

PEDOT:PSS/MWNT 나노복합체의 나노주름 임프린팅을 통한 투명전극-배향막 복합 기능 박막의 액정 구동

장종인*, 정해창*,**

Liquid Crystal Driving of Transparent Electrode-Alignment Layer Multifunctional Thin Film by Nano-Wrinkle Imprinting of PEDOT:PSS/MWNT Nanocomposite

Jong In Jang*, Hae-Chang Jeong*,**

요약 기존 liquid crystal display(LCD) 공정에서 Indium Tin Oxide(ITO) 투명전극과 폴리이미드 배향막의 러빙 공정은 액정을 정렬하고 전계를 인가하기 위하여 필수적인 공정이다. 하지만 ITO의 증착은 높은 진공을 요구하며, 러빙 공정은 정전기에 의해 소자가 손상될 수 있는 단점이 존재한다. 본 논문에서는 기존 ITO 투명전극을 대체하기 위하여 PEDOT:PSS와 Multi-wall carbon nanotube(MWNT)를 혼합하여 PEDOT:PSS 나노복합체를 제조하고, 러빙 공정을 대체하기 위하여 나노 주름 구조 몰드를 통한 나노임프린팅을 통하여 박막을 형성함으로써 기존 액정 디스플레이의 투명전극과 배향막 두 가지 박막을 PEDOT:PSS/MWNT 나노복합체 박막 하나만으로 기능하게 하여 공정을 단순화 하였다. 전사된 나노 주름을 따라 액정이 잘 배향됨을 확인하였으며, 이를 기반으로 만들어진 액정 셀에서 박막 내 MWNT의 함량이 높아질수록 박막의 전기전도도가 증가하여 낮은 구동 전압과 빠른 응답 속도를 갖는다는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 공정 단순화와 용액 공정에 의한 공정 단계 절감, 기존 러빙 공정의 단점을 해결하는데 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract In conventional liquid crystal display(LCD) manufacturing process, Indium Tin Oxide(ITO) as transparent electrode and rubbing process of polyimide as alignment layer are essential process to apply electric field and align liquid crystal molecules. However, there are some limits that deposition of ITO requires high vacuum state, and rubbing process might damage the device with triboelectric discharge. In this paper, we made nanocomposite with PEDOT:PSS and MWNT to replace ITO and constructed alignment layer by nano imprint lithography with nano wrinkle pattern, to replace rubbing process. These replacement made that only one PEDOT:PSS/MWNT film can function as two layers of ITO and polyimide alignment layer, which means simplification of process. Transferred nano wrinkle patterns functioned well as alignment layer, and we found out lowered threshold voltage and shortened response time as MWNT content increase, which is related to increment of electric conductivity of the film. Through this study, it may able to contribute to process simplification, reducing process cost, and suggesting a solution to disadvantage of rubbing process.

Key Words : ITO-free, liquid crystal display(LCD), multi-wall nanotube(MWNT), nano wrinkle pattern, nano imprint lithography(NIL), PEDOT:PSS

This research was supported by Changwon National University in 2021~2022.

*Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

**Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Changwon National University (jhchang@changwon.ac.kr)

Received December 21, 2022

Revised January 13, 2023

Accepted January 30, 2023

1. 서론

현재 디스플레이 시장에서 가장 점유율이 큰 두 기술은 Liquid crystal display(LCD)와 organic light emitting diode (OLED)이다. 최근 OLED는 높은 명암비와 유연성으로 스마트폰과 같은 소형 디스플레이와 플렉시블 디스플레이 시장을 점유하고 있다. 하지만 화소가 열화되어 수명 신뢰도에 한계가 있으며 번인(burn in) 현상은 치명적인 단점으로 작용하고 있다. 반면 LCD는 긴 수명과 높은 신뢰성으로 상대적으로 수명이 길어야 하는 대형 디스플레이에서 여전히 높은 경쟁력을 보여주고 있으며, AR/VR 디스플레이 등 고해상도 디스플레이에서도 높은 점유율과 경쟁력을 보여주고 있다[1,2].

1.1 액정 배향 법

액정 배향은 LCD모드를 결정짓고 동작 특성에 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 현재 LCD는 투명한 기판에 증착된 투명 전극 Indium Tin Oxide(ITO)위 폴리이미드 배향막을 코팅하고 러빙법(rubbing method)을 통해 액정을 배향하는 방식이 널리 사용되고 있다. 러빙법은 ITO위 폴리이미드를 코팅하여 면 또는 벨벳 롤러를 회전시켜 폴리이미드의 표면에 마이크로 크기의 이방성 지형을 만들어 액정을 배향하는 방법이다. 공정이 단순하여 경제적이므로 산업에서 주로 사용된다. 하지만 접촉식 방식으로 러빙 공정 중 물리적 접촉에 의해 정전기가 발생하여, 마찰에 의한 TFT 소자를 파괴시킬 가능성이 있으며, 벨벳 표면의 이물질 및 먼지들이 디스플레이의 성능을 저하시킬 수 있다. 이에 따라 새로운 액정 배향 법에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

이온빔(ion beam) 조사법[3], 광배향법[4] 등 다양한 방식의 배향법이 연구되어왔다. 하지만 이들은 대면적 공정이 어렵다는 치명적인 단점이 있다. 임프린팅(imprinting) 공정은 대면적 공정이 가능하고, 마찰에 의한 불량률을 최소화 할 수

있어 기존 러빙 공정의 한계점을 극복할 것으로 기대되는 공정 중 하나이다. 본 연구 그룹에서는 기계적 응력에 의한 표면 처리 공정을 통해 간단하게 대면적에 나노구조를 형성할 수 있는 나노 주름 형성 연구를 진행하였고, 이를 몰드로 이용하여 임프린팅 공정을 통해 배향막에 전사하여 액정 배향에 대한 연구결과를 보고 한 바 있다 [5].

1.2 투명 전극

액정 배향과 더불어 투명 전극 또한 액정 디스플레이에서 중요한 요소이다. 백라이트의 빛을 투과하기 위해 투과도가 높아야 하며, 액정에 일정 크기 이상의 전계를 가하기 위해 전기적 전도도가 높아야 한다. ITO는 우수한 광학적 특성과 전기적 특성으로 인하여 액정 디스플레이에서 투명 전극으로써 사용되는 물질이다. 하지만 전 세계적으로 매장량이 희귀한 물질에 속하며, 파란색 가시광 영역에서 투과도가 떨어지고, 진공 상태에서의 증착을 요구하기 때문에 상압에서 공정이 가능한 용액 공정에 비해 경제적이지 못하다 [6-9].

금속 나노와이어, [10,11] 금속 박막, [12] 그래핀, [13] 전도성 폴리머 [14-16] 등이 ITO를 대체하기 위하여 연구되어 왔다. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)는 스�핀 코팅이나 잉크젯 프린팅과 같은 용액 공정이 가능하며, 기계적 특성이 우수하고 높은 투과도를 가지는 전도성 고분자 물질로 ITO를 대체할 가능성이 높은 물질이다 [17-19]. 하지만 순수 PEDOT:PSS는 ITO를 대체할 만큼의 높은 전기전도도를 보여주지 않는다. 이를 해결하기 위하여 dimethyl sulfoxide (DMSO) [20], Dimethylformamide (DMF) [21], ethylene glycol (EG) [20], 황산 [22] 등의 용매를 사용하여 전도성을 높이는 연구들이 진행되어 왔다. 용매는 PEDOT:PSS 중 부도체인 PSS를 녹이고 전도체인 PEDOT 간의 접촉

을 높여 결정질로 변하여 박막의 전도성을 증가시킨다 [22,23,24].

1.3 임프린팅 법을 활용한 PEDOT:PSS/MWNT 복합체의 전극/배향막 일체형 박막의 액정디스플레이 적용

본 연구에서는 PEDOT:PSS와 MWNT (multi-wall carbon nanotube) 복합체를 전극이자 배향막으로 사용하고자 한다. MWNT는 기계적 강도가 우수하고 전도성이 높은 물질로 다양한 폴리머에 혼합되어 폴리머의 강도와 전도성을 높이는 것으로 널리 알려진 물질이다 [25-27]. MWNT를 혼합하여 PEDOT:PSS의 강도를 증가시키고 전도성을 증가시켜 ITO를 대체하고자 한다. 뿐만 아니라 임프린팅 법을 적용하여 액정 배향의 역할도 수행함으로써 전극과 배향막의 기능을 동시에 수행하게 하고자 한다. 이는 전극의 증착 공정과 배향막 코팅 공정, 러빙 공정의 세 단계의 공정을 단일 공정으로 단순화 할 수 있는 효율적인 공정으로써 본 연구는 PEDOT:PSS/MWNT 복합체와 임프린팅을 이용하여 기존의 LCD 공정을 대체 하고자 한다.

2. 실험 과정

본 연구에서는 PEDOT:PSS와 MWNT의 복합체를 유리 기판 위 스펀코팅한 후 나노임프린팅 공정을 이용하여 투명 전극 및 배향막을 동시에 기능하는 박막을 제조하였다.

2.1 나노패턴 몰드 제작

나노 패턴 몰드는 정렬된 주름 구조를 사용하였다. 유연한 PDMS(Polydimethylsiloxane; Sylgard-184;Dow-corning) 필름에 길이 비율을 10% 늘려 기계적 응력을 가했으며 30분간 UVO 클리너에서 표면 처리 후 응력을 제거함으로써 제작되었다.

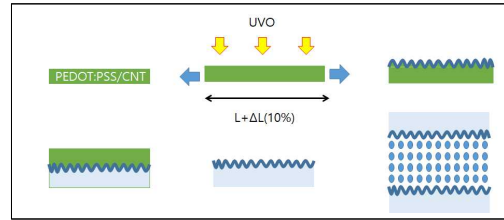


그림 1. 액정 셀 제작 모식도

Fig. 1. Schematic of Liquid Crystal (LC) cell based on PEDOT:PSS/MWNT by wrinkle imprinting method

2.2 PEDOT:PSS/MWNT 복합체 박막 제작 및 임프린팅 공정

PEDOT:PSS 수용액과 dimethylformamide (DMF)에 초음파 분산시킨 MWNT (sigma-aldrich, 100nm diameter)를 섞어 MWNT의 질량에 따라 1wt%부터 5wt%의 PEDOT:PSS/MWNT 용액을 제작하였다. 이후 1500 rpm에서 30초 동안 스펀코팅 후 제작된 주름 패턴 몰드를 전사하여 120도 오븐에서 경화하였다.

2.3 액정 셀 제작

액정 셀은 PEDOT:PSS/MWNT 복합체 박막의 주름 패턴의 광학적 특성을 평가하기 위해 주름 방향이 평행하도록 상, 하 기판을 놓아 제작된 parallel 셀과 전기-광학적 특성을 평가하기 위하여 주름 패턴의 방향이 수직하도록 상, 하 기판이 놓인 twisted nematic(TN) 액정 셀이 제작되었으며, 각 셀의 액정층의 두께는 60μm와 5μm로 제작되었다. 이후 수평 타입의 액정 ZSM-50087XX (JNC, Δε = 4.1, Δn = 0.110)이 주입되었다.

2.4 특성 평가

제작된 박막은 소스미터(Keithley2450)를 통한 4단자 측정법을 통해 전도성을 측정하였다 (MWNT 함유량 당 15회 샘플 제작 측정). 또한 제작된 몰드와 박막의 형태를 측정하기 위해 형

상 측정 레이저 마이크로스코프(vk-x1000; Keyence)를 통해 표면의 형상 및 line profile을 측정하였다. 그리고 박막의 구성 성분을 분석하기 위해 라만 분광광도계(NRS-3300; JASCO)로 박막을 분석하였으며, UV-Vis transmittance (V-650, JASCO)를 측정하였다.

액정 배향능력을 평가하기 위해 편광현미경(BX53M, Olympus)으로 parallel 액정셀을 관찰하였으며, 전기광학특성평가장치 (LCMS-200, Sesim Photonics Technology Co.)를 이용하여 전압-투과율 (voltage-transmittance) 측정 및 응답속도 (response time)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PEDOT:PSS/MWNT의 Raman spectra 특성

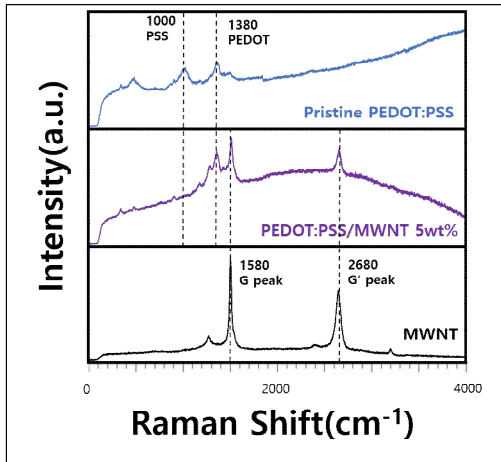


그림 2. 순수한 PEDOT:PSS 박막, PEDOT:PSS/MWNT 박막, MWNT의 라만 스펙트럼 비교

Fig. 2. Raman spectra of pristine PEDOT:PSS, PEDOT:PSS/MWNT film and MWNT

그림 2는 MWNT가 첨가되지 않은 순수한 PEDOT:PSS의 라만 스펙트럼과 MWNT가 첨가된 박막의 라만 스펙트럼, MWNT의 라만 스펙트럼을 비교하여 보여준다. 순수한 PEDOT:PSS에서는 1000cm⁻¹ 에서 PSS의 피크가 검출되었

고, 1380 cm⁻¹에서 PEDOT에 해당하는 피크가 검출되었다 [28-30].

MWNT의 라만 스펙트럼에서는 1580 cm⁻¹, 2680 cm⁻¹ 두 가지의 강한 세기를 가지는 피크가 검출되었다. 1580 cm⁻¹ 에서의 피크는 G peak로 탄소기반 물질의 피크에 해당하며, 2680 cm⁻¹ 피크는 G' peak로써 겹쳐진 그래핀이나 MWNT에서 검출되는 피크이다 [31,32]. 두 가지의 강한 피크는 PEDOT:PSS/MWNT 박막에서도 강한 세기로 검출되었다. 따라서 PEDOT:PSS와 MWNT가 잘 혼합되어 복합체를 형성했음을 알 수 있다.

MWNT가 첨가된 PEDOT:PSS 박막에서는 PEDOT의 피크, G peak, G' peak가 검출되었으나, PSS의 피크는 검출되지 않았다. 이는 MWNT가 분산된 DMF에 의한 영향으로, DMF에 의해 PSS가 녹아 상대적으로 약해지고 1580 cm⁻¹과 2680 cm⁻¹에서 강한 피크에 의해 shoulder peak가 제거된 것으로 추정된다 [22].

3.2 PEDOT:PSS/MWNT의 MWNT 함량에 따른 전도성 평가

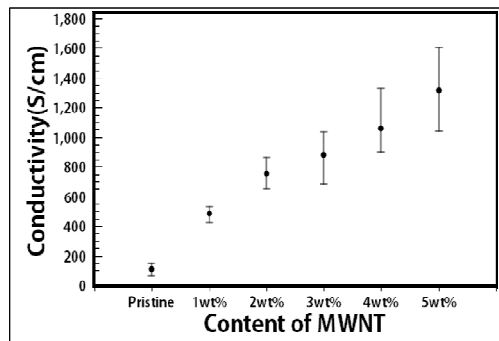


그림 3. MWNT 함량에 따른 PEDOT:PSS/MWNT 박막의 전도도

Fig. 3. Conductivity of PEDOT:PSS/MWNT film depending on content of MWNT

그림 3은 NIL 과정을 거쳐 제작된 순수한 PEDOT:PSS 박막과 PEDOT:PSS/MWNT 박막

의 MWNT함량에 따른 전도도를 나타낸다. 순수한 PEDOT:PSS의 경우 평균 105 s/cm의 낮은 전도도를 가졌지만 박막 내 MWNT의 함량이 증가할수록 박막의 전도성은 높아지는 경향을 보였으며, 5wt%의 PEDOT:PSS/MWNT 박막의 경우 평균 1313 s/cm의 전도도를 가졌다. MWNT는 높은 전도성을 가지는 물질로 박막에 함량이 증가할수록 MWNT의 네트워크 형성이 많아지고, 전자가 쉽게 이동할 수 있는 전도 경로의 수가 많아짐에 따라 전도성이 증가한 것으로 보인다.

3.3 PEDOT:PSS/MWNT의 MWNT 함양에 따른 투과율 특성

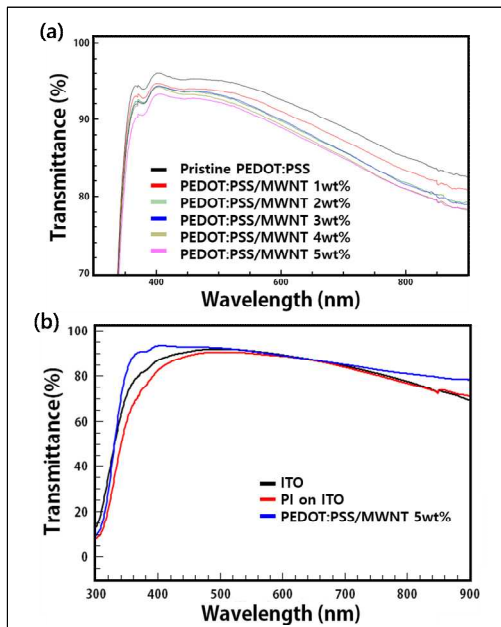


그림 4. (a) PEDOT:PSS/MWNT 박막의 MWNT 함량에 따른 자외-가시선 투과도 스펙트럼 (b) ITO, 폴리이미드가 코팅된 ITO, PEDOT:PSS/MWNT 5wt% 박막의 자외-가시선 투과도 스펙트럼

Fig. 4. (a) UV-Visible transmittance spectra of PEDOT:PSS/MWNT composite depending on MWNT content (b) UV-Visible transmittance spectra of ITO, polyimide coated ITO, and PEDOT:PSS/MWNT 5wt%

그림 4(a)는 MWNT의 함량에 따른 PEDOT:PSS/MWNT 박막의 투과도를 보여준다. MWNT는 검은색 물질로 가시광선을 모두 흡수하는 성질이 있기 때문에, MWNT의 함량이 증가할수록 전체적인 투과도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 4(b)는 유리 기판 위에 증착된 ITO, 폴리이미드가 스핀코팅된 ITO, PEDOT:PSS/MWNT 5wt% 박막의 가시광 영역대의 투과도를 나타낸다. ITO는 400nm부터 700nm 사이의 가시광 영역에서 평균 89.2%의 높은 투과도를 보여주나 일반적으로 LCD에 활용되는 폴리이미드를 코팅한 ITO의 경우 전체 가시광 영역에서 투과도가 감소하여 평균 88.1%의 투과율을 보여주었다. PEDOT:PSS/MWNT 5wt% 박막의 경우 가시광 영역에서 평균 90%의 투과도로 폴리이미드가 코팅된 ITO보다 높은 투과도를 보여주며, 특히 파란색 가시광 영역에서 ITO보다 높은 투과도를 보여주었다.

3.4 PEDOT:PSS/MWNT의 표면 특성

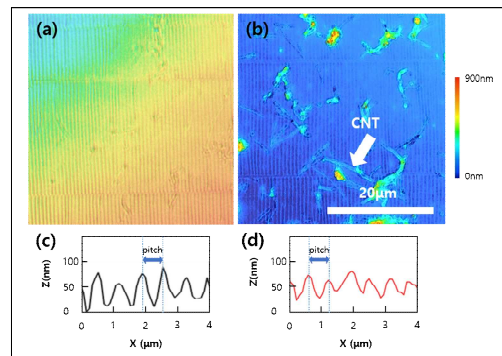


그림 5. (a)나노 주름 패턴 PDMS 몰드의 3D 스캔 이미지 (b) PEDOT:PSS/MWNT 박막의 3D 스캔 이미지 (c)나노 주름 패턴 PDMS 몰드의 라인 프로파일 (d) PEDOT:PSS/MWNT 라인 프로파일

Fig. 5. (a)3D scan image of nano wrinkle pattern PDMS mold (b)3D image of imprinted PEDOT:PSS/MWNT film (c)Line profile of PDMS mold (d) line profile of imprinted PEDOT:PSS/MWNT film

그림 5는 제작된 주름 패턴의 PDMS몰드와 임프린팅 공정을 거친 PEDOT:PSS/MWNT박막의 형상을 비교하여 보여준다. 그림 5(a)의 경우 응력과 함께 UVO처리된 PDMS가 응력이 해제되었을 때 응력의 수직인 방향으로 주름 패턴이 형성된 것을 보여주며, 그림 5(c)에서 높이가 약70nm, 피치가 0.7um 인 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 PDMS몰드를 통해 전사된 PEDOT:PSS/MWNT 박막의 형상을 보여주며, PDMS의 패턴이 잘 전사되었음을 확인할 수 있다. 또한 박막 내 MWNT가 존재함을 확인할 수 있다. 그림 4(d)에서 확인할 수 있듯 리소그래피 이후 박막의 피치는 몰드와 동일하며, 높이는 50nm로 감소하였다. 이는 몰드에 용액이 모세관 압력으로 인해 채워진 뒤 경화 과정에서 용매의 증발로 인한 것으로 추정된다.

3.5 액정 디스플레이 배향 특성

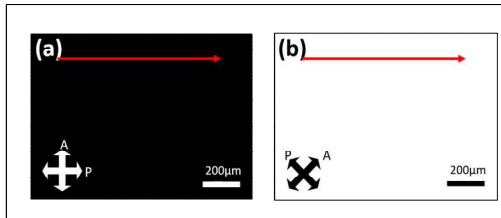


그림 6. anti-parallel 액정 셀의 편광 현미경 사진 (a)편광자와 주름 패턴(빨간화살표)이 평행할 때 (b)편광자와 주름 패턴이 45도의 각도를 이룰 때

Fig. 6. Polarized optical image of the anti-parallel LC cell of PEDOT:PSS/MWNT film. (a)With parallel direction of polarizer and wrinkle pattern direction, (b) placed with 45 degree difference between polarizer and wrinkle pattern

그림 6(a)는 수직 방향의 편광자와 검광자의 배치에 주름 구조의 방향이 편광자와 동일한 방향으로 배치되었을 때의 현미경 사진이며, 그림 6(b)는 주름 구조의 방향이 편광자와 45도 각도로 배치되었을 때의 현미경 사진이다. 그림 6(a)에서는 빛이 차단되며, 그림 6(b)에서는 빛이 투과됨을 볼 수 있다. 이는 주입된 액정이 주

름 구조의 방향을 따라 잘 배열하여 그림 6(a)에서는 수직인 편광자와 검광자에 의해 빛이 차단되고, 그림 6(b)에서는 편광자에서 편광된 빛이 굴절률 이방성을 갖는 액정 분자에 의해 45도로 배열된 액정층을 따라 원편광되어 검광자로 투과된다. 이를 통해 주름 구조가 전사된 배향막에 액정이 잘 배향되었음을 확인할 수 있다.

3.6 액정 디스플레이 전기광학 특성

그림 7은 주름 구조가 전사된 PEDOT:PSS/MWNT 박막으로 제작된 액정 셀의 전기-광학 특성을 보여준다. 그림 7(a)에서 4wt%의 경우 액정이 동작하였으나, 2.665V의 구동전압을 보였다. 이는 ITO전극을 사용하였을 때보다 높은 구동전압 특성을 보여준다. 5wt%의 경우 구동 전압은 4wt%일 때 보다 감소하였으나 (2.254V), ITO 전극을 사용하였을 때의 구동 전압(1.7V)과 비교하였을 때 여전히 높은 것을 확인할 수 있었다. MWNT 3wt% 이하의 경우 낮은 전도도로 인해 전계가 액정 셀에 안정적으로 가해지지 않아 불안정한 동작을 보였다. 4wt% 액정 셀의 응답속도는 rise time(32.193ms), fall time(26.883ms) 이나 5wt%의 경우 rise time(12.01ms), fall time(13.802ms)를 보여주며 빠른 응답속도를 보여주는 것을 확인할 수 있었다. MWNT의 함량이 높을수록 구동 전압이 낮아지고 액정이 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 MWNT의 함량이 증가할수록 전기전도도가 증가하는 경향과 연관됨을 확인할 수 있었다. 액정은 전계에 반응하여 유전을 이방성에 의해 스위칭 된다. 따라서 충분한 전도도를 가져야 전압 인가 시 충분한 전하밀도를 가지고 전계가 인가 되어 액정 디스플레이가 안정적으로 동작할 수 있다.

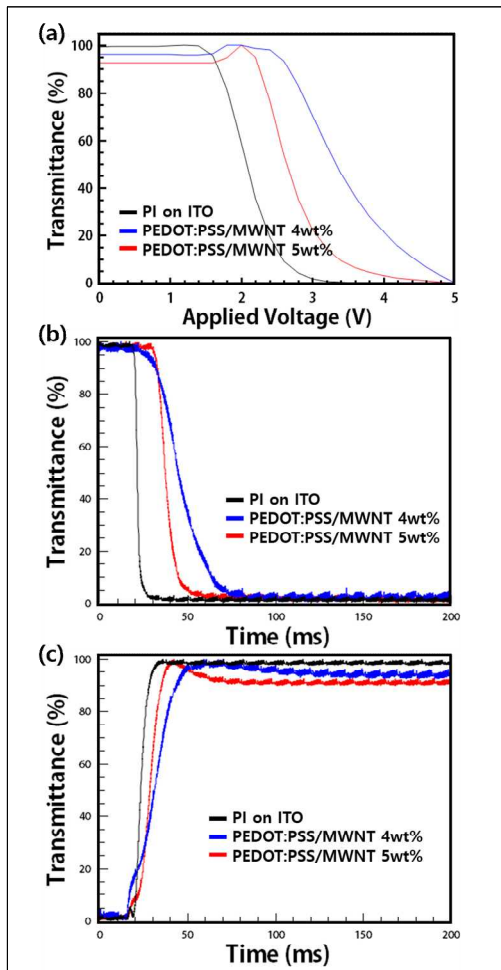


그림 7. 액정 셀의 전기-광학적 특성. (a) ITO/PI 액정 셀과 PEDOT:PSS/MWNT 액정 셀의 전압-투과율 관계의 비교 (b) ITO/PI 액정 셀과 PEDOT:PSS/MWNT 액정 셀의 상승시간 비교 (c) ITO/PI 액정 셀과 PEDOT:PSS/MWNT 액정 셀의 하강시간 비교

Fig. 7. Electro-optical characteristics of LC cells. (a) Comparison of voltage-transmittance between conventional ITO/PI LC cell and PEDOT:PSS/MWNT LC cell. (b) Comparison of rising time between conventional ITO/PI LC cell and PEDOT:PSS/MWNT LC cell. (c) Comparison of falling time between conventional ITO/PI LC cell and PEDOT:PSS/MWNT LC cell.

4. 결론

본 연구에서는 PEDOT:PSS/MWNT 복합체와 임프린팅 공정을 이용하여 배향막과 전극의 기능을 동시에 수행할 수 있는 효율적인 액정 배향 공정에 대하여 검토하였다. 임프린팅 공정을 적용하여 러빙 과정 중에 발생하는 정전기에 의한 소자 파괴 문제를 해결할 수 있었다. 또한 MWNT의 함량이 증가할수록 박막의 전기전도도가 증가하는 것을 확인하였으며, 4wt%와 5wt%의 MWNT 함량을 가질 때 액정 셀이 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다. 또한 PEDOT:PSS/MWNT 박막은 파란색 가시광 영역에서 ITO 전극보다 더 높은 투과도를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 기존의 ITO전극과 폴리이미드 배향막을 활용한 LCD 제조 공정보다 경제적이고 단순한 공정을 제시하지만 한계점도 존재함을 확인 할 수 있었다. 구동전압에 있어서 기존의 ITO와 폴리이미드 배향막을 활용한 액정 셀 보다는 높은 구동전압 특성을 보인다. 또한 MWNT의 함유량이 증가함에 따라 가시광을 투과율이 낮아지는 한계점이 존재 한다. 이는 액정 셀의 전기광학 특성과 투과율이 trade-off 관계를 가지는 것을 의미한다.

향후에는 전극/배향막 일체형 LCD 구현을 위하여 디스플레이에 적용 가능한 투과율과 전도성을 높일 수 있는 소재에 대한 연구가 지속적으로 필요하여 동시에 소재에 따른 적합한 배향 공정에 대한 연구가 이루어져야 한다. 또한 전극/배향막의 전도성과 액정 응답 특성 사이의 관계에 대한 후속 연구를 통해 AR/VR 디스플레이에 안정적으로 동작 가능한 고속응답특성 LCD에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

[1] Y. Huang, "Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives", Light: Science & Application,

- Vol. 9 (105), June, 2020.
- [2] G. Chansin, "LCD Fights Back Against OLED With MiniLED Backlight Technology", *Information Display*, Vol. 37 (2) pp. 49-51, April, 2021.
- [3] HC. Jeong, HG. Park, J. LEE, H. Jung, S.Jang, DS. Seo, "Homogeneous self-aligned liquid crystals on wrinkled-wall poly(dimethylsiloxane) via localised ion-beam irradiation", *Sci. Rep.*, Vol. 5, 8641, March, 2015.
- [4] M. Ibn-Elhaj, M. Schadt, "Optical polymer thin films with isotropic and anisotropic nano-corrugated surface topologies", *Nature*, Vol. 410, pp. 796-799, April, 2001.
- [5] HC. Jeong, J. Lee, J. Won, B. Oh, D. Kim, D. Lee, I. Song, Y. Liu, and DS. Seo, "One-dimensional surface wrinkling for twisted nematic liquid crystal display based on ultraviolet nanoimprint lithography," *Optics Express*, Vol. 27 (13), pp. 18094-18101, June, 2019.
- [6] D. R. Cairns, R. P. Witte, D. K. Sparacin, S. M. Sachsman, D. C. Paine, G. P. Crawford, and R. R. Newton, "Strain-dependent electrical resistance of tin-doped indium oxide on polymer substrates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76 (11), pp. 1425, January, 2000.
- [7] C. S. Tao, J. Jiang, M. Tao, "Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95 (12), pp. 3176-3180, December, 2011.
- [8] A. Chipman, "A commodity no more", *Nature*, Vol. 449 (13), pp.131, September, 2007.
- [9] J. M. Phillips, R. J. Cava, G. A. Thomas, S. A. Carter, J. Kwo, T. Siegrist, J. J. Krajewski, J. H. Marshall, W. F. Peck, D. H. Rapkine, "Zinc-indium-oxide: A high conductivity transparent conducting oxide" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67 (15), pp. 2246, November, 1995.
- [10] J. Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, P. Peumans, "Solution-Processed Metal Nanowire Mesh Transparent Electrodes", *Nano Lett.*, Vol. 8 (2), pp. 689-692, January, 2008.
- [11] P.C. Hsu, S. Wang, H. Wu, V. K. Narasimhan, D. S. Kong, H. R. Lee, Y. Cui, "Performance enhancement of metal nanowire transparent conducting electrodes by mesoscale metal wires", *Nat. Commun.*, Vol.4 (2522), September, 2013.
- [12] J. Meiss, M. K. Riede, K. Leo, "Towards efficient tin-doped indium oxide (ITO)-free inverted organic solar cells using metal cathodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.94 (013303), January, 2009.
- [13] V. C. Tung, L.-M. Chen, M. J. Allen, J. K. Wassei, K. Nelson, R. B. Kaner, Y. Yang, "Low-Temperature Solution Processing of Graphene-Carbon Nanotube Hybrid Materials for High-Performance Transparent Conductors", *Nano Lett.*, Vol.9 (5), pp. 194, April, 2009.
- [14] Y. J. Xia, K. Sun, J. Y. Ouyang, "Highly conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) films treated with an amphiphilic fluoro compound as the transparent electrode of polymer solar cells", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 5, pp. 5325-5332, November, 2011.
- [15] J. E. Yoo, K. S. Lee, A. Garcia, J. Tarver, E. D. Gomez, K. Baldwin, Y. M. Sun, H. Meng, T.Q. Nguyen, Y.L. Loo, "Directly patternable, highly conducting polymers for broad applications in organic electronics", *Proc Natl Acad Sci U S A*. Vol. 107 (13), pp. 5712-5717, March, 2010.
- [16] S. I. Na, S. S. Kim, J. Jo, D. Y. Kim, "Efficient and Flexible ITO-Free Organic Solar Cells Using Highly Conductive Polymer Anodes", *Adv. Mater.*, Vol. 20, pp. 4061-4067, October, 2008.
- [17] L. B. Groenendaal, F. Jonas, D. Freitag, H. Pielartzik, J. R. Reynolds, "Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Its Derivatives: Past, Present, and Future", *Adv. Mater.*, Vol. 12 (7), pp. 481-494, April, 2000.
- [18] Y. Cao, G. Yu, C. Zhang, R. Menon, A. J. Heeger, "Polymer light-emitting diodes with polyethylene dioxythiophene-polystyrene sulfonate as the transparent anode", *Synth.*

- Met., Vol.87 (2), pp. 171-174, March, 1997.
- [19] S. Kirchmeyer, K. Reuter, "Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)", *J. Mater. Chem.*, Vol. 15 (21), pp. 2077-2088, February, 2005.
- [20] J. p. Thomas, L. Zhao, D. McGillivray, K. T. Leung, "High-Efficiency Hybrid Solar Cells by Nanostructural Modification in PEDOT: PSS with Co-Solvent Addition", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2 (7), pp. 2383- 2389, 2014.
- [21] J. Ouyang, Q. Xu, CW. Chu, Y. Yang, G. Li, J. Shinar, "On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment", *Polymer*, Vol. 45, pp.8443-8450, October, 2004.
- [22] M. Jeong, A. Sanger, S. Kang, Y. Jung, I. Oh, J. Yoo, G. Kim, K. Choi, "Increasing the thermoelectric power factor of solvent-treated PEDOT:PSS thin films on PDMS by stretching", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 6 (32), pp. 15621-15629, July, 2018.
- [23] Y. H. Kim, C. Sachse, M. L. Machala, C. May, L. Müller-Meskamp, K. Leo, "Highly Conductive PEDOT : PSS electrode with optimized solvent and thermal post-treatment for ITO-free organic solar cells", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 21, pp. 1076-1081, February, 2011
- [24] TR. Chou, SH. Chen, YT. Chiang, YT. Lin, CY. Chao, "Highly conductive PEDOT:PSS films by post-treatment with dimethyl sulfoxide for ITO-free liquid crystal display", *J. Mater. Chem. C.*, Vol.3 (15), pp. 3760-3766, February, 2015.
- [25] M. Imai, K. Akiyama, T. Tanaka, E. Sano, "Highly strong and conductive carbon nanotube/cellulose composite paper", *Composites Science and Technology*, Vol. 70(10), pp. 1564-1570, September, 2010.
- [26] Y. Wang, M. Li, Y. Gu, X. Zhang, S. Wang, Q. Li, Z. Zhanga, "Tuning carbon nanotube assembly for flexible, strong and conductive films", *Nanoscale*, Vol. 7 (7), pp. 3060-3066, 2015.
- [27] J. Mannayil, S. M. Raman, J. Sankaran, R. Raman, J. M. K. Ezhuthachan, "Solution Processable PEDOT:PSS/Multiwalled Carbon Nanotube Composite Films for Flexible Electrode Applications", *Phys. Status Solidi A*, Vol. 215 (18), pp. 1701003, September, 2018.
- [28] S. Garreau, J. L. Duvail, and G. Louarn, "Spectroelectrochemical studies of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) in aqueous medium", *Synthetic Metals*, vol. 125 (3), pp. 325-329, December, 2002.
- [29] YK. Han, MY. Chang, WY. huang, HY. Pan, KS. Ho, TH. Hsieh, SY. Pan, "Improved performance of polymer solar cells featuring one-dimensional PEDOT nanorods in a modified buffer layer," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, (3), pp. K88-K93, January, 2011.
- [30] A. A. Farah, S. A. Rutledge, A. Schaarschmidt, R. Lai, J. P. Freedman, A. S. Helmy, "Conductivity enhancement of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrene sulfonate) film postspincasting," *J. Appl. Phys.*, vol. 112 (11), pp. 113709-1-113709-8, December, 2012.
- [31] N. B. Pramanik, N. K. Singha, "Direct functionalization of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) via grafting of poly(furfuryl methacrylate) using Diels-Alder "click chemistry" and its thermoreversibility", *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 94321-94327, October, 2015.
- [32] A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K. S. Novoselov, S. Roth, A. K. Geim, "Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers" , *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 97, pp. 187401, October, 2006.

저자약력

장 종 인 (Jong In Jang)

[회원]



- 2020년 2월: 창원대학교 전기공학 (공학사)
- 2022년 2월: 창원대학교 스마트제조융합 협동과정 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재: 창원대학교 스마트제조융합협동과정 박사과정

<관심분야> 액정디스플레이, 표면처리응용연구

정 해 창 (Hae-Chang Jeong)

[회원]



- 2012년 2월: 연세대학교 전자공학 (공학사)
- 2017년 8월: 연세대학교 전자공학 (공학석사, 공학박사)
- 2019년 9월 ~ 현재: 창원대학교 전기공학과 조교수

<관심분야> 액정디스플레이, 표면처리응용연구