

2026. 6. 19.(금) 03:00

보도시점

(국제 엠바고)

배포 2026. 6. 18.(목) 09:00

(2026. 6. 19.(금) 조간)

씨앗을 하나씩 '톡, 톡' 튕겨내는 제비꽃의 비밀, 차세대 유연 로봇 개발 길 밝혀

- 서울대·대구경북과학기술원 공동 연구팀 성과, Science(사이언스)誌 논문 게재
 - 제비꽃 열매 꼬투리의 반원형 구조가 힘을 통제하는 원리 규명
 - 상처 치료 패치부터 생체모사 유연 로봇까지... 차세대 의공학 분야 활용 기대
- 【관련 국정과제】 27. 기초연구 생태계 조성**과 과학기술 인재강국 실현

국내 연구진이 열매 꼬투리가 마르며 접히는 힘으로 씨앗을 튕겨내는 제비꽃의 번식 비밀을 규명하며, 상처 봉합과 종양 절제 등에 활용 가능한 차세대 유연 로봇 개발 가능성을 제시하였다.

과학기술정보통신부(부총리 겸 과기정통부 장관 배경훈, 이하 '과기정통부')는 서울대학교 생명과학부 현유봉 교수·기계공학부 김호영 교수 및 대구경북과학기술원(이하 'DGIST') 로봇 및 기계전자공학과 정소현 교수 공동 연구팀이 제비꽃 열매 꼬투리의 기하학적 구조를 통해 복잡한 장치 없이 힘을 제어하고 씨앗을 순차적으로 튕겨내는 원리를 규명하는데 성공했다고 밝혔다.

과기정통부 개인기초연구(리더연구 및 핵심·신진연구) 및 선도연구센터(SRC) 사업으로 수행한 이번 연구 성과는 세계 최고 권위의 국제학술지인 「사이언스(Science)」에 6월 19일(금) 오전 3시(현지시간 6.18.(목) 14시, 미국 동부 시간)에 게재되었다.

* 논문명 : Viola seed pod architecture shapes sequential, force-augmented pinching

주변에서 흔히 보는 제비꽃은 아주 영리한 번식 전략을 가지고 있다. 일반적인 식물은 열매가 터지면서 내부의 씨앗을 한꺼번에 사방으로 방출하는 폭발적 종자 산포 방식을 취한다.

반면, 제비꽃은 열매 꼬투리*가 마르면서 안쪽으로 오므라드는 힘을 이용해, 내부에 든 씨앗을 ‘하나씩 차례대로 튕겨 발사’하는 독특한 방식을 쓴다.

* 꼬투리 : 속에 씨앗들이 줄지어 들어있는 길쭉한 주머니 모양의 열매 껍질

이처럼 씨앗을 순차적으로 발사하려면 씨앗을 밀어내는 힘의 중심점 역시 씨앗의 위치에 맞춰 이동해야 한다. 이는 현대 로봇공학 기술로도 정밀한 모터나 제어 장치 없이는 구현하기 힘든 난제다. 하지만 제비꽃은 아주 작고 단순한 열매 꼬투리의 기하학적 구조만으로 이를 해결한다.

연구팀은 이 비밀을 풀기 위해 제비꽃 열매 꼬투리의 구조를 정밀 분석하였다. 그 결과, 효율적인 씨앗 발사는 열매 꼬투리가 건조되면서 마치 지퍼가 닫히듯 접히는 ‘지퍼링(zippering)’ 동작 덕분임을 밝혀냈다. 꼬투리는 수분 함량에 따라 접힘을 유도하는 부위와 접힘 과정에서 씨앗에 직접 힘을 전달하는 매우 얇은 막 구조로 이루어져 있다.

실제 제비꽃 시료와 이를 본뜬 인공 장치의 동작을 비교한 결과, 열매 꼬투리의 단면은 힘을 가장 강하게 낼 수 있는 ‘반원형 구조’로 진화해 왔음을 증명하였다. 열매 꼬투리 양 끝의 기하학적 조건과 모양 차이 덕분에 꼬투리가 접힐 때 발생하는 힘이 얇은 막을 타고 씨앗이 있는 특정 지점에만 완벽하게 집중된다. 이 힘의 중심점이 지퍼가 채워지듯 앞으로 점진적으로 이동하며, 나란히 줄 서 있는 씨앗들을 앞에서부터 차례대로 꼬집듯 밀어내는 원리다.

연구팀은 이번 연구를 통해 복잡한 모터나 배터리, 전선 없이도 ‘구조의 힘’만으로 상처 봉합 및 종양 절제 등에 활용 가능한 차세대 유연 로봇을 개발할 가능성을 제시하였다. 이는 식물이 제한된 조건 속에서도 별도의 장치 없이 스스로 최적의 힘을 내는 ‘물리적 지능’을 공학적으로 입증한 것으로서, 향후 고효율 생체모방 공학 기술 개발에 새로운 통찰을 제공할 것으로 기대된다.

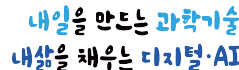
한편, 이번 성과는 과기정통부 기초연구 사업의 성장 사다리(신진-핵심-선도연구센터-리더) 각 단계에 포진한 연구자들이 유기적으로 협업하여 이뤄낸 결실이다.

특히, 각 단계의 연구자들이 힘을 모아 자연의 메커니즘을 공학적으로 규명함으로써, 우리나라의 우수한 연구 역량을 세계에 증명했다는 점에서 더욱 의미가 깊다.

연구를 수행한 서울대 현유봉·김호영 교수와 DGIST 정소현 교수는 “이번 성과는 제비꽃이 최소한의 자원만으로 효율적인 힘을 전달하도록 열매 꼬투리의 구조를 영리하게 진화시켜 왔음을 밝혀낸 것”이라며, “복잡한 장치 없이 디자인만으로 정교한 움직임 구현하는 차세대 소프트 소재 설계는 물론, 상처 치료 패치나 생체모사 유연 로봇 등 의공학 분야 전반에 폭넓게 활용될 것으로 기대한다”고 밝혔다.

과기정통부 김성수 연구개발정책실장은 “이번 성과는 과기정통부 기초 연구 사업의 성장 사다리 각 단계에 있는 연구자들이 협업하여 이뤄낸 기념비적인 결실”이라며, “앞으로도 우수한 연구자들이 서로의 전문성을 더해 세계적 수준의 연구 역량을 발휘할 수 있도록 지원을 아끼지 않을 것”이라고 밝혔다.

담당 부서	연구개발정책실	책임자	과 장	조종영	(044-202-4530)
	기초연구진흥과	담당자	주무관	강준철	(044-202-4537)
	미래인재정책국	책임자	과 장	김동준	(044-202-4830)
	미래인재양성과	담당자	사무관	주재현	(044-202-4831)
유관기관	서울대학교 생명과학부	교신저자	교 수	현유봉	(02-880-6603)
	서울대학교 기계공학부		교 수	김호영	(02-880-9286)
	DGIST 로봇 및 기계전자공학과		교 수	정소현	(053-785-6211)



주요내용 설명

논문명	Viola seed pod architecture shapes sequential, force-augmented pinching
저널명	Science
키워드	Viola(제비꽃), Biomimetic(생체모방), Soft Machine(소프트로봇), Explosive seed dispersal(폭발적 종자 산포)
저자	김청산 박사(제1저자/서울대), 원지현 박사(제1저자/서울대), 김동현(제1저자/서울대), 정소현 교수(교신저자/대구경북과학기술원), 김호영 교수(교신저자/서울대), 현유봉 교수(교신저자/서울대)

1. 연구의 필요성

- 제비꽃은 열매 꼬투리가 마르며 접히는 힘을 이용해 씨앗을 하나씩 튕겨 발사하는 독특한 번식 전략을 갖고 있음.
- 씨앗을 차례로 발사하려면 필요한 힘이 씨앗의 위치에 맞춰 이동해야 하는데, 이는 생각보다 복잡한 기계적 과제임
- 제비꽃은 이러한 과제를 놀라울 정도로 작고 단순한 열매 꼬투리 구조만으로 해결함

2. 연구내용

- 제비꽃 열매 꼬투리의 ‘지퍼링’ 동작에 의한 폭발적 종자 산포
 - 제비꽃 열매 꼬투리의 ‘지퍼링’ 동작
 - 제비꽃 종자 산포 방식의 기계적 특징점

- 힘 발생에 최적화된 반원형 구조로부터 유래하는 제비꽃 열매 꼬투리의 2차원 접힘
 - 제비꽃 열매 꼬투리의 횡단면 2차원 구조
 - 접힘 힘 전달 최적화 반원형 이중층 구조
- 제비꽃 열매 꼬투리 ‘지퍼링’ 동작에 의한 전달 힘 증강 및 증강 지점의 이동
 - 제비꽃 열매 꼬투리의 3차원 기하학적 구조에 의한 ‘지퍼링’ 동작
 - 접힘 운동에 수반하는 꼬투리 신장 및 막 응력에 의한 전달 힘 증강
- 제비꽃 열매 꼬투리 모사 ‘지퍼링’ 액츄에이터
 - 제비꽃 열매 꼬투리 모사 상처 봉합 패치
 - 제비꽃 열매 꼬투리 ‘지퍼링’ 동작 모사 조직 절제 소프트 기계

3. 연구결과

- 제비꽃은 열매가 터지면서 씨앗을 한꺼번에 방출하는 일반적인 폭발적 종자 산포 방식과 달리, 열매 꼬투리의 접힘 동작에서 발생하는 힘을 이용해 씨앗을 하나씩 튕겨 내보내는 독특한 번식 전략을 진화시켰다.
- 이러한 종자 산포는 열매 꼬투리가 건조되는 과정에서 나타나는 ‘지퍼링(zippering)’ 동작에 의해 구현되며, 종자 확산 과정에서 높은 에너지 효율을 제공한다.
- 제비꽃의 높은 종자 산포 효율은 매우 작고 단순한 구조의 열매 꼬투리만으로도 씨앗을 효과적으로 분산시킬 수 있게 하지만, 씨앗을 하나씩 선택적으로 방출하기 위해서는 정교한 힘 전달 메커니즘이 필요하다.
- 씨앗을 하나씩 꼬집어 쏘아내는 방식은 생각 외로 복잡한 기계적 과제를 요구한다.

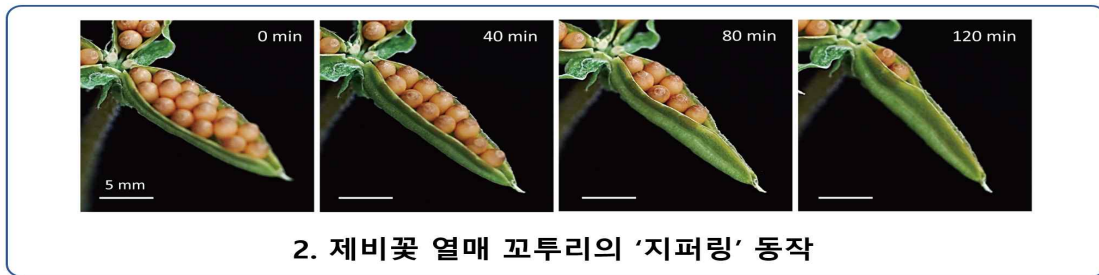
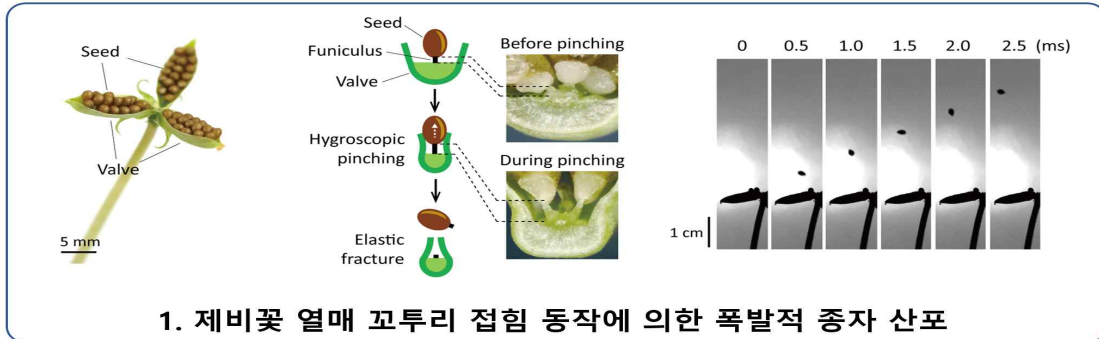
- 서울대 현유봉-김호영교수 및 DGIST 정소현 교수 연구팀은 제비꽃 열매 꼬투리의 세포생물학적·기계공학적 구조를 분석한 결과, 제비꽃이 단순한 기하학적 원리를 활용해 종자 산포에 필요한 복잡한 힘 전달 과정을 구현하고 있음을 규명하였다.
- 제비꽃 열매 꼬투리는 수분 함량 변화에 따라 접힘 동작을 유도하는 액추에이터(actuator) 부위와, 접힘 과정에서 씨앗에 직접 힘을 전달하는 매우 얇은 막 구조로 구성되어 있다.
- 김청산, 김동현, 원지현 연구원이 공동 제1저자로 참여한 본 연구팀은 실제 생체 시료와 이를 모사한 인공 소자의 거동을 비교·분석한 결과, 제비꽃 열매 꼬투리의 액추에이터 형상이 제한된 구조적 자원만으로도 최대의 접힘 힘을 생성할 수 있도록 최적화된 방향으로 진화해 왔음을 입증하였다.
- 또한 열매 꼬투리 양 말단의 기하학적 조건과 형상 차이가 제비꽃 특유의 ‘지퍼링(zippering)’ 동작을 결정할 뿐만 아니라, 씨앗을 압박하는 막 구조에 ‘막 응력(membrane stress)’을 유도함으로써 종자 산포에 필요한 힘이 효과적으로 집중되도록 설계되어 있음을 밝혀냈다.
- 특히 이러한 힘 집중 부위는 지퍼링 동작이 진행됨에 따라 점진적으로 이동하며, 씨앗을 하나씩 순차적으로 방출하는 제비꽃 고유의 종자 산포 방식을 구현하는 것으로 나타났다.
- 연구팀은 이번 연구를 통해 규명한 제비꽃 열매 꼬투리의 기계적 작동 원리를 바탕으로, 상처 봉합 및 종양 절제 등에 활용 가능한 차세대 소프트 로봇 개발 가능성도 제시하였다.
- 이번 연구는 식물이 제한된 구조적 자원만으로도 정교한 운동 기능을 구현할 수 있는 체화된 물리적 지능(embodied physical intelligence)을 가지고 있음을 보여주는 사례로, 고효율 생체모방 공학 기술 개발에 새로운 통찰을 제공할 것으로 기대된다.
- 한편 이번 연구는 서경배과학재단, 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 리더연구자지원사업 및 중견연구자지원사업, 식물가소성센터의

지원을 받아 수행되었으며, 연구 성과는 세계적 권위의 학술지 Science에 6월 18일 게재되었다.

4. 연구성과/기대효과

- 이번 연구는 제비꽃이 최소한의 자원만으로도 효율적으로 힘을 전달하는 ‘지퍼링(zippering)’ 동작을 구현할 수 있도록 열매 꼬투리의 기하학적 구조를 영리하게 진화시켜 왔음을 밝혀냄.
- 제비꽃 열매 꼬투리 동작의 기하학적 원리는 간단한 디자인만으로도 부드러운 소재의 정교한 움직임과 힘을 구현하는 차세대 소프트 소재 설계에 새로운 영감을 제공하고, 특히 상처 치료 패치와 같은 의공학 소재는 물론, 생체모사 소프트 로봇과 의료기기 개발에도 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 전망됨.

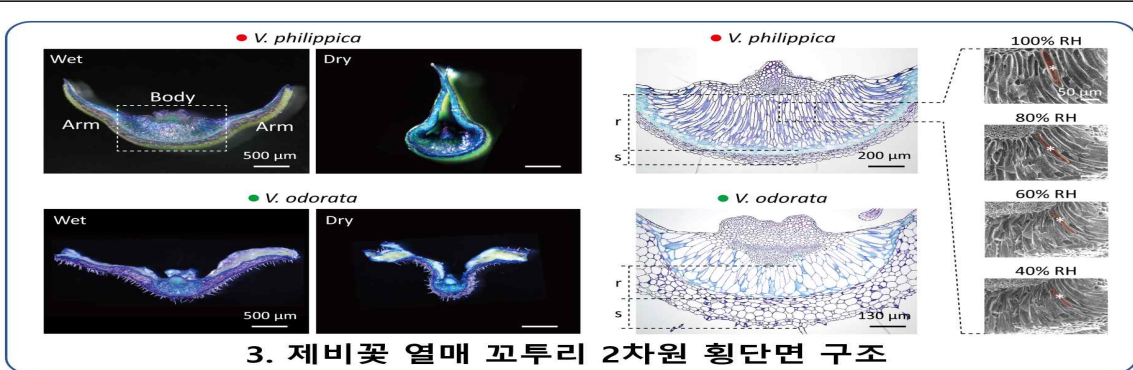
그림 설명



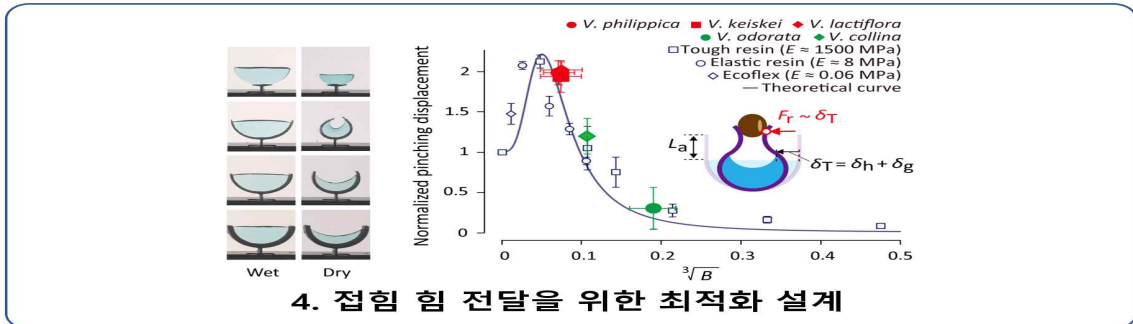
(그림1) 제비꽃은 열매가 터지면서 씨앗을 한꺼번에 방출하는 일반적인 폭발적 종자 산포 방식과 달리, 열매 꼬투리의 접힘 동작에서 발생하는 힘을 이용해 씨앗을 하나씩 튕겨 내보내는 독특한 번식 전략을 진화시켰다

(그림2) 이러한 종자 산포는 열매 꼬투리가 건조되는 과정에서 나타나는 '지퍼링(zippering)' 동작에 의해 구현되며, 종자 확산 과정에서 높은 에너지 효율을 제공한다

그림설명 및 그림제공 : 서울대학교 현유봉 교수



3. 제비꽃 열매 꼬투리 2차원 횡단면 구조

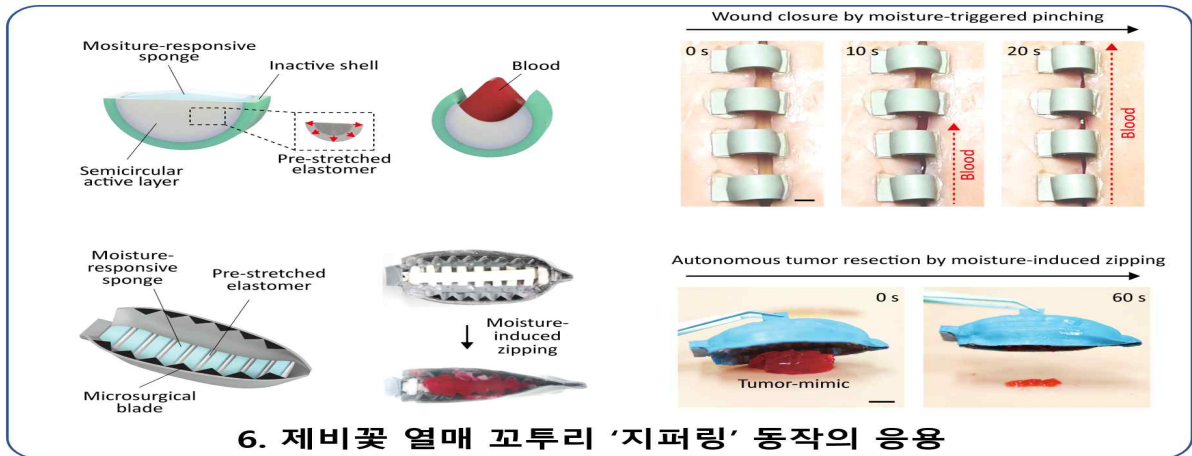
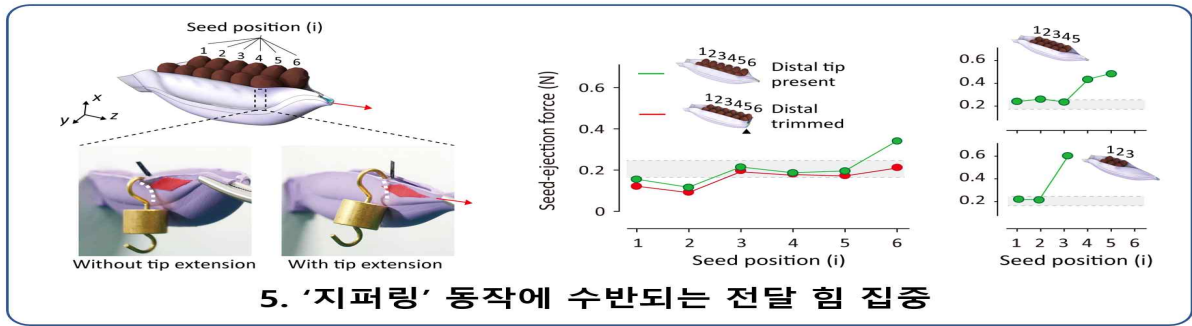


4. 접힘 힘 전달을 위한 최적화 설계

(그림3) 제비꽃 열매 꼬투리는 수분 함량 변화에 따라 접힘 동작을 유도하는 액추에이터(actuator) 부위와, 접힘 과정에서 씨앗에 직접 힘을 전달하는 매우 얇은 막 구조로 구성되어 있다

(그림4) 김청산, 김동현, 원자현 연구원이 공동 제1저자로 참여한 본 연구팀은 실제 생체 시료와 이를 모사한 인공 소자의 거동을 비교·분석한 결과, 제비꽃 열매 꼬투리의 액추에이터 형상이 제한된 구조적 자원만으로도 최대의 접힘 힘을 생성할 수 있도록 최적화된 방향으로 진화해 왔음을 입증하였다

그림설명 및 그림제공: 서울대학교 현유봉 교수



(그림5) 열매 꼬투리 양 말단의 기하학적 조건과 형상 차이가 제비꽃 특유의 '지퍼링(zippering)' 동작을 결정할 뿐만 아니라, 씨앗을 압박하는 막 구조에 '막 응력(membrane stress)' 을 유도함으로써 종자 산포에 필요한 힘이 효과적으로 집중되도록 설계되어 있음을 밝혀냈다

(그림6) 연구팀은 이번 연구를 통해 규명한 제비꽃 열매 꼬투리의 기계적 작동 원리를 바탕으로, 상처 봉합 및 종양 절제 등에 활용 가능한 차세대 소프트 로봇 개발 가능성도 제시하였다

그림설명 및 그림제공: 서울대학교 현유봉 교수

연구자 소개

<현유봉, 교신저자>



1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 생명과학부
- 전 화 : 02-880-6603

2. 학력

- 1997 ~ 2002 학사 : 서울대학교 생명과학부
- 2002 ~ 2008 박사 : 서울대학교 생명과학부

3. 경력사항

- 2008 ~ 2011 박사후연구원 : 서울대학교 생명과학부
- 2012 ~ 2019 박사후연구원 : 막스플랑크 식물육종연구소
- 2020 ~ 2026 조교수 : 서울대학교 생명과학부
- 2026 ~ 현재 부교수 : 서울대학교 생명과학부

4. 전문분야 정보

- 분자생물학
- 식물과학
- 유전체학
- 진화생물학

5. 연구지원 정보

- 2026 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(핵심연구)
- 2021 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 집단연구지원(선도연구센터)

연구자 소개

<김호영, 교신저자>



1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 기계공학부
- 전 화 : 02-880-9286

2. 학력

- MIT 기계공학 박사 (1999)
- MIT 기계공학 석사 (1996)
- 서울대학교 기계공학 학사 (1994)

3. 경력사항

- 미국물리학회 석학회원 (2017)
- 대한기계학회 유체공학부문 부회장 (2020-)
- Harvard University 방문연구원 (2011-2012)
- Harvard University 박사후연구원 (2004)

4. 수상경력

- 한국기계기술단체총연합회 2020 올해의 10대 기계기술 (2020)
- 대한기계학회 남헌학술상 (2018)
- 대한기계학회 가산학술상 (2014)

5. 전문분야 정보

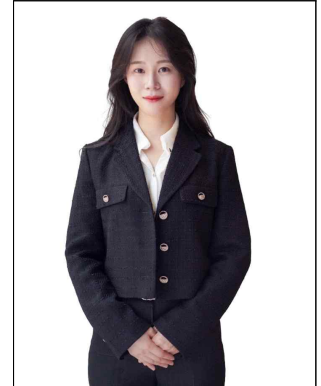
- 마이크로/나노유체역학/생체모방공학
- 소프트매터/ 소프트기계

6. 연구지원 정보

- 2018 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(리더연구)

연구자 소개

<정소현, 교신저자>



1. 인적사항

- 소 속 : 대구경북과학기술원, 로봇및기계전자공학과
- 전 화 : 053-785-6211

2. 학력

- Ph. D. in Seoul National University, Korea

3. 경력사항

- Mechanical Engineering
- Robotic Engineering

4. 전문분야 정보

- Macro robots
- Micro robots
- Robot mechanism
- Microfluid Mechanics
- Soft Matter Physics
- Poromechanics
- Biomimetic Systems

5. 연구지원 정보

- 2025 ~ 2026 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(신진연구)