

Thermal Reflow 공정 적용 Micro Pattern 형상 변화를 통한 광 향상 구조층 연구

성민호, 차지민, 문성철, 유시홍, 이성의^a

한국산업기술대학교 신소재공학과

Study on Optical Control Layer for Micro Pattern Shape Change Using Thermal Reflow Process

Min-Ho Seong, Ji-Min Cha, Seong-Cheol Moon, Si-Hong Ryung, and Seong Eui Lee^a

Department of Advanced Material, Korea Polytechnic, Siheung 429-793, Korea

(Received December 3, 2014; Revised December 18, 2014; Accepted December 29, 2014)

Abstract: In this study, the change of optical characteristics was studied according to the micro optical pattern provided by photo lithography followed by thermal reflow process. The shape and luminance variation with micro pattern was evaluated by SEM and spectrometers. Also, we analyzed the luminance characteristics using the 3D-optical simulation (Optis works) program. As a result, we found that the radius of curvature(R) in micro pattern is decreased up to 77%(150°C) compared to the radius of curvature at the condition 100°C, which is caused by efficient reflow of organic material without chemical changes. The highest enhancement of brightness with optimum micro pattern was obtained at the condition of 120°C reflow process. The brightness gain with optical micro patterns is more than 15% at the condition of R=16.95 μm , $\theta = 77.14^\circ$ compared to original optical source. The results of light simulation with various radius of curvature and side angle of pattern shows the similar result of experiment evaluation of light behavior on optical micro patterns. It is regarded that the more effect on light enhancement was contributed by side angle which is effective factor on light reflection, rather than the curvature of micro-patterns.

Keywords: Micro-pattern, Photo-lithography, Thermal reflow, Optical control layer, Simulation

1. 서론

최근 소비자의 요구에 따라 디스플레이 device는 대형화, 박형화, 저전력 소비를 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 액정 패널은 인가전압에 따른 액정의 투과도 변화를 이용하여 각종 장치에서 발

생되는 전기적 정보를 시각정보로 변화시키는 전자소자이다. 하지만 자체적으로 발광할 수 없기 때문에 광원 역할을 하는 BLU (back light unit)을 필요로 한다. BLU는 측면형과 직하형으로 나눌 수 있다. 측면형 BLU의 경우 광원이 도광판 한쪽 측면 혹은 양쪽 측면 부분에 위치하기 때문에 차지하는 광원의 면적이 적고 그 개수도 많지 않아 전력 소모가 적다. 하지만 발열량이 적어 휘도를 향상시키기에 어려움이 따른다. 반면 직하형은 광원이 차지하는 면적이 BLU 전체 면적과 비슷하기 때문에 전력소모와 발열량이 크지만 BLU를 통해 나오는 휘도가 측면형에 비해 월등히 높으며, 휘

a. Corresponding author; selee@kpu.ac.kr

도 조절에 제약이 없는 것이 장점이다. 현재 광학 특성을 향상하기 위해 곡면에 의한 광 산란효과를 가진 lens pattern 형성에 관한 연구가 진행 중이다 [7-15]. Micro lens pattern 형상의 soft mold를 이용하여 온도와 압력을 가지고 pattern을 형성하는 고가의 imprint 방식 [1] 또는 시간 및 온도에 따라 lens pattern 형상 조건을 조절하는 thermal reflow 공정 [2-6]에 대한 연구가 진행 중이다. 하지만 기본 pattern 형상이 원기둥으로 한정되어 다양한 pattern에 대한 연구가 부족하며, lens pattern 변형에만 집중되어 형상 변화 과정에서 생기는 빛변의 각도 및 곡률 반경에 따른 광학 특성평가 관련 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 값 싸고 pattern 변형이 자유로운 photo-lithography 공정을 적용하였으며, 변형 시 발생하는 빛변에 의한 광 집중효과와 lens pattern 형상에 의한 굴절각 변화로 광 분산 효과를 높이기 위해 팔각형 pattern을 적용하였다.

Micro pattern을 형성 후, thermal reflow 공정을 적용하여 온도 및 표면 장력에 의한 pattern shape 변형을 통해 패턴 형상에 따른 정면 / 측면 휘도, 각도에 의한 광학 특성 변화(휘도, spectrum, 색좌표 변화)를 측정하였다. 또한 3D-optical simulation 프로그램을 적용하여 pattern shape에 대한 측면휘도 및 곡률 반경(radius of curvature)에 따른 광학 특성을 비교 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 Micro pattern 형성

그림 1은 photo-lithography process로 micro pattern 형성 과정을 나타내며, thermal reflow 공정을 통해 온도 및 표면장력에 의한 pattern shape을 변형하였다. Photo-resist(PR)는 UV에 의해 서로 결합력이 강해지는 N-type 용액인 AZ사의 Az-nof 2035 제품을 사용하였다. 기본적인 pattern shape 변화에 의한 광학 특성을 평가하기 위하여 substrate는 0.7 T의 두께와 6 cm × 6 cm 면적으로 자른 강화유리(Gorilla Glass)를 사용하였으며, micro pattern을 형성하기 위해 코팅층은 spin coating 장비를 사용하여 400 RPM, 40 sec의 조건으로 진행하였다. 코팅 두께를 최대한 높이기 위하여 N-type PR의 점도 조건과 알맞은 RPM을 test하여 적용하였다. 또한 solvent 제

Table 1. Photo-lithography process condition.

Process	Condition
Spin speed	500 RPM, 40 sec
Soft Bake	110°C, 1 min
Exposure	7 sec(133 mJ)
Post Exposure Bake(PEB)	110°C, 1 min
Develop	2 min 23 sec
Reflow Temperature	100°C, 110°C, 120°C, 150°C

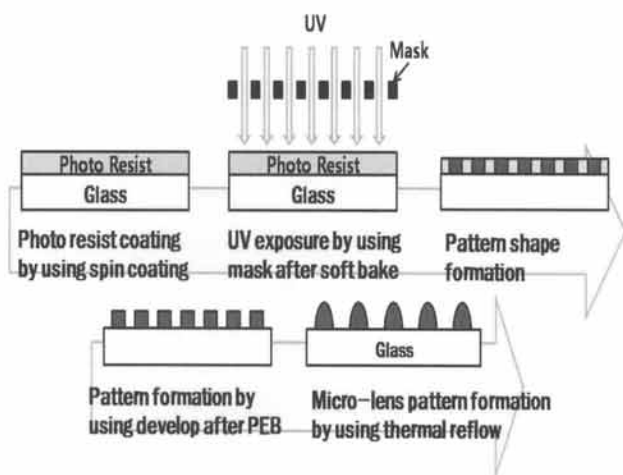


Fig. 1. Photo-lithography process.

거를 위해 110°C에서 1 min 동안 soft bake를 진행하였다. Exposure(노광)는 MIDAS사의 초당 19 mJ의 에너지를 방출하는 MDA-400M 장비를 사용하여 7 sec 동안 UV를 가한 후 pattern의 결합력을 높이고 잔류 solvent를 제거하기 위해 1 min 동안 PEB (post exposure bake)를 진행하였다. 마지막으로 micro pattern을 형성하기 위해 2 min 23 sec 동안 현상 과정을 진행하였다. 이때 사용한 developer는 MIF 300을 사용하였다. Micro pattern을 형성 후 광 확산 및 집중효과를 주기 위해 온도 및 표면장력에 의한 pattern shape을 곡면으로 변화시키는 thermal reflow 공정을 적용하였다. 온도에 의한 변색을 줄이기 위해서 thermal reflow 공정은 100°C, 120°C, 150°C에서 5 min간 건조로(열풍 건조)에서 진행하였고, 온도에 의한 pattern shape의 변화를 SEM으로 측정하여 곡률 반경(R) 및 빛변의 각도(θ)에 의한 광학 특성을 평가하였다.

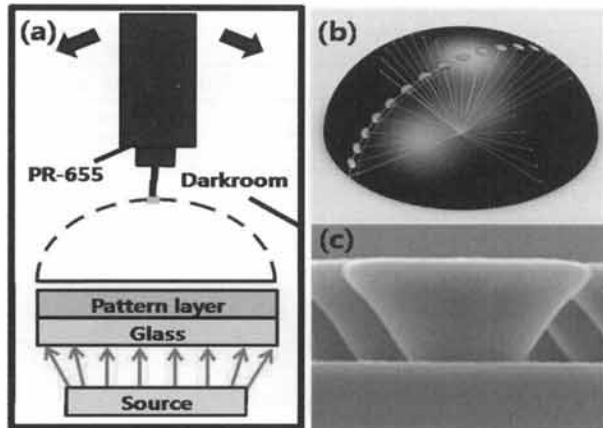


Fig. 2. Optical characteristics measurement. (a) structure, (b) side brightness measurement mold, (c) reference pattern shape.

그림 2는 광학 특성 측정 방법에 대한 것으로서 (a) 광학 특성 측정 구조, (b) 측면각 휘도측정 mold, (c) thermal reflow하기 전의 reference pattern 형상이다. 광학 특성 평가 장비로는 휘도, spectrum, 색좌표 측정이 가능한 PR-655를 사용하였으며, 각도에 의한 광학 특성평가를 위해 angle mold를 제작하여 측정 방법에 적용하였다. 또한 angle mold를 사용하기 위해 광섬유의 광학 특성과 유사한 probe 렌즈인 FP-55를 사용하여 측면광을 측정하였다. 이때 사용된 광원(optical source)은 pattern 형상에 대한 광학 특성을 평가하기 위하여 substrate의 크기와 동일한 면광원을 사용하였다.

2.2 Optical simulation (optis works)

그림 3은 optical simulation process로 device 각각의 부품들을 설계하고 재료에 표면 특성을 적용하여 구조 및 재료의 따라 광학 특성을 평가할 수 있는 프로그램이다. Simulation은 실제 제작한 pattern shape에 대해 광학 특성평가 후 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 사용하였으며, pattern shape에 대한 광학 특성을 비교하기 위해 모델링 프로그램인 Dassult Systems의 solid works와 3D 광학 시뮬레이션인 OPTIS사의 optis works를 사용하였다. Solid work로 각각의 구조를 설계 후 재료의 표면 물성(투과율(transmittance), 반사율(reflectance), 굴절률(refractive index)을 부여하여 simulation을 진행하였다. 기판은 실제 제작 sample과 동일한 조건으로 설계하였으며 재

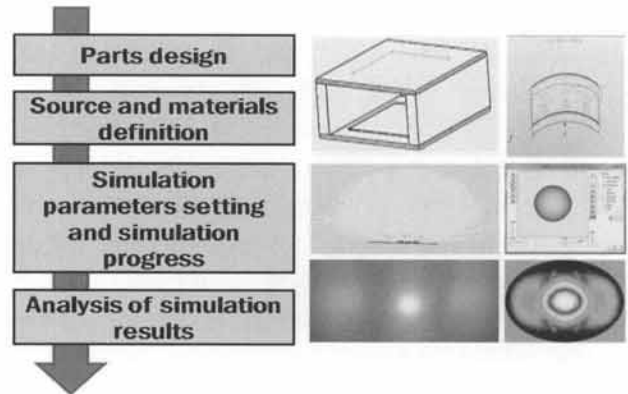


Fig. 3. Optical simulation process.

료 물성은 투과율 91%, 반사율 9%, 굴절률 1.5의 표면 특성을 가지는 Gorilla glass로 설계하였으며, photo-resist로 구성된 micro pattern은 투과율 85%, 반사율 15%, 굴절률 1.46으로 설정하였다. 재료의 광학 특성이 부여된 부품들을 하나로 조립하여 광학 특성을 비교 평가하기 위하여 detector (Illuminance, intensity, IES, luminance detector)를 설치하였다. 실제 광원과 동일 시 하기 위해 flux를 0.0002로 설정하고, 방출되는 빛의 ray는 10,000개로 설정하였다. 또한, 부품 설계 후 시뮬레이션 결과에 대한 error ratio는 1% 이하로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 thermal reflow 온도에 따른 shape 변화를 나타낸다. Photo-lithography 공정을 통해 형성한 micro pattern은 윗면에서 볼 때 팔각형 모양이며, 측면 형상은 역 사다리꼴 모양을 하고 있다. Thermal reflow process 적용을 통해 온도가 증가할수록 pattern shape이 변화하며, pattern 상단부의 표면이 lens 형상처럼 굴곡이 생기는 것을 관찰하였다. 또한 pattern 하단부 바닥 길이의 증가로 빔변의 각이 둔각으로 변화하는 것을 관찰하였다. 일반적으로 액상의 물질이 표면을 최소화하기 위해 구 형태를 유지하려는 표면장력에 의한 것으로 pattern 상단부의 형상이 les 형태의 굴곡이 있는 형상으로 변화하여 곡면에 의한 빛의 확산효과를 보이며, pattern 하단부의 길이 증가로 인해 하단부와 연결되어 있는 빔변의 각이 둔각으로 변화하는 현상은 빛이 산란되는 면적의 증가로 직진성을 향상시킬 것으로 사료된다.

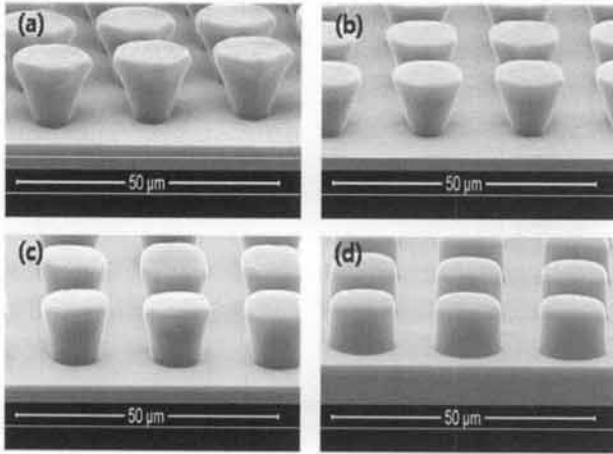


Fig. 4. Shape variation with thermal reflow temperature. (a) reference(reflowX), (b) reflow 100°C, (c) reflow 120°C, and (d) reflow 150°C.

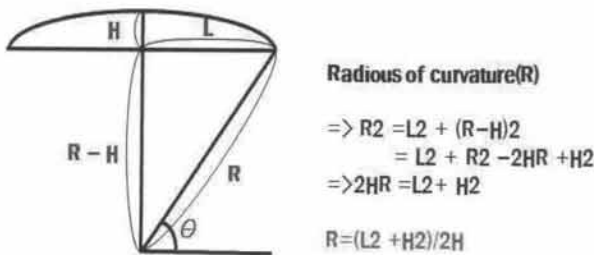


Fig. 5. radius of curvature(R).

그림 5는 곡률 반경(radius of curvature(R))을 구하는 식을 나타낸다. 그림 4처럼 온도에 따라 표면을 최소화하려는 표면장력으로 인해 lens 형태의 굴곡이 생기면서 H와 L 값이 변하게 된다. 또한 pattern 하단부의 형상 변화로 빗변과 이루는 θ 값이 증가하는 현상이 나타난다.

그림 6은 thermal reflow 온도에 따른 곡률 반경 변화를 나타내며, 그림 5의 나타낸 식에 적용하여 곡률 반경을 구하였다. Pattern 형상의 변화폭이 나타나는 100°C를 기준으로 선정하였으며, 100°C 이하에선 pattern의 변형이 미비하게 나타났다. 온도를 가하지 않은 pattern 형상은 H값이 존재하지 않으므로 곡률 반경(R) 값을 0 um으로 나타내었으며, 변형이 일어나면서 H값이 점점 증가하므로 그림 5의 식으로 인해 100°C까지는 R값이 증가할 것으로 예상된다. 온도 증가에 따른 pattern 형상 변화를 통해 곡률 반경(R)을

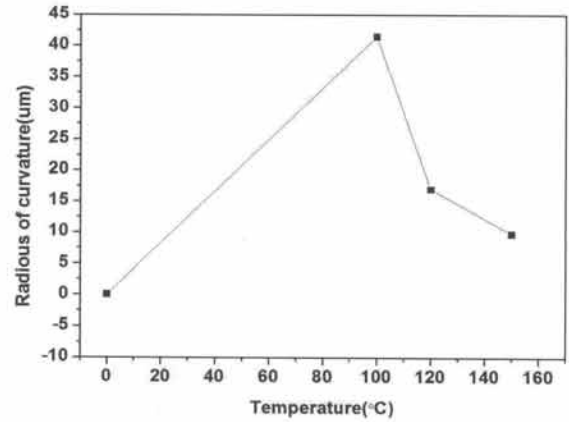


Fig. 6. radius of curvature with thermal reflow temperature.

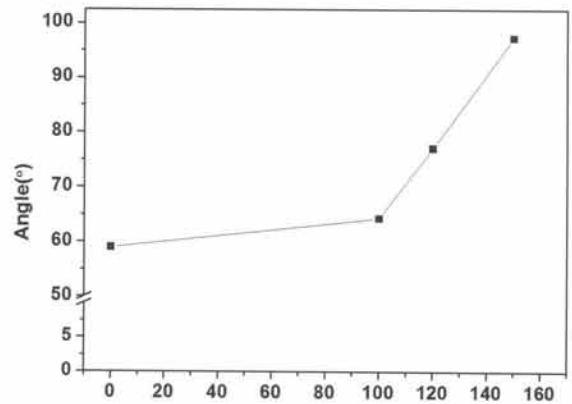


Fig. 7. Angle(°) with thermal reflow temperature.

계산해본 결과 100°C에서 $R=41.44 \text{ um}$, 120°C에서는 $R=16.95 \text{ um}$, 150°C에서는 $R=9.75 \text{ um}$ 로 pattern 변형이 확연하게 일어나는 100°C를 기준으로 thermal reflow 온도가 증가할수록 곡률 반경(R)이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 결과적으로 100°C 대비 120°C의 곡률 반경이 약 59% 감소하였으며, 150°C의 곡률 반경은 100°C 대비 약 77%, 120°C 대비 약 43% 감소하였다.

그림 7은 thermal reflow 온도에 따른 빗변의 각도 변화로서 빗변의 각은 그림 5와 같이 빗변과 바닥면 사이의 θ 값을 나타낸다. Reflow 온도 변화에 따라 100°C 이하에선 낮은 온도로 인해 pattern 변화가 적어 빗변 각도가 5° 이내로 변화하였지만 100°C 이상에서는 높은 온도로 인해 pattern 빗변의 각도의 증가폭이 10°에서 35°로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 그림 4와 그림 5에서 나타난 것과 같이 온도

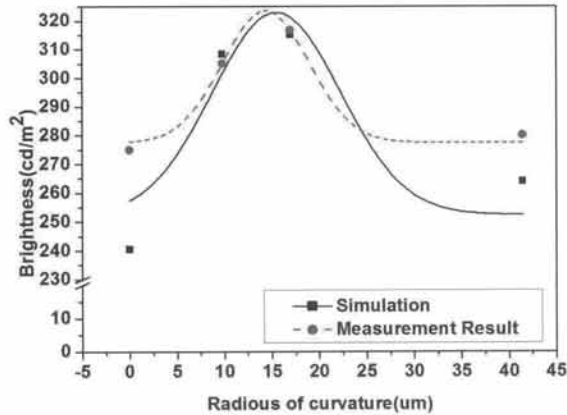


Fig. 8. Brightness with radius of curvature.

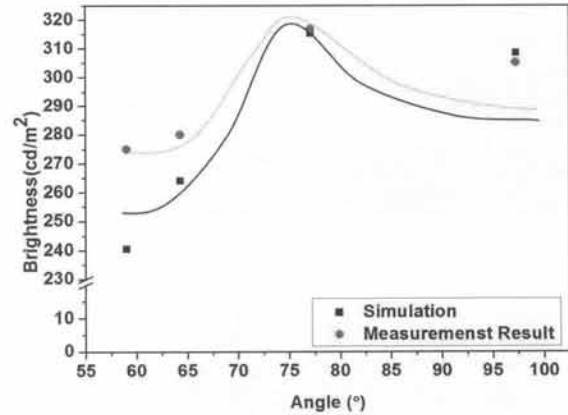


Fig. 9. Brightness with angle(θ).

변화에 의해 표면적을 최소화하려는 표면장력으로 pattern 하단면의 길이가 변화하여 바닥면과 빗변을 이루는 각이 둔각으로 변화하는 것으로 판단된다.

그림 8은 곡률 반경에 따른 휘도 변화로서 그림 2에 나타난 측정 장비(PR-655) 및 구조를 통하여 광학 특성을 측정한 후 3D-optical simulation으로 설계한 pattern 형상 구조와 비교 평가하였다. 이 때 정면에서 나온 빛에 대한 광학 특성평가를 위해 측정 각 (Angle)은 90°에서 진행하였으며, simulation 결과 중 luminance detector를 사용하여 도출한 값을 토대로 pattern 형상에 따른 곡률 반경 변화와 휘도의 관계를 실제 측정값과 비교하였다. Thermal reflow를 하지 않은 reference pattern의 경우 측정 휘도는 275 cd/m^2 로 측정되었으며, 곡률 반경이 13 μm 인 지점을 기준으로 그 이하에선 R이 증가할수록 휘도가 증가하는 현상을 보였다. 즉 R이 9.75 μm 일 때 휘도는 308 cd/m^2 로 증가 폭은 11%, 최대 휘도를 보이는 15 μm 에선 휘도가 321 cd/m^2 로 증가 폭이 약 16% 증가하였다. 그 이후에는 곡률 반경이 증가할수록 점차 휘도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 그림 4처럼 thermal reflow 온도에 의해 pattern 상단부 형상이 곡면으로 변화하여 나타난 것으로 초기에 평평한 면보다 온도에 의한 형상 변화로 빛이 굴절되는 양이 증가하여 점점 휘도가 증가하지만 곡률 반경의 증가로 휘도 향상보다는 확산효과에 영향을 주어 휘도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 광학 특성평가 후 실제 측정 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 사용한 simulation은 pattern 형상 변화와 동일하게 설계하였으며, 그림 2에 구조처럼 면광원 위에 glass, pattern

순으로 assembly 후 평가하였다. Thermal reflow를 하지 않은 reference ($R=0 \mu\text{m}$)=240 cd/m^2 , 150°C (9.75 μm)=308 cd/m^2 , 120°C(16.95 μm)=315 cd/m^2 , 100°C의 온도($R=41.44 \mu\text{m}$)일 경우에는 264 cd/m^2 의 휘도 값을 보였으며 전체적으로 실제 측정 결과와 비슷한 경향을 보였다. 하지만 실제 측정 결과와 비교한 결과 reference pattern($R=0 \mu\text{m}$)과 100°C의 경우 20에서 30 cd/m^2 의 휘도 차이를 보였다. 이는 초기 팔각형 pattern 형상에서 온도를 가하여 pattern이 변화하는 100°C까지 pattern 형상 변형이 불균일하여 산란이 더 많이 일어나 simulation 상에서 약간의 휘도 차이를 보이는 것으로 사료된다.

그림 9는 빗변의 각도에 따른 휘도 변화를 나타내며, 그림 4처럼 pattern 형상을 SEM으로 관찰한 후 각도를 측정하여 나타내었다. 실제 pattern과 동일하게 simulation을 설계하여 광학 특성을 비교 평가하였다. 그림 8과 마찬가지로 simulation과 실제 측정 결과 모두 비슷한 경향을 보였으며, thermal reflow 공정을 진행하지 않은 pattern의 경우 빗변의 각(θ)은 59.03°, 100°C에서는 $\theta=64.31^\circ$, 120°C에서는 $\theta=77.14^\circ$, 150°C에서는 $\theta=97.29^\circ$ 로 측정되었다. Simulation 설계 각도도 동일하게 설정하였으며, 그 결과 온도가 증가할수록 빗변의 각과 휘도는 증가하지만 120°C에서 가장 높은 317 cd/m^2 의 휘도 값을 보인 후 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 점점 pattern 하단 면과 빗변이 이루는 각이 작아져 빛이 pattern 형상에 의해 산란되지 못하고 pattern 안으로 반사되어 휘도가 감소된 것으로 사료된다. 3D-optical simulation으로 비교해 볼 때 그림 8의 곡률 반경에 의한 현상보다 그림

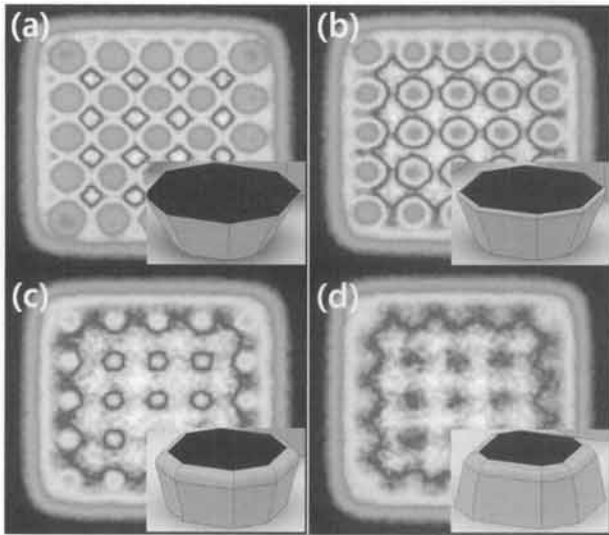


Fig. 10. Pattern shape and illuminance variation. (a) reference (R=41.44), (b) R=23.16 (100°C), (c) R=16.95 (120°C), and (d) R=9.75 (150°C).

9에 나타난 빗변의 각도에 의한 변화가 더 근접하게 비교되었다. 이는 곡면에 의한 변화보다 빗변 각도 변화가 추가됨으로써 광 산란효과가 더 높은 것으로 판단된다.

그림 10은 simulation에 의한 pattern shape에 따른 조도 분포 & pattern 형상으로 파란색으로 갈수록 조도가 낮은 부분을 나타내며, 노란, 붉은 계열의 색으로 갈수록 높은 부분을 나타낸다. Simulation 결과 (a)에서 (d)로 갈수록 전체적인 조도 분포가 증가하며, pattern 부분에서는 조도가 감소, pattern과 pattern 사이에서는 조도가 증가한 현상을 볼 수 있다. 수치상으로 나타내면 (a)=619 lx, (b)=678.7 lx, (c)=288.1 lx, (d)=702.4 lx로 점점 증가하는 경향을 보인다. 이 현상은 앞에서 설명한 내용과 동일하게 thermal reflow 온도에 의해 pattern 형상의 변화로 광학 특성이 향상된 것으로 사료된다. 표면장력에 의해 상단부의 pattern 형상이 lens pattern으로 변화되고 하단면의 길이가 증가함에 따라 빗변의 각이 둔각으로 변화하여 빛이 pattern 변화에 의해 산란되어 주위에 빛을 향상시킨 것으로 예상된다.

그림 11은 angle에 따른 휘도 변화를 나타낸다. 그림 2에 나타난 측정 구조를 이용하여 angle mold를 적용 후 측면 각도에 따른 휘도 분포에 대해 평가하였다. 그 결과 곡률 반경이 R=16.95 μm , R=9.75 μm 인 pattern을 살펴보면 angle이 90°일 때 온도를 가하지

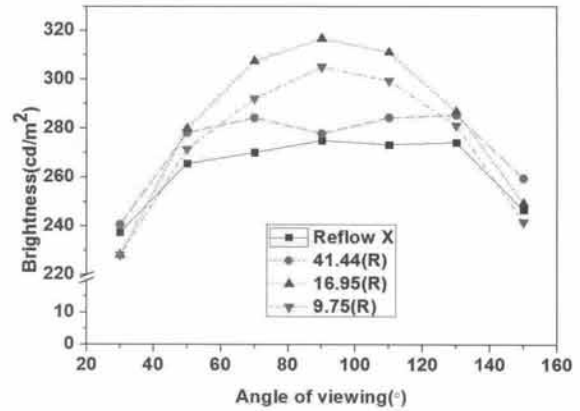


Fig. 11. Brightness with angle of viewing.

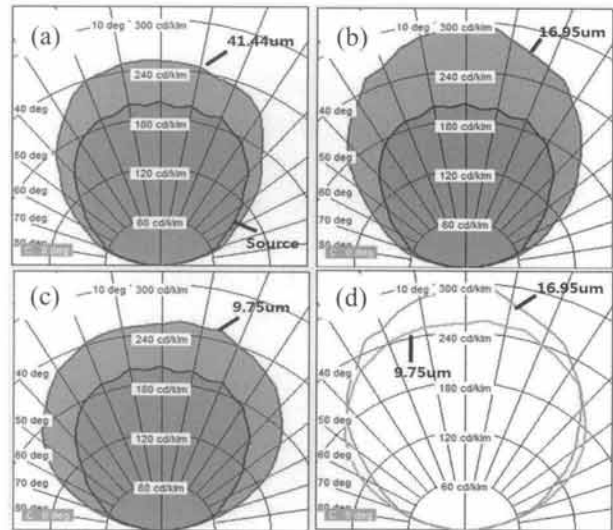


Fig. 12. Luminous intensity with radius of curvature. (a) reference, R=41.44 μm (100°C), (b) R=16.95 μm (120°C), (c) R=9.75 μm (150°C), and (d) R=16.95 μm & R=9.75 μm .

않은 pattern보다 317 cd/m^2 , 305 cd/m^2 로 휘도가 약 15%, 11% 높았으나 측면 각도(30°, 150°)에서는 낮게 관찰되었다. 온도에 의한 pattern 형상 변화로 부분적으로 형성된 곡면에 의해 광 집중효과가 저하된 것으로 사료된다. 반면에 30°, 150°에서는 R=16.95보다 R=9.75가 더 높게 측정되었다. 이 현상은 곡면에 의해 광 집중효과보다 산란효과가 더 커 측면 휘도가 높게 측정된 것으로 사료된다. 전체적으로 pattern 형상 변화에 의해 정면광의 휘도가 상승한 것을 관찰하였다.

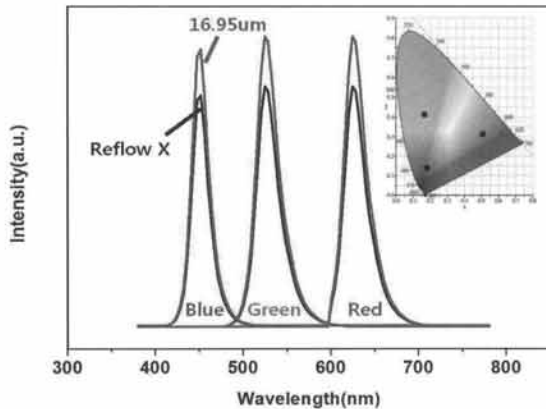


Fig. 13. Spectrum and chromaticity coordinates with wavelength (Red, Green, Blue).

그림 12는 곡률 반경에 따른 광도 변화를 simulation으로 비교한 것으로 (a) $R=41.44 \mu\text{m}$ 보다 (b) $R=16.95 \mu\text{m}$ 가 정면 광도가 상승한 경향을 보였다. 이는 측정 결과와 비슷한 경향으로 pattern 형상 변화로 인한 빛변의 각에 의해 정면 광도가 상승하였으며, 온도가 증가하면서 pattern 형상이 곡면화 되어 (c)처럼 측면 광도가 상승한 결과가 나타났다. 결과적으로 (d) $R=16.95 \mu\text{m}$ & $R=9.75 \mu\text{m}$ 에서 보는 것과 같이 pattern 형상에 따라 빛변 각에 의한 광 집중효과 ($R=16.95 \mu\text{m}$)와 곡면 pattern shape에 따른 광 산란 효과($R=9.75 \mu\text{m}$)를 도출하였다.

그림 13은 파장에 따른 spectrum 및 색좌표 변화를 나타낸다. 광원에 따른 파장의 shift를 관찰하기 위해 Red, Green, Blue의 면광원을 사용하였으며, pattern 형상에 의한 광학 특성의 변화가 큰 $R=16.95$ (120°C)인 pattern과 thermal reflow를 하지 않은 pattern($R=0$)을 비교하였다. Pattern 자체의 색과 reflow 시 유기물(photo-resist)이 변색되는 현상에도 불구하고 광원과 유사한 색좌표 값을 가지며 Red, Green, Blue 광원 모두 파장이 shift되는 경향은 보이지 않았다. 또한 휘도의 경향과 마찬가지로 120°C 에서 가장 높은 intensity 값이 관찰되었다.

4. 결론

광학 특성을 향상시키기 위하여 photo-lithography 공정을 사용하여 pattern을 형성하였으며, thermal

reflow process를 적용하여 pattern shape에 변화를 주어 pattern 형상에 따른 광학 특성을 비교 평가하였다. 또한 광학 특성평가 후 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 3D-optical simulation을 적용하였다.

Thermal reflow 온도 변화와 표면장력에 의해 pattern의 빛변과 하단면 사이의 각도가 증가하여 광 집중효과가 나타났다. 동시에 pattern 상단부의 곡면화로 광 굴절효과도 관찰되었다. 곡면화로 인해 곡률 반경은 변화 폭이 시작되는 100°C 대비 최대 77%(150°C) 감소하였으며, 온도가 증가할수록 변화되는 각도는 점차 증가하는 경향을 보였다. 광학 특성 관찰 결과 $R=16.95 \mu\text{m}$ (120°C)일 때 317 cd/m^2 의 최대 휘도 값을 보였으며, 곡률 반경 및 빛변의 각도에 의한 휘도 비교 결과도 120°C 일 때 가장 높은 값이 측정되었다. 또한 측면각도에 의한 광학 특성을 평가하기 위하여 angle mold를 사용한 결과 pattern 형상 변화로 인해 최대 47 cd/m^2 (angle 90°)가 증가하였으며, 기존 pattern 보다 광학 특성이 향상되었다. 정량적 분석을 위해 3D-optical simulation을 통하여 비교해 본 결과 thermal reflow 온도가 120°C 인 $R=16.95 \mu\text{m}$ 에서 정면/측면 휘도가 최대였으며, 그 이후 곡면화가 진행될수록 광 확산 효과가 높은 것을 확인하였다. (150°C , $R=9.75 \mu\text{m}$) 결과적으로 실제 측정값과 유사한 경향을 보였다. 또한 온도 변화에 의한 pattern의 곡면화보단 빛변의 각도 조절을 통해 simulation 값과 유사한 경향을 관찰하였다. 이를 통해 pattern의 형상 변화 결과 빛변의 각도와 곡면화로 인해 빛이 굴절되어 방향이 변함으로써 pattern 형상이 광학 특성 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(CAFDC 5-1(2), NRF-2007-0056090).

REFERENCES

- [1] M. K. Wei, I. L. Su, and M. C. Jung, *Sci. Eng.*, **7**, 81, (2004).
- [2] T. W. Choi and S. C. Yoo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **15**, 10 (2001).
- [3] J. C. Tsai and Y. S. Hsu, *J. IEEE*, **47**, 10 (2011).

- [4] S. K. Hwang and S. H. Baek, *Sci. Eng.*, **20**, 81 (2009).
- [5] M. H. Lu and J. C. Sturm, *J. Appl. Phys.*, **91**, 595 (2002).
- [6] P. Nussbaum, R. Volkel, H. P. Herzig, M. Eisner, and S. Haselbeck, *Pure Appl. Opt.*, **6**, 617 (1997).
- [7] S. R. Cho, J. Kim, K. S. Oh, S. K. Yang, J. M. Baek, D. H. Jang, T. I. Kim, and H. Jeon, *J. IEEE*, **14**, 378 (2002).
- [8] M. H. Lu and J. C. Sturm, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1927 (2001).
- [9] J. C. Tsai, K. R. Chang, and H. Yang, in *Proc. 10th Anniversary Int. Conf. European Society for Precision Engineering and Nanotechnology* (Zurich, Switzerland, 2008).
- [10] C. S. Lee, C. H. Han, *Sensor. Actuat., A*, **88**, 87 (2001).
- [11] R. Danzebrink and M. A. Aegerter, *Thin Solid Films*, **392**, 223 (2001).
- [12] T. Shiga, H. Fujikawa, and Y. Taga, *J. Appl. Phys.*, **93**, 19 (2003).
- [13] J. K. Lim, *Ph. D. Thesis*, p.18-21, Kyungpook National University, Daegu (2011).
- [14] T. H. Kim, S. H. Park, H. K. Oh, and Y. J. Shin, *Optics & Laser Technology*, **39**, 1437 (2007).
- [15] A. Y. Smuk and N. M. Lawandy, *J. Appl. Phys.*, **87**, 4026 (2000).