

슬롯 다이 코팅과 Thermal Reflow 방법을 이용한 Cylindrical 마이크로렌즈 제조

이진영*·박종운**†

*한국기술교육대학교 창의융합공학협동과정, **†한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부

Fabrication of Cylindrical Microlens Using Slot-die Coating and Thermal Reflow Method

Jinyoung Lee* and Jongwoon Park**†

*Interdisciplinary Program in Creative Engineering, Korea University of Technology and Education,

**† School of Electrical & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

A microlens has been fabricated by various methods such as a thermal reflow, hot embossing, diamond milling, etc. However, these methods require a relatively complex process to control the microlens shape. In this work, we report on a simple and cost-effective method to fabricate a cylindrical microlens (CML), which can diffuse light widely. We have employed a slot-die head with the dual plate (a meniscus guide with a protruded μ -tip and a shim with a slit channel) for coating of a narrow stripe using poly(methyl methacrylate) (PMMA). We have shown that the higher the coating gap, the lower the maximum coating speed, which causes an increase in the stripe width and thickness. The coated PMMA stripe has the concave shape. To make it in the shape of a convex microlens, we have applied the thermal reflow method. When the stripe thickness is small, however, its effect is negligible. To increase the stripe thickness, we have increased the number of repeated coating. With this scheme, we have fabricated the CML with the width of 223 μm and the thickness of 7.3 μm . Finally, we have demonstrated experimentally that the CML can diffuse light widely, a feature demanded for light extraction efficiency of organic light-emitting diodes (OLEDs) and suppression of moiré patterns in displays.

Key Words : Cylindrical Microlens, Slot-die Coating, Thermal Reflow, PMMA, Light Diffusion

1. 서 론

마이크로렌즈(microlens)는 수 mm에서 수 nm까지의 지름을 갖는 반구형의 곡면으로 광원의 굴절 및 확산 등의 기능을 하는 크기가 작은 렌즈이다. 이러한 마이크로렌즈는 광 추출을 이용하여 광 효율을 증가시키거나 [1,2] 빛을 사방으로 확산시키는 기능으로 [3] 디스플레이, 광통신, 광학기기와 같은 다양한 산업 및 연구 분야에서 응용되

고 있다. 마이크로렌즈를 제작하는 방식은 크게 간접 방식(indirect method)과 직접 방식(direct method)으로 나눌 수 있다. 간접 방식은 오목한 구형의 음각을 갖는 몰드(mold)가 필요한 방식으로 마이크로렌즈의 형상을 정밀하게 제어할 수 있지만 제작 과정이 복잡하다. 간접 방식으로는 포토리소그래피(photolithography)와 습식 식각(wet etching)을 사용하여 렌즈 형상의 몰드를 형성하는 방식(MEMS method)과 다이아몬드 밀링과 같은 초정밀 장비로 마이크로 구조의 몰드를 제작하는 방식(ultra-precision machining method) 등이 있다 [4]. 직접 방식은 몰드 없이 마이크로렌즈를 직

†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

접 제작하는 방식으로 공정이 간단하고 효율적이거나 온도, 압력, 공정 시간과 같은 변수에 의해서 형상이 결정되기 때문에 마이크로렌즈의 형상 제어가 어렵다는 단점이 있다. 직접 방식으로는 포토리소그래피나 전자빔(e-beam)을 이용하여 정사각형의 패턴을 형성한 뒤 가열 공정을 거쳐 렌즈를 제작하는 방식 (thermal reflow), 가열 판을 사용하여 폴리머 기판을 렌즈로 만드는 방식(microplastic embossing), 잉크젯과 노즐 코터를 이용하여 소수성 기판 위에 미세 방울을 분사하는 방식(microdroplet jetting) 등이 있다 [5]. 직접 방식 중, thermal reflow 방식은 간단히 열을 이용하여 렌즈의 형상을 조절할 수 있어 널리 사용되지만, thermal reflow로 마이크로렌즈 형상을 만들기 전에 포토리소그래피 [6]나 전자빔 [7] 등으로 패턴 막을 형성해야 하기 때문에 박막 형성 후 추가적인 패터닝 공정이 요구되며 이는 공정 비용을 증가시키는 원인이 된다.

이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 슬롯 다이 코팅을 이용하여 별도의 패터닝 공정 없이 stripe 패턴 막을 코팅한 뒤 thermal reflow 방법을 적용하여 원통형 마이크로렌즈(cylindrical microlens, CML)을 제작하였다. 렌즈 코팅물질로 poly(methyl methacrylate) (PMMA) 사용하여 코팅 갭 및 속도에 따른 PMMA stripe 막 특성을 조사하였다. 또한 빛의 확산 특성을 향상시키기 위하여, PMMA stripe를 반복 코팅함으로써 초점거리(focal length, f)를 조절하였고 thermal reflow 공정을 적용해 CML의 형상을 제어하였다. 마지막으로 레이저 빛을 제작된 CML에 조사하여 광 확산 정도를 비교/분석하였다.

2. 실험 방법

CML 제작을 위하여 우리는 전 방향으로 코팅이 가능한 슬롯 다이 코터를 사용하였다. 사용된 슬롯 다이 코터는 Fig. 1(a)와 같이 슬롯 다이 헤드, 주입 펌프(infusion pump), 이동 판(moving plate), 컨트롤러로 구성되어 있다. 좁은 폭의 마이크로렌즈를 제작하기 위하여, 우리는 μ -tip이 형성된 메니스커스 가이드와 slit이 있는 심이 내장된 슬롯 다이 헤드를 사용하였다. 메니스커스 가이드와 심은 polyimide (PI) 필름을 레이저 커터로 가공하여 제작하였다. μ -Tip 길이와 폭은 각각 250 μm 와 50 μm 이고 slit 폭은 μ -tip과 동일하다. 마이크로렌즈 물질인 PMMA (purchased in Sigma Aldrich)의 용매로 butyl cellosolve(boiling point(BP)=171 $^{\circ}\text{C}$, vapor pressure = 0.8mmHg)와 toluene(BP=111 $^{\circ}\text{C}$, vapor pressure = 22mmHg)를 사용하였다. 코팅 유량을 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ 로 고정한 뒤, 10 wt%의 PMMA 용액을 소다-라임 유리기판 위에 코팅하였다. 마이크로렌즈의 초점거리를 줄이기 위하여 코팅 속도를 기판과 μ -tip 사이에 형성되는 메니스커스(meniscus)가

끊어지는 직전까지(최고 코팅 속도, V_M) 높여 좁은 폭의 PMMA stripe를 제작하였다. 코팅된 PMMA stripe는 hotplate에서 80 $^{\circ}\text{C}$ 로 5분간 soft-bake한 뒤 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 30분간 hard-bake 하였다. 이후 건조된 PMMA stripe를 150 $^{\circ}\text{C}$ 로 1시간동안 thermal reflow하여 CML를 완성하였다. 제작된 CML의 프로파일(폭 및 두께)을 3D 레이저 현미경(VK-8700, KEYENCE)으로 측정하였다. 또한 CML의 빛 확산 정도를 측정하기 위하여, Fig. 1(b)와 같이 레이저 포인터를 CML에 쏘아주어 제작한 CML의 광 확산 정도를 비교/분석하였다.

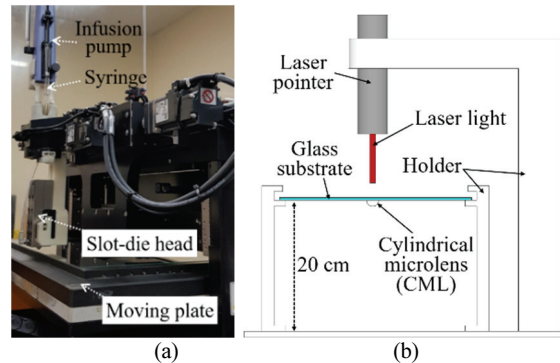
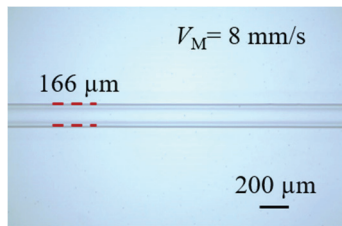


Fig. 1. (a) Image of a slot-die coater used for experiments and (b) setup for measurement of light diffusion by CML.

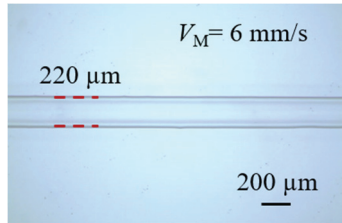
3. 결과 및 고찰

먼저 기판과 μ -tip 사이의 코팅 갭과 코팅 속도를 달리 하여 PMMA stripe를 제작하였다. 슬롯 코팅된 stripe의 광학 이미지와 프로파일을 Fig. 2에 나타내었으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다. Fig. 2와 Table 1에서 보듯이, 코팅 갭이 20 μm 에서 80 μm 로 증가함에 따라 최고 코팅 속도가 8 mm/s에서 4 mm/s로 감소하였다. 최고 코팅 속도가 감소함에 따라 stripe의 최소 폭은 166 μm 에서 270 μm 로 증가하였고 두께 또한 2.3 μm 에서 3.8 μm 까지 증가하였다. 코팅 갭이 크면 기판과 μ -tip 사이에 형성되는 유체 흐름(fluid stream)이 쉽게 끊기기 때문에 최고 코팅 속도가 낮아진다. 이때 동일 유량에서 최고 코팅 속도의 감소는 stripe 폭과 두께 모두가 증가하는 결과를 불러온다.

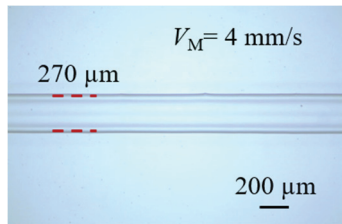
마이크로렌즈의 광학 성능은 렌즈의 곡률 반경에 따라 변하는 초점거리와 관계가 있다. 반구형의 마이크로렌즈로 덮인 기판을 통한 빛의 경로를 Fig. 3와 같이 나타내었다. 이때 초점거리는 다음과 같다 [4].



(a)



(b)



(c)

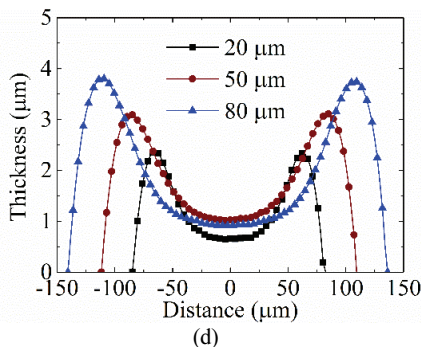


Fig. 2. Optical images of the PMMA stripes when the coating gap is (a) 20 μm , (b) 50 μm , and (c) 80 μm at a maximum coating speed (V_M), and (d) measured profile of those stripes.

$$f = \frac{R}{n - 1}$$

여기서 R 은 곡률 반경을 나타내고 n 은 물질 고유의 굴절률이다. R 은 렌즈의 폭에 비례하고 두께에 반비례하기 때문에 렌즈의 종횡비(aspect ratio, T/W)가 클수록 곡률 반경이 작아지고 초점 거리가 짧아진다. 따라서, PMMA stripe의

Table 1. Summary of measured thickness (T) and width (W) of the PMMA stripes for different coating gaps and speeds

Coating speed (mm/s)	Coating gap					
	20 μm		50 μm		80 μm	
	W (μm)	T (μm)	W (μm)	T (μm)	W (μm)	T (μm)
4	Non-uniform width		285	3.6	270	3.8
6	227	2.9	220	3.2	Line breakup	
8	166	2.3	Line breakup			
10	Line breakup		Line breakup			

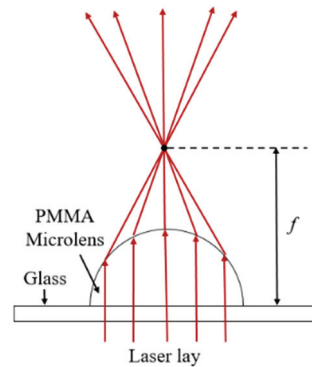


Fig. 3. Path of laser light beams passing through the hemispherical microlens.

종횡비가 클수록 thermal reflow 후의 CML 초점거리가 짧아지게 된다. 최고 코팅 속도에서 코팅 갭에 따른 stripe의 종횡비는 각각 0.0139(코팅 갭=20 μm), 0.0143(코팅 갭=50 μm), 0.0135(코팅 갭=80 μm)으로 계산되었으며 50 μm 의 코팅 갭을 사용할 때 종횡비가 가장 큼을 알 수 있다. 초점거리가 짧으면 광 확산 정도가 커지게 되므로 광 확산을 효과적으로 하기 위해서는 50 μm 의 갭을 사용하여 PMMA stripe를 제작하는 것이 적합하다.

앞서 제작된 PMMA stripe은 두께가 얇아 마이크로렌즈로 사용하기에는 여전히 초점거리가 길다. 두께를 증가시키기 위하여, 우리는 갭과 코팅 속도를 각각 50 μm 과 6 mm/s으로 고정하고 동일한 위치에서 PMMA stripe를 반복 코팅하였다. 결함없이 stripe를 반복하여 코팅하기 위해서는 용액의 휘발성(volatility)과 점도(viscosity)를 고려해야 한다. 낮은 휘발성을 갖는 용매를 사용할 경우, 첫 번째 층을 코팅한 뒤 바로 두 번째 층을 코팅하면 아래 층이 습식 막(wet film) 상태이기 때문에 위 층을 형성할 용액과 하 층의 습식 막이 섞이며 폭이 균일하지 않게 된다. 휘발성이 높은 용매를 사용할 경우, 커피링 효과(coffee ring effect)가 크게 나타나 렌즈 형성이 어렵다. 따라서 우리는 휘발

성을 조절하기 위하여 증기압이 0.8mmHg로 휘발성이 낮은 butyl cellosolve와 증기압이 22mmHg로 휘발성이 높은 toluene을 7:3의 비율로 혼합하여 사용하였다. 또한 저점도(낮은 농도)의 액체는 고점도의 액체에 비해 젖은 표면을 타고 퍼지는 속도가 빠르고 진동(oscillation)이 강하다 [8]. 낮은 점도의 용액으로 반복 코팅을 할 경우, 하부 stripe의 경사면을 타고 용액이 흘러내려 넓은 stripe을 형성하거나 강한 진동으로 인해 폭이 균일하지 않다. 따라서 좁고 균일한 stripe을 제작하기 위해서는 고점도의 용액을 사용해야 하며 본 연구에서는 10 wt%의 농도를 갖는 PMMA 용액을 제조하여 반복 코팅을 진행하였다.

반복 코팅된 PMMA stripe의 광학이미지와 프로파일을 Fig 4에 나타내었으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 3번 반복 코팅된 PMMA stripe는 폭이 거의 변하지 않으며 최고 두께(T_M)만 3.2 μm 에서 6.2 μm 로 약 1.95배 증가하였다. 반복 코팅된 stripe의 종횡비를 계산해본 결과, 종횡비가 0.0143에서 0.0279까지 증가하였으며 보다 짧은 초점 거리

Table 2. Summary of measured thickness (T) and width (W) of the PMMA stripes in Fig. 4

Number of repeated coating	W (μm)	T_M (μm)	T_C (μm)	Aspect ratio (T/W)
1	220	3.2	0.9	0.0143
2	219	4.5	2.2	0.02
3	221	6.2	4.1	0.0279

를 보일 것으로 예상된다. 또한 Fig 4(d)의 프로파일에서 보이듯, 반복 코팅에 의해 stripe 중심부의 빈 공간이 채워지며 중심 두께(T_C)가 증가하는 것을 알 수 있다. 중심 두께 대비 최고 두께의 비율(T_C/T_M)을 계산해보면, 반복 코팅이 안된 단일층 stripe의 경우 0.29로 낮고 3번 반복 코팅된 stripe는 0.66으로 높다. 이를 통해 반복 코팅 수를 증가할수록 PMMA stripe의 중심부가 채워지며 빈 공간이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이후 thermal reflow 공정에서 stripe 중심부의 빈 공간 면적은 마이크로렌즈의 형상을 결정하는 주요 변수가 된다.

앞서 반복 코팅된 PMMA stripe의 형상은 커피링 효과에 의해 양쪽 가장자리가 솟아나는 모습을 보인다. 이와 같은 양 가장자리가 솟아나는 형상을 통상적인 마이크로렌즈 형상으로 바꾸기 위하여 thermal reflow 방법을 적용하였다. Thermal reflow 방법은 고분자의 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g) 이상의 온도 조건에서 용융되는 고분자 수지 계면의 표면장력(surface tension)으로 렌즈 곡면을 성형하는 방법이다. PMMA의 T_g 는 105°C이며 확실한 reflow 효과를 얻기 위하여 150 °C 의 온도로 thermal reflow 공정을 진행하였다.

Thermal reflow된 PMMA stripe의 광학이미지와 프로파일을 Fig 5에 나타내었으며 그 결과를 Table 3에 정리하였다. Fig 5에서 보이듯, 2회, 3회 반복 코팅된 PMMA stripe은 중심부가 볼록한 CML이 되었다. 반면 반복 코팅하지 않은 단일층의 PMMA stripe는 thermal reflow 후에도 볼록한 렌즈 형상이 되지 않았다. 이는 열에 의해 용융된 PMMA가 양 가장자리 최고점(봉우리)에서 중심부쪽으로 흘러내렸지만 중심부의 빈 공간이 크므로 중심부 영역을 모두 채우지 못하기 때문이다. 이때 용융된 PMMA가 흘러내림에 따라 stripe 두께는 3.2 μm 에서 2.5 μm 로 감소한다. 이와 달리, 2번 반복 코팅된 PMMA stripe는 중심부의 빈 공간이 작기 때문에 thermal reflow 시 흘러내린 PMMA가 중심부를 채울수 있다. 하지만 2번 반복 코팅된 PMMA stripe의 빈 공간은 3번 반복 코팅된 PMMA stripe의 것에 비해 크며 흘러내린 대부분의 PMMA가 빈 공간을 채우는데 사용되어 두께는

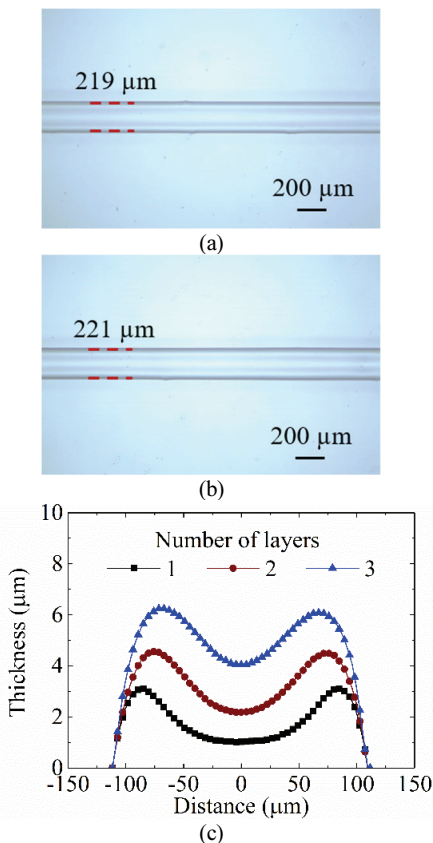


Fig. 4. Optical images of the PMMA stripes formed by (a) 2 times, (b) 3 times repeated coatings, and (c) measured profile of those stripes.

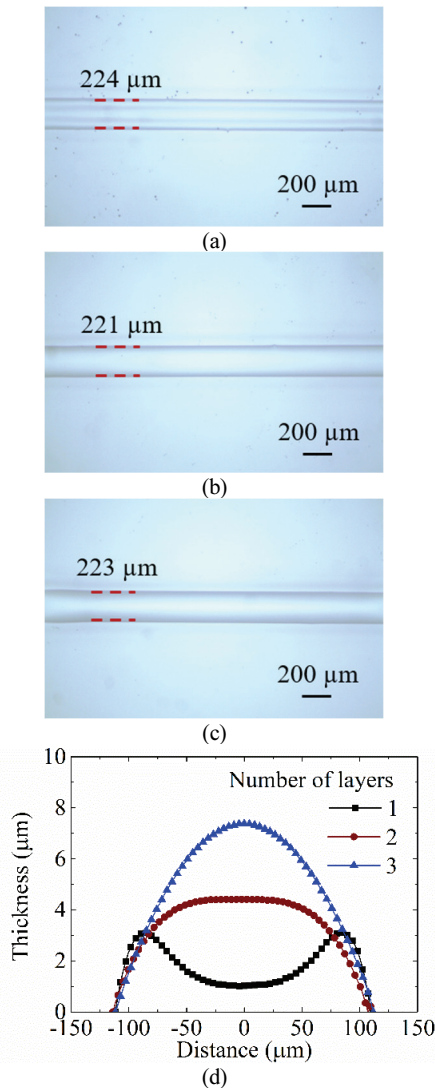


Fig. 5. Optical images of (a) the single-layer PMMA stripe and the CMLs formed by (b) 2 times, (c) 3 times repeated coatings and thermal reflow, and (d) measured profile of those stripe and CMLs.

Table 3. Summary of measured thickness (T) and width (W) of those stripe and CMLs in Fig. 5

Number of repeated coating	W (μm)	T (μm)	Aspect ratio (T/W)
1	224	2.5	0.0111
2	221	3.8	0.0169
3	223	7.3	0.0329

감소하나 중심부가 다소 평탄한 형상을 나타낸다. Fig. 4(d)에서 보이듯, 3번 반복 코팅된 PMMA stripe는 중심부의 빈 공간이 작기 때문에 thermal reflow 시 양 봉우리에서 흘러 내린 PMMA가 중심부의 빈 공간을 채우고도 남아 중심부에 쌓여 중심부가 두꺼워지게 되고 두께가 6.2 μm에서 7.3 μm로 증가한다. 이때 thermal reflow 공정의 시간이 길어질수록 두께가 감소하고 폭이 넓어지다 일정 시간 이상에서 포화(saturation)을 이룰 것이다. 따라서 가장 높은 종횡비를 얻기 위해서는 공정 시간을 적절히 조절할 필요가 있다. 또한 표면장력은 온도에 반비례하기 때문에 너무 높은 온도에서 공정을 진행할 경우 표면장력이 감소하여 마이크로렌즈의 폭이 넓어지고 종횡비를 낮추는 결과를 보일 수 있다. 결과적으로 반복 코팅과 thermal reflow 방법을 적용하여 폭이 223 μm이고 두께가 7.3 μm인 CML을 제작할 수 있었다.

마지막으로 제작된 CML에 대한 광 확산 특성을 비교하기 위하여, 적색 레이저를 제작된 CML에 쏘아 광 확산 정도를 측정하였다. Fig. 6의 레이저 빛 분포에서 보이듯, 유리기판을 통과한 레이저 빛은 원형을 이루는 것에 반해 CML를 통과한 레이저 빛은 좌우로 넓게 확산되는 것을 알 수 있다. 반복 코팅에 의해 CML 두께가 증가함에 따라 레이저 빛의 확산 길이는 4.2 cm에서 5.0 cm까지 증가하였다. 이를 통해, CML의 광 확산 성능을 볼 수 있었으며 반복 코팅 및 thermal reflow공정을 통한 두께, 형상 제어에 의해 광 확산 특성을 향상시킬 수 있음이 증명되었다.

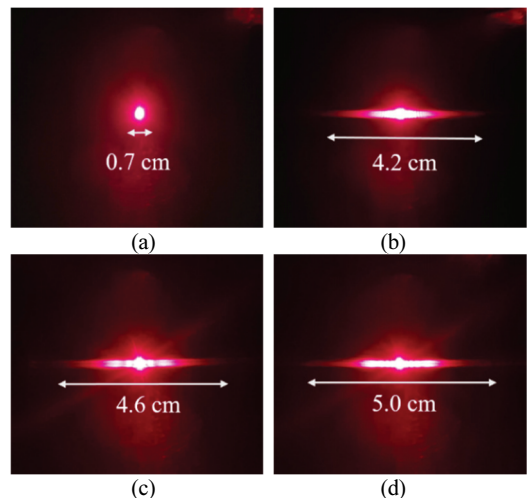


Fig. 6. Image of laser beam through the glass substrate (a) without the CML and with the CML formed by (b) no repeated coating (single coating), (c) 2 times repeated coating, and (d) 3 times repeated coating and thermal reflow.

4. 결 론

슬롯 다이 코팅을 이용하여 PMMA stripe를 코팅하였으며 반복 코팅과 thermal reflow방법을 적용하여 cylindrical 마이크로렌즈를 제작하였다. 슬롯 코팅 시 코팅 갭이 높으면 최고 코팅 속도가 감소하여 stripe 폭이 넓어지고 두께가 증가하였다. 광 확산을 향상시키기 위해서는 stripe의 중횡비를 높여 초점 거리를 짧게 해야 한다. 우리는 50 μm 의 코팅 갭에서 중횡비가 가장 높은 PMMA stripe를 제작할 수 있었다. 추가로 중횡비를 높이기 위하여 stripe를 반복 코팅하였으며 반복 코팅을 위해서는 코팅액의 건조 속도 및 점도가 중요한 변수로 작용하였다. 우리는 낮은 휘발성의 butyl cellosolve와 높은 휘발성의 toluene 혼합을 통하여 건조 속도를 조절하였으며 3번 stripe 반복 코팅을 통해 6.2 μm 의 두께를 갖는 PMMA stripe를 제작할 수 있었다. 그리고 나서 thermal reflow 공정을 통해, 반복 코팅된 PMMA stripe를 중심부가 볼록한 CML로 만들 수 있었다. 최종적으로 3번 반복 코팅과 thermal reflow 방법을 통해 223 μm 의 폭과 7.3 μm 의 두께를 갖는 CML로 만들 수 있었다. 반복 코팅과 thermal reflow공정을 통해 형상이 조절된 CML은 짧은 초점거리를 가지며 레이저 빛을 넓게 확산시키는 것을 실험으로 입증하였다. 이는 향후 어레이(array), 메쉬(mesh) 구조로 CML을 제작하여 OLED 패널의 발광 효율을 개선하거나 고효율 다이오드 레이저 빔의 변환, 디스플레이 모아레 패턴 억제 등에 적용 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Ee, Y. et al., "Optimization of Light Extraction Efficiency of III-Nitride LEDs with Self-Assembled Colloidal-Based microlenses," *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, Vol. 15, pp. 1218-1225, 2009.
2. Park, J. B., Shin, D. K., Han, S. G., and Park, J. W., "Enhancement of Light Extraction from Transparent OLED Lighting Panels," *J. of The Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, pp. 41-45, 2017.
3. Zhou, L., Dong, X., Lv, G., Chen, J., and Shen, S., "Fabrication of concave microlens array diffuser films with a soft transparent mold of UV-curable polymer," *Opt. Commun.*, Vol. 342, pp. 167-172, 2015.
4. Yuan, W., Li, L., Lee, W., and Chan, C., "Fabrication of Microlens Array and Its Application: A Review," *Chin. J. Mech. Eng.*, Vol. 31, pp. 1-9, 2018.
5. O'Neill, F., and Sheridan, J., "Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments," *Optik*, Vol. 113, pp. 391-404, 2002.
6. Bae, S., Kim, K., Yang, S., Jang, K., and Jeong, K., "Multifocal microlens arrays using multilayer photolithography," *Opt. Express*, Vol. 28, pp. 9082-9088, 2020.
7. Gschrey, M. et al., "Highly indistinguishable photons from deterministic quantum-dot microlenses utilizing three-dimensional in situ electron-beam lithography," *Nat. Commun.*, Vol. 6, 7662, 2015.
8. Chen, L., and Bonaccorso, E., "Effects of surface wettability and liquid viscosity on the dynamic wetting of individual drops," *Phys. Rev. E*, Vol. 90, 022401, 2014.

접수일: 2020년 8월 20일, 심사일: 2020년 9월 7일,
게재확정일: 2020년 9월 11일