



Review

Recent Progress in Passive Radiative Cooling for Sustainable Energy Source

Choyeon Park^{*,**}, Chanil Park^{**}, Jae-Hak Choi^{*}, and Youngjae Yoo^{***,†}

^{*}Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University,
99 Daehak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

^{**}Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
141, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, Republic of Korea

^{***}Department of Advanced Materials Engineering, Chung-Ang University, 4726 Seodong-daero,
Daedeok-Myeon, Anseong 17546, Republic of Korea

(Received June 17, 2022, Revised June 24, 2022, Accepted June 27, 2022)

Abstract: Passive daytime radiative cooling (PDRC) is attracting increasing attention as an eco-friendly technology that can save cooling energy by not requiring an external power supply. An ideal PDRC structure should improve solar reflectance and emissivity within the atmospheric spectral window. Early designs of photonic crystal materials demonstrated the benefits of PDRC. Since then, functional arrangements of polymer-based radiative cooling materials have played an important role and are rapidly expanding. This review summarizes the known inorganic, organic, and hybrid materials for PDRC. The review also provides a complete understanding of PDRC and highlights its practical applications.

Keywords: passive radiative cooling, atmospheric window, composites, porous polymer, thermal emitter

Introduction

여름철 일상생활에서 적절한 실내 온도를 유지하기 위해 냉각에 사용하는 전력은 막대하여 세계적으로 많은 에너지 소모가 발생한다. 통계에 따르면 전 세계적으로 냉각시스템에서 소비되는 전력량은 전체의 15%를 차지하며, 냉각을 위한 지나친 전력 소비는 온실가스 배출 및 지구온난화로 이어진다.¹ 수동 주간 복사냉각(passive daytime radiative cooling) 기술은 전력을 사용하지 않고 냉각이 가능하기 때문에 에너지 소비량을 줄일 수 있고, 온실 가스 배출, 대기 질 문제 해결에 기여할 수 있어 연구가 활발히 이루어지고 있다.²⁻⁷ 수동 복사냉각 기술은 지구(300K)상의 물체가 열 복사를 통해 차가운 우주(3K) 공간에 열을 방출하는 원리를 이용한다. 수동 복사냉각 원리를 이해하기 위해서는 지구의 복사 에너지 흐름과 대기의 창(atmospheric window) 개념을 먼저 살펴볼 필요가 있다. 플랑크 법칙(Planck's law)에 따르면 온도가 300K인 흑체의 복사 스펙트럼은 2.5~25 μm 파장 영역에 분포하기 때문에, 지구상의 높은 방사율을 가진 물체는 비슷한 복사 스펙트럼을 갖게 된다(Figure 1a).⁸⁻¹¹ 대기의 창은 8~13 μm 의 원격외선 영역으로 정의하는데, 이 파장 영역에서는 대기를 구성하는 이산화탄소, 오존, 수증기 등 분자에 의한 흡수가 거의 없고 투과도가 높기 때문에 지구에서 우주로의 열 방출이

가능하다.^{5,12} 따라서, 높은 효율의 복사냉각 기술을 개발하기 위해서는 대기의 창 영역으로 열을 잘 방출할 수 있도록 높은 방사율을 가지는 소재를 설계하는 것이 중요하다.

일반적으로 냉방 수요는 주로 주간 및 여름철 태양광 노출이 많을 때 높기 때문에 직사광선 아래에서 높은 복사냉각 성능은 필수적이다. 하지만 주간에는 태양 복사에너지가 강하여 물체의 표면에서 외부로 방출되는 열 복사를 쉽게 상쇄시키기 때문에 수동 주간 복사냉각을 달성하기 어렵다(Figure 1b). 이를 극복하기 위해서는 가시광선과 근적외선 영역($\lambda=0.3\sim2.5\ \mu\text{m}$)에서 빛을 반사시켜 태양 복사에너지의 흡수를 줄이고, 원격외선 영역($\lambda=8.0\sim13.0\ \mu\text{m}$)에 존재하는 대기의 창으로 열을 방출할 수 있도록 소재를 설계하는 것이 핵심이다(Figure 1c).

에너지의 수요가 증가함에 따라 신재생 에너지·지속가능한 에너지의 중요성이 대두되고 있다. 2014년 Raman 연구팀의 연구가 발표된 이후, 수동 주간 복사냉각은 추가적인 전력의 사용이 없어 효율적인 열관리와 에너지 절감에 매우 유용하기 때문에 에너지 소재 및 응용분야에서 연구들이 활발히 진행되고 있다. 여기서 수동 주간 복사냉각의 기본원리를 요약하고 이상적인 복사냉각 소재를 구현하기 위한 최근 기술 개발 동향과 다양한 응용분야를 소개한다. 본 논문은 수동 주간 복사냉각의 전반적인 이해와 향후 실제 적용에 많은 도움을 줄 것으로 기대한다.

[†]Corresponding author E-mail: yjyoo@cau.ac.kr

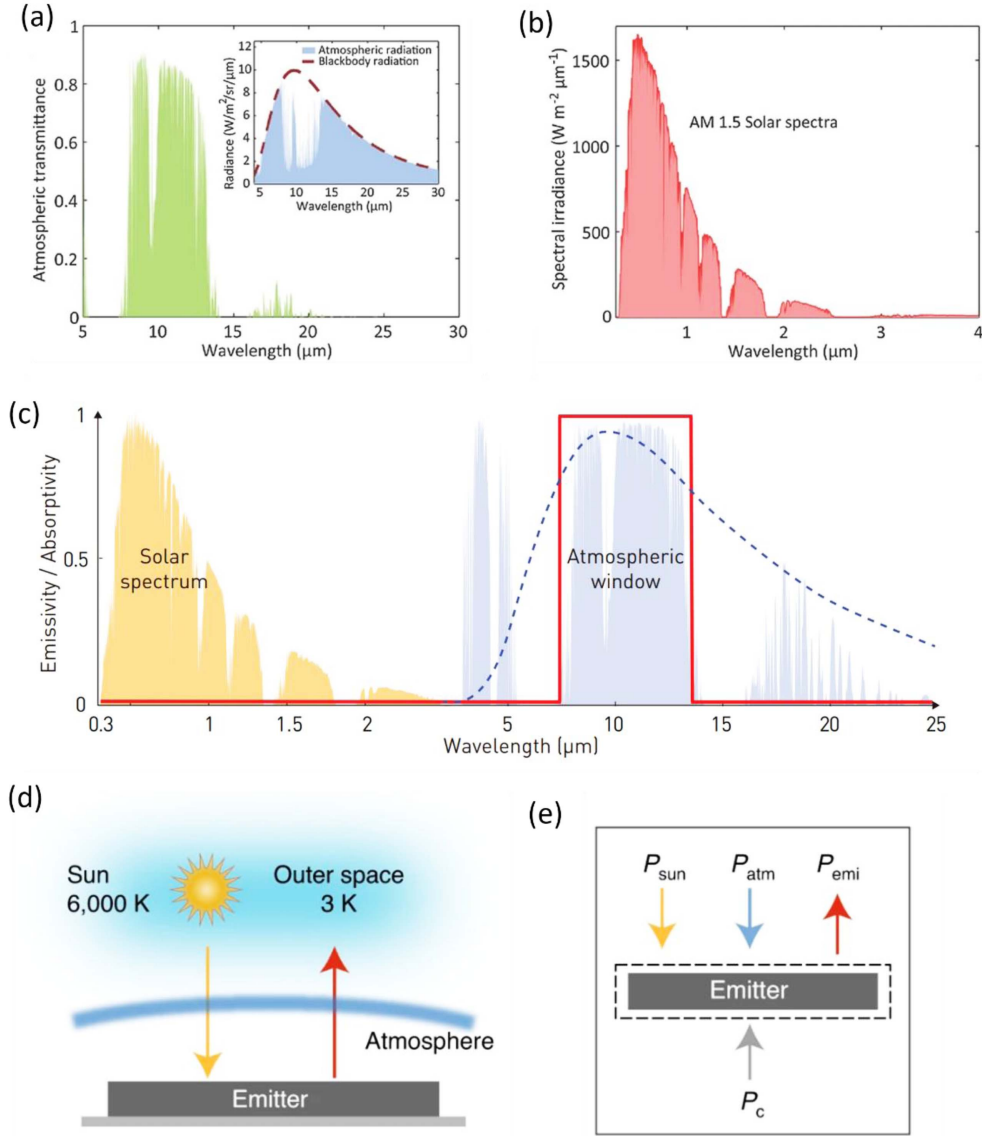


Figure 1. (a) An atmospheric transmittance and atmospheric radiation (inner data) spectra. (b) A reference AM 1.5 solar irradiance spectra.⁵ (c) The ideal optical properties of a radiative cooling material.¹³ (d) Radiative heat-exchange process of daytime radiative cooling. (e) Thermal balance of daytime radiative cooling.³

수동 복사냉각의 원리

지구상에 햇빛과 대기 환경에 노출된 물체는 대류 및 전도, 열복사 등에 의해 열 교환 및 열적 평형을 이룰 수 있다. 수동 주간 복사냉각은 태양빛이 강한 낮에 냉각체가 방출하는 복사에너지가 흡수하는 에너지보다 우세하여 냉각이 가능한 원리이다(Figures 1d, e). 즉, 전자기파 형태로 방출하는 복사열이 태양 및 대기로부터 흡수하는 복사에너지의 양보다 많아 냉각 효과가 나타난다. 이러한 수동 복사냉각의 에너지 수지식(energy balance equation)에 따라 순 냉각력(net cooling power)은 다음과 같이 정의할 수 있다.¹⁴

$$P_{net}(T) = P_{rad}(T) - P_{Sun} - P_{atm}(T_{ambient}) - P_{non,rad} \quad (1)$$

여기서 $P_{rad}(T)$ 는 냉각체 표면의 온도(T) 조건에서 외부로 방출하는 복사에너지를 의미하고, P_{Sun} 은 냉각체가 흡수하는 태양 복사에너지를 나타낸다. $P_{atm}(T_{ambient})$ 은 주변 온도($T_{ambient}$)에서 냉각체가 흡수하는 대기의 복사에너지를 의미하는데, 이는 대기를 구성하는 분자들에 의해 방출되는 복사에너지도 존재하기 때문이다. $P_{non,rad}$ 은 냉각체와 주변 환경 간의 대류 및 전도를 통한 열 교환을 나타낸다. 이들은 다음 식들을 이용해 더 자세히 정의할 수 있다.¹⁴

$$P_{rad}(T) = A \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta) \quad (2)$$

여기서 A 는 냉각체의 면적, $\int d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta$ 이고, θ 는 반구(hemisphere)의 각도(polar angle)에 대한 적분을 의미하고 $\varepsilon(\lambda, \theta)$ 는 각도 θ 와 파장 λ 에 대한 냉각체의 방사율이다. 또한, 절대 온도(T)에서 흑체의 방사열 세기는 Planck's law를 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$I_{BB}(T, \lambda) = (2hc^2/\lambda^5)/[e^{hc/(\lambda\kappa_B T)} - 1] \quad (3)$$

여기서 h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, κ_B 는 볼츠만 상수, λ 는 파장을 나타낸다.

$$P_{Sun} = A \int_0^\infty d\lambda \varepsilon(\lambda, \theta) I_{AM1.5}(\lambda) \quad (4)$$

$I_{AM1.5}(\lambda)$ 은 표준 태양 스펙트럼 복사 조도를 나타낸다. 식 (4)에 따르면 태양 복사에너지는 주간 복사냉각 성능에 많은 영향을 끼친다. 냉각체가 더 많은 햇빛을 흡수할수록 냉각 성능이 저하되기 때문에 냉각체는 높은 태양광 반사율을 갖는 것이 중요하다.

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon(\lambda, \theta) \varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) \quad (5)$$

대기의 주요 구성성분인 질소(N_2), 산소(O_2), 이산화탄소(CO_2), 수증기(H_2O)는 태양 및 지구의 복사에너지 일부를 적외선 영역에서 흡수하고 다시 우주나 지구로 방출한다. 그러나 대기의 창 영역은 투과도가 높아, 대기에 의한 흡수 거의 없이 냉각체에서 전자기파의 형태로 열을 방출할 수 있다. 따라서 수동복사 냉각체는 대기의 창 영역에서 1에 가까운 방사율(emissivity)을 갖는 것이 이상적이다.

$$P_{non,rad} = Ah_c(T_{amb} - T_{sam}) \quad (6)$$

$h_c (= h_{cond} + h_{conv})$ 는 대류 및 전도에 의한 열 전달 계수를 의미한다. 이 때, 에너지($P_{non,rad}$)는 냉각체의 표면과 주변환경 간의 열 교환에 의해 결정된다. 결론적으로, 고효율의 수동 주간 복사냉각을 달성하기 위해서는 식 (1)을 고려하여, 냉각체에서 방출되는 복사 에너지를 최대화하고 태양 및 대기 복사 에너지 흡수, 그리고 대류와 전도에 의한 열 흡수를 최소화해야 한다. 이를 위해 소재의 파장에 따른 광학 물성을 고려할 필요가 있다.

키르히호프의 복사법칙(Kirchhoff's law of thermal radiation)은 열적 평형 상태에서 방사율과 흡수율은 비례하다고 정의되고, 이를 이용하여 복사열이 물체에 도달할 때 에너지 보존 법칙은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (7)$$

위 식에 따라 모든 파장에서 물체의 흡수율(방사율, $\varepsilon(\lambda)$), 반사율($\rho(\lambda)$), 투과율($\tau(\lambda)$)의 합은 항상 1이다. 따라서, 수동복사 냉각체의 효율을 높이기 위해서는 원하는 파장 영역에서 소재의 반사율과 흡수율을 선택적으로 조절해야 한다. 이상적

인 수동복사 냉각체는 태양광 반사율은 높고 적외선 영역 중 에서 대기의 창 영역 에서만 방사율이 높은 선택적 방사체(selective emitter)이다. 반대로 광대역 방사체(broadband emitter)는 상대적으로 넓은 적외선 영역에서 높은 방사율을 갖는 것을 말한다. 광대역 방사체는 주변 온도보다 물체가 낮은 온도를 제공하지 못하거나 선택적 방사체보다 냉각력이 낮다. 그 이유는 광대역 방사체가 넓은 적외선 영역에서 흡수 스펙트럼을 가지고 있어서 대기로부터의 복사에너지를 흡수하여 방사체 표면에서 방출되는 복사에너지가 상쇄되기 때문이다. 따라서, 이상적인 방사체를 구현하기 위해서는 대기 창 영역에서 선택적으로 방사율이 높아 대기에 의한 복사 에너지 흡수를 줄이고 열을 방출하는 것이 중요하다.

수동 복사냉각 소재와 종류

1. 무기 소재(Inorganic materials)

수동 주간 복사냉각 연구 초기에는 다층 구조, 광 결정, 메타 소재 등이 복사냉각 소재로서 뛰어난 잠재성이 입증되었다.¹⁴⁻²¹ 2014년에 Stanford 대학교의 Raman 연구진은 광결정 다층 박막구조를 사용하여 최초의 수동 주간 복사냉각을 구현했다.¹⁴ 이 광결정 소자는 Si/Ti/Ag 층 위에 다양한 나노 두께의 SiO_2 와 HfO_2 등 7개 층으로 구성된 구조를 제안했다(Figure 2a). 3개의 상층에 사용된 SiO_2 는 포논-폴라리톤 공명으로 인해 9~10 μm 근처에서 강력한 흡수 피크를 나타내고, HfO_2 또한 강한 흡수 피크를 가져 8~13 μm 파장영역에서 높은 방사율 특성에 기여했다. 4개의 하층은 Ag 층과 함께 높은 태양광 반사율(97%)을 위해 최적화되었다(Figure 2b). 또한, 실제 외부환경에서 복사냉각 효과를 확인할 수 있도록 실험장치를 설계하였는데, 반사필름으로 코팅된 폴리스타이렌 폼 위에 냉각체를 놓고 그 위를 low-density polyethylene (LDPE) 필름으로 막아 바람에 의한 영향을 최소화 하였다. 약 800 W/m²의 일사량 조건의 외부실험에서 개발된 냉각체가 주변온도보다 약 5°C 낮은 온도를 나타내는 것을 확인하여 수동 주간 복사냉각 기술의 응용 가능성을 입증했다. 이후 메타 물질을 이용한 연구가 활발히 연구되기 시작하였는데, 2015년 Swinburne 공과대학교의 Hossain 연구진은 게르마늄(Ge)과 알루미늄(Al)의 교대층으로 구성된 대칭 원뿔형 메타물질(conical metamaterial, CMM)을 제안하였다(Figure 2c). 이러한 다층 금속-유전체 이방성(anisotropic) 메타물질 구조는 플라즈몬 또는 광자 공명의 여기로 인해 선택적인 흡수를 갖는다. 따라서, 8~13 μm 파장영역에서 90%에 가까운 선택적인 방사율을 갖도록 설계되어 비복사 열교환 계수 6.9 W/m²K² 조건인 주간 주 주변 온도 대비 9°C 가량 냉각이 가능할 것으로 예측되었다(Figure 2d).²⁰ 또한, Zhejiang 대학교의 Fu 연구진은 알루미늄을 양극 산화(anodic aluminum oxide, AAO)시

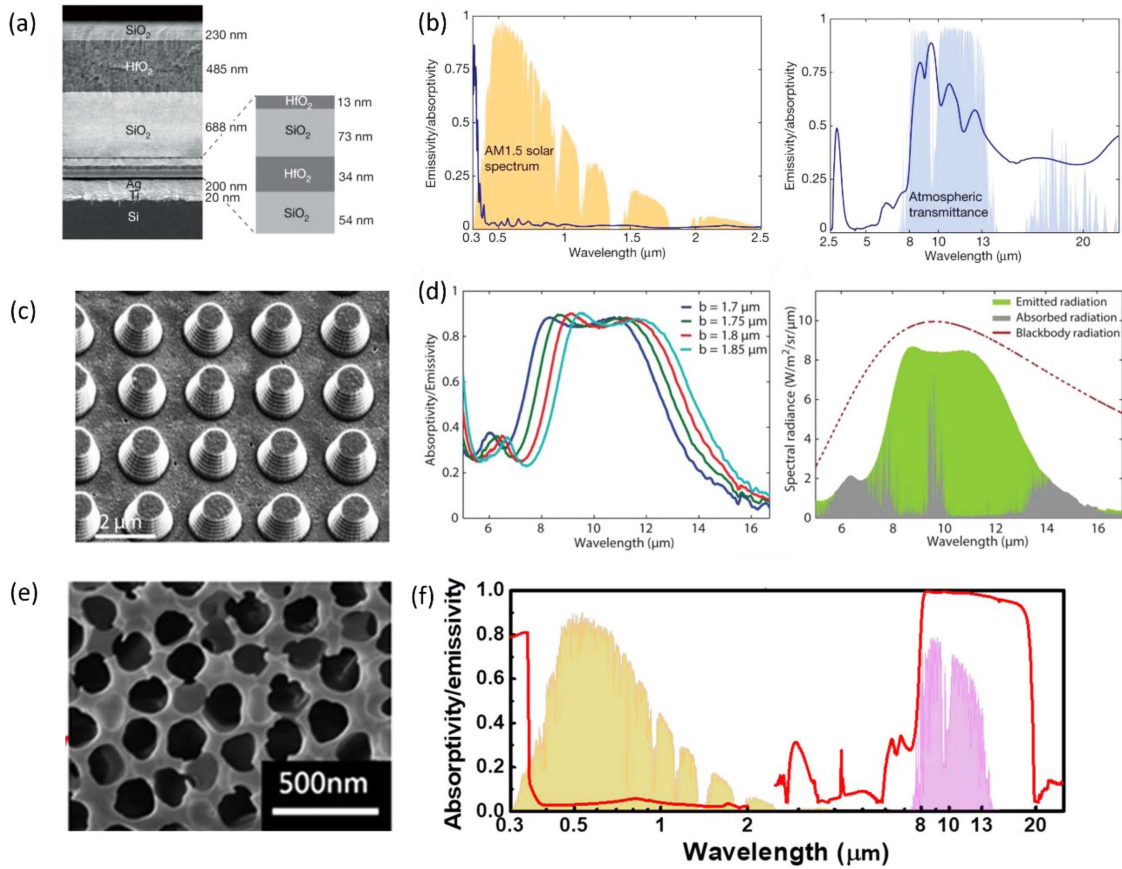


Figure 2. (a) SEM image of the photonic radiative cooler that is designed (b) Emissivity/absorptivity of the photonic radiative cooler from the ultraviolet to the mid-infrared.¹⁵ (c) SEM images of the CMM structures. (d) Measured emissivity (absorptivity) of the CMM structures for different sizes of the CMM pillar and calculated spectral radiance of the CMM structure at the ambient temperature of 300 K.²⁰ (e) SEM images for top view of AAO sample. (f) Emissivity/absorptivity of AAO sample from the ultraviolet to the mid-infrared.²²

켜 제작한 다공성 구조체를 복사냉각 소재로 활용하였다. 개발된 AAO 구조체는 Al₂O₃ 내의 다공성으로 인해 원적외선 영역에서 강한 공명 흡수를 가져 0.95 방사율을 보였다. 또한, 실험적으로 직사광선 아래에서 주변 온도보다 2.6°C 낮은 복사냉각 효과를 구현하였고(Figures 2e, f),²² 이러한 결과는 기존의 AAO 멤브레인 소재에 새로운 응용 분야를 제공하였다. 복사냉각용 무기소재 개발은 광 결정(SiO₂, SiO, TiO₂, SiN₄, SiC 등), 메타 소재의 포논 공명을 이용해 대기의 창 영역에서 방사율을 향상시키는 연구가 주를 이루었다. 그러나 광 결정, 메타 소재는 최대 10%의 태양광을 흡수하기 때문에 보다 완벽하게 태양 복사에너지를 차단하기 위해 은 반사층이 필요했고, 제조 공정이 복잡하고 대면적이 어려운 한계가 있다. 앞서 언급한 AAO 멤브레인 냉각 소재는 효율성과 확장성 측면에서 광 결정 및 메타 소재보다 비교적 좋은 대안이 될 수 있으나 여전히 제한된 공정으로 제약을 받는다. 따라서 무기소재를 이용한 복사냉각 연구가 비교적 간단한 공정 개발을 통해 실제 적용 및 대면적 코팅에 용이한 방안을 마련한다면 이상적인 주간 복사냉각체를 구현할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 유기 소재(Organic materials)

Raman 연구팀 이후에¹⁴ 수동 주간 복사냉각 기술이 재조명되고 다양한 무기 소재들이 연구되었지만 상대적으로 간단한 공정으로 코팅이 가능한 소재가 필요하게 되었고, 그 대안으로 고분자를 기반으로 한 복사냉각 소재가 활발히 연구되기 시작하였다. 최근 연구에 따르면 별도의 반사층 없이 광 산란을 유도하는 다공성 구조의 고분자는 태양광 영역에서 높은 방사율을 가능하게 한다.²³⁻²⁸ 특히, 계층적 기공구조(hierarchically porous structure)는 빛을 다중 산란(multiple light scattering) 시켜 고분자의 태양광 방사율을 높이는데 기여한다. 또한, 대기의 창 영역에서의 높은 방사율은 필수적이기 때문에 고분자 매트릭스(polymer matrix)의 선택도 중요하다. 고분자는 주사슬의 화학 구조에 따라 분자 결합 진동과 스트레칭으로 인해 높은 방사율을 구현할 수 있다. 특히, 6.7~16.7 μm 파장 영역은 대기의 창 영역을 포함하기 때문에 C-O, C-N, C-Cl, C-F, C-O-C, -CHO, C=C의 작용기를 갖는 고분자가 높은 방사율 구현에 유리하다. 또한, 상대적으로 가격이 저렴해 많은 고분자들이 복사냉각 소재로 연구가 진행되었다.²⁹⁻³⁵

Columbia 대학교의 Mandal 연구진은 계층적인 다공성 구조를 갖는 $P(\text{VdF-HFP})_{\text{HP}}$ 을 보고했다.²³ Figure 3a, b에서 볼 수 있듯이 후면 금속 반사층 없이도 위상 반전 기법을 이용해 마이크로/나노 크기의 다공성 복사냉각 소재를 개발했다. 이

러한 기공 구조는 빛을 효율적으로 후방 산란시켜 높은 태양광 반사율(0.96)을 가지고, $P(\text{VdF-HFP})$ 분자의 진동 운동에 의한 원적외선 흡수로 인해 높은 방사율(0.97)을 나타냈다. 이 냉각체는 옥외 실험을 통해 주변 온도보다 6°C 가량 복사냉

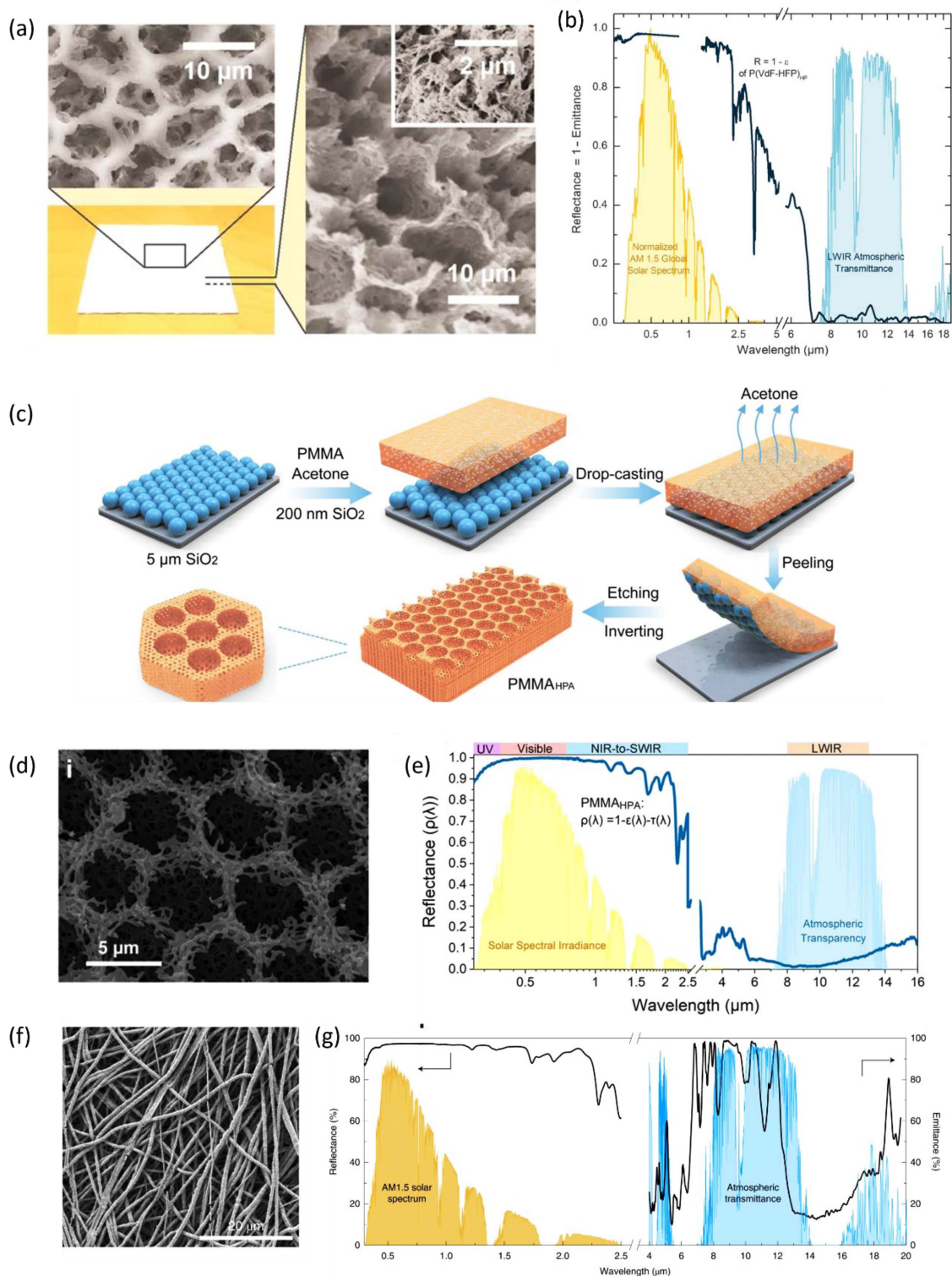


Figure 3. (a) Micrographs showing top and cross-section views and nonporous (inner data) (b) Spectral reflectance of $P(\text{VdF-HFP})_{\text{HP}}$ ²³ (c) Schematic illustration of the fabrication (d) SEM micrographs (e) spectral reflectance of PMMA_{HPA} with a hierarchically porous array.²⁹ (f) SEM images and (g) spectral reflectance of es-PEO film.³⁰

각 효과를 보였고, 고분자만 사용한 복사냉각 소재로서 가능성을 입증했다. Fudan 대학교의 Wang 연구진은 Figure 3c, d에 나타난 바와 같이 규칙적으로 배열된 마이크로 크기의 기공과 무질서하게 배열된 나노 크기의 기공이 결합되어 계층적으로 구조화된 polymethyl methacrylate (PMMA) 필름을 개발했다.²⁹ 이 다공성 PMMA 필름은 충분히 높은 태양 반사율(0.95)과 우수한 원적외선 열 방출(0.98)을 보였고, 야간에는 8.2°C, 900 W/m² 일사량 조건의 주간에는 평균 6.0~8.9°C의 복사냉각 효과를 보였다(Figure 3e). 다공성 고분자 외에도 섬유 형태의 고분자 소재도 구조 제어를 통해 복사냉각 응용 연구가 보고된 바 있다.³⁶⁻³⁹ 전기방사(electrospinning)를 사용하여 마이크로/나노 직경의 섬유를 제작할 수 있는데, 고분자 섬유의 직경을 최적화하고 섬유 사이에 형성되는 공극을 이용하면 높은 태양 반사율을 구현할 수 있다. Nanjing 대학교의 Li 연구진은 롤투롤(roll-to-roll) 전기방사법을 이용해 poly-

ethylene oxide (PEO) 기반의 나노 섬유 필름을 제작했다(Figure 3f).³⁰ PEO 나노 섬유 필름은 C-O, C-C, C-H의 결합만 있어 결합진동으로 인해 원적외선 영역인 대기의 창에서 높은 선택적인 방사율을 보였다. Figure 3g에서 볼 수 있듯이 PEO 나노 섬유는 0.78의 선택적인 방사율을 나타내며, 제어된 직경 크기는 0.96의 높은 태양광 반사율을 가지고, 옥외 실험을 통해 주변 온도보다 7°C 냉각되었다. 이 연구결과는 롤투롤 전기방사법을 기반으로 효율적인 대면적 제조 공정 방법을 제시했다. 고분자 기반의 복사냉각용 유기 소재는 상대적으로 저렴한 공정 비용으로 대면적이 용이하고, 후면 반사층 없이 다공성 구조를 통해 높은 반사율을 구현할 수 있는 장점이 있다. 하지만 방사율은 고분자의 고유 특성으로 인해 결정되기 때문에 선택적인 방사율을 갖도록 적절한 관능기를 갖는 소재를 선택하는 것이 중요하고, 향후 실제 적용을 위해 내후성 개선이 반드시 필요하다.

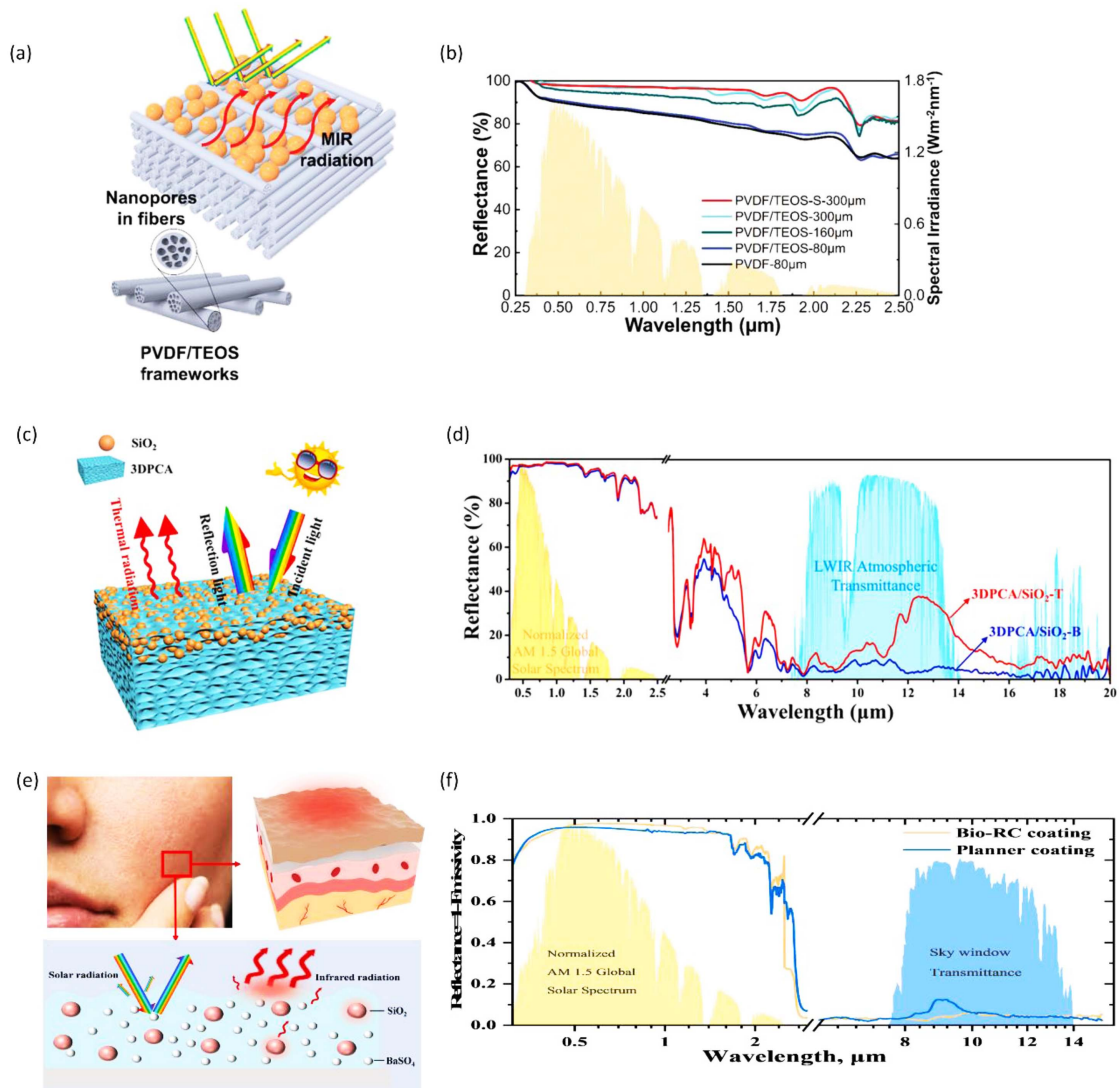


Figure 4. (a) Schematic and (b) Solar reflectance of FHRM.³⁸ (c) Schematic illustration of structural features and (d) spectral reflectance of unique 3DPCA/SiO₂.⁴¹ (e) Schematic and (f) spectral reflectance of the Bio-RC coating.⁴²

3. 하이브리드 소재(Hybrid materials)

무기소재는 유기소재 대비 이상적인 방사율을 구현하고 내구성이 좋지만 성형 및 가공이 어렵고 충격에 약한 단점이 있고, 유기소재는 가볍고 제조공정이 용이하다. 따라서 코팅 공정이 용이하고 광학물성이 우수한 복사냉각 소재를 위해 선택적으로 반사율 및 방사율이 조절된 유/무기 하이브리드 소재가 개발되었다.⁴⁰⁻⁴²

대표적으로 Shanghai Jiao Tong 대학교의 Wang 연구진은 polyvinylidene fluoride/tetraethyl orthosilicate (PVDF/TEOS) 다공성 섬유에 SiO₂의 입자가 도입된 flexible hybrid membrane radiator(FHMR)를 개발하였다(Figure 4a).³⁸ PVDF/TEOS 섬유는 전기방사를 이용해 제작하였고, 용매 건조 과정에서 상분리를 유도하여 섬유 내에 나노 기공을 도입하였다. 이 섬유 내부의 다공성 구조와 SiO₂ 마이크로 입자는 광산란에 기여하여 기존 복사냉각 섬유보다 높은 태양광 반사율(0.97)을 나타냈다(Figure 4b). 또한, PVDF 분자 구조인 C-F 결합 진동과 SiO₂ 입자의 Si-O 결합의 포논공명으로 인해 높은 원적외선 방사율(0.96)을 구현하였다. 옥외 실험결과, FHMR 필름은 오후에 주변 온도 대비 평균 3.5°C 냉각되었고, 동일한 자동차 모형에 각각 FHMR 필름과 흰색 용지를 덮어 표면 온도 변화를 비교하여 FHMR 필름이 5°C 가량 더 냉각되는 것으로 보고되었다. Nanjing 대학교의 Xiang 연구진은 상분리법을 이용해 다공성 셀룰로오스 아세테이트(CA)의 필름을 제조하고 필름의 내부에 SiO₂ 입자를 도입하여 유-무기 하이브리드 소재를 개발하였다(Figure 4c).⁴¹ 이 3차원 다공성 셀룰로오스 아세테이트(3DPCA) 필름은 SiO₂ 마이크로 입자가 포논공명으로 인해 높은 방사율(0.95)을 갖고, 평균 5 μm 크기의 다공성 구조가 매우 높은 태양광 반사율(0.97)에 기여하였다(Figure 4d). 옥외실험을 통해 주변 온도보다 야간에 8.6°C, 주간 6.2°C 가량 냉각되어 우수한 복사냉각소재로서 가능성이 입증되었다. 이처럼 다공성 고분자 기반에 무기입자를 도입한 유/무기 하이브리드 소재는 대면적 코팅이 가능하면서도 기존 고분자 기반 소재의 물성 한계를 해결할 방안을 제안하였다.

나아가 최근 몇 년 동안 은개미³⁴, 장수풍뎅이³⁵ 등 생체모방 구조에서 영감을 받아 삼각형 프리즘 배열, 기둥 어레이 및 피라미드 구조를 포함하는 나노/미세 구조를 규칙적으로 가질 수 있는 에칭 기술을 사용한 수동 복사냉각체도 개발되었다. Harbin Institute of Technology의 Cheng 연구진은 인체의 주름진 피부 표면 구조와 유사한 복사냉각 소재를 개발하였다(Figure 4e, f). 일반적으로 인체는 전체 열 손실의 약 40~60%가 복사 열전달을 통해 이루어지는데, 이때 피부의 불규칙한 주름 구조가 열을 방출하는 표면으로서 중요한 역할을 한다. 따라서, 피부의 표면 미세 구조를 모방해 주름을 가지고 내부에 BaSO₄와 SiO₂ 입자를 포함하는 효율적인 복사냉

각 소재를 개발하였고, 일반 건축물에 비해 생체모방 코팅을 한 건축물의 최대 실내 평균 온도가 6.2°C 감소하는 결과를 보고하였다.⁴² 이러한 생체와 유사한 구조를 모방한 방법은 새로운 재료와 구조를 제안할 수 있는 좋은 아이디어를 주었다.

수동 주간 복사냉각의 최근 활용 동향

1. 태양전지(Solar cells)

태양전지는 물질이 빛에 노출되었을 때 전기가 발생하는 광전 효과(photovoltaic effect)를 이용하여 친환경적인 미래 에너지로 많은 연구가 진행되고 있다. 태양전지는 직사광선 아래에서 사용되기 때문에 효율적인 열관리가 요구되는데, 태양전지는 흡수한 태양광 일부만 전기로 변환하고 나머지 흡수된 태양 복사에너지가 열로 발산되어 작동 온도가 상승하면 수명과 효율성이 저하되기 때문이다.⁴³ 이를 해결하기 위해 수동 복사냉각 기술을 도입하면 태양 복사에너지를 방출시켜 소자의 표면이 가열되는 것을 막기때문에 태양전지의 표면 온도를 낮출 수 있고 냉각시스템에 사용되는 전력도 최소화할 수 있다. 따라서, 태양전지의 작동 온도를 낮추기 위해 복사냉각 기술을 접목한 연구들이 보고되었다.⁴⁴⁻⁴⁷ Gwangju Institute of Science and Technology의 Heo 연구진은 복사냉각 기술을 도입한 다중 접합 태양전지(multi-junction solar cells, MJSC)를 제안했다(Figure 5a).⁴⁸ 이 모듈은 InGaP/GaAs/Ge 태양전지 위에 micro-grating 구조의 광결정 복사냉각 층을 구성하여, 밴드갭 이상($P_{\text{above-BG}}$)의 광흡수 및 밴드갭 이하($P_{\text{sub-BG}}$)의 반사를 높이고 대기의 창 영역에서 열방출을 향상시켰다. 또한, 외부 평가를 통해 복사냉각체가 접목된 소자(MJSC/LTRC)의 표면 온도가 6.1°C 더 낮았고 태양전지 효율 또한 1.3% 증가했다고 보고되었다(Figure 5b, c). 이처럼 태양전지는 직사광선 아래에서 작동하여 고온으로 인한 성능 저하와 수명에 부정적인 영향을 받지만, 수동 복사냉각 기술을 방열판으로 활용할 경우 주간 작동 온도를 낮추어 태양 복사에너지에 의한 열 관리 문제를 해결할 좋은 방안이 될 수 있다. 향후 태양전지에 도입될 복사냉각 기술은 다양한 반도체 소재의 흡수 스펙트럼에 따라 최적화된 광학 물성을 필요로 하고 실제 환경조건에서 장기간 성능 평가가 이루어질 때, 이상적인 고효율 태양전지를 위한 핵심 기술이 될 것이다.

2. 건물용 소재(Buildings)

수동 주간 복사냉각 소재는 일반적으로 건물의 외벽에 적용되어 에너지 절감 효과를 기대한다. 특히, 태양광을 직접적으로 받기 때문에 지붕을 냉각시켜 건물의 냉방 비용을 줄이고, 도시 열섬 효과(heat island effect)를 감소시킬 수 있다.⁴⁹⁻⁵² Muselli는 low-density polyethylene (LDPE) 매트릭스에 TiO₂

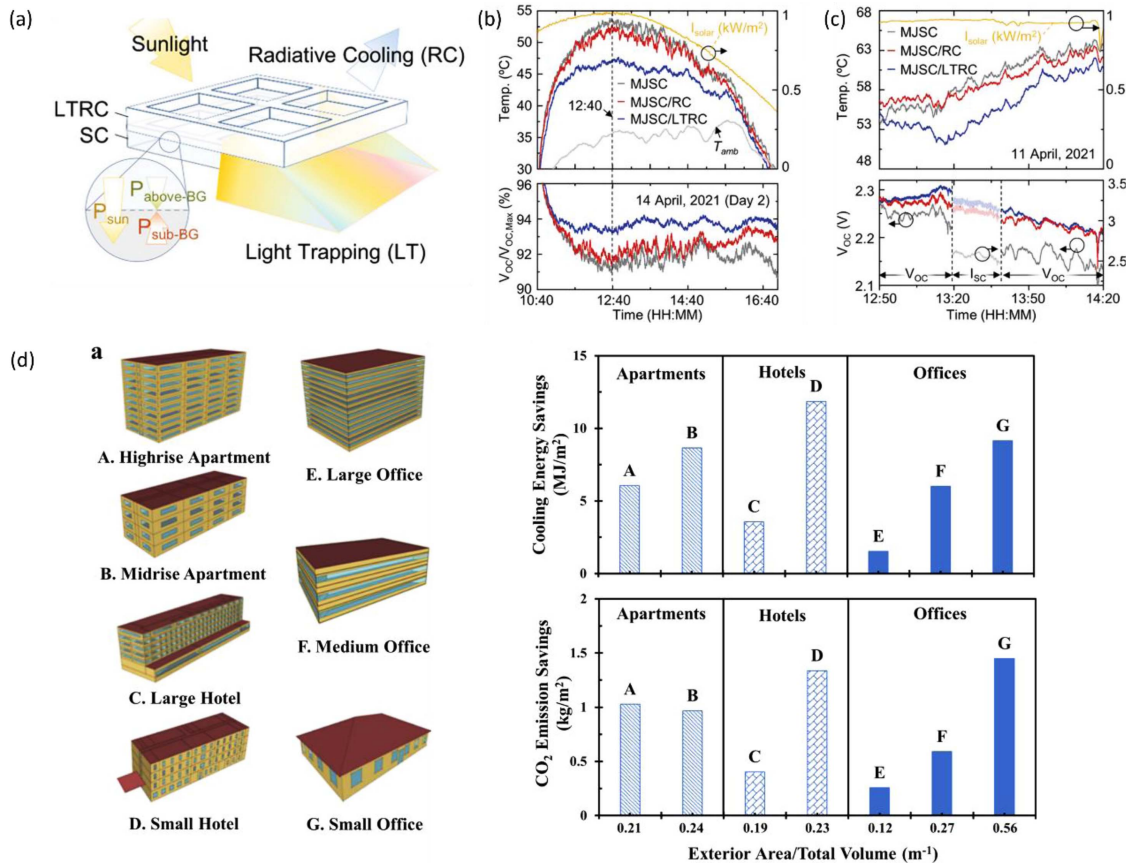


Figure 5. (a) Illustration of RCs which simultaneously radiate heat and trap light. (b) Measured temperatures and VOC variations of three samples during daytime. (c) Logged data of three samples for temperature, open-circuit voltage (V_{OC}), and short-circuit current (I_{SC}).⁴⁸ (d) Annual cooling energy savings and CO₂ emission savings by modifying the reference building types with 70 vol% polymer coating.⁵¹

와 BaSO₄ 마이크로 입자가 도입된 코팅 소재를 제안하고 시뮬레이션을 통해 지붕 구성 덮개에 따라 냉방 전기에너지를 26~49% 절약할 수 있다고 보고하였다.⁴⁹ California Irvine 대학교의 Nie 연구진은 polydimethylsiloxane (PDMS) 매트릭스에 중공 유리(glass bubble) 마이크로 입자를 도입해 복사냉각 코팅제를 개발하였다.⁵¹ 중공 유리 마이크로 입자를 포함한 고분자 필름은 낮은 밀도로 인해 건물의 외부에 대면적 코팅하기에 적절하고, 입자 내부에 공극을 형성하는 중공 구조(hollow structure)는 빛을 산란시켜 0.92의 높은 태양광 반사율에 크게 기여했다. 또한, EnergyPlus 시뮬레이션을 이용해 개발된 복사냉각 코팅제를 미국 로스엔젤레스의 기후 조건에서 7개의 다양한 건물 모델에 적용했을 경우, 연간 냉방 에너지를 27.5% 절약이 가능하다고 보고되었다(Figure 5d).⁵¹

3. 웨어러블 장치(Wearable devices)

수동 복사냉각은 태양전지, 건물 외에도 웨어러블 장치에 응용되어 효율적인 열관리에 기여할 수 있다. 야외에서 직접 태양광에 노출되는 인간은 의류를 통해 체온조절을 용이하게 하고 추위나 더위로부터 보호할 수 있지만, 장시간 직사광선

을 받으면 체온 조절에 어려움을 겪을 수 있다. 수동복사냉각 기술이 도입된 섬유는 몸의 열을 효과적으로 방출해 쾌적함을 유지하는데 도움을 준다.⁵³⁻⁵⁶ Maryland 대학교의 Zhang 연구진은 인간이 열과 땀을 방출했을 때 섬유 사이의 간격을 조절하여 능동적으로 열을 관리할 수 있는 기술을 보고했다(Figure 6a).⁵³ 이 소재는 트리아세이트-셀룰로오스 바이모र्फ 섬유(triacetate-cellulose bimorph fibers)에 탄소 나노튜브를 코팅하여 주변 습도가 변할 때 적외선 방사율이 최대 35% 가량 변화하여 환경에 따라 열관리를 효과적으로 할 수 있는 가능성을 보여주었다. 또한, 복사냉각 기반 섬유는 보통 가시광선 영역에서 높은 반사율을 위해 주로 흰색이지만, 색상이 들어간 섬유가 상업적으로 유리하다. 따라서 적외선 영역에서 반사율 저하를 최소화하면서 다양한 색상을 구현하는 것이 필요하다. Figure 6b에서 볼 수 있듯이, Stanford 대학교의 Cai 연구진은 무기안료 나노 입자를 통해 색상을 부여한 폴리에틸렌 복사냉각 섬유를 구현하였다(Figure 6b).⁵⁴ 이 복합 섬유를 피부에 올렸을 때, 일반 면직물의 온도는 3°C 상승하였고 복사냉각 섬유는 1°C 가량 소폭 상승하여 복사냉각 효과가 더 뛰어난 것으로 보고되었다.

더 나아가 연세대학교 Khan 연구진은 수동 복사냉각 기술

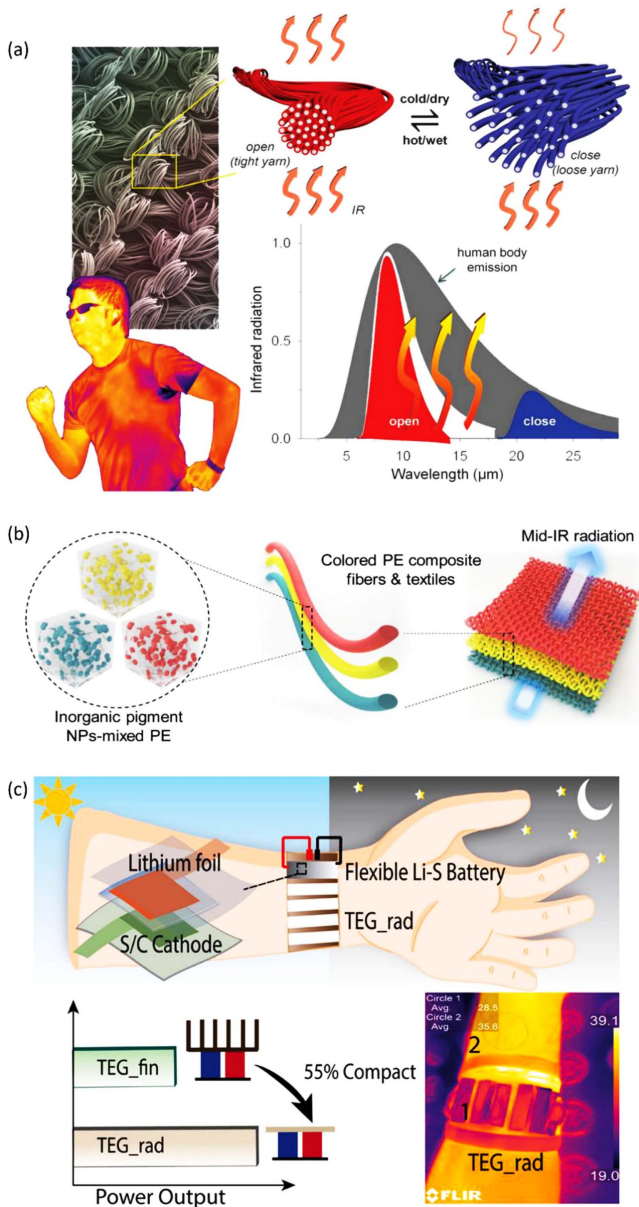


Figure 6. (a) Design principles of an IR gating textile.⁵³ (b) Coloration design for infrared-transparent polyethylene textiles.⁵⁴ (c) Schematic comparison of compactness and power output between the thermoelectric generator (TEGs) with P(VdF-HFP) radiative heat sink (TEG_{rad}) and the TEG with copper finned heat sink (TEG_{fin}) during the daytime and nighttime.⁵⁷

을 저온부에 도입하여 소형 웨어러블 열전 발전기(thermoelectric generators, TEGs)를 개발하였다(Figure 6c).⁵⁷ 열전 발전은 Seebeck 효과를 이용해 열 에너지를 전기 에너지로 변환하여 지속적으로 전력을 공급할 수 있는 미래 기술로 유망하다. 제안된 웨어러블 열전 발전기는 높은 태양광 반사율(0.97)과 방사율(0.97) 갖는 다공성 P(VdF-HFP) 방열 필름을 이용해 더 큰 온도구배를 유도하여 최대 12.48 μW/cm²의 전력을 얻을 수 있었고 기존의 금속 방열판을 대체하여 부피를

크게 줄일 수 있다. 또한, 웨어러블 소자로서 신체에 착용했을 때 1.9°C의 온도차를 이용해 열전 발전이 가능하다고 보고되었다. 이러한 웨어러블 열전 소자는 온도구배가 작은 환경에서 발전 효율이 낮아 제한적이었는데, 수동 복사냉각 기술의 도입으로 기술적 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망된다.

Conclusions

수동 복사냉각은 직사광선 아래서 주변온도보다 냉각이 가능하여 제로에너지 냉각 기술로 유망하고, 지구온난화와 대기오염 등 야기되는 환경문제를 해결하는데 기여할 것이다. 태양 복사에너지가 강한 주간에 복사냉각 기술을 실제로 적용하기 위해선 소재가 높은 태양광 반사율과 대기의 창 영역에서 선택적인 방사율을 가져야 한다. 광 결정, 메타 소재, 다층 구조는 정밀한 기술을 통해 최적화된 구조를 설계할 수 있어 이상적인 높은 태양광 반사율과 선택적인 방사율 구현이 가능하다. 하지만 실제 응용을 위해선 대면적화가 필요하기 때문에 비싸고 복잡한 구조는 제한적이다. 고분자 기반 수동 복사냉각체는 간단한 제조 공정, 저렴한 비용, 높은 상용성으로 유망한 복사냉각 소재라고 할 수 있다. 특히, 고분자는 고유의 적외선 진동 흡수로 인해 높은 방사율을 나타내기 때문에 다공성을 부여한 고분자는 금속층 없이도 높은 반사율을 가져 활용도를 극대화할 수 있다. 다양한 다공성 고분자에 광산란 및 공명효과를 유도할 수 있는 무기 입자를 도입하여, 이상적인 선택적 방사체를 개발하는 것이 필요하다. 향후, 복사냉각 소재의 광범위한 응용을 위해서는 근적외선 영역에서 높은 반사율, 투명한 복사냉각체, 다양한 색상 구현, 환경에 따라 냉각 성능을 전환할 수 있는 기능화에 대한 개발도 함께 진행되어야 할 것이다. 본 논문은 수동 복사냉각 및 효과적인 열관리를 필요로 하는 연구분야와 더불어 에너지 하베스팅 소자의 효율 향상에 도움이 될 것으로 기대한다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 산업연계형저탄소공정전환핵심기술개발사업(과제번호 : RS-2022-00155175), 한국화학연구원 전략과제(SS2221-20) 및 중앙대학교 연구장학금의 지원을 받아 진행되었으며 이에 감사드립니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

References

1. E. A. Goldstein, A. P. Raman, and S. Fan, "Sub-Ambient Non-Evaporative Fluid Cooling with the Sky", *Nat. Energy*, **2**, 17143 (2017).

2. X. Yu, J. Chan, and C. Chen, "Review of Radiative Cooling Materials: Performance Evaluation and Design Approaches", *Nano Energy*, **88**, 106259 (2021).
3. S. Fan and W. Li, "Photonics and Thermodynamics Concepts in Radiative Cooling", *Nat. Photonics*, **16**, 182 (2022).
4. Y. Zhang, X. Chen, B. Cai, H. Luan, Q. Zhang, and M. Gu, "Photonics Empowered Passive Radiative Cooling", *Adv. Photonics Res.*, **2**, 202000106 (2021).
5. M. M. Hossain and M. Gu, "Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials", *Adv. Sci.*, **3**, 1 (2016).
6. K. Te Lin, J. Han, K. Li, C. Guo, H. Lin, and B. Jia, "Radiative Cooling: Fundamental Physics, Atmospheric Influences, Materials and Structural Engineering, Applications and Beyond", *Nano Energy*, **80**, 105517 (2021).
7. B. Zhao, M. Hu, X. Ao, N. Chen, and G. Pei, "Radiative Cooling: A Review of Fundamentals, Materials, Applications, and Prospects", *Appl. Energy*, **236**, 489 (2019).
8. C. G. Granqvist and A. Hjortsberg, "Radiative Cooling to Low Temperatures: General Considerations and Application to Selectively Emitting SiO Films", *J. Appl. Phys.*, **52**, 4205 (1981).
9. S. Catalanotti, V. Cuomo, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, and G. Troise, "The Radiative Cooling of Selective Surfaces", *Sol. Energy*, **17**, 83 (1975).
10. B. Orel, M. K. Gunde, and A. Krainer, "Radiative Cooling Efficiency of White Pigmented Paints", *Sol. Energy*, **50**, 477 (1993).
11. A. R. Gentle and G. B. Smith, "Radiative Heat Pumping from the Earth Using Surface Phonon Resonant Nanoparticles", *Nano Lett.*, **10**, 373 (2010).
12. D. Zhao, A. Aili, Y. Zhai, S. Xu, G. Tan, X. Yin, and R. Yang, "Radiative Sky Cooling: Fundamental Principles, Materials, and Applications", *Appl. Phys. Rev.*, **6**, 021306 (2019).
13. W. Li and S. Fan, "Radiative Cooling: Harvesting the Coldness of the Universe", *Opt. Photonics News*, **30**, 32 (2019).
14. A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, and S. Fan, "Passive Radiative Cooling below Ambient Air Temperature under Direct Sunlight", *Nature*, **515**, 540 (2014).
15. E. Rephaeli, A. Raman, and S. Fan, "Ultrabroadband Photonic Structures to Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling", *Nano Lett.*, **13**, 1457 (2013).
16. L. Zhu, A. Raman, and S. Fan, "Color-Preserving Daytime Radiative Cooling", *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 22 (2013).
17. M. A. Kecebas, M. P. Menguc, A. Kosar, and K. Sendur, "Passive Radiative Cooling Design with Broadband Optical Thin-Film Filters", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **198**, 1339 (2017).
18. S. Y. Jeong, C. Y. Tso, J. Ha, Y. M. Wong, C. Y. H. Chao, B. Huang, and H. Qiu, "Field Investigation of a Photonic Multi-Layered TiO₂ Passive Radiative Cooler in Sub-Tropical Climate", *Renewable Energy*, **146**, 44 (2020).
19. Y. Zhou, Y. Liu, Y. Li, R. Jiang, W. Li, W. Zhao, R. Mao, L. Deng, and P. Zhou, "Flexible Radiative Cooling Material Based on Amorphous Alumina Nanotubes", *Opt. Mater. Express*, **10**, 1641 (2020).
20. M. M. Hossain, B. Jia, and M. A. Gu, "Metamaterial Emitter for Highly Efficient Radiative Cooling", *Adv. Opt. Mater.*, **3**, 1047 (2015).
21. Y. Huang, M. Pu, Z. Zhao, X. Li, X. Ma, and X. Luo, "Broadband Metamaterial as an "Invisible" Radiative Cooling Coat", *Opt. Commun.*, **407**, 204 (2018).
22. Y. Fu, J. Yang, Y. S. Su, W. Du, and Y. G. Ma, "Daytime Passive Radiative Cooler Using Porous Alumina". *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **191**, 50x (2019).
23. J. Mandal, Y. Fu, A. C. Overvig, M. Jia, K. Sun, N. N. Shi, H. Zhou, X. Xiao, N. Yu, and Y. Yang, "Hierarchically Porous Polymer Coatings for Highly Efficient Passive Daytime Radiative Cooling", **362**, 315 (2018).
24. Y. Xu, B. Sun, Y. Ling, Q. Fei, Z. Chen, X. Li, P. Guo, N. Jeon, S. Goswami, Y. Liao, S. Ding, Q. Yu, J. Lin, G. Huang, and Z. Yan, "Multiscale Porous Elastomer Substrates for Multifunctional On-Skin Electronics with Passive-Cooling Capabilities", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **117**, 205 (2020).
25. A. Leroy, B. Bhatia, C. C. Kelsall, A. Castillejo-Cuberos, M. H. Di Capua, L. Zhao, L. Zhang, A. M. Guzman, and E. N. Wang, "High-Performance Subambient Radiative Cooling Enabled by Optically Selective and Thermally Insulating Polyethylene Aerogel", *Sci. Adv.*, **5**, 1 (2019).
26. M. Yang, W. Zou, J. Guo, Z. Qian, H. Luo, S. Yang, N. Zhao, M. Yang, W. Zou, J. Guo, Z. Qian, H. Luo, S. Yang, and N. Zhao, "Generalized Bioinspired Approach to a Daytime Radiative Cooling "Skin", **12**, 25286 (2020).
27. M. Yang, W. Zou, J. Guo, Z. Qian, H. Luo, S. Yang, N. Zhao, L. Pattelli, J. Xu, and D. S. Wiersma, "Bioinspired "Skin" with Cooperative Thermo-Optical Effect for Daytime Radiative Cooling", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 25286 (2020).
28. J. Wang, J. Sun, T. Guo, H. Zhang, M. Xie, J. Yang, X. Jiang, Z. Chu, D. Liu, and S. Bai, "High-Strength Flexible Membrane with Rational Pore Architecture as a Selective Radiator for High-Efficiency Daytime Radiative Cooling", *Adv. Mater. Technol.*, **7**, 1 (2022).
29. T. Wang, Y. Wu, L. Shi, X. Hu, M. Chen, and L. A. Wu, "Structural Polymer for Highly Efficient All-Day Passive Radiative Cooling", *Nat. Commun.*, **12**, 1 (2021).
30. D. Li, X. Liu, W. Li, Z. Lin, B. Zhu, Z. Li, J. Li, B. Li, and S. Fan, "Scalable and Hierarchically Designed Polymer Film as a Selective Thermal Emitter for High-Performance All-Day Radiative Cooling", *Nat. Nanotechnol.*, **16**, 153 (2021).
31. S. Meng, L. Long, Z. Wu, N. Denisuk, Y. Yang, L. Wang, F.

- Cao, and Y. Zhu, "Scalable Dual-Layer Film with Broadband Infrared Emission for Sub-Ambient Daytime Radiative Cooling", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **208**, 110393 (2020).
32. A. Aili, Z. Y. Wei, Y. Z. Chen, D. L. Zhao, R. G. Yang, and X. B. Yin, "Selection of Polymers with Functional Groups for Daytime Radiative Cooling", *Mater. Today Phys.*, **10**, 100127 (2019).
 33. S. Son, S. Jeon, D. Chae, S. Y. Lee, Y. Liu, H. Lim, S. J. Oh, and H. Lee, "Colored Emitters with Silica-Embedded Perovskite Nanocrystals for Efficient Daytime Radiative Cooling", *Nano Energy*, **79**, 105461 (2021).
 34. S. Y. Jeong, C. Y. Tso, Y. M. Wong, C. Y. H. Chao, and B. Huang, "Daytime Passive Radiative Cooling by Ultra Emissive Bio-Inspired Polymeric Surface", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **206**, 110296 (2020).
 35. H. Zhang, K. C. S. Ly, X. Liu, Z. Chen, M. Yan, Z. Wu, X. Wang, Y. Zheng, H. Zhou, and T. Fan, "Biologically Inspired Flexible Photonic Films for Efficient Passive Radiative Cooling", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **117**, 14657 (2020).
 36. R. A. Yalçın, E. Blandre, K. Joulain, and J. Dré villon, "Daytime Radiative Cooling with Silica Fiber Network", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **206**, 110320 (2020).
 37. W. Z. Song, X. X. Wang, H. J. Qiu, N. Wang, M. Yu, Z. Fan, S. Ramakrishna, H. Hu, and Y. Z. Long, "Single Electrode Piezoelectric Nanogenerator for Intelligent Passive Daytime Radiative Cooling", *Nano Energy*, **82**, 105695 (2021).
 38. X. Wang, X. Liu, Z. Li, H. Zhang, Z. Yang, H. Zhou, and T. Fan, "Scalable Flexible Hybrid Membranes with Photonic Structures for Daytime Radiative Cooling", *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1 (2020).
 39. H. Kim, S. McSherry, B. Brown, and A. Lenert, "Selectively Enhancing Solar Scattering for Direct Radiative Cooling through Control of Polymer Nanofiber Morphology", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 43553 (2020).
 40. L. Cai, A. Y. Song, W. Li, P. C. Hsu, D. Lin, P. B. Catrysse, Y. Liu, Y. Peng, J. Chen, H. Wang, J. Xu, A. Yang, S. Fan, and Y. Cui, "Spectrally Selective Nanocomposite Textile for Outdoor Personal Cooling", *Adv. Mater.*, **30**, 1 (2018).
 41. B. Xiang, R. Zhang, Y. Luo, S. Zhang, L. Xu, H. Min, S. Tang, and X. Meng, "3D Porous Polymer Film with Designed Pore Architecture and Auto-Deposited SiO₂ for Highly Efficient Passive Radiative Cooling", *Nano Energy*, **81**, 105600 (2021).
 42. Z. Cheng, H. Han, F. Wang, Y. Yan, X. Shi, H. Liang, X. Zhang, and Y. Shuai, "Efficient Radiative Cooling Coating with Biomimetic Human Skin Wrinkle Structure", *Nano Energy*, **89**, 106377 (2021).
 43. A. Sachenko, V. Kostylyov, I. Sokolovskyi, and M. Evstigneev, "Effect of Temperature on Limit Photoconversion Efficiency in Silicon Solar Cells", *IEEE J. Photovoltaics*, **10**, 63 (2020).
 44. T. S. Safi and J. N. Munday, "Improving Photovoltaic Performance through Radiative Cooling in Both Terrestrial and Extraterrestrial Environments", *Opt. Express*, **23**, 1120 (2015).
 45. L. Zhu, A. Raman, K. X. Wang, M. A. Anoma, and S. Fan, "Radiative Cooling of Solar Cells", *Optica*, **1**, 32 (2014).
 46. L. Zhu, A. P. Raman, and S. Fan, "Radiative Cooling of Solar Absorbers Using a Visibly Transparent Photonic Crystal Thermal Blackbody", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **112**, 12282 (2015).
 47. Z. Zhou, Z. Wang, and P. Bermel, "Radiative Cooling for Low-Bandgap Photovoltaics under Concentrated Sunlight", *Opt. Express*, **27**, A404 (2019).
 48. S. Y. Heo, D. H. Kim, Y. M. Song, and G. J. Lee, "Determining the Effectiveness of Radiative Cooler-Integrated Solar Cells", *Adv. Energy Mater.*, **12**, 103258 (2022).
 49. M. Muselli, "Passive Cooling for Air-Conditioning Energy Savings with New Radiative Low-Cost Coatings", *Energy Build.*, **42**, 945 (2010).
 50. A. R. Gentle, J. L. C. Aguilar, and G. B. Smith, "Optimized Cool Roofs: Integrating Albedo and Thermal Emittance with R-Value", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 3207 (2011).
 51. X. Nie, Y. Yoo, H. Hewakuruppu, J. Sullivan, A. Krishna, and J. Lee, "Cool White Polymer Coatings Based on Glass Bubbles for Buildings", *Sci. Rep.*, **10**, 1 (2020).
 52. A. R. Gentle and G. B. Smith, "A Subambient Open Roof Surface under the Mid-Summer Sun", *Adv. Sci.* **2015**, 2, 2-5. <https://doi.org/10.1002/advs.201500119>.
 53. X. A. Zhang, S. Yu, B. Xu, M. Li, Z. Peng, Y. Wang, S. Deng, X. Wu, Z. Wu, M. Ouyang, and Y. H. Wang, "Dynamic Gating of Infrared Radiation in a Textile", *Science*, **363**, 619 (2019).
 54. L. Cai, Y. Peng, J. Xu, C. Zhou, C. Zhou, P. Wu, D. Lin, S. Fan, and Y. Cui, "Temperature Regulation in Colored Infrared-Transparent Polyethylene Textiles", *Joule*, **3**, 1478 (2019).
 55. P. C. Hsu, X. Liu, C. Liu, X. Xie, H. R. Lee, A. J. Welch, T. Zhao, and Y. Cui, "Personal Thermal Management by Metallic Nanowire-Coated Textile", *Nano Lett.*, **15**, 365 (2015).
 56. P. C. Hsu, A. Y. Song, P. B. Catrysse, C. Liu, Y. Peng, J. Xie, S. Fan, and Y. Cui, "Radiative Human Body Cooling by Nanoporous Polyethylene Textile", *Science*, **353**, 1019 (2016).
 57. S. Khan, J. Kim, K. Roh, G. Park, and W. Kim, "High Power Density of Radiative-Cooled Compact Thermoelectric Generator Based on Body Heat Harvesting", *Nano Energy*, **87**, 106180 (2021).

출판자 공지사항: 한국고무학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.