

액정 전기 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 엄정한 시청영역 분석

김태현, 김봉식, 박우상^a

인하대학교 전자공학과

Rigorous Analysis of Viewing Zone for 3D Display with Electric-field-driven Liquid Crystal Lens

Tae-Hyeon Kim, Bong-Sik Kim, and Woo-Sang Park^a

Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received April 19, 2016; Revised June 23, 2016; Accepted June 27, 2016)

Abstract: In this paper, we proposed the 3-dimensional (3D) analysis for calculating the optical characteristics of an autostereoscopic display with electric field driven liquid crystal (ELC) lens. From 3D analysis considering the slanting of lens, we calculate the cross-talk of each images and the distortion of viewing zone. Using geometric optics and extended Jones matrix method (EJMM), phase retardation of ELC lens according to position is calculated and then optical path difference in 3D space considering tilt and azimuth angle of incident light is gotten. Then, intensity distribution is presented in the space. Through comparing the intensity distribution using ideal lens with the ELC lens, we identify the noise and image distortion of ELC lens. As a result, this analysis is expected to provide optimum design conditions for realistic and rigorous 3D display with ELC lens.

Keywords: 3D display, ELC lens, Liquid crystal

1. 서 론

3차원 디스플레이에는 안경식과 무안경식, 스테레오스코픽 디스플레이와 홀로그래픽 디스플레이 등이 있다. 현재 가장 보편화되어 양산되고 있는 것은 안경방식이다.

안경방식의 경우 편광필름을 안경에 사용하여 양안에서 보이는 영상을 분리 시켜주는 수동방식이 있고, 패널과 동기화된 신호를 이용하여 열고 닫히는 안경으

로 영상을 시분할 시켜주는 능동방식이 있다. 수동방식에서 사용하는 안경은 능동방식의 안경보다 가볍고 저렴하지만, 화면의 밝기가 저하되는 단점이 있다. 궁극적으로 자연스러운 입체영상 시청과 높은 입장감에 구현에 있어서 안경방식보다는 무안경방식이 요구되고 있다 [1].

무안경방식에는 대표적으로 패럴랙스 배리어 방식과 랜티큘러 렌즈 방식이 있다 [2]. 패럴랙스 배리어 방식은 디스플레이 표면에 교대로 배열된 배리어를 설치하여 양안에 들어가는 영상을 분리해줌으로써 입체감을 느끼게 하는 방식이다. 랜티큘러 렌즈 방식은 디스플레이 표면에 특수한 형태로 설계된 렌즈를 설치하여 렌즈를 통과한 영상이 양안에 분리되는 방식이다. 랜티큘러 렌즈 방식의 경우 렌즈 제작에 있어서 높은 비용과

^a Corresponding author; wspark@inha.ac.kr

고도의 광학적 기술이 필요로 하지만 패럴랙스 배리어 방식과는 달리 화면의 밝기 저하가 없다는 장점이 존재한다.

3차원 디스플레이 장치의 발전에도 불구하고, 현재 제공되는 영상들의 대부분이 2차원 영상이므로, 3차원 디스플레이 장치의 2차원/3차원 영상 출력 전환이 필요했고, 이에 따라 액정 전계 렌즈기반 방식이 연구되었다 [3]. 기존의 렌티큘러 렌즈 방식에서 렌티큘러 렌즈를 액정 전계 렌즈로 대체하여 2차원/3차원 영상 출력의 전환을 가능하게 하였다.

본 연구에서는 액정 전계 렌즈의 3차원적 해석방법을 제안한다. 이를 통해, 기존의 2차원 해석에서는 계산할 수 없었던 렌즈의 기울임 각도로 인한 시정영역에서의 출력 영상 왜곡을 볼 수 있었다. 또한, 영상이 섞이지 않고 정확히 분리되는 정도를 평가하는 혼선율(cross-talk ratio) 분석에서 2차원에서는 고려되지 않은 방향으로의 수치를 확인할 수 있었다 [4]. 따라서 렌즈의 기울임 정도를 고려한 실제적인 3차원 디스플레이 설계가 가능할 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 액정 전계 렌즈 설계

그림 1은 본 연구의 시뮬레이션에서 사용한 액정 전계 렌즈의 구조를 나타낸다. 액정은 3개의 화소 전극과 1개의 공통전극을 통해 거동된다. 렌즈에서 액정의 배열은 de Gennes의 차원 텐서와 Erickson-Leslie 운동방정식을 적용하여 구하였다 [5].

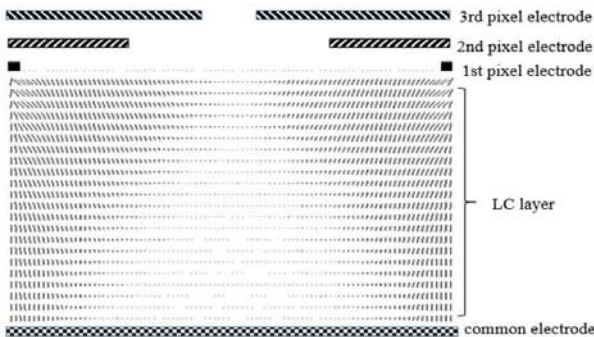


Fig. 1. Schematic drawing of the ELC lens and the director distribution of the liquid crystals under the influence of an applied electric field.

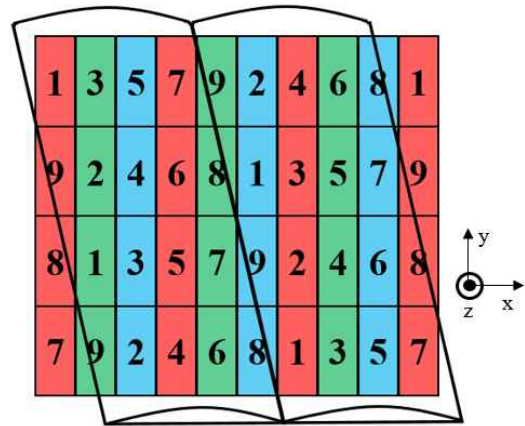


Fig. 2. Schematic drawing of the ELC lens and the director distribution of the liquid crystals under the influence of an applied electric field.

Table 1. Specifications of the ELC lens and material property of the liquid crystals.

Parameters	Values
Voltage (1st electrode)	11 V
Voltage (2nd electrode)	14.5 V
Voltage (3rd electrode)	21 V
Cell gap	35 μm
Pretilt angle	2°
K_{11}	6.4 pN
K_{22}	3 pN
K_{33}	10 pN
Δn at 550 nm	0.1918
$\Delta\epsilon$	13

화소 전극들과 공통전극의 전압차를 이용함으로써 렌즈의 가장자리에서 액정을 최대한 일어서게 만들고, 중앙에서는 최대한 액정이 초기상태로 유지되게 설계하였다. 굴절률이 클수록 빛의 전파속도가 느려지게 되는데, 렌즈의 중앙으로 갈수록 액정의 장축의 굴절률을 겪게 되고, 가장자리로 갈수록 장축의 굴절률보다 작은 단축의 굴절률을 겪게 되므로 빛이 한 점으로 모이는 렌즈의 특성을 갖게 할 수 있다.

액정 전계 렌즈는 그림 2와 같이 기울여 부착하게 된다. 그 이유는 화상과 수직으로 배열되면 시청 시 화소의 블랙매트릭스가 확대되고, 영상전환이 자연스럽게 못하다는 단점이 있기 때문이다 [6]. 렌즈의 기울임

으로 인해 영상의 분포 양상 또한 기울어지게 된다.

표 1은 시뮬레이션에 적용된 액정 전계 렌즈의 특성이다. 각 전극에 인가된 전압과 액정의 주요 물성치를 나타낸다. Δn 값이 클수록 파면을 왜곡 시키는데 필요한 액정 층의 두께가 얇아지므로 Δn 이 큰 액정을 선택할수록 액정 전계 렌즈를 얇게 구현할 수 있다.

2.2 액정 전계 렌즈 3차원 해석

액정 전계 렌즈의 액정 층을 통과한 후의 빛의 편광 상태는 EJMM (extended Jones matrix method)를 이용하여 계산할 수 있다 [7]. 계산한 편광상태 값을 이용하여 각 위치에서의 위상지연을 확인할 수 있으며, 위상지연으로 렌즈를 통과한 빛의 파면을 구할 수 있다. 빛은 파면에 수직하기 때문에 모든 빛의 각도를 구할 수 있다. 액정 층 투과 후의 편광상태를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 δ 는 전계의 x방향의 위상과 y방향의 위상의 차이로 $\delta = \delta_y - \delta_x$ 로 표현할 수 있다. A_x, A_y 는 각각 x방향, y방향으로의 진폭이다.

\vec{E} 의 총 위상지연은 EJMM을 이용하여 계산된 \vec{E}_x 의 누적된 위상지연 값 δ 와 γ 의 합이며, 식 (6)과 같다 [8].

Table 2. Specifications of the LCD panel with the ELC lens.

Parameters	Values
Panel Size	17.1" (378.56×212.94 mm ²)
Resolution	FHD (1,920×1,080)
Pixel Structure	RGB stripe
Number of view	9
Optimum Viewing Distance	80 cm
Focal Length	1.60 mm
Eye Distance	65 mm
Pixel Pitch	65.7 μ m
Lens Pitch	295.65 μ m
Maximum Incident Angle	15°

$$\delta_{total,x} = \delta_x + \gamma \quad (6)$$

액정 전계 렌즈 각 지점에서의 총 위상지연 $\delta_{total,x}$ 을 통해 각각의 면에서 왜곡된 파면을 구한다. 같은 방법으로 $\delta_{total,y}$ 를 구하고 3차원으로 구성하여 광 특성을 해석할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션은 표 2에 나타낸 특성을 갖는 LCD패널에 9 view 입체영상을 적용하여 MATLAB tool에서 수행하였다.

그림 3은 이상적인 단일 렌즈의 초점거리 부근에서의 3차원 광경로 추적 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 3차원 공간에서의 광경로 추적결과를 나타내며, 그림 3(b)는 x-z 평면에서의 이상적인 렌즈의 광선추적 결과이다. 그림 3(b)에서 광선이 1.6 mm의 초점에 모였다가 다시 퍼지는 것을 볼 수 있다. 광선이 초점에서 모였다가 비틀린 모양으로 분산되는 것을 볼 수 있는데 이는 렌즈가 패널에 기울어져 부착되어 있기 때문이다.

그림 4는 EJMM을 이용하여 액정 전계 렌즈의 광경로를 추적한 결과이다. 그림 3과 비교하여 초점을 벗어난 빛들이 존재한다. 이는 EJMM의 복굴절에 대한 가정과 액정 층 내부 경계면에서의 굴절에 대한 계산이 포함되어 있지 않으므로 매끄러운 실효굴절을 곡선을 얻기가 힘들기 때문이다. 또한 액정 전계 렌즈에서 전극간의 횡전계가 존재하기 때문에 액정이 수평거동을 일으키게 되어 이상적인 단일 렌즈의 광경로 차이와 일치하지 않는 왜곡된 값을 갖기 때문이다.

그림 5는 각각의 렌즈를 사용한 디스플레이의 최적 시청거리에서의 각 영상별 조도 분포를 나타낸다. 그림 5(a)는 이상적인 단일 렌즈의 입체영상 시청 영역을 3차원으로 나타낸 것으로 그림 3의 이상적인 단일 렌즈의 3차원 광선 추적 결과를 이용하여 디스플레이 전체에 대해 확장하고, 광선밀도가 가장 큰 부분을 단독으로 계산한 결과이다. 각 영상 시청영역 분포의 x축 간격이 눈간 거리 65 mm의 1/4인 16.25 mm로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 렌즈 설계 시에 이미 고려한 형태로 서로 다른 영상을 좌우 눈에 도달하게 한 것이다. 따라서 시청자는 양안 시차를 느껴 입체영상의 구현이 가능하다. 또한, 영상의 자연스러운 전환을 위하여 렌즈를 기울여 부착하였기 때문에 기울어진 형태의 시청영역을 볼 수 있다.

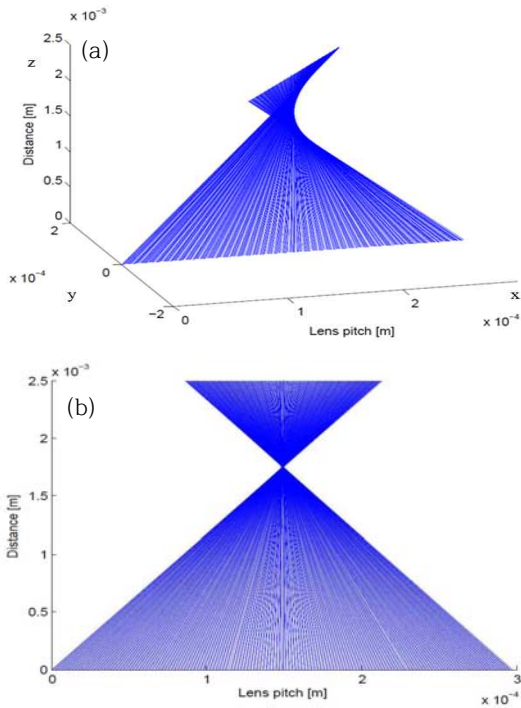


Fig. 3. Result of raytracing the ideal lens (a) in xyz space and (b) on x-z plane

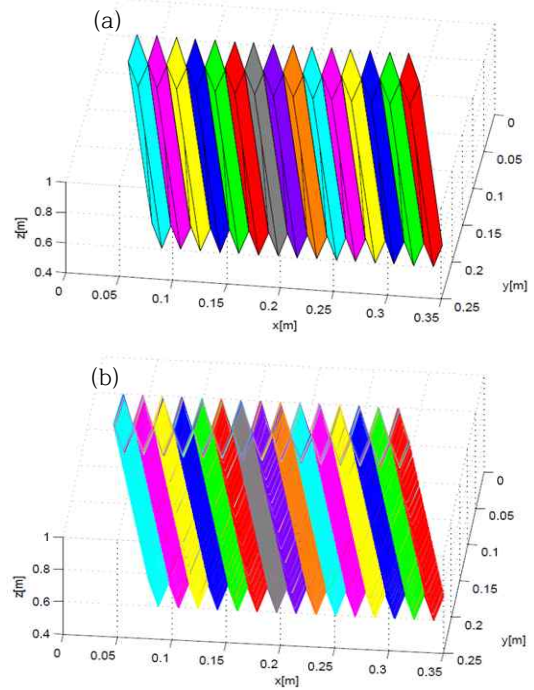


Fig. 5. Intensity distribution of each view at optimum viewing distance in using (a) the ideal lens and (b) the ELC lens.

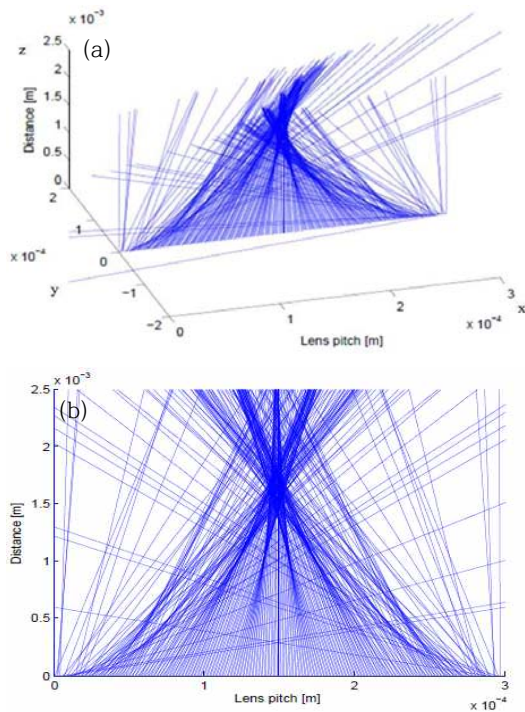


Fig. 4. Result of raytracing the ELC lens (a) in xyz space and (b) on x-z plane

그림 5(a)에서 각 영상들이 한자리에 겹치지 않게 분리가 되어 있는 것을 볼 수 있지만, 바닥부분을 보면 영상간의 혼선이 존재하며 노이즈 형태로 존재하는 빛들이 있음을 확인할 수 있다. 이 때, 영상의 혼선을 분석을 이용하면 3차원 해석의 혼선율은 3.11%로 2차원 해석으로 계산한 2.94%보다 큰 값을 확인할 수 있다. 이는 3차원 해석에서 고려되지 않은 방향의 혼선이 보다 실제적으로 계산되었기 때문으로 볼 수 있다. 그림 5(b)는 3차원 해석 방법을 이용하여 계산된 액정 전계 렌즈의 시정영역 분포를 나타낸다. 그림 5(a)와 마찬가지로 각 영상의 간격이 눈간 거리의 1/4만큼 떨어져 분포하여 3차원 입체영상이 구현됨을 확인할 수 있고, 렌즈의 기울임 각도로 인한 시정 영역의 기울어진 형태도 확인할 수 있다. 하지만 이상적인 렌즈의 시정영역 분포 결과와는 달리 노이즈가 다소 존재함을 볼 수 있다. 이것은 그림 4의 액정 전계 렌즈 광경로 추적에서 초점을 벗어난 광선들과 그림 5에서 나타난 액정 전계 렌즈의 영상 별 조도분포의 혼선으로 인한 것이다.

액정 전계 렌즈 설계 시 빛의 수렴을 위해 다층 전극 구조를 이용, 위치별로 위상차를 만들어 액정을 세

밀하게 제어했음에도 불구하고 다층 전극 구조에서 존재할 수밖에 없는 횡전계로 인해 액정이 수평거동을 일으켜 빛의 진행에 왜곡이 발생하였다. 왜곡으로 인한 영상의 시청영역 분포를 3차원적으로 확인하여 액정 전계 렌즈를 이용한 2D/3D 전환 3차원 디스플레이 최적설계를 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 17.1인치 9 view 3D LCD를 이용하여 2D/3D 모드의 전환이 가능한 액정 전계 렌즈의 3차원 해석 방법을 제안하고 2차원 해석에서는 확인할 수 없었던 각 영상 간의 혼선과 렌즈의 기울임 각도로 인한 시청영역의 왜곡에 대하여 확인하였다.

Erickson-Leslie의 운동방정식과 유한차분법을 이용하여 얻은 액정의 분자 배열 분포에 EJM을 적용하여 투과광의 편광상태를 얻고, 이로부터 렌즈를 통과한 빛이 겪은 총 위상지연 크기를 계산하였다. 위상지연 값을 이용하여 액정의 경사각과 방위각을 모두 고려한 광경로 차를 계산하고 이를 이용하여 렌즈를 통과한 투과광의 파면을 얻었으며, 각 영상이 공간상에 분포되는 양상을 계산하였다. 이상적인 단일 렌즈의 결과와의 비교를 통하여 액정 전계 렌즈에서 발생하는 영상의 노이즈와 왜곡을 확인하였다.

시뮬레이션 결과로부터, 각 영상이 눈간 거리 65 mm 간격으로 분리되어 있음을 확인하였고, 각 영상 간의 혼선 정도를 의미하는 CR은 2차원 해석방법을 이용할 경우 2.94%, 3차원 해석방법을 이용할 경우 3.11%로 계산되었으며, 2차원 시뮬레이션만으로는 확인할 수 없었던 렌즈 기울임으로 인한 시청영역에서 3차원 영상의 기울어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 해석방법을 이용하여 렌즈의 기울임 정도를 고려한 보다 실제적이고 엄정한 3차원 액정 전계 렌즈 기반 시

뮬레이션이 가능하며, 액정 전계 렌즈 기반 2차원/3차원 모드 변환이 가능한 디스플레이의 최적 설계 조건을 제공할 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 신성장동력장비경쟁력 강화사업인 분석오류 1% 미만의 매뉴얼 리뷰 센터(MRC) 기반, 분해능 0.2 μm 이하 촬상장치를 적용한 처리속도 60 t/h 스마트 백혈구 이미지 감별기기 개발(과제번호 10059106) 사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. A. Beton, *ed.*, *SID '08*, **39**, 348 (2008).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.3069666>]
- [2] J. Y. Son, V. V. Saveljev, Y. J. Choi, J. E. Bahn, and H. H. Choi, *Opt. Eng.*, **42**, 3326 (2003).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/1.1615259>]
- [3] H. K. Hong, S. M. Jung, B. J. Lee, H. J. Im, and H. H. Shin, *SID '08 Dig.*, **39**, 348 (2008).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.3069666>]
- [4] G. J. Woodgate, J. Harrold, A. M. S. Jacobs, R. R. Moseley, and D. Ezra, *Proc. SPIE*, **3957**, 153 (2000).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.384438>]
- [5] M. Kitamura, *SID '95 Dig.*, **26**, 540 (1995).
- [6] C. van Berkel and J. A. Clarke, *Proc. SPIE*, **3012**, 179 (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.274456>]
- [7] P. Yeh, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 507 (1982).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.72.000507>]
- [8] B. S. Kim, S. C. Lee, and W. S. Park, *J. Korean Phys. Soc.*, **65**, 392 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.65.392>]