

★ 2020년 10월 27일(화) 조간(온라인 10. 26.(월) 낮 12:00)부터 보도해주시기 바랍니다.

<p>보도자료</p> <p>청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF</p>	 <p><홍보실> 실장 박길수, 이은지 부연구위원 ☎ 042-869-6116</p>
---	--

<자료문의> 서울대학교 화학생물공학부 김연상 교수(031-888-9131/02-880-7411)

이온-고체 표면의 전기적 상호작용 규명

이온 흡착에 의한 에너지 준위 변화를 이용한 발전원리 규명

- 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 떨어질 때 낙차를 이용해 전기에너지를 수확하는 수력발전은 친환경적이지만 많은 물이 필요하다. 그 가운데 국내 연구진이 미량의 물방울을 이용하여 발전(發電)하는 기술에 대해 소개하고 그 원리를 알아냈다.
- 한국연구재단(이사장 노정혜)은 김연상 교수(서울대학교) 연구팀이 물이 다공성 구조에 스며드는 과정에서 발생하는 전기를 수확하는 에너지 하베스팅 원리를 규명했다고 밝혔다.
- 최근 토양이나 나무의 증산작용 등에서 나타나는 모세관 현상을 이용하여 적은 양의 물로 상당한 전기에너지를 생성하는 에너지 하베스팅 기술이 큰 주목을 받고 있다.
- 하지만 전기에너지가 생성되는 원리에 대한 정확한 이해가 부족해 액체-고체 계면에 대한 정확한 이해가 필요한 상황이다.
- 연구팀은 표면특성이 잘 알려진 산화구리 나노선이 배열된 다공성 필름형 소자를 만들었다. 여기에 물방울을 떨어뜨려 필름의 젖은 부분과 마른 부분 각각에 놓인 나노선의 전하 에너지 준위 차이에 의해 전기를 발생시킬 수 있음을 보여주었다.

- 특히, 반도체 특성이 잘 알려진 산화구리 나노선이 모세관 현상에 의해 물이 스며들 때 전기에너지를 생산하는 원리를 반도체 공학적으로 규명하였다.
- 물이 스며들 때 물 속의 이온이 나노선 표면에 흡착되면서 나노선의 전하 에너지 준위 특성을 변화시키는 것을 알아냈다.
- 나아가 스며드는 물 속의 이온농도가 증가함에 따라 소자의 성능도 높아지는 것을 통해 이온-고체 표면 상호작용인 이온발전(Ionovoltaic) 현상임을 규명하였다.
- 실제 산화구리 나노선 기반의 다공성 필름형 소자(1.5 · 6 cm)에 수돗물 수준의 이온농도를 갖는 소금물 네 방울 정도(20 μ l)를 떨어뜨려 ~0.45V, ~0.23 μ A 의 전압, 전류를 40분 동안 생성했다.
- 또한 소자의 직렬, 병렬연결을 통해 건전지처럼 전압과 전류를 증폭할 수 있는 것도 확인하였다. 실제 연구팀이 8개의 소자를 직렬연결하고 각각의 소자에 바닷물 한 방울(5 μ l)씩 스며들게 했을 때 녹색 LED를 4분 이상 연속적으로 켤 수 있었다.
- 이번 연구는 이온을 포함하는 하천수나 바닷물 등 자연의 다양한 물 자원을 이용한 에너지 하베스팅 기술의 기반이 되는 원리를 규명하는 한편, 향후 물속의 극미량 물질을 탐지하는 생화학 센서로 응용할 수 있는 실마리를 제공한 것으로 기대된다.
- 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 중견연구지원 사업으로 수행된 이번 연구의 성과는 국제학술지 에너지 앤 인바이런먼탈 사이언스(Energy & Environmental Science) 10월 호에 게재되었다.

주요내용 설명

<작성 : 서울대학교 김연상 교수>

논문명	Identification of water-infiltration-induced electrical energy generation by ionovoltaic effect in porous CuO nanowire films
저널명	Energy & Environmental Science
키워드	ionovoltaic effect, ion-surface interaction, water infiltration, contact line motion, surface energy band bending, capillary action, porous CuO nanowire films
DOI	10.1039/D0EE02190C
저자	김연상 교수(교신저자/서울대학교), 김호정(Huding Jin)(제1저자/서울대학교), 윤선근(공동저자/서울대학교), 이원형(공동저자/서울대학교), 조용현(공동저자/서울대학교), 한정협(공동저자/서울대학교), 박준우 박사(공동교신저자/하버드대학교)

1. 연구의 필요성

- 자연의 물 순환 과정에서 발생하는 증발, 흡수, 흐름 등과 같은 현상을 이용해 전기에너지를 생산하는 기술이 미래지향적 에너지 하베스팅 기술로 주목받고 있다.
- 특히, 토양 내부나 나무의 증산작용 등에서 나타나는 모세관 현상을 이용해 전기에너지를 생성하려는 시도는 폭넓은 응용 가능성 때문에 주목받고 있지만 구동원리에 대한 정확한 이해가 부족한 상황이다.
- 구동원리를 정확하게 이해하고 다양하게 응용하기 위해서는 물이 다공성 나노구조에서 이동할 때 액체-고체 계면현상에 대해 자세하게 파악하는 것이 관건이다.

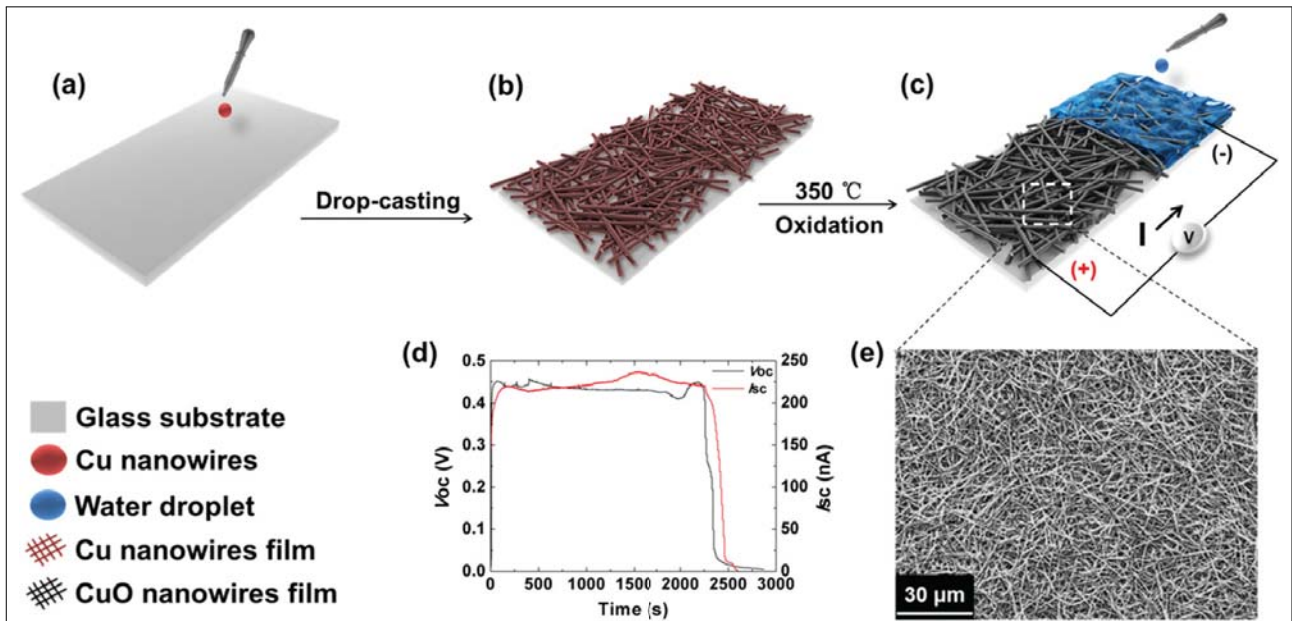
2. 연구내용

- 본 연구진은 표면 특성이 잘 알려진 산화구리 나노선 기반의 다공성 필름형 소자를 제작하여, 물이 흡수되는 자연현상으로부터 전기에너지를 발생시키는 에너지 하베스팅 기술을 제시하였다. 특히, 물이 다공성 나노구조에 스며들 때 전기에너지를 생성하는 구동 원리(Ionovoltaic 현상)에 대해 규명하였고, 일반 건전지처럼 직렬 또는 병렬연결을 통해 전압과 전류가 각각 증폭될 수 있음을 보여주었다.
- 물리-화학적으로 액체(물)/고체(산화구리)/기체 3상의 경계에서 이온과 반도체 효과를 동시에 관찰하였다. 특히, 모세관 현상에 의해 물이 스며들 때 반도체 표면에는 수많은 이온이 흡착되게 되는데 이는 반도체 내의 전하 에너지 준위 특성을 변화시킨다. 이온의 흡착은 물에 젖은 영역과 마른 영역의 전하 에너지 준위 차이를 발생시키고, 이로 인해 전기에너지가 발생한다는 것을 증명하였다. 또한, 스며드는 물속의 이온 농도가 증가함에 따라 소자의 성능이 향상하는 것을 통해 이온-고체 표면 상호작용에 의한 발전 (Ionovoltaic 현상)임을 규명하였다.
- 산화구리 나노선 필름형 소자를 직렬, 병렬연결 하여 쉽게 일반 건전지처럼 전압과 전류를 증폭 할 수 있었다. 8개의 소자를 직렬연결하고 각각의 소자에 바닷물 한 방울($5\mu\text{l}$)을 스며들게 했을 때 녹색 LED를 4분 이상 작동시켰다. 이때 생성된 전력은 $\sim 0.23\ \mu\text{Wh}$ 에 도달하였다. 또한, 산화구리 나노선 필름형 소자는 쉽게 제작할 수 있고 대량생산이 가능한 잠재성을 보여주고 있고 반복 사용도 되기에 실제 환경에 적용 가능성을 보여주었다.
- 물이 다공성 나노구조에 스며들 때 전기에너지를 생성하는 현상을 에너지 하베스팅 기술로 발전시킴과 동시에 물 속의 극미량의 물질을 탐지하는 생물/화학적 센서로 활용할 가능성을 보여주었다는 점이 본 연구결과의 의의라고 할 수 있다.

3. 기대효과

- 표면 특성이 잘 알려진 다공성 산화구리 나노선을 사용함으로써 이온-고체 표면의 상호작용을 보다 정확하게 파악할 수 있었다. 물의 흡수로 인한 전기에너지 발전은 이온-고체 표면 상호작용에 의한 발전으로 물이 다공성 구조에 스며들 때 물 속에 존재하는 이온이 산화구리 나노선에 흡착하여 나노선 내부의 전하 에너지 준위를 변화시킴에 따라, 물에 젖은 부분과 젖지 않은 부분 사이의 전하 에너지 준위 차이가 전기를 발생시키는 것으로 구동 원리를 파악할 수 있었다.
- 액체-고체 계면에서의 상호작용, 특히, 이온-고체 표면의 상호작용에 대한 깊은 이해를 통하여 자연계의 물 흡수 현상을 이용한 에너지 하베스팅 기술로 발전시킴과 동시에 물 속 극미량의 물질을 탐지하는 생물/화학적 센서로서의 활용 가능성을 보여주었다.

그림 설명



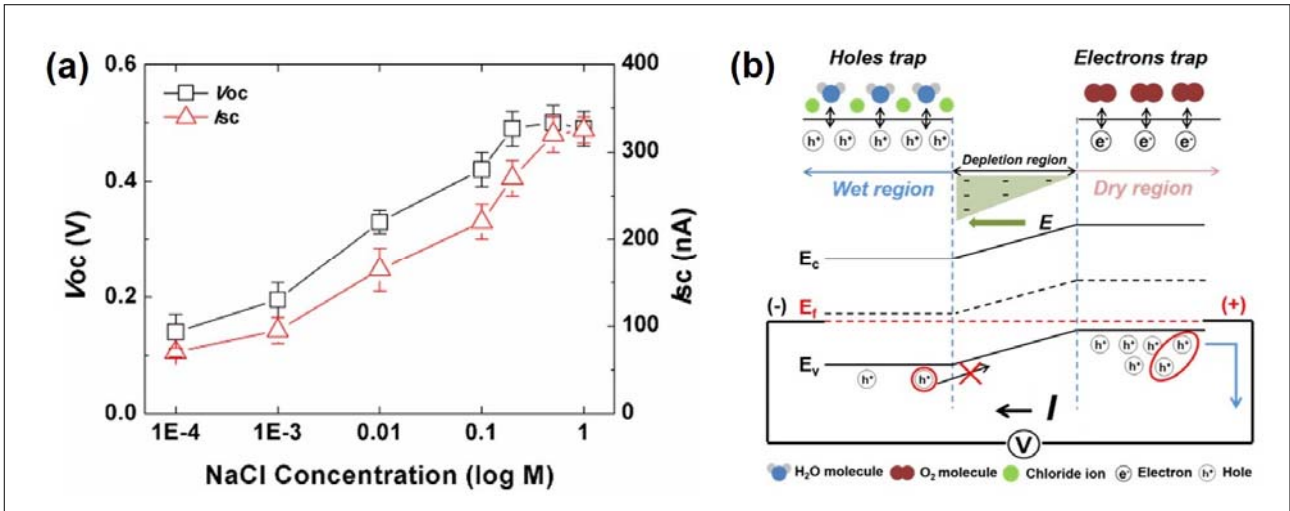
(그림 1) 다공성 산화구리 나노선 필름형 소자의 제조 및 작동 모식도

(a-c) 유리 기판에 ($1.5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 123 \text{ } \mu\text{m}$) 구리 나노선 필름을 형성하였다. 형성된 구리 나노선 필름을 350°C 조건에서 산화를 시켜 다공성 산화구리 나노선 필름 기반의 에너지 하베스팅 소자를 제작하였다. 미량의 물을 산화구리 나노선 에너지 하베스팅 소자의 한쪽 끝에서부터 스며들게 하며 발생 되는 전기에너지를 측정하였다.

(d) 일반 생수 수준의 이온 농도를 갖는 0.1 M NaCl 용액이 산화구리 나노선 에너지 하베스팅 소자의 (-) 전극에서부터 스며들 때 최대로 0.45 V 의 전압과 $0.23 \text{ } \mu\text{A}$ 의 전류가 발생하였다.

(e) 주사 전자 현미경 (SEM) 이미지로부터 산화구리 나노선 에너지 하베스팅 소자의 표면은 모세관 현상에 의해 물을 흡수할 수 있는 다공성 구조라는 것을 확인할 수 있었다.

제공: 서울대학교 김연상 교수

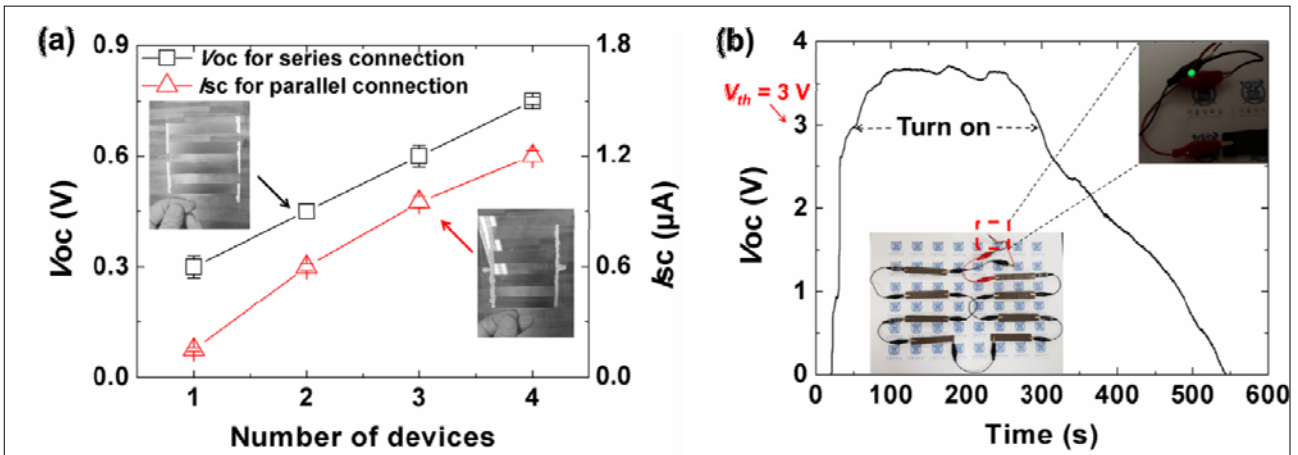


(그림 2) 다공성 산화구리 나노선 필름형 소자의 특성 및 구동원리

(a) 스며드는 물의 이온 농도가 증가함에 따라 형성되는 전압, 전류가 모두 증가하였다. 이는 이온-고체 표면의 상호작용이 형성되는 전압, 전류에 직접적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

(b) 물이 산화구리 나노선 에너지 하베스팅 소자에 스며들 때 생성되는 전기에너지의 원리를 이온-고체 표면에서의 이온 동역학적 발전 현상으로 (Ionovoltaic effect) 규명하였다. 다공성 구조에 스며들 때 물 속에 존재하는 이온들이 산화구리 나노선에 흡착하여 나노선 내부의 전하 에너지 준위를 변화시킴에 따라, 물에 젖은 부분과 젖지 않은 부분 사이의 전하 에너지 준위 차이가 전기를 발생시키는 것으로 구동 원리를 파악할 수 있었다.

제공 : 서울대학교 김연상 교수



(그림 3) 다공성 산화구리 나노선 필름형 소자의 실용 가능성 제시

(a) 다공성 산화구리 나노선 기반의 에너지 하베스팅 소자를 직렬, 병렬연결 하였을 때 전압, 전류를 각각 쉽게 증폭할 수 있다.

(b) 8개의 다공성 산화구리 나노선 필름형 소자를 직렬연결 하고 각각의 소자에 한 방울의 바닷물을 스며들게 하였을 때 녹색 LED를 4분 이상 켤 수 있다.

제공 : 서울대학교 김연상 교수

연구 이야기

<작성 : 서울대학교 김연상 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

다공성 나노구조에 물이 스며들 때 전기에너지를 생성하는 현상에 대해 흥미롭게 생각하였다. 특히, 전기에너지를 생성 원리에 대해 여러 의문점이 생겼다. 이에 본 연구팀은 먼저 구동원리를 정확하게 밝혀내어야 한다고 생각하였고, 이를 위해서 표면 특성이 잘 알려진 산화구리 나노선을 이용하여 에너지 하베스팅 소자를 제작하고 원리규명연구를 진행하였다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

물이 다공성 산화구리 나노선 필름에 스며들 때 어떠한 조건이 구비 되어야 전기에너지를 생성되는지에 대해 파악하였다. 특히, 물이 스며드는 과정에 액체 (물)/고체 (산화구리)/기체 3상에서 형성되는 접촉선이 한 개만 존재해야 되고 이러한 접촉선이 연속적으로 움직여야만 한다는 것을 확인하였다. 이후 물의 이온 농도, 체적, 환경 습도와 온도 등 여러 변수가 형성되는 전기에너지를 위한 영향을 확인하였다. 특히, 여러 변수에 대한 영향을 파악함으로써 이온-고체 표면에서의 이온 동역학적 발전 현상(Ionovoltaic effect)에 의존하는 구동원리를 밝혀낼 수 있었다. 최종적으로 실제 응용에 적용 가능성을 확인하기 위해 직렬, 병렬연결을 통하여 전기에너지 증폭을 실현하였고 5 μ m 바닷물 여덟 방울을 이용하여 녹색 LED를 4분 이상 켤 수 있다는 것을 확인하였다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

먼저 물이 다공성 나노구조에 스며들 때 생성되는 전기에너지를 구동원리를 이온-고체 표면에서의 이온 동역학적 발전현상으로 증명하였다. 또한, 건전지를 연결하듯이 다공성 산화구리 나노선 필름 소자를 직렬, 병렬 연결하여 전압, 전류의 증폭을 쉽게 구현할 수 있었다. 8개의 소자를 직렬연결하고 5 μ m의 바닷물을 각각의 소자에 스며들게 하였을 때 녹색 LED를 켤 수 있는 충분한 전압 (~ 3.6 V)과 전류 (~ 0.85 μ A)를 생성하였고 이때 총 전력은 ~ 0.23 μ Wh에 도달하였다. 물이 다공성 나노구조에 스며들 때 생성되는 전기에너지를 규명하고 실제 환경에 적용 가능성을 제시함으로써 추후 에너지 하베스팅 소자, 생물/화학적 센서 등 다양한 영역에 적용될 것으로 전망한다.

실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

Drop-casting 방법과 열처리에 의한 산화 방법으로 쉽게 다공성 산화구리 나노선 필름 소자를 얻을 수 있다는 것이 매우 큰 장점이다. 이는 다공성 산화구리 나노선 필름 소자의 대면적화나 다양한 굴곡 면에서의 구현이 매우 쉽게 된다. 결과적으로 바다, 호수 같은 물 자원이 많은 곳에 다공성 산화구리 나노선 필름 소자를 배치하여 전기에너지를 수확할 수 있을 것으로 전망한다. 실용화를 위한 과제로는 다공성 산화구리 나노선 필름 소자가 외부 충돌에 의해 표면이 쉽게 깨지는 문제를 개선해야 된다. 또한, 더 많은 전기에너지를 생성하기 위해서는 대면적화가 필수적이다. 이러한 부분은 추후 연구를 통하여 충분히 해결할 수 있을 것으로 기대한다.

꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

본 연구에서 물이 다공성 산화구리 나노선 필름 소자에 스며들 때 전기에너지를 생성하는 현상에 대해 이온-고체 표면에서의 이온 동역학적 발전 현상으로 규명하였다. 특히, 이온-고체 표면의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 응용 영역을 확장하여 물 속 극미량의 물질을 탐지하는 생물/화학적 센서를 개발하고자 한다.

연구자 소개

<김연상, 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 공과대학 화학생물공학부 & 융합과학기술대학원
- 전 화 : 031-888-9131/02-880-7411

2. 학력

- 2002 서울대학교 박사 졸업 (화학공학과)
- 2002 ~ 2004 미국 매사추세츠공과대학교 박사후연구원

3. 경력사항

- 2004 ~ 2009 이화여자대학교 화학/나노과학부 교수
- 2009 ~ 2019 서울대학교 융합과학기술대학원 교수
- 2019 ~ 현재 서울대학교 화학생물공학부 교수

4. 전문분야 정보

- 고분자 화학, 나노계면소재공정, 박막 트랜지스터, 에너지 하베스팅 소자

5. 연구지원 정보

- 2017 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(중견연구)

<김호정 (Huding Jin), 제1저자>



1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 융합과학기술대학원 나노융합학과
- 전 화 : 031-888-9154

2. 학력

- 2017 연변대학교 (중국) 석사 졸업 (화학과)
- 2017 ~ 현재 서울대학교 융합과학기술대학원 나노융합학과 박사과정

3. 전문분야 정보

- 에너지 하베스팅 소자, 나노소재 합성