



**2016. 9. 9.(금) 조간부터 보도하여 주시기 바랍니다.**

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

**나노제조기술에 활용될 수 있는 냉간용접\* 현상의 규명  
- 냉간용접의 제어를 통한 다양한 나노구조체 제작 가능성을 열어 -**

- 서울대 공과대학 조선희 교수 연구팀은 규산염 계열 마이카 기저(mica substrate)\*의 영향으로 인하여 크기가 큰 금 나노입자에서도 냉간용접(cold welding)이 발생하는 현상을 발견하고 물리적 원리를 규명하였다.
- 나노선(nanowire)과 나노박막(nanofilm)에서 냉간용접의 크기는 지금까지 학계에 보고된 바로는 각각 10 nm, 2~3 nm로 제한적이거나, 본 연구에서 마이카 기저 위의 금 나노입자는 25 nm 크기까지 발견된다.
- 냉간용접된 영역은 결함(defect)이 거의 없으며 나머지 영역과 동일한 결정구조(lattice structure)와 강도(strength)를 가지므로, 냉간용접은 기본 나노구조체(nanostructure)\*의 고유한 특성을 변화시키지 않고 서로 결합시키는 나노제작(nanofabrication) 도구로 활용될 수 있다.
- 본 연구는 미래창조과학부/한국연구재단의 리더연구자지원사업(창의연구)의 지원으로 수행되었으며, 세계 3대 과학저널인 네이처(Nature)의 자매지인 사이언티픽 리포트(Scientific Reports) 9월 6일(화)자에 온라인으로 게재되었다.
- 논문명과 저자 정보는 다음과 같다.
  - 논문명 : Cold welding of gold nanoparticles on mica substrate: Self-adjustment and enhanced diffusion
  - 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

### Cold welding of gold nanoparticles on mica substrate: Self-adjustment and enhanced diffusion

Song-Hyun Cha, Youmie Park, Jeong woo Han, Kyeonghak Kim,  
Hyun-Seok Kim, Hong-Lae Jang, and Seonho Cho  
(Scientific Reports, *in Press*)

- 고분해능 투과전자현미경(HR-TEM), 원자력 현미경(AFM), 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하여 합성된 금 나노입자의 시료를 분석하는 방법으로 냉간용접 현상을 관찰하였다. 그 결과 HR-TEM에서의 금 나노입자 지름보다 AFM에서의 값이 훨씬 큰 사실을 발견하였다.
- 나노선과 나노박막의 냉간용접은 지금까지 학계에 보고된 바로는 그 크기가 각각 10 nm, 2~3 nm로 제한적이거나, 본 논문에서 금 나노입자는 마이카 기저 위에서 냉간용접으로 인하여 25 nm 크기까지 발견되었다.
- 압력이 필요한 나노선과는 달리 금 나노입자들은 기저로부터의 인력으로 인하여 자유롭게 회전할 수 있으며, 따라서 냉간용접은 격자구조를 맞추면서 진행이 된다. 마이카 기저 위의 금 나노입자를 수학적으로 모델링하여 분자동역학(molecular dynamics) 해석코드를 활용하여 물리적 특성들을 분석하였으며, 그 결과 마이카 기저 위의 금 나노입자들의 위치 및 운동 에너지들은 확산장벽(diffusion barrier)\*을 넘을 만큼의 충분한 에너지를 제공함을 확인하였다.
- 냉간용접에서 기저의 영향을 이용하면 금 나노입자의 성장을 원하는 대로 조절할 수 있으며 이는 나노입자의 형상 최적설계\* 기술로 발전될 수 있다. 나노재료의 용접은 열로 인하여 가능하지 않고 냉간용접도 재료의 크기에 한계를 가지고 있었으나, 본 연구로 인하여 냉간용접의 물리적 현상을 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. 확산 장벽(diffusion barrier)

하나의 물체에서 다른 물체로 원자가 이동하기 위해 넘어야 할 에너지 장벽으로, 그 이상의 에너지가 주어질 경우에는 원자 이동에 의한 확산이 발생할 수 있다.

## 5. 형상 최적설계(shape design optimization)

시스템의 가장 뛰어난 성능을 얻기 위하여 시스템을 구성하는 설계변수를 결정하는 것을 최적설계라고 하며, 특히 시스템의 기하학적 특성을 나타내는 설계변수를 결정하는 것을 형상 최적설계라고 한다.

## 6. 환원제(reducing agent)

산화와 환원은 언제나 동시에 일어나며, 산화-환원 반응이 일어날 때 자신은 전자를 잃고 산화되면서 상대 물질을 환원시키는 물질.

## 7. 격자구조

### 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 6개의 정삼각주로 나누어 삼각주의 6개 구석에 원자가 배열된 공간격자.

## 8. 적층 결함(stacking fault)

격자형에 따라 주기성을 가지고 원자가 쌓일 때 부분적인 순서착오에 의해 생긴 결함.

# 그림 설명

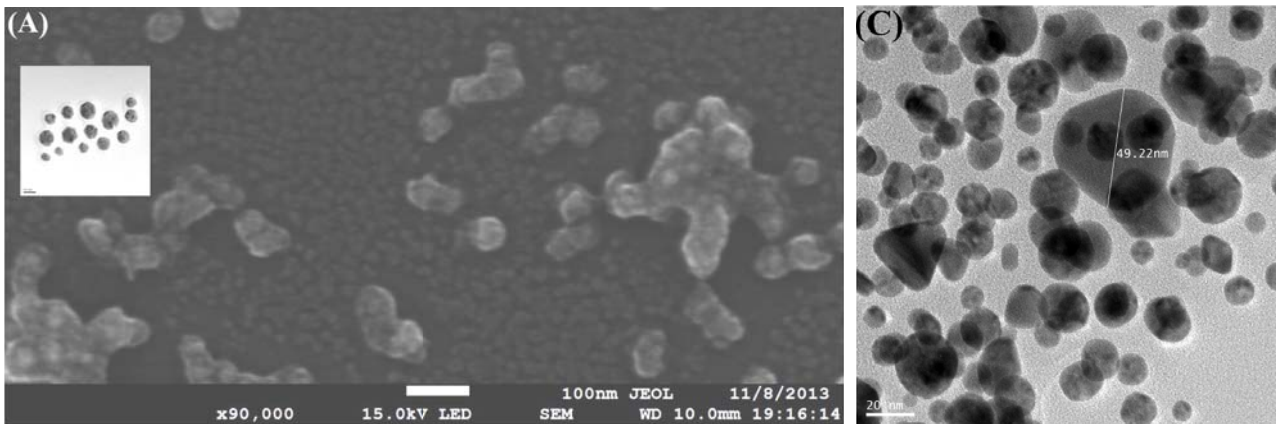
## 마이카 기저를 사용한 AFM 스캔 전·후의 나노입자 크기 비교

○ 환원제\*: Chlorogenic acid (A)

AFM 스캔 전 HR-TEM(삽도)에서의 평균 크기는  $22.25 \pm 4.78$  nm 이었으나 AFM 스캔 후, 마이카 기저로부터 금 나노입자를 떼어낸 후 FE-SEM(원도)에서는 측정하였을 때는  $59.35 \pm 4.67$  nm로 나타났다. (원도와 삽도는 동일한 스케일의 사진임.)

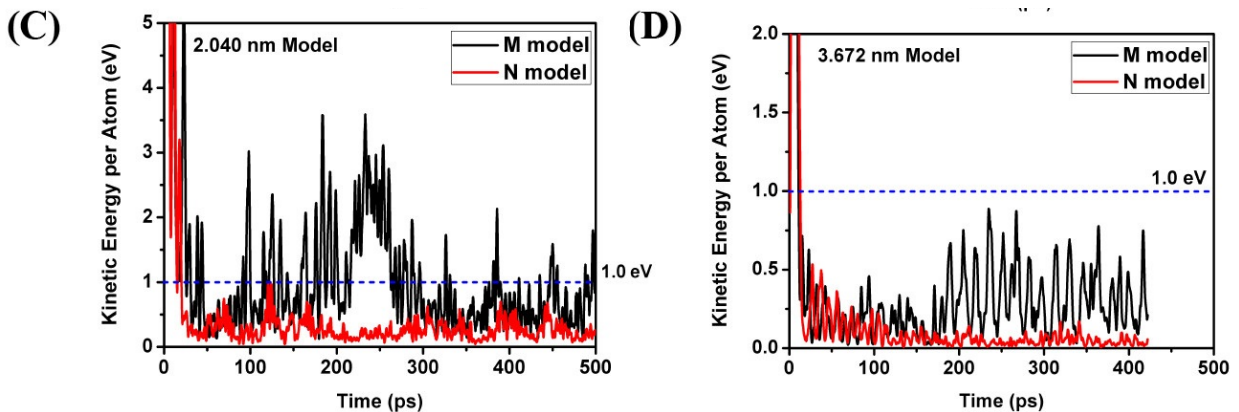
○ 환원제: Resveratrol (C)

AFM 스캔 전 HR-TEM에서의 평균 크기는  $14.60 \pm 2.97$  nm이었으나 AFM 스캔 후, 마이카 기저로부터 금 나노입자를 떼어낸 후 HR-TEM에서 다시 측정하였을 때는 40~50 nm로 나타났다.



○ 운동에너지

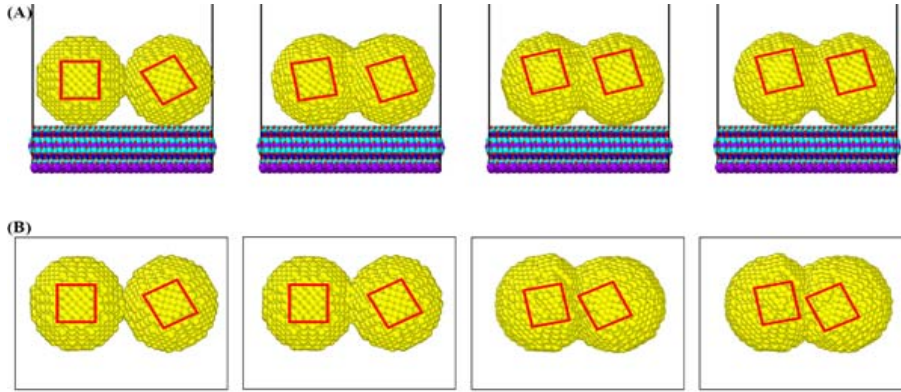
마이카 기저 위의 나노입자(M model; 흑색)는 기저가 없는 모델(N model; 적색)보다 단위원자당 운동에너지가 커져서 확산장벽 1 eV를 넘는 경우가 많아서 쉽게 냉간용접이 발생한다. 모델의 크기가 커질수록 단위원자당 운동에너지가 줄어서 확산장벽을 넘기 어려워짐을 알 수 있다(그림 D).



## ‘자가 조정’과 ‘향상된 확산’을 통한 냉간용접의 품질 향상

### ○ 마이카 기저 유무에 따른 ‘자가 조정’의 비교

마이카 기저 위의 금 나노입자(A)는 냉간용접 후에도 격자구조를 맞추기 위해 회전을 하여 적색 박스와 같이 정렬된 경향을 보인다. 그러나 기저가 없는 경우(B)는 회전이 발생되기 어려워 냉간용접 후에는 정규 격자구조가 허물어진 것을 알 수 있다.



### ○ 마이카 기저 유무에 따른 ‘향상된 확산’의 비교

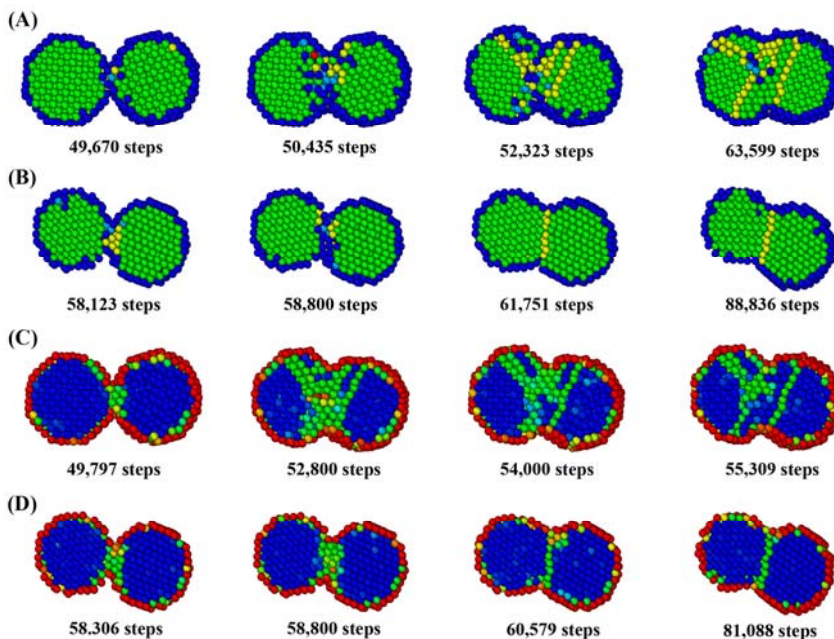
#### - 기저가 없는 경우

**Ackland-Jones 척도:** 냉간용접의 진행에 따라 BCC\* 및 HCP\* 구조가 용접면에서부터 확산되었다가 완화시간 후, 원래의 FCC\* 구조가 최종적으로 회복된다(A).

**Centro-symmetry:** 냉간용접의 진행에 따라 적층 결함(stacking fault)\*이 용접면에서부터 확산되었다가 완화시간 후, 원래의 FCC 구조가 최종적으로 회복된다(C).

#### - 기저가 없는 경우

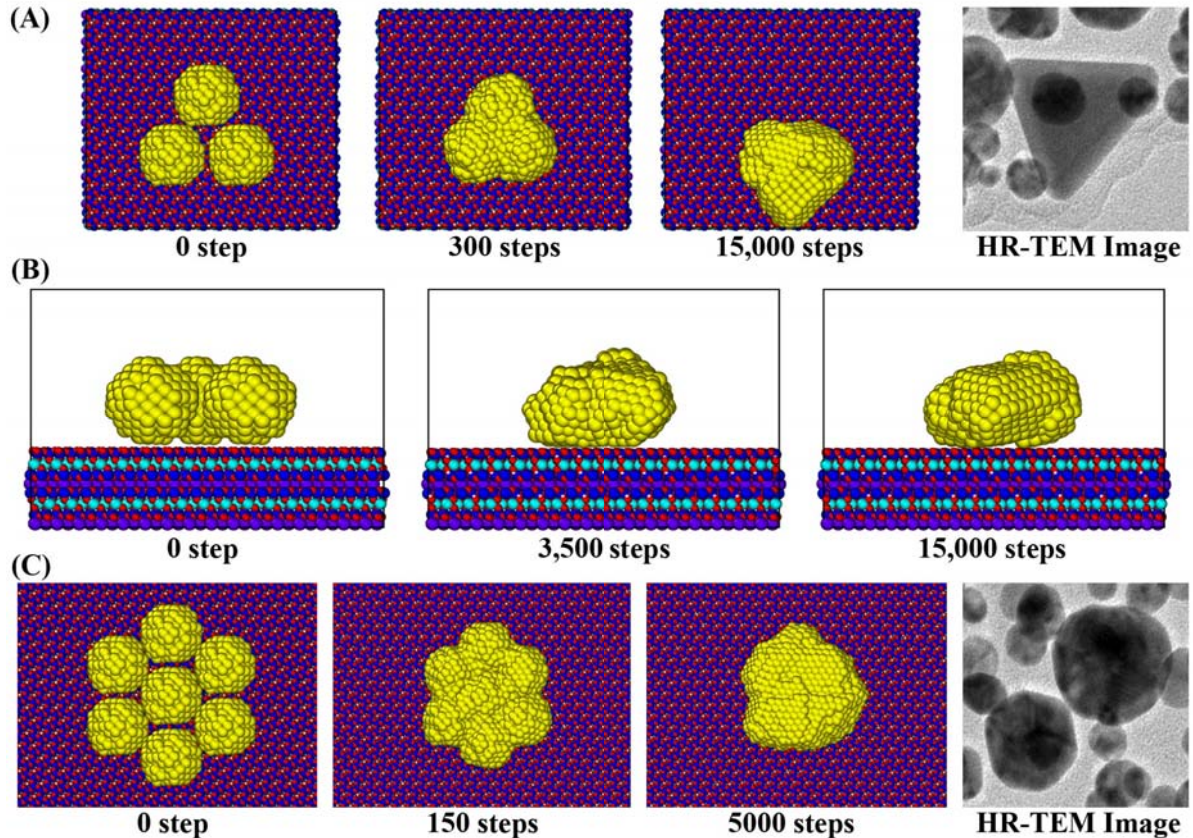
냉간용접이 진행됨에 따라 HCP 구조와 적층 결함이 용접면에서부터 조금 확산되었다가 곧바로 FCC 구조가 회복되므로 불완전한 용접이 된다(B,D).



## 냉간용접을 통한 격자구조의 유지와 형상 제어

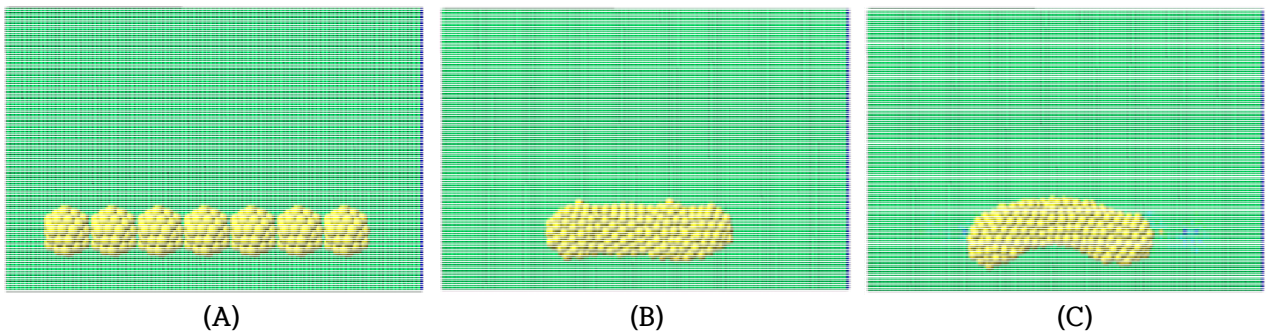
### ○ 정규 격자구조의 유지

AFM 스캔을 한 후, 마이카 기저에서 떼어낸 금 나노입자에 대해 HR-TEM 사진을 얻었다. 삼각형(A) 및 육각형(C) 금 나노입자 형성과정에서 발생된 냉간용접 현상을 분자동역학 전산모사를 수행한 결과, 냉간용접은 정규 격자구조를 잘 유지하면서 기저와 평행한 방향으로 진행되었음(B)을 알 수 있다.



### ○ 금 나노입자의 형상 제어

마이카 기저의 형상이나 냉간용접의 반응조건(온도, 압력, 속도 등)을 변화시켜 금 나노입자의 냉간용접 형상을 제어할 수 있다. 초기 상태(A)에서 단순 냉간용접을 했을 때(B)는 나노선(nanowire) 형상이 만들어지나, 반응조건을 변경하면(C) 굽은 나노선(curved nanowire)를 만들 수 있다.



# 연구자 이력사항 - 조선희 교수

## 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 조선해양공학과 교수  
서울대학교 해양시스템공학연구소
- 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 Univ. of Iowa 기계공학과 박사

## 3. 경력사항

- 2001 - 현재 서울대학교 조선해양공학과 교수
- 2008 - 현재 Structural and Multidisciplinary Optimization (Review Editor)
- 2013 - 현재 해양수산부 해양수산미래기술위원회 기술위원
- 2010 - 2016 미래창조과학부 아이소-지오메트릭 최적설계 창의연구단장
- 2011 - 2014 국가과학기술위원회(심의회) 거대공공 전문위원

## 4. 기타 정보

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