

러빙한 유리 기판을 이용한 반응성 액정 배향

이몽룡 · 배진우 · 김안나 · 윤형석 · 송기국[†]

경희대학교 정보전자신소재공학과 영상정보소재기술연구센터
(2014년 8월 28일 접수, 2014년 10월 21일 수정, 2014년 10월 21일 채택)

Alignments of Reactive Mesogen Using Rubbed Glass Substrates

Mongryong Lee, Jin Woo Bae, Anna Kim, Hyeon Seuk Yun, and Kigook Song[†]

Dept. of Advanced Materials Engineering for Information and Electronics, Materials Research Center for Information Display,
Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 446-701, Korea

(Received August 28, 2014; Revised October 21, 2014; Accepted October 21, 2014)

초록: 고분자 배향막이 없는 순수 유리 기판을 이용하여 광반응성 액정의 배향을 유도하였다. 유리 기판을 러빙하여 액정 배향을 유도한 경우, 고분자 배향막을 사용하여 유도한 경우와 같이 액정을 러빙 방향과 평행하게 배향할 수 있는 것을 편광 FTIR, 편광현미경, 복굴절 측정 등의 실험을 통해서 알 수 있었다. 순수 유리 기판을 러빙하여 액정 배향을 유도하는 메커니즘은 러빙 과정에서 유리 표면에 묻어나온 고분자들이 러빙 방향으로 늘어서 분자간 상호작용을 통하여 액정 분자들의 배향을 유도하는 것이다.

Abstract: Alignments of photo-reactive mesogen were induced using bare glass substrates without a polymer alignment layer. It was found by using polarized FTIR spectroscopy, polarized microscopy, and birefringence measurement experiments that the reactive mesogen could be aligned along the rubbing direction although the glass substrate without an alignment layer was used. The induction mechanism of the rubbed bare glass is ascribed to that polymers from rubbing clothes are coated on the glass substrate along the rubbing direction and lead the alignment of liquid crystals through intermolecular interactions.

Keywords: reactive mesogen, rubbing, retardation film, alignment layer, spectroscopy.

서 론

액정의 배향을 유도하기 위해서는 일반적으로 기판 표면에 고분자 배향막을 코팅하고 러빙을¹⁻⁷ 하거나 UV를 이용하는 광배향 방법⁸⁻¹⁸ 등을 이용하고 있다. LCD에 부품으로 사용되는 광학 필름이나 위상 지연 액정필름 등을 제조하는 방법으로 반응성 액정단량체를 코팅 방식으로 고분자 배향막 위에 도포하여, 배향막의 배향 처리 방향에 따라 액정의 배향을 유도한 후 광조사에 의해 경화하여 필름으로 제작하는 방법을 사용하고 있다.¹⁹⁻²⁸ 이러한 공정에는 다양한 종류의 고분자 배향막이 사용되는데, 이들이 갖춰야 할 기본 조건으로는 첫째 액정단량체와 배향막 고분자간 상호작용을 통해 액정의 배향을 유도할 수 있어야 하며, 둘째 코팅 공정에 의해 도포가 가능해야 하고, 셋째 화학적 또는 열적으로 안정해야 한다. 대표적인 고분자 배향막으로는 polyimide(PI)가 있으며,

주사슬에 액정단량체와 π - π 상호작용할 수 있는 벤젠링 등의 작용기가 있어 액정단량체를 기판과 평행한 방향으로 배향을 유도하는 배향막이거나 PI 사슬의 결사슬에 길이가 긴 alkyl 사슬이 있어 액정의 배향을 기판에 수직인 방향으로 유도하는 수직 배향막 등이 사용된다.

액체의 유동성과 고체의 규칙성을 동시에 가지는 액정 가운데 분자 말단에 acrylate 그룹과 같은 반응이 가능한 관능기를 포함하고 있는 반응성 액정단량체(reactive mesogen, RM)를 사용하면, 액정 상에서 분자들의 배열을 유도한 후 경화를 시켜 위상차 필름을 제조할 수 있다.¹⁹⁻²⁸ 이러한 반응성 액정단량체는 기판 위에 균일하게 코팅되고 분자들이 쉽게 정렬되는 장점을 갖고 있기 때문에, 액정의 배향을 특정방향으로 유도한 상태에서 액정단량체 분자를 중합하게 되면 액정의 배열된 상을 유지하면서 가교된 고분자 네트워크를 얻을 수 있다. 이와 같이 형성된 대면적의 액정상 가교 네트워크 필름은 액정이 가지는 광학 이방성이나 유전율 등의 특성을 그대로 가지면서도 매우 균일한 박막 형태로 제조할 수 있어 일반적으로 제조되는 연신기술의 위상지연 필름과 달리

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ksong@khu.ac.kr

코팅 방식으로 쉽게 액정층 두께 조절을 통해서 다양한 위상차를 갖는 액정필름을 제작할 수 있어 기존의 기능성 필름을 대신할 수 있다.²⁹⁻³³ 하지만, 반응성 액정단량체를 이용한 액정필름은 고분자 배향막을 코팅, 배향 처리하고 그 위에 다시 액정단량체를 코팅, 경화하여 제조하는 과정이 복잡하여 전체적인 필름 제작의 생산성을 저하시키는 원인이 되었다. 그러므로 본 논문에서는 액정필름을 간단하게 제조할 수 있는 방법으로 기판 위에 PI 등의 고분자 배향막을 입히지 않고, 유리 기판 위를 직접 러빙하여 반응성 액정단량체의 배향을 유도하는 실험을 수행하였다.

실 험

중합에 사용된 반응형 액정단량체인 LC242는 분자의 양쪽 말단에 아크릴레이트 반응을 포함하는 광반응 네마틱 액정으로 BASF사에서 구입하여 사용하였다(Figure 1). 라디칼 중합의 개시제로는 Ciba사의 Irgacure 819를 0.03 wt% 농도로 혼합하여 사용하였다. 개시제가 혼합된 액정단량체를 20 wt% 비율로 cyclohexanone에 녹인 후 1시간 동안 stirring하여 균일하게 섞어주었다.

LC 셀 제조를 위한 러빙 공정은 두께 0.7 mm 유리 기판을 2×2 cm 크기로 절단한 후 영도벨벳의 레이온 러빙포가 장착된 신도기연의 러빙기를 사용하여 회전속도 1000 rpm, 2회 러빙하였고, 고분자 배향막을 사용한 경우는 polyimide(PI)를 스핀코터로 유리 기판 위에 4000 rpm, 70초 코팅하고, 80 °C 와 235 °C에서 각각 30분, 1시간 열처리를 해주어 이미드화 반응을 유도하여 배향막을 입히고 동일 조건으로 러빙하였다. 액정필름은 앞서 러빙한 배향막이 없는 또는 있는 기판 위에 LC242 용액을 3000 rpm, 60초 코팅하고, 100 °C에서 60초 열처리 과정을 거친 후, 500 mW high pressure mercury lamp로 300초 UV를 조사하여 제조하였다.

편광 FTIR 실험은 KRS-5 wire grid 편광판과 Perkin-Elmer System 2000 FTIR spectroscopy를 사용하였고, 편광 현미경을 이용한 LC cell의 배향 확인 실험은 Nikon 사 Optiphot-2 microscope를 40배의 배율로 고정한 후에 관찰하였다. Otsuka사의 필름 위상차 측정 장비인 RETS는 회전 검광자법(rotation analyzer method)을 이용하여 필름의 복굴절을 측정하였다. 유리 기판의 러빙 후 표면을 분석하기 위해 Park System 사 XE-70 atomic force microscope(AFM)을 이

용하여 non-contact mode로 확인하였다.

결과 및 토론

분자의 양 말단에 아크릴레이트 관능기를 포함한 광반응성 액정인 독일 BASF사의 LC242(Figure 1)는 단순한 코팅 공정을 이용하여 위상지연 필름을 제작할 수 있는 대표적인 액정단량체이다. 액정 배향의 온도에 따른 영향을 액정필름의 복굴절 변화를 측정하여 조사하였다. PI 배향막이 코팅된 기판을 사용하여 러빙한 후 LC242를 코팅하고 UV 광경화 전과 후의 복굴절 변화를 상온에서 등방상 온도까지 측정하여 Figure 2에 나타내었다. 액정 셀 형태로 시료를 준비한 광경화 전 액정의 복굴절은 상온에서부터 온도가 상승함에 따라 서서히 감소하다가 등방상 전이온도 T_{NI} 124 °C 부근에서 급격하게 줄어들어 등방상의 액체가 되는 nematic 액정의 특성을 보인다. 이와 달리, 광경화 후의 LC242 액정필름의 복굴절은 상온에서부터 등방상 전이온도를 지나서까지 변화가 없었다. 이 결과는 광경화를 하지 않은 LC242 액정의 경우, 온도가 증가하면 액정 분자의 움직임이 활발해져서 액정 배열의 규칙성이 무너지고 배향이 흐트러져 복굴절이 감소하고 결과적으로 등방상이 되어 액정 배향이 완전히 사라지는 것이다.^{34,35} 하지만, 광반응성 액정인 LC242에 UV를 조사하여 액정필름으로 제조하면, 분자 말단에 붙어있는 아크릴레이트 그룹의 광반응에 의해 분자들이 네트워크 구조를 형성하게

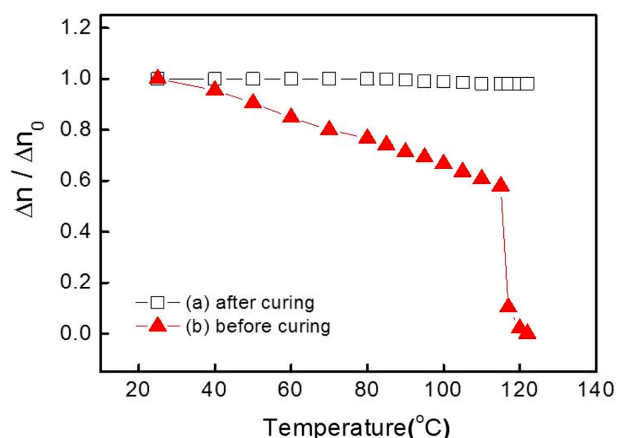


Figure 2. Birefringence changes of LC242 films prepared using a rubbed PI alignment layer: (a) before; (b) after photo-curing.

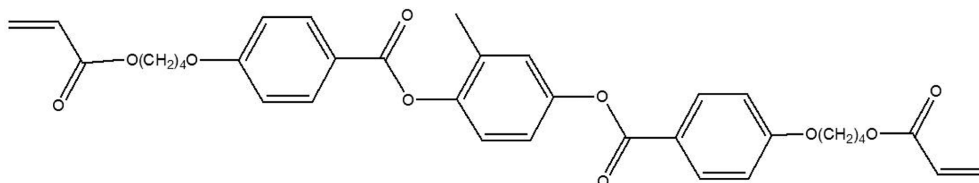


Figure 1. Chemical structure of reactive mesogen LC242.

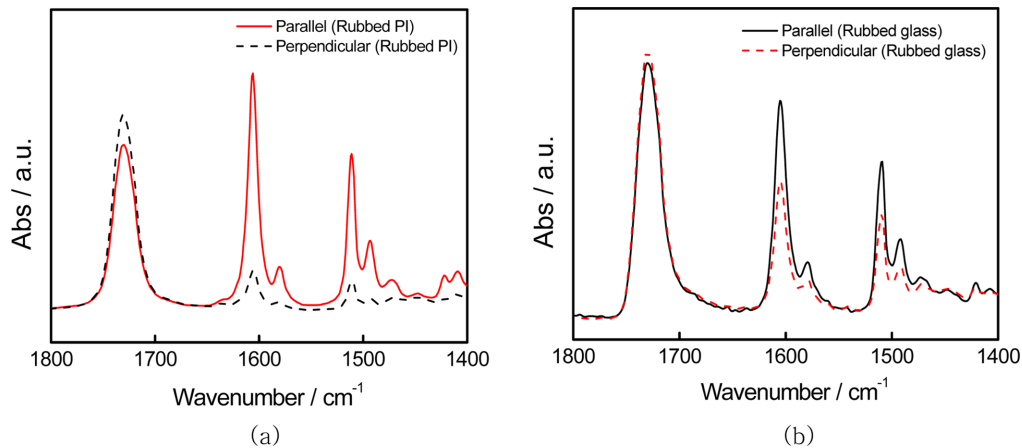


Figure 3. Polarized FTIR spectra of LC242 film coated on (a) rubbed PI alignment layer; (b) rubbed bare glass substrate.

되므로 온도 증가에 관계없이 액정 분자들의 배향이 유지된 상태의 액정필름이 되는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 아무 코팅도 하지 않은 순수 유리 기판을 러빙포로 러빙한 후 그 위에서 액정의 배향을 유도하여 액정 필름을 제조하는 공정과 고분자 필름을 배향막으로 사용하여 러빙 공정으로 액정필름을 제조하는 공정을 비교하였다. 유리 기판 위에 코팅한 광반응성 액정의 배향 방향과 정도를 분자 차원에서 정량적으로 확인하기 위하여 편광 FTIR 분광 실험을 수행하였다.³³ 액정 배향막으로 사용하는 PI 필름을 유리 기판 위에 코팅하고 러빙한 후, 그 위에 LC242를 스핀 코팅하고 UV로 경화시켜 LC242 액정필름을 제조하였다. 편광 FTIR 실험을 이용하여 PI 필름의 러빙 방향과 평행하게 그리고 수직으로 편광 FTIR 스펙트럼을 얻어서 Figure 3(a)에 나타내었다. PI 배향막의 러빙 방향으로 액정의 director가 늘어서서 LC242 분자의 장축이 러빙 방향과 평행하게 배향되는 것을 편광 FTIR 스펙트럼에서 확인할 수 있다. 배향막을 사용한 Figure 3(a) 스펙트럼에서 1605 cm^{-1} 피크는 LC242 분자 내 벤젠 링 C=C 결합들의 진동운동 때문에 나타나는데, 이 진동운동의 transition dipole이 액정 축과 평행하므로 러빙 방향에 평행하게 얻은 편광 IR 스펙트럼에서의 피크가 수직 방향으로 얻은 편광 IR 스펙트럼 피크보다 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 반면에 액정 축에 비스듬하게 진동운동을 하는 C=O 신축운동 1720 cm^{-1} 피크의 경우는 러빙 방향에 평행 또는 수직한 두 편광 IR 스펙트럼에서, 피크 세기가 큰 차이는 없지만 수직 방향으로 약간 크게 나타나는 것이 보여진다. 편광 FTIR 실험에서 30° 씩 편광 방향을 회전하며 측정한 IR 스펙트럼에서, 액정의 장축 방향과 평행하여 액정 배향 방향을 확인할 수 있는 1605 cm^{-1} 피크를 이용하여 Figure 4에 polar plot을 하였다. 편광 IR 빔의 입사 방향이 러빙 방향과 평행한 0° 에서 가장 큰 피크 세기를 보이는데, 편광 IR 방향이 러빙 방향과 달라지며 피크 세기가 점점 줄어들다가, 편광 IR 빔의 방향이 러빙 방향에 수직하게,

즉 1605 cm^{-1} 피크의 진동운동 방향에 수직하게 입사하면 피크의 세기가 가장 작게 나타나는 것이다. 이러한 Figure 4의 결과는 러빙한 PI 배향막에 LC242를 코팅하게 되면 액정들이 러빙 방향으로 늘어서서 LC242 액정 분자의 장축이 러빙 방향과 평행하게 배향되는 것을 의미하는 것이다.

이와 같은 LC242 액정의 배향을 고분자 배향막을 코팅하지 않은 순수 유리 기판 위에서 동일하게 유도하였다. 배향막이 없는 유리 기판 위를 배향막을 코팅한 경우와 동일하게 러빙한 후, 그 위에 LC242를 스핀 코팅하고 UV로 경화시켜 액정필름을 제조하였다. 배향막을 사용한 Figure 3(a)의 편광 IR 스펙트럼에서의 피크 변화는, 비록 그 차이가 조금 줄었지만 순수 유리판을 러빙하여 액정을 배향시킨 액정필름의 편광 IR 결과인 Figure 3(b)에서도 보여진다. 편광 FTIR 실험을 이용하여 유리 기판의 러빙 방향과 평행하게 그리고 30°

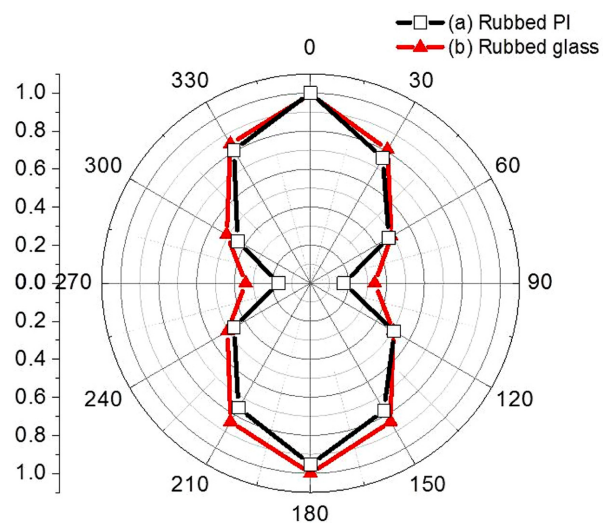


Figure 4. Polar plot of FTIR 1605 cm^{-1} peak of LC242 films prepared using (a) rubbed PI alignment layer; (b) rubbed bare glass substrate.

씩 편광 방향을 회전하며 측정한 IR 스펙트럼을 얻어서 1605 cm^{-1} 피크 세기의 polar plot을 Figure 4에 PI 고분자 배향막을 사용한 경우와 비교하여 표시하였다. Figure 4에서 보듯이, 배향막을 사용하지 않고 유리 기판을 러빙하여 배향을 유도한 LC242 필름에서도 고분자 배향막을 사용한 경우와 같이 액정의 배향 방향이 러빙 방향 즉 0° 와 평행하며, 러빙 방향과 평행하게 액정 분자의 장축이 배향되는 것을 알 수 있다. 하지만, 배향막을 사용하지 않으면 PI 고분자 막을 이용하여 액정 배향을 유도한 경우보다 액정의 배향 정도가 약간 작은 것을 Figure 4 polar plot의 90° 편광 방향에서 얻은 피크 세기 값 차이에서 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해서 고분자 배향막을 사용하지 않고 유리 기판을 러빙하는 공정 만으로도, 액정의 배향 정도는 상대적으로 조금 낮지만, 액정 분자의 장축이 러빙 방향과 평행하게 배향을 유도하여 액정 필름을 제조할 수 있었다.

서로 직교하는 편광판 사이에 액정필름을 위치하고 필름을 회전시키면서 관찰하면 액정의 복굴절 특성에 의해 투과도의 변화가 나타난다. 두 개의 직교 편광판에 평행한 0° 또는 90° 에서는 빛의 투과도가 가장 낮아 검게 보이며, 액정의 배향 방향이 편광판에 45° 기울어져 있을 때 가장 밝은 투과도를 보인다. 배향막 PI를 러빙하여 제조한 LC242 액정필름과 배향막이 없이 유리를 러빙하여 제조한 액정필름의 액정 배향 차이를 이러한 편광 현미경의 원리를 이용하여 조사하였다. Figure 5에 LC242 액정필름의 편광 현미경 이미지를 나타내었는데, 러빙 방향과 액정 배향이 평행한 0° 에서는 액정필름의 투과도가 가장 낮은 black을 나타내고 45° 기울어진 상태에서 투과도가 가장 높은 white를 나타내는 것을 배향막 유.

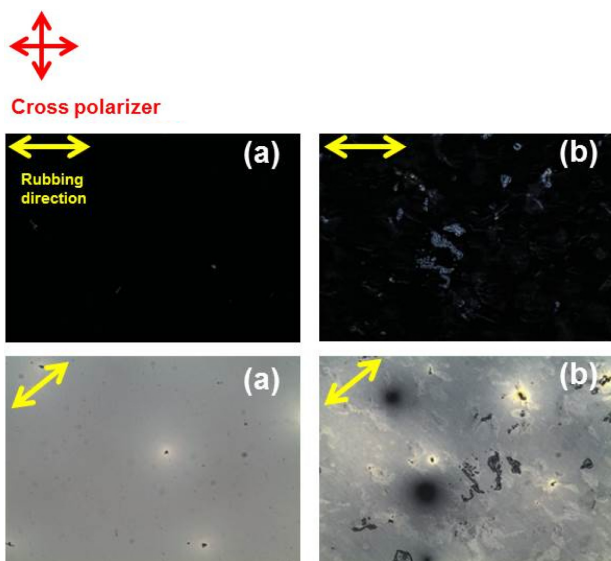


Figure 5. Polarized optical microscope pictures of LC242 film prepared using (a) rubbed PI alignment layer; (b) rubbed bare glass substrate.

무에 관계없이 두 액정필름에서 모두 볼 수 있었다. 하지만, PI 배향막을 사용하여 제조한 액정필름이 배향막을 사용하지 않고 제조한 액정필름보다 0° 와 45° 에서의 빛 투과 차이가 더 확연하므로 고분자 배향막을 이용한 배향 공정이 Figure 4의 편광 FTIR 실험 polar plot 결과에서와 같이 액정 배향을 더 잘 유도하는 것을 알 수 있다. 그리고 기판 전면에 걸쳐 액정 분자의 배향이 틀어져서 발생하는 defect가 배향막이 없이 유리 기판을 러빙하여 제조한 액정필름에서 많이 보이는 것도 두 액정필름 내 액정 배향 정도의 차이를 보여주는 것이다.

배향막 러빙 공정은 러빙포를 이용해 기판의 표면을 문질러주는 공정으로 롤러의 회전 속도, 기판의 이동 속도, 러빙 깊이 등에 따라서 기판 표면에서의 액정 배향 특성이 다르게 나타난다.^{36,37} 배향막이 없는 유리 기판을 러빙하고 그 위에 액정 배향을 유도할 때, 러빙 깊이에 따른 액정의 배향 정도를 굴절률을 측정하여 Figure 6에 나타내었다. 액정 배향이 전혀 유도되지 않아 액정분자들이 랜덤하게 늘어서 있는 경우에는 복굴절이 0의 값을 가지는데, 유리 기판을 러빙하여 제조한 액정필름은 복굴절이 0이 아닌 값을 가지므로 액정의 배향이 유도된 것을 알 수 있다. 그리고 러빙포와 유리 기판 사이 간격을 줄여 러빙 깊이를 증가시켜서 제조한 액정필름의 복굴절 값이 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 러빙 깊이가 0.2 mm 이상에서는 복굴절 값이 거의 일정한 상태에 이르는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 러빙 깊이가 증가할수록 기판의 액정 배향 능력이 증가하며, 일정 수준 이상이 되면 액정의 배향력이 더 이상 증가하지 않고 일정한 상태를 유지하는 것을 의미한다. PI 배향막이 입혀진 기판을 러빙하여 제조한 LC242 액정필름의 복굴절 값 0.18은 순수 유리 기판을 러빙하여 유도한 액정의 배향 정도 값 0.16 보다 조금 크게 나타났는데, 앞의 편광 FTIR 실험 결과와 잘 일치한 결과이다. 그러므로 배향막을 사용하지 않고 순수 유리 기판만을 러빙한

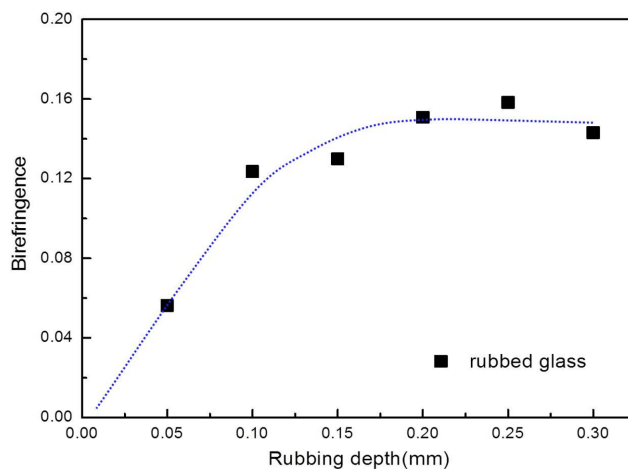


Figure 6. Birefringence of LC242 films prepared with rubbed bare glass substrate as a function of rubbing depth.

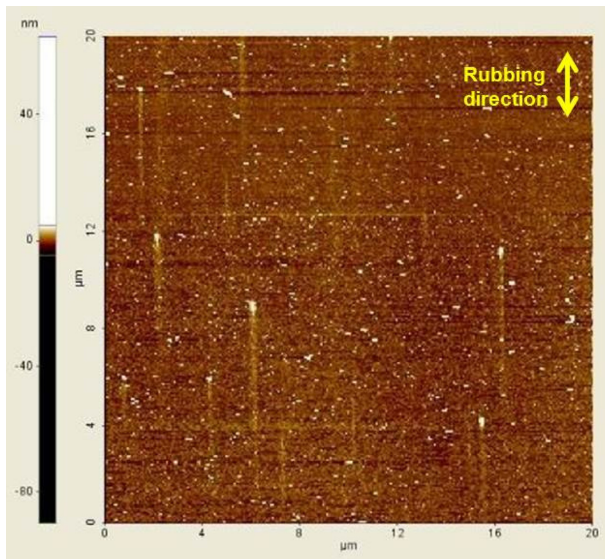


Figure 7. AFM picture of rubbed surface of bare glass substrate.

공정에서도 고분자 배향막을 이용하여 러빙한 공정과 비슷하게 LC242 액정의 배향을 한 방향으로 유도하여 액정필름을 제조할 수 있는 것을 알 수 있었다.

고분자 배향막을 사용하여 액정의 배향을 유도하는 메커니즘은 이미 잘 알려져 있지만, 배향막을 사용하지 않고도 액정 배향을 유도하는 경우에 대하여는 아직 발표가 된 적이 없다. 이와 같이 고분자 배향막을 사용하지 않고서도 액정의 배향을 유도하여 액정필름을 제조할 수 있는 이유를 알아보고자 러빙 후 유리 기판 표면의 변화를 AFM으로 조사하였다. Figure 7의 러빙 후 유리 기판 표면 AFM 사진을 보면, 기판 표면에 러빙 방향을 따라 끌려간 입자들의 흔적이 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 러빙포를 이용해 기판 표면을 러빙하는 과정에서 러빙포 물질이 러빙 방향으로 닦이면서 묻어 나와 형성된 것으로 생각된다. 액정들은 일반적으로 고유의 분자 구조와 분자 사이 상호작용 때문에 기판 표면에 아주 미소한 이방성만 존재하더라도 액정 분자들의 평균적인 분자 배향을 유도할 수 있다.^{36,37} 그러므로 AFM 사진에 보이는 또는 보이지는 않지만 러빙 과정에서 유리 기판에 묻어난 러빙포의 고분자 흔적들이 러빙 방향으로 늘어서 그 위에 코팅되는 LC242 액정분자들을 러빙 방향으로 배향되도록 유도하는 것으로 여겨진다. 이와 같은 액정 배향 메커니즘을 증명하기 위하여, 배향막이 없는 유리 기판을 앞의 공정과 동일하게 러빙한 후 기판을 500 °C로 1시간 동안 열처리하여 러빙 과정에서 러빙포로부터 묻어난 모든 유기고분자 물질의 흔적을 없애고자 하였다. 이렇게 열처리한 기판을 사용하여 LC242 액정필름을 제조하고 편광 FTIR을 이용하여 액정 배향을 조사하였다. LC242의 배향을 확인할 수 있는 1605 cm⁻¹ 피크로 polar plot한 결과를 Figure 8에 열처리하지 않은 러

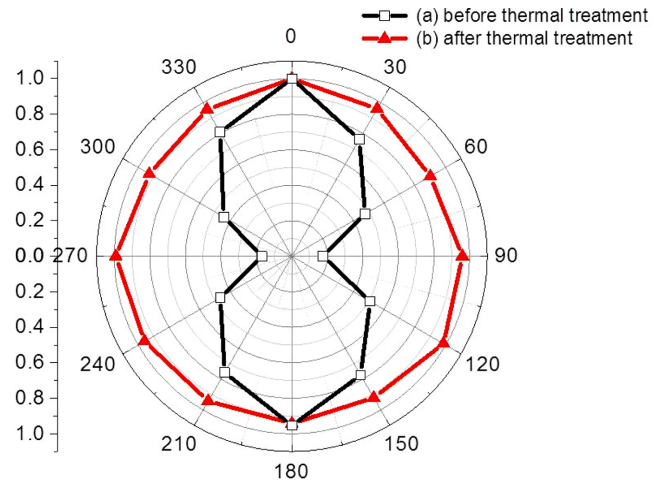


Figure 8. Polar plot of FTIR 1605 cm⁻¹ peak of LC242 films prepared using rubbed bare glass substrates: (a) before; (b) after thermal treatment at 500 °C.

빙한 유리 기판으로 제조한 경우와 비교하여 표시하였다. 액정의 배향 방향을 의미하는 polar plot에서 볼 수 있듯이 러빙한 기판을 500 °C에서 열처리한 경우 액정 배향이 전혀 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 이렇게 열처리된 기판으로 제조한 액정필름을 편광 현미경으로 관찰하였을 때, 0°와 45°에서 빛 투과 차이를 보이지 않아 액정 배향이 전혀 유도되지 않았음을 알 수 있었다.

고분자 배향막을 러빙하면 배향막 표면에 위치한 고분자 사슬들이 마찰 열과 shear force에 의하여 러빙 방향으로 늘어서게 되는데, 이렇게 러빙 방향으로 늘어선 고분자 사슬과 그 위에 코팅된 액정 분자 사이에 π - π interaction 등의 분자간 상호작용에 의하여 액정의 배열이 러빙 방향으로 유도되는 것이다.³³⁻³⁷ 이에 반하여 고분자 배향막이 없는 경우는 러빙 과정에서 유리 기판에 묻어나온 러빙포의 고분자들이 러빙 방향으로 늘어서서, 그 위에 코팅되는 액정 분자들의 배향을 분자간 상호작용을 통해 러빙 방향으로 유도한다고 생각한다. 배향력이 강한 고분자 막을 이용해서 액정 배향을 계속 유지해야 하는 액정 셀과는 다르게 광반응성 액정을 이용한 액정 위상지연 필름 제조 경우에는 액정을 기판에 코팅하여 액정 배향을 유도한 후 곧바로 UV 빛을 조사하여 액정의 배향을 고착시키기 때문에, 순간적으로 액정의 배향을 유도하는 이방성 인자만 있으면 가능하다. 그러므로 배향막을 사용하지 않은 유리 기판 위에서도 러빙 공정으로 인해 형성된 유리 표면의 이방성을 이용해 LC242 액정 분자들의 배향을 일시적으로 유도할 수 있는데, 이 때 광 조사를 하여 액정필름을 제조할 경우 PI 고분자 배향막을 사용한 경우보다 액정의 배열 정도가 떨어지지만 기판 위에 배향막을 입히는 추가 공정 없이도 액정필름을 제조할 수 있는 것을 보여준다.

결 론

본 연구에서는 고분자 배향막을 기판 위에 코팅하여 액정의 배향을 유도하는 공정을 사용하지 않고, 아무 코팅하지 않은 유리 기판을 러빙하여 반응성 액정의 배향을 유도한 후 액정필름을 제조하는 실험을 수행하였다. 고분자 배향막을 코팅한 기판에서의 경우와 동일하게 배향막이 없는 유리 기판을 러빙한 후, 그 위에 광반응성 액체인 LC242를 코팅, 경화시켜 액정필름을 제조하였는데, 순수 유리 기판을 러빙하여 액정 배향을 유도한 경우에도 고분자 배향막을 사용하여 배향을 유도한 경우와 같이 액정이 러빙 방향과 평행하게 배향되는 것을 편광 FTIR 실험으로 알 수 있었다. 하지만, 배향막을 사용하지 않으면 PI 배향막을 사용하여 액정 배향을 유도한 경우보다 배향 정도는 약간 낮았는데, 이와 같은 결과는 액정필름의 편광현미경 사진과 복굴절 측정실험 결과에서도 확인할 수 있었다.

고분자 배향막을 사용하는 경우 배향막 표면의 고분자 사슬과 액정 사이 분자간 상호작용에 의하여 액정 배향이 유도되는 것에 반하여, 배향막이 없는 유리 기판을 러빙한 경우에는 러빙 과정에서 유리 표면에 묻어나온 러빙포의 고분자들이 러빙 방향으로 늘어서 액정의 배향을 유도한다고 생각한다. 이와 같은 순수 유리 기판의 액정 배향 메커니즘은 러빙포의 러빙 깊이를 변화시켜 액정 배향을 유도한 실험과 러빙한 유리 표면의 AFM 사진, 그리고 러빙한 유리 기판을 500 °C에서 열처리한 후에는 액정 배향이 유도되지 않는 실험 결과 등으로 증명할 수 있었다.

감사의 글: 이 논문은 경기도 기술개발사업(C121213) 지원과 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과입니다(과제번호: 2013058642).

참 고 문 헌

1. D. S. Seo, S. Kobayashi, and M. Nishikawa, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2392 (1992).
2. B. S. Ban and Y. B. Kim, *J. Am. Chem. Soc.*, **103**, 3869 (1999).
3. E. S. Lee, P. Vetter, T. Miyahita, and T. Uchida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, L1339 (1993).
4. M. G. Samant, J. Stohr, H. R. Brown, T. P. Russell, J. M. Sands, and S. K. Kumar, *Macromolecules*, **29**, 8334 (1996).
5. S. W. Lee, S. J. Lee, S. G. Hahm, T. J. Lee, B. Lee, B. Chae, S. B. Kim, J. C. Jung, W. C. Zin, B. H. Sohn, and M. Ree, *Macromolecules*, **38**, 4331 (2005).
6. B. Chae, S. W. Lee, B. Lee, W. Choi, S. B. Kim, Y. M. Jung, J. C. Jung, K. H. Lee, and M. Ree, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 11911 (2003).
7. B. S. Ban, Y. N. Rim, and Y. B. Kim, *Liq. Cryst.*, **27**, 125 (2000).
8. W. M. Gibbons, P. J. Shannon, S. T. Sun, and B. J. Swetlin, *Nature*, **351**, 49 (1991).
9. K. Ichimura, *Chem. Rev.*, **100**, 1847 (2000).
10. M. O'Neill and S. M. Kelly, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, R67 (2000).
11. M. Obi, S. Morino, and K. Ichimura, *Chem. Mater.*, **11**, 656 (1996).
12. P. O. Jackson, M. Oneill, W. L. Duffy, P. Hindmarsh, S. M. Kelly, and G. Owen, *Chem. Mater.*, **13**, 694 (2001).
13. B. Chae, S. W. Lee, Y. M. Jung, M. Ree, and S. B. Kim, *Langmuir*, **19**, 687 (2003).
14. S. W. Lee, S. I. Kim, B. Lee, H. C. Kim, T. Chang, and M. Ree, *Langmuir*, **19**, 10381 (2003).
15. S. W. Lee and M. Ree, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **42**, 1322 (2004).
16. S. W. Lee, T. Chang, and M. Ree, *Macromol. Rapid Commun.*, **22**, 941 (2001).
17. S. W. Lee, S. I. Kim, B. Lee, W. Choi, B. Chae, S. B. Kim, and M. Ree, *Macromolecules*, **36**, 6527 (2003).
18. M. Hasegawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L457 (1999).
19. Z. Suna, A. Qina, Z. Chena, and Y. Wanga, *Liq. Cryst.*, **37**, 345 (2010).
20. A. Y.-G. Fuh, C.-K. Liu, K.-T. Cheng, C.-L. Ting, C.-C. Chen, P. C.-P. Chao, and H.-K. Hsu, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 161104 (2009).
21. D. Coates, O. Parri, M. Verrall, K. Slaney, and S. Marden, *Macromol. Symp.*, **154**, 59 (2000).
22. L. H. Wu, S. Luo, C. S. Hsu, and S. T. Wu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 5899 (2000).
23. F. Li, F. W. Harris, and S. Z. D. Cheng, *Polymer*, **37**, 5321 (1996).
24. C. D. Hoke, H. Mori, and P. J. Bos, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L642 (1999).
25. W.-Y. Wu, C.-C. Wang, and A. Y. Fuh, *Opt. Express*, **16**, 17131 (2008).
26. Y.-C. Yang and D.-K. Yang, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **11**, 105502 (2009).
27. I. McCulloch, W. Zhang, M. Heeney, C. Bailey, M. Giles, D. Graham, M. Shkunov, D. Sparrowe, and S. Tierney, *J. Mater. Chem.*, **13**, 2436 (2003).
28. W. Warta, R. Stehle, and N. Karl, *Appl. Phys. A*, **36**, 163 (1985).
29. F. M. Mirabella, Jr., *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **25**, 591 (1986).
30. G. Jung, M. Lee, I. Seo, and K. Song, *Polymer(Korea)*, **35**, 272 (2011).
31. G. Jung, I. Seo, M. Lee, S.-W. Choi, and K. Song, *Polymer(Korea)*, **34**, 242 (2010).
32. Y. V. Kissin and L. A. Rishina, *Eur. Polym. J.*, **12**, 757 (1988).
33. M. Lee, M. Y. Shin, S. H. Kim, and K. Song, *Polymer(Korea)*, **35**, 493 (2011).
34. S. Chandrasekhar, *Liquid Crystals*, 2nd ed, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
35. P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, John Wiley & Sons, Canada, 1999.
36. J. Stohr and M. G. Samant, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.*, **98-99**, 189 (1999).
37. Y. Inoue, Y. Kuramoto, M. Hattori, M. Adachi, M. Kimura, and T. Akahane, *J. Inf. Disp.*, **12**, 125 (2011).