

광개시제 첨가에 따른 고분자 분산형 액정 렌즈의 전기-광학 특성 변화

김재용 · 한정인[†]

동국대학교 화공생물공학과
100-715 서울특별시 중구 필동로 1길 30
(2013년 11월 15일 접수, 2013년 12월 24일 수정본 접수, 2013년 12월 29일 채택)

Change of Electro-optical Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystal Lens with Addition of Extra Photo-initiator

Jaeyong Kim and Jeong In Han[†]

Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, 30 Pildong-ro 1-gil, Jung-gu, Seoul 100-715, Korea
(Received 15 November 2013; Received in revised form 24 December 2013; accepted 29 December 2013)

요 약

고분자 분산형 액정 렌즈는 40 wt%의 NOA65 prepolymer와 60 wt%의 E7 액정 균일 혼합물에 추가적으로 광개시제를 첨가하여 11 μm 와 30 μm 의 두께로 제작되었다. 광개시제로 사용된 벤조페논은 상업적으로 판매되는 NOA65에 기본적으로 5.0 wt%의 함량으로 포함되어 있다. 이 논문에서는 NOA65에 포함되어 있는 벤조페논의 농도가 스마트 전자 안경을 위한 고분자 분산형 액정 렌즈에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 광개시제는 NOA65와 E7 액정 혼합물 무게의 1, 2, 4, 8, 16 wt%씩 추가로 첨가되었다. 벤조페논이 첨가된 샘플이 가지는 구동 전압, 직선 구간의 기울기, 응답 시간, 명암비와 같은 전기-광학적 특성들은 벤조페논의 첨가 없이 NOA65만을 사용해 만든 샘플에 비해 모두 개선되었다. 이러한 개선들은 벤조페논의 첨가로 인해 샘플 내부에 존재하는 액정 방울의 평균 직경 크기가 증가하는 것에 기인하였다. 액정 방울의 평균 직경 크기는 벤조페논을 0 wt%에서 8 wt%로 첨가함에 따라 5.3 μm 에서 12.2 μm 로 증가하였다. 광개시제의 농도 범위에 대해 구동 전압은 11.1 V에서 17.3 V의 범위를 보였고, 직선 구간에서의 기울기는 10.35 %T/V에서 13.96 %T/V의 범위를 보였다. 이 두 특성은 벤조페논의 첨가 없이 기본 NOA65로 만들어진 샘플에 비해 더욱 개선되었다. 벤조페논을 첨가하지 않고 샘플의 셀 간격을 30 μm 에서 11 μm 로 감소시킴에 따라 상승 응답 시간은 0.47 ms에서 1.05 ms로, 하강 응답 시간은 18.64 ms에서 45.3 ms로 각각 증가하였고 명암비는 86.5에서 5.7로 크게 감소하였다. 두 특성 모두 셀 간격의 영향으로 저하되는 것을 확인하였으나 벤조페논의 첨가에 따라 상승 응답 시간은 0.77 ms, 하강 응답 시간은 41.04 ms로 각각 감소하였고 명암비는 16.7로 증가하여 다소 개선되는 것 또한 확인되었다.

Abstract – Polymer dispersed liquid crystal lenses of the cell gap of 11 μm and 30 μm were made from a uniformly dispersed mixture of 40 wt% NOA65 prepolymer - 60 wt% E7 liquid crystal with the variations of the additional photoinitiator. The photoinitiator, benzophenone of 5.0 wt% was originally in the commercial prepolymer NOA65. In this works, the influence of the benzophenone amount intentionally added in the commercial NOA65 on the electrical properties of polymer dispersed liquid crystal lens for smart electronic glasses. The additional quantities of the photoinitiator were 1, 2, 4, 8 and 16 wt% of the weight of NOA65 - E7 mixture. All the electro-optical properties of the sample with added benzophenone such as the driving voltage, the slope of the linear region, the response time and contrast ratio were more improved than that of commercial NOA65 only. These improvements were due to the increase of the average size of E7 liquid crystal droplets in the samples with the increase of the added benzophenone amount. The liquid crystal droplet size was increased from 5.3 μm to 12.2 μm when the photoinitiator was added from 0 wt% to 8 wt%. At the same concentration range of the photoinitiator, the driving voltage was ranged from 11.1 V to 17.3 V. The slopes of the linear region were in the range of 10.35~13.96 %T/V, which were more enhanced than that of NOA65 without the additional

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hanji@dongguk.edu

‡이 논문은 동국대학교 화공생물공학과 김병식 교수님(초당대학교 총장님)의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

benzophenone. In particular, though the deteriorations by cell gap of 11 μm were so effective to offset the influence of the added benzophenone for both rising and falling response time, it is confirmed that there were still somewhat improvement by the additional benzophenone. Response time and contrast ratios of all the samples with excess benzophenone were slightly enhanced.

Key words: Polymer Dispersed Liquid Crystal(PDLC), Benzophenone, Photoinitiator, Smart Electronic Glasses

1. 서 론

최근 빛의 세기에 따른 자동 광량 조절 기능과 거리에 따른 자동 초점 조절 기능이 부여된 다양한 스마트 전자 안경에 대한 많은 연구가 발표되고 있다[1-8]. 특히, 고분자 분산형 액정은 액정 기반의 근거리용 응용 렌즈로 자동 광량 조절 기능과 자동 초점 기능이 부여된 스마트 전자 안경으로 개발이 진행 중이다.

자동 광량 조절은 전자 안경의 기능으로 외부에서 가해지는 빛의 양에 따라 빛의 투과도가 자동적으로 증가 또는 감소되는 것을 뜻하며, 빛이 강할 때는 빛의 투과율을 감소시키고 빛이 약할 때는 투과율을 증가시키는 것으로 이를 가능하게 한다. 자동 초점 조절은 사물과의 거리에 따라 초점 거리를 자동적으로 변화하여 원하는 상을 정확하게 맺힐 수 있게 하는 기능이다.

만일 고분자 분산형 액정 렌즈가 가지고 있는 전기-광학적 특성들이 향상된다면, 이러한 자동 광량 조절, 자동 초점 조절과 같은 전자 안경의 스마트 기능들 역시 더욱 향상될 것이다. 특히, 구동 전압의 경우 스마트 전자 안경과 같은 휴대용 기기들의 배터리 소모를 줄이기 위해 반드시 감소되어야 한다. 이 밖에도 고분자 분산형 액정 렌즈의 전압-투과도 곡선에서 직선 구간의 기울기나 응답속도, 그리고 명암비와 같은 전기-광학적 특성 역시 개선되어야 한다.

따라서, 구동 전압, 직선 구간의 기울기 특성, 응답속도 그리고 명암비와 같은 고분자 분산형 액정 렌즈의 전기-광학적 특성을 향상시키기 위해 광개시제로 사용되는 벤조페논의 농도를 변화시켰다. 고분자 분산형 액정 렌즈를 제작함에 있어서 광개시제인 벤조페논의 농도를 변화시키는 것으로 UV 경화 시 형성되는 E7 액정 방울의 밀도, 크기 그리고 분포도를 제어할 수 있었다. 고분자 분산형 액정 렌즈 장치의 더욱 개선된 전기-광학적 특성을 위해 기존에 구동 전압과 직선 구간의 기울기에서 좋은 특성을 보였던 11 μm 의 셀 간격을 주로 사용하였다.

벤조페논의 농도를 다양하게 하여 제작한 시료의 분석을 통해 광개시제의 영향에 대해 조사하였다. 인가된 전압에 따른 광 투과도 변화, 구동 전압, 상승시간과 하강시간의 응답시간, 명암비와 같은 고분자 분산형 액정 렌즈의 전기-광학적 특성을 측정하여 전자 안경에 대해 자동 광량 조절 또는 자동 초점 조절의 응용 가능성에 대해 알아보았다.

2. 실험 방법

고분자 분산형 액정 렌즈 장치의 제조 과정은 이전의 논문들에 구체적으로 기술하였다[1-5]. 고분자 분산형 액정 렌즈 장치를 제작하기 위해 사용된 전고분자와 네마틱 액정으로는 각각 상용화된 NOA65(Norland Products)와 네마틱 액정 E7이며 이들을 서로 균일하게 혼합하여 사용하였다. NOA65는 자외선에 경화되는 광 접착제로 trimethylpropane diallyl ether, trimethylolpropanetris thiol, isophorone diisocyanate ester 그리고 광개시제인 benzophenone(벤조페논)으로

구성된 균일 혼합물이다[9,10]. 네마틱 액정인 E7은 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB), 4-heptyl-4'-cyanobiphenyl (7CB), 4-octyloxy-4'-cyanobiphenyl (8OCB), and 4-pentyl-4'-cyanoterphenyl (5CT)로 구성되어 있다[11,12]. E7의 성분비는 51 wt%의 5CB, 25 wt%의 7CB, 16 wt%의 8OCB 그리고 8 wt%의 5CT이며 완전한 혼합을 위해 E7의 등방성 전이 온도인 61 $^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 온도인 75 $^{\circ}\text{C}$ 에서 혼합하였다. 고분자 분산형 액정 렌즈 장치에 대한 광개시제인 벤조페논의 영향을 조사하기 위해 일정한 성분비를 가지는 NOA65 (40 wt%)와 E7 (60 wt%) 혼합물에 벤조페논의 양을 전체질량의 0, 1, 2, 4, 8, 16 wt%씩 첨가한 뒤 균일하게 혼합하였다. 고분자 분산형 액정 장치는 ITO가 코팅되어 있는 3×4 cm^2 크기의 두 유리판 사이에 NOA65, 벤조페논 그리고 E7의 혼합물이 포개어져 있는 샌드위치 모양으로 제작되었다. 이 때 NOA65, 벤조페논 그리고 E7의 혼합물 두께는 두 유리판 사이에 11 μm 와 30 μm 의 균일한 두께를 가지는 PET 필름을 스페이서로 사용하여 11 μm 와 30 μm 로 균일하게 유지시켜 주었다. 서로 다른 벤조페논 함량을 가지는 NOA65와 E7의 균일한 혼합물에 고분자화 반응을 일으키기 위해 365 nm 파장의 자외선 램프를 사용하여 780 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 세기의 자외선을 조사해 주었으며, 이 때 일어나는 고분자화 반응에 의해 균일한 하나의 상을 이루던 혼합물은 고체의 고분자 상과 E7으로 이루어진 액정 방울의 상으로 나뉘지게 된다. 벤조페논을 첨가한 고분자 분산형 액정 장치의 표면은 광학현미경으로 관찰하였다. 고분자 분산형 액정 장치의 인가전압에 대한 광 투과도 곡선과 응답속도의 측정은 이전 논문에서 정확하게 설명하였다[1-5]. 620 nm의 파장을 가진 헬륨-네온 레이저를 광원으로 사용하였고, 검출기는 광검출기를 사용하였다. 또한, 전기광학적 특성은 디지털 오실로스코프, 평선제너레이터, 전원 증폭기와 멀티미터를 사용하여 측정하였다. 인가전압에 대한 광투과도 곡선에서 구동 전압, 직선 구간에서의 기울기와 명암비를 측정하고 계산하였다. 응답속도의 측정은 평선제너레이터로 투과도가 충분히 포화되는 40 V의 전압을 인가하였고 이를 디지털 오실로스코프로 측정하였다. 명암비는 고분자 분산형 액정 렌즈의 켜진 상태와 꺼진 상태의 광투과도를 측정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

NOA65와 E7 액정의 질량비율을 40 : 60으로 혼합한 후, 그 혼합물 질량의 0, 1, 2, 4, 8, 16 wt%에 해당하는 만큼의 벤조페논을 첨가해 주었으며, 이 때의 NOA65, E7 액정, 그리고 벤조페논의 질량비율을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 벤조페논의 첨가량이 0 wt%임에도 2 wt%를 차지하는 이유는 상업적으로 판매되는 NOA65의 성분 중 벤조페논이 5 wt% 함유되어 있기 때문이며, 따라서 파란색으로 표시된 prepolymer의 비율은 NOA65에서 벤조페논을 뺀 나머지를 뜻한다. Fig. 1의 y축 범례에는 혼합물에 포함된 벤조페논의 총량이 아닌 첨가한 벤조페논의 비율을 표기하였다. 그래프 상에 prepolymer, E7 액정과 함께 비율로 나타낸 벤조페논의 양은 y축 범례만큼 첨가

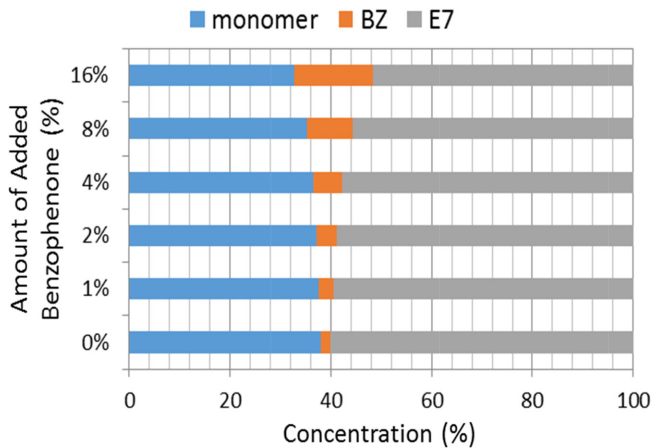


Fig. 1. Compositions of PDLC lens device with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

된 양에 벤조페논을 첨가하기 전 40 wt%에 해당하는 NOA65에 이미 포함되어있던 벤조페논의 양을 합친 것이다. 즉 NOA65와 액정의 혼합물의 질량을 100으로 가정했을 때, 이미 포함되어 있는 벤조페논의 양은 2이고 여기에 1, 2, 4, 8, 16만큼 첨가된 벤조페논을 합하면 3, 4, 6, 10, 18이 되며 벤조페논을 첨가한 후의 총 질량으로 환산하여 비율을 계산할 경우 2, 2.97, 3.92, 5.77, 9.26, 15.52의 벤조페논의 총 비율을 구할 수 있다. NOA65에서 벤조페논을 제외한 prepolymer와 E7 액정 역시 증가된 총 질량에 맞게 다시 계산할 경우, 벤조페논의 첨가량이 증가할수록 prepolymer는 38, 37.62, 37.25, 36.54, 35.19, 32.76으로 E7 액정은 60, 59.41, 58.82, 57.69, 55.56, 51.72으로 감소하게 된다. 0, 1, 2, 4, 8, 16 wt%만큼 벤조페논이 첨가된 샘플들은 각각 BZ00, BZ01, BZ02, BZ04, BZ08, BZ16으로 표기하였다.

Fig. 2의 사진들은 780 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 세기의 자외선으로 경화된 BZ00, BZ01, BZ02, BZ04, BZ08, BZ16 샘플들의 표면을 광학현미경으로 200배 확대하여 관찰한 모습이다. Fig. 2를 통해 볼 때 벤조페논의 비율이 증가할수록 액정 방울의 크기가 어느 정도 증가하는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 또한, Fig. 2를 통해 측정된 벤조페논의 첨가량에 따른 액정 방울의 평균 직경의 길이를 Fig. 3에 그래프로 나타내었다. 벤조페논의 첨가량이 0 wt%에서 8 wt%까지 증가할수록 액정 방울의 평균 직경의 길이는 5.3 μm 에서 12.2 μm 로 비례적으로 증가하였고 벤조페논의 첨가량이 16 wt%인 경우 8 wt%에 비해 액정 방울의 평균 직경의 길이가 다소 줄어들었다. 벤조페논은 고분자 분산형 액정에서 고분자화 중합을 일으키는 광개시제로 작용한다. 벤조페논의 첨가량을 증가시키는 것은 고분자화 중합의 초기 단계를 가속시키며 고분자 분산형 액정 혼합물의 상분리를 빠르게 진행시킨다. 기본적으로 자외선 경화를 통해 고체 고분자를 형성할 수 있는 prepolymer의 양이 벤조페논을 첨가함에 따라 상대적으로 감소하고 있으므로 첨가되는 벤조페논의 양이 많아질수록 액정 방울의 평균 직경의 크기는 점점 증가하게 된다. 다만 BZ16의 경우 과도한 벤조페논의 첨가로 prepolymer뿐만 아니라 E7 액정의 양 또한 크게 줄어들게 되어 액정방울의 크기가 다소 줄어드는 것으로 보여진다. 그 결과, 벤조페논의 비율이 8 wt%일 때 액정 방울의 직경 크기가 12.2 μm 로 가장 크게 나타났다.

BZ00, BZ01, BZ02, BZ04, BZ08 그리고 BZ16 샘플들의 인가 전압에 대한 광 투과도 곡선을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 또한 전

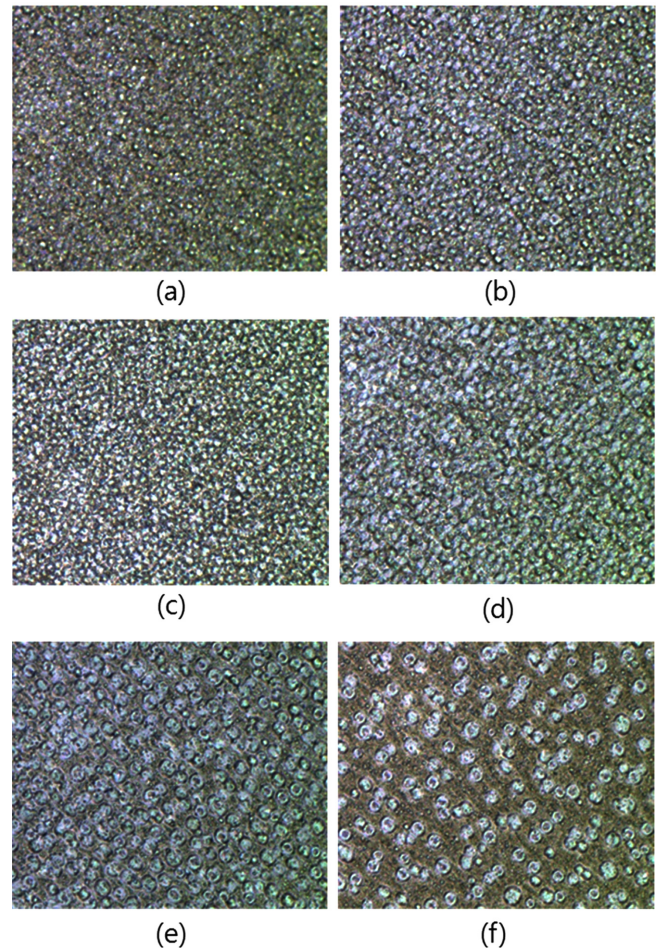


Fig. 2. Optical microscope images of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%: (a) 0 wt%, (b) 1 wt%, (c) 2 wt%, (d) 4 wt%, (e) 8 wt% and 16 wt%.

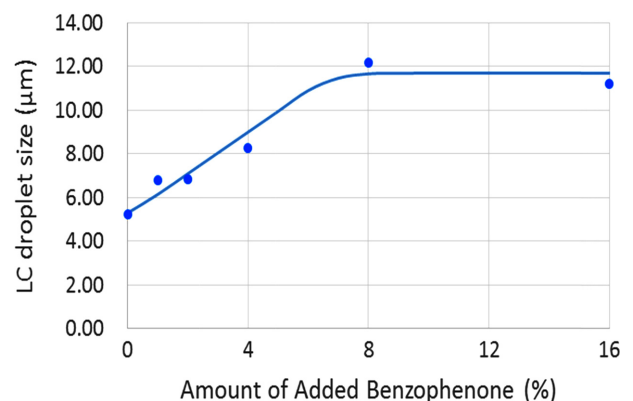


Fig. 3. Variations of average size of liquid crystal droplet of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

기·광학적 특성 비교를 위해 이전 논문의 30 μm 의 셀 간격을 가지는 샘플에 대한 투과도-전압 곡선을 Fig. 4에 30 μm 로 표현하여 함께 포함시켰다. Fig. 4에서 그래프상으로 보여지듯이 11 μm 의 셀 간격을 가지는 고분자 분산형 액정의 구동 전압은 30 μm 의 셀 간격을 가지는

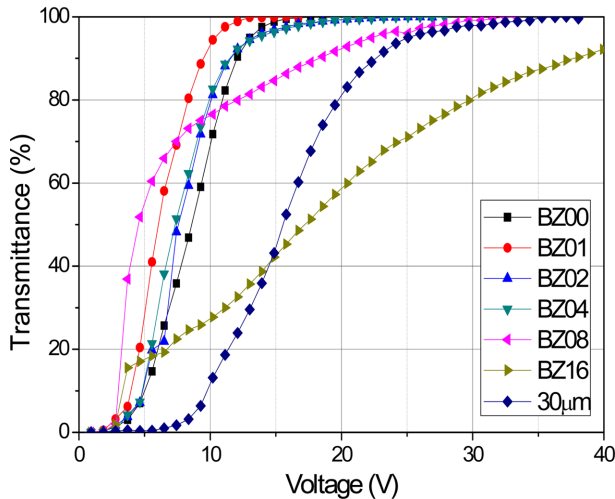


Fig. 4. Optical transmittance - applied voltage curves of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

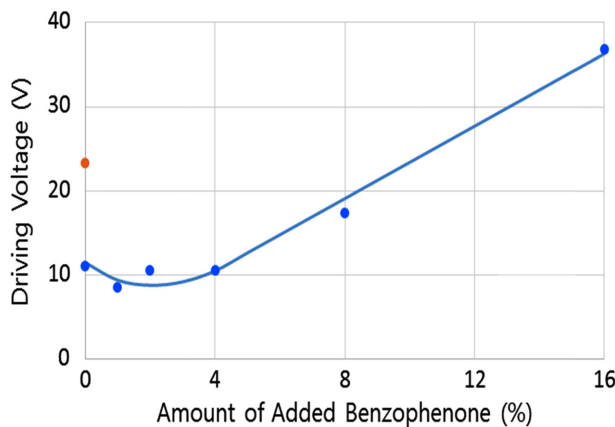


Fig. 5. The driving voltage of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

고분자 분산형 액정 보다 낮은 전압 방향으로 이동한다. BZ00 샘플의 투과도-전압 곡선은 이전의 논문에서 11 μm 의 셀 간격을 가지는 고분자 분산형 액정의 곡선과 같은 것이다[5]. 고분자 분산형 액정 장치에 인가된 전기장은 고분자 분산형 액정의 셀 간격에 반비례한다는 것은 이미 논의된 바 있다[5]. 따라서 더 작은 셀 간격을 가지는 샘플일수록 그 장치에 인가된 전기장은 더 커질 것이며, 그 결과 구동 전압은 y축에서 볼 수 있듯이 23.3 V에서 11.1 V로 낮아지게 된다.

벤조페논이 첨가된 샘플들의 인가된 전압에 따른 광 투과도 곡선은 스마트 전자 안경에 반드시 필요한 S자 모양의 곡선을 매우 잘 보여주고 있다[1-5]. 또한 벤조페논이 추가 되지 않은 샘플에 비해 구동 전압이 다소 낮은 것을 볼 수 있으며, 이러한 구동 전압의 개선은 액정 방울의 직경 크기의 증가로 인해 발생하는 것으로 생각된다.

벤조페논을 16 wt% 첨가한 BZ16 샘플의 투과도-전압 곡선에서는 다른 샘플의 곡선과는 달리 S자 모양의 곡선이 잘 나타나지 않았다. 이 곡선은 3 V의 인가된 전압을 기준으로 두 개의 경향성을 보여준다. 인가 전압이 3 V 보다 낮은 구간에서는 곡선의 기울기가 가파르며 3 V 이상의 구간에서는 기울기가 좀 더 완만하게 나타난다.

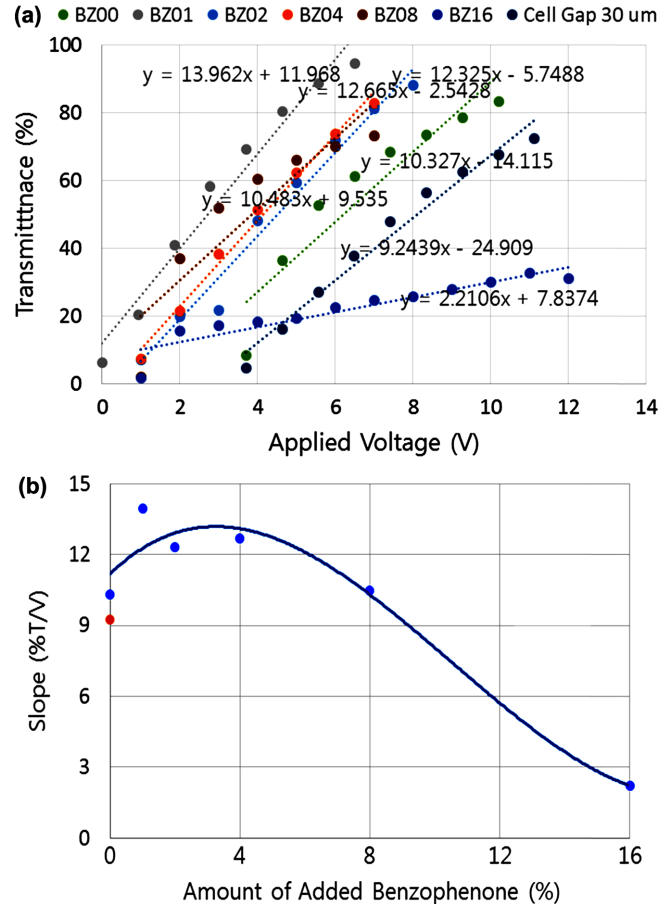


Fig. 6. (a) Linear region of transmittance - applied voltage curves and (b) slopes with the applied voltage of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

또한 이 곡선은 높은 전압에서도 수렴하지 않았으며 BZ16 샘플의 구동 전압은 36.78 V로 다른 샘플에 비해 매우 높게 측정되었다. 측정된 구동 전압은 Fig. 5에 표현되었다. 따라서 16 wt% 첨가의 경우는 Fig. 6의 투과도-전압 특성 곡선이 고분자 분산 액정 렌즈에의 응용에는 적절하지 않은 것을 알 수 있었다. 벤조페논을 0-4 wt% 첨가한 고분자 분산 액정 렌즈의 구동 전압은 11.1 V의 일정한 구동 전압을 보였으며 8 wt%와 16 wt% 첨가한 경우는 17.3 V 그리고 36.8 V로 상승하였다. 16 wt%의 고분자 분산 액정 렌즈의 구동 전압은 추가된 벤조페논의 양의 너무 많아 상대적으로 액정의 양이 적어져 구동 전압이 증가하였다.

결론적으로 광개시제인 벤조페논을 전체 질량의 8 wt% 미만으로 소량 첨가하는 것은 액정 방울의 직경을 증가시키는 효과로 인해 구동 전압을 개선시킬 수 있으나 8 wt% 이상의 벤조페논의 첨가는 상대적으로 액정의 비율을 너무 작게 만들어 구동 전압을 증가시키게 된다.

Fig. 6은 벤조페논의 양에 따른 각각의 샘플들이 가지는 투과도-전압 곡선에서 직선의 구간을 추출하여 정리한 것이며 직선의 방정식과 함께 표현하였다. Fig. 6(a)은 투과도-전압 특성 곡선에서 투과도가 전압에 따라 직선적으로 변화하는 부분만을 발췌하여 최소자승법에 의한 직선 방정식을 구하고 직선 방정식으로부터 기울기를 구하는 것을 보여주며 Fig. 6(b)는 6(a)에서 구한 기울기 값들을 벤조페논의

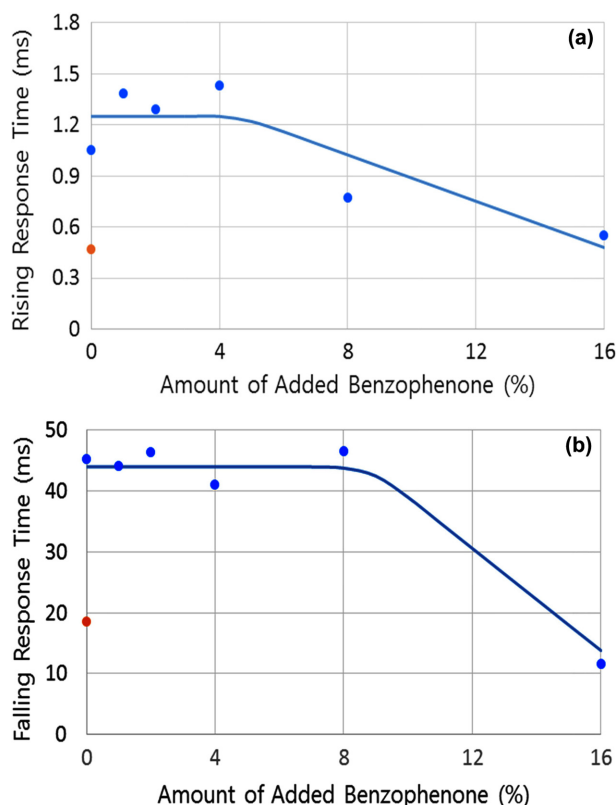


Fig. 7. Response time of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%. (a) rising response time and (b) decay response time.

추가 양에 변화에 대한 기울기의 변화를 나타내었다. 또한 비교를 위해 벤조페논을 추가하지 않고 형성된 고분자 분산형 액정의 셀 간격이 11 μm 와 30 μm 인 샘플의 자료도 Fig. 6에 함께 표현하였으며 이들이 가지는 직선 구간에서의 전압에 대한 투과도의 기울기는 각각 10.35 %T/V와 9.24 %T/V이다. 벤조페논 첨가량이 8 wt% 이하인 구간에서는 벤조페논의 첨가에 따라 기울기가 약간 증가하였으나 그 이상의 벤조페논의 첨가에 대해서는 기울기가 감소하였다. 가장 높은 기울기는 13.96 %T/V이며 이 때의 벤조페논의 첨가량은 1 wt%이다. 벤조페논이 16 wt% 첨가된 경우 기울기는 2.2106 %T/V로 가장 낮게 측정되었다. 그러나 16 wt% 첨가의 경우는 Fig. 6의 투과도-전압 특성 곡선이 고분자 분산 액정 렌즈에의 응용에는 적절하지 않으며 또한 높은 구동 전압과 마찬가지로 낮은 기울기 특성을 보이고 있다.

이 결과로부터 벤조페논을 8 wt% 이하로 첨가시킬 경우 고분자 분산형 액정 렌즈의 투과도-전압 곡선에서 직선 구간의 기울기 특성이 개선된다는 것을 확인하였다.

벤조페논을 추가로 첨가하였을 때의 고분자 분산 액정 렌즈의 상승 응답 시간과 하강 응답 시간을 Fig. 7에 나타내었다. 벤조페논의 첨가량이 증가함에 따라 상승 응답 시간은 감소하는 반면에 하강 응답 시간은 벤조페논을 8 wt%까지 첨가할 때까지는 큰 변화가 없으며 벤조페논이 16 wt% 첨가되었을 때 감소하였다. Fig. 7에서 Y축 범례에 나타난 붉은 점은 고분자 분산형 액정 렌즈의 셀 간격이 30 μm 일 때의 상승 응답 시간과 하강 응답 시간이다. 셀 간격이 30 μm 인 샘플에는 벤조페논을 첨가한 것이 아니기 때문에 상승 응답 시간과

하강 응답 시간은 Y축 범례에 그려졌다. 마찬가지로 셀 간격이 11 μm 이고 벤조페논의 첨가량이 0 wt%인 샘플 역시 Y축 범례에 그려졌다. 고분자 분산형 액정의 셀 간격을 30 μm 에서 11 μm 로 줄일 경우, 상승 응답 시간과 하강 응답 시간 모두 증가하였다. 셀 간격이 11 μm 인 샘플의 상승 응답 시간은 약 1.0 ms 정도로 매우 작지만 셀 간격이 30 μm 인 샘플에 비해 약 2.2배 정도 더 큰 값을 갖는다. 하강 응답 시간은 11 μm 의 셀 간격을 갖는 샘플이 45.4 ms로 30 μm 의 셀 간격을 갖는 샘플이 18.64 ms인 것에 비해 매우 크게 증가하였으며, 이 역시 상승 응답 시간과 비슷하게 셀 간격이 11 μm 인 샘플의 하강 응답 속도는 셀 간격이 30 μm 인 샘플에 비해 약 2.4배 정도 증가한 수치이다. 이전의 논문에서 이미 논의되었듯이, 액정 방울에 가해진 강한 전기장은 액정 분자들의 그 배열을 유지하려는 힘을 증가시켜 응답 시간을 길어지게 할 수 있다[1-2,5]. 액정 방울을 이루는 액정 분자들에 가해지는 전기장의 세기는 셀 간격에 반비례하기 때문에 셀 간격을 30 μm 에서 11 μm 로 변화시키는 것은 전기장의 세기를 2.7배 이상 증가시키는 것을 의미한다. 이렇게 증가된 전기장은 액정 분자들이 배열된 상태를 순간적으로 유지하게 하는 경향을 가지게 되고, 따라서 상승 응답 시간과 하강 응답 시간이 길어지게 된다. 본 논문에서는 셀 간격을 30 μm 에서 11 μm 로 낮추어 실험을 진행하였고 셀 간격이 감소함에 따라 인가된 전기장의 세기는 그와 반비례하여 약 2.7배 증가했음을 알 수 있다. 상승 응답 시간과 하강 응답 시간에서 셀 간격이 30 μm 일 때에 비해 셀 간격이 11 μm 일 때 약 2.5배 이상 길어진 것은 인가된 전기장의 세기가 약 2.7배 증가되는 것과 매우 유사한 관계가 있음을 알 수 있다.

셀 간격이 11 μm 인 샘플에 대해서 벤조페논의 첨가량을 증가시킬 경우 상승과 하강 응답 시간이 개선되는 것으로 보여진다. Fig. 7(a)에 나타난 상승 응답 시간의 경우 벤조페논의 첨가량이 4 wt% 보다 낮을 때에는 상승 응답 시간이 1.43 ms으로 더 길어졌으나 그 이상에서는 0.77 ms으로 크게 감소하였다. 그러나 셀 간격이 11 μm 이고 벤조페논을 첨가한 샘플의 상승 응답 시간은 셀 간격이 30 μm 이고 벤조페논을 첨가하지 않은 샘플의 상승 응답 시간인 1.05 ms 보다 항상 크게 나타났다. 벤조페논이 첨가됨에 따라 상승 응답 시간은 점점 줄어드는 것으로 보이지만, 벤조페논의 첨가량이 16 wt%인 샘플의 경우 투과도-전압 곡선이 S자 모양을 나타내지 않았고 수렴하지 않았다는 점을 고려해볼 때 샘플의 셀 간격이 상승 응답 시간에 주는 영향이 벤조페논의 첨가에 따른 영향보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

벤조페논의 첨가에 따라 하강 응답 시간이 다소 감소하는 것을 Fig. 7(b)를 통해 확인할 수 있다. 상승 응답 시간과 마찬가지로 셀 간격이 11 μm 이고 벤조페논을 첨가한 샘플의 하강 응답 시간은 41.04 ms로 셀 간격이 30 μm 이고 벤조페논을 첨가하지 않은 샘플의 하강 응답 시간인 18.64 ms 보다 항상 크게 나타났다. 벤조페논의 첨가에 따라 하강 응답 시간이 다소 감소하는 것으로 보이지만 이 역시 샘플의 셀 간격이 하강 응답 시간에 미치는 영향이 벤조페논의 첨가에 따른 영향 보다 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)와 (b)를 통해 보았을 때 샘플의 셀 간격이 응답 시간에 미치는 영향이 주도적이긴 하지만 벤조페논의 첨가가 상승 응답 시간과 하강 응답 시간을 감소시키는 것은 분명하다. Fig. 2를 통해 보았을 때, 벤조페논의 첨가는 고분자 분산형 액정 렌즈 내부에 분산되어 있는 액정 방울들의 평균 직경의 길이를 증가시킨다. 벤조페논의 첨가에 의한 액정 방울의 크기 증가는 상승 응답 시간과 하강 응답 시간을 각각 0.77 ms와 41.04 ms

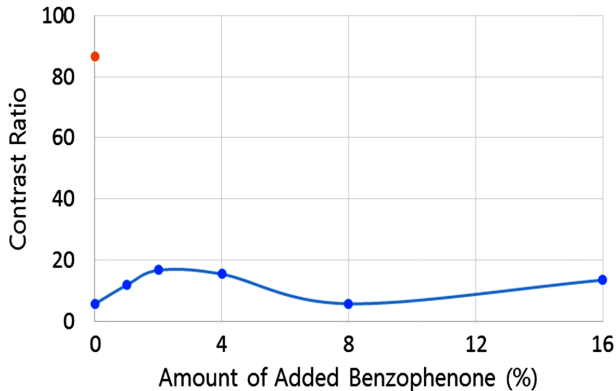


Fig. 8. Contrast ratios of PDLC lens device of the cell gap of 11 μm with the concentration of additional benzophenone from 0 wt% to 16 wt%.

으로 감소시켰으며 이는 본 연구 그룹에서 발표한 이전 논문인 액정의 양을 증가시켰을 때와 유사한 경향성을 보여준다[1]. 따라서 고분자 분산형 액정 렌즈 장치에 함유되어 있는 벤조페논의 양을 증가시키는 것은 상승과 하강의 응답 시간을 개선시키는 효과를 가진다고 결론지을 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 2에 그려진 샘플들의 투과도-전압 곡선에 대한 명암비의 변화를 보여준다. Y축 범례에 위치한 86.5에 해당하는 붉은색 점은 셀 간격이 30 μm 이고 벤조페논이 첨가되지 않은 고분자 분산형 액정 렌즈 샘플의 명암비를 나타낸다. 셀 간격이 30 μm 인 샘플의 경우 벤조페논이 첨가되지 않았기 때문에 명암비를 Y축 범례에 표시하였다. 또한 Y축 범례 중 5.7에 해당하는 또 다른 점은 셀 간격이 11 μm 이며 벤조페논을 첨가하지 않은 샘플의 명암비를 나타낸 것이다. 30 μm 에서 11 μm 로 셀 간격을 감소시킨 결과 명암비가 86.5에서 5.7로 매우 크게 감소하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 좁아지는 셀 간격의 영향으로 고분자 분산형 액정 장치에 가해지는 전기장의 세기가 더 강해졌으며, 이로 인해 액정 방울을 이루고 있는 액정 분자들이 인가된 전압에 의한 배열을 유지하려는 힘 역시 강해지게 된다. 이러한 액정 분자들이 인가된 전압에 의한 배열을 유지하려는 힘은 액정 분자들을 배열시키는 것과 같은 효과를 가지는 경향이 있다. 셀 간격이 11 μm 인 고분자 분산형 액정 렌즈 샘플에 벤조페논을 첨가했을 때의 명암비는 같은 셀 간격을 가지며 벤조페논을 첨가하지 않았을 때의 명암비 보다 더 높게 나타났다. 벤조페논의 양에 따른 명암비는 벤조페논의 첨가량이 2 wt% 때까지 선형적으로 5.7에서 16.7까지 상승하였지만 그 이상의 벤조페논 첨가량에서는 점차 5.73까지 감소하였다. 이것은 본 연구 그룹의 이전 논문에서 액정의 양을 증가시켰던 때의 명암비 결과와 유사하다[1]. 따라서 벤조페논의 첨가로 인해 명암비는 개선되는 것으로 보이지만 벤조페논의 첨가량이 증가할수록 액정 방울의 크기가 커지는 효과에 의해 명암비가 점차 감소된다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 일정량 이하의 벤조페논의 첨가는 명암비를 개선시키는 효과를 가져온다.

4. 결 론

고분자 분산형 액정 렌즈 장치를 11 μm 의 셀 간격에서 벤조페논의 농도를 조절하여 제작하였다. 이 때 벤조페논의 농도는 일정한 성분비를 가지는 NOA65 (40 wt%)와 E7 (60 wt%) 혼합물에 벤조페논의

양을 전체질량의 0, 1, 2, 4, 8, 16 wt%씩 첨가한 뒤 균일하게 혼합하였다. 고분자 분산형 액정 렌즈 장치 제조에 있어 추가적인 벤조페논의 첨가는 구동 전압, 직선 구간의 기울기, 상승과 하강 응답 시간 그리고 명암비와 같은 모든 전기-광학적 특성을 개선시켰다. 이러한 개선은 액정의 농도 변화에 따른 효과와 마찬가지로 벤조페논의 첨가에 따라 액정 방울의 평균 직경의 길이가 증가했기 때문으로 해석된다[1]. 벤조페논의 첨가량이 0 wt%에서 16 wt%로 증가할 때 액정 방울의 평균 직경의 길이 역시 5.3 μm 에서 12.2 μm 로 지속적으로 증가하였으며, 이것은 약 2.36배에 이른다. 구동 전압과 직선 구간의 기울기 특성은 줄어든 셀 간격으로 실험했던 이전의 논문에 비해 더 강화되었다[4]. 구동 전압은 벤조페논의 첨가량이 0 wt%일 때 11.08 V에서 4 wt%일 때 10.55 V로 감소되었고 직선 구간의 기울기는 벤조페논의 첨가량이 0 wt%일 때 10.33 %T/V에서 4 wt%일 때 12.67 %T/V으로 증가하였다.

그러나, 상승과 하강 응답 시간과 명암비 특성은 셀 간격이 30 μm 이고 벤조페논을 첨가하지 않은 기존의 샘플과 비교해 보았을 때 성능이 저하되는 것을 확인하였으며 이것은 셀 간격에 의한 영향이 작용했기 때문으로 해석된다. 비록 좁은 셀 간격에 의한 특성의 저하가 벤조페논의 첨가에 의한 상승과 하강 응답 시간의 영향을 상쇄시킬 만큼 뚜렷이 나타났으나, 벤조페논의 첨가에 의한 개선이 다소 발생되었다는 것 또한 확인되었다. 상승과 하강 응답 시간과 명암비는 벤조페논의 추가에 따라 조금 증가하였다.

References

- Kim, J. and Han, J. I., "Effects of Liquid Crystal Concentration on Electro-optical Properties of Polymer Disperse Liquid Crystal Lens for Smart Electronic Glasses with Auto-Shading and Auto-Focusing Function," *Electron. Mater. Lett.*, (In Press).
- Kim, J. and Han, J. I., "Effect of UV Intensity on the Electro-Optical Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystal Lens for Smart Electronic Glasses," *Electron. Mater. Lett.*, (In Press).
- Kim, J. and Han, J. I., "Effect of Cell Gap on Electro-optical Properties of Polymer Disperse Liquid Crystal Lens for Smart Electronic Glasses," *Electron. Mater. Lett.*, (In Press).
- Han, J. I., "IR Sensor Synchronizing Active Shutter Glasses for 3D HDTV with Flexible Liquid Crystal Lens," *Sensors*, **13**, 16583-16590(2013).
- Han, J. I., "Active Shutter Glasses for 3D HDTV with Flexible Liquid Crystal Lens," *Proc. Int. Conf. on Consumer Electronics 2013*, IEEE Consumer Electronics Society, Las Vegas, USA(2013).
- Park, Y. J., Kim, J., Kim, D. W. and Han, J. I., "Consideration on Fabrication of Active Shutter Glasses for 3D HDTV with Flexible Liquid Crystal Lens," *Proc. Conf. on Korean Liquid Crystal Conf.*, Korea Information Display Society, Seoul(2013).
- Park, Y. J., Park, J. K., Kim, J., Kim, D. W. and Han, J. I., "Study on Electro-Optical and Mechanical Properties of Flexible Liquid Crystal Lens," *Proc. Conf. on Korean Liquid Crystal Conf.*, Korea Information Display Society, Seoul(2013).
- Ren, H., Fan, Y.-H. and Wu, S.-T., "Polymer Network Liquid Crystals for Tunable Microlens Arrays," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 400-403(2004).
- Presnyakov, V. V. and Galstian, T. V., "Electrically Tunable Polymer Stabilized Liquid-crystal Lens," *J. of Appl. Phys.*, **97**, 103101(2005).

10. Malik, P., Raina, K. K. and Gathania, A. K., "Effects of Polymer Viscosity on the Polymerization Switching and Electro-optical Properties of Unaligned Liquid Crystal/UV Curable Polymer Composites," *Thin Solid Films*, **519**, 1047-1051(2010).
11. No, Y. S., Kim, J. H., Jeon, C. W. and Park, S. H., "Temperature Stability of Electro-optic Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystal with Different Crosslinking Monomer in PN393 Base Pre-polymer," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**, 181-184(2008).
12. Rahimpour, A., "Preparation and Modification of Nano-porous Polyimide (PI) Membranes by UV Photo-grafting Process: Ultrafiltration and Nanofiltration Performance," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 261-266(2011).