GIST-성균관대, 심근경색 손상 심장에 약물 직접 전달하는 '붙이는 주사형 하이드로젤' 개발

- GIST 의생명공학과 류동렬 교수·성균관대 신미경 교수 공동 연구팀, 심장 세포의 에너지 대사 돕는 물질을 전달하는 '아이엔젤(iANgel)' 개발... 심장 표면에 부착해 3일간 서서히 방출
- 생쥐 실험서 심장 기능 개선 효과 28일간 유지... 미토콘드리아 기능 보호 및 염증·조직 손상 완화 확인
- 국제학술지《Advanced Functional Materials》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 의생명공학과 류동렬 교수(공동 교신저자), 웨이쉬보 박사(공동 제1저자)

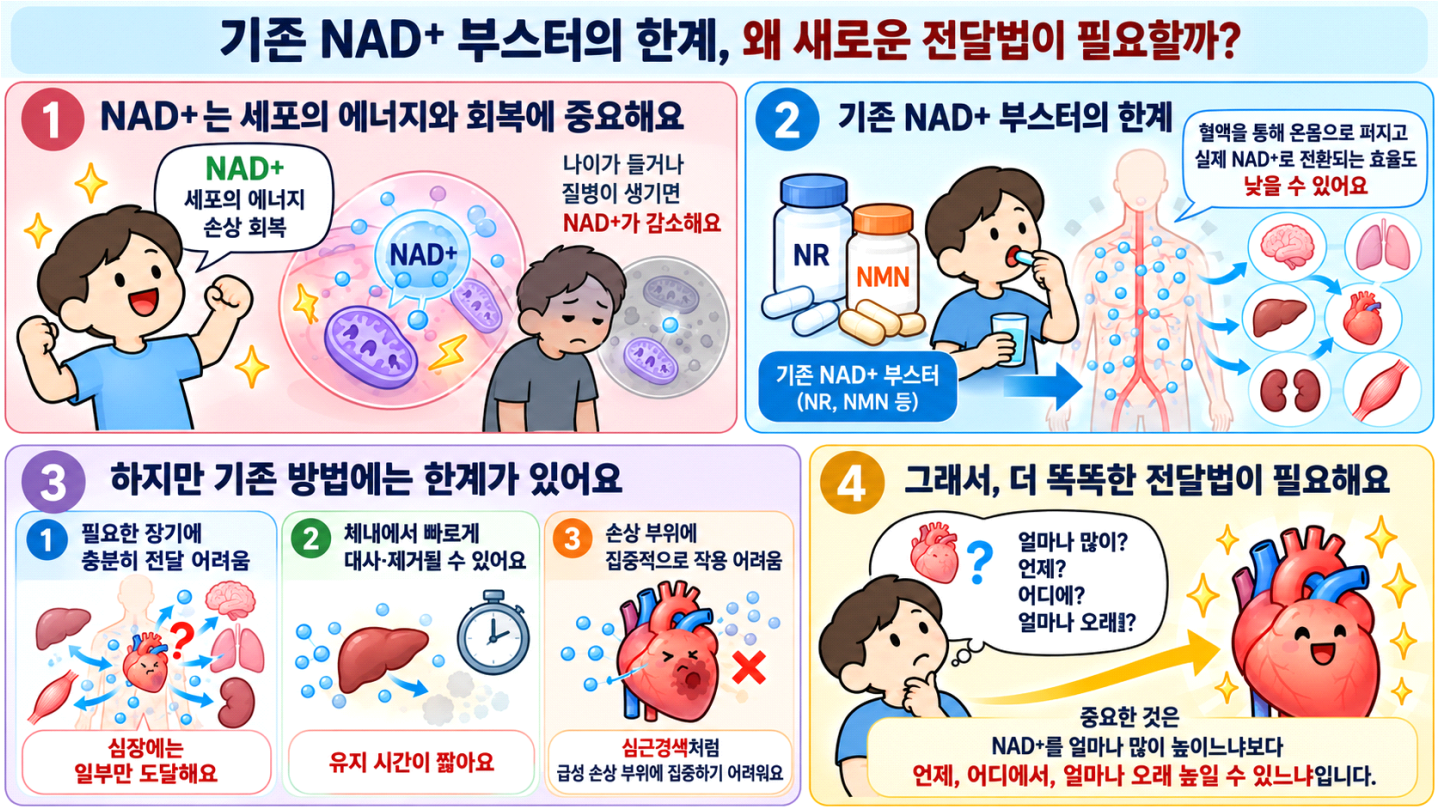
광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 **의생명공학과 류동렬 교수와 성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과 신미경 교수 공동 연구팀이 심근경색으로 손상된 심장에 세포의 에너지 대사를 회복시키는 물질을 직접 전달하는 주사형 하이드로젤 '아이엔젤(iANgel)'을 개발**했다고 밝혔다.

심근경색이 발생하면 심장 근육에 혈액과 산소 공급이 줄어들면서 세포의 에너지 생산을 담당하는 미토콘드리아 기능이 저하된다. 이 과정에서 염증과 산화 스트레스가 증가하고 심장 조직의 손상이 심해질 수 있다.

연구팀은 이러한 손상을 줄이기 위해 세포가 에너지를 만들고 손상에 대응하는 데 필요한 생체 내 핵심 성분인 조효소 'NAD⁺(니코틴아마이드 아데닌 다이뉴클레오타이드)'에 주목했다. **NAD⁺는 심근경색 발생 후 심장 조직에서 급격히 감소하며, 이를**

보충하면 손상된 심장 세포의 기능 회복을 도울 수 있다.

그러나 NAD⁺를 보충하는 물질을 경구나 정맥으로 투여하면 혈액을 따라 온몸으로 퍼지기 때문에 손상된 심장 조직에 충분히 전달하기 어렵다. 약물이 필요한 부위에 머물면서 일정 시간 작용하도록 하는 데도 한계가 있다.



▲ 기존 NAD⁺ 증진제의 전달 한계

연구팀은 이를 극복하기 위해 체내에서 NAD⁺로 바뀌어 세포의 에너지 대사에 활용되는 'NR(니코틴아마이드 리보사이드)'을 탑재한 주사형 하이드로젤 아이엔젤을 개발했다. **손상된 심장 조직에 직접 주입할 수 있고, 심장 표면에도 부착해 NR을 서서히 방출하도록 설계**했다. 치료 물질을 필요한 부위에 집중적으로 전달하고 지속적으로 공급할 수 있도록 한 것이다.

아이엔젤은 **주사로 투여할 수 있을 뿐 아니라 끊임없이 움직이는 심장 표면에도 안정적으로 부착되는 것이 특징**이다. 연구팀은 약물을 붙잡아 서서히 방출하는 소재와 심장 조직에 잘 달라붙는 소재를 결합해 이러한 특성을 구현했다.

두 소재를 혼합하면 NR을 머금은 하이드로젤이 빠르게 형성되며, 약물이 한꺼번에 빠져나가지 않고 서서히 방출된다. 조직 접착 특성 덕분에 박동하는 심장에서도 하이드로젤이 쉽게 떨어지지 않는다.

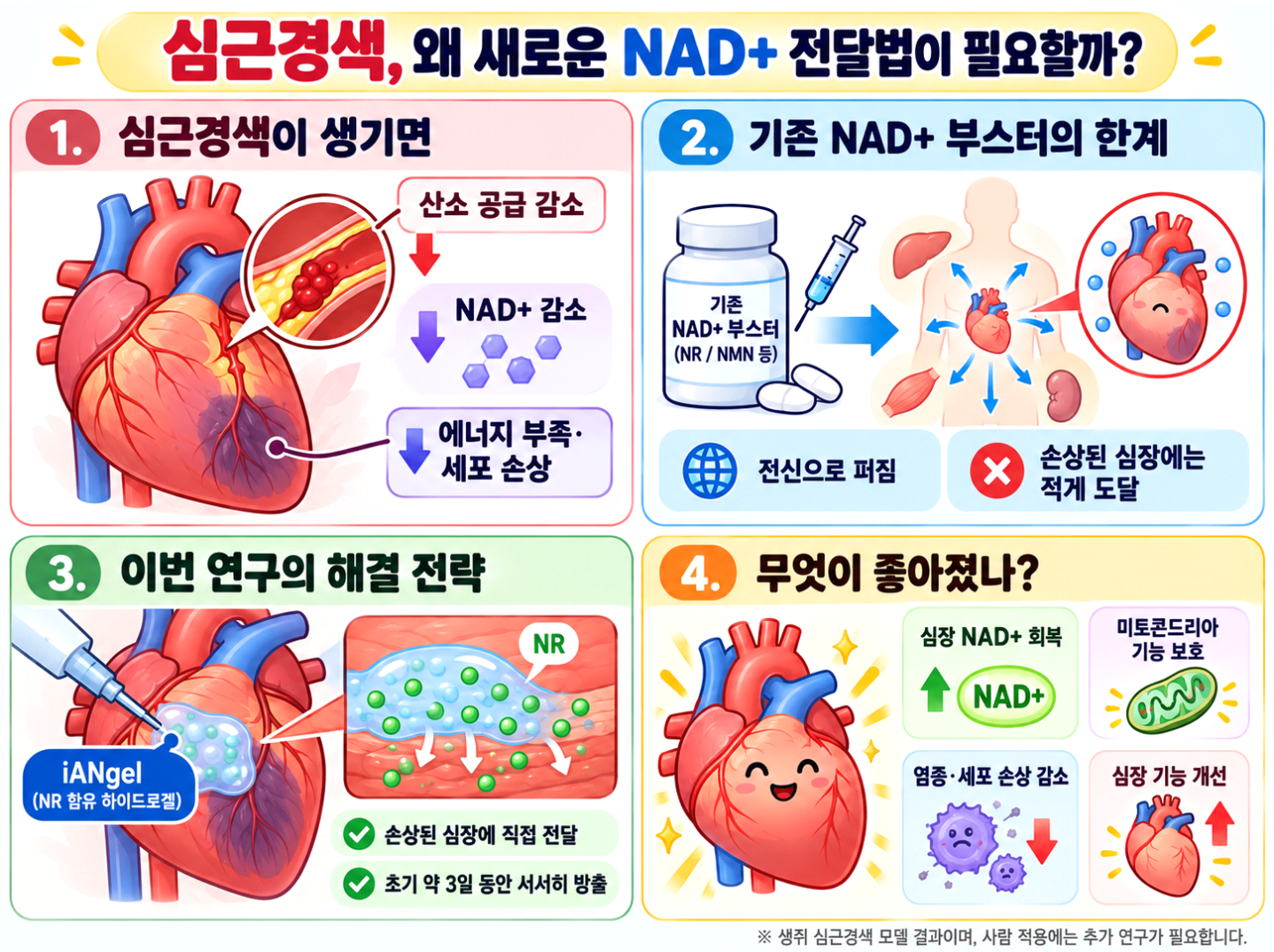
실제 실험에서 아이엔젤은 주사기와 카테터를 통해 투여할 수 있었으며, 심장 조직에 부착된 상태로 NR을 방출했다. 연구팀은 심근경색 직후 염증과 조직 변화가 활발하게 일어나는 **초기 3일에 치료 물질이 집중적으로 공급되도록 설계**했다.

연구팀은 심근경색을 유도한 생쥐 모델에서 아이엔젤의 치료 효과를 확인했다. **아이엔젤을 투여한 생쥐에서는 심장 조직의 NAD⁺ 수치가 회복되고 심장 수축 기능과 혈액을 내보내는 기능이 개선**됐다.

특히 **심장 근육에 직접 주사하고 심장 표면에도 부착하는 방식을 병행했을 때 효과가 가장 두드러졌다**. 반면 NR을 복강에 주사해 전신에 투여한 그룹에서는 같은 수준의 개선 효과가 나타나지 않았다.

심장 초음파 검사에서는 **심장이 혈액을 내보내는 능력을 나타내는 박출률과 수축 기능이 개선**됐으며, 심전도 검사에서도 **심근경색으로 인한 전기적 신호의 이상이 완화**됐다. **심장 조직의 염증과 섬유화, 손상도 줄어드는 것으로 확인**됐다.

28일간 추적 관찰한 결과에서도 심장 수축 기능과 심전도상의 개선 효과가 유지됐다. 이는 아이엔젤의 초기 치료 효과가 심근경색 이후 심장 조직이 회복·재구성되는 과정에서도 이어질 수 있음을 보여준다.



▲ 심근경색의 NAD⁺ 감소와 아이엔젤(iANgel)의 심장 보호 전략

연구팀은 아이엔젤이 심장 기능을 개선하는 작용 원리도 확인했다. **핵심은 NAD⁺를 보충해 세포 보호 기능과 관련된 단백질 'SIRT1'의 작용을 회복시키고, 이를 통해**

미토콘드리아 기능을 보호하는 것이다.

아이엔젤을 통해 NAD^+가 보충되면 **염증 반응을 조절하는 신호가 억제**되고, 철과 지질의 산화 반응으로 세포가 손상되는 **'페롭토시스(ferroptosis·철 의존성 세포 사멸)'도 완화**되는 것으로 나타났다. **미토콘드리아의 에너지 생산 기능이 유지되고 산화 스트레스가 줄어드는 효과도 확인**됐다.

이번 연구는 **치료 물질을 심장에 직접 전달하는 기술과 세포의 에너지 대사를 회복시키는 접근을 결합해 심근경색으로 인한 심장 손상을 줄일 수 있는 가능성을 제시**했다.

연구를 이끈 류동렬 교수는 "아무리 뛰어난 치료 물질이라도 필요한 장기에 적절한 시점에 충분히 전달되지 않으면 치료 효과를 기대하기 어렵다"며 "이번 연구는 **심장에 치료 물질을 직접 전달하는 기술과 세포의 에너지 대사 회복을 결합**했다는 데 의미가 있다"고 말했다.

이어 "**기존의 막힌 혈관을 뚫어 혈류를 회복시키는 재관류 치료와 병행해 심장 세포의 대사 회복을 돕는 보조 치료 전략으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대**한다"고 밝혔다.

류동렬 교수는 NAD^+ 대사와 유로리틴 A 등 건강노화 관련 물질의 작용 및 치료 가능성을 연구해 온 노화·대사 생물학 분야 전문가다. 미국 스탠퍼드대학교와 글로벌 학술정보 분석기업 엘스비어(Elsevier)가 선정하는 **'세계 상위 2% 연구자'에 5년 연속(2022~2026년) 이름을 올렸다**.

이번 연구는 GIST 류동렬 교수와 성균관대학교 신미경 교수가 공동 교신저자로 참여하고, 성균관대학교 김성동 박사와 GIST 웨이쉬보(Shibo Wei) 박사가 공동 제1저자로 수행했으며, 과학기술정보통신부·한국연구재단의 지원을 받았다.

연구 성과는 **재료과학 및 바이오소재 분야 국제학술지 《어드밴스드 펑셔널 머티리얼즈(Advanced Functional Materials)》에 2026년 10월 26일 온라인으로 게재**됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Advanced Functional Materials(IF: 19.9, 2025년 기준)
- 논문명 : Localized Nicotinamide Riboside Delivery Through a Reversible Affinity Hydrogel Promotes Myocardial Restoration
  (DOI: https://doi.org/10.1002/adfm.79275)
- 저자 정보 : 김성동(공동 제1저자, 성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과), 웨이쉬보(공동 제1저자, GIST 의생명공학과), 류동렬(공동 교신저자, GIST 의생명공학과), 신미경(공동 교신저자, 성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학과) 등