손안에서 미끄러지거나 회전하는 상황을 감지하려면 단순 수직 압력보다 전단력과 접촉 패턴 변화가 중요하기 때문에, Tier 1 센서는 **휴머노이드 로봇의 정밀 조작 능력을 좌우하는 핵심 기술**로 볼 수 있다.

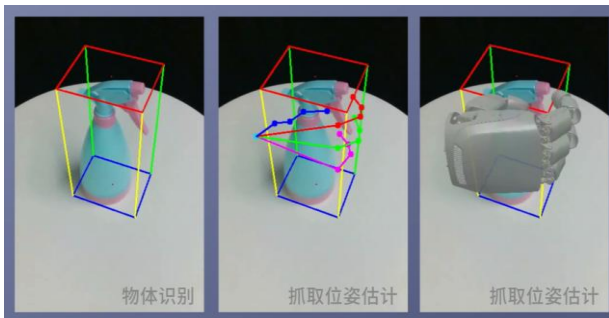
안전계측형 센서:
넓은 면적의 압력
인지하는 촉각센서

Tier 2에 해당하는 안전-계측형 센서는 넓은 면적에서 압력 분포, 접촉 유무, 충격, 하중을 안정적으로 측정하는 데 초점을 둔다. Tekscan, PPS, Unitree Dex 기본형 센서가 여기에 해당한다. 이러한 센서들은 로봇이 물체와 접촉했는지, 어느 부위에 압력이 집중되는지, 충격이 발생했는지 등을 파악하는 데 유용하다. 특히 산업용 그리퍼, 의료기기, 공정 계측, 안전 모니터링처럼 **압력 분포를 넓은 면적으로 확인해야 하는 분야**에서 활용 가치가 높다. 다만 이 층위의 센서는 주로 1축 수직 압력 측정에 기반하기 때문에, 물체의 미끄러짐 방향, 질감, 접촉면의 미세한 형상 변화를 감지하는 데는 한계가 있다. 따라서 Tier 2 센서는 로봇의 안전성과 계측 정확도를 높이는 데는 적합하지만, 인간 손과 같은 정밀 조작 능력을 구현하기에는 부족하다.

Unitree Dex3-1은 안전-계측형 촉각센서의 대표적인 상용 사례로 볼 수 있다. 손끝과 손바닥에 촉각센서를 배치해 로봇이 물체와 접촉했는지, 어느 정도의 압력이 가해졌는지를 파악할 수 있도록 한다. 그러나 총 33개의 압력센서 중심 구조이기 때문에, XELANa PaXini처럼 3축 힘과 미끄러짐 방향을 고해상도로 감지하는 정밀 조작형 센서와는 차이가 있다. 따라서 Dex3-1은 촉각센서가 보급형 로봇 손에 적용되는 초기 사례이면서도, 인간 손 수준의 고차원 촉각 정보에는 아직 도달하지 못했음을 보여준다.

그림 36. PaXini DexH13 다차원 촉각 감지

그림 37. Unitree DEX3-1 압력 센서



자료: PaXini, KUVIC 리서치 1팀

자료: XELA Robotics, KUVIC 리서치 1팀

이러한 층위 구분은 로봇 촉각센서가 왜 병목인지도 잘 보여준다. **현재 시장에는 이미 다양한 압력센서와 압력 매핑 솔루션이 존재하지만, 이들 상당수는 Tier 2에 가까운 안전-계측형 기술이다.** 즉, 로봇이 물체와 접촉했는지, 어느 정도의 압력이 가해졌는지는 확인할 수 있지만, 물체가 미끄러지는 방향이나 손안에서의 회전, 표면 질감까지 실시간으로 이해하기는 어렵다. 반대로 Tier 1 센서는 정밀 조작에 필요한 정보를 제공할 수 있지만, 고비용, 높은 데이터 처리량, 손 전체 통합 난이도, 내구성, 보정 문제를 안고 있다. 결국 **촉각센서 산업의 핵심 병목은 Tier 1 수준의 고차원 촉각 정보를 로봇 손 전체에 안정적이고 경제적으로 구현할 수 있는가에 있다.**

따라서 로봇 촉각센서 기술을 평가할 때는 무엇을 감지할 수 있는지가 중요하다. 1,000개의 수직 압력 감지점이 있더라도 전단력과 미끄러짐을 감지하지 못한다면 정밀 조작에는 한계가 있다. 반대로 감지점 수가 상대적으로 적더라도 3축 힘과 접촉 패턴을 안정적으로 읽을 수 있다면 로봇 파지 제어에는 더 큰 가치를 가질 수 있다. 이 때문에 향후 휴머노이드 로봇 시장에서는 Tier 2의 대면적 안전-계측형 센서와 Tier 1의 정밀 조작형 센서가 서로 다른 역할을 하면서 발전할 가능성이 크다. **단기적으로는 비용과 적용성이 높은 Tier 2 센서가 산업 현장과 보급형 로봇에 먼저 확산되고, 장기적으로는 Tier 1 센서가 휴머노이드 로봇의 정밀 조작 능력을 결정하는 핵심 부품으로 부상할 것으로 예상된다.**

산업 전망

'진짜' 휴머노이드가 되기 위한 최종 관문

나야, 촉각센서

촉각센서 없이는 소프트웨어 병목을 해결할 수 없다

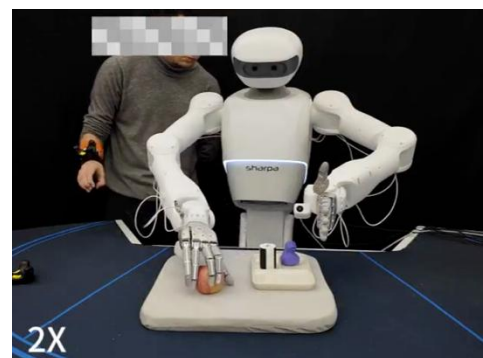
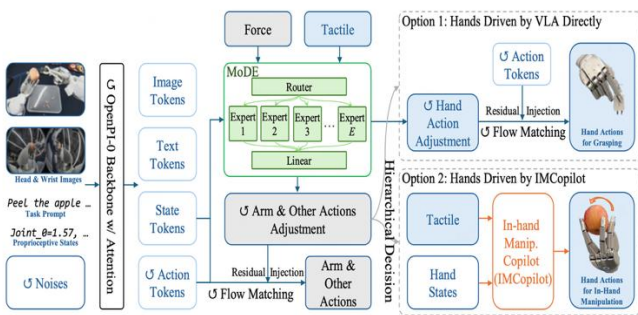
2026년은 휴머노이드 로봇 상업화의 원년이 될 것으로 전망된다. VLA(Vision-Language-Action) 모델의 등장으로 소프트웨어 병목은 해결되고 있는 것으로 보인다. 그러나 VLA가 정교한 명령을 이행하려면 촉각 피드백은 필수이다. 결국 상업화 속도를 결정짓는 것은 하드웨어로, 하드웨어는 부품별로 병목이 일어나는 이유가 제각각이다. 감속기의 경우 공급이 부족한 병목이라면, 촉각센서는 기술 자체가 아직 해결되지 않아서 발생하는 병목이다.

촉각센서 병목은 휴머노이드가 한 단계 더 발전하기 위해 반드시 해결되어야 할 문제이다. 예컨대 물류 창고 피킹 작업은 일정한 형태의 박스를 정해진 동선으로 나르는 작업으로, 카메라만으로도 구현이 가능하다. 그러나 식품 핸들링, 전자부품 조립과 같은 작업은 더 미세한 컨트롤이 요구된다. 이러한 작업은 식품의 형태를 보존해야 하거나, 매우 얇은 커넥터를 정확히 꽃아야 하는 등의 섬세한 작업이다. 해당 작업들의 공통점은 물체가 미끄러지기 직전의 순간을 감지하고 매우 짧은 속도 안에 힘을 조절해야 한다는 것이다. 카메라는 물체가 이미 손에서 빠져나간 후에야 이를 인식할 수 있다. 사람이 눈을 감고도 달걀을 깨지 않고 잡을 수 있는 이유는 손끝의 촉각 덕분이듯이, 휴머노이드 로봇의 손에도 같은 원리가 필요하다. VLA가 아무리 정교한 명령을 수행하더라도, 촉각센서의 피드백 없이는 물체를 어떻게 잡고 있는지 알 수 없다.

또한 특정 기업의 센서로 AI 신경망을 한번 훈련시키면, 추후 센서 교체 시 처음부터 재학습해야 하므로 초기 기술력을 선점하는 기업이 시장 경쟁력을 가질 수 있다. 그렇기 때문에 촉각센서 병목에 지금부터 주목하고, 어떤 기업이 기술력을 선점할지 관심을 가질 필요가 있다.

그림 38. VLA의 한계를 극복하기 위한 촉각센서 기술

그림 39. SharpaWave의 훈련 모습



자료: Sharpa, KUVIC 리서치 1팀

자료: Sharpa, KUVIC 리서치 1팀

촉각센서 TAM

본 리서치 팀은 글로벌 로봇 기업 12개 사의 로봇 손 제품 유형과 기술력을 바탕으로 TAM을 추정하였다. 로봇 손 전체에 촉각센서가 탑재되는 유형과 로봇 손 일부(손가락 끝 등)에만 촉각센서가 탑재되는 유형을 구분하였고, 이를 고려하여 로봇 손 한 개에 촉각센서가 얼마나 들어가는지를 추정하였다. 손 전체에 촉각센서가 탑재되는 유형은 손바닥과 전체 손가락을 고밀도로 커버하는 방식이고, 손 일부에 탑재되는 유형은 손가락 끝 접촉 포인트 위주로 최소한으로 탑재되는 방식이다. 로봇 손 제작사의 제품별 특성을 고려하였으며, Boston Dynamics, Tesla와 같이 내재화되어 있는 기업의 경우 외부 기업이 침투하기 어렵다고 판단하여 최종 TAM 추정에서는 제외하였다. 본 리포트의 TAM 추정은 외부 공급사가 실질적으로 공략 가능한 시장을 대상으로 산출한 것이다.

표 11. 기업별 탑재 로봇 손 유형 및 공급 형태

기업	국가	생산 유형	공급형태
Sharpa	싱가포르	손 전체	외부 조달
샤오핑	중국	손 전체	내재화
Boston Dynamics	한국	손 일부	내재화
Tesla	미국	손 일부	내재화(일부 외부 조달)
Figure AI	미국	손 일부	외부 조달
Agility Robotics	미국	손 일부	외부 조달
Apprtronik	미국	손 일부	외부 조달
UBTECH	중국	손 일부	내재화
AgiBot	중국	손 일부	내재화
Unitree	중국	손 일부	내재화
1X Technologies	노르웨이	손 일부	외부 조달
Sanctuary AI	캐나다	손 일부	외부 조달

자료: 각 사, KUVIC 리서치 1팀

Q 추정

2025년까지의 글로벌 휴머노이드 시장은 중국 기업이 주도했다. Unitree가 5,500대, AgiBot이 5,100대로 상위권을 차지했다. 미국 기업인 Tesla는 수백 대 규모, Figure AI는 약 500대로 아직 파일럿 단계이다. 출하 대수만큼 중요한 것은 탑재율이다. 중국 로봇 완성사는 대부분 저가 모델 위주로 촉각센서가 탑재된 비율이 낮다. Unitree의 경우 저가형 G1에는 촉각센서가 탑재되지 않고, 고사양인 H2+에만 촉각센서가 탑재되고 있다. AgiBot 역시 저가 대량생산 전략을 공식화하고 있어, 촉각센서 탑재율을 할인하여 보수적으로 추정했다. 이처럼 기업의 전략과 제품 라인 특성을 고려하여 기업별 탑재율 할인/할증값을 산출하였다.

반면 Sharpa는 촉각센서가 탑재된 텍스처러스 핸드 자체를 생산하므로 탑재율이 100%이며, Figure AI는 일부 모델이 그리퍼형으로 출하되는 점을 감안하여 할인된 80%를 적용하였다. 이처럼 기업별로 제품 구성과 판매 전략이 다른 점을 고려하여 단순 출하 대수가 아닌 탑재율을 반영한 유효 수요 기준으로 시장 규모를 산출하였다.

표 12. 로봇 손 촉각센서 탑재 출하 대수 추정

기업	2025	2026E	2027E	2028E	2029E
Sharpa	500	2,000	6,000	15,000	35,000
샤오핑			내재화		
Boston Dynamics			내재화		
Tesla			내재화		
Figure AI	240	2,400	8,000	20,000	40,000
Agility Robotics	140	560	2,100	4,900	8,400
Appttronik	80	320	1,600	4,800	11,200
UBTECH			내재화		
AgiBot			내재화		
Unitree			내재화		
1X Technologies	45	450	2,700	9,000	19,800
Sanctuary AI	90	450	1,800	5,400	10,800

자료: KUVIC 리서치 1팀

P 추정

촉각센서 공급사 대부분이 비상장사로 단가에 대한 정보가 불충분하다. 그러나 Sharpa SharpaWave의 공개된 단가를 기반으로 ASP를 추정하였다. Sharpa의 로봇 손은 텍스처러스 핸드 완제품 가격으로, 액추에이터, 구조, 제어, 촉각센서 등이 모두 포함된 가격이다. 한 손 기준 \$50,000로 공개되어 있다. 이에 완제품 로봇 손 내 촉각센서의 원가 비율을 추정하여 단가를 산출하였다. 텍스처러스 핸드 완제품의 주요 원가 구성은 액추에이터가 약 55~60%, 구조·케이블이 약 15%, 제어 모듈이 약 10%로 촉각센서는 15% 내외로 추정된다. 이를 적용하면 한 손 기준 촉각센서 단가는 \$7,500 달러가 도출된다. 이는 손 전체를 고밀도로 커버하는 경우의 단가이다.

손 일부에만 탑재하는 경우는 별도의 역산 방법을 활용하였다. Sharpa 양손 ASP \$15,000을 Unitree Dex5 기준 양손 탑재 센서 수인 188개로 나누어 센서 개당 단가를 \$80으로 산출하였다. 손 일부 탑재 유형의 경우 손가락 끝에 5개씩 탑재된다고 가정하였고, 양손 25개로 추정하여 \$2,000의 ASP를 도출하였다.

표 13. 기업별 P 추정 (단위: 달러)

기업	공급형태	2025	2026E	2027E	2028E	2029E
Sharpa	외부 조달	15,000	12,900	11,094	9,541	8,205
샤오핑	외부 조달					
Boston Dynamics	내재화					
Tesla	내재화					
Figure AI	외부 조달	2,000	1,720	1,479	1,272	1,094
Agility Robotics	외부 조달	1,700	1,462	1,257	1,081	930
Appttronik	외부 조달	2,000	1,720	1,479	1,272	1,094
UBTECH	내재화					
AgiBot	내재화					
Unitree	내재화					
1X Technologies	외부 조달	2,000	1,720	1,479	1,272	1,094
Sanctuary AI	외부 조달	2,000	1,720	1,479	1,272	1,094

자료: KUVIC 리서치 1팀 추정

이를 기반으로 기업별 특성을 고려하여 ASP를 세부적으로 조정하였다. Agility Robotics의 경우 물류에 특화된 단순 구조로 탑재 센서수가 적어 할인된 \$1,500을 적용, 저가 대량생산 전략을 공식화한 AgiBot과 Unitree 역시 할인된 \$1,000을 적용하였다. 이에 더하여 기술의 발달에 따른 학습 효과를 고려하였다. 학습 효과는 휴머노이드 전체 BOM의 연평균 하락률인 -14%/yr를 동일하게 적용하였다.

표 14. 촉각센서 TAM

(단위: 백만 달러)	2025	2026E	2027E	2028E	2029E
TAM	9	33	90	198	384

자료: KUVIC 리서치 1팀 추정

커져가는 시장에 도사리고 있는 리스크

본 리서치 팀의 추정에 따르면, 로봇 손 촉각센서 TAM은 25년 \$9M에서 2029년 \$384M까지 폭발적으로 성장할 것으로 전망된다. 아직 시장이 제대로 형성되어 있지 않은 만큼, 이후 기술이 상용화되기 시작한다면 높은 성장성을 지니고 있는 시장으로 볼 수 있다. 그러나 이 시장이 온전히 외부 공급사의 몫이 될지는 지켜봐야 한다. 향후 시장의 성장성에 크게 영향을 미칠 수 있는 핵심 변수는 완성사의 수직 통합 속도와 기술 표준 확립 여부이다.

Tesla는 촉각센서 내재화를 추진하고, Unitree가 Dex5를 자체 개발하는 것에서 볼 수 있듯이 완성사의 수직 통합은 계속되고 있다. 선도 기업들의 내재화가 심화될수록 외부 공급사의 시장 파이는 작아질 것이다. 특정 센서 모델의 훈련이 락인 효과를 가지고 있지만, 이것이 되려 완성사가 내재화하는 경우 넘을 수 없는 벽이 될 수 있다.

기술 표준 역시 확립되지 않았다. 저항식·정전용량식·광학식·자기식 등 다양한 방식이 공존하는 상황으로, 이러한 상황에서 안정적인 시장 지위를 확보하는 것은 매우 어려운 과제이다. 이와 더불어 상용화가 지연될 수도 있음에 유의해야 한다. 현재 공개되고 있는 로봇 영상의 상당수는 통제된 환경에서 촬영된 데모 영상이다. 또한 휴머노이드 로봇의 경우 200~500시간마다 유지 보수가 필요하다는 점에서 산업 현장에 즉각적으로 투입되어 활약하기는 어려울 수 있다. 상용화가 지연될수록 촉각센서 시장의 활성화 역시 지체될 것이다.

결국 해당 시장은 기술 선점과 상용화라는 산업 전체의 측면에서 불확실성을 가지고 있다. 그럼에도 이 경쟁에서 살아남는 기업은 성장하는 시장의 수혜를 누구보다 크게 누릴 수 있을 것이다.

COMPANY ANALYSIS

—
Not
Rated

로보티즈 (108490)

로봇 손 장인입니다

빅테크는 이미 알아본 로봇 손 장인

동사가 26년 1월 출시한 HX5-D20은 출시 전부터 Apple, Google 등 글로벌 빅테크 기업이 이미 선주문을 넣을 정도로 우수한 기술력을 탑재하고 있다. 해당 모델은 다섯 개의 손가락 끝에 각각 9개의 고감도 촉각센서를 내장하고 있는 것으로, 글로벌 피지컬 AI 시장에서 동사의 로봇 손이 우수한 지위를 확보하고 있음을 보여준다. 기존의 로봇 손과 달리 독자 개발한 초소형 핑거 액추에이터를 통해 촉각센서와 전류 제어 기반 힘 조절을 통합하여 시각 정보 없이도 작업을 수행할 수 있는 모델이다. 또한 동사의 제품은 부품의 90% 이상을 내재화하여 한 손 기준 800만원 수준으로, 타 제품 대비 70% 이상 저렴하다. 기술 우위와 가격 경쟁력을 바탕으로 동사는 로봇 손 시장의 강자로 자리잡았다.

데이터 공부도 열심히 합니다

동사는 Capa 확장도 공격적으로 진행하고 있다. 유상증자 등을 통하여 조달한 자금을 우즈베키스탄 현지의 생산시설을 인수하고 신규 공장을 건설하는 데에 사용한다. 27년 이후 연간 210만~300만대로 Capa 확장이 기대된다. 주목할 부분은 우즈베키스탄으로의 확장이 단순 생산기지 증설을 넘어 데이터 팩토리의 역할을 한다는 것이다. 동사는 하드웨어 경쟁력을 바탕으로 데이터 축적을 통하여 로봇 플랫폼 기업으로의 전환을 꾀하고 있다. 피지컬 AI 시장의 경쟁은 하드웨어에서 로봇이 학습한 데이터 경쟁으로 전개될 가능성이 크다. 동사는 경쟁이 난무하는 시장에서 하드웨어와 소프트웨어 두 측면 모두 앞서나갈 수 있는 역량을 가지고 있는 기업이다.

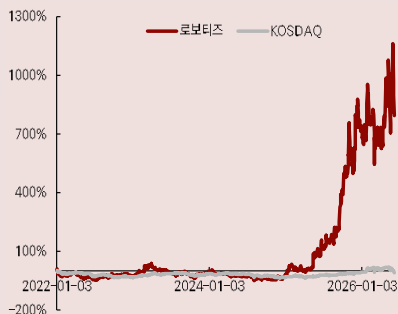
중국의 저가 공세는 조심합시다

동사 제품의 가격 경쟁력은 중국 기업들과의 경쟁 구도에서 미미해질 수 있다. 중국의 Fourier Intelligence의 FDH-6 모델은 약 90만원에 출시되기도 하였다. 물론 기술적 측면에서는 아직 동사가 우수할 수 있으나 이러한 경쟁 구도가 지속된다면 완성사와 부품사 양측면에서 모두 압박을 받을 수 있다. 핵심은 중국 기업들이 치고 올라오기 전에 글로벌 기업의 수요를 얼마나 빠르게 선점할 수 있는냐이다.

Stock Information

시가총액	4조 2,432억원
발행 주식 수	1,465만주
유동주식비율	76.07%
52주 최고가	464,000원
52주 최저가	51,807원
외국인 지분율	7.92%
KOSDAQ	911.11

Price Trend



KUVIC Research Team 1

메일	kuvic_korea@naver.com
팀장	44기 Senior 신주성
팀원	44기 Senior 류승민
팀원	44기 Senior 오연수

Who We Are



Earnings and valuation metrics

계산기 (12월)	2021	2022	2023	2024	2025
매출액 (십억원)	22	26	29	30	39
YoY	-	15.6%	12.7%	3.1%	29.6%
영업이익 (십억원)	-1	-2	5	-3	3
YoY	-	적지	흑진	적진	흑진
영업이익률 (%)	-4.2	-8.4	18.2	-9.9	8.6
당기순이익 (십억원)	1	0	-1	-3	5
EPS (원)	64	-21	-107	-240	377
P/E (배)	346	N/A	N/A	N/A	692

주: K-IFRS 연결 기준, 순이익은 당기순이익

자료: KUVIC Research 1팀

Compliance Notice

- 본 보고서는 고려대학교 가치투자동아리 KUVIC의 리서치 결과를 토대로 한 분석 보고서입니다.
 - 본 보고서에 사용된 자료들은 고려대학교 가치투자동아리 KUVIC이 신뢰할 수 있는 출처 및 정보로부터 얻어진 것이나 그 정확성이나 완전성을 보장하지 못합니다.
 - 본 보고서는 투자 권유 목적으로 작성된 것이 아닌 고려대학교 가치투자동아리 KUVIC의 스터디 목적으로 작성되었습니다.
 - 따라서 투자자 자신의 판단과 책임 하에 종목선택이나 투자시기에 대한 최종 결정을 하시기 바랍니다.
- 본 보고서에 대한 지적재산권은 고려대학교 가치투자동아리 KUVIC에 있으며 어떠한 경우에도 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다.