

◆ 특집 ◆ 최신 플라스틱-금속 성형 해석 기술

## 금속 전극을 포함한 미세유체 칩의 인서트 사출성형 충전 공정 해석

### Numerical Analysis of the Filling Stage in Insert Injection Molding of Microfluidic Chip with Metal Electrodes

이봉기<sup>1,✉</sup>, 나승식<sup>1</sup>  
Bong-Keel Lee<sup>1,✉</sup> and Seung-Sik Na<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 전남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chonnam National University)  
✉ Corresponding author: b.lee@chonnam.ac.kr, Tel: +82-63-530-1685

Manuscript received: 2015.7.29. / Accepted: 2015.9.2.

*In the present study, a numerical investigation of an insert injection molding process was carried out for the development of thermoplastic microfluidic chip plates with metal electrodes. Insert injection molding technology enables efficient realization of a plastic-metal hybrid structure and various efforts have been undertaken to produce novel components in several application fields. The microfluidic chip with metal inserts was proposed as a representative example and its molding process was analyzed. The important characteristics of the filling stage, such as the effects of filling time and thickness of the part cavity, were characterized. Furthermore, the detailed distributions of pressure and temperature at the end of the filling stage were investigated, revealing the significance of metal insert temperature.*

KEYWORDS: Insert injection molding (인서트 사출성형), Microfluidic chip (미세유체 칩), Numerical analysis (수치해석), Filling stage (충전 공정)

#### 기호설명

$\eta$  = shear viscosity  
 $\eta_0$  = zero-shear-rate viscosity  
 $T_m$  = melt temperature  
 $T_i$  = metal insert temperature  
 $T_w$  = Initial mold temperature  
 $t_f$  = total filling time in filling stage

#### 1. 서론

인서트 사출성형(insert injection molding) 공정은 사출성형 공정 중 금형이 열렸을 때 금형의 캐비티(cavity) 내부에 금속 혹은 플라스틱 인서트(insert)를 먼저 삽입한 후 금형의 닫힘과 플라스틱 멜트(melt)의 충전(filling)이 이루어지는 특수 사출성형 공정이다.<sup>1</sup> 일반적인 사출성형 공정과 같이

높은 생산성 등의 장점을 그대로 가지면서 플라스틱-금속 하이브리드 부품 혹은 이중 플라스틱 부품 등의 성형이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 자동차 내장재, 의료용 부품, 베어링, 집적회로 칩 등 다양한 분야의 생산 공정에 활발하게 적용되고 있다.<sup>2</sup>

금속 인서트를 적용한 인서트 사출성형 공정에서는 안정적인 기계적 물성과 내구성을 가지는 최종 성형품의 대량 생산을 위하여 여러 특성에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 플라스틱 재료와 금속 재료의 계면에서의 접착력은 플라스틱-금속 하이브리드 부품의 기계적 안정성 및 기능에 영향을 주는 주요 인자로 여겨지고 있다.<sup>3</sup> 최종 성형된 부품의 성형 후 변형 및 뒤틀림(warping) 역시 중요한 현상 중의 하나이며, 따라서 다양한 공정변수가 변형 및 뒤틀림에 주는 영향에 대한 연구들이 보고되고 있다.<sup>4,5</sup> 하지만 성형 공정 및 성형품의 특성에 영향을 주는 인자들의 복잡한 상호작용에 의하여 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요한 상황이다.

최근 인서트 사출성형이 효과적으로 적용할 수 있는 다른 응용 분야로 미세유체 칩(microfluidic chip)이 고려되고 있다. 극소량의 유체 샘플을 이용한 신속하고 다양한 분석 및 유체의 조작이 가능한 미세유체 칩은 전기적 신호의 검출 혹은 외부 전기장의 인가를 위하여 금속 전극이 요구되는 경우가 많이 있다.<sup>6-8</sup> 금속 전극 인서트를 이용한 인서트 사출성형 공정은 이와 같이 금속 전극이 포함된 플라스틱 미세유체 칩의 제작 및 대량생산에 효과적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 금속 전극이 포함된 플라스틱 미세유체 칩의 인서트 사출성형 공정의 개발을 위하여 형상 설계 및 충전 공정에 대한 해석적 연구를 진행하였다. 미세 채널(microchannel)과 두 개의 측면 금속 전극을 포함하는 미세유체 칩의 형상을 바탕으로 인서트 사출성형 충전 공정에서의 최적 충전 시간(filling time)을 결정하였다. 또한 이와 같은 조건에서의 플라스틱 유동의 분석과 금속 인서트의 온도가 미치는 영향에 대한 해석을 통하여 인서트 사출성형 충전 공정의 주요 특성에 대한 기초 연구를 진행하였다.

## 2. 해석

### 2.1 해석 형상

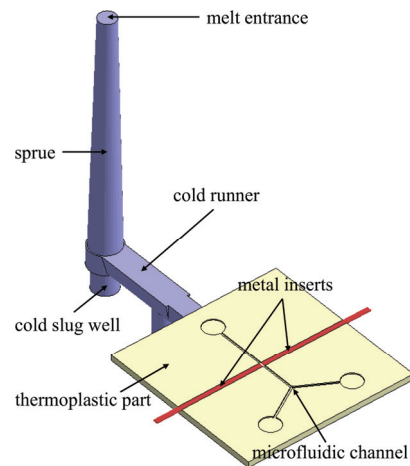


Fig. 1 Schematic diagram of the inset injection molded part with metal inserts investigated in the present study

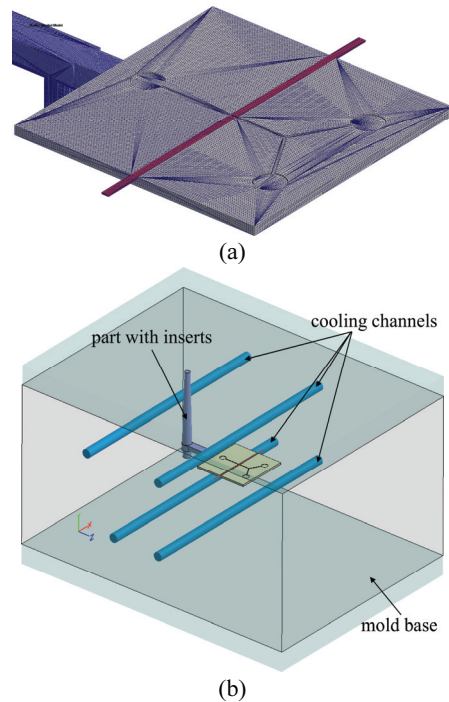


Fig. 2 (a) Finite element mesh for the microfluidic chip plate and metal inserts (b) Layout of the mold base including four cooling channels

본 연구에서 설계한 금속 전극이 포함된 미세유체 칩의 인서트 사출성형 성형품은 Fig. 1과 같다. 스프루(sprue)와 러너(runner), 게이트(gate)와 같

은 이송 시스템(delivery system)을 포함하는 전체 형상으로 설계가 되었으며, 35mm×35mm 크기의 정사각형 판형 성형품이 금형의 캐비티를 구성하는 구조를 가지고 있다. 판형 성형품의 두께는 1.2mm 및 1.7mm의 두 경우를 설계하여 성형품 두께의 영향을 확인할 수 있도록 하였다. 성형품의 윗면에는 Y-미세 채널과 두 개의 금속 전극이 위치하도록 하였으며, Y-미세 채널은 400μm의 너비(width) 및 200μm의 높이(height)로 설계되었다. 두 금속 전극은 Y-미세 채널의 주 채널(main channel)의 가운데 지점에 위치하도록 하였으며, 주 채널의 측면에 드러나 있는 측면 전극의 역할을 수행하게 된다. 금속 전극의 너비는 1mm, 높이는 미세 채널과 동일하게 200μm를 가지도록 설계되었다.

Fig. 1과 같은 전체 성형품 모델은 유한요소 해석을 위하여 사면체 요소(tetrahedron element)를 이용하여 분할이 되었다. 본 연구에서는 약 100만 개의 요소 및 110만 개의 절점(node)을 이용한 유한요소 해석이 진행되었다.

또한 인서트 사출성형 공정 중 보다 정확한 온도 해석을 위하여 전체 성형품이 포함되는 금형 베이스(mold base)와 냉각 채널(cooling channel)에 대한 형상 모델링을 진행하였다. 금형 베이스 및 냉각 채널들은 실제 성형 실험에 이용될 금형의 구조와 유사하게 모델링이 되었으며, 본 연구에서는 충전 공정 해석 전 금형 표면의 온도 분포를 구하는데 이용되었다. 이와 같은 방법을 적용함으로써 일반적인 사출성형 공정의 해석에서 가정되는 일정한 금형 표면 온도가 아니라 냉각 채널과 냉각수의 효과 등이 포함된 보다 정확한 해석이 가능하였다.

미세유체 칩 성형품 부의 유한요소 분할 및 금형 표면의 온도 분포 해석을 위하여 설계된 금형 베이스의 모델은 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

### 2.2 성형 재료

본 연구의 금속 전극을 포함한 미세유체 칩은 플라스틱-금속 하이브리드 구조를 가지고 있다. 따라서 성형공정에 대한 정확한 해석을 위해서 성형에 이용되는 플라스틱 및 금속 재료의 정확한 물성의 도입이 매우 중요하다. 본 연구에서는 성형성 및 생체적합성 등으로 의료용 제품으로의 적용이 용이한 폴리스티렌(polystyrene, Styron 666, Dow)을 플라스틱 재료로 가정하였다. 또한 금속 전극은 가공성 및 화학적 안정성을 가지고 있는 스테

Table 1 Parameters for the viscosity model of Styron 666

n	0.2407
$\tau^*$	$3.085 \times 10^4$ [Pa]
B	$7.798 \times 10^{-7}$ [Pa·s]
$T_b$	11110 [K]
D	0 [1/Pa]

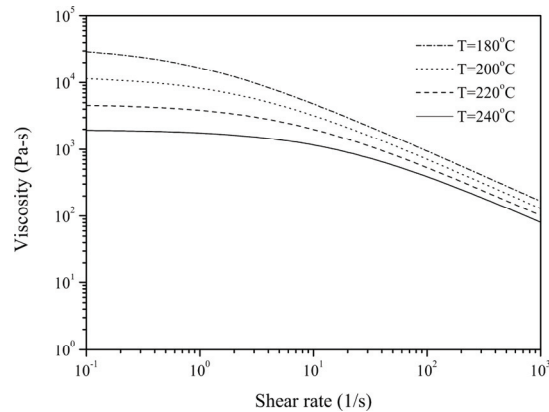


Fig. 3 Shear viscosity plot of the molding material used in the present study

인리스강(stainless steel, SUS 410)으로 가정하였다.

두께가 얇은 캐비티로의 플라스틱 멜트의 빠른 주입이 진행되는 인서트 사출성형 공정의 특성 상 플라스틱 재료의 점도(viscosity)의 변화가 매우 크게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 전단변형률(shear rate) 및 온도에 따른 점도를 정확하게 도입하기 위하여 식(1) 및 (2)와 같은 Arrhenius 형태의 Cross 모델을 적용하였다.<sup>9</sup>

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T} + D \cdot p\right) \quad (2)$$

해석에 이용된 플라스틱 재료인 Styron 666의 점도 모델 상수들은 Table 1과 같으며, Fig. 3과 같은 플라스틱 재료의 점도 변화를 표현하게 된다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 전단변형률이 증가할수록 점도가 감소하는 전단 담화(shear thinning) 효과 및 온도 상승에 따른 점도 감소를 동시에 나타낼 수 있다. 이와 같은 점도 모델의 도입을 통하

Table 2 Important processing conditions used in the present study

Processing parameters	Conditions
Filling time, $t_f$ (s)	0.1 to 1.5
Melt temperature, $T_m$ (°C)	225
Initial mold temperature, $T_w$ (°C)	60
Metal insert temperature, $T_i$ (°C)	30, 50

여 충전 공정 중의 플라스틱 재료의 거동을 보다 정확하게 구하고자 하였다.

### 2.3 해석 방법

본 연구에서는 상용 사출성형 해석 소프트웨어인 Moldex3D R12.0(CoreTech Systems)을 이용한 3차원 해석을 진행하였다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 몰드 베이스 및 냉각 채널의 형상을 기반으로 한 금형 표면에서의 온도 분포 해석을 먼저 수행하고, 그 결과로 얻게 되는 온도 분포를 도입한 충전 공정의 해석을 진행하였다. 충전 공정의 해석에 적용된 주요 공정 조건은 Table 2와 같다. 적용된 공정 조건들은 해석에 이용된 Styron 666의 일반적인 성형 조건들이며, 이 중 초기 금형 온도 ( $T_w$ )는 금형 표면의 온도 분포 해석에 초기 조건으로 적용되는 값이다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 최적 충전 시간

사출성형 충전 공정에서는 사출성형기의 노즐을 통하여 용융된 플라스틱 멜트가 금형의 내부로 주입이 되게 된다. 일반적으로 일정한 유량 혹은 몇 단계로 설정된 유량으로 플라스틱 멜트의 충전이 진행되므로 금형의 이송 시스템 및 캐비티의 충전이 진행될수록 노즐에서의 유동 압력은 증가하게 된다. 유동 선단(melt front)에서의 압력은 대기압으로 가정할 수 있기 때문에 노즐 부분에서 발생하는 최대 압력이 증가할수록 전체 성형품 내부에서의 압력 차이 역시 증가하게 된다. 이와 같은 큰 압력 차이는 최종 성형품의 불균일한 특성을 야기하기 때문에 가능한 낮은 최대 압력을 가지도록 공정 조건을 결정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 1.7mm 및 1.2mm 두께의 캐비티 형상에 대하여 충전 시간을 변화시키면서 발생하는 최대 압력을 구하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 두께가 1.7mm인 캐비티 형상에 비하여 두께

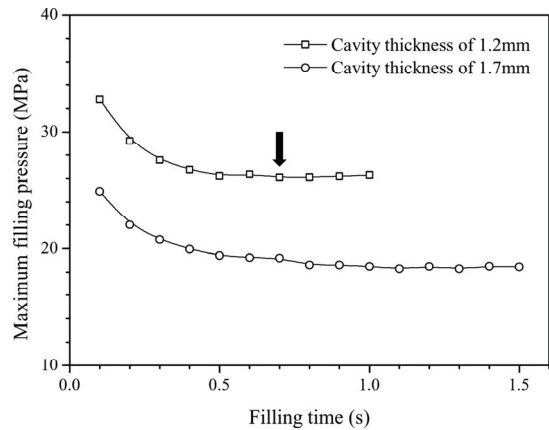


Fig. 4 Maximum pressure at the end of the filling stage with respect to the filling time ( $T_m = 225^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 30^\circ\text{C}$ )

1.2mm 캐비티 형상에서의 최대 압력이 모든 경우에서 높게 발생하였다. 이는 캐비티의 두께가 얇아질수록 충전 중 플라스틱 멜트의 냉각 효과 및 유동 저항의 증가에 따른 결과이다. 특히 두께 1.2mm 캐비티를 가지는 경우에는 충전 시간이 증가할수록 최대 압력이 감소하다가, 0.7s를 지나면서 최대 압력이 다시 증가하는 결과를 보여 주고 있다. 이는 충전 시간이 길어질수록 플라스틱 멜트의 금형 내 체류 시간이 늘어나게 되어, 고화층(solidified layer) 및 유동 저항의 증가를 야기하기 때문이다. 이와 같은 경향성은 일반적인 사출성형 공정에서도 확인되는 결과이며, 따라서 본 연구에서는 1.2mm 두께의 캐비티 형상에서의 최적 충전 시간을 0.7s로 결정하고 이 조건에서의 추가적인 해석 연구를 진행하였다.

### 3.2 캐비티 내 충전 거동

캐비티의 두께가 1.2mm인 미세유체 칩 형상에 대하여 3.1절에서 결정된 0.7s의 충전 시간을 공정 조건으로 적용하였을 때의 시간에 따른 충전 형상은 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)에서 확인할 수 있듯이 전체 부피의 약 50%의 충전이 완료되었을 때 플라스틱 멜트의 유동 선단이 게이트 부근에 도달하였다. 이후 캐비티 내부로 플라스틱 멜트가 충전되기 시작하였으며, 약 70% 충전이 진행되었을 때 유동 선단이 금형 내의 금속 인서트와 접촉하기 시작하였다(Fig. 5(e)). 금속 인서트는 전체적인 충전 형상에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났

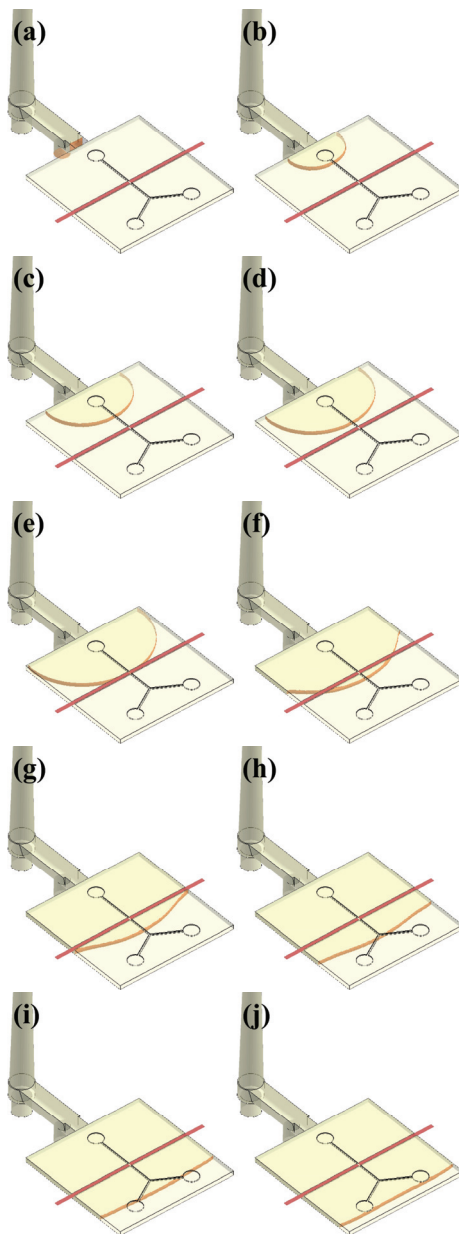


Fig. 5 Melt front distribution during the filling of the cavity: filling ratio of (a) 50%, (b) 55%, (c) 60%, (d) 65%, (e) 70%, (f) 75%, (g) 80%, (h) 85%, (i) 90%, and (j) 95%

다. 하지만 금속 인서트와 미세 채널의 영향으로 이 부분에서의 캐비티 두께가 1mm로 약 16.7% 줄어들었기 때문에 유동 저항의 증가와 이에 따른 유동 선단의 변화를 확인할 수 있었다. 즉 금속 인

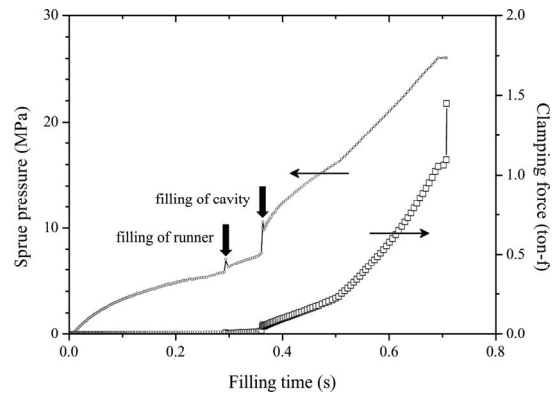


Fig. 6 Variations of pressure at the sprue end and clamping force during the filling stage (cavity thickness of 1.2mm and filling time of 0.7s)

서트가 위치한 캐비티 가운데 지점에서 약간의 정체(hesitation) 현상이 발생하여, 이 지점을 지나면서 유동 선단이 평평하게 변화하기 시작하였다. 하지만 이와 같은 유동 선단의 변화는 평판 형상의 캐비티에 비하여 크지 않은 것으로 확인되었으며, 따라서 본 연구에서의 성형품 형상 및 공정 조건에서는 금형 내부에 삽입된 금속 인서트는 충전 형상에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 압력 및 온도 분포

용융된 플라스틱 멜트의 금형 내부로의 충전이 진행되면서 충전 길이가 증가하면서 멜트가 주입되는 스프루의 노즐 부분에서의 압력은 지속적으로 증가하게 된다. 캐비티 두께 1.2mm 및 충전 시간 0.7s의 공정 조건이 적용된 경우, 충전 공정 중 노즐에서의 압력 변화는 Fig. 6과 같다.

충전이 진행될수록 압력이 점차 증가하여 충전이 종료되었을 때 최대 압력이 약 26MPa으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 충전이 시작되고 약 0.3s가 지났을 때 러너의 충전이 시작되며, 3.2절의 충전 형상에서 확인된 바와 유사하게 약 0.35s 시점(50% 충전)부터 캐비티의 충전이 시작되었다. 이 시점부터 금형 내부에서 형성되는 압력에 의한 형체력(clamping force)가 급격하게 증가하기 시작하였으며, 최종적으로 약 1.5ton-f의 형체력이 발생하는 것으로 나타났다. 형체력은 금형이 체결되는 방향으로 작용하기 때문에 이 방향으로 넓은 면적을 차지하고 있는 캐비티의 충전이 시작되면서 형체력이 크게 증가하게 되었다.



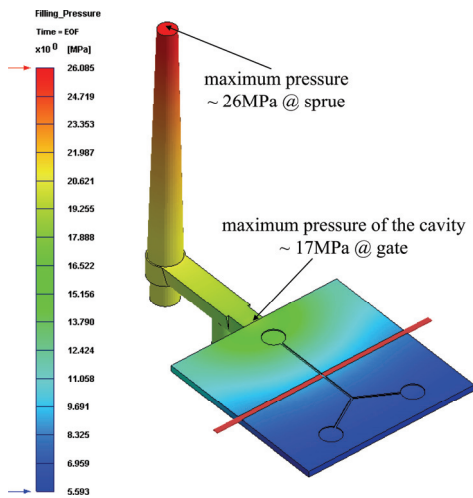


Fig. 7 Pressure distribution at the end of the filling stage

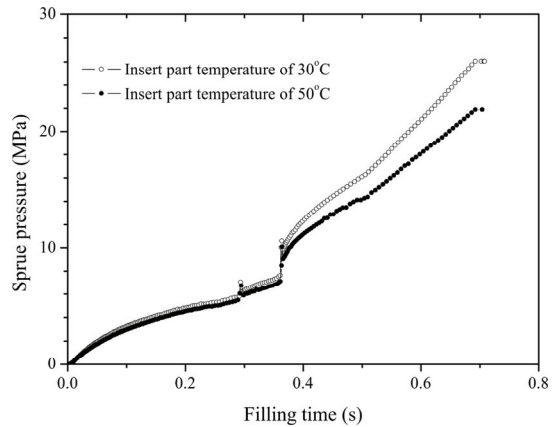


Fig. 9 Effect of metal insert temperature on the sprue pressure variation during the filling stage

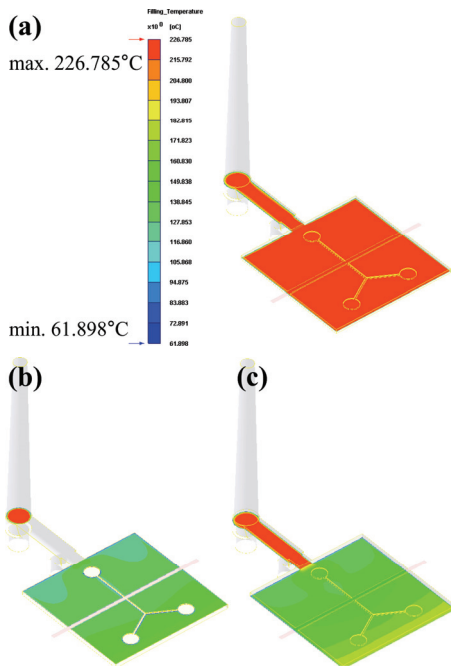


Fig. 8 Temperature distributions at the end of the filling stage; (a) On the middle plane (b) Near the top surface (c) Near the bottom surface

충전 공정이 종료된 시점에서의 성형품 내부의 압력 분포는 Fig. 7과 같다. 이 결과에서 확인할 수 있듯이 노즐에서 게이트까지의 이송 시스템에서의 압력 변화는 약 9MPa이나, 게이트에서 캐비티 끝 부분까지의 캐비티 내부에서의 압력 변화는 약

17MPa로 나타났다. 이는 스프루와 러너와 같은 이송 시스템에 비하여 캐비티의 두께가 매우 얇기 때문에 나타나는 결과이다.

Fig. 8은 충전이 종료된 시점에서의 온도 분포를 나타내고 있으며, 캐비티의 두께 방향으로 중간 평면(Fig. 8(a)), 윗면 부분(Fig. 8(b)), 그리고 아랫면 부분(Fig. 8(c))에서의 온도 분포이다. 윗면 및 아랫면 부분을 나타내는 평면은 금형 벽면에서 내부 방향으로 0.1mm 떨어진 면을 의미한다. 이 결과에서 확인할 수 있듯이 성형품의 윗면과 아랫면 부분에서의 불균일한 온도 분포가 발생하였다. 즉 윗부분(Fig. 8(b))에 비하여 아랫부분(Fig. 8(c))의 온도가 전체적으로 더 높은 것으로 나타났다. 이는 30°C의 온도로 설정된 금속 인서트 위치인 윗부분에서 금속 인서트의 영향이 크게 나타난 결과로 판단할 수 있다. 이와 같은 성형품의 두께 방향으로의 온도 불균일은 뒤틀림 등의 후변형을 발생시킬 수 있기 때문에 이를 최소화하여야 한다.

### 3.4 금속 인서트 온도의 영향

금형에 삽입된 금속 인서트의 온도가 충전 공정에 미치는 영향을 확인하기 위하여 금속 인서트의 온도를 50°C로 증가시킨 공정 조건에 대한 해석을 수행하였다. 금속 인서트의 온도 변화는 캐비티를 충전하는 플라스틱 멜트의 온도에 영향을 주는 주요 공정 변수로 고려할 수 있다. 금속 인서트의 온도를 30°C로 설정한 이전의 결과와 50°C로 증가된 결과는 Fig. 9과 같이 충전 공정 중 다른 압력 변화를 보여 주었다.

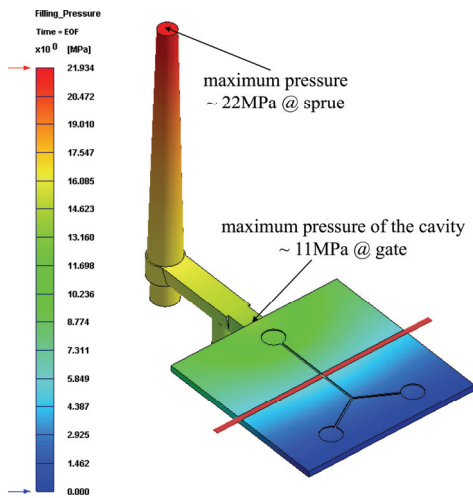


Fig. 10 Pressure distribution at the end of the filling stage with the metal insert temperature of 50°C

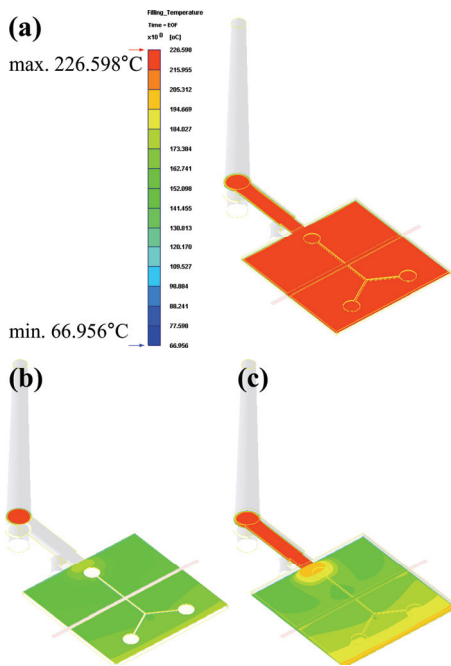


Fig. 11 Temperature distributions with the metal insert temperature of 50°C; (a) On the middle plane (b) Near the top surface (c) Near the bottom surface

본 연구에서는 충전 해석 전 금형 베이스의 온도 분포 해석을 진행하였기 때문에 금속 인서트의 온도 변화가 스프루와 러너와 같은 이송 시스템 부분의 금형 벽면 온도에도 영향을 주게 된다. 따

라서 캐비티의 충전이 발생하기 이전에도 노즐에서의 압력은 다소 감소하는 것으로 나타났으나 그 변화는 크지 않았다. 하지만 캐비티의 충전이 시작되는 0.35s 이후의 압력 변화의 경우, 금속 인서트의 온도가 50°C로 증가된 조건에서의 해석이 압력 변화에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이는 금속 인서트의 온도 증가가 캐비티 부의 금형 표면 온도 변화뿐만 아니라 플라스틱 멜트가 금속 인서트와 접촉하면서도 많은 영향을 주는 것으로 이해할 수 있다. 이와 같은 이유로 충전이 종료된 시점에서의 최대 압력은 약 22MPa로 감소하는 것으로 나타났다.

금속 인서트의 온도를 50°C로 설정한 해석에서 충전이 종료된 시점에서의 압력 및 온도 분포를 Figs. 10과 11에 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 노즐에서의 최대 압력 감소뿐만 아니라 캐비티 부에서의 압력 변화도 약 11MPa로 감소하는 것으로 나타났다. 이송 시스템 부에서의 압력 변화는 약 11MPa로 30°C의 금속 인서트 온도 결과에 비하여 다소 증가하는 것으로 확인되었다. 하지만 변화율을 고려하면 캐비티에서의 압력 변화 감소가 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 온도 분포에서도 금속 인서트 온도 변화의 영향을 확인할 수 있다. 최대 온도에서는 거의 차이가 없으나 최소 온도가 다소 증가하였으며, 특히 캐비티의 윗부분과 아랫부분의 온도 분포 차이가 줄어든 것을 알 수 있다. 이와 같은 온도의 균일성은 최종 성형품의 뒤틀림 감소와 균일한 특성 등 성형품의 품질 향상에 도움이 될 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인서트 사출성형 공정의 충전 공정에 대한 해석 연구를 수행하였다. 최종 성형품으로 금속 전극이 포함된 플라스틱 미세유체 칩을 설계하고 사출성형 공정 해석 소프트웨어인 Moldex3D R12.0을 이용한 충전 공정 기초 해석을 진행하였다. 이와 같은 해석 연구를 통하여 다음과 같은 주요 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 설계한 미세유체 칩의 인서트 사출성형의 경우, 금형에 삽입된 금속 인서트가 용융된 플라스틱 멜트의 충전 형상에 주는 영향은 적었으나 성형품의 형상에 따른 약간의 지체 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 캐비티의 충전이 시작되면서 형체력의 급

속한 증가가 발생하며, 충전이 종료된 시점에서 이송 시스템에서의 압력 변화보다 상대적으로 두께가 얇은 캐비티 부에서의 압력 변화가 더 큰 것으로 나타났다.

(3) 금형 내 금속 인서트의 영향 및 비대칭 형상으로 인하여 충전이 종료되었을 때 캐비티의 두께 방향으로의 온도 불균형이 나타났다.

(4) 금속 인서트의 온도를 증가시킴으로써 성형품의 두께 방향 온도 불균형은 감소시킬 수 있으며, 동시에 최대 압력 및 캐비티 내 압력 변화의 감소를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻은 기초 해석 결과들은 보압(packaging)과 냉각(cooling)과 같은 충전 후 공정에 대한 후속 연구 및 이를 기반으로 한 최종 성형품의 뒤틀림 감소 등의 성형품 품질 향상 연구에 활용될 계획이다. 이를 통하여 금속 전극이 포함된 미세유체 칩의 개발뿐만 아니라 인서트 사출성형 공정에 대한 다양한 연구 결과의 확립과 적용이 가능할 것이다.

## 후 기

이 논문은 국토교통부의 국토교통기술촉진연구사업(15CTAP-C097490-01)의 지원 및 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A1008487).

## REFERENCES

1. Pötsch, G. and Michaeli, W., "Injection Molding: An Introduction," Hanser Gardner Publications, pp. 180-181, 2007.
2. Lho, T.-J. and Kim, K.-S., "A Study on Implementation of Al-Inserted Plastic Injection Molding Process for Automobile Interior-Parts," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 5, pp. 43-51, 2008.
3. Honkanen, M., Hoikkanen, M., Vippola, M., Vuorinen, J., and Lepistö, T., "Metal-Plastic Adhesion in Injection-Molded Hybrids," Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 23, No. 13-14, pp. 1747-1761, 2009.
4. Chiang, Y.-C., Cheng, H.-C., Huang, C.-F., Lee, J.-L., Lin, Y., et al., "Warping Phenomenon of Thin-Wall Injection Molding," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 55, No. 5-8, pp. 517-526, 2011.

5. Jin, K., Jeong, T., Kim, T., Kim, N., and Kim, B., "Analysis and Design for Reducing Residual Stress and Distortion after Ejection of injection Molded Part with Metal-Insert," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 12, pp. 2533-2542, 2014.
6. Reyes, D. R., Iossifidis, D., Auroux, P.-A., and Manz, A., "Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology," Analytical Chemistry, Vol. 74, No. 12, pp. 2623-2636, 2002.
7. Park, T., "Thermoplastic Fusion Bonding of UV Modified PMMA Microfluidic Devices," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 5, pp. 441-449, 2014.
8. Johnson, A. S., Selimovic, A., and Martin, R. S., "Integration of Microchip Electrophoresis with Electrochemical Detection Using an Epoxy-Based Molding Method to Embed Multiple Electrode Materials," Electrophoresis, Vol. 32, No. 22, pp. 3121-3128, 2011.
9. Hieber, C. and Shen, S., "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 1-32, 1980.