

# 스탬퍼 가열/냉각을 이용한 고세장비 나노 구조물 성형

유영은<sup>#</sup>· 최성주<sup>1</sup>· 김선경<sup>1</sup>· 최두선<sup>2</sup>· 황경현<sup>2</sup>

## Injection Molding of High Aspect Ratio Nano Features Using Stamper Heating/Cooling Process

Y. E. Yoo, S. J. Choi, S. K. Kim, Y. H. Seo, D. S. Choi, K. H. Whang

(Received November 16, 2006)

### Abstract

Polypropylene substrate with hair-like nano features(aspect ratio~10) on the surface is fabricated by injection molding process. Pure aluminum plate is anodized to have nano pore array on the surface and used as a stamper for molding nano features, The size and the thickness of the stamper is 30mm x 30mm and 1mm. The fabricated pore is about 120nm in diameter and 1.5 um deep. For molding of a substrate with nano-hair type of surface features, the stamper is heated up over 150 °C before the filling stage and cooled down below 70 °C after filling to release the molded part. For heating the stamper, stamper itself is used as a heating element by applying electrical power directly to each end of the stamper. The stamper becomes cooled down without circulation of coolant such as water or oil. With this new stamper heating method, nano hairs with aspect ratio of about 10 was successfully injection molded. We also found the heating & cooling process of the stamper is good for releasing of molded nano-hairs.

**Key Words :** Injection Molding, High Aspect Ratio, Nano Feature, Rapid Heating

### 1. 서 론

최근 평면 방향으로는 수십 혹은 수백 나노의 크기를 가지며, 수직 방향으로는 수 마이크로 혹은 수십 마이크로의 크기를 가지는 고세장비 나노 구조물의 제작 및 응용에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이러한 고세장비의 나노 구조물은 최근 초소수성 표면[1~2]의 구현이나, 건식 점착 시스템 [3] 등 여러 분야에서의 응용이 가능한 것으로 알려지고 있으며 이외에도 새로운 응용 제품 개발에 대한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 응용 분야 중 상당 부분은 제품의 특성, 가공성 혹은 대량 생산에 의한 비용 감소 등 다양한 이유로

인해 플라스틱 소재 및 이와 연계된 제작 공정의 적용이 요구되고 있다.

플라스틱 제품의 생산에 전통적으로 널리 사용되어 온 사출 성형은 이와 같은 나노 구조물 응용 제품에 대해서도, 사출 성형의 우수한 생산성을 고려할 때, 매우 필요한 공정 기술이며, 이미 낮은 세장비(~0.2)의 서브 마이크로 패턴(150nm~700nm)을 기반으로 하는 CD, DVD 또는 Blu-ray Disk(BD)와 같은 광학 저장 매체의 생산에 적용되고 있다[4].

이와 같은 나노 구조물이 응용된 제품의 성형에서는 용융 수지와 금형의 온도 차이로 인한 충전 단계의 수지 냉각 및 고화로 표면에 존재하는 나노 패턴 혹은 구조물의 성형성이 저하되며 특히

1. 서울산업대학교 금형설계학과  
2. 한국기계연구원 나노공정장비연구센터  
# 교신저자 : 한국기계연구원 나노공정장비연구센터,  
Email : yeyoo@kimm.re.kr

고세장비 나노 구조물의 성형성은 더욱 악화된다 [4]. 또한 성형 후 고세장비 표면 구조물 제품의 이형 공정은 현재 더욱 큰 기술적인 어려움을 가지고 있다.

표면 미세 구조물의 성형성을 향상 시키기 위해서는 충전 중 용융 수지의 냉각을 최대한 지연시키는 것이 매우 중요하며, 고온 금형의 적용은 매우 효과적인 방법 중의 하나이다. 그러나 일반적으로 일정 온도 이상으로 금형 온도를 설정하는 경우, 이형 과정에서 성형품이나 구조물이 변형되거나 파손되는 등의 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 금형 온도를 충전 과정에서 고온으로, 냉각 및 이형 과정에서는 저온으로 빠르게 제어하는 것이 필요한데, 이러한 금형의 급속 가열 및 냉각 기술의 개발이 여러 방법으로 진행되고 있다. 또한 나노 구조물의 성형 후 이형을 위해 스탬퍼의 표면 처리를 중심으로 한 연구들이 진행되고 있다[5~7].

본 연구에서는 고세장비 나노 구조물의 성형 특성에 큰 영향을 미치는 금형의 온도를 효과적으로 조절하기 위해, 나노 구조물 스탬퍼를 신속하게 가열/냉각 시킬 수 있는 방법을 고안 적용하였으며, 그 결과 매우 양호하게 성형된 나노 헤어 얻을 수 있었으며, 또한 고안된 방법이 고세장비의 구조물의 이형에도 매우 효과적임을 확인하였다.

## 2. 나노 헤어 성형용 금형

### 2.1 나노 헤어 스탬퍼 제작

고세장비 나노 구조물의 성형을 위해서 양극 산화에 의해 표면에 나노 포어 구조가 형성된 산화층(AAO)을 가지는 알루미늄 기판을 스탬퍼로 이용하였다. 알루미늄의 양극 산화에 의해 형성되는 나노 포어는 산화 조건에 따라 수십 나노~수백 나노의 지름과, 수 마이크로~수십 마이크로의 깊이로 다양한 크기로 가공이 가능하다[8]. 또한 대면적에 대해서 낮은 비용으로 제작이 가능하며, 특정한 형태나 배열을 필요로 하지 않는 경우, 고세장비 나노 구조물 성형을 위한 대면적의 스탬퍼 제작에 매우 적합하다. 본 연구에서는 포항공대 화학공학과와 고분자 계면 및 접착 연구실에서 제작된 AAO 기판을 고세장비 나노 구조물 성형을 위한 스탬퍼로 사용하였으며, 사용된 스탬퍼 및 가공된 포어의 사진 및 주요 특성은 아래 Table 1 과 Fig. 1 에 나타내었다.

Table 1 Some dimensions of AAO stamper

Stamper thickness	1mm
Stamper size	30mm x 30mm
Pore diameter	120nm
Pore pitch	500nm
Pore depth	1.2 ~ 1.5um

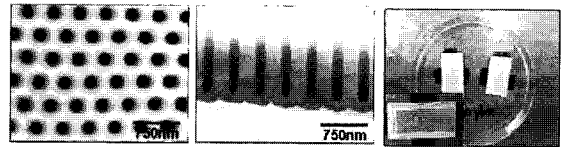


Fig. 1 AAO stamper and nano pores

### 2.2 스탬퍼 급속 가열 시스템

고세장비 나노 구조물 성형을 위해서 나노 구조물의 스탬퍼로 사용되는 AAO 기판에 전원을 연결하여 스탬퍼를 직접 전기 저항체로 이용한 저항 발열에 의해 스탬퍼를 가열하였다. 스탬퍼 가열을 위한 개략적인 전기 회로를 Fig. 2에 나타내었다. 개략도에서와 같이 매우 간단한 회로 및 부가 장치로서 스탬퍼 가열을 통한 온도 조절이 가능하도록 하였으며, 이를 적용한 고세장비 나노 구조물 사출 성형 금형의 상·하측 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 금형의 스프루, 런너, 게이트 및 나노 구조물 시편 구조 및 주요 치수를 Fig. 4에 나타내었다.

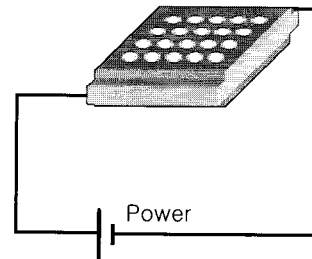


Fig. 2 Schematic of AAO stamper heating circuit

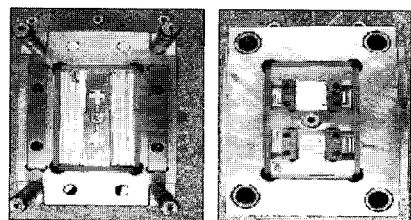


Fig. 3 Mold for nano hairs

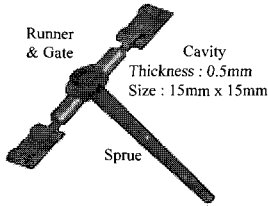


Fig. 4 Sprue, runner, gate and cavities

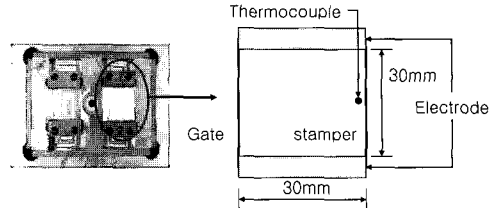


Fig. 5 Stamper installation and thermocouple location

### 3. 나노 헤어 성형 결과

#### 3.1 스탬퍼 급속 가열/냉각 시험

고세장비 나노 헤어 스탬퍼를 금형에 장착하여 전원을 연결한 후, 스탬퍼 표면 온도를 열전대를 이용하여 측정하였다. 적용된 스탬퍼의 크기는 30mm×30mm, 두께 1mm 이었으며, 약 0.01Ω의 전기 저항 값을 보였다. 스탬퍼의 전원 연결 및 온도 측정 위치는 Fig. 5에 나타내었으며, 온도 측정은 K type의 thermocouple을 사용하였다. Fig. 6에는 스탬퍼에 1.5V, 120A의 전원을 공급하였을 때 스탬퍼 표면의 시간에 따른 온도 변화를 나타내었는데, 180W의 전력을 적용하는 경우 95℃의 온도 상승(25℃→120℃)에 30초 정도의 시간이 소요되었다.

냉각수 순환 등의 강제 냉각을 병행하지 않은 상태에서 전류를 차단한 후 스탬퍼의 온도를 120℃에서 50℃로 냉각시키는데 50초의 시간이 소요되었으며, 30℃로 냉각시키기 위해서는 추가적으로 100초 정도의 시간이 필요하였다. 스탬퍼 온도가 50℃ 정도인 경우 일반적인 성형품의 취출에는 문제가 없어 전체 공정은 2분 이내에서 진행이 가능하며, 추가적으로 냉각수 순환 등을 통한 강제 냉각을 병행하는 경우, 냉각에 소요되는 시간은 크게 단축될 것으로 판단된다.

#### 3.2 나노 헤어 성형 결과

나노 포어 AAO 기관 및 스탬퍼 가열 냉각 공정을 이용한 고세장비 나노 구조물의 사출 성형 결과를 Fig. 7-Fig. 8에 나타내었다. 성형 소재는 Polypropylene(현대석유화학 SEETEC PP H6110)을 사용하였으며, 사출기의 노즐 온도 240℃, 가소화 실린더의 온도는 240℃~200℃로 설정하였다. 스탬퍼 온도에 의한 고세장비 나노 헤어 구조물의 성형성 및 이형성을 평가하기 위해 사출 속도는 30mm/sec로 일정하게 유지하였다. 기존의 자체적인 실험에서 스탬퍼 온도가 낮은 경우, 고세장비

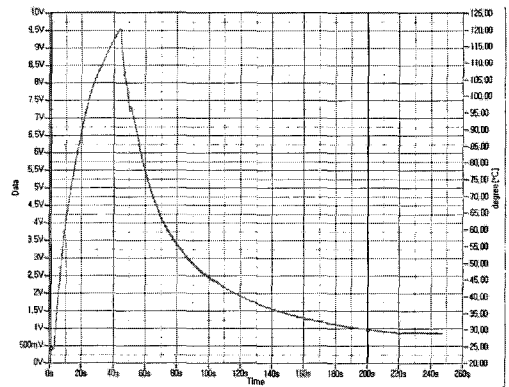


Fig. 6 Temperatures of the stamper vs. time

나노 헤어 구조물의 성형성에 대한 보압의 영향은 매우 작은 것으로 판단되어 본 실험에서는 보압을 적용하지 않았다. Fig. 7(a)는 상온의 금형(≈50℃)에서 성형한 결과로서, 스탬퍼에 형성되어 있는 나노 포어 입구 부분의 패턴만 전사되어 있어, 나노 헤어 구조가 성형되지 않았음을 알 수 있다. 오른쪽 사진은 스탬퍼를 95℃로 가열하여 용융 수지를 충전한 후, 스탬퍼를 50℃이하로 냉각하여 성형한 시편으로 왼쪽의 상온에서의 성형 결과에 비해 더 큰 세장비의 나노 구조물이 성형되었음을 알 수 있다. Fig 8에서는 스탬퍼 온도를 120℃까지 상승시켜 성형한 후, 30℃로 냉각하여 성형 시편을 이형한 결과를 나타내었다. 이때 스탬퍼에 부과된 전압 및 전류는 1.5V, 120A이었으며, 가열에 소요된 시간은 40초, 냉각에는 총150초가 소요되어(Fig. 6), 총 공정 시간은 190초 정도가 소요되었다. 사진에서 알 수 있듯이 이와 같은 스탬퍼 가열 냉각 공정을 이용하여 직경 120nm, 길이 1.5μm 형상의 고세장비 나노 구조물이 표면에 형성된 시편을 성형하였다. Fig. 8의 오른쪽 사진은 성형된 나노 헤어의 끝 부분들이 다소 손상된 형상을 보여주고 있는데, 이형 중 나노 헤어의 일부분이 떨어져나간 것으로 보인다.

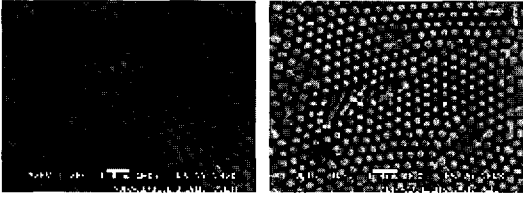


Fig. 7 Injection molded nano hairs, (a) mold temperature=50°C, (b) mold temperature=95°C

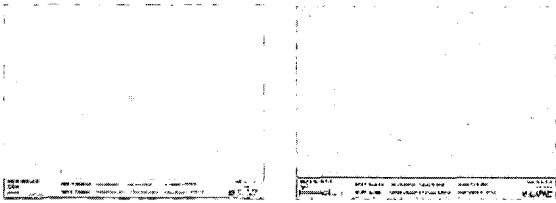


Fig. 8 Nano hairs injection molded(Filled at stamper temperature 120°C and ejected at stamper temperature 30°C)

#### 4. 결과 및 분석

본 연구에서 적용된 가변온도 스탬퍼를 이용하여 충전 과정에서는 고온의 스탬퍼가 적용되어 수지의 냉각 및 고화가 지연되어 고세장비의 나노 구조물의 성형이 가능하였다. 고세장비의 나노 구조물 이형이 가능하였던 원인은 다음과 같은 몇 가지로 분석된다. 우선 성형에 사용된 polypropylene 의 경우 다른 물질과의 접촉 특성이 좋지 않은 것으로 알려져 있는데, 이러한 낮은 접촉 특성이 스탬퍼와의 이형에 유리하게 작용하는 것으로 보인다. 또한 충전을 위해 금형 온도를 증가시키는 경우 성형성은 개선이 되나, 이와 같이 높은 온도에서 이형을 하는 경우 성형 제품이나 구조물의 높은 온도로 인한 강성 저하로 이형시 변형 또는 파손되어 이형이 어렵게 된다. 본 연구에서 적용한 가변 온도의 스탬퍼를 적용하는 경우 이형시 스탬퍼의 온도를 이형 가능한 온도까지 낮추어 성형품을 이형할 수 있어 향상된 이형 특성을 얻을 수 있었다. 이와 더불어 고온의 스탬퍼 환경에서 충전된 소재가 저온의 스탬퍼에서 냉각 고화되며 상당한 수축이 발생하여 성형 소재와 스탬퍼 사이의 실질적인 접촉 면적이 매우 작아지게 되어 이형성이 증가한 것으로 판단된다 (Fig. 9). 성형된 결과에서 알 수 있듯이 가변 온도

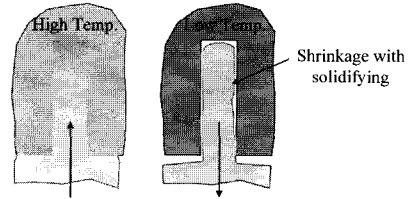


Fig. 9 Filling & releasing of nano hairs for the stamper rapidly heated & cooled

의 스탬퍼를 적용하는 경우에도 상당한 영역에서 나노 구조물의 변형이나 파손이 발생하고 있으며, 이러한 변형 및 파손은 성형품의 성능 저하 및 스탬퍼의 오염 등의 문제를 발생시킬 것으로 예상된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 고세장비의 나노 구조물 성형을 위해서 가공된 나노 구조물 스탬퍼에 직접 전원을 연결, 스탬퍼를 전기적 저항체로 이용함으로써 매우 간단하게 효과적으로 스탬퍼의 온도를 조절할 수 있었다. 또한 이와 같은 스탬퍼 가열 공정을 실제 사출 금형 및 공정에 적용하여 고세장비 구조물에 대한 용융수지의 충전 및 이형 특성을 개선함으로써 합리적인 수준의 공정 시간에 고세장비 나노 구조물이 표면에 형성되어 있는 시편을 제작할 수 있었다. 향후 강제적인 냉각 공정 및 적절한 스탬퍼의 표면 처리를 통해서 공정 시간 단축 및 이형 특성의 추가적인 개선이 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원(06K1401-00520)에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분의 노고에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] W. Barthlott, Neinhuis, 1997, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta* Vol. 202, pp. 1~8.
- [2] C. NEINHUIS, & W. BARTHLOTT, 1997, Character-

- zation and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces, *Annals of Botany* 79, pp. 667~677.
- [3] Carmel Majidi, Richard Groff, Ron Fearing, 2004, Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting, *Proceedings of IMECE '04, IECE 2004-62142*, pp. 1~6.
- [4] Kari monkkonen, etc, 2002, Replication of Sub-Micron Features Using Amorphous Thermoplastics, *Polymer Engineering and Science*, July, Vol. 42, No.7, pp. 1600~1608.
- [5] Kim Dong-hak, Kang Myung-ho, Y. H, Chun, Dec, 2001, Development of a New Injection Molding Technology : Momentary Mold Surface Heating Process, *Journal of Injection Molding Technology*.
- [6] D. Yao, B, Kim, 2003, Rapid Thermal Response Molding for Cycle Time Reduction, *SPE ANTEC 2003*, pp. 607~611.
- [7] Youngmin Kim, Yong Choi, Young-Joo Kim, Shinill Kang, 2005, Construction of Injection Mold with MEMS RTD Sensor and MEMS Heater for Micro/Nano Molding Process, *Japaness Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No.5B, pp. 3591~3595.
- [8] Sun-kyu Hwang, Soo-Hwan Jeong, Hee-Young Hwang, Ok-Joo Lee, Kun-Hong Lee, 2002, Fabrication of Highly Ordered Pore Array in Anodic Aluminum Oxide, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 467~473.