

바이어스 전압에 따른 STN LCD의 스위칭 특성

전인수 · 정태혁 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과, 정보통신연구소

(1996년 1월 29일 받음)

본 논문에서 STN LCD의 구동전압에 따른 응답특성을 조사하였다. 네 가지 STN 액정 셀로써 여러 인가전압에 대한 스위칭 시간을 측정하였다. 또한 해석식으로 설명이 안되는 바이어스 전압의 스위칭 시간에 대한 영향을 실험을 통해 알아보았다. 그리고 수치해석적 방법으로 구한 계산결과와 비교하므로써, 계산결과가 바이어스 전압에 따른 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

I. 서 론

정보화 시대가 열리면서 시각 정보에 대한 욕구는 날로 증대되고 있으며, 이에 따라 표시장치 산업이 차지하는 비중은 점점 커지고 있다. 특히 휴대용 컴퓨터나 차량 및 항공 탑재용 표시장치 등 이동정보기기의 표시장치에 대한 요구가 증가됨에 따라 크기, 두께 등의 문제점을 가진 현재의 CRT(Cathode Ray Tube)를 대체할 수 있는 표시장치의 개발이 불가피해졌다. 그 결과 박형화, 경량화, 저소비전력화에 대한 요구를 충족시키는 LCD(Liquid Crystal Display)가 개발되어 CRT의 뒤를 이을 차세대 표시장치로 각광을 받게 되었다.

액정은 1888년 Reinitzer에 의해 처음 발견되었으며,^[1] 1971년 처음 상업화된 TN(Twisted Nematic) 액정 혼합물이 개발된 후 급속한 발전을 해 왔다. 초기에 액정 혼합물은 거의 동일한 분자구조를 가지는 두 액정 물질로 구성되었으며, 이러한 단순함에도 불구하고 24개의 화소로 구성된 숫자 디스플레이가 가능하였다.^[2] 그러나 단순 매트릭스 TN LCD의 경우 구동전압에 대한 투과 특성곡선의 기울기 정도를 나타내는 급준성(steeptness)이 좋지 못하므로 멀티플렉싱 구동에 적합하지 못하다. 고 해상도의 대형화면을 구성하기 위해서는 행과 열의 투명 전극선들의 수가 증가하게 되고 이에 따라 LCD 구동시 화소에 걸리는 선택 전압(select voltage)과 비선택 전압(nonselect voltage)의 차가 보다 작은 것이 요구되는데^[3] 단순 매트릭스 TN LCD로 이러한 조건을 충족시키기는 한계가 있다.

*이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

STN(Super Twisted Nematic) LCD는 이러한 단순 매트릭스 TN LCD의 단점을 보완한 급준성이 우수한 LCD로서, 액정분자의 꼬임을 $180^\circ \sim 270^\circ$ 정도 되도록 만든 것이다. 대형화면의 구성이 용이하고 명암대비(contrast)도 TN에 비해 우수하므로 현재 노트북 PC나 팜탑(palmtop) PC 등의 표시장치에 널리 사용되고 있다. 그러나 현재의 LCD가 기존의 CRT를 대체하고, 궁극적으로 HDTV와 같은 고품위의 대형화면을 실현하기에는 많은 문제점이 있는 것이 사실이다. 특히 STN LCD의 경우, 느린 응답속도는 동화상 구현에 장애를 주어 큰 문제점이 되고 있다.

LCD의 응답시간은 표시장치의 성능을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 LCD에 사용되는 액정은 사용 목적에 따라 여러 액정 재료를 혼합하여 만들어진다.^[4] 그러므로 고속의 STN LCD 개발을 위해서는 점성도, 유전율 이방성, 탄성상수 등과 같은 액정의 물성 파라메타들이 LCD의 응답시간에 어떠한 영향을 주는지를 파악하는 것은 중요하다.

본 논문에서는 네 가지 STN 액정 셀에 대한 실험을 통해 STN LCD의 각 파라메타들이 스위칭 시간에 미치는 영향을 논하고자 한다. 또한 비선택식 인가되는 바이어스 전압이 스위칭 시간에 미치는 영향을 실험결과를 통해 알아보고, 수치해석적 방법으로 구한 결과와 비교, 고찰하고자 한다.

II. LCD의 광응답특성에 대한 이론

2.1 수치해석적 방법

LCD는 액정의 광학적 이방성을 이용한 표시장치로서,

인가해 준 전계에 의하여 액정의 배향을 변화시키므로써 빛의 통과를 제어하는 전기광학 소자이다. 따라서 전압이 인가된 시점에서 시간에 따른 액정의 배향분포를 구하고, 셀 내의 액정을 분자배향이 균일한 여러 층으로 이루어진 것으로 생각하여 빛이 각각의 액정 층을 지날 때의 편광상태의 변화를 행렬식을 써서 차례로 구하므로써 광응답특성을 구할 수 있다.

액정이 네마틱(nematic) 또는 콜레스테릭(cholesteric) 이고 Oseen-Frank 탄성상수에 의한 연속체 이론^[5,6]으로 기술될 수 있다고 가정하면, Berreman의 해석 원리^[7]에 의해 액정배향 즉, 틸트 각 α 와 트위스트 각 β 의 시간에 대한 미분 방정식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{\partial \alpha}{\partial t} = & \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial z^2} \right) (K_{11} \cos^2 \alpha + K_{33} \sin^2 \alpha) \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial z} \right)^2 (K_{33} - K_{11}) \sin 2\alpha \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial z} \right)^2 [K_{22} - (K_{33} - K_{22}) \cos 2\alpha] \sin 2\alpha \\ & - \left(\frac{\partial \beta}{\partial z} \right) \beta K_{22} \sin 2\alpha \\ & - \frac{1}{2\pi} \frac{D_z^2 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \sin 2\alpha}{(\epsilon_1 \sin^2 \alpha + \epsilon_2 \cos^2 \alpha)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (\gamma_1 \cos^2 \alpha) \frac{\partial \beta}{\partial t} = & \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2} \right) \cos^2 \alpha (K_{22} \cos^2 \alpha + K_{33} \sin^2 \alpha) \\ & + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) \beta' K_{22} \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K_{11} , K_{22} , K_{33} 는 각각 액정의 스플레이(splay), 트위스트(twist), 벤드(bend)에 대한 탄성상수이며, γ_1 은 회전점성상수(rotational viscous constant)이다. 또한 β' 은 어떠한 힘도 받지 않았을 때의 트위스트 정도를 나타내는 자연 꼬임(natural twist)이고, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 액정의 평행한 방향과 수직한 방향의 유전율이다.

위 미분 방정식을 풀기 위해 그림 1과 같이 액정 셀 내를 등간격 ϵ 의 N개의 층으로 나누어 임의의 i 층에서의 $\alpha(z)$ 와 $\beta(z)$ 의 z 에 대한 변화량을

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \approx & \frac{(\alpha_{i-1} - \alpha_{i-1})}{2\delta} \\ \frac{\partial \beta_i}{\partial z} \approx & \frac{(\beta_{i-1} - \beta_{i-1})}{2\delta} \end{aligned} \quad (3)$$

로 근사화시키고, 경계 조건으로

$$\alpha(0) = \alpha(d) = \text{pretilt angle}$$

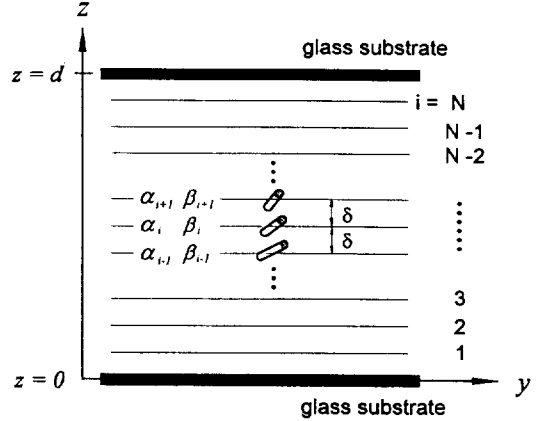


그림 1. 액정의 배향분포를 구하기 위한 STN LCD의 구성도.

$$\begin{aligned} \beta(0) &= 0 \\ \beta(d) &= \text{twist angle} \\ \alpha(z) &= \alpha(d-z) \\ \beta(z) &= \text{twist angle} - \beta(d-z) \end{aligned} \quad (4)$$

를 사용하여 4차의 Runge-Kutta 방법^[8]으로 식 (1)과 (2)를 수치해석하였다.

그리고 경계에서 액정의 표면 고정력(surface anchoring force)을 무한값이라 가정하여 $i=1, 2, N-1, N$ 층의 α 와 β 는 시간에 대해 변화가 없다고 보았다. 전압이 인가되지 않았을 때 정상상태에서의 초기치는

$$\begin{aligned} \alpha(z) &= A \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \\ \beta(z) &= \frac{\Phi z}{d} \end{aligned} \quad (5)$$

로 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 여기서 d 는 셀 갭(cell gap)이고, Φ 는 액정의 총 트위스트 각(total twist angle)이다.

이와 같이 식 (1), (2)를 수치해석적 방법으로 풀어주므로써 시간에 대한 각 층의 액정의 배향분포를 얻을 수 있고, 그 분포들을 2×2 Jones 행렬법^[9,10]에 적용하면 시간에 따른 광투과율의 변화를 구할 수 있다.

2.2 광응답 시간에 대한 해석식

수치해석의 방법으로 LCD의 각 파라메타들과 응답시간의 유기적 관계를 알아보기에는 사실상 어려운 점이 있다. 즉 스위칭 시간은 하나의 파라메타에 선형적으로 의존하는 것이 아니라, 여러 파라메타들의 조합에 비선

형적으로 의존하기 때문에 그 복합적인 관계를 찾아내기란 어렵다. 따라서 LCD의 파라메타와 스위칭 시간의 관계를 간단한 수식으로 표현하려는 노력이 계속되어 왔다.^[11-13]

K. Tarumi 그룹은 일반적인 twisted LCD에 대한 switch-on 시간 τ_{on} 과 switch-off 시간 τ_{off} 에 대해 아래의 식을 유도하였다.^[13]

$$\tau_{on} \propto \frac{\gamma_1 d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon V^2 - [\pi^2 K_{11} + (K_{33} + 2(r-1)K_{22})\Phi_l^2]} = \frac{\gamma_1 d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon (V^2 - V_{th}^2)} \quad (6)$$

$$\tau_{off} \propto \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K_{11} + (K_{33} + 2(r-1)K_{22})\Phi_l^2} = \frac{\gamma_1 d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon V_{th}^2} \quad (7)$$

여기서

$$r = \frac{2\pi d}{p\phi_l} \quad (8)$$

이고, V_{th} 는 임계전압(threshold voltage)으로

$$V_{th} = \sqrt{\frac{\pi^2 K_{11} + (K_{33} + 2(r-1)K_{22})\Phi_l^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (9)$$

이다. 여기서 p 는 콜레스테릭 액정의 피치 길이(pitch length)를 나타낸다.

III. 실험결과와 고찰

실험에 사용된 액정들은 독일 Merck사에서 240° STN LCD용으로 만든 것으로 그 파라메타들은 표 1에 나타내었다. 액정들은 셀 갭이 6 μm 이고 10 mm×7 mm 크기의 test cell에 주입하여 사용하였다. 실험의 구성도는 그림 2와 같다. 광원은 632.8 nm 파장의 He-Ne 레이저를 사용하였고, 편광판 2를 통과한 빛은 PIN 광 검출기로 검출하였다. 그 결과를 디지털 스토리지 오실로스코프(DSO, ReCroy 9354AL 500 MHz)로 측정하였다. 그리고 test cell의 투명전극에 가하는 전압을 만들기 위해 임의의 파형 발생기(AWG, Wavetek Model 75A)를 사용하였다. 파형은 PC에서 만들어져 임의의 파형 발생기로 보내진다.

셀에 인가되는 파형은 비선택 전압과 선택 전압의 크기가 각각 V_b , V 의 크기를 가지는 구형파로 그림 3에서 스위칭 시간에 대한 정의와 함께 나타내었다. 한편 τ_{on} 은

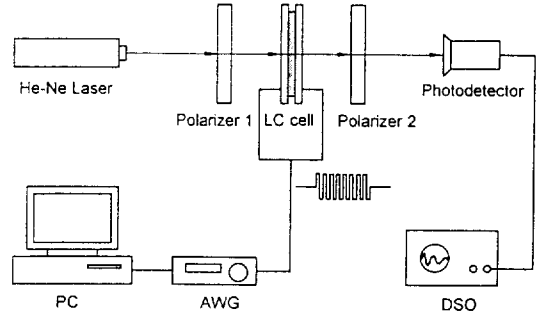


그림 2. 광응답 측정을 위한 구성도.

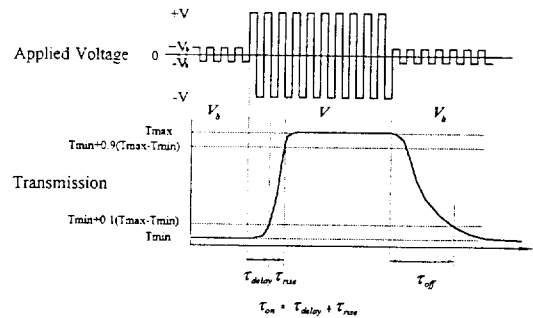


그림 3. 인가파형과 τ_{on} , τ_{off} 에 대한 정의.

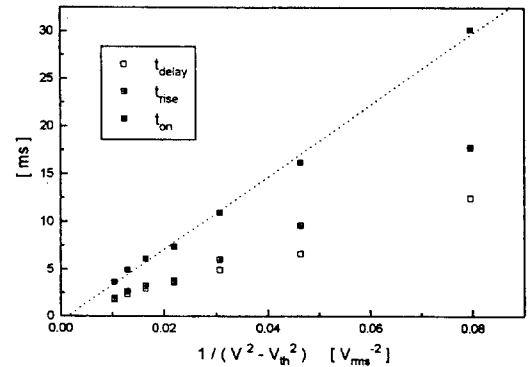


그림 4. 액정 No. 1의 switch-on 시간.

τ_{delay} 와 τ_{rise} 로 나누어 측정하였다.

3.1 인가전압에 대한 스위칭 시간의 의존성

비선택 시의 바이어스 전압 V_b 는 0으로 고정시키고, 선택시 인가하는 전압 V 를 가변시켜 가며 인가전압 V 에 대한 τ_{on} 과 τ_{off} 의 의존성을 알아 보았다. 그 측정결과들을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4의 결과를 통하여 τ_{on} 이 식 (6)에서와 같이 $1/(V^2 - V_{th}^2)$ 에 비례하고 있음은

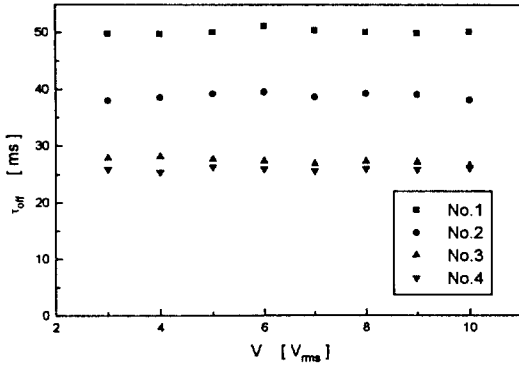


그림 5. switch-off 시간.

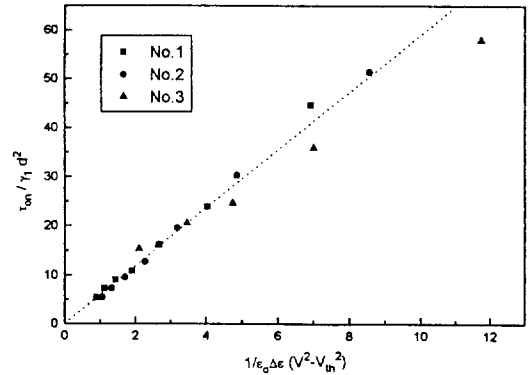


그림 6. τon과 식 (6)의 관계.

표 1. 시뮬레이션과 실험에 사용된 액정의 파라메타 (cgs 단위계).

파라메타	액정	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
γ_1 [dyne·s/m ²]		1.8800	1.4400	1.1200	1.0069
n_r		1.6417	1.6397	1.6141	1.6421
n_o		1.5022	1.4970	1.4941	1.4978
ϵ_1		17.8000	15.3000	9.5000	10.7240
ϵ_2		4.800	4.2000	3.6000	3.8880
K_{11} [10 ⁻⁷ dyne]		12.40	11.10	14.30	12.93
K_{22} [10 ⁻⁷ dyne]		6.900	6.800	7.700	6.404
K_{33} [10 ⁻⁷ dyne]		18.50	19.60	21.10	18.36

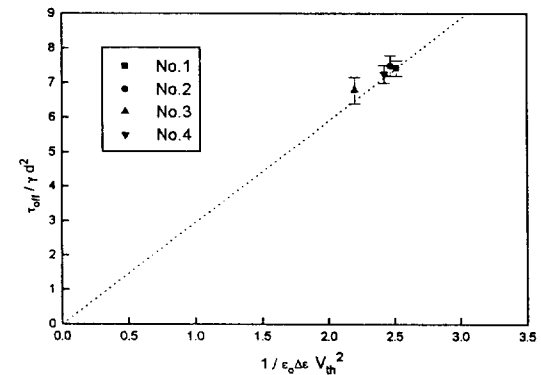


그림 7. τoff와 식 (7)의 관계.

알았다. 이 때 선택시 인가되는 전압이 커질수록 τ_{dis} 와 τ_{rise} 모두 감소함을 알 수 있었다. 나머지 액정에 대해서도 같은 관계의 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 그림 5에서와 같이 τ_{off} 는 인가전압에 관계없이 일정하게 측정되었다.

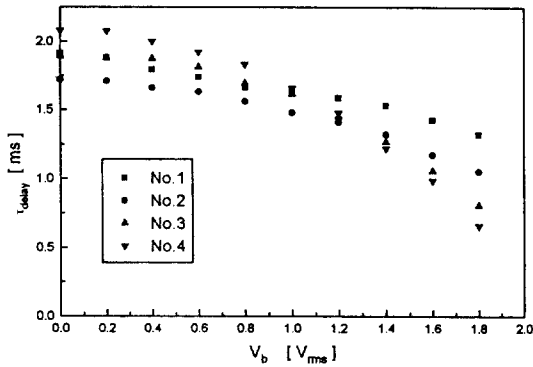
식 (6)과 (7)의 타당성 검증을 위하여 그림 4와 그림 5의 좌표축 척도를 바꾸어 표 1의 액정들에 대해 그림 6과 그림 7로 다시 나타내어 보았다. 그 결과 τ_{on} 은 액정의 종류에 관계없이 식 (6)의 비례식에서 약 6 정도의 동일한 비례상수를 가짐을 발견하였다. 또한 τ_{off} 의 경우도 식 (7)의 관계에서 액정 종류에 관계없이 약 3 정도의 비례상수를 가짐을 발견하였다. 이상의 실험결과로부터 식 (6)과 (7)이 STN LCD의 광응답 시간과 각 LCD 파라메타와의 관계를 알 수 있는 해석식으로 유용하다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 식 (6)과 (7)을 통해 LCD의 각 파라메타들이 광응답 시간에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴볼 수 있다.

식 (6)과 (7)에 의하면 회전점성상수 γ_1 은 τ_{on} 과 τ_{off} 에 비례하는 관계를 가진다. 그러므로 γ_1 을 작게 하므로써

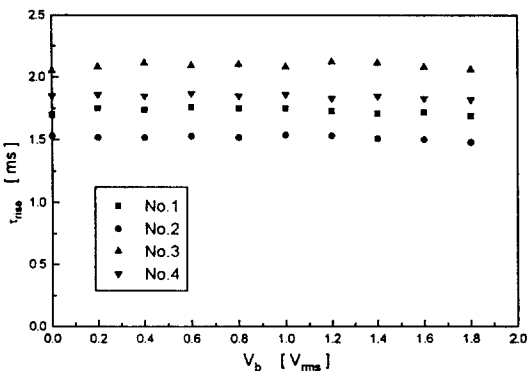
스위칭 시간을 개선할 수 있다. 그러나 식 (6)과 (7)은 액정의 흐름(flow)을 무시하여 유도된 식이기 때문에^[13] γ_1 이 스위칭 시간에 직접적인 비례관계를 가지리라 보긴 어렵다. γ_1 의 변화가 스위칭 시간에 얼마나 영향을 미치는지는 6개의 Leslie 계수^[14]를 고려한 모든 점성 계수에 대해 정밀한 수치해석이 필요하다.

또한, 식 (6)과 (7)에서 τ_{on} 과 τ_{off} 는 모두 d^2 에 비례하는 관계를 가진다. 따라서 셀 갭 d 를 줄이므로써 τ_{on} 과 τ_{off} 를 크게 감소시킬 수 있으리라 본다. 그러나 d 의 변화는 LCD의 위상지연(phase retardation) Δnd 에 영향을 주므로 액정 혼합물의 설계 시에 복굴절률 Δn 과 함께 고려해야 한다.

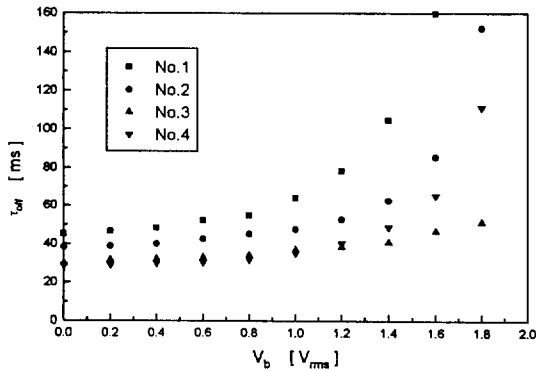
식 (6)과 (7)의 V_{th} 가 포함된 식을 살펴보면 스위칭 시간과 유전을 이방성 $\Delta \epsilon$ 이 서로 반비례하는 관계를 가지는 것처럼 보인다. 하지만 사실은 그렇지 못하다. τ_{off} 의 경우 $\Delta \epsilon$ 을 증가시키면 그에 따른 V_{th} 의 감소를 가져와 $\Delta \epsilon$ 의 증가 만으로는 τ_{off} 를 감소시킬 수 없다.



(a) delay 시간,



(b) rise 시간,



(c) off 시간.

그림 8. 바이어스 전압에 의한 스위칭 시간의 영향.

그러므로 τ_{off} 를 개선시키기 위해서는 탄성상수 K_s 도 함께 증가시키므로써 V_{th} 의 감소를 보상해야 한다. τ_{on} 은 $\Delta\epsilon$ 의 증가로 개선시킬 수 있으나, $\Delta\epsilon$ 과 직접적으로 반비례 하는 관계는 아니다.

3.2 바이어스 전압에 대한 스위칭 시간의 의존성

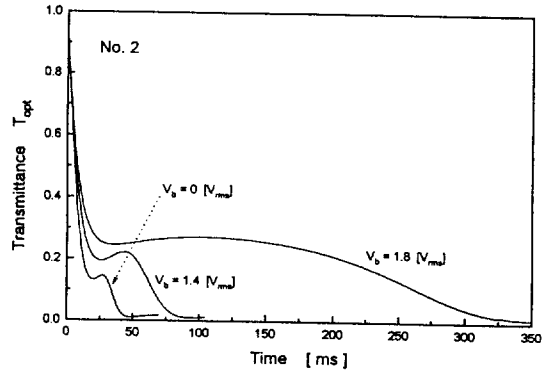


그림 9. 액정 No. 2의 여러 바이어스 전압에 대한 광응답의 감쇄 곡선.

STN LCD의 구동방식은 단순 행렬(simple matrix) 방식을 취하고 있다. 즉 시간 순차적으로 선택 파형이 인가되는 주사 전극(scanning electrode)과 선택 파형과 동기되어 ON 파형 또는 OFF 파형이 인가되는 신호 전극(data electrode)이 서로 교차하는 행렬 형태의 전극을 이루고, 그 교차점이 하나의 화소를 구성하게 된다. 따라서 이러한 멀티플렉싱 구동 시에는 선택 화소 뿐만 아니라 비선택 화소에도 전압이 인가된다. 그러므로 비선택 시 인가되는 바이어스 전압이 있는 상태에서의 LCD의 동특성을 살펴보는 것은 의미있는 일이다.

비선택시 가하는 바이어스 전압이 광응답 시간에 미치는 영향을 실험을 통해 알아 보았다. 그림 3에서 선택시 인가하는 전압은 10 V로 고정시키고, 비선택시의 바이어스 전압을 0.2 V 간격으로 변화시켜 가며 응답시간을 측정해 보았다. 그 결과들은 그림 8과 같다.

그림 8(a)의 결과를 통해 delay 시간은 바이어스 전압이 클수록 짧아짐을 알았다. 그러나 그림 8(b)는 rise 시간이 바이어스 전압의 영향을 받지 않음을 보여준다. 또한 τ_{off} 는 그림 8(c)에서와 같이 바이어스 전압의 변화에 가장 큰 영향을 받으며, 바이어스 전압이 커질수록 느려진다는 것을 알았다.

그러나 바이어스 전압이 존재하는 경우, 식 (6)과 (7)의 해석식으로 STN LCD의 응답특성을 설명할 수 없다. 따라서 II장에서 소개한 수치해석적 방법을 사용하여 바이어스 전압이 존재하는 경우의 응답특성을 구해 보았다. 특히, 바이어스 전압에 가장 큰 영향을 받는 switch-off 시의 STN LCD의 응답특성을 수치해석적 방법으로 계산하고, 실험결과와 비교하였다. 10 V_{rms}에서의 정상상태의 분포를 초기값으로 사용하고, 프리틸트 각(pretilt angle)은 5°로 두었다. 그리고 셀 내의 액정은 1000개의 층으로 나누어 수치해석하였다. 그림 9는 표 1의 액정

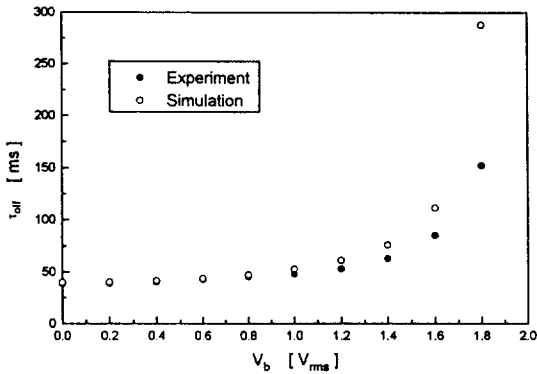
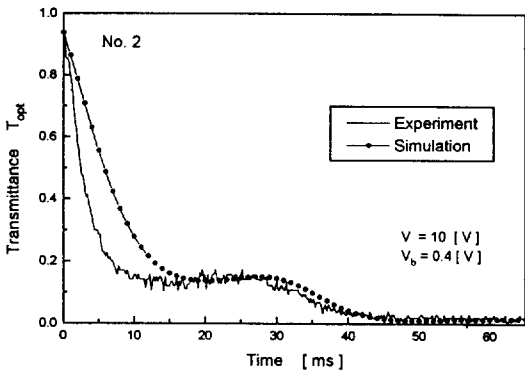
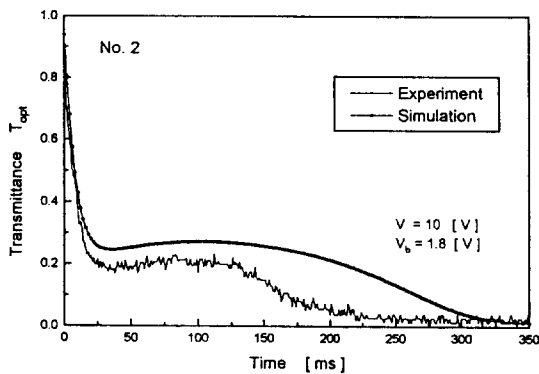


그림 10. 실험과 계산으로 구한 액정 No. 2의 τ_{off} 비교.



(a) $V_b = 0.4$ [V],



(b) $V_b = 1.8$ [V].

그림 11. 액정 No. 2에 대한 실험과 계산으로 구한 광응답의 감쇄 곡선의 비교.

No. 1에 대해서 바이어스의 전압을 변화시켜가며 계산한 광응답 곡선을 보여주고 있다. 바이어스 전압이 커질수록 응답 곡선의 감쇄 속도가 느려짐을 볼 수 있다. 또한 그림

10은 그림 9와 같이 계산된 응답곡선에서 구한 τ_{off} 를 No. 2에 대한 앞선 실험결과와 비교한 것으로, 계산결과도 τ_{off} 가 V_b 의 증가에 따라 길어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 τ_{off} 에 대한 계산결과가 실험에서 측정된 결과보다 다소 길며, 특히 바이어스 전압이 증가할수록 실험결과와의 차이가 커짐을 알 수 있었다. 그림 11에서 비교적 낮은 바이어스 전압인 0.4 V와 1.8 V의 높은 바이어스 전압에 대해 실험과 계산 상의 광응답 곡선을 비교해 보았다. 계산결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 특히, 실험의 응답 곡선에서 나타난 거의 평탄한 부분까지도 잘 일치하였다. 이러한 부분은 액정의 역흐름(backflow)에 의한 optical bounce로 규정하여 왔는데,^[14,15] 일반적으로 STN LCD의 경우 TN LCD에 비해 optical bounce의 정도가 작은 것으로 알려졌다.^[16] 그러나 본 해석에서는 액정의 역흐름을 고려하지 않았음에도 불구하고, 240°STN LCD에서 나타나는 그러한 현상을 충분히 잘 설명해 주고 있음을 알 수 있었다. 한편, 바이어스 전압이 큰 경우 계산결과와 감쇄 곡선 끝부분이 실험결과에 비해 다소 길게 나타나는데, 이와 같은 차이는 본 수치해석에서 하나의 일정한 회전점성상수만을 고려한 까닭으로 보인다. 즉 점성도 중에 가장 큰 회전점성상수 γ_1 을 액정의 배향상태에 관계없이 모든 시간에 대해 항상 일정한 값으로 놓고 해석하였으므로, 실제 실험결과보다 응답시간이 다소 길게 나왔던 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 네 종류의 STN 액정 셀에 대한 실험을 통해 STN LCD의 광응답특성을 알아보았다. 선택 전압을 가변해 가며 STN LCD의 스위칭 시간을 측정하고, LCD의 각 파라메타들이 스위칭 시간에 미치는 영향에 대해 논하였다. 이 실험을 통해, τ_m 과 τ_{off} 에 대한 해석식에서 액정의 종류에 관계없이 각각 약 6과 3 정도의 비례상수를 가짐을 알 수 있었다. 그리고 비선택시 인가되는 바이어스 전압의 스위칭 시간에 대한 영향을 실험을 통해 알아 보았다. 특히, 바이어스 전압의 영향이 큰 τ_{off} 에 대해서는 수치해석의 결과와 비교해 보았다. 실험결과와 마찬가지로 바이어스 전압의 증가에 따라 τ_{off} 가 증가하며, 응답 곡선도 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] F. Reinizer, Monatsch Chem., 9, 421 (1888).

- [2] M. Schadt, *SID Short Course s-3*, pp. 3-4 (1993).
- [3] G. Stix, *IEEE Spectrum*, **26**(9), 36 (1989).
- [4] N. V. Madhusudana, *Theory of Liquid Crystals in Liquid Crystals Applications and Uses*, **1**, (World Scientific, 1990) pp. 37-90.
- [5] C. W. Oseen, *Trans. Faraday Soc.*, **29**, 883 (1933).
- [6] F. C. Frank, *Discuss. Faraday Soc.*, **25**, 19 (1958).
- [7] D. W. Berreman, *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 12 (1974).
- [8] M. J. Maron, *Numerical Analysis-A Practical Approach* (Macmillan, 1982) pp. 346-352.
- [9] R. C. Jones, *J. Opt. Soc. Am.*, **31**, 488 (1941).
- [10] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, New York, 1984).
- [11] E. Jakeman and E. P. Raynes, *Phys. Lett. A*, **39A**, 69 (1972).
- [12] F. Nakano, H. Kawakami, H. Morishita, and M. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, 659 (1980).
- [13] K. Tarumi, U. Finkenzeller, and B. Schuler, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 9A, 2829 (1992).
- [14] C. Z. van Doorn, *J. Appl. Phys.*, **46**(9), 3738 (1975).
- [15] S. Kobayashi and A. Mochizuki, *Other Types of LCDs in Liquid Crystals-Applications and Uses*, Vol. 2, (World Scientific, 1992) pp. 278-282.
- [16] H. A. van Sprang and H. G. Koopman, *J. Appl. Phys.*, **64**(10), 4873 (1988).

Bias-Voltage-Dependent Dynamic Behavior of a STN LCD

In-Soo Jeon, Tae-Hyeog Jeong, Tae-Hoon Yoon, and Jae Chang Kim
Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received: January 29, 1996)

In this paper, the voltage dependence of the dynamic characteristics in a STN LCD is investigated. From the measurement of the switching times for four STN LC cells under various applied voltages, it was found that the analytical equation for the switching times has a fixed proportional constant irrespective of sample parameters. We also investigated the dependence of the switching times on the bias voltage. Our theoretical results were in good agreement with above experimental results.