



문의 : 담당자 연락처(02-880-8496)

연구책임자 : 조선해양공학과 조선희 교수(02-880-7322) / 교신저자  
연구진 : 조선해양공학과 차송현 박사과정 학생(02-880-8496) / 제1저자

## 냉간용접\* 현상과 유전영동 제어를 통한 나노구조체의 제작 - 고 품질 결정구조, 강도, 전기특성을 갖는 나노제작 기법의 개발 -

- 서울대 공과대학 조선희 교수 연구팀은 마이카 기저(mica substrate)\*를 이용한 냉간용접(cold welding)과 유전영동(dielectrophoresis) 제어를 통하여 나노선(nanowire), 나노리본(nanoribbon), 나노잎(nanoleaf) 등 다양한 나노구조체(nanostructure)의 제작에 성공하였다.
- “나노제조기술에 활용될 수 있는 냉간용접 현상의 규명”(2016년 9월 11일자 서울대 보도자료)에 이어 유전영동력 제어를 통한 나노제작으로 확장된 연구이다.
- 냉간용접은 결함을 거의 발생시키지 않으며, 용접 외 영역과 동일한 격자구조(lattice structure), 강도(strength), 전기적 특성 등을 제공하므로, 나노제작(nanofabrication) 도구로서 잠재력은 인정되나 용접의 제어가 문제가 되었다.
- 냉간용접을 기반으로 유전영동력 발생을 위한 전기장 주파수와 전극의 형상, 금이온 용액의 농도 등을 변화시켜 나노선, 나노리본, 나노잎 등을 제작하였으며 전기장 및 분자동역학 시뮬레이션을 통해 나노제작 과정을 규명하였다.
- 본 연구는 미래창조과학부/한국연구재단의 리더연구자지원사업(창의연구)의 지원으로 수행되었으며, 네이처(Nature)의 자매지인 사이언티픽 리포트(Scientific Reports) 3월 6일(수)자에 온라인으로 게재되었다.
- 논문명과 저자 정보는 다음과 같다.
  - 논문명 : Fabrication of nanoribbons by dielectrophoresis assisted cold welding of gold nanoparticles on mica substrate
  - 저자 정보 : 조선희 교수 (교신저자, 서울대 조선해양공학과), 차송현 박사과정 학생 (제1저자, 서울대 조선해양공학과)

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명 4. 연구진 이력사항

## 연구 결과

### Fabrication of nanoribbons by dielectrophoresis assisted cold welding of gold nanoparticles on mica substrate

Song-Hyun Cha, Se-Hyeon Kang, You Jeong Lee, Jae-Hyun Kim,  
Eun-Young Ahn, Youmie Park & Seonho Cho  
(Scientific Reports, March 6, 2019)

- 교류 전기장을 가한 마이카 기저 위에서 금 나노입자 용액으로부터 나노리본을 제작하였다. 본 논문은 얇은 나노구조체의 성장을 전기적으로 제어하는 최초의 연구이며 나노제작 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있다.
- 금 나노입자들은 기저로부터의 인력으로 인하여 자유롭게 회전할 수 있어서 냉간용접은 격자구조를 맞추면서 진행이 되며, 불균일한 전기장 하에서 분극된 나노입자에 가해지는 유전영동력은 나노구조의 성장 방향을 제어할 수 있다.
- 금 이온 용액의 농도, 전기장의 주파수, 전극의 형상 등이 유전영동력의 의해 제작되는 나노구조체의 형상에 큰 영향을 있음을 확인하였다.
  - 나노리본의 성장을 위해서는 말단부 주변에서 금 이온 용액이 적절한 농도를 유지해야 하며, 나노리본 다발로부터 나노잎이 형성됨을 알 수 있다.
  - 대부분의 나노리본은 전극에 수직하게 정렬하게 되며 전기장의 주파수가 증가함에 따라 나노리본이 짧고, 얇으며, 곧은 형태가 만들어지는 경향이 있다. 10 nm 이하의 금 나노입자로 제작된 나노리본의 높이는 1.6~4.7 nm, 폭은 11~28 nm, 길이는 400~1,000 nm 정도의 크기로 파악되었다.
  - 전기장의 세기는 나노구조체의 형성에는 큰 영향이 없으나 전기장 구배는 유전영동력에 직접적으로 영향을 미쳐 나노입자를 정렬시키는 역할을 한다.
- 본 연구로 인하여 냉간용접과 유전영동력에 의한 제어를 명확히 파악하게 되어 향후 나노입자의 냉간용접을 통해 나노입자의 고유한 특성을 변화시키지 않고 다양한 형태의 나노구조체 제작이 가능하여 관련 연구나 산업의 목적에 맞게 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

# 용 어 설 명

## 1. 냉간용접 (cold welding)

비교적 무른 구리, 알루미늄 등의 금속을 상온에서 고체 상태로 이루어지는 용접과정으로서, 용접면에서 강한 외력이나 열을 필요로 하지 않고 눈에 띄는 용융현상을 수반하지 않으며 다른 어떠한 용접 방법보다 빠르게 진행이 된다. 냉간용접은 용접영역에서 결함이나 부적절한 결정구조를 발생시키지 않으면서 단일 결정구조가 유지된다.

## 2. 마이카 기저 (mica substrate)

규산염(Silicate) 광물(운모)로 납작하고 얇은 필름 형태의 마이카는 원자력 현미경 스캔에서 금속 나노입자, DNA 분자 등 실험시료가 고정되는 지지재료로 사용된다.

## 3. 나노구조체 (nanostructure)

0.1~100 nm 의 크기를 갖는 기본 구조체(structure)를 의미하며 나노선, 나노필름, 나노입자, 각종 나노튜브 등이 해당된다.

## 4. 격자구조 (lattice structure)

**체심입방격자(BCC; Body Centered Cubic lattice):**

격자의 모서리와 결정의 부피중심에 원자가 위치하는 고체 결정구조.

**면심입방격자(FCC; Face Centered Cubic lattice):**

격자의 모서리와 결정 면의 중심에 원자가 위치하는 고체 결정구조.

**조밀육방격자(HCP; Hexagonal Close Packed lattice):**

정육각주를 6개 정삼각주로 나누어 삼각주 6개 구석에 원자가 배열된 공간격자.

## 5. 유전영동 (dielectriphoresis)

쌍극분자가 불균질한 전기장에 놓일 때 전기장의 세기가 큰 방향으로 유전체 입자들이 이동하는 현상.

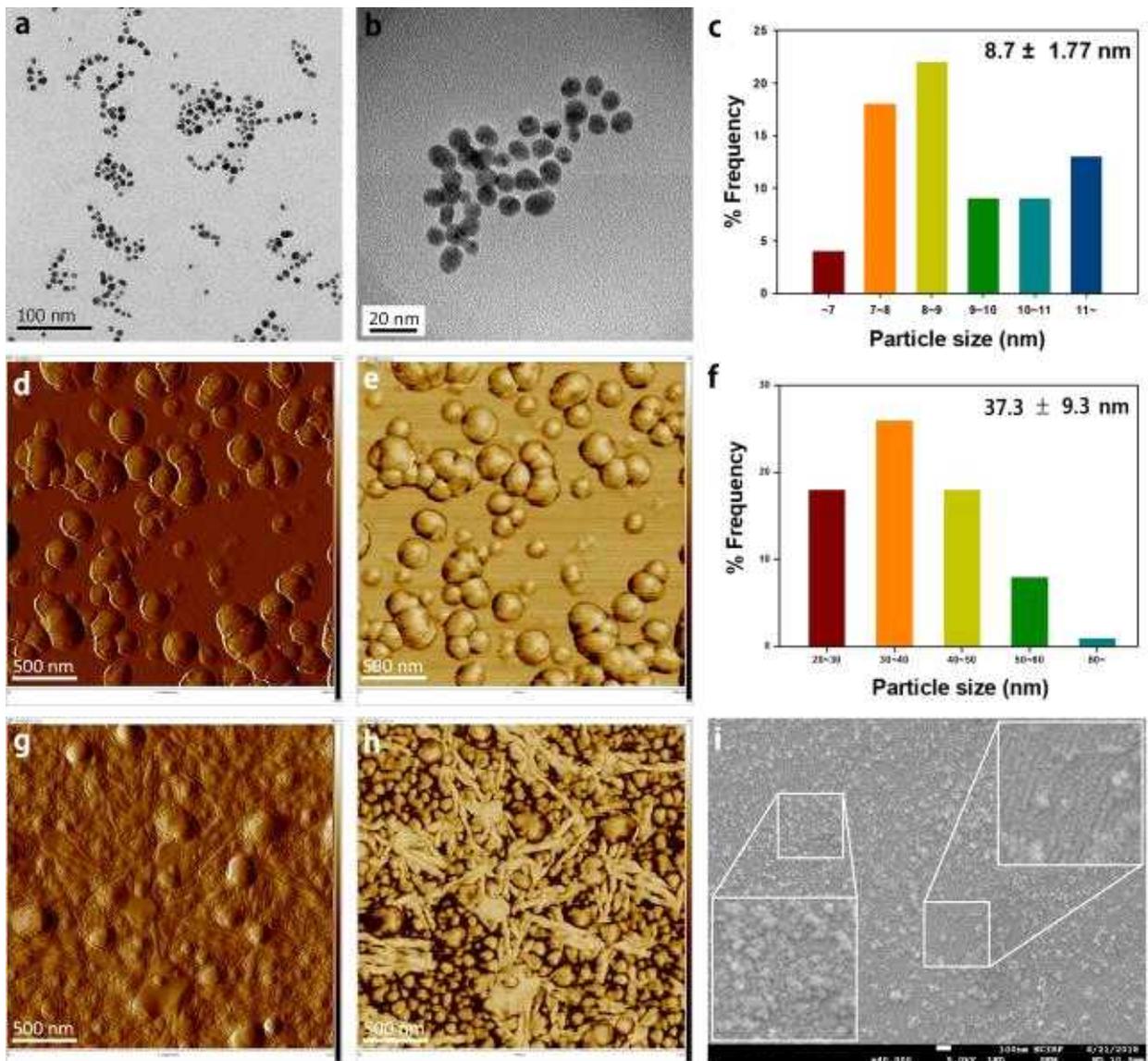
## 6. 쌍극자 (dipole)

크기가 같은 양의 전하와 음의 전하가 일정거리 만큼 떨어져 있는 전하 배열.

# 그림 설명

## 합성된 금 나노입자의 형상 비교

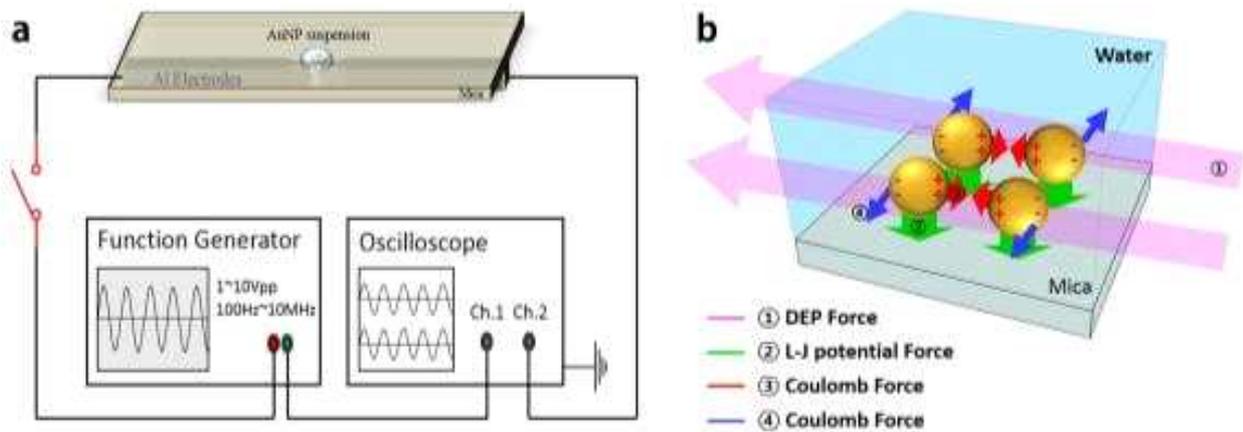
- 합성된 금 나노입자의 원래 평균 크기는 HR-TEM 사진(a,b)으로부터 측정치는  $8.7 \pm 1.77 \text{ nm}$  였으나(c), AFM 스캔을 위해 샘플을 마이카 기저 위에 두었을 때 (d: 형상, e: 재질), 냉간용접의 영향으로  $37.3 \pm 9.3 \text{ nm}$  (f) 로 증가하였음을 알 수 있다.
- 100Hz 주파수의 교류 1V 전기장을 가했을 때 마이카 위의 샘플은 냉간용접이 발생하면서 전기장의 영향으로 발생한 유전영동력으로 인하여 일정 방향으로 성장함을 AFM 스캔에서 알 수 있다. (d: 형상정보, e: 재질정보)
- FE-SEM 사진(i)에서는 농도가 적절한 경우 나노리본이 입자들 사이에서 성장하고 (좌측 삽도), 농도가 너무 높은 경우 냉간용접만이 발생함을 알 수 있다 (우측 삽도).



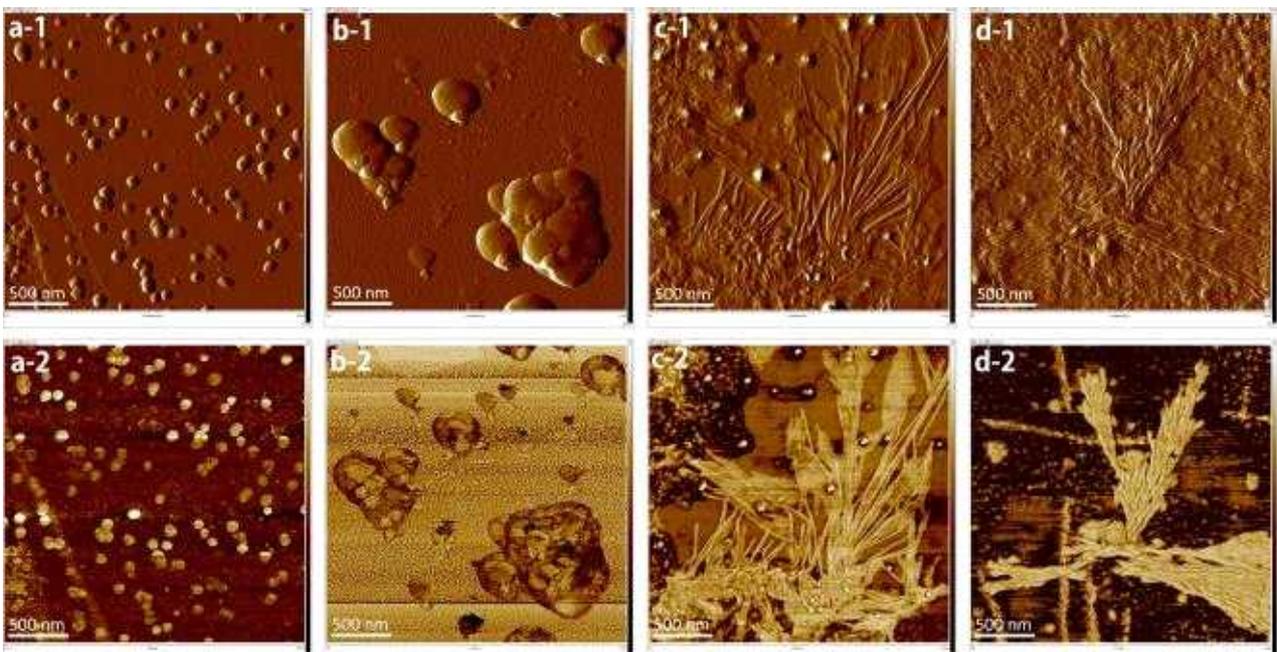
## 유전영동력을 활용한 냉간용접

○ 유전영동력 장치는 그림 a와 같이 1~10 V<sub>pp</sub>, 주파수 100Hz~10MHz 범위의 함수발생기를 사용하여 마이카 배면에 접착된 알루미늄 전극에 전기장을 가하였다. 마이카 전면에 떨어뜨린 금 나노입자 용액은 그림 b와 같이 4 가지 힘을 받게 된다.

- ①  $F_{DEP}$  : 유전영동력. 금 나노입자의 응집에는 기여하지 않으나 쌍극자 상호작용을 통해 나노입자를 나노구조체의 말단으로 이동시켜 성장을 유지하게 한다.
- ②  $F_{mica}$  : 마이카에서 발생하는 Lennard-Jones 힘으로 냉간용접을 유발시킨다.
- ③  $F_{Coulomb}$  : 대전된 입자 사이의 쿨롱 힘이며 인력에 의해 입자간의 응집이 발생된다.
- ④  $F_{Coulomb}$  : 응집된 나노입자에서의 쿨롱 힘이며 척력에 의해 유전영동력과 수직한 방향으로 서로 멀어지게 되어 가닥을 형성하게 된다.



○ 전극형상은 전기장의 분포와 구배를 변화시켜 궁극적으로 유전영동력을 변화시킨다. 100 KHz 주파수, 교류 5V<sub>pp</sub> 전기장을 가했을 때 평행 전극을 사용한 경우에는 냉간용접만 발생하였으나(그림 a-1, a-2, b-1, b-2), 화살표 모양 전극(윗 그림 a 참조)을 사용한 경우에는 다량의 나노리본 및 나노잎이 형성되었다(그림 c-1, c-2, d-1, d-2).



# 연구자 이력사항 - 조선희 교수

## 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 조선해양공학과 교수
- 전 화 : 02-880-7322
- E-mail : secho@snu.ac.kr



## 2. 학력

- 1982-1986 서울대학교 조선공학과 학사
- 1986-1988 서울대학교 조선공학과 석사
- 1994-1998 The Univ. of Iowa 기계공학과 박사

## 3. 경력사항

- 2001-현재 서울대학교 조선해양공학과 교수
- 2011-현재 Review Editor (SCI 급 국제학술지, Springer),  
*Structural and Multidisciplinary Optimization*
- 2008-현재 Associate Editor (SCI 급 국제학술지, Taylor & Francis),  
*Mechanics Based Design of Structures and Machines*
- 2013-2017 해양수산부 해양수산미래기술위원회 기술위원
- 2011-2014 국가과학기술위원회(심의회) 거대공공 전문위원
- 2010-2016 미래창조과학부 아이소-지오메트릭 최적설계 창의연구단장

## 4. 기타 정보 [수상]

- 논문상(2009), 학술상(2016), 30주년 학술상(2018), 한국전산구조공학회
- 과학기술 우수논문상(2012), 한국과학기술단체총연합회
- 우수연구상(2009), 서울공대
- 신양공학학술상(2005), 신양문화재단