

# CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에서의 네마틱액정의 프리틸트각 발생과 광배향 TN-LCD의 전기광학특성

논문  
12-2-12

## Generation of Pretilt Angle in NLC and EO Characteristics of Photo-aligned TN-LCD on Soluble Polyimide Surface Containing Trifluoromethyl Moieties

서대식\*, 박태규\*

(Dae-Shik Seo\* and Tae-Gyu Park\*)

### Abstract

The generation of pretilt angle in nematic liquid crystal (NLC) and electro-optical (EO) characteristics of photo-aligned twisted nematic (TN)-LCD with oblique p-polarized ultraviolet (UV) light irradiation on the two kinds of the soluble polyimide (PI) surfaces containing trifluoromethyl moieties were investigated. The generated pretilt angle of NLC is about 2.5° with P-polarized UV light irradiation of 20° on PI-3 surface at 20 min. However pretilt angle of about 0.5° are observed on PI-1 and PI-2 surfaces. The generated pretilt angle of NLC on PI-3 surface may be attributed to the trifluoromethyl moieties attached to the lateral benzene rings. The voltage-transmittance and response time characteristics of photo-aligned TN - LCD with p-polarized UV light irradiation of 20° on PI-1 surface at 20 min were almost same in comparison with the rubbing-aligned TN-LCD. However, the high threshold voltage and slow response are observed on PI-3 surface. Also, the decay time  $\tau_d$  of photo-aligned TN-LCD is attributed to the anchoring energy of NLC.

**Key Words(중요용어)** : Nematic liquid crystal(네마틱 액정), Soluble polyimide(가용성 폴리이미드), Photo-alignment(광배향), Pretilt angle(프리틸트각), EO characteristics(전기광학특성), Response time(응답속도)

### 1. 서 론

최근, 정보표시소자로서 휴대화, 저소비전력 그리고 고화질등의 특징을 지닌 액정디스플레이(liquid crystal display : LCD)가 각광을 받고 있다. LCD 소자에 있어서 고체 기판 위에 액정분자를 한 쪽방향으로 균일하게 배열시키기 위한 방법인 액정배향처리기는 전기광학 특성을 향상시키기 위한 중요한 요소기술이다. 현재 액정배향처리법으로는 개발 초기부터 러빙천 등을 이용하여 고분자 표면을 문지르는 러빙처리법이 사용되어 왔다<sup>1-5)</sup>. 그러나, 이 러빙처리법은 러빙천이 기판표면과 기계적으로 접촉하는 방식으로서 러빙시에 오물 및 정전기 등이 발생하여 TFT(thin-film-transistor) 소자를 파괴하는 등의

영향을 미치고 있다<sup>6)</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 기계적인 러빙처리를 하지 않는 너러빙 처리법(rubbingless method)이 강하게 요구되고 있다. 현재, 여러 종류의 너러빙처리법 중에서도 광배향처리법이 큰 기대를 모으고 있다.

광배향처리법 중에서도 광분해법은 Hasegawa 등이 제안한 것으로 폴리이미드 표면에 직선 편광된 자외선을 조사하여 특정한 방향을 향한 분자의 부분 결합을 선택적으로 절단하는 광분해 반응을 이용하여 광학 이방성을 발생시켜 액정분자를 배열시키는 방식이다<sup>7)</sup>. 최근, 폴리이미드 표면에 UV 광 조사시의 액정배향 및 프리틸트각 발생에 관하여 여러 연구자들에 의하여 보고되었다<sup>8-13)</sup>. 그리고, 본 저자 등은 폴리이미드 표면에 UV 광을 경사 조사시의 액정배향, 프리틸트각의 발생 그리고 광배향 TN-LCD의 전기광학특성등에 관하여 보고하였다<sup>14-17)</sup>. 본 연구에서는 CF<sub>3</sub>기를 포함한 2 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 경사 조사시의 네마틱액정의 프리틸트각 발생과 광배향 TN-LCD의 전기

\* : 송실대학교 전기공학과  
(서울시 동작구 상도 5동 5가 1-1, Fax : 02-817-7961 E-mail : dsseo@elecprw.soongsil.ac.kr)  
1998년 10월 26일 접수, 1999년 1월 29일 심사완료

광학특성 등에 관하여 검토하였다.

## 2. 실험

본 실험에서 사용한 3 종류의 폴리머의 분자구조를 그림 1에 나타내었다(Japan Synthetic Rubber Co., Ltd. 제공).

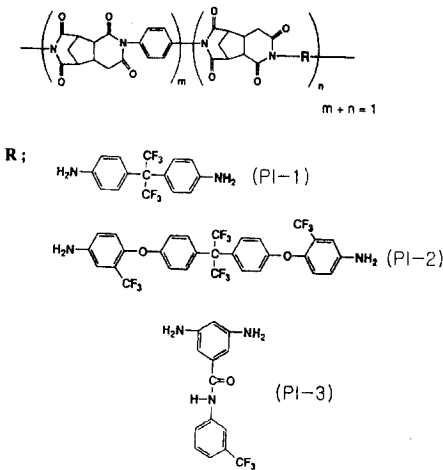


그림 1. 사용한 3 종류의 폴리머의 분자구조.  
 Fig. 1. The molecular structures of the three kinds of the polymer.

그림 1에 나타낸 프리커서는 ITO(indium-tin-oxide) 전극이 코팅된 유리 기판 위에 스펀 코팅법을 이용하여 균일하게 도포 한 후 핫 플레이트에서 80℃에서 10분간 열처리한 후 오븐에서 250℃에서 1시간 동안 열처리하여 폴리이미드막을 형성하였다. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 경사 조사하는 방법을 그림 2에 나타내었다. 광원은 1 kW 용량의 UV 램프를 사용하였으며 UV의 파장 영역이 365nm에서 가장 높은 흡수치를 가진다. UV 광 조사는 프리틸트각을 발생시키기 위하여 10~70°의 경사조사를 이용하였으며, 조사시간은 10~60분간 변화시켜 사용하였다. 그리고 광배향 처리된 셀의 특성을 비교하기 위하여 러빙 처리한 셀을 제작하였다. 러빙 처리에 사용한 러빙강도 RS(rubbing strength)는 이전의 논문에서 보고하였다<sup>3,4)</sup>. 그리고 셀은 약 60μm의 두께로 하여 anti-parallel 구조로 제작하였다. 사용한 액정은 불소계열의 혼합형 네마틱 액정 (fluorinated type mixture ; T<sub>c</sub>=87℃)으로 isotropic phase 로 주입 한 후, 97℃에서 10분간 열처리한 후 서냉 하였다. 또한 전기광학 특성을 평가하기 위하여 직선 편광된 UV광을 20°각도로 20분간 경사 조사하여 제작한 광배향 TN-LCD

와 중간정도의 러빙강도로 제작한 러빙 처리한 TN-LCD를 5μm의 두께로 제작하였다. 네마틱 액정의 프리틸트각은 실온에서 결정회전법을 이용하여 측정하였다. 그리고 광배향 및 러빙 처리한 TN-LCD의 전기광학특성의 평가에는 전압-투과율(V-T) 특성 및 응답속도를 측정하였다.

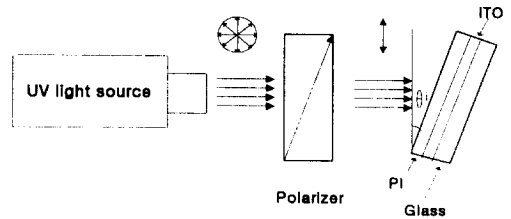


그림 2. 실험에 사용한 UV 광의 조사장치.  
 Fig. 2. The system of UV light irradiation used in this experiment.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3에 CF<sub>3</sub>기를 포함한 3 종류의 가용성 폴리이미드 표면에서의 네마틱 액정의 프리틸트각의 러빙강도 의존성을 나타내었다. 네마틱 액정의 프리틸트각은 PI-3 막에 있어서 RS = 110 mm 일 때 약 16°로 큰 값을 나타내었으며, 러빙 강도가 증가함에 따라서 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 네마틱 액정의 프리틸트각의 발생은 폴리머의 backbone 에 위치한 CF<sub>3</sub>기의 역할에 기인 한 것으로 생각 할 수 있다. 그러나 PI-1 및 PI-2 막에 있어서는 약 2° 정도의 작은 프리틸트각을 나타내었다. 본 저자 등은 이전의 논문에서 CF<sub>3</sub>기를 포함한 4 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 있어서의 네마틱 액정의 고 프리틸트각의 발생에 관하여 보고하였다<sup>19)</sup>. 네마틱 액정인 4-n-penty-4'-cyanobiphenyl (5CB)의 프리틸트각은 PI-3 막에 있어서 강한 러빙 영역에서 약 15° 정도의 프리틸트각을 발생하였으며 본 연구의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에서의 프리틸트각의 발생에는 액정분자와 폴리머 표면과의 배체적 상호작용이 크게 기인 한 것으로 생각 할 수 있다.

그림 4에 CF<sub>3</sub>기를 함유한 3 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20분간 경사 조사시의 프리틸트각의 입사각도 의존성을 나타내었다. PI-1 및 PI-2 막에서는 약 1°미만의 작은 프리틸트각이 발생함을 알 수 있었다. 그러나 PI-3 막에서의 프리틸트각은 20°의 입사각도에서 약 2.5°가 발생하였으며, 입사각도가 증가함에 따라서 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 입사각도가 20°에서 에너지가 가장 많이 입사되어 광분해 반응이 증가하

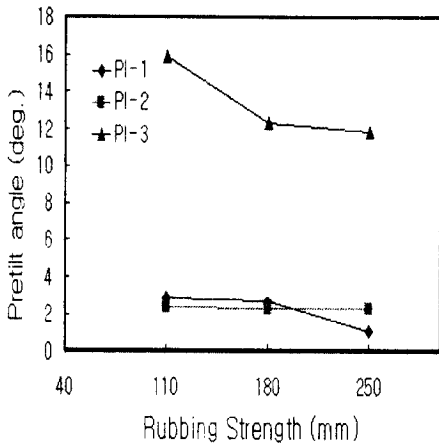


그림 3. CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에서의 네마틱 액정의 프리틸트각의 러빙강도 의존성

Fig. 3. Generation of pretilt angle in NLC on the three kinds of the rubbed soluble PI surfaces containing trifluoromethyl moieties as a function of RS.

여 프리틸트가 비교적 크게 발생하고, 입사각도가 증가함에 따라서 에너지가 감소되어 광분해 반응이 감소되어 프리틸트각이 감소하는 것으로 생각 할 수 있다. 그리고, PI-3 막에서는 러빙 처리한 셀에서와 같이 폴리머의 backbone에 위치한 CF<sub>3</sub>기의 기여로 인한 배제체적 상호작용에 기인한 것으로 생각 할 수 있다.

그림 5에 CF<sub>3</sub>기를 함유한 2 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°로 경사 조사시의 프리틸트각의 조사시간 의존성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, PI-1 막에서는 약 1°미만의 작은 프리틸트각이 발생함을 알 수 있다. 그러나 PI-3 막에서의 프리틸트각의 발생은 조사시간이 20분에서 약 2.5°의 값을 나타내었으며, 조사시간이 증가함에 따라서 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 조사시간이 20분에서 가장 적당한 에너지가 입사되어 광분해 반응에 의하여 프리틸트가 발생하고, 조사시간이 증가함에 따라서 에너지가 증가하여 폴리머의 부분절단을 필요이상으로 진행시켜 프리틸트각이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 생각 할 수 있다. 이러한 조사시간의 증가에 따라서 프리틸트각이 현저하게 감소하는 현상은 폴리머의 분자구조에 따라서 차이가 있는 것으로 생각 할 수 있으며 이러한 경향은 소자특성에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 생각 된다.

그림 6과 표 1에 CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°의 입사각도로 20분간 조사한 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD와의 V-T 특성을 나타내었다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 CF<sub>3</sub>기를 함유한 PI-1 및 PI-3 막

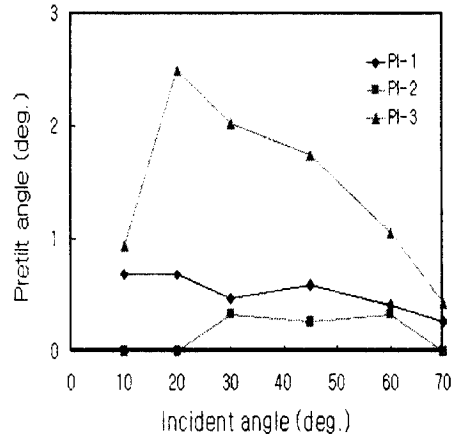


그림 4. CF<sub>3</sub>기를 함유한 3 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20분간 경사 조사시의 프리틸트각의 입사각도 의존성.

Fig. 4. Generation of pretilt angle in NLC with p-polarized light UV irradiation on the three kinds of the soluble PI surfaces at 20 min. as a function of incident angle.

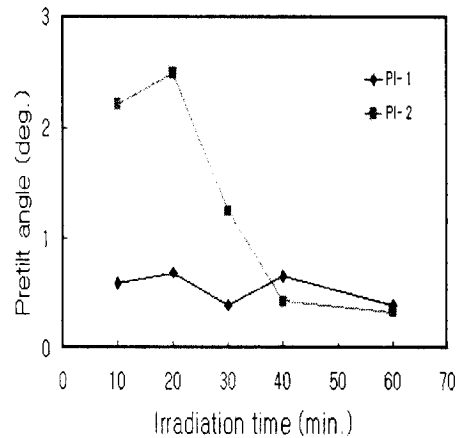


그림 5. CF<sub>3</sub>기를 함유한 2 종류의 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°경사 조사시 프리틸트각의 조사시간 의존성.

Fig. 5. Generation of pretilt angle in NLC with p-polarized UV light irradiation of 20° on the two kinds of the soluble PI surfaces as a function of irradiation time.

의 러빙 처리한 TN-LCD는 거의 유사한 특성을 나

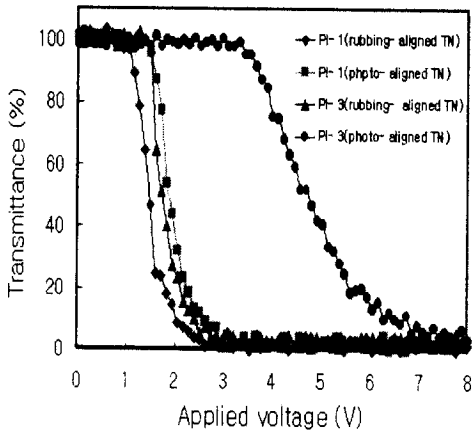


그림 6. CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°의 입사각도로 20분간 조사한 광배향 TN-LCD와 러빙처리한 TN-LCD와의 V-T 특성.

Fig. 6. Voltage-transmittance characteristics of photo-aligned TN-LCD with p-polarized UV light irradiation of 20° on soluble PI surface containing trifluoromethyl moieties at 20 min. and rubbing-aligned TN-LCD.

표 1. CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에서의 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD의 인가전압에 따른 투과율.

Table 1. The applied voltage versus transmission for photo-aligned TN-LCD and rubbing-treated TN-LCD on soluble PI surface containing trifluoromethyl moieties.

\* V<sub>90</sub>은 투과율이 90%일 때의 전압, V<sub>10</sub>은 투과율이 10% 때의 전압

Voltage \ TN	rubbing	photo	rubbing	photo
	aligned	aligned	aligned	aligned
	TN-LCD	TN-LCD	TN-LCD	TN-LCD
	(PI-1)	(PI-1)	(PI-3)	(PI-3)
V <sub>90</sub>	1.1	1.5	1.6	3.7
V <sub>10</sub>	2.1	2.4	2.5	6.2

타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 PI-1막을 이용한 광배향 TN-LCD는 PI-1 막을 러빙 처리한 TN-LCD보다 임계치 전압이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 PI-3 막을 이용한 광배향 TN-LCD는 임계치 전압이 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면을 이용한 광배향 TN-LCD는 러빙 처리한 TN-LCD보다 임계치 전압이 높아짐을 알 수 있다. 본 저자들이 보고한 내용에 의하면, 측쇄기를 가진 폴리이미드 표면에 비 편광된 UV광을 경사 조사한 광배향 TN-LCD가 러빙 처리한 TN-LCD보다 임계치 전압이 감소하는 경향을 나타내었다<sup>16)</sup>. 이러한 결과로부터 광배향 TN-LCD의 전기광학특성에 폴리머의 분자구조가 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

표 2에 CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°의 경사각도로 20분간 조사한 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD와의 응답속도를 나타내었다. PI-1 막에 있어서 광배향 TN-LCD가 러빙 처리한 TN-LCD 보다 하강시간 τ<sub>a</sub>가 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 본 저자들이 보고한 내용과 잘 일치하고 있다<sup>16)</sup>. 일반적으로 TN-LCD의 상승시간 τ<sub>r</sub> 및 하강시간 τ<sub>d</sub>는 다음과 같이 표현 된다<sup>19)</sup>.

$$\tau_r = \frac{\gamma d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon (V_a - V_{th})^2}$$

$$\tau_d = \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K}$$

$$K = \frac{4K_{11} + (K_{33} - 2K_{22})}{4}$$

여기서, V<sub>a</sub>는 인가전압, d는 셀 두께, γ는 점성계수, V<sub>th</sub>는 임계치 전압등을 나타낸다. 그리고 탄성계수 K<sub>11</sub>, K<sub>22</sub>, K<sub>33</sub>는 각각 퍼짐 배향, 비틀림 배향, 굽힘 배향등을 의미한다.

위 식으로부터 상승시간 τ<sub>r</sub>은 전기적인 에너지의 영향이, 하강시간 τ<sub>d</sub>는 탄성 에너지가 크게 기여하는 것을 알 수 있다.

본 저자 등은 이전의 논문에서 측쇄기를 가지지 않는 폴리이미드 표면을 매우 약하게 러빙 처리한 경우 네마틱액정의 극각 방향의 결합에너지가 약 1×10<sup>-3</sup> (J/m<sup>2</sup>) 이상인 것을 보고하였다<sup>20)</sup>. 그리고 Hasegawa등에 의하면 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV광을 조사한 경우 면내 방향의 결합에너지는 1×10<sup>-4</sup> (J/m<sup>2</sup>) 정도로 보고하고 있다<sup>21)</sup>. 이러한 결과로부터, 폴리이미드 표면에서의 결합에너지는 러빙 처리한 셀 보다 광배향 셀 쪽이 작은 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 광배향 TN-LCD의 하강시간이 증가하는 것은 극각 방향의 결합에너지가 작기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 그리고 PI-3 막에 있

어서 광배향 TN-LCD가 러빙 처리한 TN-LCD보다 응답속도가 매우 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 광배향 TN-LCD의 상승시간  $\tau_r$ 이 약 30ms로 매우 느린 응답속도를 나타내고 있다. 이 결과는 그림 6의 V-T특성에서 임계치 전압이 증가하는 결과와 같은 맥락으로 생각 할 수 있다. 즉, 광배향 TN-LCD의 상승시간이 증가하는 것은 임계치 전압이 증가하기 때문인 것으로 생각 할 수 있다. 이러한 결과로부터 가용성 폴리이미드 표면을 이용한 광배향 TN-LCD의 응답특성에 폴리머의 분자구조가 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

표 2. CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면을 이용한 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD의 응답속도.

Table 2. The response time for photo-aligned TN-LCD and rubbing-aligned TN-LCD on soluble PI surface containing trifluoromethyl moieties.

TN Time (1)	rubbing aligned TN-LCD (PI-1)	photo aligned TN-LCD (PI-1)	rubbing aligned TN-LCD (PI-3)	photo aligned TN-LCD (PI-3)
Rising Time $\tau_r$ (ms)	3.8	7.2	8.2	29.6
Decay Time $\tau_d$ (ms)	30.0	46.4	33.2	32.4
Response Time $\tau$ (ms)	33.8	53.6	41.4	62.0

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 경사 조사시의 네마틱액정의 프리틸트각의 발생 및 광배향 TN-LCD의 전기광학특성에 관하여 검토하였다. 폴리머의 backbone에 CF<sub>3</sub>기를 함유한 PI-3 표면에 직선 편광된 UV 광을 20°의 입사각도로 20분간 조사시의 네마틱액정의 프리틸트각은 약 2.5°로 가장 크게 발생하였다. 그러나, PI-1 및 PI-2 표면에서는 모든 입사각도에서 약 0.5°의 작은 프리틸트각 얻어짐을 알 수 있었다. 또한, CF<sub>3</sub>기를 함유한 가용성 PI-1막을 이용한 광배향 TN-LCD는 러빙 처리한 TN-LCD와 거의 유사한 임계치 특성 및 응답특성을 나타내었다. 그러나, 폴리머의 backbone에 CF<sub>3</sub>기를 가진 가용성 PI-3 표면을 이용한 광배향 TN-LCD는 러빙 처리한 TN-LCD 보다 임계치 전압이 높고, 응답속도가 느린 경향을 나타내었다. 마지막으로, 광배향

TN-LCD의 하강시간  $\tau_d$ 는 기판 표면에서의 네마틱액정의 극각 방향의 결합에너지의 기여가 큰 것으로 생각 할 수 있었다

본 연구는 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 G-7사업(차세대 평판표시장치기반기술 개발사업)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. J. Cognard, "Alignment of nematic liquid crystals and their mixtures", Mol. Cryst. Liq. Cryst. Supplement, 1, 1982.
2. T. Sugiyasama, S. Kuniyasu, D.-S. Seo, H. Fukuro, and S. Kobayashi, "A simple model for pretilted nematic liquid crystal medium and its torsional surface coupling strength", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, 2045, 1990.
3. D.-S. Seo, K. Muroi, and S. Kobayashi, "Generation of pretilt angles in nematic liquid crystal, 5CB, media aligned on polyimide films prepared by spin-coating and LB techniques : effect of Rubbing", Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 213, 223, 1992.
4. D.-S. Seo, S. Kobayashi, and M. Nishikawa, "Study of the pretilt angle for 5CB on rubbed polyimide films containing trifluoromethyl moiety and analysis of the surface atomic concentration of F/C(%) with an electron spectroscopy for chemical analysis", Appl. Phys. Lett., Vol. 61, 2392, 1992.
5. D.-S. Seo, N. Yoshida, S. Kobayashi, M. Nishikawa, and Y. Yabe, "Effect of the molecular structure of weakly rubbed organic solvent soluble polyimide with trifluoromethyl moieties on anchoring strength of liquid crystals", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, 4896, 1995.
6. H. Matsuda, D.-S. Seo, N. Yoshida, K. Fujibayashi, and S. Kobayashi, "Estimation of the static electricity and optical retardation produced by the rubbing polyimide and polyamide films with different fabrics", Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 264, 23, 1995.
7. M. Hasegawa, H. Takano, Y. Momoi, and K. Nakayama, "Relationships between the image-sticking time and

- electrical characteristics of UV-exposed two-domain wide-viewing-angle LCD", SID digest paper., 666, 1996.
8. J. L. West, X. Wang, and Y. Ji, J. R. Kelly, "Polarized UV-exposed polyimide films for liquid-crystal alignment, SID digest paper", 703, 1995.
  9. X. Wang, D. Subacius, O. Lavrentovich, and J. L. West, "Four-domain LCD using high-pret tilt photoaligned polyimide substrates", SID digest paper, 654, 1996.
  10. K.-W. Lee, A. Lien, and J. Stathis, "Mechanism of UV modification of LC pretilt angle and its application to two-domain TN-LCDs" SID digest paper, 638, 1996.
  11. T. Yamamoto, M. Hasegawa, and H. Hatoh, "Liquid-crystal alignment by slantwise irradiation of non-polarized UV light on a polyimide layer" SID digest paper, 642, 1996.
  12. X. Wang and J.L. West, "The mechanism of pretilt generation on polarized ultraviolet light aligned polyimide film", SID digest paper, 5, 1997.
  13. Y. Iimura and S. Kobayashi, "Prospects of the photo-alignment technique for LCD fabrication", SID digest paper, 311, 1997.
  14. D.-S. Seo, L.-Y. Hwang, and S. Kobayashi, "Investigation of pretilt angle generation in nematic liquid crystal with slanted non-polarized ultraviolet light irradiation on polyimide surfaces", Liquid Crystals, Vol. 23, 923, 1997.
  15. D.-S. Seo, J.-H. Lee, and C.-H. Lee, "Pretilt angle generation and EO performance in NLC with polarized UV light irradiation on polyimide surface", J. of KIEEME, Vol. 11, No. 10, 1998.
  16. D.-S. Seo, J.-M. Han, and D.-S. Park, "Pretilt angle generation of NLC and EO performance of photo-aligned TN-LCD using oblique non-polarized UV light irradiation on polymer surface", J. of KIEEME, Vol. 11, No. 10, 1998.
  17. D.-S. Seo and J.-H. Choi, "Generation of high pretilt angle in nematic liquid crystal in cell with single oblique linearly-polarized UV light irradiation on polyimide surfaces", Liquid Crystals(in press).
  18. D.-S. Seo, M. Nishikawa, and S. Kobayashi, "Generation of high pretilt angles of nematic liquid crystal (5CB) on rubbed organic solvent soluble polyimide surfaces with helical backbone structure and trifluoromethyl moieties", Liquid Crystals, Vol. 22, No. 4, 515, 1997.
  19. "Electronic display device", edited by S. Matsumoto, John Wiley & Sons, chapter 2, 1990
  20. D.-S. Seo, Y. Iimura, and S. Kobayashi, "Temperature dependence of the polar anchoring strength of weakly rubbed polyimide films for the nematic liquid crystal (5CB)", Appl. Phys. Lett., Vol. 61, No. 2, 234, 1992.
  21. M. Hasegawa and Y. Taira, "Determination of a photoalignment mechanism from the effects of linearly polarized deep UV on several polymers", 17th International Liquid Crystal Conference (July 19-24, 1998, in Strasbourg, France), P4-11, 214, 1998.