

초소형사출성형 공정을 이용한 마이크로 구조 표면의 성형

Replication of Microstructured Surfaces by Microinjection Molding

이봉기¹, 김영배², 권태현^{1,✉}

Bong-Kee Lee¹, Young-Bae Kim² and Tai Hun Kwon^{1,✉}

¹ 포항공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

² LG 전자 디지털어플라이언스 사업본부 DAC 연구소 (Digital Appliance Company, LG Electronics)

✉ Corresponding author: thkwon@postech.ac.kr, Tel: 054-279-2175

Manuscript received: 2008.11.3 / Revised: 2009.3.17 / Accepted: 2009.5.21

In the present study, replication of microstructured surfaces by microinjection molding was carried out. For a fabrication of mold inserts, nickel microstructures having various characteristic dimensions were fabricated by nickel electroforming onto Si mother microstructures. In addition, reverse nickel microstructures based on the electroformed nickel microstructures were successfully realized by electroforming with passivation process. The fabricated nickel microstructures were used as mold inserts for a replication of microstructured surfaces by microinjection molding. Microinjection molding experiment was carried out under three different processing conditions, which revealed effects of a packing stage and mold wall temperature. The microinjection-molded microstructured surfaces were characterized by using an atomic force microscope (AFM). It was found that mold wall temperature could enhance replication quality, resulting in the precise microstructured surfaces.

Key Words: Microinjection Molding (초소형사출성형), Microstructured Surface (마이크로 구조 표면), Mold Insert (금형 인서트), Replication Quality (성형성), Mold Wall Temperature (금형 온도)

기호설명

s = distance between adjacent microstructures

w = width of square microstructures

1. 서론

최근 MEMS(Micro-Electro-Mechanical-System) 및 NEMS(Nano-Electro-Mechanical-System) 기술의 발달로 인하여 다양한 형상의 마이크로/나노 구조물과 그 응용 제품들의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 여러 종류의 물리/화학적 센서들,^{1,2} LCD 도광판(back light unit), 마이크로 렌즈 어레이,³ 광커넥터(optical connector)⁴ 등의 광응용제품,⁵ 초소형

기어와 같은 마이크로 기계부품,⁶ 랩온어칩(lab-on-a-chip),⁷ 조직공학(tissue engineering)⁸ 등의 바이오 응용 분야 등 다양한 분야에서의 연구가 이루어지고 있다.

이와 같은 마이크로 혹은 나노 구조물의 제작을 위하여 기존에는 반도체 공정을 기반으로 한 여러 리소그래피(lithography) 공정, 증착(deposition) 및 식각(etching) 공정 등이 주로 이용되어 왔다. 하지만 제작 재료의 다양성 및 제작 효율성 등에서 한계점을 보이고 있다. 이를 극복하기 위하여, 최종 성형되는 구조물의 반대 형상을 가지고 있는 금형(mold) 혹은 스탬프(stamp)제작⁹을 통한 대량복제(mass replication) 공정 기술들이 주목받고 있다. 소프트 리소그래피(soft lithography),¹⁰ 초소형사출성

형(microinjection molding)^{11,12} 핫 엠보싱(hot embossing)¹³ 및 나노 임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography)¹⁴ 등 다양한 성형 공정들이 개발, 연구되고 있으며, 이들을 적용한 여러 마이크로 및 나노 구조물의 제작이 이루어지고 있다. 또한 기존의 대량 복제 기술들이 고분자 재료를 그 성형 대상으로 다루고 있었으나, 이 기술들을 금속 및 세라믹 재료의 성형/제작에 적용하기 위한 연구들^{6,15}도 함께 진행되고 있어, 향후 그 중요성이 매우 커질 것이다.

본 연구에서는 마이크로 및 나노 구조물의 대량 성형 기술들 중의 하나인 초소형사출성형 공정을 이용한 마이크로 구조 표면(microstructured surface)의 성형을 수행하였다. 마이크로 구조 표면은 초소형 모터나 초소형 기어와 같은 단일 마이크로 구조물(micropart)과는 달리, 상대적으로 큰 크기의 구조물의 표면에 마이크로 구조물들이 위치하고 있게 된다. 이들은 광학, 표면 공학, 바이오 공학 등의 여러 응용 분야를 가지고 있어, 표면의 마이크로 구조물들의 정밀하고 안정적인 성형이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 마이크로 구조물을 표면에 가지고 있는 여러 금속 금형 인서트(mold insert)를 제작하고, 이를 이용한 초소형사출성형 공정을 수행하였다. 일반적으로 고분자 재료를 이용한 마이크로 및 나노 대량 복제 기술들에서는 금형 혹은 스탬프의 온도가 성형성에 미치는 영향이 매우 크며, 따라서 다양한 방식의 금형의 온도조절시스템들¹⁶⁻¹⁸이 연구/개발되고 있다. 본 연구에서는 초소형사출성형 공정에 급속온도조절(Rapid Thermal Control) 시스템¹⁹을 적용하여 성형 시 금형의 급속 가열 및 냉각 과정을 진행하였다. 이와 같이 성형된 마이크로 구조 표면은 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 그 성형성을 확인하고, 보압(packaging) 공정 및 금형 온도의 영향을 확인하였다.

2. 금형 인서트 제작

2.1 금형 인서트 제작 공정

Fig. 1은 본 연구에서 진행된 마이크로 구조 표면의 금형 인서트 제작 및 초소형사출성형에 대한 공정 개략도이다. 먼저, Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 DRIE(deep reactive ion etching) 공정을 통하여 마이크로 기둥 어레이(micro pillar array)를 가지는 양각 형태의 실리콘(Si) 마이크로 구조물(positive

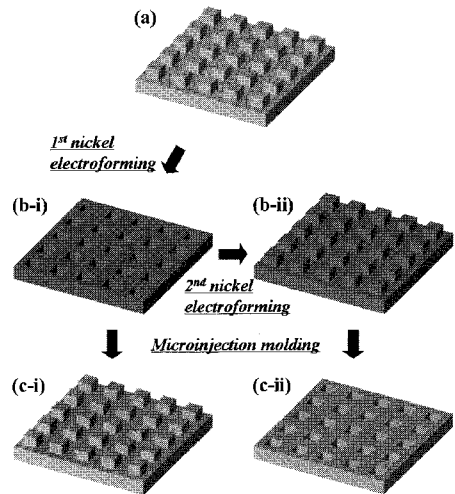


Fig. 1 Schematic diagram of the whole fabrication process in the present study: (a) positive Si microstructure, (b-i) electroformed negative nickel mold insert, (b-ii) electroformed positive nickel mold insert, (c-i) replicated positive microstructured surface, and (c-ii) replicated negative microstructured surface

microstructure)을 제작한다. 이후, 제작된 양각 마이크로 구조물을 모구조물(mother structure)로 한 니켈 전주도금 공정을 통하여 Fig. 1(b-i)와 같은 양각 마이크로 구조물의 반대 형상인 마이크로 우물 어레이(micro well array) 형태를 가지는 음각 마이크로 구조물(negative microstructure)을 얻게 된다.

제작된 음각 니켈 마이크로 구조물은 초소형사출성형 공정의 금형 인서트로 이용되며, 동시에 두 번째 니켈 전주도금 공정의 모구조물로 이용된다. 이와 같은 두 번의 니켈 전주도금 공정을 수행함으로써 처음 제작된 실리콘 양각 마이크로 구조물과 같은 형태의 양각 니켈 마이크로 구조물(Fig. 1(b-ii))을 얻을 수 있게 된다. 최종적으로 두 종류의 양각 및 음각 마이크로 구조물을 가지는 니켈 금형 인서트를 제작하게 되며, 이를 이용한 초소형사출성형 공정으로 양각(Fig. 1(c-i)) 및 음각(Fig. 1(c-ii)) 고분자 마이크로 구조 표면의 대량 성형이 가능하게 된다.

2.2 실리콘 모구조물 제작

본 연구에서 사용되는 니켈 금형 인서트 제작의 기본이 되는 마이크로 기둥 어레이의 양각 마이크로 구조물은 실리콘 제작 공정 기술 중의 하

나인 DRIE 공정으로 제작되었다. UV 포토 리소그래피(photo-lithography) 공정을 이용하여 실리콘 기판 상에 감광재(photoresist)를 패터닝한 후, DRIE 공정을 수행함으로써 여러 종류의 마이크로 기둥 어레이 형상의 실리콘 구조물을 제작할 수 있었다. 제작된 마이크로 구조물은 Fig. 2 와 같이 정사각형 형상이며, 일정한 간격을 가지고 배열되도록 설계되었다.

제작된 다양한 형상의 실리콘 마이크로 구조물 중, 본 연구에서는 다음과 같은 세 종류의 마이크로 구조물을 그 대상으로 하였다. 즉, 정사각형 마이크로 구조물의 크기(w)는 $10\mu\text{m}$ 로 고정되었으며, 각 구조물 사이의 간격(s)이 6, 8 그리고 $10\mu\text{m}$ 인 마이크로 구조물의 성형에 대한 연구를 진행하였다. 모든 마이크로 기둥의 높이는 약 $2\mu\text{m}$ 이며, 전체 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 의 영역에 일정한 간격으로 균일하게 배치되었다.

2.3 니켈 전기도금 공정

실리콘 마이크로 구조물을 초소형사출성형 공정의 금형 인서트로 이용하는 경우, 충분한 기계적 안정성을 얻기 힘들어 비효율적이라는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 제작된 실리콘 마이크로 구조물을 모구조물로 한 니켈 전주도금 공정을 통하여 니켈 금형 인서트를 제작하였다. 이와 같은 견고한 금형 인서트를 이용함으로써 안정적인 대량 복제 공정이 가능하게 된다.

먼저, 제작된 실리콘 마이크로 구조물 상에 도전층(seed layer)을 증착한 후 니켈 전주도금 공정을 수행하여 니켈 구조물을 제작하게 된다. 불균일하게 도금되는 윗면에 대한 래핑(lapping) 공정을 거친 후, 실리콘 모구조물에서 분리함으로써 음각 마이크로 구조물을 가지는 니켈 마이크로 구조물을 제작할 수 있었다. 또한 제작된 니켈 마이크로 구조물을 모구조물로 이용한 두 번째 니켈 전주도금 공정을 수행함으로써 양각 마이크로 구조물을 가지는 니켈 마이크로 구조물을 제작할 수 있었다. 이 때 음각 니켈 마이크로 구조물의 표면을 중크롬산 칼륨(potassium dichromate)을 이용하여 부동화(passivation) 시킨 후 두 번째 니켈 전주도금 공정을 수행하였다. 이와 같은 부동화 처리를 통하여, 도금된 양각 니켈 마이크로 구조물은 모구조물의 손상 없이 성공적으로 분리될 수 있었다. 최종적으로 제작된 두 종류의 니켈 마이크로 구조물들은 후가공 등을 거친 후, 마이크로 구조 표면의 초소

형사출성형 공정 금형 인서트로 이용되었다.

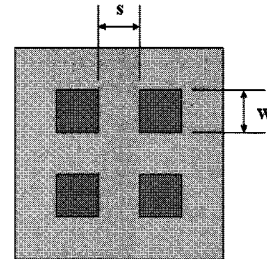


Fig. 2 Schematic diagram of the characteristic dimensions of microstructures (w : width of square micropillar or microcavity, s : distance between adjacent microstructures)

3. 초소형사출성형 공정

3.1 금형 베이스 설계 및 제작

제작된 마이크로 구조 표면의 금형 인서트들을 초소형사출성형 공정에 이용하기 위해서는 금형 베이스(mold base)가 필수적이다. 금형 베이스는 제작된 금형 인서트를 견고하게 고정하여 마이크로 구조 표면의 안정적인 대량 성형을 수행할 수 있게 해 준다. 또한 용융된 고분자 수지를 사출성형기의 노즐(nozzle)에서부터 마이크로 구조물이 위치하는 캐비티(cavity)까지 유도하기 위한 스프루(sprue), 러너(runner) 및 게이트(gate)와 같은 송출 시스템(delivery system)을 가지고 있게 된다. 이와 함께 성형 공정 중, 금형의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 최적화된 냉각 채널(cooling channel)을 함께 가지고 있도록 설계되었다.

본 연구에서 제작된 금형 베이스의 개념도는 Fig. 3 과 같다. 마이크로 구조물을 가지고 있는 금형 인서트는 금형 베이스의 고정판(stationary platen)에 볼스터 판(bolster plate)을 이용하여 견고하게 고정된다. 금형 베이스의 이동판(moving platen)에는 러너와 게이트 등이 위치한다. 초소형사출성형 공정 중 금형이 닫히게 되면, 고정판과 이동판이 만나게 되며, 따라서 고정된 금형 인서트, 볼스터 판 및 금형 이동판에 의해서 캐비티가 형성되게 된다. 이와 같은 캐비티의 금형 인서트면에 마이크로 구조물들이 위치하게 되며, 최종적으로 마이크로 구조 표면이 성형되게 된다. 또한 이동판에 위치한 러너, 게이트를 통하여 초소형사출성형 충전(filling) 공정 중 용융된 고분자 수지가

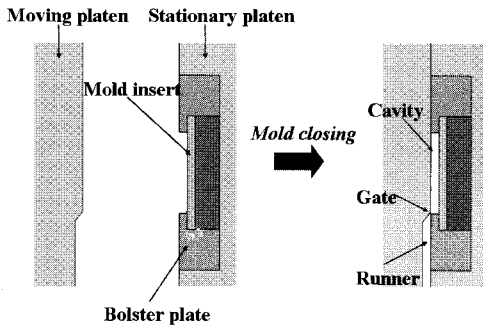


Fig. 3 Schematic diagram of the mold base used in the present study

캐비티 부로 유도된다.

이와 같이 설계/제작된 금형 베이스를 이용한 초소형사출성형 공정을 수행함으로써, 그 크기가 24mm×24mm 이며, 두께가 2mm 인 최종 성형품을 얻을 수 있었다. 최종 성형품의 한 쪽 표면에는 성형에 이용된 금형 인서트의 마이크로 구조물에 대응하는 마이크로 구조물들이 성형된다.

3.2 초소형사출성형 공정조건 및 재료

제작된 금형 인서트 및 금형 베이스를 이용한 초소형사출성형 공정 실험을 수행하였다. 성형 실험에는 전동식 사출압축성형기(SE-50D, Sumitomo)가 이용되었으며, 성형에 이용된 고분자 수지는 PMMA(Polymethylmethacrylate; IF-870S, LG MMA)이다. 마이크로 기어 등과 같은 단일 마이크로 구조물의 성형에는 정밀한 부피 계량을 바탕으로 한 최소 사출용량을 가지는 초소형사출성형기가 요구되나, 본 연구에서와 같이 넓은 면적의 표면에 마이크로 구조물들이 성형되는 마이크로 구조 표면의 성형에는 일반적인 사출성형기를 이용한 성형이 보다 유리하다.

초소형사출성형을 이용한 마이크로 구조물의 성형성에는 여러 공정 조건이 영향을 주게 되며, 이에 대한 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 사출 속도, 즉 충전 시간(filling time)과 금형 온도(mold wall temperature)가 큰 영향을 주는 것으로 확인되고 있다.²⁰ 본 연구에서는 여러 공정 조건 중, 보압 공정 및 금형 온도가 마이크로 구조 표면의 성형에 미치는 영향을 확인해 보기 위하여 Table 1 과 같은 공정 조건을 이용한 초소형사출성형 실험을 수행하였다. 초소형사출성형 공정 중, 보압 공정을 제외한 충전 공정만을 진행한 조건 I

Table 1 Processing conditions used in the present study

Processing Parameters	Conditions		
	I	II	III
Filling time (s)	0.48	0.48	0.48
Packing pressure (MPa)	-	100	100
Packing time (s)	-	1.00	1.00
Melt temperature (°C)	220	220	220
Mold wall temperature (°C)	60	60	163

과 보압 공정이 포함된 조건 II, 그리고 금형의 온도가 고분자 수지의 유리전이온도(glass transition temperature) 보다 매우 높은 조건 III 에 대한 성형 실험을 진행하였다. 조건 II 의 경우, 일반적인 사출성형 공정을 통하여 본 연구에서의 최종 성형품을 안정적으로 성형할 수 있는 최적 공정 조건으로 선택되었다. 그리고 조건 III 에서 적용된 높은 금형 온도는 카트리지 히터(cartridge heater)를 이용한 금형 인서트 부분의 급속 가열을 이용하여 구현하였다. 이와 같이 급속온도조절 시스템을 적용하는 경우, 충전 공정 전의 금형이 열려 있는 상태에서 금형 인서트 부분만의 가열이 이루어진다. 급속 가열을 통하여 금형 인서트 표면의 온도가 목표 온도까지 상승된 후, 가열이 중지되며 금형의 단합 및 고분자 수지의 충전 공정이 시작된다. 실제 성형 공정 중에는 금형 인서트 표면의 온도를 정확하게 측정하는 것이 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 미리 보정(calibration) 과정을 통하여 냉각수(coolant)의 온도에 따른 금형 인서트 표면의 목표 온도까지의 상승에 소요되는 시간을 측정하였으며, 이 결과를 실제 초소형사출성형 공정에 이용하였다.

위와 같은 공정 조건에 대하여 성형 실험을 수행한 후, AFM(SPA 400, Seiko Instrument)을 이용하여 성형된 마이크로 구조물들을 측정하였으며, 이를 통하여 각 공정 조건에서의 마이크로 구조 표면의 성형성을 확인하였다. 초소형사출성형을 통하여 성형되는 마이크로 구조물은 10mm×10mm 의 영역에 위치하고 있으며, AFM 을 이용한 표면 측정은 마이크로 구조물 영역의 가운데 40µm×40µm 의 영역에서 이루어 졌다.

4. 결과 및 토론

본 연구에서 제작된 마이크로 구조 표면 성형을 위한 니켈 금형 인서트들은 Fig. 4 와 같다. Fig.

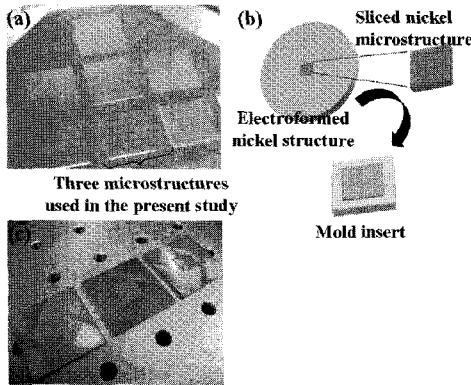


Fig. 4 Fabrication of nickel mold inserts for positive microstructures: (a) photograph of the electroformed nickel microstructures, (b) schematic diagram of the fabrication step for mold inserts, and (c) fabricated three mold inserts

4(a)는 두 번의 니켈 전주도금 공정을 통하여 제작된 양각 마이크로 구조물(Fig. 2(b-ii))을 가지고 있는 니켈 구조물을 보여 주고 있다. 제작된 다양한 크기의 마이크로 구조물 중, 본 연구에서는 세 종류의 마이크로 구조물을 Fig. 4(b)와 같은 기계가공을 통하여 초소형사출성형 공정에 적용될 수 있는 니켈 금형 인서트(Fig. 4(c))를 제작하였다. 이와 같이 제작된 니켈 금형 인서트들은 금형 베이스에 고정되어 초소형사출성형 공정에 이용되었다. 또한 Fig. 2(b-i)에서 나타낸 바와 같은 음각 마이크로 구조물을 가지고 있는 니켈 금형 인서트도 동일한 과정을 통하여 제작되었다.

Fig. 5는 이와 같은 공정을 통하여 제작된 니켈 금형 인서트들이 가지고 있는 마이크로 구조물을 보여 주고 있다. 2.2 절에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 제작된 한 번의 길이가 10 μ m 인 정사각형 형태의 마이크로 구조물들이 일정한 간격으로 배열된 니켈 마이크로 구조물들을 확인할 수 있다. Fig. 5(a)의 음각 마이크로 구조물들은 처음 제작된 실리콘 마이크로 구조물을 모구조물로 한 니켈 전주도금 공정을 통하여 제작되었다. 이와는 달리 Fig. 5(b)의 양각 마이크로 구조물들은 Fig. 5(a)의 음각 니켈 마이크로 구조물을 기반으로 제작되었다. Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이, 부동화 처리를 도입함으로써 두 번째 니켈 전주도금 공정의 모구조물로 이용되는 니켈 음각 마이크로 구조물의 손상 없이, 반대 형상의 니켈 마이크로 구조물들을 성공적으로 제작할 수 있었다. 이와 같은 부동화

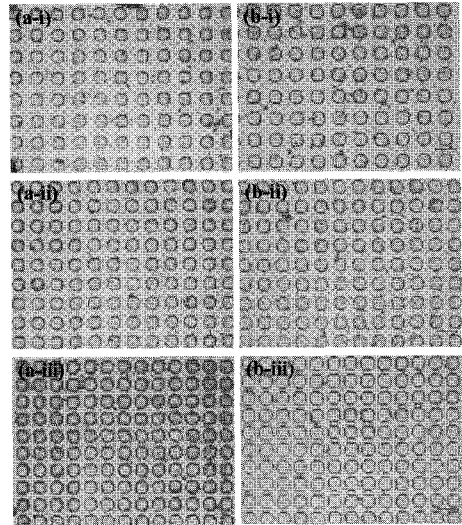


Fig. 5 Micrographs of the nickel mold inserts ($\times 500$): (a) negative microstructures ((a-i) $s=10\mu\text{m}$, (a-ii) $s=8\mu\text{m}$, and (a-iii) $s=6\mu\text{m}$) and (b) positive microstructures ((b-i) $s=10\mu\text{m}$, (b-ii) $s=8\mu\text{m}$, and (b-iii) $s=6\mu\text{m}$)

처리를 이용한 니켈 전주도금 공정은 다른 다양한 마이크로 구조물의 금형 인서트 제작 공정에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

제작된 니켈 금형 인서트를 이용하여 성형된 양각 및 음각 마이크로 구조 표면은 AFM 을 이용하여 측정되었으며, 그 결과들은 Fig. 6-8 에서 확인할 수 있다. Fig. 6은 간격이 8 μ m 인 양각(Fig. 6(a)) 및 음각(Fig. 6(b)) 마이크로 구조물의 표면의 AFM 측정 결과를 보여 주고 있다. 본 연구에서 적용한 공정 조건 중, 조건 I 은 초소형사출성형 공정 중 보압 공정을 제외한 충전 공정만을 수행했을 경우를 나타낸다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 이와 같은 조건에서는 마이크로 구조물의 성형이 거의 이루어지지 않았다. 성형품의 표면에서 마이크로 구조물의 흔적을 확인할 수는 있으나, 금형 인서트가 가지고 있는 마이크로 구조물로의 고분자 수지의 채워짐이 없다고 볼 수 있다. 동시에 충전 후 냉각 공정에서의 온도 감소에 따른 부피 수축에 의하여 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. 하지만, 충전 공정 후 보압 공정이 이루어진 조건 II 및 금형의 온도(163 $^{\circ}$ C)를 고분자 수지의 유리전이온도($\sim 105^{\circ}$ C) 이상으로 상승시킨 후 충전 공정을 진행한 조건 III 의 경우, 보다 향상된 성형성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 조건 II 및 조건 III

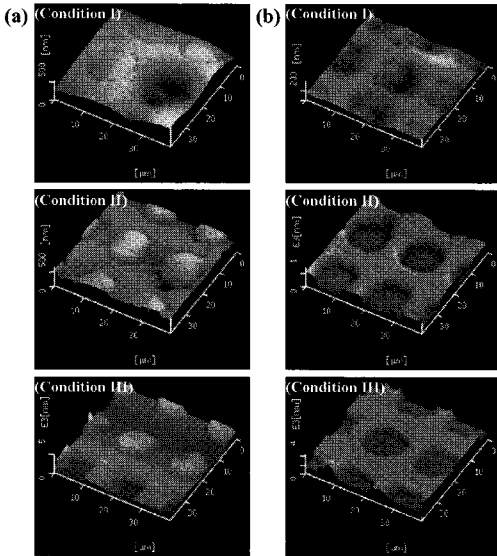


Fig. 6 AFM measurements for microinjection molded microstructures of $s=8\mu\text{m}$: (a) positive and (b) negative microstructures

에서의 성형 결과는 AFM 을 이용하여 측정된 양각(Fig. 7) 및 음각(Fig. 8) 마이크로 구조물의 단면 형상을 통하여 자세하게 확인할 수 있다.

Fig. 7(a) 및 8(a)와 같이 충전 공정 후 보압 공정이 이루어진 조건 II 의 경우에는 마이크로 구조물들의 성형성이 조건 I 에 비해 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 용융된 고분자 수지를 금형의 캐비티 내부로 빠르게 주입하는 충전 공정 후에 보압 공정을 적용하였기 때문이다. 일반적으로 용융된 고분자 수지는 금형 내부로 충전되면서 금형 벽면으로의 열전달 때문에 온도가 내려가게 되며 그 부피가 줄어들게 된다. 이와 같은 부피 감소를 보상해 주기 위하여 충전 공정 후, 사출성형기의 노즐을 통하여 높은 압력을 가해 주는 보압 공정이 필요하게 된다. 이 때 고분자 수지로 가해지는 높은 압력은 성형품의 잔류응력(residual stress) 및 복굴절(birefringence) 등에 영향을 주게 되며, 동시에 초소형사출성형 공정에서는 마이크로 구조물의 성형에도 영향을 주게 된다. 일반적으로 금형 혹은 금형 인서트 근처에서는 고분자 수지의 온도가 급격히 감소하게 되어 접도가 매우 높은 고화층(solidification layer)이 형성이 된다. 따라서, 마이크로 구조물로의 충전이 완전하게 이루어지지 않는 경우가 발생하게 된다. 하지만 금형 벽면에서 떨어진 캐비티 가운데 부분의 고분자 수지는 아직

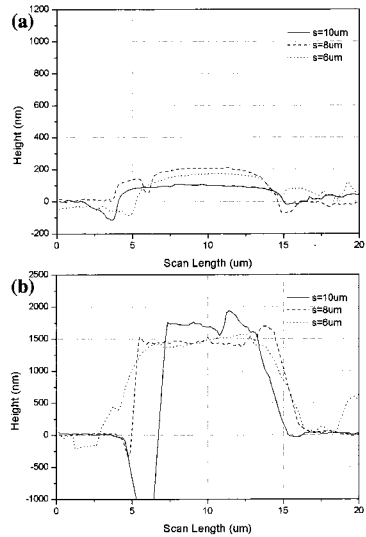


Fig. 7 Cross-sections of the microinjection molded positive microstructures of different distances: (a) condition II and (b) condition III

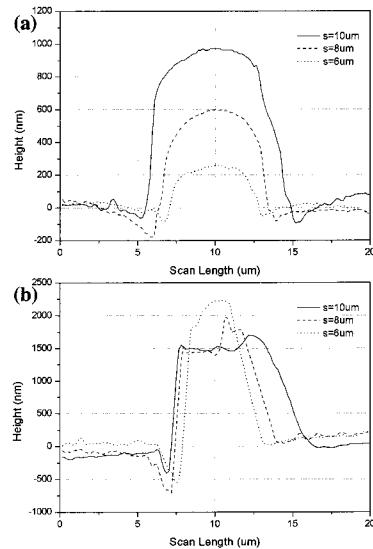


Fig. 8 Cross-sections of the microinjection molded negative microstructures of different distances: (a) condition II and (b) condition III

완전히 식지 않은 상태이기 때문에 보압 공정 중 가해지는 높은 압력의 영향을 받게 된다. 이와 같은 높은 압력이 미충전된 마이크로 구조물로의 고화층의 변형을 일으킬 수 있으며, 이를 통하여 보다 나은 성형성을 얻을 수 있다.²¹ 즉, 조건 II 의 경우 조건 I 에 비하여 향상된 성형성을 보이지만,

완전한 충전은 이루어지지 않았다. 금형 인서트의 마이크로 구조물의 깊이가 약 $2\mu\text{m}$ 이나 성형된 양각 마이크로 구조물은 약 200nm 의 높이를 보이고 있다(Fig. 7(a)). Fig. 8(a)의 음각 마이크로 구조물의 경우, 금형 인서트의 양각 마이크로 구조물($10\mu\text{m}$) 사이의 간격을 그 두께로 가지는 마이크로 격벽(thin wall)을 성형하게 되는데, 그 높이는 200nm 에서 $1\mu\text{m}$ 정도로 확인되었다. 이와 같이 마이크로 구조물의 양각 및 음각 형상에 따라서 성형성의 차이가 나는 이유는 양각 마이크로 구조물의 경우 작은 캐비티 부분을 고분자 수지가 채워야 하기 때문에 상대적으로 성형에 불리하며 좁은 마이크로 구조물 사이에 공기가 갇히는 등의 문제도 발생할 수 있다. 음각 마이크로 구조물의 경우, 성형되는 마이크로 구조물이 서로 연결되어 있는 격자형상이기 때문에 고분자 수지의 흐름 및 성형에 보다 유리하다. 또한 마이크로 구조물의 크기(w) 및 간격(s)에 따른 마이크로 구조물의 성형성 차이는 금형 인서트의 형상에 따른 고화층의 변형²¹ 정도 혹은 고분자 수지의 비등온 스퀴징 유동²² 효과 등의 복합적인 결과로 이해할 수 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

이와 같은 마이크로 구조물의 미충전은 조건 III 과 같이 보다 높은 금형 온도를 적용함으로써 해결할 수 있다. 즉, Fig. 7(b) 및 8(b)의 결과들과 같이 금형의 온도(163°C)를 고분자 수지(PMMA)의 유리전이온도($\sim 105^\circ\text{C}$) 이상으로 상승시킨 후, 충전 공정을 진행하면 보다 뛰어난 성형성을 얻을 수 있었다. 이는 유리전이온도 이상의 금형 온도를 도입함으로써 충전 공정 중 고화층의 형성을 최소화할 수 있으며, 동시에 보압 공정에서 적용되는 압력에 의한 금형 인서트로의 추가적인 충전이 이루어진 결과이다. 성형된 마이크로 구조물들은 조건 II 의 미충전 결과에서 나타나는 둥근 유통단단의 형상과는 달리 폴드 인서트의 면과 맞닿아 생긴 것으로 보이는 평평한 윗면을 보이고 있다. 이와 같이 급속온도조절 시스템 등을 이용한 금형 인서트의 온도 상승은 마이크로 구조물의 충전에 도움을 주는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 초소형사출성형 공정에서는 용융된 고분자 수지의 열손실에 관련된 문제가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서와 같이 금형 인서트 부분의 온도를 상승시켜 충전 공정 중 고화층의 형성을 줄여주거나, 고속사출성형 공정 등의 도입이 필요하다. 하지만 금형 인서트의 온도 상승은 성

형성의 증가를 보여 주지만, 동시에 전체 공정시간이 늘어나게 되어 생산성의 감소라는 단점을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서와 같은 금형의 급속 온도조절시스템의 개발/적용을 통한 공정시간 증가의 최소화 및 뛰어난 성형성 확보는 마이크로 구조 표면의 대량 성형에 필수적일 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 초소형사출성형 공정을 통하여 양각 및 음각 마이크로 구조 표면의 대량 성형에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 니켈 전주도금을 통하여 다양한 크기의 마이크로 구조물을 표면에 가지는 니켈 금형 인서트를 성공적으로 제작할 수 있었다. 특히 부동화 처리를 통한 니켈 전주도금 공정을 이용함으로써 마이크로 구조물의 손상없이 니켈 금형 인서트의 복제를 수행할 수 있었다. 이를 이용한 초소형사출성형 실험을 수행하여 마이크로 구조 표면을 대량 성형하였다. 성형된 표면의 마이크로 구조물은 AFM 을 이용하여 확인하였으며, 이와 같은 표면 성형성 분석을 통하여 초소형사출성형 공정 중 보압 공정 및 금형 온도의 영향을 확인할 수 있었다. 즉, 보다 안정적인 마이크로 구조 표면의 성형을 위하여 유리전이온도 이상의 금형 온도 상승이 필요함을 확인하였다.

본 연구에서 제작된 양각 및 음각 마이크로 구조 표면은 다양한 분야로의 응용이 가능하다. 특히, 광학 요소 부품 개발 및 소수성/친수성 표면 등과 같은 마이크로 구조물에 의한 표면 특성 변화 연구, 세포의 증식, 조작을 위한 표면 제작 연구²³ 등의 응용이 가능하다. 또한 마이크로 대량성형 공정의 하나인 초소형사출성형 공정을 이용함으로써 기존의 마이크로 구조 표면 제작 기술들보다 향상된 생산성 및 안정적인 제작을 그 장점으로 가질 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-20525-0).

참고문헌

1. Beeby, S. P., Ensel, G., Kraft, M. and White, N.,

- "MEMS Mechanical Sensors," Artech House Publishers, 2004.
2. Hierlemann, A., "Integrated Chemical Microsensor Systems in CMOS Technology," Springer, 2005.
 3. 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.
 4. Dunkel, K., Bauer, H.-D., Ehrfeld, W., Hoßfeld, J., Weber, L., Hörcher, G. and Müller, G., "Injection-moulded Fibre Ribbon Connectors for Parallel Optical Links Fabricated by the LIGA Technique," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 301-306, 1998.
 5. Sinzinger, S. and Jahns, J., "Microoptics," Wiley-VCH, 2003.
 6. Merz, L., Rath, S., Piötter, V., Ruprecht, R. and Haußelt, J., "Powder Injection Molding of Metallic and Ceramic Microparts," *Microsystem Technologies*, Vol. 10, No. 3, pp. 202-204, 2004.
 7. Becker, H. and Gärtner, C., "Polymer Microfabrication Technologies for Microfluidic Systems," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 390, No. 1, pp. 89-111, 2008.
 8. Langer, R. and Vacanti, J. P., "Tissue Engineering," *Science*, Vol. 260, No. 5110, pp. 920-926, 1993.
 9. Kim, S. K., Yoo, Y. E., Seo, Y. H., Jae, T.-J., Whang, K.-H. and Choi, D. S., "Fabrication of Ni Stamper based on Micro-Pyramid Structures for High Uniformity Light Guide Panel (LGP)," *Journal of the KSPE*, Vol. 23, No. 9, pp. 174-178, 2006.
 10. Xia, Y. and Whitesides, G. M., "Soft Lithography," *Annual Review of Materials Science*, Vol. 28, pp. 153-184, 1998.
 11. Piötter, V., Bauer, W., Benzler, T. and Emde, A., "Injection Molding of Components for Microsystems," *Microsystem Technologies*, Vol. 7, No. 3, pp. 99-102, 2001.
 12. Yoo, Y.-E., Seo, Y.-H., Je, T. J. and Choi, D. S., "Injection Molding Technology for Micro/Nano Pattern," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 23-29, 2005.
 13. 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.
 14. Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., "Imprint of Sub-25nm Vias and Trenches in Polymers," *Applied Physics Letters*, Vol. 67, No. 21, pp. 3114-3116, 1995.
 15. Löwe, D. and Haußelt, J., "Microengineering of Metals and Ceramics," Wiley-VCH, 2005.
 16. Fu, G., Loh, N. H., Tor, S. B., Tay, B. Y., Murakoshi, Y. and Maeda, R., "A Varioterm Mold for Micro Metal Injection Molding," *Microsystem Technologies*, Vol. 11, No. 12, pp. 1267-1271, 2005.
 17. Chen, S.-C., Jong, W.-R., Chang, Y.-J., Chang, J.-A. and Cin, J.-C., "Rapid Mold Temperature Variation for Assisting the Micro Injection of High Aspect Ratio Micro-Feature Parts using Induction Heating Technology," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, No. 9, pp. 1783-1791, 2006.
 18. Chang, P.-C. and Hwang, S.-J., "Experimental Investigation of Infrared Rapid Surface Heating for Injection Molding," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 102, No. 4, pp. 3704-3713, 2006.
 19. Rha, M., Park, J. M. and Kwon, T. H., "Replication of Nano Dimple Structures by Injection Molding with Rapid Thermal Control System," *Technical Proceedings of the 2008 Nanotechnology Conference and Trade Show*, Vol. 1, pp. 969-972, 2008.
 20. Lee, B.-K., Hwang, C. J., Kim, D. S. and Kwon, T. H., "Replication Quality of Flow-Through Microfilters in Microfluidic Lab-on-a-Chip for Blood Typing by Microinjection Molding," *Transactions of ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, No. 2, Paper No. 021010, 2008.
 21. Yoshii, M., Kuramoto, H. and Ochiai, Y., "Experimental Study of the Transcription of Minute Width Grooves by Injection Molding," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 9, pp. 1587-1593, 1998.
 22. Yao, D., Virupaksha, V. L. and Kim, B., "Study on Squeezing Flow during Nonisothermal Embossing of Polymer Microstructures," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 45, No. 5, pp. 652-660, 2005.
 23. Kim, S. M., Lee, S. H. and Suh, K. Y., "Cell Research with Physically Modified Microfluidic Channels: A Review," *Lab on a Chip*, Vol. 8, No. 7, pp. 1015-1023, 2008.