

★ 2026년 4월 4일(토) 조간 (온라인 4.3.(금), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

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

<자료문의> 전남대학교 고분자공학과 김형우 교수(062-530-1775)

## 빛으로 연료를 생성하는 마이크로 로봇 구현 - 광화학 기반 '연료 저장 분자' 개발로 자율 구동 소프트 로봇 기술 제시 -

- 국내 연구진이 빛을 활용해 연료를 생성하고 스스로 움직일 수 있는 소프트 마이크로 로봇을 개발해 주목받고 있다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 전남대학교 김형우 교수 연구팀과 미시간대학교 압돈 페나-프란체슈(Abdon Pena-Francesch) 교수 연구팀이 국제 공동연구를 통해 빛으로 연료를 생성·방출할 수 있는 연료 저장 분자를 개발하고, 이를 기반으로 자율적으로 구동하는 마이크로 로봇 기술을 선보였다고 밝혔다.
- 이번 연구 성과는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 글로벌R&D 지원사업으로 수행됐으며, 화학 분야 국제학술지 ‘어드밴스드 머티리얼즈(Advanced Materials)’에 2월 28일 게재되어 표지로 선정됐다.
- 마이크로 및 소프트 로봇은 체내 약물 전달, 환경 모니터링, 정밀 제조 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높은 차세대 기술로 주목받고 있다.
- 그러나 로봇의 크기가 마이크로 수준으로 작아질수록 기존 배터리나 전기적 구동 장치를 적용하기 어렵고, 외부 에너지

공급이나 연료에 의존해야 한다는 한계가 있다.

- 연구진은 이러한 한계를 극복하기 위해, 로봇 구조체 자체가 에너지를 저장하고 필요 시 방출하는 ‘내재 에너지(embodied energy)’ 개념에 주목했다. 이를 바탕으로 빛을 이용해 연료를 생성하는 광화학 기반 연료 운반 분자를 설계했다.
- 해당 분자는 물에서 표면장력 차이를 유도하는 연료 물질인 헥사플루오로이소프로판올(hexafluoroisopropanol, HFIP)을 자외선에 반응하는 오르토-니트로벤질(*o*-nitrobenzyl, ONB) 유도체와 결합한 구조로 설계되어, 연료를 안정적으로 저장하면서도 필요시 자외선 조사에 의해 분자가 광분해되어 현장에서 연료를 생성할 수 있도록 한다.
- 방출된 연료는 물과의 표면장력 차이에 의해 마랑고니(Marangoni) 흐름\*을 형성해 액체 내에서 입자의 이동을 유도하는 마이크로 펌프 역할을 수행한다.
- \* 마랑고니(Marangoni) 흐름: 액체 표면에서 표면장력의 차이가 발생할 때, 그 차이를 따라 유체가 이동하는 현상.
- 연구진은 이를 이용해 고분자 복합체 필름을 형성하거나 코팅함으로써, 빛의 켜짐/꺼짐에 따라 로봇의 구동을 제어하고, 자기장을 통해 이동 방향을 조절할 수 있는 새로운 마이크로 로봇 구동 방식의 가능성을 제시했다.
- 김형우 교수는 “해당 기술은 마이크로 로봇뿐만 아니라 능동 소재, 미세유체 시스템 등 다양한 분야에 활용될 수 있다”며, “향후 근적외선 기반 시스템으로 확장될 경우 의료용 마이크로 로봇 개발에도 기여할 것으로 기대된다”고 밝혔다.

## 주요내용 설명

<작성 : 전남대학교 김형우 교수>

논문명	Photochemical Fuel Carrier Molecules for Robotic Embodied Energy
저널명	Advanced Materials
키워드	active matter (동적 물질), embodied energy (내재 에너지), microrobotics (소형로봇), photoresponsive molecules (광반응성 분자), self-immolative (자기희생 구조), surface tension (표면장력)
DOI	<a href="https://doi.org/10.1002/adma.202520447">https://doi.org/10.1002/adma.202520447</a>
저자	김형우 교수(교신저자/전남대학교), 압돈 페나-프란체슈 (Abdon Pena-Francesch) 교수(교신저자/미시간대학교) 추치 황(Chuji Huang) 박사과정(공동제1저자/미시간대학교), 정송아 박사(공동제1저자/전남대학교), 김지우 박사과정(공동저자/전남대학교), 카냐라트 만탈라 (Kanyarat Mantala) 박사과정(공동저자/미시간대학교), 쯤하오 장 (Zenghao Zhang) 박사과정(공동저자/미시간대학교)

### 1. 연구의 필요성

- 마이크로 및 소프트 로봇은 체내 약물 전달, 환경 모니터링, 정밀 제조 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높은 차세대 기술로 주목받고 있다.
- 그러나 로봇의 크기가 마이크로 수준으로 작아질수록 기존 배터리나 전기적 구동 장치를 적용하기 어렵다는 한계가 존재하며, 대부분의 마이크로 로봇 시스템은 외부에서 지속적으로 에너지를 공급하거나 주변 환경에 존재하는 연료를 이용해야 하므로, 장시간 안정적으로 작동하기 어렵고 적용 환경도 제한적이다.
- 이러한 문제를 해결하기 위해 로봇 구조체 자체가 에너지를 저장하고 필요할 때 방출할 수 있는 '내재 에너지 (embodied energy)' 개념의 소재 시스템에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

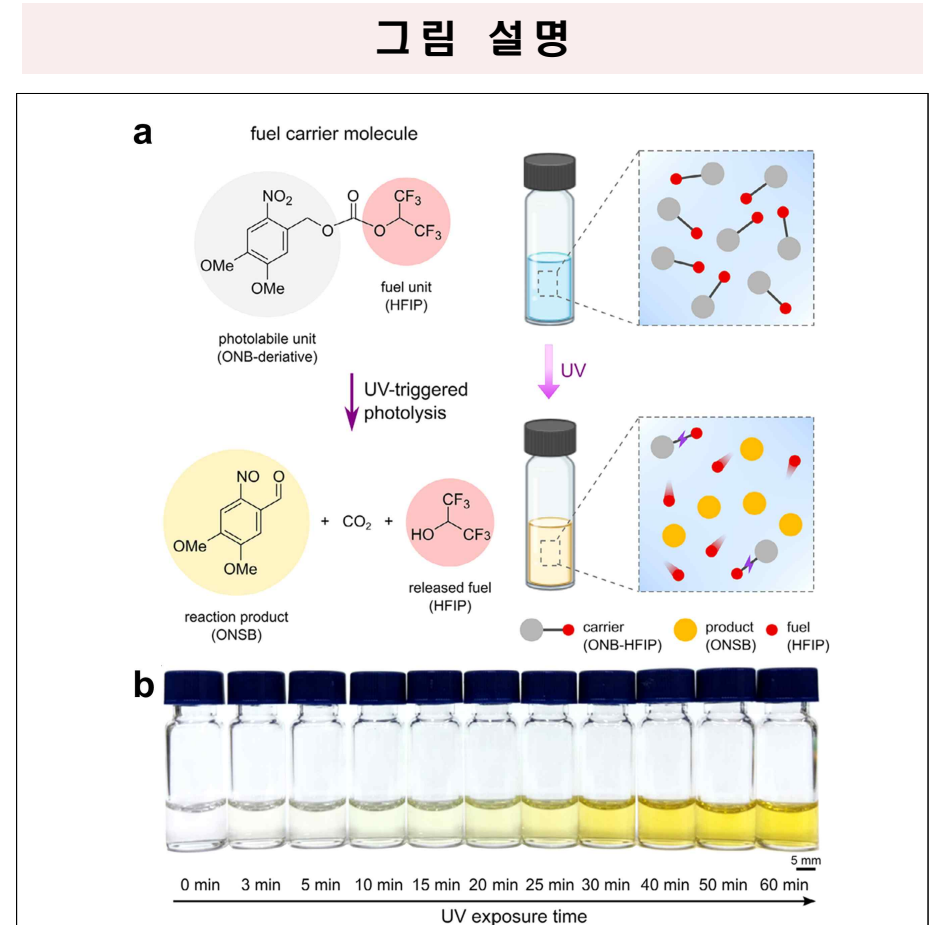
- 특히, 빛은 공간적으로 정밀한 제어가 가능하고 비접촉 방식으로 에너지를 전달할 수 있다는 장점이 있어 마이크로 시스템을 구동하기 위한 이상적인 자극으로 평가된다.
- 따라서 본 연구진은 빛을 이용해 필요할 때 화학적 연료를 생성하고 이를 통해 로봇 구동 에너지를 제공할 수 있는 새로운 소재와 구동 원리를 개발하였다.

### 2. 연구내용

- 본 연구진은 빛을 이용해 연료를 생성하고 방출할 수 있는 광화학 기반 연료 운반 분자를 설계하여 로봇 구조체에 에너지를 저장하는 새로운 소재 시스템을 개발하였다.
- 해당 분자는 물에서 표면장력 차이를 형성하는 연료인 헥사플루오로이소프로판올(hexafluoroisopropanol, HFIP)을 자외선에 반응하는 오르토-니트로벤질(*o*-nitrobenzyl, ONB)와 결합하여 설계하였다.
- 이를 통해 연료의 손실이나 분자 분해 없이 안정적으로 저장할 수 있으며, 필요 시 자외선 조사에 의해 광분해되어 연료를 현장에서 생성할 수 있다.
- 방출된 연료 분자는 물과의 표면장력 차이로 인해 마랑고니 (Marangoni) 흐름\*을 형성하여 액체 매질에서 입자를 이동시키는 마이크로 펌프로 사용된다.  
\* 마랑고니(Marangoni) 흐름: 액체 표면에서 표면장력의 차이가 발생할 때, 그 차이를 따라 유체가 이동하는 현상.
- 또한, 고분자 복합체 필름을 형성하여 광화학 기반 모터로 사용하거나 기판에 코팅하여 마이크로 로봇을 설계함으로써 빛의 온/오프 스위칭을 통해 마이크로 로봇의 구동을 조절하고, 자기장으로 방향을 조절해 마이크로 로봇이 다양한 궤적을 따라 이동할 수 있다.
- 본 연구는 해당 과정을 통해 외부 연료 공급 없이도 빛 자극만으로 로봇이 자율적으로 이동할 수 있음을 실험적으로 입증하고 광화학 반응 기반의 새로운 마이크로 로봇 구동 전략을 제시하였다.

### 3. 연구성과/기대효과

- 본 연구에서는 로봇 구조체 자체가 화학적 에너지를 저장하고 필요할 때 빛을 이용해 방출하는 내재 에너지 기반 구동 전략을 제시함으로써 기존 마이크로 로봇의 한계인 외부 연료 및 에너지 공급의 의존성을 극복하였다.
- 특히 빛을 이용한 비접촉 방식의 에너지 전달은 정밀한 공간 제어가 가능하고 외부 환경에 대한 영향을 최소화할 수 있어 다양한 응용 가능성을 제시할 수 있다.
- 개발된 광화학 구동 연료 시스템은 마이크로 로봇뿐만 아니라 능동소재, 미세 유체 시스템, 자가 구동 마이크로 장치 등 다양한 분야에 활용될 수 있다.
- 더 나아가, 다양한 광반응성 부위를 도입하여 녹색광 또는 근적외선을 이용한 분해 메커니즘을 도입함으로써 체내 약물 전달용 마이크로 로봇, 차세대 소프트 로봇 플랫폼 등 의료, 환경, 공학 분야에 폭넓게 적용하여 향후 빛 기반 화학 에너지 제어 기술을 활용한 새로운 형태의 스마트 소재 및 로봇 기술 개발을 기대할 수 있다.

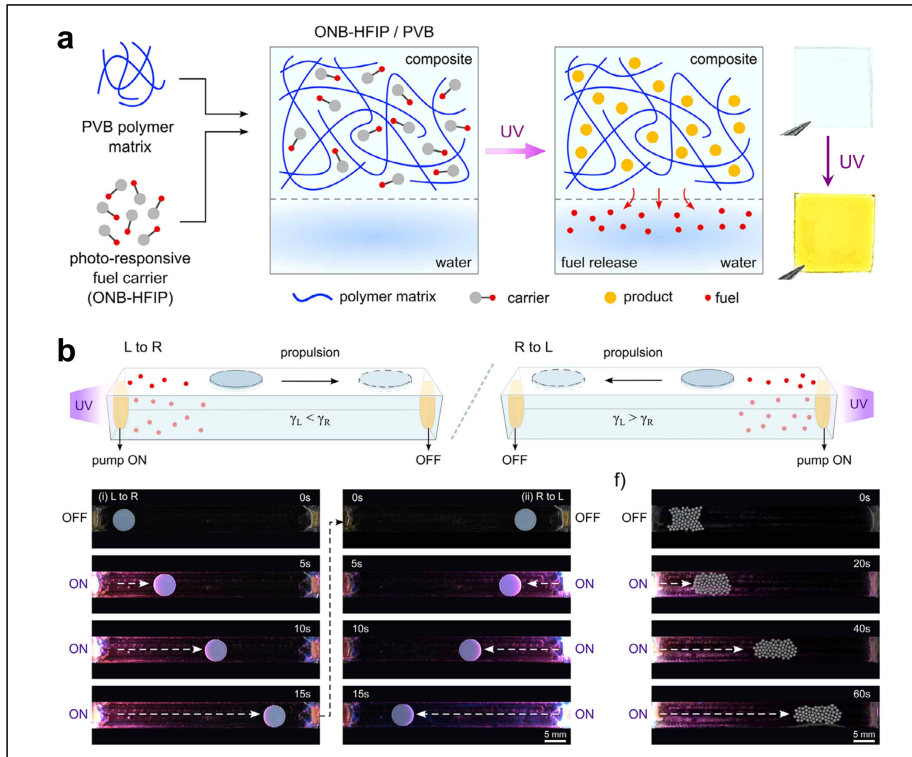


(그림1) 광화학 기반 연료 운반 분자의 설계 및 빛을 이용한 분자 분해 거동

(그림1a) 헥사플루오로이소프로판올 (hexafluoroisopropanol, HFIP) 연료 분자와 광반응성 오르토-니트로벤질 (*o*-nitrobenzyl, ONB) 유도체를 결합하여 광반응성 연료 운반 분자를 설계함. 연료 운반 분자는 자외선 조사에 의해 분해됨.

(그림1b) 용액 상태에서 연료 운반 분자의 분해에 따른 색 변화가 관찰됨. 자외선 조사 시간이 증가할수록 분해가 점차 진행됨.

그림설명 및 그림제공 : 전남대학교 김형우 교수

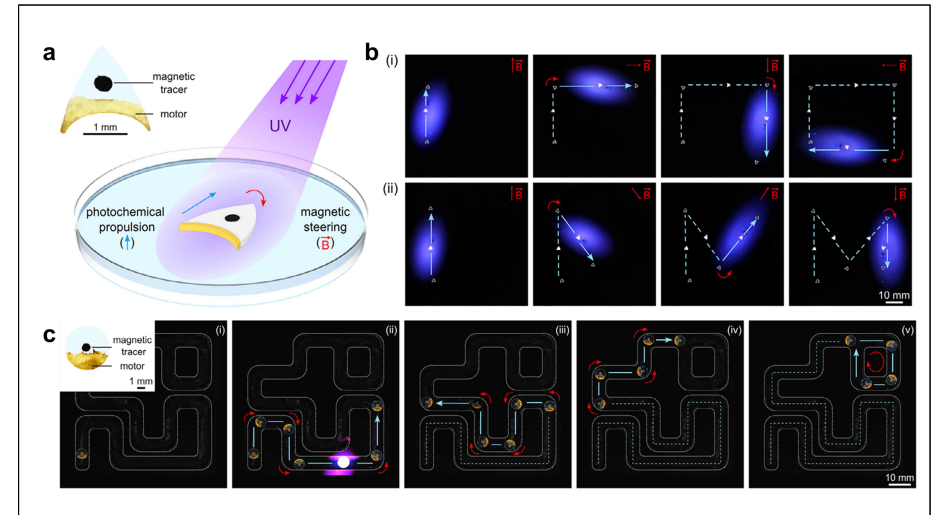


(그림2) 고분자 복합체 필름의 분해에 따른 연료 방출 메커니즘 및 광분해성 마이크로 펌프 성능

(그림2a) 연료 운반 분자는 고분자 매트릭스에 통합되어 고분자 복합체 필름을 형성하고 고체 상태에서 자외선 조사를 통해 분해되어 연료 분자를 방출함.

(그림2b) 고분자 복합체 필름을 마이크로 펌프로 적용하여 자외선 조사에 따라 연료 분자를 방출함으로써 물체를 이동시킴.

그림설명 및 그림제공: 전남대학교 김형우 교수



(그림3) 광화학 기반 연료 방출을 통한 마이크로 로봇의 추진 및 자기장을 이용한 방향성 제어

(그림3a) 폴리에틸테레프탈레이트 (Polyethylene terephthalate, PET) 필름 기관에 연료 운반 분자를 코팅하고 자성 입자를 포함시켜 마이크로 로봇을 제작함.

(그림3b) 물 위에서 마이크로 로봇에 자외선을 조사하여 연료 분자를 방출함으로써 마이크로 로봇이 앞으로 전진하며 자기장을 이용해 방향을 조절함.

(그림3c) 자외선과 자기장을 조절하여 구동하는 마이크로 로봇이 복잡한 궤적을 따라 이동함.

그림설명 및 그림제공: 전남대학교 김형우 교수

# 연구 이야기

<작성 : 전남대학교 김형우 교수>

## □ 이번 성과, 무엇이 다른가?

기존 마이크로 로봇 관련 연구에서는 연료를 지속적으로 공급하거나 전기적·자기적 장치를 이용해 구동하는 방식을 주로 이용하여 시스템의 복잡도가 높고 적용 환경이 제한적이라는 한계가 있습니다. 또한 일부 자가구동 시스템은 주변 환경에 존재하는 연료에 의존하기 때문에 안정적인 제어가 어렵고 장시간 구동에도 제약이 있습니다. 해당 연구에서는 로봇 구조체 자체에 화학적 에너지를 저장하여 빛을 이용해 연료를 생성하는 '내재 에너지 기반 구동' 개념을 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차별점이 있다고 할 수 있습니다. 특히 연료 운반 분자를 사전에 저장하여 광자극으로 현장에서 생성하는 전략을 통해 효율적인 에너지 전달이 가능하며 안정적인 에너지 공급이 가능합니다. 또한 빛의 온오프 제어를 통해 구동을 정밀하게 조절할 수 있으며, 자기장을 결합하여 방향 제어까지 동시에 구현함으로써 기존 시스템 대비 높은 제어성과 확장성을 확보하였습니다.

## □ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

본 연구에서 구현한 시스템을 실용화하기 위해서는 광자극을 자외선에서 가시광선이나 근적외선으로 확장하는 것입니다. 자외선은 투과 깊이가 낮고 생체 적용에 한계가 있기 때문에 실제 의료나 환경 분야로 확장하기 위해서는 보다 안전하고 깊이 전달이 가능한 광원으로의 전환이 필요합니다. 이외에도 연료 방출 속도를 제어할 수 있는 시스템을 도입하거나 이동, 방향 제어를 포함한 보다 정밀한 시스템을 통합한다면 의료 및 환경 분야에 적용할 수 있는 마이크로 로봇으로 발전시킬 수 있을 것으로 예상됩니다.