

LIGA 공정을 이용한 정밀 고분자 광도파로 제작

김진태* · 김병철* · 최춘기* · 윤근병* · 정명영**
(2002년 11월 29일 접수, 2003년 4월 11일 심사완료)

Fabrication of Polymeric Optical Waveguide by LIGA

Jin Tae Kim, Byeong Cheol Kim, Choon-Gi Choi, Keun Byoung Yoon
and Myung Yung Jeong

Key Words: LIGA(리가), Deep X-ray Lithography(깊은 X선 사진식각), Hot Embossing(핫 엠보싱), Polymeric Optical Waveguide(고분자 광 도파로)

Abstract

LIGA technique evolved as a basic fabrication process for micro-structure. The present report deals with the basic technological features in the sequence of the LIGA technique such as deep x-ray lithography(DXRL), electroplating, and moulding processes at Pohang Light Source (PLS). We designed 3-D structured master for fabrication of polymeric optical waveguide and manufactured polymeric optical waveguide with the same using hot embossing process. Polymeric optical waveguide could be produced with $\pm 1 \mu\text{m}$ accuracy and good surface roughness.

1. 서 론

DXRL (Deep X-ray Lithography)와 밀접한 관계를 갖는 LIGA (Lithographie Galvaniformung Abformung)⁽¹⁾ 공정은 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖는 $50 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ 높이의 미세 구조물을 만드는 유용한 방법으로 알려져 있다. X-ray를 이용한 LIGA 공정은 기존의 실리콘 기반의 MEMS 기술이 갖고 있던 재료의 한계를 극복할 수 있는 기술로 대두되고 있으며, 높은 수준의 표면조도 특성과 높은 종횡비의 미세구조물을 기존의 반도체 공정에 비해 비교적 용이하게 실현하는 기술로 각광받고 있다.⁽²⁾

최근 LIGA 공정에 의해 만들어진 최종 금형을 이용하는 핫 엠보싱(hot embossing) 공정⁽³⁾은 고분자 미세구조물(micro-structure)을 저가격으로 용이하게 대량 생산할 수 있는 기술로서 각광 받고 있으며, 고분자 광소자의 특성이 기존 실리카 광소자의 특성을 극복함에 따라 핫 엠보싱 기술을 이용하여 집적형 광배선모듈, 광 백플레인 및 광통신 소자에 적용되는 코어 크기 $50 \mu\text{m}^2$ 이상의 다중모드 고분자 광도파로 제작에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.^(4,5)

포항가속기 연구소의 DXRL beam-line은 국내 유일의 DXRL 실험 시설을 갖추고 있으며 LIGA 공정을 수행하기 위한 최적 x-ray 광원을 제공하고 있다. 그러나 DXRL 공정부터 몰딩(moulding)에 이르는 완벽한 LIGA 공정의 수행에 대한 국내 연구는 미진한 상황이다. 이에 따라 본 서에서는 고분자 광도파로 제작을 위한 전반적인 LIGA 공정을 수행하여 LIGA 공정의 응용성을 확인하였다. 가속기의 DXRL용 x-ray의 특성을 살펴보고, LIGA 공정을 이용하여 광배선모듈에 적

† 책임저자, 회원, 한국전자통신연구원 광접속모듈팀
E-mail : myjinny@etri.re.kr

TEL : (042)860-6005 FAX : (042)860-6248

* 한국전자통신연구원 광접속모듈팀

** 회원, 한국전자통신연구원 광접속모듈팀

용 가능한 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 및 $50 \times 42 \mu\text{m}^2$ 코어 크기의 다채널 다중모드 고분자 광도파로 성형용 Ni 마스터를 제작하였다. 제작된 Ni 마스터를 이용한 핫 엠보싱 공정으로 고분자 광도파로 제작을 위한 고분자 미세구조 성형을 수행하여 LIGA 공정을 완성하였다.

2. DXRL beam-line 특성

국내에서 사용 가능한 DXRL용 광원은 포항가속기연구소의 Pohang Light Source (PLS)이다. PLS는 전자 선형 가속기와 전자 저장링으로 구성되는 제 3세대 광원으로, 1994년 포항제철과 정부의 지원에 의해 포항공과대학 내에 건설되었다. PLS 내 11개 beam-line 중 9C1 beam-line은 DXRL을 위해 설계된 beam-line으로 2.5 GeV 에너지의 전자가 전자기력에 의해 원형으로 휘어질 때 방사되는 x-ray beam을 이용하고 있다. Beam-line의 구성은 Fig. 1과 같이 Be window, He chamber, polyimid film 등으로 구성되고, 방사되는 최종 beam size는 $180 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, horizontal beam span은 12 mrad이다.

가속기에서 방사되는 x-ray의 스펙트럼 분포는 광자에너지 분포 함수에 기반한 광자 플럭스(flux)로부터 출발한다.⁽⁶⁾

$$N(h\nu) = 1.256 \times 10^7 \gamma I G_1(y) \quad (1)$$

여기서 단위는 $\text{photons sec}^{-1} \text{ mrad}^{-1} \text{ mA}^{-1}$ 이며 0.1% bandwidth를 기준으로 하고, E 는 전자에너지, m 은 전자 질량, c 는 광속, I 는 가속기 저장링 내 전류, $K_{5/3}(t)$ 는 2차 modified Bessel 함수, h 는 플랑크 상수, ν 는 광자의 진동수, ν_c 는 임계주파수(critical frequency)이다. 그리고 $\gamma = E/mc^2$, $y = h\nu/h\nu_c$, $\nu_c = 3\gamma^3/4\pi\rho$, $G_1(y) = y \int_y^\infty K_{5/3}(t) dt$ 이다.

가속기에서 방사되는 x-ray의 광자 에너지에 대한 파워(power) 스펙트럼은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P(h\nu) = 2.011 \times 10^{-9} \gamma y G_1(y) \quad (2)$$

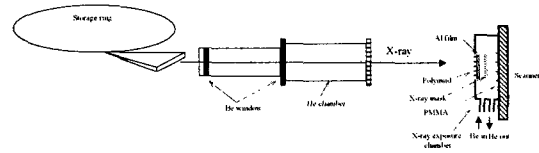


Fig. 1 Schematic diagram of PLS DXRL beam-line and exposure system

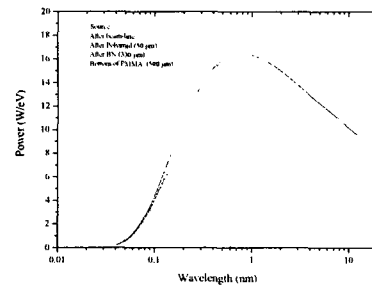


Fig. 2 Power spectrum from the synchrotron light source and filtered by different elements in the beam path

여기서 단위는 $\text{W eV}^{-1} \text{ mrad}^{-1} \text{ mA}^{-1}$ 이다.

Beam current가 150 mA 일 때, 식 (2)를 통해 계산된 x-ray의 에너지 분포는 Fig. 2에 나타내었다. 가속기에서 방사되는 x-ray 스펙트럼은 다양한 파장분포를 갖지만 beam-line을 구성하는 He, Be, polyimid 등을 통과하면서 파장에 따라 그 세기가 변화되어 최종적으로 임계파장 2 Å의 스펙트럼을 갖는다. 또한 사용목적에 따라 Al, Cu, Ni, Si 등으로 특정 파장을 여과(filtering)할 수 있고 x-ray 마스크의 투과체(membrane)의 물질에 따라 최종적으로 감광막에 도달하는 x-ray 스펙트럼은 변화될 수 있다. Fig. 1의 x-ray 노광 시스템을 구성하는 polyimid, x-ray 마스크의 BN membrane 그리고 PMMA를 통과하는 과정에서 변화되는 x-ray 스펙트럼 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

3. LIGA에 의한 고분자 광도파로 제작

LIGA 공정은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Lithographie, Galvaniformung (electroplating), Abformung (moulding)의 세 공정으로 구성된다.⁽¹⁾ 가속기에서 방사되는 x-ray 광원을 원하는 형상이 새겨진 x-ray 마스크를 통하여 고분자 물질에 노광시킨다. 노광된 고분자를 유기용제로 현상시키

고, 현상된 빈 공간을 Ni, Cu 등의 금속으로 도금 시킨다. 도금된 금속 구조체 자체가 하나의 결과물이 되거나, 도금된 금속 구조체를 마스터(master)로 이용하여 핫 엠보싱 공정,⁽³⁾ 사출성형⁽⁷⁾ 등을 통해 최종 결과물을 얻을 수 있다.

본 실험에서는 광배선모듈 및 광 백플레인에 사용될 다중모드 고분자 광도파로를 제작하기 위하여 길이 60 mm, 가로세로 100×100 μm², 간격 250 μm의 12채널 직선형 미세 구조물과 길이 38 mm, 가로세로 50×42 μm², 간격 250 μm의 12 채널 직선형 미세 구조물을 설계하였다. LIGA 공정을 구성하는 개별 공정의 기초기반 연구를 수행하고, Ni plate 위에 상기 미세 구조물이 구현된 Ni 마스터를 제작하였다. 제작된 마스터를 핫 엠보싱 기술에 적용하여 고분자 광도파로 구조를 성형함으로써, 체계적인 LIGA 공정을 완성하였다.

3.1 노광시료 준비

PMMA (polymethylmethacrylate)는 LIGA 공정에서 가장 널리 사용되는 감광 물질로서 스펀코팅⁽⁸⁾에 의한 방법이나 판재의 직접적인 접착⁽⁹⁾을 통해 금속 위에 부착하여 x-ray 노광에 이용된다. x-ray 노광 중 마스크에 의해 가려지지 않는 부분은 사슬절단(chain scission)에 의해 분자량이 줄어들고 이후 현상 과정에서 녹아 없어진다.

PMMA가 부착되는 금속은 도금 시 음극으로 작용하므로 높은 전도도 및 완벽한 PMMA 접착성을 동시에 요구한다. Ti, Cu 또는 Au 등이 주로 쓰이고, 본 실험에서는 8 mm 두께의 Ni 기판을 이용하였다.

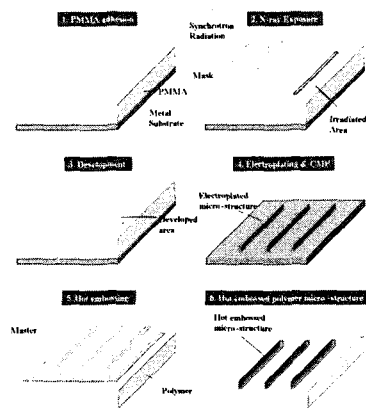


Fig. 3 Fabrication process of polymeric optical waveguide by LIGA

PMMA의 부착은 금속의 산화(oxidizing the metal)에 의한 표면처리나 접착제를 사용하는 두 경우가 있다. 본 실험에서는 Ni plate 위에 고분자와 금속을 접착할 때 사용되는 접착제 및 액상 PMMA 및 MMA를 이용하였다. 먼저 접착제를 Ni 기판에 0.01 μm로 도포하고, 그 위에 분자량 950 Kg/mol 의 액상 PMMA를 0.1 μm로 도포한 후 오븐에서 안정화시킨다. 이후 Goodfellow 사에서 제공되는 CQ grade 1 mm 두께의 PMMA 판재를 준비된 시편 위에 놓고 MMA를 그 사이에 주입하여 압착하면 PMMA와 Ni 기판의 접착이 완료된다. 이후 기계가공으로 PMMA의 두께를 150 μm로 조절하였다.

3.2 X-ray 마스크 제작

LIGA 공정에서 사용되는 x-ray 마스크는 x-ray 흡수체(absorber)와 x-ray 투과체(membrane)로 구성된다. X-ray 흡수체는 원하는 패턴의 모양을 PMMA에 전사할 때 마스크(shadow) 역할을 함으로 Pt, W, Ta 등 원자번호가 높은 금속이 사용되고 Au의 경우 도금특성과 안정성이 우수하여 주로 사용된다. 투과체는 그 반대로 PMMA의 사슬 절단을 유도하도록 x-ray 투과성이 좋은 Be, C, Si, Ti 등이 사용되고, 재료의 독성문제 및 관리 용이성을 위해 BN, Si₃N₄ 등이 이용되기도 한다.

본 실험에서는 Si₃N₄를 투과체로 사용하는 x-ray 마스크는 가로세로 50×42 μm² 구조물을, BN는 가로세로 100×100 μm² 구조물을 만드는데 사용하였다. Fig. 4는 Si₃N₄를 투과체로 쓰는 마스크의 제작 공정을 나타내고 있다.

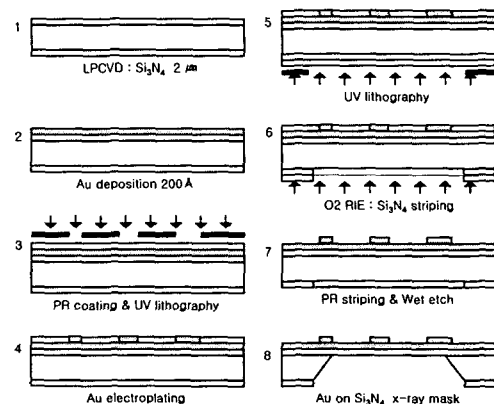


Fig. 4 Sequence of steps in the fabrication of Au-on-Si₃N₄ x-ray

먼저 Si 기판 위에 MOCVD 공정을 통해 기판 양면에 2 μm 두께의 Si_3N_4 막을 형성한다. Si 기판 한쪽 면에 Au를 0.02 μm 로 증착하고, PR을 도포한 후 일반적인 UV-lithography를 이용하여 패터닝 한다. 패터닝된 Si 웨이퍼에 Au를 8 μm 두께로 도금한다. Au가 증착되지 않은 면에 PR을 도포하고 앞서와 같이 UV-lithography를 통해 PR을 패터닝 한다. 이때 PR 패터닝은 앞서 도금한 Au 패터닝을 모두 포함하도록 하는데, Au-on- Si_3N_4 의 x-ray 마스크 제작을 위해 Au 패터닝의 하단 Si를 식각하기 위해서이다. Si 식각을 위해 O_2 RIE를 통해 노출된 Si_3N_4 막을 제거한다. Si 웨이퍼 양쪽에 남아있는 PR을 제거하면 한쪽 면은 Au 도금된 패터닝, 반대 면은 Si_3N_4 막이 일부 제거된 Si 웨이퍼를 얻는다. 이를 KOH로 실리콘을 식각시키면 Au-on- Si_3N_4 x-ray 마스크를 얻는다.

BN의 경우는 Si_3N_4 에 비하여 제작 공정이 용이하다. 330 μm 두께의 BN 기판 위에 Au를 0.02 μm 로 증착하고 PR을 도포한 후 일반적인 UV-lithography를 이용하여 PR을 패터닝하였다. 이후 패터닝된 PR에 Au를 8 μm 두께로 도금한 후 잔여 PR을 제거하면 x-ray 마스크가 완성된다.

3.3 X-ray 노광 및 현상

원하는 패터닝이 형성된 x-ray 마스크에 의해 노출된 감광막의 분자 사슬은 x-ray와의 상호작용으로 절단(scission)되어 낮은 분자량의 사슬로 변화되고, 현상액에 의해 녹게 된다. 수십 ~ 수천 μm 이상의 두꺼운 PMMA에 고른 x-ray 노광을 위해 필요한 x-ray 조사량(dose) D 의 계산은 식 (2)와 beam-line을 구성하는 물질의 x-ray 투과성을 고려한 다음의 식 (3)으로부터 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$D = t_{\text{exp}} I_{\text{syn}} \int_0^{\infty} P(y) \alpha(y)_{\text{res}} \times T(y)_{\text{res}} T(y)_{\text{abs}} T(y)_{\text{mask}} dy \quad (3)$$

여기서, t_{exp} 는 노광 시간, I_{syn} 은 가속기 전류, $\alpha(y)_{\text{res}}$ 는 감광막의 x-ray 흡수계수이고, $T(y)_{\text{res}}$, $T(y)_{\text{abs}}$, $T(y)_{\text{mask}}$ 은 각각 감광막, 흡수체, 마스크의 x-ray 투과율이다. 일반적으로 $T(h\nu) = \exp[-\alpha(h\nu)z]$ 이며, 여기서 $\alpha(h\nu)$ 는 x-ray 에너지에 따른 감쇠계수, z 는 물질의

두께이다.

LIGA 공정에서 널리 사용되는 PMMA에 대한 최소 조사량은 2 kJ/cm^3 이 요구되며, 현상 속도의 신속성과 좁은 영역의 패터닝이 부분적으로 현상되는 것을 방지하기 위해서는 감광막의 바닥면에 노광되는 x-ray 조사량이 4 kJ/cm^3 되도록 노광 시간을 조절한다. 이때 PMMA 표면의 조사량은 20 kJ/cm^3 이하가 되도록 해야 하는데, 이는 그 이상의 조사량은 PMMA에 crack과 bubble을 발생시킬 수 있으므로 주의해야 한다. 아울러 현상되지 않는 PMMA 영역은 100 J/cm^3 이하가 되도록 해야 한다.⁽¹⁾ 또한 가속기의 전류는 입사 후 그 세기가 서서히 줄어들음으로 노광시간 계산에 이를 고려하여야 한다.

포항가속기연구소의 DXRL beam-line에서 방사되는 x-ray는 beam-size가 $180 \times 15 \text{ mm}^2$ 임으로 면적이 넓은 PMMA 시편을 노광하기 위해서는 스캐너를 사용하여 아래 위로 움직이며 x-ray에 노광시켜야 한다. 이 또한 노광시간 계산에서 고려되어야 하는 변수이다.

X-ray에 노광된 PMMA는 60 Vol-%의 2-(2-butoxyethoxy)ethanol, 20 Vol-%의 morpholine, 5 Vol-%의 ethanolamine 그리고 15 Vol-%의 증류수로 구성되는 GG 현상액(invented by Ghica & Glashauser)을 사용하여 현상한다.⁽⁹⁾ MIBK(methyl-iso-butyl-ketone)도 가능하지만, 현상된 PMMA의 표면조도 및 접착력 저하 등의 이유로 자주 사용되지는 않는다.⁽¹⁰⁾

PMMA에 대한 현상율은 DXRL에 의해 구현된 PMMA 미세구조물의 정밀도 및 금속간의 접착력에 영향을 미침으로 현상 시간 계산을 통해 최적 현상시간을 확인해야 한다. PMMA의 현상율과 관계된 많은 선행 연구들이 보고되고 있으며, x-ray 표면조사량과 노광 면적과 관계가 깊은 것으로 판단되고 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 그 중 다음의 식(4)에 의한 현상율 계산이 주요하다.

$$R = \frac{aD^a}{1 + bD^a} \exp\left(\frac{-E_a}{R_a T}\right) \quad (4)$$

여기서 a , b , a 는 변수, D 는 x-ray 조사량, E_a 는 활성화에너지(activation energy), R_a 는 아보가드로수 그리고 T 는 온도이다.

3.4 Ni 도금 및 CMP 가공

PMMA가 현상된 구조물은 일반적인 Ni 도금 장비를 통하여 도금되는데, 일반적으로 사용되는 Ni sulfamate를 이용한다. Ni 도금에 대한 수율 (yield) η 는 패러데이 법칙에 의해 계산된 도금 양(m_{max})에 대한 실질적 도금양(m_{act})의 비로 구해지고 다음 식 (5)로 정리된다.⁽¹³⁾

$$\eta(\%) = \frac{m_{act}}{m_{max}} \times 100 = \frac{m_{zct}}{iAtM/zF} \times 100 \quad (5)$$

여기서 i 는 전류밀도, A 는 전극면적, t 는 도금 시간, M 은 Ni의 원자량, z 는 반응에 관여한 전자(=17.1), F 는 패러데이 상수이다.

도금 공정에 의해 현상된 빈공간이 Ni로 채워진 마스터 시료는 최종적으로 CMP 가공을 통해 구조물의 높이를 조절하고, 남은 PMMA는 THF 용액이나 클로로벤젠 등을 이용하여 제거하면 최종 Ni 마스터를 얻을 수 있다.

3.5 몰딩(moulding)

LIGA 공정에 의해 최종적으로 얻어지는 구조물은 제작된 금형을 마스터(master)로 이용하여 핫 엠보싱⁽³⁾ 또는 사출성형⁽⁷⁾ 등을 통해 최종 결과물을 얻을 수 있다. 핫 엠보싱 공정에 의한 고분자 미세구조물의 제작은 사출성형에 의한 것보다 간단한 공정에 의해 수행됨으로 최근 각광 받고 있다.

핫 엠보싱 장치는 Fig. 5와 같이 엠보싱 힘(force)을 제어하는 force frame과 고분자와 마스터의 온도를 성형온도로 가열하거나 de-embossing을 위해 냉각시키는 플레이트(plate)로 구성된다. 상단의 플레이트에 구조물이 성형된 마스터를 장착하고 하단의 플레이트에는 성형하고자 하는 고분자 시료와 이를 지지하기 위한 기판(substrate)이 놓인다. 핫 엠보싱에 의한 고분자 재료의 성형은 진공상태에서 고분자 재료를 유리전이온도, T_g , 보다 30 ~ 50 °C 이상으로 높여, 충분한 유동성을 확보한 다음, 상단 플레이트에 장치된 마스터를 일정 압력으로 고분자 재료를 누른(embossing) 후, 다시 유리전이온도 이하로 냉각하여 고분자를 굳힌 다음, 마스터를 떼어내는 de-embossing의 순서로 이루어진다. 이때 성형 공정 중 기판과

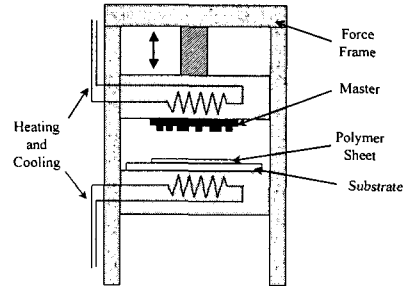


Fig. 5 Schematic diagram of hot embossing system

성형 마스터를 같은 온도로 유지시켜야 하며, embossing 중 유동성을 갖는 고분자가 충분히 마스터의 빈 공간에 충전되도록 공정조건을 조절하여야 한다. 본 실험에서의 핫 엠보싱 공정 온도를 고분자의 유리전이온도를 기준으로 50 °C 이상 되는 온도로 가열하여 엠보싱이 이루어지도록 하였고, 냉각온도를 95 °C로 유지시키면서 이형시켰다.

4. 결과 및 논의

DXRL의 PMMA 현상을 위해서 요구되는 최소 x-ray 조사량은 4 kJ/cm²이다. 그러나 PMMA 두께 증가에 따라 표면의 x-ray 조사량은 Fig 6과 같이 기하급수적으로 증가하고 이는 PMMA 표면 crack과 bubble을 발생시킨다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 PMMA 두께 증가에 관계없이 표면에 조사되는 x-ray 조사량을 조절할 필요가 있고, 그 방법으로는 polyimid, Be, 금속 등을 이용하여 x-ray 스펙트럼을 고에너지 스펙트럼 분포로 변화시켜 PMMA에 조사하는 방법이 있다. 즉, 300 mm 두께의 PMMA를 노광할 때는 고정된 3.0 Å의 x-ray 임계파장 λ_c 를 500 mm 두께의 PMMA 시료에는 1.3 Å으로 변화시키는 것이다.⁽¹⁾ Fig. 6에 20 μm 두께의 Al 필름으로 x-ray 스펙트럼을 변화시켜 노광할 때 PMMA 표면의 조사량 변화를 비교하였다.

Fig. 6에서와 같이 x-ray 스펙트럼 분포의 변화는 PMMA 표면 조사량은 감소시킬 수 있지만 그와 동반되는 단점도 증가시킨다. X-ray 노광 중 고에너지 광자는 금속에서 임의의 방향으로 방사되는 fluorescence radiation과 같은 이차방사를 발생시키는 확률을 증가시킨다. 이차방사는 임의의 방향성을 갖음으로 감광막 쪽으로 향할 수 있고,

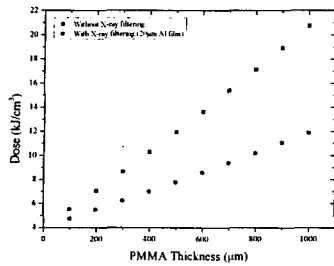


Fig. 6 X-ray top dose according to the thickness of PMMA ($D_{\text{Bottom}} = 4 \text{ kJ/cm}^2$)

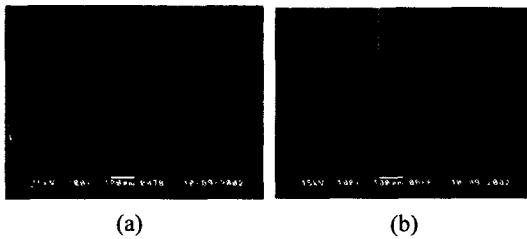
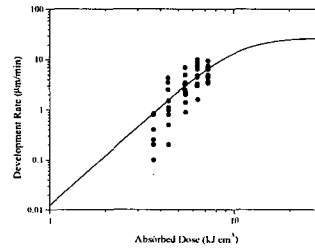


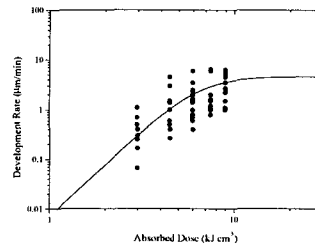
Fig. 7 Experimental results of PMMA development (a) $\lambda_c = 1.8 \text{ \AA}$, (b) $\lambda_c = 1.3 \text{ \AA}$

감광막과 금속막이 접촉된 영역에 x-ray를 노광시키는 효과를 발휘한다. 이러한 현상의 결과는 현상(development) 공정에서 감광막 하단부가 현상되고, 결국 Fig. 7과 같이 감광막이 금속막에서 떨어지거나 도금 후 불필요한 구조물이 생성되는 결과를 초래한다. 이차방사의 효과는 임계과장파 관계가 깊으며 일반적으로 λ^{-2} 에 비례하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾

PMMA에 조사되는 x-ray의 스펙트럼 변화는 PMMA의 표면 노광량과 PMMA-금속 간 접촉력에 영향을 주는 것 뿐만 아니라 노광된 PMMA의 현상율에도 상당한 영향을 미친다. Fig. 8은 x-ray 스펙트럼의 임계과장(λ_c)을 각각 1.8 Å과 1.3 Å으로 변화시켜 300 μm 두께의 PMMA를 노광한 시료의 실험적 현상율과 식 (4)를 통한 이론적 예측을 x-ray 조사량에 따라 나타낸 것이다. (a)는 임계과장이 1.8 Å, (b)는 1.3 Å인 경우이다. 두 경우 모두 표면조사량 증가에 따라 비례적인 현상율 증가를 나타내지만, (b)의 경우에는 6~7 kJ/cm²의 표면조사량에서는 현상율이 수렴하는 현상을 나타내는데 이는 C=C 결합에 의한 재조합(recombination) 현상으로 설명된다.⁽¹⁵⁾



(a)



(b)

Fig. 8 Experimental and theoretical results of PMMA development rate according to x-ray dose (a) $\lambda_c = 1.8 \text{ \AA}$, (b) $\lambda_c = 1.3 \text{ \AA}$

PMMA의 현상은 근본적으로 고분자의 chain scission에 의해 발생된다. 입사되는 광은 PMMA의 에스테르 기(ester group)과 상호작용하여 에스테르 기의 분리(abstraction)를 유발하고, main chain의 불안정화를 유도하여 main chain의 chain scission을 발생시킨다. 그러나 PMMA에 조사되는 광자에너지가 증가함에 따라 chain scission에 의해 발생된 end group의 밀도가 증가하게 되고 이들 그룹간의 C=C 결합에 의한 재조합 확률이 증가함에 따라 end group의 cross-linking을 유발하게 된다. 이는 chain scission의 밀도를 감소시켜 PMMA의 현상율을 저하시키는 원인이 되고, 두 현상이 평형을 이루는 조사량에서는 현상율이 수렴하게 된다. 식 (4)를 (a)의 경우에 적용한 결과 10 kJ/cm² 이상의 조사량에서 현상율이 수렴하는 것으로 유추되었다. 그리고 (a)와 (b) 모두 2 kJ/cm² 이하의 표면 노광량을 갖는 시료는 현상되지 않았다.

Fig. 9는 LIGA 공정을 통해 제작된 Ni 마스터의 SEM 사진을 보여주고 있다. (a)는 길이 60 mm, 가로세로 100×100 μm², 간격 250 μm인 12채널 직

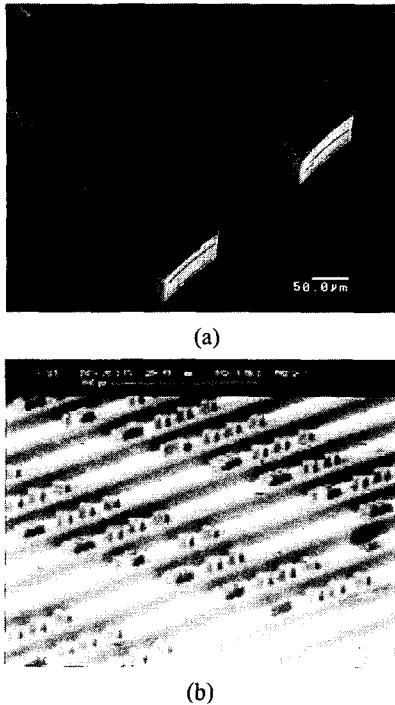


Fig. 9 Ni master fabricated by LIGA (a) 60 mm × 100 × 100 μm², (b) 38 mm × 50 × 42 μm²

선형 미세 구조물을, (b)는 길이 38 mm, 가로세로 50 × 42 μm², 간격 250 μm의 12 채널 직선형 미세 구조물이다. (a)의 경우 구조물의 크기는 높이가 99 ~ 100 μm, 너비가 98 ~ 101 μm 수준으로, (b)의 경우 높이가 42.0 ~ 42.5 μm, 너비는 50 μm 수준으로 ± 1 μm 이하 수준의 정밀도를 구현할 수 있었고, 표면조도(Ra)는 모두 8 ~ 15 nm, 측면조도(sidewall roughness)는 100 μm ~ 140 nm 수준이었다.

제작된 두 종류의 마스터를 이용하여 핫 엠보싱 기술에 의해 성형된 고분자 광도파로를 Fig. 10에 나타내었다. 미세구조물의 크기는 (a)의 경우 높이가 96 ~ 99 μm, 너비가 98 ~ 101 μm 수준이고, (b)의 경우에는 높이가 42.0 ~ 42.5 μm, 너비가 50 μm 수준으로 Ni 마스터의 광도파로 구조물 높이 보다 조금 낮게 성형되는데, 이는 고분자의 복원력에 의한 영향으로 판단된다. 표면조도는 13 ~ 23 nm 수준이며, 측면조도는 120 ~ 140 nm 수준으로 마스터의 표면조도 특성이 그대로 전사됨을 확인하였다.

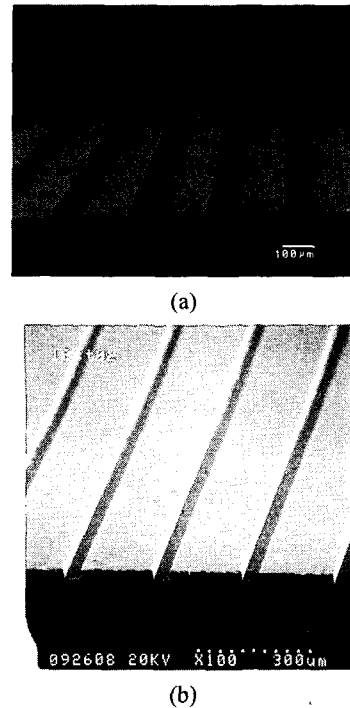


Fig. 10 Polymeric optical waveguide fabricated by hot embossing process

핫 엠보싱 공정은 열가소성 고분자를 유리전이 온도 이상으로 가열하여 유동성(flow)을 확보하고, 미세 패턴이 형성된 마스터로 압인(embossing)하는 것이 핵심 공정으로, h 의 높이로 충전되는 고분자의 유동현상은 고분자의 온도, 고분자에 가해지는 마스터의 압력, 그리고 마스터가 고분자에 압력을 가하는 시간 등에 상당한 영향을 받으며, 동시에 고분자의 유동 특성에 따라 미세 구조의 성형 완성도가 결정된다. 이들 변수들의 관계는 기존의 고분자 성형 방법으로 잘 알려진 압축성형과 유사한 관계를 갖고 있으며, 압축성형 시 고분자에 가해지는 힘과 고분자 성형높이의 관계는 다음의 식 (6)으로 표현된다.⁽¹⁶⁾

$$F_N = \frac{3\pi\eta}{8h^3} R^4 \left(-\frac{dh}{dt} \right) \quad (6)$$

여기서 F_N 은 고분자에 가해진 힘, h 는 고분자의 높이, R 은 반지름, dh/dt 는 고분자의 높이

변화이며, η 는 고분자의 점도(viscosity)이다. 위 식을 핫 엠보싱의 높이 변화의 식으로 변환하면, 고분자의 높이 변화 dh/dt 는 엠보싱 속도 v 로 치환할 수 있고, 면적 $A = \pi R^2$ 으로 놓으면 고분자에 가해진 유효 압력 $P_{eff} = F_N/A$ 가 된다. 이를 고분자의 높이로 정리하면,

$$h = \left(\frac{3\eta A v}{8\pi P_{eff}} \right)^{1/3} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 유효 압력 P_{eff} 는 성형하고자 하는 구조물의 형태와 치수에 따라 달라지기 때문에 핫 엠보싱 공정에서 고분자에 가해지는 엠보싱 압력에는 한계가 있으므로, 성형하고자 하는 구조물의 높이에 따라 금형의 빈 공간에 고분자가 충분히 충전되지 않거나, 충분한 깊이로 삽입되지 않아 불완전한 구조물이 성형될 수 있다. 따라서 제한된 엠보싱 압력 조건에서는 고분자의 점도를 낮추거나, 엠보싱 속도를 감소시키거나, 시뮬레이션을 통한 검증은 우선 수행한 후 실질적 공정에 적용하는 것이 효율적이다.

Fig. 11은 핫 엠보싱 공정을 통해 다중모드 고분자 광도파로 소자의 하부 클래드를 제작할 때 고려되는 핫 엠보싱 공정변수와 고분자 미세구조 성형의 결과를 이론적 배경을 통해 비교 분석하기 위하여 수행한 실험 결과를 재료와 관계없이

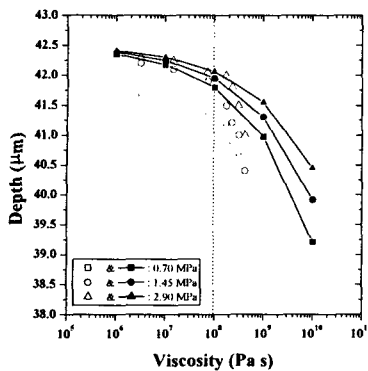


Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental results of hot embossing process

점도에 대하여 실험적 성형 깊이 변화와 이론적 예측을 함께 나타낸 것이다.⁽¹⁷⁾ 실험에 사용된 소재는 Asahi사의 poly(methyl methacrylate) (PMMA; garde 80NH)와 Ticona사의 cycloolefin-copolymer (COC; grade Topas-5013)이고, 사용된 Ni 마스터는 길이 38 mm, 가로세로 $50 \times 42 \mu\text{m}^2$, 간격 250 μm 미세구조가 형성된 마스터이다.

비교적 높은 점도에서는 엠보싱 압력 증가에 따라 성형되는 도파로의 깊이는 증가하지만, 불완전한 성형이 이루어짐을 예측할 수 있다. 반대로, 점도가 낮은 경우에는 고분자에 가해지는 압력이 앞서의 경우에 비해 상대적으로 낮은 경우에도 충분한 도파로 성형이 이루어짐을 예측할 수 있다. 이는 핫 엠보싱에 의한 고분자 미세구조 성형에서 엠보싱 압력보다는 고분자의 점도가 매우 중요한 변수로 작용함을 의미한다.

특정 점도 이하에서는 제작된 고분자 광도파로의 손실 특성을 고려한 성형 정밀도의 공차 치수 0.5 μm 이내를 만족하지만, 그 이상의 점도에서는 불충분한 고분자 도파로 성형이 이루어짐을 알 수 있다. 실선으로 나타낸 이론적 예측 값과 비교하면 동일한 성형 패턴을 나타내고 있어 이론적 예측과 실험적 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 점도가 높은 경우에는 실험적 성형치수가 이론적 예측과 비교할 때 다소 상이한 결과를 나타내는데, 이는 고분자 재료의 점도 측정이 높은 점도에서는 곤란하기 때문에 낮은 점도를 실험적으로 측정하여 이론적 유추를 통해 구함으로써 발생하는 오차 때문인 것으로 판단된다.

이론적 예측과 실험적 결과들의 비교·분석을 통해 수십 μm 크기의 고분자 도파로 성형을 위해서는 점도는 $10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 이하, 이때 엠보싱 압력은 2.9 MPa 이상으로 공정조건을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결 론

DXRL beam-line을 이용한 LIGA 공정을 수행하였으며, x-ray 방사 특성 분석과 변화를 통하여 DXRL 공정에 적합한 최적 노광 조건을 선정함으로써 DXRL의 다양한 응용 가능성을 확인하였다. PMMA sheet를 이용한 DXRL 공정과 도금 공정을 통해 길이 60 mm, 가로세로 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, 간격 250 μm 의 12채널 직선형 광도파로 성형용

Ni 마스터와 길이 38 mm, 가로세로 $50 \times 42 \mu\text{m}^2$, 간격 $250 \mu\text{m}$ 의 12 채널 직선형 광도파로 성형용 Ni 마스터를 성공적으로 제작하고, 핫 엠보싱 기술에 적용하여 다중모드 고분자 광도파로 구조를 제작함으로써 LIGA 공정의 시작 단계인 DXRL 공정과 최종 단계인 몰딩(moulding)에 이르는 전반적인 LIGA의 최적 공정 조건 설정 및 기초 기술 연구를 완성하였다.

제작된 Ni 마스터 및 핫 엠보싱에 의한 고분자 구조물은 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 정밀도 구현이 가능하였으며, 광배선모듈 및 광 백플레인용 다중모드 고분자 광도파로 성형과 같은 고분자 미세구조물의 대량 생산에 LIGA 공정이 유효함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업(과제번호 2000-N-NL-01-C-272)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

포항방사광가속기에서의 실험은 과학기술부와 포항제철의 지원을 받았음.

참고문헌

- (1) Ehrfeld, W. and Lehr, H., 1995, "Deep X-ray Lithography for the Production of Three-Dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics," *Radiat. Phys. Chem.* Vol. 45, pp. 349~365.
- (2) Bustillo, J. M., Howe, R. T., and Muller, R. S., 1998, "Surface Micromachining for Micro-Electromechanical Systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, pp. 1552~1574.
- (3) Becker, H. and Heim, U., 1995, "Hot Embossing as a Method for the Fabrication of Polymer High Aspect Ratio Structure," *Sensors and Actuators*, Vol. 83, pp. 130~135.
- (4) Schröder, H., Bauer, J., Ebling, F., and Scheel, W., 2001, "Polymer Optical Interconnects for PCB," *First International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*, pp. 337~343.
- (5) Bauer, H. D., Ehrfeld, W., Harder, M., Paatzsch, T., Popp, M., and Smaglinski, I., 2000, "Polymer Waveguide Devices with Passive Pigtailling: an Application of LIGA Technology," *Synthetic Metals*, Vol. 115, pp. 13~20.
- (6) Margaritondo, G., 1998, *Introduction to Synchrotron Radiation*, Oxford.
- (7) Ruprecht, R., Bacher, W., Hausselt, H. J., and Piotter, V., 1995, "Injection Molding of LIGA and LIGA-Similar Microstructures using filled and unfilled Thermoplastics," *Micromachining and Microfabrication Process Technology (Proceeding of the SPIE)*, Austin, TX, pp. 146~157.
- (8) Mohr, J., Ehrfeld, W., Munchmeyer, D., and Stutz, A., 1989, "Resist Technology for Deep-Etch Synchrotron Radiation Lithography," *Makromol. Chem. Macromol. Symp.*, Vol. 24, pp. 231~251.
- (9) Guckel, H., Christenson, T. R., and Skrobis, K., 1993, "Formation of Microstructures using a Preformed Photoresist Sheet," *US Patent 5,378,583*.
- (10) Pantenburg, F. J., Achenbach, S., and Mohr, J., 1998, "Characterisation of Defects in Very High Deep-Etch X-ray Lithography Microstructures," *Microsystem Technologies*, Vol. 4, pp. 89~93.
- (11) Meyer, P., El-Kholi, A., and Schulz, J., 2002, "Investigations of the Development Rate of Irradiated PMMA Microstructures in Deep X-ray Lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 63, pp. 319~328.
- (12) Tan, M. X., Bankert, M. A., Griffiths, S. K., Ting, A., Boehme, D. R., Wilson, S., and Balsler, L. M., 1998, "PMMA Development Studies using Various Synchrotron Sources and Exposure Conditions," *SPIE* Vol. 3512, pp. 262~270.
- (13) Madou, M. J., 1997, *Fundamentals of Microfabrication*, Chap. 6., Boca Taton, FL, CRC Press.
- (14) El-Kholi, A., Bade, K., Mohr, J., Pantenburg, F. J., and Tang, X. M., 2000, "Alternative Resist Adhesion and Electroplating Layer for LIGA Process," *Microsystem Technologies*, Vol. 6, pp. 161~164.
- (15) Lehouckey, E. M., Reid, I., and Hill, I., 1988, "The Radiation Chemistry of Poly-(methylmethacrylate) Polymer Resists," *J. Vac. Sci.*

- Technol. A*, Vol. 6, pp. 2221~2225.
- (16) Progelhof, R. C. and Throne, J. L., 1993, *Polymer Engineering Principles*, pp. 471, Hanser, Munich.
- (17) Kim, J. T., Kim, B. C., Yoon, K. B., Jeong, M. Y., and Jung, S. W., 2002, "Fabrication of Polymer Micro Structures by Hot Embossing," *J. Korean Industrial and Engineering chemistry*, Vol. 13, pp. 832~835.