

9/65/35 PLZT 세라믹의 디스플레이 응용

Application for Displays Using 9/65/35 PLZT Ceramics

어규성* · 이개명* · 유주현* · 정익채** · 최대섭*** · 박창엽****
 (Gyu-Seong Eo · Kae-Myeng Lee · Ju-Hyun Yoo ·
 Ik-Chae Chung · Dae-Sub Choi · Chang-Yub Park)

요 약

9/65/35 PLZT 세라믹을 그레인 크기에 따라 2 단소성법으로 제조하여 그 전기적, 광학적특성을 관찰하고, 횡모드 복굴절방식의 반사형 디스플레이소자를 제작하여 그 동작특성을 조사하였다. P-E 곡선은 슬림(slim)형의 히스테리시스를 나타냈으며, 그레인이 커질수록 유기분극과 광투과율은 증가하지만 복굴절율은 감소하여 디스플레이소자 구동시 콘트라스트 비(contrast ratio)가 감소 하였다.

디스플레이소자의 동작개시 전압은 1mm 전극 간격에서 300V이고, $V_{(CR \cdot Max)}$ 전압은 550V 였으며, 가시각도에 따른 콘트라스트 비의 비율($(60^\circ/90^\circ)$, $G_S : 4\mu m$)은 0.67이었다.

Abstract

9/65/35 PLZT ceramics with a series of grain sizes were fabricated by the two stage sintering method, and their electrical and optical characteristics were measured. The transversal birefringence mode display device of reflection type was made and its operation characteristics were investigated.

The P-E curves of 9/65/35 PLZT ceramics showed slim loop type hysteresis, and as grain size was increased, the induced polarization and transmittance increased, but the birefringence decreased and so the contrast ratio of display become lower.

* 연세대학교 대학원

** 뉴세라믹스(주)연구소

*** 서일전문대학 전기과

**** 연세대학교 전기공학과

Driving voltage of display with 1mm electrode gap was 300V and $V_{CR,MAX}$ voltage was 550V, and relative contrast ratio according to viewing angle(=60/90°, Gs:4um) was 0.67.

1. 서 론

1971년 투명한 PLZT 세라믹이 처음 제조된 이래 여러 전기광학분야로의 연구와 응용이 진행되어 왔다. PLZT 세라믹은 가시광 영역에서 투명도가 우수하고, Pb 자리에 치환되어 지는 La의 양과 Zr/Ti 비에 따라 결정구조가 변화하며, 전기광학특성도 1차 및 2차전기광학특성, 광메모리특성 등으로 변화하므로 이를 이용하여 광메모리소자, 광셔터, 영상축적 표시소자, 광센서등에 응용이 가능하다.¹⁾ La/Zr/Ti 조성비가 9/65/35인 PLZT 세라믹은 전계를 인가하지 않은 상태에서는 광학적으로 등방성이지만, 전계를 인가하면 이방성이 되어 전계의 자승에 비례하는 복굴절이 발생하는 2차전기광학효과(Kerr 효과)를 나타내므로 이를 이용하면 디스플레이소자로 응용이 가능하다.²⁾ 현재 실용화되고있는 디스플레이소자로는 CRT, LED, LCD, 등이 있으며 PLZT 세라믹을 이용하면 LCD와 유사한 방식의 디스플레이소자를 제작할수 있다.³⁾

PLZT 세라믹의 전기광학적 특성 및 디스플레이 특성은 세라믹의 미세구조 특히, 그레인의 크기에 영향을 받으며, 그레인이 작은 (fine grain) 경우 복굴절이 유리하고 큰 (coarse grain) 경우 산란에 의해 복굴절이 방해될 받게 된다.⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 9/65/35 PLZT 세라믹을 2단소성법을 이용하여 그레인의 크기에 따라 제조하여 그레인크기가 세라믹 시편에 전기적, 광학적 특

성에 미치는 영향을 조사해 보고 그레인크기별로 디스플레이소자를 시작하여 디스플레이 특성을 관찰하여 디스플레이소자 응용에 적합한 특성을 보이는 PLZT 세라믹을 연구하고자 한다.

2. PLZT 세라믹의 디스플레이 원리

PLZT 세라믹을 디스플레이소자로 응용하는 데는 종모드 산란방식 (longitudinal scattering mode) 과 횡모드 복굴절방식 (transversal birefringence mode) 을 이용할 수 있다.¹⁾²⁾ 종모드 산란방식은 광과 전계의 방향을 서로 평행하게 한 구조로 빛의 산란효과를 이용한다. 본 연구에서 시행한 횡모드 복굴절방식은 광을 전계방향과 수직으로 하여 시편에 복굴절을 유기하여 디스플레이를 나타내게 하는 방식이다. 그림1은 횡모드 복굴절방식의 구조로서 전계를 가하여 이방성이

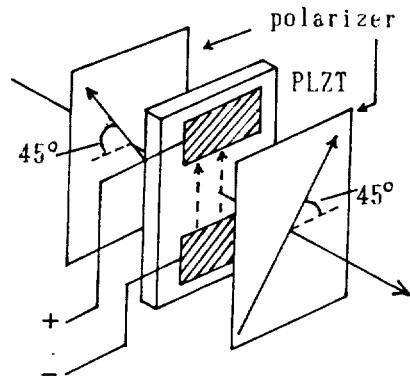


그림 1. 횡모드 복굴절 방식의 구조
Fig 1. Structure of transversal mode birefringence types

된 PLZT 시편으로, 전단의 편광기를 통하여 45°로 편광된 단색광 (monochromatic light) 이 입사하게 되면 분극축과 그의 수직인 축방향의 굴절율의 차이가 생기게 된다.

이 때 분극축방향의 굴절율을 n_e (비정상파의 굴절율) 라 하며 그의 수직인 축방향의 굴절율을 n_o (정상파의 굴절율) 라 한다.

굴절율과 빛의 속도는 각각

$$U_e = \frac{c}{n_e} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_z}}, \quad U_o = \frac{c}{n_o} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_y}}$$

여기서 ϵ_y 는 y 축 방향의 유전율,

되며, ϵ_z 는 z 축방향의 유전율이고 c 는 광속도, U_e 는 비정상파의 속도, U_o 은 정상파의 속도이며 빛이 x 방향으로 전파하는 경우이다.

세라믹 시편에 전계를 인가하여 이방성이 되면 분극축방향 (z 방향) 과 그의 수직방향 (y 방향) 의 유전율이 다르며 이는 굴절율의 변화를 주게 된다. 따라서 두방향의 굴절율의 차 $n_e - n_o = \Delta n$ - (2-1) 의 복굴절이 발생하게 된다. PLZT 시편의 두께를 d 라 할 때 광로차 (retardation) Γ 는

$$\Gamma = \Delta n \cdot d \dots\dots\dots (2-2)^3$$

로 되어 광로차를 구할 수 있다.

○ WOB (white on Black) 동작 4)

그림 1에서 45°로 편광된 빛은 이방성 PLZT 세라믹을 통과한 후에는 식 (2-2) 와 같은 광로차가 생기게 되어 후단의 분광기를 통과한 후에 투과광의 세기는 (편광기와 분광기가 서로수직)

$$I = I_o \sin^2 \frac{\Gamma\pi}{\lambda} \dots\dots\dots (2-3)$$

여기서 λ 는 단색광의 파장, I 는 투과광의 세기이고, I_o 는 입사광의 세기이다. 직류 전압을 인가하지 않을 때는 상지연 $\Gamma=0$ 가 되어 광의 세기 $I=0$ 이므로 흑색이 디스플레이

이 되며, 직류 전압을 인가하여 상지연 Γ 를 $\Gamma = \frac{\lambda}{2}$ 로 하면 (2-3) 식에서 I 가 최대로 되어 백색을 디스플레이 하게 된다.

$$\text{또한 } \Delta n = \frac{1}{2} n^3 (S_{12} - S_{11}) E^2 \dots\dots (2-4)$$

여기서 n 은 시편의 굴절율 (약 2.5), E 는 시편에 인가된 전계이고, S_{11} , S_{12} 는 2차 전기광학계수이다. 여기서 복굴절율은 전계의 자승에 비례하므로, 시편에 인가하는 전압에 따라 Γ 를 변화시킬 수 있다. 상지연 Γ 가 $\frac{\lambda}{2}$ 생길 때 전압을 $V \frac{\lambda}{2}$ (half wave voltage) 라 하며 디바이스 설계시 고려할 전압이다.

○ BOW (Blak on White) 4)

편광기와 분광기가 서로 평행하면 투과광의 세기는

$$I = I_o \cos^2 \frac{\Gamma\pi}{\lambda} \dots\dots\dots (2-5)$$

이다. 전압을 인가하지 않을 때는 $\Gamma=0$ 가 되어 광투과 I 가 최대로 되어 백색을 디스플레이 한다. 반파장전압을 가하면 식 2-5에서 $\Gamma = \frac{\lambda}{2}$ 이므로 I 가 최소로 되어 흑색을 디스플레이 한다. 본 연구에서는 그림 2(b)처럼 분광기뒤에 반사막을 두는 반사형 디스플레이로 하였으며, 또한 식 (2-2), (2-3), (2-4) (2-5) 는 단색광에서의 관계이나 백색광에서도 유사하게 적용할 수 있다. 3)

3. 실험

3-1. 시편제조와 디스플레이소자 제작

디스플레이소자용 PLZT 세라믹의 조성은 PLZT의 상평형도¹⁾에서 2차전기광학 특성을 보이는 slim-loop의 영역에서 조성식 $Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_z)_{1-1/4x}O_3$ 에 의하여 조성비가 $x/y/z = 9/65/35$ 인 조성재료를 선택하였다. 순도 99.9% 이상의 PbO , La_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 의 원료분말을 사용하여 산화물 혼합방법 (Mixed Oxide Method)으로 조

성원료를 준비 하였으며, 이를 Pellet 형태로 성형한 후 2단소성법⁵⁾으로 시편을 제조하였다. 1단계에서 graphite mould를 사용하여 1150℃에서 약 2시간 정도 진공상태에서 핫프레스하였으며, 1단 핫프레스된 시편을 2종의 알루미늄 도가니속에 넣고, $PbZrO_3 + 10wt\% PbO$ 의 분말로 주위를 채운후 5~50시간 소성을 하여 그레인크기를 각각 4, 5.8, 7.8, 8.7, 10 [μm]로 변화 시켰다.

제조된 PLZT시편을 다이아몬드 절단기로 얇게 짜르고 SiC연마재로 제반 광투과율, 복굴절을, CR 특성측정을 위해 두께 $t = 0.36 mm$ 되도록 조정하여 투명한 박판으로 만들었다.

전극설계를 위하여 시편의 한쪽면에 Ag를 진공증착 하였으며, 디스플레이를 위한 전극 모양은 photolithography 방법에 의하여 그림 2(a)와 같이 단일 간격형태로 설계 하였다.

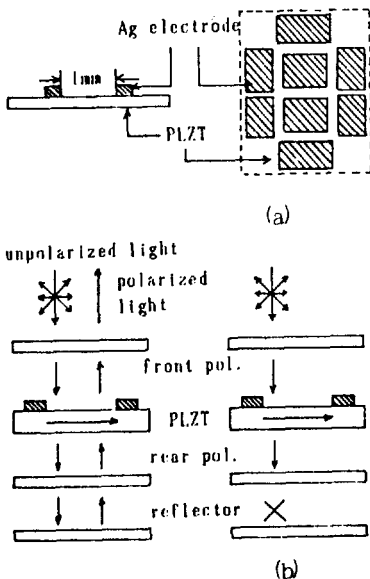


그림 2. PLZT 디스플레이

a) 전극구조

b) 반사형 디스플레이

Fig 2. PLZT Displays

a) electrode structure

b) reflective displays

이렇게 설계된 시편으로 제작한 반사형 디스플레이소자의 구조와 디스플레이원리는 그림 2(b)와 같다.

3-2. 측정

제조된 시편의 그레인을 광학현미경으로 관찰하여 그 크기를 측정하였으며, LCR메터로 온도에 따른 유전상수의 변화를 측정 하였다.

Sawyer-Tower 회로를 사용하여 시편의 P-E 히스테리시스 곡선을 관찰하였고, Spectrophotometer (UV-240)를 사용하여 시편두께 $t = 0.36 mm$ 로 조절하여 광투과율을 측정 하였다. 광원을 He-Ne Laser로 하고, 편광기와 분광기의 광축이 90°(cross)되게 하고 그사이에 $\lambda/4$ plate의 장축 및 단축이 편광기와 분광기의 광축과 일치되게 배열 하였다.

여기서 $\lambda/4$ plate란 비정상광과 정상광의 상차이를 90° 생기도록 하여 편광되도록 하는 역할을 하며 최종 분광기를 통과한 광이 완전히 소광되었는지를 Optical Powermeter로 확인한후 시편의 분극축이 편광기 및 $\lambda/4$ plate의 광축과 45°를 이루도록 하여 $\lambda/4$ plate와 편광기 사이에 측정시편을 고정시킨 그림 3과 같은 광학배열로 전계를 인가할시 다시 소광되는 지점의 회전각을 구하여 광로차를 계산하는 senarmont 방법⁶⁾을 사용하여 광로차를 구하고, 시편의 두께로 나누어 복굴절을 Δn 을 구하였다.

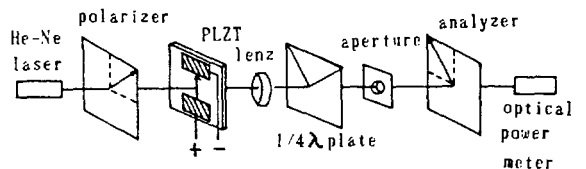


그림 3. 복굴절을 측정을 위한 광학배열

Fig 3. Optical alignment for measuring birefringence

디스플레이된 소자의 디스플레이 정도를 측정하기 위하여 그림4와 같은 측정장치로 BOW와 WOB방식의 CR (contrast Ratio) 을 측정 하였다.

BOW방식 : $CR = B_n / B_d$ (3-1)

WOB방식 : $CR = B_d / B_n$ (3-2)

B_n : Background (symbol 을 제외한 곳)
brightness

B_d : 디스플레이상태 (symbol) 의 brightness

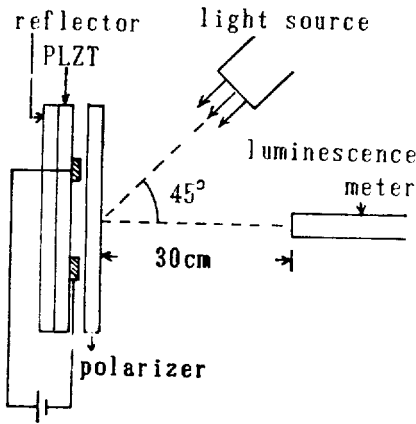


그림 4. Contrast Ratio 측정장치
Fig 4. Measurement arrangement for Contrast Ratio

4. 결과 및 고찰

1단의 핫프레스 시간을 고정시키고 2단 소성에서 $PbZrO_3 + 10wt\% PbO$ 의 분말로 시편의 주위를 채운후 소성시간을 변화시켜 그림 5와 같이 그레인크기를 변화 시켰다.

소성시간에 따라 시편의 밀도도 변하고 있으며 20 시간 이후부터 서서히 감소하고 있다. 이는 과잉 PbO 에 의하여 만들어진 액상이 소성초기 급격한 증발을 보이다가 20시간 전후하여 증발이 서서히 이루어져 치밀한 미

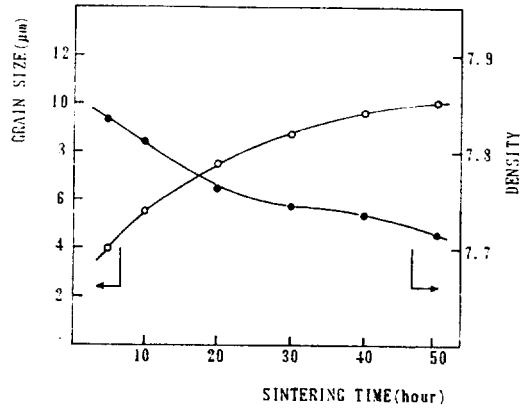


그림 5. 소성시간에 따른 그레인 크기와 밀도의 변화

Fig 5. Variations of grain size and density as a function of sintering time

세구조를 갖도록 한다.

시편의 유전상수는 그림 6과 같이 온도에 따라 유전완화 (dielectric relaxation) 를 보이고 있다. 준강유전 영역인 9/65/35 PLZT 세라믹은 ABO_3 페로브스카이트 구조를 갖고 있으며 A자리에 Pb^{+2} 대신 La^{+3} 가 치환되어 들어감에 따라 전하보상을 위해 2개의 La 이온에 의해 하나의 Pb 공공이 유발

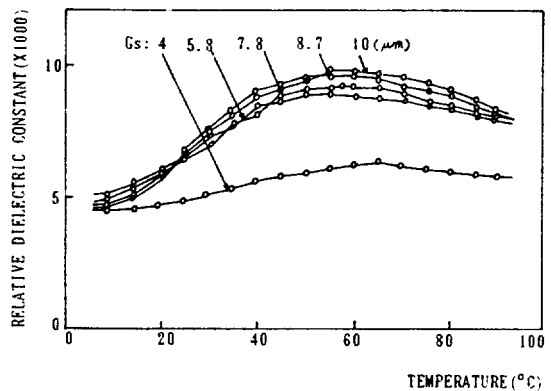


그림 6. 온도에 따른 유전상수의 변화

Fig 6. Variations of relative dielectric constant as a function of temperature

되는 도너효과를 나타낸다.⁷⁾ La^{+3} 가 치환되어 들어가는 양이 많음에 따라 이 격자공공은 증가하여 결정내의 조성의 공간적, 미시적 불균일성을 조장하여 큐리온도가 국소적으로 다르게 되어 완만한 상전이를 일으키게 된다.

또한 큐리온도가 그레인크기가 커질수록 다소 감소하는 이유는 Okazaki 등⁸⁾의 공간모델에 의하면 그레인 경계에 불순물과 공격자점으로 형성된 공간전하층 (space charge layer)은 그레인이 크면 클수록 이층은 상대적으로 작아지게 되고, 동시에 공간전하전계와 잠금 (locked-in) 강유전분극도 낮아져 내부의 도메인이동이 쉬워지므로 큐리온도가 낮아진다.

그레인의 크기가 클수록 유전상수가 증가하는 이유는 그레인이 작은것 내부에 있는 도메인보다, 그레인이 큰것 내부에 있는 도메인들은 상대적으로, 그레인 바운레리가 작기때문에 내부의 도메인 벽 (domain wall)이동을 용이하게 해주며 그레인 바운레리가 많으면 도메인 벽이동을 용이치 않게 하여 그레인크기가 클수록 유전상수가 증가하리라 생각된다.

9/65/35 시편의 상온에서의 P-E 히스테리시스 곡선은 항전계 (E_c)와 잔류분극 (P_r)의 폭이 좁은 slim형을 보였으며 따라서 2차전기광학 특성을 이용할 수 있는 근거가 된다.

그림 7은 그레인크기 $10 \mu m$ 의 시편의 P-E 히스테리시스 곡선으로, 각 시편으로부터 측정된 최대전계에서의 분극값인 유기분극 (induced polarization)의 변화는 그림 8과 같다.

그레인크기가 증가함에 따라 유기분극값이 증가하고 있으며 이는 앞에서 언급한 그레인크기가 증가할 수록 내부도메인 벽의 이동이

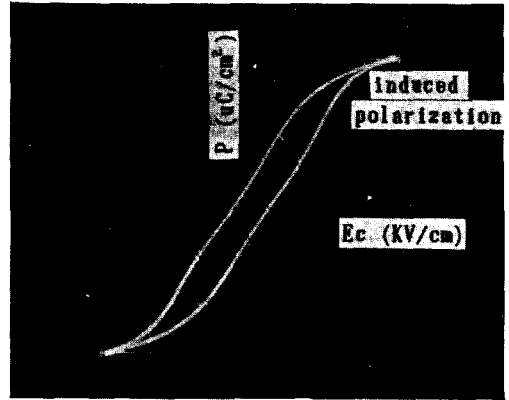


그림 7. P-E hysteresis 곡선 (Gs : $10 \mu m$)
Fig 7. P-E hysteresis 곡선 (Gs : $10 \mu m$)

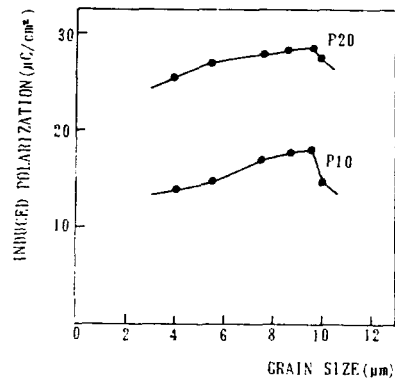


그림 8. 그레인 크기에 따른 유기분극의 변화
Fig 8. Variations of induced polarization as a function of grain size

용이한 메커니즘과 일치하고 있다. 여기서 그레인크기가 $9.5 \mu m$ 이상에선 오히려 낮아지고 있는데 그 이유는 그단 분위기소성시간이 40시간 이상인 경우 그레인크기가 $9.5 \mu m$ 이상이 되었는데, 이처럼 장시간 소성을 하면 그레인바운레리에 잔류한 PbO 및 불순물이 거의 사라지고 조성중의 Pb^{+2} 이온이 산화되어 PbO로 증발함으로써 격자공공이 증가하게 되어 공간전하층의 형성에 도움을 주어 유기분극이 감소하리라 생각된다. 디스플레이소자의 제작을 위해서는 낮은 전계에서 쉽게 도메인포화가 생겨서 유기분극값이 커야

하고 따라서 2 차 전기광학특성이 크게된다.

시편의 중요한 특성인 광투과율은 그림9와 같다. 0.37 μm 에서 기초흡수단(fundamental absorpsion edge)을 보이며 이 이후 파장에서는 투과하기 시작하며, 0.8 [μm]근방의 파장영역에서 각 그레인크기에 따라 60 ~ 75 %의 투과율의 차이를 보여 그레인크기가 증가함에 따라 광투과도도 증가함을 보였다. 이는 그레인이 커지면 상대적으로 광학적 부정합이 되어 광산란의 원인이 되는 그레인 바운더리 영역이 줄어들므로 광투과율이 증가된 것으로 판단되며, Nagata⁹⁾의 연구결과와 거의 일치하였다. 일반적으로 투명세라믹의 광투과율의 감쇄요인은 반사에 의한 외부 손실과 물질의 조성 및 조직에 기인한 광흡수와 산란등 내부 감쇄요인이다. 광의 수직입사시 Fresnel 법칙에 의하면 전면반사때 $R_{\min} = (n-1)^2 / (n+1)^2$ 다중반사까지 고려할때 $R_{\max} = (n-1)^2 / n^2 + 1$ 이며¹⁰⁾ PLZT 굴절율 $n = 2.5$ 로 하면 반사율R은 최소 18.4%에서 최대 31%로 평균값을 25%로 가정할 수 있다. 따라서 그레인이 가장 큰 10 μm 에서는 75% 정도의 투과율로 25% 정도의 반사를 제외

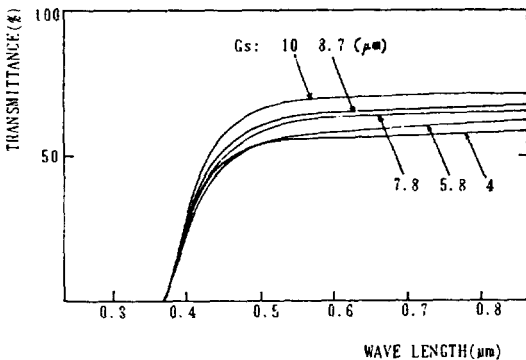


그림 9. 파장에 따른 광투과율의 변화
Fig 9. Variations of transmittance as a function of wave lengths

하면 내부 감쇄요인은 거의 없으나 4 μm 시편의 경우 반사요인을 제외하면 10% 정도의 내부감쇄요인이 생겨 광투과의 저해요인이 됨을 알 수 있다.

디스플레이의 ON-OFF 동작의 판단을 위해서는 식(2-2), (2-3), (2-5)에 의한 복굴절율의 변화가 중요하다. 그림10과 같이 그레인크기가 작을 수록 복굴절은 2차함수적으로 변화 하였다. 저전압(100 ~ 200 V)

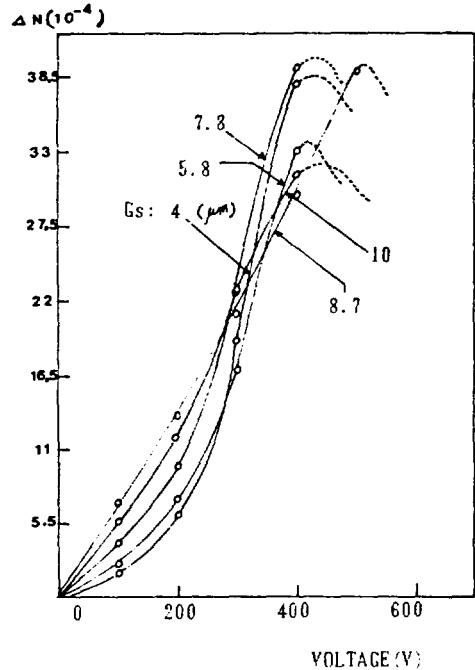


그림 10. 직류 전압에 따른 복굴절율의 변화
Fig 10. Variations of birefringence as a function of D.C voltages.

시에는 그레인이 큰시편의 복굴절이 작은 시편보다 증가하였으나 전압이 증가함에 따라 그레인이 작은 시편의 복굴절율이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 그림8에서 처럼 시편의 유기분극은 그레인이 커질수록 근소하게 증가하며, 따라서 그레인내의 도메인 반전이 용이하여 저전압에서도 복굴절이 쉽게 일어난

다. 그러나 인가전압이 $V \lambda/2$ 에 가까운 높은 전계에서는 반대의 결과를 보여 복굴절이 그레인이 커짐에 따라 방해를 받게 된다. 이는 그레인이 작은 경우는 그레인 내의 도메인은 단분역 모델로 되어 광축형성이 용이하지만 그레인이 커지면 내부 도메인이 증가하고 도메인축이 일정치 않은 단분역 모델로 되어 인가전계에 의한 광축제어가 제약을 받으며, 따라서 그레인바운데리나 도메인벽에서의 광산란이 단분역 모델보다 증가하여 depolarization 메커니즘으로 작용하여 복굴절율이 감소하기 때문이라 사료된다.

그림 2(a)의 형태에 그림 2(b)의 구조로 구동시킨 백색광 (white light)에서의 CR의 변화는 각 그레인크기에 따라 그림 11에 나타내었다. 인가전압에 따라 CR은 증가하고 있

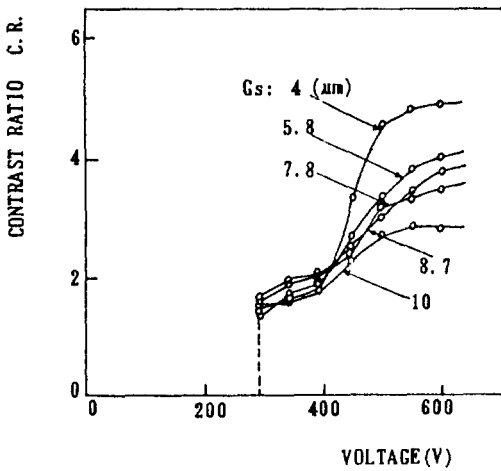


그림 11. 직류전압에 따른 CR의 특성
Fig 11. Characteristics of CR as a function of D.C voltages.

으며, 이는 그림 10의 복굴절율의 변화와 비교하면, 역시 그레인이 커질수록 CR의 증가 현상은 둔화되어 복굴절율의 변화양상과 대체적으로 비슷하였다. 300 V에서 동작개시 전압 (threshold voltage)이 나타났으며,

550 V 정도에서 최대의 CR를 보였고, 이후에는 포화현상을 나타냈다. 그레인이 커질수록 CR의 증가현상은 둔화되어짐을 알 수 있다.

그림 12는 CR특성이 가장 우수한 시편 (G_s (그레인크기) : $4 \mu m$)의 디스플레이 결과로서 디스플레이소자 응용을 위한 PLZT 세라믹은 그 투명도와 더불어 그레인이 작을수록 적합하리라 사료된다.

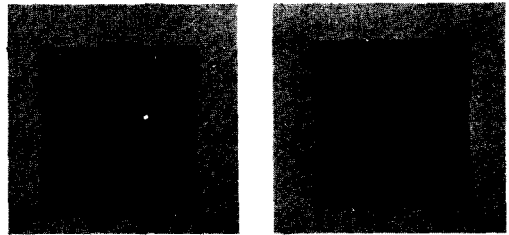


그림 12. 표시소자의 모양
Fig 12. Numeric-Displays

G_s : $4 \mu m$ 시편의 WOB 및 BOW구동방식의 비교는 그림 13과 같으며, WOB방식이 CR의 비가 4.8로서 약간 우수하였으나,

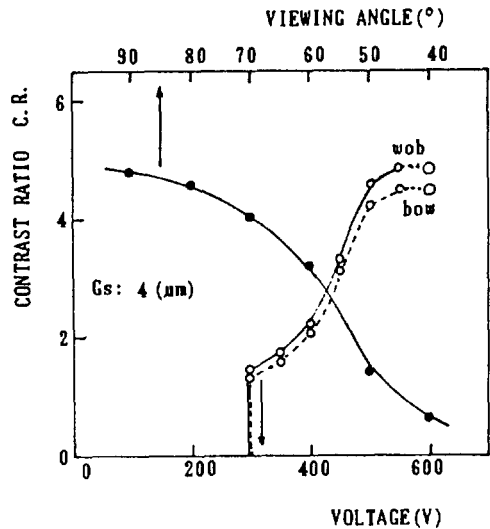


그림 13. 직류전압 및 가시각도에 따른 CR의 변화

Fig 13. Variations of CR as a function of D.C voltages and viewing angle

거의 차이는 없었으며 가시각도에 따른 CR의 변화는 그림 13에서 처럼 $60^\circ/90^\circ$ 의 비가 0.67로 LCD의 0.2에 비해서 그 특성이 우수 하였다. 이는 PLZT 세라믹의 높은 굴절율 ($n = 2.5$)에 기인한 것으로 사료된다.

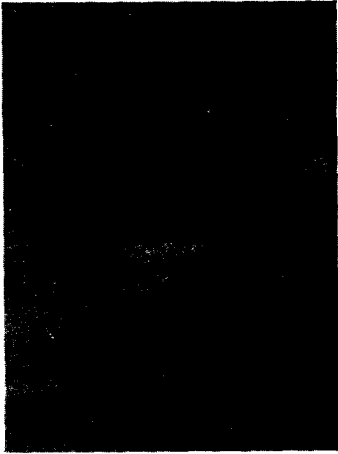


그림 14. 인터디지탈형 디스플레이
Fig 14. Interdigital type display

전극간격 1mm 에서 300V 이고, 최대 콘트라스트비는 나타내는 전압은 550V 이었다.

본 연구에서 연구한 PLZT 세라믹을 이용한 디스플레이는 구동전압이 높아서 실용상 어려움이 있지만 Maldonado 등은²⁾ 그림 14와 같은 interdigital 전극을 사용하면 시편 두께 $50\mu\text{m}$ 와 전극간격 $25\mu\text{m}$ 로 약 20V 정도까지, 구동전압을 감소할 수 있다고 보고하고있다.

이러한 구동전압만 개선되면, LCD에 비해 여러 장점을 갖고 있으므로 LCD에 대한 대체소자로 응용이 기대된다.

※ 본 연구는 과학재단 특정연구개발과제 학술연구조성비에 의하여 수행된 연구의 일부이며 과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 9/65/35 PLZT 세라믹은 히스테리시스가 적은 slim형의 P-E곡선을 나타내고, 그에 따라 복굴절율은 대체로 2차함수적으로 증가 하였다.

(2) 그레이인이 커질수록 유기분극과 광투과율은 감소하여 디스플레이 구동시 콘트라스트비는 감소 하였다.

(3) 가시각도에 따른 콘트라스트 비의 비율 ($60^\circ/90^\circ$)이 0.67로 LCD의 0.2보다 훨씬 우수 하였다.

(4) PLZT 디스플레이의 동작개시 전압은

- 1) C.E.Land, P.D.Thacher and G.H. Haerting, *Applied Solid State Science*, **3**, 137~233, Academic Press, N.Y (1974).
- 2) B. Kazen, *Advances in Image Pick up and Displays*, 65~137, Academic Press, N.Y(1975).
- 3) L.M. Levinson, *Electronic Ceramics*, 37 1~492, Marcel Dekker, N.Y(1988).
- 4) Ammon Yariv and Pochi Yeh; *Optical Waves in Crystals* (1984).
- 5) 박창업, 강원규, 위규진, 정익채; 한국요업학회지, **24**, 527~536(1987).

- 6) E.E.Wahlstrom, *Optical Crystallography*, 150~185, John Wiley & Sons, N.Y(1979).
- 7) B. Jaffe; *Piezoelectric Ceramics*, 154, Academic Press, London(1971).
- 8) K.Okazaki, K.Nagata, *J.Am.Ceram.Soc.*, **56**, 82~86(1973).
- 9) 岡崎清; *エレクトロニクス用セラミックス*, 220~260(CMC, No13)(1983).
- 10) 官内, 戸田; *オプトセラミックス*, 技報堂出版(1984).