

3 차원 LIGA 미세구조물 제작을 위한 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크

이 광 철* · 이 승 섭†

(2002년 4월 3일 접수, 2002년 8월 3일 심사완료)

Deep X-ray Mask with Integrated Micro-Actuator for 3D Microfabrication via LIGA Process

Kwang-Cheol Lee and Seung S. Lee

Key Words : LIGA(리가), Deep X-ray Lithography(깊은 X-선 사진식각), 3D Microfabrication(3 차원 미세가공), Integrated Micro-Actuator(내장형 마이크로 액추에이터)

Abstract

We present a novel method for 3D microfabrication with LIGA process that utilizes a deep X-ray mask in which a micro-actuator is integrated. The integrated micro-actuator oscillates the X-ray absorber, which is formed on the shuttle mass of the micro-actuator, during X-ray exposures to modify the absorbed dose profile in X-ray resist, typically PMMA. 3D PMMA microstructures according to the modulated dose contour are revealed after GG development. An X-ray mask with integrated comb drive actuator is fabricated using deep reactive ion etching, absorber electroplating, and bulk micromachining with silicon-on-insulator (SOI) wafer. 1 mm × 1 mm, 20 μm thick silicon shuttle mass as a mask blank is supported by four 1 mm long suspension beams and is driven by the comb electrodes. A 10 μm thick, 50 μm line and spaced gold absorber pattern is electroplated on the shuttle mass before the release step. The fundamental frequency and amplitude are around 3.6 kHz and 20 μm, respectively, for a dc bias of 100 V and an ac bias of 20 V_{P-P} (peak-peak). Fabricated PMMA microstructure shows 15.4 μm deep, S-shaped cross section in the case of 1.6 kJ cm⁻³ surface dose and GG development at 35 °C for 40 minutes.

1. 서론

리가(LIGA)기술은 X-선 사진식각(Lithographie), 전기주형(Galvanoformung), 사출성형(Abformung) 등의 공정으로 이루어져 있으며,⁽¹⁾ 방사광 가속기에서 나오는 X-선을 이용하여 구조물을 제작하므로 고종횡비, 낮은 표면 거칠기를 갖는 구조물의 제작이 가능하며 제조된 구조물을 전기주형 및 사출성형 등의 공정을 이용하여 대량 생산하는 것이 가능하므로 고출력 액추에이터,⁽²⁻⁴⁾ 고감도 센서^(5,6)

혹은 마이크로 시스템용 부품⁽⁷⁻⁹⁾ 제작 기술의 하나로써 널리 연구되고 있다. 반면 방사광 가속기를 이용한 X-선 노광공정에 의하여 제조가능한 구조물의 형상이 대부분 결정되므로 구조물의 측면 형상을 자유롭게 제조할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그러므로 리가기술의 넓은 응용 및 3 차원 마이크로 시스템에의 응용을 위하여 리가기술을 이용하여 3 차원 미세구조물을 제조하고자 하는 연구가 널리 진행되고 있다.⁽¹⁰⁻¹⁹⁾

리가기술을 이용하여 3 차원 미세구조물을 제조하는 방법으로는 자외선을 이용하는 일반적인 초소형기계가공기술과 유사하게 X-선 사진식각, 전기주형, 평탄화공정을 반복하여 여러 층이 적층된 구조물을 제조하는 방법이 있다.⁽¹⁰⁾ 또한 단층구조를 가지는 구조물을 리가기술을 이용하여 각각 제

* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sslee@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2183 FAX : (054)279-5899

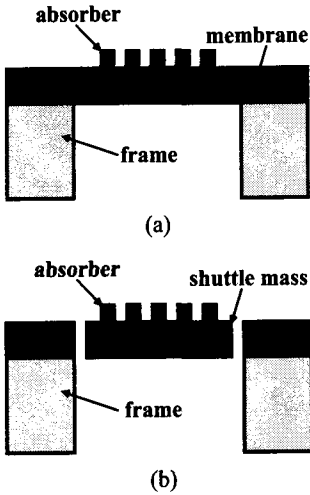


Fig. 1 Cross sectional diagram of (a) a conventional X-ray mask compared to that of (b) a deep X-ray mask with integrated micro-actuator (MIA)

작한 후 확산접합(diffusion bonding),⁽¹¹⁾ 선택적 전기도금,⁽¹²⁾ 또는 접착제 접합(adhesive bonding)⁽¹³⁾ 등을 이용하여 조립 또는 접합하여 3 차원 구조물을 제조하는 방법이 있다. 이러한 방법들은 여러 번의 X-선 노광 또는 부가적인 공정 및 장비가 필요하므로 단가 및 공정의 복잡성이 증가하는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 3 차원 리가기술과는 달리 한번의 X-선 공정을 이용하여 3 차원 구조물을 제조하는 3 차원 X-선 공정에 대한 연구가 보고되고 있다. 3 차원 X-선 공정으로는 X-선 방향에 대하여 X-선 마스크 및 감광재(resist)를 회전 또는 기울이면서 노광하는 방법과⁽¹⁴⁾ X-선 마스크를 감광재에 대하여 상대적으로 움직이면서 노광하는 방법이 있다.⁽¹⁵⁻¹⁹⁾ 회전 및 경사 X-선 노광을 이용한 다양한 3 차원 구조물이 보고되고 있으나 제조 가능한 구조물의 형상이 제한되며 임의의 곡면을 가지는 구조물을 제조하기 어려운 단점을 가지고 있다. 또한 이러한 방법에서는 X-선이 X-선 흡수층(absorber)에 대하여 기울어져서 조사되므로 X-선 흡수층 및 투과층(blank)의 표면 거칠기가 감광재에 전사되며 회전을 위한 제어 시스템의 정밀도에 의하여 표면거칠기가 영향을 받는 단점을 가지고 있다.

한편 X-선 마스크를 감광재에 대하여 상대적으로 움직이면서 노광하는 방법에서는 X-선 마스크의 움직임에 따라 감광재에 축적되는 도즈분포가 달라지게 되어 한번의 X-선 노광을 이용하여 자유로운 곡면을 가지는 3 차원 미세구조물을 제조할

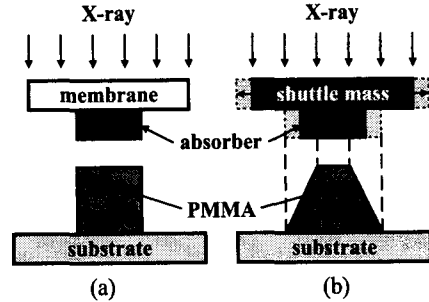


Fig. 2 Schematic of the fabrication processes of (a) conventional deep X-ray lithography compared to (b) deep X-ray lithography with MIA

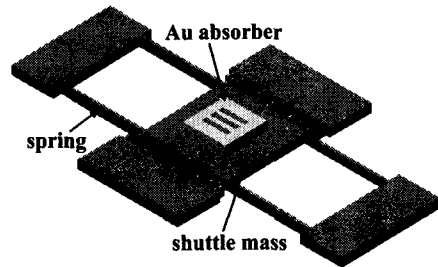


Fig. 3 Schematic of the comb type MIA which uses a comb drive actuator to oscillate Au absorber on the shuttle mass during deep X-ray exposures

수 있다. 그러나 이러한 방법을 이용하여 3 차원 미세구조물을 제조하기 위해서는 노광에 사용하고 있는 기존 X-선 스캐너 이외에 X-선 마스크를 움직이기 위한 추가적인 부대장치가 필요한 단점을 가지고 있다.

본 논문은 별도의 장비가 필요없이 X-선 마스크를 움직임으로서 자유로운 3 차원 구조물을 제조하기 위한 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크(MIA, deep X-ray mask with integrated micro-actuator)를 기술한다. Fig. 1에 본 연구에서 제안하는 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크의 단면 개념도를 일반적인 X-선 마스크와 비교하여 나타내었다. 일반적인 X-선 마스크에서는 흡수층이 고정된 얇은 투과층에 형성되어 있는 반면 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크에서는 흡수층이 마이크로 액추에이터의 가동부(shuttle mass)에 형성된다. X-선 노광 중에 마이크로 액추에이터를 구동함으로써 마이크로 액추에이터의 가동부에 형성된 X-선 흡수층이 움직이게 되고, X-선 흡수층의 움직임에 따라 변화된 감광재 내부 도즈분포를 이용하여 3 차원 미세구조물을 얻을

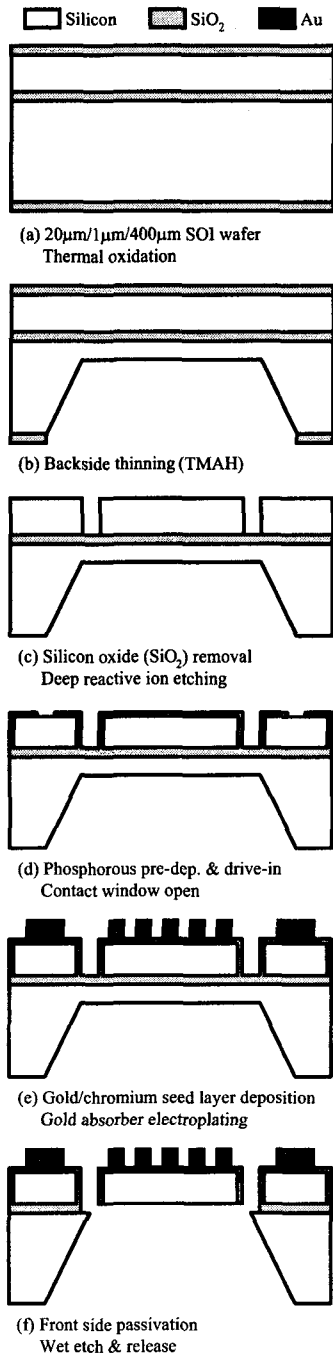


Fig. 4 Fabrication process of MIA

수 있다. Fig. 2 에 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크를 이용한 3 차원 X-선 공정의 모식도를 일반적인 X-선 공정과 비교하여 나타내었다. X-선 도즈, 흡수층 형상, 마이크로 액추에이터의 구동 패턴 등을 변화시킴으로써 Fig. 2 에 나타낸 기술

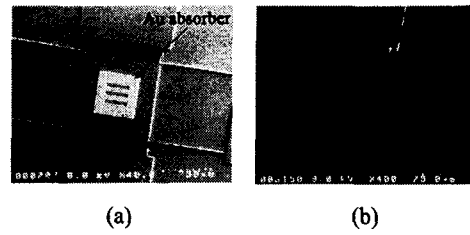


Fig. 5 SEM photomicrographs of (a) comb type MIA before release and (b) enlarged view of comb electrode

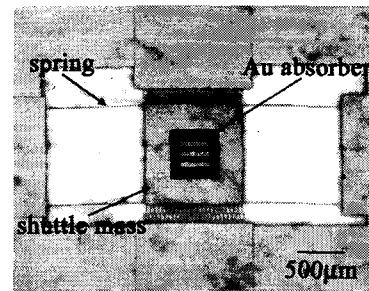


Fig. 6 Photomicrograph of the fabricated MIA

어진 벽면을 갖는 구조물 이외에도 계단 모양 또는 자유로운 곡면을 갖는 3 차원 미세구조물을 제조할 수 있다. 흡수층을 움직이기 위한 마이크로 액추에이터로서 1 차원 또는 2 차원 구동, 정전 또는 열 구동 등 다양한 마이크로 액추에이터를 응용할 수 있다. 본 논문에서는 빗모양 마이크로 액추에이터(comb drive actuator)를 이용하여 가동부에 형성된 흡수층을 구동하는 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크 및 제작된 내장형 X-선 마스크를 이용한 X-선 공정을 기술하고 토의한다.

2. 내장형 X-선 마스크

Fig. 3 에 가동부에 형성된 흡수층을 움직이기 위하여 빗모양 마이크로 액추에이터를 사용한 내장형 X-선 마스크의 개략도를 나타내었다. 두께 20 μ m, 1mm \times 1mm 의 가동부가 X-선 투과층으로, 두께 10 μ m, 선폭 50 μ m 의 금 도금층이 X-선 흡수층으로 사용되었다. 가동부 및 흡수층은 길이 1mm, 선폭 10 μ m, 두께 20 μ m 인 4 개의 지지보로 지지되며, 빗모양 전극에 의하여 X-선 노광중에 움직인다. 빗모양 전극 폭(finger width) 및 길이는 각각 10 μ m 와 100 μ m, 겹쳐진 길이는 30 μ m, 구조물의 두께는 SOI 층의 두께인 20 μ m 이었다.

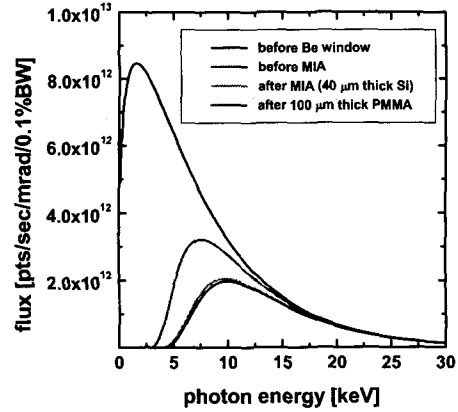
Fig. 4 에 빗모양 마이크로 액추에이터 내장형

Table 1 The parameters used in deep X-ray exposures at Pohang Light Source LIGA beamline

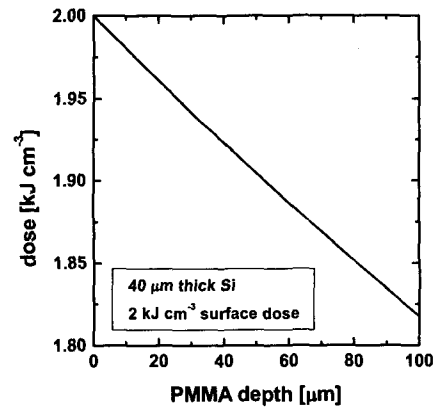
Acceleration Voltage	2.5 GeV	Kapton Film	130 μm	Mask Blank	20 μm (Si)
Bending Magnet	1.323 T	Horizontal Divergence	12 mrad	Absorber	10 μm (Au)
Beryllium Window	508 μm	Distance to Source	15 m		
Helium Spool	400 mm	Pre-absorber	20 μm (Si)		

X-선 마스크의 공정도를 나타내었다. 먼저 20 $\mu\text{m}/1\mu\text{m}/400\mu\text{m}$, N(100), 1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$, 인이 도핑된 SOI 기판을 초기세척 후 식각보호막으로서 열산화막을 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 분간 습식 성장하였다[Fig. 4(a)]. 사진식각공정을 이용하여 식각창을 정의한 후 90 $^{\circ}\text{C}$, 20wt.% TMAH 수용액을 이용하여 뒷면 실리콘을 이방성 식각하여 두께 약 100 μm 의 실리콘 층이 남도록 하였다[Fig. 4(b)]. 산화막을 제거한 후 두께 2 μm 의 양성 감광재를 보호막으로 사용하여 두께 20 μm 의 SOI 층을 고중형비 반응성 이온식각(Dep Reactive Ion Etching, DRIE)하여 빗모양 마이크로 액추에이터 형상을 정의하였다[Fig. 4(c)]. 전도도부여를 위하여 POCl_3 액체산화원을 사용하여 1050 $^{\circ}\text{C}$, 60 분간 선확산을 한 후 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 분간 습식 분위기에서 후확산을 실시하여 두께 0.7 μm 의 산화막을 성장하고 사진식각공정을 이용하여 금속배선을 위한 접착층을 형성하였다[Fig. 4(d)]. 선확산과 후확산 후 면저항은 각각 1.7 $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ 과 1.1 $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ 이었다. 도금씨앗층으로 금과 크롬을 열증착법을 이용하여 각각 400nm 와 50nm 의 두께로 증착하고 두께 20 μm 의 양성감광재 (AZ9260)를 도금틀로 사용하여 X-선 흡수층을 빗모양 마이크로 액추에이터의 가동부에 형성하였다 [Fig. 4(e)]. X-선 흡수층은 온도 35 $^{\circ}\text{C}$, 전류밀도 2mA/cm 2 에서 시안계 도금 용액을 이용하여 10 μm 의 두께로 금을 전기도금하여 사용하였다. 기판의 앞면을 왁스를 이용하여 실리콘 질화막이 성장된 실리콘 기판에 접합하여 보호한 후 60 $^{\circ}\text{C}$, 33% KOH 수용액을 이용하여 뒷면의 실리콘을 제거하였으며 남아있는 매몰산화층 및 도금씨앗층을 각각 완충불산용액 및 금과 크롬 식각용액을 이용하여 제거한 후 건조하여 내장형 X-선 마스크를 부유시켰다[Fig. 4(f)].

Fig. 5 와 Fig. 6 에 부유이전 및 공정 완료된 빗모양 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크의 SEM 및 현미경 사진을 나타내었다. 빗모양 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크의 공진주파수와 최대진폭은 100V 의 직류전압과 20Vpp 의 교류전압을 인가하였을 때 각각 3.6kHz 와 20 μm 이었다.



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Spectral flux distribution emitted from PLS LIGA beamline at each stage and (b) an example of calculated in-depth dose distribution in PMMA for 2 kJ cm $^{-3}$ surface dose and 40 μm thick Si

3. MIA 를 이용한 X-선 공정 및 토의

빗모양 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크를 이용한 X-선 노광은 포항방사광가속기 리가빔라인 (9C1)에서 2.5GeV, 100~140mA 빔 전류 영역에서 수행하였으며 Table 1 에 빔라인의 제원 및 X-선 노광에 사용한 조건을 나타내었다. 1.323T 이 극전자석에서 방사된 X-선 광원은 두께 254 μm 인

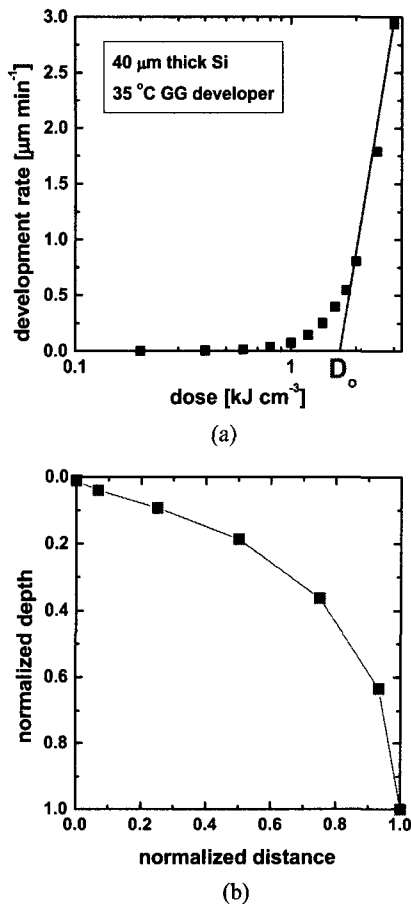


Fig. 8 (a) PMMA development rate with respect to absorbed dose at 35 $^{\circ}\text{C}$ GG developer and 40 μm Si, (b) calculated PMMA cross-sectional profile from (a) for 1.6 kJ cm^{-3} surface dose

두개의 베릴륨 창, 길이 400mm 인 헬륨용기, 두께 130 μm 인 첩톤 막을 통과하며 수평 발산각 (horizontal divergence)은 12mrad, 광원과 X-선 마스크와의 거리는 15m 이다. 내장형 X-선 마스크에 미치는 열영향을 최소화하기 위하여 두께 20 μm 의 실리콘 박막을 선흡수층(pre-absorber)으로 사용하였다.

Fig. 7(a)에 포향방사광가속기 리가 빔라인에서 방사되는 방사광 유속분포(spectral flux distribution) 변화를 나타내었으며 Fig. 7(b)에 두께 40 μm 의 실리콘(20 μm 가동부, 20 μm 선흡수층)을 통과한 후 PMMA (Poly-methylmethacrylate)에 흡수되는 도즈의 PMMA 깊이에 따른 변화를 나타내었다. Fig. 7(a), (b)는 방사광에서 방출되는 X-선 유속분포식과 각 물질의 선감쇄계수(linear attenuation coefficient)를 이용하여 계산하였다.^(20,21) Fig.

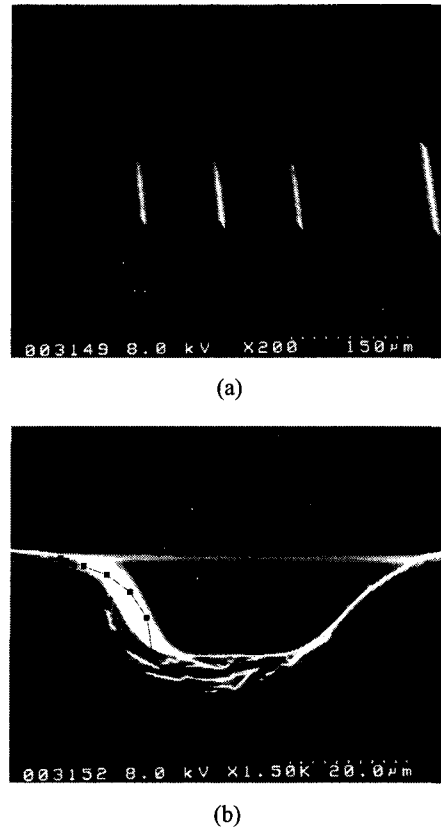


Fig. 9 SEM photomicrographs of fabricated PMMA microstructure via DXL with comb type MIA at its resonance: insert in (b) shows the calculated cross section at Fig. 8(b) (1.6 kJ cm^{-3} surface dose and GG development at 35 $^{\circ}\text{C}$ for 40 minutes)

7(a)에 나타난 바와 같이 두께 40 μm 의 실리콘을 통과한 후 PMMA 에 도달하는 X-선은 대부분 에너지가 높으며 PMMA 에 흡수되는 양이 작으므로, PMMA 내부 도즈는 Fig. 7(b)에서와 같이 PMMA 깊이에 따라 선형적으로 감소하며 2 kJ cm^{-3} 표면 도즈의 경우 두께 100 μm 당 10%정도 감소하고 있음을 보여준다.

내장형 X-선 마스크를 이용하여 측정된 도즈에 따른 35 $^{\circ}\text{C}$ GG 현상액에서의 PMMA 현상속도의 변화를 Fig. 8(a)에 나타내었다. Goodfellow 사의 두께 2mm 인 PMMA 판을 사용하였으며, X-선 노광 후 60% di(ethylene glycol) buthyl ether, 20% morpholine, 5% ethanolamine, 15% 탈이온수를 혼합한 35 $^{\circ}\text{C}$ GG 현상액을 이용하여 현상하고 탈이온수 세정 및 질소건조를 실시하였다. PMMA 현상 곡선은 0-4 kJ cm^{-3} 도즈 영역에서 측정하였으며

35°C GG 현상액에서의 임계 도즈(threshold dose, D_0)는 대략 $1.7\text{kJ}/\text{cm}^3$ 이었다. 임계 도즈 근처에서 PMMA 현상곡선이 비선형적인 관계를 보이고 $2\sim 4\text{kJ}/\text{cm}^3$ 영역에서는 선형적인 관계를 보였다.

X-선 마스크의 상대적인 움직임에 이용한 미세가공은 PMMA 내부 도즈의 분포변화를 이용하므로 다른 리가기술과는 달리 제조된 PMMA 구조물내의 도즈가 일정 이상의 값을 갖게 된다. PMMA 구조물내의 도즈가 $2\text{kJ}/\text{cm}^3$ 이상일 경우 PMMA 내부에서 X-선과의 반응으로 인한 기포 및 크랙으로 인하여 표면 거칠기가 증가하는 경향을 보였다. 그러므로 본 연구에서는 일반적인 리가공정에 비하여 낮은 $1\sim 2\text{kJ}/\text{cm}^3$ 사이의 PMMA 도즈를 이용하여 PMMA 구조물을 제작하였다. Fig. 8(b)에 $1.6\text{kJ}/\text{cm}^3$ 표면 도즈, 35°C GG 현상액을 이용하여 현상할 경우 얻게 되는 PMMA 단면도를 Fig. 8(a)에 나타낸 현상곡선을 바탕으로 계산한 결과를 나타내었다. Fig. 8(b)로부터 PMMA 현상곡선을 바탕으로 계산한 단면은 X-선 흡수층의 움직임에 따라서 볼록한 단면(convex curvature)을 보임을 알 수 있다.

내장형 X-선 마스크를 이용하여 제작한 PMMA 구조물 SEM 사진을 Fig. 9 에 나타내었다. PMMA 표면 도즈는 $1.6\text{kJ}/\text{cm}^3$ ($2000\text{mA}\cdot\text{min}$)이었으며 X-선 노광 후 35°C, 40 분 GG 현상액에서 현상하였다. 제조된 구조물의 깊이는 대략 $15.4\mu\text{m}$ 이었으며 현상속도는 대략 $0.38\mu\text{m}/\text{min}$ 이었다. Fig. 9(b)에 실제 얻어진 PMMA 단면을 Fig. 8(b)의 계산결과와 비교하여 나타내었다. $1\text{kJ}/\text{cm}^3$ 이상의 도즈에서는 PMMA 현상곡선에서 구한 계산결과와는 달리 오목한 단면(concave curvature)을 보여주며 제작된 PMMA 구조물의 단면은 S 자 형태를 보여주고 있다. 현상곡선에서 구한 계산 값과 실제 얻어진 구조물 단면형상과의 불일치는 단속적인 X-선 노광으로 인한 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁸⁾ 계산결과와 제조된 구조물 단면의 불일치는 내장형 X-선 마스크의 구동 패턴을 변화시키거나 X-선 흡수층 패턴을 PMMA 의 실제 현상특성을 보상하도록 설계 함으로서 해결될 수 있다.

이와 같은 S 자 형태 구조물 이외에 $1\text{kJ}/\text{cm}^3$ 정도의 도즈를 전면 조사 함으로서(blanket exposure) 오목한 단면을 갖는 구조물을 제조할 수 있다. 또한 X-선 흡수층 형상, 마이크로 액추에이터의 진폭 및 구동 자유도, X-선 도즈 등의 변화를 이용하여 오목한 단면, 탐침(tip shape), V-groove, 단면의 변화를 갖는 미세 유로 등을 제작할 수 있다.

본 연구에서 제작한 내장형 X-선 마스크의 최대 진폭은 3.6kHz 공진 주파수에서 대략

$20\mu\text{m}$ 이었다. 그러므로 본 연구에서 제작 가능한 PMMA 구조물의 경사면의 최대 폭은 내장형 X-선 마스크의 진폭인 $20\mu\text{m}$ 로 제한이 된다. 그러나 X-선 흡수층의 주기적인 배열을 이용하면 가능한 경사면의 최대 폭을 증가시킬 수 있다.⁽¹⁷⁾

내장형 X-선 마스크에 있어서 흡수층은 마이크로 액추에이터의 가동부에 형성되므로 노광 면적이 가동부의 면적에 제한을 받게 된다. 그러므로 대면적 3 차원 구조물을 제조하기는 어려우나 내장형 X-선 마스크를 노광 후 일정 거리 이동하여 노광 함으로서(step & repeat) 작은 미세구조물 array 를 제작할 수 있다. 그러므로 날카로운 탐침 등의 3 차원 미세구조물 array 를 제작할 수 있다. 향후 2 차원 구동형 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크를 이용하여 탐침, 렌즈, 미세 구멍 가공에 대한 연구를 수행할 계획이다.

4. 결 론

리가기술을 이용하여 3 차원 미세구조물을 제작하기 위한 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크를 제작하였다. 내장형 액추에이터로서 빗모양 마이크로 액추에이터를 사용하였으며 제작한 내장형 X-선 마스크를 이용하여 X-선 노광을 수행하여 빗모양 마이크로 액추에이터의 움직임에 따라 S 자 형태의 단면을 갖는 PMMA 구조물을 제작하였다.

빗모양 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크는 SOI 기판을 이용하여 고중형비 반응성 이온식각 및 몸체가공기술을 이용하여 제작되었다. 두께 $10\mu\text{m}$, 폭 $50\mu\text{m}$ 의 슬릿을 갖는 X-선 흡수층은 폭 $10\mu\text{m}$, 길이 1mm 인 4 개의 지지 보로 지지되어 있는 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 의 가동부에 형성하였으며, 100V 직류전압, 20Vpp 교류전압을 인가하였을 때 내장형 X-선 마스크의 공진 주파수 및 진폭은 각각 3.6kHz 및 $20\mu\text{m}$ 이었다. $1.6\text{kJ}/\text{cm}^3$ 표면 도즈, 35°C, 40 분 GG 현상액에서 현상하여 빗모양 마이크로 액추에이터의 움직임에 따라 변화된 단면을 갖는 두께 $15.4\mu\text{m}$ 인 PMMA 구조물을 제작하였다.

동일한 제작공정을 이용하여 열 구동, 정전 구동 또는 2 차원 구동을 하는 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크를 제작할 수 있으며 이를 이용하여 X-선 노광을 함으로서 기울어진 벽면, 계단 모양 벽면, 자유로운 곡면을 갖는 구조물 등 3 차원 미세가공에 응용할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학 기술부 21 세기 프론티어 연구 개발 사업인 지능형 마이크로 시스템 개발 사업 (<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비지원을 받아 수행되었음 ; 과제협약번호 MS-01-338-01.

참고문헌

- (1) Becker, E. W., Ehrfeld, W., Hagmann, P., Maner, A., and Münchmeyer, D., 1986, "Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanofarming, and Plastic Moulding (LIGA Process)," *Microelectron. Eng.*, Vol. 4, pp. 35~56.
- (2) Guckel, H., Fischer, K., and Stiers, E., 1998, "Closed Loop Controlled, Large Throw, Magnetic Linear Microactuator with 1000 μ m Structural Height," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'98)*, pp. 414~418.
- (3) Rogge, B., Schulz, J., Mohr, J., Thommes, A., and Menz, W., 1995, "Fully Batch Fabricated Magnetic Microactuators using a Two Layer LIGA Process," *Proc. Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'95)*, pp. 320~323.
- (4) Samper, V. D., Sangster, A. J., Reuben, R. L., and Wallrabe, U., 1999, "Torque Evaluation of a LIGA Fabricated Electrostatic Micromotor," *J. of Microelectromech. Sys.*, Vol. 8(1), pp. 115~123.
- (5) Strohtmann, M., Bley, P., Fromhein, O., and Mohr, J., 1994, "Acceleration Sensor with Integrated Compensation of Temperature Effects Fabricated by the LIGA Process," *Sen. and Act. A*, Vol. 41-42, pp. 426~429.
- (6) Schumacher, K., Krömer, O., Wallrabe, U., Mohr, J., and Saile, V., 1999, "Micromechanical LIGA-Gyroscope," *Proc. Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, pp. 1574~1577.
- (7) Müller, K. -D., Bacher, W., and Hecke, M., 1998, "Flexible Integration of Nonsilicon Microstructures on Microelectronic Circuits," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'98)*, pp. 263~267.
- (8) Dunkel, K., Bauer, H. -D., Ehrfeld, W., Hoßfeld, J., Weber, L., Hörcher, G., and Müller, G., 1998, "Injection-moulded Fibre Ribbon Connectors for Parallel Optical Links Fabricated by the LIGA Technique," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 301~306.
- (9) 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. 3737, pp. 562~571.
- (10) Guckel, H., 1998, "High-Aspect-Ratio Micromachining Via Deep X-ray Lithography," *Proc. of the IEEE*, Vol. 86(8), pp. 1586~1593.
- (11) Christenson, T. R. and Schmale, D. T., 1999, "A Batch Wafer Scale LIGA Assembly and Packaging Technique via Diffusion Bonding," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'99)*, pp. 476~481.
- (12) Pan, L. -W. and Lin, L., 2001, "Batch Transfer of LIGA Microstructures by Selective Electroplating and Bonding," *J. of Microelectromech. Sys.*, Vol. 10(1), pp. 25~32.
- (13) Maas, D., Büstgens, B., Fahrenberg, J., Keller, W., Ruther, P., Schomburg, W. K., and Seidel, D., 1996, "Fabrication of Microcomponents using Adhesive Bonding Techniques," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'96)*, pp. 331~336.
- (14) Ehrfeld, W. and Schmidt, A., 1998, "Recent Developments in Deep X-ray Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16(6), pp. 3526~3534.
- (15) Feinerman, A. D., Lajos, R. E., White, V., and Denton, D. D., 1996, "X-ray Lathe: an X-ray Lithographic Exposure Tool for Nonplanar Objects," *J. of Microelectromech. Sys.*, Vol. 5(4), pp. 250~255.
- (16) Katoh, T., Nishi, N., Fukugawa, M., Ueno, H., and Sugiyama, S., 2001, "Direct Writing for Three-dimensional Microfabrication using Synchrotron Radiation Etching," *Sen. and Act. A*, Vol. 89, pp. 10~15.
- (17) Sugiyama, S. and Ueno, H., 2001, "Novel Shaped Microstructures Processed by Deep X-ray Lithography," *Proc. Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'01)*, pp. 1574~1577.
- (18) Tabata, O., Matsuzuka, N., Yamaji, T., and You, H., 2001, "Fabrication of 3-dimensional Microstructures using Moving Mask Deep X-ray Lithography (M²DXL)," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'01)*, pp. 94~97.
- (19) Tabata, O., Matsuzuka, N., Yamaji, T., Uemura, S., and Yamamoto, K., 2002, "3D Microfabrication by Moving Mask Deep X-ray Lithography (M²DXL) with Multiple Stages," *Proc. IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'02)*, pp. 180~183.
- (20) Cheng, Y., Kuo, N. -Y., and Su, C. H., 1997, "Dose Distribution of Synchrotron X-ray Penetrating Materials of Low Atomic Numbers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 68(5), pp. 180~183.
- (21) Koo, Y. and Shin, N., 2000, *X-ray Science & Applications (In Korean)*, A-Jin, Seoul, pp. 29~64.