

3차원 영상출력을 위한 ELC 렌즈의 기하광학적 해석 방법 및 최적 설계

김봉식¹, 김건우¹, 백승조¹, 박우상^{1,a}

¹ 인하대학교 전자공학과

A Geometrical Analysis Method of ELC Lens for The 3D Display for Optimum Design

Bong-Sik Kim¹, Keon-Woo Kim¹, Seung-Jo Baik¹, and Woo-Sang Park^{1,a}

¹ School of Electronics Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received May 8, 2013; Revised May 20, 2013; Accepted May 24, 2013)

Abstract: In this paper, a novel method based on geometrical optics is proposed to calculate the optical characteristics of an electric field driven liquid crystal (ELC) lens. For an optimally designed ELC lens, effective refractive index is calculated and then ray tracing is carried out using Huygens' principle. From the results, the intensity distribution at the optimum viewing distance (OVD) is obtained. To confirm the validity of our work, the result is compared with that calculated by the extended Jones matrix method (EJMM). As a result, it turns out that the novel method provides more simple and rigorous simulation results than the EJMM.

Keywords: 3D display, ELC lens, Huygens' principle

1. 서론

현재의 3차원 디스플레이 방식은 크게 안경 방식과 무안경 방식으로 나눌 수 있다. 안경 방식은 이미 상용화가 되어 판매중인, SG (shutter glass) 방식과 FPR (film patterned retarder) 방식이 있으며, 무안경 방식에는 대표적으로 베리어 방식, 렌티큘러 렌즈 방식이 존재한다. 가까운 미래에는 안경 방식의 3차원 디스플레이 장치들은 무안경 방식의 3차원 디스플레

이 장치들로 대체될 것이다. 하지만 현재 제공되는 영상들의 대부분이 2차원 영상이므로, 3차원 디스플레이 장치의 2차원/3차원 영상 출력 전환은 필수적인 기술이라 할 수 있다.

본 연구에서는 무안경 방식 3차원 디스플레이 장치 중 렌티큘러 렌즈를 대체할 수 있으며, 2차원/3차원 영상의 전환 또한 가능한 ELC (electric field driven liquid crystal) 렌즈의 해석 방법을 제안한다 [1]. 우선, ELC 렌즈의 전극 구조 설계 후 액정의 동적 분자배열 분포를 얻기 위하여 de Gennes의 order tensor와 Erickson-Leslie의 운동방정식을 적용하고, 수치해석적 방법으로는 복잡한 비선형 방정식에도 비교적 적용이 쉬운 유한차분법 (finite difference method, FDM)을 적용하였다 [2]. 또한, ELC 렌즈의 분자배열 분포를 얻은 후 Huygens 원리를 적용하여

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

기하광학적으로 해석하고, 계산된 실효굴절률을 적용하여 최적시청거리에서의 조도분포를 나타내었다. 마지막으로 액정의 광학적 해석에 널리 적용되는 해석 방법인 EJMM (extended jones matrix method)을 이용하여 계산된 광추적 결과와 각 영상의 분리 정도를 표현하는 CR (cross talk ratio)을 계산하여 정량적인 수치로 렌즈의 성능을 비교하여 유효성을 확인하였다 [3].

2. 실험 방법

2.1 ELC 렌즈 설계 개념 및 수치 해석

ELC 렌즈의 해석을 위한 LCD 패널과 렌즈의 특성을 표 1에 나타내었다. 렌즈의 물성 값들은 패널의 해상도, 화상의 크기와 배치, 영상의 개수 등을 이용하여 기하광학적으로 계산된 값들이다 [4]. 초점 거리는 1.57 mm, 화상의 크기는 63.9 μm , 렌즈 크기는 287 μm 이며, 시뮬레이션에는 -15° 부터 15° 까지의 입사광을 적용하여 계산하였다.

그림 1은 시뮬레이션에 사용할 ELC 렌즈의 전극 구조를 설계하여 de Gennes의 order tensor와 Erickson-Leslie 운동방정식을 적용하고, 유한차분법을 이용하여 얻은 ELC 렌즈의 액정 분포를 보여준다. 설계한 ELC 렌즈는 세 개의 화소 전극과 하나의 공통 전극으로 구성되어 있으며, 화소 전극의 전압차를 이용하여 가장자리에서 최대한 액정이 일어서게 만들고, 중앙에서 최대한 액정이 초기 상태로 유지되게 설계하였다. 이상적인 ELC 렌즈의 경우, 액정의 회전 성분은 존재하지 않고 중앙에서 가장자리로 갈수록 액정이 점차 일어서는 형태로 존재해야 하지만, 각각 다른 전압이 인가된 화소 전극들로 인하여 발생된 횡전계의 영향으로 ELC 렌즈의 가장자리 부분에서 액정의 왜곡이 발생한 것을 확인할 수 있다. 액정을 이용하는 ELC 렌즈의 특성 상 의도치 않은 왜곡 부분이 발생하게 쉬우며, 이를 고려하여 설계를 진행하였다.

ELC 렌즈를 통과하는 빛의 진행 방향과 액정의 방향자를 각각 식 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_i &= (\sin\theta_i, 0, \cos\theta_i), \quad i = 1, 2, \dots \\ \hat{d}_i &= (\sin\theta_{id}\cos\phi_{id}, \sin\theta_{id}\sin\phi_{id}, \cos\theta_{id}), \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Table 1. Specifications of the LCD panel and design parameters of the ELC lens.

Parameters	Values
Panel Size	17.1(368×229.5) mm ²
Resolution	WUXGA(1,920×1,200)
Pixel Structure	RGB stripe
Number of view	9
Optimum Viewing Distance	80 cm
Focal Length	1.57 mm
Eye Distance	65 mm
Pixel Pitch	63.9 μm
Lens Pitch	287 μm
Maximum Incident Angle	15°

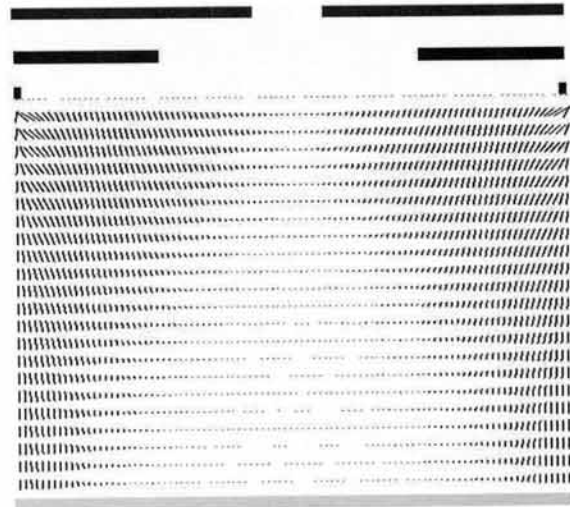


Fig. 1. Schematic drawing of the ELC lens and the director distribution of the liquid crystals under the influence of an applied electric field.

그림 2와 같이 가로 1 μm , 세로 0.1 μm 크기의 ELC 렌즈 내부 경계면마다 식 (2)에 나타낸 Snell의 법칙을 적용하여 빛의 진행 방향을 결정한다.

$$n_{air}\sin\theta_{air} = n_1\sin\theta_1 \quad (2)$$

액정의 실효굴절률은 빛의 진행 방향과 액정 분자의 방향자를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_{eff} = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 [1 - (\hat{s} \cdot \hat{d})^2] + n_e^2 (\hat{s} \cdot \hat{d})^2}} \quad (3)$$

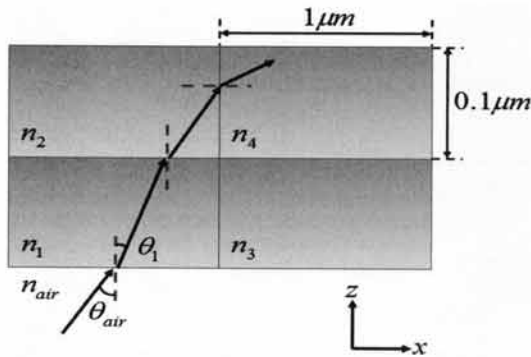


Fig. 2. Snell's law-based modeling of the ELC lens for determining the ray direction.

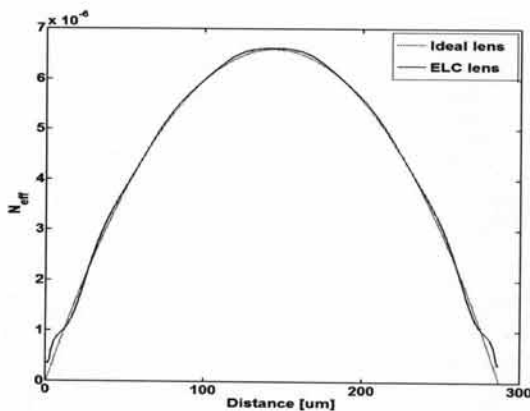


Fig. 3. Effective index of refraction calculated by using geometrical optics. The solid and dotted lines correspond to the results for the ELC lens and the ideal parabolic lens, respectively.

따라서 식 (2)와 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 나타내고, 빛이 진행함에 따라 겪는 실효굴절률과 그때의 굴절 방향을 Newton-Raphson방법을 적용하여 계산한다 [5].

$$n_{air} \sin \theta_{air} = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 [1 - (\hat{s}_1 \cdot \hat{d}_1)^2] + n_e^2 (\hat{s}_1 \cdot \hat{d}_1)^2}} \sin \theta_1 \quad (4)$$

즉, 식 (4)를 이용하여 패널을 출발하는 입사광이 ELC 렌즈 내부를 진행함에 따라 겪는 실효굴절률을 계산할 수 있으며, 최종적으로 입사광이 렌즈를 통과한 뒤, 렌즈 내부에서 겪은, 누적된 실효굴절률을 얻을 수 있다. 이를 바탕으로 계산된 실효굴절률 곡선을

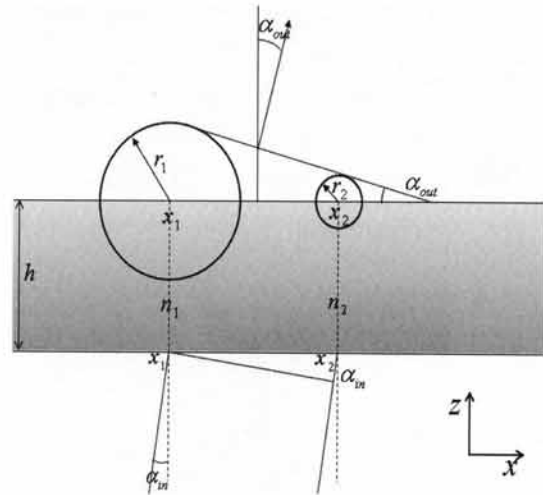


Fig. 4. Application of the Huygens' principle to an inhomogeneous media.

그림 3에 나타내었다. 이상적인 값과 시뮬레이션을 통하여 액정 분포를 해석한 값을 각각 점선과 실선으로 나타내었다. ELC 렌즈의 최적 설계를 위하여 액정의 분자배열 분포를 해석하여 얻은 실효굴절률 곡선과 이상적인 렌즈의 실효굴절률 곡선이 최대한 일치하도록 만들었다. 따라서 그림 3의 이상적인 곡선과 ELC 렌즈의 곡선은 근소한 차이를 보이게 됨을 알 수 있으며, 실효굴절률 곡선이 렌즈의 성능을 결정짓는 요소이므로, 이 부분의 설계가 정확히 이루어지도록 화소 전극들의 전압을 결정하였다.

그림 3을 바탕으로 호이겐스의 원리를 적용하여 광경로를 추적한다. 그림 4에 ELC 렌즈와 같이 굴절률이 일정하지 않은 비균질 매질에서의 호이겐스의 원리를 도식적으로 나타내었다. h 는 액정층의 두께, r_1, r_2 는 x_1, x_2 지점에서의 실효굴절률의 크기를 의미한다 [6].

일정하지 않은 굴절률로 인하여 액정을 통과한 2차적인 구면파의 속도는 각 지점마다 차이가 생기게 되고, 이 차이를 이용하여 ELC 렌즈를 통과한 빛의 굴절 방향을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sin \alpha_{out} = \frac{r_1 - r_2}{x_2 - x_1} = \frac{h}{n_{air}} \frac{n_2 - n_1}{x_2 - x_1} + \sin \alpha_{in} \quad (5)$$

마지막으로 식(5)를 이용하여 ELC 렌즈를 통과한 빛의 방향이 결정하고, 이를 이용하여 최적시청거리에 도달하는 빛의 위치를 결정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기하광학적인 방법을 이용하여 ELC 렌즈를 해석하였다. 또한 광경로 추적에 있어 비균질 매질에서의 Huygens의 원리를 적용하였다. 시뮬레이션은 17.1"(368×229.5 mm) WUXGA wide LCD 패널

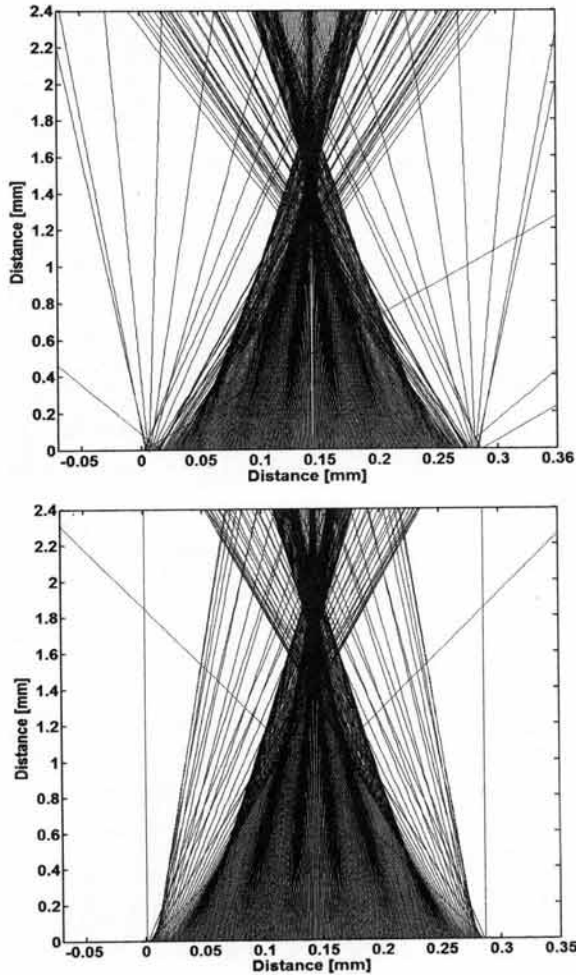


Fig. 5. Result of ray tracing the ELC lens using (a) extended jones matrix method and (b) Huygens' principle.

에 9 view 입체 영상을 적용하여 수행하였으며, 동일한 ELC 렌즈를 이미 타당성이 검증되어 있는 EJMM으로 해석하여 두 결과를 비교하였다.

그림 5는 초점거리 부근에서의 광경로 추적을 보여 준다. 그림 5(a)는 EJMM을 이용한 광경로 추적 결과이며, (b)는 Huygens의 원리에 기하광학적으로 계산된 ELC 렌즈의 실효굴절률을 적용한 방법의 광경로

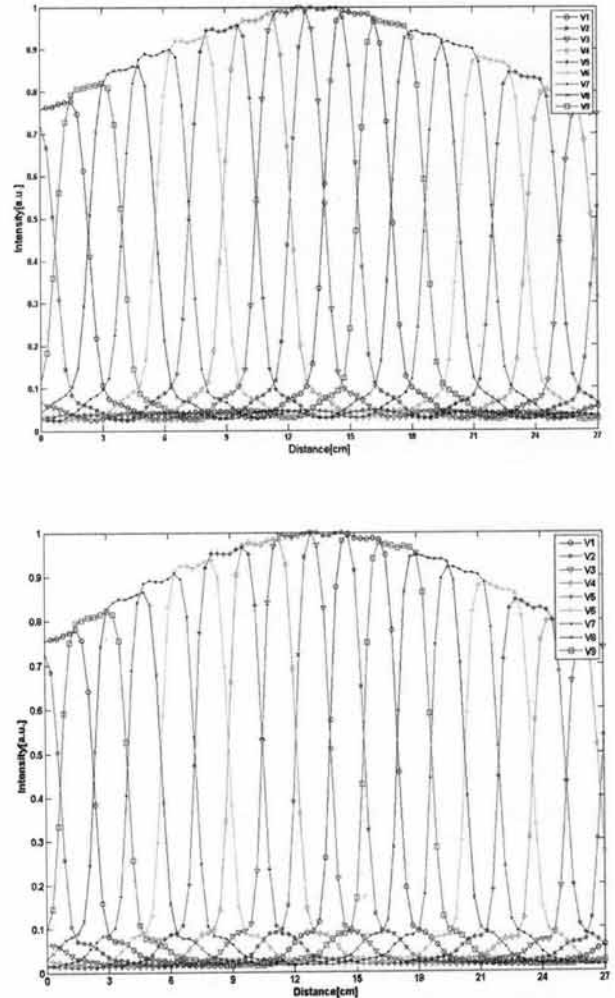


Fig. 6. Intensity distribution of each view at optimum viewing distance calculated by using (a) extended Jones matrix method and (b) Huygens' principle. The V numbers from V1 to V9 indicate the view number.

추적 결과를 나타낸다. 그림 5(a)에서는 초점을 벗어나는 빛들이 다소 존재하지만, (b)의 광추적 결과에서는 초점을 벗어나는 빛의 양이 (a)에서보다 더 적음을 확인할 수 있다. 그림 5(a)의 경우, EJMM의 복굴절에 대한 가설과 액정층 내부 경계면에서의 굴절에 대한 고려가 부족하므로 매끄러운 실효굴절률 곡선을 얻기가 힘들어 초점을 벗어나는 빛이 발생하지만, (b)의 경우, 빛의 진행에 따라 액정층 내부의 경계를 모두 고려하여 실효굴절률 곡선에서 불연속점이 없고, 이상적인 실효굴절률 값과의 차이가 적기 때문에 더 뛰어난 광추적 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

그림 6은 최적 시청거리에서 각 영상별 조도 분포

를 나타낸다. 처음 설계대로 4번 영상과 9번 영상 간의 거리가 눈 간 거리만큼 떨어져 있음을 확인할 수 있으며, 각 영상들이 한 자리에 겹치지 않게 분리되어 있다. 그림 6(a)는 그림 5(a)를 바탕으로 얻은 결과이며, 그림 6(b)는 그림 5(b)를 바탕으로 얻은 조도 분포를 나타낸다. 두 결과 모두 각 영상들이 겹치지 않게 분리되어 있으나, 그림 5에서 초점에 맞지 않는 빛들로 인하여 그림 6에서도 바닥에 noise 형태로 존재하는 빛들이 있음을 확인할 수 있다. 상대적으로 초점에서 더욱 벗어나는 양상을 보였던 EJMM을 이용한 결과인 그림 6(a)의 noise가 (b)의 결과보다 더 많이 존재한다. noise 형태의 빛들이 존재할 경우 3차원 영상의 품질이 저하되며, 이 부분을 최소화하는 방향으로 설계가 이루어져야 한다. 그림 6의 결과를 이용하여 영상의 분리 정도를 나타내는 CR을 다음의 식을 이용하여 계산하였다 [7].

$$CR = \frac{I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100[\%] \quad (6)$$

그림 6(a)는 3.05%, (b)는 1.77%로 (b)의 결과에서 더 적은 CR을 얻을 수 있었다. EJMM을 적용한 해석방법의 경우, 렌즈 가장자리 부분의 광경로 추적 결과가 Huygens의 원리를 적용한 결과의 데이터와 다소 차이가 존재하여, 이 결과를 바탕으로 패널 전체로 확장시킨 그림 6의 결과에서 그 영향이 더 심해짐을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 17.1"(368×229.5 mm) WUXGA wide LCD 패널에 9 view 입체 영상을 적용하여 ELC 렌즈를 설계하였다. 렌즈 설계 시 이상적인 실효굴절률 곡선을 기준으로 설계된 ELC 렌즈의 실효굴절률을 비교하여 최대한 근사시키는 방법으로 최적 설계를 진행하였으며, 실효굴절률 계산 시 ELC 렌즈의 가장자리에서 발생한 액정의 왜곡 부분을 고려하여 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있도록 시뮬레이션을 수행하였다. 설계된 ELC 렌즈를 de Gennes의 order tensor와 Erickson-Leslie 운동방정식을 적용하고, 복잡한 비선형 방정식에 비교적 적용이 쉬운 유한차분법 (finite difference method, FDM)을 이용하여 액정의 동적 분자배열 분포를 얻었으며, EJMM과 Huygens의 원리를 적용시킨 두 가지 해석 방법을 이

용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

EJMM을 이용한 해석 결과와 본 연구에서 사용한 비균질 매질에서의 Huygens 원리를 이용한 결과를 비교하여 해석 방법의 타당성을 확인하였으며, 본 연구에서 사용한 방법을 이용할 경우, EJMM에 비해 더 적은 계산으로 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. EJMM의 광경로 추적 방법은 렌즈를 통과하는 빛의 위상 지연을 계산하여 파면의 변화를 얻은 후 이를 바탕으로 빛의 진행을 계산하는 방법이나, 본 연구에서 사용된 방법은 기하광학적으로 실효굴절률을 얻은 후 Huygens의 원리를 적용시켜 광추적을 수행하는 방법으로, EJMM에 비해 단순한 계산 과정을 거쳐 결과를 얻을 수 있다. 최적 시청거리 80 cm에서 각 영상별 분해 능력을 의미하는 CR의 경우, EJMM은 3.05%, Huygens의 원리는 1.77%로 계산되었으며, 이는 EJMM의 해석 방법에서 존재하는 가설들로 인하여 빛이 겪는 굴절률의 누적 값이 Huygens의 원리를 적용한 경우보다 실제적인 결과를 얻을 수 없기 때문이다.

본 연구에서 사용한 ELC 렌즈의 해석방법을 이용할 경우 ELC 렌즈 설계 시 보다 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문을 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- [1] H. K. Hong, S. M. Jung, B. J. Lee, H. J. Im, and H. H. Shin, *Autostereoscopic 2D/3D Switching Display Using Electric-Field-Driven LC Lens (ELC Lens)*, SID'08, 348 (2008).
- [2] S. M. Jung, S. H. Jang, H. D. Park, and W. S. Park, *J. Korean Phys. Soc.*, 44, 190 (2004).
- [3] P. Yeh, *J. Opt. Soc. Am.*, 72, 507 (1982).
- [4] C. V. Berkel, A. R. Franklin, and J. R. Mansell, *Design and Applications of Multiview 3D-LCD; Proc. of SID Euro. Display*, 96, 109 (1996).
- [5] T. C. Kraan, T. V. Bommel, and R. A. M. Hikmet, *J. Opt. Soc. Am.*, 3467 (2007).
- [6] M. Sluijter, A. Herzog, DKG de Boer, MPCM Krijn, and H. P. Urbach, *J. Opt. Soc. Am.*, 2035 (2009).
- [7] G. J. Woodgate, et al, *Flat Panel Autostereoscopic Displays Characterisations and Enhancement; Proc. of SPIE*, 3957, 153 (2000).