



2021. 11. 25.(목) / 즉시

문의: 김재원 연구원 (02-880-1681)  
연구책임자: 고승환 교수 (02-880-7114) / 교신저자  
한성근 연구원 (insecter@snu.ac.kr) / 제 1저자

## 자가 살균 기능을 가진 투명 구리 나노선 필터

### 투명한 구리 나노선 교차구조 기반 미세먼지·병원균 집진 및 살균

- 고승환 교수(서울대학교) 연구팀은 가벼운 나일론 필터 위에 얇고 유연한 구리나노선 교차 구조를 형성하여 미세먼지·병원균 집진 및 살균 기능을 가진 “투명 구리 나노선 필터” 를 개발하였다고 밝혔다.
- 에어 필터는 인체의 신경계·호흡계 등에 악영향을 끼치는 미세먼지(PM)를 포집하는 필터로서 산업화로 인한 공기질 악화에 대응하여 다양한 분야에서 보건 목적으로 사용되고 있으며, 현재도 관련 분야에서 지속적인 연구가 수행되고 있다.
- 전 세계적인 COVID-19 발병으로 병원균을 포집할 수 있는 에어 필터의 사용량이 마스크, 공기 청정기 등 다방면에서 급증하였으나 기존 폴리머 기반 필터는 항균 기능이 없어 재사용이 불가하여 폐플라스틱을 양산할 뿐만 아니라 오염된 표면과의 접촉에 의한 2차 전염 우려가 있었다.
- 한편, 기존 필터가 적용된 마스크의 경우 특유의 불투명성으로 인하여 착용자의 입과 표정을 가리는데 이는 청각 장애인뿐만 아니라 비장애인 모두에게 시각 기반 의사소통에 어려움을 초래하는 단점이 있었다.

□ 연구팀은 구리가 높은 항균력과 전기 전도도를 가진다는 점에 착안하여 매우 얇은 구리 나노선을 새로이 합성하고 이를 적층하여 섬유 구조를 형성하여 투명하면서도 높은 미세먼지·병원균 집진 효율을 보이며 동시에 집진된 병원균을 구리 이온에 의한 미량동 효과(Oligodynamic effect)와 줄 열(Joule-heating)에 의한 발열로 자가 살균이 가능한 투명 구리 나노선 필터를 개발하였다.

□ 연구진이 개발한 투명 구리 나노선 필터는 물리 집진과 전기 집진 방식으로 수십 나노에서 수십 마이크로 단위의 미세먼지를 포집할 수 있었고, 구리 나노선으로부터 방출된 구리이온에 의한 미량동 효과와 전류를 흘려주어 가열하는 줄 발열 방식으로 제균 성능을 확보하였다.

○ 직경이 매우 얇은 구리 나노선 네트워크 덕분에 70%에 가까운 높은 가시광선 투과율을 달성하였고, 연구진이 투명 구리 나노선 필터를 마스크 형태로 제조하여 실제로 착용하였을 때 입술과 표정이 확연히 인식 가능함을 확인하였다.

○ 구리 나노선 네트워크의 작은 공극을 통해 물리적으로 미세먼지를 KF80 마스크 수준으로 포집 및 여과하였고, 높은 전도성을 가진 구리 나노선 네트워크에 전압을 인가하여 인위적으로 전기장을 형성해 정전기적 쿨롱 힘(Coulombic force)을 이용하여 수십-수백 나노 단위의 초미세먼지 또한 90% 이상의 매우 높은 수준의 효율로 포집하였다.

○ 구리 나노선에서 나오는 구리 이온을 이용하여 KF94 마스크 대비 97% 이상의 살균 효과를 달성하였고, 구리 이온에 저항성이 있는 세균 또한 줄 발열을 방식 통해 10분만에 99% 이상 세균의 수가 감소되었다.

□ 투명 구리 나노선 필터는 고분극성 용매를 활용한 세척 과정을 통해 재사용이 가능하고, 여러 번의 재사용 후에도 미세먼지 집진 성능과 줄 발열을 통한 항균 성능이 초기와 근사한 수준으로 유지되었다.

□ 본 연구는 기존의 연구와 다르게 처음부터 항균력을 가지는 구리를 섬유 형태의 나노선으로 합성하여 이를 기반으로 한 필터를 제작하는 접근법을 취하여 별도의 추가 공정 없이 미세먼지·병원균 포집 및 자가 항균이 가능한 다기능 필터의 제작했다는 점에서 차별점이 있으며 본 연구의 결과물로 새로운 형태의 자가 살균 필터 제조 원천 기술을 확보하였다.

□ 본 연구는 COVID-19과 같은 공기 중 전염성 병원균 및 미세먼지에 대한 보건적 측면에서의 대응, 유행병 사태에서 증가하는 폐플라스틱에 대한 환경적 측면에서의 대응, 그리고 불투명한 필터로 인한 의사소통 단절과 같은 사회적 측면에서의 대응을 통합한 새로운 개념의 필터 기술을 제시한다는 점에서 의의를 찾을 수 있다.

□ 과학기술정보통신부(또는 교육부)와 한국연구재단이 추진하는 중견 연구사업의 지원으로 수행된 이번 연구의 성과는 국제학술지 ‘나노 레터스 (Nano Letters)’ 에 2021년 11월 24일 게재되었다.

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명

## 연구 결과

논문명	Transparent Air Filters with Active Thermal Sterilization
저널명	Nano Letters
키워드	Transparent filter (투명필터), Air filtration (공기정화), Copper nanowires (구리나노선), Antimicrobial (항균)
DOI	doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02737
저자	한성근 석박통합과정 (1저자/서울대학교), 김재원 석사과정 (공동1저자/서울대학교), 이영석 석박통합과정 (공동저자/서울대학교), 방준혁 석박통합과정 (공동저자/서울대학교), 김철균 석박통합과정 (공동저자/서울대학교), 최준화 석박통합과정 (공동저자/서울대학교), 민진기 (공동저자/서울대학교), 하인호 (공동저자/서울대학교), 윤여상 (공동저자/서울대학교), 윤철희 (공동저자/서울대학교), Mutya Cruz (공동저자/Duke university), Benjamin J. Wiley (공동저자/Duke university), 고승환 (교신저자/서울대학교)

### 1. 연구의 필요성

- COVID-19의 대유행으로 인하여 전 지구적인 인명피해가 심화하고 이에 따른 사회경제적인 혼란이 가중되는 가운데 전염병을 막기 위한 공기정화 기술의 하나로 필터 기술은 단순히 미세먼지, 황사, 꽃가루 등 비전염성 입자로부터 호흡기를 보호하는 목적으로 활용됐으나 COVID-19과 같은 유행병으로 인해 전염성이 있는 병원균 입자를 차단하는 목적으로 마스크, 공기청정기, 차량 등에 널리 활용되고 있음.
- 그러나, 기존 필터는 병원균의 차단에만 초점을 맞췄기 때문에 주로 폴리머 재질로 제조되었고 이러한 필터는 병원균에 의한 오염에 취약하여 재사용이 불가능하므로 폐마스크로 인한 수많은 플라스틱 쓰레기를 양산하여 환경오염을 유발할 뿐만 아니라 오염된 필터로 인한 2차 감염 피해까지 우려되는 상황임.
- 이러한 한계 극복을 위하여 오븐이나 전자레인지 등 열을 이용한 필터 살균법이나 살균력이 있는 유기 용매를 활용하는 방법이 널리 알려졌지만, 야외공간, 사무실, 밀집 장소 등 다양한 상황에서 별도로

이러한 방안을 활용하기에는 시공간적인 한계가 있고 후자의 경우 필터 성능을 저하하는 문제점이 있어 현 상황을 해결하기 위한 근본적인 해결책이 되지 못했음.

- 한편, 얼굴에 착용하는 마스크의 경우 특유의 불투명함으로 인하여 안면을 가리기 때문에 의사소통을 저해하는 단점이 있으며 이는 표정에 의존하는 청각 장애인에게 큰 문제이므로 투명필터에 대한 수요가 높은 상태이나 연구가 미비한 상태임.
- 따라서, 우수한 미세먼지 및 병원균 차단 성능과 더불어 살균 기능이 있어 언제 어디서나 안전하게 사용할 수 있을 뿐만 아니라 재활용이 가능한 필터의 개발이 시급한 상황임.

## 2. 연구내용

- 본 연구에서는 우수한 살균력과 전기 전도성을 가지는 구리를 열수합성법을 통하여 직경이 100 nm에 불과한 나노선으로 합성하고 진공여과법을 활용하여 구리 나노선을 적층하여 “투명 구리 나노선 필터”를 제조하였음.
- 상기 필터의 미세먼지 및 병원균 차단 성능을 검증하기 위하여 각각 10 nm ~ 10 μm 범위의 KCl 미세먼지 입자와 두 가지 종류의 박테리아 (*E. coli*, *G. anodireducens*)에 대하여 필터 여과 테스트를 진행하여 나노선의 촘촘한 공극 구조로 인한 우수한 미세먼지 및 병원균 차단 성능을 확인하였음.
- 상기 필터의 병원균 살균 성능을 검증하기 위하여 구리에 취약한 박테리아를 집진한 필터를 배양하여 구리 이온에 의한 병원균 살균 효과를 검증하였으며, 구리에 저항력이 있는 박테리아를 집진한 필터에 전기를 흘려 주어 줄 열 (Joule-heating)에 의해 필터를 단시간 동안 (~10분) 가열하고 배양하여 열적 살균 효과를 검증하였음. 즉, 구리 나노선으로 만들어진 필터는 구리에 의한 지속적인 살균 및 능동적인 발열에 의한 열적 살균이 가능함.
- 상기 필터의 재사용성을 검증하기 위하여 미세먼지를 집진한 필터를

고분극성 용매인 에틸렌 글리콜과 에탄올의 혼합액으로 세척하여 표면에 축적된 미세먼지가 고분극성 세척액에 의하여 대부분 제거됨을 확인함. 또한, (1) 미세먼지 집진 및 포집, (2) 병원균 집진 및 열 살균 두 가지를 반복적으로 수행한 결과 미세먼지 및 병원균 열 살균 성능이 지속됨을 확인하였음.

- 상기 필터를 기반으로 마스크를 제조하여 착용 시에 상대방이 착용자의 입술의 움직임을 파악할 수 있어 시각 기반 의사소통이 가능하며 착용 및 미착용 시에 마스크를 열 살균이 가능한 온도로 가열할 수 있음을 확인하였음.

## 3. 연구성과/기대효과

- 투명 구리 나노선 필터는 매우 촘촘한 나노선 필터 구조 덕분에 기본적으로 우수한 미세먼지 및 병원균 차단효율을 보였음. 필터에 시험 박테리아가 포집될 시에 구리에 의해 살균과정이 진행되며 필터에 전기를 흘려주어 줄 열 (Joule heating)에 의해 필터 표면을 가열할 수 있어 능동적인 열적 살균도 가능하여 기존의 필터와 다르게 언제 어디서나 손쉽게 필터 살균이 가능함. 즉, 본 필터는 구리 나노선을 기반으로 하여 미세먼지 차단 및 병원균 살균 두 가지 목적을 달성할 수 있었음.
- 또한, 이 필터는 매우 얇은 나노선 덕분에 미세먼지 및 병원균을 효과적으로 차단하면서도 충분한 가시광선을 통과시켜 우수한 투명도를 보여 원활한 의사소통을 위한 마스크로 사용되거나 또는 창문에 적용되어 미세먼지 및 병원균 차단과 동시에 채광을 확보할 수 있는 신개념 필터로 사용될 수 있음.
- 결과적으로, 본 연구는 COVID-19과 같은 공기 중 전염성 병원균 및 미세먼지에 대한 보건적 측면에서의 대응, 유행병 사태에서 증가하는 폐플라스틱에 대한 환경적 측면에서의 대응, 그리고 불투명한 필터로 인한 의사소통 단절과 같은 사회적 측면에서의 대응을 통합한 새로운 개념의 필터 기술을 제시한다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있음.

## 용 어 설 명

### 1. 구리 나노선 (Copper Nanowires, CuNW)

- 나노 크기의 두께와 마이크로 수준의 길이를 갖는 얇은 선의 형태를 띠는 구리로서, 여러 나노와이어를 겹쳐 가벼우면서도 높은 전도성을 가진 네트워크를 제작할 수 있음.

### 2. 미세먼지 (Particulate Matter, PM)

- 공기 중에 오랫동안 부유하는 작은 물질을 지칭하는 단어로서, 공장 및 산업 단지 등에서 주로 방출됨.

### 3. 병원균 (Pathogen)

- 질병을 유발하는 원인 물질을 말하며, 곰팡이, 박테리아, 바이러스 등을 포함한다.

### 4. 미량동효과 (Oligodynamic Effect)

- 구리와 같은 금속의 이온이 미생물의 세포막에 침입하여 대사 작용을 교란시키고, 이를 통해 미생물을 제거하는 효과.

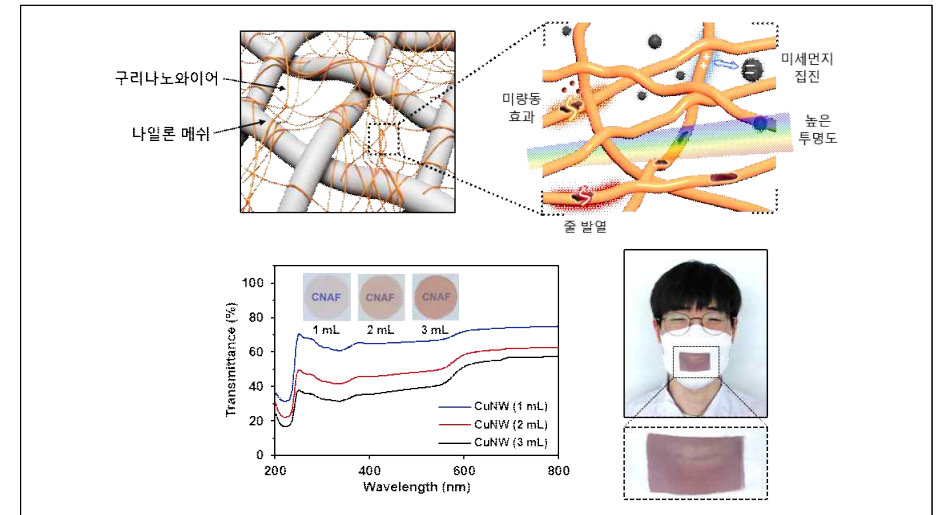
### 5. 줄 발열 (Joule-heating)

- 도체에 전류를 흘려줄 때, 전류의 흐름으로 인해 발생하는 열.

### 6. N95 마스크 (N95 Mask)

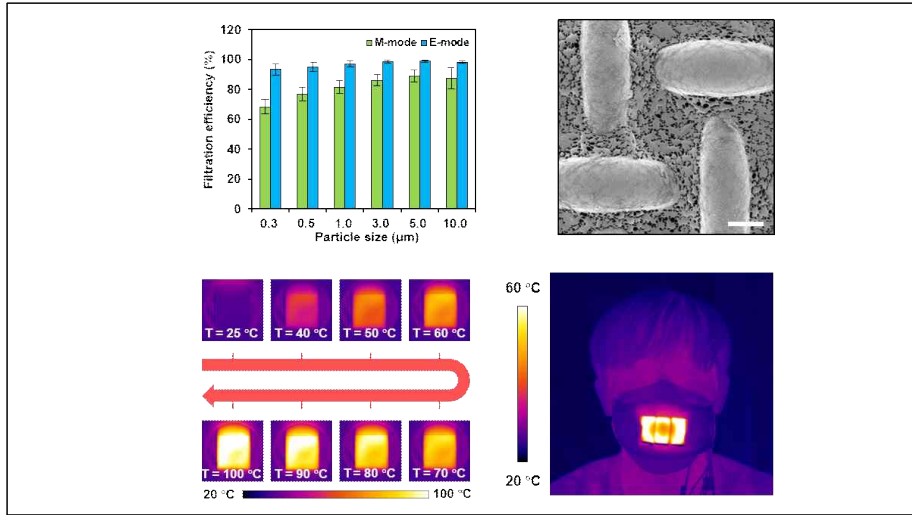
- 미국 식품의약국(FDA)가 제정한 마스크 기준 중 하나로, 0.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자에 대해 95% 이상의 포집 효과를 가짐.

## 그림 설명



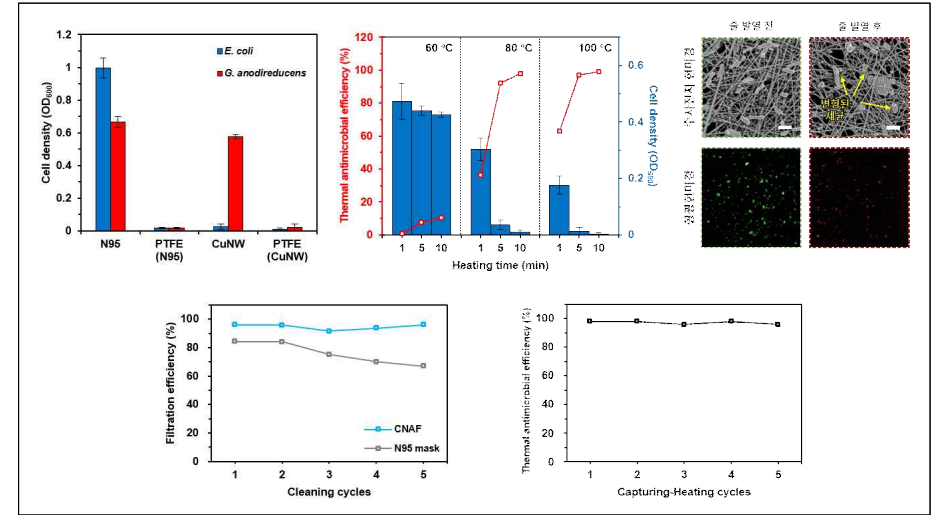
(그림1) 구리 나노선을 이용한 투명 구리 나노선 필터의 기능 모식도 및 투명도 검증

본 연구에서 개발한 투명 구리 나노선 필터는 나일론 메쉬 지지대 위에 다수의 구리 나노선을 적층하여 제작하였다. 본 필터는 물리적 방식과 정전기적 방식으로 미세먼지를 집진할 수 있으며, 미량동 효과와 줄 발열 방식으로 항균 기능을 구현할 수 있었다. 구리 나노선의 매우 얇은 두께 덕분에 충분한 효율로 미세먼지와 병원균을 포집할 수 있으면서도 동시에 필터를 통해 글씨가 분명히 보일 정도로 투명도를 유지하였으며, 본 필터를 마스크에 적용할 시에 착용자의 입과 표정을 확연히 구분할 수 있어 청각장애인 또는 비장애인의 원활한 시각 기반 의사소통에 도움이 될 것으로 예상된다.



(그림2) 투명 구리 나노선 필터의 물리 집진과 전기 집진의 미세먼지 집진 효율 평가 및 구리 나노선 필터의 발열 성능 검증

투명 구리 나노선 필터는 구리 재료의 나노선으로 이루어져 입자와 필터 섬유층의 충돌에 의한 물리 집진과 필터 표면의 강한 전기장에 의한 전기 집진이 가능하다. 각 집진 방식은 편의에 따라 조절할 수 있으며 물리적 방식으로는 약 89%, 전기 집진 방식은 더 향상된 99%의 집진 효율을 보여주고 있다. 한편, 전기적 전도성이 우수한 구리 나노선 네트워크에 전류를 흘려주었을 때, 줄 열에 의한 발열이 약 100°C까지 가능하였으며 이를 마스크에 적용할 시에도 살균에 충분한 정도로 표면 온도를 제어할 수 있었다.



(그림3) 투명 구리 나노선 필터의 미량살균 효과와 줄 발열의 항균·항바이러스 성능 평가 및 재사용성 검증

투명 구리 나노선 필터는 기본적으로 에어로졸 형태의 박테리아를 매우 높은 효율로 집진할 수 있다. 집진 이후에는 구리이온이 세균의 세포막을 투과하여 제거하는 효과인 미량 살균 효과 (Oligodynamic effect)를 통해 *E. coli*에 대해 N95 마스크 대비 97%의 살균 효과를 보여주었으며, 미량 살균 효과에 저항성을 띠는 것으로 알려져 있는 *G. anodireducens*도 줄 발열 처치를 통해 99%의 제균 효과를 확인하였다. 줄 발열 이후 세균 생존성 감소는 형광현미경을 통하여 재확인하였다. 본 필터는 고분극성 용매를 이용하여 표면의 오염물질을 세척할 수 있으며, N95 마스크와 비교 시에 세척 이후 본 필터는 미세먼지 집진효율을 유지한 반면에 N95 마스크는 효율이 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 한편, 줄 발열에 의한 열 살균 효과도 반복된 박테리아 집진에도 불구하고 높게 유지됨을 확인하였다.