

“주사 한 방으로 근육이 살아난다”

GIST-충남대, '주입형 전도성 수화젤' 개발 손상 부위에 맞춰 형상화, 전기 자극으로 근육 재생까지

- GIST 신소재공학과 이재영 교수팀, 충남대 허강무 교수팀과 공동으로 전기전도성 나노소재 활용한 맞춤형 조직 재생 기술 개발... 체온 반응형 소재에 전기 자극 결합
- 근육 대량 손실(VML) 모델 대상 실험서 전기 자극 병행 시 수축력·회복력 뚜렷한 향상 입증
“자가이식 치료법 한계 뛰어넘어” 국제학술지 《Chemical Engineering Journal》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 이재영 교수, 충남대학교 유기재료공학과 허강무 교수, GIST 신소재공학과 박세현 박사과정생

국내 연구진이 **광범위한 근육 손상을 간단한 주사 방식으로 치료할 수 있는 '전도성 수화젤 플랫폼'**을 개발해 차세대 재생의학 치료법으로 주목된다.

이 수화젤 플랫폼은 **체내에 주입되면 체온에 반응해 손상 부위에 맞춰 모양을 잡고, 전기 자극을 함께 활용하면 정상 근육에 가까운 수준으로 기능 회복이 가능한 것으로** 확인됐다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 이재영 교수와 충남대학교 유기재료공학과 허강무 교수 공동연구팀이 **근육 대량 손실(volumetric muscle loss, VML)을 효과적으로 치료할 수 있는 주입형 전도성 수화젤을 개발했다고** 밝혔다.

이번 연구는 단순히 손상 조직을 채우는 '물리적 보충'에 그치지 않고, **생체 내 세포 활성화와 기능 회복을 유도하는 적극적 재생 치료 플랫폼**이라는 점에서 의미가 크다.

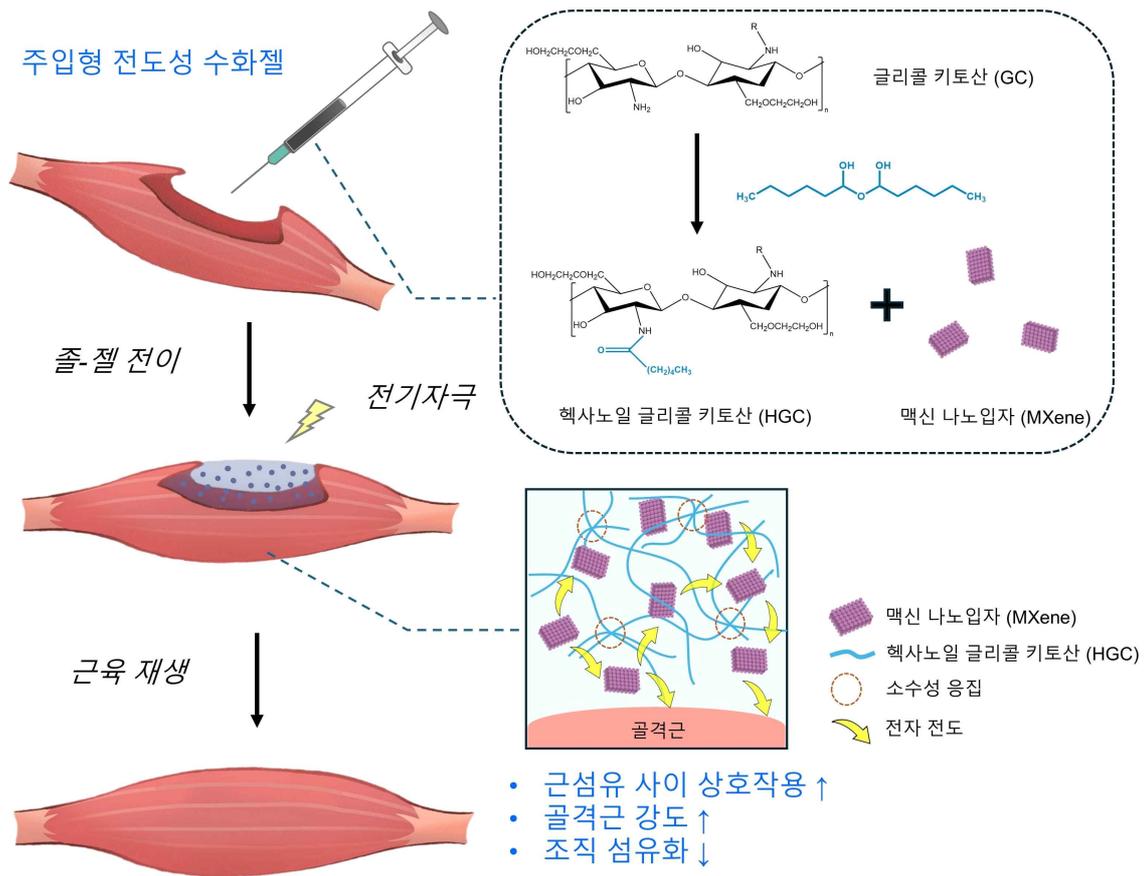
VML은 교통사고, 군사적 부상, 외과 수술, 격렬한 운동 등으로 인해 골격근 조직이 광범위하게 손상되는 질환으로, 자연적인 기능 회복이 어려운 난치성 손상이다.

현재까지는 자가 조직을 이식하는 방법이 주로 사용되고 있으나, 이식 가능한 조직량이 제한적이며, 조직을 떼어 낸 부위(공여 부위)에서 감염, 통증, 흉터 등 2차 합병증이 발생할 수 있어 치료에 어려움이 많다.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 최근 '수화젤(hydrogel)' 기반의 조직 재생 기술이 주목받고 있다. 수화젤은 천연 및 합성 고분자를 기반으로 하며 생체조직과 유사한 구조 및 기계적 특성을 모사할 수 있고 생체적합성이 높아 조직 이식의 유력한 대안으로 연구가 활발히 진행 중이다.

특히 전기적 특성이 중요한 골격근·심근·신경 조직의 경우, **전도성 물질을 활용한 수화젤이 세포의 전기적 활동을 촉진해 조직 재생 효과를 높일 수 있어** 더욱 주목된다.

연구팀은 천연 고분자인 글리콜 키토산(glycol chitosan)에 물과 잘 섞이지 않는 특성을 지닌 헥사노일(hexanoyl) 구조를 도입해 **온도에 반응하는 수화젤을 개발하고,** 여기에 전기전도성이 뛰어난 '**맥신(MXene)**' 나노입자를 혼합해 주입형 전도성 수화젤을 완성했다.



▲ **헥사노일 글리콜 키토산 기반 맥신 담지 주입형 전도성 수화젤의 모식도.** 글리콜 키토산에 소수성 헥사노일 작용기를 도입해 체온 범위에서 줄-젤 전이가 유도되며, 전기전도성이 우수한 맥신 나노입자를 도입함으로써 전도성이 향상된 수화젤을 제작. 이 수화젤은 불규칙한 근육 손실 부위에 정밀하게 주입 가능하며, 전기 전도성과 전기자극을 기반으로 골격근 재생 효과를 극대화함.

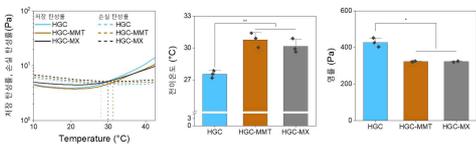
이 수화젤은 상온에서는 액체 상태를 유지하다가 체온(약 30°C) 범위에 도달하면 젤 상태로 전환돼 쉽게 주사할 수 있으며, 불규칙한 근육 손상 부위에도 정밀하게 자리잡고 고정된다.

또한, 높은 전기전도성(0.72 mS/cm) 및 낮은 임피던스(2.03 kΩ)를 지녀, 골격근과 같은 전기 활성 조직의 재생을 촉진하고 전기 자극 전달에도 적합하다.

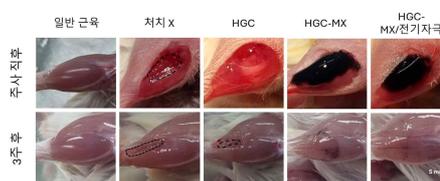
연구팀은 이 수화젤의 생체 적용 가능성을 확인하기 위해 VML이 유도된 실험용 생쥐(마우스) 모델에 주입 실험을 진행했다.

수화젤을 단독으로 주입한 그룹과 전기 자극을 병행한 그룹을 비교한 결과, 수화젤 만으로도 근육 조직의 재생과 기능 회복이 가능했고, 전기 자극을 병행한 경우 근육 수축력(일반 골격근 조직 대비 85.4 ± 13.5 %)과 조직 재생 효과(무게 회복 86.6 ± 4.4 %)가 더욱 뚜렷하게 향상됐다.

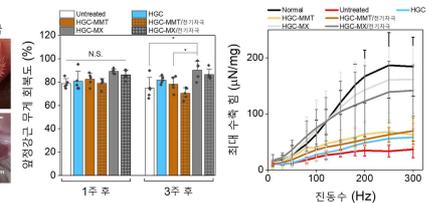
기계적 특성



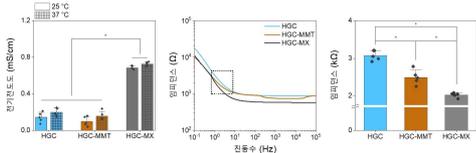
근육 대량 손실 모델 수술 사진



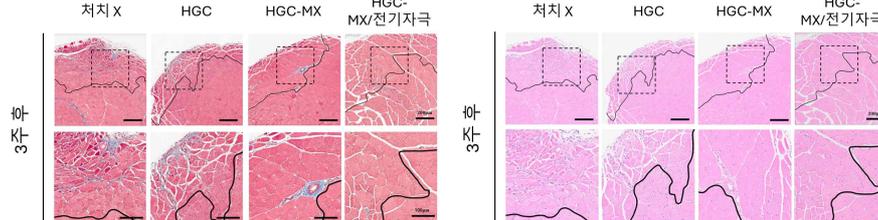
기능적 재생 평가



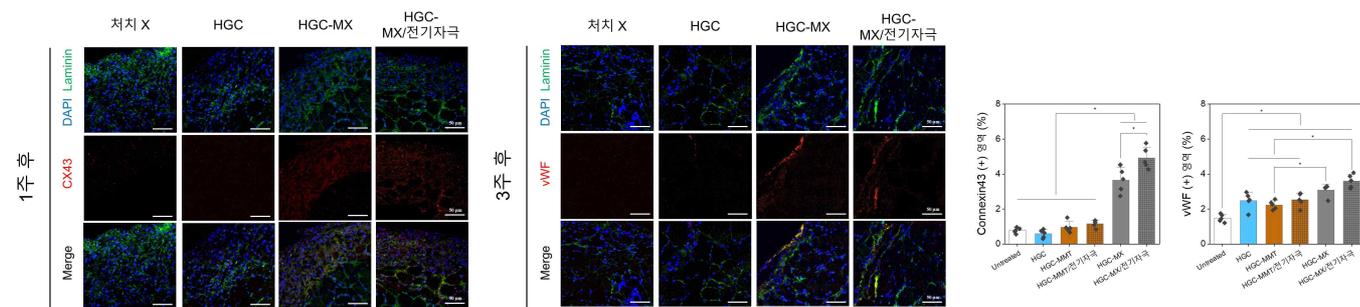
전기적 특성



구조적 재생 평가



질적 재생 마커 발현평가



▲ 체온 범위에서의 졸-젤 전이, 향상된 전기적 특성 및 근육 재생 효과 평가. 제작된 주입형 전도성 수화젤은 생리적 온도(약 30°C)에서 졸-젤 전이가 발생하며, 맥신 나노입자 도입으로 전기전도도 증가 및 임피던스 감소가 확인됨. 근육 대량 손실 동물 모델에 적용한 결과, 기능적(근육 힘-무게 회복), 조직학적(근섬유 성숙, 섬유화 억제) 지표에서 우수한 재생 효과가 확인됨.

GIST 이재영 교수는 "이번에 개발한 주입형 전도성 수화젤은 근육 조직 재생을 넘어 심장, 말초신경, 뇌 등 다양한 전기 활성 조직의 재생에도 활용될 수 있다"며 "기존 자가이식 치료법의 한계를 뛰어넘는 새로운 치료 패러다임이 될 것"이라고 밝혔다.

GIST 신소재공학과 이재영 교수와 충남대학교 유기재료공학과 허강무 교수가 지도하고 GIST 박세현 박사과정생이 수행한 이번 연구는 한국연구재단 중견연구자지원사업과 나노·소재기술개발사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《케미컬 엔지니어링 저널(Cheical Engineering Journal)》에 2025년 5월 15일 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal (IF: 13.4)
- 논문명 : Synergistic effects of conductive hydrogels and electrical stimulation in volumetric muscle loss
- 저자 정보 : 박세현 (GIST 석박통합과정, 제1저자), Thi Phuc Le (충남대학교 석박통합과정), 변희정 (GIST 석박통합과정), 이상훈 (GIST 박사), 이민규 (GIST 박사), 허강무 교수 (충남대학교, 교신저자), 이재영 교수 (GIST, 교신저자)