

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.5.419

# 초음파진동에너지를 이용한 고분자 마이크로구조물의 성형

유현우\* · 이치훈\* · 고종수† · 신보성\*\* · 노치현\*\*\*  
(2007년 12월 27일 접수, 2008년 4월 3일 심사완료)

## Polymer Replication Using Ultrasonic Vibration

Hyun Woo Yu, Chi Hoon Lee, Jong Soo Ko, Bosung Shin and Chi-Hyun Rho

**Key Words :** Ultrasonic Molding(초음파 성형), Nickel Mold(니켈몰드), Electroforming(전주도금), Polymer Replication(고분자 복제), Microstructure(마이크로구조물), Polymethyl Methacrylate(PMMA)

### Abstract

A new polymer replication technology using ultrasonic vibration is proposed and demonstrated. A commercial ultrasonic welder has been used in this experiment. Two different types of nickel molds have been fabricated: pillar type and pore type microstructures. Polymethyl methacrylate (PMMA) has been used as the replication material and the optimal molding time was 2 sec and 2.5 sec for pillar-type and pore-type micromolds, respectively. Compared with the conventional polymer micromolding techniques, the proposed ultrasonic micromolding technique has the shortest processing time. In addition, only contact area between micromold and polymer substrate is melted so that the thermal shrinkage can be minimized. The fabricated PMMA microstructures have been very accurately replicated without vacuum. The proposed ultrasonic molding technique is a good alternative for high volume production.

### 1. 서 론

최근 고분자 미세성형기술은 디지털 카메라용 비구면 렌즈, LCD 모니터용 도광판, DVD 용 회절 격자 등의 전자부품 분야와 DNA 칩, 단백질 칩, LOC (Lab on a chip) 등의 바이오 분야에서 핵심 제조 기술로 널리 적용되고 있다. 특히 고분자는 저렴한 재료단가, 대량생산의 용이함, 제조공정의 단순함, 뛰어난 화학적 안정성, 우수한 광학특성 및 뛰어난 생체적합성 등의 장점으로 인하여 그 적용 분야가 날로 확대되고 있다.<sup>(1)</sup>

대표적인 고분자 미세성형기술로는 핫엠보싱, 사출성형, 캐스팅 등이 있으며, 각종 산업과 연구 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 핫엠보싱과 캐스팅 기술은 나노미터 수준 패턴의 성형이 가능하기 때문에, 마이크로 나노 가공분야에서 큰 각광을 받고 있다. 하지만 이와 같은 기술들은 짧게는 수십 초에서 길게는 수십 분의 공정시간이 소요되고, 경화과정에서 비교적 큰 수축현상이 발생하는 문제점을 안고 있다.<sup>(2-7)</sup>

본 논문에서는 초음파 진동에너지를 이용하여 수 초 이내에 고분자 마이크로 구조물을 제작하는 새로운 고분자 성형기술을 소개한다. 연구를 위해 상용 초음파 용착기를 이용하였다. 초음파 용착기 공구흔의 상하진동 시 마찰면에서 발생하는 열을 이용하여 열가소성 고분자를 성형한다. 본 논문에서는 상술한 방법을 적용하여 고분자 마이크로구조물을 제작하고, 공정조건의 변화에 따른 구조물의 형상변화에 관하여 논의한다.

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
부산대학교 정밀정형및금형가공연구소(ERC/NSDM)  
E-mail : mems@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2488 FAX : (051)514-0685

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소(ERC/NSDM)

\*\*\* (주)소닉스코리아

### 2. 초음파에너지를 이용한 성형원리

초음파는 20 kHz 이상의 진동주파수를 가지는 것으로써 이러한 초음파는 산업분야에서 플라스틱이나 금속의 용착 등에 적용되어왔다. 그 중 플라스틱 용착은 공구흔의 상하 초음파 진동에 의해 나타나는 플라스틱의 내부발열연화 용융현상에 따라 두 개의 플라스틱이 접합되는 원리이다.<sup>(8)</sup>

Fig. 1 은 플라스틱 초음파용착기를 이용하여 고분자 마이크로구조물을 성형하는 개념도를 보여준다. 금속지그 위에 테이프를 사용하여 고분자 판을 고정 한 후 그 위에 마이크로 크기의 패턴을 가지는 몰드를 정렬한다. 이후 공구흔이 니켈몰드의 위쪽을 가압한 후 초음파에너지를 인가하면 고분자와 니켈몰드가 맞닿은 접촉면에서 마찰열이 발생한다. 발생된 마찰열은 고분자를 국부적으로 녹이고 공구흔에 의한 압력으로 몰드가 고분자 판에 박히며 수 초 이내에 몰드의 마이크로 패턴이 고분자에 전사된다. 마찰열은 몰드와 고분자가 맞닿은 면에서 국부적으로 발생하기 때문에 고분자의 수축현상은 상대적으로 작게 발생한다.

### 3. 몰드 제작과 성형

#### 3.1 니켈 몰드의 설계와 제작

본 연구를 수행하기 위한 마이크로 패턴을 가지는 몰드를 제작하기 위해 Fig. 2 와 같이 양각과 음각의 마이크로 패턴을 디자인하고 마스크를 제작하였다. 양각과 음각의 각 패턴은 가로 70 μm, 세로 70 μm의 정사각형으로 디자인 되었으며 패턴간 간격은 30 μm이다.

Fig. 3 은 니켈 마이크로몰드 제작을 위한 공정을 나타낸다. 먼저, 실리콘웨이퍼에 사진식각공정을 이용하여 감광막을 패터닝한다(Fig. 3(a)). 다음으로 DRIE (Deep Reactive Ion Etching)공정을 이용하여 50 μm의 깊이로 실리콘 건식식각공정을 수

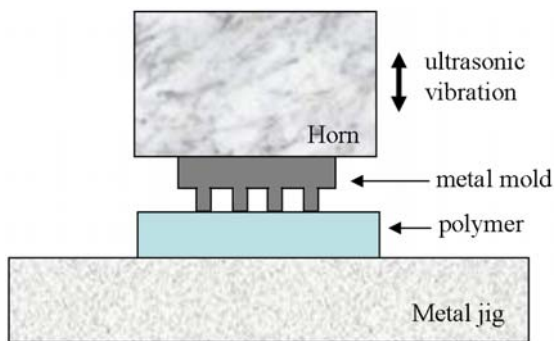


Fig. 1 Schematic view of the polymer forming process using Ultrasonic welder

행한다(Fig. 3(b)). 패턴된 감광막은 DRIE 공정에서 실리콘의 식각방지막 역할을 한다. 이 후 산소플라즈마 에싱공정을 이용하여 실리콘웨이퍼 위의 패턴된 감광막과 DRIE 공정 중 증착된 불화탄소박막을 제거한다(Fig. 3(c)). DRIE 공정으로 실리콘 미세구조물의 측면에 발생한 물결모양의 나노스칼롭(nanoscallop)을 제거하기 위하여 8,000 Å 두께의 실리콘 산화막을 성장시킨 후(Fig. 3(d)), 상온의 불산 용액에서 10 분 동안 담궈 실리콘산화막을 제거한다(Fig. 3(e)). 다음으로 스퍼터를 사용하여 Cr 과 Cu 를 각각 1,000 Å 의 두께로 순차적으로 증착한다(Fig. 3(f)). 그리고 설파민산 기반의 니켈도금욕을 사용하여 니켈전도도금을 수행한다(Fig. 3(g)). 도금공정은 55 °C 의 온도에서, 20 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도로 20 시간 동안 수행되었으며, 그 결과 약 500 μm 두께의 니켈몰드를 제작하였다. 이 후 80°C, 25 wt%의 KOH 용액에 웨이퍼를 넣어 실리콘을 식각한다. 약 8 시간의 식각공정으로 실리콘이 완전히 제거되어 니켈몰드만 남게 된다(Fig. 3(h)).

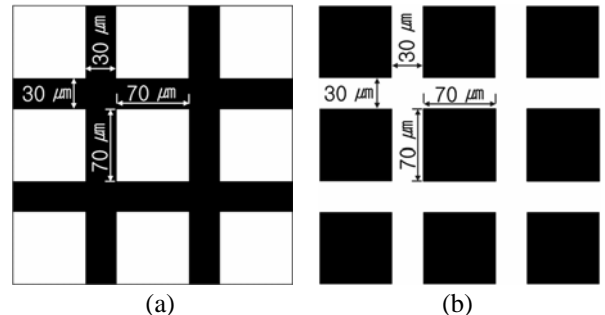


Fig. 2 The designed pattern shapes for Ni mold and their dimensions: (a) pillar patterns; (b) pore patterns

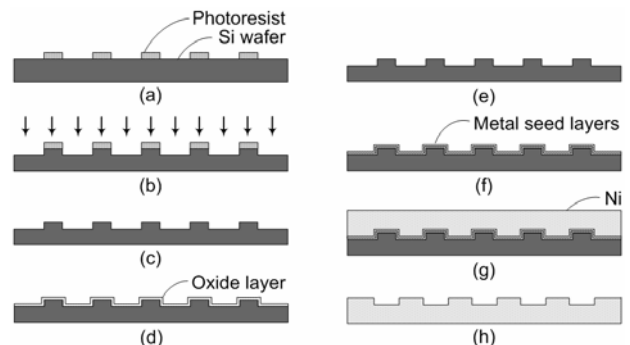


Fig. 3 The fabrication process of Ni mold: (a) photolithography; (b) Si dry etching; (c) plasma ashing; (d) oxide layer growth; (e) remove the oxide layer; (f) Cr/Cu seed layer deposition onto the Si wafer; (g) Ni electroforming process; (h) remove the Si and Cr/Cu seed layer

Fig. 4는 제작된 니켈몰드를 초음파용착기의 공구홀에 장착하기 적합한 크기인 1.0 cm × 0.9 cm 로 절단한 몰드의 사진과 함께, 몰드의 표면에 형성되어 있는 양각 및 음각구조 주사전자현미경 사진을 나타낸다.

3.2 성형실험

Fig. 5는 본 연구를 위해 사용된 2 kW 용량의 상용 초음파용착기(Sonics Korea)와 용착부의 확대 사진을 나타낸다. 상용 초음파용착기를 사용하기 때문에 바꿀 수 있는 실험조건이 매우 제한적이다.

실험 시 공구홀의 진폭을 20 μm 로 고정한 상태로, 초음파 인가 시간에 따른 고분자 성형 상태를 확인하는 방법으로 최적의 성형조건을 찾아내었다. 본 실험에 사용된 고분자는 마이크로 나노 성형에 가장 많이 사용되는 물질 중 하나인 PMMA 를 사용하였다. 성형을 위한 몰드와 PMMA 의 정렬은 Fig. 1에 상세히 도시되어 있다. 성형을 위하여 먼저 2 cm × 2 cm 크기의 PMMA 를 지그 위에 올려 놓은 후, 몰드를 PMMA 위에 정렬한다. 이 상태에서 공구홀을 아래로 이동시켜 몰드의 윗면을 가압한 후 초음파를 인가한다. 가압에 의하여 공구홀

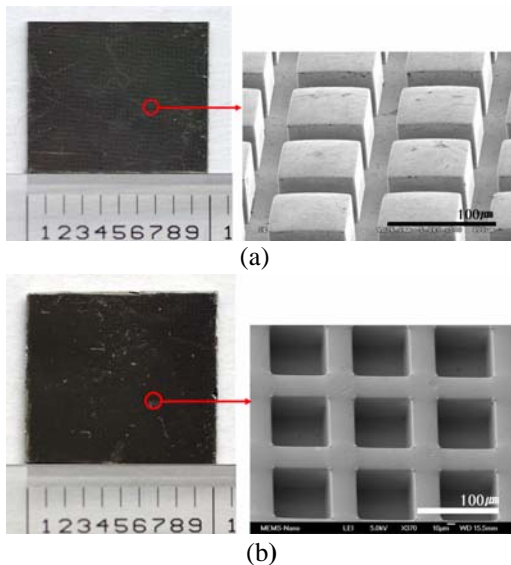


Fig. 4 Fabricated nickel micromolds: (a) pillar type; (b) pore type



Fig. 5 Plastic ultrasonic welder system

과 물리적으로 접촉한 몰드로 초음파진동이 전달되고 구조물과 PMMA 기판 사이에 발생하는 마찰열에 의해 몰드의 마이크로 구조물과 접촉하는 PMMA 영역에서만 국소적으로 용융이 발생한다. 초음파는 단계적으로 0.5 초씩 증가시키며, 1 초에서 2.5 초까지 변화시켰다. 성형된 시편은 주사전자현미경을 이용하여 형상을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 양각형 몰드를 이용한 성형

Fig. 6은 양각몰드를 사용한 성형실험의 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 1 초 동안 초음파를 인가한 후의 형상이다. 초음파로 진동하는 니켈몰드에 의해 마찰면에서 PMMA 의 용융이 일어나 양각패턴 사이의 공간으로 채워졌지만 초음파 인가 시간이 너무 시간이 짧아 충분한 채움이 이루어지지 않았다. Fig. 6(b)는 1.5 초 동안 초음파를 인가한 후의 PMMA 의 형상이다. 1 초의 경우보다 향상된 표면 형상을 보였지만 부분적으로 성형이 덜 된 부분이 관찰되었다.

Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 각각 2 초와 2.5 초 동안 초음파를 인가한 후의 PMMA 마이크로 구조물의 형상이다. 두 조건 모두 PMMA 가 완전히 성형되었다는 것을 보였지만, 초음파를 2.5 초 동안 인가한 경우 과용융된 PMMA 가 몰드와 장시간 접촉하고 있음으로 인해 PMMA 마이크로 구조물의 일부가 니켈몰드에 점착되는 현상이 관찰되었다. 이러한 점착은 성형된 PMMA 기판을 니켈몰드로부터 분리하는 과정에서 PMMA 마이크로 구조물의 모서리 또는 표면을 파손시키는 원인이 되며, Fig. 6(d)에서 파손된 부분을 확인할 수 있다. 이러한 점착문제는 니켈몰드의 표면에 점착방지막을 코팅하는 방법으로 해결할 수 있다.

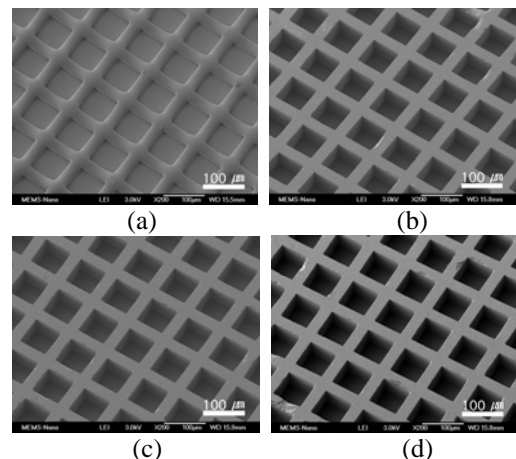
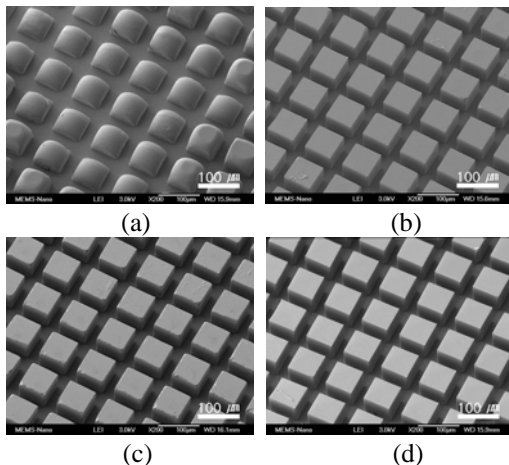


Fig. 6 SEM images of the replicated PMMA structure in case of using the pillar shape Ni mold; (a) 1 sec; (b) 1.5 sec; (c) 2 sec; (d) 2.5 sec

#### 4.2 음각형 몰드를 이용한 성형

Fig. 7은 음각몰드를 사용한 성형 실험의 결과를 보여준다. Fig. 7(a)는 1 초 동안 초음파를 인가하여 성형한 PMMA 마이크로 구조물의 형상이다. Fig. 6(a)에서와 같이 초음파로 진동하는 니켈몰드에 의해 마찰면에서 PMMA의 용융이 시작되었으나, 초음파 인가 시간이 너무 짧아 PMMA가 몰드의 미세 패턴 사이로 충분히 채워지지 않았다. Fig. 7(b), (c), (d)는 각각 1.5 초, 2 초, 2.5 초 동안 초음파를 인가하여 성형한 PMMA 마이크로 구조물 형상을 나타낸다. 1.5 초와 2 초의 경우 성형된 PMMA의 사각기둥 형상이 부분적으로 덜 성형된 부분이 관찰되었지만, 2.5 초의 경우 모서리 부분까지 정확히 성형된 형상을 얻을 수 있었다.

모서리 부분까지 충분한 성형하는데 양각형 몰드인 경우 2 초가 소요되는 반면, 음각형 몰드인 경우 2.5 초가 소요되었다. 음각형 몰드를 사용하는 경우 양각형 몰드에서 보다 0.5 초의 공정시간이 더 필요한 이유는 양각형 몰드의 경우 성형 시 몰드의 사각기둥 사이로 공기가 갇히지 않고 쉽게 빠져나가는 반면, 음각형 몰드의 경우 사각 함몰 형상의 내에 갇힌 공기가 빠져나가는 데 상대적으로 더 많은 시간이 필요하기 때문으로 사료된다. 핫엠보싱, 사출성형, 캐스팅과 같은 여타의 다른 마이크로 가공법에서는 함몰형상에 갇힌 공기를 제거하기 위하여 고분자 성형 시 진공분위기를 형성한다. 하지만, 본 논문에서 제안하는 초음파 진동을 이용한 고분자 성형법은 음각형 몰드 구조물에 갇힌 공기를 제거하기 위하여 진공을 형성하지 않더라도 우수한 성형 결과를 얻을 수 있었다. 그 이유는 음각형 몰드 구조물 내부에 갇힌 공기가 초음파 영역대의 빠르고 강한 진동의 영향으로 몰드와 고분자의 계면 사이로 빠져나가기 때문으로 사료된다.



**Fig. 7** SEM images of the replicated PMMA structure in case of using the pore shape Ni mold; (a) 1 sec; (b) 1.5 sec; (c) 2 sec; (d) 2.5 sec

## 5. 결 론

초음파 진동 에너지를 이용하여 고분자 마이크로 구조물을 성형하는 새로운 제작방법을 제안하였고, 이를 실험적으로 검증하였다. 양각 및 음각 구조물이 형성되어 있는 두 종류의 니켈 몰드를 이용하여 성형실험을 한 결과, 양각형 및 음각형 몰드에서 각각 2 초와 2.5 초의 공정시간에서 최적형상이 구현되었다. 이러한 공정시간은 기존의 여타 고분자 마이크로 성형방법에 비하여 현저히 짧은 것으로서, 성형 공정에 소요되는 시간을 기준으로 보면 현재까지 개발된 성형 방법 중 가장 빠르다. 또한 몰드와 고분자가 접촉하는 영역에서만 부분적으로 용융이 일어나기 때문에 여타 고분자 가공법에 비하여 재료가 열영향을 적게 받으며, 열수축 또한 최소화할 수 있다.

여타 고분자 가공법에서는 성형 시 미세한 패턴을 충실히 복제하기 위하여 진공분위기 내에서 공정을 진행하지만, 본 논문에서 제안하는 초음파 성형법은 몰드의 마이크로 구조물이 양각형 또는 음각형에 무관하게 진공분위기 내에서 공정을 하지 않더라도 성형이 충실히 이루어짐을 확인하였다. 일반적인 고분자 마이크로 가공법이 진공을 형성하는데 많은 시간이 소요되는 것을 감안하면, 본 초음파 성형법의 공정시간은 더더욱 빨라지게 되며 부가적인 진공시스템을 구비하지 않아도 되는 이점이 있다. 그러므로 본 논문에서 제안한 초음파 성형법은 짧은 공정시간으로 인하여 여타 가공방법에 비해 양산 공정에서 비교우위를 점할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-11051-0)

## 참고문헌

- (1) Chang-Soo Lee, Chang-Hyun Kim, Hyun-Woo Shim, Ji-Hye Lee and Jae Hoon Jung, 2006, "Fabrication of Polymeric Microfluidic Chip and Its Surface Modification," *Polymer Science and Technology*, 17, pp. 191~206.
- (2) Yun Dong Hwang, Sung Woon Cha and Jung Hyun Lee, 2001, "A Study on Measurement of Shrinkage of Molded Plastics in a Microcellular Foaming Injection Molding Process," *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting C*, pp. 621~626.
- (3) Lin, C.-R. Chen, R.-H. and Hung, C. 2003,

- “Preventing Non-Uniform Shrinkage in Open-Die Hot Embossing of PMMA Microstructures,” *Journal of Materials Processing Technology*, 140, pp. 173~178.
- (4) Jong Soo Ko, Hyun C. Yoon, Haesik Yang, Hyeon-Bong Pyo, Kwang Hyo Chung, Sung Jin Kim, Youn Tae Kim, 2003, “A Polymer-Based Microfluidic Device for Immunosensing Biochips,” *Lab Chip*, 3, pp. 106~113.
- (5) Holger Becker, Ulf Heim, 2000, “Hot Embossing as a Method for the Fabrication of Polymer High Aspect Ratio Structures,” *Sensors and Actuators A Physical*, 83, pp. 130~135.
- (6) Rean-Der Chien, 2006, “Hot Embossing of Microfluidic Platform,” *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 645~653.
- (7) Tang, Y., Tan, W.K., Fuh, J.Y.H., Loh, H.T., Wong, Y.S., Thain, S.C.H. and, Lu, L., 2007, “Micro-Mould Fabrication for a Micro-Gear via Vacuum Casting,” *J. Mater. Process Technol.*, 192-193, pp. 334~339.
- (8) Shih-Jung Liu, Ying-E Tsai, Steve Wen-Neng Ueng, Err-Cheng Chan, 2005, “A Novel Solvent-Free Method for the Manufacture of Biodegradable Antibiotic-Capsules for a Long-Term Release Using Compression Sintering and Ultrasonic Welding Techniques,” *Biomaterials.*, 26, pp. 4662~4669.