

★ 2026년 7월 10일(금) 조간 (온라인 7.9.(목), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료	 한국연구재단 National Research Foundation of Korea
청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	<대외홍보실> 조은혜 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119

<자료문의> 경희대학교 신소재공학과 박윤석 교수(031-201-3699)

메타버스 속 질감 그대로 느끼는 '소프트 메타표면' 개발

- 자기장 이용한 초고속 형상 변환 및 자가 복원 기술 구현 -

- 가상 세계 속 물체의 촉각을 현실에서 그대로 느끼게 해주는 혁신적인 3차원 입체 표면 기술이 개발되었다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 경희대학교 박윤석 교수 연구팀이 자기부상 열차의 구동 방식을 활용해 자유롭게 형태를 바꾸고 사람의 터치에도 손상 없이 스스로 복원되는 차세대 ‘소프트 메카니컬 메타표면’ * 시스템을 개발했다고 밝혔다.
* 메카니컬 메타표면 : 외부 자극에 반응하여 표면의 기하학적 형태를 능동적으로 변환할 수 있는 프로그래머블 변형 표면 구조체로, 촉각 인터페이스, 인터랙티브 디스플레이, 소프트 로봇 등 다양한 분야에 활용 가능
- 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 우수신진연구와 뇌과학 선도융합기술개발 지원사업으로 수행됐으며, 미국과학진흥협회(AAAS)의 국제학술지 ‘사이언스 어드밴시스 (Science Advances)’ 에 6월 26일 게재되었다.
- 인간-기계 인터페이스 기술의 발전으로 사용자가 화면을 만지며 실시간으로 정보를 교환하는 촉각 기반 플랫폼의 수요가 급증하면서, 외부 자극에 반응하여 표면 형태를 능동적으로 변환하는 메카니컬 메타표면 기술이 주목받고 있다.

○ 그러나 기존의 메타표면 기술은 물리적 충격에 취약하고 반응 속도가 느려 사람의 움직임을 실시간으로 따라가지 못하는 한계가 있었다. 게다가 표면 변화를 감지하기 위해 부피가 큰 외부 카메라 장비까지 따로 필요하다 보니 실제 일상생활에서 상용화하기에는 제약이 많았다.

- 연구팀은 탄성이 다른 두 고분자 소재를 결합해 유연하면서도 단단한 이중 레이어 구조를 설계하고, 여기에 각 픽셀에 유연한 탄성 고분자에 네오디뮴 자기입자*를 균일하게 혼합하여 자기장에 민감하게 반응하는 ‘소프트 메타표면’을 구현했다.

* 네오디뮴 자기입자 : 강한 자성을 가진 희토류 금속 '네오디뮴(Nd)'을 기반으로 한 미세 입자로, 외부 자기장에 민감하게 반응하여 물리적 변형을 유도할 수 있음.

○ 이 표면 아래에 전압을 걸어주면 각 픽셀의 높이를 1,000분의 8초(8ms)라는 아주 빠른 속도로 개별 제어할 수 있는데, 이를 통해 이론적으로 무려 10^{30} 가지 이상의 다양한 입체 형상을 표현할 수 있다는 것이 실험을 통해 검증됐다.

○ 특히 표면 내부에 정밀한 움직임 관성 측정 장치(IMU)*를 직접 심어놓은 덕분에, 별도의 외부 카메라 없이도 표면이 변하는 모습을 실시간으로 감지할 수 있다.

* IMU(Inertial Measurement Unit, 관성 측정 장치) : 가속도계와 자이로스코프를 결합하여 물체의 기울기, 가속도, 각속도 등 움직임 정보를 실시간으로 측정하는 소형 센서로, 별도의 외부 카메라나 광학 장비 없이도 표면의 형상 변화를 정밀하게 감지할 수 있음.

○ 이렇게 소프트한 표면과 센서를 통합한 구조 덕분에 외부 힘에 의해 형태가 일시적으로 일그러지더라도 목표 형상으로 자율 복원이 가능하며, 이 같은 물리적 복원성은 5,000회 반복 작동에서도 구조적 손상이나 성능 저하 없이 안정적으로 유지된다는 것을 실험을 통해 입증했다.

- 박윤석 교수는 “이번 연구는 형태 변환, 자가 감지, 시각 출력이 하나의 소프트 플랫폼 안에 유기적으로 통합된 사례”라며, “향후 차세대 촉각 인터페이스, 웨어러블 소자, 인터랙티브 디스플레이 분야로의 폭넓은 확장이 기대된다”고 밝혔다.

주요내용 설명

<작성 : 경희대학교 신소재공학과 석사과정 유정민>

논문명	Magnetically Levitated Metasurface enabling Tangible and Bi-directional Human-Machine Interaction
저널명	Science Advances
키워드	Shape-morphing metasurface(형상변환 메타표면), Interactive surface(인터랙티브 표면), Soft robotics(소프트 로봇), Magnetic actuation(자기장 구동), Tactile feedback(촉각 피드백), Visual feedback(시각 피드백), IMU sensor(IMU 센서), Inverse design(역설계), Human-machine interface(인간-기계 인터페이스)
DOI	10.1126/sciadv.aeg0480
저자	정구윤 (제1저자, 경희대학교), 유정민 (제1저자, 경희대학교), Pei Liu (제 1저자, Rice university, USA), 신규리 (참여저자, 경희대학교), 정동규 (참여저자, 경희대학교), 이선진 (참여저자, 경희대학교), 유재영 (참여저자, 성균관대학교), 원상민 (참여저자, 성균관대학교), 한동수 (참여저자, 한국과학기술연구원), 김지훈 (참여저자, 한국과학기술연구원), 송우석 (참여저자, 한국화학연구원), Raudel Avila (교신저자, Rice university, USA), 박윤석 교수 (교신저자, 경희대학교)

1. 연구의 필요성

- 인간-기계 인터페이스 기술의 발전과 함께, 사용자가 화면을 직접 만지고 느낄 수 있는 촉각 기반 상호작용 플랫폼에 대한 수요가 빠르게 증가하고 있다. 특히 메타버스, 원격 의료, 소프트 로봇 등 다양한 분야에서 표면이 스스로 형태를 바꾸고 사용자에게 실시간으로 물리적 정보를 전달하는 기술이 핵심 과제로 떠오르고 있다.
- 이를 위해 외부 자극에 반응하여 표면 형태를 능동적으로 변환하는 메카니컬 메타표면 기술이 주목받고 있다. 그러나 기존 시스템은 크게 세 가지 한계를 갖는다. 첫째, 얇은 필름이나 미세 구조 기반 시스템은 외부 접촉에 취약하여 영구 변형이 발생하기 쉽고, 반대로 강성이 높은 시스템은 집기·비틀기 등 세밀한 사용자 조작에 적합하지 않다. 둘째, 열 확산이나 이온 이동 기반의 구동 방식은

응답 속도가 느려 사람의 시공간적 반응 특성에 맞추기 어렵다. 셋째, 대부분의 시스템은 표면 형상을 감지하기 위해 외부 깊이 카메라 등 부피가 큰 장비에 의존하여, 사용자가 직접 접촉하는 순간 감지 기능이 마비되는 문제가 있다.

- 이러한 문제의식을 바탕으로, 본 연구에서는 유연한 탄성 고분자 소재와 자기장 기반 비접촉 구동 방식을 결합하여 물리적 충격에도 즉각 복원되는 높은 내구성을 확보하는 동시에, 내장된 IMU 센서를 통해 외부 장비 없이도 실시간으로 표면 형상을 감지하고, 이를 RGB LED 배열과 연동하여 시각 정보까지 동시에 제공하는 통합 소프트 메타표면 플랫폼의 개발을 목표로 하였다. 이를 통해 형상 변환, 자가 감지, 시각 출력의 세 가지 기능을 하나의 소프트 플랫폼 안에 유기적으로 통합하는 새로운 인간-기계 인터페이스 기술을 구현하고자 하였다.

2. 연구내용

- 경희대학교 박윤석 교수 연구팀은 탄성이 서로 다른 두 종류의 고분자 소재를 각각 구동층과 지지층으로 활용한 이중 레이어 구조를 설계하고, 각 픽셀에 유연한 탄성 고분자에 네오디뮴 자기입자를 균일하게 혼합하여 제작한 구동 자석과 지지 자석을 내장한 6×6 배열의 소프트 메타표면 시스템을 구현하였다.
- 본 연구에서 사용된 구동 자석은 반지름 6mm, 높이 3mm로 우수한 탄성고분자(PDMS)에 네오디뮴 자성입자 75wt% 비율로 균일하게 혼합한 복합체로 제작되었다. 또한, 지지 자석은 반지름 7mm, 높이 1mm, 네오디뮴 자성입자 50wt%의 조성으로 제작되어 인력에 의한 픽셀 달라붙음을 방지하고 변위를 안정적으로 제어할 수 있게 하였다.
- 더 나아가, 구동 자석과 지지 자석의 반발력을 이중으로 활용함으로써 픽셀의 상하 변위를 독립적으로 제어할 수 있으며, 하부 전자석 어레이의 전압 조절만으로 각 픽셀 높이를 -5mm에서 +3.5mm 범위에서 정밀하게 제어하는 것이 가능하다. 이 방식은 기존 시스템 대비 접촉 없이도 빠른 응답(지연 시간 8ms)과 낮은 소비 전력(픽셀당 최대 6W)을

동시에 달성하였다.

- 표면 형상의 실시간 자가 감지를 위해 IMU 센서 6개를 구동층에 직접 내장하였다. 각 IMU에서 측정된 기울기 각도를 순차적으로 연산하여 외부 장비 없이도 전체 표면의 3차원 형상을 복원하며, 사용자가 표면을 누르거나 짚는 동작 중에도 감지 기능이 유지된다. 가우시안 가중 보간법을 적용한 연속 표면 지형도 생성 결과 깊이 카메라 대비 오차가 $\pm 1\text{mm}$ 이내로 유지됨을 검증하였다.
- 나아가 역설계 알고리즘과 IMU 피드백을 결합한 자가 재구성 시스템을 구현하여, 외부 하중에 의한 표면 변형이 발생하더라도 전압 재조정만으로 목표 형상에 근접하게 자율 복원하는 것이 가능하다. 5,000회 반복 사이클 시험에서도 구조적 손상이나 성능 저하 없이 안정적 동작을 유지하였다.
- 또한, 7×7 RGB LED 어레이를 구동층 표면에 통합하여, IMU 기반 높이 데이터를 실시간으로 색상에 매핑함으로써 표면 형태를 시각적으로도 즉각 확인할 수 있는 3차원 형상 반응형 디스플레이를 구현하였다. 심장 박동 모사, 파도 위 종이배 연출, 물방울 파문 효과 등 다양한 생체모사 시나리오를 통해 플랫폼의 표현 가능성을 실증하였다.

3. 연구성과/기대효과

- 본 연구는 기존 메카니컬 메타표면 기술이 공통적으로 갖고 있던 물리적 취약성, 느린 응답 속도, 외부 감지 장비 의존이라는 세 가지 핵심 한계를 하나의 소프트 플랫폼으로 동시에 극복하였다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 특히 기존 연구들이 각각의 한계를 개별적으로 해결하는 수준에 머물렀던 것과 달리, 본 연구는 구동·감지·시각화 기능을 단일 플랫폼에 유기적으로 통합함으로써 실질적인 인간-기계 상호작용이 가능한 수준의 시스템을 구현하였다는 데 차별성이 있다.
- 특히 소프트한 표면과 센서를 통합한 구조 덕분에 누르거나 꼬집어도 원래 형상으로 즉시 복원되며, 사람과 자연스럽게 상호작용하는 차세대 인터페이스로서의 가능성을 실험적으로 확인하였다. 10명의

참가자를 대상으로 한 시각·촉각 인식 평가에서 6가지 형상 패턴에 대해 높은 인식 정확도를 달성하였으며, 5,000회 반복 사이클 시험에서도 구조적 손상이나 성능 저하 없이 안정적인 동작을 유지함으로써 실사용 환경에서의 내구성과 신뢰성을 함께 검증하였다.

- 본 플랫폼은 줄 히터, 진동 액추에이터, 하이드로겔 기반 습도 모듈 등 다양한 기능 요소와의 추가 통합이 가능하며, 온도·진동·습도·텍스처를 아우르는 다중 감각 촉각 인터페이스로의 발전 가능성도 제시하였다. 구조가 간단하고 자기장 제어 회로의 소형화가 가능하다는 점에서 향후 웨어러블 소자, 소프트 로봇, 인터랙티브 디스플레이, 원격 촉각 전달 시스템은 물론, 메타버스 및 디지털 헬스케어 플랫폼 등 다양한 응용 분야로의 확장이 기대된다.

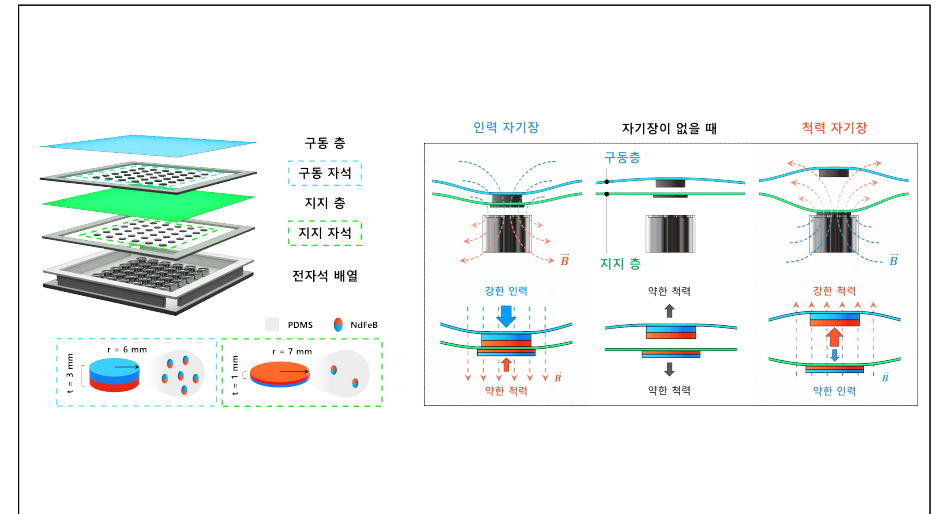
그림 설명



(그림1) 자성제어 기계적 메타표면의 성능 및 응용

그림은 자성제어 기계적 메타표면 시스템의 핵심 성능과 잠재적 응용 분야를 한눈에 보여주는 개요도이다. 좌측에는 본 시스템이 구현하는 네 가지 핵심 성능으로 인간 상호작용, 소프트한 표면, 빠른 형상변환, 센서 내장형 기능이 도식화되어 있다. 중앙에는 전압 인가와 전자식 제어를 기반으로 표면이 3차원으로 변형되고, 이를 실시간으로 시각화하여 외부 모니터에 표시하는 자성제어 기계적 메타표면 시스템의 전체 구성이 나타나 있다. 우측에는 이 시스템이 실제로 활용될 수 있는 응용 분야로 촉각 피드백 제공, 물체 이동, 3차원 디스플레이의 세 가지 시나리오가 제시되어 있다. 이를 통해 단순한 표면 변형 장치를 넘어 다양한 산업 분야에서 실질적으로 활용 가능한 차세대 인터페이스 플랫폼으로서의 가능성을 보여준다.

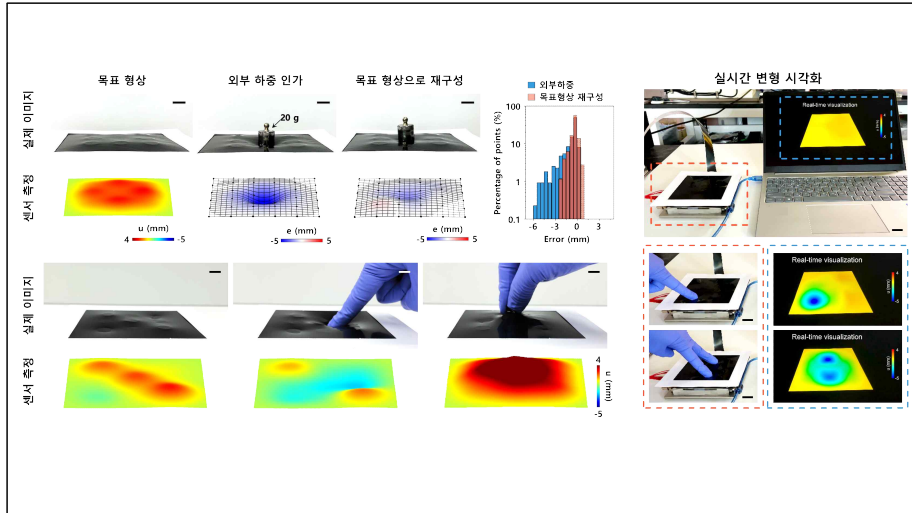
그림설명 및 그림제공 : 경희대학교 신소재공학과 석사 유정민



(그림2) 소프트 메타표면의 적층 구조 및 자기장 기반 단일 픽셀 작동원리

그림은 소프트 메타표면의 다층 적층 구조와 단일 픽셀의 자기장 기반 작동 원리를 상세히 나타낸다. 좌측의 분해도는 LED 배열층, 구동 자석이 내장된 구동층, 지지 자석이 내장된 지지층, 전자식 어레이로 이루어진 4층 구조를 보여주며, 구동 자석은 PDMS-NdFeB 복합체로 제작된 원통형 자석으로, 지지 자석은 상대적으로 낮은 자기입자 함량의 납작한 형태로 각각 최적화되었음을 확인할 수 있다. 우측에는 인력 자기장과 척력 자기장이 인가되는 두 가지 조건에서 단일 픽셀의 거동을 도식화하였다. 인력 자기장이 인가될 경우 구동층이 하방으로 변위되며 구동 자석과 지지 자석 사이의 간격이 좁아지고, 척력 자기장이 인가될 경우 구동층이 상방으로 부상하며 픽셀 높이가 증가하는 양방향 변위 제어 원리를 명확히 보여준다. 이 이중 자석 구성을 통해 단순한 온/오프 방식이 아닌 연속적이고 정밀한 픽셀 높이 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

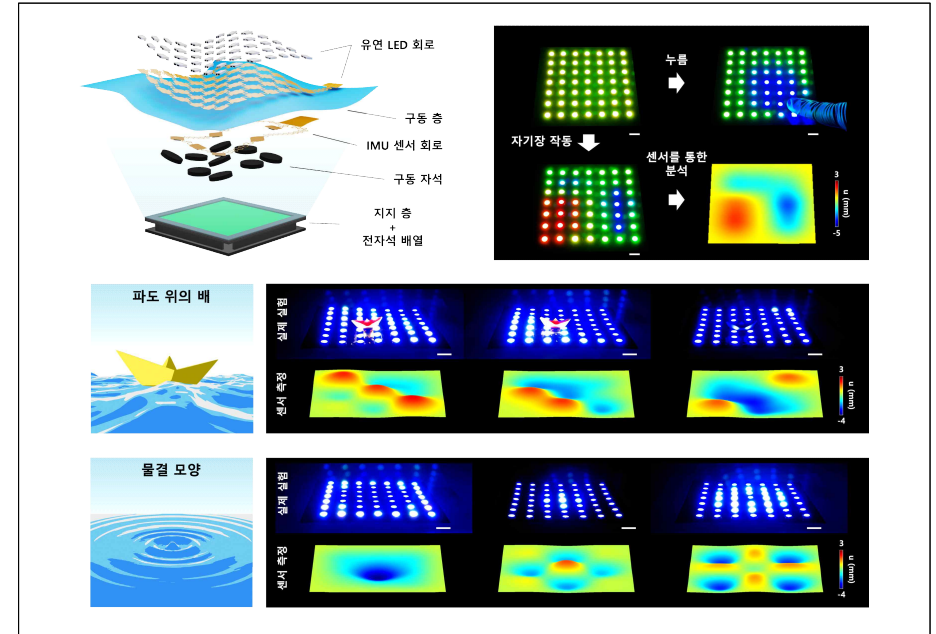
그림설명 및 그림제공 : 경희대학교 신소재공학과 석사 유정민



(그림3) 역설계 기반 자가 재구성 및 IMU 실시간 형상 감지

그림은 외부 하중에 의한 표면 변형을 역설계 알고리즘과 IMU 피드백을 통해 자을 복원하는 과정과, 사용자의 직접 접촉 시 실시간으로 표면 형상을 감지하고 시각화하는 기능을 보여준다. 상단 좌측은 목표 형상으로 구동된 메타표면 위에 20 g 추를 올려 변형을 유도한 뒤, 역설계 알고리즘 기반의 전압 재조정을 통해 목표 형상으로 자을 복원되는 과정을 실제 사진과 IMU 기반 컬러맵으로 함께 나타낸다. 하단 좌측은 사용자가 손으로 표면을 누르거나 집는 동작을 가하는 동안에도 IMU 센서가 실시간으로 형상 변화를 감지하고, 구동층이 즉각 복원되며 동작을 이어가는 물리적 복원성을 실험 사진과 컬러맵으로 보여준다. 우측에는 사용자가 표면에 접촉하지 않은 상태와 손가락으로 누르는 상태에서 IMU 기반으로 재구성된 실시간 표면 형상이 외부 모니터에 즉각 반영되는 자가 감지 및 시각화 기능이 실제 실험 사진과 함께 제시되어 있다.

그림설명 및 그림제공 : 경희대학교 신소재공학과 석사 유정민



(그림4) LED 통합 3차원 형상 반응형 디스플레이 및 환경모사 시각화

그림은 RGB LED 배열을 구동층 표면에 통합하여 IMU 기반 높이 데이터를 실시간으로 색상에 매핑하는 3차원 형상 반응형 디스플레이의 구성과 생체모사 시각화 시나리오를 보여준다. 상단 좌측은 LED 배열, IMU 회로, 구동 자석이 하나의 탄성 고분자 기판 위에 통합된 구동층의 분해 구조를 나타내며, 상단 우측은 자기장 작동 전후의 LED 색상 변화와 사용자가 표면을 누를 때 해당 영역의 색상이 실시간으로 변화하는 모습, 그리고 IMU 센서를 통해 재구성된 표면 형상이 컬러맵으로 표시되는 과정을 보여준다. 하단에는 두 가지 생체모사 시각화 시나리오가 실증되어 있다. 파도 위의 배 시나리오에서는 종이배가 메타표면 위에 올려진 상태에서 파도 형태의 연속 변형이 구현되고, 이와 동기화된 청색 계열의 LED 색상 변화가 실제 파도의 시각적 느낌을 재현한다. 물결 모양 시나리오에서는 표면 중앙부에서 동심원 형태로 퍼져나가는 물방울 파문 효과가 구현되며, 파문의 진행에 따라 LED 색상이 연동되어 변화하는 모습이 실제 사진과 IMU 기반 컬러맵으로 함께 제시되어 있다.

그림설명 및 그림제공 : 경희대학교 신소재공학과 석사 유정민

연구 이야기

<작성 : 경희대학교 신소재공학과 석사과정 유정민>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

최근 디지털 기술의 급격한 발전과 함께 메타버스, 원격 의료, 소프트 로봇 등 다양한 분야에서 사용자가 화면을 직접 만지고 느낄 수 있는 촉각 기반 상호작용 플랫폼에 대한 수요가 빠르게 증가하고 있다. 단순히 시각과 청각에만 의존하던 기존의 인터페이스 방식에서 벗어나, 표면이 스스로 형태를 바꾸고 사용자에게 실시간으로 물리적 정보를 전달하는 새로운 방식의 인간-기계 상호작용 기술이 핵심 과제로 부상하고 있다.

이러한 배경에서 외부 자극에 반응하여 표면 형태를 능동적으로 변환하는 메카니컬 메타표면 기술이 주목받기 시작하였다. 그러나 기존 시스템은 크게 세 가지 한계를 갖고 있었다. 외부 접촉에 취약하여 영구 변형이 발생하기 쉬운 구조적 문제, 열 확산이나 이온 이동 기반 구동 방식의 느린 응답 속도, 그리고 실시간 형상 감지를 위해 부피가 큰 외부 카메라 장비에 의존해야 하는 운용상의 제약이 바로 그것이다. 이러한 한계들은 실제 사용자와의 물리적 상호작용이 이루어지는 현장에서 시스템의 실용성을 크게 저하시키는 요인으로 작용하였다.

이에 연구팀은 이 세 가지 한계를 동시에 해결할 수 있는 새로운 접근법을 모색하였다. 유연한 소프트 소재와 자기장 기반 비접촉 구동 방식을 결합하여 물리적 충격에도 즉각 복원되는 내구성을 확보하고, 내장 IMU 센서를 통한 실시간 자가 감지 기능과 RGB LED 배열을 통한 시각 피드백 기능까지 하나의 플랫폼에 통합한 새로운 방식의 인간-기계 인터페이스 시스템 개발을 목표로 연구를 시작하게 되었다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

본 연구는 크게 소재 최적화, 시스템 설계, 기능 통합의 세 단계로 진행되었다.

첫 번째 단계에서는 유연한 탄성 고분자에 네오디뮴 자기입자를 혼합한 구동 자석과 지지 자석의 조성 및 형상을 체계적으로 최적화하였다. 구동 자석은 반지름, 높이, 자기입자 함량을 다양하게 변경하며 자기력과 중량 사이의 최적 균형점을 탐색하였고, 최종적으로 반지름 6mm, 높이가 3mm, 75wt% 조성이 가장 우수한 구동 성능을 나타냄을 확인하였다. 지지 자석은 전자석의 강한 인력에 의한 픽셀 달라붙음 현상을 방지하고 하방 변위를 안정적으로 제어하기 위해 반지름 7mm, 높이 1mm, 50wt% 조성으로 별도 최적화하였다.

두 번째 단계에서는 최적화된 자석 구성을 바탕으로 6×6픽셀 배열의 전자석 어레이와 결합한 메타표면 시스템을 설계하고 제작하였다. 각 전자석은 PWM(Pulse Width Modulation, 펄스 폭 변조) 신호 기반의 H-브리지 모터 드라이버를 통해 극성과 세기를 독립적으로 제어할 수 있도록 설계하였으며, 이를 통해 -20V에서 +30V 범위의 전압을 미세하게 조절하여 각 픽셀

높이를 -5mm에서 +3.5mm 범위에서 연속적이고 정밀하게 개별 제어할 수 있음을 검증하였다. PWM 방식의 도입으로 단순한 온/오프 방식 대비 훨씬 세밀한 중간 높이 제어가 가능해졌으며, 구동 지연 시간 8ms, 상승 시간 24ms, 안정화 시간 12ms의 빠른 응답 속도를 달성하였다. 또한 동작 시간 비율, 주파수, 파형의 지속 시간 등을 자유롭게 프로그래밍할 수 있어 진동, 체커보드, 이동, 파동의 4가지 연속 형상 변환 모드를 구현하고 유한요소해석(FEM) 시뮬레이션과의 일치성을 실험적으로 검증하였다.

세 번째 단계에서는 IMU 센서 내장, 역설계 기반 자가 재구성 알고리즘, RGB LED 배열 시각화의 세 가지 기능을 순차적으로 통합하였다. IMU 센서 6개를 구동층에 직접 내장하여 외부 장비 없이 실시간 형상 감지가 가능하도록 하였으며, 역설계 알고리즘과 결합한 자가 재구성 기능을 구현하여 외부 하중에 의한 변형이 발생하더라도 PWM 기반 전압 재조정을 통해 목표 형상으로 자율 복원되는 능동적 상호작용 시스템을 완성하였다. 마지막으로 7×7 RGB LED 배열을 구동층 표면에 통합하여 IMU 기반 높이 데이터를 실시간으로 색상에 매핑하는 3차원 형상 반응형 디스플레이까지 구현함으로써 최종 플랫폼을 완성하였다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

연구 과정에서 가장 크게 부딪힌 어려움은 구동 자석과 지지 자석 간의 자기력 균형 최적화 문제였다. 전자석의 강한 인력에 의해 구동 자석이 전자석 표면에 달라붙는 현상이 반복적으로 발생하여 픽셀의 하방 변위 제어가 불가능해지는 상황이 이어졌다. 초기 설계에서는 지지 자석 없이 구동 자석만으로 시스템을 구성하였으나, 전자석과의 거리가 가까워질수록 인력이 급격히 증가하여 픽셀이 전자석에 완전히 부착되는 문제가 반복되었다. 이를 해결하기 위해 지지 자석을 도입하고, 반지름, 높이, 자기입자 함량을 체계적으로 변경하며 반발력의 크기와 공간적 분포를 정밀하게 조율하였다. 특히 지지 자석의 반지름을 구동 자석보다 크게 설계함으로써 측면 및 각도 변형이 발생하더라도 안정적인 반발력이 유지될 수 있도록 하였으며, 수십 차례의 반복 실험 끝에 최적 조성과 형상을 도출할 수 있었다.

또 다른 어려움은 IMU 센서 기반 표면 형상 복원의 정확도를 확보하는 문제였다. 센서 수를 최소화하면서도 9개 노드의 전체 표면을 정확히 재구성하기 위해서는 각 IMU의 기울기 측정값을 기반으로 한 높이 연산 알고리즘의 정밀도가 매우 중요하였다. 특히 가우시안 가중 보간법의 평활화 매개변수(σ)를 결정하는 과정에서 값이 너무 작으면 각 노드 간 표면이 불연속적으로 재구성되고, 반대로 너무 크면 세밀한 형상 변화가 묻개지는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 깊이 카메라 측정값과의 반복 비교를 통해 최적의 σ 값을 도출하였으며, 최종적으로 ± 2 mm 이내의 형상 복원 정확도를 달성할 수 있었다. 아울러 역설계 알고리즘의 수렴 속도와 안정성을 동시에 확보하기 위한 이득 계수(gain factor) 조정 과정에서도 값이 지나치게 크면 목표 형상을 크게 벗어나는 오버슈팅이 발생하고, 반대로 너무 작으면 수렴 속도가 현저히 느려지는 문제가 반복되었다. 이를 극복하기 위해 다양한 이득 계수 조건에서의 평균 제곱 오차(MSE) 변화를 체계적으로 분석하였고, 최종적으로 안정적인 수렴과 빠른 응답 속도를 동시에 만족하는 최적값을 실험적으로 확립하였다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

기존 메카니컬 메타표면 연구들은 형상 변환, 감지, 시각화 기능을 각각 별도의 시스템으로 구현하는 수준에 그쳤으며, 세 가지 기능을 하나의 플랫폼에 동시에 통합한 사례는 보고된 바 없었다. 또한 사람이 직접 접촉하거나 물리적 충격이 가해지는 실사용 환경에서의 내구성과 복원성은 충분히 검증되지 않은 경우가 대부분이었다. 특히 기존 시스템에서 표면 형상 감지에 사용되던 외부 깊이 카메라는 사용자가 표면에 접촉하는 순간 가려져 작동이 불가능해지는 근본적인 한계를 가지고 있었으며, 이는 실시간 피드백과 능동적 형상 제어가 필수적인 인간-기계 상호작용 환경에서 실용화를 가로막는 핵심 장벽으로 작용하였다.

이번 연구는 이러한 한계를 정면으로 돌파하였다. 기존 연구들이 각각의 기능을 단독으로 구현하는 수준에 그쳤던 것과 달리, 본 연구는 형상 변환, 자가 감지, 시각화의 세 가지 기능을 하나의 소프트 플랫폼에 유기적으로 통합하였다. 특히 사용자가 표면을 누르거나 비트는 동작 중에도 IMU 감지 기능이 중단 없이 유지되며, 역설계 알고리즘을 통해 목표 형상으로 자율 복원되는 능동적 상호작용 기능을 구현하였다는 점에서 기존 연구들과 명확히 차별화된다. 또한 기존 연구들이 단순 반복 동작이나 정적인 형상 구현에 집중하였던 것과 달리, 본 연구는 5,000회 반복 사이클 시험과 10명의 참가자를 대상으로 한 시각-촉각 인식 평가를 통해 실사용 환경에서의 내구성과 신뢰성을 실험적으로 검증함으로써 실용화 가능성을 한 단계 높였다. 나아가 심장 박동 모사, 파도 위 종이배 연출, 물방울 파문 효과 등 동적인 생체모사 시나리오를 실증함으로써 플랫폼의 표현 가능성과 응용 잠재력을 폭넓게 제시하였다는 점도 이번 연구만의 성과로 꼽힌다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

실용화를 위해서는 몇 가지 기술적 과제를 해결해야 한다. 첫째, 현재 5,000회 수준의 내구성을 장기 사용 환경에 적합한 수만 회 이상으로 향상시키는 것이 필요하다. 둘째, 픽셀 수를 대폭 늘린 대면적 배열에서도 안정적인 구동과 형상 감지가 가능하도록 시스템 확장성을 확보해야 한다. 셋째, 현재 유선 방식으로 구성된 제어 및 데이터 전송 회로를 무선화하고 소형화하여 웨어러블 환경에서의 실질적인 착용이 가능한 수준으로 발전시켜야 한다. 이러한 과제들을 단계적으로 해결해 나간다면, 본 플랫폼은 촉각 인터페이스, 디지털 헬스케어, 소프트 로봇 등 다양한 분야에서 상용화 가능성이 높을 것으로 기대된다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

이번 연구를 통해 형상 변환, 자가 감지, 시각화 기능을 하나의 소프트 플랫폼에 통합하는 데 성공하였지만, 이는 차세대 인간-기계 인터페이스 실현을 향한 첫걸음에 불과하다고 생각한다. 가장 먼저 이루고 싶은 목표는 현재 6×6픽셀 수준의 시스템을 대면적으로 확장하면서도 각 픽셀의 독립적인 제어 정밀도를 유지하는 것이다. 픽셀 수가 늘어날수록 전자식 간 자기장 간섭과 제어

회로의 복잡도가 기하급수적으로 증가하기 때문에, 이를 효율적으로 해결하기 위한 알고리즘 고도화와 회로 설계 최적화 연구를 병행할 계획이다.

또한 현재 유선 방식으로 구성된 제어 시스템을 무선화하고 소형화하여 실제 착용이 가능한 웨어러블 형태로 발전시키는 것도 중요한 후속 과제이다. 이를 위해 저전력 무선 통신 모듈과의 통합 및 배터리 기반 독립 구동 시스템 개발을 추진할 예정이다.

나아가 온도, 진동, 습도 등 다양한 감각 모듈을 추가로 통합하여 촉각뿐 아니라 다중 감각을 동시에 전달할 수 있는 완전한 형태의 다중 감각 인터페이스 플랫폼을 완성하는 것이 궁극적인 목표이다. 이 기술이 언젠가 메타버스 환경에서 가상의 물체를 손으로 직접 만지고 느낄 수 있는 햅틱 디스플레이, 원격지의 환자를 직접 진찰하는 것과 같은 실감형 원격 의료 시스템, 그리고 인간의 감각을 완벽히 재현하는 휴머노이드 로봇의 피부 인터페이스로 실용화되는 날을 목표로 연구를 이어나갈 것이다.