

# 솔벤트 증기를 이용한 폴리머 마이크로 렌즈의 표면 연마

## Surface Polishing of Polymer Microlens with Solvent Vapor

김신형<sup>1</sup>, 송준엽<sup>1</sup>, 이평안<sup>2</sup>, 김보현<sup>2</sup>, 오영탁<sup>3</sup>, 조영학<sup>1,✉</sup>

Sin Hyeong Kim<sup>1</sup>, Jun Yeob Song<sup>1</sup>, Pyeong An Lee<sup>2</sup>, Bo Hyun Kim<sup>2</sup>, Young Tak Oh<sup>3</sup>, and Young Hak Cho<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Natl. Univ. of Sci. & Tech.)

<sup>2</sup> 송실대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil University)

<sup>3</sup> 신안산대학교 기계과 (Department of Mechanical Engineering, Shin Ansan University)

✉ Corresponding author: yhcho@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6361

Manuscript received: 2013.1.23 / Revised: 2013.4.24 / Accepted: 2013.5.8

*Today, there are lots of progresses in the field of lens researches, especially in the microlens fabrication. Unlike normal lenses, microlens has been widely used as a role of improving the performance of photonic devices which increase the optical precision, and also used in the fields of the display. In this paper, polymer microlenses with 300  $\mu\text{m}$  diameter were replicated through hot-embossing from nickel mold which was fabricated by micro-EDM. After hot-embossing process, the polymer microlenses have a rough surface due to the crater formed by micro-EDM process, which is projected onto the surface of the lenses. The surface of polymer microlenses was polished using solvent vapor to improve the surface roughness of the microlenses without changing their shape. In the experiment, the surface roughness was improved with the processing time and vapor temperature. Also, the roughness improvement was greatly affected by the solubility difference between polymer and solvent.*

Key Words: Microlens (마이크로렌즈), Micro-EDM (마이크로 방전가공), Hot-embossing (핫엠보싱 공정), Solvent vapor polishing (솔벤트 증기 연마)

### 1. 서론

마이크로 렌즈는 광학 시스템의 기본이 되는 부품으로, 다양한 직경의 마이크로 렌즈 및 마이크로 렌즈 어레이는 재료에 따라 제작 방법이 다양하며, 광디바이스의 소형화, 고집적화, 저가격화 추세에 따라 그 필요성과 응용 분야가 급격히 증가하고 있다.<sup>1</sup> 광통신 시스템에서는 광섬유와 광원의 결합 효율을 증가시키기 위해 사용되고 있으며, 광검출기에서는 이미지 센서의 광감도를 높여주는 역할을 하는 등 광학장치에 있어서 광학소자 혹은 광학부품 등과 조합하여 여러 분야에 사용되고 있다.

마이크로 렌즈를 제작할 때 사용하는 재료에는

크게 유리(Glass), 경화 접착물(Resin), 폴리머(Polymer) 등이 있으며, 유리를 사용하여 렌즈를 제작하는 방법에는 직접적으로 CO<sub>2</sub> 가스 레이저를 사용하여 유리 플레이트 표면에 형성하는 방법,<sup>2</sup> 유리 웨이퍼의 표면이 초점에 맞춰진 위치를 탄산가스 레이저 빔으로 가열할 때, 표면 장력이 발생하여 마이크로 렌즈를 생성하는 방법<sup>3</sup> 등이 있다. 이외에도 경화 접착물을 사용한 렌즈 제작에는 대표적으로 잉크젯 기술을 이용하여 폴리머 용액과 UV 경화 접착물을 증착하여 만드는 방법<sup>4</sup>이 있다.

폴리머 렌즈의 경우 포토레지스트(Photoresist)의 thermal reflow 법으로 금속 또는 폴리머 몰드를 만든 후, 사출성형 또는 hot-embossing을 이용하여 렌

즈를 제작한다. 이 과정에서 금속 몰드 제작은 제작 공정이 복잡하며, PDMS와 같은 재질의 폴리머 몰드의 경우는 hot-embossing과 같은 공정에는 적합하지 않다.<sup>5</sup>

본 연구에서는 폴리머 렌즈를 제작하기 위하여 마이크로 방전가공을 이용하여 니켈 몰드에 마이크로 렌즈 몰드를 만든 후에, PMMA (Poly(methyl methacrylate))와 PC (Polycarbonate)를 사용하여 hot-embossing 과정을 통해 마이크로 렌즈 형상을 제작하였다. 이와 같이 제작된 마이크로 렌즈는 니켈 몰드 제작 시 방전 가공으로 인해 생긴 방전흔(Crater)이 폴리머에 그대로 전사되어 표면이 매끄럽지 못하고, 집광 효과가 떨어지는 등 렌즈로서의 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 렌즈의 형상에는 영향을 미치지 않으면서 표면의 거칠기를 개선하기 위하여 다양한 솔벤트를 이용하여 표면 연마(Surface polishing)을 수행하였다.<sup>6</sup> 솔벤트 증기 연마에 작용하는 중요한 변수로는 폴리머와 솔벤트의 용해도(Solubility)가 있으며, 사용하는 폴리머의 용해도와 비슷한 용해도를 가진 솔벤트를 이용하여 적정 온도와 시간 동안 연마를 하게 되면 형상의 변형 없이 렌즈의 표면 거칠기만을 개선시킬 수 있었다.

본 연구에서는 hot-embossing을 이용하여 폴리머 마이크로 렌즈를 만든 후, 솔벤트 증기 연마를 수행한 후 마이크로 렌즈의 특성을 파악하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

### 2.1 방전 가공을 이용한 니켈 몰드 제작

실험에서 사용한 니켈 몰드는 마이크로 방전가공을 이용하여 제작하였다. Fig. 1과 같이 먼저 초경 합금(WC-Co alloy)을 반구 형태의 렌즈 형상으로 방전 가공한 뒤, 이를 다시 방전 공구전극으로 이용하여 니켈 재료에 렌즈 몰드를 가공하였다. Fig. 1(a)과 같이 구리 판을 미리 계산된 공구 경로에 따라 움직여, 지름 300 μm의 반구 모양의 공구를 가공하였다. 이렇게 가공된 공구를 니켈 몰드 재료에 수직으로 이송시켜, 방전가공을 수행하였다. 이 때 사용된 가공 조건은, 인가 전압 100 V, 축전용량 (Capacitance) 500 ~ 10000 pF, 공구 회전속도 1500 rpm 이며, 절연액으로는 등유(Kerosene)를 사용하였다. 방전 에너지는 인가 전압과 축전용량에 의해 결정된다. 방전 에너지가 클수록 가공면이 거칠어진다. Fig. 2는 각기 다른 축전용량을 사

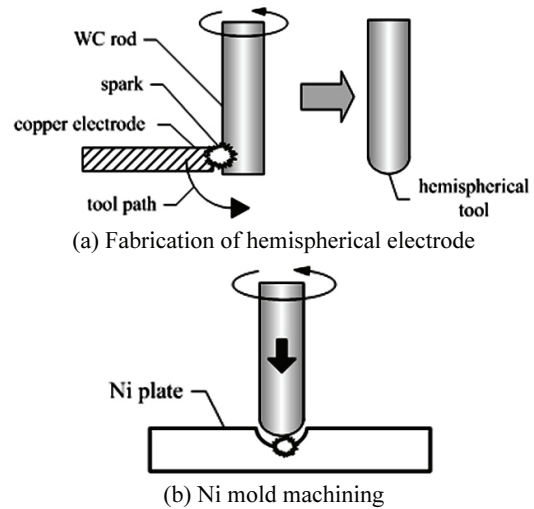


Fig. 1 Processes of Ni mold fabrication by micro EDM

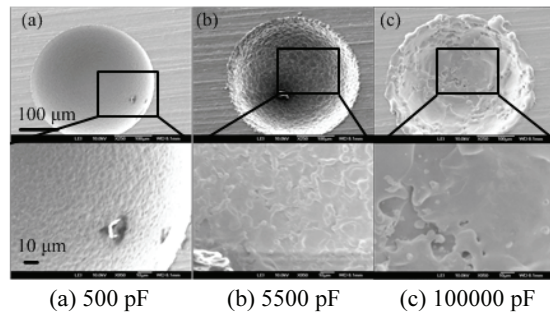


Fig. 2 Machined surface according to capacitance

용하여, 니켈 표면에 방전 가공한 사진이다. 방전 에너지가 클수록 방전흔의 크기가 커져, 가공 표면이 거칠어지는 것을 볼 수 있다. 한편 방전 에너지가 증가하면, 가공 시간이 줄어들며, 그 예로, 1000 pF로 가공했을 때에 비해 500 pF로 가공했을 때 가공시간이 2배 정도 증가한다.

### 2.2 Hot-embossing을 이용한 폴리머 마이크로 렌즈 제작

마이크로 방전가공을 통해 제작된 니켈 몰드를 이용하여 렌즈 형상을 hot-embossing방법으로 폴리머에 전사시켜 폴리머 렌즈를 제작하였다. (Fig. 4) PMMA에 대해 온도 100 °C, 압력 7 MPa의 조건에서 hot-embossing을 5분간 진행한 후 50 °C까지 식힌 후 몰드에서 렌즈를 떼어내었다. PC는 온도 150 °C, 압력 7 MPa의 조건에서 hot-embossing을 10분간 진행한 후 70 °C까지 식힌 후 렌즈를 몰드로

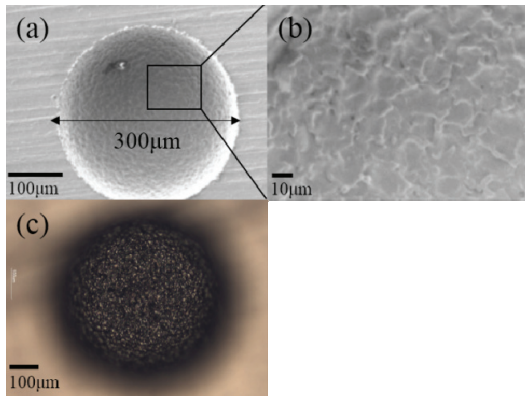


Fig. 3 (a) FE-SEM image (b) FE-SEM image of surface (c) Microscope image of Ni mold

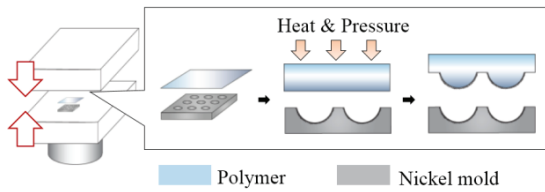


Fig. 4 Hot-embossing process

부터 떼어내었다.

### 2.3 Solvent vapor 를 이용한 렌즈 표면 연마

방전흔으로 인한 거친 표면이 그대로 렌즈 표면에 전사되게 되면 이는 렌즈의 집광 효과 등 렌즈의 특성에 큰 영향을 미치므로 표면 거칠기를 개선하기 위해 솔벤트 증기를 이용한 표면 연마를 수행하였다.<sup>6</sup> 앞에서 언급한 바와 같이 용해도 정도를 파악하는 변수로 용해도 매개 변수(Solubility parameter)가 있으며, 이는 재료 사이의 상호 작용의 정도를 수치적으로 제공하여 판단할 수 있는 지표이다.<sup>7</sup>

렌즈 제작을 위한 폴리머로는 PMMA (Solubility parameter:  $9.5 \text{ cal}^{1/2}\cdot\text{cm}^{3/2}$ )와 PC (Solubility parameter:  $11 \text{ cal}^{1/2}\cdot\text{cm}^{3/2}$ )을 이용하였으며, 단일 증기로 연마하기 위해 사용한 솔벤트는 Acetone (Boiling point:  $56.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , Solubility parameter:  $9.9 \text{ cal}^{1/2}\cdot\text{cm}^{3/2}$ )과 Toluene (Boiling point:  $110.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , Solubility parameter:  $8.9 \text{ cal}^{1/2}\cdot\text{cm}^{3/2}$ ), Methanol (Boiling point:  $64.96 \text{ }^\circ\text{C}$ , Solubility parameter:  $16 \text{ cal}^{1/2}\cdot\text{cm}^{3/2}$ ) 이다. 솔벤트 증기를 이용하여 표면 연마를 할 경우 중요한 변수인 온도와 시간 중, 온도는 끓는점과 비슷한 온도로 일정하게 유지하였으며, 표면 연마 시간 10초

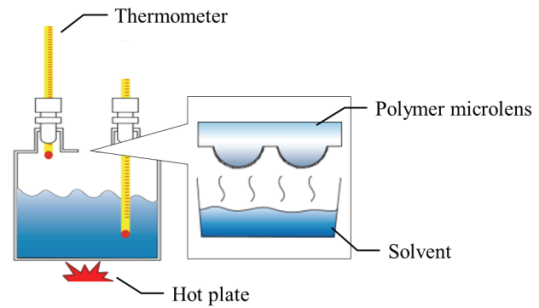


Fig. 5 Experimental setup for solvent vapor polishing

Table 1 Vapor solvent polishing conditions

Material	Time (sec)		
	Acetone (54 °C)	Toluene (104 °C)	Methanol (63 °C)
PMMA	10	10	10
	5	5	15
	13	13	20
PC	10	10	10
	5	5	5
	3	3	15

를 기준으로 변화시키며 실험을 진행하였다. 실험 장비는 Fig. 5와 같이 설치하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

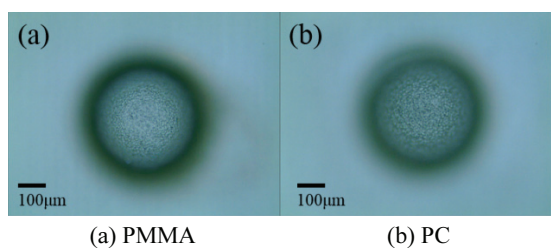
실험은 마이크로 렌즈 형상에는 영향 없이 렌즈 표면의 거칠기만을 개선할 수 있는 솔벤트 증기 연마(Solvent vapor polishing) 조건을 찾는 것에 중점을 두고 실험을 진행하였다. 거칠기 측정에는 Nano 3D (A&I, Korea)을 이용하였으며, 거칠기 측정은 마이크로 렌즈의 가장 윗면을 기준으로 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 성능평가

### 3.1 마이크로렌즈의 표면 특성

Fig. 6은 제작된 PMMA 마이크로 렌즈와 PC 마이크로 렌즈의 광학 현미경 사진이며, 이를 통해 니켈 몰드에서 확인할 수 있었던 방전흔이 그대로 전사되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 솔벤트 증기를 이용한 연마 후 PMMA 마이크로 렌즈의 FE-SEM 사진들이다. Acetone으로 표면 연마를 한 경우 (Fig. 7(a)) 시간 5초에서 렌즈의 형상 변화 없이 거칠기만 개선이 되었으며, Toluene을 이용하였을 경우 (Fig. 7(b))에는 시간 10초에서 거칠기 개선이 가장 좋은 것을 알 수 있었다. Toluene의 경우 연마 시간 10초를 기준으로, 10



(a) PMMA (b) PC

Fig. 6 Microscope images of microlens

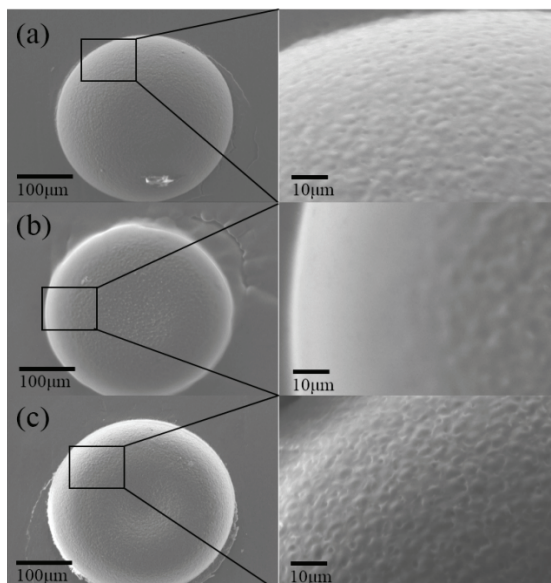


Fig. 7 FE-SEM images of PMMA microlens polished by (a) Acetone (54 °C, 5 sec), (b) Toluene (104 °C, 10 sec), (c) Methanol (63 °C, 20 sec)

초보다 짧은 경우에는 연마 되는 정도가 눈에 띄게 적어졌으며, 시간을 좀 더 늘렸을 경우에는 폴리머 렌즈 형상에 변화가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 Toluene을 이용한 연마에 있어서 연마 시간 조절이 매우 중요함을 알 수 있었다. Methanol로 했을 경우 (Fig. 7(c))에는 렌즈의 표면 거칠기가 거의 개선되지 않았다.

재료를 바꾸어 PC로 제작된 마이크로 렌즈에 대해 연마를 수행하였을 때, Fig. 8(a), (b)에서와 같이 Acetone과 Toluene으로 연마를 한 경우 각각 시간 5초와 3초에서 가장 많이 거칠기 개선이 이루어졌으며, 이 때의 거칠기 정도 또한 비슷하였다. 그러나, Methanol로 연마를 했을 경우 PMMA의 경우와 마찬가지로 거칠기의 개선이 이루어지지 않았다.

PMMA와 PC 두 종류의 폴리머 모두에 대해

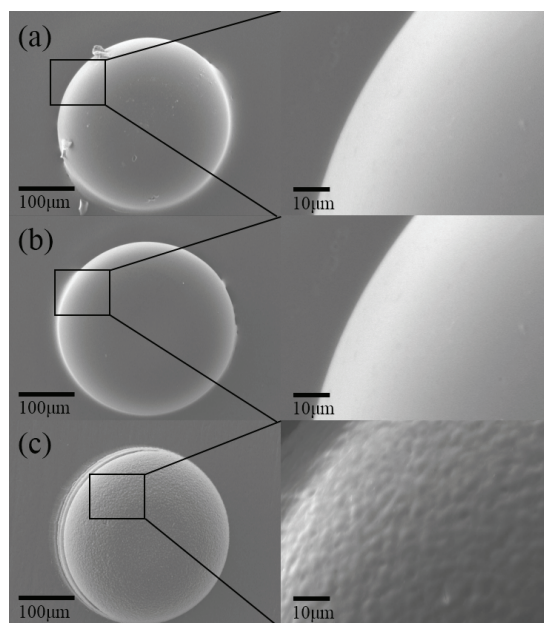


Fig. 8 FE-SEM images of PC microlens polished by (a) Acetone (54 °C, 5 sec), (b) Toluene (104 °C, 3 sec), (c) Methanol (63 °C, 15 sec)

Methanol로 연마를 진행하였을 경우 렌즈의 표면 거칠기가 개선되지 않았다. 그 이유로는 솔벤트 증기 연마의 기본 조건인 용해도의 차이로 판단된다.

본 연구에 사용된 폴리머와 솔벤트의 용해도를 비교해 보았을 때, Acetone과 Toluene의 용해도와 PMMA의 용해도 차이는 각각 0.4, 0.6이었으며, PC와의 용해도 차이는 1.1, 2.1로, 크게 차이가 나지 않았다. 그러나, Methanol과 두 폴리머들의 용해도는 5 이상의 큰 차이를 나타내어 폴리머와 솔벤트가 서로 잘 용해되지 않아 연마가 충분히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.<sup>6</sup>

Table 2는 Table 1에서 주어진 조건들에 대해 표면 연마 후 거칠기 측정 결과를 나타낸다. 연마 전 폴리머 마이크로 렌즈의 표면거칠기 ( $R_a$ )는 PMMA, PC 모두 평균 3.8  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 솔벤트를 이용한 연마 후에는 PMMA 렌즈의 경우, Acetone으로 5초 동안 진행했을 때 평균 1.7  $\mu\text{m}$ 로 가장 많이 개선이 되었으며, Methanol로 진행했을 때에는 3  $\mu\text{m}$ 로 다른 솔벤트에 비해 개선 정도가 떨어졌다. PC 렌즈의 경우에는 Toluene으로 3초 동안 진행했을 때 평균 1.2  $\mu\text{m}$ 로 가장 많은 개선이 이루어졌으나, Methanol의 경우에는 평균 2.9  $\mu\text{m}$ 로 개선이 크게 이루어지지 않았음을 알 수 있다.



Table 2 Surface roughness after vapor solvent polishing

Material	R <sub>a</sub> (μm)		
	Acetone (54 °C)	Toluene (104 °C)	Methanol (63 °C)
PMMA	1.0	1.8	3.4
	0.77(-)	1.2(-)	2.7
PC	1.3(-)	0.8(-)	3.1
	1.1	1.0(-)	2.8
	1.4	1.2	2.7

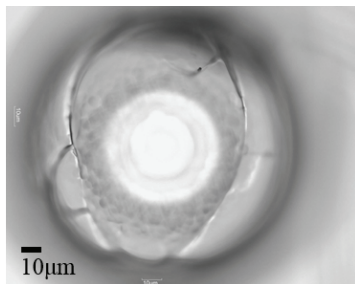


Fig. 9 Microscope image of microlens of PMMA with crack due to long polishing time

모든 폴리머 마이크로 렌즈에 나타난 공통적인 결과는 솔벤트의 증기 처리시간이 길수록 폴리머 표면의 연마정도가 더 커졌으며, 솔벤트 증기 온도가 높을수록 연마되는 정도가 더 커졌다. 그러나 솔벤트 증기 처리시간이 너무 길거나 증기 온도가 너무 높은 경우에 대해 연마를 종료한 후, 식히는 과정에서 폴리머 렌즈의 표면에 균열이 생기거나 형상의 변화가 발생하였다.

Fig. 9에서와 같이 PMMA 마이크로 렌즈의 경우, Acetone으로 13초 동안 연마를 했을 경우 표면의 거칠기는 평균 0.77 μm로 크게 개선이 되었으나, 형상에 변화가 발생하였으며 렌즈 표면에 균열 또한 발생하였다. Table 2에 나와있듯이 Fig. 7과 Fig. 8에 나와있는 조건들보다 거칠기가 더욱 개선된 조건들이 있다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 거칠기는 개선이 되었으나 렌즈 표면에 균열이 발생한 조건들이며, (-)로 표시하였다. 이와 같이 렌즈의 표면에 균열이 발생하는 이유는 연마 중 폴리머에 녹아들었던 솔벤트 증기가 연마 종료 후 증발하면서 폴리머의 부피가 줄어들어 렌즈 표면에 균열이 생긴 것으로 파악된다. 이와 관련된 자세한 사항은 현재 연구가 진행 중에 있으며 차후 보다 자세한 논의가 필요할 것으로 파악된다.

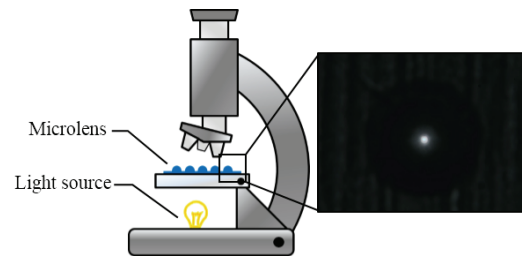


Fig. 10 Intensity measurement of microlens

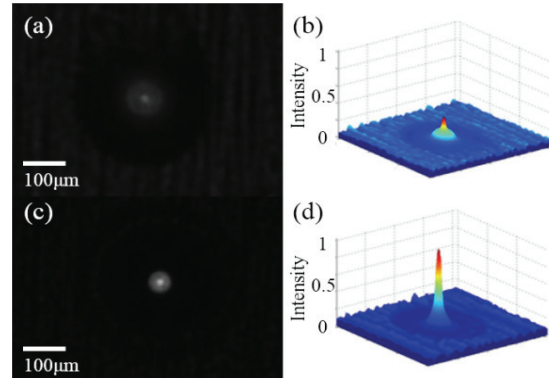


Fig. 11 Microscope images & light intensity graphs of PMMA microlens (Toluene, 104 °C, 10 sec), before polishing ((a), (b)) and after polishing ((c), (d))

### 3.2 마이크로렌즈의 성능 측정

제작된 폴리머 마이크로 렌즈의 표면 거칠기가 개선된 정도를 파악하기 위해 Fig. 10과 같이 광학 현미경 (Olympus, BX51)을 이용하여 intensity를 측정하여 평가하였다. 광원은 광학 현미경의 백라이트를 이용하였으며, 이미지 파일은 Motik program을 이용하여 저장한 후에 Matlab을 이용하여 intensity 그래프를 얻었다.

Fig. 11은 Toluene을 이용하여 104 °C에서 10 초 동안 연마한 PMMA 마이크로 렌즈를 이용하여 관찰한 광학 현미경 사진과 intensity 그래프이며, Fig. 12는 Toluene으로 104 °C에서 3초 동안 연마한 PC 마이크로 렌즈로 관찰한 광학 현미경 사진과 intensity 그래프이다. 이를 통해 마이크로 렌즈가 솔벤트 증기 연마를 통해 표면이 개선됨에 따라 집광 정도가 변한 것을 알 수 있으며, 연마 전과 후를 비교하였을 때 빛이 산란되는 현상이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 즉, 렌즈를 통과하지 않았을 때 빛의 intensity를 1로 기준을 잡았을 때, PMMA

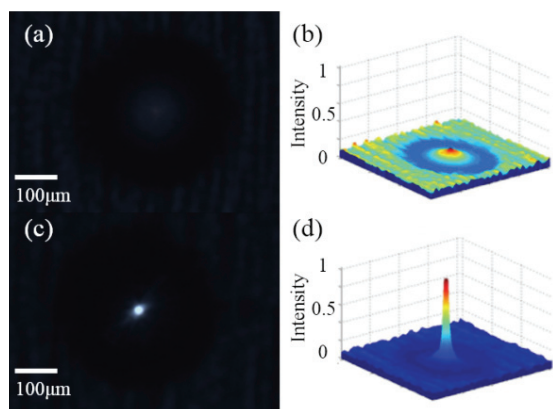


Fig. 12 Microscope images & light intensity graphs of PC Microlens (Toluene, 104 °C, 3 sec) before polishing ((a), (b)) and after polishing ((c), (d))

렌즈의 경우 연마 전 intensity가 0.30이었으나, 연마 후 intensity가 0.91까지 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 그래프에 나타난 바와 같이 빛이 산란되지 않고 한 지점으로 집광되는 것을 확인할 수 있었다. PC 렌즈의 경우도 마찬가지로 intensity가 0.14에서 0.94로 향상되었으며, 한 지점으로 집광된 것을 볼 수 있었다.

이 결과를 통해 마이크로 방전 가공을 통해 제작된 니켈 몰드로부터 만들어진 폴리머 마이크로 렌즈의 표면 거칠기가 본 연구에서 제안하는 솔벤트 증기를 이용한 연마를 통해 향상되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 다양한 솔벤트를 통해 표면 연마가 가능하다는 사실로부터 본 연구에서 제안된 이외의 폴리머에 대해서도 표면 연마가 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 마이크로 방전 가공을 이용하여 제작된 니켈 몰드로 hot-embossing 공정을 통해 PMMA 렌즈와 PC 렌즈를 제작하였다. 그 후 방전 흔에 의한 렌즈 표면의 거칠기를 개선시키기 위하여 솔벤트 증기 연마를 진행하였다. Acetone, Toluene, Methanol을 이용하여 표면 연마를 수행하였으며, PMMA 및 PC의 용해도가 가장 비슷한 Acetone으로 진행했을 경우에 연마가 가장 잘 이루어졌다. 솔벤트 증기를 이용한 연마에 있어서 증기 온도와 증기 노출 시간이 중요한 변수로 작용하므로 솔벤트의 종류에 따라 적절한 증기 온도

와 시간을 선택하는 것이 중요하다. 긴 시간 및 높은 증기 온도는 렌즈 표면에 균열 및 형상 변화를 야기하였으며, 이에 대한 자세한 연구는 현재 진행 중에 있다. 또한, 폴리머 종류에 따라 다양한 솔벤트를 조합하여 솔벤트 증기 연마를 통해 마이크로 방전가공 및 hot-embossing 공정으로 제작된 비구면 폴리머 렌즈의 형상에 미치는 영향을 파악할 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- McCormick, F. B., Tooley, F. A. P., Cloonan, T. J., Sasian, J. M., Hinton, H. S., Merseau, K. O., and Feldlum, A. Y., "Optical interconnections using microlens arrays," *Opt. Quant. Electron.*, Vol. 24, pp. S465-S477, 1992.
- Wakaki, M., Komachi, Y., and Kanai, G., "Microlenses and microlens arrays formed on a glass plate by use of a CO2 laser," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 4, pp. 627-631, 1998.
- Mihailov, S. and Lazare, S., "Fabrication of refractive microlens array by excimer laser ablation of amorphous Teflon," *Applied Optics*, Vol. 32, No. 31, pp. 6211-6218, 1993.
- MacFarlane, D. L., Narayan, V., Cox, W. R., Chen, T., and Hayes, D. J., "Microjet fabrication of microlens array," *IEEE Photonics Technology Letter*, Vol. 6, No. 6, pp. 1112-1114, 1994.
- Miyashita, T., "Standardization for microlenses and microlens arrays," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 8B, pp. 5391-5396, 2007.
- McGinniss, V. D., "Vaporous solvent treatment of thermoplastic substrates," U.S. Patent: 04529563, July 16, 1985.
- Hansen, M. C., "Hansen Solubility Parameters: A user's handbook," CRC Press, 2007.