

# 지스트-고려대, 얼룩말 무늬 응용해 구부러지고 늘어나는 섬유형 발전시스템 공동 개발

- 검정색과 흰색 색깔 차이 활용...단순한 수평 구조로 섬유 위 구현 가능
- 최대 22도 온도차 나는 열전현상 이용 24시간 전기 생산, **Science Advances** 게재



▲ (왼쪽부터) 지스트 송영민 교수, 고려대 황석원 교수, 지스트 허세연 박사과정생 지스트(광주과학기술원, 총장 김기선)와 고려대 연구진이 얼룩말 무늬에서 착안한 수평 방향의 발전(發電) 메커니즘을 생분해성 나노필름 소재에 적용해 구부러지고 늘어나는 섬유형 발전시스템을 개발했다.

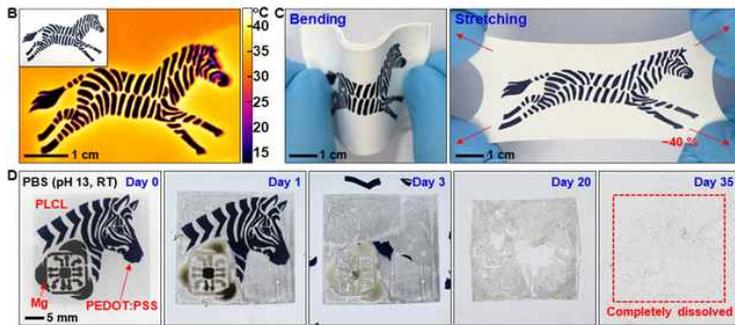
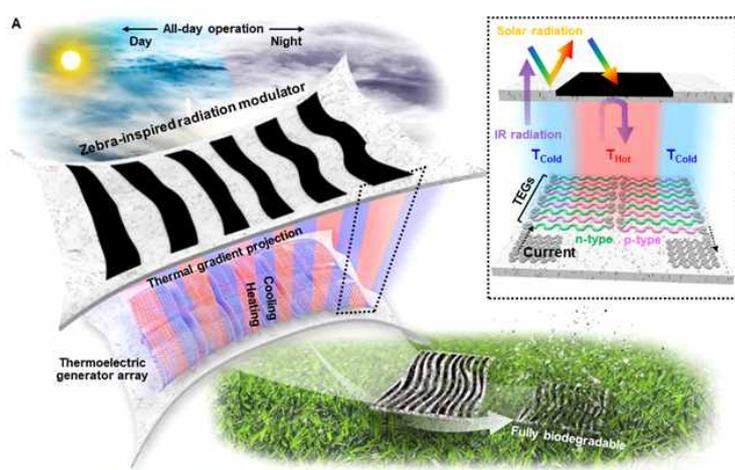
필름 소재 표면의 색깔 차이(검정색-흰색)에 따라 발생하는 온도 차로 전기를 발생시키는 '열전(熱電) 현상\*'을 이용한 것으로, 기존의 복잡한 열전소재와 달리 얼룩말 무늬와 같은 단순한 수평 구조를 적용하여 유연성과 신축성이 필요한 다양한 환경에 활용될 것으로 기대된다.

또한 24시간 쉬지 않고 전기를 생산할 수 있으며 생리식염수에서 녹아 없어지는 생분해성 소재를 사용해 차세대 친환경 에너지원으로 활용이 기대된다.

이번 연구 성과는 세계적인 학술지 사이언스(Science)의 자매지인 「사이언스 어드밴시스(Science Advances)」에 2023년 2월 1일 온라인 게재됐다.

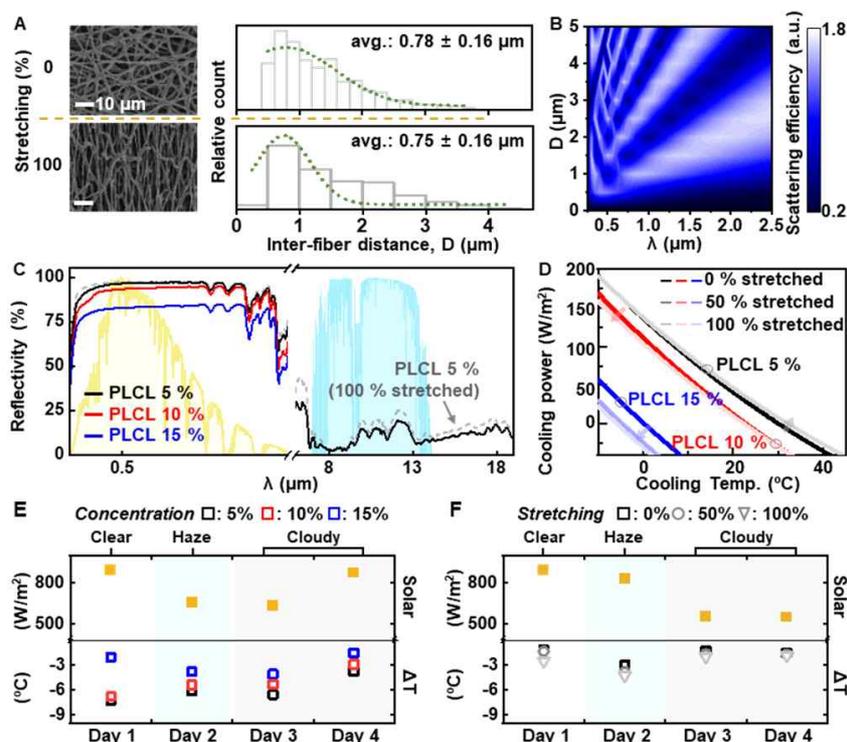
\* 열전 현상: 온도(열에너지)의 차이로부터 전위차가 발생하여 전류가 흐르게 되는 현상. 소재 안과 밖에 온도차(열)가 생기면 전하가 흐르는 힘이 생기는데, 온도차가 크고 전하가 잘 흐를수록 열전발전이 잘 이루어진다. 수력발전에서 폭포 높이(낙차)가 높고 물이 많이 흐를수록 전력 생산량이 많은 원리와 흡사하다.

연구팀은 색깔 차이로 인해 평면에서도 가열(검정색)과 냉각(흰색) 영역이 뚜렷한 얼룩말 무늬에 착안했다. 얼룩말 무늬를 생분해성 나노섬유 필름 위에 입히고 광학 계산을 통해 가장 효율적으로 열을 흡수, 방출하는 구조를 설계했다. 스펙트럼 분석 결과 가열과 냉각 영역 모두 24시간 동안 지속적인 온도 차이가 유지되었다.



▲ A. 24시간 발전 가능한 생분해성 유연/신축 온도 제어 시스템의 개략도. 복사 가열 얼룩말 무늬가 패턴된 신축성 있는 복사 냉각 나노섬유 필름으로 수평 방향의 온도 차를 형성하고, 생분해성 실리콘 나노막 열전 소자가 이 열에너지를 전기에너지로 변환하게 됨. B. 얼룩말 무늬로 패턴된 필름의 열 적외선 사진. 흰색의 나노섬유 필름은 높은 태양광 반사도와 대기의 창 영역에 대한 방사도를, 검정색의 얼룩말 무늬 패턴은 높은 태양광 흡수도와 대기의 창 영역에 대한 방사도를 보인다는 것을 의미함. C. 개발된 시스템의 필름의 벤딩 및 신축에 대한 높은 변형도. D. 발전 시스템의 주요 구성 성분에 대한 생리식염수 내에서의 생분해성 관찰.

야외의 다양한 날씨 환경 조건에서 실험한 결과 흰색 부분은 대기 온도보다 최대 약 8°C까지 낮아졌고 검은색 부분은 주변 대기 온도보다 최대 14°C까지 상승하여 최대 22도의 온도 차를 얻을 수 있었으며, 이 온도 차를 최대 약 6μW/m<sup>2</sup>의 전기에너지로 변환하는 데 성공했다.

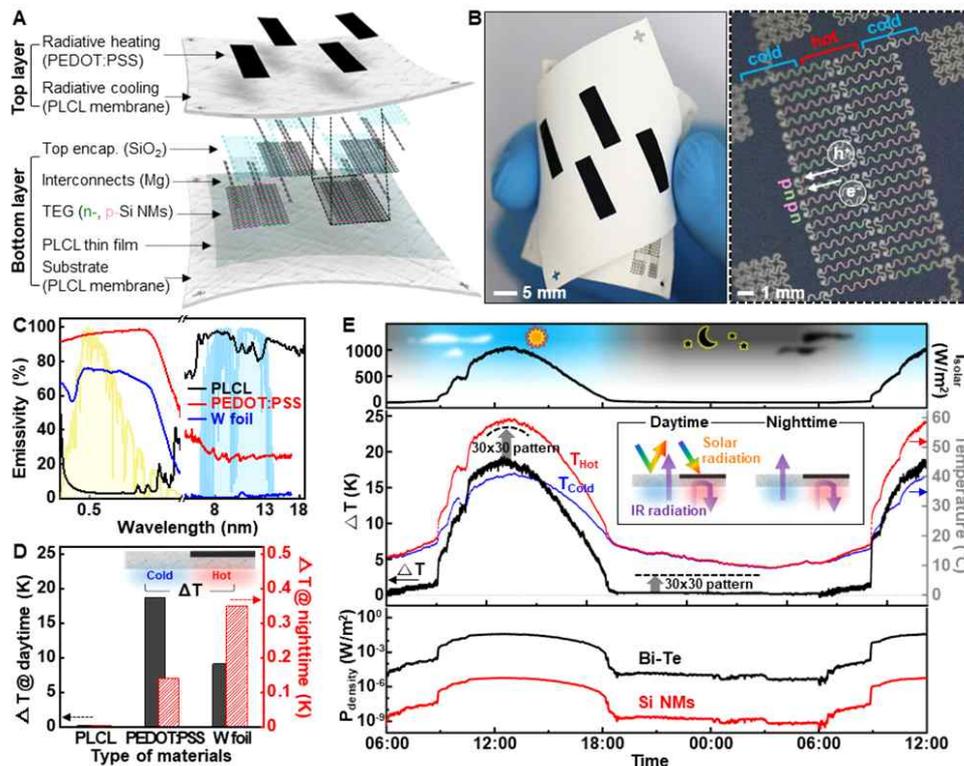


▲ A. 복사 냉각 나노섬유 필름의 신축 전후의 공극 (pore) 분포도. B. 공극 분포도에 따른 태양광에 대한 산란효율. 다양한 공극 분포를 갖는 필름이 태양광 스펙트럼의 전 범위에서 높은 반사도를 가짐을 의미함. C. 고분자의 농도에 따른 나노섬유 필름의 높은 태양광(노랑색 영역) 반사도와 대기의 창 영역(파랑색 영역)에서의 방사도를 나타내는 광학 분석 결과. D. 광학 분석을 토대로 계산된 냉각 성능. E, F. 다양한 날씨 및 변형 하에서의 필름의 냉각 성능 평가. 최대 약 8°C의 냉각 성능을 보이며, 변형 하에서도 냉각 성능은 유지됨.

이는 저전력 센서를 구동할 수 있는 수준으로 향후 생체 신호 측정 웨어러블, 산업 현장의 고온 감지 센서 및 배터리 없는 자율주행용 거리 감지 센서 등에 활용될 것으로 기대된다.

특히 사각형 모양 필름을 네 귀퉁이에서 잡아당겨 약 1.3배로 늘린 상태에서도 발전 성능이 유지되어 향후 다양한 환경에서 적용 가능할 것으로 주목된다.

평면에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 구부러지고 늘어나는 물리적 변형에도 안정적으로 전기를 생산할 수 있는 혁신적인 시스템으로, 열전소재의 활용도를 획기적으로 높일 것으로 기대된다. 기존에는 열이 상부층에서 방출되고 하부층에서 흡수되는 복잡한 구조로 설계되어 비효율적이고 상용화가 어려웠다.



▲ A. 생분해성 유연/신축 발전 시스템의 전개도. 태양광 및 대기의 창 영역을 제어해서 온도 차를 형성하는 윗면과 열에너지를 전기에너지로 변환하는 실리콘 나노막 기반 열전 소자가 전사된 아랫면으로 구분됨. B. 제작된 발전 시스템 사진과 (왼쪽) n 타입 및 p 타입의 실리콘 나노막으로 구성된 열전 소자의 확대 사진 (오른쪽). C. 복사 냉각 고분자와 복사 가열 소재(PEDOT:PSS, W foil)의 광학 분석 결과. 복사 냉각 고분자와는 달리, 복사 가열 소재는 높은 태양광 방사도(=흡수도)와 낮은 대기의 창 영역 방사도를 가짐. D. 복사 가열 소재에 따른 얼룩말 패턴의 밤낮 온도 차 형성 결과. E. 외부 환경에서의 실시간 발전 성능 측정. 위는 태양 일조량을, 중간은 형성된 온도 차를, 아래는 온도 차가 전기에너지로 변환된 전력량을 나타냄.

송영민 교수는 “이번 연구는 유연한 전자소자를 구현하는 공학과 광학의 융합 연구의 성과로, 그동안 구현하기 힘들었던 수평 방향의 온도 제어에 성공하여 유연성과 신축성을 지닌 발전시스템을 제작했다는 데 의의가 있다”고 말했다.

지스트 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수와 고려대학교 KU-KIST 융합대학원 황석원 교수가 지도하고 지스트 허세연 박사과정생, 고려대 한원배, 김동학 박사가 공동수행한 이번 연구 결과는 한국연구재단 기초연구실후속연구사업, 나노소재기술개발사업, 미래유망 융합기술 파이오니아사업, 미래소재디스커버리사업의 지원을 받아 수행되었다.

## 논문의 주요 정보

### 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Science Advances (Impact factor: 14.957)
- 논문명 : Zebra-inspired stretchable, biodegradable radiation modulator for all-day sustainable energy harvesters
- 저자 정보 : 한원배 (고려대, 공동 제1저자), 허세연 (지스트, 공동 제1저자), 김동학 (고려대 공동 제1저자), 양승민, 고관진, 이길주, 김동재, 이종훈, 신정웅, 장태민, 한성근, 강희석, 임준현, 김도현, 김수현, 송영민 (공동 교신저자), 황석원 (고려대, 공동 교신저자)