

Reduction of Color Shift Using Dichroic Dyes in a Cholesteric Liquid Crystal Cell

Jun-Hee Park, Seung-Won Oh, and Tae-Hoon Yoon[†]

Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received February 2, 2015; Revised manuscript March 4, 2015; Accepted March 4, 2015)

We propose a reflective cholesteric liquid crystal cell with reduced color shift, using dichroic dyes. Color-shifted light is absorbed by dye molecules in the proposed dye-doped cholesteric liquid crystal (DDCLC) cell. We have shown that the color shift can be reduced by increasing the concentration of dye molecules in the proposed DDCLC cell.

Keywords: Liquid crystal, Cholesteric, Chiral nematic, Color shift, Dichroic dye
OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3720) Liquid-crystal devices

콜레스테릭 액정 셀에서 염료를 이용한 Color Shift 제거

박준희 · 오승원 · 윤태훈[†]

부산대학교 전자공학과

Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2015년 2월 2일 받음, 2015년 3월 4일 수정본 받음, 2015년 3월 4일 게재 확정)

본 논문에서는 스위칭 가능한 브래그 반사판의 한 종류인 콜레스테릭 액정 셀에 염료를 주입함으로써 입사각에 따라 단파장대로 이동된 반사광을 제거하는 셀을 구현하였다. 액정과 카이랄 도펀트를 일정 비율로 혼합하여 원하는 파장대역을 반사하는 콜레스테릭 액정 셀을 제작하였고, 이에 특정한 파장대역을 흡수하는 성질을 가지는 이색성 염료를 혼합함으로써, 빛의 입사각이 증가할 때 단파장대로 이동된 빛을 흡수하여 초기에 설계된 색을 유지할 수 있다. 염료를 혼합하지 않은 콜레스테릭 액정 셀에서는 입사각에 따라서 반사된 빛이 눈에 띄게 단파장대로 이동되는데 반해, 제안된 방법에서는 염료의 혼합 비율이 1, 2 wt%로 증가할수록 단파장대로 이동된 빛을 더 잘 흡수하는 것을 확인하였다.

Keywords: 액정, 콜레스테릭, 카이랄 네마틱, 파장 이동, 이색성 염료
OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3720) Liquid-crystal devices

I. 서 론

콜레스테릭(cholesteric) 액정 소자는 반사판, 편광판, 그리고 특별한 광학적 설계 없이도 제작이 가능한 스위칭 가능한 브래그(Bragg) 반사판이다. 특히 플라나(planar)와 포칼코닉(focal conic) 상태에서 안정적인 특성을 가지는데, 여기서 안정적인 상태라는 것은 전계를 인가하지 않아도 그 상태를 유지하는 것을 의미한다. 이러한 쌍안정 특성을 바탕으로 저전력 구동이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다.^[1-4] 그러나, 콜레스테릭 액정 소자는 느린 응답특성과 입사각에 따라서 반사하는 파장대가 달라지는 큰 문제를 안고 있다. 콜레스테릭 액정 소자는 점성을 갖는 액정의 전기광학특성을 이용하고, 포칼코닉 상태에서 플라나 상태로 스위칭 하기 위해서는 호

메오트로픽(homeotropic) 상태를 거쳐야 한다. 호메오트로픽 상태에서 수직하게 배열된 액정 분자들이 플라나 상태로 돌아가기 위해 눕게 되면서 유리기판에 평행하게 꼬인 구조로 돌아가는 과정 등으로 인하여 제한된 응답특성을 나타내어 현재까지 큰 문제로 부각되었으나, 최근 수평 전계를 이용하여 콜레스테릭 액정 소자의 고속응답을 확보한 연구성과가 있었다.^[5, 6]

그러나, 콜레스테릭 액정 소자에서 반사되는 빛의 파장이 입사각에 크게 의존하는 현상은 여전히 문제로 남아있다. 콜레스테릭 액정 소자에서 반사되는 빛의 파장(λ)은 $npcos\theta$ 로 주어진다.^[7-9] n 은 액정의 장축과 단축의 굴절률 평균값을 의미하며, p 는 콜레스테릭 액정의 피치(pitch)를 의미하는데, 액정이 카이랄 도펀트(chiral dopant)에 의하여 꼬이기 시작하

[†]E-mail: thyoon@pusan.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

는 지점에서부터 2π 만큼 꼬인 지점까지를 1 피치 라고 한다. 유사하게, 파장대역 $\Delta\lambda$ 는 $\Delta n p \cos \theta$ 로 주어진다. 공통적으로 외부 광원이 셀 표면으로 입사하는 각도 (θ)를 포함하는데, 이를 통해 콜레스테릭 액정에 의해 반사되는 빛의 파장이 입사각에 크게 의존함을 알 수 있다. 현재까지 콜레스테릭 액정 소자에서 입사각이 커질수록 반사되는 빛이 단파장으로 이동하는 문제를 개선하기 위해 유리기판 표면에 반구 형태의 패턴을 형성하거나, 고분자 물질로 돌기를 형성하여 완벽하지 않은 플라나 상태를 구현하는 등의 방법이 제안되었으나, 이러한 방법은 복잡한 제조과정, 그리고 구동이 불가하거나 구동전압이 매우 높아지는 현상이 발생하였다.^[10, 11]

본 논문에서는 콜레스테릭 액정과 이색성을 가진 염료를 혼합하는 guest-host 액정 방식을 사용하였다.^[12] 이색성 염료의 비율이 높아질수록 단파장으로 이동된 빛을 더 잘 흡수하여 입사각이 커지더라도 본래 설계된 색상이 유지되는 특성을 확보하였고, 더불어 콜레스테릭 액정 셀에 빛이 정면으로 입사하였을 때도 색감이 더욱 향상됨을 확인하였다.

II. 제안된 소자의 설계 및 제작

Figure. 1에 기존의 콜레스테릭 액정 셀과 제안된 콜레스테릭 액정 셀의 구조를 나타내었다. Figure 1(a)는 기존의 콜레스테릭 액정 셀의 구조이며, 외부광원의 입사각이 커질수록 반사되는 빛이 단파장으로 이동되는 것을 나타내었다. 이에 반해 Fig. 1(b)는 콜레스테릭 액정의 회전축을 따라 균일하게 혼합된 이색성 염료가 단파장으로 이동된 파장 대의 빛을 흡수하여 본래의 색을 유지하는 것을 나타내었는데, 본 논문에서는 이 특성을 이용하고자 한다.

우리는 빛의 입사각에 따라 반사광의 단파장으로의 이동이 두드러지게 나타나는 적색과 녹색으로 각각 설계된 콜레스테릭 액정 소자로 실험을 진행하였다. 단파장으로 이동되는 빛을 효과적으로 흡수하기 위하여 반사하는 빛의 중심 파장을 적색 (650 nm)과 녹색 (550 nm)으로 설계한 콜레스테릭

액정 소자에 600 nm와 500 nm 이하의 파장대의 빛을 흡수하는 이색성 염료를 각각 혼합한다.

이색성 염료의 흡수 파장대를 확인하기 위하여 분광계(MCPD-2000)를 이용하여 측정하였다. Figure 2(a)는 이색성 염료 AZO1 (NEMATEL)을 네마틱(nematic) 액정에 혼합하여 제작한 셀에 입사하는 빛이 이색성 염료의 흡수 측과 평행하게 지나갈 때와, 직교하게 지나갈 때 각각 측정한 투과율인데, 이를 통해 이색성 염료 AZO1은 590 nm 이하의 파장대의 빛을 흡수하는 것을 확인하였다. 또 다른 이색성 염료 AG1 역시 동일한 방법으로 측정하여 Fig. 2(b)에 나타내었으며, 510 nm 이하의 파장대의 빛을 흡수하는 것을 확인하였다. 그러므로 이 실험에서 AZO1은 적색 콜레스테릭 액정 소자에, 그리고 AG1은 녹색 콜레스테릭 액정 소자에 혼합하기에 적합함을 확인하였다.

염료를 혼합한 콜레스테릭 액정은 양의 액정 (MLC-6650, $\Delta n = 0.1498$, $\Delta e = 52.6$, Merck)과 카이랄 도펀트 (S811, Merck)를 반사파장이 각각 550 nm와 650 nm가 되도록 혼합 비율을 맞추었으며, 해당하는 이색성 염료를 각각 1 또는 2 wt%의 비율로 혼합하였다.

제안된 방법의 특성을 확인하기 위하여 셀을 제작하였다. 우선 상부와 하부의 유리기판에 수평 배향제 (PIA-5310-GS10,

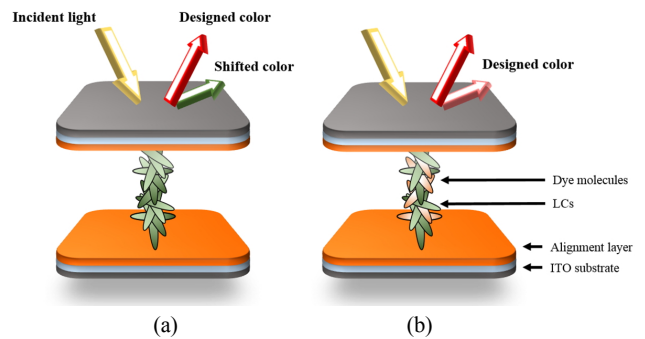


FIG. 1. Schematic illustration of (a) CLC and (b) DDCLC cells.

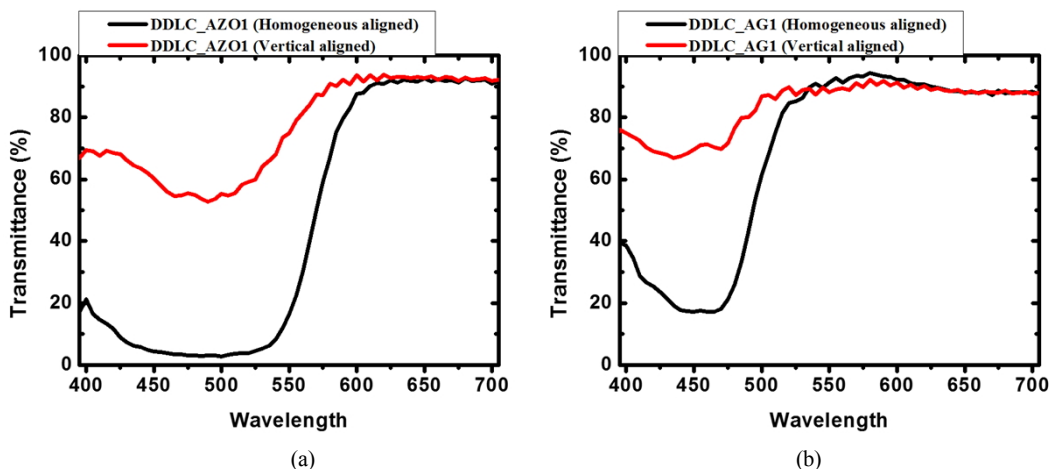


FIG. 2. Transmission spectra of a dichroic-dye-doped LC cell. LCs are doped with (a) AZO1 and (b) AG1.

JNC)를 스핀 코팅하였다. 소성 과정 (200 °C, 1 시간)이 완료된 후 콜레스테릭 액정들의 축 맞춤을 위하여 러빙 과정을 진행하였다. 간격자를 이용하여 셀 갭을 10 μm로 유지하고 러빙된 상부와 하부의 유리기판을 반대 방향이 되도록 합착한 후, 이색성 염료를 혼합한 콜레스테릭 액정을 주입하였다. 또한 제안된 방법과의 특성 비교를 해보고자 동등한 조건하에 이색성 염료를 혼합하지 않은 콜레스테릭 액정 셀을 제작하였다.

III. 실험 결과

제작된 콜레스테릭 액정 셀을 초기 설계 조건 (적색 또는 녹색)과 이색성 염료의 혼합 비율 (1 또는 2 wt%)에 따라서 각도 별로 셀 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 이색성 염료가 혼합되지 않은 적색과 녹색 콜레스테릭 액정 셀들은 측정 각도가 커짐에 따라서 색 변화가 크게 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 이색성 염료가 혼합된 콜레스테릭 액정 셀에서는 염료의 혼합 비율이 커질수록 색 변화 현상이 줄어들었으며, 더불어 정면에서도 더욱 향상된 색감을 보여준다. 반면에, Fig. 3(g)로부터 확인할 수 있듯이 반사되는 빛의 중심파장이 청색 (450 nm)으로 설계한 콜레스테릭 액정 소자에서는 반사 된 빛이 단파장으로 이동하더라도 더 진한 청색의 색을 나타내기에 이색성 염료가 필요하지 않다.

제작된 셀의 색감을 측정 각도에 따라 Comité Internationale d'Éclairage(CIE) 색 좌표계 상에 나타내기 위하여, 0°부터 60°까지 색 좌표를 측정하였다.^[13, 14] Fig. 4(a)는 기준 적색 콜레스테릭 액정 셀의 측정된 색 좌표를 나타낸다. 측정 각도가

10°씩 증가할 때마다 완전히 다른 좌표를 보여주며, 60°에 이르러서는 녹색에 해당하는 영역까지 이동하는 것을 확인할 수 있다. Figure 4(b)와 4(c)는 이색성 염료를 혼합한 적색 콜레스테릭 액정 셀의 측정된 색 좌표이다. 1 wt% 혼합한 적색 콜레스테릭 액정 셀의 경우 50°까지는 아주 작은 폭의 움직임이 보이지만, 60°에 이르러서는 황색에 해당하는 영역으로 이동하는 것을 보여준다. 그러나 2 wt% 혼합한 적색 콜레스테릭 액정 셀에서는 각도가 증가하더라도 좌표의 움직임이 0° 일 때의 좌표 근처에서 형성됨을 확인할 수 있었다. Figure 4(d)는 기준 녹색 콜레스테릭 액정 셀의 측정된 색 좌표를 나타낸다. 역시 각도가 증가함에 따라서 확연히 다른 좌표의 움직임을 보여주고 있으며, Fig. 4(e)와 4(f)에서 볼 수 있듯이, 녹색 콜레스테릭 액정 셀 에서도 이색성 염료의 혼합 비율이 높아짐에 따라서 각도가 증가하더라도 좌표의 이동 폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Figure 5는 앞선 결과를 적색과 녹색 콜레스테릭 액정 셀에 대해 각각 이색성 염료의 혼합 비율에 따라서 수치적으로 대조하기 위하여 X, Y 색 좌표를 비교한 값을 나타내었다. 이를 통해 이색성 염료의 혼합이 1 wt%, 2 wt%로 증가함에 따라 빛의 입사 각도에 따른 반사광의 단파장 이동을 개선하는데 도움이 된다는 것을 구체적으로 확인할 수 있다.

한편, 제작한 셀의 전기광학특성을 확인하기 위하여, 기준 콜레스테릭 액정 셀과 이색성의 염료를 혼합한 콜레스테릭 액정 셀의 전압에 따른 반사율 특성을 확인 해 보았다. 제안된 방법으로 제작된 셀 (2 wt%)의 반사율은 기준 셀에 비하여 약 27% 감소하였으나, 포칼코닉, 호메오토로픽 상태로 전환 될 때의 구동전압은 변함이 없었다. 또한 제안한 방법을

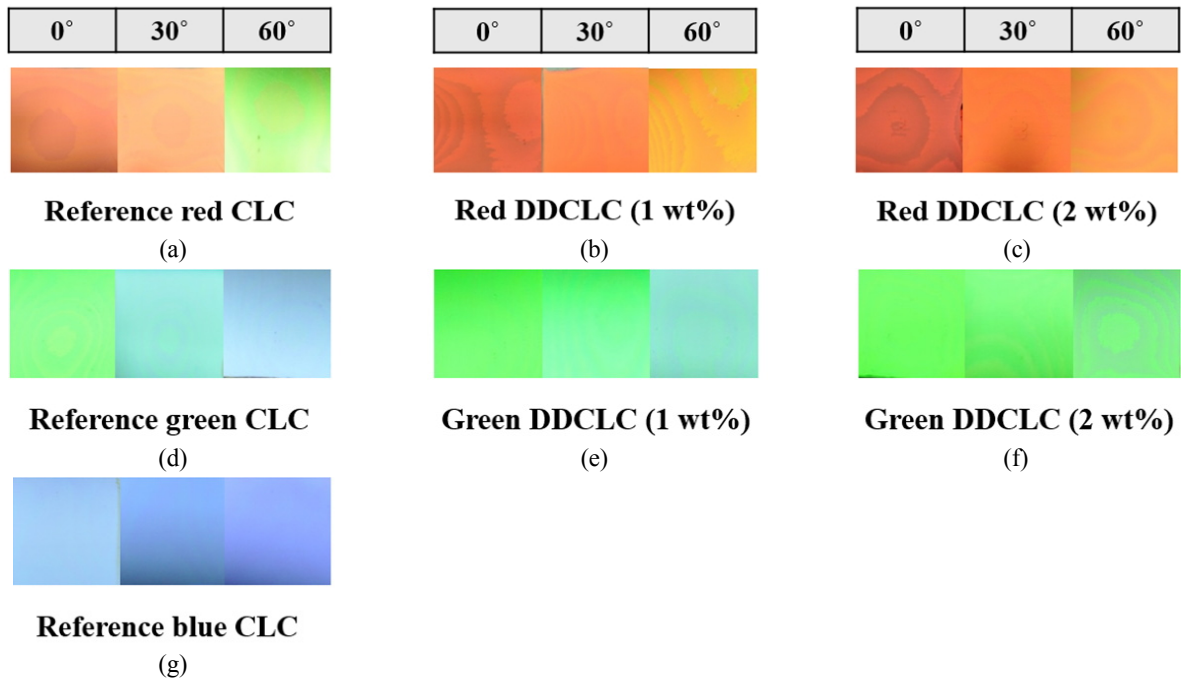


FIG. 3. Photographs of (a) red CLC, (b) red DDCLC (1 wt%), (c) red DDCLC (2 wt%), (d) green CLC, (e) green DDCLC (1 wt%), (f) green DDCLC (2 wt%) and (g) blue CLC cells at various viewing angles.

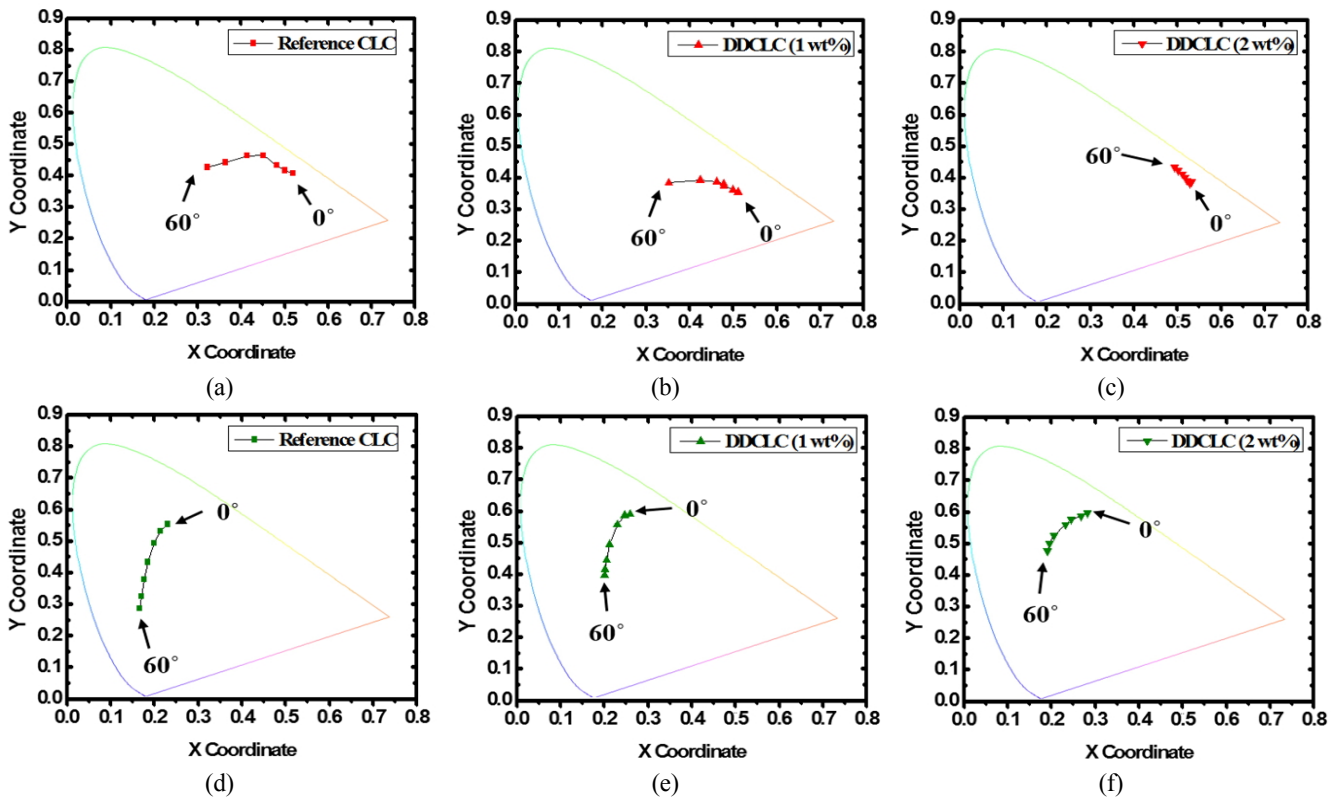


FIG. 4. Measured color shift of LC cells on the CIE chromaticity diagram. (a) red CLC, (b) red DDCLC (1 wt%), (c) red DDCLC (2 wt%), (d) green CLC, (e) green DDCLC (1 wt%), and (f) green DDCLC (2 wt%).

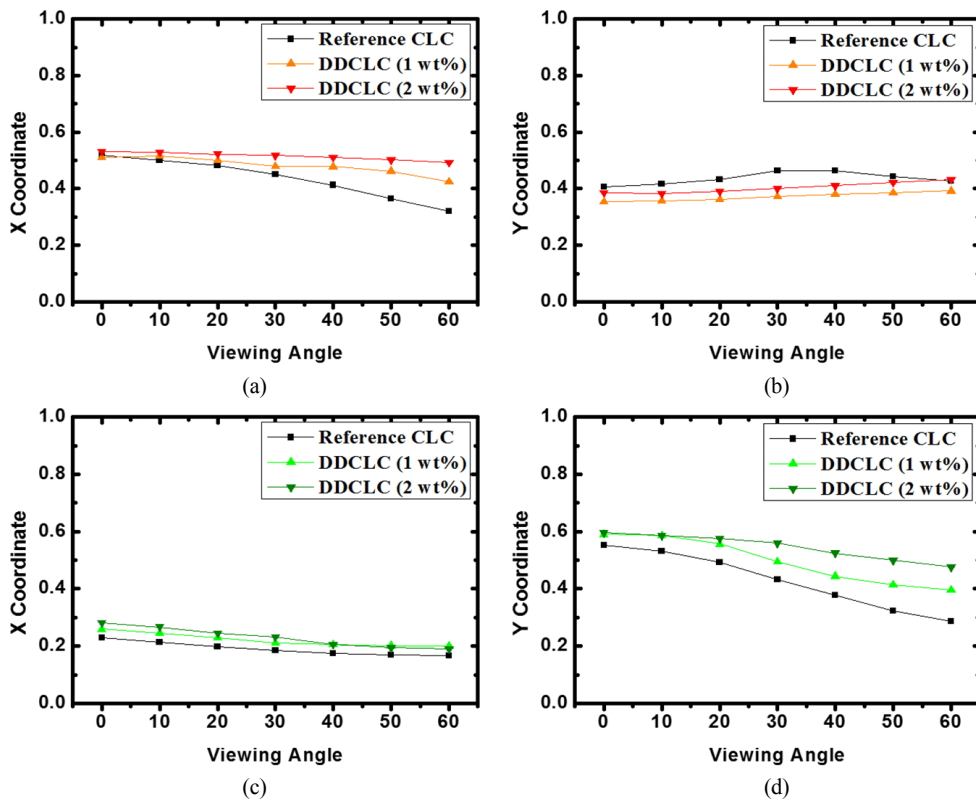


FIG. 5. Comparison of color shift at various viewing angles for each experimental condition. (a) X coordinates and (b) Y coordinates of red CLC and DDCLC cells. (c) X coordinates and (d) Y coordinates of green CLC and DDCLC cells.

적용한 셀이 플라나 상태에서 보았을 때는 기준 셀에 비하여 향상된 색감을 확인 할 수 있었다. 따라서 이색성 염료가 콜레스테릭 액정에 혼합됨으로써 구동에 영향을 주지 않고도 빛의 입사각도에 따라 단파장으로 이동한 반사광을 효과적으로 제거하였다. 하지만 포칼코닉과 호메오토로픽 상태에서는 혼합한 염료의 특정 파장대역을 흡수하는 성질로 인하여 염료의 색이 약간 잔존함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이색성 염료를 콜레스테릭 액정에 혼합하여 입사각에 따른 반사파장 변화가 줄어드는 특성을 확인하였다. 제안된 방법은 서로 다른 반사 파장을 가지는 콜레스테릭 액정에 각기 다른 염료를 추가해야 하므로, 모든 가시 광 파장대의 색을 구현하는 디스플레이 소자에 적용하기에는 약간의 제한이 따른다. 그러나 각각의 셀에서 입사 각도가 증가함에 따라 단파장으로 이동되는 빛을 효과적으로 제거함으로써 초기에 설계된 색을 넓은 각도에서 확보할 수 있었다. 이색성 염료의 혼합 비율이 증가할수록 반사율은 다소 감소하였지만 색 변화가 줄어들었으며, 특히 2 wt%를 혼합한 적색 콜레스테릭 액정 셀에서는 60°까지도 초기 색 좌표를 유지하는 것을 CIE 색 좌표계를 통하여 확인하였다. 제안한 방법은 과거의 연구들과는 달리 구조적인 변화가 없으며, 셀 구동에도 변화가 없음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (MSIP) (No. 2014R1A2A1A01004943).

References

1. D. W. Berreman and W. R. Heffner, "New bistable cholesteric

- liquid-crystal display," *Appl. Phys. Lett.* **37**, 109-111 (1980).
2. D.-K. Yang, J. W. Doane, Z. Yaniv, and J. Glasser, "Cholesteric reflective display: Drive scheme and contrast," *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1905-1907 (1994).
3. S. T. Wu and D.-K. Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays* (Wiley, 2001).
4. D.-K. Yang and S.-T. Wu, *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (Wiley, 2006).
5. K.-H. Kim, B.-H. Yu, S.-W. Choi, S.-W. Oh, and T.-H. Yoon, "Dual mode switching of cholesteric liquid crystal device with three-terminal electrode structure," *Opt. Express* **20**, 24376-24381 (2012).
6. S.-W. Oh and T.-H. Yoon, "Fast bistable switching of a cholesteric liquid crystal device induced by application of an in-plane electric field," *Appl. Opt.* **53**, 7321-7324 (2014).
7. S. Shandrasekhar, *Liquid Crystals* (Cambridge University Press, 1992).
8. P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, 2nd ed. (Wiley, 2010).
9. K.-H. Kim, H.-J. Jin, K.-H. Park, J.-H. Lee, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Long-pitch cholesteric liquid crystal cell for switchable achromatic reflection," *Opt. Express* **18**, 16745-16750 (2010).
10. W.-G. Jang, T. W. Beom, H. Cui, J. R. Park, S. J. Hwang, Y. J. Lim, and S. H. Lee, "Reduction of viewing-angle dependent color shift in a reflective type cholesteric liquid crystal color filter," *Appl. Phys. Express* **1**, 032001 (2008).
11. Y.-T. Lin and T.-H. Lin, "Cholesteric liquid crystal display with wide viewing angle based on multi-domain phase-separated composite films," *J. Disp. Technol.* **7**, 373-376 (2011).
12. C. P. Chen, K.-H. Kim, T.-H. Yoon, and J. C. Kim, "A viewing angle switching panel using guest-host liquid crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 062401 (2009).
13. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (Wiley, 1982).
14. D. Fairchild, *Color Appearance Models* (Addison-Wesley, 1998).