

다구찌 실험계획법을 이용한 액정 전계 프레넬 렌즈의 최적 설계

김봉식¹, 김종운¹, 박우상^{1,a}

¹ 인하대학교 전자공학과

Optimal Design of Electric Field Driven Liquid Crystal Fresnel Lens Using Taguchi's Method

Bong-Sik Kim¹, Jong-Woon Kim¹, and Woo-Sang Park^{1,a}

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

(Received December 7, 2011; Revised December 26, 2011; Accepted February 24, 2012)

Abstract: A rigorous electro-optical simulation and ray tracing for an electric field driven liquid crystal Fresnel lens was proposed to obtain design parameters of the electrode pattern of the Fresnel lens. The optimal design was carried out using Taguchi's experimental method for 17.1"(368×229.5 mm) wide LCD panels with 9 views. For the calculation of the distribution of liquid crystal molecules and the optical transmission of the panel, finite difference method and extended Jones matrix method were used to deal effectively with highly nonlinear and complicated motional equations of the liquid crystal molecules and to obtain the oblique transmission characteristics of the LCD panel. As simulation results, the optimal lengths of the 3 electrodes of the Fresnel lens are 4.0 μm , 30 μm and 83 μm , respectively, and the locations of the second and third electrodes are 32.9-33.0 μm and 45.9-46.0 μm , respectively. The optimal applied voltage of the 3 electrodes are found to be 5.75 V, 7.80 V and 11.9 V, respectively.

Keywords: 3D display, ELC lens, Fresnel lens, Taguchi's method

1. 서 론

평판 디스플레이 기술은 꾸준한 발전을 거듭하여 현재, 핸드폰이나 TV, 노트북 등의 매체에 3차원 영상을 표현하기에 이르렀다. 3차원 디스플레이 장치에는 안경식, 무안경식 방법이 있으며, 안경방식 3차원 디스플레이 장치에는 수동방식, 능동방식의 두 가지 종류가 존재한다. 현재의 대부분의 3차원 디스플레이 장치의 경우 안경방식을 이용하고 있으며, 3차원 영상을 시청할 경우에는 수동방식의 셔터글라스 또는 능동방식의 편광필름 글라스를 착용하고 2차원 영상은 안경을 벗고 시청이 가능하다.

무안경식 3차원 디스플레이 장치는 배리어 방식과 렌티큘러 방식이 대표적이며, 배리어 방식의 경우에는 디스플레이 표면에 부착된 얇은 가림막을 이용하여 양안에 들어갈 영상을 분리하고, 렌티큘러 렌즈 방식은 디스플레이 표면에 부착된 렌즈를 이용하여 영상을 분리시킨다. 3차원 디스플레이 장치의 개발로 인체의 내부에 관한 보다 정확한 정보가 필요한 의학 분야나 입체감이 필요한 각종 디자인, 설계분야에 대한 적용에 관심이 집중되고 있다. 하지만 대부분의 영상이 2차원으로 제공되기 때문에 2차원/3차원 영상 전환 기술의 필요성이 부각되고 있다.

본 연구에서는 무안경식 3차원 디스플레이 장치의 렌티큘러 렌즈를 대체할 수 있으며, 2차원/3차원 영상의 전환이 가능한 액정 전계 프레넬 렌즈를 다구찌

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

방법을 적용하여 최적 설계하였으며, EJMM (extended Jones matrix method)을 이용하여 기존의 해석방법 보다 실제적으로 렌즈를 해석하였다. 나아가 최적 시정거리에서의 조도를 계산함으로써 3차원 영상의 구현 여부를 확인하였다 [1].

2. 실험 방법

본 연구에서는 액정의 동적 분자배열 분포를 얻기 위하여 de Gennes의 order tensor와 Erickson-Leslie 운동방정식을 적용하고, 수치해석적 방법으로는 복잡한 비선형 방정식에도 비교적 적용이 쉬운 유한차분법 (finite difference method, FDM)을 적용한다 [2-4].

액정 전계 렌즈의 해석을 위한 LCD (liquid crystal display) 패널과 렌즈의 특성을 표 1에 나타내었다. 액정 전계 렌즈의 시뮬레이션에 앞서, 렌즈의 물성값들을 계산한다. 화상의 크기와 최적 시정거리, 눈간거리 값을 이용하여 그림 1에 나타낸 평행광선법으로 렌즈의 초점거리, 렌즈와 패널 사이 간격을 계산한다. 그리고 영상의 개수와 계산된 초점거리를 이용하여 렌즈의 크기를 계산한다. 그림 2에 나타내었듯이 최적 시정거리에서 각각의 영상들이 동일한 위치에 확대되어 시청자가 정확히 분리된 영상을 느낄 수 있도록 렌즈 크기를 계산한다.

앞서 계산된 렌즈의 물성값으로 액정 전계 렌즈를 최적화하기 위해 다구찌 방법을 이용하여 시뮬레이션을 설계한다. 다구찌 방법으로 제어하기 어려운 기계적 오차 등의 잡음 인자들로 인하여 중요한 요인들이 데이터에 끼치는 정도를 객관적이고 계량적으로 평가하며, 망소 특성을 다룬다. SNR (signal to noise ratio)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$n_i = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \tag{1}$$

위 식에서 n_i 는 실험 횟수이며, y_i 는 i 번째 특성값을 나타낸다. 이때, 망소특성에서 손실함수 $L(y)$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} y^2 \tag{2}$$

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°

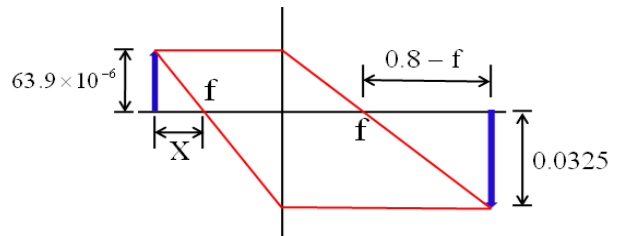


Fig. 1. The focal length and the distance between the panel and the lens.

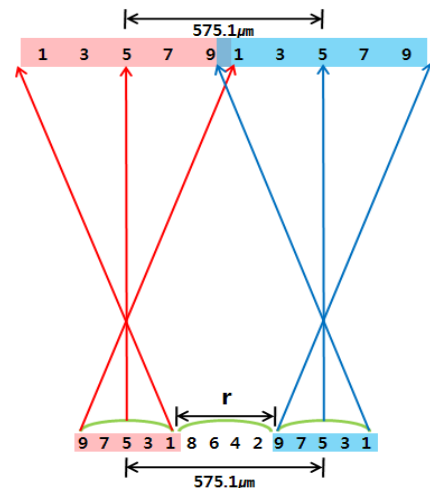


Fig. 2. Design of lens pitch of fresnel lens.

여기서 A 는 소비자 손실이고, Δ 는 소비자허용한 계이다. 다구찌 실험계획법에 의한 실험을 설계하기 위해서는 실험의 목적에 따른 특성치를 먼저 선정해

Table 2. Factor and factor levels used in the experiment.

Factor	Factor Level		
	0	1	2
A 1st Electrode Voltage	5.7	5.75	×
B 2nd Electrode Voltage	7.7	7.75	7.8
C 3rd Electrode Voltage	11.8	11.9	12.1
D 1st Electrode Length	4	5	6
E 2nd Electrode Length	33	35	37
F 3rd Electrode Length	83	84	85
G 2nd Electrode Position	32.6~32.7	32.9~33.0	33.1~33.2
H 3rd Electrode Position	45.9~46.0	46.4~46.5	46.9~47.0

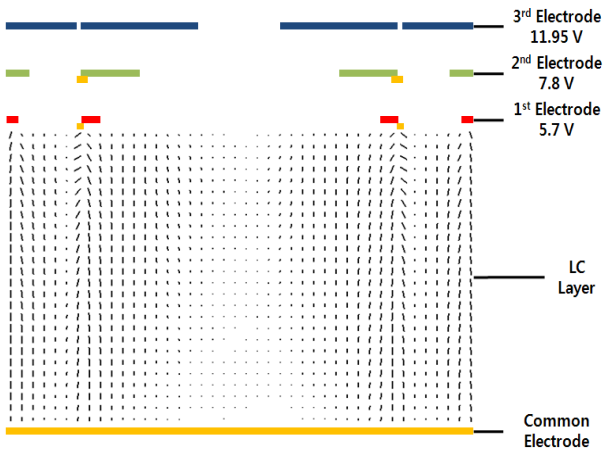


Fig. 3. Electrode structure and liquid crystal distribution of ELC lens.

야 한다. 본 연구에서는 최적 시청 거리에서 각 영상이 섞이지 않고 정확히 분리되는 정도를 평가하는 CR (cross-talk ratio)을 특성치로 정하였기 때문에 CR을 정의하는 기준이 필요하다. CR은 다음의 식으로 계산한다 [6].

$$CR = \frac{I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

위 식의 I_{\max} , I_{\min} 은 각각 조도의 최댓값과 최솟값

을 의미한다. 주로 액정 전계 프레넬 렌즈의 설계인자는 조절이 용이하고, 재현성이 있는 전극의 전압 범위, 전극의 간격 그리고 각 전극의 길이로 선정하였으며, 각 인자에 대한 수준은 3수준을 선택하여 실험을 계획하였다. 표 2는 인자에 대한 각각의 수준 값을 보여주고 있다. 설계인자의 단위는 전압의 경우 volt를 사용하고 전극의 길이와 위치의 경우 μm 를 사용하였다.

그림 3은 본 연구에서 사용한 액정 전계 프레넬 렌즈의 구조와 전압이 인가되었을 때 액정의 분포를 시뮬레이션한 결과이다. 렌즈는 세 쌍의 화소 전극과 하나의 공통전극으로 구성되며, 액정의 초기 프리틸트 각도는 2° , 러빙은 편광자의 투과축과 같은 방향을 같도록 하였다. 렌즈의 특성을 갖기 위해서는 액정 전계 렌즈의 중심 부분에서 큰 위상 지연 값을 가져야 하므로 액정 전계 렌즈의 가장자리 부분으로 갈수록 액정이 90° 에 가깝게 일어서도록, 가장자리 부분으로 갈수록 높은 수직 전계가 형성되게 전극의 위치와 길이를 설계하고 전압을 인가하였다. 액정 분포를 통하여 액정이 중심부에서 가장자리 부분으로 갈수록 수직 방향으로 거동하는 것을 확인할 수 있으며, 횡전계의 영향으로 액정이 수평 방향으로도 거동하게 되는 것을 볼 수 있는데, 이로 인하여 렌즈의 특성이 저하된다.

이상적인 액정 전계 렌즈의 경우, 액정이 수직 방향으로만 거동하여 왜곡되는 부분이 존재하지 않아야 하지만 액정 전계 렌즈의 화소 전극간의 전압차로 인하여 횡전계가 일부 발생하게 되고 이에 따라 액정의 왜곡이 발생한다. 즉, 액정 전계 렌즈의 전극 구조가 복잡해질수록 액정의 수직 방향 거동만을 고려하는 기존의 해석방법으로는 정확한 해석이 불가능하며, 시뮬레이션 결과와 실험값 사이에 큰 오차가 발생하게 된다.

본 연구에서는 액정의 왜곡까지 모두 고려한 보다 실제적인 액정 전계 프레넬 렌즈의 광학적 해석을 위하여 아래에 나타낸 EJMM 을 이용한다 [7].

$$\begin{bmatrix} A'_s \\ A'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{os} & t_{es} \\ t_{op} & t_{ep} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-ik_{oz}d) & 0 \\ 0 & \exp(-ik_{ez}d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{so} & t_{po} \\ t_{se} & t_{pe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ A_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때,

$$\begin{aligned} t_{so} &= t_{os} = \hat{s} \cdot \hat{o}t_s, & t_{se} &= t_{es} = \hat{s} \cdot \hat{e}t_s \\ t_{po} &= t_{op} = \hat{p} \cdot \hat{o}t_p, & t_{pe} &= t_{ep} = \hat{p} \cdot \hat{e}t_p \end{aligned} \quad (5)$$

Table 3. Applied voltages and LC parameters.

Parameters	Values
Voltage(1st Electrode)	5.75 v
Voltage(2nd Electrode)	7.8 v
Voltage(3rd Electrode)	11.95 v
Cell gap	18.7 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

이며, $\hat{p}, \hat{o}, \hat{e}, \hat{s}$ 는 각각 p, o, e, s 과의 방향을 나타내는 단위벡터를 의미하며, t_s, t_p 는 s, p 과의 투과율을 의미한다.

본 연구에서는 액정 층을 통과한 빛의 절대적인 위상 지연 값이 필요하기 때문에 기존 EJMM의 k_{ez} 와 k_{oz} 값을 다음과 같이 변환하여 사용한다.

$$\begin{aligned}
 k_{ez} &\rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} n_e(\theta) d \cos^{-1}(\theta) \\
 k_{oz} &\rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} n_o d \cos^{-1}(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 다구찌 방법과 변형한 EJMM을 이용하여 액정 전계 프레넬 렌즈의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 17.1" (368×229.5 mm) wide LCD 패널에 9 view 입체 영상을 적용하여 수행하였다.

표 3은 시뮬레이션에 적용된 액정 전계 프레넬 렌즈의 물성치를 나타낸다. 각 전극에 인가된 전압은 5.75 V, 7.8 V, 11.95 V 이다. 그리고 사용된 액정은 splay 변형 관련 탄성계수 K_{11} = 6.4 pN, twist 변형 관련 탄성계수 K_{22} = 3 pN, bend 변형 관련 탄성계수 K_{33} = 10 pN, 액정 분자의 수평 방향 유전율 $\epsilon_{||}$ = 19.7, 액정 분자의 수직방향 유전율 ϵ_{\perp} = 6.7, 액정 분자의 이상과 굴절률 n_e = 1.736, 액정 분자의 정상과 굴절률 n_o = 1.5442 의 물성치를 갖는다.

Table 4. Conditions of the experiments and measurement data.

No.	Conditions								CR	SNR
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.072	0.601
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1.137	1.113
3	0	0	2	2	2	2	2	2	1.201	1.590
4	0	1	0	0	1	1	0	2	1.255	1.176
5	0	1	1	1	2	2	1	0	1.032	0.276
6	0	1	2	2	0	0	1	1	1.120	0.983
7	0	2	0	0	0	2	2	2	1.136	1.104
8	0	2	1	1	1	0	0	0	1.075	0.631
9	0	2	2	2	2	1	1	1	1.132	1.073
10	1	0	0	2	2	1	2	0	1.143	1.163
11	1	0	1	0	0	2	0	1	1.223	1.746
12	1	0	2	1	1	0	2	2	1.054	0.454
13	1	1	0	1	2	0	0	1	1.191	1.521
14	1	1	1	2	0	1	1	2	1.122	0.999
15	1	1	2	0	1	2	0	0	0.991	0.078
16	1	2	0	2	1	2	1	1	1.087	0.722
17	1	2	1	0	2	0	1	2	1.092	0.761
18	1	2	2	1	0	1	2	0	1.106	0.873

Table 5. Conditions of the experiments and measurement data.

No.	Conditions								CR	SNR
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	5.845	15.336
2	0	0	1	1	1	1	1	1	6.656	16.464
3	0	0	2	2	2	2	2	2	7.606	17.623
4	0	1	0	0	1	1	0	2	6.350	16.055
5	0	1	1	1	2	2	1	0	6.668	16.480
6	0	1	2	2	0	0	1	1	7.242	17.197
7	0	2	0	0	0	2	2	2	6.096	15.700
8	0	2	1	1	1	0	0	0	6.537	16.308
9	0	2	2	2	2	1	1	1	7.346	17.321
10	1	0	0	2	2	1	2	0	7.398	17.382
11	1	0	1	0	0	2	0	1	6.074	15.669
12	1	0	2	1	1	0	2	2	6.896	16.772
13	1	1	0	1	2	0	0	1	6.895	16.771
14	1	1	1	2	0	1	1	2	7.191	17.136
15	1	1	2	0	1	2	0	0	6.054	15.641
16	1	2	0	2	1	2	1	1	7.385	17.367
17	1	2	1	0	2	0	1	2	6.134	15.754
18	1	2	2	1	0	1	2	0	6.515	16.279

표 4는 3 수준계 8인자 실험을 실시하기 위하여 L18(21×37)형 직교배열표를 이용한 액정 전계 프레넬 렌즈의 반복 실험값과 기존 해석방법으로 망소특성에 의하여 각 실험 번호별로 구해진 CR과 SNR의 값을 보여주고 있다.

표 5는 3 수준계 8인자 실험을 실시하기 위하여 L18(21×37)형 직교배열표를 이용한 액정전계 프레넬

Table 6. Conditions of the ELC fresnel lens.

Conditions	Values
1st Electrode Voltage	5.75 V
2nd Electrode Voltage	7.80 V
3th Electrode Voltage	11.95 V
1st Electrode Length	4.0 μm
2nd Electrode Length	30 μm
3th Electrode Length	82 μm
2nd Electrode Position	32.6-32.7 μm
3th Electrode Position	45.9-46.0 μm

Table 7. Optimum values of the design parameters.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Optimum Values	5.75	7.8	11.9	4	30	82	32.6	46

Table 8. Cross-talk ratio and SN ratios for the optimal design.

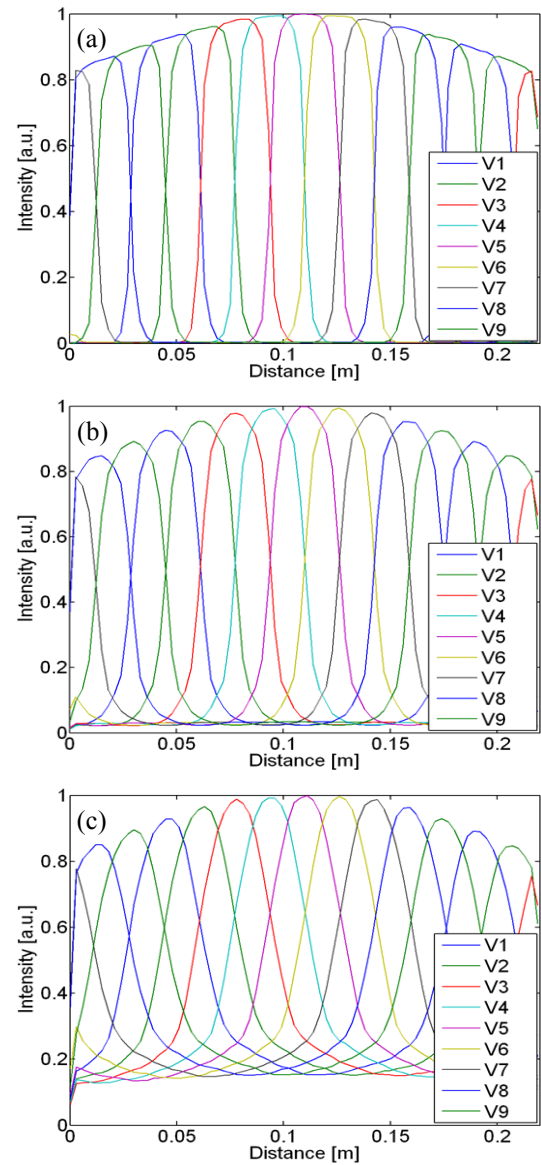
Conventional Method		Novel Method	
CR	SNR	CR	SNR
1.0118%	0.1015 dB	5.5772%	14.9283 dB

렌즈의 반복 실험값과 EJMM을 이용한 해석방법으로 망소특성에 의하여 각 실험 번호별로 구해진 CR과 SNR의 값을 보여주고 있다.

표 4와 5를 통해서 기존의 해석방법과 EJMM을 이용한 해석방법을 통해서 얻어진 CR과 SNR의 각 인자별 수준 값을 비교하면 각각의 경우에 따라 인자의 수준이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 두 직교배열 표에 사용되어진 CR의 단위는 %값을 사용하였고 SNR의 단위는 db값을 사용하였다.

표 6은 EJMM을 이용한 해석방법에서 직교배열 표에 실험 배치한 인자와 인자수준 SNR의 수준별 인자의 평균값을 정리하여 최적의 설계조건을 나타냈다.

표 7은 다구찌 실험 계획법을 이용하여 계산된 최적 설계조건을 의미하며, 표 8은 최적 설계조건으로 설계된 액정 전계 프레넬 렌즈의 시뮬레이션 결과에서 얻은 CR값과 SNR값의 결과이다. 분산 및 표준편차가 각 단계의 실험을 통해 가장 적은 단계에서 최종선택을 하였다. 표 8로부터 본 연구에서 제안한

**Fig. 4.** Intensity of each view at optimized distance for (a) ideal lens, (b) ELC lens using conventional method and (c) novel method.

새로운 해석방법을 적용할 경우 CR이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 4는 9 view 입체영상에서 액정 전계 프레넬 렌즈를 사용했을 때 최적 시정거리 80 cm에서의 영상별 상대 조도이다. (a)는 이상적인 렌즈를 사용하여 해석한 결과이며, (b)는 액정 전계 프레넬 렌즈에 기존의 해석법을 적용한 결과이고, (c)는 액정 전계 프레넬 렌즈에 새로운 해석법을 적용한 결과이다. 두

경우 모두 최적 시청거리에서 영상에 따라 조도가 분포 되었으나, 영상별 노이즈를 나타내는 CR에서는 큰 차이를 보였다.

그림 4(a)의 이상적인 렌즈를 사용한 경우에는 0%에 근접하였으며, (b)의 액정전계 프레넬 렌즈를 사용하고 기존의 해석방법을 적용한 경우엔 1.01%, (c)의 액정전계 프레넬 렌즈를 사용하고 새로운 해석방법을 적용한 경우엔 5.58%로 새로운 해석방법으로 액정전계 렌즈를 해석했을 때 CR이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 액정전계 렌즈의 새로운 해석방법으로 해석할 경우 액정의 왜곡을 고려하기 때문에 기존의 방법보다 빛이 더욱 분산되어 영상별로 분리시키는 능력이 떨어지기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 액정의 왜곡을 고려한 액정전계 프레넬 렌즈의 전극 구조 및 해석 방법을 제시하였으며, 광추적 시뮬레이션을 통해 기존의 액정전계 렌즈의 해석 방법과 결과를 대조 하였다. 그리고 17.1"(368×229.5 mm) wide LCD 패널에 9 view 입체 영상을 적용하여 액정전계 프레넬 렌즈를 설계하였다. 렌즈의 전극 구조를 설계할 때 다구찌 실험계획법을 이용하여 최소한의 전극으로 최소의 CR값을 가지도록 인자와 인자수준의 값을 선정하였고, 렌즈의 최적 설계조건을 구하였다. 그 결과 첫 번째 전극 전압은 5.75 V, 두 번째 전극 전압은 7.80 V, 세 번째 전극 전압은 11.9 V이고, 전극의 길이는 각각 4.0 μm , 30 μm , 83 μm 이며 두 번째 전극의 위치는 32.9-33.0 μm , 세 번째 전극의 위치는 45.9-46.0 μm 에서 최적임이 확인되었다.

렌즈의 광학적 시뮬레이션을 위하여 EJMM을 수정하여 절대적인 위상지연 값을 계산하였으며, 시뮬레이션을 통하여 최적 시청거리 80 cm에서 시청 위치에 따라 각각의 영상별로 분리되어 분포가 이루어지는

것을 확인하였고, CR 계산을 통해 액정전계 프레넬 렌즈의 해석방법에 따른 노이즈의 비율을 계산하였다. 기존의 해석방법을 사용한 경우엔 1.01%, 새로운 해석방법을 사용한 경우엔 5.58%로 새로운 해석방법을 적용한 경우의 CR이 기존의 해석방법을 적용한 경우와 다섯 배 이상의 차이를 보임을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 액정전계 프레넬 렌즈의 최적 설계 방법과 해석 방법을 이용하면, 액정의 왜곡 현상을 고려한 액정 렌즈의 전기 광학적 특성 해석이 가능하므로 보다 실제적인 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 이상적인 액정전계 렌즈에 보다 근접한 렌즈 설계가 가능할 것으로 생각된다.

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] J. E. Anderson, P. Watson, and P. J. Bos, *Shortcomings of Q Tensor Method for Modeling Liquid-Crystal Devices*, SID '99, 198 (1999).
- [3] S. Dickmann, J. Eschler, O. Cossalter, and D. A. Mlynski, *Simulation of LCDs Including Elastic Anisotropy and Inhomogeneous Fields*, SID '93, 638 (1993).
- [4] D. W. Berreman, *Optics in Stratified and Anisotropic Media : 4×4 Matrix Formulation*, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 502 (1972).
- [5] G. Taguchi, (Edited by Don Clausing Technical editor for the English edition), *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs* (UNIPUB, Kraus International Publications, 1987).
- [6] G. Woodgate, J. Harrold, A. Jacobs, and D. Ezra, *Proc. of SPIE*, **3957**, 153 (2000).
- [7] Pochi Yeh, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 507 (1982).