

## 변형 DEEP X-ray 공정과 Hot Embossing 공정을 이용한 마이크로 렌즈 및 어레이의 제작

이정아\*, 이현섭, 이성근, 이승섭, 권태현  
포항공과대학교 기계공학과

### Microlens and Arrays Fabrication by the Modified LIGA and Hot Embossing Process

J. A. Lee, H. S. Lee, S. K. Lee, S. S. Lee, and T. H. Kwon  
Department of Mechanical Engineering, POSTECH

#### ABSTRACT

Microlens and microlens arrays are realized using a novel fabrication technology based on the exposure of a resist, usually PMMA, to deep X-rays and subsequent thermal treatment. Hot embossing process is also studied for mass production. The fabrication technology is very simple and produces microlenses and microlens arrays with good surface roughness of several nm. The molecular weight and glass transition temperature of PMMA is reduced when it is irradiated with deep X-rays. The microlenses were produced through the effects of volume change, surface tension, and reflow during thermal treatment of irradiated PMMA. A hot embossing machine is designed and manufactured with a servo motor transfer system. The hot embossing process follows the steps of heating mold to the desired temperature, embossing a mold insert on substrate, cooling mold to the de-embossing temperature, and de-embossing. Microlenses were produced with diameters ranging from 30 to 1500  $\mu\text{m}$ . The surface X-ray mask is also fabricated to realize microlens arrays on PMMA sheet with a large area.

**Key Words** : Microlens(마이크로렌즈), LIGA(리가), Glass transition temperature(유리 전이 온도), PMMA, Hot embossing, Surface X-ray Mask

#### 1. 서론

종래의 실리콘을 중심으로 한 수십, 수백  $\mu\text{m}$  단위의 미세 구조물을 제작하는 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술에서 벗어나 유리, PMMA 등의 여러 가지 재료를 이용하여 크기 수  $\mu\text{m}$  에서 수 mm 까지의 미세 구조물을 제작하는 기술이 활발히 개발되고 있다. 특히 고에너지 싱크로트론 방사광을 이용, 우라늄 동위원소를 분리하기 위한 슬롯 노즐 (Slot nozzle)을 제작하는 과정에서 독일 Kalsruhe 원자핵연구소를 통해 처음 개발된 LIGA(Lithographic, Galvanoformung, Abformung in German : X-선 노광, 전기도금, 사출성형의 독일어 약어) 공정을 사용함으로써[1], 이러한 미세 구조물을 생산하는데 가장 경쟁력있는 기술로 인식되고 있다. 싱크로트론 방사광은 고에너지 광원으로서, 다른 광원보다 수 만배 이상의 강한 광원에 해당한다. 이 방사광은 평행성이 매우 좋아 퍼짐이 아주 작고, 연속 에너지 스펙트럼을 가지고 있으며, 또한 고진공에서 발생하는 아주 깨끗한 광원에 해당하여, 높은 고품비의 초소형 구

조물을 제조하는 것을 가능하게 한다.

미세 사출성형(Microinjection molding)과 핫 엠보싱(Hot embossing) 등과 같은 기술들은 대량 생산을 시도하여 핵심 부품의 단가 절감이라는 부분에서 매우 중요하다. 특히 핫 엠보싱은 금형 제작 비용이 적게 들고, 공정 원리가 간단하며, 열처리 과정(thermal cycle)이 작고, 성형품의 형상이 정밀한 장점을 가지고 있다. 그래서 작은 열처리 과정은 성형품의 광학적, 기계적 성질을 향상시켜 광섬유 커넥터에서 쓰이는 도파관(waveguide), 광저장 매체에 쓰이는 마이크로 렌즈, LCD 기관의 도광판(Backlight plate) 등의 성형 방법으로 각광을 받고 있다.

마이크로 렌즈에 대한 기존의 연구는 감광재의 리플로우(Reflow), 레이저를 이용한 미세 기계가공, 조정밀 절삭 공정, 실리콘의 등방성 에칭, 방사광 가속기의 X-선 광원을 이용한 LIGA 공정 등 매우 다양한 시도가 있어왔다. 하지만 대부분의 공정들은 제작 방법에 있어서 복잡하거나 마이크로 렌즈 어레이를 실현하는데 있어서 어려움이 있었던 것은 사실이다.

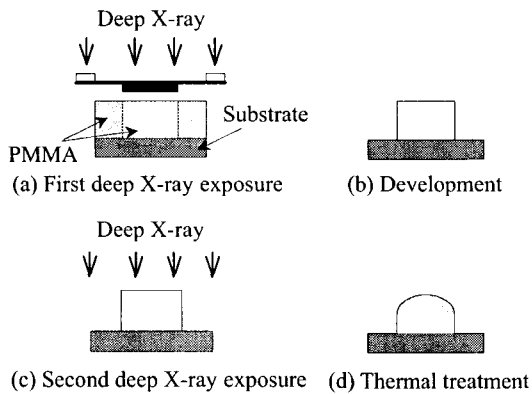


Fig. 1 Microlens fabrication process used previously by Ruther et al.<sup>(2)</sup>

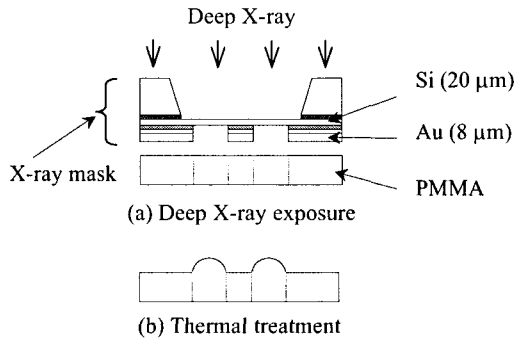


Fig. 2 The proposed microlens fabrication process by Lee<sup>(3)</sup>

1997년에 Ruther는 변형된 LIGA 공정을 이용하여 마이크로 렌즈를 제작하였고 그 공정 순서를 Fig. 1에 나타내었다[2]. PMMA 감광재 층에 X-선을 수직으로 노광하고 그것을 현상하여 원하는 원기둥 모양의 구조물을 제작하고, 여기에 X-선을 2차 노광한 후  $T_g$  이상의 열처리 온도에서 일정시간 동안 유지시켜 반구형상의 마이크로 렌즈를 만들었다. 그러나 이와 같은 기술에 의한 마이크로 렌즈 제조방법은 현상 공정과 2차의 X-선 노광 공정이 요구되므로 제조 공정이 다소 복잡하다는 단점이 있었다. Fig. 2는 SOI 웨이퍼를 이용하여 마이크로 렌즈를 제작하는 원리를 보여 주고 있다[3]. 한 번의 X-선 노광과 노광된 감광재에 대한 한 번의 열처리 공정으로 마이크로 렌즈 혹은 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 방법을 제공한다.

## 2. 변형 LIGA와 핫 엠보싱 공정

### 2.1 SOI 웨이퍼를 이용한 X-선 마스크의 제작

고에너지의 X-선 광원을 PMMA 감광재에 선택적

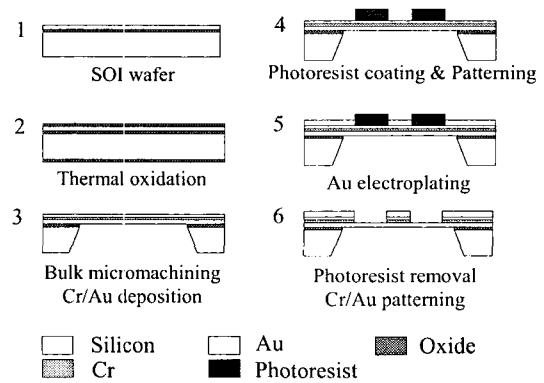


Fig. 3 Sequence of steps in the fabrication of the X-ray mask for the microlens

으로 노광하기 위해서는 금 흡수층(Au absorber)을 가지는 X-선 마스크의 제작이 필요하다. Fig. 3는 SOI 웨이퍼 SOI (Silicon On Insulator)를 이용한 X-선 마스크에 대한 제작 공정을 보여 준다. 상부 실리콘 박막층 두께 20 μm, 중간 산화막 두께 1 μm의 4인치 웨이퍼를 X-선 마스크의 기판으로 한다. SOI 웨이퍼 상하면께 1 μm 두께의 산화막을 형성하고 실리콘 기판을 식각한 후 산화막을 제거하면 20 μm 두께의 실리콘 박막을 얻는다. 금 전기도금의 전도층으로 크롬/금(Cr/Au)층을 각각 증착시키고 AZ 9260으로 실린더 모양의 패턴을 만든다. 만들어진 패턴 이외의 부분에 X-선 흡수층인 금을 8 μm 두께로 만들기 위해 일정한 전류밀도에서 전기도금한다. 전기도금이 완료되면 감광재와 불필요한 전도층을 식각용액을 이용하여 제거함으로써 원하는 X-선 마스크를 얻는다. 마이크로 렌즈의 직경 범위는 마이크로 렌즈 직경에 대한 영향을 알아보기 위하여 30 ~ 1500 μm의 범위에서 제작되었다.

### 2.2 X-선 노광

X-선 노광은 포항 방사광 가속기 (PLS)의 LIGA 빔라인에서 2.5 GeV의 에너지, 120 ~ 170 mA의 전류 범위로 실시되었다. Fig. 4는 LIGA 빔라인의 노광 시스템 사양을 보여 주고 있다.

제작되는 마이크로 렌즈의 형상은 PMMA에 노광된 X-선의 도즈량과 연관이 있다. 이러한 관계를 고찰하기 위하여 X-선 노광 공정에서는 PMMA가 노광되는 부분의 윗부분 도즈를 1.14 ~ 7.76 kJ/cm<sup>3</sup>의 영역에서 실행하였다. 마이크로 렌즈의 기판으로서 상용화된 2 mm 두께의 PMMA 판 (Goodfellow Inc.)이 사용되었다.

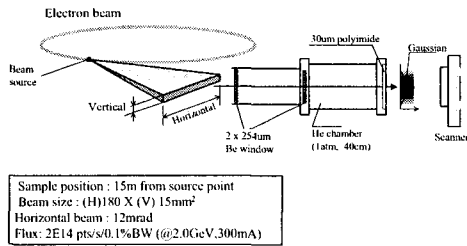
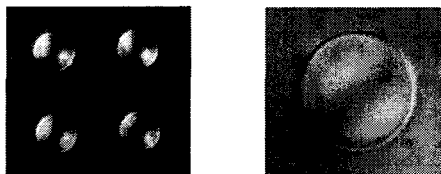
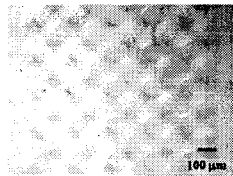


Fig. 4 Specifications of LIGA beamline (9C1) in the PLS



(a)  $\phi$  500  $\mu$ m microlenses (b)  $\phi$  300  $\mu$ m microlens



(c)  $\phi$  100  $\mu$ m microlenses

Fig. 5 Fabricated microlens

### 2.3 열처리 공정

노광 후에 시편은 순환 건조기에 넣어져 열처리된다. 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 이때 리플로우(reflow)와 영역 가장자리에 작용하는 표면장력에 의해 원하는 마이크로 렌즈가 만들어진다. Fig. 5 는 변형 LIGA 공정에 의해 제작된 마이크로 렌즈 혹은 마이크로 렌즈 어레이의 사진이다. 115  $^{\circ}$ C 에서 15 분간 열처리하였으며 노광 윗부분의 에너지량은 2.4 kJ/cm<sup>3</sup> 이다.

### 2.4 몰드 인서트의 제작

몰드 인서트를 제작하기 위해서는 몰드 코어에 3 가지의 다른 공정을 해 주어야 한다. 그 첫 번째로는 전도층 증착, 두 번째는 전기도금, 그리고 세 번째로 원하는 두께와 크기로 몰드를 만들기 위한 랩핑과 폴리싱이다. 이것에 대한 개략적인 그림을 Fig.

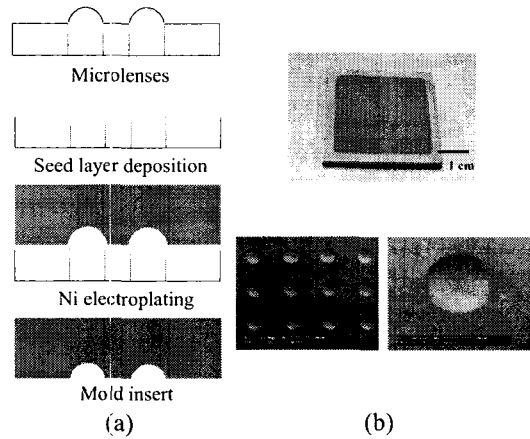
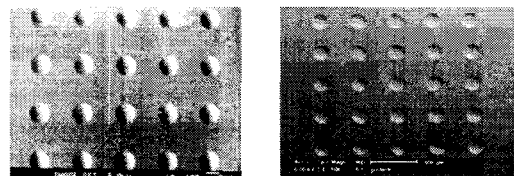
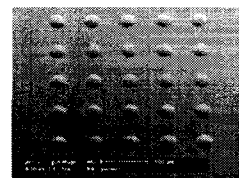


Fig. 6 Fabrication of the microlens mold insert for the hot embossing: (a) process and (b) photo of a electroplating plate



(a) Microlens by modified LIGA (b) Mold insert



(c) Microlens by embossing process

Fig. 7 SEM image to compared the surface roughness

.6 에 나타내었다. 크기는 가로, 세로 각각 3.5, 3.5 cm 이고 두께는 3 mm 이다.

### 2.5 핫 엠보싱 공정

마이크로 렌즈는 제작된 몰드 인서트를 이용하여 핫 엠보싱을 통해 만들어지게 된다. 핫 엠보싱 장비는 직접 제작된 것이며 가열과 냉각 장치, 그리고 모터와 transfer 장비로 구성된다. 일정한 온도에서 엠보싱 온도까지 열을 가하고 (130  $^{\circ}$ C) 10 분간 유지한 후, 디엠보싱(deembossing, 80  $^{\circ}$ C)을 하게 된다. Fig. 7 는 변형 LIGA 공정에 의해 제작된 마이크로 렌즈, 몰드 인서트 그리고 엠보싱된 마이크로 렌즈의 SEM 이미지를 보여주고 있다. AFM (Atomic Force Microscope ; AutoProbe M5, PSIA Co.)에 의해 측정된

표면의 평균 표면 조도값은 각각 0.5, 6.61, 2.24 nm로 나타났다.

### 3. Surface X-선 마스크를 이용한 대면적 스텐퍼 (stamper)의 제작

기존의 마이크로 렌즈를 제작하는 대부분의 방법들은 대면적에서 마이크로 렌즈 어레이를 실현하는 데는 어려움이 있다. 특히 액정 디스플레이(LCD)의 경우, 얇고 소형의 크기 및 낮은 소비 전력을 갖는 특징이 있고 핸드폰, 개인용 컴퓨터, TV 등 다양한 분야에서 이용되고 있으며 최근 그 시장은 더욱 확대되고 있는 실정이다. 반사형 액정 디스플레이에서 외부 광을 효율적으로 이용함으로써 밝은 디스플레이를 얻기 위해서는 수백만 내지 수천만개의 마이크로 렌즈의 형성이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 변형된 LIGA 방법을 이용하여 대면적에서의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하고 대량 생산을 위한 스텐퍼를 제작하였다.

Fig. 8 은 기존의 X-선 마스크를 이용하여 노광하는 모습을 보여 주고 있다. 그림에서처럼, X-선 마스크의 멤브레인으로 실리콘 이나 그 화합물을 사용할 경우, 실리콘의 크기와 두께의 한계로 인하여 대면적을 가지는 마스크의 제작이 어렵다. Fig. 9 은 PMMA 감광재위에 직접 X-선 흡수층을 만드는 surface X-선 마스크의 제작 공정을 보여 주고 있다. 이 방법은 감광재위에 마스크를 직접 만들기 때문에 대면적에서 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 수 있다. Fig. 10 는 실제 제작된 마스크를 보여 준다. 두께가 1.2 mm 이고 가로와 세로가 각각 145, 100 mm 인 PMMA 판을 사용하였고 패턴은 직경이 50  $\mu\text{m}$  인 원형이 100  $\mu\text{m}$  간격으로 불규칙하게 배열되어 있다.

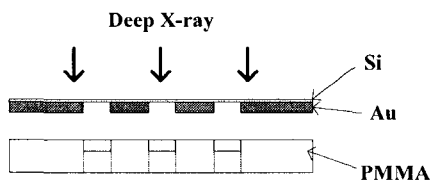


Fig. 8 Schematic view of X-ray exposure

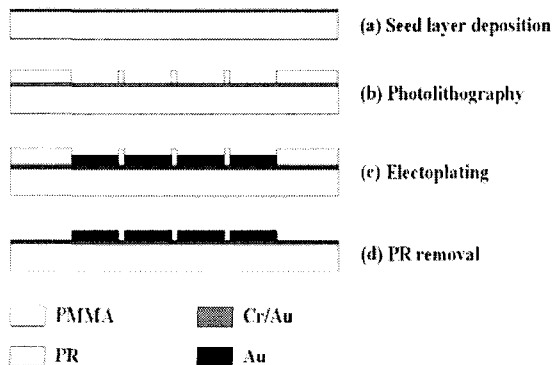


Fig. 9 Fabrication process of surface X-ray mask

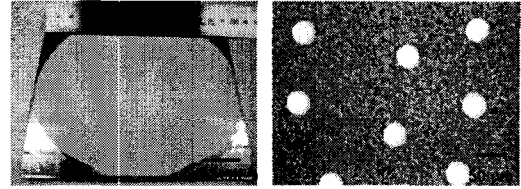


Fig. 10 Images of Fabricated surface X-ray mask

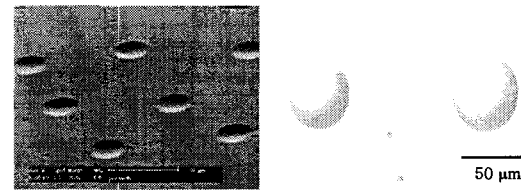


Fig. 11 Images of fabricated microlens

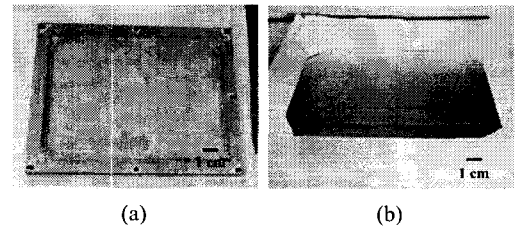


Fig. 12 Photos (a)after Ni electroplating, and (b)fabricated stamper

PMMA 표면 위에 금 전기도금을 위한 전도층으로 크롬/금을 열증착기를 이용하여 가능한 한 짧은 시간동안 증착하여 PMMA 의 열에 의한 손상을 방지했다. 감광재로 패턴한 후 10  $\mu\text{m}$  두께로 전기도금을 하여 X-선 흡수층이 만들고 불필요한 감광재를 제거하여 X-선 마스크를 제작하였다.

노광 윗부분에 축적되는 에너지양이 2 ~ 3.5  $\text{kJ}/\text{cm}^3$  정도일 때 가장 큰 변형을 보였다[3]. LIGA 빔라인의 노광 시스템에서 헬륨 챔버 길이가 달라진 것을 고려해 1 ~ 4  $\text{kJ}/\text{cm}^3$  범위에서 노광을 행하였고 열처리 온도는 60, 120, 150  $^{\circ}\text{C}$  에서 각각 5분간 실험하였다. 열처리 전에 전기 도금된 금과 전도층은 식각용액에서 제거하였다. 60  $^{\circ}\text{C}$ 에서는 변형이 전혀 없었고 120  $^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 변형이 크게 나타났다. 그 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 노광 윗부분에 축적되는 에너지양이 4  $\text{kJ}/\text{cm}^3$ 이고 120  $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분간 열처리한 샘플이 가장 변형이 가장 컸으며 오목한 형상을 나타내고 있다. 직경이 100  $\mu\text{m}$  보다 작을 경우 마이크로 렌즈의 변형 높이가 음의 값을 나타내고 이는 열처리 공정에서 마이크로 렌즈가 순환 건조기에서 꺼내졌을 때 외부와의 온도차로 인해 유동성이 있는 노광 영역의 부분이 수축하게 되는데 이 때에 모세관 현상이 일어나며 그 힘은 직경이 작을수록 커진다[3].

변형된 LIGA 공정을 이용하여 제작된 마이크로 렌즈 위에 니켈(Ni) 전기도금을 위한 전도층으로 크

롬/금을 증착한다. 그리고 니켈을 350  $\mu\text{m}$  두께로 도금하고 가로와 세로가 각각 160, 113mm 이고 300  $\mu\text{m}$  두께로 가공하였다. 그 결과를 Fig. 12 에 각각 나타내었다.

#### 4. 결론

X-선 노광에 따른 감광재의  $T_g$  변화를 이용하여 새로운 공정 방법으로 마이크로 렌즈 혹은 마이크로 렌즈 어레이를 간단하게 제작하였다. 또한 대량생산을 위하여 핫 엠보싱에 대한 금형을 제작하였고 PMMA 를 사용하여 마이크로 렌즈를 만들었다. Surface X-선 마스크를 이용하여 직경이 50  $\mu\text{m}$ 인 마이크로 렌즈를 대면적에 구현하였고 니켈 전기도금을 이용하여 스탬퍼를 제작하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로 부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 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., "Production of Separation Nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-Ray Lithography and Galvanoplastics," *Naturwissenschaften*, Vol. 69, pp. 520-523, 1992.
2. Ruther, P., Gerlach, B., Göttert, J., Ilie, M., Mohr, J., Müller A., and Oßmann, C., "Fabrication and Characterization of Microlenses Realized by a Modified LIGA process," *Pure Appl. Opt.*, Vol. 6, pp. 643-653, 1997.
3. 이성근, 이광철, 이승섭, "Microlens Fabrication Method by the Modified LIGA Process," *대한기계학회 논문집*, 제 26 권, 제 11 호, pp. 2450-2456, 2002.