

# TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극을 이용한 폴리에스터 아크릴레이트 기반 고분자분산액정의 전기광학적 특성 연구

조정대 · 허기석\* · 홍진후\*\*,†

㈜큐시스, \*한국생산기술연구원, \*\*조선대학교 생명화학고분자공학과  
(2021년 12월 13일 접수, 2022년 1월 4일 수정, 2022년 1월 4일 채택)

## A Study of Electro-Optical Properties of Polyester Acrylate-Based Polymer-Dispersed Liquid Crystals Using TIZO/Ag/TIZO Multilayer Transparent Electrodes

Jung-Dae Cho, Gi-Seok Heo\* and Jin-Who Hong\*\*,†

*Institute of Photonics & Surface Treatment, Q-Sys Co. Ltd., Gwangju 61007, Korea*

*\*National Center for Nanoprocesses and Equipment, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea*

*\*\*Department of Biochemical & Polymer Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea*

*(Received December 13, 2021; Revised January 4, 2022; Accepted January 4, 2022)*

### 초 록

본 연구에서는 RF/DC 마그네트론 증착법을 이용하여 유리 기판 상에 실온에서 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 필름을 증착하였다. 전체 박막 두께 60 nm TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm)로 이루어진 다층막의 경우 650 nm에서 투과도는 86.5%, 면저항 값은 8.1  $\Omega/\square$ 를 나타냈으며, 적외선(열선)을 효과적으로 차단할 수 있는 투과도 특성 때문에 향후 에너지 절약형 스마트 윈도우로서의 적용도 가능할 것으로 판단된다. TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극을 적용한 폴리에스터 아크릴레이트 기반 고분자분산액정(polymer-dispersed liquid crystal, PDLC) 시스템에 있어서 액정과 prepolymer의 함량비, PDLC 코팅층의 두께 및 자외선 세기 변화에 따른 전기광학 특성 및 표면 형태학에 미치는 영향이 조사되었다. 15  $\mu\text{m}$ 의 PDLC 층 두께에 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 UV 세기로 광경화된 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 셀이 전반적으로 양호한 구동 전압과 on-state 투과도 및 뛰어난 off haze를 나타냈으며, PDLC 복합체의 고분자 매트릭스 표면에 형성된 액정 droplet들은 입사광을 효율적으로 산란시킬 수 있는 1~3  $\mu\text{m}$  크기를 갖고 있었다. 또한, 본 연구에서 제조된 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 기반 스마트 윈도우는 연한 갈색의 색조를 띠고 있어서 심미적 측면에서 색다른 장점을 부여할 것으로 기대된다.

### Abstract

Ti-In-Zn-O (TIZO)/Ag/TIZO multilayer transparent electrodes were prepared on glass substrates at room temperature using RF/DC magnetron sputtering. Obtained multilayer structure comprising TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm) with the total thickness of 60 nm showed a transmittance of 86.5% at 650 nm and a sheet resistance of 8.1  $\Omega/\square$ . The multilayer films were expected to be applicable for use in energy-saving smart window based on polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) because of their transmittance properties to effectively block infrared rays (heat rays). We investigated the effects of the content ratio of prepolymer, the thickness of the PDLC coating layer, and the ultraviolet (UV) light intensity on electro-optical properties, and the surface morphology of polyester acrylate-based PDLC systems using new TIZO/Ag/TIZO transparent conducting electrodes. A PDLC cell with a thickness of 15  $\mu\text{m}$  PDLC layer photocured at an UV intensity of 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$  exhibited good driving voltage, favorable on-state transmittance, and excellent off-haze. The LC droplets formed on the surface of the polymer matrix of the PDLC composite had a size range of 1 to 3  $\mu\text{m}$  capable of efficiently scattering incident light. Also, the PDLC-based smart window manufactured using TIZO/Ag/TIZO multi-layered transparent electrodes in this study exhibited a light brown, which will have an advantage in terms of aesthetics.

**Keywords:** TIZO/Ag/TIZO multilayer, Smart window, Liquid crystal, PDLC, Surface morphology

† Corresponding Author: Chosun University  
Department of Biochemical & Polymer Engineering, Chosun University,  
Gwangju 61452, Korea  
Tel: +82-62-230-7121 e-mail: jhhong@chosun.ac.kr

## 1. 서 론

현재 스마트 윈도우 산업시장은 고분자분산액정(polymer-dispersed liquid crystals, PDLC), 분극입자 현탁액 소자(suspended particle device), 전기변색(electrochromic), 광변색(photochromic) 및 열변색(thermochromic)과 같은 광조절 기술을 이용하여 광범위하게 연구되고 발전되어 왔다[1-7]. 그 중에서도 PDLC를 이용한 스마트 윈도우 제조기술은 스위칭에 의해 손쉽게 빛을 조절할 수 있는 고유 기능과 간단한 제조 공정으로 인해 많은 관심을 받아왔으며, 사생활 보호 스마트 윈도우, 광고용 프로젝션 디스플레이, 광학용 셔터 및 가전제품용 윈도우 등 다양한 분야에 적용되어 향후 성장성에 상당한 주목을 받고 있다[8-14]. PDLC 스마트 윈도우를 제조하기 위해서는 투명 전도성 필름의 사용이 필수적인데 투명전극으로 사용되는 재료로는 투명 전도성 산화물, 은 나노 와이어, 전도성 고분자 및 탄소 나노튜브와 같은 물질들이 있다. 최근 스마트 윈도우용 투명전극으로 가장 널리 적용되고 있는 재료는 ITO (indium tin oxide) 투명 전도성 산화물이다. 이유는 ITO가 갖는 뛰어난 광전자 특성을 갖기 때문으로 알려져 있다. 그러나 ITO의 상대적으로 낮은 일함수(~ 4.7 eV), H<sub>2</sub> 플라즈마에 대한 낮은 저항성 및 높은 가격이 차세대 스마트 윈도우 및 유연 평면 디스플레이 분야에서의 응용성을 제한시키는 요인이 되고 있다 [15,16]. 또한, 유연 기판 위에 증착된 다결정질 ITO 증착막의 갈라짐 현상, 유연성 결여, 기판 변형 및 열악한 에칭성 등 여러 문제가 제기되어 왔다[17,18].

이러한 ITO의 단점을 극복하기 위해 근래 oxide/Ag/oxide 투명 산화물 다층막 연구가 활발히 진행되고 있는데 그중 ITO/Ag/ITO, TIZO/Ag/TIZO, ZITO/Ag/ZITO 및 IZO/Ag/IZO와 같은 투명 산화물 다층막은 유용한 투명전극 물질로서 유연 디스플레이, 스마트 윈도우, 유기발광 다이오드 및 염료감응 태양전지 등에 이용되어 산업계의 많은 관심을 받아왔다. 왜냐하면 유전체/금속/유전체 다층막 구조는 필름에 적용 시 우수한 유연성을 제공할 수 있고 금속층으로부터의 반사를 억제하며 선택적 투명 효과를 얻을 수 있기 때문이다. 최근에는 oxide/Ag/oxide 투명 산화물 다층막 전극이 연성의 Ag 삽입층 영향으로 인해 투명전극 필름에 뛰어난 기계적, 전기적 특성 부여와 함께 낮은 면저항, 높은 투과도 및 우수한 유연성을 제공한다는 결과가 많은 연구진들에 의해 보고되었다[19-24].

ZITO/Ag/ZITO 다층막 투명전극을 이용한 이전 연구[24-26]에서 본 연구진들은 자외선(ultraviolet, UV) 경화형 PDLC 기반 스마트 윈도우에 처음으로 ZITO/Ag/ZITO 다층막 전극을 적용하였으며 기존 ITO 투명전극에 비교하여 ZITO/Ag/ZITO 다층막 투명전극 적용 PDLC 셀에서 효과적인 자외선 및 적외선(infrared, IR) 차단, 낮은 구동전압, 양호한 광학 특성을 나타냈다고 보고하였다. 또한, ZITO/Ag/ZITO 다층막 전극을 사용하여 아크릴레이트 기반 UV 경화형 PDLC 시스템에서 PDLC 층 두께 및 UV 세기 변화에 따른 전기광학적 특성, 표면 형태학 및 광중합 동력학에 미치는 영향을 조사하여 높은 on-state 투과도, 우수한 off-state 불투명도 및 양호한 구동 전압을 나타내는 최적 조건을 도출하였다.

이번 연구에서는 ZITO/Ag/ZITO 다층막 투명전극과는 달리 염료감응 태양전지용 전극으로도 적용이 시도되었으며 전기광학 특성 또한 상이한 TIZO/Ag/TIZO 다층막을 RF/DC 마그네트론 증착법을 이용하여 유리 기판 상에 실온에서 제조하였다[27]. 흥미롭게도 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극은 ZITO/Ag/ZITO 다층막과 비교해 색상 측면에서도 연한 갈색을 띠고 있어서 PDLC 기반 스마트 윈도우 제조 시 심미적

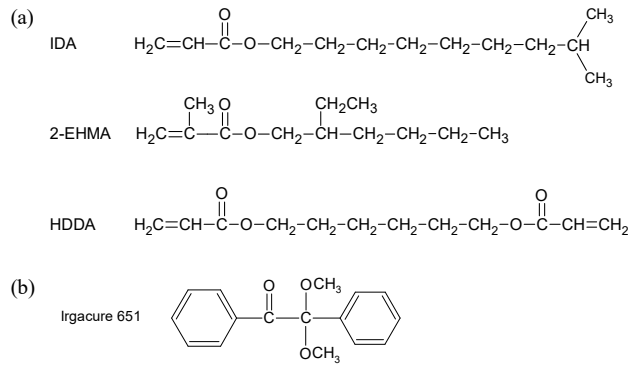


Figure 1. Chemical structures of (a) the monomers and cross-linker and (b) the photoinitiator.

측면에서 색다른 장점을 부여할 것으로 판단되었다. 일반적으로 투명 전극의 특성과 종류에 따라 제조된 PDLC 기반 스마트 윈도우의 전기 광학 특성은 서로 전혀 다른 특성을 나타낸다. 따라서 PDLC 배합과 UV 광경화 조건들을 적용된 투명전극에 알맞게 설계하여 액정과 prepolymer 사이의 상분리 속도, 광중합 속도, 고분자 매트릭스의 가교밀도 및 액정 droplet 크기 등 주요 인자들을 제어하여 최적 물성을 도출할 수 있는 특성 연구가 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 기반 스마트 윈도우용 PDLC 배합 설계와 더불어 액정과 prepolymer 함량, PDLC층 두께 및 UV 세기에 따른 PDLC 셀의 전기광학 특성을 비교 분석하여 PDLC 스마트 윈도우 제조 최적 조건의 도출 연구를 수행하였고, TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극이 적용된 폴리에스터 아크릴레이트 (polyester acrylate) 기반 PDLC 시스템의 전기광학적 특성 및 표면 형태학에 미치는 영향 조사를 위해 분광광도계(spectrophotometer), 원자현미경(atomic force microscope, AFM) 및 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 장치를 이용하였다.

## 2. 실 험

### 2.1. 재료

Polyester acrylate oligomer (UA1939, ENTIS)가 수지로서 사용되었고, isodecyl acrylate (IDA, Aldrich)와 2-ethylhexyl methacrylate (EHMA, Aldrich)가 모노머로서 사용되었으며 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA, Aldrich)가 가교제로서 1,2-diphenyl-2,2-dimethoxyethanone (Irgacure 651, BASF)이 광개시제로서 사용되었다. Merck사의 cyanobiphenyl계 액정 혼합물인 E7을 네마틱(nematic) 액정으로 사용하였으며, E7은 51%의 5CB (n-pentylcyanobiphenyl), 25%의 7CB (n-heptylcyanobiphenyl), 16%의 8OCB (n-octyloxycyanobiphenyl), 및 8%의 5CT (n-pentylcyanoterphenyl)로 혼합되어 있다. 추가 정제 없이 모든 화학 물질은 사용되었고, 본 연구에 사용된 모노머, 가교제 및 광개시제의 화학구조식은 Figure 1에 나타내었다.

### 2.2. 증착 방법

고주파 마그네트론 스퍼터링 시스템(SELCOS-01)을 이용하여, 유기 기판에 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막을 순차적으로 증착하였다. TIZO 층을 증착하기 위해, 기존 연구결과[27]에 도출된 조성인 Ti-In-Zn-O [99.99%, 8-in., TiO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO, (7.6:76.0:16.4 at.%) 타겟이 사용되었으며, 삽입되는 Ag 층을 증착하기 위하여, Ag 타겟[99.99%, 8-in]이

사용되었다. TIZO 박막은 RF 파워 300 W 조건에서 증착되었으며, 삽입되는 Ag 박막은 DC 파워 200 W 조건에서 증착되었다. TIZO 및 Ag 박막 증착 시, Ar 가스(90 sccm)만을 인입하여 증착하였으며, 공정 압력은 증착되는 박막 종류에 상관없이 0.33 Pa를 유지하였다. 기관 및 타겟과의 수직 거리는 150 mm이었으며, 스퍼터링 공정 진행 중에 기관은 회전하였다. 증착 공정이 진행되는 동안 상온(room temperature)을 유지하였다. 삽입되는 Ag 박막의 두께는 10 nm를 유지하였으며, 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층박막의 전체 두께는 30~150 nm 범위였다. 면저항은 4-point probe 시스템(RT-3000/RG-100, NAPSON)을 이용하여 측정하였고 UV-VIS-NIR 분광광도계(Cary 5000, Varian)를 이용하여 필름의 광학적 특성을 조사하였다.

### 2.3. PDLC 배합과 샘플 셀 제조

Prepolymer 배합은 45 wt% UA1939, 20 wt% IDA, 32 wt% 2-EHMA, 2 wt% HDDA 및 1 wt% Irgacure 651을 혼합하여 제조되었다. PDLC 배합물은 55~70 wt% E7 액정 혼합물과 30~45 wt% prepolymer를 실온에서 4 h 동안 교반하여 제조되었다. PDLC 셀 샘플은 2장의 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명한 유리가 증착된 유리 기관(40 × 50 mm<sup>2</sup>) 사이에 제조된 PDLC 배합물을 주입 후 UV 경화시킴으로써 제조되었다. 고분자 볼 스페이서(polymer ball spacers)를 이용하여 셀 갭(cell gap)은 10~25 μm 두께까지 조절하였다. PDLC 배합물의 UV 광경화를 위해 UV 램프는 365 nm 파장을 갖는 black-light 램프(ENF-240, Spectronics)를 사용하였으며, 이 때 UV 세기는 0.5~2.0 mW/cm<sup>2</sup>까지 조절하였고 UV 조사 시간은 3 min이었다.

### 2.4. 전기광학 특성 측정

평행광 투과도 측정 실험은 할로겐 램프 광원, CCD 검출기(AvaSpec-2048, Avantes) 및 샘플 스테이지가 부착된 광학 실험 장치(AvaLight-Hal, Avantes)를 사용하여 650 nm에서 측정되었다. 이 때 투과된 광의 수집 각도는 약 ± 3°이었다. 인가전압 대 투과도 곡선은 PDLC 셀에 외부 전압을 인가함으로써 얻어졌다. 본 연구에서 구동 전압( $V_d$ )의 정의는 투과도가 포화값( $T_s$ )에 이르게 하는 전기장을 만들어내는 데에 필요한 전압으로 정하였다. 헤이즈(haze) 수치는 KONICA MINOLTA사의 spectrophotometer (CM-3500d)를 이용하여 측정하였다.

### 2.5. AFM 및 SEM

유리 기관에 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 미세 구조와 표면 거칠기는 AFM (XE-200, PSIA) 장비의 접촉 모드(contact mode) 방식을 이용하여 측정하였다. PDLC 셀 샘플 내의 고분자 매트릭스의 표면 형태는 SEM (Quanta 200F, FEI)을 이용하여 관찰되었고, 이때 가속전압은 10 kV이었다. 표면 형태 관찰을 위해 PDLC 셀 샘플의 유리 기관을 조심스럽게 분리한 다음, 잔류 PDLC 층을 실온에서 hexane 용액에 24 h 동안 침지시켜 액정 분자를 추출하였다. 이후 액정 분자가 추출된 샘플을 진공 오븐에 넣어 24 h 동안 건조시켜 hexane 용매를 제거하였다. 샘플에 남겨진 고분자 매트릭스에 gold 증착 후, SEM을 이용하여 고분자 매트릭스의 미세 구조가 관찰되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. TIZO/Ag/TIZO 다층막 증착

유리 기관에 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 파장 및 전체 두께

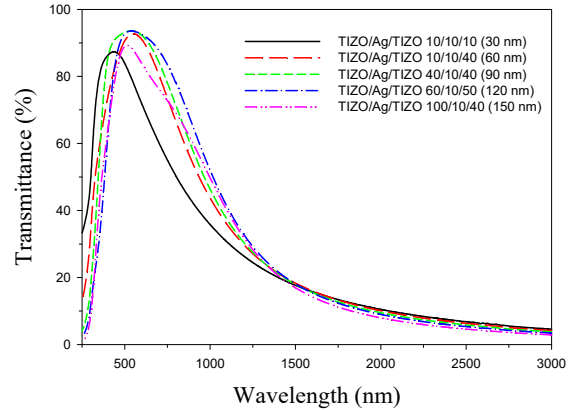


Figure 2. Curves of UV-vis-NIR transmittance of the TIZO/Ag/TIZO multilayer films deposited on glass substrates as a function of the thickness of each TIZO/Ag/TIZO layer.

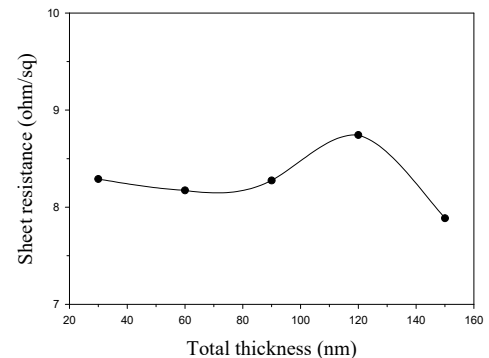


Figure 3. Sheet resistance values of the TIZO/Ag/TIZO multilayer films as a function of thickness of TIZO/Ag/TIZO layer.

변화에 따른 투과도 곡선(유리 기관으로 정규화 되지 않음)을 Figure 2에 도시하였다. 다층막 두께는 삽입 층 Ag는 10 nm로 고정하고 양측 TIZO 박막 층 두께를 적절히 조절하여 전체 다층막 두께가 30~150 nm가 되도록 증착하였다. 증착된 모든 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막은 550 nm 파장에서 78% 이상의 양호한 투과도 값을 나타내었다. 근적외선 영역에서는 증착된 다층 박막의 투과도는 급격히 감소하였으며, 이러한 거동은 삽입되는 10 nm 두께의 금속 Ag 박막에 의하여 적외선 영역에서의 반사도가 증가함에 기인한 것으로 판단된다[28,29]. 이러한 적외선 차단 효과는 향후 에너지 절약형 스마트 윈도우로서의 적용도 가능할 것으로 기대된다. TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 가시광 투과도는 특히 박막 두께 60~120 nm 범위에서 90% 이상의 우수한 투과도 특성을 나타냈다. 이러한 우수한 가시광 투과도 특성은 금속 박막이 삽입된 3층 구조 유전체 박막에서의 박막 간 굴절률 차에 의한 효과적인 플라즈몬 결합(plasmon coupling)에 의한 것으로 보고된다[21,30,31].

Figure 3은 유리 기관에 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 전체 두께 변화에 따른 면저항 수치를 나타내는 그래프이다. 증착된 모든 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막은 7~9 Ω/□의 낮은 면저항 값을 나타냈다. 삽입되는 금속 Ag 박막의 두께가 10 nm로 고정된 경우, 30~150 nm 범위의 전체 두께 변화에 따른 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 특별한 면저항 변화 거동은 관찰되지 않았으며, 값의 변화 정도도 매우 낮았다. 이러한 낮은 면저항 값은 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막이 기존에

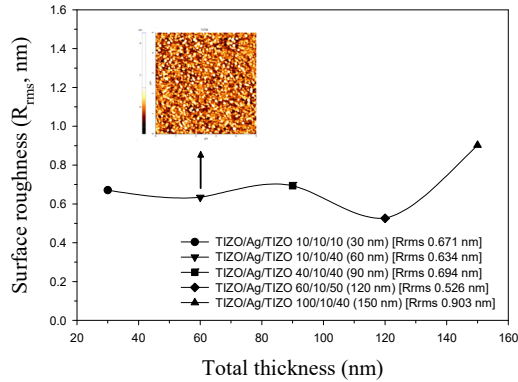


Figure 4. Surface roughness (root mean square, RMS,  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ) as a function of thickness of TIZO/Ag/TIZO layer and AFM image.

보고된 ITO/Ag/ITO, IZO/Ag/IZO, 그리고 ZITO/Ag/ZITO 다층박막의 면저항 값에 비견할 만한 낮은 면저항 값을 나타냄을 보여준다 [21-23]. 위의 TIZO/Ag/TIZO 다층막 증착 실험에서 증착 조건(시간 및 비용), 광학 및 면저항 특성을 고려할 때, 전체 박막 두께 60 nm TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm)로 이루어진 다층막 구조가 가장 유용한 조건으로 판단되며, 이 다층막의 경우 650 nm에서 투과도는 86.5%, 면저항 값은  $8.1 \Omega/\square$ 이었다.

투명전극의 표면 거칠기는 스마트 윈도우는 물론 평판형 디스플레이 및 태양전지 등의 분야에서 매우 중요한 특성이다. Figure 4는 유리 기판에 증착된 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막의 전체 두께 변화에 따른 표면 거칠기(root mean square, RMS,  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ) 및 TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm) 다층막의 AFM 이미지를 보여 준다. 증착된 모든 TIZO/Ag/TIZO 다층 박막은 전체 두께 변화에 상관없이, 1 nm 이하의 매우 낮은 RMS 값을 나타내는 부드러운 표면 특성을 나타냈다.

### 3.2. 전기광학 특성 최적화

전체 박막 두께 60 nm의 TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm) 다층막 투명전극을 적용한 UV 광경화형 폴리에스터 아크릴레이트 기반 PDLC 스마트 윈도우의 전기광학적 물성을 최적화하기 위해서는 액정과 prepolymer의 함량비, PDLC 코팅층 두께 및 UV 세기 변화가 PDLC 복합체의 전기광학 특성에 어떠한 영향을 미치는지 이해해야 하며, 또한 액정 분자와 prepolymer 간의 상분리 속도, UV 광증합 속도 및 액정 droplet 크기를 적절히 제어하여 최적의 전기광학 특성을 이끌어낼 수 있는 연구가 필요하다.

첫 번째로, 최적화 특성 연구를 위해 액정과 prepolymer의 함량비 변화에 따른 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 스마트 윈도우의 전기광학적 특성에 대해 조사하였다. PDLC 층 두께와 UV 세기는 각각  $20 \mu\text{m}$ 와  $1.0 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 로 고정시키고, 액정 함량은 55~70 wt% 까지 prepolymer 함량은 30~45 wt%까지 변화시키면서 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극을 이용하여 4개의 PDLC 샘플 셀을 제조하였다. Prepolymer 함량에 따른 PDLC 셀에 대한 투과도의 전압 의존성을 전압-투과도 곡선(V-T curves)을 통해 Figure 5에 나타내었고 얻어진 전기광학적 데이터 값들은 Table 1에 정리하였다. 우선, 구동 전압 측면에서 Figure 5와 Table 1을 살펴보면 prepolymer 함량이 증가할수록  $V_d$ 가 증가하였는데, 이는 prepolymer 함량 증가에 따라 형성된 PDLC 층 내에 전기 절연체인 고분자 매트릭스 비율이 늘어나는 반면 유전

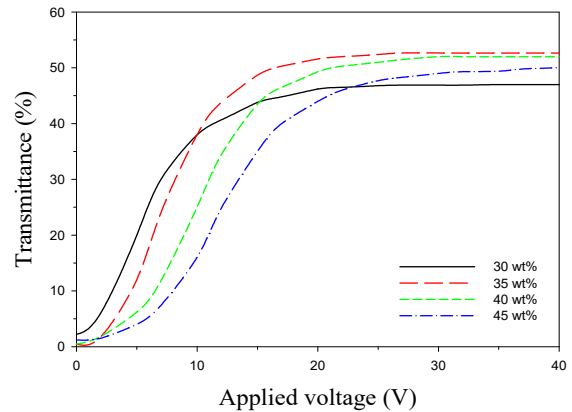


Figure 5. Curves of transmittance versus voltage for PDLC cells according to the prepolymer content.

Table 1. Electro-optical Properties of PDLC Cells According to the Prepolymer Content

Prepolymer content (%)	Transmittance (%)		$V_d^c$ (V)	Off haze (%)
	$T_o^a$	$T_s^b$		
30	2.2	46.2	19	87.6
35	0.4	53.0	21	93.1
40	0.5	51.7	26	92.4
45	1.2	49.8	30	91.0

<sup>a</sup>  $T_o$ : initial off-state transmittance.

<sup>b</sup>  $T_s$ : transmittance at the saturation level.

<sup>c</sup>  $V_d$ : driving voltage defined as the electric field required to reach  $T_s$ .

율 특성을 갖는 액정 비율은 상대적으로 줄어들어 액정 분자를 전계 방향으로 정렬시키는 데에 더 높은 전압이 소요됨을 의미한다. 광학 특성 측면의 경우는 초기 off-state 투과도( $T_o$ ),  $T_s$  및 off haze 수치 모두 prepolymer 함량 35 wt%에서 가장 우수한 값을 나타내었다. PDLC 셀의 전기광학적 특성 실험 결과, PDLC 배합물의 UV 광경화 시 prepolymer 함량이 35 wt%일 때 액정과 prepolymer 간의 상분리 정도와 액정 droplet 크기가 가장 적절하게 이루어져 액정 droplet들과 고분자 매트릭스 간의 굴절률이 잘 일치되어졌을 것으로 판단된다. 반면 prepolymer 함량 40 wt% 이상에서 투과도가 저하되는 이유는 prepolymer 함량이 많아질수록 UV 경화된 고분자 매트릭스 내에 미반응 단량체의 양도 많아질 것으로 추측되는데 이러한 미반응 단량체는 고분자 매트릭스와 액정 droplet들 간의 굴절률 차를 더욱 증대시켜 투과율을 저하에도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

두 번째로, 액정과 prepolymer의 함량비 변화에 따른 결과를 토대로 이번에는 PDLC 층 두께 변화에 따른 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극을 적용한 PDLC 셀의 전기광학적 특성에 대해 조사하였다. Prepolymer 함량과 UV 세기는 각각 35 wt%와  $1.0 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 로 고정시키고, PDLC 층 두께는 10~25  $\mu\text{m}$ 까지 변화시키면서 TIZO/Ag/TIZO 투명전극을 이용하여 4개의 PDLC 샘플 셀을 제조하였다. PDLC 층 두께에 따른 PDLC 셀의 전압-투과도 곡선을 Figure 6에 나타내었고 얻어진 데이터 값들은 Table 2에 정리하였다. 구동 전압의 경우 PDLC 층이 두꺼워질수록  $V_d$ 가 증가하였는데, 이는 당연한 결과로서 PDLC 층 두께가 두꺼워지면 형성된 고분자 매트릭스의 droplet 내에 존재하는 액정들을 전기장 방향으로 배향시키는 데 상대적으로 더 높은 전

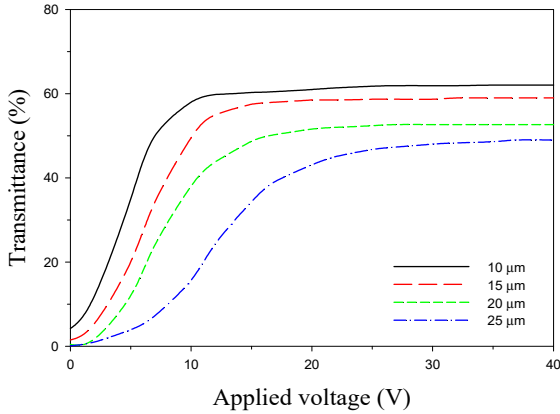


Figure 6. Curves of transmittance versus voltage for PDLC cells according to the PDLC layer thicknesses.

Table 2. Electro-optical Properties of PDLC Cells According to the PDLC Layer Thickness

PDLC layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	Transmittance (%)		$V_d^c$ (V)	Off haze (%)
	$T_0^a$	$T_s^b$		
10	4.2	61.6	11	74.1
15	1.5	59.1	16	90.2
20	0.4	53.0	21	93.1
25	0.1	48.5	27	96.4

<sup>a</sup>  $T_0$ : initial off-state transmittance.

<sup>b</sup>  $T_s$ : transmittance at the saturation level.

<sup>c</sup>  $V_d$ : driving voltage defined as the electric field required to reach  $T_s$ .

압을 필요로 하기 때문이다. 또한, PDLC 층이 얇을수록 높은  $T_0$ 와  $T_s$ 를 나타냈는데, PDLC 층 두께가 얇으면 UV 경화 시 UV광이 빠르게 침투하여 경화속도가 빨라지게 되고, 이로 인해 액정과 prepolymer 간의 상분리가 충분히 이루어지지 않아 UV 경화된 고분자 매트릭스와 액정 droplet들 사이의 굴절률 차가 크지 않게 되므로 높은 투과도를 보이는 것이다. 반면 off haze는 PDLC 층이 두꺼워질수록 증가하였는데, 이는 PDLC 층 두께가 증가함에 따라 UV 경화 시 액정과 prepolymer 간에 충분한 상분리가 일어나게 되고 이후 형성된 액정 droplet들이 더 많은 입사광을 산란시켜 더욱 높은 off-state 불투명도를 유도하였을 것으로 판단된다. 또한, PDLC 층이 두꺼워지면 UV에 의해 경화된 고분자 매트릭스 내에서 미반응 단량체의 양도 비례해서 증가하였을 것으로 예상되는데 이러한 미반응 단량체는 액정 droplet들과 고분자 매트릭스 간의 굴절률 차를 더욱 크게 하여 전반적인 투과율 저하에도 영향을 미쳤을 것으로 추측된다. 위의 두 번째 실험 결과를 토대로 PDLC 코팅층 두께 인자에 따른 PDLC 샘플 셀의 전반적인 전기광학 특성을 고려했을 때, PDLC 층 두께 15  $\mu\text{m}$ 를 갖는 PDLC 셀이 가장 만족할 만한 on-state 투과도,  $V_d$  및 off haze를 나타냄을 알 수 있었다.

세 번째로, TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 UV 광경화형 PDLC 스마트 윈도우의 성능을 최종적으로 최적화하기 위해 UV 세기 변화에 따른 TIZO/Ag/TIZO 투명전극을 적용한 PDLC 셀의 전기광학적 특성에 대해 조사하였다. 앞선 실험을 통해 최적 도출된 prepolymer 함량과 PDLC 층 두께는 각각 35 wt%와 15  $\mu\text{m}$ 로 고정시키고, UV 세기는 0.5~2.0  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 까지 변화시키면서 4개의 PDLC 샘플 셀을

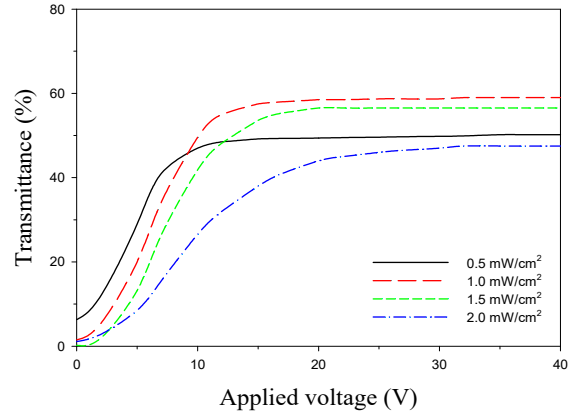


Figure 7. Curves of transmittance versus voltage for PDLC cells according to the UV intensity.

Table 3. Electro-optical Properties of PDLC Cells According to the UV Intensity

UV intensity ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )	Transmittance (%)		$V_d^c$ (V)	Off haze (%)
	$T_0^a$	$T_s^b$		
0.5	6.3	50.2	12	67.8
1.0	1.5	59.1	16	90.2
1.5	0.2	56.5	18	94.6
2.0	1.1	47.4	21	91.5

<sup>a</sup>  $T_0$ : initial off-state transmittance.

<sup>b</sup>  $T_s$ : transmittance at the saturation level.

<sup>c</sup>  $V_d$ : driving voltage defined as the electric field required to reach  $T_s$ .

제조하였다. UV 세기에 따른 PDLC 셀의 전압-투과도 곡선은 Figure 7에 도시하였고 얻어진 데이터 값들은 Table 3에 나타내었다. Figure 7과 Table 3에서 구동전압 특성을 살펴보면 UV 세기가 커질수록  $V_d$ 가 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 예상한 바와 같이 UV 세기가 커짐에 따라 폴리메틸 메타크릴레이트계 PDLC 시스템의 광경화도, 광경화 속도 및 상분리 속도가 빨라져 더 작은 액정 droplet들이 형성되고 전기 절연체인 고분자 매트릭스도 더욱 단단해져 전기장 방향으로 액정 분자들을 정렬시키는데 더욱 높은 전압이 필요하기 때문으로 생각된다. 다음으로 on-state에서의 투과도 특성을 살펴보면,  $T_s$ 가 UV 세기 1.0  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 최대값을 보이고 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 부터는 점차 감소하였는데, 이러한 경향은 아마도 UV 세기 1.0  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 액정 분자와 prepolymer 사이의 상분리 과정 중 형성된 일정 크기의 액정 droplet들과 경화된 고분자 매트릭스 간의 굴절률이 가장 잘 일치하여 높은 투과도를 나타낸 것으로 판단되며, 반면 UV 세기 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$  이상에서는 UV 세기가 증가할수록 액정 분자와 prepolymer 간의 상분리 속도가 빨라져 상대적으로 보다 작은 액정 droplet들이 생성되고 이로 인해 산란 특성이 보다 증대되고 액정 droplet들과 고분자 매트릭스 간의 굴절률 일치도 덜 이루어져 투과도가 저하된 것으로 추측된다.

마지막으로 off-state에서의 불투명도와 관계가 있는  $T_0$ 와 off haze를 살펴보면, Table 3에서 보는 바와 같이  $T_0$ 의 경우 UV 세기 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 까지는 감소하다가 UV 세기 2.0  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서는 다시 증가하였고, off haze는  $T_0$  수치와는 달리 서로 반대되는 경향을 나타내었다. 결과적으로는 UV 세기 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 제조된 TIZO/Ag/TIZO 다층



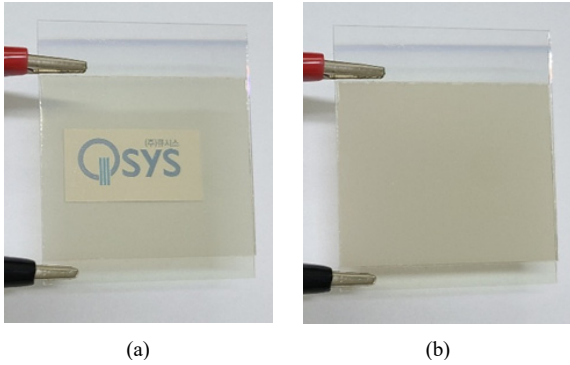


Figure 8. (a) ON state and (b) OFF state images of PDLC-based smart window sample ( $40 \times 50 \text{ mm}^2$ ) with TIZO/Ag/TIZO electrodes.

막 투명전극 적용 PDLC 셀이  $T_0$  0.2% 및 off haze 94.6%로 가장 우수한 off-state에서의 불투명도 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 한편, UV 세기가 낮은  $0.5 \text{ mW/cm}^2$ 일 때는 상대적으로 광경화 속도 및 상분리 속도가 느려져 액정 droplet들이 크게 형성되므로 산란 특성이 불충분하게 일어나게 되고 이로 인해 PDLC 셀의 off-state에서 불투명도가 저하되어  $T_0$ 는 커지고 off haze는 작아지는 경향이 나타난 것으로 생각된다. 반면, UV 세기가  $2.0 \text{ mW/cm}^2$ 일 때는 UV 세기가 커져 상대적으로 광경화 속도 및 상분리 속도가 빨라져 액정 분자와 prepolymer 사이의 다소 불충분한 상분리로 인해 off-state 불투명도가 UV 세기  $1.5 \text{ mW/cm}^2$ 일 때보다 다소 저하되었다고 유추할 수 있다. 이로써 UV 세기 변화에 따른 TIZO/Ag/TIZO 투명전극 적용 PDLC 셀의 전기광학적 특성에 대해 조사하였는데, 구동전압, on-state에서의 투과도 및 off-state에서의 불투명도 특성을 전반적으로 고려했을 때 UV 세기  $1.5 \text{ mW/cm}^2$ 에서 제조된 PDLC 셀이 스마트 윈도우로서 가장 양호한 성능을 보임을 알 수 있었다. Figure 8에  $1.5 \text{ mW/cm}^2$ 의 UV 세기로 광경화된 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 샘플 셀( $40 \times 50 \text{ mm}^2$ )의 on- 및 off-state 이미지를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제작된 셀은 PDLC에 기반한 스마트 윈도우의 전형적인 on- 및 off-state 동작 거동을 나타냈으며, 색상 측면에서 연한 갈색의 색조를 띠고 있어서 무색의 ITO 투명전극 적용 PDLC 스마트 윈도우에 비해 심미적으로 색다른 장점을 부여할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 UV 광경화형 PDLC 스마트 윈도우의 전기광학 특성 최적화 실험을 통해 액정과 prepolymer의 함량비, PDLC 코팅층 두께 및 UV 세기를 조절함으로써 새로운 투명전극을 적용한 폴리에스터 아크릴레이트 기반 광경화형 PDLC 시스템의 광경화 속도, 액정 droplet 크기 및 전기광학 특성을 적절히 제어하여 우수하고 독특한 성능을 갖는 스마트 윈도우의 제조 가능성을 보여주었다.

### 3.3. 형태학적 특성 관찰

앞서 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 폴리에스터 아크릴레이트 기반 UV 광경화형 PDLC 스마트 윈도우의 전기광학 특성 최적화 실험 중 UV 세기 변화에 따른 형성된 PDLC 복합체의 전기광학 특성을 살펴보았는데, 이 섹션에서는 SEM을 이용하여 UV 세기 변화가 미치는 PDLC 복합체의 전기광학 특성과 표면 형태학의 상관관계에 대해 조사하였다. 일반적으로 PDLC 복합체는 제조되는 UV 광경화 조건(UV 세기, 조사시간, UV 파장 등)에 따라 기계적 및 물리화학적 물성에 매우 큰 영향을 받는다고 알려져 있다. 특히, UV 세기 변화에

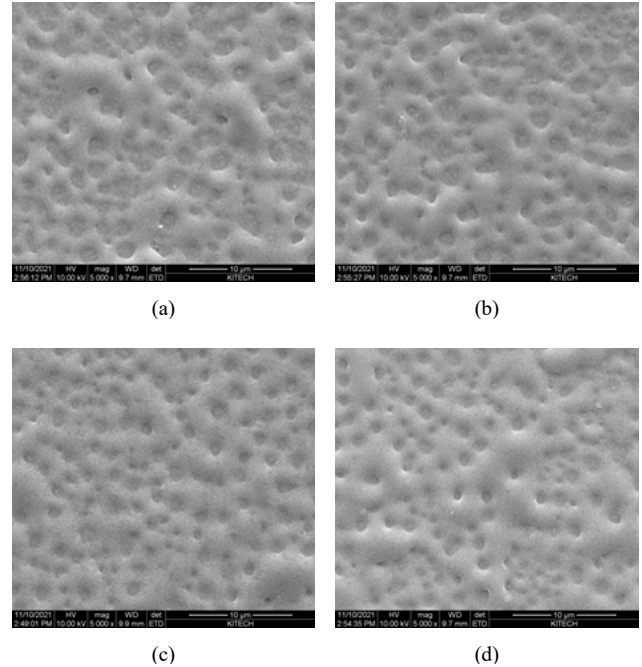


Figure 9. SEM photographs of the surface of the polymer matrix of the PDLC composites at various UV intensities (the scale bar is  $10 \mu\text{m}$  in length.): (a)  $0.5 \text{ mW/cm}^2$ , (b)  $1.0 \text{ mW/cm}^2$ , (c)  $1.5 \text{ mW/cm}^2$ , (d)  $2.0 \text{ mW/cm}^2$ .

따른 UV 광경화 속도는 액정 분자와 prepolymer 간의 상분리 거동 및 액정 droplet의 미세 형상과 같은 형태학적 특성을 결정짓는 중요한 인자 역할을 한다. 따라서 UV 광경화된 PDLC 복합체의 표면 형태 관찰은 제조된 PDLC 스마트 윈도우의 전반적인 전기광학적 물성을 해석하는 데 있어서 유용한 실험이라 할 수 있겠다.

Figure 9는  $0.5 \sim 2.0 \text{ mW/cm}^2$ 의 UV 세기에서 광경화된 폴리에스터 아크릴레이트 기반 PDLC 복합체의 고분자 매트릭스 표면에서 관찰된 SEM 사진을 나타낸 그림이다. UV 경화형 PDLC에 기반을 둔 스마트 윈도우의 액정 droplet 크기는 일반적으로  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  범위의 직경을 이루는 것으로 알려져 있으며, 대략  $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 액정 droplet이 가장 보편적이다[2,26]. Figure 9를 살펴보면 본 연구에서 제작된 PDLC 셀의 경우에도 전체적으로  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  범위를 갖는 바람직한 크기의 액정 droplet 미세 구조가 얻어졌으며, UV 세기가 증가할수록 PDLC의 고분자 매트릭스 내의 액정 droplet들 크기가 점차 감소됨을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 앞서서도 설명하였듯이 UV 세기가 증가할수록 광경화 속도가 빨라지고 액정 분자와 prepolymer 사이의 상분리 속도도 빨라져 상분리 시간이 단축되므로 액정 droplet들의 크기가 점차 작게 형성되어졌음을 나타낸다. Table 3에 나타난 UV 세기 변화에 따른 PDLC 셀의 전기광학 특성과 비교해보면, 제조된 PDLC 복합체 내의 고분자 매트릭스 표면의 SEM 사진을 통해 관찰된 액정 droplet들의 형상은 그 크기에 따라 상이한 전기광학 특성을 보였는데, UV 세기가 낮아 액정 droplet 크기가 커지는 경우는 액정 분자를 정렬 시키기는 데 더 낮은 전기장이 필요하게 되어  $V_d$  값 하락으로 이어졌고 반대로 UV 세기가 높아 액정 droplet 크기가 작아지는 경우는 높은 전기장이 필요하므로  $V_d$  값 상승으로 이어졌음을 알 수 있다. 또한, Table 3에서 살펴본 PDLC 셀들의 투과도와 헤이즈와 같은 광학 특성들도 액정 droplet들의 크기나 형상에 따라 다르게 설명될 수 있음을

SEM 측정을 통해 뒷받침 될 수 있었다.

#### 4. 결 론

RF/DC 마그네트론 증착법을 이용하여 유리 기판 상에 실온에서 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 필름을 증착하였다. 전체 박막 두께 60 nm TIZO/Ag/TIZO (10 nm/10 nm/40 nm)로 이루어진 다층막의 경우 650 nm에서 투과도는 86.5%, 면저항 값은 8.1  $\Omega/\square$ 를 나타냈으며, 효과적인 적외선(열선) 차단 특성은 향후 에너지 절약형 스마트 윈도우로서의 적용도 가능할 것으로 판단된다.

분광광도계, 전기광학 측정 장치 및 SEM을 이용하여 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극을 적용한 폴리에스터 아크릴레이트 기반 PDLC 시스템에 있어서 액정과 prepolymer의 함량비, PDLC 코팅층 두께 및 UV 세기 변화가 PDLC 셀의 전기광학 특성과 표면 형태학에 미치는 영향을 조사하였다. 도출된 최적의 전기광학 및 형태학적 특성을 고려 시, 15  $\mu\text{m}$ 의 PDLC 층 두께에 1.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 UV 세기로 광경화된 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 셀이 전반적으로 양호한 구동 전압과 on-state 투과도 및 뛰어난 off haze를 나타냈다. SEM 관찰 결과, PDLC 복합체의 고분자 매트릭스 표면에 형성된 액정 droplet 들은 1~3  $\mu\text{m}$  크기를 갖는 양호한 마이크로 미세 구조로서 입사광을 효율적으로 산란시킬 수 있는 droplet 형상임을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 제조된 TIZO/Ag/TIZO 다층막 투명전극 적용 PDLC 기반 스마트 윈도우는 연한 갈색의 색조를 띠고 있어서 심미적 측면에서 색다른 장점을 부여할 것으로 기대된다.

#### References

1. J. W. Doane, Polymer Dispersed Liquid Crystal Display, in: B. Bahadur (Ed.), *Liquid Crystals: Applications and Uses*, 361, World Scientific, Singapore (1990).
2. P.S. Drzaic, *Liquid Crystal Dispersions*, World Scientific, Singapore (1995).
3. J. B. Whitehead Jr., S. Zumer, and J. W. Doane, Light scattering from a dispersion of aligned nematic droplets, *J. Appl. Phys.* 73, 1057 (1993).
4. D. Kim, Study of electrochemical and electrochromic properties of 9-methyl-2,3,6,7-tetramethoxyfluorene in dichloromethane-TFA-TFAn(I), *J. Ind. Eng. Chem.* 2, 73-78 (1997).
5. M. Möller, S. Asaftei, D. Corr, M. Ryan, and L. Walder, Switchable electrochromic images based on a combined top-down bottom-up approach, *Adv. Mater.* 16, 1558-1562 (2004).
6. D. Barrios, R. Vergaz, J. M. Sánchez-Pena, B. García-Cámara, C. G. Granqvist, and G. A. Niklasson, Simulation of the thickness dependence of the optical properties of suspended particle devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 143, 613-622 (2015).
7. T. Fujisawa, M. Hayasi, H. Nakada, Y. Tani, and M. Aizawa, An analysis of photo-polymerization induced phase separation process in liquid crystal/polymer composite films, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 366, 107-116 (2001).
8. C. E. Hoyle, T. Y. Lee, and T. Roper, Thiol-enes: chemistry of the past with promise for the future, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 42, 5301-5338 (2004).
9. S. H. Hwang, K. J. Yang, S. H. Woo, B. D. Choi, E. H. Kim, and B. K. Kim, Preparation of newly designed reverse mode polymer dispersed liquid crystals and its electro-optic characteristics, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 470, 163-171 (2007).
10. T. J. White, L. V. Natarajan, T. J. Bunning, and C. A. Guymon, Contribution of monomer functionality and additives to polymerization kinetics and liquid crystal phase separation in acrylate based polymer dispersed liquid crystals (PDLCs), *Liq. Cryst.* 34, 1377-1385 (2007).
11. D. Hatice, M. Scott, K. Namil, H. Jun, K. Thein, V. N. Lalgudi, P. T. Vincent, and J. B. Timothy, Kinetics of photo-polymerization-induced phase separation and morphology development in mixtures of a nematic liquid crystal and multifunctional acrylate, *Polymer* 49, 534-545 (2008).
12. Y. S. No and C. W. Jeon, Effect of alignment layer on electro-optic properties of polymer-dispersed liquid crystal displays, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 513, 98-105 (2009).
13. M. Kashima, H. Cao, Q. Meng, H. Liu, D. Wang, F. Li, and H. Yang, The influence of crosslinking agents on the morphology and electro-optical performances of PDLC films, *J. Appl. Polym. Sci.* 117, 3434-3440 (2010).
14. K. J. Yang and D. Y. Yoon, Electro-optical characteristics of dye-doped polymer dispersed liquid crystals, *J. Ind. Eng. Chem.* 17, 543-548 (2011).
15. T. Minami and T. Miyata, Present status and future prospects for development of non- or reduced-indium transparent conducting oxide thin films, *Thin Solid Films* 517, 1474-1477 (2008).
16. D. S. Liu, C. S. Sheu, C. T. Lee, and C. H. Lin, Thermal stability of indium tin oxide thin films co-sputtered with zinc oxide, *Thin Solid Films* 516, 3196-3203 (2008).
17. Y. Park, V. Choong, Y. Gao, B. R. Hsieh, and S. W. Tang, Work function of indium tin oxide transparent conductor measured by photoelectron spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.* 68, 2699-2701 (1996).
18. J. Cui, A. Wang, N. L. Edleman, J. Ni, P. Lee, N. R. Armstrong, and T. Marks, Indium tin oxide alternatives-high work function transparent conducting oxides as anodes for organic light-emitting diodes, *Adv. Mater.* 13, 1476-1480 (2001).
19. M. Bender, W. Seelig, C. Daube, H. Frankenberger, B. Ocker, and J. Stollenwerk, Dependence of film composition and thicknesses on optical and electrical properties of ITO-metal-ITO multilayers, *Thin Solid Films* 326, 67-71 (1998).
20. Y. W. Shin, K. B. Kim, S. J. Noh, and S. Y. Soh, Effects of the particle size and shape of silver nanoparticles on optical and electrical characteristics of the transparent conductive film with a self-assembled network structure, *Appl. Chem. Eng.* 29, 162-167 (2018).
21. J. Lewis, S. Grego, B. Chalamala, E. Vick, and D. Temple, Highly flexible transparent electrodes for organic light-emitting diode-based displays, *Appl. Phys. Lett.* 85, 3450-3452 (2004).
22. S. W. Cho, J. A. Jeong, J. H. Bae, J. M. Moon, K. H. Choi, S. W. Jeong, N. J. Park, J. J. Kim, S. H. Lee, J. W. Kang, M. S. Yi, and H. K. Kim, Highly flexible, transparent, and low resistance indium zinc oxide-Ag-indium zinc oxide multilayer anode on polyethylene terephthalate substrate for flexible organic light emitting diodes, *Thin Solid Films* 516, 7881-7885 (2008).
23. K. H. Choi, H. J. Nam, J. A. Jeong, S. W. Cho, H. K. Kim, J. W. Kang, D. G. Kim, and W. J. Cho, Highly flexible and transparent  $\text{InZnSnO}_x/\text{Ag}/\text{InZnSnO}_x$  multilayer electrode for flexible organic light emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* 92, 223302 (2008).
24. E. M. Kim, I. S. Choi, J. P. Oh, Y. B. Kim, J. H. Lee, Y. S. Choi, J. D. Cho, Y. B. Kim, and G. S. Heo, Transparent conductive

- ZnInSnO-Ag-ZnInSnO multilayer films for polymer dispersed liquid-crystal based smart windows, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 095505, (2014).
25. J. D. Cho, S. S. Lee, S. C. Park, Y. B. Kim, and J. W. Hong, Optimization of LC droplet size and electro-optical properties of acrylate-based polymer-dispersed liquid crystal by controlling photocure rate, *J. Appl. Polym. Sci.* 130, 3098-3104 (2013).
26. J. D. Cho, Y. B. Kim, G. S. Heo, E. M. Kim, and J. W. Hong, Optimization of electro-optical properties of acrylate-based polymer-dispersed liquid crystals for use in transparent conductive ZITO/Ag/ZITO multilayer films, *Appl. Chem. Eng.* 31, 291-298 (2020).
27. G. S. Heo, J. C. Park, B. Y. Oh, S. K. Kim, Y. R. Lee, and D. C. Shin, Combinatorial growth and analysis of Ti-In-Zn-O films deposited by radio-frequency and direct-current magnetron co-sputtering system, *Thin Solid Films* 520, 7083-7086 (2012).
28. C. Guillén and J. Herrero, Transparent conductive ITO/Ag/ITO multilayer electrodes deposited by sputtering at room temperature, *Opt. Commun.* 282, 574-578 (2009).
29. S. Ito, T. Takeuchi, T. Katayama, M. Sugiyama, M. Matsuda, T. Kitamura, Y. Wada, and S. Yanagida, Conductive and transparent multilayer films for low-temperature-sintered mesoporous TiO<sub>2</sub> electrodes of dye-sensitized solar cells, *Chem. Mater.* 15, 2824-2828 (2003).
30. M. Fahland, P. Karlsson, and C. Charton, Low resistivity transparent electrodes for displays on polymer substrates, *Thin Solid Films* 392, 334-337 (2001).
31. X. Liu, X. Cai, J. Qiao, J. Mao, and N. Jiang, The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer films, *Thin Solid Films* 441, 200-206 (2003).

#### Authors

Jung-Dae Cho; Ph.D., Vice-director, Institute of Photonics & Surface Treatment, Q-Sys Co. Ltd., Gwangju 61007, Korea; jdcho@q-sys.co.kr

Gi-Seok Heo; Ph.D., Senior researcher, National Center for Nanoprocesses and Equipment, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea; gsheo@kitech.re.kr

Jin-Who Hong; Ph.D., Professor, Department of Biochemical & Polymer Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, jhhong@chosun.ac.kr