

액정셀의 선경사각과 액정층의 두께를 함께 재는 개선된 결정회전법

손공숙 · 박 찬 · 박희갑 · 김진승

전북대학교 물리기술학부

노 봉 규

(주)현대전자

이 형 중

전남대학교 물리학과

김 재 기

국방과학연구소

(1996년 5월 13일 받음)

액정셀에서 액정분자의 선경사각과 액정층의 두께를 함께 결정하며 측정범위와 정밀도를 높이는 개선된 결정회전법을 고안하고 그 타당성을 실험으로 확인하였다. 이 방법은 종래의 입사각에 따른 편광투과율의 변화를 재는 대신, 작교하는 두 선편광이 액정셀을 지나올 때의 위상차를 재고 그 결과를 바탕으로 액정층의 두께와 선경사각을 결정한다. 아울러 굴절율이 유리기관과 비슷한 액체가 채워진 액체통에 액정셀을 넣고 실험하여, 유리판 표면에서의 빛의 반사를 줄이고 액정층에서의 굴절각의 범위를 늘려서 측정의 정밀도를 높였다. 이 방법을 쓰면 액정층의 두께가 $10\ \mu\text{m}$ 보다 적거나 선경사각이 10° 이상인 액정셀에 대해서도 선경사각과 액정층의 두께를 동시에 잴 수 있다.

I. 서 론

액정표시소자의 중요한 부분인 액정셀에서 액정분자는 일반적으로 그림 1과 같이 유리판에 대해 비스듬히 일어서 있다. 액정분자의 축과 유리판 사이의 각 α 를 선경사각(pretilt angle)이라고 부르는데, 이 각은 액정표시소자의 반응시간과 명암대비율 그리고 액정분자배열의 안정성 등에 영향을 준다^[1,2].

따라서 액정셀을 만들 때 선경사각을 잘 조절하고, 정확히 잴 수 있어야 하는데, 지금까지는 전기용량법(capacitance method), 자기영점법(magnetic null method), 그리고 결정회전법(crystal rotation method)을 써서 재왔다^[3].

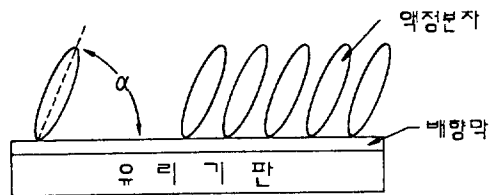


그림 1. 선경사각의 정의.

전기용량법은 액정셀의 전기용량이 액정층의 두께와 전극의 면적 그리고 액정의 유전율에 따라서 결정되며, 액정의 유전율이 선경사각의 함수이므로 액정셀의 전기용량을 재고, 이로부터 선경사각을 결정한다. 이 방법은 장치구성이 간단하나 액정층의 두께를 잘 알아야 하는데, 그 두께가 고르지 않으면 측정오차가 크다. 자기영점법은 방향이 고른 자기장 속에 액정셀을 넣으면 자기장의 방향과 세기에 따라서 액정분자의 배향이 달라지고, 그에 따라서 전기용량이 변하는데, 액정분자의 장축이 자기

*이 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심전문연구비(과제번호 : 951-0205-019-2)와 교육부 기초과학육성연구비(과제번호 : BSRI-95-2432)의 지원에 의한 결과임

장과 나란하면 전기용량이 자기장의 세기와 무관해지는 특성을 이용한다. 이 방법은 액정층의 두께나 선경사각의 범위 등에 대한 제한이 없으나 큰 전자석이 필요하고 측정시간이 오래 걸린다. 결정회전법은 레이저빔의 입사각에 대한 액정셀의 편광투과율 변화곡선이 선경사각을 중심으로 대칭이 되는 것을 이용한다. 이 방법은 장치구성이 비교적 단순하고 측정시간도 짧아서 많이 쓰인다. 그러나 빛의 입사각에 대한 편광투과율 변화곡선의 대칭성이 잘 드러나려면 액정층이 두꺼워야($\geq 10 \mu\text{m}$)한다. 또한 공기/유리 경계면에서의 빛의 굴절 때문에, 액정층에서의 굴절각이 제한되며 입사각이 커지면 유리판 표면에서 빛이 많이 반사되어 투과율 곡선의 대칭성이 흐트러지므로 실제로 정확히 잴 수 있는 선경사각의 범위가 10° 이하로 제한된다. 이러한 단점을 극복하려면 액정층에서의 굴절각의 범위를 늘리고, 유리판 표면에서의 빛의 반사를 줄여야 한다. 그리고 편광투과율을 살펴보기보다는 그 원인이 되는 직교하는 두 편광성분의 위상차를 재고, 이 결과와 가장 잘 맞는 액정층의 두께와 선경사각을 결정하는 것이 바람직하다.

이 실험에서는 결정회전법을 쓰는 실험장치에 굴절율 정합법(屈折率整合法: index matching method)을 써서 액정층에서의 굴절각의 범위를 늘리고, 유리판 표면에서의 빛의 반사를 줄였으며, 위상이동기법을 써서 편광투과율 변화곡선 대신에 위상변화곡선을 얻어 선경사각과 함께 액정층의 두께도 결정할 수 있음을 보였다.

II. 평행배향된 액정셀을 지난 빛의 위상변화

유리판에 폴리이미드(PI: Polyimide)나 폴리비닐알코올(PVA: Polyvinylalcohol) 등의 고분자막을 입혀 한 방향으로 문지르고 액정을 입히면, 액정분자의 장축이 문지른 방향과 나란히 정렬된다. 액정의 굴절을 이방성 때문에 빛이 액정층에 들어오면 서로 직교하는 두 편광성분의 굴절방향이 달라지고, 이와 함께 두 편광성분 사이에 위상차가 생긴다. 그림 2에서 액정층의 두께를 d , 액정분자의 선경사각을 α , 공기/유리 경계면에서의 빛의 입사각을 ψ , 액정층 속에서의 상광선(ordinary ray)과 이상광선(extraordinary ray)의 굴절각을 각각 γ 와 β 라고 하면 파장 λ 인 빛이 액정층을 지나올 때의 상광선과 이상광선의 위상차 $\delta(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$\delta(\psi) = \frac{2\pi d}{\lambda} \{ [n_o(\beta, \alpha)^2 - \sin^2 \psi]^{1/2} - [n_e(\gamma, \alpha)^2 - \sin^2 \psi]^{1/2} \} \quad (1)$$

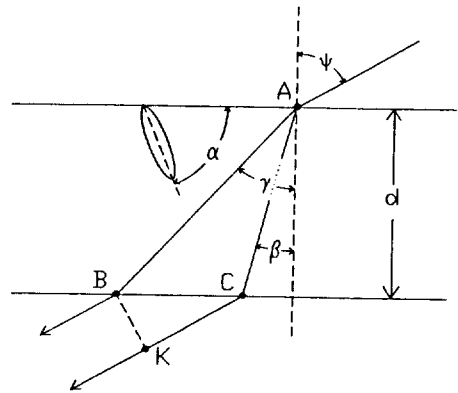


그림 2. 액정셀 안에서의 상광과 이상광의 경로.

여기에서 $n_o(\gamma, \alpha)$ 와 $n_e(\beta, \alpha)$ 는 각각 공기/유리 경계면에서의 입사각이 ψ 인 상광선과 이상광선에 대한 굴절율로서 다음 방정식을 만족한다.

$$\frac{1}{n_o(\beta, \alpha)} = \frac{\cos^2(\beta - \alpha)}{n_o^2} + \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{n_e^2} \quad (2)$$

이 두 식으로부터 액정층을 지나온 상광선과 이상광선의 위상차 δ 는 입사각 ψ 의 함수로서 다음과 같이 정해진다.

$$\delta(\psi) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left\{ \frac{a^2 - b^2}{c^2} \cos \alpha \sin \alpha \sin \psi + \frac{1}{c^2} (c^2 - a^2 \sin^2 \psi)^{1/2} - \left(\frac{1}{b^2} - \sin^2 \psi \right)^{1/2} \right\} \quad (3)$$

여기에서 a, b , 그리고 c 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$a = \frac{1}{n_e}, \quad b = \frac{1}{n_o}, \quad c^2 = \frac{\cos^2 \alpha}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{n_o^2} \quad (4)$$

III. 종래의 결정회전법과 문제점

결정회전법에서는 편광판과 검광판의 투과축의 방향을 90° 어긋나게 두고, 그 사이에 평행배향된 액정셀을 광축의 방향이 편광판의 투과축의 방향과 45° 를 이루게 둔다. 이 상태에서 액정셀을 돌려 입사각을 변화시키면서 편광투과율을 재면 다음과 같이 위상차 $\delta(\psi)$ 의 함수로 나타난다.

$$T = \frac{1}{2} [1 + \cos \delta(\psi)] \quad (5)$$

위상차 δ 는 액정분자의 장축에 대해 수직방향으로 진행할 때 가장 큰데, 평행배향된 액정셀에서는 액정분자의

선경사각에 따라서 최대값이 되는 방향이 조금씩 달라진다. 또한 진행방향이 달라지면 위상차가 줄어들어 그 방향을 중심으로 좌우로 대칭성을 띠므로 이 각을 대칭각 ψ_s 라고 하고, ψ_s 와 선경사각 사이의 관계를 아래 식에서 끌어낼 수 있다.

$$\frac{d\delta(\psi)}{d\psi} = 0 \quad (\psi = \psi_s) \quad (6)$$

식 (3)과 식 (6)으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{1}{c^2}(a^2 - b^2)\cos a \sin a - \frac{a^2 b^2}{c^2 \sqrt{c^2 - a^2 b^2 \sin^2 \psi_s}} \sin \psi_s + \frac{b}{\sqrt{1 - b^2 \sin^2 \psi_s}} \sin \psi_s = 0 \quad (7)$$

선경사각 a 가 작아서 $\sin a \approx a$ 로 근사할 수 있으면 다음 결과를 얻는다.

$$a = \arcsin \left\{ \frac{\sin \psi_s}{n_r + n_o} \right\} \quad (8)$$

종래의 결정회전법에서는 편광투과율 변화곡선의 대칭각 ψ_s 를 정하고, 대칭각이 작으면 식 (8)으로, 대칭각이 크면 식 (7)의 방정식을 풀어서 선경사각을 결정했다. 이 때 측정오차나 측정각의 범위제한은 주로 공기/유리 경계

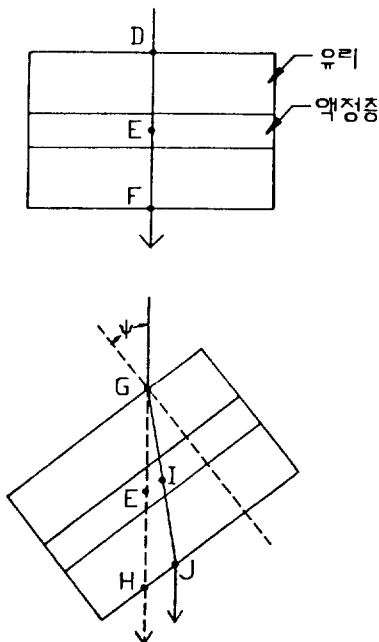


그림 3. 액정셀의 편광투과특성의 회전축정중 측정점의 이동.

면에서의 빛의 반사 때문에 생긴다. 입사각이 커지면 경계면에서 빛이 많이 반사되고, 다중반사효과가 크게 나타나 편광투과곡선의 대칭성이 떨어진다. 또한 그림 3에 보인 것처럼 입사각에 따라서 빛이 지나가는 길이 달라져 측정점이 이동한다. 액정셀의 회전중심이 E라면 빛이 지나가는 길은 수직 입사할 때는 DEF이지만 액정셀이 ψ 만큼 돌면 GIJ가 되어 측정점이 달라진다. 이러한 측정점이동을 줄이기 위해 회전중심을 액정층이 아닌 유리기판에 두기도 한다^[4,5].

공기에서 유리판을 거쳐 액정 속으로 들어가는 빛의 최대굴절각은 $\arcsin(1/1.56) = 40^\circ$ 이하로 제한된다. 따라서 선경사각이 10° 를 넘으면 편광투과곡선의 대칭중심을 정확히 결정하기 어렵다.

IV. 새로운 결정회전방법

유리판과 굴절율이 비슷한 액체를 채운 액체통(liquid gate) 속에 액정셀을 넣고 돌리면서 편광투과율을 재면 액체/유리 경계면에서의 빛의 반사가 거의 사라지고 측정점도 고정되며, 빛이 액정층에 들어가는 각도의 범위가 커져서 잴 수 있는 선경사각의 범위가 늘어난다.

액체통을 쓸 때의 입사각에 대한 위상차의 변화는 통속에 채운 액체의 굴절율을 n_{liq} 이라 할 때 식 (3)에서 $\sin \psi$ 대신에 $n_{liq} \sin \psi$ 를 넣은 다음과 같은 식이다.

$$\delta(\psi_{liq}) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left\{ \frac{1}{c^2} \cos a \sin a n_{liq}^2 \sin \psi + \frac{1}{c^2} (c^2 - a^2 b^2 n_{liq}^2 \sin^2 \psi)^{1/2} - \left(\frac{1}{b^2} - n_{liq}^2 \sin^2 \psi \right)^{1/2} \right\} \quad (9)$$

실험에서는 이 위상차를 다음과 같이 결정한다. 그림 4와 같이 액정셀과 검광판 사이에 사반파장판을 두고, 사반파장판의 느린축(slow axis)의 방향 δ 와 검광판의 투과축의 방향 ψ 를 조절하면서 액정셀을 지난 빛의 편광투과도 $I(\delta, \psi)$ 를 재는데, 특히 δ 는 45° 와 0° , ψ 는 45° 와 -45° 로 맞추어 재 다음 아래 식을 통해서 액정셀을 지나는 상광선과 이상광선의 위상차 $\delta(\psi)$ 를 구한다.

$$\delta(\psi) = -\arctan \left\{ \frac{I(0^\circ, 45^\circ) - I(0^\circ, -45^\circ)}{I(45^\circ, 45^\circ) - I(45^\circ, -45^\circ)} \right\} \quad (10)$$

이렇게 얻는 위상차의 범위는 $-\frac{\pi}{2}$ 에서 $\frac{\pi}{2}$ 까지로 제한되므로 이 값을 실제의 위상차로 바꾸려면 계산과정에서 사라진 π 의 정수배를 더해 주어야 한다. 실험에서

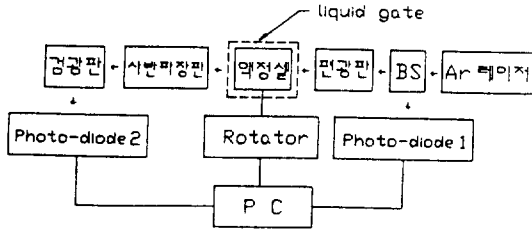


그림 4. 측정장치의 구성.

연은 이 위상차값을 액정의 두께와 굴절율 그리고 액정분자의 선경사각을 고려하여 이론적으로 설했한 결과와 비교하여 오차가 가장 작은 값으로 액정층의 두께와 선경사각을 결정한다.

V. 실험

실험장치를 그림 4와 같이 꾸미고 파장 488 nm인 레이저빔을 액체통 속에 잠긴 액정셀에 비추고 액정셀을 돌려가며 입사각에 따른 편광투과율의 변화를 쟈다. 액체통 속에는 글리세롤($\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$)을 채웠다. 액정셀의 회전범위는 레이저빔을 중심으로 $\pm 60^\circ$ 이고, 0.5° 돌 때마다 액정셀을 지나온 빛의 밝기를 쟈다. 레이저빔의 밝기는 시간이 지남에 따라서 약 3% 정도 변한다. 이것을 보상하려면 레이저빔을 두가닥으로 나누어, 하나는 곧바로 광다이오드(1)에, 다른 하나는 실험장치를 지나 광다이오드(2)에 들어가게 한다. 광다이오드(2)의 신호값을 광다이오드(1)의 신호값으로 나누면 레이저빔의 밝기변화의 효과가 지워진다. 평행배향된 액정셀에 Merck사의 ZLI 5100-100 네마틱 액정을 채운 다음 회전전에 놓고 편광판과 검광판의 투과축이 서로 수직이 되도록 하면서 편광판과 검광판을 돌려 소광각을 쟈는다. 소광이 되면 액정셀과 검광판 사이에 사반파장판을 끼우고 사반파장판의 광축을 돌려가며 소광되도록 한다. 편광판의 투과축과 액정셀의 문지른 방향 그리고 사반파장판의 광축이 모두 나란하고 검광판의 투과축이 편광판의 투과축과 수직이 되면 완전소광된다. 소광이 되면 편광판의 투과축을 액정셀의 느린 광축에 대해 45° 로 둔다. 검광판의 투과축을 조절하여 $I(0^\circ, 45^\circ)$ 과 $I(0^\circ, -45^\circ)$ 를 쟈고, 이어서 사반파장판을 액정셀의 느린 광축에 대해 45° 로 두고 검광판의 투과축을 조절하여 $I(45^\circ, 45^\circ)$ 와 $I(45^\circ, -45^\circ)$ 를 쟈다.

VI. 실험결과 및 토의

그림 5의 두 곡선은 평행배향된 액정셀을 각각 공기와

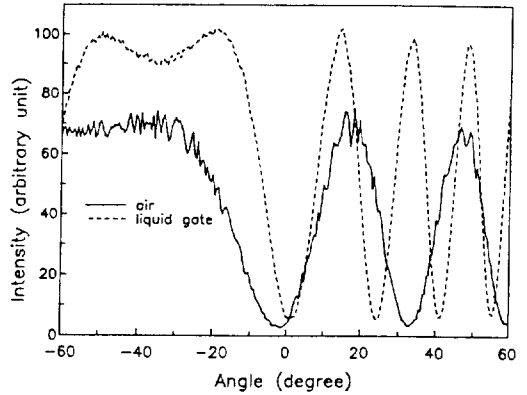


그림 5. 액정셀의 편광투과곡선의 한 예.
 실선 : 공기중에서 쟈 편광투과곡선
 점선 : 액체통에서 쟈 편광투과곡선.

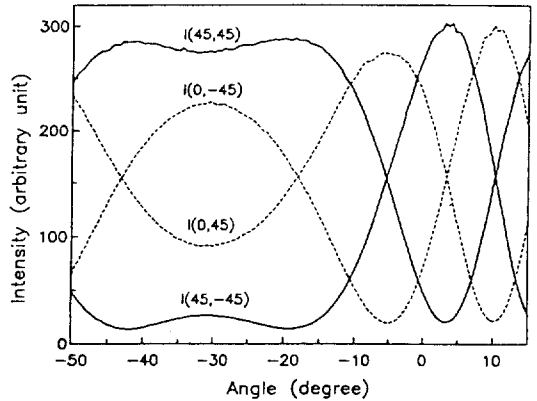


그림 6. 사반파장판의 광축과 편광판의 투과축의 방향을 달리하면서 쟈 편광투과곡선.

글리세롤을 채운 액체통 안에서 돌려가며 쟈 레이저빔살의 편광투과곡선이다.

배향막과 유리판 사이에 있는 바둑판 모양의 투명전극 때문에 레이저빔의 일부가 회절되어 완전소광은 이루어지지 않았다. 글리세롤을 채운 액체통 속에서 쟈 편광투과곡선이 공기중에서 쟈 것보다 봉우리가 더 높고 그 수도 더 많다. 글리세롤 속에서는 봉우리가 더 높아지는 까닭은 빛이 액정셀에 들어가고 나올 때 유리판의 표면에서의 빛의 반사가 줄었기 때문이고, 봉우리의 수가 더 많아지는 까닭은 액체통 속에서는 액정층에서의 굴절각의 범위가 커지기 때문이다. 그림 6은 사반파장판의 광축과 검광판의 투과축을 조건을 달리하여 쟈 평행배향된 액정셀의 편광투과곡선인데, 그 모양으로부터 대칭각이 약 -30° 임을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6의 편광투과곡선을 식 (10)에 넣어서

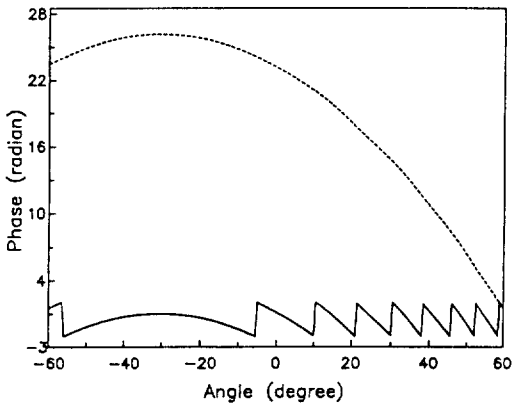


그림 7. 위상이어붙이기.

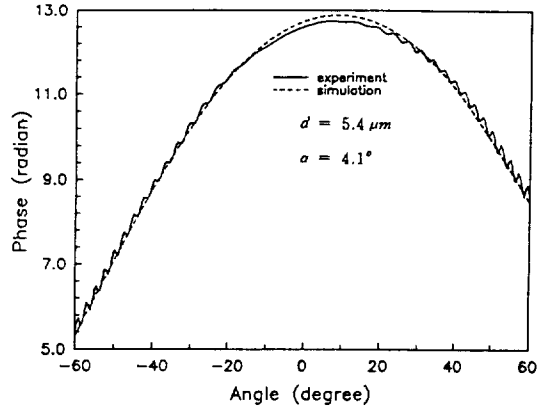


그림 9. 선경사각이 4.1°이고 액정층의 두께가 5.4 μm인 액정셀의 위상차값.

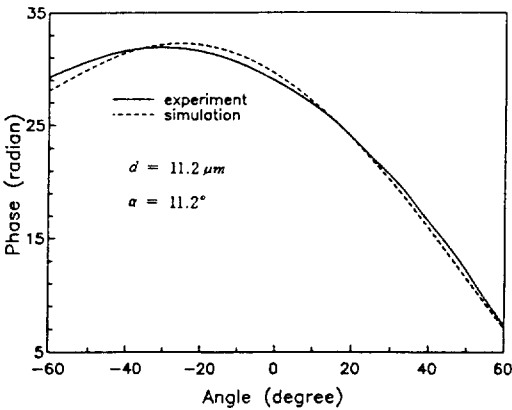


그림 8. 선경사각이 11.2°이고 액정층의 두께가 11.2 μm인 액정셀의 위상차값.

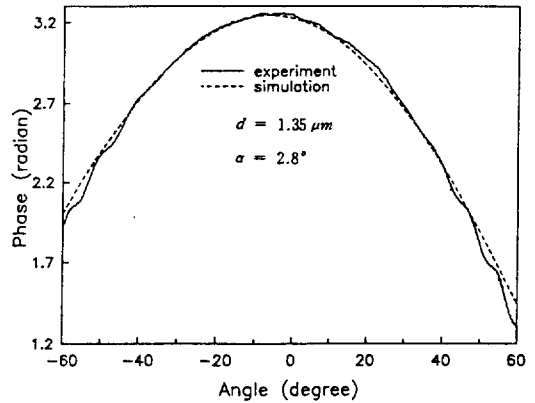


그림 10. 선경사각이 2.8°이고 액정층의 두께가 1.35 μm인 액정셀의 위상차값.

구한 것으로 입사각에 따른 액정셀의 위상차를 나타낸다. 아래 실선이 위상이어붙이기를 하지 않았을 때의 위상차로서 $-\frac{\pi}{2}$ 에서 $\frac{\pi}{2}$ 사이의 값을 가진다. 위 점선은 아래의 실선을 오른쪽부터 이어붙인 것이다. 그림 8은 그림 7에서 위상을 이어붙인 곡선을 π 만큼씩 올린 곡선과 식 (1)에서 두께와 선경사각을 변화시켜가면서 구한 이론값의 차이가 가장 작은 조건에서의 위상차값을 나타낸 것이다.

이론적으로 구한 액정셀의 두께는 11.2 μm이고 선경사각은 11.2°이다. 이 두 곡선이 아주 잘 맞지는 않는 까닭은 실험에 쓴 액정셀의 두께가 고르지 않기 때문인 것으로 짐작되는데, 그것은 나트륨등 밑에 액정셀을 두고 뉴턴 고리무늬를 보아 확인하였다. 액정셀의 두께와 선경사각을 변화시켜가면서 구한 이론값과 실험값을 비교한 결과 두께의 오차는 0.2 μm, 선경사각의 오차는 1.5°

이내로 결정할 수 있었다. 그림 9는 에폭시수지에 지름 7 μm의 간극체를 섞은 봉지제로 만든 평행배향된 액정셀의 위상차 곡선의 실험값과 여기에 가장 잘 맞는 이론값을 보여주는데, 액정셀의 두께는 5.4 μm이고 선경사각은 4.1°이다.

그림 10은 에폭시수지에 간극체를 넣지 않는 봉지제로 만든 평행배향된 액정셀의 위상차 곡선의 실험값과 여기에 가장 잘 맞는 이론값을 보여주는데, 액정셀의 두께는 1.35 μm이고 선경사각은 2.8°이다. 실험에서 얻은 위상차곡선은 액정층과 유리기판에서의 다중반사 때문에 잔물결모양이 생겼다. 이 잔물결은 액정층이 두꺼울수록 많아지지만 두께가 10 μm를 넘으면 입사각의 변화에 대한 위상차의 변화에 묻혀 다중반사의 효과가 잘 나타나지 않는다.

VII. 결 론

굴절율정합법과 위상이동기법을 써서 결정회전법을 개선하여 빛이 액정셀을 지나올 때 입사각의 변화에 따른 상광선과 이상광선의 위상차의 변화를 곧바로 결정하고, 이 결과를 이론적으로 썸한 결과와 비교하여 액정셀의 선경사각과 액정층의 두께를 한꺼번에 결정하였다. 굴절율정합법을 쓴 결과 액정층에서의 광선의 굴절각의 범위가 늘어나고, 액정셀의 유리판 표면에서의 빛의 반사가 크게 줄어 실험값이 더 정확해졌다. 위상이동기법을 쓴 결과 위상차를 직접 재고, 그 결과를 이론값과 비교할 수 있게 되어 측정값의 정확도가 크게 높아졌다. 이로써 종래의 방법으로는 켤 수 없었던 두께가 $10\ \mu\text{m}$ 이하이거나 선경사각이 10° 이상인 액정셀의 선경사각과 두께를 한꺼번에 결정할 수 있으므로 액정층의 두께가 특히 얇은 강유전성 액정표시소자(FLCD: Ferroelectric Liquid Crystal Display)나 선경사각이 큰 고해상도 TFT LCD(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display)의 선경사각과 액정층의 두께를 재는데 유용할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] I. C. Khoo and S. T. Wu, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals* (World Scientific, Singapore, 1993).
- [2] B. Bahadur, *Liquid Crystal Applications and Uses, Vol. 1* (World Scientific, Singapore, 1989).
- [3] T. J. Scheffer and J. Nehring, "Accurate Determination of Liquid Crystal tilt bias angles," *J. Appl. Phys.* **48**, 1783 (1977).
- [4] K. Y. Han, T. Miyashita, and T. Uchida, "Accurate Measurement Method and Measurement Error of Pretilt Angle in Liquid Crystal," 3rd Japan-Korea Joint Symposium on Information Display (1992).
- [5] K. Y. Han, P. Vetter, and T. Uchida, "Determination of Molecular Inclination in Rubbed Polymer for Liquid Crystal Alignment by Measuring Retardation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, L1242 (1993).

An Improved Crystal Rotation Method for Simultaneous Measurement of Pretilt Angle and Thickness of a Liquid Crystal Layer

Gong Sook Sohn, Chan Park, Hee Gap Park and Jin Seung Kim
School of Physics and Technology, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Bong Gyu Rho
Hyundai Electronics Co., Ltd., Ichon, 467-860, Korea

Hyong Jong Lee
Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Jae Ki Kim
Agency of Defence Development, P. O. Box 35, Taejeon 305-600, Korea

(Received: May 13, 1996)

An improved crystal rotation method with increased accuracy and range is proposed and experimentally verified for simultaneous measurement of molecular tilt angle and thickness of LC (liquid crystal) layer of an LC cell. The improvement is brought about by direct determination of difference between phases instead of intensities of two components of orthogonal linear polarization of the light passing through an LC cell filled with uniformly oriented molecules. By comparing the experimental data with theoretical result the thickness and pretilt angle are determined more precisely. Further improvement is brought about by use of a liquid gate filled with an index matching liquid in which the LC cell is immersed. Because of the index matching liquid reflection of light at the surfaces of an LC cell almost completely disappears and the range of angle of refraction in the LC layer increases significantly, which gives rise to increased signal to noise ratio as well as decreased statistical error. With this improvement precise measurement for either very thin ($<10\ \mu\text{m}$) and/or higher pretilt angle ($\geq 10^\circ$) LC cells become possible.