

메타패브릭 연구 및 개발 동향



김건우

- 2007. 동경공업대학 생명공학 학사
- 2009. 동경대학교 생명과학 석사
- 2009-2013. 삼성전기 선임연구원
- 2016. UC San Diego 재료공학 박사
- 2016-2021. NanoSD Inc. Senior Engineer
- 2021-2024. 한국생산기술연구원 수석연구원
- 2024-현재. 전북대학교 유기소재섬유공학과 부교수

1. 서 론

메타패브릭(metafabric)은 섬유 고분자에 새로운 광학적 특성을 부여하여 원단의 열적 쾌적성(thermal comfort)을 향상시킨 기능성 의류를 의미하며, 최근 이를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 의류에서 열 전달은 크게 네 가지 방식으로 이루어진다. 첫째는 증발(evaporation), 둘째는 전도(conduction), 셋째는 대류(convection), 넷째는 복사(radiation)이다.

이 중에서 가장 중요한 열 전달 방식은 증발이다. 인체의 열 조절 역시 증발에 크게 의존하기 때문이다. 땀의 증발은 신체의 열 배출에서 50% 이상을 담당하기도 하며, 운동 시 우리가 땀을 흘리는 주된 이유가 된다. 스포츠 원단 연구에서 폴리에스터(polyester)와 같은 소수성 섬유의 직조를 통해 모세관 현상(capillary effect)을 유도하고, 표면적을 증대시켜 증발 효율을 높이려는 시도가 활발히 이루어지는 것도 이 때문이다.

전도의 경우, 열이 섬유 내부로 전달되도록 결정성이 높은 폴리에틸렌을 사용하거나 열전도도가 높은 금속을 결합한 원단이 소개된 바 있다. 그러나 전도를 통한 열적 쾌적성 증가는 제한적이다. 원단 내부에서 전도로 열이 일시적으로 전달되더라도, 결국 다른 메커니즘을 통해 섬유 외부로 방출되어야 하기 때문이다. 다만 이러한 어려움에도 불구하고 섬유고분자의 열용량 증대 연구를 통한 전도를 통한 섬유의 열적 쾌적성 연구는 여전히 진행 중이다.

대류는 원단의 투기도(porosity)와 밀접하게 연관되며, 공기 투과도(air permeability)가 높을수록 대류에 의한 열 전달이 용이하다. 이는 곧 원단의 투습도(breathability)와도 연결되어, 증발 메커니즘과 상호 보완적인 역할을 한다.

마지막으로 복사는 증발만큼 큰 열 전달 잠재력을 갖고 있음에도 불구하고, 그동안 섬유 원단 연구에서는 상대적으로 주목받지 못한 열 전달 방식이다. 최근 메타패브릭 연구에서는 바로 이 복사 조절 능력에 주목하여, 태양광 반사 및 인체 적외선 방출 제어를 통해 열적 쾌적성을 획기적으로 개선하는 방향으로 발전하고 있다.

복사 열전달이 섬유 분야에서 상대적으로 주목받지 못했던 가장 큰 이유는, 섬유 원단의 주재료인 고분자가 대체로 유사한 복사 열방사율을 가지기 때문이다. 복사는 전도나 대류와 달리 매개체가 필요하지 않고, “빛”의 형태

로 에너지를 전달한다. 열에너지는 플랑크 법칙(Planck's law)에 따라 특정 온도를 가지는 표면에서 전자기파의 방출 형태로 정의되며, 그 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

여기서 h 는 플랑크 상수, ν 는 진동수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수를 의미한다.

물질의 종류나 구조에 따라 이러한 복사 에너지를 방출할 수 있는 능력이 달라지는데, 이를 열방사율(emissivity)이라 한다. 예를 들어, 체온 약 섭씨 32도에서 방출되는 복사 에너지는 약 10 μm 파장 영역에 해당하며, 인간 피부의 열방사율은 90% 이상에 달한다.

고분자의 경우, 분자 결합 특성이 10 μm 부근의 원적외선 파장을 잘 흡수하기 때문에, 대부분의 고분자는 상온(약 30°C)에서 높은 원적외선 흡수율을 보인다. 키르히호프 법칙(Kirchhoff's law)에 따르면 원적외선 흡수율이 높은 물질은 원적외선 방출율도 높으므로, 결과적으로 고분자는 이 영역에서 높은 열방사율을 갖게 된다[1].

소재 자체 외에도 표면 거칠기(roughness) 또한 열방사율에 영향을 준다. 표면이 거칠수록 빛의 산란 및 굴절이 커지면서 흡수율(방출율)에 변화를 줄 수 있다. 그러나 섬유는 경우, 보통 직경이 10–20 μm 수준이며, 섬유 고분자의 굴절률이 제한적이기 때문에 원단 단위에서의 빛의 산란 효과의 차이가 크지 않다. 그 결과, 다양한 원단들이 대체로 비슷한 수준의 열방사율을 보이는 것이다(80~90% 열방사율).

2. 복사냉각 소개

이와 함께 최근 열전달 분야에서 가장 활발히 연구되는 영역 중 하나가 바로 복사냉각(radiative cooling)이다. 복사냉각은 지구 대기 중 대기의 창(atmospheric window, 8–14 μm 파장영역)

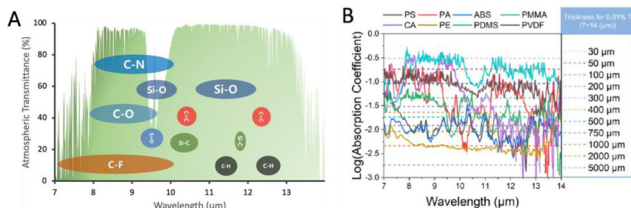


Figure 1. A. 대기의 창 파장영역과 관련 파장 흡수 분자결합, B. 고분자의 원적외선 흡수율[1].

구간에서 높은 열방사율을 갖는 소재가, 흡수나 산란의 제약 없이 열을 우주로 직접 방출함으로써 표면에서 약 150 W/m²의 추가적인 열 방출이 가능해지는 현상을 의미한다.

이 파장 영역은 섭씨 약 30–100°C의 표면에서 방출되는 열 복사의 주파장대와 일치하기 때문에, 소재가 이 영역에서 높은 방사율을 가질 경우 복사냉각 효과에 의해 표면 온도를 효과적으로 저감시킬 수 있다는 이점이 있다. 이러한 원리에 기반하여, 최근에는 대기의 창 영역에서 방사율이 높은 고분자를 표면 소재로 활용하는 복사냉각 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예로 PDMS(polydimethylsiloxane) [2], PVDF(polyvinylidene fluoride) [3], PMMA(polymethyl methacrylate) 등을 이용한 연구가 보고된 바 있다.

2.1. 메타패브릭 소개

다시 섬유로 돌아가면, 섬유 소재가 대체로 유사한 열방사율을 갖기 때문에 그동안 섬유 원단에서의 복사 에너지 전달에 관한 연구는 상대적으로 제한적이었다. 그러나 2016년 Science 저널에 소개된 원적외선 투명 원단을 계기로, 섬유의 열방사율과 열투과도에 대한 관심이 본격적으로 확산되었다.

Stanford 연구팀이 제시한 이 원단은 열방사율이 낮고 열투과도가 높은 폴리에틸렌(polyethylene)을 활용하여 우수한 열적 쾌적성을 보여주었다[4]. 일반적으로 열방사율이 높을수록 복사 에너지가 잘 방출된다고 이해되지만, 열투과도가 높은 소재를 사용할 경우 피부에서 발생하는 체열이 섬유로 전달되지 않고 곧바로 외부로 복사열로 방출될 수 있기 때문에, 오히려

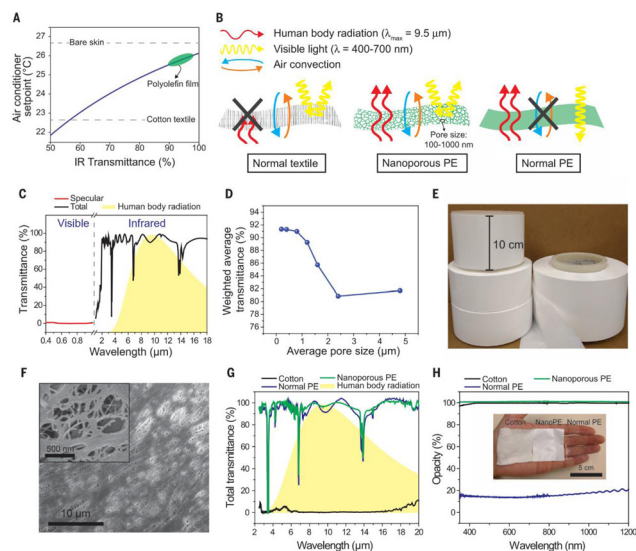


Figure 2. 열투과도가 높은 메타패브릭의 광학물성[4].

더 효과적인 체온 저감 효과를 얻을 수 있다.

대부분의 고분자는 분자 결합 특성상 적외선을 잘 흡수하여 높은 열방사율을 보인다. 하지만 폴리에틸렌과 같이 C-C, C-H와 같은 제한된 분자 결합만을 가진 고분자는 8–14 μm 영역의 원적외선을 효과적으로 흡수하지 못한다. 그 결과, 이들 고분자는 높은 열투과도를 나타낸다. 이러한 특징을 가지는 대표적인 고분자로는 폴리에틸렌 이외에도 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리메틸펜텐(polymethylpentene)이 이에 해당한다. 이러한 고분자를 적절히 활용하면 열투과 특성을 의복 소재 설계에 적용할 수 있다.

다만 의류 소재에서는 동시에 가시광 차단(불투명성)도 필요하다. 이를 위해 Stanford 연구팀은 나노섬유의 가시광 산란 효과를 활용하여, 가시광에는 불투명하면서도 적외선에는 투과성이 높은 폴리에틸렌 멤브레인을 제안하였다. 흥미로운 점은, 이 연구에서 팀이 직접 새로운 원단을 제작한 것이 아니라, 원래 이차 전지 분리막으로 쓰이는 소재를 응용했다는 점이다. 즉, 폴리에틸렌 필름을 기계적으로 신장(stretching)시켜 나노 포어를 형성한 expanded polyethylene 멤브레인을 사용하였고, 그 광학적 특성을 측정하여 섬유 응용 가능성을 보여준 것이다.

2.2. 열방사율을 더 높이고 태양빛 반사율을 높이는 메타패브릭

열방사율은 태양빛 반사율과도 밀접한 관계가 있다. 열방사율이 높아 표면 온도가 일시적으로 저감되더라도, 태양빛 반사율이 낮으면 입사된 태양복사에 의해 다시 표면 온도가 상승할 수 있다. 따라서 표면 온도 저감을 극대화하기 위해서는 높은 태양빛 반사율을 함께 확보하는 것이 필수적이다. 이러한 원리를 적용한 태양빛 고반사 고열방사율 메타패브릭이 2021년 Science 저널에 소개된 바 있다[5].

일반적으로 고분자는 태양 스펙트럼(약 250–2500 nm)의 파장을 잘 투과시키는 광학적 특성을 갖는다. 이를 반사 특성으로 전환하기 위해 섬유 연구에서는 광산란(scattering) 메커니즘이 활용된다. 섬유 다발의 구조, 단일 섬유의 직경, 그리고 고분자의 굴절률 차이가 복합적으로 작용하여, 입사된 태양광은 내부에서 다중 산란을 거쳐 결과적으로 반사로 전환된다. 실제로 일반 섬유도 일정 수준의 태양빛 반사율을 지니고 있다. 그러나 산란을 최적화하려면, 통상적인 섬유 직경(약 20 μm)보다 훨씬 작은 섬유 직경이 필요하다.

ACS Photonics에서는 Mie 산란(Mie scattering)에 최적화된 섬유 직경을 약 1 μm 내외로 제안하였으며, 이와 같이 제작된 원단은 두께가 얇더라도 충분한 태양빛 반사율을 확보할 수 있

음을 보여주었다[6]. 그러나 이러한 초미세 섬유는 기계적 강도가 낮아 내마모성이 부족하고, 섬유가 지나치게 밀집될 경우 공기 투과도 및 투습도가 저하되는 문제가 발생한다. 따라서 실사용 의류 소재로 적용하기에는 제약이 따른다.

2021년 Science 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해, 기존 섬유 직경과 직조 구조를 유지하면서도 내부 광학적 산란을 강화하는 방식의 메타패브릭을 제안하였다[5]. 구체적으로는 열방사율이 높은 polylactic acid(PLA) 기반 섬유 내부에 나노 크기의 이산화티타늄(TiO_2) 입자를 분산시켜, 두 소재 간의 굴절률 차이로 발생하는 내부 산란을 활용하여 자외선을 차단하였다. 또한 표면에는 테플론(PTFE) 마이크로섬유 박층을 적용하여 초소수성(superhydrophobicity)을 부여하는 동시에 Mie 산란 효과를 극대화하여 태양빛을 효과적으로 차단하였다. 이러한 다중 구조적 설계는 태양빛 반사율을 크게 향상시키고 복사냉각 효율을 증가시켰으며, 동시에 기존 섬유 제조 공정에 적용 가능성을 보여줌으로써 대량 생산성까지 제시하였다.

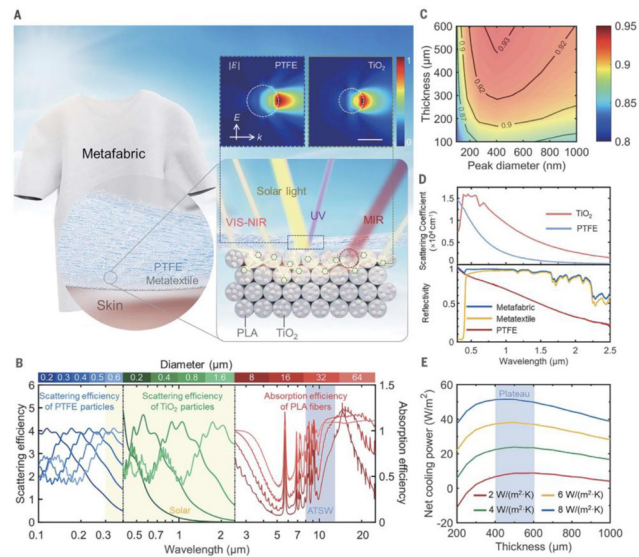


Figure 3. 태양빛 고반사율 고방사율을 가지는 메타패브릭의 광학설계[5]

2.3. 파장 선택적인 열방사율을 가지는 메타패브릭

복사열전달을 통한 열적 쾌적성에서 복사냉각(radiative cooling)은 핵심적인 현상이다. 그러나 복사냉각의 효율성은 주변 환경 요인에 따라 크게 달라질 수밖에 없다.

가장 큰 영향 요인 중 하나는 습도이다. 대기 중 수분이 많아지면, 수분 분자가 적외선을 흡수하여 대기의 창(atmospheric window, 8–14 μm) 투과도가 낮아진다. 이로 인해 고습 환경에

서는 복사냉각 효율이 감소한다.

두 번째 요인은 외부 온도이다. 복사냉각은 피사체와 외부 대기, 더 나아가 우주 공간과의 복사열 교환을 통해 이루어진다. 외부 온도가 피사체보다 낮을 경우 복사냉각이 원활히 일어나 온도 저감 효과가 커진다. 그러나 외부 온도가 피사체보다 높은 경우, 열전달이 역전될 수 있다. 이러한 현상은 특히 도심에서 두드러진다. 도심에서는 주변 건물들이 인체보다 높은 표면 온도를 갖는 경우가 많아, 의류가 복사냉각보다는 외부 복사열 흡수를 더 많이 하게 되어 오히려 체온 상승을 유발할 수 있다. 또한 의류는 입을 것을 경우 그 표면이 하늘보다는 주변 건물을 향하는 경우가 많이 있기 때문에 복사냉각을 효과적으로 활용하는 데에는 어려움이 있다.

이러한 환경적 제약을 극복하기 위해, 2024년 Science에는 원적외선 파장 선택적 메타패브릭이 소개되었다. 이 원단은 대기의 창 영역(8–12 μm)에서만 열방사율을 높이고, 그 이외 파장대에서는 반사율을 높이는 방식으로 설계되었다[7]. 이를 통해 외부 고온 환경에서의 불필요한 열 유입은 차단하면서, 복사냉각 효과는 그대로 유지할 수 있는 장점이 있다.

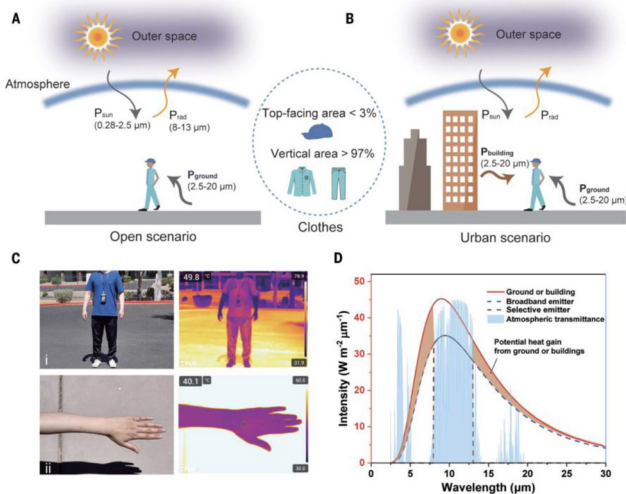


Figure 4. 외부 열차단 및 복사냉각이 가능한 메타패브릭[7].

구체적으로, 원단은 세 개의 층으로 구성된다. 1) 내부 층: 열방사율이 높은 wool 소재를 사용하여 인체의 열을 효과적으로 방출, 2) 중간 층: 나노와이어 구조의 은(silver) 소재를 배치해 복사열을 반사하면서도 투기도를 확보. 이 층은 열전도만 제한적으로 허용, 3) 외부 층: 전기방사(electrospinning)된 폴리메틸펜텐(PMP) 나노섬유 부직포로, 대기의 창 영역에서 선택적으로

열복사를 방출하고 동시에 나노직경 구조를 통해 Mie 산란을 극대화하여 높은 태양빛 반사율을 제공한다.

이와 같은 다층 광학 설계를 통해 제작된 메타패브릭은, 도심 환경과 같이 외부 방사열이 강한 조건에서도 기존 섬유 원단 대비 우수한 냉각 성능을 발휘함이 확인되었다.

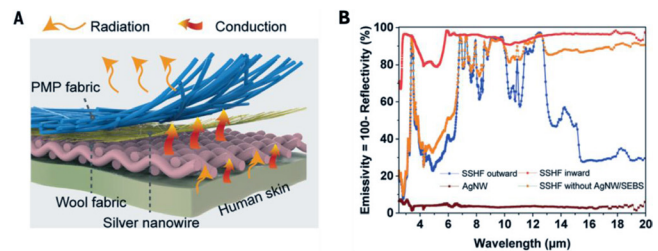


Figure 5. 3개 층으로 이루어진 내부와 외부가 다른 열방사율을 가지는 메타패브릭[7].

2.4. 능동적 메타패브릭

최근 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나는 능동적 메타패브릭(active metafabric)이다. 이는 주변 환경에 따라 광학 물성이 변화하는 메타패브릭을 의미한다. 일반적인 복사냉각은 주로 냉각 성능을 극대화하는 방향으로 연구가 이루어졌으나, 의류 원단의 경우 항상 냉각만 필요한 것은 아니다. 외부 온도가 낮을 경우에는 오히려 체온 보존, 즉 발열 효과가 요구된다. 따라서 주변 환경에 따라 피사체가 느끼는 열적 쾌적성을 능동적으로 조절할 수 있는 원단의 필요성이 대두되었다.

2017년 Maryland 연구팀은 습도에 반응하여 열방사율이 조절되는 메타패브릭을 제시하였다[8]. 인체가 더위를 느껴 땀을 흘릴 때, 섬유가 수분을 흡수하면 열방사율이 증가하여 체열 방출이 촉진된다. 반대로 습도가 낮을 때는 열방사율이 감소하여 체열 보존이 가능한 원단을 개발하였다.

이 섬유는 이중 구조(bimorph)로 설계되었다. 한 층은 셀룰로오스(cellulose) 계열 섬유로 수분을 흡수하며, 다른 한 층은 CNT(carbon nanotube) 코팅 섬유로 높은 전기전도성을 갖는다. 수분 흡수 시 셀룰로오스 섬유가 팽윤하면서 섬유가 뒤틀리고, 이로 인해 CNT코팅 섬유 간 간격이 변한다. 이러한 간격 변화는 전자기적 공명(photonic resonance)을 유발하여 표면 열방사율이 조절된다. 이는 안테나 원리를 응용한 것으로, 결과적으로 섬유의 열방사율이 습도에 따라 자율적으로 변조될 수 있음을 보여주었다.

온도에 반응하여 열방사율이 변하는 메타패브릭 연구는 주로 상전이 물질(phase-change material)을 기반으로 진행되고 있다. 일반적으로 금속은 낮은 열방사율을, 고분자는 높은 열방사율을

가진다. 따라서 고온에서는 고분자 표면, 저온에서는 금속 표면의 물성을 활용하면 열방사를 효율적으로 제어할 수 있다.

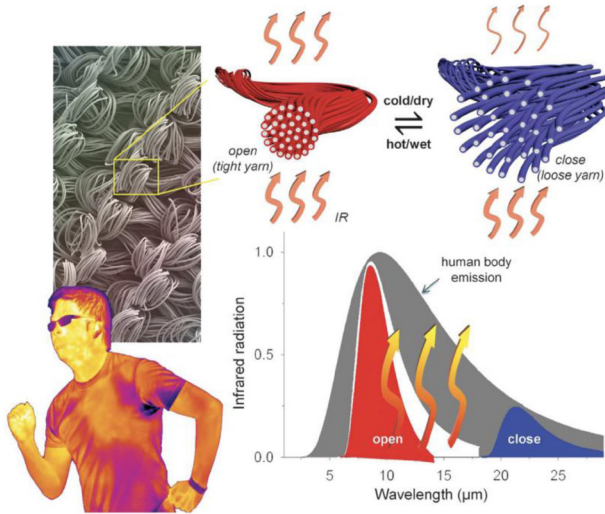


Figure 6. 외부 습도에 반응하여 열방사율이 변하는 메타패브릭[8].

특히 이산화바나듐(VO_2)은 대표적인 금속-절연체 상전이 물질로, 68°C 에서 상전이를 일으킨다. 임계 온도 이하에서는 절연체(단사정, monoclinic) 구조로 원적외선에 투명하지만, 임계 온도 이상에서는 금속성(정방정, tetragonal) 구조로 전이되어 원적외선을 반사한다. 이와 같이 VO_2 는 온도에 따라 열적외선 응답이 뚜렷하게 달라지는 장점이 있다. 또한 텅스텐 등을 도핑하였을 때 전이온도를 섭씨 30도 부근으로 떨어뜨릴 수도 있다.

그러나 실제 의류 응용에서는 이러한 광학 물성의 반대의 특성이 요구되기도 한다. 즉, 고온에서 열방사율이 증가하여 체열을 빠르게 방출하고, 저온에서는 반사율이 증가하여 체열 손실을 억제하는 기능이 필요하다. 이를 해결하기 위해 연구자들

은 Fabry-Perot 층 구조를 활용하기 시작하였다[9]. 구체적으로, VO_2 상부 층과 하부 금속 반사층 사이에 열적외선 흡수층을 삽입하여, VO_2 가 금속상일 때(고온) 흡수층이 강한 공명 효과를 나타내도록 설계한 것이다. 이 구조에서는 고온에서 전체 열방사율이 증가하고, 저온에서는 열복사 반사가 유지되어 에너지 손실을 줄일 수 있다.

최근에는 이러한 Fabry-Perot 구조를 섬유 고분자와 결합하여, 의류용 능동적 메타패브릭으로 적용하려는 시도가 보고되고 있다[10].

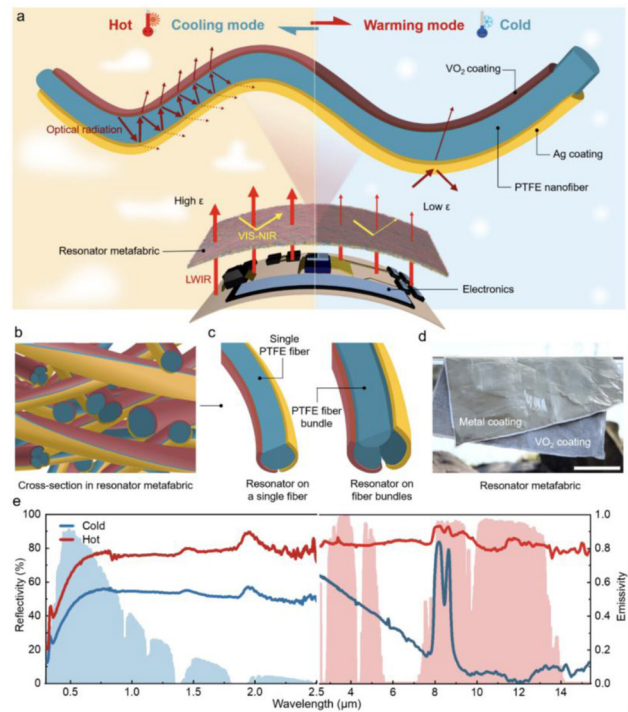


Figure 8. Fabry-Perot 구조가 적용된 온도에 따라 열방사율이 변하는 메타패브릭[10].

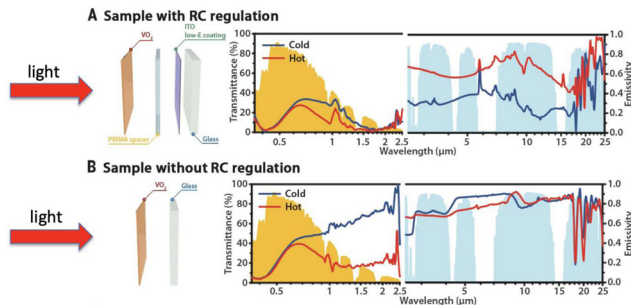


Figure 7. Fabry-Perot 구조를 활용한 온도에 따라 열방사율이 달라지는 필름 구조[9].

3. 결 론

앞으로 메타패브릭은 섬유 연구의 새로운 축으로 자리매김할 것으로 전망된다. 기존에는 증발·전도·대류 등 전통적인 열 전달 메커니즘에 주로 의존해왔지만, 이제는 복사 및 광학적 물성을 활용한 열관리가 더 현실적이고 정교한 방식으로 연구될 것이다. 나아가, 단순한 수동적 기능을 넘어 능동적·적응적 광학 제어를 구현하는 방향으로 확장되면서, 섬유 연구는 한층 더 고차원적이고 창의적인 단계로 발전할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Park S, Pal SK, Otoufat T, Kim G. “Radiative-Cooling Composites with Enhanced Infrared Emissivity by Structural Infrared Scattering through Indium Tin Oxide Nanoparticles in a Polymer Matrix”, *ACS Appl Mater Interfaces* 2023, **15**, 16026–33.
2. Zhou L, Song H, Liang J, Singer M, Zhou M, Stegenburgs E, et al. “A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling”, *Nat Sustain* 2019, **2**, 718–24.
3. Mandal J, Fu Y, Overvig AC, Jia M, Sun K, Shi NN, et al. “Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling”, *Science* 2018, **362**, 315–9.
4. Hsu Po-Chun, Song AY, Catrysse PB, Liu C, Peng Y, Xie J, et al. “Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile”, *Science* 2016, **353**, 1019–22.
5. Zeng S, Pian S, Su M, Wang Z, Wu M, Liu X, et al. “Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling”, *Science* 2021, **373**, 692–6.
6. Tong JK, Huang X, Boriskina S V, Loomis J, Xu Y, Chen G. “Infrared-Transparent Visible-Opaque Fabrics for Wearable Personal Thermal Management”, *ACS Photonics* 2015, **2**, 769–78.
7. Wu R, Sui C, Chen T-H, Zhou Z, Li Q, Yan G, et al. “Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands”, *Science* 2024, **384**, 1203–12.
8. Zhang XA, Yu S, Xu B, Li M, Peng Z, Wang Y, et al. “Dynamic gating of infrared radiation in a textile”, *Science* 2019, **363**, 619–23.
9. Wang S, Jiang T, Meng Y, Yang R, Tan G, Long Y. “Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation”, *Science* 2021, **374**, 1501–4.
10. Wei Y, Zhang L, Bernasconi F, Wu T, Li Y, Zhang Q, et al. “Temperature-Responsive Resonator Metafabrics for Self-Adaptive Thermoregulation”, *Adv Funct Mater* 2025, Early view. <http://doi.org/10.1002/adfon.202422485>.