

★ 배포 즉시 보도하여 주시기 바랍니다.

보도자료



한국연구재단
National Research Foundation of Korea

<홍보실> 실장 김한기, 담당 장효정 ☎ 042-869-6116

<자료문의> 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수(062-715-2655),
이길주 연구원(062-715-2658)

구부러지는 여러 색채의 친환경 냉각소재 개발

- 건물 표면, 웨어러블 전자소자 등에 적용 기대 -

□ 발열제품 및 빌딩의 온도를 낮추어주는 친환경 냉각 소재에 유연함과 다채로운 색깔이 더해졌다. **GIST(지스트, 총장 문승현) 송영민 교수(전기전자컴퓨터공학부)** 연구팀이 전원 공급이 필요 없는 구부러지는 색채 냉각 소재를 개발했다고 한국연구재단(이사장 노정혜)은 밝혔다.

□ 친환경 냉각 소재는 최근 화석 연료 고갈과 지구온난화 등의 환경 문제 속에서 그 중요성이 강조되고 있다. 그 중 수동형 냉각 복사 소재는 장적외선을 방출함으로써 외부 전원 공급 없이 주변 온도를 낮추어주고 전력 소모를 최소화해, 연구가 활발히 이루어지고 있다.

□ 그러나 이들 대부분은 태양빛을 반사하기 위해 은색이나 흰색을 띠고 있어, 극심한 광공해*를 일으킨다. 또한 유연성이 없는 딱딱한 물질로 이루어져 평면 구조로만 제작 가능하고, 활용 범위가 다소 제한적이다.

* 광공해(light pollution) : 인간에 의해 발생된 과잉 또는 필요 이상의 빛에 의한 공해

□ 연구팀은 이러한 기존 기술의 한계를 극복하고 다양한 색채를 가진 유연한 냉각 복사 소재를 개발했다.

- 개발된 소재는 가시광선을 증폭해 색채를 표현하는 부분과 냉각을 위해 장적외선 복사열을 방사하는 부분으로 구성된다. 색채 부분은 은-이산화규소(SiO_2)-은으로 구성되어 있고, 절연체인 이산화규소 층의 두께를 조절하면 선택적으로 색을 구현할 수 있다.
- 이어서 질화규소(Si_3N_4)와 이산화규소를 연속으로 적층함으로써 효과적으로 열을 복사해 주변을 냉각시킬 수 있게 했다. 태양 아래에서 온도변화를 관찰했을 때 개발된 냉각 소재의 표면 온도가 주변 대기보다 최대 5.6°C 낮았다.

□ 송영민 교수는 “이 연구의 특징은 기존 수동형 냉각 복사 구조의 한계인 광공해를 해결하고, 심미적 요인까지 고려했다는 것이다. 게다가 수백 나노미터의 얇은 두께로 이루어져있기 때문에 유연 소재로 사용될 수 있다”며, “시각 예술 등을 고려한 건물의 외벽, 차량 외장재, 조형물 등에 사용될 수 있으며, 웨어러블 소자의 냉각 소재로 사용될 수 있을 것으로 기대된다”고 연구 의의를 설명했다.

□ 이 연구 성과는 한국연구재단 미래소재디스커버리사업(과학기술정보통신부 소관), 이공학 개인기초연구지원사업, 글로벌박사양성사업(교육부 소관)의 지원으로 수행되었다. 광학 분야 국제학술지 첨단광학소재(Advanced Optical Materials) 8월 27일 논문으로 게재되었다.

<참고자료> : 1. 주요내용 설명
3. 연구 이야기

2. 그림 설명

1 주요내용 설명

□ 논문명, 저자정보

논문명	Colored, Daytime Radiative Coolers with Thin-Film Resonators for Aesthetic Purposes
저자	송영민(광주과학기술원, 교신저자), 이길주(광주과학기술원, 제1저자), 김영재(광주과학기술원), 김현명(광주과학기술원), 유영진(광주과학기술원)

□ 연구의 주요내용

1. 연구의 필요성

- 화석 연료 고갈로 인한 차세대 대체 에너지 개발에 대한 급진적 수요와 더불어, 에너지를 효율적으로 이용하고자 하는 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 수동 복사 냉각 구조는 외부 전원 공급 없이 발열제품 또는 빌딩/플랜트 등의 온도를 낮추기 위한 기구물로서, 전력소모를 최소화하여 온도를 낮출 수 있기 때문에 초절전/친환경 기술로 주목받고 있다. 이는 열평형을 유도하는 전도 및 대류방식과는 확연히 구분되는 기술이다. 특히 최근에는 야간뿐만 아니라 주간에도 사용할 수 있는 수동형 복사 냉각 구조 연구가 선진국에서 활발히 이루어지고 있다.
- 주간 활용을 위한 수동형 복사 냉각 구조는 태양광은 강하게 반사시키고, 내부 열은 전자기파의 형태로 외부공간으로 효과적으로 방출해야 한다. 따라서 이상적 복사 냉각 구조는 1) 280~4000 nm 파장의 빛은 최대한 반사시키고, 2) 대기의 창(Atmospheric window)* 영역인 8~13 μm 영역의 전자기파는 최대한 방출시켜야 한다. 가시광/근적외선 대역과 장적외선 대역을 모두 포함하는 광학적 설계는 매우 복잡하기 때문에 이전에는 태양광의 영향은 배제한 야간 냉각 시스템의 개발이 주를 이루었으나, 최근에는 메타물질* 연구가 활발히 이루어지면서 포토닉 구조 기반의 주간 냉각 시스템의 개발이 가능해지고 있다. 그러나 선행연구 그룹의 구조들은 매우 복잡한 유전체/금속 다층 박막 구조 또는 나노 구조와의 혼합 구조로 구성되어 제작단가가 높으며, 대면적 공정에 제약이 따른다. 또한 강한 태양광 반사가 기본적으로 요구되다 보니, 상용 수동 냉각 복사 소재는 육안으로 봤을 때 흰색 또는 은색으로 보인다.

* 대기의 창(Atmospheric window) : 8 - 13 μm 장적외선 파장 대역을 일컫는 말로 지구의 대기가 매우 투명한 영역을 뜻함.

* 메타물질 : 아직 자연에서 발견되지 않은 특성을 가지도록 설계된 물질. 일반적으로 플라스틱과 금속 같은 물질로 형성된 복합 요소의 집합체.

- 한편, 수동형 복사 냉각 구조는 주로 건물의 외벽이나 발열제품의 외부에 장착되기 때문에, 실제 응용을 위해서는 심미적 요인을 고려해야 하며, 따라서 단순히 흰색 또는 은색 계열의 색상이 아닌 다양한 형태의 색깔을 구현할 수 있어야 한다. 그러나 현재까지는 발색기능을 가지면서 동시에 수동 냉각 특성을 보이는 소재에 대해서는 개발된 사례가 없다.

2. 연구내용

- 이 연구에서는 얇은 금속(Ag)-절연체(SiO_2)-금속(Ag) 구조에서 특정 파장의 빛만을 흡수하는 광학 구조를 이용하여 가시광 대역에서 최소한의 태양에너지를 흡수하는 현상을 이용하였다. 공진 파장의 조절은 절연체 층의 두께 조절을 통해서 가능하고, 이러한 선택적 빛 흡수를 통해 빨주노초파남보 등의 다양한 색상이 구현 가능하다. 또한, 공진 파장 영역을 제외한 파장의 빛은 90% 이상 반사된다. 그렇기 때문에 발색 효과를 보임과 동시에, 발열은 최소화 된다. 하지만 이러한 최소한의 태양광 흡수 소재를 이용해도 한낮의 강한 햇빛 아래에서는 색상 소재의 온도가 주변 대기의 온도보다 섭씨 3°C에서 10°C 가량 상승하기 때문에 태양에너지를 최소화하여도 약간의 발열은 피할 수 없다.
- 이러한 미소 발열에 대한 해법으로 발색 구조인 금속-절연체-금속 광학 구조 위에 대기의 창 영역 (8-13 μm)에서 매우 높은 방사율을 지닌 열 복사 구조를 집적하였다. 열 복사 구조는 두 층의 절연체($\text{SiO}_2, \text{SiNx}$)로 이루어졌으며, 먼저, 각 절연체의 두께에 따른 대기의 창 영역에서 열 방사율 특성을 시뮬레이션 해보았다. 또한, 사용된 절연체 물질은 태양광 파장 대역(280 - 4000 nm)에서 매우 투명하기 때문에 태양광에 의한 발열은 없으며, 발색 특성은 저해하지 않으면서 최적의 열 방사율을 가지는 구조는 910 nm 의 SiNx 와 연이어서 650 nm 두께의 SiO_2 조합으로 결정되었다.

- 시뮬레이션을 통해 얻은 설계된 열 방사구조와 색상 구현 구조를 분석하기 위해 반사형 컬러 필터의 대표 색상인 청록색(Cyan), 자주색(Magenta), 노란색(Yellow)을 가지는 색채 냉각 복사 소재를 제작하여 태양 아래에서 온도 변화를 관찰하였다. 그 결과, 색상에 따라 다르지만 주변 대기 온도보다 색채 냉각 소재의 표면 온도가 최대 약 5.6°C 낮은 것을 확인하였다.
- 이러한 이론적 계산 및 실험적 증명을 통해 확인한 후, 플렉서블 형태로 색채 냉각 소재를 제작한 후 상용 웨어러블 전자소자인 스마트 워치에 부착하였다. 그런 다음, 낮 시간 동안 실외에서 스마트 워치를 동작시키면서 소자의 온도 변화를 관찰한 결과, 색채 냉각 소재가 접착된 경우, 최대 38°C 가 넘지 않았지만, 아닌 경우에는 거의 50°C 에 육박하는 것을 확인하였다.

3. 연구성과/기대효과

- 색상 구현과 열 방사구조를 단순 절연체 물질과 금속으로 이루어진 다층 박막 구조를 이용함으로써, 다양한 색상을 낼 수 있는 색채 소재를 넘어 태양광이 강한 낮 시간에도 주변 대기 온도보다 낮게 냉각이 가능하므로 기존의 수동 냉각 복사구조의 광공해(Light pollution)를 해결할 수 있다. 이러한 데코레이션 기능을 통해 이 연구에서 개발한 색채 냉각 소재는 보다 넓은 범위에 설치가 가능할 것으로 예상되며, 기존 수동 냉각 복사구조의 설치 장소인 옥상을 뛰어넘어 건물의 외벽, 차량 외장재, 조형물 등에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.
- 또한 개발된 색채 냉각 소재는 나노미터 단위의 박막 구조이며 제작이 용이한 단순한 구조이므로 제작 단가가 낮고, 구부러질 수 있는 특징이 있다. 이 연구에서 시연한 것처럼 상용 웨어러블 기기에 적용되어 냉각 소재로 사용될 수 있으며, 다양한 색상 구현이 가능하기 때문에 최신 유연소자 분야에서 냉각과 데코레이션을 동시에 수행하는 색채 냉각 소재로 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

2 그림 설명

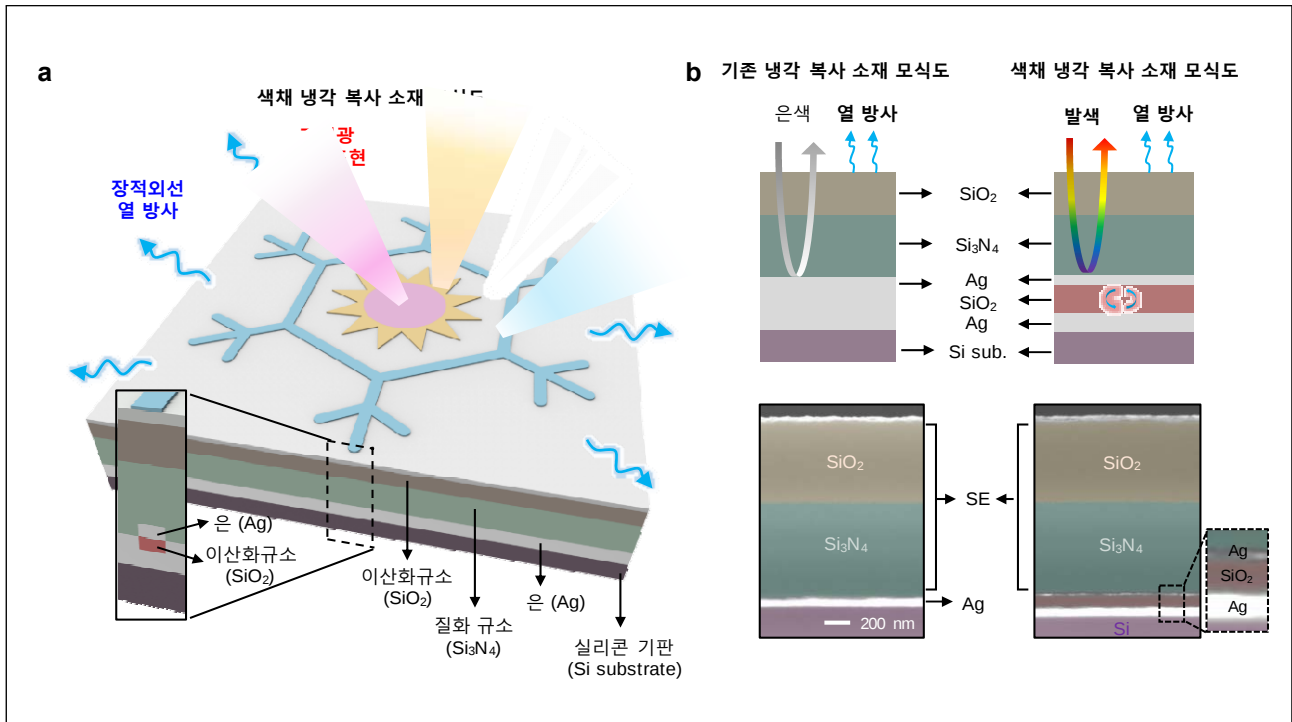


그림1

(a) 색채 냉각 복사 소재 모식도,

(b) 기존/색채 냉각 복사 소재 단면도 (위) 및 전자 주사 현미경 이미지 (아래)

이 연구의 색채 냉각 복사 소재는 가시광 대역 공진 구조 내의 이산화규소 층 두께 조절을 통해 반사형 컬러필터의 3원색인 청록색, 자색, 노란색이 구현 가능하다. 이러한 3원색은 패터닝을 통해 원하는 문양 또는 무늬를 만들 수 있다. 기존 냉각 복사 소재와 비교해 발색 공진 구조가 삽입된 형태이며 각 층은 단순한 필름 형태이다.

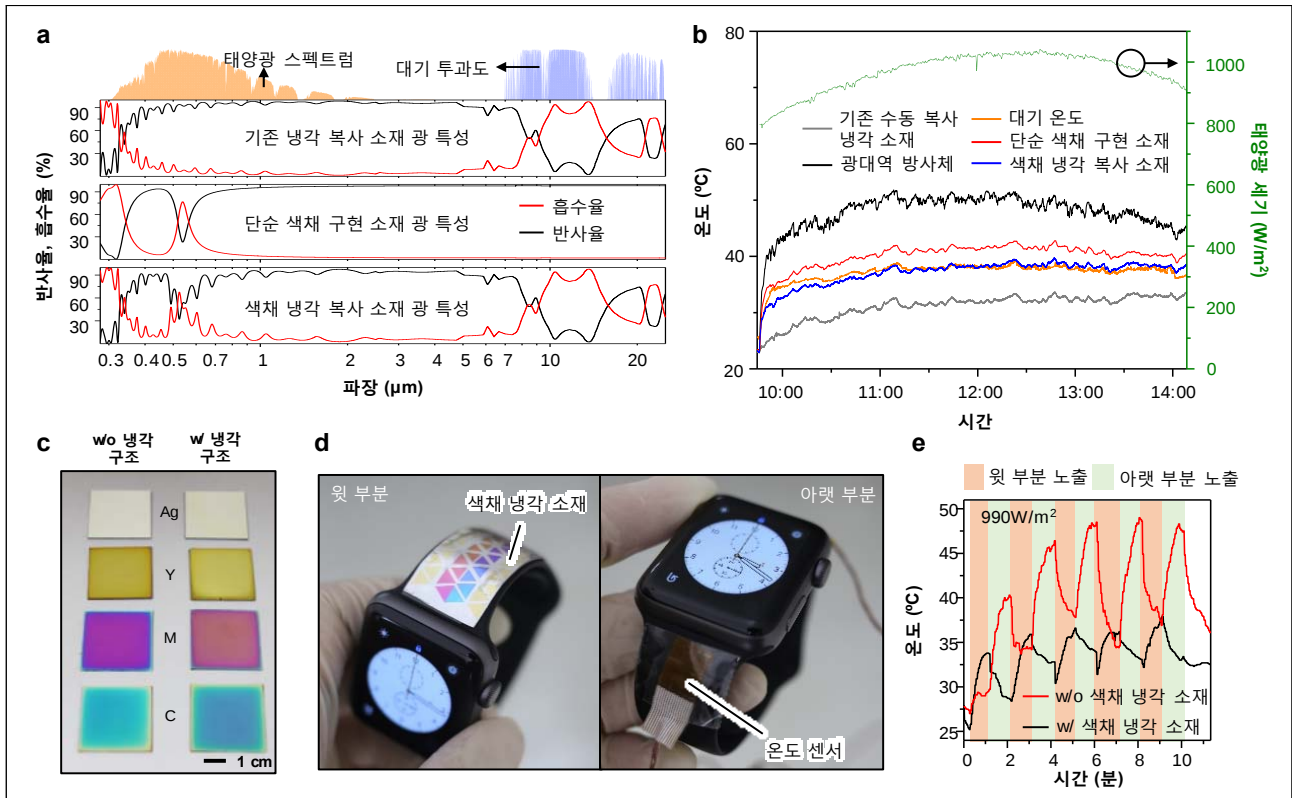


그림2.

(a) 가시광 및 장적외선 특성: 기존 냉각 복사 소재 (위), 단순 색채 구현 소재 (중간), 색채 냉각 복사 소재 (아래).

(b) 색채 냉각 소재의 온도 변화 특성.

(c) 평면형태의 단순 색채 구현 소재(좌), 색채 냉각 복사 소재(우)의 사진.

(d) 스마트 워치에 부착된 유연 색채 냉각 소재의 이미지.

(e) 스마트 워치의 온도 변화.

시뮬레이션을 통해 각 소재의 광 특성을 분석한 결과, 색채 냉각 복사 소재는 가시광 대역의 공진과 장적외선 대역의 공진 특성을 보인다. 이러한 광 특성을 통해 강한 태양광 아래에서도 주변 대기온도와 비슷한 온도를 보이고, 실제 웨어러블 소자에 부착했을 시 냉각 특성을 확인할 수 있다.

3 연구 이야기

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

이 연구의 주저자인 이길주 학생은 학부연구생 때부터 다양한 나노 포토닉스 구조에서의 특이한 광학 현상과 웨어러블 전자 소자에 대해서 많은 관심이 있었고, 각각의 주제를 병행하면서 연구 역량을 키워왔다. 궁극적으로는 이 두 주제를 접목시킨 연구를 진행하고 싶었기 때문에, 대학원에 진학하면서 그간 해왔던 연구 내용을 토대로 유연한 색채 광공진 구조를 설계하고 이를 웨어러블 전자 소자에 적용하여 데코레이션 기능이 있는 웨어러블 소자 개발에 집중했다. 그러던 중에 장적외선에서 공진구조를 형성하면 냉각소재로 활용 될 수 있다는 내용이 저명한 학술지에 보고되면서 이 연구에 응용할 수 있을까 고민하였다. 장적외선 영역과 가시광 영역은 매우 구분되는 파장 대역이기 때문에 각각의 대역에서 독립적으로 동작하는 공진 구조를 설계할 수 있었고, 이를 반도체 공정을 이용하여 지금과 같은 유연하면서도 색상을 가지는 냉각 소재를 개발할 수 있었다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

연구책임자인 송영민 교수는 대학원 재학시절부터 반도체 광소자에서 발생하는 빛의 반사, 굴절, 투과, 흡수 등에 대한 연구를 지속적으로 진행해왔다. 태양전지의 효율을 극대화할 수 있는 광대역 무반사 나노구조, 투명 디스플레이를 더욱 투명하게 할 수 있는 투명전극, 곤충 눈을 모방한 카메라 등이 이에 포함된다. 이 연구는 가시광 대역과 장적외선 대역에서의 빛의 반사와 흡수성질을 적절히 활용하여 발색과 냉각 효과를 구현하는 것으로서 앞선 연구들의 연장선 상에 있다. 이를 구현하기 위해, 광학 설계를 통해 설계된 색상과 냉각 특성을 낼 수 있도록 금속/절연체 박막 구조를 반도체 공정을 통해 제작하고, 이어서 냉각효과를 위한 절연체 구조를 앞선 시료에 연속하여 성장하는 방식으로 시료를 제작한다. 제작된 샘플은 광학 특성 측정, 색상 표현 및 온도 측정을 통해 평가되며 이론적 수치와의 비교/피드백이 이루어진다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

실험은 크게 어려운 점은 없었으나, 제작한 샘플의 냉각 특성 평가를 위해서 아침 10시부터 오후 3시까지 샘플을 욕상에 두고 샘플의 온도를 측정했어야 하는데, 아무래도 대기의 상태나 풍속이나 구름의 양 등에 영향을 많이 받아 정확한 데이터를 측정하는 것이 다소 어려웠다. 이를 위해서 측정 장비의 조건을 일정하게 유지하면서 기상 예보가 좋은 날 여러 번 측정하면서 만족할만한 데이터를 얻을 수 있었다.

☐ 이번 성과, 무엇이 다른가?

스탠포드 대학의 연구 그룹에서 2013년도 네이처(Nature) 지에 낮 시간에도 주변 대기의 온도보다 낮게 냉각할 수 있는 수동 냉각 복사 소자가 최초 보고된 바 있으나, 딱딱하고 은색 표면색을 가지는 단점이 있다. 이 연구에서는 이러한 점들을 극복하기 위해 수동 냉각 복사 구조 아래에 가시광 공진 구조인 금속-유전체-금속 구조를 삽입하여, 기존 수동 냉각 복사 구조와는 달리 다양한 색상을 표현하였다. 또한, 기판 물질을 기존 연구와 달리 금속 포일을 이용하여 손쉽게 유연 기판 위에 색채 냉각 복사 구조를 제작하였다. 이를 통해 다양한 색채를 가진 유연한 수동 냉각 복사 구조를 제작할 수 있었다. 특히, 기존에는 수동 냉각 복사 소재가 색상을 가지게 되면 주변 대기 온도보다 냉각되는 게 어렵다는 게 정설이었는데, 이 연구에서 제안하는 가시광 공진 구조를 이용하면 보다 색상을 가지면서도 대기 온도보다 낮게 유지할 수 있다. 따라서, 웨어러블 전자 소자의 냉각/색채응용, 건물 외벽, 차량 외장재, 조형물 등에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

☐ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

이 연구에서 제안한 유연한 색채 냉각 복사 소재가 실용화된다면 크게는 대기과 태양에 노출되는 색상을 가진 건물 표면이나 옥외 조형물 등에 응용되어 시각 예술을 표현하면서 동시에 냉각 소재로 사용될 것으로 기대된다. 작게는 최근 활발하게 개발되고 있는 웨어러블 전자소자나 초소형 전자소자들의 냉각 소재로 사용되면서 색채 응용도 함께 병행할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 실용화를 위한 과제로는 대면적 제작 방법 확보가 필요하다. 이 연구에서는 제한된 크기 로만 시료를 제작했는데, 공정 방법이 매우 간단하고 단순한 금속/유전체 증착을 반복하면 되는 구조이기 때문에 롤-투-롤(Roll-to-roll) 공정 방법을 응용하면 극복 가능할 것으로 기대된다.

☐ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

현재 제작된 샘플은 주로 포토닉 구조에 의한 가시광/장적외선 특징에 집중하여 색상 표현과 냉각 특성을 주로 살펴보았지만, 추후에는 이를 이용한 좀 더 복잡한 웨어러블 전자 소자를 제작하고 이에 응용할 수 있는 수준까지 만드는 것이 목표이다.