

## 실험계획법을 이용한 시야각 변환 디스플레이의 최적 설계

박기종, 김태현, 박우상 

인하대학교 전자공학과

### Optimized Design of Variable Viewing Angle Display Using Design of Experiment

Ki-Jong Park, Tae-Hyeon Kim, and Woo-Sang Park

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

(Received December 11, 2018; Revised December 27, 2018; Accepted December 28, 2018)

**Abstract:** Non-emissive LCDs need a backlight, and have difficulty implementing wide viewing angles due to differences in phase retardation depending on the behavior of the liquid crystals. Although wide viewing angles are good characteristics for devices such as TVs, they are not good for mobile devices. In this paper, we propose ways to design diffusers with ELC lenses to achieve wide and narrow viewing angles depending on the circumstances. A study was conducted on optimizing the design of a liquid lens diffuser with the same light as that for an OLED, by extracting design factors that affect the performance of the diffuser and applying the Taguchi method to them.

**Keywords:** Taguchi method, Electric-field-driven liquid crystal, Liquid crystal

#### 1. 서론

LCD (liquid crystal display)는 OLED (organic light emitting diode)에 비해 긴 수명, 낮은 소비전력, 높은 해상도, 낮은 가격과 같은 장점을 갖는다. 하지만 자발광하는 OLED와 달리 LCD는 백라이트가 필요하고 액정의 거동상태에 따라 굴절률이 달라져 위상 지연(phase retardation)의 차이가 생기게 되어 광시야각을 구현하는 데 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 내부적으로는 멀티도메인을 사용하여 위치별 위상 지연의 차이를 줄이는 방법을 사용하고, 외부적으로는 이방성 광학필름을 사용해 충분치 못한 위상지연을 보상해 주는 방법을 사용하여 넓은 시야각을 갖게 해준다. 넓은 시야각은 TV나 모니터와 같은 여러 명의 사

용자가 사용하는 기기에서는 적합하지만, 한 명의 사용자가 사용하는 모바일 기기에서는 적합하지 않다. 공공 장소에서 모바일 기기를 사용하는 경우에 나타나는 이용자의 사생활 보호 문제를 해결하기 위해서, 기존에는 필름을 부착하여 이용자 외에는 화면을 볼 수 없게 시야각이나 밝기를 조절하는 방법을 사용해 왔다. 하지만 이와 같은 경우에는 이용자에게도 화면의 밝기가 떨어진다는 점과 탈부착의 불편함이라는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 전기적으로 on/off가 가능한 ELC (electric field driven liquid crystal) 렌즈 [1]로 구성된 디퓨저(diffuser)를 LCD 전면부에 부착하여 상황에 따라 시야각을 조절할 수 있는 방법을 제안한다. QCBL (quasi collimated backlight) [2]을 사용하며, ELC 렌즈를 on/off함에 따라 액정의 거동이 다르게 일어나고, 이는 좁은 시야각과 넓은 시야각을 갖게 한다. 설계된 ELC 렌즈의 액정 방향자는 Erickson-Leslie motional equation으로부터 계산하고, 이를 통해 디퓨저의 위상지연을 얻는다. 디퓨저를 통과한 빛은 광선 추적을 통해 계산하고,

✉ Woo-Sang Park; [wspark@inha.ac.kr](mailto:wspark@inha.ac.kr)

이를 통해 광시야각 모드와 협시야각 모드에서의 빛의 분포를 나타낸다. 이러한 빛의 분포를 일반적인 IPS LCD, OLED와 비교하여 타당성을 검증한다. 그리고 실험에 유의한 설계인자를 도출하고, 도출한 설계인자를 다구찌 방법 [4]에 적용하여 성능의 최적화를 진행한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 액정 전계 렌즈

그림 1은 본 논문에서 제시하는 ELC 렌즈 디퓨저층을 이용한 시야각 변환 LCD 시스템의 개략도이다. 그림 1의 (a)는 전계를 off했을 때를 나타낸다. 이와 같은 경우 협시야각을 갖는 QCBL에서 나오는 빛은 액정층을 그대로 통과해 파면의 변화 없이 나오게 된다. 그로 인해 협시야각 분포를 나타내게 된다. 그림 1의 (b)는 전계를 on했을 때를 나타낸다. 이와 같은 경우 위치에 따라 액정의 복굴절률이 달라져 다른 위상지연 차이를 겪게 되고, 파면이 변형되어 렌즈와 같은 구면파를 만든다. 이러한 구면파는 빛이 진행함에 따라 광시야각 분포를 나타내게 된다. 이처럼 기존 QCBL과 diffusing film을 사용해 광시야각의 LCD를 구현했던 것을 ELC 렌즈를 사용하게 되면 전계를 on/off 함으로써 협시야각과 광시야각을 구현할 수 있다.

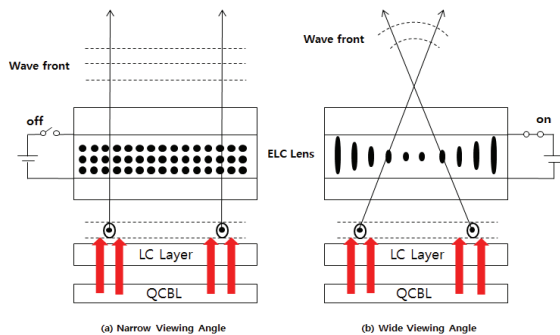


Fig. 1. Schematic diagram for narrow viewing angle and wide viewing angle.

### 2.2 Diffuser의 최적 설계

본 연구에서 제안하는 ELC 렌즈 디퓨저는 그림 2와 같이 한 개의 공통전극과 두 개의 화소전극으로 구성



Fig. 2. The structure of ELC lens.

된다. LC층을 지나온 QCBL 빛이 ELC 렌즈를 지날 때, 그 파면이 구면파를 이루게 하기 위해서는 가장자리에서의 가장 강한 전기장 형성이 필요하고 중심부로 갈수록 약한 전기장이 필요하기 때문에 첫 번째 전극은 양 끝부분에 짧은 길이로 배치하고, 두 번째 전극은 그 상단에 위치한다. 굴절률이 클수록 빛의 속도는 느려지기 때문에 빛이 빠르게 진행해야 하는 가장자리에서는 작은 굴절률을 갖고 중심부로 갈수록 빛의 속도가 느리게 진행해야 하므로 큰 굴절률을 갖게 하면 구면파와 같은 파면을 얻을 수 있다. 이를 위해 가장자리에서는 약 90° 정도의 액정의 기울임(tilt)이 필요하며, 중앙 부분에서 가장자리로 갈수록 강한 전기장이 걸리도록 전극의 길이와 위치를 설계한다.

본 논문에서는 OLED TV의 시야각 분포를 기준으로 설계하였다. 굴절률이 고정되어 있는 PMMA나 유리와 같은 diffusing unit을 사용하는 diffusing layer를 이상적인 기준으로 동일한 위상지연을 갖는 ELC diffuser를 구현한다. 이상적인 디퓨저층에서의 diffusing unit은 ray tracing과 energy conservative mapping을 통해 원하는 출력 분포를 갖도록 아래의 식을 이용하여 설계한다 [3].

$$\iint T(r,z)E(r,z)ds = \iint I(\theta,\phi)d\Omega \quad (1)$$

$$I(\theta,\phi) = I_0 \cos\theta \quad (2)$$

$E$ 는 diffusing unit 표면 위에  $x,y,z$ 에서의 입사광의 illuminance이고,  $T$ 는 공기-디퓨저, 디퓨저-공기, 두 계면을 지날 때의 투과율이다.  $T$ 는 경사각과 방위각에 따른 빛의 세기로서 OLED TV의 경우 일반적으로 식 (2)와 같은 형태이다. 이를 스넬의 법칙에 적용하여

계산하면 이상적인 diffusing unit의 위치 r에 대한 높이 z 값, 즉 모양을 구할 수 있다. 이를 위치별 위상지연으로 나타내고 이를 기준으로 ELC 기반의 diffuser의 전극구조와 인가되는 전압을 결정한다. 이상적인 diffusing unit과 ELC 기반의 디퓨저의 위상지연은 아래의 식 (3)을 통해 나타낼 수 있다.

$$\Delta nd(r) = (n_{diffuser} - n_i)d(r) = [((n_o^2 n_c^2) / (n_c^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta))^{-0.5} - n_o]d_{LC} \quad (3)$$

$n_{diffuser}$ 는 diffusing unit의 굴절률,  $n_i$ 는 입사면의 굴절률이다. 두 굴절률 차이에 의한 위치별 위상지연의 차이로 인하여 출력광의 파면 변화로 빛이 분산된다. 액정에서도 같은 효과를 주기 위해 전기장으로부터 야기되는 액정 방향자 경사각  $\theta$ 의 변화로 액정의 실효굴절률이 변화하고 o굴절률과의 위상지연을 발생시켜 빛을 분산시킨다.

본 연구에서 사용된 LCD의 LC panel은 IPS 모드의 해상도는  $2,960 \times 1,440$ , 픽셀의 사이즈는  $37 \mu m$ 이다. 서로 다른 픽셀에서 나온 빛이 겹쳐져서 발생하는 cross talk를 최소화하기 위해 디퓨저의 사이즈도 픽셀의 사이즈와 같이  $37 \mu m$ 로 설계하였다.

본 연구에서 사용된 액정의 주요 물성치는  $K_{11} = 20.1 pN$ ,  $K_{33} = 32.1 pN$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 25.6$ ,  $\epsilon_{\perp} = 5$ ,  $\Delta n = 0.42$ 이다. 액정의  $\Delta n$ 이 클수록 필요한 파면의 왜곡을 만드는 데 필요한 액정층의 두께가 줄어들게 되므로  $\Delta n$ 이 큰 액정을 선택할 경우 더 얇은 액정 전계 렌즈를 구현할 수 있다.

식 (1)과 (2)를 통해 계산한 지름이  $37 \mu m$ 인 이상적인 diffusing unit의 두께는  $31 \mu m$ 이다. 이상적인 diffusing unit의 물질을 PMMA로 하여 굴절률 1.5을 가질 때 중앙의 최대 위상지연인  $\Delta nd = 15,500 nm$ 가 된다. ELC 디퓨저의 크기가 LCD 픽셀 크기와 같은  $37 \mu m$ 이기 때문에 액정의 복굴절  $\Delta n = 0.42$ 을 고려하여 최대 위상지연  $\Delta nd = 15,500 nm$ 을 갖기 위한 최소 셀 갭을 계산하면  $37 \mu m$ 이다. 하지만 본 연구에서의 실제 ELC 디퓨저의 셀 갭은 최소 두께  $37 \mu m$ 보다  $3 \mu m$  두껍게 설계하였다. 디퓨저 양끝에서 위상지연을 0으로 주기 위해서는 액정 방향자를 수직에 가깝게 거동시켜야 하고, 그러기 위해서는 강한 전압이 필요해서 전극 주변에도 강한 수평성분 전기장을 만들게 된다. 이는 디퓨저의 위상지연 분포가 이상적인 값과 큰 차이를 야기한다. 따라서 ELC 셀 갭을 증가시키면 높은 전압으로 디퓨저의 양끝에 위상지연을 낮추지 않더라도 중앙의

위상지연을 높여서 이상적인 디퓨징 유닛의 값과 일치시킬 수 있게 된다.

설계한 ELC 기반의 디퓨저에서의 광투과 특성 해석을 수행하기 위해 광선 추적과 호이겐스의 원리를 이용한다. 용이한 계산을 위해 ELC 디퓨저 액정층을 r축 방향으로  $1 \mu m$ , z축 방향으로  $0.1 \mu m$ 의 간격으로 각각의 액정의 실효굴절률을 갖는 격자를 만든다. 액정층 내부로 입사한 빛이 진행하며 굴절되는 방향을 스넬의 법칙으로 계산하고 각 방향에서 복굴절에 의한 위상지연을 계산하면 파면의 변화를 얻을 수 있다. 파면과 광선의 진행방향은 서로 수직하므로 계산한 파면에 수직한 광선을 표현하여 ELC 디퓨저에 대한 광선 추적을 수행할 수 있다.

### 2.3 다구찌 방법에 의한 설계인자와 인자 수준 설정

표 1과 같이 OLED나 램버시안과 같은 배광(light distribution)을 갖도록 하기 위해 6개의 주요 인자인 첫 번째 전극의 전압범위, 두 번째 전극의 전압범위, 첫 번째 전극의 길이, 두 번째 전극의 길이, 가장자리로부터 두 번째 전극의 위치, 두 전극 간의 거리를 제어인자로 선택하였다. 실험에서 선정된 설계인자는 6개이며, 2수준을 갖는 1개의 인자와 3수준을 갖는 5개의 인자를 사용해 혼합 직교배열표를 사용하였다. 인자별 교호작용은 고려하지 않았으며, 시뮬레이션 기법을 사용하는 것이므로 잡음인자의 평균조건을 기준으로 실험하였고, 인자에서는 제외하였다. 설계 인자들의 단위는 전압의 경우 볼트를 사용하고 길이, 거리 그리고 위치의 경우 마이크로미터를 사용한다.

설계인자 및 인자의 수준을 선정한 후에는 직교배열표를 선택해야 한다. 직교배열표는 선정된 설계인자를 배치하여 해석을 실시하고 각 설계 인자의 효과를 파악하는 데 사용하는 것으로 최소의 실험으로 최대의

**Table 1.** Factor and factor level.

Factor	Factor level		
	Level 1	Level 2	Level 3
A 1st electrode voltage	11	12	<del>X</del>
B 2nd electrode voltage	6	7	8
C 1st electrode length	7	8	9
D 2nd electrode length	3	5	7
E 2nd electrode position	0	1	2
F A distance between electrodes	132	138	144

**Table 2.** Orthogonal array table of  $L_{18}(2^1 \times 3^5)$ .

	A	B	C	D	E	F
1	11	6	7	3	0	132
2	11	6	8	5	1	138
3	11	6	9	7	2	144
4	11	7	7	3	1	138
5	11	7	8	5	2	144
6	11	7	9	7	0	132
7	11	8	7	5	0	144
8	11	8	8	7	1	132
9	11	8	9	3	2	138
10	12	6	7	7	2	138
11	12	6	8	3	0	144
12	12	6	9	5	1	132
13	12	7	7	5	2	132
14	12	7	8	7	0	138
15	12	7	9	3	1	144
16	12	8	7	7	1	144
17	12	8	8	3	2	132
18	12	8	9	5	0	138

효과를 얻을 수 있다. 설계 인자를 6인자 3수준으로 선정할 경우 각 인자 간 교호작용이 없다는 것을 가정 하에 최소한의 실험으로 각각의 인자를 배치할 수 있는 수준계를 직교배열표를 사용해 작성하는 데 실무에서는 2, 3, 4 수준들이 혼용되는 경우가 흔히 있고 다른 수준의 열들과 같이 혼합 직교배열표를 흔히 사용하게 된다. 직교배열표는 실험의 재현성과 최적 조건 선정 시 안정성을 보장한다는 장점을 가진다.

본 연구는 표 2와 같은  $L_{18}(2^1 \times 3^5)$ 의 혼합 직교배열표를 이용하여 인자를 배치하였다.

### 3. 결과 및 고찰

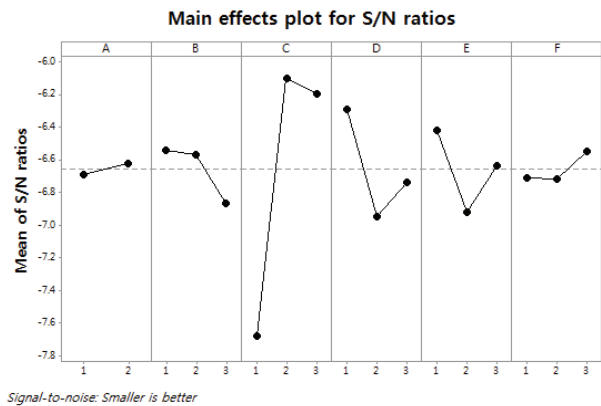
#### 3.1 시뮬레이션 결과

직교배열표를 이용한 1, 2차 시뮬레이션을 통해 인자의 수준 범위를 줄여나갔으며, 이를 바탕으로 본 논문의 인자들의 수준을 결정하였다.

OLED, 램버시안 광원과 같은 배광을 갖는 액정 전계 렌즈를 이용한 디퓨저를 만들기 위해 201개의 구간을 나누어 각 위치별 위상지연을 표준편차를 사용해 비교하였다. 비교 결과는 작으면 작을수록 좋으므로 대구찌 방법 중 망소특성을 사용해 실험을 진행하였다. 18번의 실험 시뮬레이션을 통해 특성치와 그에 따른

**Table 3.** Condition of experiment and measurement data.

No.	Condition of experiment						Standard deviation	S/N ratio
	A	B	C	D	E	F		
1	0	0	0	0	0	0	2.334	-7.362
2	0	0	1	1	1	1	2.153	-6.662
3	0	0	2	2	2	2	2.000	-6.024
4	0	1	0	0	1	1	2.351	-7.426
5	0	1	1	1	2	2	2.090	-6.403
6	0	1	2	2	0	0	1.986	-5.959
7	0	2	0	1	0	2	2.373	-7.506
8	0	2	1	2	1	0	2.259	-7.082
9	0	2	2	0	2	1	1.956	-5.829
10	1	0	0	2	2	1	2.468	-7.849
11	1	0	1	0	0	2	1.814	-5.174
12	1	0	2	1	1	0	2.035	-6.173
13	1	1	0	1	2	0	2.493	-7.935
14	1	1	1	2	0	1	1.886	-5.514
15	1	1	2	0	1	2	2.033	-6.163
16	1	2	0	2	1	2	2.516	-8.016
17	1	2	1	0	2	0	1.945	-5.778
18	1	2	2	1	0	1	2.243	-7.016



**Fig. 3.** Main effects plot of S/N ratio.

망소특성에서의 S/N비(signal-to-noise ratio)를 구했고 이와 같은 결과는 표 3에 정리하였다. 전체 실험 중 11번 실험에서의 실험이 표준편차가 가장 적게 발생했다. 이런 결과는 OLED, 램버시안 광원과 같은 배광과 가장 흡사한 결과라고 볼 수 있다. 그 외에 14번, 17번, 9번, 6번 실험에서의 설계안이 대체안으로 설계될 수 있으며, 가장 표준편차가 크게 발생한 것은 16번 실험으로 확인된다.

대구찌 방법을 적용하여 각 설계 인자의 수준에 따라 얻어진 S/N비를 그림 3에 나타내었다. 기여도가

가장 큰 인자는 C인자의 2수준, D인자의 0수준, E인자의 0수준으로 판정할 수 있다. A1, B0, C2, D0, E0, F2의 수준은 각 인자의 최적의 수준이 되며, 이러한 수준들의 조합은 최적의 결과를 가져온다.

### 3.2 다구찌 방법에 의한 최적 조건 도출

직교배열표에 실험 배치한 인자와 인자의 수준에 따라 실험을 시뮬레이션하였다. 그 결과와 S/N비를 각각 계산하여 앞 절의 표와 그림으로 정리하였다. 18번의 실험을 통한 결과는 볼 수 있지만 그것은 S/N비 분석을 통해 구한 최적의 조합은 아니다. 교호작용이 없다고 가정한다고 하면 각 인자들의 최적 수준 조합이 최적 조건이 된다. 이렇게 찾아낸 최적 설계 조합은 앞의 직교배열표 상의 실험 배치에서는 나타나지 않았던 인자수준의 조합으로, 직교배열표에 따라 실험한 후에 S/N비의 계산을 통하여 찾아낸 인자수준의 최적 조합이다. 이러한 방법을 이용하여 최소의 실험으로 최적의 조건을 찾아낼 수 있다. 시뮬레이션을 통해 각 인자의 S/N비의 수학적 통계를 통해 최적 조건을 결정하였다. 앞서 걸친 실험 결과를 통해 밝혀진 인자들의 최적 조건을 각각 정리해 보면 표 4와 같다.

각 실험에서 인자의 S/N비에 대한 분산분석으로부터 나온 인자의 효과를 분석하여 선정된 최적의 설계 조건으로 모델링하여 표준편차의 값이 감소해 성능이 개선되었는지를 검증하기 위한 해석을 실시하였다. 1, 2차 시뮬레이션의 최적 조건에서 발생한 표준편차의 값은 3.77이었으며, 최종적인 최적 조건에서의 표준편차인 1.83과 비교하였을 때, 2배 이상의 성능이 향상된 것을 볼 수 있다. 이렇게 얻어낸 인자의 조합은 직교배열표에 존재하지 않은 인자의 수준조합으로 직교배열표 상에서 실시한 실험들의 조합과 비교하였을 때, S/N비를 증가시켜 OLED와 같은 배광과의 차이를 나타내는 표준편차가 감소하는 조합임을 확인하였다.

**Table 4.** Optimum conditions of experiments.

Experiment	1st	2nd	3rd	Optimum
A	10	11.5	12	12
B	5	7	6	6
C	8	8	8	8
D	10	5	3	3
E	0	0	0	0
F	125	138	144	144

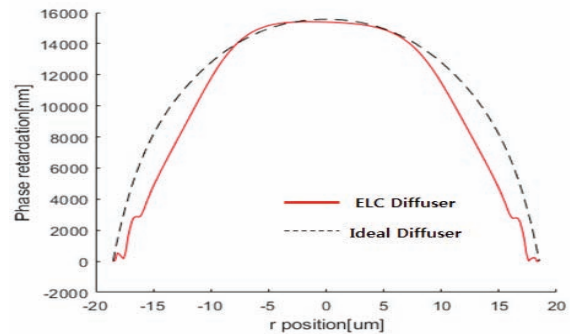
### 3.3 시뮬레이션 결과 분석

그림 4는 이상적인 디퓨저와 다구찌 방법을 통해 구해진 최적 조건에서의 ELC 디퓨저의 위치별 위상지연을 나타낸다. 이는 ELC 디퓨저의 전극구조와 전압 값으로 액정 방향자를 계산하여 얻은 결과이다.

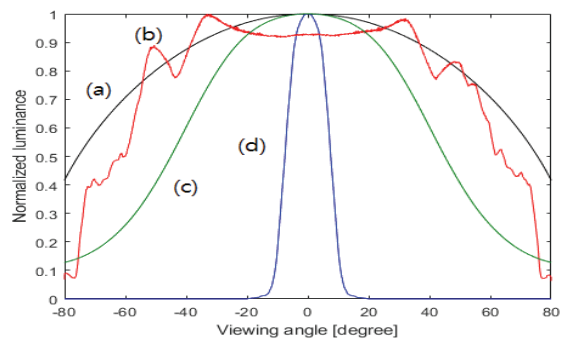
그림 4를 보면 전극의 가장자리 부분에서 급격한 변화가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 가장자리에서 수직인 전기장을 분포시키는 것이 어렵기 때문에 액정의 방향자가 설계대로 수직하게 거동하지 못해 나타나는 것이다.

그림 5는 광선 추적 시뮬레이션으로 계산한 결과로 시야각에 따른 휘도(luminance)를 정규화한 것을 보여준다. (a)는 이상적인 OLED TV, (b)는 본 연구에서 제시하고 있는 디퓨저를 이용한 광시야각 모드, (c)는 일반적인 LCD, (d)는 본 연구에서 제시한 디퓨저를 off했을 때의 협시야각 모드이다.

그림 5를 보면 시야각 60~80° 부근을 제외한 각도에서는 일반적인 LCD와 비교하였을 때 비슷한 휘도를 보이고 있으며, OLED와 비교하였을 때도 크게 떨어지



**Fig. 4.** Phase retardation distribution of ELC diffuser and ideal diffuser.



**Fig. 5.** Normalized luminance for viewing angle (a) OLED, (b) wide viewing angle mode, (c) conventional LCD, and (d) narrow viewing angle mode.

지 않는다. 60~80° 부근과 같은 문제를 해결하기 위해서는 더 큰 복굴절을 갖는 액정을 사용해 셀 갭을 줄이고, 전기장의 수평성분을 최소화하여 액정 방향자의 왜곡을 줄여야 한다. 셀 갭을 줄이면 더 낮은 전압으로 디퓨저를 구동할 수 있게 되고, 응답속도 또한 빨라지게 된다.

그림 5(d)를 보면 ELC 디퓨저가 off된 상태에서 QCBL의 분포 그대로 휘도가  $FWHM = \pm 7^\circ$  를 갖는 결과를 볼 수 있다. 그리고 20° 이상에서의 시야각에서는 0에 가까운 휘도를 갖기 때문에 주변에서의 디스플레이의 시청이 제한돼 사생활 보호가 가능하게 구현됨을 확인할 수 있다. 그리고 정면으로 대부분의 휘도가 분포하게 되므로 QCBL에서 나온 빛의 에너지가 좁은 영역에 고정되어 적은 에너지로 밝고 선명한 영상을 볼 수 있게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 제시한 ELC 디퓨저를 이용해 LCD 시스템에서의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 전기적으로 시야각을 제어할 수 있음을 확인할 수 있었고, 다구찌 방법을 이용해 최소의 실험으로 최적의 결과를 얻어낼 수 있었다. QCBL을 사용한 패널에 전기적으로 위상지연을 제어할 수 있는 ELC렌즈를 디퓨저로 부착하여, 사용자의 요구에 맞도록 시야각을 제어하였다.

좁은 시야각 모드에서의 휘도 분포 결과는  $FWHM = \pm 7^\circ$  이고, 시야각 20° 이상에서는 대부분의 휘도가 0에 가깝게 나타나 사생활 보호 효과가 극대화될 것으로 기대된다. 또한, 사용자의 시야각 범위 밖으로 출력되는 빛을 좁은 시야각으로 한정시키므로 에너지소비도 줄일 수 있다.

넓은 시야각 모드에서의 휘도 분포 결과는 OLED와 비슷하게 얻었지만, 60~80°에서는 약간 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 해결하기 위해서는 더 큰 복굴절을 갖는 액정을 사용해 셀 갭을 줄이고, 전기장의 수평성분을 최소화하여 액정 방향자의 왜곡을 줄여야 한다. 셀 갭을 줄이면 더 낮은 전압으로 디퓨저를 구동할 수 있게 되고, 응답속도 또한 빨라지게 된다.

ELC 렌즈 기반의 디퓨저를 사용하여 시야각을 사용자 환경에 맞추어 제어할 수 있는 LCD는 모바일뿐만 아니라 보안이 중요한 ATM에 사용함으로써 정보보안의 효과와 에너지절약 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### ORCID

Woo-Sang Park

<https://orcid.org/0000-0001-6087-5595>

#### REFERENCES

- [1] H. K. Hong, S. M. Jung, B. J. Lee, H. J. Im, and H. H. Shin, *Soc. Inf. Disp. Int. Symp. Dig. Tech. Pap.*, **39**, 348 (2008) [DOI: <https://doi.org/10.1889/1.3069666>]
- [2] Y. Gao, Z. Luo, R. Zhu, Q. Hong, S. T. Wu, M. C. Li, S. L. Lee, and W. C. Tsai, *J. Disp. Technol.*, **11**, 315 (2015). [DOI: <http://doi.org/10.1109/JDT.2015.2408993>]
- [3] R. Zhu, Q. Hong, Y. Gao, Z. Luo, S. T. Wu, M. C. Li, S. L. Lee, and W. C. Tsai, *Opt. Express*, **23**, 14070 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.23.014070>]
- [4] 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).