

변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 모델링 및 성형

김동성¹, 이현섭¹, 이봉기¹, 양상식¹, 이승섭², 권태현[#]

Modeling and Replication of Microlens Arrays Fabricated by a Modified LIGA Process

D. S. Kim, H. S. Lee, B.-K. Lee, S. S. Yang, S. S. Lee, T. H. Kwon

Abstract

Microlens arrays were fabricated using a modified LIGA process based on the exposure of a PMMA (Polymethylmethacrylate) sheet to deep x-rays and subsequent thermal treatment. A successful modeling and analyses for microlens formation were presented according to the experimental procedure. A nickel mold insert was fabricated by the nickel electroforming process on the PMMA microlens arrays fabricated by the modified LIGA process. For the replication of microlens arrays having various diameters with different foci on the same substrate, the hot embossing and the microinjection molding processes have been successfully utilized with the fabricated mold insert. Fabricated microlenses showed good surface roughness than the mold insert. The focal lengths of the injection molded microlenses were successfully measured experimentally and also estimated theoretically.

Key Words : Microlens Array, Modified LIGA Process, Glass Transition Temperature, Free Volume Theory, Mold Insert, Hot Embossing, Microinjection Molding

1. 서론

최근 마이크로 렌즈는 원격통신, 저장기 매체, 디스플레이, 광학 센서 및 생의학 기구 등 여러 범주에 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 요구에 발맞추어, 마이크로 렌즈의 제작법들로서 열처리를 통한 감광재의 리플로우 (reflow) 공정 [1,2], 변형 LIGA 공정 [3], 마이크로 침입 (intrusion) 공정 [4], 등방성 식각 및 플라스틱 성형 공정 [5], 마이크로 잉크젯 공정 [6] 등이 소개되었다. 특히 최근 Lee 등[7]은 마이크로 렌즈 제작을 위한 새로운 변형 LIGA 공정을 소개한 바 있다. 이 공정에 의

하면, PMMA 기판에 깊은 x-선 조사(deep x-ray exposure)와 열처리 과정을 통해 현상과정 없이 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 것이 가능하다. 특히 동일한 지름에 열처리 과정의 가열 온도를 변화시킴으로써 제작되는 마이크로 렌즈의 초점 거리를 변화시킬 수 있는 장점이 있다 [8]. Fig. 1은 이 변형 LIGA 공정을 도식적으로 보여주며 [7,8], 이 공정은 다음 두 단계로 구성되어 있다: (i) x-선 조사 (Fig. 1(a)와 같이 PMMA 기판에 깊은 x-선을 일정량 노광한다), (ii) 열처리 (Fig. 1(b)와 같이 x-선에 조사된 PMMA 기판을 오븐에서 설정된 가열 온도로 가열한 후 상온에서 냉각시킨다).

이 때, 마이크로 렌즈의 형성과정에 대한 정확한 예측 모델이 존재한다면, 마이크로 렌즈를 원하는 형상으로 만들기 위한 공정조건 최적화에

1. 포항공과대학교 기계공학과

2. 한국과학기술원 기계공학과

교신저자: 포항공과대학교 기계공학과, E-mail:

thkwon@postech.ac.kr

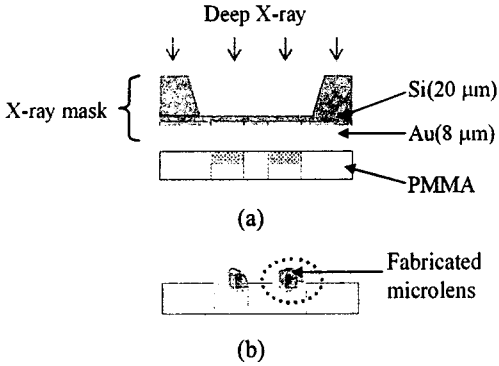


Fig. 1 Proposed microlens fabrication process: (a) Step 1: x-ray irradiation and (b) Step 2: thermal treatment [7,8].

적용할 수 있을 것이다. 또한 핫 엠보싱 (hot embossing) 혹은 미세 사출성형 (microinjection molding) 등의 대량 생산 방식을 통해 마이크로 렌즈를 성형하기 위한 금형 인서트의 디자인에도 적용하는 것이 가능할 것이다. 결과적으로 마이크로 렌즈 원형의 제작 비용 및 마이크로 렌즈의 개발 시간을 단축하며, 대량 생산을 통해 마이크로 렌즈의 가격 경쟁력을 얻는 것이 가능해진다.

이에 본 연구에서는, 우선 근본적인 고분자의 물리적 성질에 기반하여 본 연구자들이 개발한 마이크로 렌즈 형성의 예측 모델[8]을 소개한다. 또한 변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈 어레이에 전주 도금 공정(electroforming)을 통해 제작된 니켈 금형 인서트를 소개하는 한편, 제작된 금형 인서트를 이용하여 핫 엠보싱과 미세 사출성형을 통해 대량 생산한 마이크로 렌즈 어레이와 함께 성형된 마이크로 렌즈의 특성에 대한 평가를 소개한다.

2. 마이크로 렌즈 형성의 예측 모델 [8]

2.1 모델링 및 해석

깊은 x-선 노광에 있어서, x-선 조사 후 고분자의 분자량 변화는 다음식으로 표현할 수 있다:

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w0}} + \frac{(G_s - 4G_x)D}{200N_A} \quad (1)$$

이 때, M_w , M_{w0} , D 는 각각 질량 평균 분자량, 초기 분자량, x-선 조사량을 의미한다. G_s 와 G_x 는 각각 고분자가 100eV의 에너지를 흡수할 경우 사슬의 절단양과 가교화되는 양을 의미하며, N_A 는 아보가드로 수를 의미한다.

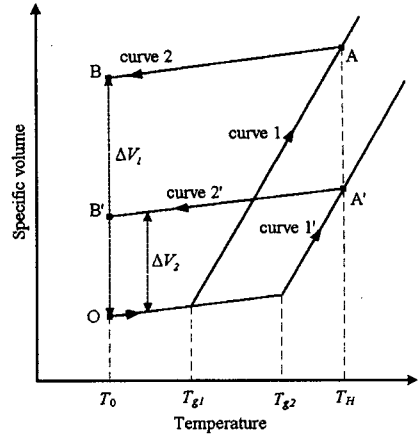


Fig. 2 Schematic diagram for the mechanism of microlens formation.

x-선 조사에 의해 줄어든 분자량은 유리 전이 온도, T_g 의 감소를 야기하게 되며, 그 관계식은 다음과 같다:

$$T_g = T_{g,\infty} - \frac{K}{X_n} \quad (2)$$

이 때, X_n , K , $T_{g,\infty}$ 는 각각 수평균 사슬 길이, 고분자 특성 상수, 유리 전이 온도 점근값을 의미한다.

결과적으로 x-선 조사에 의한 두께 방향의 T_g 변화는 열처리 과정의 가열, 냉각 과정에서 여유 부피 (free volume) 증가를 낳아 마이크로 렌즈를 형성에 직접적으로 관여한다. Fig. 2는 이러한 부피 증가 메커니즘을 보여준다. 서로 다른 유리 전이 온도 T_{g1} , T_{g2} 를 가지는 PMMA의 부피는 T_0 에서 T_H 로의 가열과정에서 각각 O에서 A, A'으로 곡선 1과 1'을 따라간다. 하지만 급속냉각과정에서는, 이완과정(relaxation process)을 배제할 경우, 각각 A, A'에서 B, B'으로 곡선 2와 2'을 따라가게 된다. 따라서, 가열과 급속냉각 과정에 의해 각각 잉여 부피(net volume) ΔV_1 , ΔV_2 를 낳게 된다. 즉, 작은 T_g 를 가질수록 많은 잉여 부피 증가 ΔV 를 낳게 된다. 이 때, 가열온도가 T_g 보다 낮을 경우 잉여 부피는 생성되지 않는다. 결과적으로 열처리 과정에서 형성된 잉여 부피 증가는 PMMA 기판 위에 마이크로 렌즈의 형성을 야기하게 된다.

이렇게 x-선 조사 후 열처리 과정에서 형성된 잉여부피는 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$\Delta V_{nr} = \int_{V_{exposed}} \Delta\alpha(T_H - T_g(h))H(T_H - T_g(h))dV - \int_{V_{exposed}} \Delta\alpha(T_H - T_{g,\infty})H(T_H - T_{g,\infty})dV \quad (3)$$

이 때, ΔV_{nr} , T_H 는 각각 부피 이완 과정을 고려하지 않은 잉여 부피 증가, 열처리 과정의 가열온도를 의미한다. $\Delta\alpha$ 는 $(\alpha_r - \alpha_g)$ 로서 α_r , α_g 는 각각 고무와 유리 상태의 부피 열팽창 계수를 의미한다. $H(T)$ 는 Heaviside 계단 함수를 의미한다.

냉각 과정의 부피 이완을 고려한 최종 잉여 부피 증가, ΔV_r 는 식 (3)의 ΔV_{nr} 에 기초하여 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$\Delta V_r = \Delta V_{nr} + \Delta\delta_v V_o \quad (4)$$

여기서 $\Delta\delta_v \equiv \delta_v - \delta_v^0$ 는 음수 값으로 그 크기는 이완 과정 동안 부피가 줄어든 양을 표현한다. 이 때 δ_v , δ_v^0 는 각각 시간 t 와 $t=0$ 에서의 여유 부피의 평형 상태로부터의 상대 이탈(relative departure)을 의미한다.

부피 이완 과정에서 시간에 따른 열역학적 비평형 상태를 표현하는 δ_v 에 대한 발전 방정식(evolution equation)은 가상 온도(fictive temperature)를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\Delta\delta_v(h) = \int_{t_{ci}}^{t_{cf}} \left\{ -\Delta\alpha \cdot \left[\frac{e}{(T_g(h) - T_{cool}(t))\beta} + \sigma \right]^{-1} \right. \\ \left. \cdot H(T_H - T_g(h)) \frac{dt}{t} \right\} \quad (5)$$

이 때, e , β , σ , t_{ci} , t_{cf} , $T_{cool}(t)$ 는 각각 자연 로그, 비지수성, 비선형성, 냉각 과정의 시작과 끝 시간, 냉각 온도를 의미한다. 식 (5)는 작은 T_g 를 가질수록 더 작은 양의 부피 이완이 일어남을 보여준다.

X-선 조사와 열처리 과정에서 형성된 잉여 부피 증가는 마이크로 렌즈를 형성하게 되며, 표면장력 효과를 고려한 Young-Laplace 식으로부터 형성된 마이크로 렌즈의 단면이 다음과 같은 2 차식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다:

$$y = \frac{y_{max}}{R^2} (-r^2 + R^2) \quad (6)$$

이 때, y , r , R , y_{max} 는 각각 마이크로 렌즈 단면의 높이 및 방사 방향 좌표, 마이크로 렌즈의 반지름과 최고 높이를 의미한다. 여기서 y_{max} 는 식 (3)와 (4)를 통해 구해진 잉여 부피 증가와 식 (6)으로부터 다음과 같이 결정된다:

(i) 부피 이완을 고려하지 않은 ΔV_{nr} 의 경우:

$$y_{max} = 2 \int_0^{h_{max}} \Delta\alpha (T_H - T_g(h)) H(T_H - T_g(h)) dh \\ - 2 \int_0^{h_{max}} \Delta\alpha (T_H - T_{g,\infty}) H(T_H - T_{g,\infty}) dh \quad (7)$$

이 때, h_{max} 는 PMMA 기판의 두께를 의미한다.

(ii) 부피 이완을 고려한 ΔV_r 의 경우:

$$y_{max} = 2 \int_0^{h_{max}} [\Delta\alpha (T_H - T_g(h)) + \Delta\delta_v(h)] \\ \cdot H(T_H - T_g(h)) dh \\ - 2 \int_0^{h_{max}} [\Delta\alpha (T_H - T_{g,\infty}) + \Delta\delta_{v,plate}] \\ \cdot H(T_H - T_{g,\infty}) dh \quad (8)$$

이 때, $\Delta\delta_{v,plate}$ 는 PMMA 기판의 상대 여유 부피 감소를 나타낸다.

2.2 해석 결과

Fig. 3 은 지름 $1500\mu\text{m}$ 마이크로 렌즈의 형상에 대하여, 가열온도 105°C , 115°C 에서 실제 실험과 식 (1)과 (2)로부터 계산된 M_w 와 T_g 의 변화를 기초로 이완 과정을 고려한 (식 (8)) 경우와 고려하지 않은 (식 (7)) 경우에 대한 예측 결과를 보여준다. Fig. 3(a)에서 보여지는 것처럼 식 (8)을 이용하여 여유 부피 이완 과정을 고려해야만 마이크로 렌즈의 형상을 보다 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 금형 인서트의 제작

본 연구에서는 마이크로 렌즈 어레이의 핫 엠보싱과 미세 사출성형을 통한 대량 생산을 위해, 니켈 전주 도금 공정을 통해 금형 인서트를 제작하였다. Fig. 4 는 마이크로 렌즈의 금형 인서트 제작 공정을 보여준다. 우선 포항 방사광 가속기의 깊은 x-선을 이용하여, Fig. 4(a)와 같이 변형 LIGA 공정[7,8]을 통한 마이크로 렌즈 어레이들을 PMMA 기판 위에 제작한다. 이 때, 제작된 마이크로 렌즈 어레이는 지름 $500\mu\text{m}$ 의 2×2 어레이, 지름 $300\mu\text{m}$ 의 2×2 어레이, 지름 $200\mu\text{m}$ 의 5×5 어레이로 구성되어 있다. 지름 $500\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ 마이크로 렌즈들의 높이는 각각 $20.81\mu\text{m}$, $17.21\mu\text{m}$, $8.06\mu\text{m}$ 이었다. 전주 도금을 이용하여 금형 인서트를 제작하기 위해, Fig. 4(b)와 같이 가열 증착기(thermal evaporator)를 통해 제작된 PMMA 기판 위의 마이크로 렌즈 어레이 위에 시드층(seed layer)으로써 각각 30nm 의 크롬과 금 층을 증착하여 전주 도금 마스터를 제작한다. 전주 도금 공정을 위해 제작된 SUS 지그에 마스터를 고정 후 Fig. 4(c)와 같이 도금조 안에서 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도로 55°C 에서 약 300 시간 도금한다. 마지막으로 전주 도금된 마스터 뒷면을 래핑

(lapping) 및 연마(polishing)한 후 PMMA 기판을 탈거(stripping)하면 Fig. 4(d)와 같이 금형 인서트를 얻을 수 있다. 제작된 전주 도금된 금형 인서트의 크기는 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 3\text{mm}$ 이며, Fig. 5는 금형 인서트의 마이크로 렌즈 어레이 캐비티의 SEM (scanning electron microscope) 사진을 보여준다.

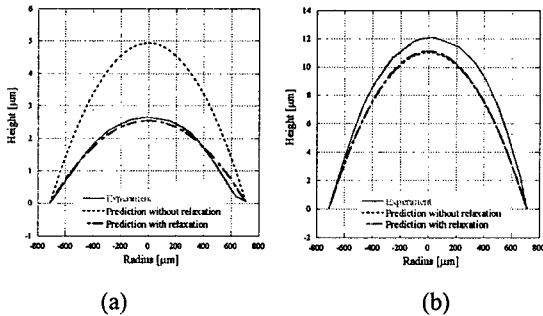


Fig. 3 Predicted microlens shapes ($1500\mu\text{m}$ in diameter) in comparison with experimental ones (solid curve) at heating temperature of (a) 105°C (b) 115°C .

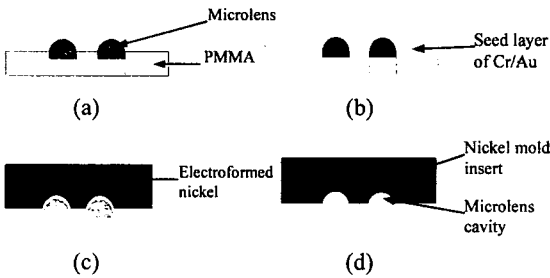


Fig. 4 Fabrication process of microlens mold insert: (a) microlens arrays on a PMMA sheet by the modified LIGA process, (b) seed layer deposition, (c) nickel electroforming and (d) nickel mold insert.

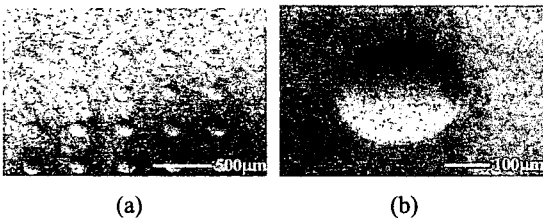


Fig. 5 SEM images of the fabricated nickel mold insert for (a) $200\mu\text{m}$ -diameter microlens array and (b) $300\mu\text{m}$ -diameter microlens.

4. 핫 엠보싱을 통한 마이크로 렌즈 성형

제작된 금형 인서트와 본 연구 그룹이 개발한 핫 엠보싱 장치[9] 및 PMMA 기판을 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 성형하였다. 본 연구의 핫 엠보싱 공정은 다음과 같다. (i) 마이크로 렌즈 금형 인서트와 PMMA 기판을 PMMA의 T_g 인 105°C 보다 높은 온도까지 가열한다. 본 연구에서는 공정 변수 연구를 위해 $110, 130, 150^\circ\text{C}$ 의 세가지 가열 온도에서 핫 엠보싱 공정을 수행하였다. (ii) 가열된 금형 인서트로 10분의 시간 동안 $10\mu\text{m/s}$ 의 속도로 PMMA 기판을 엠보싱한다. (iii) 마지막으로 80°C 의 디엠보싱(deembossing) 온도까지 냉각한 후 성형된 PMMA 기판을 취출한다.

Fig. 6은 금형 인서트의 캐비티(cavity)와 $110, 130, 150^\circ\text{C}$ 에서 성형된 지름 $300\mu\text{m}$ 마이크로 렌즈들의 표면 외곽선을 보여준다. Fig. 6으로부터 낮은 고풍비의 마이크로 렌즈의 편이한 성형성으로 인해 엠보싱 온도에 큰 영향 없이 성형이 잘 되었음을 알 수 있다. 성형된 PMMA 마이크로 렌즈와 금형 인서트 캐비티의 높이 차이는 약 $0.6\mu\text{m}$ 으로 전체 높이 $17.21\mu\text{m}$ 의 3.5%에 해당하였다. 이는 공정 중에 캐비티에 갇힌 공기나 냉각 공정 중의 PMMA 수축에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 핫 엠보싱 공정을 통해 성형된 PMMA 마이크로 렌즈들의 SEM 사진을 보여준다. Fig. 5와 Fig. 7의 사진들로부터 금형 인서트의 캐비티보다 엠보싱된 마이크로 렌즈의 표면이 보다 매끄러운 것을 알 수 있다. 이는 핫 엠보싱 공정 중의 냉각 과정에서 PMMA의 수축으로 마이크로 렌즈 표면이 금형 표면에서 떨어진 후 리플로우되면서 표면장력에 의해 표면이 보다 매끄러워진 것으로 사료된다.

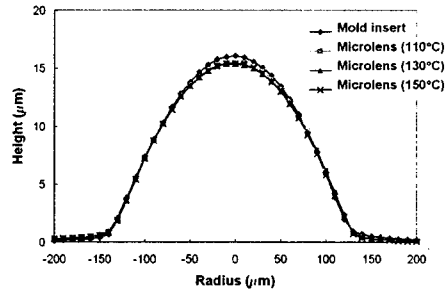


Fig. 6 Surface profiles of $300\mu\text{m}$ -diameter microlenses of the mold insert and embossed PMMA substrates at different embossing temperatures of $100, 130$ and 150°C .

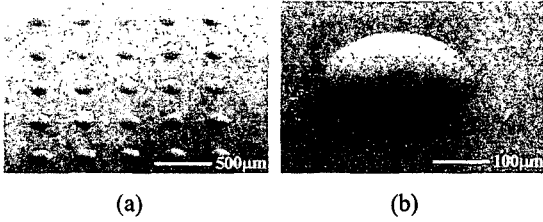


Fig. 7 SEM images of embossed PMMA: (a) 200µm-diameter microlens array and (b) 300µm-diameter microlens.

5. 미세 사출성형을 통한 마이크로 렌즈 성형

제작된 금형 인서트를 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 미세 사출성형하기 위해 사각 틀 형의 볼스터 판(rectangular frame-type bolster plate)를 도입한 금형 베이스를 디자인하여 제작하였다 [10]. 사출 성형에는 PMMA 와 PC(polycarbonate)의 두 가지 고분자를 사용하였다. 이 때, PMMA 와 PC 의 굴절률은 각각 1.490, 1.586 으로, 미세 사출성형을 통해 동일한 구조를 가진 마이크로 렌즈를 성형 하더라도 두 고분자의 마이크로 렌즈는 다른 초점 거리를 가지게 된다.

본 연구자들의 기존 사출성형 변수 연구[10]는, 마이크로 렌즈의 높은 성형성을 위해서는 빠른 사출 유량과 높은 보압 압력이 필요하며, 보압 시간은 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 보였다. 이 중에서 사출 유량에 대한 공정 변수 연구 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 그림으로부터 12cc/s 의 빠른 유량을 사용했을 때 가장 좋은 성형성을 보임을 알 수 있었다. 또한 핫 엠보싱과 마찬가지로 마이크로 렌즈의 편이한 성형성으로 성형된 마이크로 렌즈와 금형 캐비티의 최고 높이는 5% 이내의 차이를 보임을 알 수 있었다.

Fig. 9 는 사출 성형된 PMMA, PC 마이크로 렌즈들의 SEM 사진을 보여준다. 핫 엠보싱 공정 결과와 마찬가지로 Fig. 5 의 금형 인서트와 비교해보았을 때 마이크로 렌즈 표면이 보다 매끄러운 것을 알 수 있다. 이는 핫 엠보싱 공정과 마찬가지로 냉각 과정에서 PMMA 와 PC 가 리플로우되면서 표면장력에 의해 표면이 보다 매끄러워진 것으로 사료된다.

마지막으로, 사출 성형된 PMMA, PC 평면 볼록(planar convex) 마이크로 렌즈의 초점 거리를 이론적, 실험적으로 측정하였다. 렌즈의 초점거리는

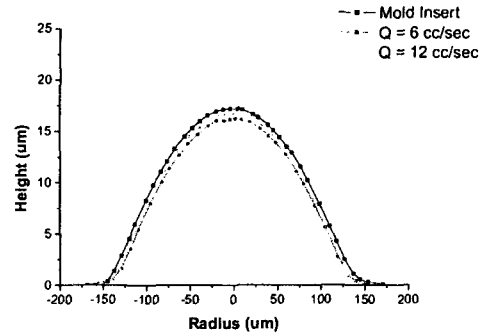


Fig. 8 Surface profiles of 300µm-diameter microlenses of the mold insert and injection molded PMMA substrates at different injection flow rates of 6 and 12cc/s.

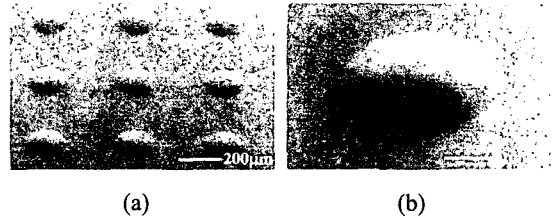


Fig. 9 SEM images of the injection molded polymers: (a) 200µm-diameter PMMA microlens array and (b) 300µm-diameter PC microlens.

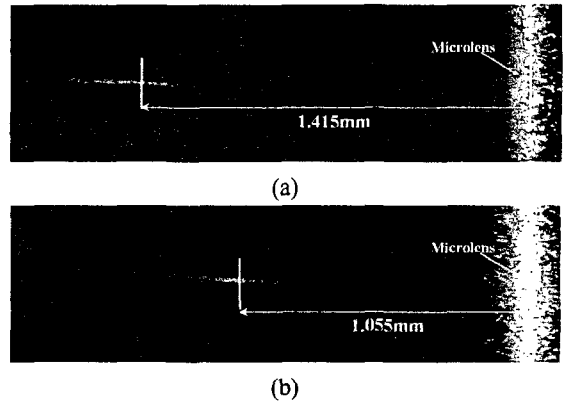


Fig. 10 Focused laser beam by the injection molded 300µm-diameter microlenses: (a) PMMA microlens ($f=1.415\text{mm}$), and (c) PC microlens ($f=1.055\text{mm}$).

다음 식을 통해 계산할 수 있다 [11]:

$$\frac{1}{f} = (n_i - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (9)$$

이 때, f , n_i , R_1 , R_2 는 각각 초점 거리, 렌즈 재료의 굴절률, 두 개의 주곡률 반경을 의미한다. 성형된

지름 300 μ m PMMA, PC 마이크로 렌즈의 높이는 각각 16.19, 16.14 μ m 으로 거의 비슷한 마이크로 렌즈 형상을 가지지만, 이를 바탕으로 계산한 초점 거리는 각각 1.435mm, 1.203mm으로 서로 다른 값을 갖게 된다. 즉, PMMA와 PC의 굴절률 차이로 인해 다른 초점 거리를 갖게 된다. 성형된 마이크로 렌즈의 광학 특성은, Fig. 10처럼 He-Ne 레이저(파장 632.8nm)에서 나오는 평행광을 마이크로 렌즈에 통과시켜 평가할 수 있다. Fig. 10(a), (b)의 레이저 광 초점 실험 결과로부터 PMMA, PC 마이크로 렌즈의 초점 거리가 1.415, 1.055mm 가 됨을 알 수 있으며, 이는 예측 값과 거의 일치하는 결과임을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈의 형성에 대한 예측 모델을 소개하였다. 예측 모델은 깊은 x-선에 조사된 PMMA 기판이 열처리 과정을 겪는 동안 생성되는 여유 부피와 부피 이완 과정을 고려하여 최종 마이크로 렌즈 형상을 예측하도록 개발되었다.

변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 마스터로 이용한 전주 도금 공정을 통해, 마이크로 렌즈 어레이의 대량 생산을 위한 니켈 금형 인서트 제작되었다.

제작된 금형 인서트를 이용하여, 핫 엠보싱과 미세 사출성형 공정을 통해 마이크로 렌즈 어레이를 성형하였다. 성형된 마이크로 렌즈들은 금형 인서트의 캐비티와 거의 비슷한 높이를 가지고 있어 성형이 잘 이루어졌음을 보여주었다. 성형된 고분자 마이크로 렌즈들이 금형 인서트보다 매끄러운 표면을 가지고 있음을 알 수 있었다. 성형된 마이크로 렌즈의 매끄러운 표면은, 이 마이크로 렌즈 어레이가 정밀 광학 제품의 부품으로 사용될 수 있음을 시사하였다. 마지막으로 사출 성형된 PMMA, PC 마이크로 렌즈들의 광학 특성으로서 초점 거리가 이론적, 실험적으로 측정되었으며, 두 값은 서로 유사함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 대량 생산된 매끄러운 표면을 가지는 마이크로 렌즈 어레이는 여러 가지 광학 제품들로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 2010 생산기반혁신기술개발사업 및 핵심연구개발사업(NM5410)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Z. D. Popovic, R. A. Sprague and G. A. N. Connell, 1988, Technique for monolithic fabrication of microlens array, *Appl. Opt.*, Vol. 27, pp. 1281~1284.
- [2] D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley and N. Davies, 1990, The manufacture of microlenses by melting photoresist, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 759~766.
- [3] P. Ruther, B. Gerlach, J. Göttert, M. Ilie, J. Mohr, A. Müller and C. Oßmann, 1997, Fabrication and characterization of microlenses realized by a modified LIGA process, *Pure Appl. Opt.*, Vol. 6, 643~653.
- [4] L.-W. Pan, X. Shen and L. Lin, 2004, Microplastic lens array fabricated by a hot intrusion process, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 13, pp. 1063~1071.
- [5] U. Kohler, A. E. Guber, W. Bier and M. Hecke, 1996, Fabrication of microlenses by plasmaless isotropic etching combined with plastic moulding, *Sensor Actuat. A*, Vol. 53, 361~363.
- [6] D. L. MacFarlane, V. Narayan, J. A. Tatum, W. R. Cox, T. Chen and D. J. Hayes, Microjet fabrication of microlens arrays, *IEEE Photonic Tech. Lett.*, Vol. 6, pp. 1112~1114.
- [7] S.-K. Lee, K.-C. Lee and S. S. Lee, 2002, A simple method for microlens fabrication by the modified LIGA process, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 334~340.
- [8] D. S. Kim, S. S. Yang, S.-K. Lee, T. H. Kwon and S. S. Lee, 2003, Physical modeling and analysis of microlens formation fabricated by a modified LIGA process, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 523~531.
- [9] H. S. Lee, S.-K. Lee, T. H. Kwon and S. S. Lee, 2002, Birefringence distribution in V-grooved optical parts by hot embossing process, *Proc. IEEE/LEOS Optical MEMS 2002*, Lugano, Switzerland, pp. 135~136.
- [10] B.-K. Lee, D.S. Kim and T.H. Kwon, 2004, Replication of microlens arrays by injection molding, *Microsyst. Technol.*, Vol. 10, 531~535.
- [11] E. Hecht, 2002, *Optics*, Addison-Wesley, New York.