

렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 광학적 해석방법

김봉식¹, 김건우¹, 이길훈¹, 박우상^{1,a}

¹ 인하대학교 전자공학과

Optical Analysis for the 3D Display with a Lenticular Array

Bong-Sik Kim¹, Keon-Woo Kim¹, Kil-Hoon Lee¹, and Woo-Sang Park^{1,a}

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

(Received June 5, 2013; Revised June 23, 2013; Accepted June 24, 2013)

Abstract: We propose a generic method to calculate the optical functionalities of a 3D display with a lenticular lens array. In the present work, based on the geometrical optics, it is designed considering the specifications of the display panel. For the effective simulation, we first calculate the optical functionalities of a single cylindrical lens and, by comparing with the results obtained from the conventional geometrical optics, confirm the validity of the present method. Afterwards, we obtain the full distribution of the light intensity at an optimum viewing distance by expanding the results of the single lens to the horizontal plane of the display panel. From these results, we finally confirm whether the 3D images are realized or not in the system.

Keywords: 3D display, Lenticular lens, Geometrical optics

1. 서 론

현재의 무안경 3차원 디스플레이 장치 기술은 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 그 중, 가장 기본적인 무안경 3차원 디스플레이 기술은 크게 패럴랙스 배리어 (parallax barrier)와 렌티큘러 렌즈 (lenticular lens)를 사용하는 기술로 나눌 수 있다. 패럴랙스 배리어 기술의 경우, 제작이 용이하지만, 패널에 부착되는 슬릿으로 인하여 밝기가 저하되는 문제가 존재하며, 렌티큘러 렌즈 기술은 렌즈를 이용하여 좌, 우 영상을 분리하기 때문에 밝기 저하가 없다는 장점이 있으나 렌즈를 부착 후 2차원 영상을 시청하기 어렵다

는 단점이 존재한다. 대부분의 영상이 2차원으로 제공되고 있기 때문에 렌티큘러 렌즈 기반의 3차원 디스플레이 장치에서 이를 해결하기 위한 다양한 기술들이 연구, 개발되어 소개되고 있다. 한편, 현재 상용화된 시뮬레이터는 렌즈 자체의 해석에만 초점이 맞춰져 제공되고 있어, 연구, 개발 목적의 무안경 방식의 3차원 디스플레이 장치의 해석에는 여러 종류의 시뮬레이터를 사용해야 하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 무안경 3차원 디스플레이 기술 중, 렌티큘러 렌즈가 적용된 3차원 디스플레이 장치를 해석하는 방법을 수학적 기술과 기하광학적 방법을 이용하여 제시하고, 그 결과의 타당성에 대해 검토하였다. 렌티큘러 렌즈의 해석에는 일반적인 Snell의 법칙을 적용하여 계산 과정을 기존의 방법들에 비해 단순화시켰고, 디스플레이 패널까지 적용하여 제작된 시뮬레이터는 패널의 종류에 무관하게 해석이 가능하도록 패널의 크기, 해상도에 대한 정보만을 이용하여

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

렌즈의 특성을 기하광학적으로 계산하였다 [1-3]. 마지막으로 제작된 시뮬레이터의 타당성 검증을 위하여 시뮬레이션을 통해 얻은 단일 렌즈의 광추적 결과와 최적 시청거리에서의 조도 분포를 기하광학적으로 계산된 결과와 비교하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션에 사용된 렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 3차원 영상 구현 여부를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 시뮬레이션

렌티큘러 렌즈의 해석을 위한 패널과 렌즈의 특성을 표 1에 나타내었다. 렌티큘러 렌즈의 특성 값들은 패널을 결정한 뒤, 패널의 변수들을 이용하여 기하광학적으로 계산된 값들이다. 4.5" HD RGB stripe wide 패널에 적용된 렌티큘러 렌즈의 피치는 154.02 μm , 초점거리는 337.21 μm , 눈간거리는 65 mm, 시뮬레이션에는 -15° 부터 15° 까지의 각도를 입사각으로 사용하였다 [4].

렌즈의 곡률반경을 계산하기 위해 그림 1에 단일 렌티큘러 렌즈를 도식화하여 나타내었다. 그림 1로부터 렌티큘러 렌즈의 곡률반경 R 을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = f \times (n_{lens} - n_{air}) \tag{1}$$

초점거리 f 와 공기의 굴절률 $n_{air} = 1$, 렌즈의 굴절률 $n_{lens} = 1.5$ 를 이용하여 계산한 결과, 렌티큘러 렌즈의 곡률반경은 168.6 μm 로 계산되었다.

그림 2는 렌즈 바닥의 점 (x_L, y_L, z_L) 에서 렌즈 내부를 진행하는 각도 θ_L 로 렌즈의 경계면에 도달할 때, 굴절이 일어나는 상황을 도식화 한 형태이다. k_L 은 렌즈 내부를 진행하는 빛, k_r 은 투과광, θ_r 은 투과각, θ_n 은 투과점 (x_r, y_r, z_r) 에서의 법선 벡터가 z 축과 이루는 각도를 의미한다. 패널에서 출발한 빛은 렌즈 바닥에 도달하게 되며, 굴절을 겪게 된다. 이때의 굴절각은 식 (2)에 나타난 Snell의 법칙을 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

$$n_{air} \sin \theta_i = n_{lens} \sin \theta_L \tag{2}$$

Table 1. Specification of the display panel and design parameters of the lenticular lens array.

| Parameter | Value |
|--------------------------|---------------------------|
| Panel Size | 4.5" |
| Resolution | HD(1,280×720) |
| Pixel Structure | RGB stripe |
| Pixel Pitch | 77.1 μm |
| Optimum Viewing Distance | 30 cm |
| Number of view | 2 |
| Focal Length | 337.21 μm |
| Eye Distance | 65 mm |
| Lens Pitch | 154.02 μm |
| Incident Angle | -15° to 15° |

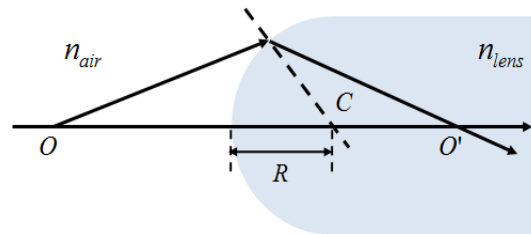


Fig. 1. Schematic drawing for calculating the radius of curvature of a lenticular lens.

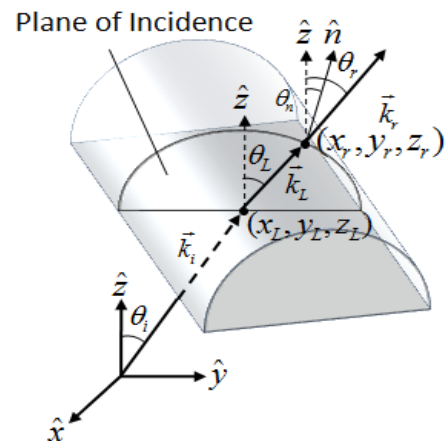


Fig. 2. Schematic drawing of the ray passing through a lenticular lens. The ray incident from the bottom of the lens is propagated through the plane of refraction.

식 (2)의 θ_i 는 패널에서 렌즈 바닥으로 입사된 빛의 입사각을 의미한다. 위 식에서 계산된 θ_L 의 각도

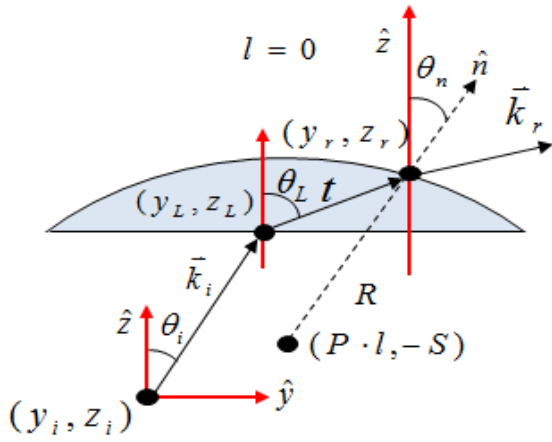


Fig. 3. Schematic illustration of the ray-tracing for a single lenticular lens.

를 이용하여 렌즈 내부를 진행하는 빛이 만나는 렌즈 경계면에서의 투과점을 얻고, 이로부터 렌즈를 통과하는 빛의 투과각을 계산한다.

그림 3은 디스플레이 패널에 적용될 렌티큘러 렌즈의 모식도를 나타낸다. (y_i, z_i) 는 패널상의 좌표, l 은 렌즈의 번호를 의미하며, 각 렌즈에 해당하는 곡률 중심을 계산하기 위해 패널의 중앙에 위치한 렌즈를 0 번으로 설정하였다. P 는 렌즈의 피치, S 는 렌즈의 바닥에서부터 곡률 중심까지의 거리, t 는 렌즈 바닥에서 투과점까지 빛의 진행 거리를 의미한다.

$$f(y_r, z_r) = (y_r - Pl)^2 + (z_r + S)^2 - R^2 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{y_r - y_L}{\sin\theta_L} = \frac{z_r - z_L}{\cos\theta_L} = t \quad (4)$$

렌즈를 진행한 빛이 도달하는 투과점을 얻기 위해 식 (3)과 (4)를 이용한다. 식 (3)은 그림 3에서 렌즈 경계면을 의미하고, 식 (4)는 렌즈 내부를 진행한 거리 t 를 표현한 식이다. 식 (3)과 식 (4)를 연립하여 다음의 식 (5)를 계산하면 렌즈 내부 진행 거리를 얻을 수 있고, 이를 바탕으로 렌즈 경계면상의 투과점을 계산하면 다음과 같다.

$$t = \sqrt{R^2 - [\cos\theta_L(y_L - Pl) - \sin\theta_L(z_L + S)]^2 - [\sin\theta_L(y_L - Pl) + \cos\theta_L(z_L + S)]^2} \quad (5)$$

위에서 계산된 렌즈의 투과점에서 빛의 진행 방향을 계산하기 위해 벡터 형태로 변형시킨 식 (6)의 Snell의 법칙을 사용한다.

$$\vec{k}_L \times \hat{n} = \vec{k}_r \times \hat{n} \quad (6)$$

식 (6)의 각 벡터들은 식 (7)의 값들로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{k}_L &= \frac{\omega}{c} n_{lens} (\sin\theta_L \cos\phi_L \hat{x} + \sin\theta_L \sin\phi_L \hat{y} + \cos\theta_L \hat{z}) \\ \vec{k}_r &= \frac{\omega}{c} n_{air} (\sin\theta_r \cos\phi_r \hat{x} + \sin\theta_r \sin\phi_r \hat{y} + \cos\theta_r \hat{z}) \\ \hat{n} &= (\sin\theta_n \cos\phi_n \hat{x} + \sin\theta_n \sin\phi_n \hat{y} + \cos\theta_n \hat{z}) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 값들을 식(6)에 대입하여 투과점에서의 법선 벡터가 포함된 2차원 Snell의 법칙을 식 (8)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$n_{lens} \sin(\theta_L - \theta_n) = n_{air} \sin(\theta_r - \theta_n) \quad (8)$$

식 (8)로부터 공기중의 굴절률, 렌즈의 굴절률, 렌즈 내부의 진행 각도, 투과점의 법선 벡터를 대입하여 투과점에서 빛이 진행하는 각도 θ_r 을 얻을 수 있다. 투과점에서의 법선 벡터가 z 축과 이루는 각도는 식 (1)에서 계산한 렌즈의 곡률 중심과 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{y_r - Pl}{z_r + s} \right) \quad (9)$$

각 렌즈마다 곡률 중심의 좌표를 다시 계산하여 식 (9)에 대입하고, 식 (9)의 결과를 식 (8)에 대입하여 최종적으로 렌즈를 통과하는 빛의 투과각을 얻을 수 있다.

렌즈를 통과한 빛의 광추적에는, 빛이 출발하는 패널 좌표에서의 정보가 필요하다. 패널상의 좌표에 대응되는 픽셀의 좌, 우 영상을 판별하기 위하여 다음의 식을 이용하여 계산한다.

$$P_n(y) = \frac{y_i}{P_p} \quad (10)$$

$$view(y) = remainder\ of\ \left(\frac{P_n(y)}{N_{view}}\right) \quad (11)$$

식 (10)으로부터 패널상의 좌표에 해당하는 픽셀이 패널 중앙의 픽셀로부터 몇 번째 픽셀인지를 의미하는 $P_n(y)$ 을 판단할 수 있다. P_p 는 픽셀 피치를 의미하며, y_i 좌표를 이용하여 패널상의 좌표에 해당하는 픽셀을 계산할 수 있다. 식 (11)은 패널상의 좌표에 해당하는 영상의 종류를 판별하는 식을 의미한다. 식 (10)을 (11)에 대입하고 영상의 개수 N_{view} 를 결정하면, $P_n(y)/N_{view}$ 의 나머지 값으로 패널상의 좌표에 해당하는 영상의 종류 $view(y)$ 를 판별할 수 있다. 픽셀의 모양, 배열의 형태에 대한 정보를 반영하여 식 (10)과 식 (11)을 적용할 경우, 패널의 종류에 무관하게 해석이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기하광학적 방법과 수학적 기법을 이용하여 렌티큘러 렌즈 기반의 3차원 디스플레이 장치의 해석 방법을 제시하였다. 패널에 적용된 렌티큘러 렌즈는 패널의 변수들을 고려하여 계산된 특성값을 사용했다.

그림 4는 렌티큘러 렌즈를 적용한 패널의 픽셀 구조와 렌즈의 모식도를 나타낸다. 두개의 영상을 이용한 RGB stripe 배열의 3차원 디스플레이 패널에 픽셀의 구조를 고려하여 렌티큘러 렌즈를 적용하고, 좌안, 우안으로 시청할 영상의 번호를 각각의 픽셀에 표현하였다. 1번 영상과 2번 영상이 렌티큘러 렌즈를 통과하여 최적 시청거리에서 눈간 거리만큼 떨어져 분포하게 되고, 픽셀의 피치와 구조, 렌즈의 피치에 따라 두 영상의 분리 정도가 결정된다.

그림 5에는 패널에 적용된 렌티큘러 렌즈 시트 중 단일 렌즈만을 이용한 광추적 결과를 나타낸다. 가로축은 렌즈의 피치 $154.02\ \mu\text{m}$ 를 의미하며, 세로축은 빛이 진행한 거리를 나타낸다. 표 1에서 기하광학적으로 계산된 초점 거리 $337.21\ \mu\text{m}$ 와 그림 5의 시뮬레이션 결과로 얻은 초점 거리가 동일함을 확인할 수 있다. 평행광선법을 이용하여 계산된 렌즈의 특성과 본 연구에서 제안하는 해석 방법을 이용하여 계산된 렌즈의 특성에 차이가 없음을 근거로, 패널의 수평면에 대해 렌티큘러 렌즈를 확장하여 최적 시청거리에

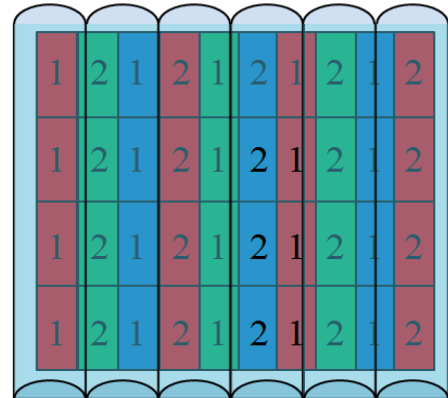


Fig. 4. Schematic structure of the pixel with the lenticular lens array in a 2-view 3D panel.

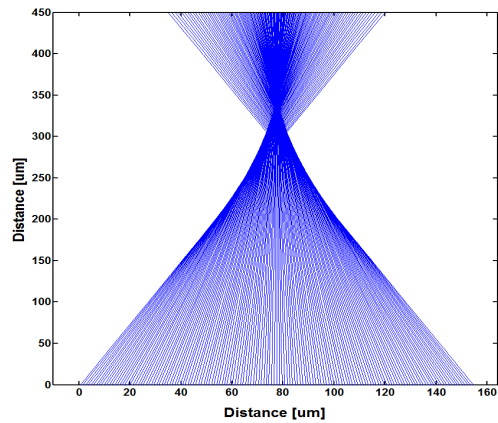


Fig. 5. Results of the ray-tracing for the single lens. The focal length is well coincided with that obtained using the geometrical optics.

서의 조도 분포를 확인하였다.

그림 6에는 본 연구에서 제시한 해석 방법을 적용하여 계산된 단일 렌즈의 광추적 결과를 바탕으로 패널의 수평 방향으로 확장시킨 최적 시청거리에서의 조도 분포를 나타내었다. 패널의 가운데를 기준으로 각 영상이 겹치는 부분 없이 교대로 나타났으며, 이는 렌즈 제작 시 발생할 수 있는 오차들이 고려되지 않았기 때문에 영상간의 혼선이 되는 부분이 0으로 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한, 초점 거리와 최적 시청거리, 눈간 거리를 바탕으로 계산된 결과와 동일하게 각 영상들은 눈간 거리 $65\ \text{mm}$ 의 간격으로 떨어져 있음을 확인할 수 있다.

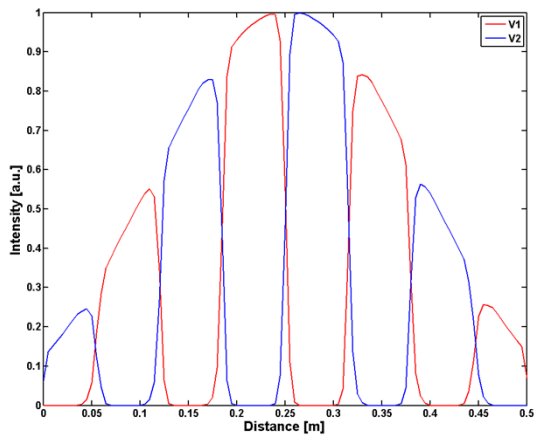


Fig. 6. Light intensity at an optimum viewing distance by expanding the results of the single lens to the horizontal plane of the display panel.

그림 5와 6을 통하여, 본 연구에서 제시한 렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 해석방법이 고전적인 기하광학적 계산 결과와 일치함을 확인할 수 있으며, 렌즈 제작 시 발생할 수 있는 오차들을 고려할 경우, 렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 3차원 영상 구현 여부와 실제적인 영상의 품질에 대해서도 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기하광학적 방법과 수학적 기법을 적용한 렌티큘러 렌즈 기반의 3차원 디스플레이 장치의 광학적 해석 방법을 제시하였다. 시뮬레이션에는 렌티큘러 렌즈 기반 4.5" HD RGB stripe wide 패널을 이용하였으며, 패널의 변수들을 이용하여 렌티큘러 렌즈의 특성값을 계산하였다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 단일 렌즈의 광추적 결과를 얻고, 이를 바탕으로 패널 수평면으로 확장하여 최적 시청거리에서의 조도 분포를 확인하였다. 마지막으로 시뮬레이션 결과와 기하광학적으로 계산된 렌즈의 특성을 바탕으로 본 연구에서 제시한 해석 방법의 타당성을 확인하였다.

렌티큘러 렌즈 시트의 해석을 위해, 단일 렌즈의 해석을 먼저 수행하고, 그 결과를 패널 전체에 확장하는 방향으로 연구를 수행하였으며, 렌즈의 특성은 패널을 결정한 뒤 기하광학적으로 계산하여 그 값을

적용하였다. 패널에서 출발한 입사광은 렌즈 바닥에서 굴절을 일으키게 되고, 이때의 굴절각은 일반적인 Snell의 법칙을 이용하여 계산하였다. 렌즈를 통과하는 빛에 대해, 렌즈 경계면에서 투과하는 방향을 결정하기 위해 Snell의 법칙을 벡터 형태로 변형하여 적용하였으며, 렌즈 경계면에서의 투과점을 찾기 위하여 렌즈 경계면의 방정식과 렌즈 바닥에서 경계면까지 빛의 이동 거리를 이용하여 투과점을 계산하였다. 최종적으로 각 데이터들을 벡터 형태로 변형시킨 Snell의 법칙에 대입하여 렌티큘러 렌즈를 투과하는 빛의 투과 방향을 결정하였다.

단일 렌즈의 광추적 시뮬레이션 결과와 기하광학적으로 계산된 렌즈의 특성값을 비교한 결과, 초점거리가 일치함을 확인하였고, 광추적 결과를 바탕으로 패널 수평면으로 확장하여 최적 시청거리에서의 조도 분포를 계산하였다. 그 결과, 렌즈 제작 시 발생할 수 있는 오차를 고려하지 않았을 경우, 각 영상은 혼선 없이 분리되며, 패널 중앙에서부터 좌, 우로 각 영상이 순간 거리만큼 벌어져서 교대로 분포함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 해석 방법을 이용하면, 패널의 종류, 픽셀의 배치, 모양에 관계없이 렌티큘러 렌즈 기반 3차원 디스플레이 장치의 해석이 가능하며, 렌즈 자체의 해석만이 아닌, 패널을 고려한 해석이 가능하므로, 부가적인 상용 시뮬레이터 사용의 번거로움을 해소할 수 있으며, 결과를 바탕으로 패널에 적용될 렌티큘러 렌즈의 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- [1] P. D. Lin and C. Y. Tsai, *J. Opt. Soc. Am.*, **174** (2012).
- [2] A. Miks and P. Novak, *J. Opt. Soc. Am.*, 1356 (2012).
- [3] P. D. Lin and C. Y. Tsai, *J. Opt. Soc. Am.*, 1358 (2012).
- [4] C. V. Berkel, A. R. Franklin, and J. R. Mansell, *Design and Applications of Multiview 3D-LCD*, Proc. SID Euro. Display 96, 109 (1996).