

광학적등방성 액정 및 디스플레이로의 응용

1. 개요

삼성전자가 2008년 5월에 미국 LA에서 개최된 SID에서, 블루페이즈(Blue Phase: BP)방식의 액정디스플레이(LCD)를 전시하며 주목을 모았다. 현재, 일반적으로 쓰이고 있는 TV나 모니터에 적용되고 있는 LCD는, 1축의 광학적 이방성을 가지는 네마틱상(N)을 이용하고 있는 것에 비해, BP방식의 LCD는, 광학적으로 등방성인 특성을 가지는BP를 이용한다는 데 큰 차이가 있다.

BP란 키랄네마틱상(N*)과 등방상(Iso) 사이에 일반적으로는 1~2도의 좁은 온도 범위에서 발현하는 광학적으로 등방성인 특성을 가지는 액정상이다. 그렇다면, 서두부터 반복 사용되고 있는 광학적 등방성인 특성을 가지는 액정상이란 무엇이며, 그러한 재료를 이용한 LCD는 어떤 특성을 가지고 있는 것일까? 이하, BP를 포함하는 광

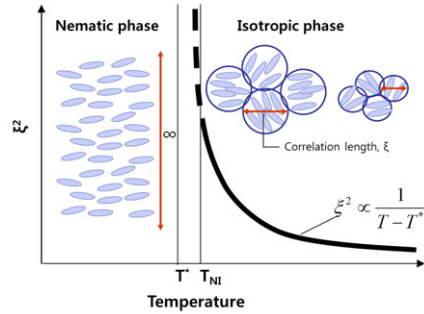


그림 1. 액정재료가 Iso상부터 N상으로 전이될 때, 액정의 질서 구조의 온도에 따른 변화

서 구조의 온도에 따른 변화를 그림1에 나타낸다. N-Iso 전이점 (T_{NI}) 보다 충분히 고온 측에서는, 액정 분자들의 배열은 무질서하여, 일반의 등방성 액체와 다를 바 없다. 액정재료인 경우, 이 무질서 구조로부터 N상의 장거리질

특집 ■ 차세대 디스플레이 기술

광학적등방성 액정 및 디스플레이로의 응용

최석원*

학적 등방성의 특성을 가지는 액정상을 광학적등방성 액정, 그리고 그러한 재료를 이용한 LCD를 광학적등방성 LCD라 총칭하겠다. 즉, BP방식의 LCD는 광학적등방성 LCD의 한 종류 인 것이다.

2. 액정의 등방상

2.1 상관거리 (Correlation length)

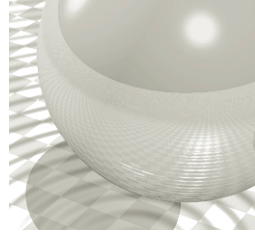
액정 재료가 Iso상부터 N상으로 전이될 때, 액정의 질

서 구조의 형성이 T_{NI} 에서 갑자기 발현되는 것이 아니라, T_{NI} 에 가까워짐에 따라 서서히 단거리의 N상의 질서가 형성되어 지며, 그 단거리질서는 T_{NI} 에서 수 십 nm로 성장한다. 이 단거리질서의 길이를 상관거리 (correlation length, ξ) 라 한다[1]. 이 상관거리 (ξ) 의 온도의존성은 식(1)로 나타낸다.

$$\xi^2 \sim 1 / (T - T^*) \quad (T > T_{NI}) \quad (1)$$

여기서, T^* 는 상관거리 (ξ)가 무한대로 발산하는 임계 온도로, 일반적으로 T_{NI} 보다 1도 정도 저온측에 존재한

* 경희대학교 공과대학 정보전자신소재공학과



다. 따라서, 상관거리는 T_{NI} 이상에서는 식(1)에 따라 변화하며, T^* 에서 무한대로 발산한다. 즉, N상이란 상관거리가 무한대인 장거리의 질서를 가지는 액정상이라 정의할 수 있겠다.

그림1에서 T_{NI} 근방에서는 상관거리가 수십 nm라 하였으나, 이 영역에서는 단거리의 액정질서도는 가지고 있으나, 그 상관거리가 가시광파장보다 짧기 때문에, 이 영역이 인간의 눈에 보이게 되는 현상은, T_{NI} 보다 충분히 높은 온도측 영역의 등방성 액체와 별 차이가 없어 보이게 된다. 즉, 광학적으로는 등방적이나, 단거리의 상관거리를 가지는 액정상이 T_{NI} 근방에 존재한다고 할 수 있다. 즉, 이와 같은, 가시광의 길이보다 짧은 단거리의 상관거리를 가지고 있는 액정상이나, 인간의 눈으로는 광학적으로 등방성을 띠는 액정상을 광학적등방성 액정이라 정의하겠다. 또한 이러한 액정재료를 이용한 LCD를 광학적등방성LCD라 하겠다.

2.2 전이전구현상 (Pre-transitional phenomena)

T_{NI} 보다 충분히 고온측의 등방상은 등방액체이기에 액정으로서의 물리적 특징은 현저하지 않다. 그러나, T_{NI} 근방에 있어서는 상관거리가 가시광 파장 이하이나, 어느 정도 성장한 단거리의 상관거리에 기인한, 매우 큰 자기복굴절[2], 이상Kerr효과[3]등의 현상이 관측 된다.

Kerr효과란, 등방성의 극성이 있는 물질에 전기장을 인가할 때, 전기장의 제공에 비례한 복굴절을 발현하는 현상으로 다음과 같은 식으로 표현된다[4].

$$\Delta n(E) = \lambda K E^2 \quad (2)$$

여기서, $\Delta n(E)$, λ , K , E 는 각각 유기복굴절 (Induced birefringence), 빛의 파장, Kerr 계수, 인가전기장을 나타낸다. 액정재료의 이상Kerr효과는 T_{NI} 근방에서 현저하며, 그 Kerr계수는 유기 물질 중, 큰 Kerr계수를 가지는 것으로 알려져 있는 니트로벤젠보다도 일반적으로 10~100배 이상 크다[1]. 그러나, Kerr 효과와 상관거리(ξ)와의 관계로부터,

$$K \sim \xi^2 \sim 1/(T-T^*) \quad (T > T_{NI}) \quad (3)$$

T_{NI} 근방에서의 Kerr효과는 급격한 온도의존성을 나타냄을 알 수 있다. 또한, T_{NI} 이하의 온도 영역에서는 N상의 장거리질서에 기인하는 액정 분자의 재배열이 우선되어, 더 이상 Kerr효과는 관측되지 않는다. T_{NI} 근방의 이상Kerr효과의 응용연구가 비교적 진행되지 않은 것은 이상Kerr효과를 발현하는 온도 범위가 매우 좁다라는 이유와 더불어, 이 온도 영역에 있어서의 Kerr계수의 급격한 온도의존성에 기인한다.

한 편, 등방상에 있어서의 액정분자의 응답은 매우 빠르며, Landau-de Gennes 이론에 따르면 다음과 같은 관계가 있다.

$$\tau \propto \eta(T) k_B^{-1} \xi^2 \quad (4)$$

여기서, τ 는 전기장 off 시의완화시간, k_B 는볼츠만상수이다. 즉, 등방상에있어서의응답시간은상관거리(ξ)가 짧을수록 짧아 진다.

3. 광학적등방성액정

3.1. 고속응답화개념

현재, LCD 에 쓰이고 있는 N상의예로서 twisted nematic (TN) 방식을 고려하면, 그림2에 나타내는 바와 같이 응답시간은 τ_{rise} 및 τ_{decay} 모두 다 셀간격의 제곱에 비례한다. 따라서 셀간격을 줄이면 고속응답화를 달성할 수 있다. 그렇다면 셀간격을 줄인다는 것이 물리적으로 어떤 의미가 있는 것일까?

액정 분자 한 개의 회전의 다이아믹스가나노초 (ns) 수준임에도 응답속도가 둔화되는 원인은 액정분자는 거대한 분자 집단으로 움직이기 때문이다. 즉, 액정의 배향 벡터는 회전 운동하는 다수의 액정 분자의 평균 배향 방향이기에, 개 개의 액정의 분자의 회전이 제 아무리 빠르더라도, 다수의 액정 분자가 모인 집단으로는 그렇게 쉽게 움직일 수가 없다. 그렇다면, 그 집단의 분자 수를 줄여, 운동 단위를 간결한 단위로 간소화 한다면 고속화가 달성될 수 있을 것이다. 이러한 개념이 실제적으로 적용되고 있는 예가, 바로 LCD에서 셀간격을 줄여 고속화하는 방법이다. 즉, N상에서는무한대의 상관거리(ξ) 를 가

광학적등방성 액정 및 디스플레이로의 응용

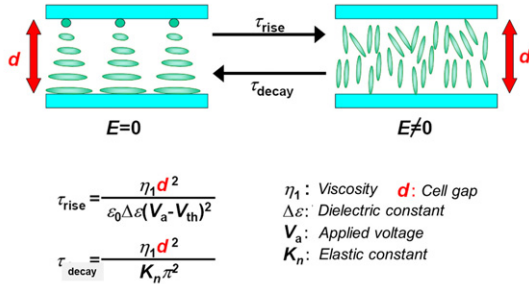


그림 2. TN 방식에서의 응답시간

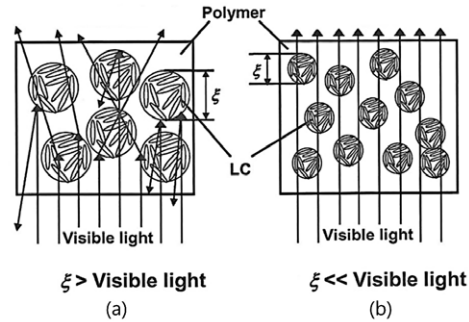


그림 4. PDLC 개념도

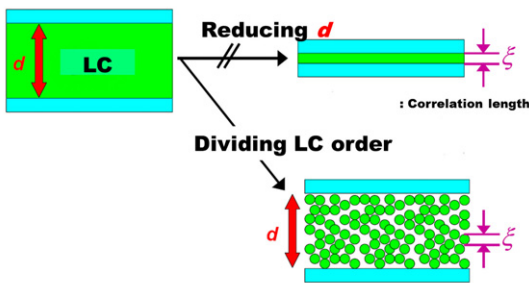


그림 3. 셀 내부의 세분화/미세화

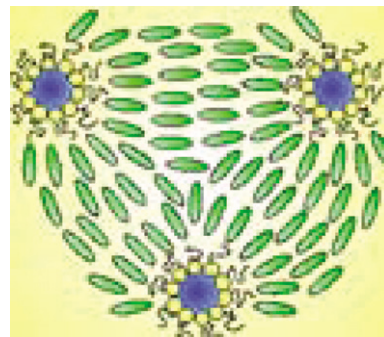


그림 5. Transparent nematicphase 개념도

지는장거리 질서를 가지나, 실무적으로는 상판과 하판간의 특정 셀간격을 가지는 용기안에 N상을 가둬, 상관거리(ξ)를 조절하고 있는 것이다. 예를 들어, 셀간격이 5 μ m 이면, 상관거리(ξ)는 5 μ m 로 제한 된 것이며, 셀간격을 2 μ m 로 줄였다면, 상관거리(ξ)를 2 μ m 로 줄였다는 이야기가 되어, 상관거리(ξ)를 감소시킨 것은, 즉 집단의 분자 수를 줄여, 운동 단위를 간결한 단위로 간소화하였다는 것이 된다. 셀간격을 줄이는 것이 LCD의 응답 속도의 개선에 크게 영향을 미치는 것이 바로 이러한 이유 때문인 것이다. 그러나, LCD 셀의 전기광학적 특성이나, 셀공정적인 측면에서 무제한으로 셀간격을 줄일 수 없음을 두 말 할 나위 없다.

셀간격을 줄일 수 없다면, 그림 3와 같이 셀 내부를 일정 크기로 세분화/미세화하여, 운동단위를 간결한 단위로 단순화할 수는 없을까? 즉, 셀간격은유지한채, 셀 내부의 상관거리를 짧게하여 고속 응답화를 달성하기 위한 방법이 제안되는 것이다. 이 경우, 상관거리가 가시광 파장과 동등한 경우, 가시광의 강한 산란 또는 회절 현상을 피할 수 없어, 편광판을 이용하는 표시방식에는 적합하지 않다. 한 편, 상관거리가 너무 작으면, 식(3)으로부터,

Kerr계수가 작아져, 충분한 Kerr효과를 얻을 수 없어, 구동 전압이 상승이 우려된다.

그러하므로, 다음과 같은 조건을 만족시키는 상관거리의 제어가 필요하다[5].

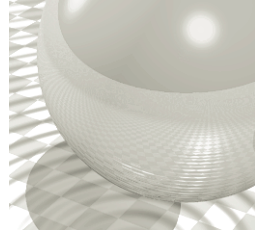
- (1) 상관거리가 가시광을 산란, 회절하지 않을 정도의 길이이며, 거시적으로는 등방상이나, 미시적으로는 액정적 질서를 가지도록 한다.
- (2) 상관거리의 온도 변화가 완만하여야 하며, 동시에 온도 범위가 넓어야 한다.

3.2 상관거리제어기술

이 장에서는 지금까지 알려져 있는 몇몇의 상관거리제어 기술에 대하여 설명한다.

1) Top-down 적 기술

고분자 분산형액정 (PDLC)에서 고분자 중에 분산된 액정 droplet 이가시광 보다 짧은 길이로 분산된 재료가 보고되어 있다[6]. PDLC에 있어서, 액정 droplet의 크기가 μ m 오더인 것은 고분자와 액정간의 굴절율 차이로 인



하여 산란현상이 일어난다. (그림4a) 액정 droplet의 크기를 가시광 파장보다 충분히 작게 하게 하면, 가시광의 산란이 크게 억제됨과 동시에, 각 각의 액정 droplet 안의 액정 분자들의 배향이 우선적인 방향 없이 램덤하게 배열되어 있기 때문에 광학적으로 등방성이 된다. (그림 4b) 예를 들어, 고분자와 액정의 중량비가 69/31의 PDLC에서 액정 droplet의 크기를 약 60 nm로 제어 함으로, 투명하고 등방적인 상이 제조됨이 보고되어 있다 [7]. 상관거리라는 관점에서 본기술은 액정을 강제적으로 제한된 공간내에 채어 넣어 액정의 상관거리를 가시광 파장이하로 제어 한 기술이라 할 수 있겠다.

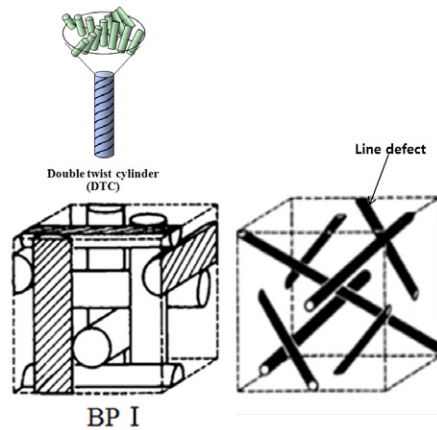


그림 6. BPI의구조

2) Bottom-up적 기술

액정의 자기배열을 이용하여, 상관거리를 제어하는 기술에 대하여 설명한다.

(1) Transparent nematic phase

Yamamoto는 유성분 (油成分)으로 N상의 액정을 이용한 역micelle 상태에서 국소적으로는 N상으로의 질서를 가지나, 가시광 크기의 파장에 대해서는 등방적으로 보이는 “투명N상” (그림5)를 보고하였다[8]. 이 재료는 장거리의 상관거리가 무한대로 발산한 N상에서 상관거리를 가시광 이하의 크기로 제어한 최초의 예라 할 수 있다.

(2) 고분자안정화 BP (Polymer Stabilized BP: PSBP)

▶ (2-1) BP

N*상에서는 1축의 나선분자 배열을 형성하고 있으며, 나선의 주기를 피치(pitch: P)라 한다. BP는 N*과 Iso 사이의 일반적으로 1~2도 정도의 매우 좁은 온도영역에서 출현하는 광학적등방성의 액정상이다. BPI의 구조를 그림6에 나타낸다. 중심 분자에서 직교하는 두 방향으로 나선 구조를 가지는 이중나선구조의 액정 배열을 가지며, 공간적으로, 이 이중나선구조를 단면으로하는 DTC (double twist cylinder) 가 서로 교차하며 삼차원적으로 적층된체심입방체를 기본 격자 구조로 하는 3차원의 주기 구조를 가지고 있다. 이 구조에서 분자는 3차원 공간을 연속적으로 배열시킬 수 없어, 주기적 선결함을 동반하게 된다. 이 선결함 내의 분자배열은 등방적으로 흐트러져 있다고 추정된다. 즉, BP에서는 질서상 (액정상) 과 등방상이 수백 나노 크기의 격자 중에 공존하는 상이다.

BP는 이 결함의 존재에 의하여, 상관거리가 가시광 파장이하로 제어된 상이라 생각할 수 있다. BP의 온도 범위는 앞서 서술한 바와 같이 좁아, 이것을 응용하기 위해서는 온도 범위를 확대할 필요가 있다. 온도 범위가 좁은 이유는 투명점으로부터 온도가 강하함에 따라, 등방적인 분자 배열을 가지는 결함의 에너지가 상승하기 때문이다. N*로 바로 전이하여 에너지적으로 안정화 되기 위해서이다.

▶ (2-2) PSBP

Kikuchi는 BP에 소량의 비액정성단일관능모노머 (non-liquid crystalline monofunctional monomer) 와 액정성 이관능모노머 (liquid crystalline bifunctional monomer) 를 중합하여 BP 내에 고분자 네트워크를 형성함으로써 BP의 발현 온도 범위를 100도 이상 확대하는데 성공하였다[9]. 이 것을 “고분자 안정화 BP (PSBP)”라 부른다.

최근, BP의 선결함으로의 고분자의 농축이 증명되어, 선결함의 안정성이 증대되었음이 BP의 온도 범위 확대의 원

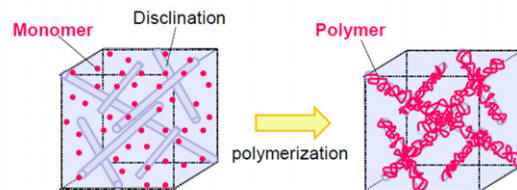


그림 7. BPI 내의 polymer network

광학적등방성 액정 및 디스플레이로의 응용

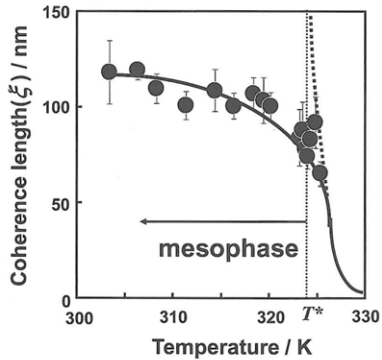


그림 8. 광산란 측정에 의한 PSIP의 상관거리의 온도 의존성. Ref. [5]에서 인용

인이라는 것이 보고되었다. (그림7) 즉, 액정 자신이 고분자 네트워크의 힘을 빌어, 가시광파장이하의 상관거리로 안정화 되었다고 할 수 있다. 2008년도에 삼성전자가 발표한 BP방식의 LCD가 바로 이 PSBP를 이용한 것이다.

(3) 의등방성액정 (擬等方性液晶, Polymer stabilized isotropic phase: PSIP)

Haseba는 BP를 발현시키는 액정을 이용하여, 그 등방상에 소량의 비액정성삼관능모노머 (non-liquid crystalline trifunctional monomer) 와액정성이관능모노머 (liquid crystalline bifunctional monomer) 를 중합하여, 등방적 고분자 네트워크를 형성하여, 넓은 온도 범위에서 거시적으로 등방상이며, 미시적으로는 액정적 질서를 가지는 “PSIP”를 형성하는 데 성공하였다[10]. 이 재료는 사용한 액정이 N^* 을 나타내는 온도 범위에 있어서도 유한한 제어진 상관거리를 가지고 있어, 광학적 등방성을 나타내고 있다. 그림8은광산란 측정에 의한 PSIP의 상관거리의 온도 의존성을 나타낸 그림이다. 상관거리가 T^* 에서 무한대로 발산하지 않고, T^* 이하의 온도 영역에서도 가시광 파장보다 충분히 짧은 길이로 유지되고 있음을 알 수 있다.

(4) 온도 범위가 넓은 저분자계 BP

Coles는 이량체 액정에서의 BP의 온도 범위가 약 40도 정도 확대됨을 보고하였다[11]. Yoshizawa는 T자형 액정의 BP의 온도 범위가 약10도 정도 확대됨을 나타내었으며, 또 BPIII에있어서도 고속의 전기광학응답을 나타냄을 보고하고 있다[12].

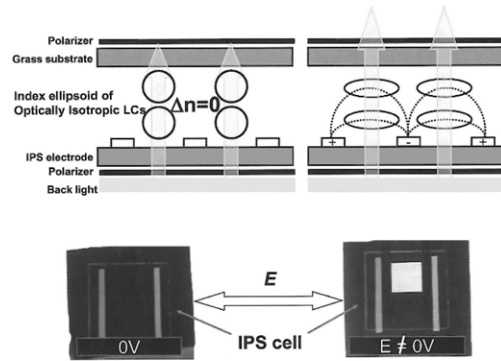


그림 9. 광학적등방성액정에 횡전계를 인가 시의 굴절을 타원체의 변형하는 모습과 테스트셀의 사진. Ref. [5]에서 인용

필자의 연구 그룹에서는 굽은 형의 액정 분자, 소위 Bent-core 분자를 이용하여, N상을 가지고 있는 Bent-core 분자에 chiral dopant를 첨가하여, BP를 발현 시, 온도 범위가 약 20도 정도 확대 됨을 보고하였다[13]. 최근에는 일반적인 봉상형 액정 분자에 bent-core 분자를 첨가 함으로 액정의 탄성 계수를 조절 함으로서 액정의 탄성 계수와 BP의 온도 범위와의 관계를 규명하여, 그 관계를 이용하여 BP의 온도 범위를 약 30도 정도 확대하는 데 성공하였다[14].

4. 광학적등방성 액정의 디스플레이로의 응용

광학적등방성LCD는 현재의 LCD와 비교하여, 고속응답, 무배향처리와 같은 장점이 있지만, 향후 극복해야 할 과제 또한 많다. 그러나, 고속응답과 동시에 저코스트 LCD가 가능하다는 큰 매력으로 인하여, 큰 관심을 받고 있다.

4.1. 배향처리와 구동 방식

N상의 LCD에서는 굴절률타원체의 방향을 전기장으로 제어하면서 빛의 투과율을 제어하기 때문에, 직교하는 편광판 사이에 Black 표시를 하기 위해서는 사전에 굴절률 타원체의 방향을 적절한 방향으로 정렬해야 할 필요가 있다. 그렇기 때문에, 배향처리가 필수 불가결한 것이다. 광학적등방성의 액정상에서는 전기장이 인가되지 않은 상태에서는 굴절률타원체는 구이며, 전기장을 인가

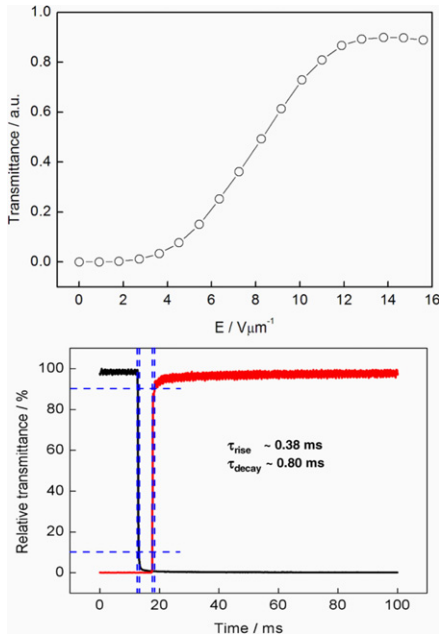
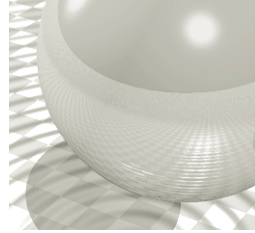


그림 10. PSIP 셀의 V-T 곡선 및 응답속도. Ref. [15]에서 인용

함에 따라, 굴절률타원체는 타원으로 변형하여, 그 장축이, 유전이방성이 positive인 액정을 이용하는 경우, 전기장인가방향과 같은 방향으로 정렬하게 된다. 따라서, 전기장 무인가시에 배향처리를 하지 않아도 직교편광판 사이에서 Black 표시가 가능하다.

전기장 인가 방향으로 굴절률타원체의 장축이 정렬한다는 것로부터, In-plane-switching (IPS) 방식과 같은 횡전계를 발생시키는 디바이스가 광학적등방성액정에 적합하다. 그림9에 광학적등방성액정에 횡전계를 인가 시의 굴절률타원체의 변형하는 모습과 테스트셀의 사진을 나타낸다. 편광판의 편광축과 전기장 인가 방향을 45도로 배치함으로 그림과 같은 스윙칭이 가능하게 된다[5].

4.2. 구동전압과 응답시간

그림10는 광등방성액정재료 중, 필자의 연구 그룹에서 제작한 PSIP 셀의 V-T 곡선 및 응답속도를 나타낸 그림이다. 여기서, 사용한 셀은 IPS방식의 셀로 전극폭 5 μm, 전극간 거리 10 μm, 셀간격 10 μm이다. 이 PSIP 셀에서의 포화전압은 12 V/mm이며, 응답속도 (rise+decay)는 약 120 μs 이다[15]. 일반적으로 PSBP 나 PSIP에서의 구

동 전압은 매우 높아, 이 대로는 디스플레이로의 응용은 어려워, 대폭적인 구동전압의 저감이 필요하다. 그러나, 응답속도는 N상 액정에 비해 매우 고속이다.

Kerr효과에서 식(2)를 전개하면 유도복굴절은 다음 식으로 나타내게 된다.

$$\Delta n(E) = \lambda KE^2 = \lambda KV^2 d^{-2} \quad (5)$$

여기서 V 및 d는 각각 전압과 전극간 거리이다. 식(5)로부터 d를 작게 하면 유도복굴절은 증대되기 때문에 전극간 거리를 작게하는 것이 효과적이라 하겠으나, 전극간 거리만으로는 실용수준의 구동 전압의 달성은 어렵다고 예상된다.

따라서, 액정재료의 Kerr계수 K를 크게 하여, 저전압화를 달성할 필요가 있다. Kerr계수 K는 다음 식(6)과 같이 표현된다[16].

$$K = \frac{\Delta n_0 \cdot \Delta \epsilon_0}{[12\pi\lambda a(T-T^*)]} = C \cdot \Delta n_0 \cdot \Delta \epsilon_0 \cdot \xi^2 \quad (6)$$

여기서, $\Delta n_0 \cdot \Delta \epsilon_0$ 은 각각 액정의 order parameter S 가 1일때의 굴절률이방성, 유전률이방성의 값이며, C는 비례상수, ξ 는 상관거리이다. 즉, 액정재료의 굴절률 이방성과 유전률이방성을 증대시키면, Kerr계수가 증대되어 구동전압의 저감이 실현될 것이라 기대된다. 종래의 N상의 LCD용 액정화합물의 개발에서는 응답속도 측면에서 저점성의재료일것이 중시되어, 액정화합물의 화학 구조에 제약이 있었다. 광학적등방성액정에서는 응답속도가 충분히 고속이기에 어느 정도의 응답속도는 희생시키면서, 그 만큼 구동전압을 저감시키는 분자설계가 가능하다고 한다. 즉, 액정화합물 점도의 고려 없이, 화합물 설계가 가능하다는 것이다. 그렇기 때문에 종래의 N상의 LCD용 화합물보다, 굴절률이방성과 유전률이방성이 큰 액정화합물의 개발이 가능하다고 하겠다.

맺음말

1888년 액정의 발견으로부터, 현재의 LCD까지의 발전 과정을 돌이켜 볼 때, 새로운 액정재료와 새로운 동작모

광학적등방성 액정 및 디스플레이로의 응용

드의 제안 및 개발이 상호 협조하면서 지금의 LCD 산업이 발전하였다. 앞으로도 앞서 진행한 바와 같이, 새로운 재료와 새로운 동작모드의 제안과 개발로 LCD산업의 제2의 중흥을 달성하여야겠다. 이러한 제2의 LCD중흥기에 광학적등방성액정 재료 및 이러한 액정재료를 이용한 액정모드는 중요한 역할을 담당할 것이며, 앞으로 이분야의 산/학/연간의 유기적 결합을 통한 활발한 기술개발과 관련 기술 인력 양성이 시급하다고 하겠다.

참고문헌

[1] P. G. de Gennes, J. Prost: "The physics of Liquid Crystals", Clarendon Press, Oxford (1993)
 [2] T. Stinson, J. Lister: Phys. Rev. Lett., 25, 503 (1970)
 [3] V. Tsvetkov, E. Rymtsev: Sov. Phys., 13, 225 (1968)
 [4] J. Kerr: Phil. Mag., 50, 337 (1875)
 [5] Y. Haseba, H. Kikuchi: Ekisho, 13, 107 (2009)
 [6] M. Sansone, G. Khanarian, M. Kwiatek: J. Appl. Phys., 75, 1715 (1994)
 [7] S. Matsumoto, M. Houlbert, T. Hayashi, K. Kubodera: Appl. Phys. Lett., 69, 1044 (1996)
 [8] J. Yamamoto, H. Tanaka: Nature, 409, 321 (2001)
 [9] H. Kikuchi, M. Yokota, Y. Hisakado, H. Yang, T. Kajiyama: Nature Mater., 1, 64 (2002)
 [10] Y. Haseba, H. Kikuchi, T. Nagamura, T. Kajiyama: Adv. Mater., 17, 2311 (2005)

[11] H. Coles, M. Pivnenko: Nature, 436, 997 (2005)
 [12] M. Sato, A. Yoshizawa: Adv. Mater., 19, 4145 (2007)
 [13] M. Lee, S. Hur, H. Higuchi, K. Song, S.-W. Choi, H. Kikuchi: J. Mater. Chem., 20, 5813 (2010)
 [14] S. Hur, M. Gim, H. Yoo, S.-W. Choi, H. Takezoe: Soft Matter, DOI: 10.1039/c1sm06046e (2011)
 [15] S.-W. Choi, S. Yamamoto, T. Iwata, H. Kikuchi: J. Phys. D: Appl. Phys., 42, 112002 (2009)
 [16] R. Yamamoto, S. Ishihara, S. Hayakawa, K. Morimoto: Phys. Lett., 69A, 276 (1978)

약 력



최석원

2008. 03. - 현재
 경희대학교 정보전자신소재공학과 조교수
 2007. 04. - 2008. 02.
 JST(일본과학기술진흥기구) Fellow
 1998. 04. - 2003. 09.
 LG, Philips LCD (현 LG Display) 선임연구
 구원
 2007. 03. Tokyo Institute of Technology 유기/고
 분자물질전공 공학박사
 1998. 03. Tokyo Institute of Technology 유기재료
 공학전공 공학석사
 1995. 02. 한양대학교 섬유공학과 공학사
 E-mail : schoi@khu.ac.kr