

◆특집◆ 플라스틱 나노/마이크로 구조의 성형기술과 응용

방사광 LIGA 공정을 이용한 플라스틱 성형용 마이크로 금형 제작

이봉기*.#, 김종현**

* 전남대학교 기계공학부, ** 포항공과대학교 포항가속기연구소

Manufacturing of Micromolds for Plastic Molding Technologies via Synchrotron LIGA Process

Bong-Kee Lee*.#, Jong-Hyun Kim**

* School of Mechanical Engineering, Chonnam National University

** Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology

(Received 4 August 2015; accepted 5 August 2015)

ABSTRACT

In the present study, copper micromolds with a microhole array were precisely manufactured by a synchrotron LIGA process. Like in the traditional LIGA process, a deep X-ray lithography based on a synchrotron radiation was employed as the first manufacturing step. Due to the excellent optical performance of the synchrotron X-ray used, cylindrical micropillar arrays with high aspect ratio could be efficiently obtained. The fabricated microfeatures were then used as a master of the subsequent copper electroforming process, thereby resulting in copper micromolds with a microhole array. Thermoplastic hot embossing experiments with the copper micromolds were carried out for imprinting cylindrical microfeatures onto a polystyrene sheet. Through the hot embossing, the effect of embossing temperature and usefulness of the present manufacturing method could be verified.

Key Words : LIGA Process(LIGA 공정), Micromold(마이크로 금형), Synchrotron Radiation(방사광), Electroforming(전주도금), Hot Embossing(핫 엠보싱)

1. 서 론

플라스틱 마이크로, 나노 및 마이크로/나노 다중스케일 정밀 구조의 대량생산 기술은 현재 다양한 분야에 적용이 되고 있다. 초소형 기계 부품, 정밀 광학 구조, 진단용 미세유체 시스템, 기능성

표면 등 마이크로/나노 구조를 도입하고 이를 효과적으로 활용한 여러 응용 제품군이 활발하게 개발되고 있다^[1]. 특히 다양한 플라스틱 재료를 도입한 생산제조 기술의 개발로 높은 생산성과 가격 경쟁력뿐만 아니라 다양한 물리/화학적 특성의 선택 및 표면 개질의 용이성 등과 같은 장점을 가

Corresponding Author : b.lee@chonnam.ac.kr

Tel: +82-62-530-1685, Fax: +82-62-530-1689

지게 되었다.

플라스틱 마이크로/나노 정밀 구조의 대량생산에는 미세사출성형(microinjection molding), 핫 엠보싱(hot embossing), 초소형 열성형(microthermoforming) 등의 공정들이 주로 적용되고 있다^[1-4]. 또한 전통적인 플라스틱 성형기술들의 직접적인 적용뿐만이 아니라 마이크로/나노 구조의 성형성 및 생산성 향상에 유리한 새로운 생산기술들의 개발도 활발하게 진행되고 있다^[5-6].

하지만 안정적인 플라스틱 마이크로/나노 구조의 성형을 위해서는 금형(mold) 혹은 금형 인서트(mold insert)의 정밀한 제작이 필수적으로 요구된다. 최종적으로 성형하고자 하는 마이크로/나노 구조의 반대 형상을 가지는 금형의 제작에는 정밀 기계가공이 활용될 수 있다^[7]. 또는 다양한 광학 리소그래피(optical lithography) 기술을 이용한 마스터(master)의 제작과 금속 전주도금(electroforming)을 결합한 마이크로/나노 금형의 제작이 이루어지고 있다. 이 중, 방사광가속기의 고에너지 X-선을 이용한 마스터 제작과 금속 전주도금, 그리고 플라스틱 대량성형 공정 등의 일련의 공정들로 구성되는 LIGA 공정은 마스터 제작을 위한 리소그래피 공정에 적용되는 X-선의 뛰어난 특성을 바탕으로 표면 조도(surface roughness)가 뛰어난 고종횡비(high aspect ratio)의 마이크로 구조의 제작이 용이하다는 장점을 가진다^[8]. 이와 같은 방사광 LIGA 공정의 장점을 활용하여 다양한 형상의 마이크로 금형의 제작 및 성형기술 개발에 연구가 진행되어 오고 있다^[9-11].

본 연구에서는 방사광 LIGA 공정을 이용하여 고종횡비 마이크로 구조를 포함하는 금형을 제작하고 이를 핫 엠보싱 공정에 적용하였다. 금형의 전주도금 공정에 일반적으로 사용되는 니켈(nickel) 혹은 니켈 합금이 아니라 구리(copper) 전주도금 공정을 진행하여 안정적으로 구리 마이크로 금형을 제작하였다. 또한 제작된 마이크로 금형을 미세사출성형 등에 비하여 보다 낮은 압력이 요구되는 핫 엠보싱 공정에 적용하여 성형성을 확인함으로써 본 연구의 마이크로 금형 제작 공정의 활용 가능성을 검증하고자 하였다.

Table 1 Representative dimensions for microhole arrays in the present micromolds

Type	Diameter (μm)	Pitch (μm)	Total area (mm ²)
i	50	200	10×10
ii	75	200	10×10
iii	100	200	10×10
iv	150	200	10×10

2. 마이크로 금형 설계

본 연구에서 제작하고자 하는 구리 마이크로 금형은 원형 마이크로 홀 배열을 가지도록 설계되었다. 총 네 종류의 다른 형태를 가지는 마이크로 홀 배열을 설계하였으며, 세부적인 주요 치수들은 Table 1과 같다. 즉, 지름이 50, 75, 100, 150μm인 마이크로 홀들이 중심 간의 거리가 200μm가 되는 배열을 이루고 있도록 설계를 하였다.

이와 같은 마이크로 홀 배열은 25mm×25mm의 마이크로 금형의 가운데 위치하도록 하였으며, 마이크로 금형의 두께는 1mm로 설계를 하였다. 따라서 네 종류의 마이크로 금형들은 종횡비가 최대 20, 최소 약 6.67이 되는 마이크로 홀을 포함하게 된다.

3. 제작 공정

3.1 X-선 마스크 제작

본 연구에서 제작하고자 하는 마이크로 금형은 고종횡비의 마이크로 홀을 포함하고 있다. 또한 플라스틱 성형 공정 중 성형품의 원활한 이형(demolding)을 위하여 마이크로 홀은 낮은 표면 조도를 가지도록 제작이 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 방사광 X-선을 이용한 X-선 리소그래피 공정으로 고종횡비의 마이크로 기둥(pillar) 배열을 제작하고, 이 마이크로 기둥을 마스터로 이용한 전주도금 공정을 진행하여 최종적으로 마이크로 홀을 가지는 금형 구조를 제작하였다.

X-선 리소그래피 공정을 위하여, 조사되는 방사광 X-선을 선택적으로 흡수할 수 있는 X-선 마스크가 요구된다. 본 연구에서는 X-선의 투과 특성

이 뛰어난 PI(polyimide) 필름을 X-선 마스크의 기관으로 사용하고, X-선 흡수제(absorber)로는 금(Au) 패턴을 이용하였다.

안정적인 X-선 마스크 제작 공정을 위하여 PI 필름을 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에 부착한 후, 전도층(conductive layer)으로 이용될 크롬(Cr)과 금을 각각 20nm, 100nm 두께로 전자빔 증착(E-beam evaporation)하였다. 이후 SU-8 3010(MicroChem) 감광재(photoresist)를 이용한 UV-포토리소그래피(UV-photolithography)를 통하여 두께가 약 20 μ m의 마이크로 홀 패턴을 제작하였다. 이와 같이 형성된 마이크로 홀의 내부는 드러난 전도층을 이용한 전기도금(electroplating) 공정으로 X-선 흡수재인 금(두께 14 μ m)으로 채워지게 되며, 최종적으로 PI 필름을 실리콘 웨이퍼에서 분리함으로써 PI 기관 상에 금 패턴이 형성된 X-선 마스크를 제작하였다.

3.2 X-선 리소그래피

제작된 X-선 마스크를 이용한 X-선 리소그래피 공정은 포항방사광가속기의 9D 빔라인(beamline)을 이용하여 진행되었다. X-선 리소그래피 공정의 감광재로는 PMMA(polymethylmethacrylate)가 이용되었다. 두께 1.1mm의 PMMA 판을 용매 접착법(solvent bonding)으로 흑연(graphite) 기관에 부착한 후, X-선 마스크와 함께 지그에 고정하여 Fig. 1과 같이 스캐너에 장착하였다. 수직 방향으로 스캐너를 왕복 운동시킴으로써 전체 면적에 X-선이 조사될 수 있었으며, PMMA 감광재의 바닥면에 총 4kJ/cm³의 X-선이 조사될 때까지 X-선 노광을 실

시하였다.

X-선이 충분히 조사된 PMMA는 분자량이 감소하게 되며, 노광 후의 현상(development) 과정을 통하여 제거되었다. 이를 통하여 X-선 마스크 상의 금 패턴 아래에 위치한 PMMA 구조만 남게 되며, 이를 통하여 고종횡비의 PMMA 마이크로 기둥을 제작하였다.

3.3 구리 전주도금

X-선 리소그래피 공정으로 제작된 PMMA 마이크로 기둥을 마스터로 이용한 전주도금 공정을 진행하여 마이크로 홀 배열을 가지는 마이크로 금형을 제작하였다. 일반적으로 기계적 특성이 뛰어난 니켈 혹은 니켈 합금 등이 전주도금의 재료로 이용되나, 도금 층의 두께가 큰 경우 안정적인 도금이 다소 어려우며 잔류응력이 크게 발생한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 구리를 이용한 전주도금 공정을 진행함으로써 보다 정밀한 마이크로 금형을 제작하였다.

현상 후 드러난 흑연 기관의 표면을 전도층으로 사용하여 구리 전주도금이 진행되었다. 전주도금의 초기에는 2mA/cm²의 전류 밀도(current density)를 유지함으로써 안정화 과정을 진행하였으며, 최종적으로 10mA/cm²의 전류 밀도를 가해 주면서 도금된 구리의 두께가 1.1mm 이상이 될 때까지 전주도금을 진행하였다. 전주도금이 완료된 후, 도금된 뒷면의 평탄화 작업과 흑연 기관에서의 분리 및 아랫면의 평탄화를 진행하였다. 최종적으로 아세톤으로 구리 구조에 남아 있는 PMMA를 제거하고 세척 과정을 진행하여 구리 마이크로 금형을 제작하였다.

3.4 핫 엠보싱

제작된 구리 마이크로 금형의 플라스틱 성형 공정 적용 가능성을 확인하기 위하여, 핫 엠보싱 실험

Table 2 Processing conditions used in the present hot embossing experiments

Parameter	Processing condition
Pressure (MPa)	0.5
Temperature (°C)	115, 135
Embossing time (min.)	5

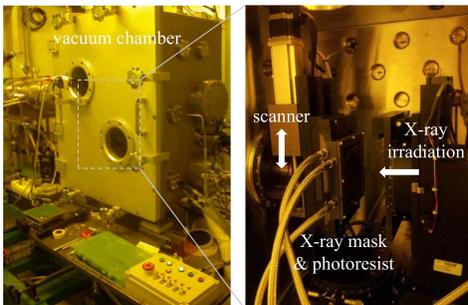


Fig. 1 Photograph of the X-ray exposure setup at 9D XNMM beamline

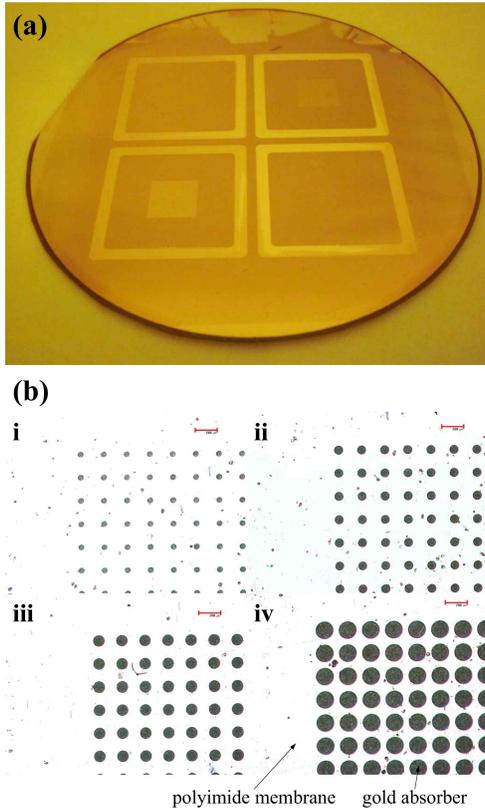


Fig. 2 Fabricated X-ray mask: (a) photograph and (b) microscopic view of four structures

험을 수행하였다. 플라스틱 소재는 두께 1.0mm의 PS(polystyrene) 판을 이용하였으며, 주요 공정변수들은 Table 2와 같다. 일반적인 미세사출성형 공정에서 마이크로 금형에 가해지는 압력에 비하여 낮은 0.5MPa의 엠보싱 압력을 설정하여 마이크로 금형의 변형을 최소화하였다. 또한 성형에 이용된 PS의 유리 전이온도(glass transition temperature)가 약 100°C이므로, 엠보싱 온도는 115°C 및 135°C로 설정하여 온도에 따른 성형성의 차이를 확인하였다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서 제작된 X-선 리소그래피 용 X-선

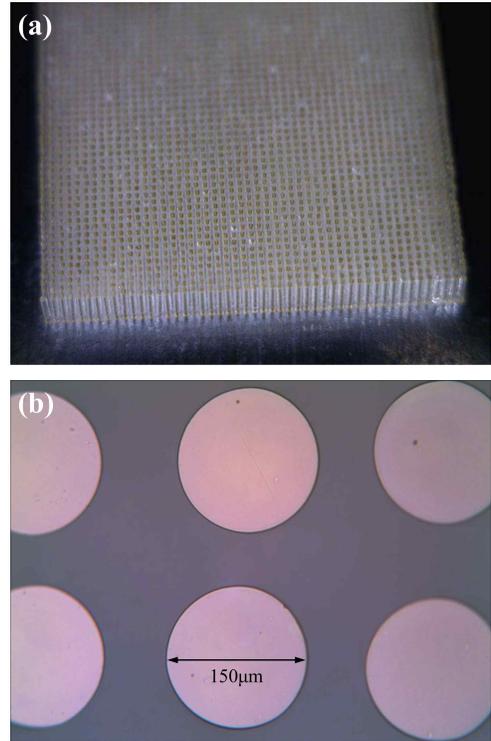


Fig. 3 PMMA micropillar array (150 μ m diameter) fabricated by the deep X-ray lithography process: (a) tilted microscopic view and (b) magnified view

마스크는 Fig. 2와 같다. 4인치 웨이퍼 크기의 PI 필름 기판에 Fig. 2(b)와 같이 금 패턴이 형성되어 있다. 우수한 기계적 특성과 함께 유연성을 가지는 PI 필름을 기반으로 X-선 마스크를 제작하였기 때문에, X-선 리소그래피 공정 중 X-선 마스크와 PMMA 감광재 사이의 정확한 접촉이 가능하다는 장점을 가진다. Fig. 2(b)의 i~iv에서 설명한 네 종류의 원형 마이크로 구조(지름 50 μ m, 75 μ m, 100 μ m, 150 μ m)들에 대한 금 패턴을 나타내고 있다.

이와 같은 X-선 마스크를 이용한 X-선 리소그래피 공정을 통하여 Fig. 3과 같은 고종횡비의 마이크로 기둥 배열을 제작할 수 있었다. 지름 150 μ m인 PMMA 마이크로 기둥 배열의 전체적인 형태를 보여주는 Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 마이

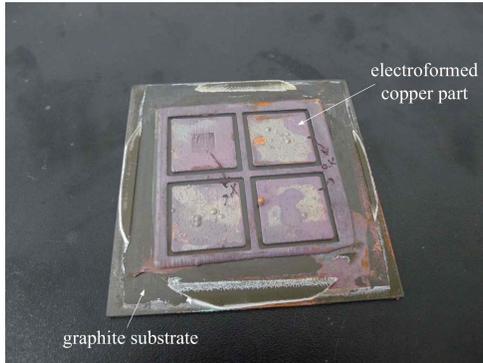


Fig. 4 Photograph of the electroformed copper structure based on the PMMA master

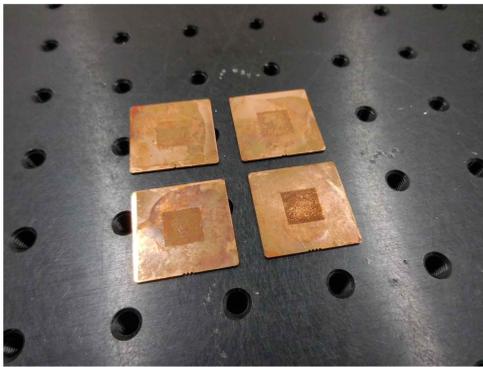


Fig. 5 Photograph of the copper micromolds with microholes

크로 기둥들을 전체적으로 균일하게 제작할 수 있었다. Fig. 3(b)는 제작된 마이크로 기둥 배열을 확대한 모습으로 제작된 마이크로 기둥들이 매끈한 측면을 가지고 있음을 알 수 있다.

흑연 기관에 제작된 PMMA 마이크로 기둥 배열들을 구리 전주도금의 마스터로 이용하여 구리 마이크로 금형들을 제작하였다. Fig. 4는 구리 전주도금으로 제작된 마이크로 금형 구조를 보여 주고 있다. X-선 리소그래피 공정에 이용된 PMMA 감광제의 두께가 1.1mm이며 구리 전주도금은 1.1mm 이상의 두께까지 진행되었기 때문에, 표면에 드러난 도금된 구리의 윗부분은 거친 면을 가진다. 래핑(lapping) 및 폴리싱(polishing)의 평탄화 과정을 통하여 도금된 윗면과 흑연 기관에 부착되었던 거친 아랫면을 가공하여 최종 마이크로 금형

의 매끈한 양면을 가지도록 하였다. 동시에 이와 같은 평탄화를 통하여 마이크로 금형들이 두께가 1.0mm가 되도록 하였다. 세척을 통하여 PMMA 잔류물을 제거함으로써 최종적으로 제작된 구리 마이크로 금형들은 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 설계된 바와 같이 네 종류의 다른 지름의 마이크로 홀 배열을 가지는 마이크로 금형들을 성공적으로 제작할 수 있었다.

제작된 마이크로 금형들의 플라스틱 성형공정으로서의 적용 가능성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 핫 엠보싱 실험을 진행하였다. 마이크로/나노 구조의 성형에 적용될 수 있는 핫 엠보싱 공정에서는 엠보싱 압력, 온도, 그리고 시간이 중요한 공정 변수로 고려되고 있다. 제작된 마이크로 금형의 소재가 구리이기 때문에, 본 연구에서는 비교적 낮은 엠보싱 압력(0.5MPa)을 적용하여 성형 공정 중 마이크로 금형의 변형이나 파손을 방지하고자 하였다. 일반적인 비정질 열가소성 플라스틱(amorphous thermoplastic) 재료의 경우, 유리 전이 온도 보다 온도가 높아지면서 점도(viscosity)가 급격하게 감소하기 때문에, 성형 온도에 따른 성형성의 차이가 크게 나타나게 된다. 따라서 이와 같은 성형 온도에 따른 성형성의 차이를 확인하기 위하여 핫 엠보싱 실험에서는 일반적인 PS의 유리 전이온도보다 15°C 및 35°C가 높은 엠보싱 온도를 적용하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 6은 상대적으로 낮은 온도(115°C)에서 진행된 핫 엠보싱 실험의 결과를 보여 주고 있다. 네 종류의 마이크로 금형 중, 지름이 100 μ m와 150 μ m의 마이크로 홀 배열을 가지는 금형에 대한 결과를 Fig. 6(a)와 6(b)에 나타 내었다. 이 결과에서 확인할 수 있듯이 115°C의 엠보싱 온도에서는 두 경우 모두 금형의 마이크로 홀 배열로의 PS의 충분한 충전(filling)이 이루어지지 않았다. 즉, 상대적으로 높은 PS의 점도로 인하여 높이가 매우 낮은 마이크로 기둥들이 성형되었다. 하지만 동일한 엠보싱 온도를 적용하더라도 압력 혹은 시간을 증가시킨다면 보다 향상된 성형성을 기대할 수 있을 것이다.

이와는 달리 135°C의 온도에서 진행된 핫 엠보싱 실험을 통하여 Fig. 7과 같이 향상된 성형 결

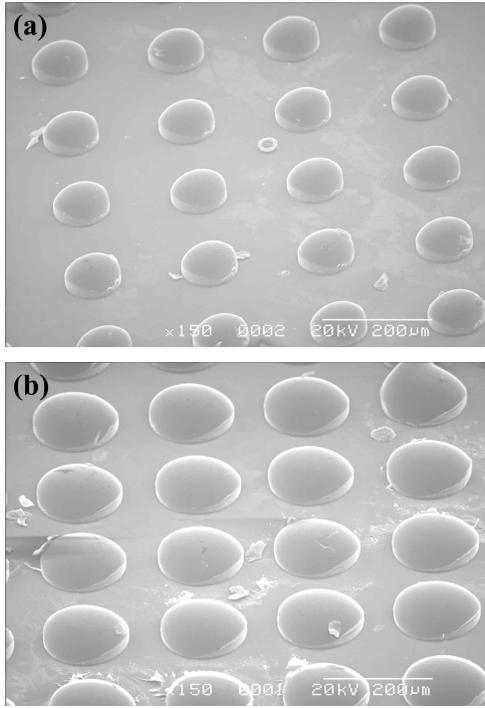


Fig. 6 SEM images of the hot embossed microstructures under a temperature of 115°C: (a) diameter of 100 μ m and (b) diameter of 150 μ m

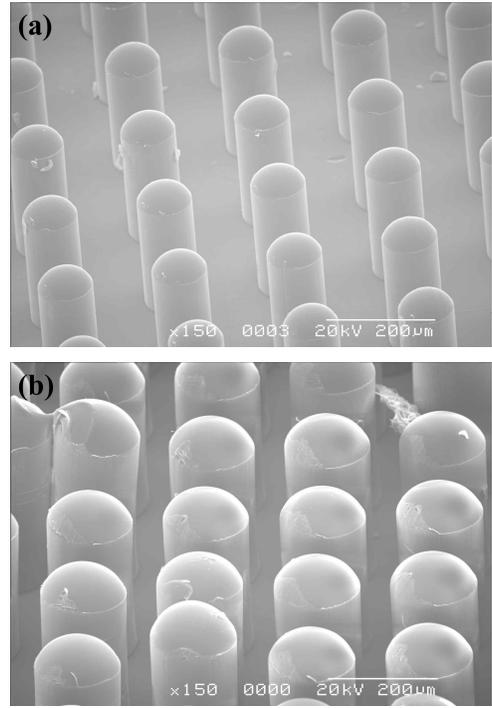


Fig. 7 SEM images of the hot embossed microstructures under a temperature of 135°C: (a) diameter of 100 μ m and (b) diameter of 150 μ m

과를 얻을 수 있었다. 낮은 온도에서 진행된 Fig. 6의 결과에 비하여 성형된 마이크로 기둥들의 높이가 매우 증가된 것을 확인할 수 있다. 이는 유리 전이온도 이상의 온도에서는, 온도가 증가함에 따라 플라스틱 재료의 점도가 급격하게 감소하는 현상에 따른 결과이다. 또한 마이크로 기둥들의 측면이 매우 뛰어난 표면 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 마이크로 금형의 제작에 이용된 X-선 리소그래피 공정의 장점을 반영하고 있는 결과로 볼 수 있다. 하지만 적용된 공정조건에서는 완전한 충전이 이루어지지 않았기 때문에 마이크로 기둥의 윗면이 곡면을 보이고 있다.

이와 같은 미충전 현상은 보다 높은 엠보싱 압력과 온도 등을 적용함으로써 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 충전 길이가 증가될수록

이형 단계에서의 금형 벽면과 플라스틱 성형품 사이의 마찰력 증가와 이에 따른 파손 등이 나타날 수 있기 때문에, 향후 보다 정교한 공정변수의 최적화가 진행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 방사광 LIGA 공정을 이용한 구리 마이크로 금형을 제작하고 핫 엠보싱 공정에 적용함으로써 제작된 금형의 활용 가능성을 검증하였다. X-선 LIGA 공정의 장점을 활용하여 고종횡비의 마이크로 홀 배열을 가지는 마이크로 금형을 용이하게 제작할 수 있었으며, 이를 적용한 핫 엠보싱 실험으로 플라스틱 마이크로 기둥 배열을 성형할 수 있었다.

마이크로 금형의 제작에 적용된 X-선 리소그래

피 공정으로 측면의 표면 특성이 뛰어난 마이크로 구조물의 제작이 가능하였으며, 최종적으로 성형된 플라스틱 마이크로 기둥 구조 역시 이와 같은 특성을 반영하고 있었다. 또한 전주도금 공정에서의 안정성 향상을 위하여 이용된 구리는 비교적 낮은 압력에서 진행되는 핫 엠보싱 공정의 금형 소재로 활용이 가능함을 확인할 수 있었다.

이와 같은 방사광 LIGA 공정의 장점을 활용할 수 있는 마이크로 금형 제작 공정은 향후 다양한 플라스틱 마이크로/나노 성형기술의 핵심 요소로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 고종횡비의 마이크로 구조물을 포함하는 플라스틱 기능성 표면 혹은 뛰어난 표면 조도를 활용한 정밀 광학 부품의 성형 등에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

“ 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A1008487).”

REFERENCES

1. Hecke, M. and Schomburg, W. K., “Review on Micro Molding of Thermoplastic Polymers,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 3, pp. R1-R14, 2004.
2. Giboz, J., Copponex, T. and Mélé, P., “Microinjection Molding of Thermoplastic Polymers: A Review,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 6, pp. R96-R109, 2007.
3. Hecke, M., Bacher, W. and Müller, K. D., “Hot Embossing - The Molding Technique for Plastic Microstructures,” *Microsystem Technologies*, Vol. 4, No. 3, pp. 122-124, 1998.
4. Truckenmüller, R., Rummeler, Z., Schaller, Th. and Schomburg, W. K., “Low-cost Thermoforming of Micro Fluidic Analysis Chips,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 375-379, 2002.
5. Lim, H. J., Lee, J. J., Choi, K. B., Kim, G. H., and Lee, S. H., “Technology for Roll-based Nanoimprint Lithography Systems,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 5, pp. 1-8, 2013.
6. Lee, H. J. and Park, K., “Development of Composite Micro-patterns on Polymer Film Using Repetitive Ultrasonic Imprinting,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 341-345, 2014.
7. Lee, J. R., Jeon, E. C., Je, T. J., Woo, S. W., Choi, D. S., Yoo, Y. E. and Kim, H., “Fabrication and Analysis of Optical Micro-pyramid Array-patterns,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 7-12, 2014.
8. Becker, E. W., Ehrfeld, W., Haggmann, P., Manner, A. and Münchmeyer, D., “Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoformung, and Plastic Moulding(LIGA Process),” *Microelectronic Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-56, 1986.
9. Lee, B. K., Kim, D. S. and Kwon, T. H., “Replication of Microlens Arrays by Injection Molding,” *Microsystem Technologies*, Vol. 10, No. 6-7, pp. 531-535, 2004.
10. Lee, B. K., “Microinjection Molding of Plastic Microfluidic Chips Including Circular Microchannels,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 54, No. 1, pp. 42-50, 2014.
11. Lee, B. K. and Kwon, T. H., “Replication of Multi-level Microstructures by Microinjection Molding Using Modularized and Sectioned Micromold System,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 34, No. 7, pp. 859-866, 2010.