

## 플라스틱 마이크로 채널 기판 사출성형 시 보압의 영향

우상원<sup>a</sup>, 박시환<sup>b\*</sup>

## Effects of Packing Pressure and Time on Injection Molding of Plastic Micro-channel Plates

Sang-Won Woo<sup>a</sup>, Si-Hwan Park<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Korea Institute of Machinery & Materials, 156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34103, Korea<sup>b</sup> Mechanical Engineering, Ulsan College, 93, Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	29	April	2016
Revised	18	May	2016
Accepted	24	May	2016

## Keywords:

Micro-fluidic chip  
Injection molding  
Packing time  
Replication

## ABSTRACT

Recently, polymeric micro-fluidic biochips with numerous micro patterns on the surface were fabricated by injection molding for realizing low-cost mass production of devices. To evaluate the effects of process parameters on large-scale micro-structure replication, a 50×50 mm<sup>2</sup> tool insert with surface structures having a patterns of trapezoidal shapes (height: 30 μm) was employed. During injection molding, PMMA was used; packing phase parameters and mold temperature were investigated. The replicated surface textures were quantitatively characterized by confocal laser microscopy with 10-nm resolution. The degree of replication at low mold temperatures was found to be higher than that at high mold temperature at the beginning of the packing stage. Thereafter, the degree of replication increased to a greater extent at higher mold temperatures; application of higher mold temperatures improved the degree of replication.

## 1. 서론

고가의 장비를 활용한 질병 진단을 대체하기 위하여 최근에 바이오칩을 이용한 질병의 조기 발견에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 바이오칩은 일반적으로 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하여 제작되나 이러한 공정은 제작 비용의 과다 및 비교적 복잡한 공정으로 인하여 대량 생산에 어려움을 가지고 있어 최근에는 대량 생산이 가능한 사출성형 공정을 이용하여 제조원가 절감 및 생산 효율 증대를 위한 시도들이 이루어지고 있다. 대표적으로 혈액에 존재하는 백혈구나 암세포 등의 다양한 세포 또는 대사를 물질 검출하고자 하는 연구들이 이루어져왔다<sup>[1,2]</sup>.

사출성형을 이용하여 수십 마이크로 크기의 미세 구조물 array를 정밀하게 구현하고 이로부터 미소채널 기판을 소자화하여 혈액 속의 암세포를 물리적으로 분류하고자 하는 Woo<sup>[3]</sup>의 연구와 같은 경우는 수많은 미세 구조물이 설계된 형상으로 고정밀 사출성형이 되어야 하고 소자화를 위하여 기판 자체의 변형도 일정 수준을 확보하여야 하므로 사출성형 조건의 주요 변수에 대한 영향 평가가 이루어져야 한다.

수십 마이크로 크기의 구조물을 가지는 기판의 성형 공정 또한 성형, 보압, 냉각, 이형의 4가지 공정으로 구성되어 있는 일반 사출성형 공정과 동일한 공정을 거쳐서 제작되며 전체 성형 중에 발생하는 주요 문제점은 미세 구조물의 미성형 및 이형과정에서 발생하

\* Corresponding author. Tel.: +82-52-279-3121

Fax: +82-52-279-3137

E-mail address: shpark3@uc.ac.kr (Si-Hwan Park).

는 구조물의 변형 및 파단 현상이다.

이중 미세 구조물의 미충전 문제는 일반적으로 금형온도, 사출속도, 보압 압력 등에 관련되어 많은 연구<sup>[4]</sup>가 진행되어 왔다. 미세 구조물의 성형에 영향을 미치는 인자에 대한 연구는 초기 실험적 접근방식을 통하여 성형온도 및 사출속도<sup>[5]</sup>, 금형온도<sup>[6]</sup>, 보압 압력<sup>[7]</sup>에 대한 영향 평가를 진행하였다. 이후 미세 구조물의 성형에는 사출성형의 여러 공정조건 간의 조합에 대한 최적화 연구가 DOE(design of experiments) 기법으로 연구되어 최적 사출조건 도출에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이 때 고려된 사출성형 조건은 초기 실험과 유사하게 성형온도, 사출속도, 금형온도, 보압 압력 등이 성형 조건의 최적화에 대한 주요 고려 인자였으며<sup>[8,9]</sup> 이후 미세 구조물의 크기 및 진공도<sup>[10]</sup> 또한 최적화를 위한 인자로 포함되어 연구되었다.

하지만 최근에는 Woo<sup>[3]</sup>의 연구와 같이 수많은 미세 구조물을 가지는 마이크로채널 기판의 필요성이 중요해 지고 있어 기존 연구의 고세장비의 단일 미세 구조물의 성형성과 더불어 모든 미세 구조물의 성형 균일도, 미세 구조물이 변형 및 기판 자체의 변형 또한 주요한 관심사항이다. 이를 위하여 사출성형 제품의 변형에 주로 영향을 주는 보압 압력 뿐 아니라 보압 시간 및 보압 전환 위치에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 Park 등<sup>[11]</sup>이 실험을 진행했던 폭 30  $\mu\text{m}$ , 높이 100  $\mu\text{m}$ , 피치가 60  $\mu\text{m}$ 의 미세 구조물로 이루어진 마이크로채널 array를 갖는 기판의 사출성형에 있어서 보압 시간 및 보압 압력이 미세 구조물의 성형성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였고 이를 CAE를 통하여 결과에 대한 원인 분석을 진행하고자 한다.

## 2. 실험대상 및 장비

### 2.1 실험대상

Fig. 1과 같은 마이크로 채널을 이용하여 혈액 등의 액체 시료 내에 존재하는 서로 다른 크기의 세포를 분리할 수가 있는데, 이의 실용화를 위해서는 열가소성 소재를 이용한 사출성형 공정을 통한

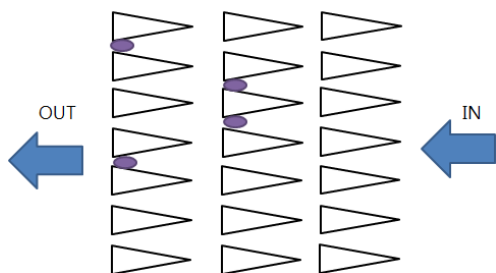


Fig. 1 A schematic diagram of the micro taper post array<sup>[5]</sup>

마이크로채널 기판 제작이 요구된다.

이러한 마이크로채널 기판을 사출성형하기 위해서 Ni-스탬퍼 (Ni-stamper)를 제작 후 금형에 부착하는 방식을 적용하였다. 미세 구조물 성형을 위한 스탬퍼는 포토레지스트 및 노광, 현상 공정에 의해 제작된 패턴 마스터를 이용하였으며, 니켈 도금 공정을 통해서 제작된 음각 형상의 미세 구조물을 갖는 두께 0.5 mm, 크기 50 mm×50 mm의 스탬퍼를 제작하였고 부착지그를 이용하여 금형에 부착하였다. 마이크로채널 형성을 위한 미세 구조물은 스탬퍼 중앙의 20 mm×20 mm에 해당하는 영역에 대각선 방향으로 배열하였다. 단위 미세 구조물의 형상은 바닥면이 20  $\mu\text{m}$ ×80  $\mu\text{m}$ ×100  $\mu\text{m}$ 인 사다리꼴 형상이며 높이는 30  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 각 구조물은 이형성을 원활히 하기 위하여 1°와 8°의 테이퍼를 주었다.

### 2.2 실험 및 측정방법

본 논문에서 사출성형을 위한 사출기는 Sumitomo사의 SE550S 전동식 사출성형기를 사용하였으며 실험에 사용된 소재는 Asahi사의 PMMA 80N이다. 또한 각 조건별 미세 구조물의 성형성을 판단하기 위하여 분해능이 10 nm 수준인 confocal laser microscopy를 사용하여 성형이 완료된 최종 제품의 미세 구조물을 측정, 분석하였다. 이는 주로 광학현미경이나 SEM장비를 사용하여 형상만을 측정하는 방식과는 달리 3차원 형상을 측정함으로써 실제 성형 후 미세 구조물의 충전도 및 변형정도까지 파악이 가능하도록 하였다.

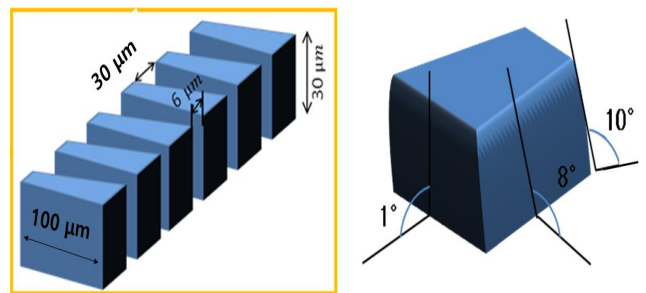


Fig. 2 Design and dimension of the micro-structure and the plate

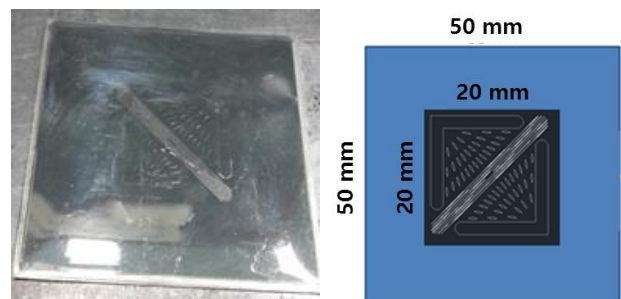


Fig. 3 Stamper image

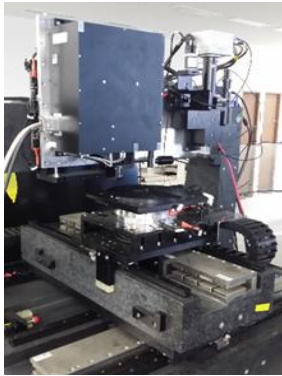


Fig. 4 DIT Confocal laser microscopy with resolution  $\leq 10$  nm

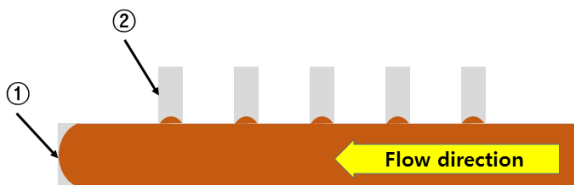


Fig. 5 V-P switching position

Table 1 Processing conditions

Injection molding conditions				
Melt temp.	250°C			
Mold temp.	80°C	90°C	95°C	100°C
Packing time (sec)	1	2	3	
Packing pressure	4,905 N/cm <sup>2</sup> (500 kgf/cm <sup>2</sup> )			
Injection velocity	100 mm/s			
Cooling time	30 sec			

### 3. 성형 실험 및 사출성형 해석

#### 3.1 사출성형 실험

본 연구에서 성형 조건의 설정은 Fig. 5와 같이 보압을 주지 않는 상태에서 ① 부분인 기관의 끝까지 충전을 시키는 조건을 사전 실험을 통하여 결정하였으며 이후 보압 전환은 screw의 위치를 기준으로 전환하였다. 이후 ② 부분인 미세 구조물의 성형을 위하여 보압 압력, 보압 시간 및 금형온도를 변화시켰으며 그 영향도를 평가하였다. 이렇게 설정된 성형 조건은 Table 1과 같다.

#### 3.2 사출성형 해석

본 논문에서는 미세 구조물의 전사성에 대한 성형조건의 영향을 검토하기 위하여 사출성형해석 프로그램(moldflow)을 사용하였다. 일반적으로 미세 구조물을 가지는 기관에 대한 해석은 미세 구조물과 기관의 크기 차이로 인하여 기존 Park의 연구<sup>[12]</sup>처럼

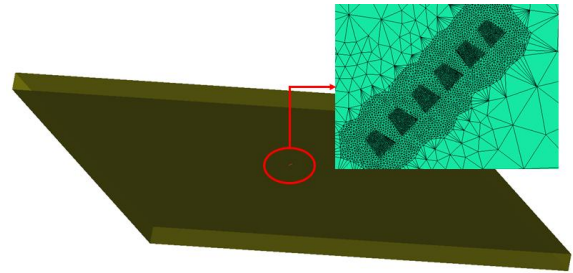
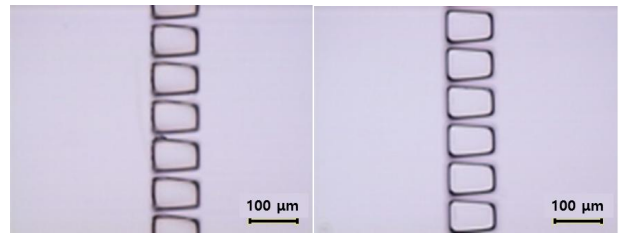
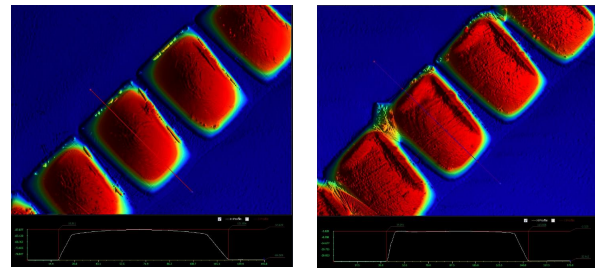


Fig. 6 Multi-scale mesh, overview of part (coarse mesh) and micro pattern (fine mesh)



(a)



(b)

Fig. 7 The images: (a) using optical microscopy, (b) using confocal laser microscopy (packing pressure 4,905 N/cm<sup>2</sup>, packing time 2 sec)

multi-scale 해석 진행이 필요하나 본 연구에서는 실험결과에 대한 원인 분석을 위하여 Fig. 6과 같이 미세 구조물 전체를 모델링하지 않고 일부 미세 구조물만 모델링하였으며 미세 구조물 하단의 결과를 분석하여 실험결과에 대한 원인 분석을 진행하였다.

### 4. 실험 및 시뮬레이션 결과

#### 4.1 Confocal laser microscopy를 이용한 및 구조물의 성형성 분석

미세 구조물의 성형 정도는 광학 현미경과 confocal microscopy를 이용한 냉각이 완료된 제품의 이미지를 분석하였다. Fig. 6과 같이 광학 현미경을 이용할 경우 미세 구조물의 성형성 분석은 단순히 형상 분석으로 그치게 되며 실제 성형 정도를 파악하기 어렵다. 따라서 SEM을 이용한 분석이나 성형 제품의 단면을 자른 후 그 단면을 측정하는 등 추가적인 측정 방법이 필요하다. 하지만 Fig. 7과 같이 confocal laser microscopy의 경우 3차원 측정이

가능하여 미세 구조물의 성형 후 전체 형상뿐 아니라 이미지 프로세싱을 통한 단면 형상의 측정이 가능하여 비교적 단순하고 정확한 방식으로 미세 구조물의 성형 정도를 파악할 수 있다.

Fig. 8은 confocal laser microscopy으로 얻은 단면 형상을 마스터와 비교한 결과이다. 이 결과는 미세 구조물의 충전 현상이 Park 등<sup>[12]</sup>의 연구 결과와 같이 미세 구조물을 가지는 상대적으로 두꺼운 기판을 통하여 유동이 먼저 지나가고 이후 미세 구조물로의 충전이 일어나는 현상을 잘 보여주고 있다. 또한 보압 유지 시간이 길어질수록 미세 구조물로의 충전이 지속적으로 진행됨을 알 수 있으며, 이는 보압 압력 뿐 아니라 보압 유지 시간 또한 미세 구조물의 충전에 큰 영향 인자임을 알 수 있다. 그리고 보압 유지 시간이 길수록 성형된 미세 구조물의 측벽 기울기가 마스터 스템퍼의 기울기와 차이가 적어짐을 알 수 있다. 이는 지속적 보압으로 미세 구조물의 수축 현상이 적어짐을 보여준다. 또한 측벽 기울기를 가지는 패턴의 경우 성형된 미세 구조물이 성형 후 수축으로 인해 스템퍼에서 이탈되며, Park<sup>[13]</sup>의 연구 결과에서 제시한 바와 같이 미세 구조물에서 발생하는 수축은 수축에 의한 수직항력의 감소로 이형성 개선에도 도움이 됨을 알 수 있다.

#### 4.2 금형온도에 따른 미세 구조물 충전의 영향 분석

미세 구조물로의 충전 초기 현상에 대한 평가를 진행하기 위해 보압 시간을 1 sec로 하여 미세 구조물의 충전 현상을 평가하였다. 이는 보압 시간이 0 sec인 경우와 대비하여 실제 보압이 작용할 수 있는 시간을 고려한 것이며, 실제 사출기의 성능에 따라 사출 공정에서 보압 공정으로의 전환 지연 시간이 있음을 고려하였다.

Fig. 9는 보압 시간을 1 sec로 유지하며 금형온도와 보압 압력이 4,905 N/m<sup>2</sup> (500 kgf/cm<sup>2</sup>)일 때 미세 구조물의 충전 높이를 나타내고 있으며, Fig. 10은 confocal laser microscopy으로 얻은 단면 형상을 마스터와 비교한 결과를 보여주고 있다.

실험 결과 미세 구조물로의 충전 초기에는 금형온도가 낮을수록 미세 구조물로의 충전 높이가 높음을 알 수 있다. 이는 일반적으로

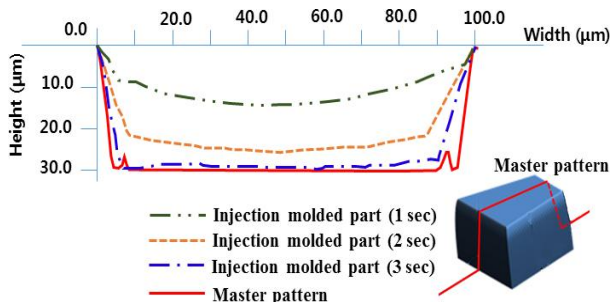


Fig. 8 Comparison of master pattern, injection molded part using Confocal laser microscopy (Mold temp. 90°C, packing pressure 4,905 N/m<sup>2</sup>, packing time 1, 2, 3 sec)

금형온도가 높을수록 미세 구조물의 충전이 잘 일어난다는 일반적인 연구 결과와 상반된 결과이다. 하지만 기존의 연구 결과는 보압 시간을 충분히 줄 경우에 대한 연구의 결과이며 보압 시간의 고려가 부족하였으나 Park<sup>[14]</sup>의 연구 결과는 금형온도가 높게 유지되면 수지의 고화 지연으로 인하여 보압에 의한 미세 구조물로의 충전 현상이 지속적으로 일어남을 보여 주고 있다.

이와 같은 현상을 분석하기 위하여 성형해석을 수행하여 미세 구조물의 전사성에 대한 성형조건에 영향을 평가하였다. 해석 진행 방법은 Fig. 11과 같이 미세 구조물의 바닥면에서 기판의 유동 방향(x축 방향)과 미세 구조물 방향(z축 방향)으로의 유동 속도 및 수축률을 계산하였으며, 그 결과 Fig. 12와 같이 금형온도가 높은

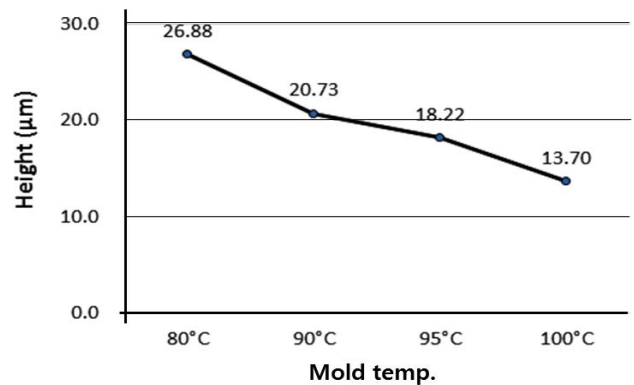


Fig. 9 Micro channel replication result followed by mold temperature (packing pressure 4,905 N/m<sup>2</sup>, packing time 1 sec)

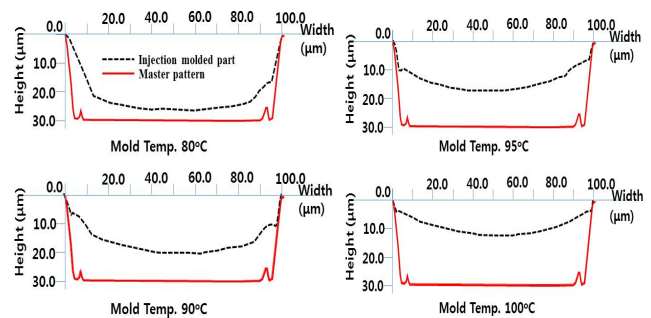


Fig. 10 The comparison between master and replicated pattern (packing pressure 4,905 N/m<sup>2</sup>, packing time 1 sec)

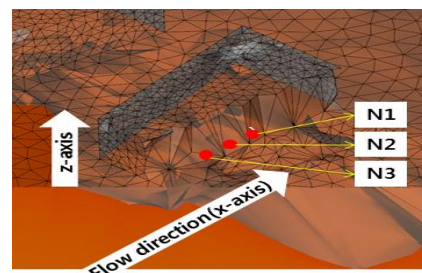


Fig. 11 The direction of the flow and measurement point

경우보다는 금형온도가 낮은 경우 z방향의 유동속도가 크고, x축 방향의 유동 속도는 적다. 즉 충전 초기에는 금형온도가 낮은 경우 미세 구조물 방향으로의 유동이 상대적으로 크게 되어 초기에 보다 많은 양의 수지가 미세 구조물 안으로 충전될 것이다. 또한 Fig. 13과 같이 금형 온도에 따른 수축률을 비교하면 금형온도가 높을 수록 수축률이 크을 알 수 있다. 이는 냉각 완료 후 미세 구조물의 충전 높이가 작게 측정되는 것에 영향을 미친다.

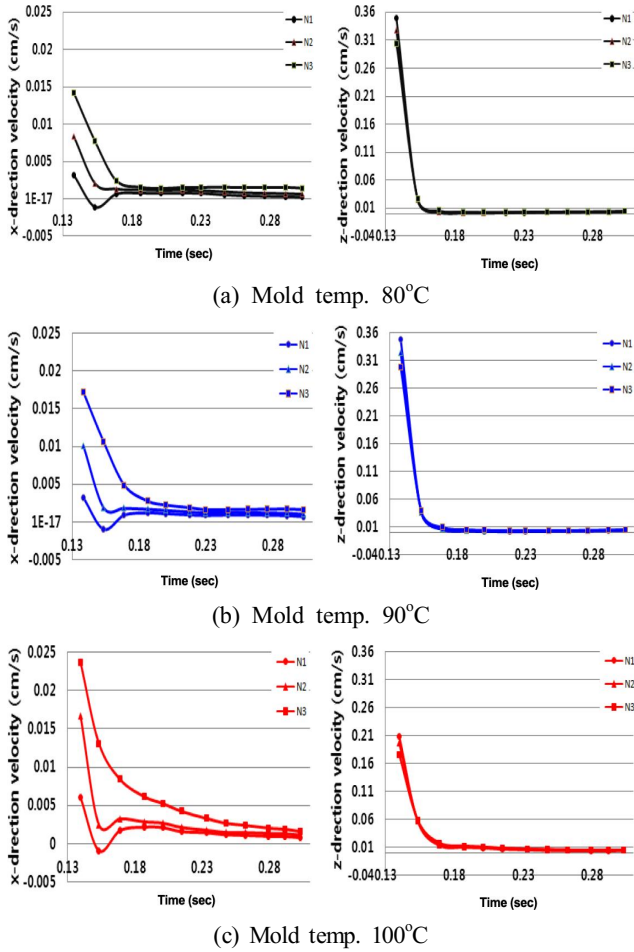


Fig. 12 Axial velocity results at the bottom of the micro pattern

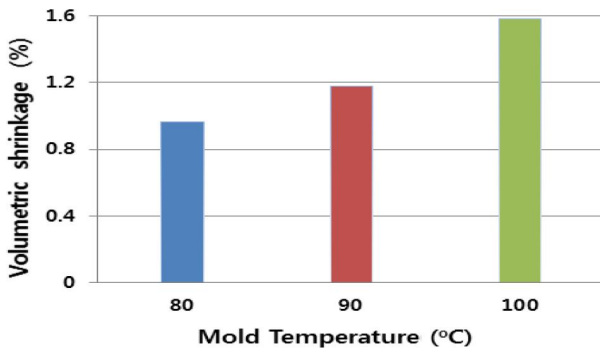


Fig. 13 Volumetric shrinkage results at the bottom of the micro pattern

### 4.3 보압 시간에 따른 미세 구조물의 충전형상 분석

미세 구조물을 가지는 기관의 사출성형에서 미세 구조물의 충전 전에 보압 유지 시간의 영향을 평가하기 위하여 금형온도를 일정하게 하고 보압 유지 시간을 1, 2, 3 sec하여 미세 구조물의 충전 영향을 평가하였다. Fig. 14, 15의 결과와 같이 금형온도가 높을 수록 충전 초기 미세 구조물로의 충전은 작으나 보압 유지 시간이 길수록 보압에 의한 미세 구조물로의 충전의 증가가 크을 알 수 있다. 이는 금형 온도가 높을수록 수지의 온도 저하가 적고 고화층의 발달이 지연되어 미세 구조물로의 충전량이 증가하기 때문이다.

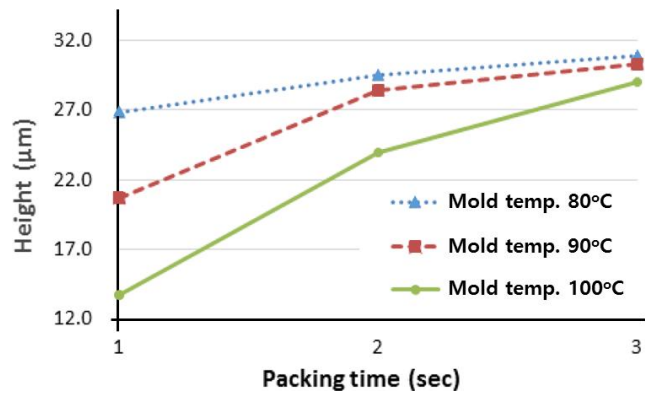


Fig. 14 Micro channel replication result followed by packing pressure and packing time (packing pressure 4,905 N/m<sup>2</sup>)

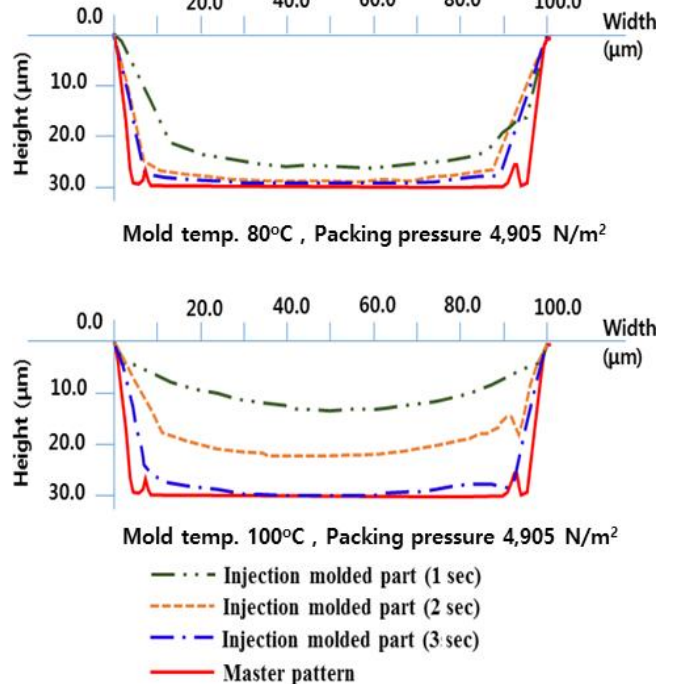


Fig. 15 The comparison between master and replicated pattern using confocal laser microscopy

## 5. 결론

최근에 활발히 연구되고 있는 수많은 미세 구조물을 가지는 미소 채널 기관을 이용한 바이오칩의 소자화를 위하여 대량생산이 가능한 공정의 요구 증대로 사출성형을 활용한 연구가 활발히 진행되어지고 있어 기존 연구의 고세장비의 단일 미세 구조물의 완벽한 성형뿐 아니라 미세 구조물 균일한 성형 확보 및 기관 자체의 변형 또한 주요한 관심사항이다. 이를 위하여 사출성형 제품의 변형에 주로 영향을 주는 보압 압력 뿐 아니라 보압 유지 시간에 대한 검토가 필요하다. 본 실험의 결과와 같이 미세 구조물의 성형을 위해서는 보압 시간을 적절히 유지하여야만 한다. 또한 Park<sup>[14]</sup>의 연구에서도 실험적 결과들이 도출된 바와 같이 보압에 의한 제품의 수축은 미세 구조물의 이형에도 크게 영향을 미치므로 본 연구에서 진행한 바와 같은 수많은 미세 구조물을 가지는 바이오칩 성형에 있어서 보압 유지 시간을 비롯한 성형조건을 최적화는 매우 중요하다.

## References

- [1] Doh, I., Yoo, H. I., Cho, Y. H., Lee, J. S., Kim, H. K., Kim, J. K., 2012, Viable Capture and Release of Cancer Cells in Human Whole Blood, *Applied Physics Letters*, 101:4 043701-043704.
- [2] Adams, A. A., Okagbare, P. I., Feng, J., Hupert, M. L., Patterson, D., Gottert, J., McCarley, R. L., Nikitopoulos, D., Murphy, M. C., Soper, S. A., 2008, Highly Efficient Circulating Tumor Cell Isolation from Whole Blood and Label-free Enumeration Using Polymer-based Microfluidics with an Integrated Conductivity Sensor, *Journal of the American Chemical Society*, 130:24 8633-8641.
- [3] Woo, S. W., Jung, J. S., Kim, J. Y., Park, H. H., Park, S. H., Kim, S. K., Yoo, Y. E., 2015, Fabrication of Plastic Bio-chip Employing Micro-channels, *KSMTE Annual Spring Conference*, 266.
- [4] Attia, U. M., Marson, S., Alcock, J. R., 2009, Micro-Injection Moulding of Polymer Microfluidic Devices, *Microfluidics and Nanofluidics*, 7:1 1-28.
- [5] Despa, M., Kelly, K., Collier, J., 2002, Injection Molding Using High Aspect Ratio Microstructures Mold Inserts Produced by LIGA Technique, *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*.
- [6] Wimberger-Friedl, R., 1999, Injection Molding of Sub- $\mu\text{m}$  Grating Optical Elements, *Journal Injection Molding Technology*, 4 78-83.
- [7] De Mello A., 2002, Plastic Fantastic?, *Lab On a Chip*, 2 31N-36N.
- [8] Shen, Y. K., Yeh, S. L., Chen, S. H., 2002, Three-dimensional Non-newtonian Computations of Micro-injection Molding with the Finite Element Method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29:5 643-652.
- [9] Zhao, J., Mayes, R., Chen, G., Xie, H., Chan, P., 2003, Effects of Process Parameters on the Micro Molding Process, *Polymer Engineering & Science*, 43:9 1542-1554.
- [10] Sha, B., Dimov, S., Griffiths, C., Packianather, M., 2007, Micro-injection Moulding: Factors Affecting the Achievable Aspect Ratios, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33:1 147-156.
- [11] Park, S. H., Woo, S. W., Jeong, J. S., Kim, S. K., Yoo, Y. E., 2015, Deformation of the Micro-structure during the Releasing of the Injection Molding Process, *KSMTE Annual Autumn Conference*, 266.
- [12] Park, S. H., Kim, S. M., Kang, S. Y., Lee, W. I., Yoo, Y. E., 2012, Global/Local Analysis of Filling Behavior during Injection Molding for a Large Scale Plate with Micro Patterns, *International Polymer Processing*, 27:2 205-212.
- [13] Park, S. H., Yoo, Y. E., Lee, W. I., 2014, Effect of Molding Conditions on Demolding Force During Injection Molding of Parts with Micro-features, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:2 127-132.
- [14] Park, S. H., Lee, W. I., Moon, S. N., Yoo, Y. E., Cho, Y. H., 2011, Injection Molding Micro Patterns with High Aspect Ratio Using a Polymeric Flexible Stamper, *eXPRESS Polymer Letters*, 5:11 950-958.