

★ 2026년 3월 14일(토) 조간 (온라인 3.13.(금), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료	
청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	<대의홍보실> 김윤숙 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119

<자료문의> 서울대학교 재료공학과 강승균 교수(02-880-7162)

전자 부품까지 통째 분해, 다 쓰면 ‘거름’ 되는 친환경 로봇 - 100만 번 움직여도 성능 그대로 사용 후엔 식물 영양분으로 환원 -

- 고성능·고내구성을 유지하면서도 사용 후 자연으로 완전히 돌아가는 ‘완전 생분해·퇴비화 소프트 로봇 전자 시스템’이 개발됐다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 서울대학교 강승균 교수 연구팀이 고내구성을 갖춘 생분해성 엘라스토머*와 무기 전자소자**를 통합해, 구동 후 산업용 퇴비 환경에서 완전히 분해되는 소프트 로봇 플랫폼을 개발했다고 밝혔다.
 - * 엘라스토머(Elastomer): 고무(Eraser)와 고분자(Polymer)의 합성어로, 고무처럼 탄성이 뛰어나 외력을 가해 잡아당기면 크게 늘어났다가 힘을 제거하면 원래의 상태로 되돌아가는 성질을 가진 고분자 재료
 - ** 무기 전자소자: 실리콘(Si), 마그네슘(Mg) 등 금속이나 광물 유래 원소를 기반으로 만든 전자 부품
- 이번 연구 성과는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 나노소재기술개발사업의 지원으로 수행됐으며, 국제학술지 ‘네이처 서스테이너빌리티(Nature Sustainability)’에 3월 5일 온라인 게재됐다.
- 로봇과 전자기기의 보급 확대로 전 세계는 새로운 환경적 부담에 직면하고 있다. UN 산하 조사기관인 UNITAR에 따르면, 2022년 전 세계 전자폐기물(E-waste)은 약 6,200만 톤에 달하며, 그 중 상당수는 재활용되지 않은 채 매립되거나 소각되고 있다.
 - 특히 소프트 로봇과 로봇용 전자 시스템은 열경화성 고분자 엘라스토머, 합금 및 외인성 반도체 등 복합 소재가 다층 박막 형태로 결합되어 있어 재활용이 사실상 불가능하고, 자연 분해도 되지 않는 ‘지속 불가능한 기술’로 지적되어 왔다.

- 이러한 문제를 해결하기 위해 연구팀은 고내구성 생분해 엘라스토머(PGS), 생분해 접착제(PBTPA), 그리고 Mg·Mo·Si 기반의 생분해 무기 전자소자를 통합했다. 이를 통해, 낮은 히스테리시스*와 우수한 복원력을 바탕으로 100만 회 이상 안정적인 반복 구동이 가능한 고내구성 소프트 로봇 손가락과 다중 감각 전자 시스템을 구현했다.
 - * 히스테리시스(Hysteresis): 물질에 힘을 가했다가 뺐을 때, 원래 상태로 돌아가는 과정이 변형될 때의 경로와 일치하지 않고 차이가 생기는 ‘응답 지연 현상’
- 이는 생분해 소재 기반 소프트 로봇에서도 장기간 안정적인 구동과 전자 기능 통합이 가능함을 실험적으로 입증한 성과다.
- 연구진은 곡률·변형·축각·온도·습도·pH 센서를 포함한 다중 감각 전자소자를 로봇 구조에 집적해 정밀한 센싱 기능을 구현했을 뿐 아니라, 히터, 전기 자극기, 약물 방출 소자 등 능동적인 기능을 전자기적으로 제어할 수 있는 통합 시스템을 구축했다.
 - 이를 통해 단순한 생분해 구조체 수준을 넘어, 환경과 상호작용하며 다양한 기능을 수행할 수 있는 고집적 생분해 소프트 로봇 전자 플랫폼의 가능성을 제시했다.
- 또한 로봇 전체 시스템을 산업용 퇴비 환경에 노출시켰을 때, 구조체와 전자소자가 수개월 내 미생물 작용에 의해 완전히 분해됨을 확인했다. 분해 후 생성된 퇴비를 이용한 식물 재배 실험에서는 정상적인 생장이 이뤄졌으며 환경 독성이 없음을 입증했다. 이 결과는 사용 후 자연으로 환원되어 토양 생태계 순환에 기여할 수 있는 지속 가능한 로봇 전자 시스템의 가능성을 확인시켜 준다.
- 강승균 교수는 “이번 연구는 로봇과 전자기기가 남기는 폐기물 문제에 대한 근본적인 해법을 제시한 것”이라며, “단순한 생분해 구조체를 넘어 환경과 상호작용하며 다양한 임무를 수행할 수 있어, 미래의 지속가능한 로봇 기술과 환경 보호라는 두 가지 핵심 가치를 동시에 실현할 것으로 기대된다”라고 밝혔다.

주요내용 설명

<작성 : 서울대학교 공과대학 재료공학부 강승균 교수>

논문명	Biodegradable yet hyperdurable robotic fingers for zero-waste soft electronics
저널명	Nature Sustainability
키워드	Biodegradable Soft Robotics, Compostable Electronics, Sustainable Robotics, Transient Electronic Systems, High-Durability Actuators, Eco-friendly Materials, Circular Technology
DOI	10.1038/s41893-026-01780-4
저자	강승균 교수(교신저자/서울대학교 재료공학부), 김상엽 교수(교신저자/서강대학교 기계공학과), Martin Kaltenbrunner 교수(교신저자/케플러대학교 연성물질물리학과), 김경섭 박사(제 1 저자/서울대학교 재료공학부 (현: 로잔연방공과대학)), 심준석 박사(제 1 저자/서울대학교 재료공학부), 김성우 연구원(제 1 저자/서울대학교 재료공학부), 황경석 박사(공동 저자/울산과학기술원 신소재공학과), 박유정 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), Joran Booth(공동 저자/예일대학교 기계·재료 공학과), 배재영 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 김종형 교수(공동 저자/부경대학교 재료공학과), 오민하 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 채민성 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 전주익 박사(공동 저자/단국대학교 나노바이오 의학과), 이주용 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 이재환 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 채민정 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 최성근 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 김영서 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 이승민 박사(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 강세훈 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 박주현 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 김용우 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 이우진 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 김임덕 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 김기현 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부), 최성유 연구원(공동 저자/서울대학교 재료공학부) 선정운 교수(공동 저자/서울대학교 재료공학부), Rebecca Kramer-Bottiglio 교수(공동 저자/예일대학교 기계·재료 공학과), 옥명렬 박사(공동 저자/한국과학기술연구원), 김재준 박사(공동저자/한국전자통신연구원), 현정근 교수(공동 저자/단국대학교 나노바이오의학과), 이강식 박사(공동 저자/울산의과대학 의공학연구소), 김주영 교수(공동 저자/울산과학기술원 신소재공학과)

1. 연구의 필요성

- 전 세계적으로 전자기기 보급과 자동화 기술 도입이 가속화되면서, 전자폐기물 문제는 이미 기후·자원 문제와 맞먹는 환경 이슈로 부상했

다. 특히 소프트 로봇은 의료용 보조기기, 농업 자동화, 환경 모니터링, 재난 대응 등 활용 범위가 빠르게 확대되고 있으나, 대부분 실리콘 고무, 비 생분해성 플라스틱, 금속·반도체 기반 전자소자로 구성돼 사용 후 환경에 장기간 잔존한다.

- 기존 소프트 로봇은 구조적 복합성과 복합 소재 사용으로 인해 분해·재활용이 거의 불가능하며, 이는 전자폐기물 증가 속도를 더욱 가속화하는 요인으로 작용한다.
- 일부 생분해 로봇 연구가 보고된 바 있으나, 구동 성능과 내구성이 낮거나 전자소자가 부분적으로만 분해되는 한계가 있었고, 분해 부산물이 생태계에 미치는 영향 역시 충분히 검증되지 않았다.
- 이에 따라 고성능 구동, 고집적 전자 기능, 완전 생분해성, 생태계 안전성을 동시에 만족하는 차세대 소프트 로봇 플랫폼 개발은 필수적인 과제이다.

2. 연구내용

- 본 연구진은 기존 소프트 로봇의 재활용이 사실상 불가능하고 자연 분해 또한 되지 않는 한계에 대응해, 고내구성 생분해 엘라스토머(PGS), 생분해 접착제(PBTPA), 그리고 Mg·Mo·Si 기반의 생분해 무기 전자소자를 통합해 사용 중에는 고성능·고내구성을 유지하면서도, 사용 후에는 자연으로 완전히 환원되는 ‘완전 생분해·퇴비화 소프트 로봇 전자 시스템’을 개발하였다.
- 또한 연구진은 물이 없는 고내구성 생분해 엘라스토머(PGS)를 로봇 프레임 소재로 사용해, 낮은 히스테리시스와 우수한 복원력을 갖춘 소프트 액츄에이터를 구현하였다. 제작한 굽힘 액츄에이터는 100만 회 반복 구동 후에도 굽힘 각도와 출력 힘의 변화가 거의 없으며, 6개월 이상의 장기 보관 이후에도 안정적인 성능을 유지하였다.
- 더불어 Mg·Mo·Si로 구성된 생분해 무기 전자소자를 활용해 곡률·변형·축각·온도·습도·pH 센서를 포함한 다중 감각 센싱 기능과 함께 히

터, 전기 자극기, 약물 방출 소자 등 능동적 기능을 하나의 소프트 로봇 손가락에 집적하였다. 이러한 전자소자들은 전기적으로 구동·제어 되도록 설계되어 환경 감지부터 구동 및 약물 전달까지 수행할 수 있는 고집적 생분해 전자 시스템을 구현하였다.

- 개발한 소프트 액추에이터와 다중 감각 전자 시스템을 통합한 로봇은 산업용 퇴비 조건에서 수개월 내 구조체와 전자소자가 모두 분해되었으며 해당 퇴비에서 식물 생장이 정상적으로 이루어짐을 통해 환경 독성이 없음을 입증하였다.

3. 연구성과/기대효과

- 본 연구는 초고내구 구동성능, 고집적 생분해 전자 시스템 구현, 완전 퇴비화 및 생태계 안전성 검증이라는 세 가지 목표 달성을 통해 생분해 소프트 로봇 전자 시스템의 성능·내구성·환경 안전성을 세계 최초로 종합 검증하였으며, 로봇과 전자기기의 전 생애주기를 고려한 기술로, 지속가능 로봇공학의 새로운 방향성을 제시한다.
- 개발한 차세대 소프트 로봇은 회수·재활용이 어려운 의료용 일회성 로봇, 농업·환경 모니터링 로봇, 원격·장기 배치 탐사 로봇 등에서 적용이 가능하며, ‘임무를 마친 뒤 쓰레기가 아닌 토양의 일부로 돌아가는 지능형 기계’라는 새로운 로봇 기술 패러다임을 통해 로봇과 전자기기가 남기는 폐기물 문제에 대한 근본적인 해법을 제시한다.
- 또한 본 연구는 고성능 무기 반도체를 포함하면서도 완전 분해가 가능하다는 점에서, 향후 생분해 논리회로·제어 시스템·지능형 로봇 플랫폼으로의 확장 가능성도 크다.
- 이번 연구 성과는 기존 소프트 로봇의 한계를 보완한 “고성능 + 완전 생분해 + 생태계 무독성”을 동시에 달성한 플랫폼으로, 친환경 로봇·전자 산업 전환의 핵심 기술로 자리매김할 전망이다.

그림 설명



(그림1) 완전 퇴비화 가능한 소프트 로봇 시스템



(그림2) 소프트 로봇 손가락의 생분해 과정

본 연구진이 개발한 소프트 로봇은 사용이후 수개월 이내에 구조체와 전자소자가 모두 분해되는 ‘임무를 마친 뒤 쓰레기가 아닌 토양의 일부로 돌아가는 지능형 기계’라는 새로운 로봇 패러다임을 제시한다.

자료 출처 : Kim et al., *Nature Sustainability* (2026)

그림설명 및 그림제공 : 로잔연방공과대학 / 김경섭 / 박사후연구원

연구 이야기

<작성 : 서울대학교 공과대학 재료공학부 강승균 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

연구팀은 그동안 지속가능 소프트 로봇과 생분해 전자 시스템 구현을 핵심 연구 주제로 삼아왔다. 특히 소프트 로봇이 의료·환경·농업 분야로 빠르게 확산되는 반면, 사용 후에는 분해되지 않은 채 전자폐기물로 남는 구조적 한계에 주목하여 이에 대한 근본적 해결 방안을 모색해왔다. 그 과정에서 고성능 구동과 전자 집적을 유지하면서도, 수명 종료 후 자연으로 환원될 수 있는 소재·구조 통합 설계 전략의 필요성을 인식하였다. 이러한 문제의식을 바탕으로 연구팀은 생분해 엘라스토머와 생분해 무기 전자소자를 결합한 완전 생분해 소프트 로봇 플랫폼에 주목하였다. 기존 생분해 로봇 연구가 낮은 기계적 내구성이나 부분적 분해에 머무른 한계를 극복하고, 실제 활용 가능한 수준의 구동 성능과 전자 집적도를 동시에 확보하는 것을 목표로 하였다. 특히 로봇 구조체와 전자소자가 모두 산업용 퇴비 환경에서 완전 분해되고, 그 부산물이 생태계에 무해함을 검증하는 데 연구의 초점을 두었다. 연구팀은 '고내구 구동 성능과 완전 생분해성을 동시에 달성할 수 있는가'라는 가설을 수립하고, 소재 설계부터 소자 집적, 동물·식물 기반 환경 안전성 평가에 이르기까지 단계적이고 체계적인 검증을 수행하였다. 그 결과, 100만 회 이상 반복 구동이 가능한 소프트 액추에이터와 다기능 생분해 전자 시스템을 구현하고, 수개월 내 완전 퇴비화 및 생태계 무독성을 입증함으로써 본 연구 성과를 학술 논문으로 발전시켰다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

연구팀은 기존 소프트 로봇이 대부분 비분해성 실리콘 탄성 고분자와 복합 전자소자로 구성되어 사용 후 장기간 환경에 잔존한다는 점에 주목하였다. 특히 일부 생분해 로봇 연구가 보고되었음에도 불구하고, 실제 활용 수준의 구동 내구성과 전자 집적 성능을 동시에 확보하지 못하거나, 구조체와 전자소자가 완전히 분해되지 않는 한계가 존재한다는 점을 문제의식으로 삼았다. 이에 연구 초기 단계에서부터 단순 소재 치환이 아닌, 구조체-전자소자-환경 안전성까지 통합적으로 검증할 수 있는 새로운 생분해 소프트 로봇 플랫폼의 구축이 필요하다고 판단하였다. 연구진은 먼저 기계적 신뢰성과 생분해성을 동시에 만족할 수 있는 엘라스토머 후보군을 비교·평가한 뒤, PGS(poly(glycerol sebacate))를 로봇 프레임 소재로 선정하였다. 이후 반복 구동 환경을 모사한 가속 내구 시험을 통해 100만 회 이상 구동 시에도 굽힘 각도와 출력 힘의 변화가 거의 없음을 확인하였다. 동시에 Mg, Mo, Si 기반 생분해 무기 전자소자를 설계·집적하여 곡률·변형·촉각·온도·습도·pH 센서와 히터, 전기 자극기, 약물 방출 기능을 하나의 소프트 로봇 손가락에 통합하였다. 이를 통해 반복 변형 조건에서도 전기적 성능이 안정적으로 유지됨을 검증하였다. 나아가 연구팀은 산업용 퇴비 조건에서의 분해 거동과 생태계 안전성을 체계적으로 분석하였다. 로봇 전체 시스템을 실제 퇴비 환경에 노출시킨 결과, 수개월 내 구조체와 전자소자가 모두 분해되었으며, 분해 후 생성된 퇴비를 활용한 식물 생장 시험을 통해 독성 영향이 없음을 확인하였다. 이번 연구는 고성능 구동, 고집적 전자 기능, 완전 생분해성, 생태계 무독성을 하나의

플랫폼에서 동시에 구현함으로써, 임무 수행 후 자연으로 환원되는 차세대 지속가능 소프트 로봇의 실현 가능성을 제시했다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

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

연구 초기 단계에서 연구팀은 단순히 개별 전자소자를 제작한 뒤 순차적으로 부착하는 기존 방식이 아니라, 각 기능별 생분해 전자소자를 하나의 소프트 로봇 플랫폼에 안정적으로 집적할 수 있는 통합 공정 전략을 구축하고자 하였다. 그러나 센서, 히터, 자극기 등 각 소자는 요구되는 기계적 유연성, 두께, 분해 특성이 서로 달라 공정 중 계면 박리, 정렬 오차, 반복 변형 시 단선 등의 문제가 발생하는 기술적 어려움이 있었다. 특히 생분해 소재는 열과 용매에 민감해 기존 반도체 공정을 그대로 적용하기 어려웠다. 이에 연구팀은 기능별로 최적화된 전자소자를 먼저 평면 기판 상에서 정밀 제작한 뒤, 이를 3차원 구조로 변환하는 roll-up process를 도입하였다. 동시에 다층 소자를 한 번에 엘라스토머 기판으로 전사하는 one-step transfer 공정을 병행함으로써 공정 단계를 최소화하고 계면 안정성을 확보하였다. 그 결과, 반복 구동 환경에서도 전기적·기계적 신뢰성을 유지하는 고집적 생분해 전자 시스템을 안정적으로 구현할 수 있었다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

최근 소프트 로봇 연구 분야에서는 유연성과 정밀 제어 성능을 중심으로 기술 발전이 이루어져 왔으나, 사용 후 환경에 잔존하는 비분해성 소재 문제는 충분히 해결되지 못한 과제로 남아 있었다. 일부 생분해 로봇이 보고된 바 있으나, 구조체만 부분적으로 분해되거나 단일 기능 수준의 전자소자만 통합된 사례가 대부분이었으며, 다기능 전자 시스템을 고집적으로 탑재한 완전 생분해 로봇은 사실상 전례가 없었다. 특히 여러 개의 센서·자극 기능을 하나의 플랫폼에 통합하면서도, 구조체와 전자소자가 모두 완전 분해되는 시스템 수준의 구현은 기존 연구로는 달성되지 못한 영역이었다. 기존 접근은 주로 개별 생분해 센서 또는 단순 구동 구조에 초점을 맞추었고, 다기능 집적 과정에서 요구되는 기계적 신뢰성, 전기적 안정성, 분해 후 환경 안전성까지 종합적으로 검증한 사례는 제한적이었다. 또한 반복 구동 환경에서 고내구성을 확보하면서 동시에 고집적 전자 기능을 유지하는 것은 기술적으로 상충되는 과제로 인식되어 왔다. 이로 인해 '고성능'과 '완전 생분해'는 양립하기 어려운 목표로 여겨져 왔다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고자, PGS 기반 고내구 소프트 액추에이터 위에 Mg·Mo·Si 기반 생분해 무기 전자소자를 집적하여 곡률·변형·촉각·온도·습도·pH 센서와 히터, 전기 자극기, 약물 방출 소자의 총 9개의 전자 기능을 통합한 다기능 생분해 로봇을 구현하였다. 더 나아가 시스템 전체를 산업용 퇴비 조건에서 완전 분해시키고, 생태계 무독성까지 검증함으로써 단순 소재 차원의 생분해를 넘어 '시스템 수준의 지속가능 로봇'이라는 새로운 개념을 제시하였다. 이번

연구는 고집적·고내구·완전 생분해를 동시에 달성한 최초 수준의 다기능 소프트 로봇 플랫폼을 구현했다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

본 연구에서 제시한 완전 생분해·퇴비화 소프트 로봇 전자 시스템은 의료·환경·농업·재난 대응 등 회수가 어렵거나 일회성 활용이 요구되는 다양한 분야로의 확장 가능성을 제시한다. 특히 구조체와 전자소자가 모두 자연으로 환원되는 플랫폼 전략은 단순히 특정 응용에 국한되지 않고, 장기 잔존 폐기물을 남기지 않아야 하는 차세대 지속가능 기술 전반에 적용 가능한 범용 설계 개념으로 발전할 수 있다. 이는 일회성 의료기기, 분산형 환경 센서 네트워크, 토양·해양 탐사용 로봇 등 기존에 환경 부담 문제로 적용이 제한되었던 영역에서 새로운 활용 기회를 열어줄 것으로 기대된다.

이번 연구 성과는 고성능과 완전 생분해를 동시에 달성하기 어렵다는 기존 인식을 넘어, 시스템 수준에서 지속가능성을 구현할 수 있음을 실증했다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 이는 기존 소프트 로봇 및 전자 시스템이 가진 비분해성 구조의 한계를 보완하는 새로운 기술 패러다임을 제시하는 동시에, 친환경 소재·공정·설계 전략을 통합한 차세대 로봇·전자 산업으로의 전환을 가속화하는 계기가 될 것으로 기대된다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

본 연구에서 제시한 생분해 소프트 로봇 전자 시스템은 주로 실험실 수준의 반복 구동 시험과 산업용 퇴비 조건에서의 분해 검증을 통해 성능과 환경 안전성을 확인하였다. 그러나 실제 의료·농업·환경 현장에서의 장기 사용 조건, 다양한 기후·토양 환경에서의 분해 거동, 그리고 대규모 적용 시의 신뢰성에 대해서는 추가적인 검증이 필요한 상황이다. 또한 수개월 내 완전 분해가 입증되었지만, 실제 응용 환경에서 요구되는 사용 기간과 분해 시점 간의 정밀한 제어 가능성 역시 추가 연구가 요구된다.

더불어 생분해 무기 전자소자(Mg, Mo, Si)의 체내 또는 생태계 노출 시 장기적 축적 가능성과 미세 농도 수준에서의 환경 영향에 대해서도 체계적이고 장기적인 평가가 필요하다. 특히 의료용 삽입 기기로 확장될 경우에는 생체 적합성, 면역 반응, 분해 부산물의 대사 경로 등에 대한 정밀한 독성 및 안전성 검증이 필수적이다. 산업적 관점에서는 대면적·대량 생산 공정에서의 균일성 확보와 비용 효율성 개선 역시 중요한 과제로 남아 있다.

이러한 한계와 과제를 바탕으로, 연구팀은 현재 다양한 실제 환경 조건(토양 조성, 수분, 온도, 미생물 밀도 등)에서의 분해 동역학의 정밀 분석을 추진하고 있으며, 사용 기간 동안은 안정성을 유지하다가 특정 자극에 반응해 분해가 시작되는 ‘프로그래머블 수명 제어’ 기술을 고도화하고 있다. 또한 장기 환경 영향 평가와 국제 안전 기준 확립을 위한 데이터 축적을 병행하고 있으며, 향후 의료 및 환경 응용을 목표로 한 전임상 수준의 안전성 평가와 파일럿 규모 실증 연구를 단계적으로 추진할 계획이다.