

솔벤트 증기처리 Reflow를 이용한 폴리머 마이크로 렌즈 제작 및 특성고찰

Fabrication and Characterization of Polymer Microlens using Solvent-vapor-assisted Reflow

양승우¹, 김신형¹, 김보현², 조영학^{1,✉}
Seung Woo Yang¹, Sin Hyeong Kim¹, Bo Hyun Kim², and Young Hak Cho^{1,✉}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology)

² 숭실대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil University)

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

Manuscript received: 2014.11.29 / Accepted: 2015.2.9

In this paper, we propose a simple and low-cost fabrication method of polymer microlens using solvent-vapor-assisted reflow (SVAR). Metal molds for replication of polymer were fabricated using micro milling and the cylindrical shape of polymer was imprinted using hot-embossing process. The cylindrical shape of polymer was changed to hemispherical lens shape by SVAR. The characteristics of fabricated microlens were evaluated according to the condition of SVAR such as temperature and time. The focal length of polymer microlens could be controlled more easily in low-temperature and long-time condition than in high-temperature and short-time condition. That is, the level of concentrated light to focal point could be improved through the control of temperature and time. Also, we confirmed that toluene was more appropriate solvent than acetone in fabrication of PMMA polymer microlens using SVAR.

Key Words: Microlens (마이크로 렌즈), Hot-embossing (핫-엠보싱 공정), Solvent-vapor-assisted reflow (솔벤트 증기처리 리플로우), Light concentrating ratio (집광도)

1. 서론

마이크로 렌즈는 적용 분야에 따라 수 μm 에서 수 mm의 크기를 가지며, 반도체 레이저와 광섬유와의 연결부분에서 레이저의 퍼짐을 막는데 사용되며 광 감지 센서의 효율을 증대시키거나 DVD의 광 Pick-up장치에 이용되고 있다.^{1,2} 다양한 마이크로 렌즈 제작 방법이 제안되었으며, 이는 크게

몰드를 사용하지 않고 직접적으로 렌즈 형상을 가공하는 방법과 몰드를 사용하여 렌즈를 제작하는 방법으로 나눌 수 있다. 몰드를 사용하지 않고 직접 렌즈 형상을 가공하는 방법으로는 대표적으로 레이저를 이용한 가공 방법이 있다. 이 방법은 정밀한 가공이 가능하나 가공시간이 오래 걸려 대량 생산에 적합하지 않다는 단점이 있다. 반면 몰드를 사용한 렌즈 제작 방법은 대량생산이 가능하기

때문에 폴리머 렌즈를 제작하기 위해 많이 이용되고 있으며, 이와 같은 마이크로 렌즈용 몰드를 제작하는 방법 역시 다양하여 대표적으로 포토레지스트(photoresist)의 thermal reflow를 이용하는 방법³ 등이 이용되고 있다. 이 방법은 반도체 공정 중 하나인 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하여 웨이퍼 위에 원기둥 형상의 포토레지스트 패턴을 형성하고, 포토레지스트에 열을 가하여 표면장력에 의하여 원기둥 형상을 반구면 형상으로 만든다. 이와 같이 반구면 형상의 포토레지스트 위에 전주를 위한 seed 층을 증착한 후 전주 공정을 통해 금속 몰드를 제작한다. 이 방법은 다수의 마이크로 렌즈 어레이를 가진 몰드 제작 시에는 적합한 방법이나, 렌즈의 형상이 구면 렌즈만 가능할 뿐 아니라 소수의 마이크로 렌즈가 필요한 경우에는 그다지 적합하지 않다.

본 연구에서는 소수의 마이크로 렌즈를 간단하게 그리고 다양한 형상으로의 렌즈 제작이 가능한 방법을 제안한다. 이를 위해 원기둥 형상의 몰드 제작을 위해 마이크로 밀링을 이용하며, 렌즈 가공을 위해 솔벤트 증기처리 reflow (Solvent-vapor-assisted reflow; SVAR)이라는 방법을 처음으로 제안한다. 이전 연구⁴에서 방진가공을 이용하여 반구면 형상의 마이크로 렌즈 몰드를 만든 후, hot-embossing 공정을 통해 제작된 폴리머 마이크로 렌즈의 표면 폴리싱을 위해 솔벤트 증기처리를 이용하였으나, 렌즈의 형상 변화는 거의 일어나지 않았다. 그러나, 본 연구에서 제안하는 SVAR은 적절한 솔벤트 증기처리를 통해 국부적으로 폴리머에 reflow현상을 일으켜 폴리머 마이크로 렌즈를 제작하는 방법으로, 포토레지스트 전체에서 reflow가 발생하는 photoresist thermal reflow 방법과는 차별성이 있다.

본 연구에서는 솔벤트의 종류, 솔벤트 증기처리 시의 온도 및 시간에 따라 다양한 형상의 렌즈 제작이 가능함을 보이고, 이와 같이 제작된 마이크로 렌즈의 특성을 평가하였다.

2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 마이크로 밀링을 이용한 니켈 몰드 제작

실험에서 사용한 니켈 몰드는 마이크로 밀링가공을 이용하여 제작하였다. Fig. 1과 같이 지름 0.3 mm의 밀링공구 (flat endmill)를 40000 rpm으로 회전시키고 수직방향으로 이송하여 두께 1 mm의 니켈

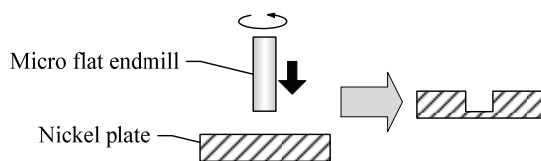


Fig. 1 Ni mold fabrication by micro endmill

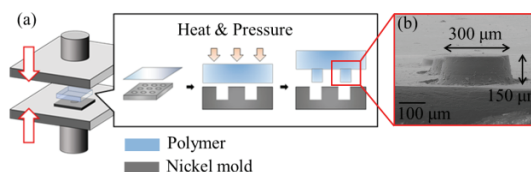


Fig. 2 (a) Hot-embossing process, (b) FE-SEM image of PMMA cylindrical shape by hot-embossing process

기판에 원기둥 형상의 몰드를 가공하였다. 엔드밀을 이용하여 30 μm/s의 이송속도로 가공하는 경우 수직 방향 절삭력이 최대 18 N까지 증가하여, 미세공구가 부러지는 경우가 발생하였다. 따라서 실제 몰드가공에서는 2 μm/s의 매우 낮은 속도로 가공하였으며 이송속도가 낮은 만큼 버 발생도 줄어들어 버의 크기는 무시할만한 정도였다. 가공깊이는 150 μm로 가공하였으며 전기적 접촉을 이용하여 초기 위치를 설정하여 정확한 가공 깊이를 얻을 수 있었다.

2.2 Hot-embossing 을 이용한 원기둥 형상 제작

마이크로 밀링 가공을 통해 제작된 니켈 몰드를 이용하여 지름 300 μm, 높이 150 μm의 원기둥 형상을 hot-embossing 공정을 통해 폴리머에 전사시켰다(Fig. 2). 이 때 사용한 폴리머는 PMMA (Polymethylmethacrylate)이며, hot-embossing 공정 조건은 온도 100°C, 압력 5 MPa의 조건에서 5 분간 진행한 후 70°C 까지 식힌 후 PMMA를 몰드로부터 이형시켰다.

2.3 Solvent-vapor-assisted reflow 를 이용한 원기둥의 형상 변화

Hot-embossing 공정을 통해 제작된 원기둥 형상의 폴리머에 SVAR을 이용하여 마이크로 렌즈를 제작하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 이용하였다. SVAR은 솔벤트를 적절한 온도로 가열할 때 증발되는 솔벤트 증기를 이용하여 폴리머의 reflow

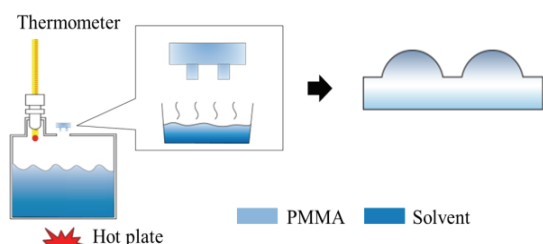


Fig. 3 Experimental setup for solvent-vapor-assisted reflow (SVAR)

를 발생시키는 것으로, 솔벤트 증기의 온도 및 처리 시간에 따라 형상 변화 정도가 달라지는 것을 이용하였다. 이와 같이 열이 아닌 솔벤트 증기에 의한 reflow를 이용함으로써 렌즈와 같은 재질로 이루어진 폴리머 기관의 변형을 최소화할 수 있다.

이전 연구⁴에 따르면 솔벤트 증기를 이용한 표면 가공에 있어서 중요한 변수로 솔벤트와 폴리머의 용해도 (Solubility parameter)⁵가 있으며, 이는 재료 사이의 상호 작용의 정도를 수치적으로 제공하여 판단할 수 있는 지표이다. 이에 따르면 사용하는 폴리머의 용해도와 비슷한 값을 가지는 솔벤트를 이용하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서도 이전 연구⁴에서 이용한 폴리머인 PMMA (Solubility parameter: $9.5 \text{ cal}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2}$)에 대해 솔벤트로 아세톤 (Solubility parameter: $9.9 \text{ cal}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2}$)과 톨루엔 (Solubility parameter: $8.9 \text{ cal}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2}$)을 이용하였다.

또한, 예비실험을 통해 SVAR을 이용한 형상 변화 실험에 있어 솔벤트 증기를 이용한 표면 연마실험에서와 마찬가지로 온도와 시간이 중요한 변수임을 알 수 있었다. 본 실험에 있어 증기 처리 시간은 유의미한 형상 변화가 발생하는 시간을 기준으로 20 sec 간격으로 증가시키며 그 변화를 관찰하였으며, 온도 역시 유의미한 형상 변화가 발생하는 온도를 기준으로 솔벤트의 끓는점 이하의 온도에 대해 실험을 진행하였다. 솔벤트로는 아세톤 (Boiling point: 56.2°C) 및 톨루엔 (Boiling point: 110.6°C)을 사용하였으며, Table 1과 2에 각각의 실험조건을 나타내었다. 이 중에서 회색으로 표시한 부분의 조건에 대해서는 유의미한 형상 변화가 관찰되어 렌즈 형상을 확인할 수 있었으나, 그 이외의 조건에 대해서는 reflow에 의한 원기둥의 형상 변화가 과도하게 많이 일어나 렌즈의 형상이 사라져 렌즈의 형상을 확인할 수 없었다.

Table 1 Experimental conditions of solvent-vapor-assisted reflow with acetone

	20s	40s	60s	80s	100s	160s	220s	280s
35°C								
40°C								
45°C								
50°C								
55°C								

Table 2 Experimental conditions of solvent-vapor-assisted reflow with toluene

	20s	40s	60s	80s	100s
70°C					
80°C					
90°C					
100°C					

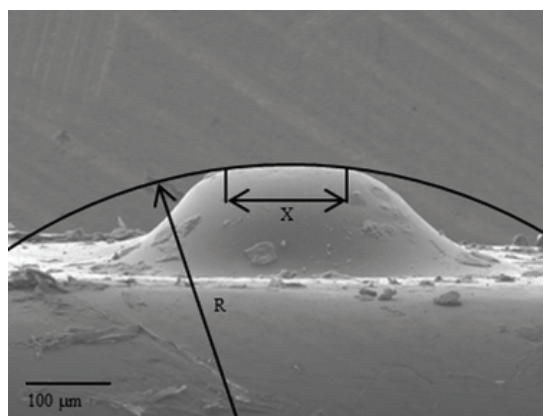


Fig. 4 FE-SEM image of PMMA microlens reflowed by acetone (40°C , 160 sec) and its geometry measurement by AutoCad

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마이크로 렌즈의 형상 변화

Fig. 4는 SVAR 을 수행한 마이크로 렌즈의 FE-SEM 사진으로 형성된 마이크로 렌즈의 형상을 정량적으로 평가하기 위하여 마이크로 렌즈의 치수를 AutoCad를 이용하여 측정하였다. 렌즈의 곡률 반경 (R)과 유효직경 (X)을 측정하였다. R은 렌즈의 초점거리와 반비례 관계에 있으며, X는 실제 렌즈의 초점에 빛이 집광되는 렌즈의 유효직경으로 렌즈의 집광 능력과 관계가 있다.⁶

Fig. 5와 Fig. 6은 아세톤과 톨루엔을 이용하여

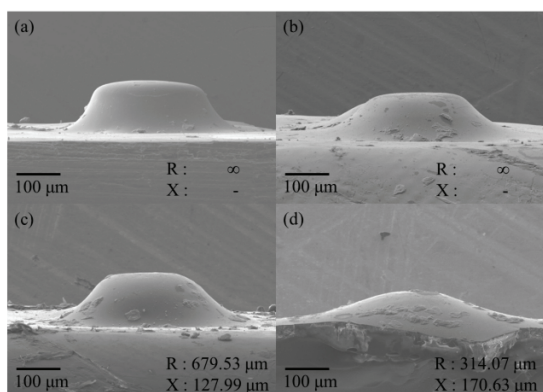


Fig. 5 FE-SEM images of PMMA microlens reflowed by acetone at 40 °C for (a) 40 sec, (b) 80 sec, (c) 160 sec, (d) 280 sec

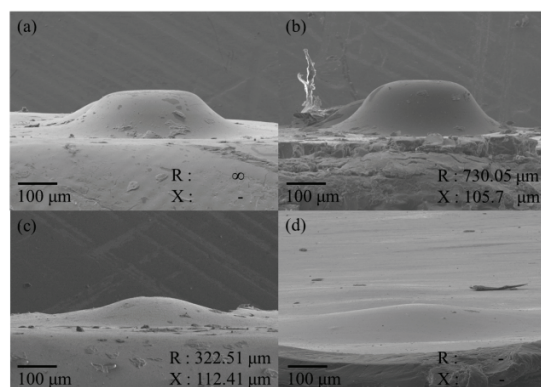


Fig. 7 FE-SEM images of PMMA microlens reflowed by acetone for 80 sec at (a) 40 °C, (b) 45 °C, (c) 50 °C, (d) 55 °C

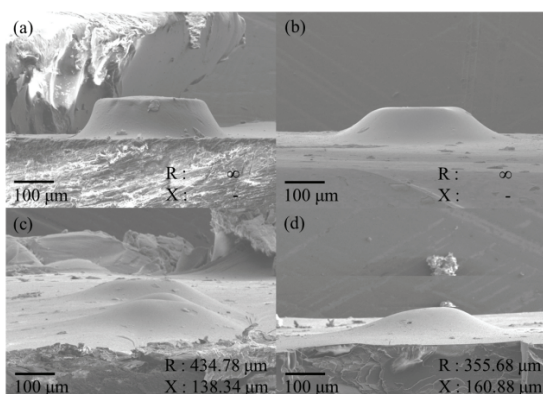


Fig. 6 FE-SEM images of PMMA microlens reflowed by toluene at 80 °C for (a) 20 sec, (b) 40 sec, (c) 80 sec, (d) 100 sec

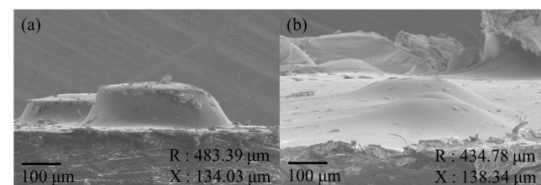


Fig. 8 FE-SEM images of PMMA microlens reflowed by toluene for 80 sec at (a) 70 °C, (b) 80 °C

시간 변화에 따른 PMMA 마이크로 렌즈의 형상을 측정된 FE-SEM 사진들이며, Fig. 7과 Fig. 8은 온도 변화에 따른 PMMA 마이크로 렌즈의 형상을 측정된 FE-SEM 사진들이다. 이로부터 온도와 시간의 두 실험변수 중 하나의 변수가 일정할 때 다른 변수가 커질수록, 즉 폴리머와 솔벤트 사이의 반응이 많이 일어날수록 렌즈의 곡률반경 (R)은 작아지며 유효직경 (X)은 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 마이크로 렌즈의 곡률반경과 유효직경을 조절하여 초점거리와 집광도의 컨트롤이 가능하다.

실험 조건에 따라 원기둥 형상의 윗부분에서 솔벤트 증기처리에 의한 reflow가 완전히 일어나지

않아 원기둥 전체가 렌즈 형상으로의 변화가 이루어지지 않았다. Fig. 5(a),(b) 및 Fig. 6(a),(b) 등에서 볼 수 있듯이 이러한 경우의 유효직경은 측정 불가능하였다. 반면, 완전한 반구형을 이루지는 않았으나 부분적으로 렌즈의 형상이 관찰되는 경우 (Fig. 5(c) 및 Fig. 6(c) 등)에는 렌즈의 유효직경 (X)을 측정할 수 있었으며, 이는 앞으로의 집광도와 상관성이 있음을 3.2장에서 보일 예정이다.

아세톤 및 톨루엔을 이용한 SVAR 실험에 있어 특정온도 (아세톤: 35°C, 톨루엔: 70°C) 이상의 온도에서 특정시간 이상 실험을 진행한 경우 원기둥의 윗부분에 곡률반경이 생성되었다. 또한, 특정온도 (아세톤: 55°C, 톨루엔: 100°C) 이상의 온도에서 특정시간 이상 실험을 진행한 경우에는 반응이 지나치게 많이 일어나 렌즈의 형상이 사라졌다. 이를 Fig. 9의 그래프에서 보이는 바와 같이 Lens shape creating point 및 Excess reaction point로 나타내었다. 즉, 이 두 그래프 사이에서는 렌즈 형상이 구현되었으나, 이를 벗어난 영역에서는 반응이 일어나지 않거나 (Lens shape creating point 아래 영역) 렌즈 형상이 사라져 (Excess reaction point 위 영역)

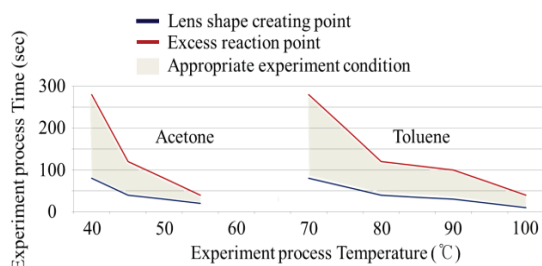


Fig. 9 Conditions of microlens formation according to temperature, time and solvent during SVAR

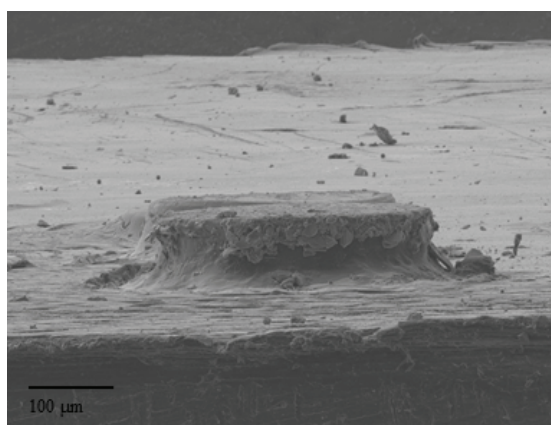


Fig. 10 Crystallization of PC microlens after SVAR using acetone (40 sec, 45 °C)

렌즈 형상을 구현할 수 없었다. 또한 낮은 온도에서 SVAR을 수행할 때에 시간에 따른 렌즈의 형상 변화 정도가 크지 않았으나, 높은 온도에서는 시간에 따른 렌즈의 형상 변화 정도가 크게 발생하여 형상을 컨트롤하기가 쉽지 않았다. 따라서, SVAR을 수행 시에는 낮은 온도에서 시간을 조절하여 렌즈의 형상 변화를 컨트롤하는 것이 보다 유리하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 PMMA 이외의 다른 폴리머로 이전 연구⁴에서도 사용하였던 PC (Polycarbonate, Solubility parameter: 11 cal^{1/2}·cm^{3/2})에 대해서 실험을 진행하였으나, 솔벤트 폴리싱 시의 실험 조건보다 높은 솔벤트 증기의 온도 및 긴 증기 처리 시간에 의해 표면에 결정화 (Crystallization)⁷ 현상이 발생하였다(Fig. 10). 이는 장시간 솔벤트에 노출 시 폴리머의 성질에 큰 변화가 발생한 것으로, SVAR을 이용한 렌즈 제작 시 반드시 폴리머의 특성을 파악하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

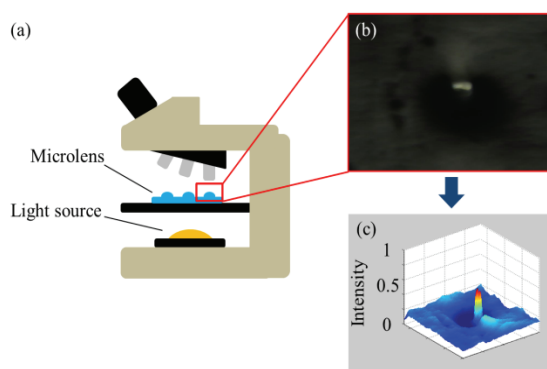


Fig. 11 (a) Experimental setup for intensity measurement of microlens, (b), (c) microscope image & intensity graph of microlens reflowed by toluene (80 °C, 100 sec)

3.2 마이크로 렌즈의 집광도 측정

제작된 PMMA 마이크로 렌즈의 형상 변화 정도를 파악하기 위해 Fig. 11(a)와 같이 광학 현미경 (Olympus, BX51)을 이용하여 광 intensity를 측정하였다. 광원은 광학 현미경의 백라이트를 이용하였으며, 이미지 파일은 TSVIEW를 이용하여 저장한 후에 Matlab을 이용하여 intensity 그래프를 얻었다.

Fig. 11(b),(c)는 톨루엔을 이용하여 80°C에서 100 sec 동안 SVAR을 수행한 PMMA 마이크로 렌즈를 이용하여 관찰한 광학 현미경 사진과 intensity 그래프이다. Intensity값은 어둡고 밝은 정도를 0과 1사이의 값으로 나타낼 수 있으며, 렌즈를 통과하여 초점에 모인 광들의 intensity 값 (I)은 약 0.5 를 나타냈으며, 렌즈의 주변부를 통과한 광들의 intensity 평균값 (I₀)은 약 0.15을 나타냈다. 이 때 집광도 (I/I₀; Concentrating ratio)는 이 두 값의 비 (I/I₀ = 3.3)로 나타낼 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 PMMA와 아세톤 반응 실험에서 온도가 일정할 때 시간의 변화에 따른 집광도의 변화와 시간이 일정할 때 온도의 변화에 따른 집광도의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 PMMA와 톨루엔 반응 실험에 대한 집광도의변화를 나타낸 그래프이다. 사용한 솔벤트와 실험조건의 변화에 따라 시간이 증가할 수록 그리고 온도가 높아질수록 반응이 많이 일어나 렌즈의 집광도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 3.1장에서의 유효직경 (X) 측정 결과와 같은 경향을 보이고 있으며, 반응이 많이 일어날수록 집광도 및 유효직경이 커지는 것을 알 수 있다.

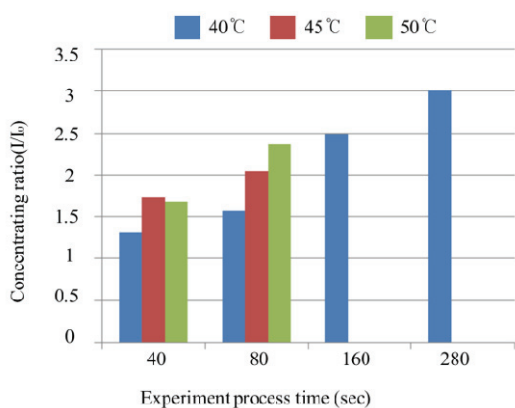


Fig. 12 Light concentrating ratio of PMMA microlens reflowed by acetone at 40 °C, 45 °C, 50 °C

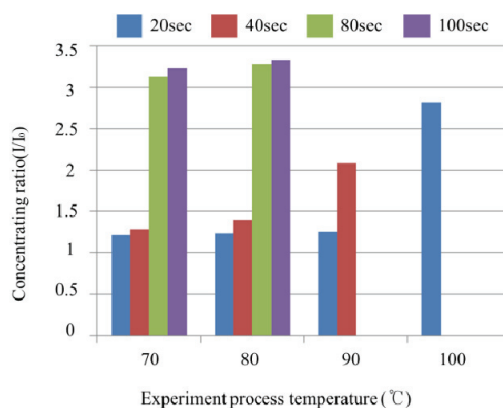


Fig. 15 Light concentrating ratio of PMMA microlens reflowed by toluene during 20 sec, 40 sec, 80 sec, 100 sec

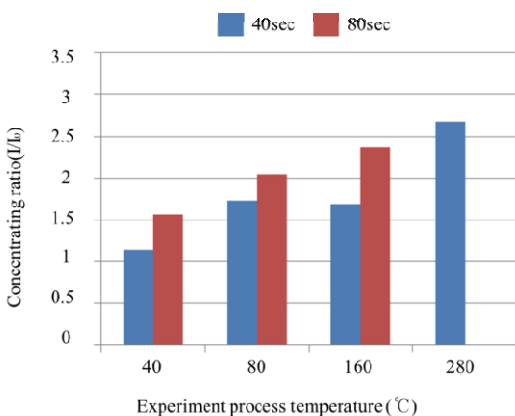


Fig. 13 Light concentrating ratio of PMMA microlens reflowed by acetone during 40 sec, 80 sec

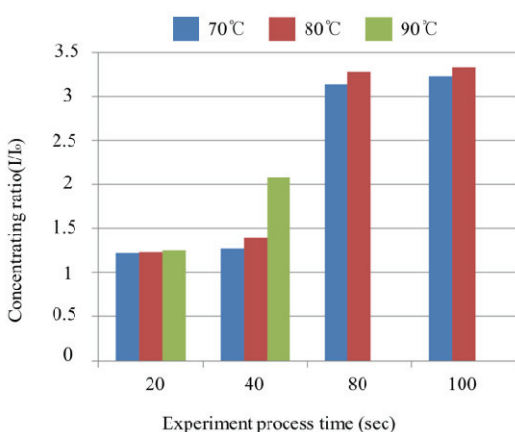


Fig. 14 Light concentrating ratio of PMMA microlens reflowed by toluene at 70 °C, 80 °C, 90 °C

또한, SVAR 이후 표면 거칠기 (R_a)가 톨루엔을 이용한 경우 ($X: 135.94 \mu\text{m}$, $R_a: 66.7 \text{ nm}$)가 아세톤을 이용한 경우 ($X: 134.46 \mu\text{m}$, $R_a: 61.1 \text{ nm}$)보다 약간 더 나뉘에도 불구하고 유효직경이 비슷한 경우 톨루엔을 이용해 제작된 마이크로 렌즈의 집광도 ($I/I_0 = 3.23$)가 아세톤의 경우 ($I/I_0 = 2.67$)보다 약 1.2 배 정도 높은 집광도를 보였다. 이는 솔벤트 증기처리 후 폴리머의 광 투과율과 같은 광 특성에 변화가 발생한 것으로 판단되며, 이와 관련된 보다 자세한 연구가 진행 중에 있다.

이 결과를 통해 마이크로 밀링 가공으로 제작된 원기둥 형상으로부터 SVAR을 이용하여 마이크로 렌즈의 제작가능함을 확인하였다. 즉, 마이크로 렌즈 제작을 위해 열을 이용한 reflow 뿐만 아니라 솔벤트 증기처리를 통해 발생하는 국부적 reflow 현상도 이용가능함을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 솔벤트와 폴리머에 대해서뿐만 아니라 다양한 솔벤트와 폴리머의 조합을 통해서도 마이크로 렌즈 제작이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 밀링 가공을 이용하여 제작된 니켈 몰드로 hot-embossing 공정을 통해 PMMA 기판에 원기둥 형상을 전사 후, 솔벤트 증기처리 reflow (SVAR)를 통하여 원기둥 형상을 변화시켜 마이크로 렌즈를 제작하였다. PMMA에 대해 아세톤과 톨루엔을 이용하여 SVAR을 수행하였으며, 솔벤트 증기처리를 이용한 형상 변화에 있

어서 솔벤트 증기의 온도와 증기처리 시간이 중요한 변수로 작용하였다. SVAR을 통해 제작된 렌즈의 형상을 정량적으로 측정하였으며, 시간과 온도에 따른 렌즈의 집광 정도를 측정하여 렌즈의 성능을 평가하였다. 이 때 동일한 솔벤트에 대해 낮은 온도에서 긴 시간의 증기처리를 통해 렌즈를 제작하는 것이 보다 형상 컨트롤이 용이하였다. 또한, SVAR에 의해 동일한 형상으로 제작된 마이크로 렌즈에 대해서 솔벤트로 톨루엔을 사용한 경우가 아세톤을 사용한 경우보다 약 1.2배 높은 집광도를 나타냈다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Tuantranont, A., Bright, V., Zhang, J., Zhang, W., Neff, J., and Lee, Y., "Optical Beam Steering using Mems-Controllable Microlens Array," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, No. 3, pp. 363-372, 2001.
2. Lesem, L. B., Hirsch, P. M., and Jordan, J. A., "The Kinoform: a New Wavefront Reconstruction Device," *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 13, No. 2, pp. 150-155, 1969.
3. Tsai, J. C. and Hsu, Y. S., "Profile of Microlens Fabricated by the Thermal Reflow Process," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 3, pp. 598-601, 2011.
4. Kim, S. H., Song, J. Y., Lee, P. A., Kim, B. H., Oh, Y. T., and Cho, Y. H., "Surface Polishing of Polymer Microlens with Solvent Vapor," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 6, pp. 644-649, 2013.
5. McGinniss, V. D., "Vaporous Solvent Treatment of Thermoplastic Substrates," US Patent, No. 4529563, 1985.
6. Roy, E., Voisin, B., Gravel, J. -F., Peytavi, R., Boudreau, D., and Veres, T., "Microlens Array Fabrication by Enhanced Thermal Reflow Process: Towards Efficient Collection of Fluorescence Light from Microarrays," *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, pp. 2255-2261, 2009.
7. Harron, H. R., Pritchard, R. G., Cope, B. C., and Goddard, D. T., "An Atomic Force Microscope (AFM) and Tapping Mode AFM Study of the Solvent-Induced Crystallization of Polycarbonate Thin Films," *Journal of Polymer Science Part B*, Vol. 34, No. 1, pp. 173-180, 1996.