

간단한 지수함수를 패턴 밀도 함수로 이용한 LGP 패턴 설계

김영철[†] · 김대욱 · 오태식 · 이용민 · 안승준 · 김호섭

선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과
☎ 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

(2010년 3월 3일 받음, 2010년 4월 15일 수정본 받음, 2010년 4월 19일 게재 확정)

전산모사를 통하여 LGP 출력 분포를 조절할 수 있는 패턴 밀도 함수를 찾고 그 효과를 조사하였다. 패턴 밀도 함수, 즉 패턴 간격은 $[P\exp(-y/70) + Q\exp(+y/25)]R$ 로 조사되었다. 이 함수를 이용하여 패턴의 간격을 조절하는 방식으로 반구형 패턴이 장착된 도광판을 설계하여 도광판 출력 분포를 분석한 결과 출력 분포가 등간격 패턴에 의한 출력 분포에 비하여 확연히 개선되는 것을 확인하였다. 또한 이 함수를 피라미드 패턴에 적용하여 도광판의 출력을 조사하였는데, 반구형 패턴의 경우와 마찬가지로 출력 분포가 개선되는 것을 확인하였다.

LGP Pattern Design by Using a Pattern Density Function with Simple Exponential Function

Young Chul Kim[†], Dae-Wook Kim, Tae-Sik Oh, Yong-Min Lee, Seungjoon Ahn, and Ho-Seob Kim

Department of Information Display, Sun Moon University, 100 Kalsan-ri, Tangjeong-myeon, Asan 336-708, Korea

(Received March 3, 2010; Revised manuscript April 15, 2010; Accepted April 19, 2010)

A pattern density function using simulation analysis for controlling LGP output distribution was proposed. The pattern density function was found as $[P\exp(-y/70) + Q\exp(+y/25)]R$. We analyzed the LGP output distribution of a hemi-sphere pattern using the function and then found that its output distribution was clearly improved as compared with that of the equi-distance pattern. We found that the density function works well for the pyramid pattern case as well as.

Keywords: TFT-LCD, BLU, LGP, Pattern density function

OCIS codes: (120.2040) Displays; (080.0080) Geometric optics; (350.0350) Other areas of optics

I. 서 론

TFT-LCD (Thin Film Transistor Liquid Crystal Display)의 BLU(Back Light Unit)는 그림 1과 같이 광원(Light Source), 도광판(Light Guide Plate), 확산시트(Diffusion Sheet), 프리즘시트(Prism Sheet), 그리고 반사판(Reflector) 등으로 이루어져 있다. 그림 1에서 보여주는 바와 같이 광원으로부터 도광판으로 입사된 빛은 도광판을 따라 전반사되어 수평방향(y-축 방향)으로 진행하다 도광판에 가공된 패턴에 의해 반사, 굴절되어 수직방향(z-축 방향)으로 배출된다. 도광판으로부터 나온 빛은 확산시트를 거치면서 여러 방향으로 퍼져서 출력면의 휘도 균일도를 향상시키고, 다시 프리즘시트를 거치면서 z-축 방향으로의 방향성이 개선되어 디스플레이 면에서의 휘도를 증가시킨다.

일반적으로 기업체나 학교 등에서 BLU의 도광판 패턴 설계를 하는 경우, 각자 경험적으로 얻은 패턴 설계 프로그램을 사용하거나 상업용 패턴 설계 프로그램을 사용한다. 상업용 프로그램은 그 가격이 만만치 않고, 상업용 프로그램이 아닌 경험적으로 얻은 패턴 프로그램을 사용하는 경우 빠르게 변하는 다양한 제품 설계에 대처하는데 있어 어려움이 있다. 이에따라 신속한 설계에 적합한 기술들이 연구되고 있다. 다양하게 적용할 수 있는 패턴 설계 최적화 프로세스 연구^[1-2], 다항식을 이용하여 구간별 패턴 밀도를 조절하는 방식으로 패턴 설계 최적화 연구 등이 시도되었다.^[3] 본 연구에서는 도광판 내부의 광세기 분포를 분석함으로써 각 모델에 맞도록 상수만을 조절함으로 도광판 패턴을 설계할 수 있는 패턴 밀도 함수를 찾고자 시도하였다.

[†]E-mail: yckim@sunmoon.ac.kr

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

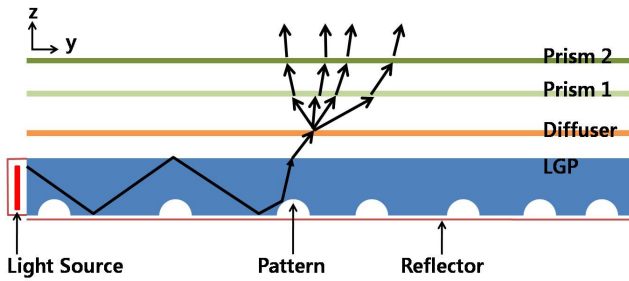


FIG. 1. Conceptual description of the BLU.

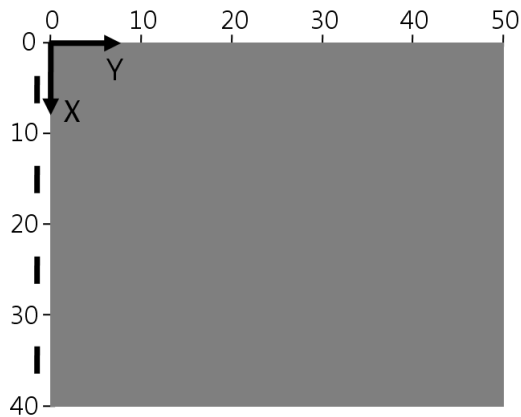


FIG. 2. Simulation model.

II. 전산모사를 이용한 분석

전산모사를 통해 도광판 출력 특성을 분석하기 위하여 SPEOS (OPTIS, France)를 활용하였다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 40 mm × 50 mm × 1 mm 크기의 도광판을 기본구조로 채택하였으며, 도광판의 각 면은 반사, 투과, 흡수가 Fresnel 법칙을 따르는 “Optical Polished Surface”로 채택하였다. 그림 1에 제시된 좌표계에서 광원은 y = -2.0 mm 위치에 0.6 mm × 3 mm 크기의 네 개의 LED(Light Emitting Diode)가 각각 x= 5, 15, 25, 35 mm 위치에 놓여있고, 빛은 +y 방향으로 550 nm 단색광을 Lambertian 형태로 100만개 광선이 방출되도록 하였다. 또한 주위에 100% 반사판을 설치하여 광원에서 방출된 광선은 모두 도광판 내부로 진입하도록 하였다. 도광판은 PMMA를 가정하여 굴절율 1.49, 광흡수율은 1.70×10⁻³/mm 으로 설정하였다.

앞에서 언급한바와 같이 광원으로 LED 네 개를 광원으로 채택하였다. 과거에는 제품의 단가를 낮추고 충전 후 사용시간을 늘리기 위하여 LED 개수를 줄이기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔으나, 현재는 디스플레이 화면이 넓어지고 배터리의 기술개발에 의하여 충전 용량이 커짐으로 인하여 LED 개수를 줄이는 것에 대한 중요성이 많이 희석되고 있다. 이에 따라 본 연구에서 광원으로 LED 네 개를 채택한 것은 세 개를 채택한 것 보다는 x-방향으로의 세기 균일도 향상 측면에서 좀 더 유리하고 출력이 보다 강하기 때문이다.

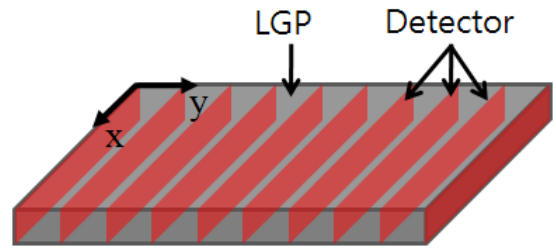


FIG. 3. Detectors installed inside the LGP.

2.1. LED에 의한 도광판 내부 조도 변화

LED로부터 도광판에 입사된 빛이 도광판을 지날 때 세기(illuminance) 감소에 영향을 주는 각각의 효과를 고려하는 것은 쉽지 않을 뿐만 아니라 이들 효과가 동시에 발생할 때, 각각의 효과로부터 전체 효과를 예측하는 것이 사실상 불가능하다. 따라서 복합적인 효과를 분석하여 이를 패턴 설계에 적용해야 한다. 체계적으로 패턴 조절을 하기 위하여 복합적인 효과에 의한 도광판 내부에서의 세기 분포를 분석하고 이에 적합한 세기 분포 함수를 찾는 것이 필요하다. 패턴 간격 조절함수를 찾기 위하여 그림 3과 같이 도광판 내부에 디텍터를 5 mm 간격으로 y-방향에 수직하게 설치하여 각 지점에서의 illuminance를 계산하였다.

그림 4(a)는 LED에서 방출된 빛이 도광판 내부에서 진행하는 특성을 분석하기 위하여 도광판에 음각으로 가공된 직경이 50 um인 반구형 패턴을 등간격으로 배치하여 계산한 도광판의 출력 분포이다. 이 계산에서는 LED를 둘러싸도록 반사판을 설치하였으며, 도광판에는 패턴이 가공된 밀면(z=-0.55 mm)과 옆면(x=0, 40 mm)에 반사판을 설치하고 앞면(y=50 mm)에는 반사판을 설치하지 않았다. 이는 LED 만에 의한 출력 특성을 조사하기 위한 것으로, 반사판에 의한 효과는 뒤에서 별도로 언급할 것이다. 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 LED에 의한 입력 부분이 밝고 앞으로 진행할수록 어두운 것을 확인할 수 있다. 또한 네 개의 LED를 사용하였는데 LED가 설치된 곳이 그대로 드러나 보인다.

광원으로부터 방출된 빛이 도광판(LGP)을 따라 진행하는 동안 점점 빛의 세기가 약해지는데, 이는 도광판에 의한 흡수, 패턴에 의한 출력면으로의 방출, 그리고 패턴에 의하여 반사된 빛의 도광판 내부에서 방향전환과 같은 효과들이 복합적으로 작용한 결과이다. 따라서 도광판 출력면 전체의 휘도 균일도를 높이기 위해서는 앞에서 언급한 여러 조건에 의한 빛의 세기 감소 효과를 적절히 반영하여 패턴의 간격을 조절하여야 한다.

그림 4(b)는 그림 3에 제시된 각 디텍터면에서 계산된 도광판 내부의 illuminance 이다. 그래프의 사각형 점들은 그림 4의 각 디텍터에서 측정된 세기를 나타낸 것으로, y가 증가함에 따라 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 도광판 내부에서 흡수와 LGP 밀면에 설치된 패턴에 의한 반사 및 굴절로 인하여 도광판에서 배출된 결과이다. 실선은 측정 결과를 지수함수로 fitting한 것이다.

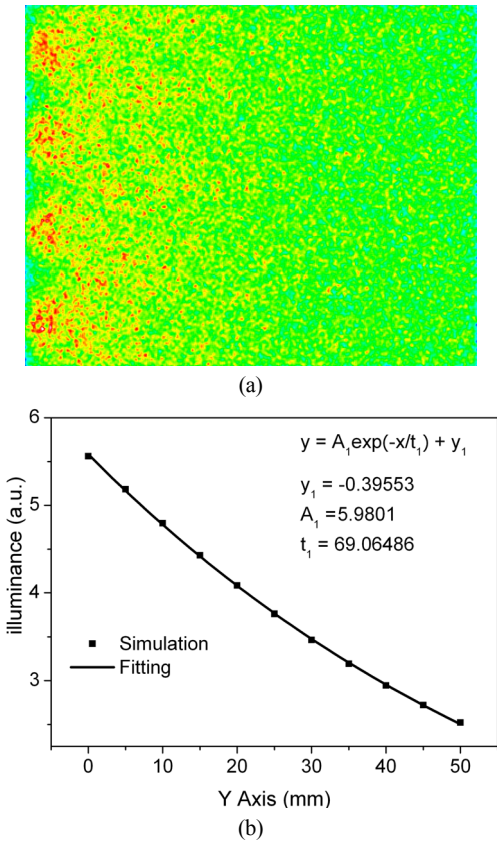


FIG. 4. (a) LGP output illuminance distribution on the $z=0.6$ mm surface and (b) LGP inside illuminance along the y -axis for equidistance hemisphere pattern.

Fitting 함수는

$$Ae^{-y/B} + C \quad (1)$$

로 상수 A 와 C 는 초기 조건 즉, LED의 출력(경계 조건 즉, LED의 출력, 반사판의 반사율, 도광판의 구성 물질 등의 변수)에 좌우되는 값이다. 즉 전산모사 초기 조건에 달라질 수 있는 상수이다. 도광판 내부에서의 광 분포 특성을 보여주는 상수는 B 이다. 반구 패턴이 등간격으로 장착된 도광판 내부의 illuminance는 그림 4(b)에서 보여주는 바와 같이 y 가 증가함에 따라 $\exp(-y/69)$ 식에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

2.2. 반사판에 의한 출력 효과

LED에서 방출된 빛은 도광판 내부로 입사되어 도광판을 따라 y -방향으로 진행한다. 도광판 끝부분, $y=50$ mm 지점에 반사판을 설치한 경우, 이 곳에 도달한 빛은 도광판을 빠져 나가지 못하고 반사판에 의하여 반사된 후 다시 방향을 바꾸어 도광판 내부로 되돌아온다. LED가 유일한 광원이지만 이 반사판이 제2의 광원 역할을 하는 것이다. 따라서 패턴 간격을 조절함에 있어 반사판의 효과를 고려해야만 도광판 출력 분포를 적절히 조절할 수 있다.

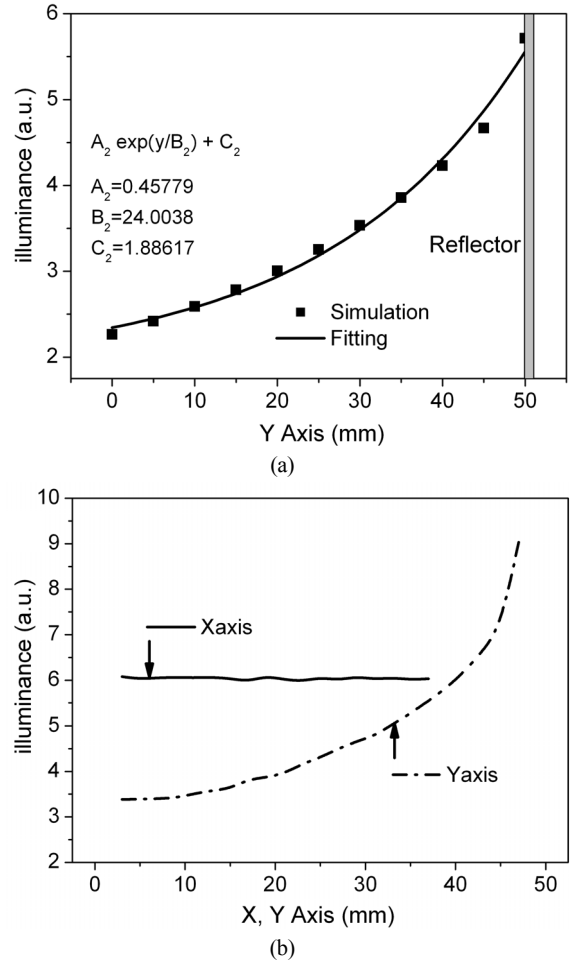


FIG. 5. Illuminance distribution for hemisphere pattern (a) along y -axis in the LGP (b) along x - and y -axis on the $z=0.6$ mm plane.

LED 반대편에 설치된 반사판에 의한 효과를 분석하기 위하여 등간격으로 가공된 패턴을 갖는 도광판의 각면에 반사판을 설치하고 LED 반대편의 반사판 전체를 광원으로 설정하였다. 이는 반사판에 도달한 빛이 되반사되는 효과를 알아보기 위한 것이다. 이에 대하여 그림 3에 의한 도광판 내부에서의 조도와 출력 분포를 각각 그림 5(a)와 (b)에서 제시하였다. 그림 5(a)에서 보여주는 바와 같이 $y=50$ mm로부터 y 가 감소함에 따라 세기가 $\exp(+y/24)$ 식에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이는 도광판이 작거나 도광판 밑에 가공된 패턴이 피라미드 모양인 경우에도 같은 결과를 보여준다.^[4] 그림 5(b)는 도광판 출력면(도광판으로부터 0.1mm 위 x - y 평면)에서 x -축 및 y -축에 따른 조도 분포이다. 도광판 내부에서와 유사한 분포를 확인할 수 있다.

여기서 그림 4(b)는 $\exp(-y/69)$ 로 그림 5(b)는 $\exp(+y/24)$ 로 변화를 보이는데, 전자는 LED에서 방출된 빛이 $(+y)$ 방향으로 진행하면서 세기가 약해지고 후자는 반사판에서 반사된 빛이 $(-y)$ 방향으로 진행하면서 세기가 약해짐을 의미한다.

2.3. LED와 반사판에 의한 출력 효과

위의 결과를 종합하면, LED에 의한 방출과 반사판에 의하여 반사현상을 포함하는 조도 분포는

$$[P \exp(-y/70) + Q \exp(+y/25)]R \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다. 도광판 내부의 조도 분포는 도광판에 가공되는 패턴밀도와 관련이 깊다. 조도가 강한 부분은 패턴 간격을 늘려 패턴 밀도를 줄이고, 반대로 조도가 약한 부분은 패턴 간격을 좁혀 패턴 밀도를 증가시켜야 도광판 출력의 균일도가 향상된다. 따라서 식 (2)는 도광판에 가공될 패턴 간격 분포 함수인데, 이후에는 식 (2)를 “패턴밀도함수”라고 부르기로 한다.

여기서 지수를 69와 24로 적용하지 않고 70과 25로 적용한 것은 지수의 작은 변화가 출력 분포에 크게 영향을 주지 않기 때문에 편의상 이와 같이 표기하였다. 이 값이 크면 패턴 간격이 완만하게 변하고, 반대로 이 값이 작으면 패턴 간격이 비교적 급격히 변한다. 따라서 패턴 설계 시, 모델과 상황에 따라 이 값들은 약간씩 변화를 줄 수 있다.

또한 분석 결과에 의하면 지수 70과 25의 차이는 광원이 도광판 외부에 있는지 아니면 내부에 있는지에 의하여 결정된다. 즉 LED가 도광판 밖에 위치하고 있고, 반사판은 도광판 끝(y=+50 mm)에 설치하였기 때문에 지수의 차이가 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 새로운 모델에 식 (2)를 적용하는 경우, LED의 크기나 위치에 관계없이 모델의 조건에 따라 지수 70과 25를 약간씩 조절하여 패턴을 설계할 수 있을 것으로 보인다.

그림 6에 패턴이 등간격으로 이루어진 경우와, LED에 의한 감소만을 고려하여 설계한 경우, 그리고 LED와 반사판에 의한 효과를 모두 고려한 패턴 밀도 함수를 적용한 각각의 경우에 패턴 사이의 간격 변화를 사각형, 원, 그리고 삼각형으로 나타내었다. 패턴 밀도 함수는 y-축에 따라 감소하다가 끝부분에 가면 다시 올라가는데 이는 LED로부터 방출된 빛의 세기가 감소하다가 끝에 있는 반사판에 의하여 빛이 되반사 하여 그림 6의 삼각형 분포와 같이 도광판 출력 분포에

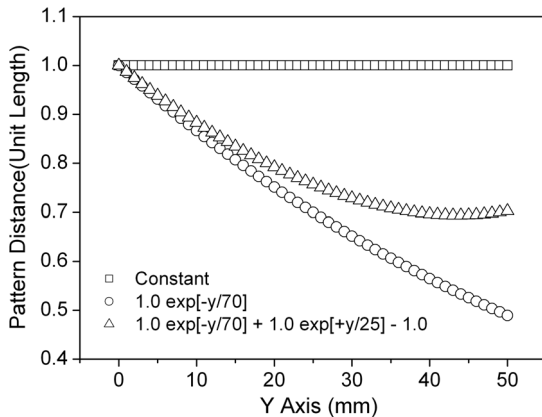


FIG. 6. Comparison of pattern density functions.

있어 끝부분이 중간보다 더 밝기 때문이다. 따라서 패턴의 간격을 조절할 때 이 함수와 같이 중간부분은 패턴의 간격을 좁게 하여 밀도를 높이고 앞부분과 끝부분은 패턴 간격을 넓혀 패턴 밀도를 줄여야 한다.

상수 P는 LED 근처의 패턴 간격을 조절하는 상수로 이 값이 크면 앞부분의 패턴 간격이 넓어져서 패턴 밀도가 줄어든다. 상수 Q는 끝에 있는 반사판의 효과를 조절하는 상수로 이 값이 크면 반사판 근처에서의 패턴 간격이 넓어지고 역시 패턴 밀도가 줄어든다. 상수 P와 Q를 조절하다 보면 패턴이 도광판 밖으로 밀려 나가기도 하고 도광판을 다 채우지 못하기도 한다. 이때 상수 R을 조절함으로써 패턴이 도광판 전체를 채울 수 있다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 반구 모양의 패턴 밀도 함수 $e^{-y/70}$ 와 $30e^{-y/70} + 1.0e^{+y/25}$ 에 의하여 계산된 도광판 으로부터 0.1 mm 위 x-y 평면(z=0.6 mm)에서 5 mm 간격으로 나누어 평균값을 계산된 x-축, y-축 출력 분포이다. 즉 그림 7은 LED 효과만을 고려한 경우와 LED와 도광판의 반사판을 동시에 고려하여 얻은 출력 분포를 비교한 것이다. 그림 7(a)는 출력 분포가 나란하지만 LED와 도광판 효과를 모두 고려한 경우의 출력이 다소 큰 것을 알 수 있다. 그림

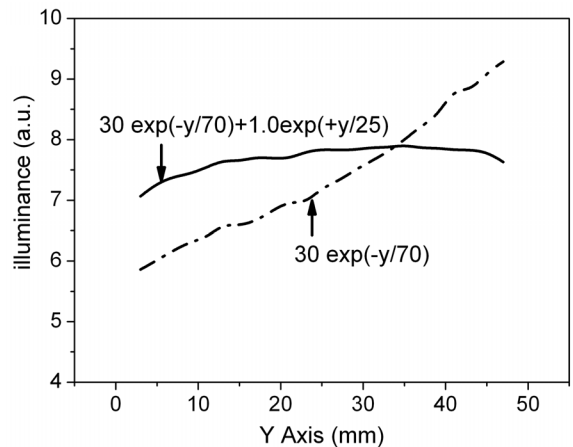
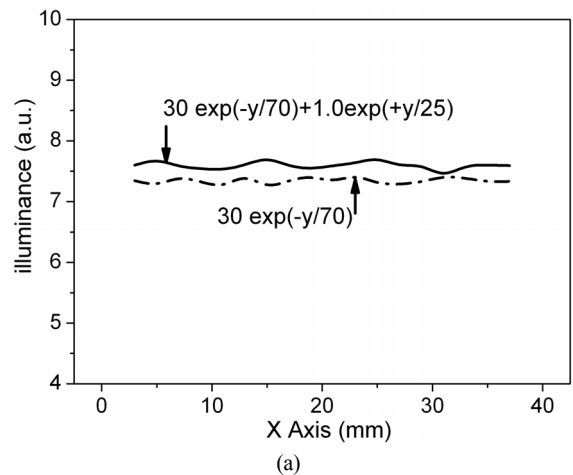


FIG. 7. LGP output illuminance distribution with pattern density function of $30e^{-y/70}$ and $30e^{-y/70} + 1.0e^{+y/25}$ for hemisphere pattern (a) along the x-axis (b) along the y-axis.

7(b)에서는 LED와 도광판 효과를 모두 고려한 경우의 출력 분포 균일도가 현저히 향상된 것을 확인할 수 있다. 이를 수치적으로 확인하기 위하여 9-포인트 출력 불균일도

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100 \quad (3)$$

를 조사하였다. 그 결과 LED 효과만을 고려한 경우와 LED-도광판 효과를 모두 고려한 경우에 있어서 각각 37.8 %와 10.2 %로 계산되었다. 따라서 수치상으로도 출력 균일도가 확연히 개선된 것을 확인하였다. 새로운 모델의 경우, 그 모델에 적합하게 보다 정밀한 계산을 원하는 경우 상수 P , Q 그리고 R 을 미세 조절 할 수 있다.

III. 패턴 밀도 함수에 의한 피라미드 패턴 설계

앞 절에서 반구 모양의 패턴이 장착된 도광판에 패턴 밀도 함수를 적용하여 그 효과를 분석하였다. 이제 패턴 밀도 함수가 반구 모양이 아닌 다른 모양의 패턴에도 적용될 수 있는지 알아보려고 한다. 도광판에 형성시키는 패턴의 제작 방식은 일반적으로 인쇄 방식과 무인쇄 방식으로 나누어진다. 무인쇄 방식에서는 반구 모양의 패턴이 많이 사용되고 있으나, 피라미드 모양의 패턴이 제작상 많은 장점이 있기 때문에 실리콘 웨이퍼를 이용한 피라미드 패턴에 관한 연구들이 진행되고 있다.^[4-6] 실리콘 웨이퍼를 이용한 피라미드 모양의 패턴 제작에 있어, 실리콘 웨이퍼 습식 식각 공정이 잘 정립되어 있기 때문에 크기와 모양이 균일한 패턴 제작이 용이하고 재현성이 매우 높다.^[7] 또한 제작 공정이 비교적 간단하여 일반 도광판 가공비용에 비해 제작비용이 매우 저렴하다. 아래 그림 8은 패턴 밀도 함수를 적용하여 설계된 음각의 피라미드 패턴이 장착된 도광판 출력 분포이다. 여기서 피라미드 패턴은 실리콘 웨이퍼를 습식 식각으로 결정면(100)을 가공

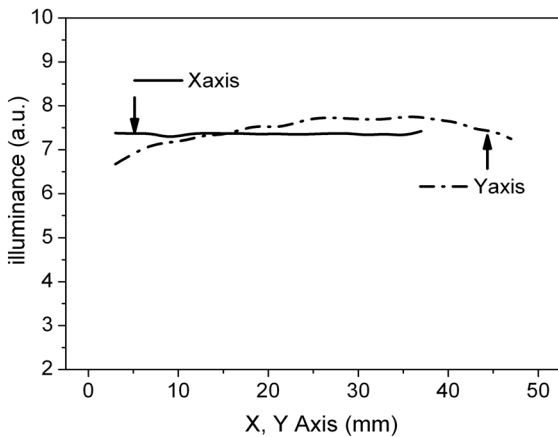


FIG. 8. LGP output illuminance distribution on the $z=0.6$ mm surface with pattern density function of $30e^{-y/70} + 1.0e^{+y/25}$ for pyramid pattern.

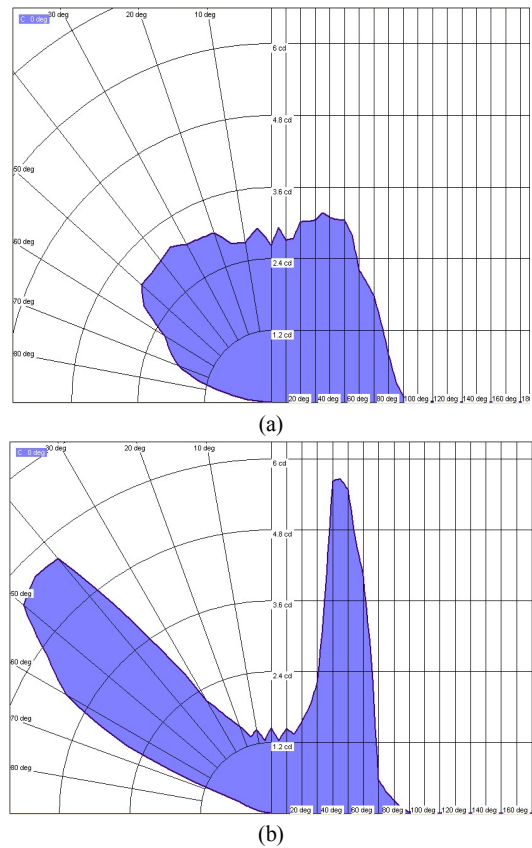


FIG. 9. Output illuminance versus angle for (a) hemisphere pattern (b) pyramid pattern.

하면 54.7°로 가공되기 때문에 피라미드의 각을 54.7°로 설정하여 계산한 것이다. 본 연구에서는 피라미드 밑면의 한 변의 길이를 $50 \mu\text{m}$ 로 하였으며, 이에 따라 피라미드의 높이는 $35.3 \mu\text{m}$ 이다. 식 (3)에 의하여 계산된 출력 불균일도가 10.2%로 반구형 패턴을 장착한 경우의 출력 불균일도가 소수점 이하 두 번째 자리에서 차이를 보일 정도로 큰 차이가 없음을 확인하였다. 따라서 피라미드 패턴에도 같은 형태의 패턴 밀도 함수가 적용될 수 있음을 알 수 있다.

그림 9는 패턴 밀도 함수를 적용하여 설계한 도광판의 출력이 방향에 따라 변화하는 것으로 계산한 결과로, (a)와 (b)는 각각 반구형 패턴과 피라미드 패턴을 장착한 도광판에서 얻은 결과를 제시한 것이다. 반구형 패턴을 장착한 경우 출력이 $0^\circ \sim 50^\circ$ 사이에서 비교적 고르게 방출되는 반면 피라미드 패턴을 장착한 경우에는 출력이 $40^\circ \sim 50^\circ$ 사이에만 집중되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 피라미드 패턴을 장착한 도광판의 프리즘 시트를 설계할 때에는 $40^\circ \sim 50^\circ$ 의 출력을 제어하여 최종 BLU 출력면에서의 휘도를 향상시키도록 설계해야 함을 의미한다. 반구형 패턴을 장착한 도광판은 출력각이 넓은 반면에 피라미드 패턴을 장착한 도광판은 특정 각으로 출력이 편중되기 때문에 프리즘 시트를 설계하는 측면에서 보다 효율적일 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 도광판 내부의 광세기 분포를 분석함으로써 범용으로 적용할 수 있는 패턴 밀도 함수를 찾고자 하였다. 도광판 내부에서 흡수와 반사, 굴절에 의한 효과를 도광판 패턴 설계에 적용해야 하는데, 이를 위하여 도광판 내부의 각 지점에서의 조도를 측정하여 패턴 밀도 함수를 찾는 연구를 수행하였다. 그 결과 패턴 밀도 함수는 $[P \exp(-y/70) + Q \exp(+y/25)]R$ 과 같은 형태로 주어지는 것으로 조사되었다. 상수 P 와 Q 는 각각 도광판의 앞쪽(LED와 가까운 쪽)과 도광판의 뒤쪽(LED로부터 먼 쪽)의 패턴 밀도를 조절하는 상수이다. 이 값이 커지면 패턴 간격이 넓어져서 패턴 밀도가 줄어든다. 설계하고자 하는 모델과 그 조건에 따라 이 값이 결정될 것이다. 상수 R 은 도광판 전체에 걸쳐서 패턴 간격을 일괄적으로 줄이거나 넓혀주는 함수이다. 상수 P 와 Q 를 조절하다 보면 패턴의 위치가 도광판 밖으로 밀려나가거나 도광판을 다 채우지 못할 수 있는데, 이 경우 상수 R 을 조절함으로써 도광판 전면에 적절히 패턴을 채울 수 있다.

본 연구에서 얻은 패턴 밀도함수를 활용하여 반구형 패턴이 장착된 도광판을 설계하고 계산한 결과 출력 분포가 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 피라미드형 패턴에서도 동일한 형태의 패턴 밀도함수가 잘 적용됨을 확인하였다.

감사의 글

This reserach was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0016331)

References

1. G. Lee, J. H. Jeong, S.-J. Yoon, and D.-H. Choi, "Discrete design approach for light guide panel in back light unit to improve the optical performances of liquid crystal display," in *Proc. 8th World Congress on Structural and Multi-disciplinary Optimization* (Lisbon, Portugal, June 2009), pp. 1-6.
2. J. Choi, K.-S. Hahn, H. Seo, and S.-C. Kim, "Design, analysis, and optimization of LCD backlight unit using ray tracing simulation," in *Proc. ICCSA 2004* (Perugia, Italy, 2004), pp. 837-846.
3. G. Lee, J. H. Jeong, S.-J. Yoon, and D.-H. Choi, "Design optimization for optical patterns in a light-guide panel to improve illuminance and uniformity of the liquid-crystal display," *Opt. Eng.* **48**, 024001 (2009)
4. Y. C. Kim, S. J. Ahn, S. Ahn, T.-S. Oh, H.-S. Kim, and D.-W. Kim, "Output characteristics of a LGP for TFT-LCD with pyramid shaped pattern," *J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.* **10**, 3080-3086 (2009).
5. K. Choi, J.-S. Lee, S. H. Song, C.-H. Oh, and P.-S. Kim, "Micro-patterning of light guide panel in a LCD-BLU by using on silicon crystals," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **16**, 113-120 (2005).
6. S. K. Kim, Y. E. Yoo, Y. H. Seo, T.-J. Jae, K.-H. Whang, and D.-S. Choi, "Fabrication of Ni stamper based on micro-pyramid structures for high uniformity light guide panel (LGP)," *J. of the Korea Soc. for Precision Eng.* **23**, 174-178 (2006).
7. J. D. Plummer, M. D. Deal, and P. B. Griffin, *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling* (Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2000), p. 618.
8. Y. C. Kim, "LGP output characteristics depending in BLU pattern size," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 43-47 (2008).