

|                                                                                   |                                                                                       |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|  | <b>지스트(광주과학기술원) 보도자료</b><br><a href="http://www.gist.ac.kr">http://www.gist.ac.kr</a> |              |
| 배포일시                                                                              | <b>배포 즉시 보도 부탁드립니다.</b>                                                               |              |
| 보도일                                                                               | 2020.09.05.(토)                                                                        |              |
| 보도자료                                                                              | 홍보팀 김효정 팀장                                                                            | 062-715-2061 |
| 담당                                                                                | 홍보팀 이나영 선임행정원                                                                         | 062-715-2062 |
| 자료 문의                                                                             | 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수                                                                     | 062-715-2655 |

## 지스트, 찜통차 예방 실마리… 친환경 냉각소재 개발

**- 야누스 포토닉 구조를 통한 내부온도 제어… 밀폐차량의 극단적 가열현상 해결 기대**

- 찜통차처럼 밀폐된 공간에서의 온실효과로 인한 극단적인 과열을 해소할 실마리가 나왔다.
  - 지스트(광주과학기술원, 총장 김기선) 전기전자컴퓨터공학부 송영민 교수 연구팀이 외부전원 없이 밀폐된 공간의 온도를 낮춰줄 친환경 소재로 된 구조체를 개발하였다.
- 쾌적한 실내온도 유지를 위한 차량지붕용 소재 뿐 아니라 전자기기의 발열을 막을 방열소자나 냉방에너지 절약을 위한 건축물 시공 등으로의 응용을 위한 단초가 될 것으로 기대된다.
- 위에서부터 차례로 폴리머(PDMS), 은(Ag), 석영(SiO<sub>2</sub>)으로 된 두께 500  $\mu$ m 정도의 다층패널 형태로, 온도를 낮추고자 하는 공간의 위를 덮는 형태로 냉각 효과를 낼 수 있다.
  - 태양광을 강하게 반사(90% 이상)하는 금속 은(Ag)을 기준으로 위 아랫면에서의 복사 특성을 분리하여 아랫면은 밀폐된 공간에서 열을 흡수

하고 흡수된 열을 윗면을 통해 방출시킨다. 로마신화에 나오는 두 얼굴의 신, 야누스를 따라 야누스 복사 냉각기라고 명명한 이유이다.

- 물론 자연적 열 방출인 복사현상을 이용하는 냉각방식은 기존에도 있었다. 하지만 한 쪽 단면에서만 열을 방출하기에 부착된 표면(surface)의 냉각에만 그쳐 공간(space)의 열을 배출시키기는 어려웠다.

\*수동형 복사 냉각 방식: 장적외선을 복사를 통해 방출함으로써 외부 전원 공급 없이 주변 온도를 낮추어주는 냉각 방식

- 개발된 냉각소재는 맨 아래 놓인 석영 구조체가 접하고 있는 밀폐된 공간 내부의 열을 흡수(광대역 복사)하면, 그 위의 폴리머 구조체가 이 열이 주변 공기를 데우는데 쓰이지 않도록 하면서 전자기파 형태로 방출(선택적 복사)하여 밀폐공간의 온도를 낮춘다.

- 실제 차량모사 환경에서 측정한 결과 기존 수동복사냉각 소재\*가 ‘표면’만 냉각시키는 데 반해 이 소재는 차량 ‘내부’의 온도를 43℃에서 39℃로 4℃가량 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

\*기존 수동복사냉각 소재 : 태양광을 반사하는 알루미늄(Al) 기판, 두께 100 μm의 폴리머(PDMS)로 된 이상적인 광대역 복사기

- 이를 자동차 소비전력 절감효과로 환산하면 10% 절감할 수 있는 수준이다.

- 한편 이번 연구는 10cm<sup>2</sup> 면적의 야누스 냉각판을 이용한 것이나, 면적에 비례해 방출에너지가 커지는 적외선 열복사 특성상 차량 같은 큰 체적에서도 냉각효과를 보일 것으로 연구팀은 기대하고 있다.

- 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 기초연구지원사업(BRL 등)과 미래소재디스커버리사업의 지원으로 수행된 이번 연구결과는 기업으로 기술이전되는 한편 국제학술지 사이언스 어드밴시즈(Science Advances)에 2020년 9월 4일 게재되었다. <끝>

## 주요내용 설명

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 논문명 | A Janus Emitter for Passive Heat Release from Enclosures                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 키워드 | passive heat release, greenhouse effect, surface cooling, space cooling                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 저널명 | Science Advances                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 저자  | 송영민 교수(교신저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 허세연 박사과정(공동 제1저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 이길주 박사과정(공동 제1저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 김도현 통합과정(공동저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 김영재 박사(공동저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), Satoshi Ishii 박사(공동저자·일본국립재료과학연구소(NIMS), 일본 과학 기술청(JST)), 김민석 박사과정(공동저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 석태준 교수(공동저자·광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부), 이봉재 교수(공동저자·한국과학기술원·기계공학과) 전기전자컴퓨터공학부) 이현 교수(공동저자·고려대학교 신소재공학부) |

### 1. 연구의 필요성

- 화석연료 고갈로 인한 차세대 대체에너지 개발 수요와 더불어, 에너지를 효율적으로 이용하려는 노력이 전세계적으로 활발하다. 외부전원 공급 없이 발열제품 또는 빌딩/ 플랜트 등의 온도를 낮추기 위한 기구인 수동복사 냉각 구조 역시 그 같은 노력의 일환이다.
- 냉각을 위한 전력소모를 최소화할 수 있어 초절전/친환경 기술로 주목받고 있다. 열평형을 유도하는 전도 및 대류방식과는 확연히 구분되는 기술이다. 최근에는 야간 뿐 아니라 주간에도 사용할 수 있는 수동형 복사 냉각 구조 연구가 활발하다.
- 주간 활용을 위해서는 태양광은 강하게 반사시키고, 내부 열은 전자기파의 형태로 외부공간으로 효과적으로 방출해야 한다. 따라서 이상적 복사 냉각 구조는 1) 280-4,000 nm 파장의 빛은 최대한 반사시키고 2) 대기의 창\* 영역인 8~13  $\mu\text{m}$  영역의 전자기파는 최대한 방출시켜야 한다. 대기의 창 영역의 전자기파는 선택적 또는 광대역으로 방출시켜야 한다. 대기의 투과율이 높은 스펙트럼 영역에서 복사를 통해 300K인 지구에서 3K인 우주로 열을

복사함으로써 열전달 효율을 극대화하여 에너지 공급 없이 대기 온도 아래로 냉각할 수 있다. 열평형 방정식에 따르면 전자기파를 선택적으로 8~13  $\mu\text{m}$ 에서만 열을 복사하는 경우(선택적 복사기), 냉각 온도(cooling temperature)를 높이는 데 유리하고, 4~30  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 넓은 영역에서 효과적으로 열을 복사하는 경우 냉각 전력(cooling power)을 높이는 데 유리한 측면이 있다.

\* 대기의 창(Atmospheric window) : 8 - 13  $\mu\text{m}$  장적외선 파장 대역을 일컫는 말로 지구의 대기가 매우 투명한 영역을 뜻함.

- 한편 주차된 차량이나 건물같이 열적으로 밀폐된 공간에는 기존 수동 복사 냉각기를 이용한 주간 냉각에 한계가 있다. 건물 및 차량 유리의 경우 가시광영역에서 투명하나 장 적외선(10  $\mu\text{m}$  이상의 전자기파)을 반사하는 특성 때문이다. 유리를 통과한 태양광은 차량 내부 물체를 가열하고, 가열된 내부 물체는 장적외선 파장을 재복사한다. 재복사된 장적외선 파장은 내부에 열이 갇히는 ‘온실효과’를 만든다.
- 그 결과, 한여름 주차된 차량의 주변 온도는 35℃이지만 차량 내부 온도는 1시간 이내에 60℃ 이상으로 치솟는다. 차량에 갇힌 채 높은 기온으로 체온이 40℃ 이상 높아졌다가 정상으로 되돌아오지 않는 이상 고열과 고체온 합병증으로 숨질 수 있다. 미국 연구진에 따르면 특히 여름철 햇볕이 내리쬐는 장소에 차를 주차하면 10분 내 실내온도는 42℃, 1시간 내 무려 61℃까지 치솟는다. 테슬라에서는 일부 차종에 운전자가 떠나도 최대 12시간 동안 차량 실내온도가 40℃를 넘기지 않도록 환기구를 열거나 에어컨을 작동하는 차량 컨트롤 소프트웨어를 탑재했다.
- 한편 현재까지 연구된 수동형 복사 냉각 구조는 대기를 향하고 있는 소자의 열 방사율을 극대화시켜 냉각하는 방식이다. 이는 부착된 주변 위치만 냉각되므로 실내에서 가열되거나 온실 효과로 인해 내부가 가열되는 상황에서는 냉각하기 어려운 구조이다.

## 2. 연구내용

- 이 연구에서는 복사 스펙트럼 제어를 통하여 상단의 선택적 복사기와 하단의 광대역 복사기 역할을 하는 야누스 열 복사기를 제작하고, 밀폐공간 냉각을 이루었다.
- 먼저 이상적(Ideal) 선택적 복사기를 개발하고 냉각성능을 평가하였다.
- 기관의 방사율이 대기의 창 영역( $8\sim13\ \mu\text{m}$ )에서 선택적으로만 존재할 경우, 복사로 우주로 열을 방출하는 양이 대기로부터 흡수되는 열의 양보다 월등히 많게 되기 때문에 복사 냉각에 보다 효과적이다. 이를 위해 기존 유전체 다층 박막 또는 메타구조를 도입한 선택적 복사기는 특성이 이상적 수치에 도달하기에는 턱없이 부족한 수준이며 공정방식도 복잡하다.
- 이를 극복하기 위해 공정이 비교적 간단하면서도 우수한 선택적 복사기를 개발하였다. PDMS(Polydimethylsiloxane) 또는 고분자/유전체 물질은 각 물질 고유의 진동방식에 의해 몇몇 장적외선 영역에서 높은 흡광계수를 가진다. 예를 들어 수  $\mu\text{m}$  수준의 얇은 두께의 PDMS로도 90% 이상의 방사율을 가질 수 있다. 그러나 대기의 창 영역 일부에서 방사율 손실이 존재하기 때문에 선택적 복사기로 동작하기 어렵다. 본 연구에서는 낮은 복사 특성을 갖는 일부 파장에서 공진이 발생할 수 있도록 표면 플라즈몬 폴라리톤(sPP) 구조와 분산 관계를 사용하여 이상적 선택적 복사기를 개발하였다.
- 시뮬레이션을 통해 얻은 열 복사 구조를 분석하기 위해 PDMS,  $\text{SiO}_2$ , Ag를 이용하여 설계된 구조를 반도체 공정을 통해 제작하여 태양광 아래에서 온도변화를 관찰하였다. 그 결과, 주변 대기온도보다 선택적 복사 소재의 표면 온도가 최대 약  $6\ ^\circ\text{C}$  낮은 것을 확인하였다.
- 나아가 이상적 광대역 복사기를 설계하고 야누스 복사 구조 제작, 특성을 평가하였다.
- 공간 냉각을 위하여 단면 복사 특성만 가진 기존 수동 복사 냉각 시스템과는 차별된 양면 복사 특성을 갖는 복사 냉각기를 제안하였다. 냉각 온도에서 그 효과가 입증된 선택적 복사기는

하늘을 향하게 하여 대기의 재흡수 없이 우주로 열을 빼는 효과를 극대화함과 동시에 높은 냉각 전력을 가진 광대역 복사기(흡수기)는 밀폐된 공간의 내부를 향하게 하여 가장 많은 양의 열을 흡수한다. 즉 윗면은 선택적, 아랫면은 광대역 복사 특성을 갖는 양면이 다른 야누스 수동 복사 특성을 통하여 열적으로 밀폐된 공간의 열을 빼는 효율을 극대화 하였다.

- 언급한 이상적 선택적 복사기의 밑면 기관을 규소 등의 유전체를 이용하고, 3차원 광학시뮬레이션으로 도출한 최적 두께를 적용, 이상적 광대역 복사기를 도입하였다. 이를 통해 단일 기관에 야누스 복사 특성을 갖는 냉각 소자를 구현했다. 그 결과, 기존 수동 복사 냉각 소재 대비 차량 내부 온도에서 4℃ 가량 냉각 효과를 확인했다.

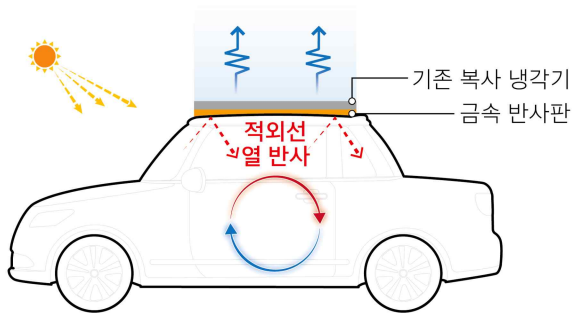
### 3. 연구성과/기대효과

- 수동형 복사 냉각 구조 연구는 기술개발 장벽이 높다. 본 연구에서 제안한 양면의 복사 특성을 이용한 공간 내의 온도제어에 대한 첫 보고이기에 성공적으로 개발될 경우 수동형 복사 냉/난방 시스템에 관한 원천기술 확보의 단초가 될 수 있다.
- 야누스 수동복사 소자는 전력을 이용하지 않고, 전자 소자/기기 또는 건물/실외기기 등의 온도를 낮출 수 있어 에너지 절감 효과를 기대할 수 있다. 특히 차세대에너지 기술 및 스마트 그리드 기술 등과 연동될 경우 그 효과가 더 커질 것으로 기대된다.

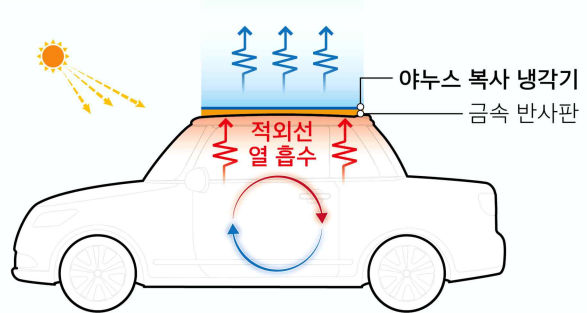
# 그림 설명

자연대류 복사

## 기존 냉각 소재



## 제안 냉각 소재

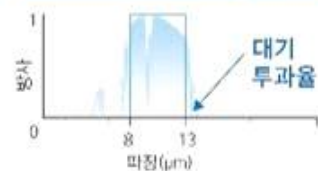


[그림1] 기존 냉각 소재와 야누스 소재의 열 복사·방출 특성 차이점에 대한 개략도  
 (기존 냉각 소재) 내부 열을 반사하여 내부 열 흡수에 불리함  
 (제안 냉각 소재) 밀폐된 내부 공간에서 열 적외선 흡수 및 외부 방출에 유리함.

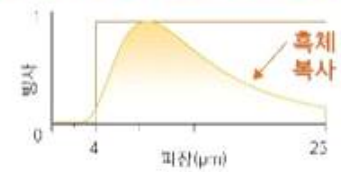
## 제안 구조 모식도



## 야누스 냉각기 윗면 폴리머



## 야누스 냉각기 아랫면 석영



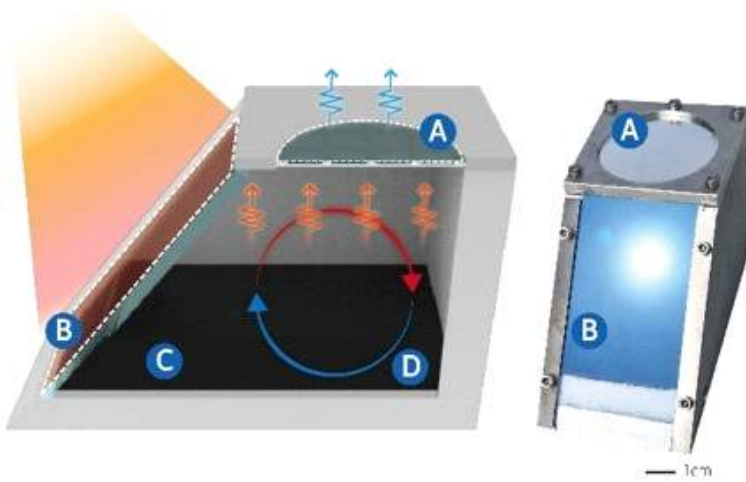
[그림2] 직사광선 아래에서 주차된 차량에 적용된 야누스 구조의 모식도.

(확대된 구조) 제안된 야누스 구조는 위에서부터 순차 적으로 폴리머, 은(Ag), 및 마이크로 공진 구조의 석영(SiO<sub>2</sub>)으로 구성됨.

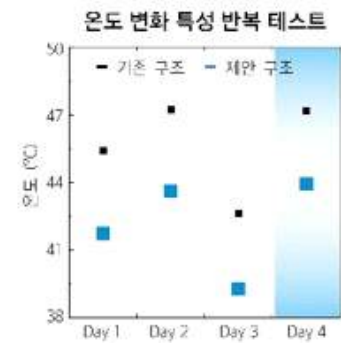
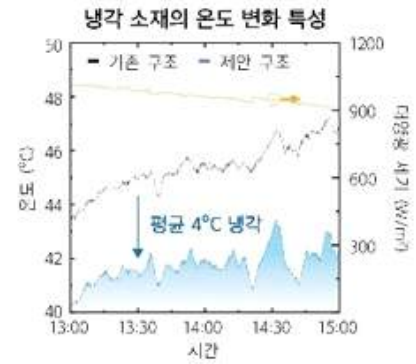
(야누스 냉각기 윗면 폴리머) 야누스 냉각기의 윗면은 폴리머를 통해 대기 투과율이 높은 부분에서만 선택적 열복사 특성을 가짐.

(야누스 냉각기 아랫면 석영) 야누스 냉각기 아랫면은 석영 기판을 통해 흑체 복사의 전체 파장 영역에서 광대역 열복사 특성을 보임.

## 차량 모사 밀폐공간



**A** 냉각소재    **B** 태양광 투과/적외선 반사 유리  
**C** 열 재방출 소재(가죽)    **D** 온도 측정 센서



[그림 3] 야누스 구조의 차량 모사 밀폐 공간에서의 냉각 성능 시연

(좌) 차량 모사 밀폐 공간의 형태의 구조물로 외부 태양광에 의해 가열되는 개략도. 프레임 상단은 야누스 냉각 소재 또는 기존 냉각 소재로 덮임. 전면은 태양광 투과/적외선 반사 유리, 밑면은 열 재방출 소재 및 온도 측정 센서로 구성됨.

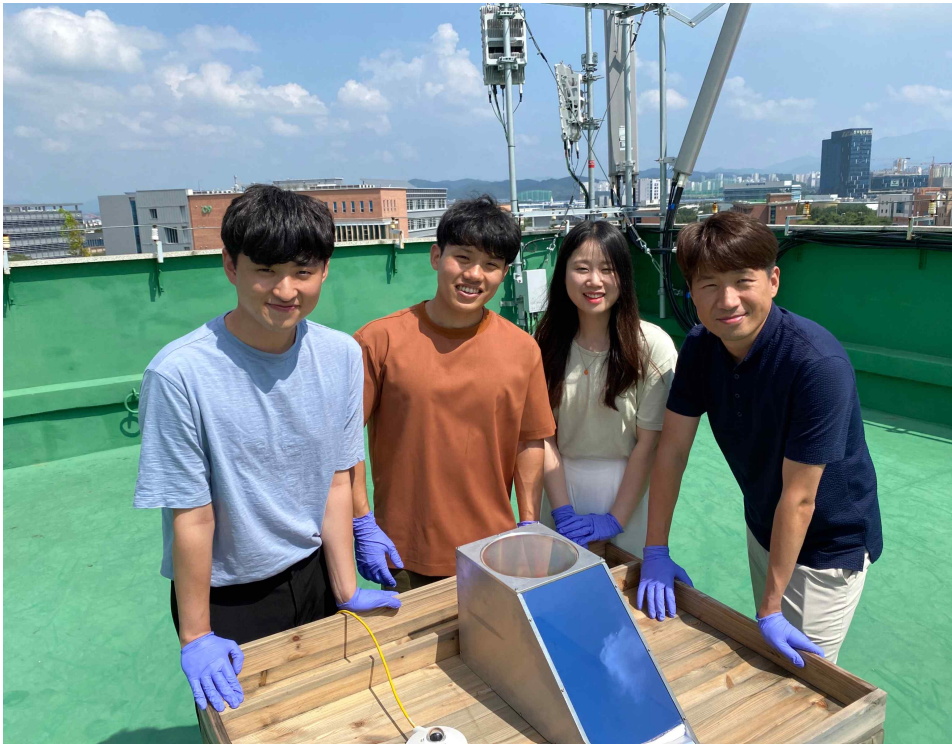
(우) 냉각 소재의 온도 변화 특성- 야누스 소재의 경우 기존 수동 복사 냉각 소재 대비  $-4^{\circ}\text{C}$  냉각됨. 온도 변화 특성 반복 테스트- 맑은 날씨와 안개 낀 날씨 조건이 다른 나흘 동안의 온도 변화 특성 반복 테스트. Day 4는 안개 낀 날에도 측정이 유효함 보임.



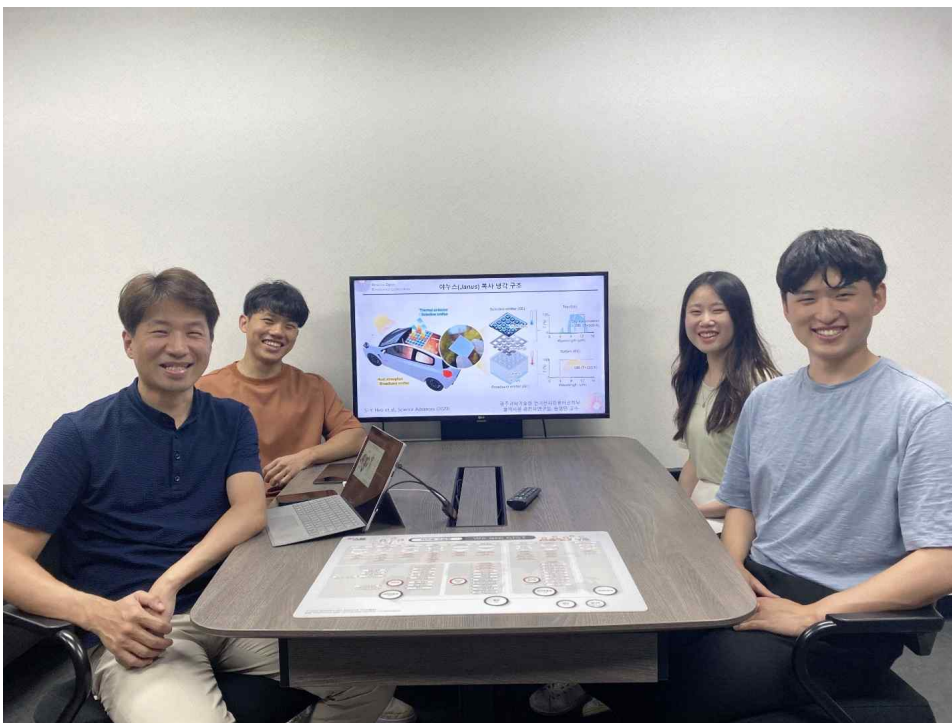
[그림 4] 야누스 냉각 구조가 적용된 열적으로 밀폐된 공간의 열 방출 모식도

(좌) 밀폐된 차량 윗면에 야누스 냉각 구조를 적용할 경우, 가장 아래에 있는 석영기판으로 된 광대역 복사기가 아래에 놓인 차량 내부의 열(붉은색으로 표시)을 흡수(노란색 표시)하고 이어 그 위에 있는 폴리머 기판으로 된 선택적 복사기가 이를 대기공간으로 방출(파란색 표시)하는 방식으로 차량 내부의 온도를 낮춘다.

(우) 차량 구조를 모사한 모델의 열 방출 이미지



[사진1] 야누스 소재 개발 연구팀 사진: 왼쪽부터 김도현 연구원(통합과정), 이길주 연구원(통합과정), 허세연 연구원(통합과정), 송영민 교수



[사진2] 야누스 소재 개발 연구팀 사진: 왼쪽부터 송영민 교수, 이길주 연구원(통합과정), 허세연 연구원(통합과정), 김도현 연구원(통합과정)

# 연구 이야기

## □ 연구를 시작한 계기나 배경은?

최근 수동 복사 냉각 분야는 에너지 소비나 오염 물질의 방출 없이 온도를 낮출 수 있기 때문에 세계적으로 큰 관심을 끌고 있다. 우리 연구팀 역시 이 분야의 지속 가능성에 매료되었으며 ‘미학적 목적을 위한 컬러 복사 냉각기’를 구현하여 수동복사 냉각기를 보다 다양한 분야에서 사용할 수 있도록 한 연구결과를 광학 분야 국제학술지인 ‘어드밴스드 옵티컬 머티리얼’에 2018년 보고한 바 있다. 또한, 우리는 같은 이유로 ‘공간’ 또한 수동으로 ‘에너지 사용 없이 냉각’ 되기를 원했다. 그러나 종래의 수동복사 냉각기들은 안쪽 면의 복사 특성이 밀폐된 공간에서의 냉각에 상당히 영향을 주더라도, 하늘에 노출된 한쪽의 복사율만 고려하기 때문에 차량과 같은 밀폐 공간 냉각에 부적합한 것으로 밝혀졌다. 그래서 밀폐된 공간에서 수동 열 방출을 위한 양면 복사특성이 다른 ‘야누스 복사 냉각기’에 관한 아이디어를 생각해 냈다.

## □ 연구 전개 과정에 대한 소개

연구책임자는 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 선택적 복사기와 광대역 복사구조를 반도체 공정을 통해 제작하고, 이를 이용하여 차량과 같은 밀폐공간의 냉각을 위한 위 아랫면이 상이한 복사 특성을 갖는 야누스 냉각 소재를 제작했다. 제작된 샘플은 광학 특성 측정, 생상 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 옥상에 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?

최근 보도된 수동복사 냉각기의 경우 낮 시간에도 주변 대기의 온도보다 낮게 냉각됨을 시연했다. 이러한 냉각기는 건축 외장재, 지붕 또는 사람의 피부에 부착되어 전도 및 대류를 통해 온도를 낮춘다. 그러나 보통 소재의 한쪽면의 복사 성질만 구현했기 때문에 한낮에 주차된 차량과 같은 밀폐된 공간에서 열이 지속해서 누적될 경우에는 한계가 있다. 이번 연구에서는 양면의 열복사율을 제어하여 양면에서 다른 복사 특성을 갖는 야누스 복사 냉각 소재를 개발하였다. 이를 통해 밀폐된 공간의 열을 빼낼 수 있었다. 또한, 각 면 역시 현재까지 보고된 최고 수준의 수동 복사 냉각 연구결과와 그 특징 및 기능적 측면에서 비슷한 수준이어서, 웨어러블 전자소자의 냉각, 건물 외벽, 조형물 등에 다양하게 활용될 수 있을 것을 기대된다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

이 연구에서 제안한 야누스 복사 냉각 소재가 실용화된다면 크게는 대기과 태양에 노출되는 자동차, 건물 표면이나 옥외 조형물 등에 응용되어 에너지 공급이 필요 없는 냉각 소재로 사용될 것으로 기대된다. 작게는 웨어러블 전자소자나 초소형 전자소자들의 냉각 소재로의 응용도 함께 병행할 수 있을 것으로 기대된다. 실용화를 위해 대면적 제작 방법 확보가 필요하다. 이 연구에서는 제한된 크기만으로 시료를 제작했는데, 시뮬레이션을 통해 폴리머 기판의 경우도 시연 가능함을 확인했기 때문에 패터닝을 롤-투-롤(Roll-to-roll) 공정 방법을 응용하면 대면적 샘플 제작이 가능할 것으로 기대된다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

현재 제작된 샘플은 높은 온도일수록 냉각 효과가 우수한 광대역 복사기를 차량 모형에 적용하여 저온에서 냉각이 억제되는 것을 확인했다. 그러나 물체의 열이 복사를 통해 빠져나올 수 있기 때문에 추운환경에서도 어느 정도 냉각 효과를 보인다. 따라서 다음 연구에서는 주변 환경에 따라 IR 복사 특성을 끄고 켤 수 있는 방식으로 온도 항상성을 유지하는 복사 장치를 고안하려고 한다.