

대면적 엣지형 LED 디스플레이의 광특성 향상을 위한 도광판설계

Design of Light Guide Plate to Improve Optical Characteristics for Large-Area Edge-lit LED Display

이재용*, 신민호*, 김종섭**, 김영주[†]

Jae-Yong Lee, Min-Ho Shin, Jong-Sub Kim, and Young-Joo Kim

(2013년 3월 19일 접수; 2013년 3월 22일 심사완료; 2013년 3월 25일 게재확정)

Abstract

Through the rapid development of LED TV, a large-area edge-lit backlight unit is widely researched in the display industry for enhancing the optical efficiency, luminous uniformity and slim design. In addition, an edge-lit backlight unit includes many optical sheets such as reflection sheet, prism sheet and diffuser sheet. However the function can be replaced by the carefully patterned light guide plate (LGP). Micro patterns which located on the top and bottom surface of light guide plate was designed by ray-tracing optical simulation. The designed patterns improved the light characteristics of LGP, including optical extraction efficiency and intensity distribution uniformity. These results suggest that it is very effective method to design edge-lit LGP with micro-patterns on both sides for large-area display and to reduce the fabrication cost.

Key Words : Backlight unit, Light guide plate, Ray tracing method, Micro pattern, Uniformity

1. 서론

21세기 초반, LED TV의 급속한 보급으로 인하여 디스플레이 산업에서 엣지형 백라이트 유닛(Backlight Unit, BLU)의 대면적화가 급격한 속도로 진행되고 있다. 또한 저전력, 고효율, 고휘도 균일도, 슬림화 등 여러 측면에서 그 성능이 향상되고 있다. 이러한 엣지형 백라이트 유닛은 반사 시트, 프리즘 시트, 확산 시트 등 여러 장의 광학 시트와 LED의 점광원을 면광원화 시켜주는 역할을 하는 도광판(Light Guide Plate, LGP)으로 구성된다. 도광판은 엣지에 위치하는 광원으로부터 출사되는 광을 백라이트 유닛 전체 면적에

균일하게 분포시키는 역할을 하며, 하부에 있는 작은 크기의 패턴(Micro Pattern)을 이용하여 엣지에서 입사된 광선의 방향을 꺾어 주어 전반사 또는 반사 시트에 의한 반사를 이용하여 도광판 상부로 추출 시켜준다. 초기에는 추출 효율을 향상시키기 위해 도광판의 다양한 패턴 형상 설계에 대한 연구가 활발히 진행되었으며[1-2], 기술이 발전함에 따라 프리즘 시트, 확산 시트 등의 광학 필름을 도광판의 패턴을 통해 대체하는 방법과 휘도 균일도를 높이기 위한 하부 패턴의 설계로 도광판 성능을 향상 시키는 연구가 진행되었다[3-6]. 본 연구에서는 디스플레이의 대면적화에 따른 LGP 설계에 대한 보다 효율적인 방법을 제안하고, 이를 바탕으로 55인치 LED 디스플레이용 LGP의 최적화된 패턴의 형상 및 배열구조를 제시하고자 한다. 우선 광선 추적법(Ray Tracing method) 시뮬레이션을 통하여, 추출 효율 및 휘도 향상을 위한 상, 하부 패턴의 구조 형상에 대한 최적화 설계를 진행하고, 이를 바탕으로 다시 상, 하부 패턴의 배열 분포를 밀도함수

[†] Department of mechanical engineering, Yonsei Univ.
E-mail : yjkim40@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-6852

* Department of mechanical engineering, Yonsei Univ.
** A-TECH SOLUTION CO.,LTD

제어방식을 이용하여 결정하는 보다 효율적인 휘도 균일도를 확보하는 설계방법을 확립하고자 한다.

2. 패턴 형상구조 최적화

2.1 광선 추적법을 이용한 패턴 구조 분석

대면적 엷지형 도광판 패턴 설계에 앞서 최적의 패턴 형상 및 구조 이해를 위하여 패턴의 기하학적 분석을 진행했다. 분석을 진행한 패턴 형상은 Cylinder, Trapezoid, Prism 그리고 R-Prism 의 4 가지이다. Cylinder, Trapezoid, Prism 은 각각 반구, 사다리꼴, 삼각형의 단면을 가지며, R-Prism 형상은 Cylinder 형상의 좌우에 접선을 덧댄 구조이다. R-Prism 형상은 조밀하게 위치해 있는 Cylinder 형상의 패턴을 가공할 때 발생하는 산 무너짐 현상을 보완하기 위해 끝 부분을 곡률이 아닌 직선으로 설계한 형상이다.

선정한 4 가지 형상을 hole type 과 bump type 의 2 가지 형태로 분류한 후 광선 추적법을 사용하여

각 패턴에 의한 광선의 진행 및 분포를 분석했다. Fig.1 을 보면 곡면을 가지는 Cylinder 와 R-Prism 형상의 경우 입사각에 대한 출사각의 변화가 작다. 또한 Trapezoid 와 Prism 형상의 경우 패턴의 옆면의 기울기에 따라 입사각에 대한 굴절되는 크기가 달라져 기울기 변화를 통해 패턴을 통과한 출사각을 제어하기에 용이하다. 따라서 도광판의 상부 패턴에는 Cylinder 패턴과 같은 곡면을 가지는 패턴이 유리하며, 하부 패턴에는 Prism 패턴과 같이 평면을 가지는 패턴이 유리함을 알 수 있었다.

LED 에서 출사된 람버시안(Lambertian) 분포의 빛은 도광판에 입사하면서 공기와 도광판 재료의 굴절률 차이에 의해 타원형 형태의 배광 분포를 가지며 진행 하게 된다. 예를 들어 굴절률 1.49 를 가지는 PMMA 의 경우에는 최소 배광각이 85 °에서 42 °로 감소하게 된다. 이후 입사광은 도광판 상부 경계면과 하부 경계면에서 발생하는 전반사를 통해 도광판 내부를 진행하게 되고, 이 중 일부는 도광판 하부의 패턴에 부딪혀 도광판 상부로 추출되고, 일부는 반복되는 전반사를 통해 입사면으로부터 먼 곳으로 진행한다. 일반적으로 빛이 상부로 추출되기 위해서는 입사된 빛이 하부 패턴에 의해 굴절 및 전반사 되어야 하며 도광판 재료의 굴절률과 패턴의 각도가 중요한 영향을 미친다. 도광판 내부를 진행하는 광선이 전반사를 이루는 임계각보다 큰 각도로 패턴에 맞아 한 번 굴절을 이루고, 도광판 상부면에 전반사 각도 보다 작은 각도로 입사하여 추출 되는 것이 가장 이상적인 추출 구조이다. 이에 하부면과 상부면의 조건을 고려하여 기하학적인 방법으로 이상적인 광 추출을 위한 하부와 상부 패턴에 적합한 각도를 계산하였다. Fig.2 는 도광판 내부를 진행하는 빛이 상부 패턴과 하부 패턴에 의해 추출되는 과정에 대한 개념도이다.

하부 패턴은 입사한 광을 상부로 전반사 시키거나 굴절시키는 역할을 하는데, 앞서 분석한 패턴 형상 중에서 입사광에 대해 일정한 각도를 가지는 평면을 가지고 있는 Prism 형상이 가장 적합하였다. 따라서 입사광을 상부로 추출 하기 위한 Prism 의 중심각을 고려하여 기하학적 분석을 통해 하부 패턴을 설계하였다.

도광판 하부에 입사하는 광의 입사각을 θ_i , 하부면에 전반사 되어 패턴에 입사하는 광의 입사

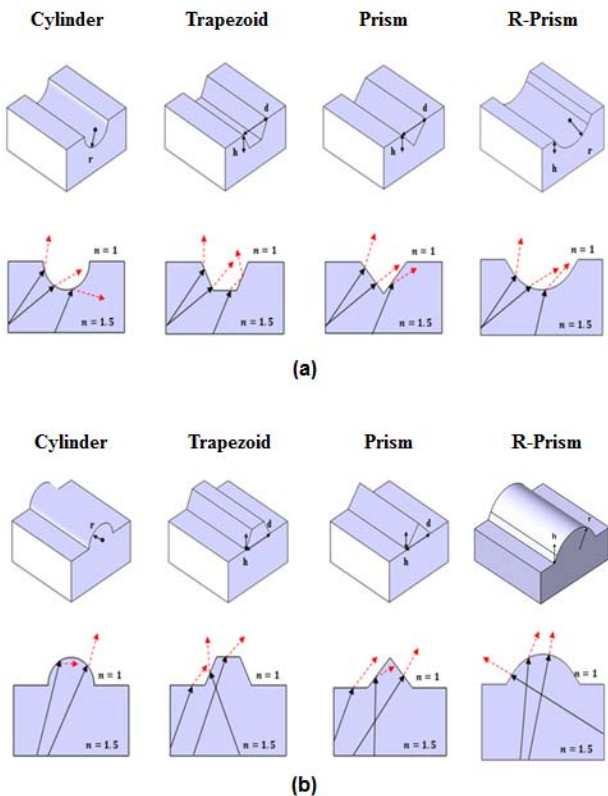


Fig. 1 Ray tracing for various pattern shape
(a) hole type, (b) bump type

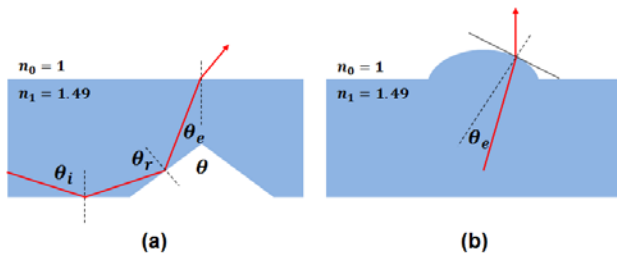


Fig. 2 Light extraction mechanism by (a) bottom pattern, (b) top pattern

각을 θ_r , 패턴에 전반사 되어 상부로 입사되는 광의 입사각을 θ_e 그리고 하부 패턴의 중심각을 θ 라 정의한다. 그리고 공기의 굴절률은 $n_0 = 1$ 이고, 도광판 재료의 굴절률은 $n_1 = 1.49$ (PMMA)이며, 굴절률 차이에 따른 임계각(Critical Angle, θ_c)은 약 42° 이다. Fig.2(a)를 바탕으로 도광판 하부에 입사되어 패턴에 전반사 된 후 상부면으로 추출되기까지의 과정을 수식화 하면 아래와 같다.

$$\theta_i > \theta_c, \theta_r > \theta_c, \theta_e < \theta_c$$

$$\theta_i + \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \theta) = \frac{\pi}{2} - \theta_r \dots (1)$$

$$\frac{\theta}{2} = \theta_e + (\frac{\pi}{2} - \theta_r) \dots (2)$$

$$\theta = \theta_i - \theta_e + \frac{\pi}{4} \dots (3)$$

식 (1)은 하부 면 전반사와 패턴 면 전반사에 대한 조건을 정리한 관계식이고, 식 (2)는 패턴 면 전반사와 상부면 추출에 대한 조건을 정리한 관계식이며, 이를 통해 식(3)의 관계식을 얻을 수 있다. 여기서 식 (3)을 만족하는 θ 의 범위가 하부 패턴의 중심각에 적합하며, 초기 입사각과 임계각 그리고 추출각의 조건을 고려하여 θ 의 범위를 선정하면 $93^\circ < \theta < 135^\circ$ 가 되고, 이 범위 내에서 패턴 설계를 할 경우 향상된 추출 효율을 얻을 수 있었다.

상부 패턴은 앞서 설명하였듯 기존 광학 시트들의 역할을 대체하기 위하여 하부 패턴과 다르게 상부면으로 입사되는 광선들에 대해 각도를 굴절 시켜 수직인 형태로 변환시키는 역할을 한다. 이에 입사되는 광선들을 수직인 각도로 굴절 시킬 수 있는 곡면 형상에 대한 기하학적 분석을 통해 상부 패턴을 설계하였다.

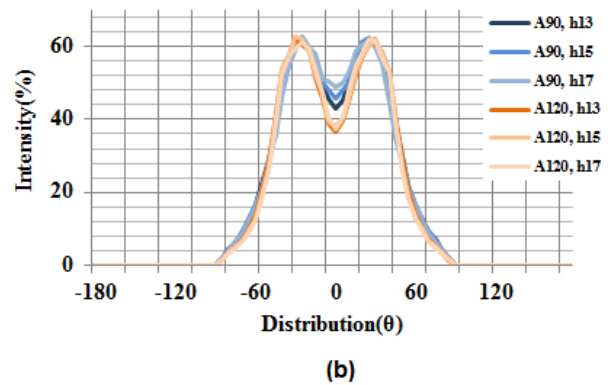
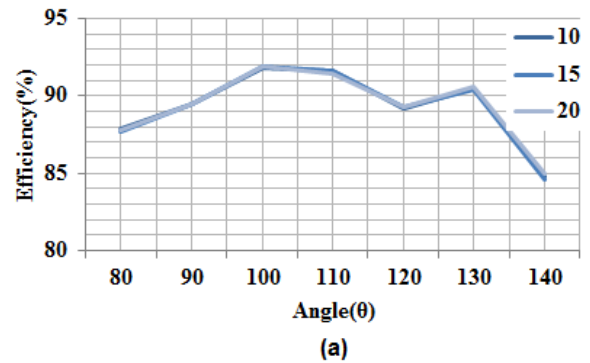


Fig. 3 Simulation result about pattern shape (a) bottom prism pattern, (b) top r-prism pattern

광원으로부터 출사되어 도광판 내부를 진행하는 광선들은 하부 패턴에 의해 다양한 각도를 가지며 상부 면으로 진행하는데, Fig.2(b)는 임의의 각도를 가지며 상부로 진행하는 광이 수직인 방향으로 추출 되기 위한 각도에 대해 도식하고 있다. 곡면을 가지는 상부 패턴에 입사하는 광선들은 곡면과 연속적인 접선에 대해 스넬의 법칙(Snell's Law)를 만족 시키며 상부로 출사 된다. 따라서 평면으로 구성된 패턴 보다 곡면으로 구성된 패턴이 90° 또는 그와 유사한 각도로 굴절될 확률이 증가한다. 따라서 가공성을 함께 고려하여 R-Prism 형상을 상부 패턴으로 선정하였다.

2.2 시뮬레이션을 통한 패턴 형상 최적화

이론적인 광선 추적법을 통해 계산된 θ 범위 내의 각도를 중심각으로 가지는 Prism 패턴에 대한 시뮬레이션을 통해 중심각에 따른 상부 광 추출 효율을 확인하였다. 패턴의 중심각은 80° 부터 140° 까지 10° 간격으로 설정했고, 패턴의 폭은 $10\ \mu\text{m}$ 에서 $20\ \mu\text{m}$ 까지 $5\ \mu\text{m}$ 간격으로

설정하였다. 하부 패턴에 의한 효과만 확인하기 위해 상부 패턴은 사용하지 않았다. Fig.3(a)는 패턴 중심각과 패턴 폭의 변화에 따른 광 추출 효율 결과이다. 그래프의 추이를 보면 패턴의 폭에 의한 영향은 거의 없으며, 패턴 중심각이 변화함에 따라 추출 효율이 변화하였다. 100 °의 각도에서 추출 효율이 92%로 가장 좋았고, 110 ° 또한 유사한 결과를 나타냈다. 그리고 이 둘을 중심으로 각도가 커지거나 작아짐에 따라 추출 효율이 감소하는 경향을 보였다. 결과를 바탕으로 중심각 100 °를 가지는 Prism 패턴이 상부 광 추출에 가장 유리함을 알 수 있었다.

상부 패턴에 대해서도 하부 패턴과 동일한 방법으로 시뮬레이션을 진행하여 그 결과를 확인하였다. 단, 하부 패턴을 평가하는 지표가 추출 효율이었다면 상부 패턴을 평가하는 지표는 배광 분포이다. 선정한 R-Prism 패턴의 형상에 따른 배광 분포 확인을 위해 패턴의 높이와 패턴과 패턴 간의 사이 각을 변수로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 곡률 40 μm에 대해 패턴의 높이를 13 μm에서 17 μm까지 2 μm 간격으로, 패턴과 패턴이 이루는 사이 각은 60 °에서 120 °까지 30 ° 간격으로 변수를 설정하였는데, 사이 각 60 °의 경우는 R-Prism 형상을 이룰 수 없는 구조 이기 때문에 제외 시켰다. 시뮬레이션을 통해 Fig.3(b)와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 결과를 보면 사이 각이 120 °인 경우는 높이에 따른 배광 분포에 큰 차이가 없었다. 반면, 90 °인 경우는 패턴의 높이가 커짐에 따라 배광 분포가 개선되는 것을 확인하였다.

3. 대면적 LGP 패턴 설계

3.1 대면적 LGP 설계 시뮬레이션 구성

분석한 패턴 형상들을 사용하여 추출 효율과 휘도 균일도가 향상된 대면적 엷지형 도광판 시뮬레이션을 위해 모델링을 진행하였다. 본 연구에서는 LightTools 광학 상용 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 선정한 도광판은 55 인치 크기를 가지는 대면적으로 광원의 개수가 많고 도광판 자체의 면적이 크기때문에

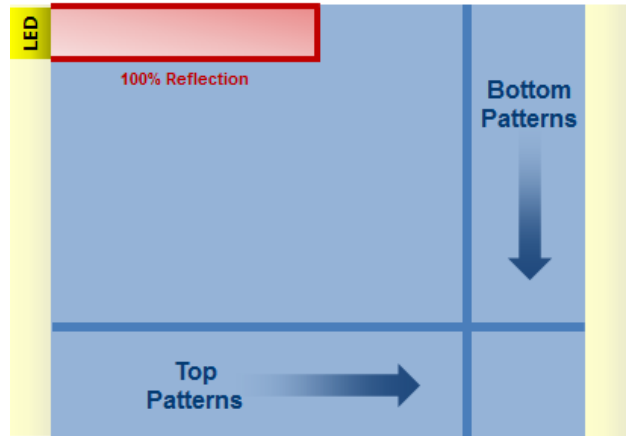


Fig. 4 Schematic diagram of comparison full scale modeling and length-way modeling

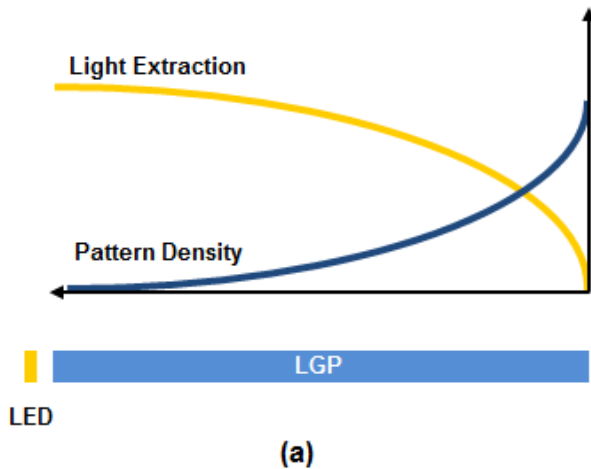
에 시뮬레이션을 진행할 경우 계산 시간이 오래 걸린다는 문제점이 있다. 선행 연구들에 의하면 이러한 문제점을 보완하기 위해 작은 사이즈의 도광판의 시뮬레이션을 통해 확인하고자 하는 결과를 얻는 방법을 사용하였다[6]. 이에 본 연구에서도 시뮬레이션 시간을 단축 시키면서 실제 대면적 도광판에 패턴을 적용 하였을 때와 동일한 결과를 가질 수 있는 모델링 방법을 설계하였다. 설계한 길이방향 모델링은 전체 55 인치 도광판(1230x700x3 mm)의 일부분을 시뮬레이션 함으로써 전체 면적에 대한 영향을 확인할 수 있다. 전체 면적을 고려하기 위하여 도광판의 각 면을 단순 굴절을 차이에 의한 광선의 변화로 확인하지 않고 양 옆면에 반사 100% 조건을 줌으로써 실제 광원이 있는 것과 동일한 효과를 줄 수 있다. Fig.4 에서 실제 도광판 모델링과 길이방향 모델링을 비교하고 있다. 최적화한 길이방향 모델링의 크기는 615x34.65x3 mm³이고, 이로부터 55 인치 도광판에 해당하는 결과를 확인 가능하였다.

도광판의 재료는 앞서 패턴 분석에 사용한 PMMA 를 사용하였고 재료의 굴절률은 1.49 이다. 광원은 백색 LED 의 일종인 STW8Q14BE(5630 type, 서울 반도체)를 사용하였으며, 배광 분포는 일반적인 LED 와 동일하게 램버시안 형태로 방사한다. 발광부의 크기는 4.6x2.7x0.9 mm³로 가장 큰 면이 도광판을 향하도록 했고, LED 간의 pitch 는 6.93 mm이다. 광원의 개수는 시뮬레이션을 위해 길이방향 모델링의 크기에 맞춰 실제 55 인치

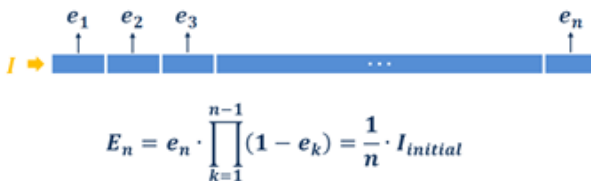
면적에 사용된 도합 192 개 중 일부인 5 개를 사용했다. LED 와 입사부 사이의 거리는 0.3 mm이며 각기 LED 의 출력은 1W 이다. 반사 시트는 도광판의 0.05 mm 아래에 위치하며 정반사와 확산반사가 혼재된 형태인 가우시안 산란(Gaussian Scattering)을 적용했으며 Scattering 되는 각도는 $\pm 10^\circ$ 이다. 또한 실제 조건과 유사한 조건으로 표면에 90%의 반사율과 10%의 흡수율을 가지도록 하였다.

3.2 휘도 균일도 향상을 위한 패턴 밀도 설계

앞서 언급하였듯 추출 효율에 영향을 주는 요인은 하부 패턴으로 도광판 내부를 진행하는 광선들이 하부 패턴에 부딪혀 전반사 되거나 굴절 광선이 반사시트에 의해 반사될 경우 상부로 추출되므로 하부 패턴의 유무가 추출 효율에 영향



(a)



(b)

Fig. 5 Pattern density design for enhance extraction efficiency (a) relation between pattern density and light extraction, (b) concept of sectional pattern density

을 주게 된다. 따라서 하부 패턴의 밀도가 높을수록 상부로 추출되는 광량이 많아지며 추출되는 광량은 패턴의 밀도에 비례하게 된다. 따라서 하부 패턴의 밀도와 그에 따른 추출 광량이 Fig.5(a)와 같은 그래프를 이룰 때, 휘도 균일도를 높일 수 있다. 이러한 추출 효율 그래프를 그리기 위해서는 하부 패턴의 밀도를 정밀하게 조절해야 하는데 이를 위해 구역별 패턴 밀도 (Sectional Pattern Density)의 개념을 사용하였다. 도광판을 동일한 크기를 가지는 여러 개의 구역으로 나누어 생각해 보면 각 구역 별로 추출 되는 광량을 모두 같을 경우 그 도광판의 휘도 균일도는 100%가 된다. Fig.5(b)에서 I 는 초기 입사광량, e_n 은 n 번째 구역의 광 추출 효율, 그리고 E_n 은 n 번째 구역에서의 추출 광량이다. 구역별 패턴 밀도의 개념을 적용하면 아래 수식과 같이 모든 구역에서의 광량이 초기 광량의 $1/n$ 이 되어야 한다. 이에 수식을 바탕으로 도광판을 20 개의 구역으로 나눈 뒤, 모든 구역이 동일한 광량을 가질 수 있도록 패턴 밀도를 설계하고 이를 하부 패턴 밀도로서 사용하였다. 상부 패턴은 배광 분포를 바꿔 주기 위한 역할이므로 상부 패턴이 있는 면에 광이 입사할 경우 패턴에 의해 각도가 꺾여 추출하며, 패턴이 없는 면은 단순히 굴절을 차이에 따른 굴절로 광을 추출한다. 도광판 상부 면의 모든 면적에 상부 패턴이 존재할 경우 배광 분포를 항상 시킬 수 있으므로 상부 패턴의 밀도는 1로 설계했으며, 이는 상부 전체가 패턴이 들어가기 있음을 의미한다.

3.3 상, 하부 패턴 밀도 최적화 적용

최종 도광판 조건은 상부에는 패턴 밀도 1을 가지는 R-Prism 패턴을 사용하였고, 하부에는 구역별 패턴 밀도 설계를 적용한 Prism 패턴을 사용하였고, 각 패턴의 크기는 Fig.6에 나타나있다. 결과를 분석하기에 앞서 휘도 균일도의 정량적 평가를 위해서 도광판으로부터 추출된 광선들이 확산판에 입사하기 이전의 위치에서 휘도 균일도를 측정하였다. 측정 방식은 도광판과 동일한 면적을 가지는 검출기 (Receiver)를 다수의 픽셀로 나눈 후 각 픽셀의 평균 휘도(모든 방향에서 입사되는 광선의 수)를

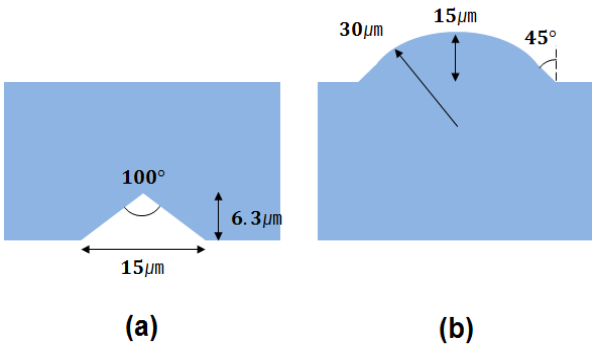


Fig. 6 Schematic diagram of selected pattern
(a) bottom prism pattern, (b) top r-prism pattern

대면적 도광판의 추출 효율과 배광 분포 결과를 확인하였다. Fig.7(a)를 보면 설계한 도광판은 하부 Prism 패턴에 의한 영향으로 78%의 추출 효율을 가지고, 하부 패턴의 구역별 밀도 설계를 통해 86%의 높은 휘도 균일도를 얻었음을 알 수 있었다. 그리고 상부 패턴에 의한 배광 분포 또한 Fig.7(b)를 통해 확인할 수 있는데, 0°~30°에 분포하는 광이 전체의 60%로 상부패턴이 없는 도광판 대비 휘도 개선이 가능하므로, 일부 광학시트를 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다.

4. 결론

디스플레이 기술이 발전함에 따라 대면적화, 슬림화, 단가 절감 등을 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 대면적 도광판의 추출 효율 및 휘도 균일도를 확보하기 위해, 본 연구에서는 패턴 형상 설계와 패턴 밀도 설계의 방법론 제시를 통하여 보다 효율적인 대면적 디스플레이용 도광판 설계 방법을 제안하였다. 패턴 형상은 기하학적 분석을 통해 대면적 도광판에 적합하도록 결정되었으며, 휘도 균일도를 확보하기 위해 n 개의 구역으로 나누어 패턴 밀도를 설계하는 구역별 패턴 밀도 설계 방법을 적용하였다. 이를 통하여 광학 시트의 역할을 포함하는 대면적 디스플레이용 엠티형 도광판을 설계하고 휘도 균일도를 확보했으며, 또한 기존 도광판 대비 단가 절감 효과를 기대할 수 있었다. 뿐만 아니라 추출 효율, 배광 분포, 휘도 균일도 측면에서 향상된 광학 특성을 가지므로 대면적 디스플레이에 적합한 도광판임을 확인하였다.

후기

이 논문은 지식경제부의 기술혁신사업 우수기술 연구센터사업으로 수행된 연구결과임. (No. 10035905)

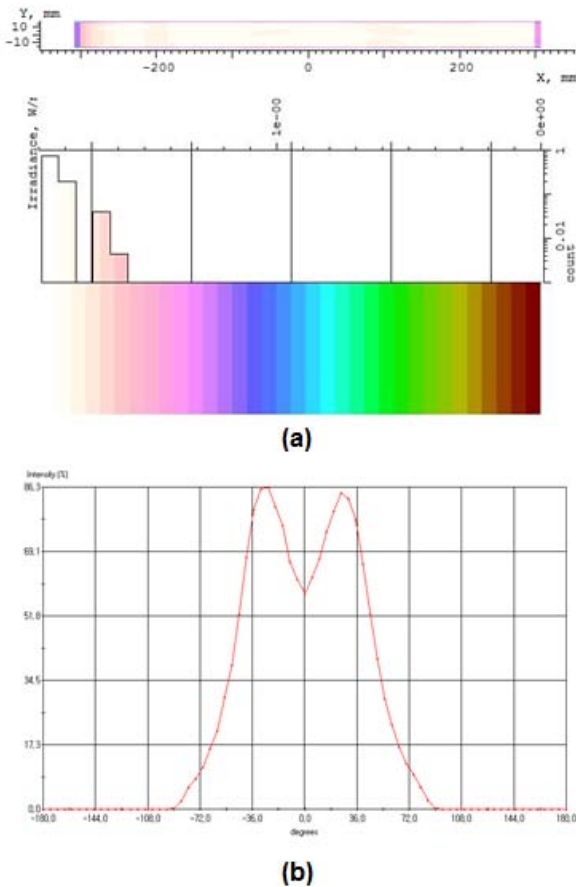


Fig. 7 Simulation result of optimized pattern shape and density (a) luminous uniformity, (b) intensity distribution

구한 뒤, 최소 평균 휘도를 최대 평균 휘도로 나눈 값으로 정의하였다. 설계한 상, 하부 패턴 형상과 패턴 밀도를 길이방향 모델링에 적용하여

참고문헌

- [1] Di Feng, Yingbai Yan, Xingpeng Yang, Guofan Jin, and Shoushan Fan, 2005, "Novel integrated light-guide plates for liquid crystal display backlight", Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Vol.7, pp.111-117
- [2] Young Chul Kim, 2008, "LGP Output Characteristics Depending in BLU Pattern Size", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.19, No.1, pp.43-47
- [3] Jee-Gong Chang, and Yu-Bin Fang, 2007, "Dot-pattern design of a light guide in an edge-lit backlight using a regional partition approach", Optical Engineering, Vol.46, No.4, 043002
- [4] Young Hyun Ju, Ji-Hee Park, Jeong Ho Lee, Ji-Young Lee, Kie-Bong Nahm et al., 2008, "Study on the Simulation Model for the Optimization of Optical Structures of Edge-lit Backlight for LCD Applications", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.12, No.1, pp. 25-30
- [5] Yun-Mi Lee, Jun Ho Lee, and Eun Chae Jeon, 2010, "A Study on an Integrated Light Guide Plate", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.21, No.2, pp. 53-60
- [6] Jung Ho Lee, Kie-Bong Nahm, Jae-Hyeon Ko, and Joong Hyun Kim, 2010, "Optimization of Optical Structure of Lightguide Panel for Uniformity Improvement of Edge-lit Backlight", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.21, No.2, pp. 61-68