

# Optimized Optical Design of LCD Color-matching BLU Using an RGB Light Source

Hwa Jun Jeon, Jin Seok Gwag, and Jin Hyuk Kwon<sup>†</sup>

Department of Physics, Yeungnam University, 280 Daehak-ro, Gyeongsan 38541, Korea

(Received April 5, 2019; Revised May 13, 2019; Accepted May 15, 2019)

An LCD backlight unit (BLU) using RGB light sources is designed and simulated, in order to improve its optical energy efficiency. A color-matching BLU is designed with a lenticular lens array (LLA) with elements that image the linear RGB light sources onto the RGB subpixels of the color filter. Type-A and Type-B simulations are performed, according to the location of the light sources. As a result, the luminance increases to 210% in Type-A and 270% in Type-B respectively. The optimum values for the height and the gap of the LLA for maximum efficiency are found to be 25  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  respectively.

Keywords: Backlight unit, High efficiency, Color-matching

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (230.3720) Liquid-crystal devices; (240.3990) Micro-optical devices

## RGB 광원을 사용한 고효율 LCD Color-matching BLU의 광학적 설계

전화준 · 곽진석 · 권진혁<sup>†</sup>

영남대학교 자연과학대학 물리학과  
☎ 38541 경북 경산시 대학로 280

(2019년 4월 5일 받음, 2019년 5월 13일 수정본 받음, 2019년 5월 15일 게재 확정)

LCD의 광 효율을 향상시키기 위해 LCD backlight unit (BLU)의 광원으로 적색, 녹색, 청색의 광원을 사용하였으며, RGB 광원 lenticular lens array (LLA)를 통해 집광되어 각각 컬러 필터의 적색, 녹색, 청색 필터에 색일치되는 조건으로 광이 지나도록 설계하여 시뮬레이션하였다. 광원의 위치에 따라 Type-A와 Type-B 두 가지 방식으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과 LLA를 사용하지 않았을 때와 비교하여 Type-A는 휘도가 210%로 상승하였으며, Type-B는 270% 상승함을 확인하였다. LLA의 최적의 조건은 렌즈의 높이가 25  $\mu\text{m}$ , 렌즈 간의 간격이 3  $\mu\text{m}$ 일 때, 효율이 최대가 됨을 확인하였다.

Keywords: 백라이트 유닛, 고효율, 컬러 매칭

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (230.3720) Liquid-crystal devices; (240.3990) Micro-optical devices

### I. 서 론

액정디스플레이(liquid crystal display, LCD)는 대형화가 쉽고, OLED (organic light-emitting display)와 비교할 때 상대적으로 저비용으로 제작이 가능하기 때문에 최근까지도 중요한 디스플레이 장치로 자리잡고 있다. 하지만 디스플레이의 대형화가 요구될수록 낮은 에너지 효율에 대한 문제가 제기되고 있다. 일반적인 LCD 패널의 광 투과율은 5% 미만으로 낮는데 그 이유는 편광판에서 약 50%가 흡수되고 컬러필터에서 입사광의 약 70%가 흡수되기 때문이다. 또한 개구율로 인한 손실도 발생하는데 가장 많은 손실이 발생하는 광소자는 컬러필터이다. 편광판으로 인한 손실을 줄이기 위해 편광

백라이트에 대한 연구가 많이 이루어졌으나 여전히 실용화되는 단계까지는 이르지 못하고 있다<sup>[1]</sup>. 균일한 백색광이 입사할 때 RGB 컬러필터에서의 흡수율이 약 70%에 이르기 때문에 광효율 향상에 가장 효율적인 가능성은 color-matching BLU를 개발하는 것이다. 한편 컬러 필터를 제거하기 위한 field sequential color (FSC) 방식<sup>[2,3]</sup>에 대한 연구가 진행되었다. FSC 방식에서는 BLU에서 시간순서적으로 켜지는 적색, 녹색, 청색과 동일한 순서로 동기화되어 액정 패널에 적색, 녹색, 청색의 영상이 인가되기 때문에 액정의 서브 픽셀과 컬러필터를 모두 제거할 수 있어서 매우 높은 광효율 향상을 얻을 수 있다. 그러나 움직이는 물체의 가장자리에 발생하는 무지개 효과 때문에 실용화에 실패하고 있다. 이에 비해서

<sup>†</sup>E-mail: [jhkwon@ynu.ac.kr](mailto:jhkwon@ynu.ac.kr), ORCID: 0000-0002-2499-2919

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

RGB 광을 동시에 액정 서브픽셀과 RGB 컬러필터 속으로 입사시키는 color-matching 방식에서는 구조적으로 좀 더 복잡해질 수는 있지만 무지개 효과가 없기 때문에 실용화 가능성은 오히려 더 높다고 볼 수 있다.

Color-matching 방식에서는 RGB 컬러를 만들어 내는 방식에 따라 몇 가지 연구가 이루어져왔다. 먼저 백색 광원을 블레이즈 회절격자(blazed grating)를 이용하여 RGB 3색광으로 나눈 후 이것을 lenticular lens array (LLA)를 이용하여 각각 RGB 컬러 필터에 집광시켜주는 방식<sup>[4,5]</sup>이 있다. 회절 격자를 사용하면 광학시스템의 구조적 복잡성 이외에도 1차 회절에서 발생하는 RGB 광 이외에 0차의 백색광이 많이 발생하기 때문에 이에서 발생하는 광 손실을 피하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 보완하는 방법으로 RGB LED와 LLA를 이용하여 컬러 필터의 서브 픽셀에 color-matching 시켜주는 기술<sup>[6,7]</sup>이 제안되었다. 이 방법은 확실한 에너지 효율 증가를 보여주었지만 많은 수의 RGB LED를 직하형 배치로 사용해야 하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 LCD의 광 효율을 증대시키고 더 우수한 화질을 달성하기 위한 방식으로 병렬로 나란히 배치되는 RGB 광원을 사용하여 color-matching LCD BLU를 제안하고 시뮬레이션하였으며 최적의 광학적 설계 조건을 구하였다. 효율

을 높여주기 위해서는 컬러 필터와 병렬로 배치하되 같은 주기의 띠 형태의 RGB 광원이 사용되어야 한다. 광원의 위치에 따라 Type-A와 Type-B로 나누어 시뮬레이션을 진행하였으며 최적의 조건에서 휘도와 에너지 효율의 차이를 비교해 보았다.

## II. Color-matching BLU의 광학적 설계

Color-matching BLU는 그림 1과 같이 RGB 광원의 배열과 LLA, 컬러 필터를 포함한 액정 패널로 구성된다. 광원의 위치를 도광판 상부에 두는 방식을 그림 1(a)인 Type-A로 두었으며 그림 1(b)는 광원이 도광판 하부에 위치한 Type-B이다. RGB 광원과 컬러 필터의 서브 픽셀의 RGB 필터는 같은 색상으로 같은 주기로 배열된다.

먼저 그림 2(a)는 Type-A의 color-matching BLU에서 광경로를 나타내는 것으로 RGB 광원에서 출사된 광은 LLA에 의해 집광되어 액정 패널의 후면 유리 기판을 지나 컬러 필터의 서브 픽셀로 입사하게 된다. 이 때, RGB 광원도 RGB OLED를 사용할 수 있다. 컬러 필터를 지나가는 광은 컬러 필터의 서브 픽셀의 각 필터가 만족하는 파장 영역이 아닐 경우 필터를 투과하지 못하고 흡수된다. 이러한 손실을 줄이

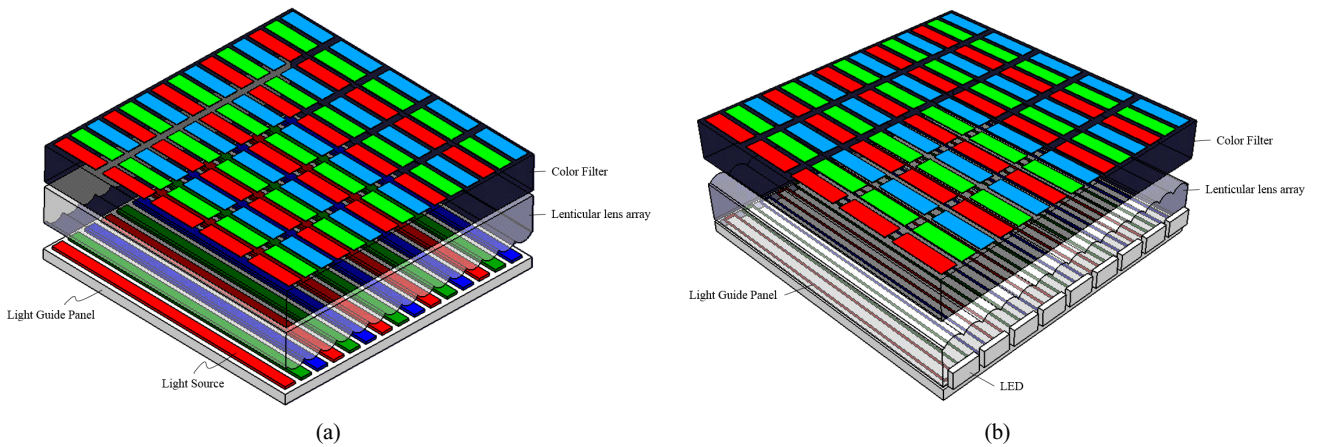


Fig. 1. Schematic structure of the color-matching backlight unit of (a) Type-A and (b) Type-B.

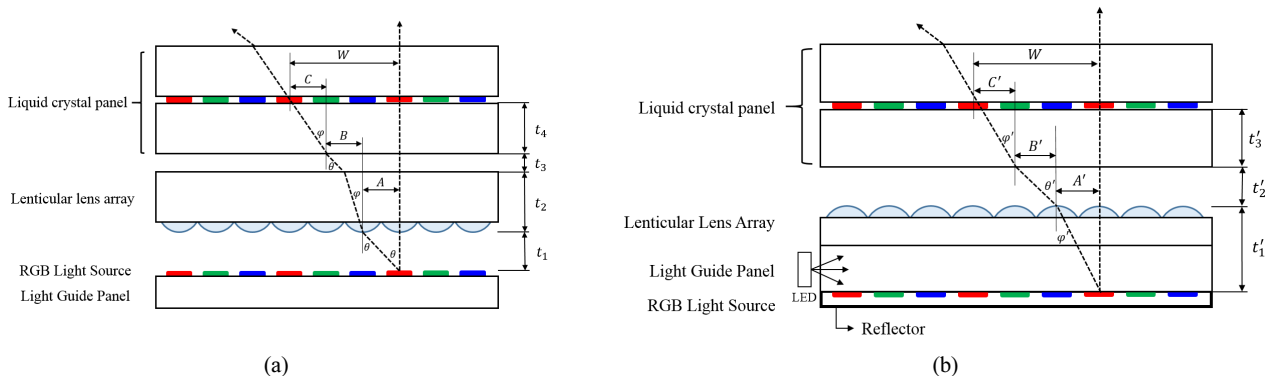


Fig. 2. Ray propagation in the color-matching backlight unit of (a) Type-A and (b) Type-B.

기 위해 color-matching 조건에 맞춰 RGB 광원과 LLA의 간격( $t_1$ ), 액정 패널의 후면 유리 기판 두께( $t_2$ ), 액정의 두께( $t_3$ ), 액정 패널의 상부 유리 기판 두께( $t_4$ )를 설정하여 주어야 한다. 액정 후면으로 입사된 광이 LLA에 도달하면서 발생하는 수평 변위  $A$ 와 LLA를 통과하여 액정 패널 후면 유리 기판을 통과할 때 발생하는 수평 변위  $B$ , 컬러 필터를 통과할 때 발생하는 수평 변위  $C$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$A = t_1 \tan \theta, \quad (1)$$

$$B = t_2 \tan \phi + t_3 \tan \theta, \quad (2)$$

$$C = t_4 \tan \phi, \quad (3)$$

스넬의 법칙을 적용하여  $\sin \theta = n \sin \phi$ 가 된다.

Color-matching의 조건은  $A, B, C$ 의 합이 컬러 필터 주기  $P$ 의 3배가 되어야 하며

$$W = A + B + C = nP \quad (n = 3 \text{의 배수}), \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (4)의 조건이 만족되도록 변수들을 조절해주었을 때, RGB 광원에서 출사한 RGB와 동일한 색상의 컬러 필터를 통과하게 되고, 이를 통해 컬러 필터에서 투과율이 향상되게 된다.

RGB 광원과 LLA의 사이 간격( $t_1$ )은 렌즈의 초점 거리와 같아야 하며 액정 패널의 유리 기판의 두께가 결정되게 되면 초점 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_1 = W - (t_2 + t_4) \tan \phi - t_3 \tan \theta / \tan \theta \quad (5)$$

그림 2(b)는 Type-B에서 광 경로를 나타내는 모식도로 RGB 광원이 LLA 시트 아래에 배치되어 있으며 아래로 향하는 광을 액정 패널 방향으로 올려주기 위한 반사시트를 위치시켜 주어야 한다. 이렇게 상부로 출사된 광은 LLA에 의해 집광되어 액정 패널을 통과하게 된다. Type-B의 color-matching을 위한 조건은

$$A' = W/3 = t_1' \tan \phi, \quad (6)$$

$$B' = t_2' \tan \theta, \quad (7)$$

$$C' = t_3' \tan \phi, \quad (8)$$

로 정의할 수 있으며, 스넬의 법칙을 따른다. 컬러 필터의 주기는

$$W = A' + B' + C' = nP \quad (n = 3 \text{의 배수}) \quad (9)$$

와 같이 정의될 수 있으며, 이를 통해 LLA를 포함한 RGB 광원과 액정 패널 사이의 간격은

$$t_2' = nW - (t_1' + t_3') \tan \phi / \tan \theta \quad (10)$$

의 식에 따라 결정된다.

본 연구에서는 Type-A의 경우 컬러 필터의 주기는  $P = 0.1805 \text{ mm}$ , 유리 기판의 두께는  $t_2 = t_4 = 0.700 \text{ mm}$ , 액정의 두께는  $t_3 = 0.104 \text{ mm}$ 로 설정하여 초점거리  $t_1 = 0.500 \text{ mm}$ 로 설계되었고, Type-B의 경우 컬러 필터의 주기  $P$ 는 Type-A와 같으며, 유리 기판은  $t_1' = t_3' = 0.700 \text{ mm}$ , 도광판과 액정 패널 사이의 간격은  $0.444 \text{ mm}$ 로 설계되었다. Type-A, B 방식의 액정 패널의 크기는 가로, 세로  $5.50 \text{ mm}$ 로 두었으며, RGB 광원은 화이트 밸런스를 고려하여 3:6:1의 비율에 맞춰 R은 30 lm, G는 60 lm, B는 10 lm으로 설정하여 각각 10개씩 설치하여 주었다. 굴절률은 LCD에 일반적으로 사용되는 유리기판을 기준으로 하여 1.509로 설정하여 굴절각을 계산하여 주었다. 시뮬레이션은 Light Tools 광학 설계 프로그램을 사용하여 진행하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

LLA의 경우 컬러 필터의 주기와 동일한 주기로 설계되어야 하기 때문에 렌즈의 높이를 조절하여 주면 곡률 반경도 주기에 맞추어 조절된다. LLA의 최적의 조건을 찾기 위하여 렌즈의 높이에 따른 효율의 변화를 살펴보았으며, 렌즈와 렌즈 사이에 간격을 두어 효율에 주는 영향을 시뮬레이션하였다. 렌즈의 주기는 컬러 필터의 주기와 같은  $0.1805 \text{ mm}$ 로 설정해야 하기 때문에 렌즈의 높이에 따라 곡률 반경이 변하게 된다. 곡률 반경  $R$ 에 대한 식은

$$R = [(P - G)/2]^2 + h^2 / 2h \quad (11)$$

로 나타낼 수 있으며,  $P$ 는 렌즈의 주기,  $G$ 는 렌즈와 렌즈 사이의 간격,  $h$ 는 렌즈의 높이이다.

렌즈와 렌즈 사이의 간격(gap)은  $3 \mu\text{m}$ 와  $30 \mu\text{m}$ 로 두고 렌즈의 높이를 변화시키면서 효율을 확인하였다. LLA 시트가 없을 때를 100%로 하여 LLA 시트를 사용하였을 때 효율의 상승도를 알아보았다. 그림 3은 렌즈의 높이에 따른 효율 변화를 나타내는 그래프이며, 사이 간격이  $3 \mu\text{m}$ 일 때, 렌즈의 높이  $25 \mu\text{m}$ 에서 효율은 최대값을 나타냈다.

최적화된 LLA의 조건을 적용하여 Type-A 방식과 Type-B 방식의 효율을 계산한 결과가 표 1에 나타나 있다. Type-A 방식의 경우 광이 BLU의 하부로 내려가는 광을 고려하여 기판 아래에 흡수 처리를 한 경우와 거울 반사 처리를 한 경우로 나누어 비교해 보았다. Type-A 방식의 LLA가 없는 경우를 기준으로 하여 효율이 얼마만큼 상승하였는지 알아보았으며, Type-A 방식과 Type-B 방식 모두 LLA가 없는 경우

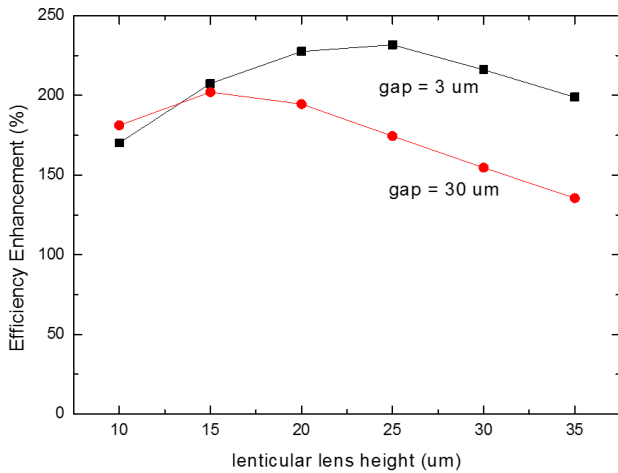


Fig. 3. Energy efficiency enhancement of color-matching backlight unit in terms of the height of lenticular lens.

보다 있는 경우 더 높은 효율 상승을 보였다. LLA로 집광을 시켜주게 되면 color-matching의 효과가 더 상승하는 것을 알 수 있다. Type-A의 경우 아래에 거울 반사 처리를 한 것이 좀 더 높은 효율을 보였다. Type-A보다 Type-B에서 더 높은 효율 상승을 보였으며 이로부터 Type-B의 구조가 더 효과적임을 확인할 수 있다. 휘도 또한 Type-A는  $8.50 \times 10^5$  nit, Type-B는  $1.50 \times 10^6$  nit로 1.7배 이상 높게 나타났다. 두 가지 방식을 비교하였을 때 Type-B의 구조가 더 단순하고, 광의 이동 경로가 더 짧기 때문에 더 높은 효율을 나타내는 것을 보여준다.

#### IV. 토 론

Color-matching BLU의 광원의 구조는 띠 형태의 RGB 광원들의 병렬로 나란히 배열되어야 한다. 띠 형태의 광원을 제작할 수 있는 물질로는 organic light-emitting device (OLED), 형광체(phosphor), 양자점(quantum dot, QD) 등이 있다. OLED의 경우 자발광이기 때문에 도광판이 필요하지 않으므로 Type-A와 Type-B 모두 사용하기 적합하며 형광체와 양자점의 경우는 비자발광원으로 짧은 파장의 청색 광원에 의해 색 변환이 이루어지는 물질이기 때문에 도광판이 필요하며 Type-A보다 Type-B에 알맞은 광원이다. 형광체와 양자점을 이용하여 RGB 광원을 만들기 위해서는 도광판 측면에 배치된 LED 청색 광원에서 나온 빛이 도광판의 하부에 위치한 적색과 녹색의 형광체나 양자점에 부딪혀 적색과 녹색 광을

발생하도록 한다. 청색광은 도광판 측면에 배치된 청색 LED의 광을 백색 산란체를 이용하여 산란시키면 된다. 이렇게 함으로써 RGB 광원을 모두 얻을 수 있게 된다.

OLED는 자발광으로 색 재현성이 좋고, 높은 명암비, 넓은 시야각과 같은 특성으로 주목 받아왔다<sup>[8]</sup>. 또한 최근에는 수명이 충분히 보장되는 청색 OLED도 개발되어 있기 때문에 BLU 광원으로 사용하기에 적절한 것으로 보인다. Active matrix (AM) OLED는 이미 디스플레이로 잘 검증이 되고 상용화에 성공하고 있지만 여전히 AM 방식에서 핵심적인 역할을 하는 다결정 실리콘 기반의 트랜지스터 공정에서 과도한 비용과 수율 저하의 문제로 인하여 최근까지도 LCD에 비해서 가격 경쟁력을 얻지 못하고 있다. 하지만 PM OLED는 트랜지스터가 없기 때문에 매우 경제적으로 제작이 가능하다는 장점이 있다. PM OLED만으로는 OLED 디스플레이의 품질 조건을 만족시키기 어렵지만, PM OLED를 color-matching LCD의 BLU 광원으로 사용하면 청색 LED와 형광체를 이용해서 백색광을 얻는 기존 LCD보다 더 우수한 화질을 달성할 수 있다.

형광체는 디스플레이에서 색을 변환하는 물질로 널리 사용되어 왔으며 최근에는 청색 LED 칩의 전면에 황색 형광체를 배치하여 백색 LED 광을 발생시키는데 주로 사용되고 있다. LCD가 대형화될수록 고효율 LED가 요구되면서 형광체의 광 변환 효율이 중요하게 대두되고 있다. 형광체의 광 변환 효율은 LED 칩과의 거리와 칩에서 발생하는 열에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 백색 LED의 광 변환 효율을 고려하였을 때, color-matching BLU에 RGB 광원으로 사용하였을 때의 광 변환 효율과 큰 차이가 없을 것으로 보이며 오히려 열적 부하가 줄어 더 높은 효율을 달성할 것으로 예상된다.

양자점은 수십 나노미터의 물질로 입자의 크기를 조절하여 높은 색 순도의 적색 또는 녹색을 얻을 수 있다. 양자점은 광 발광 방식과 전계 발광 방식이 있으며 현재 가장 널리 사용되고 있는 기술은 광 발광 방식이다. 디스플레이에 적용하는 대표적인 방법은 quantum dot enhanced film (QDEF)을 이용하는 것으로 청색 광의 BLU와 액정 패널 사이에 QDEF를 위치시켜 적색, 녹색의 양자점과 청색의 광이 섞여 백색 광이 되어 액정패널로 들어가게 된다. QDEF 방식은 제조가 용이하여 널리 사용되고 있지만 필름으로 사용하게 될 경우 LCD 전면적에 넓게 도포되기 때문에 양자점의 사용량이 많아져 생산 단가가 올라가게 된다. 또한 백색광이 컬러 필터를 통과하면서 70% 정도 흡수되므로 기존의 LCD와 마찬가지로 에너지 효율이 감소하게 된다. 양자점을 이용한 RGB

Table 1. Comparison of efficiency enhancement according to the structure of RGB light sources

	Type-A				Type-B	
	Bottom absorber		Mirror bottom		Up emission	
	Luminous flux	Efficiency	Luminous flux	Efficiency	Luminous flux	Efficiency
With lenticular lens array	367 lm	222%	447 lm	271%	633 lm	383%
Without lenticular lens array	165 lm	100%	230 lm	139%	300 lm	181%

광원을 color-matching LCD에 적용한 경우 QDEF를 이용한 디스플레이보다 양자점의 사용을 줄일 수 있으며 동시에 높은 에너지 효율을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

## V. 결 론

광학 설계 프로그램을 이용하여 RGB 광원을 이용한 color-matching BLU에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며, LLA의 최적의 조건은 높이 25  $\mu\text{m}$ , 렌즈 사이 간격 3  $\mu\text{m}$ 이다. Type-A에 비해 Type-B가 더 높은 효율을 나타냈으며, Type-A와 비교하여 1.4배 높은 효율을 나타냈으면 휘도는 1.7배 높게 나타났다. 이를 통해 Type-B가 광 투과율 향상에 더 효과적인 것을 알 수 있다.

Type-B의 경우 높은 투과율뿐만 아니라 구조가 단순하여 제작에 더 용이하며 도광판 위에 LLA 시트를 부착하여 정렬하는데 더 용이할 수 있다. RGB 광원으로 OLED나 양자점을 사용하게 된다면 수분과 산소로부터 보호하기 위한 봉지 과정을 쉽게 이행할 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 영남대학교 2018년도 연구년 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## References

1. X. Yang, Y. Yan, and G. Jin, "Polarized light-guide plate for liquid crystal display," *Opt. Express* **13**, 8349-8356 (2005).
2. F. Yamada, H. Nakamura, Y. Sakaguchi, and Y. Taira, "Sequential-color LCD Based on OCB with an LED Backlight," *J. Soc. Inf. Disp.* **10**, 81-85 (2002).
3. C. H. Lee, "Angularly positioned LED-based spatial-temporal color separation system," *Opt. Express* **20**, 19109-19118 (2012).
4. M. J. J. Jak, R. Caputo, E. J. Hornix, L. de Sio, D. K. G. de Boer, and H. J. Cornelissen, "Color-separation backlight for improved LCD efficiency," *J. Soc. Inf. Disp.* **16**, 803-810 (2008).
5. C. G. Son, J. S. Gwag, J. H. Lee, and J. H. Kwon, "Analysis of a color-matching backlight system using a blazed grating and a lenticular lens array," *Appl. Opt.* **51**, 8615-8620 (2012).
6. J. H. Kwon, "A color-filterless LCD with RGB LED and lenticular-lens arrays," *J. Inf. Disp.* **11**, 45-48 (2010).
7. H. J. Jeon, G. J. Park, J. S. Gwag, J. H. Lee, and J. H. Kwon, "Color-matching liquid crystal display using a lenticular lens array and RGB light sources," *J. Opt. Soc. Korea* **18**, 345-349 (2014).
8. Y. Kim and C. S. Ha, *Advances in Organic Light-Emitting Device* (Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2008).