Polymer(Korea), Vol. 40, No. 5, pp. 823-827 (2016)
http://dx.doi.org/10.7317/pk.2016.40.5.823

ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

편광 FTIR 이미징 시스템을 이용한 액정 배향 연구

정재현 · 배진우 · 송기국†
경희대학교 정보전자신소재공학과 영상정보소재기술연구센터
(2016년 7월 20일 접수, 2016년 8월 5일 수정, 2016년 8월 10일 채택)

Studies on Liquid Crystal Orientation Using Polarized FTIR Imaging System

Jae Hyun Jung, Jin Woo Bae, and Kigook Song†
Department of Advanced Materials Engineering for Information and Electronics, Materials Research Center for Information Display, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 17104, Korea
(Received July 20, 2016; Revised August 5, 2016; Accepted August 10, 2016)

초록: 편광 적외선(infrared, IR)을 사용한 FTIR 이미징 실험으로 시료 전체의 평균 배향 상태가 아닌 각 위치에서의 분자 배열 정도를 측정할 수 있었다. 시료 내에서 분자들의 배향 방향이 서로 다른 액정 셀(cell)에 대하여 러빙(rubbing) 강도와 온도에 따른 편광 FTIR 이미징 실험을 수행하였다. 5CB 액정들이 불규칙하게 배열된 영역과 한 방향으로 나란히 배열된 두 영역의 경계 부분 IR 이미지는 러빙 강도에 따라 변하였으며, 5CB가 온도에 따라 액정상에서 액체상으로 변화하는 IR 이미지로부터는 배열이 흐트러진 마이크로미터 크기의 영역들이 배향된 액정상 내에서 부분적으로 먼저 나타난 후 전체의 배열이 모두 변하였다.

Abstract: Molecular orientations at each domains of a sample, not an average of whole area, could be measured using the FTIR imaging experiment with polarized IR beam. Polarized FTIR imaging experiments according to the rubbing strength and sample temperature were carried out for 5CB liquid crystal (LC) cell containing different molecular orientations. At the boundary between areas with random molecular arrangement and perfect LC alignment, the IR image of the cell was changed with rubbing strength. When 5CB changed from LC phase to isotropic liquid phase, disordered areas with micrometer-size were first observed within the area of perfect LC alignment, then whole LC molecules changed to the disordered isotropic phase.

Keywords: FTIR imaging, polarized FTIR, liquid crystal, orientation, alignment.

서 론

FTIR 분광기를 이용하여 분광실험을 수행하면 분자 내 특정 관능기의 존재를 확인할 수 있어 유기화합물 또는 고분자의 분자 구조를 조사하는데 유용하게 이용할 수 있다. 이와 같은 FTIR 실험에서 선편광이 된 적외선을 분자들이 한 방향으로 배향되어 있는 시료에 입사할 경우, 시료의 방향에 따라 IR 흡수피크의 세기가 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 입사 IR의 편광방향 전기장과 시료 내 분자들의 진동운동에 의해 형성되는 transition dipole의 방향이 이루는 각도에 따라서 IR 흡수 피크의 세기가 달라지기 때문이다. 진동운동의 피크세기는 $[I] = (M \cdot E)^2 \cdot \cos^2\alpha$로 표시되는데, M은 진동운동의 transition dipole, E는 IR의 전기장 벡터 그리고 α는 transition dipole과 편광 IR의 전기장 방향이 이루는 각도를 의미한다. 그러므로 시료의 특정 축에 대하여 입사 IR의 편광방향에 따른 흡수피크 세기를 비교하면 시료 내 분자들의 배향에 관한 정보를 얻을 수 있다.[1,2]

FTIR 분광법을 이용한 측정 방법은 시료 전체 영역을 하나의 점 형태인 1차원 데이터로만 보여주기 때문에 2차원적(2D) 실험 결과를 얻기 위해서는 시료의 여러 위치를 이동하며 일정 위치에서의 스펙트럼을 각각 얻은 후 각 스펙트럼을 모두 모아서 일정 면적의 총 스펙트럼으로 구성해야 한다. 이와 같은 mapping 실험을 수행하면 시료 내 특정 물질의 분포나 불순물 또는 결함 등의 2차원적 위치를 확인할 수 있어 매우 유용한 실험으로 이용되고 있다. 하지만, 일반 FTIR 분광기와 같이 검출기의 검출셀이 하나인 경우 시료 내 각 측정 위치마다 옮겨서 스펙트럼을 얻어야 하기 때문에 시간이 오래 걸리고, 이에 따라 측정 중 습도 등 외부 환경의 변화에 영향을 받을 가능성이 커지며, 측정 위치를 옮기는 과정에서 위치상의 오차도 발생할 가능성도 높다. 이를 보완하기

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ksong@khu.ac.kr
©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

위하여 여러 개의 검출요소가 하나의 행 방향으로 늘어서 있는 선형배열 검출기(linear array detector)를 사용하면 한 번에 여러 위치의 측정이 가능하여 앞에서 언급한 문제점들을 해결하면서 mapping 데이터를 얻을 수 있다.[3] 입사 IR 빔 크기가 수 밀리미터 이상인 일반 FTIR 분광기에 비하여 현미경을 사용한 FTIR 현미경 실험에서는 아주 작은 마이크로미터 크기 영역에서의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 그러므로 FTIR 현미경 실험과 선형배열 검출기를 사용한 mapping 실험을 같이 사용하면 마이크로미터 크기로 작게 나누어진 여러 위치에서의 IR 스펙트럼들을 동시에 얻을 수 있는데, 이렇게 얻어진 스펙트럼들에서 특정 피크의 세기에 대하여 비교하여 일정 면적에서 그 피크의 세기의 분포를 색깔로 표시한 실험 방법이 FTIR 이미징 실험이다.[4-8]

특정 IR 피크의 세기를 2차원적 이미지로 나타내는 FTIR 이미징 실험을 이용하면 일반 FTIR 실험으로는 측정하기 어려웠던 시료 내 혼합된 물질의 분포, 상 분리, 계면의 변화, 분자의 확산 현상 등에 대한 연구를 수행할 수 있게 되었다.[9-13] 하지만, 본 연구에서는 FTIR 이미징 실험을 수행할 때 입사 IR을 선편광이 된 상태로 사용함으로써, 시료 내 분자들의 단순한 분포가 아닌 시료 내 위치에 따른 분자들의 배향 방향에 관한 연구를 수행할 수 있었다. 이와 같이 시료 내에 분자의 종류가 아닌 분자의 배향 방향에 따른 분포를 편광 FTIR 이미징 실험으로 조사하는 것은 본 논문이 처음이라 생각한다. 그러므로 본 연구에서는 분자의 배향 방향이 서로 다르게 배열된 액정 셀을 제조 후 편광 FTIR 이미징 실험으로 측정하여 공정 조건에 따른 액정 분자들의 배열 상태 변화를 셀 내 각 위치에서 조사하였다.

실 험

액정 셀 제작에 사용된 5CB(4'-pentyl-[1,1'-biphenyl]-4-carbonitrile)는 대표적인 네마틱(nematic) 액정으로 Merck사에서 구입하였고(Figure 1), 5CB와 액정 혼합물로 사용한 LC242(2-methyl-1,4-phenylene *bis*(4-(((4-(acryloyloxy)butoxy) carbonyl)oxy)benzoate)) 액정은 BASF에서 구입하였다. 배향막으로 사용한 폴리이미드(PI)의 경우 일본 NCK사의 PI 7492K를 사용하였으며 유리 기판에 4000 rpm으로 40초간 스핀 코팅하여 박막으로 제조하였다. 그리고 hot plate에서 80 °C로 30분 동안 annealing하여 용매를 제거하였고, 235 °C에서 1시간 베이킹하였다. 이렇게 얻어진 PI 필름의 배향을 유도하기 위하여 러빙 공정을 사용하였는데, 러빙포를 1000 rpm으로 회전시키면서 2회 러빙하였다. 액정 혼합물을 사용한 실험의 경우 LC242와 5CB를 1:1(wt%)로 섞은 뒤에 두 혼합물의 등방상온도인 75 °C보다 높은 온도인 80 °C에서 5분간 교반하여 균일하게 섞어주어 사용하였다. PI 필름이 코팅된 두 유리 기판 사이에 액정이 샌드위치 형태로 있는 액정 셀을 제조할 때 액정을 두 기판 틈 사이로 모세관 현상을 이용하여 주입하였고, 모세관 현상으로 주입되면서 생성된 액정의 배향을 제거하기 위해 액정 셀을 등방상 온도보다 높은 온도에서 5분간 annealing하였다. FTIR microscopy 분광실험은 JASCO사의 FTIR-6000 분광기를 이용하였는데, FTIR 이미징 실험의 경우는 JASCO사의 IMV-4000 이미징 시스템을 이용하였다. Detector로는 dual mercury cadmium telluride (MCT) detector를 액체질소로 냉각하여 사용하였다. 이때, 이미징 분석의 스펙트럼의 잡음을 최대한 줄이면서 정확도를 높이고자 500번 스캔한 뒤, 이를 평균하였다. 액정 셀의 배향을 확인하고자 Harrick사에서 제조한 KRS-5 wire grid 편광판을 이용하여 편광방향 스펙트럼을 얻었다. 복굴절 측정을 위해 광원으로는 10 mW 출력의 He-Ne 레이저(632.8 nm)를 사용하였고 Newport사의 818-SL 실리콘 검출기를 사용하였다. Oriel의 Glan-Thomson polarizer를 polarizer와 analyzer로 사용하여 설치한 직교된 편광판 사이에 액정 셀을 위치하고, 셀을 투과하여 나오는 광원의 위상지연을 Babinet-Soleil compensator로 측정하여 액정 셀의 광학 이방성인 복굴절을 측정하였다.

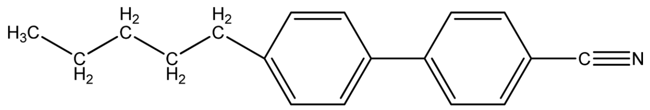

Figure 1. Chemical structure of 5CB nematic liquid crystal.

결과 및 토론

유리 기판에 코팅된 PI 필름을 러빙하여 액정 분자들의 배향을 러빙 방향으로 유도하는 액정 셀 제조에서는, PI 필름을 러빙하는 강도에 따라 셀 내 액정들의 배열 정도를 다르게 얻을 수 있다. 액정 셀 내 분자들의 배열 상태를 조사하기 위하여 러빙 강도, 즉 러빙 깊이(rubbing depth)가 다르게 PI 필름을 러빙하여 제조한 5CB 액정 셀들의 복굴절을 측정하였다. 러빙 깊이가 깊어질수록 PI 필름의 배향력이 증가하여 더 많은 액정 분자들이 한 방향으로 유도되므로 액정 셀 내의 이방성은 Figure 2에 나타난 것처럼 러빙 깊이에 따라 증가하게 된다. 액정 셀의 복굴절은 러빙 강도에 따라 증가하다가 러빙 깊이가 0.3 mm를 넘으면 더 이상 변하지 않고 일정하게 유지되는데, 이는 PI 필름을 깊이가 0.3 mm의 강도로 러빙하면 액정 셀 내 5CB 분자들은 이미 모두 한 방향으로 완전하게 배열된다는 것을 의미한다. 하지만, 이와 같은 복굴절 실험은 액정 셀 내 위치에 따른 각각의 결과가 아닌 셀 전체의 평균 결과를 의미한다. 본 연구에서는 FTIR 이미징 분광 실험을 수행하여 액정 셀 전체가 아닌 시료 각 위치에서의 분자들의 배향 방향 및 배열 정도 변화를 조사하였다.

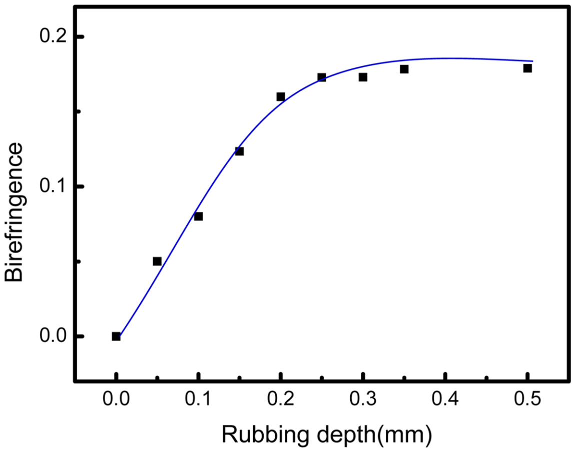

Figure 2. Effect of rubbing depth on birefringence of 5CB LC cell.

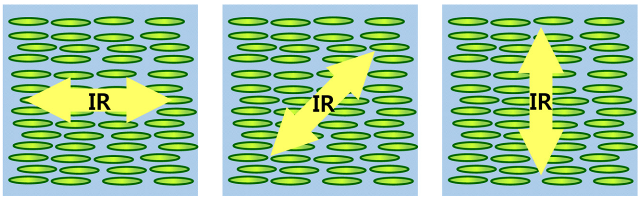

Figure 3. Schematic diagram of LC molecules with polarized IR beam direction.

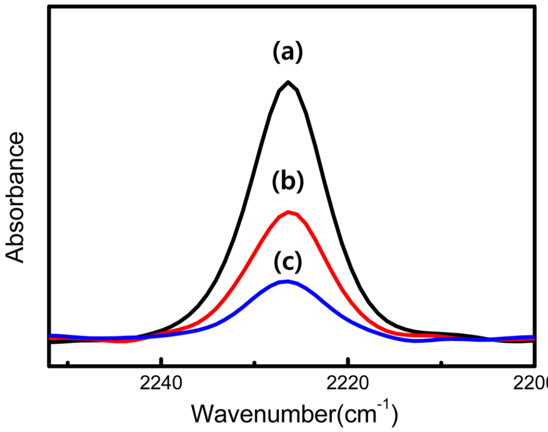

Figure 4. Polarized FTIR spectra of C≡N stretching mode of 5CB with different angle between LC director and polarized IR direction: (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°.

본 실험에 사용한 5CB 액정의 구조를 Figure 1에서 보면 분자의 장축 방향으로 C≡N 그룹이 평행하게 늘어서 있어, IR 스펙트럼 2225 cm^{-1}에서 나타나는 C≡N 신축 진동운동에 따른 transition dipole의 방향은 5CB 분자의 장축과 평행하리라 여겨진다. 그러므로 시료 내 5CB 분자들이 한 방향으로 늘어서 배향되어 있을 때, 이 진동운동을 편광 FTIR 실험으로 측정하면 입사 IR의 편광방향이 5CB의 장축방향, 즉 액정 축과 평행할 때 피크의 세기가 가장 크게 나오는 반면 IR 편광방향이 분자 장축에 수직일 경우 C≡N 신축 진동운동의 피크세기가 가장 작게 나타날 것을 예측할 수 있다. 러빙을 한 PI 배향막을 사용하여 액정상인 5CB 모든 분자들을 한 방향으로 배열시킨 액정 셀을 제조한 후 Figure 3 모식도와 같이 입사 IR의 편광방향을 액정 셀 내 5CB 장축방향과 평행하게, 엇갈려서, 그리고 수직으로 하여 편광 FTIR 실험을 수행하였다. 얻어진 IR 스펙트럼 중 2225 cm^{-1}에서 나타나는 C≡N 신축운동의 피크세기를 보면, 5CB 장축방향이 입사 IR의 편광방향과 일치하는 경우 피크세기가 가장 크게 나타나는 반면, 수직인 경우에는 가장 작게 나타나는 것을 Figure 4 FTIR 스펙트럼의 C≡N 신축운동 피크에서 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이, C≡N 신축운동의 transition dipole 방향이 5CB 분자의 장축과 평행하여, 액정 축이 입사 IR의 편광방향과 이루는 각도에 따라 피크의 세기가 변하기 때문이다.[12] Figure 4의 입사 IR 편광방향과 액정 축이 수직일 경우 2225 cm^{-1} 피크가 완전히 사라지지 않는 이유는 C≡N 신축운동의 transition dipole 방향이 5CB 분자의 장축과 완벽하게 일치하지 않는 것과 액정 상의 분자들이 계속 움직여 분자의 장축방향이 변하기 때문으로 여겨진다.[14,15]

FTIR 이미징 실험은 시료의 IR 스펙트럼을 얻을 때 마이크로미터 크기의 여러 픽셀로 나누어 각 픽셀 영역에서의 IR 스펙트럼을 각각 얻은 후, 특정 피크에 대한 세기를 각 픽셀 별로 비교하여 나타냄으로써 시료 전체에 해당 피크의 세기 분포를 표시하는 실험 방법이다. 특정 피크의 세기 변화를 시료 각 영역에 해당하는 2D 이미지로 쉽게 시각화하기 위하여 각 픽셀 별로 피크세기를 색깔로 비례하여 표시함으로써, 즉 각 픽셀에서 피크세기가 클 때는 붉은 색의 밝은 색 계열로 표시하고 피크세기가 작아지면 점점 어두운 파란색 계열로 표시하여 시료 전체 영역에 대하여 각 위치 별 피크세기 분포를 2D 이미지로 보여준다. 그러므로 FTIR 이미징 실험을 이용하면 특정 관능기를 포함하고 있는 분자의 정량적 분포를 시료 내 위치에 따라 알 수 있어 혼합물의 경우 각 분자들의 분포와 시간에 따른 움직임에 관한 정보를 쉽게 구할 수 있다.[14] 본 연구에서는 FTIR 이미징 실험과 편광 FTIR 실험을 동시에 수행하여 시료 내 분자들의 분포가 아닌 분자들의 배향 방향의 변화를 시료 내 각 위치에서 조사하였다. 5CB 액정 셀을 제조할 때 PI 필름의 일부분만 러빙하여 액정 분자들의 배향이 셀 내 위치에 따라 다르게 한 후 러빙 경계에서의 액정 배향 변화를 편광 FTIR 이미징 실험으로 조사하였다. 앞에서 설명하였듯이, 입사 IR 편광 방향을 러빙 방향과 동일하게 FTIR 이미징 실험을 수행할 경우 셀 내 액정 분자들의 배향이 IR 편광 방향과 같을 경우 2225 cm^{-1}의 C≡N 신축운동의 피크세기가 크게 나오며, 액정 배열 정도가 완전할수록 그 피크는 더 커지게 된다. 그러므로 액정 셀의 FTIR 이미징 실험에서 각 픽셀 별 스펙트럼을 얻은 후 각 픽셀의

2225 cm^{-1} 피크세기를 비교하면, 피크세기가 큰 픽셀은 액정이 러빙 방향으로 배향이 잘 된 상태인 반면, 세기가 작으면 액정 배향이 잘 안되어 불규칙하게 분자가 배열한 상태를 의미하는 것이다. 시료의 각 픽셀 별 2225 cm^{-1} 피크세기 차이를 색깔로 나타내면, 피크세기가 커서 액정 배열이 잘 된 붉은색 계열과 액정 배향이 되지 않아 피크세기가 작은 파란색 계열로 표시할 수 있다. 이와 같은 액정 배향에 따른 IR 이미지 변화를 셀 내 위치에 따라 액정 배향이 다른 Figure 5의 FTIR 이미징 그림에서 볼 수 있다.

액정의 배향막으로 사용되는 PI 필름의 일부를 마스크로 가리고 러빙하여 필름의 일부분만 러빙된 PI 배향막으로 제조한 5CB 셀에서, 액정의 배향이 유도되지 못한 영역과 배향이 유도된 영역의 경계 부분을 찍은 FTIR 이미징 결과를 2225 cm^{-1} 피크세기에 대하여 색깔 이미지로 표시하여 Figure 5에 나타내었다. 마스크로 가려져 있는 PI 필름 부분은 러빙이 되지 않아 액정이 불규칙하게 배열하여 파란색으로 나타나고(Figure 5의 위 영역), 러빙된 필름 부분의 액정들은 한 방향으로 배향되어 이미지는 붉은 색으로 표시된다. 이와 같이 액정의 배향이 서로 다른 두 영역의 경계에서는 Figure 5의 모식도처럼 분자들이 배열되어 있으리라 생각한다. 액정들이 불규칙하게 배열된 영역과 한 방향으로 나란히 배열되어 있는 영역의 경계 부분 FTIR 이미징을 보면, PI 필름의 러빙 깊이가 커질수록 양 영역이 확연하게 구분되며, 또한 액정의 배향 상태가 서로 다른 두 영역의 경계 폭도 좁아졌다. 러빙 깊이가 깊어질수록 액정의 배향이 잘 되는 것은 Figure 2의 복굴절 실험에서도 보였는데, FTIR 이미징 실험으로는 액정 셀 전체 평균 배향 상태가 아닌 셀 내 각 위치에서의 배향 정도 차이를 이미지로 보여주는 것이다. PI 러빙 깊이가 0.1, 0.3 그리고 0.5 mm일 때 액정 배향이 서로 다른 영역 사이의 경계 폭이 각각 870, 330 그리고 117 μm로 감소하였다. 러빙 깊이 0.1 mm의 경우는 경계 부분에서 러빙 방지 마스크의 존재로 인하여 러빙포가 PI 필름에 완벽하게 밀착되지 못해 이격이 발생하면서 필름 러빙을 확실하게 하지 못해 경계 부분의 폭이 넓게 나타난다. 하지만, 0.5 mm로 깊게 러빙한 경우에는 마스크 때문에 이격된 부분을 러빙포가 강하게 누를 수 있어 경계 부분에서도 PI 배향을 확실하게 유도할 수 있어 각 영역의 액정 배향 차이가 뚜렷하고 경계 폭도 좁게 나타나는 것이다. 이와 같이 FTIR 이미징 실험을 편광 IR로 수행하여 분자의 배향에 관한 조사를 수행하면 액정 셀 전체 영역의 평균적 배향 변화가 아니라 셀 위치에 따라 서로 다른 액정 배향과 배열 정도에 관한 정보를 얻을 수 있다.

액정상에서 등방의 액체상으로 변화하는 T_{ni} 전이온도가 35 °C인 5CB를 T_{ni} 123 °C의 diacrylate 계열 LC242(BASF) 네마틱 액정과 섞어 액정 혼합물을 만들었을 때, T_{ni} 전이온도가 혼합물의 조성에 따라 변화하여 5CB:LC242(1:1) 경우에는 75 °C에서 나타나는 것을 이전 논문에서 설명하였다.[16] 5CB 액정을 상대적으로 분자 크기가 큰 LC242 액정과 섞었을 때 크기가 작은 5CB 분자는 LC242 액정 사이에 섞여 LC242가 배열되는 방향으로 동일하게 늘어서는 것을 보여주었다. 이전 논문에서 5CB 액정이 다른 액정과 혼합물로 존재할 때는 5CB T_{ni} 온도보다 높은 70 °C에서도 불규칙한 배열을 가지지 않고 한 방향으로 분자들이 나란히 배열되는 것을 보였는데, 본 연구에서는 액정 혼합물의 온도에 따른 분자들의 배열 변화를 편광 FTIR 이미징 실험을 통하여 조사하였다. 5CB:LC242(1:1) 혼합물의 온도에 따른 액정들의 배향 변화를 조사하기 위하여 앞에서와 같이 액정 셀을 준비한 후, 편광 FTIR 이미징 실험의 5CB C≡N 신축 진동운동에 대하여 피크세기 이미지를 Figure 6에 표시하였다. 25 °C에서 FTIR 실험을 한 Figure 6(a) IR 이미지를 보면 앞의 실험에서와 마찬가지로 러빙되지 않은 PI 필름 위에서는 액정이 불규칙 상태로 존재하여 푸른색 계열의 어두운 색깔인 반면 러

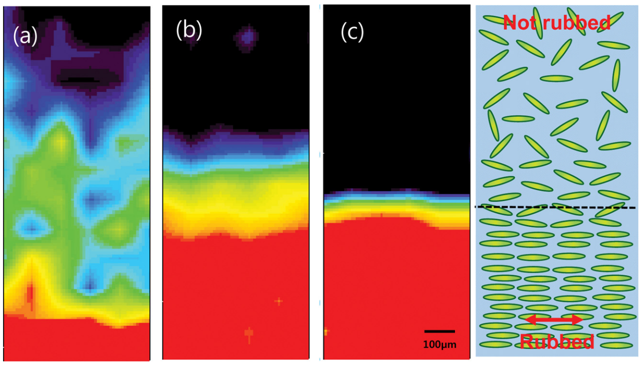

Figure 5. FTIR imaging of 2225 cm^{-1} peak of 5CB in LC cell prepared with polyimide alignment layer with different rubbing depth: (a) 0.1 mm; (b) 0.3 mm; (c) 0.5 mm.

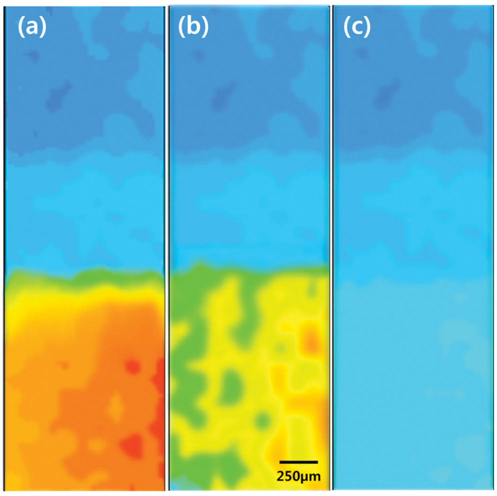

Figure 6. FTIR imaging of 2225 cm^{-1} peak of 5CB/LC242 LC mixture at different temperatures: (a) 25 °C; (b) 70 °C; (c) 90 °C.

빙된 PI 필름 위에서는 배향이 유도되어 붉은색의 밝은 영역으로 나타났다. 하지만, 70 ℃에서 수행한 FTIR 이미징 실험의 Figure 6(b) IR 이미지에서는 온도가 증가함에 따라 액정이 잘 배향된 영역에서 점점 불규칙 상태의 액정 배열을 의미하는 어두운 색이 부분적으로 나타나기 시작하였다. 혼합물의 T_{ni} 전이온도인 75 ℃ 보다 높은 90 ℃에서의 FTIR 이미징 실험 결과인 Figure 6(c) IR 이미지는 예측대로 시료 전 영역이 균일하게 불규칙한 액체상을 보였다. 그러므로 온도에 따른 FTIR 이미징 실험의 Figure 6 IR 이미지를 보면 액정의 배향 변화가 T_{ni} 전이온도를 지나며 배향 경계 부분 각 위치에서 어떻게 변화하는지 알 수 있다. 즉, 액정 혼합물의 온도가 전이온도에 다가가면서 균일하던 액정 배향 IR 이미지 색깔이 부분적으로 조금씩 변하는데, 70 ℃에서 배열이 흐트러진 약 200 마이크로미터 정도의 영역들이 부분적으로 나타난 후 전이온도를 넘어가면 액정 전체의 배열이 모두 불규칙하게 변하는 것으로 여겨진다.

결 론

편광 IR을 사용한 FTIR 이미징 실험을 통하여 시료 내 액정 분자들의 각 영역별 배향 변화에 관하여 연구하였다. 5CB 액정 셀을 제조할 때 PI 배향막의 일부만 러빙하여 액정 분자들의 배향이 셀 내 위치에 따라 다르도록 한 후 경계에서의 액정 배향 변화를 조사하였다. 액정들이 불규칙하게 배열된 영역과 한 방향으로 나란히 배열되어 있는 두 영역의 경계 부분 FTIR 이미징을 보면 러빙 강도가 클수록 양 영역이 확연하게 구분되며 두 영역의 경계 폭도 좁아졌다. 액정 셀의 복굴절 실험에서도 러빙에 따른 액정 배향 변화를 보였지만, FTIR 이미징 실험으로는 액정 셀 전체 평균 배향 상태가 아닌 셀 내 각 위치에서의 배향 정도 차이를 IR 이미지로 보였다.

5CB 액정이 다른 액정과 혼합물로 존재할 때는 순수 5CB 액정의 T_{ni} 전이온도보다 높은 온도에서도 한 방향으로 분자들이 나란히 배열되는데, 본 연구에서 이와 같은 액정 혼합물의 온도에 따른 분자들의 배열 변화를 편광 FTIR 이미징 실험을 통하여 조사하였다. 온도에 따른 FTIR 이미징 실험 이미지를 보면 액정 혼합물의 온도가 전이온도에 다가가면서 균일하던 액정 배향 IR 이미지가 부분적으로 조금씩 변하여, 약 200 마이크로미터 정도의 배열이 흐트러진 영역들이 나타난 후 액정 혼합물의 전이온도를 넘어 가면서 액정 전체의 배열이 모두 불규칙하게 변하였다.

감사의 글: 이 논문은 산업통상자원부의 전략적핵심소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 결과입니다(과제번호: 10053627).

참 고 문 헌

1. P. C. Painter, M. M. Coleman, and J. L. Koenig, *The Theory of Vibrational Spectroscopy and Its Application to Polymeric Materials*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1982.
2. J. Ok and K. Song, *Polym. Korea*, **20**, 1042 (1996).
3. S. C. Lee and S. J. Oh, *Polym. Sci. Technol.*, **21**, 2, 191 (2010).
4. R. Bhargava and I. W. Levin, *Anal. Chem.*, **73**, 5157 (2001).
5. H. Sugiyama, J. Koshoubu, S. Kashiwabara, T. Nagoshi, R. A. Larsen, and K. Akao, *Appl. Spec.*, **62**, 17 (2008).
6. T. Nakano, T. Yokoyama, and H. Toriumi, *Appl. Spec.*, **47**, 1354 (1993).
7. W. Uhmann, A. Becker, C. Taran, and F. Siebert, *Appl. Spec.*, **45**, 390 (1991).
8. E. N. Lewis, P. J. Treado, R. C. Reeder, G. M. Story, A. E. Dowrey, C. Marcott, and I. W. Levin, *Anal. Chem.*, **67**, 3377 (1995).
9. E. N. Lewis, A. M. Gorbach, C. Marcott, and I. W. Levin, *Appl. Spec.*, **50**, 263 (1996).
10. A. Gupper, K. L. A. Chan, and S. G. Kazarian, *Macromolecules*, **37**, 6498 (2004).
11. C. A. McFarland, J. L. Koenig, and J. L. West, *Appl. Spec.*, **47**, 321 (1993).
12. D. W. Rafferty, J. L. Koenig, G. Magyar, and J. L. West, *Appl. Spec.*, **56**, 284 (2002).
13. C. M. Snively and J. L. Koenig, *J. Polym. Sci.; Part B: Polym. Phys.*, **37**, 2353, (1999).
14. K. Toriyama and D. A. Dunmur, *Mol. Phys.*, **56**, 479 (1985).
15. K. Kato, S. Kobinatia, and S. Maeada, *Liq. Cryst.*, **5**, 595 (1989).
16. J. W. Bae and K. Song, *Polym. Korea*, **39**, 690 (2015).