

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.859

모듈화된 초소형 몰드 시스템(MSMS)을 이용한 다단 마이크로 구조물의 초소형 사출성형 공정[§]

이 봉 기* · 권 태 헌*,**†

* 포항공과대학교 기계공학과, ** 포항공과대학교 융합생명공학부

Replication of Multi-level Microstructures by Microinjection Molding Using Modularized and Sectioned Micromold System

Bong-Kee Lee* and Tai Hun Kwon*,**†

* Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH),

** Department of Integrative Biosciences and Biotechnology, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

(Received January 5, 2010 ; Revised May 6, 2010 ; Accepted May 10, 2010)

Key Words : Micromold System(초소형 몰드 시스템), Microinjection Molding(초소형 사출성형), Modularization(모듈화), LIGA Process(리가 공정), Multi-Level Microstructures(다단 마이크로 구조물)

초록: 본 연구에서는 다단 마이크로 구조물의 대량성형을 위하여, 모듈화된 초소형몰드 시스템(MSMS)을 이용한 초소형 사출성형 공정을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 초소형몰드 시스템은 여러 모듈들로 구성되어 있으며, 각 모듈들은 다양한 단면 마이크로 구조물을 가지고 있다. 초소형몰드 시스템의 모듈들은 X-선 리소그래피 공정 및 니켈 전주도금 공정으로 제작되었으며, 다양한 모듈들을 조합 및 결합함으로써 복잡한 형상을 가지는 초소형몰드 시스템을 효과적으로 구현할 수 있다. 이와 같은 초소형몰드 시스템을 적용함으로써, 본 연구에서는 다단 구조물의 표면에 마이크로 삼각 프리즘이 주기적으로 배열되어 있는 다단 마이크로 구조물의 초소형 사출성형 공정을 성공적으로 수행하였다.

Abstract: In this study, microinjection molding process using the newly developed micromold system, namely modularized and sectioned micromold system (MSMS), has been carried out for a replication of multi-level microstructures. The present MSMS consisted of several micromold modules, each having cross-sectional microstructures on the top surface. The micromold modules were precisely fabricated by deep X-ray lithography and subsequent nickel electroforming. By assembling the micromold modules, an MSMS having multi-level microstructures, which could be used as a mold system in micromolding processes, was obtained. In this manner, polymeric multi-level microstructures, such as the triangular prism microstructures on a stepped surface, were successfully replicated by the microinjection molding process.

- 기호설명 -

H : 다단 마이크로 구조물 표면의 상대적인 높이 차이

w : 다단 마이크로 구조물의 마이크로 삼각 프리즘 사이의 간격

d : 다단 마이크로 구조물의 마이크로 삼각 프리즘의 밑변 길이의 절반

h : 다단 마이크로 구조물의 마이크로 삼각 프리즘의 높이

1. 서론

다중스케일(multi-scale) 혹은 다단(multi-level) 마이크로 구조물들은 형상의 복잡성 및 높은 집적도 등의 특징을 가지고 있어 다양한 응용 분야에서의 활용 가능성을 지니고 있다. 특히 여러 종류의 복잡한 형상이 도입된 초소형정밀 광학 부품,⁽¹⁾ 기능성 구조 표면⁽²⁾ 등의 개발이 가능하다. 또한 복잡

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, thkwon@postech.ac.kr

한 마이크로 구조를 통한 다양한 유동 현상의 유도 및 이를 적용한 미세유체 시스템(microfluidic system)⁽³⁾과 바이오 응용 시스템⁽⁴⁾ 등을 효과적으로 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 예를 들어 재귀 반사 표면(retro-reflective surface)과 같은 기능성 광학 제품⁽⁵⁾ 혹은 실제 생체 환경을 보다 유사하게 모사할 수 있는 마이크로 구조물이 집적된 3 차원 환경에서의 세포 거동을 연구하기 위한 미세유체 시스템⁽⁶⁾의 구현이 용이하게 된다.

이와 같은 복잡한 형상을 가지는 마이크로 혹은 나노 스케일의 초소형 구조물을 안정적으로 구현하기 위하여 다양한 제작기술의 개발과 연구가 이루어져 왔다. 초소형 머시닝(micro machining),⁽⁷⁾ 레이저 가공(laser ablation),⁽⁸⁾ 마이크로 스테레오리소그래피(micro stereolithography)⁽⁹⁾ 등과 같은 직접적인 3 차원 가공 기술들과 함께 경사 노광(inclined exposure),⁽¹⁰⁾ 리플로우(reflow) 공정,⁽¹¹⁾ 무빙 마스크(moving mask) 기술⁽¹²⁾ 등 다양한 종류의 리소그래피(lithography) 기반 기술들이 복잡한 형상의 초소형 구조물 제작/가공기술의 대표적 예이다. 이와 같은 기술들 중, 직접적 가공 기술들은 보다 다양한 형상의 구조물을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 제작에 소요되는 시간 및 정밀도 측면에서의 문제점을 보이고 있다. 또한, 리소그래피 기반 기술들의 경우 비교적 짧은 제작 시간과 정밀도를 보이고 있으나, 추가적인 공정 장비 및 기술들의 도입이 필요하다는 단점을 가지고 있다.

한편, 1980년대 중반 개발된 LIGA 공정⁽¹³⁾은 방사광가속기(synchrotron)의 고에너지 X-선을 이용한 X-선 리소그래피 공정(deep X-ray lithography, DXRL), 전주도금(electroforming) 및 대량성형(molding)과 같은 일련의 공정들로 이루어져 있다. 이와 같은 LIGA 공정은 DXRL 공정을 적용함으로써, 뛰어난 표면 특성을 가지는 높은 두께의 고종횡비(high aspect ratio) 초소형 구조물의 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 또한 전주도금을 통한 몰드(mold)의 제작과 이를 이용한 대량성형 공정을 통한 초소형정밀 부품의 복제를 가능하게 한다. 이에 LIGA 공정은 초정밀 광학제품, 미세유체 응용제품 등의 개발 및 성형에 이용되고 있다.

본 연구에서는 최근 개발된 모듈화된 초소형몰드 시스템(modularized & sectioned micromold system, MSMS)⁽¹⁴⁾을 이용하여, 다단 마이크로 구조물의 대량성형 공정을 진행하였다. 먼저 DXRL 공정 및 니켈 전주도금 공정을 이용하여 모듈화된 초소형몰드 시스템을 구성하기 위한 다양한 모듈들을 제

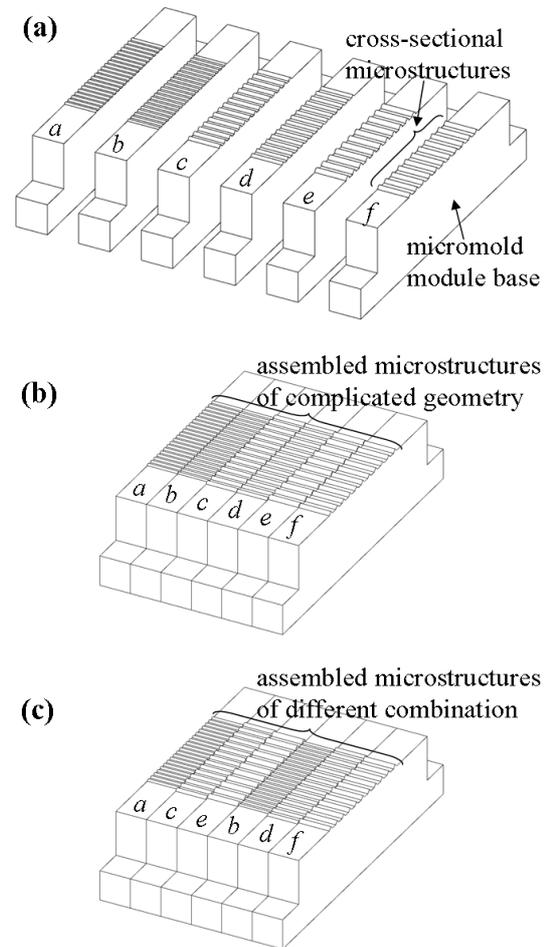


Fig. 1 Schematic diagram of MSMS: (a) several micromold modules, each having various cross-sectional microstructures, (b) one typical example of the module assembly, and (c) the MSMS assembled with a different combination of modules

작하고, 제작된 모듈들로 구성된 MSMS 를 이용한 초소형 사출성형 공정을 진행함으로써, 다단 마이크로 구조물의 대량성형 기술을 연구하였다. 이를 통하여 100 μm 높이 차이를 가지는 다단 구조물 표면에 마이크로 삼각 프리즘들이 존재하는 다단 마이크로 구조물을 성공적으로 성형하였다.

2. MSMS 설계 및 제작

2.1 MSMS 개념

Fig. 1 은 본 연구진이 개발한 모듈화된 초소형몰드 시스템(MSMS)의 개념을 개략적으로 나타내고 있다.⁽¹⁴⁾ DXRL 공정 및 니켈 전주도금 공정을 통하여 제작되는 MSMS 모듈들은 Fig. 1(a)와 같이 한 면에 단면 마이크로 구조물(cross-sectional

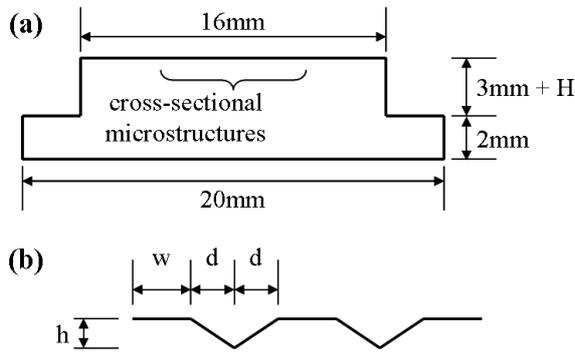


Fig. 2 Schematic design of the micromold modules: (a) detailed dimensions of the module base and (b) characteristic dimensions of the cross-sectional microstructures

microstructure)을 가지고 있다. 각각의 모듈들은 다양한 종류의 단면 마이크로 구조물들을 가질 수 있으며, 이와 같이 제작된 여러 모듈들의 조합을 통하여 복잡한 형상을 가지는 마이크로 구조 표면을 손쉽게 구현할 수 있다(Fig. 1(b)). 원하는 조합으로 구성된 MSMS 를 초소형 대량성형 공정에 적용함으로써, 일반적인 제작기술로 구현하기 어려운 복잡한 형상을 가지는 초소형 구조물의 대량 성형이 가능하게 된다. 이와 함께, 제작된 모듈들을 다른 조합으로 결합함으로써(Fig. 1(c)) 다른 형상을 가지는 몰드 시스템의 구성이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 즉, MSMS 를 적용함으로써 다양한 모듈들의 조합 및 결합을 통한 최종 초소형 구조물의 복잡성 증대가 가능하게 된다.

본 연구에서 적용되는 MSMS 모듈들은 측면에 단면 마이크로 구조물을 가지게 되며, 이와 같은 단면 마이크로 구조물들이 최종적으로 성형되는 몰드 면을 구성하게 되므로, 측면의 표면 특성이 매우 중요하다. 동시에 보다 정밀한 마이크로 구조물의 구현을 위하여 두께 방향으로의 수직도가 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 SU-8 등의 감광재(photoresist)를 이용한 일반적인 UV-포토리소그래피(UV-photolithography) 공정 대신, X-선을 이용한 DXRL 공정을 도입함으로써 마이크로 구조물의 뛰어난 측면 조도 및 수직도를 얻고자 하였다.

2.2 다단 마이크로 구조물 MSMS 설계

본 연구에서는 다단 마이크로 구조물의 대량성형을 위하여 MSMS 를 도입하였다. 이를 위하여 MSMS 를 구성하는 모듈들의 베이스(module base) 형상에 변화를 줌으로써, 다단으로 이루어진 표면을 손쉽게 구성할 수 있도록 하였다. 동시에 각 모듈들이 여러 단면 마이크로 구조물들을 가지게

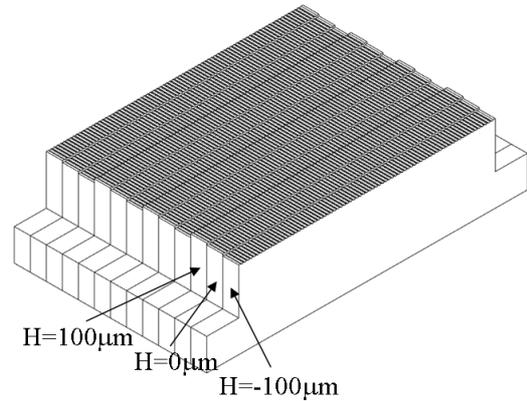


Fig. 3 Schematic view of the assembled MSMS for a replication of multi-level microstructures

제작함으로써, 최종적으로 다단 마이크로 구조물의 성형을 위한 MSMS 를 구성하였다.

다단 마이크로 구조물 성형을 위하여 본 연구에서 제작된 MSMS 모듈 베이스의 형상은 Fig. 2(a)와 같다. 모듈 베이스는 2 단 형상을 가지도록 설계되어 초소형 사출성형 공정을 위한 몰드 코어(mold core)로의 결합을 용이하게 하였으며, 모듈들의 윗면에는 단면 마이크로 구조물들이 위치하도록 하였다. 또한 모듈 베이스의 두 번째 단의 높이 차이(H)를 다양하게 설계함으로써 다양한 높이를 가지는 MSMS 모듈들을 구현하였다. 본 연구에서는 100, 0, -100µm 의 세 종류의 H 를 가지는 모듈들을 설계/제작하였다.

결합된 MSMS 모듈들의 윗면에 위치하게 되는 단면 마이크로 구조물로 Fig. 2(b)와 같은 음각(concave)의 마이크로 삼각 프리즘들을 제작하였다. 이와 같은 마이크로 구조물은 밑변의 길이(2d)가 150µm, 높이(h)가 50µm, 그리고 간격(w)이 50µm 가 되도록 설계되었다.

이와 같이 제작된 세 종류의 모듈들로 구성되는 MSMS 의 개략도는 Fig. 3 와 같다. Fig. 3 에서 확인할 수 있듯이 결합된 MSMS 는 각 단의 높이 차이가 100 µm 인 다단 구조물을 이루고 있으며, 다단 구조물의 표면에는 Fig. 2(b)와 같은 음각의 마이크로 삼각 프리즘들이 위치하게 된다. 이와 같은 MSMS 를 초소형 사출성형과 같은 대량성형 공정에 도입함으로써, 최종적으로 양각의 마이크로 삼각 프리즘들로 이루어진 다단 마이크로 표면을 성형하게 된다.

2.3 MSMS 모듈 제작공정

본 연구에서는 MSMS 를 구성하는 모듈들의 정밀한 제작을 위하여, DXRL 공정 및 니켈 전주도

금 공정을 수행하였다. 먼저, 방사광가속기의 고에너지 X-선을 이용한 DXRL 공정을 통하여 마이크로 구조물을 포함하는 모듈 베이스의 Polymethyl methacrylate(PMMA) 구조물을 제작하였다. 이후, 제작된 PMMA 구조물을 모구조물(mother structure)로 이용한 니켈 전주도금 공정을 진행함으로써, 최종적으로 니켈 MSMS 모듈들을 제작하였다.

2.3.1 DXRL 공정

DXRL 공정을 이용한 PMMA 모구조물의 제작을 위해서는 X-선 감광재로 이용되는 PMMA의 선택적인 조사(exposure)를 위한 X-선 마스크(X-ray mask)의 제작이 필요하다. 본 연구에서는 다단 마이크로 구조물의 성형을 위한 MSMS 모듈들의 제작을 위한 X-선 마스크를 UV-포토리소그래피 및 금 전기도금 공정을 이용하여 제작하였다. 먼저, 175 μm 두께의 폴리이미드(polyimide) 필름의 표면에 전도층(seed layer)으로 이용하기 위한 크롬(chromium, 20nm) 및 금(gold, 100nm)을 증착한 후, SU-8 2025 (MicroChem Corp.)을 이용한 UV-포토리소그래피 공정을 진행하였다. 이와 같은 포토리소그래피 공정을 통하여 제작된 마이크로 구조물의 빈 공간에 X-선 흡수재(X-ray absorber) 역할을 하는 금을 전기도금 함으로써 X-선 마스크를 제작하였다.

제작된 X-선 마스크를 이용한 X-선 노광 공정은 포항방사광가속기에서 수행되었으며, 두께 1.1mm의 PMMA 판(Goodfellow Cambridge Ltd.)을 X-선 감광재로 이용하였다. 준비된 PMMA 판은 X-선 노광 전에 탈수(dehydration) 과정을 거친 후 티타늄(titanium) 기판에 부착되었다. 이를 위하여, 먼저 티타늄 기판에 액상 PMMA(PMMA 950C9, MicroChem Corp.)를 도포한 후, 가열 과정을 통하여 용매(solvent)를 제거하여 2 μm 두께의 PMMA 층을 얻고, methyl methacrylate(MMA)를 티타늄 기판과 PMMA 판의 접착제로 이용하였다. X-선 노광 공정에서는 미러 시스템(X-ray mirror system, 0.35°) 및 X-선 필터(aluminum, 36 μm thickness)를 적용하여 마이크로 구조물의 정밀한 제작에 효과적인 파장대를 이용한 X-선 노광을 진행하였다. 이와 같은 조건에서의 X-선 노광을 통하여 약 4.0kJ/cm³의 에너지를 PMMA 판의 아랫면에 조사할 수 있었다.

X-선 노광 후, GG-현상액(GG-developer)을 이용한 현상 공정을 진행하여 선택적으로 조사된 PMMA를 제거하였다. 이와 같은 공정들을 통하여 이후의 니켈 전주도금에 이용되는 PMMA 모구

구조물을 성공적으로 제작할 수 있었다.

2.3.2 니켈 전주도금

DXRL 공정으로 제작된 PMMA 구조물들 사이의 빈 공간을 니켈 등의 기계적 물성이 뛰어난 금속을 채움으로써 MSMS의 모듈들을 제작할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 설파민산 니켈(nickel sulfamate) 용액을 이용한 니켈 전주도금 공정을 진행하였다. 전주도금 공정 중, 설파민산 니켈 용액의 온도는 55°C로 유지되었으며, 초기 단계에서의 안정적인 도금을 위하여 약 1mA/cm²의 낮은 전류밀도(current density)가 적용되었다. 이후 전류밀도를 10mA/cm²까지 점차적으로 증가시키면서 니켈 전주도금이 진행하였다.

니켈 전주도금 공정으로 제작된 MSMS 모듈들이 최종적으로 원하는 두께 및 결합 과정을 위한 평탄도를 가지도록, 니켈 모듈의 도금된 면에 대한 래핑(lapping) 및 폴리싱(polishing) 공정을 진행하였다. 이와 같은 평탄화를 거친 후, 니켈 모듈들의 면은 그 거칠기가 수 nm의 뛰어난 표면 특성을 가지는 것으로 측정되었으며(New View 200, ZYGO), 이를 통하여 보다 정밀한 MSMS 모듈들의 결합을 얻을 수 있게 된다. 평탄화 및 두께 조정을 거친 후, 도금된 니켈 모듈들을 지지하고 있는 PMMA 구조물을 제거하기 위한 세척 공정을 수행하였으며, 이를 통하여 최종적으로 다양한 종류의 MSMS 모듈들을 제작하였다.

3. 초소형 사출성형 공정

3.1 몰드 베이스 설계 및 제작

제작된 MSMS 모듈들을 안정적으로 결합하고 초소형 사출성형 공정의 몰드로의 도입을 용이하게 하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 몰드 베이스(mold base)를 이용하였다. 몰드 베이스는 고정판(stationary platen)과 이동판(moving platen)으로 구성되며, MSMS 모듈들이 결합된 몰드 코어는 몰드 베이스의 고정판에 부착되었다. 동시에 이동판에는 캐비티(cavity) 형상을 포함하는 코어를 부착하였다. 이와 같은 몰드 베이스를 적용함으로써, 초소형 사출성형 공정 중 몰드 베이스가 단했을 때, 결합된 MSMS의 표면이 캐비티의 한 면을 구성하게 된다. 따라서 용융된 고분자 수지의 충전(filling)을 통하여, 성형에 이용된 MSMS의 표면 형상이 복제된 평판 형상의 성형품을 얻을 수 있게 된다. 이와 함께 몰드 베이스에는 냉각 채널이 위치하였으며, 외부의 냉각 장치(TT-157E, Tool-

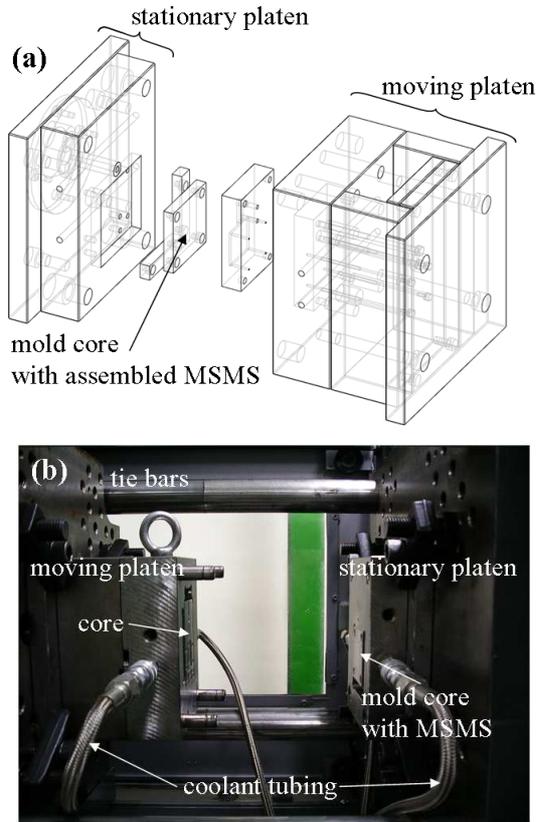


Fig. 4 (a) Schematic design of the mold base for microinjection molding process and (b) photograph of the installed mold base

TEMP AG)를 이용한 몰드 베이스의 온도 조절이 가능하도록 하였다.

3.2 초소형 사출성형

DXRL 공정 및 니켈 전주도금 공정으로 제작된 MSMS 모듈들을 위와 같은 몰드 베이스에 적용한 초소형 사출성형 공정을 수행하여 다단 마이크로 구조물을 성형하였다. 성형 공정에는 전동 사출압축성형기(SE-50D, Sumitomo)가 이용되었으며, 성형용 수지로는 LDPE(Low-density polyethylene, LDPE 722, Hanhwa Chemical Corp.)를 이용하였다.

본 연구의 초소형 사출성형 공정에 적용된 주요 공정조건들은 Table 1 과 같다. 이와 같은 공정조건을 적용함으로써 다단 마이크로 구조물을 성공적으로 성형할 수 있었다.

4. 결과 및 토의

다단 마이크로 구조물의 MSMS 모듈 제작을 위한 DXRL 공정에 이용된 X-선 마스크는 Fig. 5 에 나타내었다. 2 단 형상을 가지고 있는 모듈 베이스들의 제작하기 위한 금 구조물들이 폴리이미드 필

Table 1 Processing conditions used in the present microinjection molding process

Processing Parameter	Condition
Filling time	0.23 s
Packing pressure	75 MPa
Packing time	1.00 s
Melt temperature	200 °C
Mold temperature	40 °C

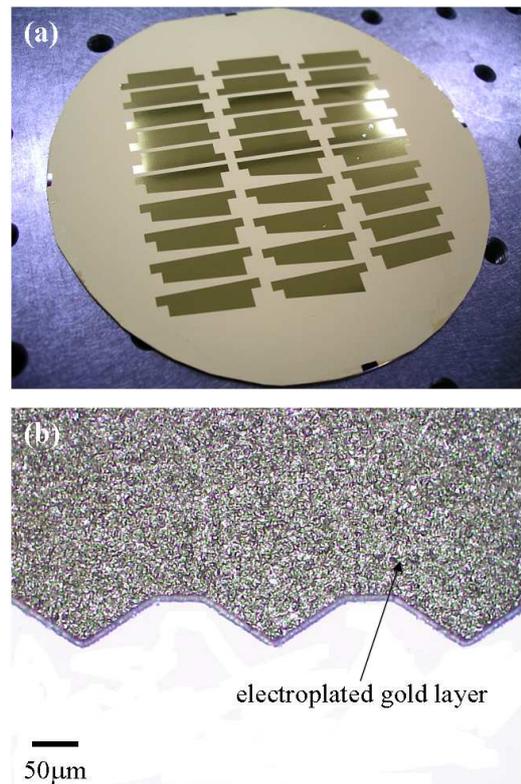


Fig. 5 (a) Photograph of the X-ray mask used in the present study and (b) microscopic view of the electroplated gold microstructure in the X-ray mask

름 기판 위에 제작되어 있는 것을 확인할 수 있다. 설계된 바와 같이 세 종류의 다른 모듈 베이스의 높이 차이(H)를 가지는 모듈들의 형상이 구현되어 있다. 동시에 각 모듈 베이스들의 한 면에는 음각 마이크로 삼각 프리즘들의 형상들이 위치하고 있으며, 이는 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다.

이와 같이 제작된 X-선 마스크를 이용하여 DXRL 공정을 수행함으로써, PMMA 감광재에 선택적으로 X-선을 조사할 수 있었으며 그 결과는 Fig. 6 와 같다. X-선 조사 중, X-선 마스크의 금 구조물은 X-선 흡수재의 역할을 하기 때문에, MSMS 모듈에 해당하는 PMMA 부분에만 X-선이 선택적으로 조사되게 된다. X-선이 조사된 PMMA 는 X-

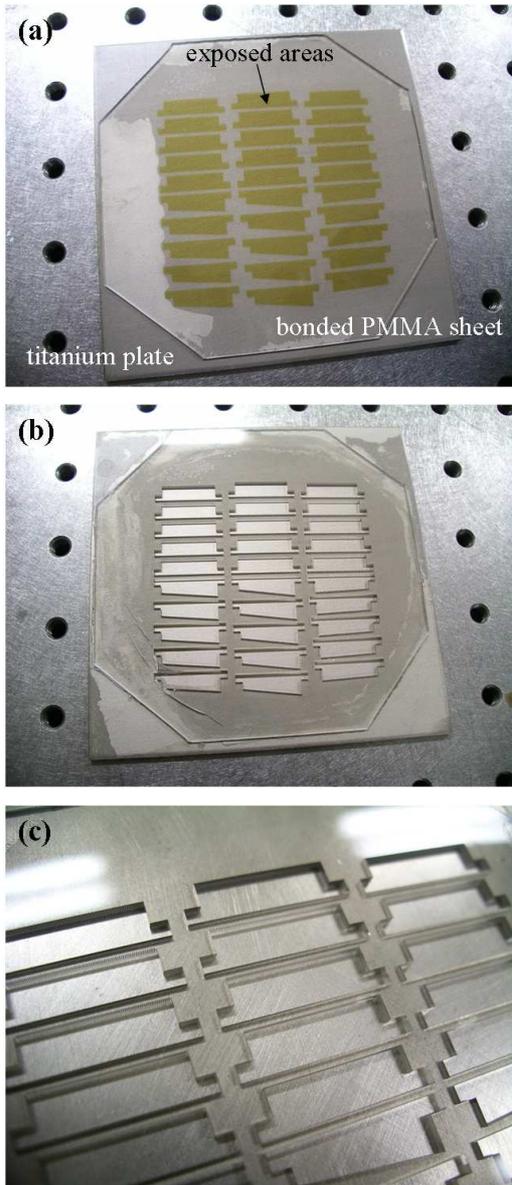


Fig. 6 Photographs of (a) the exposed PMMA sheet, (b) the fabricated PMMA microstructures after the development process, and (c) the enlarged view of the fabricated cavities for MSMS modules

선의 높은 에너지에 의하여 PMMA 를 구성하는 고분자 체인(chain)이 끊어지게 되어 분자량이 감소하게 된다. 이와 같이 분자량이 감소된 부분들은 X-선 노광 이후의 현상 공정에서 제거될 수 있으며, 이를 통하여 PMMA 마이크로 구조물을 제작할 수 있게 된다. 이와 같은 DXRL 공정에서 두꺼운 감광재를 완전하게 노광 및 현상을 하기 위하여는 $4\text{kJ}/\text{cm}^3$ 정도의 에너지가 요구된다. 하지만, 이와 같은 양의 에너지를 얻기 위하여 X-선을 조사하는 동안 X-선 흡수재 아래의 PMMA 부분들에도 약간의 X-선이 조사되게 되어, X-선 흡수

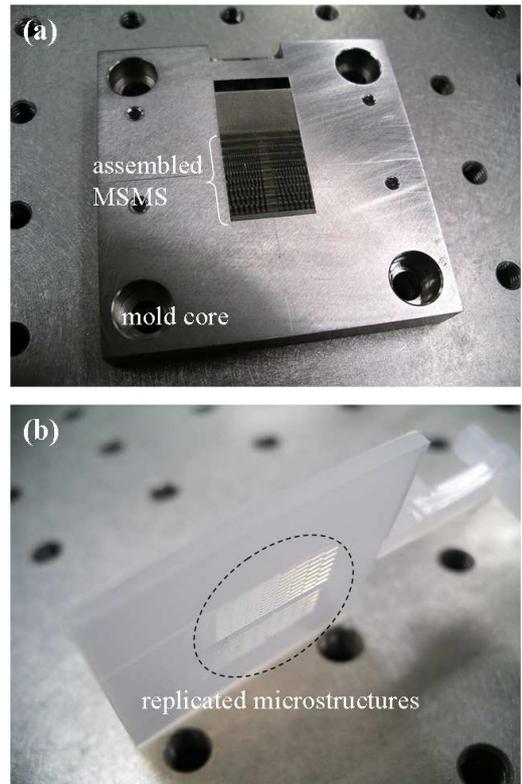


Fig. 7 Photographs of (a) several MSMS modules assembled in the mold core system, (b) microinjection-molded article including a microstructured surface

재로 이용되는 금 구조물의 두께가 충분하지 않을 경우 초소형 구조물의 정밀한 제작이 어렵게 된다. 실제 본 연구에서 제작된 X-선 마스크의 금 마이크로 구조물의 두께는 약 $19\mu\text{m}$ 이며, 이는 X-선 노광 공정에서 이용된 1.1mm 두께의 PMMA 판의 안정적인 선택적 노광에 충분한 두께이다.

이와 같이 제작에 충분한 에너지를 받은 PMMA 부분들은 Fig. 6(a)에서 확인할 수 있다. 이 부분들은 현상 공정을 통하여 완전히 제거할 수 있었으며, 이를 통하여 Fig. 6(b) 및 (c)와 같은 PMMA 마이크로 구조물들을 성공적으로 제작할 수 있었다. DXRL 공정을 통하여 PMMA 가 선택적으로 제거된 부분들에서는 기관으로 이용된 티타늄이 드러나게 되며, 이 면을 이용하여 니켈 전주도금 공정이 진행되게 된다. 즉, PMMA 가 제거되면서 형성되는 캐비티 부분을 전주도금을 이용하여 니켈로 채우게 되는 것이다. 이와 같은 니켈 전주도금 기술을 이용하여 대량성형 공정에 이용될 수 있는 니켈 MSMS 모듈들을 얻게 된다.

니켈 전주도금 및 평탄화 과정을 통하여 제작된 여러 다양한 니켈 MSMS 모듈들은 3.1 절에서 언급한 바와 같이, 초소형 사출성형 공정에 효과적

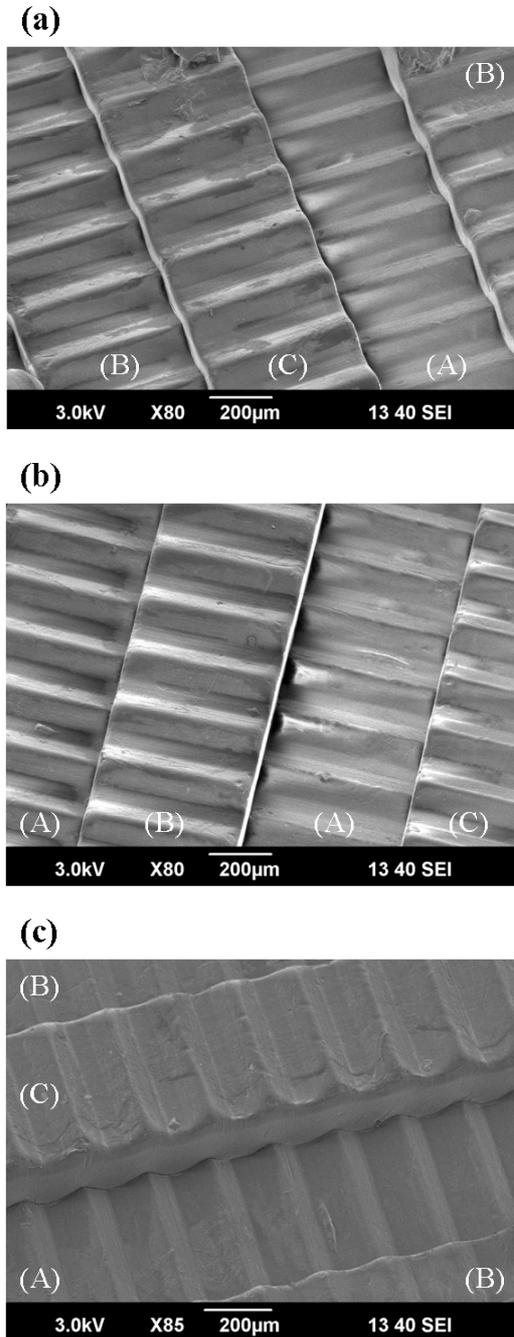


Fig. 8 SEM images of the various multi-level microstructures replicated in the present study

으로 적용하기 위하여 먼저 몰드 코어에 결합되게 된다. 즉, Fig. 7(a)와 같이 다양한 종류의 모듈들을 원하는 조합으로 몰드 코어에 견고하게 결합하게 된다. 이와 같이 MSMS 모듈들이 결합된 몰드 코어를 몰드 베이스에 부착하여 초소형 사출성형 공정을 진행하게 되며, 그 결과 Fig. 7(b)와 같은 플라스틱 성형품을 얻을 수 있었다. MSMS 모듈들이

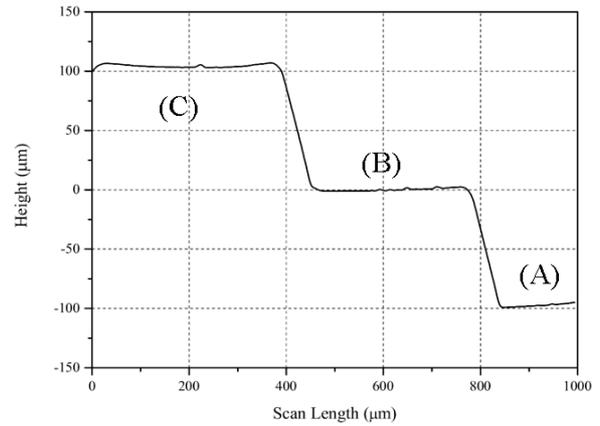


Fig. 9 Surface profile of the replicated multi-level microstructure

결합된 몰드 코어는 몰드 베이스의 고정판에 부착되었으며, 반대편의 몰드 베이스 이동판에 부착된 몰드 코어에 최종 성형품의 캐비티 형상이 위치하고 있다. 본 연구에서는 35mm×35mm 크기 및 두께 2mm의 정사각형 평판 캐비티를 가지는 이동판 몰드 코어를 이용하였으며, 따라서 Fig. 7(b)에서와 같은 정사각형의 성형품을 얻을 수 있었다. 이와 같은 성형품의 한 면에는 몰드 코어에 결합된 MSMS 모듈들에 의해서 구성되는 다단 마이크로 구조물 표면이 성형되어 있다.

본 연구에서 제작된 MSMS를 적용한 초소형 사출성형으로 성형된 다단 마이크로 구조물들은 Fig. 8과 같다. 설계된 바와 같이 최종 구조물들은 100µm의 높이 차이를 가지는 세 종류의 다단 구조물로 이루어져 있으며, 그 표면에는 너비 150µm, 높이 50µm의 마이크로 삼각 프리즘들이 50µm의 간격으로 성형되어 있다. Fig. 8의 SEM 사진들에서 (A), (B), (C)는 각각 H가 100, 0, 및 -100µm인 MSMS 모듈들에서 성형된 형상들이다. 이를 통하여 확인할 수 있듯이 본 연구의 MSMS를 이용함으로써 서로 다른 높이를 가지는 다단 마이크로 구조물들의 초소형 사출성형 공정을 성공적으로 진행할 수 있다. 또한 제작된 MSMS 모듈들을 여러 종류로 조합함으로써 Fig. 8에서 보여지는 여러 종류의 다단 마이크로 구조물을 성형할 수 있었다.

마지막으로 표면단차 측정기(Alpha-Step IQ, KLA Tencor)를 이용하여 성형된 다단 마이크로 구조물의 높이 차이를 확인하였다. Fig. 9의 측정 결과에서 확인할 수 있듯이 본 연구에서 이용한 MSMS를 이용하여 100µm의 높이 차이를 가지는 마이크로 구조물을 효과적으로 성형할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상을 가지는 초소형 구조물의 대량성형을 위한 새로운 개념의 몰드시스템(MSMS)을 개발하고, 이를 초소형 사출성형 공정에 도입하여 다단 마이크로 구조물을 성공적으로 성형하였다. 여러 형상을 가지는 다양한 모듈들로 구성되는 MSMS 는 모듈들의 조합 및 결합을 통하여 보다 복잡한 형상을 가지는 몰드시스템을 손쉽게 구현이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 모듈들의 효과적인 제작을 위하여 본 연구에서는 DXRL 공정 및 니켈 전주도금을 이용하였다. 이를 통하여 높이 차이가 100 μm 인 다양한 다단 구조물의 표면에 밀변의 길이가 150 μm , 높이가 50 μm , 간격이 50 μm 인 마이크로 삼각 프리즘들이 위치하고 있는 다단 마이크로 구조물을 성형할 수 있었다.

본 연구의 MSMS 를 도입함으로써 복잡한 형상의 마이크로 구조물들을 보다 효과적으로 대량성형할 수 있는 초소형몰드 시스템을 구현할 수 있었다. 이와 같은 MSMS 및 대량 성형기술은 향후 다양한 광학 요소 부품 및 바이오 응용 기능성 표면 등 형상적 복잡성을 가지는 응용 제품군의 개발에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0092817) 및 WCU 사업(R31-2008-000-10105-0)이며, 포항방사광가속기에서의 실험은 교육과학기술부와 포항공대의 지원을 받음.

참고문헌

- (1) Char, S. K., Jung, H. J. and Jeong, K. H., 2008, "Micropatterned Complex Optical Surface for Wide Angle Illumination," *Proc. IEEE Optical MEMS*, pp. 37~38.
- (2) Lee, B.-K., Cha, K. J. and Kwon, T. H., 2009, "Fabrication of Polymer Micro/Nano Hybrid Lens Array by Microstructured Anodic Aluminum Oxide (AAO) Mold," *Microelectron. Eng.*, Vol. 86, No. 4-6, pp. 857~860.
- (3) Kwon, J. W. and Kim, E. S., 2002, "Multi-level Microfluidic Channel Routing with Protected Convex Corners," *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 97-98, pp. 729~733.
- (4) Mai, J., Sun, C., Li, S. and Zhang, X., 2007, "A Microfabricated Platform Probing Cytoskeleton Dynamics Using Multidirectional Topographical Cues," *Biomed. Microdevices*, Vol. 9, No. 4, pp. 523~531.
- (5) Lin, C.-Y., Su, C.-H., Hsu, C.-M. and Lin, C.-R., 2008, "Improvement of the Microcrystalline Cube Corner Reflective Structure and Efficiency," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 7, pp. 5693~5701.
- (6) Leclerc, E., Sakai, Y. and Fujii, T., 2003, "Cell Culture in 3-Dimensional Microfluidic Structure of PDMS(polydimethylsiloxane)," *Biomed. Microdevices*, Vol. 5, pp. 109~114.
- (7) Yan, J., Yoshino, M., Kuriagawa, T., Shirakashi, T., Shoji, K. and Komanduri, R., 2001, "On the Ductile Machining of Silicon for Micro Electro-mechanical Systems (MEMS), Opto-electronic and Optical Applications," *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, Vol. 297, No. 1-2, pp. 230~234.
- (8) Heyl, P., Olschewski, T. and Wijnaendts, R. W., 2001, "Manufacturing of 3D Structures for Micro-tools Using Laser Ablation," *Microelectron. Eng.*, Vol. 57-58, pp. 775~780.
- (9) Zhang, X., Jiang, X. N. and Sun, C., 1999, "Microstereolithography of Polymeric and Ceramic Microstructures," *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 77, No. 2, pp. 149~156.
- (10) Han, M., Lee, W., Lee, S.-K. and Lee, S. S., 2004, "3D Microfabrication with Inclined/rotated UV Lithography," *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 111, No. 1, pp. 14~20.
- (11) Lin, C. P., Yang, H. and Chao, C.-K., 2003, "Hexagonal Microlens array Modeling and Fabrication Using a Thermal Reflow Process," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, No. 5, pp. 775~781.
- (12) Tabata, O., You, H., Matsuzuka, N., Yamaji, T., Uemura, S. and Dama, I., 2002, "Moving Mask Deep X-ray Lithography System with Multi Stage for 3-D Microfabrication," *Microsyst. Technol.*, Vol. 8, No. 2-3, pp. 93~98.
- (13) Becker, E. W., Ehrfeld, W., Haggmann, P., Manner, A. and Münchmeyer, D., 1986, "Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanofornung, and Plastic Moulding (LIGA Process)," *Microelectron. Eng.*, Vol. 4, No. 1, pp. 35~56.
- (14) Lee, B.-K. and Kwon, T. H., 2009, "Development of Modularized & Sectioned Micromold System (MSMS) via LIGA Technology," 8th International Workshop on High Aspect Ratio Microstructure Technology (HARMST), pp. 79~80, Saskatoon, Canada, June 25-28.