

Feasibility Study of the Light-outcoupling Characteristics of a Diffraction-grating-imprinted Light-guide Plate for an LCD Backlight Unit

Hwan Young Choi[†]

*Department of Mechanical Design Engineering, Korea University of Technology and Education,
1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan 31253, Korea*

(Received April 10, 2020; Revised May 18, 2020; Accepted June 1, 2020)

The possibility of replacing the condensing-prism film used in conventional backlight units with a light-guide plate engraved with a submicrometer-periodic diffraction grating was investigated. The optimal period for the diffraction grating was determined through simulation and experiment, and the transmission-mode efficiency of the diffraction grating was calculated in terms of the polar angle and azimuthal angle of the incident light. In addition, the effects of the two methods of optimizing the polar angle and the directional angle were compared by simulation, by suggesting the shape and configuration of the light-guide plate, so that more light could be extracted by diffraction. By using a ray-tracing program, the luminance angular distribution of the light-guide plate engraved with the diffraction grating was calculated and compared to the luminance angular distribution for each actual prototype.

Keywords: Light-guide plate, Diffraction efficiency, Light extraction

OCIS codes: (120.2040) Displays; (150.2950) Illumination; (230.1950) Diffraction gratings

LCD 백라이트 유닛의 서브 마이크로 회절 격자 도광판의 광 출사 특성 연구

최환영[†]

한국기술교육대학교 기계설계공학과
☎ 31253 충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600

(2020년 4월 10일 받음, 2020년 5월 18일 수정본 받음, 2020년 6월 1일 게재 확정)

서브-마이크론 주기의 미세한 회절 격자가 새겨진 도광판을 이용하여 빛을 수직으로 출사시켜 기존 방식에서 사용하는 집광용 프리즘 필름을 대체할 수 있는 가능성에 대하여 연구하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 최적 회절 격자 주기를 결정하였고, 입사되는 빛의 고도각과 방위각에 따라 회절 격자의 투과 모드 효율을 계산하였다. 또한, 회절에 의해 더 많은 빛을 추출할 수 있도록 도광판의 모양과 구성을 제안하여 고도각과 방향각을 최적화하는 두 가지 방식의 효과를 시뮬레이션으로 비교하였다. 광선 추적 프로그램을 활용하여 회절 격자 각인 도광판의 휘도 각 분포를 계산하여 실제로 제작된 시제품의 위치별 휘도 각 분포와 비교하였다.

Keywords: 도광판, 회절 효율, 광속 추출

OCIS codes: (120.2040) Displays; (150.2950) Illumination; (230.1950) Diffraction gratings

I. 서 론

지난 10여 년간 평판 디스플레이의 상당 부분을 차지하는 LCD (liquid crystal display)는 발광형(emissive) 소자인 OLED와는 다르게 패널 뒷면에 백라이트 유닛이라고 불리는 평면 조명기구가 필요하다. 백라이트 유닛은 일반적으로 광원의 위치에 따라 두 가지 유형이 존재하는데 하나는 광원이 측면

에 설치되는 엣지-라이트(edge-lit) 백라이트 유닛이고, 다른 하나는 직하형 백라이트 유닛이다. 직하형 백라이트는 확산판 아래에 다수의 광원을 배치하여 LCD TV 또는 옥외 광고용 디스플레이 등 높은 휘도가 요구되는 제품에 사용되어 왔으며, 엣지-라이트 방식은 휴대폰, 태블릿, 노트북 PC 등, 휘도와 더불어 전력 소비도 동시에 고려해야하는 모바일 전자 기기 용도로 직하형에 비해 상대적으로 낮은 휘도 성능을 보

[†]E-mail: zauber@koreatech.ac.kr, ORCID: 0000-0002-6100-2283

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

여 왔다. 그러나 얇고 높은 효능(efficacy)의 LED의 개발로 인해 적정 소비전력으로 고휘도가 가능해진 edge-lit 백라이트는 지난 몇 년 전부터 박형(slim) TV, 곡면(curved) TV 등의 요구에 대응하여 LCD TV 백라이트 유닛에 널리 확산되어 채택되고 있다. 엣지-라이트 백라이트 유닛의 통상적인 구조는 도광판(light-guide plate) 및 하면 반사판을 포함하는 여러 개의 광학 시트와 도광판의 측면에 배치된 일련의 광원으로 구성된다. 백라이트 유닛의 기능은 LED와 같은 유사 점광원 또는 선광원으로부터 제공되는 광속(light flux)을 LCD 패널 면적과 동등한 크기의 면광원 형태로 변환하여 LCD 패널에 제공하는 조명 기구에 해당한다.

엣지-라이트 백라이트는 도광판 한쪽 측면으로부터 입사된 광속이 도광판 내 전반사에 의하여 도파로처럼 전달되어 반대측면으로 대부분 빠져나가기 때문에 도광판 표면에 미세한 형상이나 산란 패턴 또는 내부에 미세한 입자 등을 적절하게 분포하여 도광판 전면적에 걸쳐 균일하게, 그리고 손실을 최소화하여 빛이 추출되도록 하는 연구가 다수 진행되어 왔다¹¹. 또한 추출된 빛이 가능한 LCD패널에 수직으로 향하여 디스플레이 정면에서 가장 밝아 보이도록 출사 광의 방향을 제어하는 1~2장의 프리즘 형상 광학 필름이 필수 불가결하게 사용이 되고 이를 최적화하거나 도광판 표면에 가공 처리된 다양한 형상과 조합하여 광학 필름 일부를 삭제하여도 백라이트 본연의 기능은 물론 요구되는 성능에 부합되도록 하는 연구가 수행되었다^{12,31}. 최근에는 도광판 상하 표면에 가공 처리된 V 그루브와 블레이드 형상 조합으로 빛의 굴절을 제어하여 도광판 기능 복합화와 지향성 극대화로 고가의 광학필름을 모두 사용하지 않고 고효율, 고휘도 백라이트를 구현하고자 하는 연구도 진행되고 있다^{4,6}.

다른 접근법으로, 빛의 굴절이나 산란이 아닌 회절에 의하여 빛을 추출하는 원리를 이용하는 도광판을 근간으로 하는 발명^{7,81}이 소개된 이후 도광판 표면에 회절 소자를 각인하여 빛을 추출하는 연구가 수행되어 왔다. M. Parikka와 공동 연구자는 광원의 휘선을 감추기 위한 수단으로 도광판을 바둑판처럼 픽셀화하여 주기와 방향이 서로 다른 2종류의 회절 격자를 배치하고 수치 해석과 여러 번의 제작을 통하여 휘도

균일도가 도광판 길이 방향으로 80%, 폭 방향으로 완벽한 성능을 보이는 바둑판 조합을 찾아내었다⁹¹. 확산 필름을 대신하는 용도로는 만족하는 결과를 보이고 있으나 최고 휘도와 효율에 대해서는 언급되지 않았고 연구에 사용된 광원은 백색광이 아닌 좁은 대역의 LED라서 풍부한 색상을 표현해야 하는 디스플레이의 백라이트로는 제한적이다. 이후 여러 연구자들에 의하여 수치 해석과 실제 제작 실험을 통하여 적합한 회절 격자의 주기와 깊이, 형상 등에 대한 연구가 진행되었고 회절의 본질적인 문제점인 갈라 분산을 극복하는 방법이 제안되었으나 아직 낮은 출광 효율에 따른 저휘도를 극복하는 연구들은 미흡한 편이다¹¹⁰⁻¹⁵¹.

그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 일반적인 백라이트 유닛은 도광판에서 출사된 빛이 LCD패널 정면에 집광되도록 2장의 광학필름을 필요로 하는데, 그림 1(b)에서와 같이 회절 격자에 의해 빛이 패널에 수직으로 출사된다면 프리즘 필름은 없는 상태로 백라이트 유닛 구성이 가능하게 된다. 그러나 회절에 의한 투과 모드 효율은 지금껏 낮은 것으로 알려져 있어, submicron grating이 각인된 도광판의 이론적 분석과 모델링 수단을 구축하여 출사광 극대화를 위한 몇 가지 형상을 제안하고 비교분석을 통하여 종래의 기술을 대체 가능하도록 최적의 형상을 제안하는데 본 연구의 목적이 있다.

II. 설 계

2.1. 회절 격자 설계

회절 격자의 입사각과 출사각은 다음과 같이 회절 차수 및 파장과 격자 주기의 함수로 정의된다. 여기서 n 은 두 매질의 굴절률이고 그림 2에서와 같이 입사각과 출사각은 3차원 공간에서 고도각(θ)과 방향각(ϕ)으로 세분화되어 표현된다¹⁵¹.

$$n_i \sin\theta_i \cos\phi_i - n_t \sin\theta_t \cos\phi_t = \frac{m\lambda}{\Lambda} \tag{1}$$

회절 격자를 사용하는 궁극적인 목적은 도광판 내부의 빛을 추출하여 패널에 수직 방향으로 향하도록 하는 것이므로

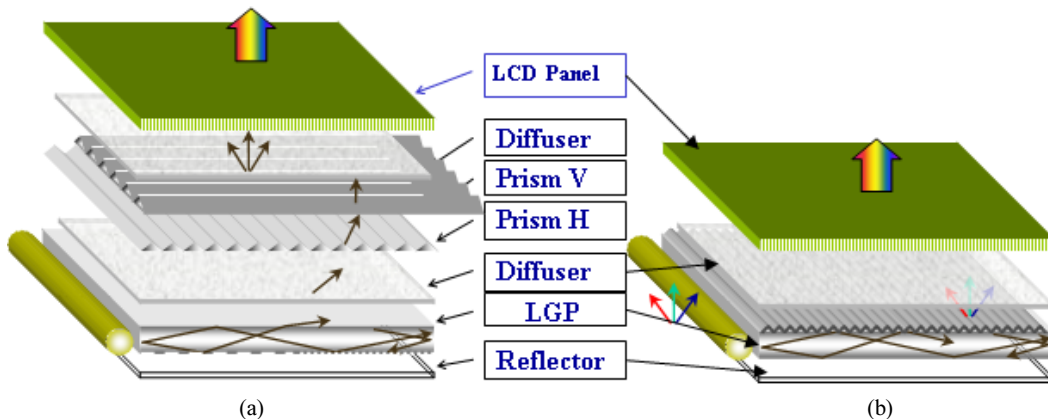


Fig. 1. Schematic picture of (a) conventional vs (b) diffractive light-guide plate.

$\theta_i=0^\circ$ 로 놓을 수 있다. 또한 초기 모델링 단순화를 위하여 방향각을 $\phi=0^\circ$ 로 제한하고 회절 차수 또한 $m=-1$ 로 한정하면 아래 식 (2)와 같이 간략화된 식을 구할 수 있다. 여기서 n_i 는 보통 투명한 폴리머 재료의 굴절률이고 λ 는 사용하는 광원의 중심 파장이므로 식 (2)로부터 대표 입사각이 정해지면 특정한 주기를 갖는 회절 격자의 투과 모드로 출사되는 빛은 패널에 수직인 $\theta_t=0^\circ$ 이 된다고 볼 수 있다. 도광판 내부에서 회절 격자에 입사하는 고도각은 전반사 임계각과 90° 사이에 있을 것으로 추정되지만, 대표각을 이론적으로 구하는 것은 불가능하므로 여러 종류의 주기가 다른 회절 격

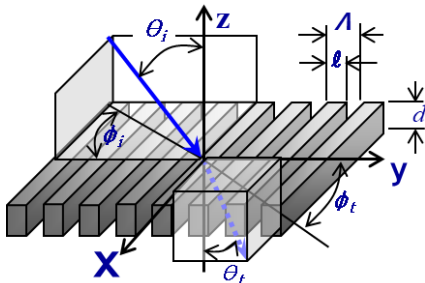


Fig. 2. Incident and out-coupling angle represented in terms of polar angle (θ) and azimuthal angle (ϕ) in the transmission mode.

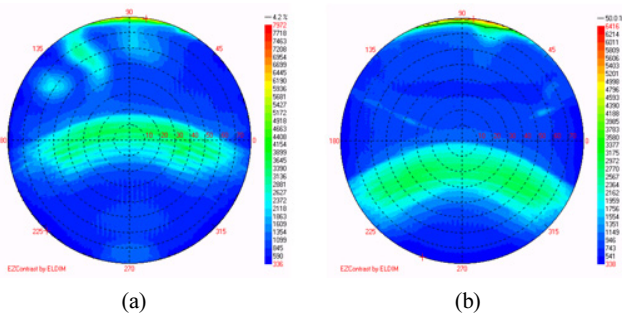


Fig. 3. Results of preliminary experiment to investigate the angular luminance distributions of the light flux coming from different grating period of (a) $0.43 \mu\text{m}$ and (b) $0.36 \mu\text{m}$.

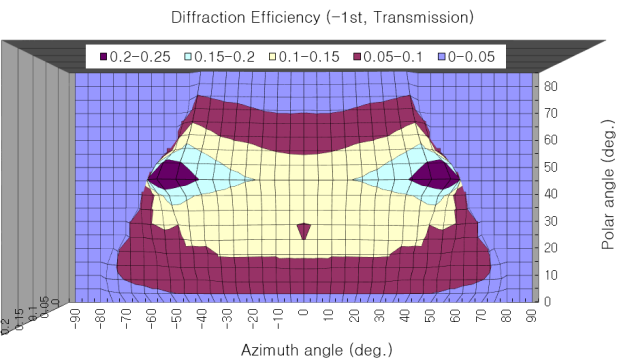


Fig. 4. Diffraction efficiency of -1st-order transmission light according to the incident angle of θ and ϕ averaged over three wavelengths (460 nm, 540 nm, 620 nm) and two polarization states (TE & TM) at grating depth $0.25 \mu\text{m}$.

자를 제작하여 어느 주기에서 수직방향으로 출사하는지를 실험적으로 확인한 결과 $0.43 \mu\text{m}$ 에서 수직(정면)으로 출사하고 이보다 작은 주기에서는 아래로, 큰 주기에서는 윗 방향으로 출사됨을 확인하였다. 그림 3에서와 같이 $\lambda=532 \text{ nm}$ 에 대하여 $0.43 \mu\text{m}$ 주기(a)의 회절 격자가 $0.36 \mu\text{m}$ 주기(b)의 경우보다 더 많은 광속이 $\theta=0^\circ$ 방향인 정면으로 출사하는 것을 확인할 수 있다. 주기가 결정되면 식 (2)로부터 대표 입사각은 55° 가 됨을 알 수 있다.

$$-n_i \sin\theta_i = \frac{-\lambda}{\Lambda} \tag{2}$$

특정한 주기로 제작된 회절 격자에 빛이 도달하면 일부는 투과하여 추출되지만 대부분은 반사 또는 전반사되고 투과되는 빛도 TE, TM 모드로 나뉘어 입사각과 파장에 따라 효율이 달라진다. 따라서 고도각과 방향각에 따른 효율 특성을 3개의 파장(460 nm, 540 nm, 620 nm) 각각에 대하여 구한 효율을 평균하여 고도각과 방향각으로 나타내면 그림 4와 같이 표현된다^{16,17}.

계산 결과에서 볼 수 있듯 고도각 45° , 방향각 45° 에서 20~25%로 투과 모드로 출사되는 효율이 최대값을 보이고 고도각 75° 이상, 방향각 70° 이상에서는 5% 미만의 효율을 보이고 있다. 이러한 범위로 입사되는 광은 추출에 회절 격자의 기여도는 미미함을 알 수 있다. 측면에 설치된 광원으로부터 제공되는 빛의 분포는 일반적으로 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 이고 특히 $\theta=90^\circ$ 에서 최고 광속을 보이고 있어 회절 격자에 입사하는 각도를 적절하게 제어해야할 필요성이 있다.

2.2. 도광판 설계 및 최적화

도광판 내부에서 격자에 입사되는 고도각을 변경시키는 방법은 도광판의 단면을 테이퍼각을 갖는 썸기 모양으로 설계하는 방법과 그림 5와 같이 광원의 반대 측에 테이퍼각을 갖는 거울을 설치하여 변경하는 방법이 있다. 기존의 백라이트에서는 썸기 형태의 도광판을 사용하는 경우가 많지만, 회절 격자를 각인하는 가공의 용이성을 감안하여 본 연구에서는 평판 도광판을 사용하고 테이퍼 미러를 배치하여 출사량과 균일도가 최적화되도록 테이퍼 미러 각도를 구하였다. 광선 추적 기법을 활용하여 각 경우에 대해 그림 6(b)와 같이 동

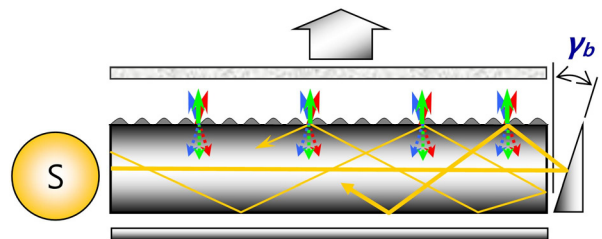


Fig. 5. Polar angle correction method: Flat plate with a taper mirror.

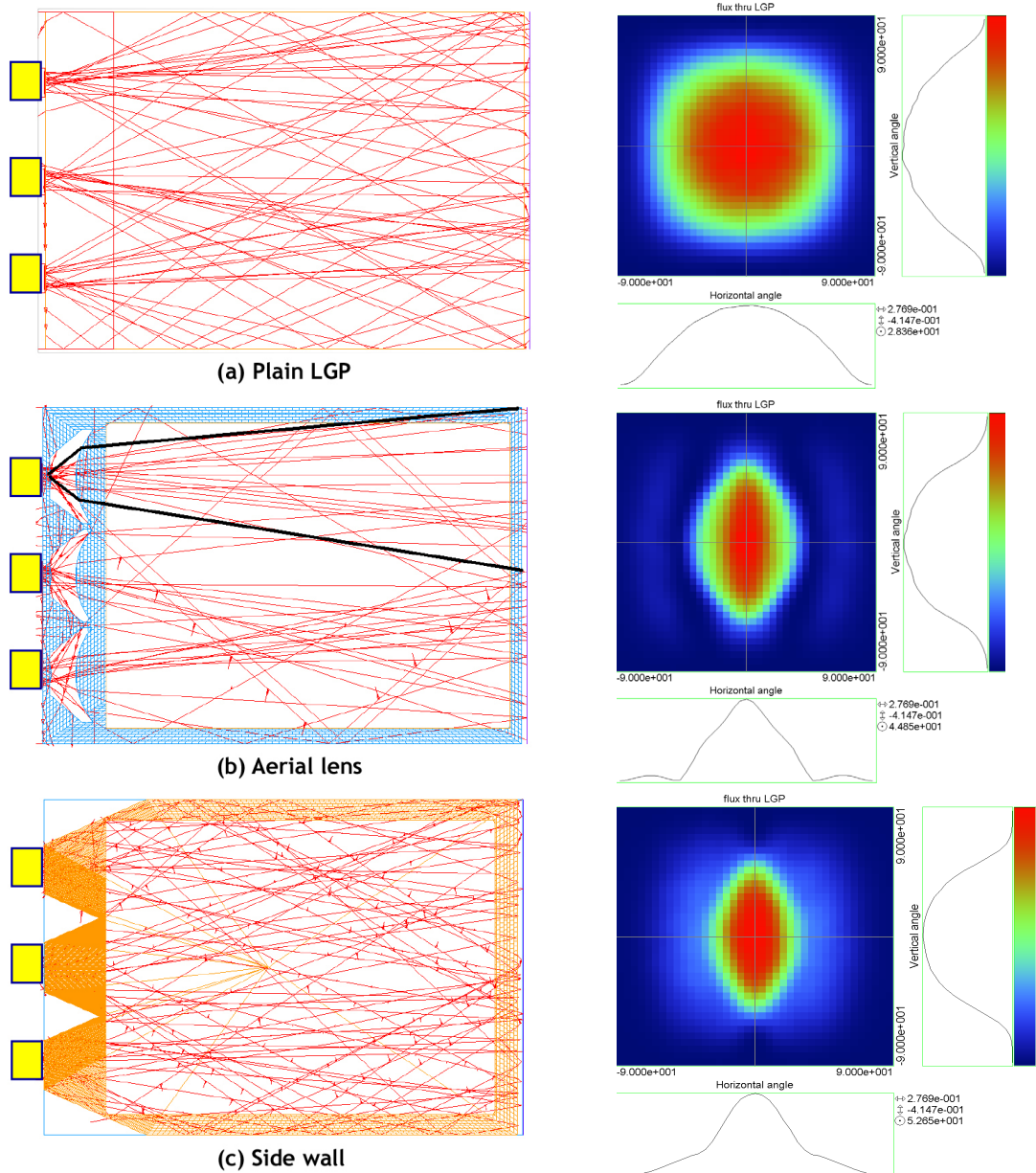
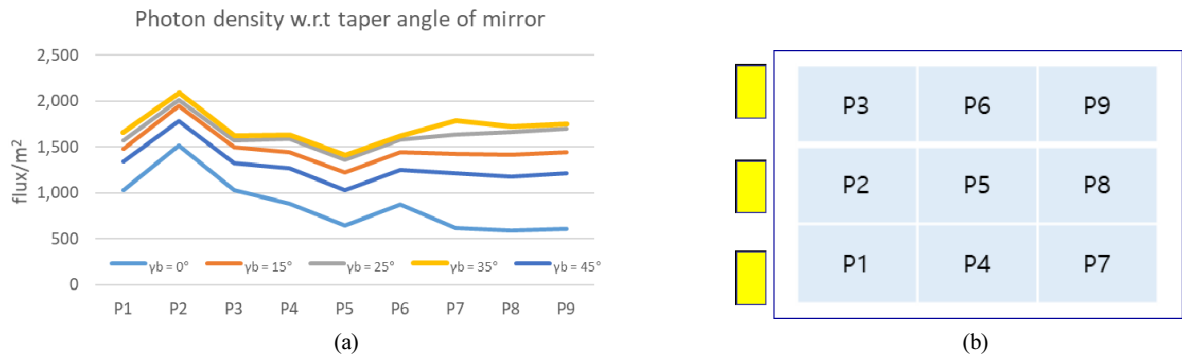


Fig. 7. Azimuthal angle correction: Angular distribution changes due to ϕ correction by implementing an optical structure in front of the light source (left) and each luminous flux of measuring region (right).

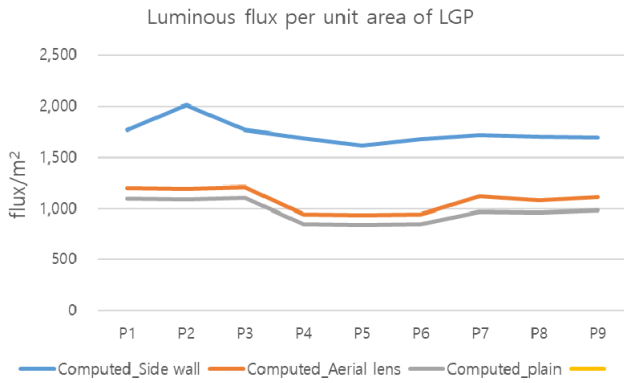


Fig. 8. Luminous flux per unit area of the light-guide plate (LGP).

Table 1. Luminous flux and uniformity

	Max	Min	Mean	Uniformity
Plain light-guide plate (LGP)	1,108	835	971	75.4%
Aerial lens implemented	1,206	935	1,082	77.4%
Side reflector wall LGP	2,009	1,617	1,739	80.5%

일한 9개의 위치에서 측정된 출사 광속 밀도(flux/m²)를 그림 6(a)에서 보여주고 있다. 반사 미러의 테이퍼 각도가 $\gamma_b = 35^\circ$ 일 경우에 측정위치별 광속 밀도 평균은 1,696 flux/m²로 출사량이 최대가 되고 최소값/최대값으로 정의되는 균일도는 68%를 보이고 이후 각도가 45°로 커지면 출사량 및 균일도가 감소하는 결과를 보이고 있다. 반사 미러 설치에 의한 부차적인 효과로 그림 3에 나타난 좌우 꼬리가 내려간 형태의 초승달 모양에 대해 반사 미러에 의해 재입사된 빛은 좌우 꼬리가 올라간 형태의 패턴을 만들어 내므로 상호 보완을 통해 정면 휘도 향상에 기여하는 효과가 있다.

한편 출사 효율 측면에서 고려해야 할 한 가지 사항은 입사하는 광의 방향각을 제어하는 것으로, 앞선 그림 4에서 보여주는 것과 같이 고도각 10°인 경우는 70° 이후, 고도각 75°인 경우는 45°보다 큰 방향각으로 입사하는 광의 출사 효율이 5% 미만으로 저하되기 때문에 광원의 방향각이 가능하면 높은 효율 범위인 $\phi < 50^\circ$ 에 들어가도록 보정할 필요가 있다.

그림 7에서 볼 수 있듯, 방향각 보정을 위하여 제안된 (b)와 (c) 두 가지 방식에 대하여 방향각 보정이 없는 (a) 경우와 입사광의 FWHM을 비교하면 (c)의 경우의 방향각이 더 좁은 범위로 보정되는 것을 알 수 있다. 또한 도광판 3종류에 대해 측정 위치별 luminance flux와 전구간의 uniformity는 각각 그림 8과 표 1에 나타나 있다.

III. 시뮬레이션 결과 및 토의

LED 광원으로부터 공급된 광은 도광판의 측면에 입사하여, 회절 격자가 인쇄되어 있는 도광판의 상면에서 수직 방향으로 출사된다. 회절 격자에서 투과 모드 효율이 상대적으로 높은 범위로 가능한 한 많은 광속이 입사되도록 고도각과

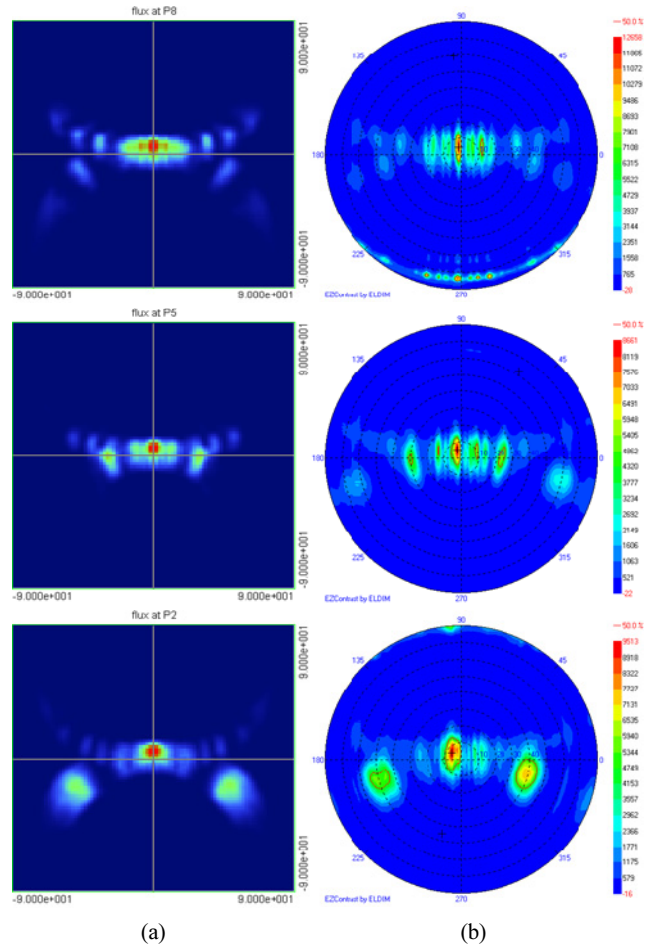


Fig. 9. Luminance angular distribution: (a) computational and (b) experimental results.

방향각을 보정한 도광판을 제작하여 측정된 휘도 분포와 광선 추적 기법으로 계산된 결과와 비교하였으며, P1~P9로 구분된 도광판 전면적의 9개소에서 동일하게 출사되는 빛의 각 분포를 비교하였고 그중 일부를 그림 9에 표현하고 있다.

계산 결과와 실험 결과 모두 패널의 정면에 해당하는 중심에서 최고 휘도를 보이고 있어, 출사 효율 증대를 위해 고도각과 방향각을 보정한 도광판이 $\theta = 0^\circ$ 인 수직 방향으로 가능한 많은 빛이 출사되도록 역할을 잘 수행하고 있다고 볼 수 있다. 그림 10과 같이 수평과 수직 성분을 나누어 계산 결과와 측정 결과를 비교하면 (a)에서 볼 수 있듯이 세 개의 봉우리는 주로 도광판의 한쪽 모서리와 함께 위치한 3개의 LED 광원에 의해 발생함을 알 수 있고 계산 결과는 전 시야각 범위인 $-80^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ 에서 실험에서 구한 측정값과 잘 일치하며 (b)에서도 마찬가지로 빛은 패널의 정면 방향인 수직으로 출사하고 있으며 실험결과와 잘 일치하고 있음이 확인되었다. 출사 광량을 측정하는 실험 장치는 그림 11에 나타난 것과 같고 angular luminance 측정에는 ELDIM EZContrast160이 사용되었다.

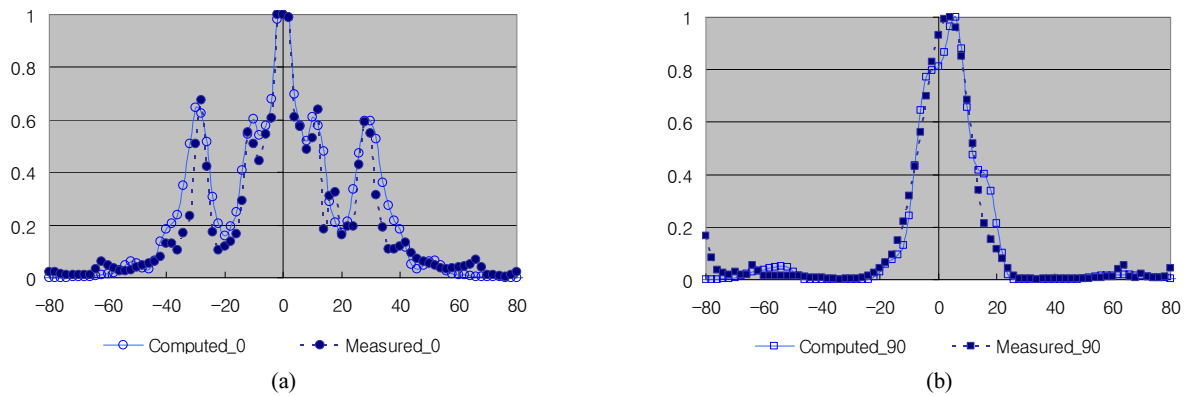


Fig. 10. Computational and experimental results of the luminance angular distribution of an imprinted light-guide plate at P5 region. (a) $\phi = 0^\circ$. (b) $\phi = 90^\circ$.

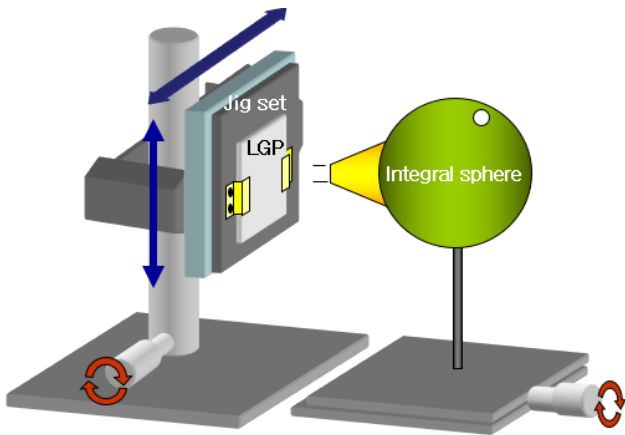


Fig. 11. Photometric apparatus for measuring the out-coupling luminous flux.

IV. 결 론

서브-미크론 주기의 미세한 회절 격자가 새겨진 도광판으로 빛을 수직으로 출사시킬 수 있는지를 확인하는 연구를 수행하였다. 회절 격자의 주기는 실험 및 시뮬레이션을 통해 결정하였고 회절 격자의 투과 모드 효율은 입사되는 빛의 고도각과 방위각에 따라 계산되었다. 또한 회절에 의해 더 많은 빛을 추출할 수 있도록 광원의 반대 측에 반사 거울을 설치하여 고도각을 교정하였고 광원 측에는 방향각을 제한하는 두 가지 방식에 대하여 효과를 시뮬레이션으로 비교하였다. 최종적으로 광선 추적 프로그램을 활용하여 회절 격자 각인 도광판의 휘도 각 분포를 계산하여 실제로 제작된 시제품의 위치별 휘도 각 분포와 비교하여 연구 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 추출 효율 증대를 위해 설치한 반사 미러의 테이퍼 각도는 $\gamma = 35^\circ$ 에서 최대의 효율을 보인다.
- 2) 광원의 방사 방향을 제한하는 방안으로 side reflector 방식이 aerial lens 형상이 가공된 도광판보다 출광량 및

uniformity 측면에서 우수하다.

- 3) 회절 격자가 각인된 도광판의 휘도 각 분포를 예측한 시뮬레이션 결과는 실제 실험 결과와 잘 일치하여 향후 도광판 형상 설계에 활용이 기대된다.

본 연구를 통하여 출사 광량이 극대화되도록 적절하게 형상이 제안된 회절 격자가 새겨진 도광판은 수직 방향으로 빛을 추출할 수 있어 기존방식 백라이트에서 필수적으로 사용되는 광학필름을 배제할 가능성을 확인하였다. 그러나 현재 수준으로는 기존 방식에 대해 uniformity 성능이 동등 이하 수준으로 이에 대한 개선이 필요하고 면광원으로 역할을 위해서는 색 수차 성능에 대한 연구가 요구되고 있어 후속연구를 통하여 보다 향상된 결과를 기대한다.

References

1. S. H. Park, E. S. Choi, S. Y. Ahn, and Y. J. Shin, "Research trends in light guide plates for LED backlight units," *Korean J. Opt. Photon.* **28**, 314-326 (2017).
2. K. Kälántár, "Modified functional light-guide plate for back-lighting transmissive LCDs," *J. Soc. Inf. Disp.* **11**, 641-645 (2003).
3. S. Aoyama, A. Funamoto, and K. Imanaka, "Hybrid normal-reverse prism coupler for light-emitting diode backlight systems," *Appl. Opt.* **45**, 7273-7278 (2006).
4. J.-W. Pan and C.-W. Fan, "High luminance hybrid light guide plate for backlight module application," *Opt. Express* **19**, 20079-20087 (2011).
5. C.-Y. Li and J.-W. Pan, "High-efficiency backlight module with two guiding modes," *Appl. Opt.* **53**, 1503-1511 (2014).
6. R. Zhang, "Directional backlighting system using a light guide with paired microstructures," *Appl. Opt.* **56**, 6735-6741 (2017).
7. S. Ochiai, "Light guide plates and light guide plate assembly utilizing diffractive grating," U.S. Patent 5703667A (1997).
8. M.-G. Lee, H.-Y. Choi, J.-S. Choi, and J.-H. Min, "Backlight using planar hologram for flat display device," U.S. Patent 7253799B2 (2007).

9. M. Parikka, T. Kaikuranta, P. Laakkonen, J. Lautanen, J. Tervo, M. Honkanen, M. Kuittinen, and J. Turunen, "Deterministic diffractive diffusers for displays," *Appl. Opt.* **40**, 2239-2246 (2001).
10. J. H. Min, H. Y. Choi, M. G. Lee, J. S. Choi, J. H. Kim, and S. M. Lee, "Holographic backlight unit for mobile LCD devices," *J. Soc. Inf. Disp.* **11**, 653-657 (2003).
11. A. K. Aristov, V. V. Novoselskii, G. B. Semenov, T. V. Shchedrunova, H.-K. Sohn, and M.-B. Yu, "Holographic diffraction grating for side lighting of liquid-crystal displays," *J. Opt. Technol.* **70**, 480-484 (2003).
12. H. Y. Choi and Y. P. Park, "Design and analysis of diffractive grating imprinted light-guide plate for LCD illumination," *J. Inf. Disp.* **5**, 7-15 (2004).
13. S. R. Park, O. J. Kwon, D. Shin, S.-H. Song, H.-S. Lee, and H. Y. Choi, "Grating micro-dot patterned light guide plates for LED backlights," *Opt. Express* **15**, 2888-2899 (2007).
14. Y. Ye, D. Pu, Y. Zhou, and L. Chen, "Diffraction characteristics of a sub-micrometer grating for a light guide plate," *Appl. Opt.* **46**, 3396-3399 (2007).
15. J. Kimmel, "*Review Paper*: Diffractive backlight technologies for mobile applications," *J. Soc. Inf. Disp.* **20**, 245-258 (2012).
16. P. Lalanne and G. M. Morris, "Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization," *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 779-784 (1996).
17. S. Peng and G. M. Morris, "Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 1087-1096 (1995).