



# 논문의 주요 내용

## □ 논문명, 저자정보

- 논문명 : Enhancement of Interfacial Adhesion Using Micro/Nanoscale Hierarchical Cilia for Randomly Accessible Membrane-Type Electronic Devices

- 저자 : 고흥조 교수(교신저자·GIST 신소재공학부),

황영규 박사(공동1저자·GIST 신소재공학부, 現 난양공대 포닥),

유성광 석박사통합과정(공동1저자·GIST 신소재공학부),

임남수 박사(GIST 신소재공학부), 강상명 석사(GIST 신소재공학부),

유혜련 석사(GIST 신소재공학부), 김종우 박사(한국화학연구소),

현유준 박사과정(GIST 신소재공학부), 정건영 교수(GIST 신소재공학부)

## □ 논문의 주요 내용

### 1. 연구의 필요성

- 전사인쇄는 고성능·고집적 전자소자를 울퉁불퉁한 표면에 올릴 수 있는 기술이다. 이 기술은 전자소자를 직접 제작하기 힘든 신체, 의류, 사물 등 다양한 표면에 전자소자를 접착시키고, 활용하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.
- 기존 전사인쇄 기술에서는 전자소자를 울퉁불퉁한 표면에 접착할 때, 강력한 접착력을 유지하기 위해 접착제를 사용하는 경우가 많았다. 그러나 생체와 자연물과 같은 표면에 접착할 경우 화학적 접착제의 사용이 제한된다.
- 울퉁불퉁한 표면과 넓은 접합 면적을 유지하기 위해 나노미터(nm, 1nm는 10억 분의 1m) 또는 마이크로미터( $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 는 100만 분의 1m) 크기의 구조체를 활용해 접착력을 향상시키는 연구가 많이 진행됐다. 그러나 강한 접착력을 부여하려면 접착 방향, 가해주는 힘 등 특정한 조건이 필요한 단점이 있었다.
- 특히 자연물의 경우 울퉁불퉁한 표면의 모양이나 거칠기의 정도의 범위가 넓고, 쉽게 예측하기 힘들어 조건의 제약 없이 접착력을 강화시킬 기술이 필요하다.

### 2. 연구 내용

- 연구팀은 나노미터 크기의 구멍을 갖는 양극산화 알루미늄(Anodized aluminum oxide, AAO)을 틀로 이용해, 속이 빈 튜브형 나노 섬모를 폴리이미드 (Polyimide, PI) 고분자 박막 기판 아랫면에 형성시켰다. 이런 튜브형 나노 섬모는 복잡하고 거친 표면에 전사인쇄될 때, 울퉁불퉁한 표면을 따라 효율적으로 변형되며 접촉해, 접착력을 크게 향상시킨다. 이를 이용하여 종이, 나뭇잎, 계란, 면직물, 나뭇가지, 나무껍질과 같은 다양한 울퉁불퉁한 표면에 안정적으로 전자소자용 기판을 접착시킬 수 있었다.
- 연구팀은 울퉁불퉁한 표면에 전자소자를 전사인쇄 할 때 **물에 띄운 채 옮기는 수전사** 방식을 사용했다. 수전사 후 물이 마르는 과정에서 튜브형 나노 섬모와 울퉁불퉁한 표면 사이에서 모세관 현상이 발생한다. 모세관 현상은 튜브형 나노 섬모가 납작해지기 위한 충분한 힘을 제공해주며, 울퉁불퉁한 표면의 굴곡을 따라 납작해지기 때문에 표면 거칠기의 정도나 방향에 제약을 받지 않는다. 증가된 표면적은 전자소자와 울퉁불퉁한 표면과의 계면 접착력을 향상시킨다.
- 전자소자 응용 사례로, 필름형 **마이크로 섬모와 부분적 튜브형 나노섬모로 이루어진 계층 구조**의 섬모를 도입해 **'금속저항 기반 온도센서'**를 계란껍질 표면에 전사인쇄하여 계란의 실시간 온도를 비파괴적으로 측정할 수 있었으며, 산화물 반도체인 **'인듐갈륨아연산화물(indium gallium zinc oxide, IGZO) 기반 박막 트랜지스터 소자'**를 현무암 타일 표면에 전사인쇄하고 안정적으로 구동되는 걸 확인했다.

### 3. 기대 효과

- 이 기술을 이용하면 매우 울퉁불퉁한 표면, 특히 그 거칠기의 범위가 넓은 자연물의 다양한 표면에 전자소자를 접착할 수 있다. **전자소자의 직접 제작 공정을 수행하기 어려운 자연물에 전자소자의 기능을 부여함으로써, 환경 및 생체 모니터링 등 다양한 분야에 활용될 수 있다.**
- 또 자연 환경의 다양한 사물 및 동식물에 친환경적으로 전자소자를 부착할 수 있어, 사물인터넷과 빅데이터를 연계할 수 있다. 이렇게 구축된 시스템은 미래 사회의 핵심 플랫폼 기술이 될 것으로 기대된다.

## ★ 연구 이야기 ★

### □ 연구를 시작한 계기나 배경은?

본 연구실에서는 기존에 직접 소자를 제작하기 힘든 표면에 전자소자 기능을 부여하기 위해, 수평으로 뾰은 필름형 마이크로 섬모 구조를 이용해 직물에 전자소자를 전사인쇄하는 기술을 개발한 바 있다. 그 후 좀 더 완성된 전사인쇄 기술을 위해 '튜브형 나노 섬모의 구조'를 개발하고 설계를 최적화해 직물 이외에도 인공물이나 자연물에 전자소자를 부착하기 위한 연구를 진행했다.

### □ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소가 있었다면 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

수평으로 뾰은 필름형 마이크로 섬모는 반도체 공정인 포토리소그래피와 식각 공정을 통해 제작 가능해 전자소자 제작 공정에 영향을 주지 않았다. 하지만 튜브형 나노 섬모를 양극산화 알루미늄 틀로 제작하고 분리할 때는 어려움이 있었다. 틀로 사용한 양극산화 알루미늄을 녹여야 하는데, 이때 쓰이는 물질이 전자소자에 안 좋은 영향을 주었던 것이다. 다양한 시도 끝에, 튜브형 나노 섬모 구조가 제작된 기판을 물을 사용해 붙이는 수전사 방식으로 전사인쇄에 중요한 난제를 해결하였다. 첫째, 물에 띄운 뒤 **얼린 박막형 전자소자를 표면에 전사인쇄 하는 방법을 통해 박막 트랜지스터를 장착할 수 있었다.** 둘째, 전사인쇄 과정에서 물이 마르는 동안 **모세관 현상을 통해 섬모 구조들을 울퉁불퉁한 틈새에 잘 부착시킬 수 있었다.**

### □ 이번 성과, 무엇이 다른가?

울퉁불퉁한 표면의 굴곡에 맞춰 납작하게 달라붙을 수 있는 튜브형 나노 섬모 구조체를 전자소자 기판 아래에 도입한 것이 가장 큰 특징이다. 튜브형 나노 섬모 구조체는 전자소자와 울퉁불퉁한 표면과의 표면 불일치를 극복하도록 해준다. 튜브형 나노 섬모 구조체가 불규칙한 표면을 매우면서 접촉면적이 늘어나고 계면 접착력을 향상시키는 것이다. 이 기술은 접착제 같은 화학물질이 어려운 환경이나 생체친화적인 물질에 적용 가능하다는 강점을 가진다. 이뿐만 아니라 울퉁불퉁한 표면의 거칠기 정도와 방향성에 제약이 없어 적용 가능한 범위가 매우 넓다.

### □ 꼭 이루고 싶은 목표와, 향후 연구계획은?

본 연구에서 튜브형 나노 섬모를 제작하기 위해 사용한 양극산화 알루미늄은 양극산화 조건에 따라 배열된 구멍의 크기와 길이 분포의 조절이 가능하다. 하지만 크기와 길이 분포의 변이가 넓어 각 조건에 따른 접착력을 정량화하기가 힘들었다. 접착 가능한 범위를 더욱 넓히기 위해 필름형 마이크로 섬모와 튜브형 나노 섬모의 구조 및 디자인을 정교하게 조절하는 연구를 진행할 계획이다.

## 용어 설명

### 1. 섬모 구조

고분자 물질을 길게 뾰은 형태로 제작한 것으로, 본 연구에서는 얇은 고분자 박막 필름을 반도체 공정인 포토리소그래피와 건식 식각 공정을 통해 수평으로 뾰은 형태와, 양극산화 알루미늄 틀을 통해 수직으로 뾰은 형태 두 가지의 섬모 구조를 제작하였음.

### 2. 양극산화 알루미늄

알루미늄을 전기화학적으로 양극산화(anodizing)시켜 표면에 나노미터크기의 구멍이 규칙적으로 형성된 알루미늄 기판임. 크기나 직경이 다양한 나노튜브나 나노기둥 등의 나노 구조를 만드는 틀로 사용됨.

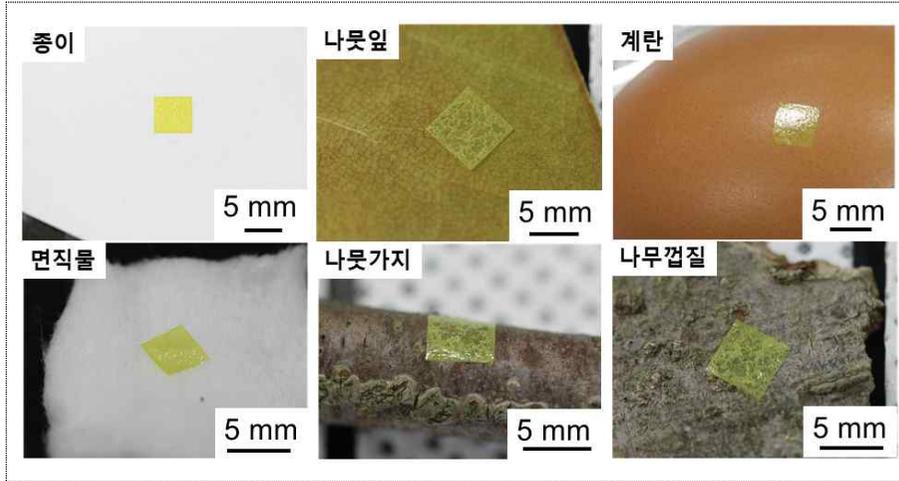
### 3. 전사인쇄 공정(Transfer printing process)

하나의 기판 위에 있는 소재 또는 소자를 떼어내어 원하는 기판 또는 물체의 표면에 옮기는 방법. 주로 전자소자 제작 공정이 제한되어 직접적인 전자소자 제작 공정이 어려운 표면에, 공정이 용이한 기판에서 제작된 소재 및 소자를 옮기는데 활용되는 간접적인 전자소자 제작 공정임.

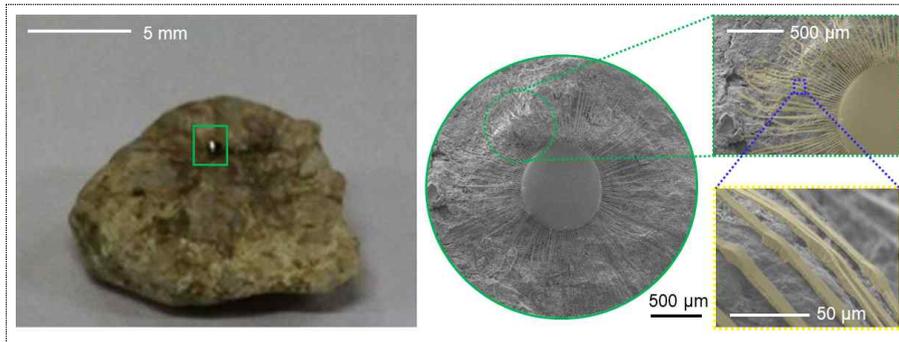
### 4. 박막 트랜지스터(Thin film transistor)

증착 등의 방법으로 반도체 박막을 형성시키고 이를 채널로 이용하여 만든 트랜지스터(transistor)로 TFT라고도 함. 대면적 기판 위에 형성시킬 수 있는 장점이 있고, 액정 디스플레이의 구동소자로 널리 이용되고 있음.

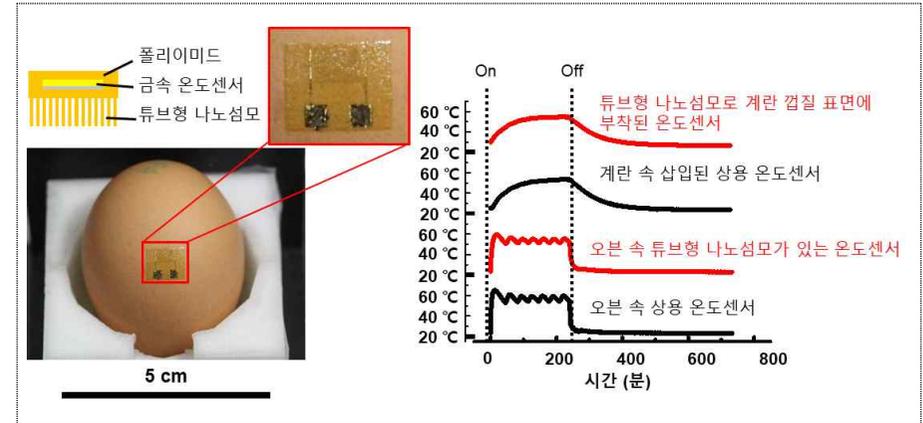
## 그림 설명



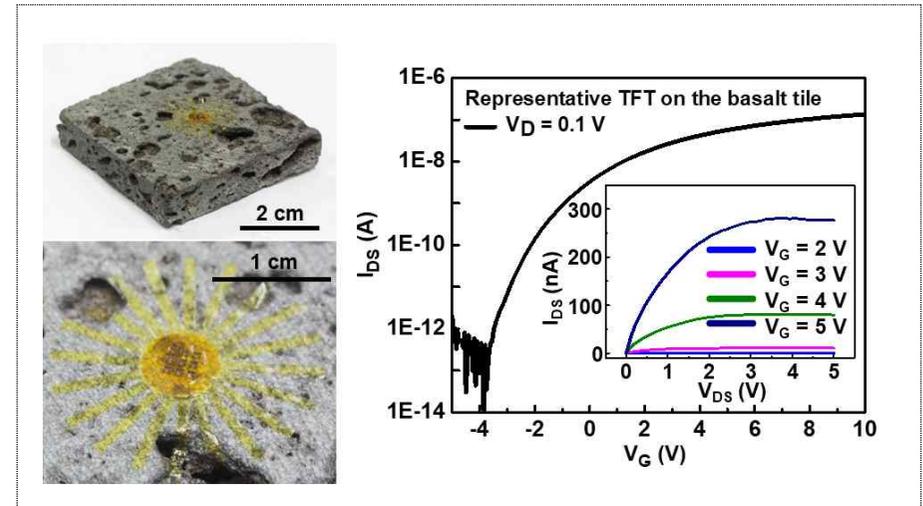
[그림 1] 튜브형 나노 섬유가 있는 폴리머 필름을 종이, 나뭇잎, 계란, 면직물, 나뭇가지, 나무껍질 등 다양한 울퉁불퉁한 표면에 접착한 이미지.



[그림 2] 계층형 섬유 구조를 이용해 울퉁불퉁한 돌멩이 표면에 붙인 폴리머 고분자 박막 기판의 사진 및 주사현미경 이미지. 방사 방향으로 뻗은 필름형 마이크로 섬유 구조와 그 아래 부분적 형성된 튜브형 나노 섬유 구조를 확인할 수 있음.



[그림 3] 튜브형 나노 섬유를 이용해 계란 껍데기 표면에 부착된 금속저항 기반 온도센서 (왼쪽)와 오븐 속에서 튜브형 나노 섬유가 있는 온도센서와 상용 온도센서의 온도 변화 그래프(오른쪽). 계란 껍데기에 부착된 온도센서는 겉에서도 계란 내부의 실시간 온도를 정확히 파악할 수 있어 비파괴적 온도 모니터링이 가능함을 보여줌.



[그림 4] 계층형 섬유 구조를 이용하여 울퉁불퉁한 현무암 타일 표면에 접착된 트랜지스터의 사진(왼쪽)과 이 소자의 전기적 특성을 보여주는 그래프(오른쪽). 울퉁불퉁한 현무암 타일 표면에 접착된 뒤에도 안정적으로 트랜지스터 소자가 작동함.