

변형된 LIGA 공정을 이용한 마이크로렌즈 제작방법

이성근* · 이광철** · 이승섭†

(2002년 5월 3일 접수, 2002년 8월 29일 심사완료)

Microlens Fabrication Method by the Modified LIGA Process

Sung-Keun Lee, Kwang-Cheol Lee and Seung S. Lee

Key Words : Microlens(마이크로 렌즈), LIGA(리가), Glass Transition Temperature(유리 전이 온도) PMMA, MEMS(멤스)

Abstract

Microlenses and microlens arrays are fabricated using a novel fabrication technology based on the exposure of a resist (usually PMMA) to deep X-rays and subsequent thermal treatment. The fabrication technology is very simple and produces microlenses and microlens arrays with good surface roughness (less than 1 nm). The molecular weight and glass transition temperature of PMMA is reduced when it is irradiated with deep X-rays. The microlenses is produced through the effects of volume change, surface tension, and reflow during thermal treatment of irradiated PMMA. The geometry of the microlens is determined by parameters such as the X-ray dose applied to the PMMA, the diameter of the microlens, along with the heating temperature, heating time, and cooling rate in the thermal treatment. Microlenses are produced with diameters ranging from 30 to 1500 μm . The modified LIGA process is used not only to construct hemispherical microlenses but also structures that are rectangular-shaped, star-shaped, etc.

기호설명

$M(D)$: 노광된 고분자의 평균 분자량
 $M(0)$: 노광되기 전 감광재의 평균분자량
 D : 노광된 도즈량
 D_0 : 노광 도즈량 특정상수
 ρ : 감광재의 밀도
 N_A : 아보가드로 수
 ΔE : 고분자의 사슬을 분리시키는데 필요한 평균에너지
 T_g : 유리전이온도(glass transition temperature)
 T_g^∞ : 무한 분자량(infinite molecular weight)을 가지는 고분자에 대한 T_g

$T_g(0)$: 노광되지 않은 시편의 T_g
 $T_g(D)$: 노광된 시편의 T_g
 K : 고분자 특정 상수
 θ : 고분자 사슬의 한 쪽 끝 부분이 여유 부피에 기여하는 정도
 α_f : 여유 부피의 열팽창 계수
 V : 시편의 총 부피
 V_0 : 분자들 자체의 부피
 V_f : 여유 부피 (free volume)
 V_f^* : T_g 아래의 여유 부피
 ΔV : 고분자의 부피팽창

1. 서론

최근 방사광을 이용하여 많은 연구가 진행되고 있고 그에 따라 여러 가지 팔목할 만한 성과의 발표가 잇따르고 있다. 이 방사광을 이용한 응용연구 중 하나로서 반도체 개발에 응용을 시작으로

* 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : sslee@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2183 FAX : (054)279-5899
 * 포항공과대학교 대학원 기계공학과부
 ** 포항공과대학교 대학원 기계공학과부

최근에 주목을 받고 있는 X-ray 사진 기술(X-ray lithography)을 이용한 LIGA(German acronym for lithography, electroforming, and molding) 공정이 있다.

LIGA 공정은 독일 칼스루에(Klsruhe) 원자핵연구소에서 우라늄 동위원소를 분리하기 위해 슬롯 노즐 (Slot nozzle)을 제작하는 과정에서 처음으로 개발되었다.⁽¹⁾ 이 공정은 방사광을 이용하여 상대적으로 두꺼운 감광재에 X-ray 마스크를 통해 패턴을 노광, 현상한 후에 전기도금, 사출성형의 과정을 통하여 3차원 구조체를 제작하는 것을 포함한다.

LIGA 공정에서 이용하는 싱크로트론 방사광(Synchrotron Radiation)은 강도가 기존의 광원보다 적어도 수 만배 이상인 강한 펄스광원으로 평행성이 매우 좋아 퍼짐이 아주 작고, 연속 에너지 스펙트럼을 가지고 있으며 고진공에서 발생하는 아주 깨끗한 광원이라는 탁월한 특성을 가지고 있다. 이러한 방사광의 특성을 이용하면 고종횡비의 구조를 가지는 크기가 작고 정밀한 구조를 실현하는 것이 가능하다. 또한 임의의 파장역을 선택함으로써 마스크의 자유도를 증가시킬 수가 있어, LIGA 공정에 최적의 X-ray 광원이라고 할 수 있다.

한편, 마이크로렌즈는 광학 시스템에서 매우 중요한 구성요소로서 원하는 광학적 성질을 가질 수 있도록 그 형상을 제어하는 것이 필요하다. 기존의 마이크로렌즈는 변형된 LIGA 공정,⁽²⁾ 감광재의 reflow 를 이용하는 방법,⁽³⁾ micro-intrusion process,⁽⁴⁾ 실리콘의 등방식각공정⁽⁵⁾ 등을 통하여 제작되었다. 하지만 이러한 공정들의 대부분은 제작 방법에 있어서 복잡하거나 마이크로렌즈 어레이(microlens array)를 실현하는데 있어서 어려운 점이 있었던 것이 사실이다.

1997년에 Ruther는 변형된 LIGA 공정을 이용하여 마이크로렌즈를 제작하였다.⁽²⁾ PMMA (polymethylmethacrylate) 감광재 층에 X-ray 를 수직으로 노광하고 그것을 현상하여 원하는 원기둥

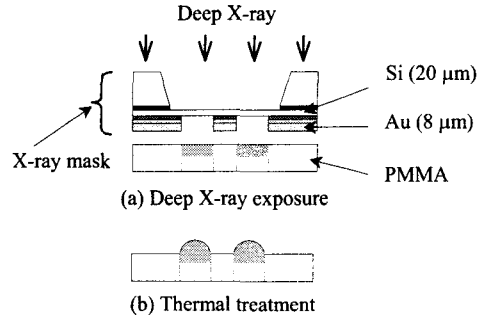


Fig. 2 The proposed microlens fabrication process

모양의 구조물을 제작하고, 여기에 X-ray 를 2차 노광한 후 T_g 이상의 열처리 온도에서 일정시간 동안 유지시켜 반구형상의 마이크로 렌즈를 만들었다 (Fig. 1).

그러나 이와 같은 기술에 의한 마이크로렌즈 제조방법은 현상공정과 2차의 X-ray 노광 공정이 요구되므로 제조 공정이 다소 복잡하다는 단점이 있었다.

본 논문은 방사광 가속기의 X-ray 노광을 이용한 구조물 제조방법에 관한 것으로서 마이크로렌즈 뿐만 아니라 소정의 패턴을 갖는 미세구조물을 용이하게 제작할 수 있는 기술을 제시하고자 한다. Fig. 2는 본 연구에 의해 제작된 마이크로렌즈의 제작 원리에 대하여 제시하고 있다.

2. 이론 및 제작 원리

본 연구에서는 한번의 X-ray 노광과 노광된 감광재에 대한 한번의 열처리 공정으로 마이크로렌즈 혹은 마이크로렌즈 어레이를 제작 방법을 제공한다.

PMMA 감광재를 구성하는 고분자는 방사광 가속기의 X-ray 에 노광되었을 때 분자량이 감소된다.⁽⁶⁾ Photon의 흡수는 고분자 사슬 절단(chain scission)을 일으키게 되고 이 때에 결과로써 나타내게 되는 노광된 고분자의 평균 분자량 ($M(D)$)는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(D) = \frac{M(0)}{1 + D/D_0} \quad (1)$$

이 때에 $M(0)$ 는 노광되기 전 PMMA 감광재의 평균 분자량, D 는 노광된 도즈량, 그리고 $D_0 = \rho N_A \Delta E / M(0)$ 을 나타낸다. 여기에서 D_0 에 대해서 ρ 는 감광재의 밀도, N_A 는 아보가드로 수 (Avogadro's Number), 그리고 ΔE 는 고분자의 사슬을 분리시키는데 필요한 평균에너지를 의미한다. 본 연구에서 사용한 PMMA 감광재에 대하여 ρ 는

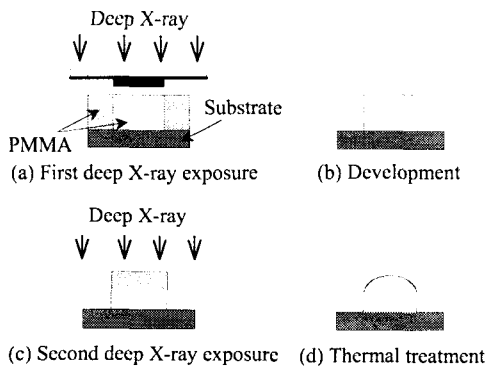


Fig. 1 Microlens fabrication process used previously by Ruther et al.⁽²⁾

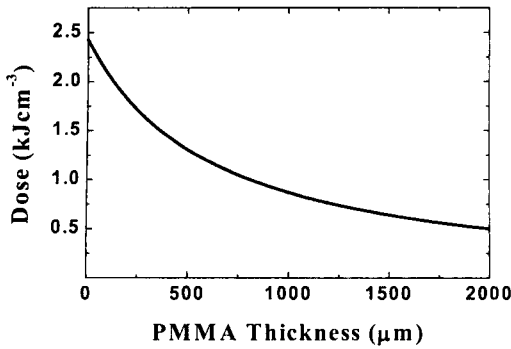


Fig. 3 Radiation dose vs. depth into the PMMA sample (top dose = 2.4 kJ/cm³)

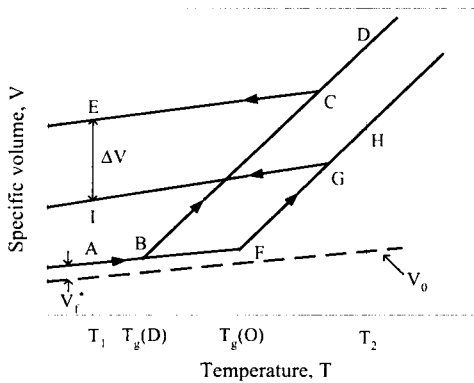


Fig. 4 Schematic of the variation in the specific volume, *V*, of a polymer with temperature, *T*

1.19 g/cm³, 그리고 $M(0)$ 는 10⁶ g/mol 이다. Fig. 3 은 PMMA 에 X-ray 가 수직으로 입사된 경우, 깊이 방향에 따른 노광량을 보여 주고 있다.

고분자의 T_g 는 평균 분자량의 함수로 표현되므로 PMMA 시편이 X-ray 에 노광되면 시편의 노광된 영역에서의 고분자가 가지는 T_g 는 감소하게 된다. T_g 는 고분자가 고무 상태 (rubber state)에서 유리 상태 (glass state)로 천이하는 온도를 의미한다. T_g 를 결정하는 한가지 방법으로는 고분자의 온도에 따른 비중의 변화를 측정하는 것이다. 고분자의 비중은 온도에 따른 선형 변화 (linear variation)를 보이게 되는데 T_g 를 지나게 되면 본 영역에서의 선형 변화와는 다른 급격한 기울기의 선형 변화를 보이게 된다.⁽⁷⁾

T_g 의 값은 고분자의 분자량이 감소함에 따라 감소하게 되는데 이 현상은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$T_g^x = T_g + K / M(D) \quad (2)$$

여기에서 T_g^x 는 무한 분자량 (infinite molecular

weight)을 가지는 고분자에 대한 T_g 를 나타내며 K 는 고분자 특정 상수, 그리고 $M(D)$ 는 X-ray 노광 후에 결정된 고분자의 평균분자량이다. 여유 부피 (V_f)에 대한 개념은 T_g 를 분석하는데 유용한 접근 방법이라 할 수 있다. 여유 부피는 채워지지 않은 고체 혹은 액체에서의 공간을 의미하며, 특히 분자간의 빈 공간으로 정의된다. 여유 부피의 생성에서 고분자 사슬 (polymer chain)의 끝 부분에서 생기는 여유 부피가 지배적이라고 가정하면 식 (2)는 다음에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_g^x = T_g + \frac{2\rho N_f \theta}{\alpha_f M(D)} \quad (3)$$

θ 와 α_f 는 각각 고분자 사슬의 한 쪽 끝 부분이 여유 부피에 기여하는 정도와 여유 부피의 열팽창 계수를 나타낸다.

X-ray 가 노광된 부분의 PMMA 의 부피는 노광되지 않은 부분과의 T_g 의 차이로 인해 열처리 공정에서 증가하게 된다. 이에 대한 메커니즘을 Fig. 4 에 도시하였다.

여기에서 T_g 아래의 여유 부피 (V_f^*)는 상수이고 T_g 이상에서의 여유 부피는 온도가 올라 갈수록 증가한다고 가정한다. 이 경우 시편의 총 부피 (V)는 분자들 자체의 부피 (V_0)와 여유 부피로 구성되고 식은 다음과 같이 표현된다.

$$V = V_0 + V_f \quad (4)$$

T_g 이상의 온도범위에서는, 녹은 고분자의 부피 팽창으로 인해 여유 부피의 큰 부피 변화가 일어나게 되는데 이 때에 나타나는 T_g 이상에서의 여유 부피는 다음과 같이 서술된다.

$$V_f = V_f^* + (T - T_g) \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \quad (5)$$

X-ray 노광 공정에서 노광된 PMMA 영역에 해당하는 고분자의 T_g 인 $T_g(0)$ 는 $T_g(D)$ 로 감소하게 된다. 잇따른 열처리 공정에서는, Fig. 4 에서 제시하는 바와 같이 열처리 온도를 T_1 에서 T_2 로 증가시킨 후 다시 T_2 에서 T_1 으로 감소시킨다. 이 과정에서 노광된 영역의 고분자들은 A-B-D-C-E 의 경로를 따라가게 되지만 노광되지 않은 부분에 존재하는 고분자들은 A-F-H-G-I 의 경로를 겪게 된다. 이러한 사이클을 통해 최종적인 온도 T_1 에서는 고분자의 부피팽창 (ΔV)을 얻게 된다. 여기에 열처리 과정에서 노광된 PMMA 영역에 작용하는 표면장력과 리플로우 (reflow)의 효과로 마이크로렌즈 혹은 마이크로렌즈 어레이는 제작된다.

마이크로렌즈의 제작에 있어서 X-ray 의 노광량, 마이크로렌즈의 직경, 그리고 열처리 과정에서의 열처리 온도, 열처리 시간, 냉각 속도 등은 형상에

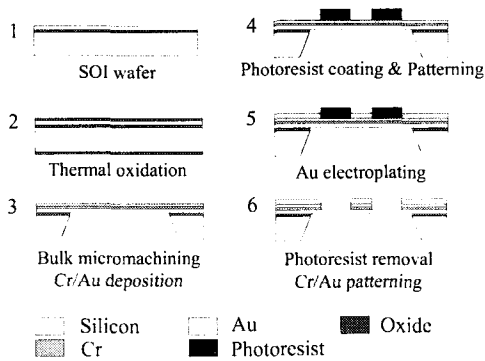


Fig. 5 Sequence of steps in the fabrication of the X-ray mask for the microlenses

영향을 주는 요소들이다.

3. 제작 공정

제작공정은 X-ray 마스크의 제작과 더불어 그것을 이용하여 PMMA 감광재에 마이크로렌즈가 형성될 영역에 X-ray 를 노광하는 과정, 그리고 이후 노광된 감광재 부분을 선택적으로 녹여 변형은 일으켜서 마이크로렌즈를 형성하는 열처리 공정을 포함한다.

3.1 X-ray mask 의 제작

고에너지의 X-ray 광원을 PMMA 감광재에 선택적으로 노광하기 위해서는 금 (Au) 흡수층을 가지는 X-ray 마스크의 제작이 필요하다. Fig. 5 는 마이크로렌즈를 제작하는데 필요한 X-ray 마스크에 대한 제작 공정을 보여 준다.

상부 실리콘 박막층 두께 20 μm , 중간 산화막 두께 1 μm 의 4 인치 SOI (Silicon On Insulator) 웨이퍼를 X-ray 마스크 기판으로 한다. SOI 웨이퍼 상 하면에 기판미세가공 (bulk micromachining)에서의 보호층 (barrier layer)으로 쓰일 1 μm 두께의 산화막을 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 실리콘 웨이퍼 습식 산화를 통하여 형성한다. 이후에 웨이퍼 하면의 패턴된 산화막을 보호층으로 하여 기판미세가공을 통해 실리콘 기판을 식각한다. 이때 식각용액은 20 wt% TMAH (Tetramethyl ammonium hydroxide) 용액을 사용한다. 본 샘플의 경우 실리콘 웨이퍼 기판 400 μm 를 90 $^{\circ}\text{C}$ TMAH 용액에서 8 시간 동안 식각한다. 산화막을 BHF (Buffered HF)에 30 분 정도 넣어 제거함으로써 20 μm 두께의 실리콘 박막을 얻는다. 금 전기도금의 seed layer 로써 사용될 크롬/금(Cr/Au) 금속층을 thermal evaporator 를 통해 각각 300 \AA , 1000 \AA 정도 증착시킨다. 그런 후, 감광재 AZ 9260 을 10 μm 회전 도포하고 이를 이용하여 Cr/Au seed layer 위에 실린더 모양의 패턴을 만

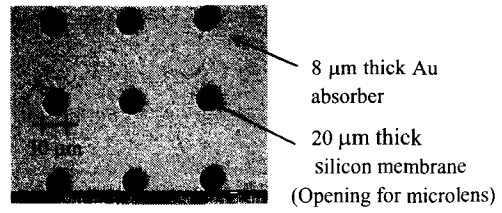


Fig. 6 The SEM photomicrograph of the electroplated gold absorber of the X-ray mask

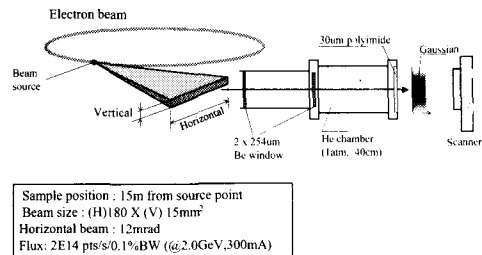


Fig. 7 Specifications of LIGA beamline (9C1) in the PLS

든다. 만들어진 패턴 이외의 부분에 X-ray 흡수층인 금을 8 μm 두께로 만들기 위해 일정한 전류밀도에서 전기도금한다. 전기도금이 완료되면 끓는 Aceton, Methanol 과 DI water 에 각각 넣어 감광재를 제거한다. 그러한 후 불필요한 Cr/Au seed layer 를 식각용액을 이용하여 제거함으로써 원하는 X-ray 마스크를 얻는다.

Fig. 6 는 20 μm 두께의 실리콘 박막 위에 직경 30 μm 의 구멍들을 가지는, 두께 8 μm 금 흡수층의 X-ray 마스크에 대한 SEM 사진이다. 마이크로렌즈 직경의 범위는 마이크로렌즈 직경에 대한 영향을 알아 보기 위하여 30 μm ~ 1500 μm 의 범위에서 제작되었다.

3.2 X-ray 노광

X-ray 노광은 포항 방사광 가속기 (PLS)의 LIGA 빔라인에서 2.5 GeV 의 에너지, 120 ~ 170 mA 의 전류범위로 실시되었다. Fig. 7 은 LIGA 빔라인의 노광 시스템 사양을 보여 주고 있다.

제작되는 마이크로렌즈의 형상은 PMMA 에 노광된 X-ray 도즈량과 연관이 있다. 이러한 관계를 고찰하기 위하여 X-ray 노광 공정에서는 PMMA 가 노광되는 부분의 윗부분 도즈를 1.14 kJ/cm^3 ~ 7.76 kJ/cm^3 의 영역에서 실행하였다. 실험에서는 마이크로렌즈의 기판으로서 상용화된 2 mm 두께의 PMMA 판 (Goodfellow Inc.)이 사용되었다.

PMMA 가 X-ray 에 노광되었을 때 고분자 사슬은 부분적으로 끊어져 그 분자량은 작아지고 이것은 노광된 PMMA 영역의 T_g 를 감소케 하는 결과

를 낳는다.

3.3 열처리 공정

노광 후에 시편은 순환 건조기에 넣어서 열처리 된다. 노광 공정에서 PMMA 의 노광된 영역은 수직적으로 도즈의 분포를 갖고 이에 따라 T_g 가 수직적인 변화를 보인다. 시편에 열이 가해지면 노광 영역의 윗부분은 다른 부분보다 더 빨리 녹게 되고 이 때 리플로우 (reflow)와 영역 가장자리에 작용하는 표면장력에 의해 원하는 마이크로렌즈가 만들어진다.

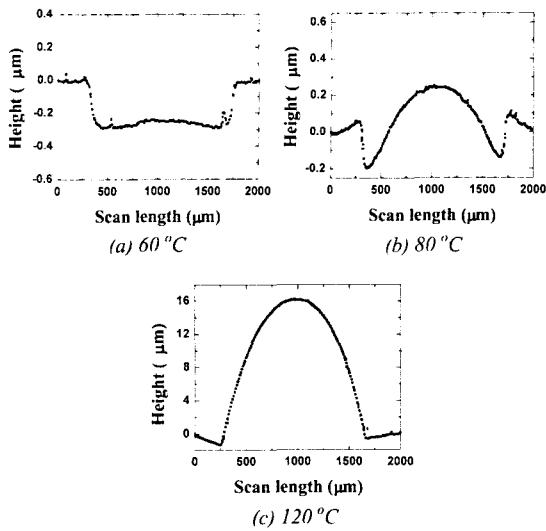


Fig. 8 Microlens profiles at different heating temperature(heating time = 5 min)

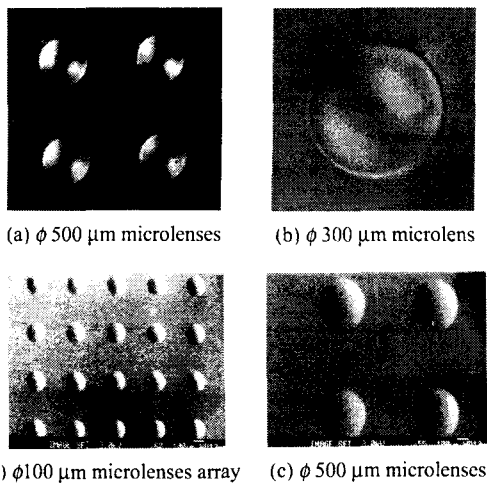


Fig. 9 Microlenses fabricated by melting the deep X-ray irradiated pattern in the PMMA substrate

Fig. 8 은 각각 다른 온도에서 profilometer (Tencor Alpha-Step 200)로 측정된 마이크로렌즈의 윤곽을 보여 준다. Fig. 9 는 실제로 제작된 마이크로렌즈 혹은 마이크로렌즈 배열의 사진이다.

4. 실험방법 및 결론

4.1 실험방법

마이크로렌즈를 제작하는데 있어서 어떠한 변수가 영향을 미치는 지를 알아 내는 것은 중요하다. 실험을 통하여 마이크로 렌즈의 형상은 주로 X-ray 의 PMMA 에 대한 도즈와 열처리 온도, 열처리 시간 그리고 마이크로렌즈의 직경에 영향을 받음을 알아 냈다.

사용된 PMMA 는 2 mm 두께의 판으로 그것의 물리적, 재료적 성질을 마이크로렌즈의 모양과 광학적 성질을 얻는데 중요하다. 실험에 이용된 PMMA 시료의 T_g 는 105 °C, 선형 열팽창계수는 $7 \times 10^{-5} K^{-1}$, 굴절률은 1.49 이다.

열처리 공정에서는 순환 건조기를 사용하여 시료에 고정된 온도에서 정해진 열처리 시간 동안 열을 주었다가 식힌 후 측정하는 과정을 반복하였다. 실험은 대개의 경우 온도 60 °C ~ 125 °C 범위에서 실시되었다. 열처리 후 상온에서 서서히 냉각되었고 이에 변형된 마이크로렌즈의 높이는 profilometer 로 측정되었다.

4.2 실험결과

X-ray 를 노광하는 과정에서 에너지는 PMMA 에 쌓이게 되고 이로 인해 PMMA 고분자의 분자량이 낮아지게 된다. 이로 인해 T_g 가 낮아져 열처리 공정에서 변형이 일어 나기 때문에 마이크로렌즈에 대한 도즈의 영향을 알고 최적화 하는 과정은 필수적이다.

변형에 대한 도즈의 영향을 알아보기 위하여 PMMA 윗부분의 도즈는 1.14 kJ/cm³ ~ 7.76 kJ/cm³ 의 범위에서 실험되었다.

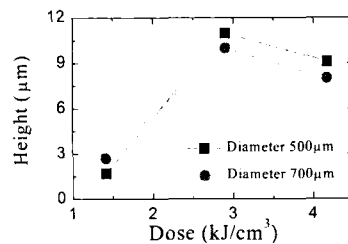


Fig. 10 Height of the microlens versus top dose (heating time = 5min)

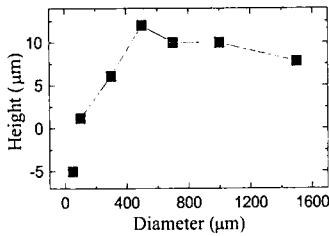


Fig. 11 Height of the microlens versus diameter

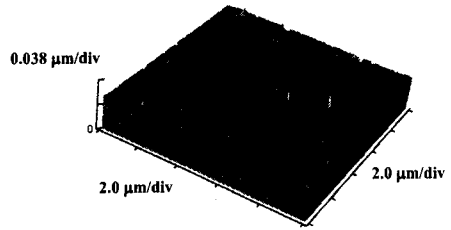


Fig. 13 Scanning image of surface of the microlens measured by an AFM

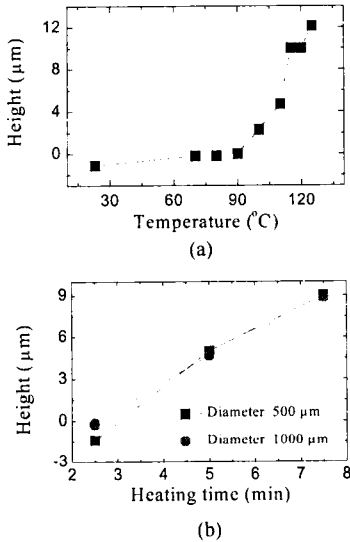


Fig. 12 Height of the microlens with changing (a) heating temperature and (b) heating time

Fig. 10 은 마이크로렌즈의 변형된 높이와 PMMA 에 축적된 윗부분의 도즈와의 관계를 부분적으로 나타내었다. 측정된 시편의 열처리 온도는 120 °C 이고 열처리 시간은 4 분이다. 마이크로렌즈는 2 kJ/cm³ ~ 3.5 kJ/cm³ 의 범위에서 가장 큰 변형을 보인다. 2 kJ/cm³ 아래의 도즈에서는 노광된 영역이 T_g 부근의 온도에서도 충분히 녹지 못하고 3.5 kJ/cm³ 이상에서는 T_g 부근의 온도에서 노광영역 내에 기포가 쉽게 생기게 된다.

변형에 대한 마이크로렌즈의 직경의 영향을 알아 보기 위하여 마이크로렌즈 직경의 범위는 30 μm ~ 1500 μm 로 제작되었다. Fig. 11 에서는 마이크로렌즈의 변형된 높이와 마이크로렌즈 직경의 관계를 도시하였다. 측정된 시편의 윗부분의 도즈는 2.4 kJ/cm³ 이고 열처리 온도는 120 °C 이고 열처리 시간은 5 분이다.

마이크로렌즈의 변형 높이는 그 직경에 무관하다고 고려되어진다. 하지만 열처리 공정에서 마이크로렌즈가 순환 건조기에서 꺼내어 졌을 때 외부 온도와외 온도차로 인해 유동성이 있는 노광 영역

의 부분은 수축하게 되는데 이때에 모세관 현상이 일어난다. 마이크로렌즈의 직경이 작으면 작을수록 그 힘은 더욱 커진다. Fig. 11 은 이러한 현상을 잘 설명해 준다. 300 μm 이하에서 마이크로렌즈는 큰 변형 높이를 보여 주지 않는다. 하지만 500 μm 이상의 직경을 가지는 마이크로렌즈의 변형 높이는 커다란 차이를 보여 주지 않고 있다.

열처리 공정에서의 열처리 온도와 열처리 시간에 대한 마이크로렌즈의 변형 높이의 관계를 Fig. 12 에 나타내었다. 측정된 시편의 윗부분의 도즈는 2.4 kJ/cm³ 이고 열처리 온도의 영향에 대한 실험의 경우 열처리 시간은 5 분, 열처리 시간의 영향에 대한 실험의 측정 열처리 온도는 110 °C 이다. Fig. 12(a)에서 알 수 있듯이 마이크로렌즈의 변형 높이는 90 °C 이상의 온도에서 급작스런 변화를 보인다. 그리고 Fig. 12(b)에서 알 수 있듯이 열처리 시간은 고정된 온도에서 많이 줄수록 큰 변형을 일으키는 경향성을 띤다.

Atomic Force Microscope (AFM; AutoProbe M5, PSIA Co.)로 측정된 마이크로렌즈 표면의 평균 표면 조도 (average surface roughness)는 0.5 nm 이고 이에 대한 스캐닝 이미지는 Fig. 13 에서 보여지고 있다.

5. 결론

X-ray 노광에 따른 감광재의 T_g 변화를 이용하여 새로운 공정 방법으로 마이크로렌즈 혹은 마이크로렌즈 어레이를 간단하게 제작하였다. 제작된 마이크로렌즈의 직경은 100 μm 에서 1500 μm 로써 측정된 평균 표면 조도는 0.5 nm 였다. 이 공정을 이용하여 마이크로렌즈 뿐 아니라 사각형이나 별 모양의 다른 모양의 구조물도 이미 제작하였다. 여기에 대량생산을 위하여 핫 엠보싱(Hot Embossing) 또는 사출 성형 (Injection molding)에 대한 금형을 제작할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

- (1) Becker, E. W., Betz, H., Ehrfeld, W., Glashauser, W., Heuherger, A., Michel, M. J., Münchmeyer, D., Pongratz, S. and Siemen, P. R., 1992, "Production of Separation Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics," *Naturwissenschaften*, Vol. 69, pp. 520~523.
- (2) Ruther, P., Gerlach, B., Göttert, J., Ilie, M., Mohr, J., Müller A. and Oßmann, C., 1997, "Fabrication and Characterization of Microlenses Realized by a Modified LIGA process," *Pure Appl. Opt.*, Vol. 6, pp. 643~653.
- (3) King, C. R., Lin, L. Y. and Wu, M. C., 1996, "Out-of-plane Refractive Microlens Fabricated by Surface Micromachining," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 10, pp. 1349~1351.
- (4) Schulze, J., Ehrfeld, W., Hoßfeld, J., Klaus, M., Kufner, M., Kufner, S., Müller, H. and Picard, A., 1999 "Parallel Optical Interconnection using Self-Adjusting Microlenses on Injection Molded Ferrules Made by LIGA Technique," *Proc. SPIE*, Vol. 37, pp. 562~571.
- (5) Köhler, U., Guber, A. E., Bier, W. and Heckeke, M., 1996, "Fabrication of Microlenses by Plasmaless Isotropic Etching Combined with Plastic Moulding," *Sensors and Actuators A*, Vol. 53, pp. 361~363.
- (6) Liu, Z., Bouamrane, F., Roulliay, M., Kupka, R. K., Labéque, A. and Megtert, S., 1998, "Resist Dissolution Rate and Inclined-Wall Structures in Deep X-Ray Lithography," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 298~300.
- (7) Young, R. J. and Lovell, P. A., 1991, *Introduction to Polymers*, Chapman & Hall.