

## 고효율 광산란을 위한 고밀도 다공성 엘라스토머 제작

정흥빈<sup>#</sup> · 이수아<sup>#</sup> · 배희영<sup>#</sup> · 최보석<sup>#</sup> · 황현성 · 김세움<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 전기정보공학과

(2023년 9월 27일 접수, 2023년 12월 14일 수정, 2023년 12월 14일 채택)

### Elastomer Film of High-Density Porosity for Efficient Light Scattering

Hongbin Jeong<sup>#</sup>, Suah Lee<sup>#</sup>, Heeyoung Bae<sup>#</sup>, Bosuk Choi<sup>#</sup>, Hyeon Seong Hwang, and Se-Um Kim<sup>†</sup>

Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received September 27, 2023; Revised December 14, 2023; Accepted December 14, 2023)

**초록:** 본 연구에서는 압착을 가하여 광산란도를 조절할 수 있는 다공성 필름을 제안한다. Water-in-polydimethylsiloxane (PDMS) 에멀전 제작 시 실리콘 오일을 첨가하여 수  $\mu\text{m}$  크기의 물 분리상 비중을 증가시켰다. 에멀전의 열경화 및 물 증발을 통해 형성한 다공성 PDMS 필름은 압착을 가하지 않을 때 광산란을 유발하고 압착 시 투과도가 증가하였다. 물 비중의 증가를 통해 얇은 두께에서도 높은 광산란 효율을 달성할 수 있다. 이렇게 제조된 다공성 필름은 공정이 간단하여 건물, 자동차, 항공우주 산업 등 다양한 분야에서 투과도 조절이 가능한 스마트 윈도우로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract:** We propose a high-density porous film capable of adjusting light scattering through a mechanical compression. We create a water-in-polydimethylsiloxane (PDMS) emulsion with a high concentration of water by incorporating silicone oil as a surfactant. The porous PDMS film produced through thermal curing and evaporation of water of the emulsion shows a highly efficient control of light scattering in a thin film configuration due to high density porosity. This simple and straightforward manufacturing process for the proposed device may enable the control of light in buildings, automotive, and aerospace industries.

**Keywords:** water-in-polydimethylsiloxane emulsion, porous polydimethylsiloxane film, mechanical smart windows, light scattering, optical transmittance.

## 서 론

스마트 윈도우는 차량 및 건물에 적용돼 광 투과도 또는 산란도를 제어하여 실내의 냉난방 및 조명에 사용되는 에너지를 절약할 수 있다.<sup>1</sup> 일반 창문의 실내외 열 교환에 의한 건물 에너지 손실이 60%에 달하기 때문에, 창문의 투과도를 효과적으로 조절하면 건물 냉난방 에너지를 절약할 수 있다.<sup>2,3</sup> 최근 외벽 자체를 유리로 활용하는 건물이 증가함에 따라 재실자의 사생활 보호 필요성도 증가하고 있다.<sup>4</sup> 이에 따라 창문의 광산란도를 필요에 맞게 조절할 수 있는 스마트 윈도우가 주목을 받고 있다.<sup>5</sup>

스마트 윈도우는 광변색(photochromic),<sup>6,7</sup> 열변색(therm-

ochromic)<sup>8-10</sup> 등 외부 자극에 감응하여 광특성이 조절되는 감응형 방식과<sup>11,12</sup> 전기변색(electrochromic),<sup>13,14</sup> 분극입자소자(suspended particle devices),<sup>15</sup> 고분자분산액정(polymer dispersed liquid crystals)<sup>16</sup> 등과 같이 구동 신호를 직접 장치에 인가하여 조절하는 방식으로 나눌 수 있다.<sup>17,18</sup>

기계식 스마트 윈도우는 기계적 변형을 통해 내부의 기공 또는 입자와 이를 감싸고 있는 외부의 탄성 물질 간의 굴절률 차이를 발생시켜 광산란을 조절할 수 있다.<sup>19-21</sup> 다양한 물질 조합을 통해 기계적/광학적 특성 조절이 매우 용이하며 응답 속도가 빠르다. 또한 스마트 윈도우 표면에 추가 광산란을 유도하는 구조물을 형성하여 효율을 상승시키거나 다중모드 구현을 할 수 있다.<sup>22</sup>

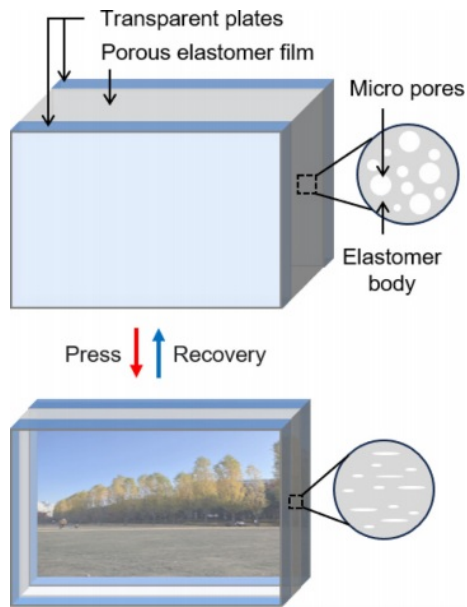
기계적 스마트 윈도우는 인장률 대비 높은 광산란 조절 범위를 달성하는 것이 중요하다. 최근 isopropyl alcohol 수용액과 실리콘 기반 고분자(Ecoflex; Smooth On, USA)의 상분리 현상을 이용하여  $\mu\text{m}$  단위의 필름이 제작되었으며 이를 이용하여 투과도를 조절할 수 있는 기계식 스마트 윈도우가 보고

<sup>#</sup>These authors equally contributed to this work.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

seumkim@seoultech.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-6897-0706

©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.



**Scheme 1.** Conceptual illustration of light scattering modulation of porous PDMS film.

되고 있다.<sup>23</sup> 이 연구에서 기계식 스마트 윈도우는 두 개의 투명 기판 사이에 다공성 필름을 배치시키고 압착을 통해 기공의 크기를 조절하는 비교적 간단한 방식으로 작동한다. 그러나 이렇게 제작된 다공성 필름의 경우 필름의 몸체를 구성하는 Ecoflex 자체의 투과도가 낮아 압착 시 최대 투과도가 50% 정도 값을 가진다.<sup>24,25</sup> 따라서 비슷한 조건에서도 더 높은 투과도를 변화시키는 새로운 물질 개발이 필요하다.

본 연구에서는 고비중의 물 분리상을 포함하는 water-in-polydimethylsiloxane(PDMS) 에멀전을 활용하여 제작한 고밀도 다공성 필름을 제안한다. 에멀전에 계면활성제 역할을 하는 실리콘 오일을 첨가하여 수  $\mu\text{m}$  크기의 물 분리상 비중을 50%까지 증가시켰다. 고밀도 다공구조 활용을 통해 더 얇은 두께에서도 높은 광산란도를 달성하고 압착에 필요한 압력을 줄일 수 있다. 이렇게 만들어진 필름을 활용하여 압착 정도에 따라 시인성이 달라지는 스마트 윈도우의 구동 원리가 Scheme 1에 나타나있다. 비용이 저렴하고 구조가 단순한 기계식 스마트 윈도우를 건축물뿐만 아니라 미래 모빌리티 분야에서 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 실 험

**시약 및 재료.** 본 연구에서 사용한 시약 또는 시료는 PDMS(Slygard 184; 다우하이텍, Korea), 실리콘 오일(Sigma Aldrich, Germany), 증류수이며, 모두 추가적인 정제 없이 사용되었다.

**Water-in-PDMS 에멀전 제조.** 물과 PDMS가 상분리 되는

현상을 이용하여 water-in-PDMS 에멀전을 제조하였다. 먼저 PDMS 주체와 경화제를 10:1로 혼합하여 PDMS 전구체를 준비하였다. PDMS 전구체와 실리콘 오일을 4:1의 비율로 혼합하고 이것을 증류수와 9:1(물 10 wt%), 2:1(물 33 wt%), 1:1(물 50 wt%)의 비율로 혼합하여, 최종적으로 PDMS 전구체가 연속상이고 증류수가 분리상인 에멀전을 제작하였다.

**다공성 필름 제조.** 1 mm 두께의 필름 형태의 공간을 가진 유리재질 몰드에 water-in-PDMS 에멀전을 채운 후 65 °C에서 8시간 동안 1차 열경화를 진행하고, 이후 100 °C에서 12시간 2차 열경화를 진행하여 증류수를 증발시켰다. 몰드에서 경화된 에멀전을 탈착하여 필름을 완성하였다.

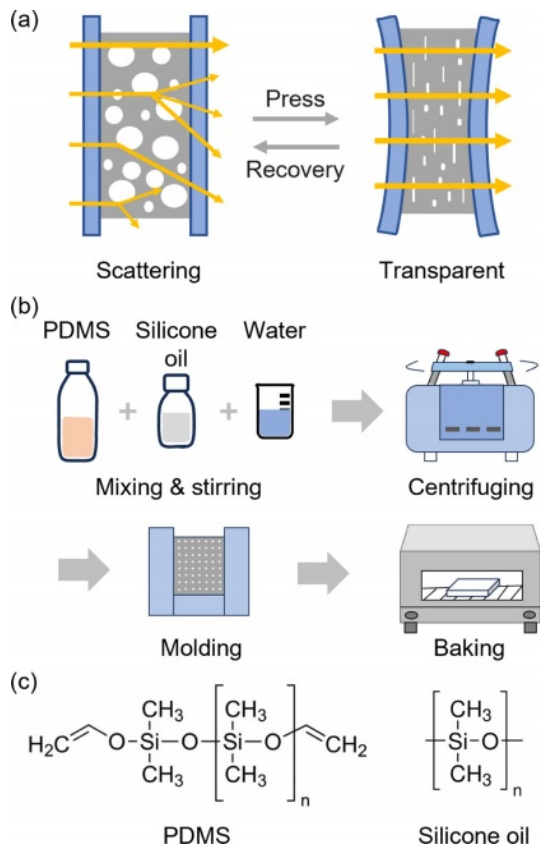
**구조 및 광 특성 분석.** 다공성 필름의 압착은 네 개의 코너에 나사가 체결 되어있는 두개의 유리기판 사이에 다공성 필름을 배치시키고, 나사를 조여 기판의 간격을 조절하는 방식으로 수행하였다. 에멀전 경화 전 분리된 증류수 상과 에멀전 경화 후 필름 내부의 다공 구조를 광학현미경(Eclipse LV100N POL; Nikon, Japan) 및 전자현미경(JSM-6700F, JEOL Ltd., Japan)을 통해 분석하였다. 분광계측기(UV-Vis-NIR Spectrometer; Ocean Optics, USA)를 이용하여 다공성 필름의 압착 전, 압착 후 가시광 대역 투과 스펙트럼을 측정하였다.

## 결과 및 토론

다공성 구조를 가진 PDMS는 발전장치, 유연 센서, 바이오 분야에서 널리 사용하고 있다.<sup>26-29</sup> 일반적으로 다공성 구조는 PDMS 전구체와 물을 섞어 에멀전을 형성시킨 후 PDMS의 경화를 통해 형태를 고정하고 물을 증발시켜 제작하게 된다. 이때 수  $\mu\text{m}$  크기 수준의 고밀도의 물 분리상을 형성하는 것이 매우 어렵다. 물 비중이 낮을 경우 동일 두께 대비 다공성 PDMS 필름의 광산란도가 낮아지게 되어 특정 수준의 산란도를 달성하기 위해 더 두꺼운 필름이 필요하거나 또는 시각을 차단하고자 하는 대상 물체의 거리가 더 멀어져야 한다. 또한 필름의 두께가 두꺼워질 수록 제작 비용이 증가하게 되고 다공구조의 압착 시 더 높은 압력이 필요해진다.

에멀전 제작은 PDMS, 실리콘 오일, 물을 물리적으로 섞는 방식을 사용한다(Figure 1(b)). 에멀전은 본 연구에서 적용한 물 비중 조건(10-50 wt%)에서 PDMS의 가시시간 동안 안정적인 상태를 유지하였다. 제작한 다공성 PDMS 필름은 수백 나노에서 수 마이크로 크기의 기공을 형성하고, 기공과 PDMS 사이에서 굴절률 차이가 발생하여 광산란을 발생시켜 재료가 불투명하게 보인다. 반면 압력을 가하면 기공이 눌러서 빈공간이 메워지고 빛이 산란하지 않고 통과하여 재료가 투명해진다(Figure 1(a)).

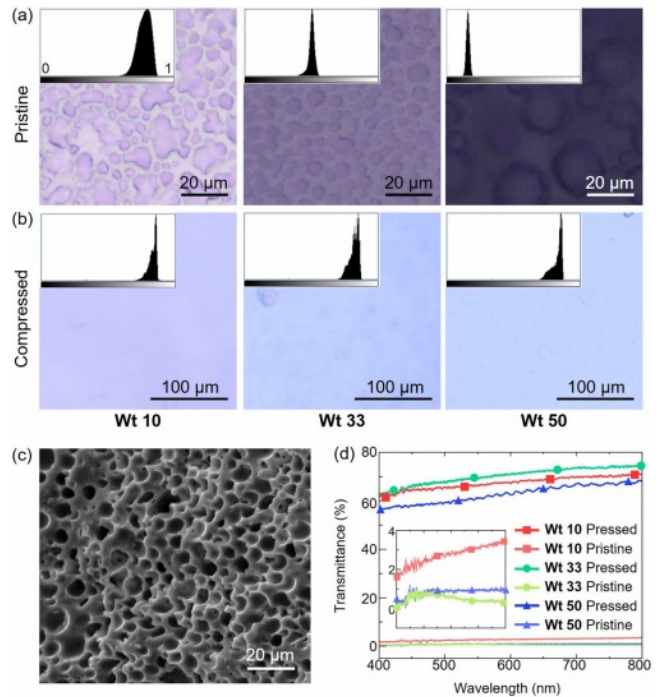
본 연구에서는 최대 물 비중을 증가시키기 위해 실리콘 오일을 첨가하였다. 실리콘 오일은 PDMS와 유사한 분자구조를 가지나 분자량이 더 낮고 경화 반응에 참여하지 않는다(Figure



**Figure 1.** Preparation of the porous PDMS film: (a) light scattering at the pristine state and the increased light propagation at the compressed state; (b) fabrication process of porous PDMS film; (c) molecular structure of PDMS and silicone oil.

1(c)). 실리콘 오일을 PDMS 비중 대비 25% 첨가하였을 때 물 비중을 50%까지 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 실리콘 오일은 PDMS 용해도가 매우 높아서 첨가 비율에 관계없이 PDMS와 완전히 섞이고 공정 과정 및 최종 제작된 필름에서 PDMS로부터 분리되어 추출되지 않는다.

물 비중이 10, 33, 50 wt%로 다르게 형성된 다공성 필름 (각각, Wt 10, Wt 33, Wt 50)을 유리기판 사이에 배치시킨 후 압착 전, 압착 후의 기공 구조와 광산란 특성을 광학현미경을 이용해 측정하였다(Figure 2(a)). 측정된 광학현미경 사진의 화소별 계조 분포를 측정하여(ImageJ) 광산란도를 정량적으로 분석하였다(Insets in Figure 2(a)). 이때, 그래프의 x축은 상대적 계조(최소: 0, 최대: 1)이고, y축은 해당 계조를 가지는 픽셀의 비율이다. 동일한 광원 노출 조건에서 압착 전에는 물 비중이 증가할수록 밝기가 감소하였다. 압착을 하지 않았을 때 Wt 10, Wt 33, Wt 50 계조 분포의 평균값은 각각 0.8, 0.52, 0.16임을 확인하였다. 물 비중이 증가할수록 기공의 밀도가 증가하여 직진하는 빛 성분이 산란에 의해 감소했음을 알 수 있다.



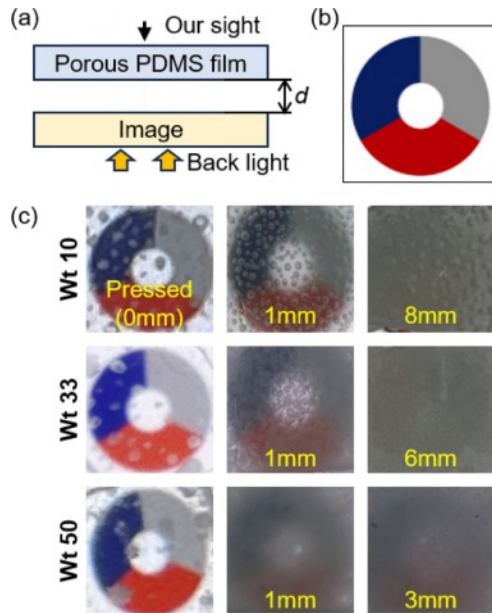
**Figure 2.** Optical characteristics of porous PDMS film: Optical microscopic images of Wt 10, Wt 33, and Wt 50 (a) at the pristine state; at (b) the pressed state with a histogram of normalized grey level of pixels in the inset. (c) Cross-sectional scanning electron microscopic image of Wt 50 at the pristine state; (d) transmittance spectra of Wt 10, Wt 33, and Wt 50 at the pristine state and the pressed state. Inset shows the magnification of the pristine state.

압착 전 광학현미경 사진(Figures 2(a), (b)) 및 전자현미경 사진(Figure 2(c))을 통해 분석한 다공 구조의 직경은 수  $\mu\text{m}$  수준이다. 이는 가시광 영역 및 적외선 영역의 빛을 산란할 수 있는 크기에 해당한다. 압착 전 관측되는 다공 구조는 압착 후에 기공이 닫히면서 관측이 되지 않는다. 이에 따라, 굴절률 분산에 의한 광산란이 줄어든다. 압착 후 광학현미경 사진 및 화소별 계조 분포에 따르면 평균 계조 분포는 물 비중과 관계없이 0.85, 0.85, 0.86으로 높게 나타난다.

다음으로, Wt 10, Wt 33, Wt 50 다공성 필름의 광투과 스펙트럼을 측정하였다(Figure 2(d)). 가시광 영역(400-700 nm)에서 압착 전 평균 투과도는 약 0-3%로 이는 산란되지 않은 성분에 해당한다. 물 비중이 작을수록 압착 전 투과도가 커지는 경향이 광학현미경을 통해 측정된 총 광량의 차이와 일치한다. 압착 후 평균 투과도는 약 60-65%이며 기공이 닫히면서 물 비중에 관계없이 투과도가 크게 차이 나지 않음을 확인할 수 있다. 압착 후 평균 투과도는 필름을 더 얇게 제작하거나 에멀전의 기포 제거를 수행하면 더 높아질 수 있다.

다음으로, Wt 10, Wt 33, Wt 50 다공성 필름과 이미지 사이의 거리에 따른 시인성을 분석하였다(Figure 3). 이미지 후

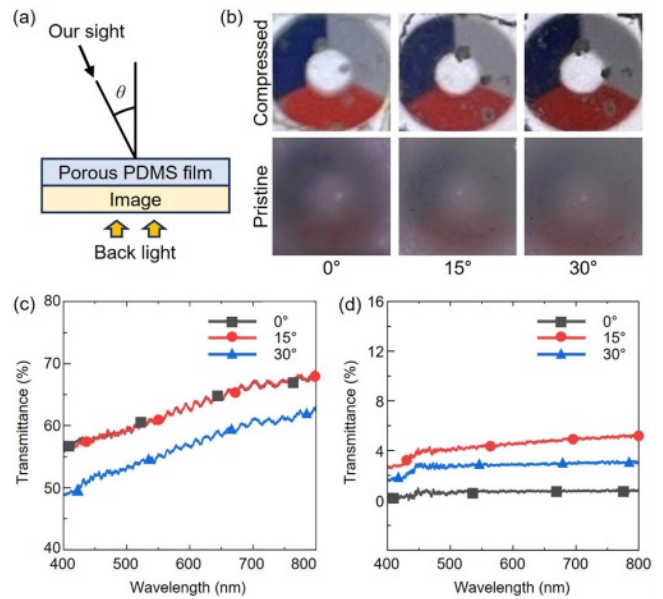




**Figure 3.** Light scattering characteristics of the porous PDMS film: (a) schematic diagram showing the experimental setup for measuring light scattering characteristics at variable distance ( $d$ ) between the porous PDMS film and the image; (b) original image for the measurement; (c) optical images of the original image captured through **Wt 10**, **Wt 33**, and **Wt 50** films at several values of  $d$ .

면부에 광원을 위치시키고 압착 전, 완전 압착 후 다공성 필름과 이미지 사이의 거리를 변화시키며 사진을 촬영하였다 (Figure 3(a)). 완전 압착 시 물체의 시인성은 물 비중에 관계없이 유사한 수준이나, 물 비중이 높을수록 더 가까운 거리에서도 이미지 식별이 불가능해진다. 1 mm 두께 기준, **Wt 10**, **Wt 33**, **Wt 50** 다공성 필름은 이미지 후면부 광원의 세기와 관계없이 각각 8 mm(두께의 8배), 6 mm(두께의 6배), 3 mm(두께의 3배)에서 이미지의 식별이 완전히 불가능해진다. 이는 스마트 윈도우를 제작할 때 더 높은 물 비중의 다공성 필름으로 더 얇은 두께에서 충분한 광산란 효과를 달성할 수 있음을 의미한다.

다음으로, 입사광의 입사각에 따른 이미지의 시인성을 분석하였다(Figure 4). 이미지를 **Wt 50** 다공성 필름에 부착시킨 후( $d = 0$  mm), 다공성 필름의 법선으로부터 측정 각도( $\theta$ )를  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ 로 변화시키면서 사진을 촬영하고 투과 스펙트럼을 분석하였다. 측정 각도에 따른 이미지의 시인성은 다공성 필름의 압착 여부에 관계없이 거의 차이가 나지 않았다(Figure 4(b)). 투과 스펙트럼의 경우, 압착 전 투과도가 각도가 증가할수록 평균 0%( $0^\circ$ , 흑색선)에서 5%( $30^\circ$ , 청색선)로 증가하였고, 압착 후 투과도가 각도가 증가할수록 평균 60%( $0^\circ$ , 흑색선)에서 55%( $30^\circ$ , 청색선)로 감소하였다(Figure 4(c)). 이 변화량은 다공성 필름의 측정 위치 변화 또는 분광기의 정렬



**Figure 4.** Angular optical characteristics of porous PDMS film: (a) schematic diagram showing the experimental setup for measuring angular light scattering characteristics of **Wt 50**; (b) optical images showing the visibility of the target image at the pressed state and the pristine state of **Wt 50** at viewing angles of  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ , and  $30^\circ$ . The original target image is given in Figure 3(b). transmittance spectra of (c) the pressed state; (d) the pristine state of **Wt 50** at viewing angles of  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ , and  $30^\circ$ .

오차에 따라 발생할 수 있는 오차와 유사한 수준으로, 각도에 따른 시인성의 변화는 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 기공의 크기 및 구조가 압착 전, 압착 후 모두 빛의 입사각에 관계없이 등방적 산포를 가지고 있음을 알 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 실리콘 오일을 도입한 water-in-PDMS 에멀전을 활용하여 고밀도 기공구조를 가지는 다공성 필름을 제작하였다. 다공성 필름을 활용한 스마트 윈도우는 필름의 압착을 통해 기공의 닫힘 및 열림 상태를 조절하여 광산란도를 조절하는 것으로, 낮은 압력 요구치 및 높은 광산란도 조절 범위를 구현하는 것이 중요하다. 본 연구에서 제작한 다공성 필름은 기존의 water-in-PDMS 에멀전에 비해 물 비중을 매우 높여, 더 높은 광산란도와 낮은 압력 요구범위를 동시에 달성할 수 있었다. 제안된 다공성 필름은 압착 시 높은 광 투과도를 보이며, 압착이 없을 때에는 1 mm 두께 기준, 거의 0%에 가까운 법선 방향 투과도를 가짐을 실험을 통해 입증하였다.

또한, 물 비중의 변화에 따른 압착 전, 압착 후의 광산란도 분석을 통해 실제로 물 비중이 높아질 때 더 높은 광산란도를

달성할 수 있음을 확인하였다. 더불어, 샘플과 물체 사이의 거리가 이미지의 시인성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 통해 스마트 윈도우의 효율적인 활용 가능성을 제시하였다. 마지막으로, 입사하는 빛의 각도에 따른 투과성의 변화를 조사한 결과, 다공성 엘라스토머 필름이 빛의 입사 각도와 무관하게 랜덤한 위치에 다양한 크기의 기공들을 압착하여 빛을 전방향으로 투과시킨다는 것을 확인하였다.

이러한 연구 결과는 건물 및 차량의 에너지 절감 및 다양한 광학적 기능과 서비스를 제공할 수 있는 스마트 윈도우 분야에서 중요한 연구 방향을 제시한다. 본 연구의 결과를 기반으로 재료의 배합비 조절, 신규 물질 도입, 또는 공정과정 최적화를 통해 상용화가 가능한 다공성 필름 소재 개발이 가능할 것으로 기대한다.

**감사의 글:** 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

- Baetens, R.; Jelle, B. P.; Gustavsen, A. Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-Art Review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2010**, *94*, 87-105.
- Tan, Y.; Peng, J.; Curcija, C.; Yin, R.; Deng, L.; Chen, Y. Study on the Impact of Window Shades' Physical Characteristics and Opening Modes on Air Conditioning Energy Consumption in China. *Energy Built. Environ.* **2020**, *1*, 254-261.
- Lee, S.-J.; Song, S.-Y. Evaluation of Visual Comfort and Lighting Energy in a Residential Building Equipped with Suspended Particle Device Smart Window Based on In-Situ Measurement. *J. Archit. Inst. Korea* **2023**, *39*, 147-156.
- Yoon, Y.-S.; Choi, W.-K.; Sim, M.-H. A Study on the Characteristics of the Energy Performance in Curtain Wall Building - Focused on the Glazing Type, Window to Wall Ratio and Internal Gains -. *J. Archit. Inst. Korea* **2013**, *29*, 255-263.
- Jelle, B. P.; Hynd, A.; Gustavsen, A.; Arasteh, D.; Goudey, H.; Hart, R. Fenestration of Today and Tomorrow: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2012**, *96*, 1-28.
- Ke, Y.; Chen, J.; Lin, G.; Wang, S.; Zhou, Y.; Yin, J.; Lee, P. S.; Long, Y. Smart Windows: Electro-, Thermo-, Mechano-, Photochromics, and Beyond. *Adv. Energy Mater.* **2019**, *9*, 1902066.
- Yang, H.; Zhao, H.; Song, Z.; Yang, Z.; Song, Z.; Qiu, J.; Huang, A.; Yang, Z. Preparation and Photochromic Behavior of Borosilicate Aluminate Glass for Smart Window and Curtain Wall Applications. *Ceram. Int.* **2023**, *49*, 21645-21651.
- Aburas, M.; Soebarto, V.; Williamson, T.; Liang, R.; Ebendorff-Heidepriem, H.; Wu, Y. Thermochromic Smart Window Technologies for Building Application: A review. *Appl. Energy* **2019**, *255*, 113522.
- Kim, B.; Yoo, K.; Kim, S.; Park, J. S.; Seong, D. G.; Yoon, J. Self-Adhesive Thermotropic Smart Films for Adaptive Solar Control under Various Climate Conditions. *Chem. Eng. J.* **2022**, *443*, 136471.
- Kwon, M.; Kim, D.; Yoon, J. Control of Phase Transition Temperature of Poly(N-isopropylacrylamide) Based Polymers for Thermotropic Smart Window by Copolymerization with Hydrophilic/Hydrophobic Comonomers. *Polym. Korea* **2021**, *45*, 734-741.
- Kang, S. K.; Ho, D. H.; Lee, C. H.; Lim, H. S.; Cho, J. H. Actively Operable Thermoresponsive Smart Windows for Reducing Energy Consumption. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 33838-33845.
- Wang, Y.; Runnerstrom, E. L.; Milliron, D. J. Switchable Materials for Smart Windows. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **2016**, *7*, 283-304.
- Cannavale, A.; Ayr, U.; Fiorito, F.; Martellotta, F. Smart Electrochromic Windows to Enhance Building Energy Efficiency and Visual Comfort. *Energies* **2020**, *13*, 1449.
- Sheng, S.-Z.; Wang, J.-L.; Zhao, B.; He, Z.; Feng, X.-F.; Shang, Q.-G.; Chen, C.; Pei, G.; Zhou, J.; Liu, J.-W.; Yu, S.-H. Nanowire-Based Smart Windows Combining Electro- and Thermochromics for Dynamic Regulation of Solar Radiation. *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 3231.
- Vergaz, R.; Sánchez-Pena, J.-M.; Barrios, D.; Vázquez, C.; Contreras-Lallana, P. Modelling and Electro-Optical Testing of Suspended Particle Devices. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2008**, *92*, 1483-1487.
- Kamal, W.; Li, M.; Lin, J.-D.; Parry, E.; Jin, Y.; Elston, S. J.; Castrejón-Pita, A. A.; Morris, S. M. Spatially Patterned Polymer Dispersed Liquid Crystals for Image-Integrated Smart Windows. *Adv. Opt. Mater.* **2022**, *10*, 2101748.
- Barrios, D.; Alvarez, C. Spectral Voltage Contour Plots of Optical Constants and Interface Parameters of the Active Layer of a Multilayer Structure Suspended Particle Device Smart Window from Clear on to Dark Off States. *Orbital* **2023**, *15*, 8-20.
- Wang, J.; Meng, C.; Wang, C.-T.; Liu, C.-H.; Chang, Y.-H.; Li, C. C.; Tseng, H.-Y.; Kwok, H.-S.; Zi, Y. A Fully Self-Powered, Ultra-Stable Cholesteric Smart Window Triggered by Instantaneous Mechanical Stimuli. *Nano Energy* **2021**, *85*, 105976.
- Kim, H.-N.; Yang, S.; Responsive Smart Windows from Nanoparticle-Polymer Composites. *Adv. Func. Mater.* **2020**, *30*, 1902597.
- Minnai, C.; Milani P. Metal-Polymer Nanocomposite with Stable Plasmonic Tuning Under Cyclic Strain Conditions. *Appl. Phys. Lett.* **2015**, *107*, 073106.
- Ke, Y.; Zhang, Q.; Wang, T.; Wang, S.; Li, N.; Lin, G.; Liu, X.; Dai, Z.; Yan, J.; Yin, J.; Magdassi, S.; Zhao, D.; Long, Y. Cephalopod-Inspired Versatile Design Based on Plasmonic VO<sub>2</sub> Nanoparticle for Energy-Efficient Mechano-Thermochromic Windows. *Nano Energy* **2020**, *73*, 104785.

22. Kim, H.-N.; Ge, D.; Lee, E.; Yang, S. Multistate and On-Demand Smart Windows. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1803847.
23. Shin, M.; Lee, Y.; Kim, J.; Sim, G. W.; Eom, Y.; Kim, S.-U.; Kim, D. S. Fabrication of Transmittance Tunable Porous Elastomers for Smart Window Applications. *Polym. Korea* **2021**, *45*, 934-939.
24. Lee, W. J.; Park, S.-Y.; Nam, H. J.; Choa, S.-H. Mechanical and Optical Characteristics of Transparent Stretchable Hybrid Substrate Using PDMS and Ecoflex Material. *Packag. Soc.* **2018**, *25*, 129-135.
25. Lee, Y. S.; Yang, S. M.; Park, D. Y.; Lee, W. J.; Park, J. Y.; Choa, S.-H. Characteristics of Mechanical Behavior and Environmental Reliability of Ultra-Stretchable Ecoflex Substrates. *Nanosci. Nanotechnol. Lett.* **2017**, *9*, 1153-1158.
26. Riesco, R.; Boyer, L.; Blosser, S.; Lefebvre, P. M.; Assemat, P.; Leichle, T.; Accardo, A.; Malaquin, L. Water-in-PDMS Emulsion Templating of Highly Interconnected Porous Architectures for 3D Cell Culture. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 28631-28640.
27. Montazerian, H.; Mohamed, M. G. A.; Mohaghegh Montazeri, M.; Kheiri, S.; Milani, A. S.; Kim, K.; Hoorfar, M. Permeability and Mechanical Properties of Gradient Porous PDMS Scaffolds Fabricated by 3D-Printed Sacrificial Templates Designed with Minimal Surfaces. *Acta Biomater.* **2019**, *96*, 149-160.
28. Lee, B.-Y.; Kim, J.; Kim, H.; Kim, C.; Lee, S.-D. Low-Cost Flexible Pressure Sensor Based on Dielectric Elastomer Film with Micro-Pores. *Sens. Actuator A Phys.* **2016**, *240*, 103-109.
29. Tantraviwat, D.; Buarin, P.; Suntalelat, S.; Sripumkhai, W.; Pattamang, P.; Rujijjanagul, G.; Inceesungvorn, B. Highly Dispersed Porous Polydimethylsiloxane for Boosting Power-Generating Performance of Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* **2020**, *67*, 2211-2855.

**출판자 공지사항:** 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의  
 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.