

의료용 초박막 액정의 광배향 제어와 광변위 전류 특성

Properties of Photo-regulation of Liquid Crystal Alignment and Generation of Maxwell-displacement-current for Application with a Medical Engineering Device

이호식¹, 안준호², 김우연³, M. Iwamoto¹, 이원재^{4,a}
(Ho Shik Lee¹, Joon Ho Ahn², Woo Yeon Kim³, M. Iwamoto¹, and Won Jae Lee^{4,a})

Abstract

Maxwell-displacement-current (MDC) measuring technique has been applied for the investigation of monolayers of poly(vinyl alcohol)s bearing azobenzene side-chains (6Az5PVA) mixed with p-pentyl-p'-cyano-biphenyls (5CBs) on a water surface. For mixed monolayers containing trans-form 6Az5PVA and LCs, displacement current due to photo isomerization was not generated with alternative photo-irradiation with UV and visible light. In contrast, for mixed monolayers containing cis-form 6Az5PVA and LCs, displacement current was generated. Finally, it was found that the alignment layers deposited in cis-form could photoregulate the orientation of LCs.

Key Words : Displacement current, Langmuir-blodgett film, Command surface, Photoisomerization, Regulation of liquid crystal

1. 서 론

반도체 기술과 이를 응용한 정보처리 기술이 발달됨에 따라 정보를 취득하는 방법, 즉 센서에 관한 기술의 진보와 고속화가 요구되고 있다. 특히 센서는 대상에 따른 분류가 매우 중요시 되고 있으며, 그중에서도 바이오센서는 각종 생체 재료와 변환기를 조합하여 구성하는데 조합이나 구성에 대한 여러가지가 제안되고 있다. 바이오센서의 원리는 측정 대상물질을 선택적으로 식별하는 부위, 즉 리셉터 (receptor)와 어떠한 변화를 전기 신호로 변환하는 부위 즉, 변환기 (transducer)로 구성된다. 이러한 구조에서 특히 리셉터에 이용하는 물질을 무엇으로 하느냐에 따라 센서가 분류된다[1]. 본 연구에서는 아조벤젠 분자의 트랜스-시스 광이성화 반응을 이용한 광배향 제어 기술에 관한 연

구를 통하여 새로운 생체 센서의 응용에 접근하고자 하는 것이 주목적이다. 기관 표면상의 분자의 광이성화에 의한 구조변화가 액정분자의 배향을 제어하는 것이기 때문에 이 기술은 command surface라고 이름붙이고 있다. 이 광배향 제어 기술에서는 기관표면분자의 광이성의 구조 변화 자극을 효율 좋게 액정분자에 전달시키는 것이 기본으로 되지만 그 전달 기구의 자세한 내용은 확실하지 않다[2]. 그런데 수면 상에 전개된 유기단분자막이 전기 물성을 평가하는 방법으로써 변위 전류법을 제안하고 있다. 압력·광 등이 자극을 단분자막에 줄 때 극성분자의 배향변화나 분자의 광이성화에 따라 변위 전류가 발생하기 때문에 수면 등의 물질 표면에서의 분자 자극전달 기구를 해명하는 외에 변위 전류법은 유효하다고 생각된다[3-6].

따라서, 본 연구에서는 command surface의 기본으로 되는 6Az5PVA 아조벤젠 분자로부터 시아노비페닐계의 액정분자로의 자극 전달 기구를 명확하게 하기 위하여 광 자극 변위 측정 연구를 수행한다. 또한 본 연구에 사용한 물질의 의용 공학적 소자로서의 응용가능성도 함께 연구하고자 한다.

1. 동경공업대학 전자물리공학과
2. 홍익대학교 과학기술연구소
3. Enhanced Brightness Technology Co.
4. 경원전문대학 전자정보과
(경기도 성남시 수정구 복정동 산 65)
a. Corresponding Author : wjlee@kwc.ac.kr
접수일자 : 2006. 10. 27
심사완료 : 2006. 11. 14

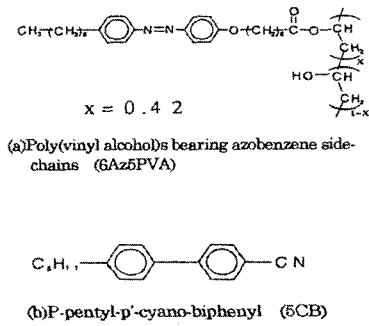


그림 1. 분자 구조.
Fig. 1. Molecular structure.

2. 실험

2.1 시료

실험에 이용한 아조벤젠분자 (6Az5PVA)는 그림 1(a)에 나타난 측쇄 가운데 아조기를 갖는 폴리머이다. 측쇄는 알킬쇄에 의해 적당한 간격을 유지하고 있기 때문에 단량체에서는 시스-트랜스 광이성화 반응이 진행하기 쉽다. 아조기는 트랜스체에서 안정하지만 파장 360 nm 전후의 자외선을 조사하면 시스체로 변환한다. 또한 시스체일때는 파장 450 nm 전후의 가시광을 조사하면 시스체로부터 트랜스체로 변화한다. 이러한 시스체와 트랜스체 사이에서의 가역적인 구조 변화에 따라 양자간의 쌍극자 능률이 큰 변화가 나타난다. 그 결과 변화과정에서 변위 전류를 측정 할 수가 있다[7,8].

실험에 이용한 액정 분자는 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 시아노 비페닐계의 p-pentyl-p'-cyano-biphenyl (5CB) 분자이다. 5CB 분자는 친수성이 시아노 (CN) 기와 친수성의 알킬기를 양단에 갖고 있으며 수면 상에서는 친수성의 시아노기를 수면 측으로 하여 단분자막을 형성한다.

분자는 두 개의 페닐기를 갖고 있기 때문에 수직 봉형 구조이며 장축방향으로 큰 다이폴모멘트를 갖고 있다. 액정분자 (5CB)와 아조벤젠 분자 (6Az5PVA)를 분자수비가 1:1로 되도록 조합하여 클로로포름(1 mmol/l)에 용해시켜 전계용액으로 한다. 아래에 수면상 혼합 단분자막의 실험과 액정 셀 실험에 대해서 논의 한다[9].

2.2 혼합막의 변위 전류 측정

(a) 측정장치

실험에 이용한 장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. LB trough (Nippon Laser Co.)는 장방향

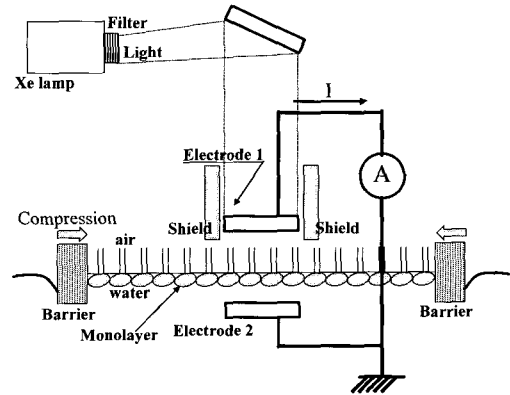


그림 2. 변위 전류 측정 장치의 개략도.
Fig. 2. Block diagram of the displacement current measurement equipment.

형으로 두 개의 가동 베리어에 의해서 유효 면적이 변화되도록 하고 있다. 전극 1은 원형의 ITO 투명전극이고 그 면적은 45.6 cm²이다. 트러프 중앙 위치에는 Wilhelmy형 표면압계가 배치되어 있고 변위 전류와 표면압이 동시에 측정된다. 전극 2는 수중에 배치되어 금선에 의해 고감도 직류 전류계 (Keithley 617)를 통하여 전극 1과 단락되고 있다. 변위 전류는 전극 1로부터 하부전극 2로 흐르는 방향을 플러스로 하여 기록했다. 한편 노이즈를 제거하기 위하여 전극 1을 금속제의 쉴드로 에워쌌다. 광원은 500 W의 Xe 램프(UI-501C)이고 밴드패스필터 (Mells Griot제)를 통해서 단색광으로 하여 투명전극 1을 통해서 분자 막에 입사하고 있다.

한편 단색광화에서는 380 nm와 450 nm의 두 종류의 밴드패스필터가 이용되고 있다. 또한 각각의 투명광의 강도는 0.2 mW/cm², 2.0 mW/cm²이다.

(b) 변위전류 측정

그림 2에 나타난 것과 같이 유기 분자 막을 사이에 두고 상하 두 개의 전극이 전류계를 통해서 단락하고 있다. 이때 전극 1에서는 (1)식에서 나타낸 전하 Q가 유기된다.

$$Q = -\frac{m_z}{d} N - \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d \Phi_s} \quad (1)$$

단 ϵ_0 : 진공유전율, ϵ : 공기의 비유전율(=1),
 d : 전극 1과 수면의 거리, S : 전극 1의 면적,

Φ_s : 물의 표면전위, m_z : 분자가 갖는 쌍극자 모멘트의 수직성분 평균치, N : 전극 1아래 수면 상의 분자수.

지금 유기 분자 막에 외부에서 광 자극을 가하면 유기 분자 막의 광이성화의 구조가 변화하고 m_z 가 변화한다. 그 결과 수면과 전극 1 사이에 전속 밀도가 변화하기 때문에 변위 전류가 흐른다.

$$\frac{I(-dQ)}{dt} = \frac{N}{d} \frac{dm_z}{dt} + \frac{m_z}{d} \frac{dN}{dt} + \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (2)$$

변위 전류 I 는 (1)식을 시간 t 로 미분하여 쓰여 질 수 있다. (2)식으로부터 변위 전류 I 는 3개의 원인으로 흐르는 것으로 알 수 있다. 우변의 제 1항은 분자의 배향 상태가 변화해서 쌍극자 모멘트의 수, 성분 m_z 가 변화할 때에 흐르는 전류를 나타낸다. 우변의 제 2항은 전극 아래에 존재하는 분자의 수가 변화할 때 흐르는 전류, 제 3항은 물의 표면 전위 Φ_s 가 변화할 때에 흐르는 전류이다. 이들은 어느 것도 광이성화에 의해서 크게 변화하지는 않아서 무시할 수 있다. 실험에 의해서 측정된 변위 전류 I 를 시간 적분하면 전극 1에 유기된 전하량의 변화량 ΔQ 가 구해진다. ΔQ 로부터 다이폴 모멘트의 변화량 Δm_z 를 계산할 수 있다. 실험에서는 혼합 단분자막의 광조사에 의해 흐르는 변위전류를 측정한다.

2.3 액정 셀의 측정

(a) 액정 셀의 제작

기판으로써 ITO 전극을 평면 증착한 유리 기판을 이용했다. 아조벤젠에 자외광 (360 nm)을 30분간 조사하여 시스체로 한 후 표면압 10 mN/m에서 1층의 분자 막을 기판 상에 누적했다. 그 후 기판을 끌어 올리는 방향이 반 평행이 되도록 두 개의 기판을 배치하고 셀 두께 25 μm 의 액정 셀을 제작했다. 한편 액정 분자(5CB)는 모세관 현상을 이용해서 셀 내에 주입한다. 똑같이 트랜스체의 아조벤젠 분자 막을 누적한 기판을 이용한 셀도 이용했다.

(b) 측정장치

그림 3은 액정 셀의 투과율 측정 장치의 개략도이다. 셸드 박스 내에 ITO 전극을 갖는 액정 셀을

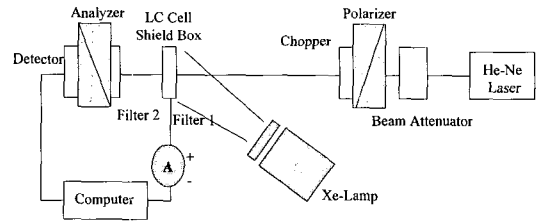


그림 3. 액정 배향의 투과율 측정 장치 개략도.

Fig. 3. Block diagram of the transmittance measurement equipment of the Liquid crystal arrangement.

설치했다. 광이성화 때문에 광원은 500 W의 Xe램프(UI-501)로써 밴드 패스 필터를 이용하여 단색광으로 만든다.

실험에서는 360 nm, 450 nm의 두 종류의 밴드 패스 필터가 이용되고 자외 또는 가시광을 이용했다. 액정 투과 강도의 측정은 He-Ne 레이저 (NEC GLC 5020, 파장은 633 nm)를 이용한다. 레이저 광은 직접 측정하면 강하기 때문에 감광기으로써 광량을 조정한다. 또한 폴라라이저 뒤로 초퍼를 설치하여 디텍터와 로그인 앰프를 이용하여 접속해서 레이저 광 이외의 파장을 갖는 광의 영향을 적게 하고 있다. 에널라이저의 앞에는 500 nm 이하의 파장을 차단하는 밴드 패스 필터를 설치한다.

(c) 광투과강도의 측정

5CB 액정은 광학적 일축결정과 똑같은 광학 이방성을 갖고 액정 분자의 장축이 양 기판 상에 대해서 수평에 나란한 호모지니우스 배열, 수직으로 나란한 호메오트로픽 배열에 대해서 그 광축이 액정 분자의 장축 방향과 수직 또는 평행으로 한다. 셀의 아조벤젠 분자 배향막이 시스체 일때는 그림 4(a)와 같은 액정 분자 배향(호모지니우스 배열)로 되어 있다. 따라서 입사 직선 편광은 셀 통과시에 복굴절을 받지 않기 때문에 제 2의 편광자는 통과하지 않는다. 또한 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 아조벤젠 분자가 트랜스체 배향막으로 변화할 때 (호메오트로픽 배열), 입사 직선 배향은 복굴절에 의해 타원 편향으로 되며 일부의 광은 제 2의 검광자를 통과한다. 투과광 강도를 I 로 하면 I 는 다음과 같이 나타낸다.

$$I = I_0 \sin^2(2\beta) \sin^2[\pi d \Delta n(a)/\lambda] \quad (3)$$

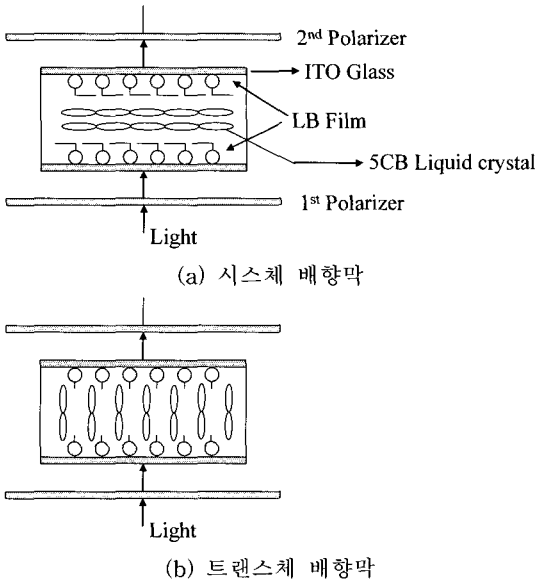


그림 4. 배향막에 의한 액정의 배열.
Fig. 4. Arrangement of the liquid crystal with polarized film.

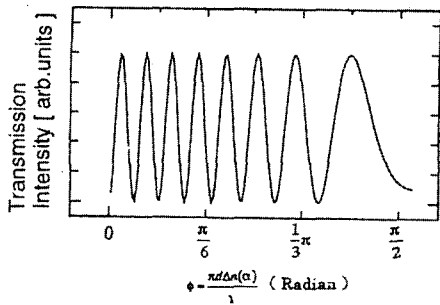


그림 5. 투과광 강도의 이론 곡선.
Fig. 5. Curve of the theory with intensity of the transmitted light.

여기서 I_0 는 입사광의 강도, β 는 입사 편광 방향과 셀내 광파의 각도를 나타낸다.

d 와 $\Delta d(\alpha)$ 는 각각 셀 두께, 프리틸트 각이 α 때의 액정의 복굴절율을 나타낸다. 또한, λ 는 입사광의 파장을 나타낸다.

(3)식으로 부터 아조벤젠 분자를 배향 처리한 액정 셀에 광 조사하면 배향막이 시스-트랜스체로 역동적으로 움직이면 광투과 강도의 강약이 나타나는 것을 알 수가 있다.

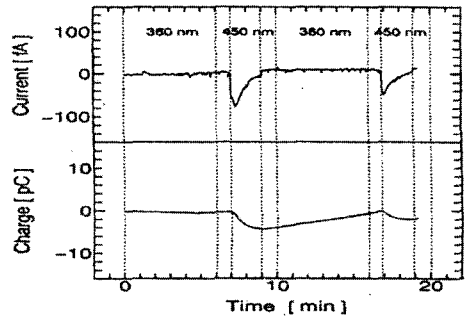
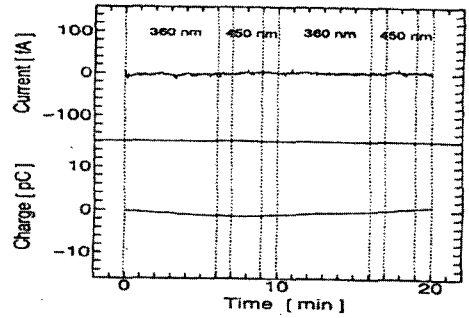


그림 6. 수면상의 6Az5PVA와 5CB 혼합막의 광변위전류.

Fig. 6. Optical displacement current of 6Az5PVA and 5CB mixed molecule on the water surface.

이번에 이용된 액정셀 ($\theta = 1/4\pi$, $d = 25\mu m$, $\lambda = 633nm$)의 액정분자인 비페닐계 (5CB)를 예를 들면 복굴절율(Δn)이 0.18~0.23이기 때문에 호메오토로픽 배열로부터 호모지니우스 배열로 90° 회전하면 광강도는 그림 5와 같이 8개 정도의 강약이 보인다.

3. 실험 결과와 검토

3.1 혼합 단분자막의 광자

그림 6(a), (b)는 분자당 점유면적 100 \AA^2 에서 트랜스체와 시스체로 전개한 6Az5PVA와 액정분자(5CB) 혼합막으로 자외광과 가시광으로 교대로 조사할 때 광변위 전류가 나타난다. 트랜스체로 전개한 막에서는 광자극에 의한 변위전류는 흐르지 않는다.

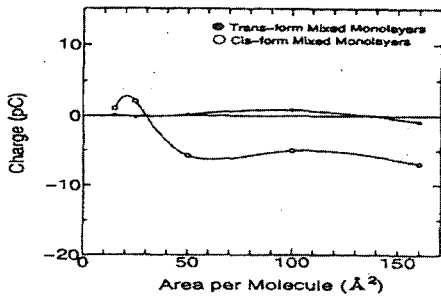


그림 7. 6Az5PVA와 5CB 혼합막의 전하량 비교.
 Fig. 7. Compare of charge amount with 6Az5PVA and 5CB mixed molecule.

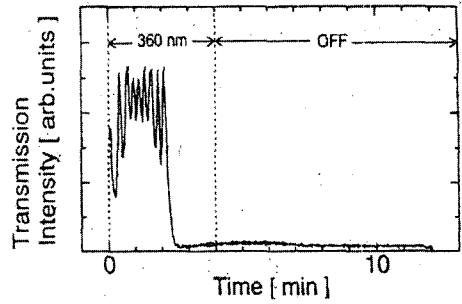
이것은 트랜스체의 아조벤젠 분자와 액정분자 (5CB)의 간격이 너무 좁아서 두 분자 사이의 상호작용이 강할 때 아조벤젠 분자의 광이성화가 저해되기 때문이다. 한편, 시스체의 혼합막에서는 광조사에 의해서 변위전류가 크게 흐른다. 이것은 아조벤젠 분자를 시스체로 하면 아조벤젠 분자와 5CB 분자의 간격이 유지되고, 분자간의 상호작용이 약해서 아조벤젠의 광이성화 반응의 진행은 저해되지 않기 때문이라고 생각된다.

그림 7에 혼합 막의 전하량을 넓은 점유면적 (160 Å²) 으로부터 좁은 점유면적까지 트랜스체로부터 시스체로 아조벤젠 분자가 변화하는 경우에 흐른 전하량을 비교한 것이다. 트랜스체 막으로 전개할 때는 전하량의 변화는 거의 보이지 않지만 시스체 막에서는 전하량 변화가 확인된다.

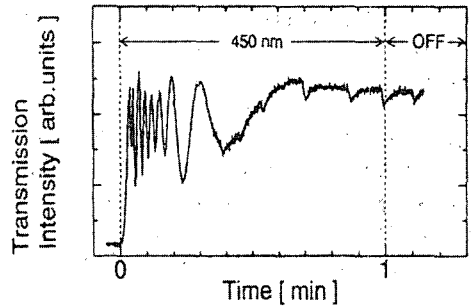
이 결과로부터 시스체막으로 하면 광이성화가 발생하지만 트랜스 막에서는 광이성화가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2 광이성화에 의한 액정셀의 배향 제어

본 실험에서 이용된 액정 셀의 구조는 그림 4(a), (b)에 나타내고 있다. 시스체의 아조벤젠 분자를 기판 상에 누적할 때에는 그림 4(a)와 같이 액정 분자가 유리면에 평행으로 나란한 호모지니우스 배열이 얻어지고 있다고 생각된다. 그림 8(a)는 가시광 (450 nm)의 광을 1분간 주고 그 후 30초간 차광했을 때의 그림이다. 광조사하지 않은 경우에는 레이저광의 진행방향은 액정배열 셀의 광축과 수직이다. 따라서, 입사 직선편광은 셀 통과시에 복굴절을 받지 않기 때문에 제 2의 광 검출기를 통과할 수 없다. 한편 가시광을 조사하면 아조벤젠 분자 시스체의 배향막이 트랜스체로 변화한다.



(a) 시스체 → 트랜스체



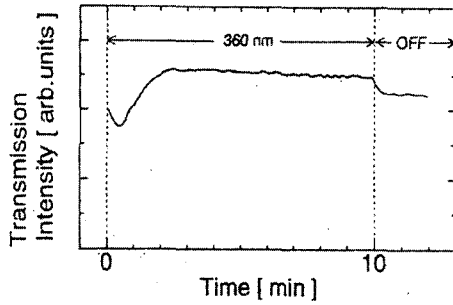
(b) 트랜스체 → 시스체

그림 8. 액정셀의 변위전류 및 투과율 측정 결과 (cis state).

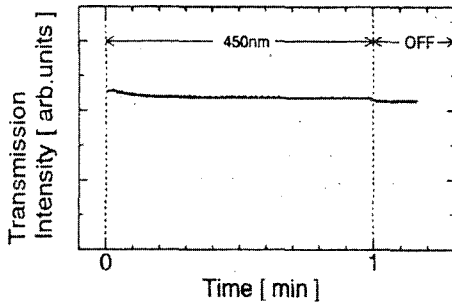
Fig. 8. Transmittance and displacement current of the LC cell (cis state).

이 자극에 의해 액정분자는 서서히 호메옴트로픽스로 변화해버리고, 즉, 액정의 광축이 서서히 기울어진다. 이러한 액정분자의 회전에 의해서 입사직선편광은 타원 편광으로 변하고, 그 일부는 검광자를 투과하게 된다. 그림에서 보여진 대로 가시광 조사에 의해 8개의 투과강 강도의 강약이 나타나기 때문에 그림 4에서 추정된 바와 같이 분자는 호모지니우스로부터 호메옴트로픽스 배열로 화하고 있다고 추정할 수 있다.

그림 8(b)는 360 nm의 광을 4분간 주었을 때의 결과이다. 시스체로부터 트랜스체로 변화한 아조벤젠 배향 막은 트랜스체로부터 시스체로 돌아오는 과정에서 액정분자를 호메옴트로픽 배열로부터 호모지니우스로 배열시키는 것을 알 수 있다. 이 때문에 거듭된 광투과 강도로 8개의 강약이 나타나고 있다. 한편, 이러한 변화는 어느 정도 반복해도 나타난다. 트랜스체의 아조벤젠 배향 막의 액정셀을 제작하여 똑같이 자외광과 가시광을 조사하는 실험을 하였다.



(a) 트랜스체 → 시스체



(b) 시스체 → 트랜스체

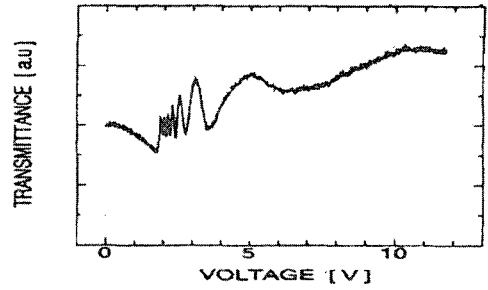
그림 9. 액정셀의 변위전류 및 투과율 측정 결과 (trans state).

Fig. 9. Transmittance and displacement current of the LC cell (trans state).

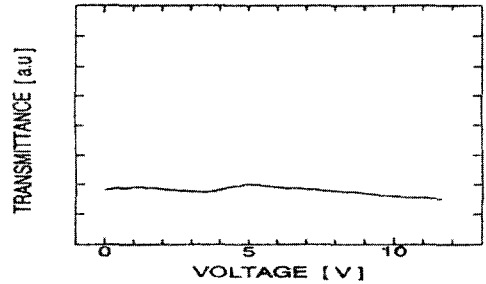
그림 9(a), (b)에 나타난 바와 같이 광투과 강도의 변화가 나타나지 않았다. 아조벤젠 분자의 트랜스체 배향 막은 앞에서 논의했던 수면상의 아조벤젠 분자와 액정분자 혼합 막의 결과와 똑같이 아조벤젠 분자의 간격이 좁기 때문에 광이성화가 저해되기 때문이라고 생각된다. 즉, 트랜스체 아조벤젠 배향 막의 액정셀에서도 광이성화는 일어나지 않아, 액정분자로의 자극이 전달되지 않았다고 생각된다.

이상의 결과로부터 수면 상에 전개된 혼합단분자막의 광이성화와 액정 셀의 광배향 제어사이에는 강한 상관관계성이 있다는 것을 알게 되었다. 이러한 상관성을 이용하면 수면상 혼합 분자 막의 광이성화를 조사함으로써 셀을 제작하지 않고서도 액정 셀의 광배향제어성을 예측할 수 있을 것이라고 추정된다.

현재, 액정 셀을 이용해서 그림 8, 9의 과정에서 변위전류를 동시 측정해 보았다. 이러한 측정으로 자극전달의 형태가 더욱 명확해지리라 생각된다.



(a) 트랜스체 → 시스체



(b) 시스체 → 트랜스체

그림 10. 전압 인가에 의한 광투과율의 측정.

Fig. 10. Transmittance measurement with applied bias voltage.

3.3 인가전압에 의한 광투과율

현재 실용화되고 있는 액정 디스플레이는 인가 전압에 의해서 액정을 배향시키는 것에 기초하고 있다. 본 실험에서는 그림 4(a), (b)와 같은 시스체 및 트랜스체 배향 막에 의한 액정 셀을 이용했다. 5CB 액정은 유전 이방성이 네마틱스성 및 광학적 일축성 결정과 같은 광학 이방성을 갖고 있지만, 그 광축이 액정분자 장축과 일치하고 있기 때문에 전압을 인가하지 않은 경우에는 광의 진행 방향은 호모지니우스 배열 셀 (그림 4)의 장축과 수직으로 된다. 따라서, 입사 직선 편광은 셀 통과시에 복굴절을 받지 않기 때문에 광 검출기를 통과할 수 없다.

한편 인가 전압이 문턱전압(V_{th})을 넘어서면 전기적인 에너지가 최소가 되도록 액정분자의 장축 방향 즉, 전기 쌍극자 모멘트가 전계방향으로 평행하게 배향한다. 액정분자의 배열이 셀의 중앙에서부터 서서히 분자축이 일정 각도씩 변화하지만 동시에 전기적인 성질도 변화한다.

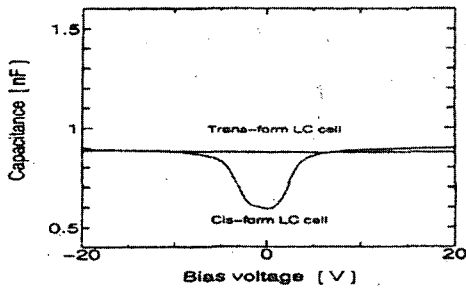


그림 11. 전압 인가에 의한 트랜스체의 용량 변화.
Fig. 11. Capacitance with applied bias voltage on trans state.

그림 11과 같이 시스템 배향 액정 셀의 정전 용량이 증가한다. 이 각도는 전압의 증가에 따라 크게 되며, 입사 직선편광은 복굴절에 의해 타원 편광으로 변화하고 일부의 광은 광검출기를 통과하도록 한다.

이 광통과 강도는 (3)식에 의해서 그림 10(a)와 같이 나타난다. 그림 3(b)와 같은 트랜스체의 액정 셀에서는 그림 10(b)와 같이 투과율이 나타나지 않는다. 이는 처음부터 액정의 배향이 호메오토ropic으로 되어 있어서 전압을 인가하여도 변화가 없다고 생각된다.

4. 결론

변위 전류법을 이용하여 수면상의 아조벤젠 분자 6Az5PVA와 액정분자(5CB) 혼합 막의 광자극 전달에 대해서 연구하였다. 트랜스체 혼합 막의 전개 막에서는 아조벤젠 분자와 액정 혼합막과의 상호작용이 강하여 광조사를 하여도 광이성화반응이 일어나지 않고 광 변위전류는 흐르지 않는다.

한편, Langmuir-Blodgett(LB)법을 이용하여 아조벤젠 분자의 시스템과 트랜스체 막을 누적한 후 액정 셀을 제작하여 광이성화 반응에 의한 자극이 액정에 전달하는 조건에 대해 조사하였다. 그 결과, 시스템의 배향막에서는 광투과율의 변화가 나타나지만, 트랜스체의 배향 막에서는 나타나지 않음을 알았다.

또한 본 연구에서는 command surface의 기본으로 되는 6Az5PVA 아조벤젠 분자로부터 광 자극 변위 측정을 통하여 본 연구에 사용한 물질의 의

용 공학적 소자로서의 응용가능성도 함께 연구하여, 그 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 홍승호, "바이오센서", 의공학회지, 10권, 2호, p. 109, 1989.
- [2] 신훈규, 손정호, 김병상, 권영수, "아조벤젠이 기능화된 덴드리머 유기단분자막의 광학적 거동", 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, p. 627, 2002.
- [3] 박근호, 박태곤, "지방산과 폴리아미드산 혼합물의 광이성질화 현상에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 8호, p. 695, 2002.
- [4] T. Seki and K. Ichimura, "Formation and langmuir-blodgett deposition of monolayers of poly(vinyl alcohol)s bearing azobenzene side-chains of varied spacer length", Thin Solid Films, Vol. 179, p. 77, 1989.
- [5] M. Iwamoto, Y. Majima, H. Naruse, T. Naruse, T. Noguchi, and H. Fuwa, "Generation of maxwell displacement current across an azobenzene monolayer by photoisomerization", Nature, Vol. 353, p. 645, 1991.
- [6] 이호식, 이원재, 장경욱, 최명규, 이성일, 김태완, M. Iwamoto, 이준용, "Polyimide 터널 장벽을 이용한 Au/polyimide/유기 단분자막/Pb 구조에서 비탄성 전자 터널링에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 2호, p. 196, 2004.
- [7] W. Y. Kim and M. Iwamoto, "Maxwell displacement current across azobenzene polyimide multilayers caused by photo-irradiation", Thin Solid Films, Vol. 585, p. 284, 1996.
- [8] Y. Majima, H. Naruse, and M. Iwamoto, "Detection of optical molecular switching in monolayers by displacement current measurement", Thin Solid Films, Vol. 210, p. 82, 1992.
- [9] S. Matsumoto and I. Tsunoda, "Liquid Crystals Fundamentals & Applications", Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd in japan, 1991.