

광경화성 단분자를 이용한 광학 보상 휨 액정 디스플레이의 전기광학 특성연구

임영진 · 전은정 · 권동원 · 김정환 · 정광운 · 이명훈 · 이승희[†]

전북대학교 고분자·나노공학과 고분자 BIN 융합연구센터

(2009년 5월 13일 접수, 2009년 6월 11일 수정, 2009년 6월 13일 채택)

Study on Electro-optic Characteristics of the Optically Compensated Bend Liquid Crystal Display Using UV Curable Monomer

Young Jin Lim, Eun Jeong Jeon, Dong Won Kwon, Jeong Hwan Kim,
Kwang-Un Jeong, Myong-Hoon Lee, and Seung Hee Lee[†]

Polymer BIN Fusion Research Center, Department of Polymer · Nano Science and Engineering,
Chonbuk National University, Chonju, Chonbuk 561-756, Korea

(Received May 13, 2009; Revised June 11, 2009; Accepted June 13, 2009)

초록: 광학 보상 휨 액정디스플레이(OCB-LCD)는 빠른 응답속도와 광 시야각 특성 때문에 응용 분야가 많다. 하지만 OCB-LCD는 초기에 splay 상태로 배열되어 있고 계조 구동은 bend 상태에서 이루어지기 때문에 초기 splay 상태에서 bend 상태로의 빠른 전이가 필요하다. 기존에 순간적으로 고전압을 인가하는 방식과 달리 본 연구에서는 임계 전압과 광경화성 반응성 단량체의 고분자화를 통한 표면 전경사각 형성으로 초기 상태에서 bend 상태를 갖는 OCB-LCD를 제조하였다. 제조된 액정 셀의 전기 광학적 및 전기적 특성을 분석한 결과 본 연구에서 제조된 셀은 기존 OCB 셀에 비해 고 전경사각으로 인한 고속응답 특성을 보여주었고 액정 단량체에 의해 형성된 배향막 위의 고분자 층 형성에 따른 잔류 DC 값은 0.1 V 보다 적었다.

Abstract: Optically compensated bend liquid crystal display (OCB-LCD) has many application fields owing to its fast response time and wide viewing angle. However, in order to operate the OCB-LCD in bend state, this device needs quick transitions from the initial splay state to bend state. Unlike conventional approach using transient high voltage for the transition, the OCB-LCD with high surface tilt angle, which was achieved by polymerization of UV curable reactive mesogen monomer under certain voltage, was manufactured and the cell showed bend state initially. Electro-optic and electrical characteristics of the cell were analyzed. The cell shows a fast response time owing to high surface pretilt angle and very low residual DC less than 0.1 V although another polymer layer is formed above polymer alignment layers.

Keywords: OCB-LCD, reactive mesogen, UV curable, pretilt angle.

서 론

일반적으로 액정디스플레이는 크게 편광판을 한 장도 사용하지 않는 산란형 모드인 고분자 분산형 액정(PDLC)^{1,2} 모드와 편광판을 두 장 사용하는 투과형 모드로 구분되어 진다. 대표적인 투과형 모드인 twisted nematic(TN)^{3,4} 모드는 낮은 소비전력과 낮은 제조비용, 그리고 높은 수율을 가지는 장점으로 인해 널리 이용되고 있지만 좁은 시야각과 느린 응답속도 때문에 대면적 액정 텔레비전과 완벽한 동영상 구현을 요구하는 제품에는 일반적으로 적용하지 않는다. 이러한 좁은 시야각 특성을 보완하기 위해 in-plane switching(IPS),⁵⁻⁷ multi-domain vertical alignment(MVA),⁸⁻¹⁰ fringe-field

switching(FFS)¹¹⁻¹³ 등이 개발되었지만 이 모드들 또한 고속 응답 속도의 특성을 만족시키지는 못했다. 따라서, 이러한 모드들은 최근에 field sequential 방식에 요구되는 제품에는 일반적으로 적용하지 않는다. 반면 5 ms 이하의 고속 응답 속도와 적절한 시야각 특성을 보이는 optically compensated bend mode(OCB)¹⁴⁻¹⁶ 모드는 고속응답 특성 때문에 field sequential 색 표현 방식에 많이 응용되고 있다. 일반적으로 OCB 모드는 전압인가 전 초기 상태가 퍼짐 상태이기 때문에 디스플레이를 구동시키기 위해서는 초기에 높은 DC bias 전압을 인가하여 “splay-bend” 전이를 일으켜 유지시켜야 한다.¹⁷ 임의의 문턱전압 이하에서는 bend 구조 보다 splay 구조가 에너지 관점에서 더 안정하고 “splay-bend” 전이 과정이 느리기 때문에 실제 응용을 위해서는 낮은 전압에서 전이 과정을 빠르게 일으킬 수 있는 방법이 요구된다. 따라서, 최근에 안정된 상태의 OCB셀을 만들기 위해 액정단량체(reactive

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: lsh1@chonbuk.ac.kr

mesogen, RM) 단분자를 이용하여 초기 액정 상태를 bend 상태로 유지시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁸⁻²⁰ 하지만, 종래에 발표된 논문들은 RM 단분자의 농도가 높고 벌크 상태에서 네트워크 형태로 RM 단분자들이 고분자화되기 때문에 액정과 고분자화된 RM 단분자 사이에 빛이 산란되어 어둠 상태에서 빛샘이 크게 발생하는 문제가 발생한다.

본 논문에서는 어둠 상태에서의 빛의 산란을 최소화시키기 위해 적은 양의 RM 단분자를 액정에 혼합한 후 OCB셀에 주입하고 전압을 인가하여 bend 상태가 되면 UV 광원에 노출시켜 기판 표면에만 선경사각을 갖는 고분자 박막을 형성시켜 초기 상태에 안정한 bend 상태를 갖는 OCB 셀의 제조방법에 대해 연구를 하였다. 더불어 제조된 셀의 전기 광학적 및 전기적 특성에 대해 분석하였다.

실 험

셀 조건 및 재료. 본 연구에서 사용된 OCB 모드의 셀 조건은 셀 갭이 5.1 μm 이고, 셀의 상판과 하판은 모두 ITO가 코팅되어 있는 유리 기판이며, 수평 배향막은 상·하판 모두 평행하게 같은 방향으로 러빙하였다. 액정은 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 굴절률 이방성(Δn)이 0.099(at 589.3 nm)이고, 유전율 이방성($\Delta\epsilon$)이 8.1인 물질을 사용하였고, 사용된 반응성 단량체는 RM 257(Merck Co., Ltd)이며 액정 질량에 대해 농도를 다르게 혼합하였다. 그리고, 광 개시제는 Irgacure 607을 사용하였으며, 함유된 반응성 단분자 대비 0.01 wt%의 양을 혼합하였다.

반응성 단분자를 이용한 선경사각 제조. Figure 1은 OCB 셀에서 RM 단분자에 의한 선경사각 형성 과정을 보여준다. Figure 1(a)와 같이 초기 동일한 방향으로 수평 배향된 액정은 splay 상태를 형성하고 RM 단분자들은 액정 셀 안에서 액정을 따라 존재한다. 이때 임계 전압 이상의 수직전기장을 인가하면 Figure 1(b)와 같이 기판에 수직인 중간 액정 방향자를 중심으로 상하대칭 구조를 이루며 bend 상태를 형성한다. 이 상태에서 Figure 1(c)와 같이 액정 셀에 UV를 조사(30 mW at 365 nm, 15 min)하면 RM 단분자들의 고분자화 반응

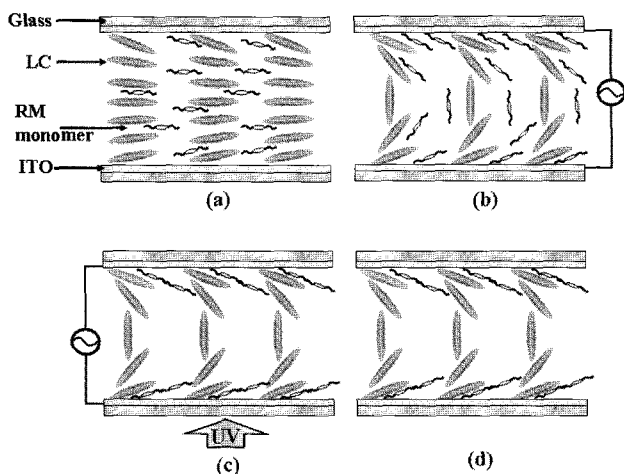


Figure 1. Schematic diagram of the processes for fabricating the OCB-LCD with defined pretilt angles at the substrate surfaces: (a) initial splay state; (b) applying voltage; (c) UV curing at applying voltage; (d) forming new pretilt angle at surface.

이 진행되고, 점점 배향막 표면에서 고분자화되면서 선경사각이 형성된다.²¹⁻²³

이러한 특정 선경사각이 형성되면 Figure 1(d)와 같이 전압을 제거한 후에도 bend 상태를 유지한다.^{18-20,23} 본 논문에서는 액정성을 띠는 반응성 단량체인 RM 257의 양을 조절하여 bend 상태가 나타나는 최적 조건을 조사하였다.

Figure 2는 인가하는 전압과 반응성 RM 단분자의 농도에 따른 액정층의 변형상태를 보여주고 있다. 종래의 논문은¹⁹ bend 상태를 얻기 위해서 RM 단분자의 농도가 액정 질량 대비 4 wt% 이상 함유되어야 하지만 본 논문에서는 Figure 2에서 확인할 수 있듯이 RM 단분자의 농도가 1.5% 이상으로 매우 낮은 농도에서도 bend 상태가 형성되었고, 전압 또한 종래의 논문은²⁰ 농도가 2 wt%일 때 10 V의 전압을 인가하는데 비해 본 논문은 4 V의 전압에서도 bend 상태가 형성되었다. 따라서, 본 논문에서는 낮은 농도와 낮은 전압인가로도 안정한 bend 상태를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Figure 3은 RM 단분자의 농도가 2 wt%일 때의 기판 표면 위에 형성된 고분자화된 RM 단분자들의 SEM 사진을 보여주고 있다. Figure 3(a)에 나타난 바와 같이 비교적 일정하게 RM 고분자들이 기판 표면에 고분자 체인이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 이렇게 형성된 고분자 층에 의해 기판 표면위의 액정 방향자들은 높은 선경사각을 형성할 수 있다. Figure 3(b)를 보면 투명 전극인 indium thin oxide (ITO)의 두께는 약 149 nm, 배향막은 약 155 nm이고, RM 고분자

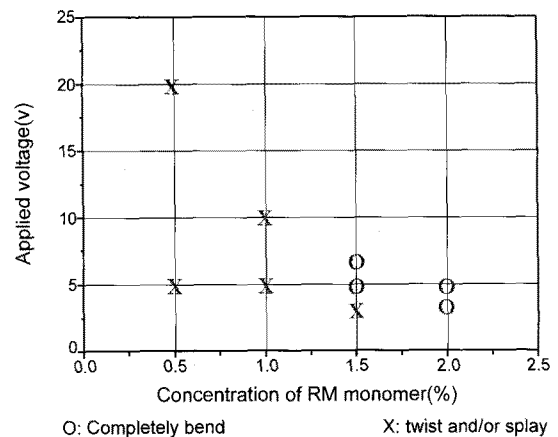


Figure 2. Orientation of liquid crystal molecules according to applied voltage and concentration of RM monomer.

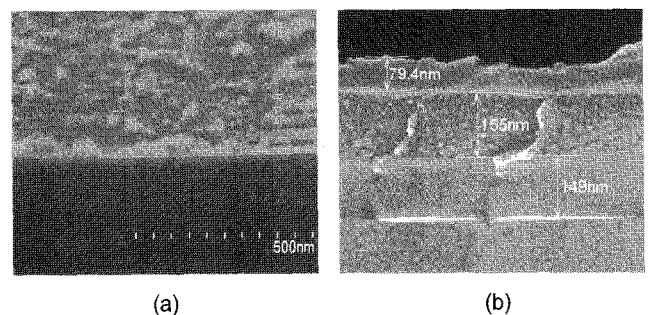


Figure 3. The SEM photographs of the polymerized RM monomers when concentration of the RM monomers is 2% (a) on surface of (b) in side of substrate.

막은 약 79.4 nm로 매우 얇게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

결과 및 토론

셀의 초기상태 확인. Figure 4는 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB 셀의 전압인가 전후 상태에서 디지털 카메라로 찍은 사진이다. Figure 4(a)의 전압인가 전 상태를 보면 셀이 빨강색을 띠는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 액정의 위상지연 값이 아주 큰 504 nm를 갖는 splay 상태이기 때문이다. Figure 4(b)의 전압인가 전 상태를 보면 약간 푸른 색 빛을 띠는 화이트 상태를 보여주고 있다. 이는 초기 액정 셀의 위상 지연 값이 일반 OCB셀에 비해 확연히 줄어들음을 암시하고 실제 셀을 교차된 편광자 아래서 회전시킨 결과 광축이 존재하는 것으로 보아 초기 배열 상태가 bend 상태를 암시하고 있다. 두 셀 모두 전압을 10 V 정도 인가해지면 어둡게 상태가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이때 제안된 셀의 어둡게 상태는 고분자 표면의 액정이 고분자막에 강하게 정박 되어 있어 전압 인가시 완벽하게 액정들이 모두 설 수가 없어 잔존하는 복굴절로 인해 완벽한 어둡게 상태를 얻을 수 없다. 이는 negative C-plate와 positive A-plate를¹⁵ 사용하거나 biaxial¹⁶ 보상필름 등을 사용하여 해결할 수 있다.

셀의 전기광학 특성 확인. Figure 5는 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB셀의 전압인가에 따른 투과율곡선을 보여주고 있다. 측정 장비는 세심 광전자사의 LCMS-200을 사용하였다. Figure 5에서 볼

수 있듯이 아무런 처리도 하지 않은 일반적인 OCB셀은 임계전압 1.5 V에서 bend 상태가 되고 RM으로 선경사각을 만들어준 제안된 OCB셀은 초기상태에서 bend 상태가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, RM 단분자를 이용해 초기 bend 상태를 만들어 주면 임계전압이 필요 없이 디스플레이 구동이 가능하다.

Figure 6은 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB셀의 전압인가에 따른 위상지연 값 변화를 보여주고 있다. 측정 장비는 세심 광전자사의 REMS-150을 사용하였다. Figure 6에서 볼 수 있듯이 일반적인 OCB셀은 초기 splay 상태로 504 nm의 높은 위상지연 값을 가지고 있다가 전압인가 시 급격히 위상지연 값이 감소하는걸 알 수 있다. 반면에 제안된 OCB셀은 초기 bend 상태이기 때문에 전압인가 전 상태와 10 V까지 전압을 인가했을 때의 위상지연값 변화가 167 nm에서 49 nm로 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Figure 5를 보면 3 V에서 두 셀의 투과율이 일치했는데 이는 Figure 6에서 확인할 수 있듯이 전압 인가에 따른 두 셀의 위상지연값의 감소율이 다르기 때문에 초기 두 셀의 위상지연값이 같지 않더라도 어느 한 지점(3 V)에서 두 셀의 위상지연 값이 같아졌음을 의미한다.

셀의 선 경사각 확인. 형성된 선경사각을 확인하기 위하여 전기용량을 측정하였다. 측정 장비는 Agilent Technologies사의 LCR METER를 사용하였고 측정모드는 전기 용량(C)과 저항(R)이 병렬 연결된 C-R로 하였다. 셀의 두께가 d이고 전극의 면적이 A이고 액정의 유전율 이방성 값이 Δε 이라면 측정되는 전기 용량 ΔC는 식 (1)과 같다. 본 연구에서 사용한 양의 액정(Δε > 0)은 전기장에 평행할 때의 유전상수 값이 전기장에 수직할 때의 유전상수 값보다 크다. OCB셀에서 전기용량은 다른 변수를 동일하게 유지하면, 유전체인 액정의 배열 상태에 따라 유전상수가 결정된다.

$$\Delta C = C_{||} - C_{\perp}$$

$$C_{||} = \frac{\epsilon_{||} \times A}{d}$$

$$C_{\perp} = \frac{\epsilon_{\perp} \times A}{d}$$

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp} > 0 \tag{1}$$

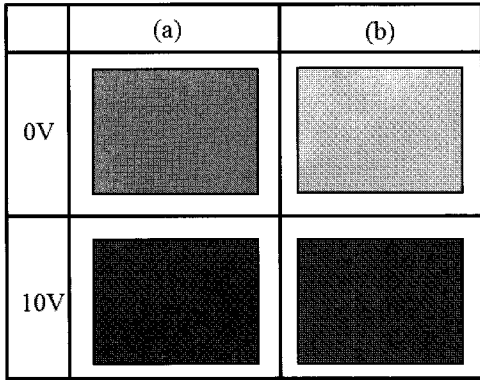


Figure 4. Photographs of (a) normal OCB; (b) proposed OCB cells at 0 V and 10 V.

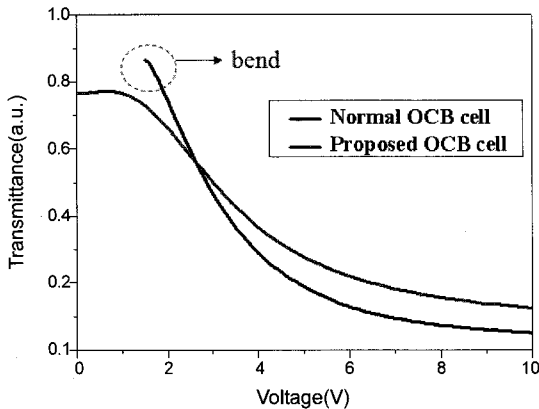


Figure 5. Measured voltage-dependent transmittance curves in normal OCB and proposed OCB cells.

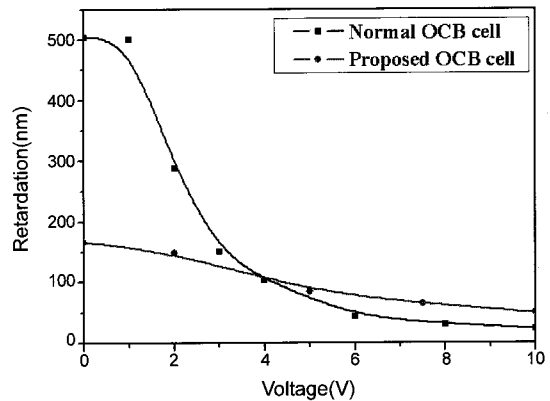


Figure 6. Measured voltage-dependent retardation value in normal OCB and proposed OCB cells.

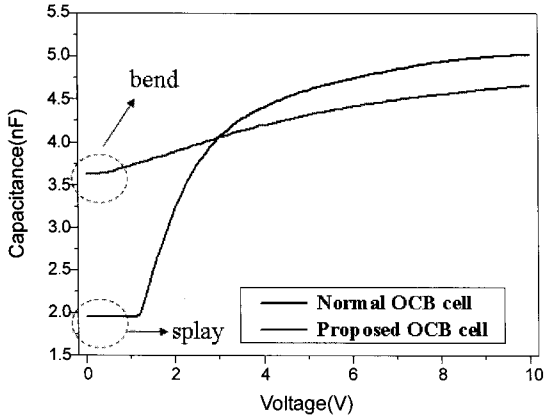


Figure 7. Measured capacitance by applying AC voltage in normal OCB and proposed OCB modes.

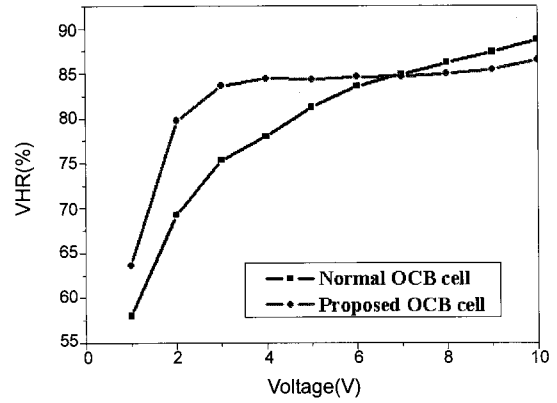


Figure 8. Measured VHR by applying AC voltage in normal OCB and proposed OCB cells.

Figure 7은 초기 액정 변형상태가 splay 상태인 일반적인 OCB 셀과 RM 단분자들을 이용해 초기 액정 변형상태를 bend 상태로 만들어준 OCB셀에서 전압인가에 따른 전기용량의 변화를 보여주고 있다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 일반적인 OCB셀은 초기 수평배열이고 10 V 전압 인가 시 수직 배열이 되어 유전상수의 차가 크기 때문에 전기용량의 변화(ΔC)가 크다. 반면, RM 단분자들이 첨가된 셀은 초기 선경사각이 증가하여 수평 배향 상태보다 액정의 유전상수가 증가하고, 따라서 초기 OCB셀의 전기용량도 증가하였다. 고분자 박막(RM 층)에 인접한 액정은 인가된 전압에 의한 움직임이 없기 때문에 10 V의 전압을 인가할 경우 전기용량은 기존 OCB셀에 비해 상대적으로 낮아지게 된다.

RM 박막이 액정 셀에 미치는 영향 확인. RM 고분자 박막이 액정 셀에 미치는 영향을 확인하기 위하여 전압 보전율을 측정하였다. 측정 장비는 세심 광전자사의 VHR-200를 사용하였다. TFT-LCD 등의 active matrix 구동방식에서는 비선박기간 동안에 액정층은 외부 전원과 floating 상태이다. 선택기간 동안에 화소의 액정층에 충전된 전하는 비선박기간 동안에 액정의 내부 저항으로 방전된다. 전극이 floating 된 상태에서 액정층이 충전된 전압을 유지하는 정도를 전압 보전율 (voltage holding ratio, VHR)이라고 한다. 전압 보전율은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$VHR = V/V_0 = \exp(-t/C_{LC}R_{LC}) = \exp(-t/\epsilon_{LC}\rho_{LC}) \quad (2)$$

식 (2)에서 R 은 액정층의 내부저항이고, C 는 액정층의 전기용량이고, ρ 는 액정의 비저항이고, ϵ 는 액정의 유전상수를 의미한다. 따라서, VHR은 액정의 유전상수와 비저항에 의존하고, 전압을 높이면 유전상수와 비저항의 곱이 증가하여 결국 VHR은 증가하게 된다.

Figure 8은 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB셀의 AC전압에 따른 VHR 변화를 보여주고 있다. Figure 8에서 알 수 있듯이 인가되는 전압이 6 V 이하에서 VHR은 RM 단분자가 첨가된 셀이 높다. 이는 RM 단분자에 의해 초기 상태가 bend 상태인 OCB셀이 아무것도 처리하지 않은 일반적인 OCB셀보다 저계조에서 VHR이 높은 것을 의미한다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 RM 단분자들이 형성한 고분자 박막이 새로운 유전체 역할을 하여 낮은 전압에서 VHR이 향상된 것으로 보인다. 두 셀의 전체적인 VHR이 낮은 이유는 액정의 극성

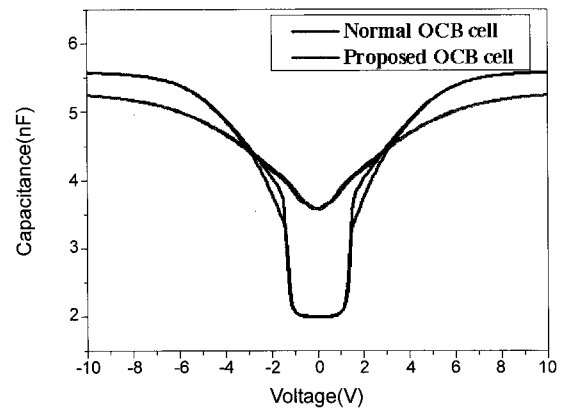


Figure 9. Measured C-V curves by applying DC voltage in normal OCB and proposed OCB cells.

을 나타내는 polar group에 이온 분산물들을 끌어 들이는 -CN기가 붙어 있는 액정을 사용했기 때문이다.

RM 고분자 박막이 액정 셀에 미치는 영향을 확인하는 또 다른 방법으로 DC 전압에 따른 전기 용량 곡선의 hysteresis를 측정하였다. 측정 장비는 Agilent Technologies사의 LCR METER를 사용하였다. Figure 9는 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB셀의 DC전압에 따른 C-V 곡선의 hysteresis를 보여주고 있다. Figure 9에서 알 수 있듯이 일반셀은 splay-bend 전이과정에서 이력곡선이 발생함을 알 수 있는데 RM 단분자를 이용한 제안된 OCB셀은 hysteresis가 0.1 V 이내로 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 RM 단량체가 셀에 혼합되어 있어도 잔류 DC가 적게 나타나는 이유는 RM 단량체들이 완벽하게 경화되어 이온들이 기판 표면에 쌓이는 것을 막아주기 때문이다.²⁴

제안된 OCB셀의 응답속도 확인. 액정 셀의 응답속도는 가장 밝은 상태와 가장 어두운 상태 사이의 투과율 변화를 100%로 하여, 투과율이 10%에서 90%로 변하는 시간과 투과율이 90%에서 10%로 변하는 시간의 합으로 나타낸다. 액정분자의 움직임을 기준으로 rising time(τ_{on})과 decay time(τ_{off})은 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 γ 는 액정의 회전점도이고, K 는 액정의 탄성상수이고, d 는 액정 셀의 갭을 나타내고 V 는 인가된 전압, V_c 는 셀의 문턱전압을 나타낸다. 측정 장비

Table 1. Measured Response Time in Normal OCB and Proposed OCB Cells

	Rising time(ms)	Decay time(ms)
Normal OCB mode	0.9	6.7
Proposed OCB mode	0.5	3.1

는 세심 광전자사의 LCMS-200을 사용하였다.

$$\tau_{\text{on}} = \frac{\gamma d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon (V^2 - V_c^2)}$$

$$\tau_{\text{off}} = \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K_{\text{eff}}} \quad (3)$$

Table 1은 일반적인 OCB셀과 제안된 OCB셀의 응답속도를 보여 주고 있다. 인가한 전압의 영향을 배제시킨 τ_{on} 과 τ_{off} 의 비교를 위해 전압은 두 셀 모두 각각 2 V와 6 V로 하였다. 두 셀의 τ_{on} 과 τ_{off} 을 비교해보면 제안된 OCB셀이 일반적인 OCB셀보다 τ_{on} 은 0.4 ms, τ_{off} 는 3.6 ms 더 빠른 것을 확인할 수 있다. 응답시간의 첫 번째 주 이유는 제안된 셀의 경우 초기 선경사각이 약 45도로 액정 분자들이 초기부터 bend 상태를 유지하고 있기 때문에 전압 인가시 액정 재배열의 변형 정도가 종래 셀보다 아주 적어 재배열에 걸리는 반응시간이 상대적으로 단축되고 relaxation 시간 역시 같은 이유로 빨라진 것으로 예측된다. 두 번째 이유는 제안된 셀과 일반적인 OCB셀의 셀 갭이 각각 4.9 μm 와 5.1 μm 로 고분자화된 RM 단분자에 의해 제안된 셀의 셀 갭이 0.2 μm 정도 작다. 응답시간은 d^2 에 비례하기 때문에 셀갭 감소에 의해서는 약 10% 정도로 응답시간이 감소되었다.

결 론

본 논문에서는 광경화성 RM 단분자들을 이용하여 초기 액정 상태가 bend 상태인 OCB셀 제조 조건을 확인하였다. 제작된 OCB셀의 전기광학 특성을 연구한 결과 기존 OCB셀에 비해 고선경사각으로 인해 응답속도 특성이 향상되었고, RM 단분자들이 배향막 위에 고분자 층으로 형성되어 잔류 DC값은 0.1 V 이내로 매우 적게 발생하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 제안된 OCB 셀이 field sequential LCD의 실현에 기여할 것으로 예상된다.

감사의 글: 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

1. C. H. Choi, S. H. Kim, and B. K. Kim, *Polymer(Korea)*, **18**, 1035 (1994).
2. M. S. Kim, H. K. Won, S. H. Song, M. H. Lee, and S. H. Lee, *Polymer(Korea)*, **28**, 298 (2004).

3. M. Schadt and W. Helfrich, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 127 (1971).
4. S. H. Hwang, Y. J. Lim, M. -H. Lee, S. H. Lee, G. D. Lee, H. Kang, K. J. Kim, and H. C. Choi, *Curr. Appl. Phys.*, **11**, 690 (2007).
5. M. Oh-e, M. Ohta, S. Aratani, and K. Kondo, *Proc. of the 15th International Display Research Center*, 577 (1995).
6. H. H. H. Klausmann, S. Aratani, and K. Kondo, *J. Appl. Phys.*, **83**, 1854 (1998).
7. E. Y. Oh, S. H. Baik, M. H. Sohn, K. D. Kim, H. J. Hong, J. Y. Bang, K. J. Kwon, M. H. Kim, H. Jang, J. K. Yoon, and I. J. Chung, *J. SID*, **13**, 215 (2005).
8. A. Takeda, S. Kataoka, T. Sasaki, H. Chida, H. Tsuda, K. Ohmuro, Y. Koike, T. Sasabayashi, and K. Okamoto, *Society for Information Display Int. Symp.*, 1077 (1998).
9. H. L. Ong, N. Cheong, J. Lo, M. Metras, and O. Woodard, *Society for Information Display Int. Symp.*, 680 (2003).
10. K. Hanaoka, Y. Nakanishi, Y. Inoue, S. Tanuma, and Y. Koike, *Society for Information Display Int. Symp.*, 1200 (2004).
11. S. H. Lee, S. L. Lee, and H. Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2881 (1998).
12. J.-D. Noh, H. Y. Kim, J.-H. Kim, S.-H. Nam, and S. H. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 1290 (2003).
13. M. S. Kim, Y. H. Jung, S. M. Seen, H. Y. Kim, S. Y. Kim, Y. J. Lim, and S. H. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 3121 (2005).
14. P. J. Bos, P. A. Johnson, and K. R. Koehler-Beran, *Society for Information Display Int. Symp.*, 30 (1983).
15. M. J. Jung, C. G. Jhun, J. C. Kim, T. -H. Yoon, J. D. Hoh, D. H. Suh, and J. Y. Lee, *Proc. of the 11th International Display Workshops*, 121 (2004).
16. T. -J. Chang and P. -L. Chen, *Proc. of the 10th International Display Workshops*, 77 (2003).
17. C.-L. Kuo, T. Miyashita, M. Suzuki, and T. Uchida, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1461 (1996).
18. S. W. Kang, S. Sprunt, and L. C. Chien, *Macromolecules*, **35**, 9372 (2002).
19. R. Hasegawa, Y. Kidzu, I. Amemiya, S. Uchikoga, and H. Wakemoto, *Society for Information Display Int. Symp.*, 995 (2007).
20. T. -J. Chen, C. C. Chen, J. J. Wu, and C. H. Sun, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 4203 (2007).
21. S. G. Kim, S. M. Kim, Y. S. Kim, H. K. Lee, S. H. Lee, G.-D. Lee, J.-J. Lyu, and K. H. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 261910 (2007).
22. T.-J. Chen and K.-L. Chu, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091102 (2008).
23. E. J. Jeon, S. S. Kim, Y. J. Lim, M. -H. Lee, and S. H. Lee, *Proc. of 2008 Spring Symposium on Display and Optical Device*, 49 (2008).
24. S.-F. Hsu, W.-Y. Chien, K. -H. Wu, L. -Y. Yeh, M. -H. Wu, T. C. Lin, and J. -C. Tsai, *Society for Information Display Int. Symp.*, 503 (2008).