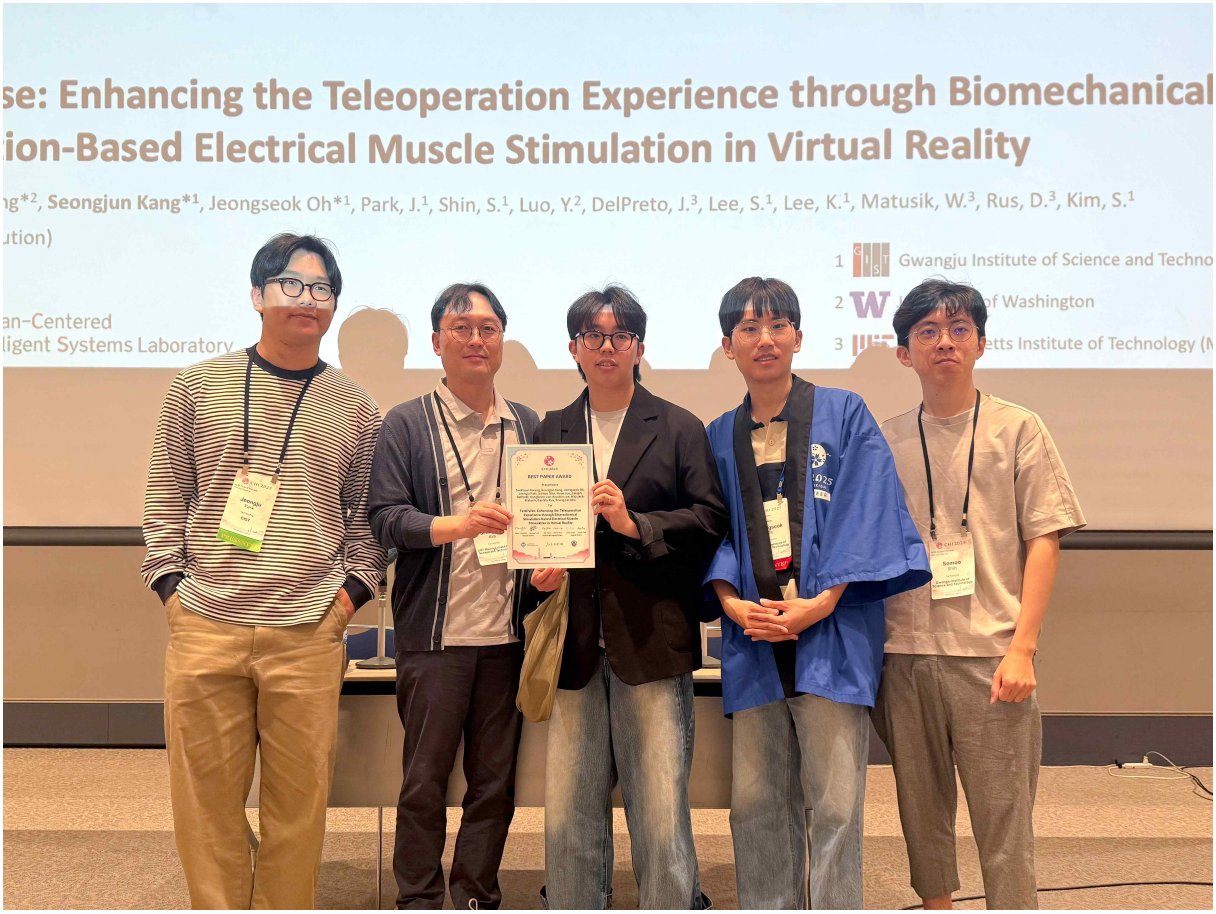
“로봇의 촉감을 인간의 팔로 그대로 전달”
GIST-MIT, 차세대 햅틱 시스템 'TelePulse' 개발

- GIST AI융합학과 김승준 교수 연구팀, MIT와 공동으로 생체 역학 기반 정밀 햅틱 기술 선보여... 전기 자극과 생체 시뮬레이션 결합해 실시간 물리 피드백 구현
- VR 환경에서 로봇-사용자 간 촉각 공유해 몰입감 극대화, 원격 산업·수술·재활 등 실용성 입증... 세계 최고 권위 CHI 2025 학회서 Best Paper Award 수상



▲ TelePulse 개발팀, CHI 2025 학회장에서 Best Paper Award 상장 수여. 연구팀은 TelePulse 시스템을 통해 인간-로봇 상호작용의 몰입도와 정밀도를 획기적으로 향상시킨 공로를 인정받았다.

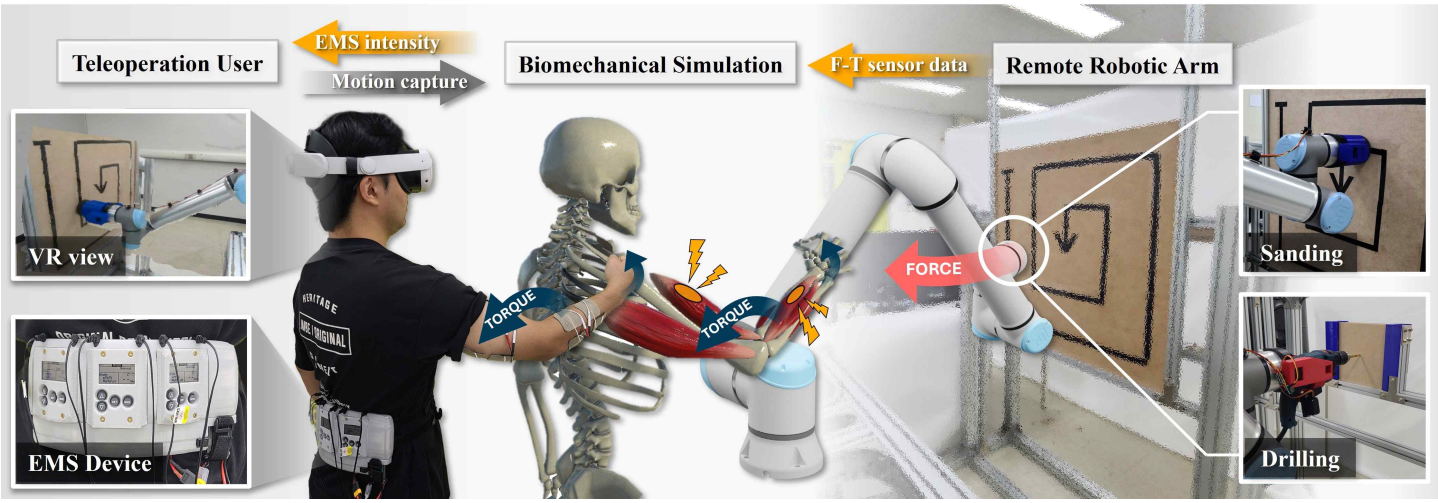
로봇이 받는 물리적 힘을 사람의 팔에 실시간으로 전달하는 **신개념 햅틱(Haptic)* 시스템이 개발**됐다.

이 기술은 가상현실(VR) 환경에서 사용자가 로봇의 움직임이나 외부 환경의 물리적 변화를 피부로 직접 느낄 수 있게 함으로써 **몰입감을 극대화**한다. 또한 **시각이나 청각에 제약이 있는 사용자에게도 새로운 인터페이스를 제공**할 수 있어 주목된다.

* **햅틱(Haptic)**: 촉각을 통해 정보를 전달하는 기술을 의미하며, 일반적으로 물리적인 감각을 활용하여 사용자가 디지털 환경에서 상호작용할 때, 감각적인 피드백을 제공하는 방식이다. 예를 들어, 스마트폰의 진동, 게임 컨트롤러의 충격 피드백, VR(가상 현실) 장치에서의 촉감 등에서 사용된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 AI융합학과 김승준 교수 연구팀이 미국 MIT 연구팀과 공동으로 **원격 로봇과 인간을 물리적으로 연결하는 차세대 햅틱 피드백 시스템 ‘TelePulse’를 개발**했다고 밝혔다.

이 시스템은 **VR 환경에서 사용자가 원격 로봇 팔을 조작할 때, 로봇이 접촉한 물리적 힘을 팔에 정확히 전달**한다. 이를 위해 **전기 근육 자극(Electrical Muscle Stimulation, EMS) 기술과 생체 역학 시뮬레이션(Biomechanical Simulation)을 결합**했다.

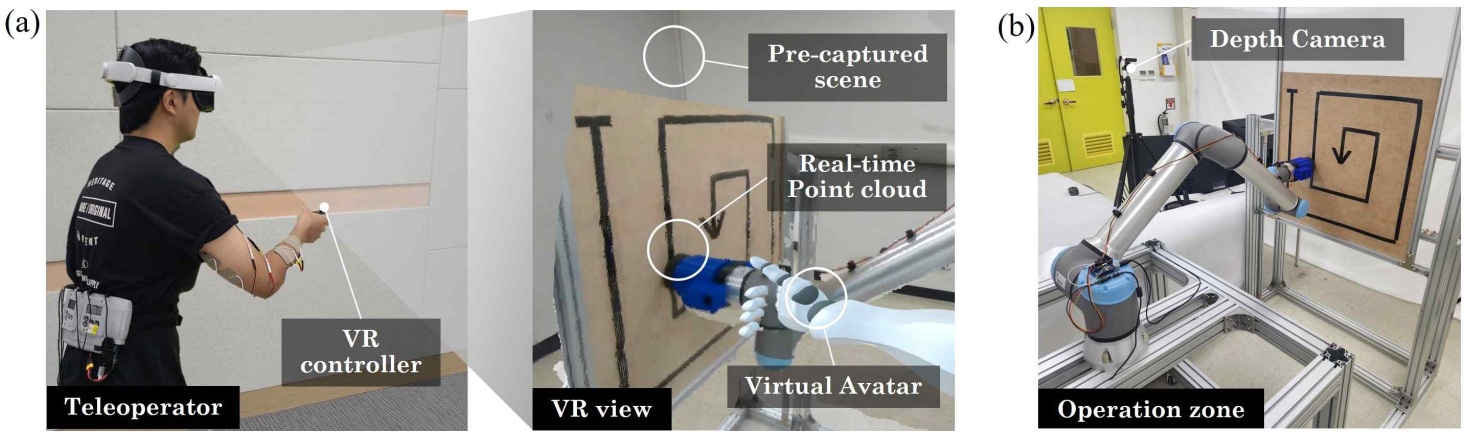


▲ **TelePulse 시스템 개요.** 원격 로봇팔의 작업 힘을 생체역학 시뮬레이션을 통해 계산하고, EMS로 사용자에게 전달하는 양방향 원격 조작 시스템이다.

물체를 누르거나 잡을 때 발생하는 미묘한 힘의 차이를 실시간으로 인지할 수 있도록 함으로써 사용자는 단순한 진동이나 표면 자극을 넘어, **실제로 근육이 수축하는 수준의 생생한 햅틱 피드백을 경험**할 수 있다.

EMS는 인체의 '생체 액추에이터*'인 근육에 전기 신호를 전달해 직접 수축을 유도하는 기술로, **별도의 모터나 기계 장치 없이도 직관적이고 강력한 햅틱 피드백을 제공**한다.

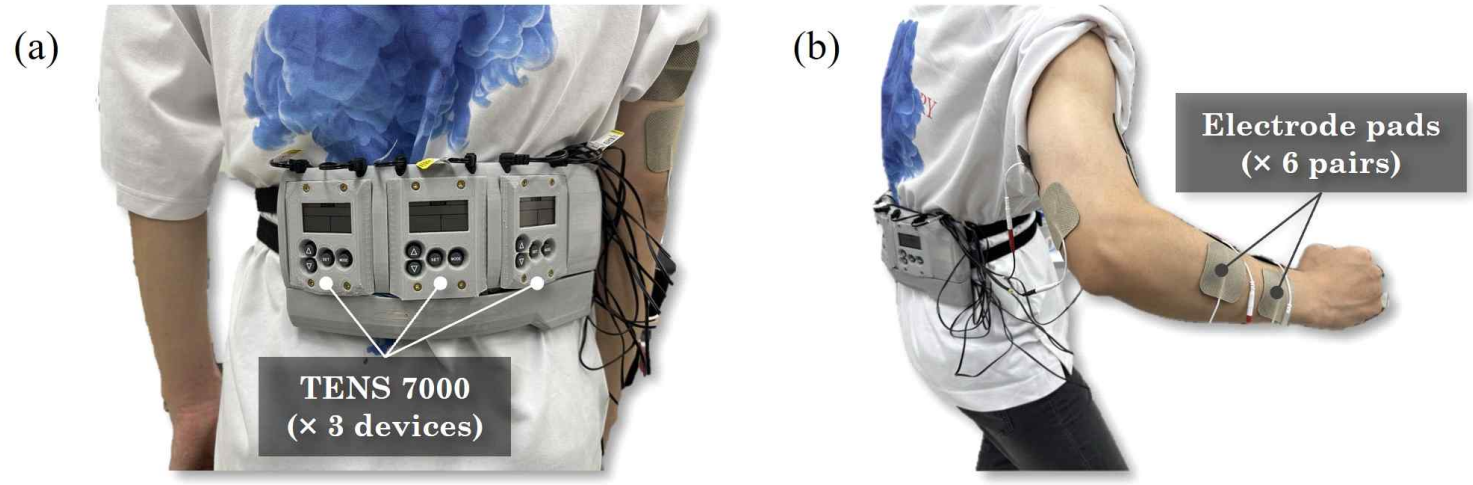
* **액추에이터(Actuator):** 전기, 압력, 열 등의 신호를 받아 기계나 장치를 실제로 움직이게 만드는 부품으로, 센서가 정보를 감지하는 감각기관이라면 액추에이터는 그 정보를 바탕으로 행동을 수행하는 근육과 같은 역할을 한다.



▲ **TelePulse 원격 조작 인터페이스.** (a) 사용자는 VR 환경에서 가상 아바타를 통해 실시간 점군과 사전 캡처된 장면을 보며 원격 작업을 수행한다. (b) 로봇팔이 배치된 작업 공간은 뎁스 카메라로 스캔되어 실시간으로 VR에 반영된다.

기존의 EMS 기반 햅틱 시스템은 대개 정해진 강도에 비례해 근육을 자극하는 데 머물렀으나 **TelePulse는 사용자의 신체 조건, 자세, 관절 위치 등을 실시간으로 분석하여 어떤 근육을 얼마만큼 자극해야 하는지를 정밀하게 계산해 최적화된 피드백을 제공**한다.

이를 위해 연구팀은 물리치료 및 재활 연구 분야에서 활용되는 생체 역학 시뮬레이션 툴인 **'OpenSim'을 도입해, 사용자 맞춤형 관절 토크 계산과 자극 강도 조절을 실시간으로 수행**하도록 하여 보다 섬세하고 현실감 있는 햅틱 경험을 구현하는 데 성공했다.



▲ **TelePulse EMS 장치 구성.** (a) 세 개의 TENS 7000 기기를 허리에 장착하여 다채널 근육 자극을 구현함. (b) 총 6쌍의 전극 패드가 팔의 다양한 근육에 부착되어 정밀한 전기 자극을 제공함.

실용성 검증을 위해 연구팀은 TelePulse를 산업 현장을 가상으로 구현한 **드릴링(구멍 뚫기)과 샌딩(연마)과 같은 원격 산업 작업의 시뮬레이션한 실험에 적용**했다. 그 결과, **TelePulse를 사용한 참가자들은 힘 조절 정확도와 작업 일관성 면에서 유의미한 향상**을 보였다.

샌딩(sanding) 작업에서는 나선형 경로를 따라 표면을 연마하면서 일정한 압력을 유지해야 했는데, TelePulse를 사용한 참가자들은 연속적인 힘 조절이 요구되는 이 과제에서 평균 절대 오차(MAE)를 **약 22% 감소시키며, 정밀도가 크게 향상**되었다.

드릴링(drilling) 작업에서는 일정한 두께의 나무판을 뚫는 정교한 힘 조절이 필요했는데, TelePulse 사용자는 비사용자 대비 정확도가 **약 30% 높았고, 과도한 힘으로 인한 실패율도 크게 낮았다**.

실험 종료 후 실시한 설문 조사에서 참가자들은 TelePulse가 단순한 기계적 진동 자극을 넘어 **"로봇과 감각을 공유하는 느낌"이라는 강한 몰입감을 느꼈다**고 답했다. 실제로 **몰입감(presence) 척도 점수도 평균 15% 이상 향상**된 것으로 나타났다.

TelePulse는 복잡한 기계식 햅틱 장치와 달리, **착용이 간편하고 가벼운 구조로 설계되어 높은 이동성과 활용성을 제공**한다. 이를 바탕으로 원격 로봇 조작뿐 아니라 **원격 수술, 재난 구조, 우주 탐사 등 다양한 고난이도 원격 작업 환경에서도 폭넓게 활용**될 수 있을 것으로 기대된다.

전기 자극 기술의 실시간 정밀 제어라는 기술적 진보를 이룬 이번 연구 성과는 **인간-로봇 상호작용의 몰입도와 정밀도를 동시에 향상시킬 수 있는 새로운 인터페이스 모델로 주목**받고 있다.

김승준 교수는 "TelePulse는 로봇이 받는 물리적 자극을 인간의 신체로 실시간 전달하는 기술로, **단순한 기계적 조작을 넘어 사람과 로봇이 '감각'을 공유하는 시대를 여는 기술**"이라며, "향후 **원격 협업, 정밀 작업, 훈련, 재활 등 다양한 분야에서 유용하게 활용**될 것"이라고 밝혔다.

이번 연구는 혁신성과 실용성을 모두 인정받아, HCI(인간-컴퓨터 상호작용) 및 사용자 인터페이스 분야 최고 권위의 국제 학술대회인 **ACM CHI 2025(Conference on Human Factors in Computing Systems)에 채택**됐다. 특히 **전체 논문 중 상위 1%에 해당하는 논문에 수여되는 'Best Paper Award'를 수상**했다.

연구 결과는 지난 5월 1일 일본 요코하마에서 개최된 CHI 2025 학회에서 발표됐다.

▲ TelePulse 발표 현장. 연구팀이 CHI 2025 학회에서 원격 로봇팔의 작업 힘을 실시간으로 사용자에게 전달하는 TelePulse 시스템의 원리와 성능을 청중에게 설명하고 있다.

이번 연구는 **GIST와 미국 MIT 컴퓨터과학·인공지능연구소(CSAIL) 간의 공동연구 결과로,** 과학기술정보통신부 지원 하에 정보통신기획평가원(IITP) 대학ICT연구센터(ITRC) 사업, 한국연구재단(NRF) 연구지원 사업, 그리고 GIST-MIT 공동연구사업의 지원을 받아 수행되었다.

한편, 이번 연구에는 GIST 김승준 교수를 비롯해 황석현, 강성준, 오정석 연구원을 포함한 총 4명의 GIST 소속 연구진과 MIT의 다니엘라 러스(Daniela Rus) 교수, 보이체흐 마투식(Wojciech Matusik) 교수, 그리고 2명의 MIT 연구원이 참여하였으며, 양 기관은 VR 환경에서의 실감형 상호작용 기술과 다감각 인터페이스 개발 등 **인간 중심 차세대 인터페이스 분야의 핵심 기술을 지속적으로 연구**해 오고 있다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 학회명 : Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)

  * 세계 최고 인간-컴퓨터 상호작용 학회(2025년 기준 h5-index=129 in Human Computer Interaction, Top 1)이며, 한국정보과학회 기준 최우수 학술대회

- 논문명 : TelePulse: Enhancing the Teleoperation Experience through Biomechanical Simulation-Based Electrical Muscle Stimulation in Virtual Reality

- 저자 정보 : 황석현 박사과정생(공동 1저자, University of Washington), 강성준 박사과정생 (공동 1저자, GIST AI융합학과), 오정석 박사과정생 (공동 1저자, GIST AI융합학과), 박정주 석사과정생 (GIST AI융합학과), 신세무 석사과정생 (GIST AI융합학과), Yiyue Luo 교수 (University of Washington), Joseph DelPreto 연구원 (MIT), 이상범 박사과정생 (GIST AI융합학과), 이규빈 교수 (GIST AI융합학과), Wojciech Matusik 교수 (MIT), Daniela Rus 교수 (MIT)교수, 김승준 교수 (교신저자, GIST AI융합학과)