

# 펄티어 소자를 이용한 나노 사출 금형의 능동형 온도 제어

신홍규<sup>1</sup>· 권종태<sup>1</sup>· 홍남표<sup>2</sup>· 서영호<sup>3</sup>· 김병희<sup>#</sup>

## A method for Thermal Control of Nano Injection Molding using the Peltier Devices

H. Shin, J. Kwon, N. Hong, Y. Seo, B. Kim

(Received May 6, 2008)

### Abstract

The injection molding process has high accuracy and good reproducibility that are essential for mass production at low cost. Conventional molding processes typically use the water-based mold heating and air cooling methods. However, in the nano injection molding processes, this semi-active mold temperature control results in the several defects such as air-flow mark, non-fill, sticking and tearing, etc. In order to actively control temperature of the molds and effectively improve the quality of the molded products, the novel nano injection molding system, which uses active heating and cooling method, has been introduced. By using the Peltier devices, the temperature of locally adiabatic molds can be controlled dramatically and the quality of the molded patterns can be improved.

**Key Words** : Injection Molding, Peltier Device, Active Heating and Cooling Method

### 1. 서 론

사출성형은 열가소성 폴리머를 이용하여 나노 구조물이나 광학회절 제품, Bio-MEMS 제품 등을 높은 정밀도를 필요로 하는 제품을 저렴한 생산 비용으로 대량생산 할 수 있는 효과적인 공정이 다[1~4]. 특히, 폴리머(polymer)는 사출성형에 가장 적합한 재료이며, 대량생산을 위해 높은 재연성과 성형성의 유지가 쉬운 재료이다. 또한, 폴리머는 물리적 영향과 환경적 영향에 따라 복잡한 형태의 거동을 하는 물질이다. 따라서, 고세장비를 갖는 마이크로-나노 구조물을 사출 성형할 경우, 사출 금형의 온도가 가장 중요한 요소가 되며, 정량화된 온도 조건이 가해지지 않을 경우, 사출된 폴리머 상에 붙거나(sticking) 뜯어짐(tearing)과 같은

문제점이 발생한다.

고세장비의 마이크로-나노 구조물에 대한 사출 성형 시 가장 중요한 조건은 금형의 온도제어이다. 금형의 온도제어는 폴리머의 유리전이 온도( $T_g$ ) 보다 높을 경우, 일반적으로 성형성이 가장 좋다는 사실은 이미 선행 연구자들에 의해 발표된 논문에서 언급된 바 있다[5~7]. 금형의 온도가 폴리머의 유리전이온도 보다 낮을 경우, 높은 압력이 요구되는 반면 유리전이온도 이상일 경우 폴리머의 유동성이 증가하여 낮은 압력에도 고세장비의 마이크로 구조물이 성형된다[5]. 그러나 기존 사출성형 공정의 금형 온도제어를 위해 사용되는 히팅 코일과 워터 재킷을 이용한 가열과 냉각은 고 세장비(high aspect ratio)의 나노 구조물에 대해서 전사특성이 저하된다. 또한, 폴리머 전사

1. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과

2. 강원인력개발원 컴퓨터응용기계과

3. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

# 교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부,

E-mail: kbh@kangwon.ac.kr

량을 증가시키기 위해서 유리전이온도 이상으로 금형온도를 높일 경우, 사출 후 이형 시 금형의 빠른 냉각이 어려워 오랜 시간이 소요된다. 따라서, 사출성형 공정에서 고 세장비의 나노 구조물을 성형하기 위해서는 금형온도의 빠르고 정밀한 제어가 요구된다.

최근 나노 성형에 대한 기술적 요구가 증가함에 따라 금형온도를 능동적으로 제어하여 전사성을 높이기 위한 연구가 진행되었다. MEMS 히터 및 기체화염 전열로 등의 금형 온도제어 방법은 나노 단위의 구조물에 대해서 쉽게 성형할 수 있으나, 냉각 시 빠르고 정확한 금형온도를 유지할 수 없기 때문에 고 세장비를 갖는 나노 구조물에 대해서는 성형성이 저하된다.

본 연구에서는 빠른 가열과 냉각이 가능한 펠티어 소자(Peltier devices)를 이용하여 사출 금형의 온도를 능동적으로 제어하였다. 펠티어 소자의 열 효율을 높이고 금형 마스터의 교체를 용이하게 하기 위해서, 몰드가 쉽게 분리되는 코어형으로 설계되었으며, 금형 내의 온도보상은 열화상 카메라를 이용하여 최적 온도조건을 도출하였다. 제작된 마이크로 사출성형 시스템은 마이크로-나노 패턴을 몰드 스탬퍼로 이용하여 PMMA 상에 인위적인 조건하에서 성형실험을 수행하였다. 사출된 패턴은 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하여 최종적인 결과물을 검증하였다.

## 2. 마이크로-나노 사출성형 시스템 설계

### 2.1 사출성형 시스템의 구성

Fig. 1은 마이크로 패턴의 성형을 위한 간이형 사출성형 시스템의 개략도이다. 자체 제작된 간이형 마이크로-나노 사출성형 시스템은 제어가 쉽고 사출압의 조절이 용이한 풀린지 방식이다. 사출성형 시스템은 크게 호퍼를 통해 폴리머를 유입하기 위한 작동부와 금형 및 폴리머 공급부의 온도 제어부로 구성된다. 또한, 온도측정을 위한 열전소자와 폴리머 공급량 및 유압 실린더의 위치를 제어하는 리밋(limits) 센서 등이 설치되어 있으며, 모든 시스템과 센서를 컨트롤 하기 위한 메인 컨트롤러와 전원 공급장치가 설치되어 있다.

2.2 국부적 금형 가열을 위한 금형-코어 제작  
국부적으로 금형을 가열과 냉각이 빠르며, 독립

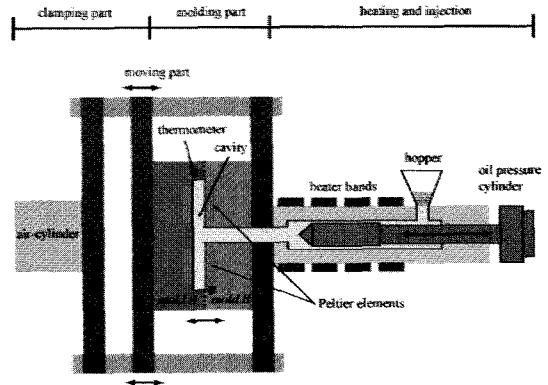


Fig. 1 Schematic illustration of micro injection molding system

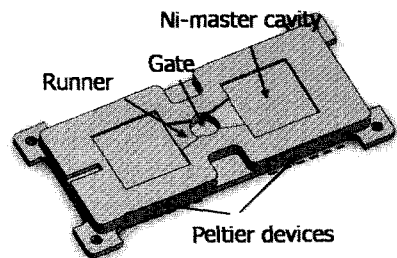


Fig. 2(a) 3D-modeling of mold-core

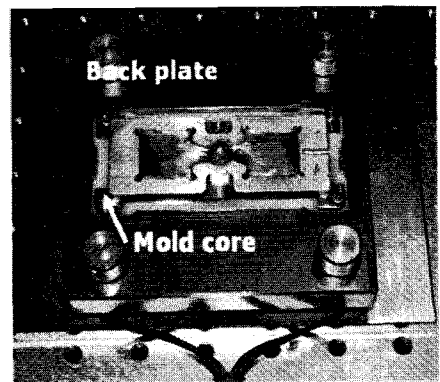


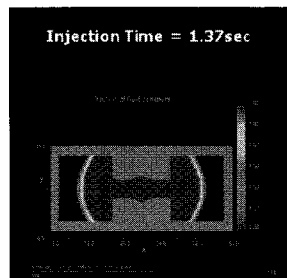
Fig. 2(b) Real image of mold core

과 분해가 용이한 금형을 제작하기 위해서, 열적-독립형 (thermal independence) 코어방식을 선택했다. Fig. 2에서와 같이 스탬퍼 장착을 위한 금형 코어 (Fig. 2(a)), 하부에서 금형 코어를 가열하는 열전소자와 사출성형기와 결합되는 고정판으로 구성된다. Fig. 2(b)는 실제 금형 코어와 하부의 고정판과 연결된 사진이다. 스탬퍼 장착을 위한 캐비티의 크기는 10(w)x10(h)x1(t)mm로 제작하였다.

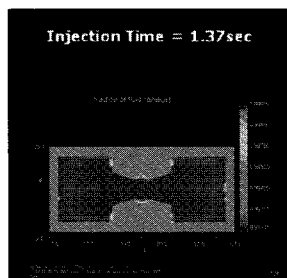
폴리머 레진(polymer resin)을 캐비티로 전달하는 역할을 하는 러너(runner)는 FDM 해석을 통하여 접근하였다. 유동해석 프로그램은 Flow 3D를 이용하였다. 성형해석의 변수로는 러너의 형상(직석/디퓨저)에 따라 해석하였으며, 폴리머의 온도조건 및 러너표면과의 접촉각 및 표면장력을 적용하여 동일 시간대에서 주어진 레진 충전량의 차이로 결과를 판단하였다. Fig. 3에서와 같이,  $t=1.37\text{sec}$ 에서 직선형상의 경우 레진이 캐비티 면적의 절반 가량을 채운 반면, 디퓨저 형상은 전체 면적을 고르게 레진이 분포함을 확인하였다. 이는 게이트에서 나온 레진이 러너를 지남에 따라 접촉 면적이 점진적으로 증가하였기 때문에 레진의 확산이 직선형상에 비해 빠르게 이루어졌으며 레진의 유동량이 증가하였다.

스탬퍼 캐비티의 온도를 빠르게 가열하고 냉각하기 위하여 캐비티 하단에  $200\mu\text{m}$ 의 간격으로 펄티어 소자가 삽입할 수 있는 홈을 가공하였다. 스탬퍼와 펄티어 소자를 직접 연결하면 열손실이 최소화되지만, 사출 시 강한 압력에 의해 펄티어 소자가 파손되기 때문에  $200\mu\text{m}$ 의 간격을 두고 설치하였다. 사용된 펄티어 소자는  $30\times 30\text{mm}$ 의 크기이며, 용량은  $35.4\text{W}$ , 상판과 하판의 온도차( $\Delta T$ )는  $68^\circ\text{C}$ 이다. 펄티어 소자는 세라믹 절연층을 사이에 두고 P형 반도체와 N형 반도체 전체가 직렬로 연결된 단일 소자로, 펄티어 내의 PN커풀이 많을수록 용량이 비례적으로 증가한다. 펄티어 소자의 발열면 온도가 T라고 가정하면, 반대면은  $T-\Delta T$ 의 온도를 갖는다. 전류의 방향에 따라 소자내의 극성이 바뀌어 냉각면과 가열면을 선택적으로 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다.

제작된 몰드의 온도분포를 측정하기 위하여 전자 온도계와 열화상 카메라를 이용하였다. 하단에 펄티어 소자가 부착된 상태에서 온도를 측정할 결과 예상보다 느린 응답속도를 보였다. 특히, 펄티어 소자에서 발생하는 열이 스탬퍼 캐비티로 집중되지 않았다. 또한, 펄티어 소자에서 발생한 열은 몰드코어를 연결하는 고정판으로 전달되어 열 손실이 발생하였으며 느린 응답속도의 원인이 되었다. 펄티어 소자에서 발생한 열이 고정판으로 전달되는 것을 방지하기 위하여 몰드코어와 고정판 사이에 뛰어난 단열 성능을 지닌 테프론(열전도도:  $0.22\text{W/m}\cdot\text{k}$ ) 단열재를 삽입하였다. 테프론의 용융온도는  $300^\circ\text{C}$ 이상이기 때문에 폴리머 사출성형 시 온도에 의한 변형이 없다. 테프론의 삽입



(a) Straight shape



(b) Diffuser shape

Fig. 3 FDM analysis with respect to runner shapes

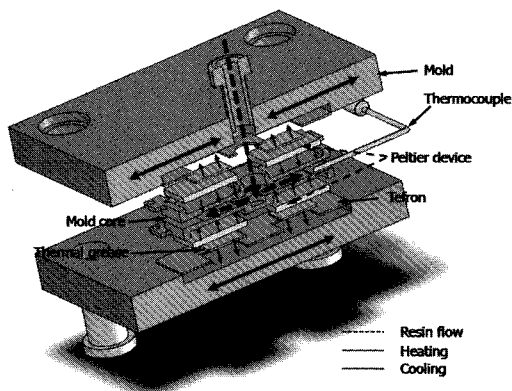


Fig. 4 Assembly image of mold and mold core

유무에 따라 스탬퍼 캐비티의 설정온도까지 도달하는 시간차는 약 10초가 발생하여 테프론이 몰드 코어와 고정판 사이의 열전달을 차단함을 확인하였다. 또한, 펄티어 소자에서 발생하는 열을 스탬퍼 캐비티 내로 빠르게 전달하기 위하여 펄티어 소자와 몰드 코어에 써멀 그리스(thermal grease)를 도포하여 열 전달을 향상시켰다.

Fig. 4는 금형코어와 펄티어 소자 및 고정판을 조립한 그림이다. 금형 표면에 설치된 열전대(thermo couple, pt100)를 통해 표면온도가 검출되며

검출된 온도 데이터는 PID 제어를 통하여 펠티어 소자의 온도를 조절하였다.

### 2.3 금형의 온도제어

사출성형에서 충전율에 영향을 주는 인자로는 온도, 압력, 시간, 속도 및 금형의 크기 등이 있다. 사출성형에서 이러한 인자들은 서로 연관성이 있기 때문에, 각 인자 간의 교호 작용에 의해서 최적 사출성형이 이루어진다[8]. 그 중 금형 온도는 금형 내에서 폴리머 레진의 유동성을 향상시켜 보다 좋은 성형 결과를 얻는데 기여한다.

본 연구에서는 금형 온도를 기존 열히터와 냉각수에 의해 조절하는 방법 대신에 펠티어 소자를 이용하여 국부적으로 금형의 온도를 빠르게 상승과 하강이 가능하도록 제어하였다. 펠티어 소자의 설정 온도를 효율적으로 유지하기 위해 PID 제어를 하였다. 제어기에서 발생하는 동작 신호를 직접적으로 펠티어 소자가 작동하는 최적 전류와 전압의 환경으로 전달하기 위해서 L298 칩을 이용하여 브릿지 회로를 구성하였다. 또한, 컨트롤러에서 발생하는 전력 손실과 발열반응을 저하시키기 위해서 트랜지스터의 일종인 MOSFET 드라이버를 구성하였다. 외부에서 신호를 빠르고 편리하게 입력하기 위해서 터치패널 방식으로 제작하였다. 제어기의 초기 설정은 금형 표면에 내장된 열전대를 통하여 측정된 금형의 온도는 AD 변환 후, 미리 저장된 표준 온도값과 비교하여 초기 금형 온도를 설정한다. 이 값을 바탕으로 PID 연산을 통해 제어기에서 펠티어 소자로 PWM 신호를 발생하여 원하는 온도만큼 상승 또는 하강시키는 원리로 작동한다.

Fig. 5는 펠티어 소자를 가열 및 냉각 공정을 수행하였을 경우의 금형 내의 온도분포를 열화상 카메라(NEC, Th5104)를 이용하여 측정된 결과이다. Fig. 5(a)와 같이 펠티어 소자를 가열하였을 경우, 금형 캐비티 내에서만 설정 온도로 열 분포가 나타남을 확인하였다. 반면에 펠티어 소자를 냉각하였을 경우(Fig. 5(b)), 금형 캐비티와 더불어 금형 외부까지 온도가 감소하였음을 확인하였으며, 주변의 열이 완벽하게 차단됨을 검증하였다.

### 2.4 펠티어 소자를 이용한 사출성형

본 연구에서 사용된 폴리머 재료는 PMMA ( $T_g=104^{\circ}\text{C}$ )이다. 금형의 온도 제어를 위해 사용된 펠티어 소자의 효과와 성능을 확인하기 위하여,

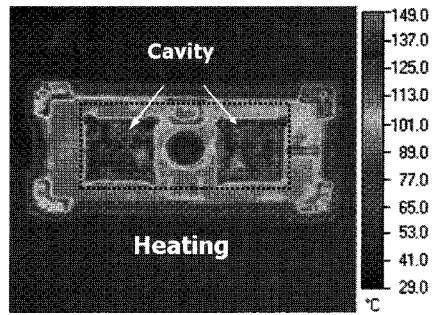


Fig. 5 (a) Heat distribution for heating process (peltier voltage : 12V, 1min)

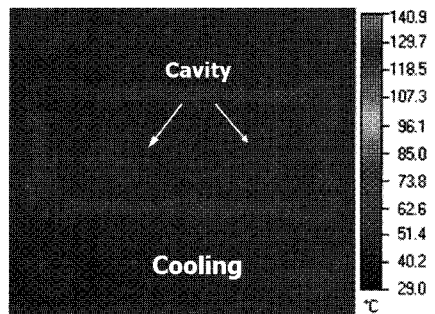
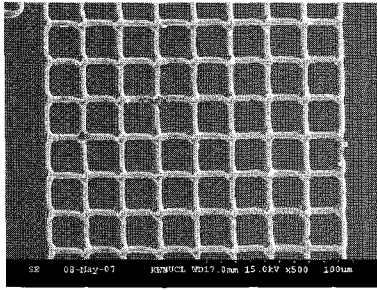


Fig. 5 (b) Heat distribution for cooling process (reverse-side peltier voltage : 12V, 1min)

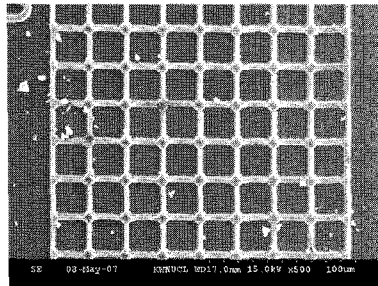
Table 1 Experimental condition for injection molding

	A	B	C
Heating temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	100	100	120
Cooling temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	100	80
Feeding temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	200		
Cylinder pressure	60kgf/cm <sup>2</sup>		
Cycle time (sec)	63		
Injection time (sec)	3		

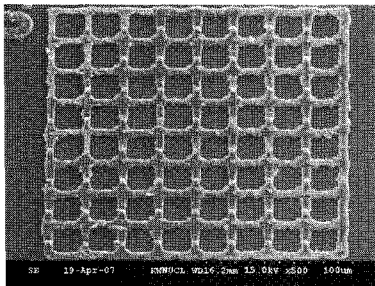
Table 1 과 같이 간단한 세가지 조건에서 실험을 수행하였다. PMMA의 유리전이온도 범위의  $100^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하는데 소요 시간은 약 40 초이며, 성형을 위해 유지하는 시간은 3 초로 유지한 후, 냉각을 위해 설정된 값으로 온도를 변화시켰다. PID 제어를 통하여 냉각-유지 시 온도 변화는 약  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이다. 사용된 금형 스탬프는 Deep RIE 공정과 열산화 공정(thermal oxidation)으로 제작된 실리콘 마스터이다. 20mmx20mm 실리콘 상에 사각, 원, 트랜치(trench)와 격자(grating) 및 방사형 원형상 등 다양하게 제작하였다. 또한, 패턴의 크기는 마이크



(a) 100°C heating & 80°C cooling(Condition A)



(b) 100°C heating & 100°C cooling(Condition B)



(c) 120°C heating & 80°C cooling(condition C)

Fig. 6 FE-SEM images of grating pattern with respect to temperature variations of mold stamp

로 선폭(width $\approx$ 2-5 $\mu$ m), 깊이(depth $\approx$ 4~7 $\mu$ m)로 동일한 형상에 크기별로 제작하여 치수효과에 대한 성형특성을 고려하였다. 성형된 패턴은 FE-SEM을 이용하여 형상을 측정·비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 금형의 온도를 효율적으로 빠르게 조절하기 위하여, 펄티어 소자가 사용되었다. 사용된 펄티어 소자가 금형 온도를 효율적으로 제어 가능함에 대한 타당성을 검토하기 위하여, 사용된 PMMA의 유리전이온도를 기준으로 20°C

또는 40°C의 온도편차를 가지고 가열과 냉각을 조절하는 실험을 간단히 수행하였다.

Fig. 6는 온도조건에 따른 성형결과를 FE-SEM을 이용하여 측정된 사진이다. A 조건에서 패턴의 손상 없이 충진되었다(Fig. 6(a)). 온도조건 B에서는 패턴의 첨부분에서 뜬어짐 현상과 미충진 영역을 확인하였다(Fig. 6(b)). 또한, 온도조건 C에서 가열과 냉각온도의 온도차(40°C)가 증가하여 패턴이 심하게 뜬어짐을 확인할 수 있었다(Fig. 6(c)). 간단한 실험결과를 바탕으로 본 연구에서 사용된 펄티어 소자를 이용한 금형의 온도 제어에 대한 타당성을 검증하였다. 향후, 보다 다양한 온도조건의 실험을 통하여 금형의 온도변화에 따른 구조물의 특성을 연구할 예정이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 펄티어 소자를 이용하여 금형 온도를 빠르고 효율적으로 제어하였다. 펄티어 소자의 열효율을 높이고, 금형 마스터의 교체가 용이하게 몰드가 쉽게 분리되는 코어형으로 제작하였다. 또한, 금형 내의 온도보상은 열화상 카메라를 이용하여 최적 온도조건을 도출하였다. 제작된 마이크로 사출성형 시스템은 마이크로-나노 패턴을 몰드 스탬퍼로 이용하여 간단한 온도조건으로 PMMA 상에 성형실험을 수행하였다. 사출된 패턴 결과를 바탕으로, 펄티어 소자를 이용한 금형의 온도 제어에 대한 타당성을 검증하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(06K1401-00511)에 의해 수행되었습니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21 사업'의 지원비를 받습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Bell, C. Cookson, 2004, Next generation DVD: application requirements and technology, Signal Processing: Image Communication, Vol. 16, pp. 909~920.
- [2] H. Pranov, H. Rasmussen, 2006, On the injection

- molding of nanostructured polymer surface, Polym. Eng. Sci., Vol. 46, pp. 160~171.
- [3] M. Gale, C. Gimkiewicz, S. Obi, 2005, Replication technology for optical Microsystems, Opt. Lasers Eng., Vol. 43, pp. 373~386.
- [4] O. Rötting, W. Röpke, H. Becker, C. Gärtner, 2002, Polymer microfabrication technologies, Microsyst. Technol., Vol. 8, pp. 32~36.
- [5] A. Liou, R. Chen, 2006, Injection molding of polymer micro-and sub-micron structures with high-aspect ratios, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 28, pp. 1097~1103.
- [6] M. Yu, W. Young and P. Hsu, 2007, Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 460-461, pp. 288~295.
- [7] S. Chen, W. Jong, Y. Chang, J. Chang, J. Cin, 2006, 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, pp. 1783~1791.
- [8] W. Ro, J. Jeong and K. Hwang, 2006, Injection molding and Design for World Best, Kyobobook, pp. 115~173.