

미세 패턴 사출 성형에서의 이형력에 대한 성형 조건의 영향 평가

박시환^{a*}, 유영은^b, 이우일^c

Effect of Molding Conditions on Demolding Force During Injection Molding of Parts with Micro-features

S.H. Park^{a*}, Y.E. Yoo^b, W.I. Lee^c^a Mechanical Engineering, Ulsan College, Ulsan 680-749, Republic of Korea^b Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Republic of Korea^c School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	5	December	2013
Revised	11	March	2014
Accepted	13	March	2014

Keywords:

Demolding
Release force
Shrinkage
Roughness

ABSTRACT

Micro/nano-injection molding is one of the main processing techniques for polymer micro-fabrication. Most of the difficulties encountered in polymer micro-molding are caused by the demolding, rather than the filling of molds. Therefore, studying the demolding process is vitally important for manufacturing polymer replicas. The most important parameters are the thermal stress, friction and adhesion forces, and mechanical strength of the resist. In this research, we determined the effects of the processing conditions on the ejection force for cases involving two common thermoplastic polymers. The results showed that the processing conditions noticeably influenced the ejection force.

1. 서론

나노 기술의 발달로 제품의 소형화 정밀화 되면서 초소형 정밀 기계부품이나 소형 의료 부품등과 같은 제품의 크기가 매우 작은 정밀 부품의 생산성 향상을 위한 마이크로 몰딩분야에 대한 요구가 증대되고 있다. 이를 위해 매우 적은 양의 성형 소재를 정밀하게 제어할 수 있는 정밀 성형기의 개발이나 정밀 금형 개발이 진행되어 왔다. 이와는 별도로 기능성 표면 제품을 구현 및 광학 특성을 플라스틱 기판에 구현하기 위하여 최소 구조물의 크기는 마이크로 급 또는 나노급이나 전체 제품은 수십 센티미터의 크기를 가지는 제품의 성형 기술의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 미세 패턴을 가지는 제품 중 이미 광학 저장 매체와 도광판등은 상용화 단계로

대량 생산중이나 바이오 분야와 기능성 표면 제품의 구현을 위해서 패턴의 형상비가 큰 제품의 수요가 지속적으로 증가하고 있으며 이에 관한 연구도 지속적으로 요구된다.

미세 패턴을 가지는 제품의 사출 성형 공정도 일반 사출 성형 공정과 동일하게 성형, 보압, 냉각, 이형 4가지 과정으로 이루어져 있다. 위와 같은 과정 중 발생하는 주요 문제점은 성형 과정과 보압 과정 동안 패턴의 불안전 성형과 이형 과정에서의 미세 구조물의 변형 및 파단이다. 특히 이형 과정에서의 불량 요인은 세장비가 클수록, 미세 패턴의 형상이 작을수록 더 크게 발생하게 된다^[1,2]. 또한 축벽의 표면 거칠기에 따라 이형력에 차이가 있음이 연구되었다^[2]. Yuhua Guo^[3,4]은 ABAQUS/Standard을 사용하여 Hot embossing 공정에서 금형과 polymer의 수축차이로 인한 열응력에 대하여 연

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

Fax: +82-52-279-3137

E-mail address: shpark3@uc.ac.kr (S.H. Park).

구를 수행하여, 공정 최적화에 대한 제안을 하였으며, Interface adhesion에 의한 마찰력에 대한 영향 평가를 수행하였다. G. Fu^[5]은 Micro Metal Injection Molding에서 이형력을 직접 측정하였고 미세패턴의 성형품과 금형의 접촉압력(Contact pressure)의 영향에 대하여 분석하였다. 또한 G. Fu 등^[6]은 미세패턴의 성형품과 금형의 접촉압력(Contact pressure)의 영향에 대하여 분석함으로써 G. Fu 등^[5]의 연구 내용을 뒷받침 하였다. Sunggook Park 등^[7] 수치적 해석과 실험을 통하여 최적의 이형온도가 존재함을 보였다. 이처럼 기존 연구의 대부분은 실제적 실험보다는 주로 수치적 해석을 통하여 미세 패턴의 이형성에 대한 연구를 수행되어 왔다.

본 연구에서는 Park 등^[14]의 제시했던 실험과 같이 100 μm급 Line 패턴을 가지는 미세 패턴 측벽의 표면 거칠기가 다른 Ni-stamper 및 Insert core을 사용하였고 제품의 성형 과정에서 이들을 가열하여 패턴을 성형 시킬 수 있는 전기 가열 방식의 금형을 사용하여 금형온도 조절이 가능하도록 하였으며 성형 조건을 변경하면서 실시간으로 이형력을 측정할 수 있는 탈형 구조를 구상하여 패턴의 측벽 표면 거칠기에 따라 성형 조건이 이형력에 주는 영향을 평가하였다.

2. 성형 조건을 고려한 이형력 예측

2.1 이형력 분석

이형 과정에서 발생하는 변형과 파단 현상을 이해하기 위해서는 이때 발생하는 이형력에 대한 이해가 필요하다. Fig. 1은 Line 형상의 미세 패턴에 작용하는 이형력을 나타내고 있다. 이 때 이형력

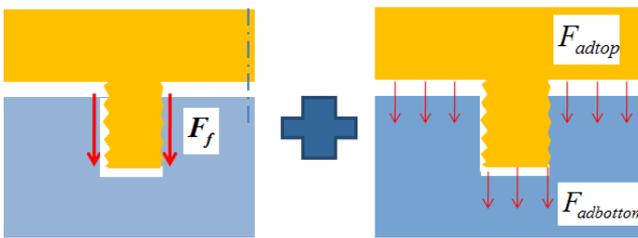


Fig. 1 Forces acting on the pattern

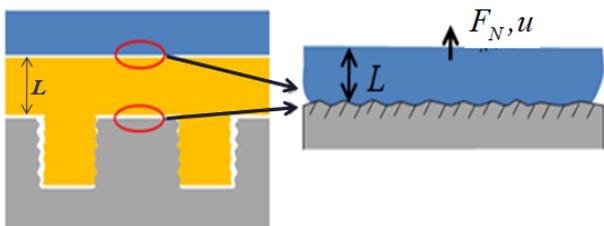


Fig. 2 Rectangular elastic block with flat surfaces in contact with a nominally flat substrate surface

($F_{pull-off}$)은 식 (1)과 같이 패턴 바닥에서 작용하는 접착력($F_{adbottom}$)과 윗면에서의 접착력(F_{adtop}), 측면에서 발생하는 마찰력(F_f)의 합으로 표현될 수 있을 것이다^[14].

$$F_{pull-off} = F_f + F_{adtop} + F_{adbottom} \quad (1)$$

이때 패턴 바닥과 윗면에서 작용하는 접착력은 Fig. 2와 같이 금형면과 성형 수지면이 접촉하는 것으로 가정할 수 있고 이때 Persson^[8]의 연구에 의하면 식 (2)와 같이 성형품과 금형의 결합력보다 소재의 수축에 의한 Elastic energy가 클 경우 두 계면 사이에 결합이 깨어지게 된다. 여기서 L은 성형품의 두께, E는 탄성계수, u는 변형량, A_0 는 면적, $\Delta\gamma$ 는 두 표면에서의 접착력을 말한다. 이 경우 이형력은 패턴 바닥과 윗면에 작용하는 접착력의 영향은 극히 미비하고 패턴 측면에서 발생하는 마찰력의 주요인이 된다.

$$\frac{1}{2} A_0 L E \left(\frac{u}{L} \right)^2 > A_0 \Delta\gamma \quad (2)$$

이형력의 결정하는 또 다른 요인인 마찰력의 발생 원인에 대하여 검토하기 위하여서는 사출 성형과정 중 발생하는 수축현상에 대한 이해가 필요하다. 이형력에 영향을 미치는 과정은 냉각과정부터 진행된다. 즉 Fig. 3와 같이 보압 완료 이후 냉각 과정 중 성형된 수지는 제품의 중심방향으로 수축(Δ_{sh})이 발생되고 미세 패턴에서도 미세한 수축(δ_{sh})이 발생된다. 이로 인하여 일부 측벽에서는 수직항력이 발생하게 되고 또한 다른 측벽에서는 성형 조건에 따라 일부 탈형이 일어나게 된다.

이후 이형 과정은 외력에 의해 성형된 수지를 금형에서 빼내는 공정으로 금형 패턴부의 측벽과 성형된 수지면이 미끄러지면서 탈형이 이루어짐으로써 여러 요인에 의해 발생하는 수직항력(P_c)의 영향을 받게 된다. 이때 각 측벽에서 발생하는 마찰력(F_{f1}, F_{f2})은 식 (3)과 같이 될 것이다. 따라서 실험적으로 측정되는 이형력은 패턴 바닥과 윗면에서 작용하는 접착력이 매우 작다면 탈형 과정에서의 발생하는 마찰력에 의한 힘으로 측정된다^[14].

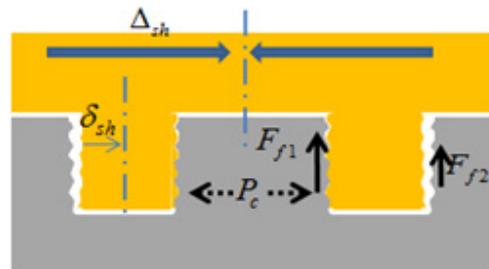


Fig. 3 Forces acting on the pattern

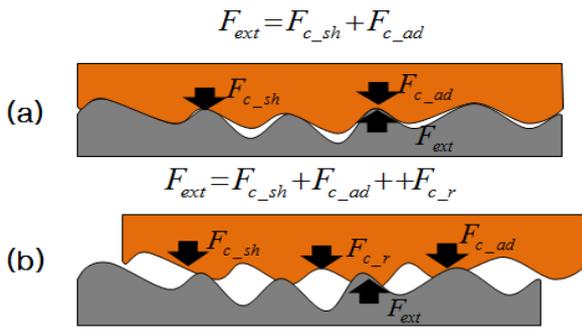


Fig. 4 Roughness interaction: (a) Initial state, stamper and polymer roughness are connected, no contact load; (b) Arbitrary state after polymer displacement, the roughness-induced interfacial normal load

$$F_{pull-off} \approx F_{f1} + F_{f2} = \mu P_{c1} A_{c1} + \mu P_{c2} A_{c2} \quad (3)$$

이때 마찰력은 패턴의 표면 거칠기와 성형 조건에 따라 달라지는 패턴 측벽에서 성형되는 수지의 표면 상태 및 두 표면이 상관 관계에 영향을 받을 것이다. 만약 패턴의 표면 거칠기가 거칠고 표면 거칠기 안으로 성형 소재가 충전되는 성형 조건을 갖는다면 마찰력의 크기가 커질 것이며 패턴의 표면 거칠기가 매끈할수록 마찰력의 크기는 작아질 것이다. 이러한 표면 거칠기의 영향에 의해 패턴 측벽에 작용하는 수직항력은 Fig. 4와 같이 냉각 과정 중 제품 전체의 수축(Δ_{sh}) 및 각 패턴 안에서의 수축(δ_{sh})에 의한 수직항력($P_{c_{sh}}$) 의한 힘($F_{c_{sh}}$)과 두 소재간의 접착력(Adhesion)에 의한 수직항력($P_{c_{ad}}$)에 의한 힘($F_{c_{ad}}$) 및 이형 공정 중 측벽 면과 성형된 수지간의 상대적 움직임이 발생할 때 미세 패턴 측벽의 거칠기와 이 부분의 성형된 수지 간의 상대적 움직임으로 인한 수직항력(P_{c_r})에 의해 발생하는 힘(F_{c_r})으로 구분되어 질 수 있다. 이는 식 (4)와 같이 비교적 간단하게 정의 할 수 있다^[14].

$$F_{ext} \approx F_{c_{sh}} + F_{c_{ad}} + F_{c_r} \quad (4)$$

3. 실험

3.1 Ni-Stamper 제작 및 Insert core 제작

미세 패턴을 가지는 제품의 이형력은 패턴 바닥과 윗면에서 작용하는 접착력과 패턴 측면에서 발생하는 마찰력의 합으로 표현될 수 있음을 이미 설명하였다. 이를 실험적으로 검증하기 위해서 3종류의 Stamper를 제작하였다. 그중 하나는 성형된 수지와 금형면과의 접착력을 시험할 수 있는 아무런 패턴이 없는 Stamper와 제작 공정에 따라 미세 패턴 측벽의 표면 거칠기가 다른 Ni-stamper 및

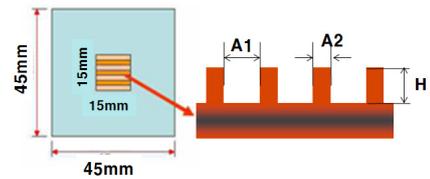


Fig. 5 Micro channel of Ni-stamper

Table 1 Dimension of the Micro Pattern

s	A1 (μm)	A2 (μm)	H (μm)
size	100	50	100

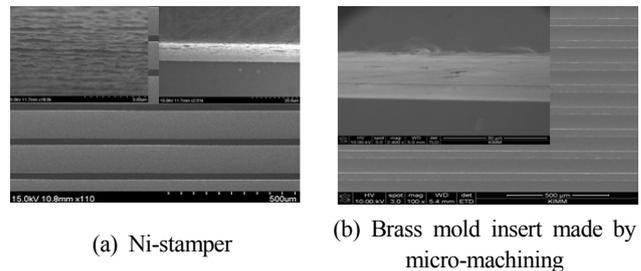


Fig. 6 The sidewall roughness of brass mold insert and Ni-stamper

Insert core를 제작하였다.

Ni-Stamper는 실리콘 기판상에 Negative PR (THB)을 Spin Coater에서 약 100 μm의 두께로 도포한 후, 건조, 노광 및 건식식각 등의 공정을 수행하여 제작된 DRY 에칭 실리콘 웨이퍼에 전해 도금을 수행하여 제작 되었다. 또한 미세 패턴 측면의 거칠기의 영향을 검토하기 위하여 Micro milling machine을 사용하여 동일한 패턴을 가지는 Insert core를 가공 제작하였다. Fig. 5는 위 공정으로 제작된 미세패턴 형상을 나타낸 것이며 Table 1은 제작된 Ni-stamper의 규격을 나타낸 것이다. 모든 Line 패턴들의 폭과 깊이는 동일하도록 제작하였다.

이 때 사용된 Ni-stamper의 측벽 표면 거칠기는 Fig. 6와 같이 Insert core의 측면에 비하여 매우 거칠다. 이는 H.-C. Liu^[9]의 연구 결과 실제 금속 스템퍼를 제작을 위한 마스터 제작 시 사용되는 공정인 식각 공정은 측벽에 수 십 nm단위의 거칠기가 생성됨이 보고되고 있음에서도 알 수 있다. 하지만 정밀 기계가공에 의해 미세 패턴을 가지는 Insert core를 제작하는 경우는 이보다 표면 거칠기가 매우 매끈한 패턴을 제작할 수 있다. 거칠기의 정량적 측정은 패턴의 측벽을 직접 측정할 필요가 있으나 실제 측정 방법의 난해함으로 인하여 동일한 배율의 SEM 사진을 이용하여 정성적 비교를 하였다.

3.2 사출성형 실험 장비

미세 패턴의 이형력을 사출 성형 중에 직접 측정하기 위하여



Fig. 7 Mold and the electric circuit for rapid heating of the stamper

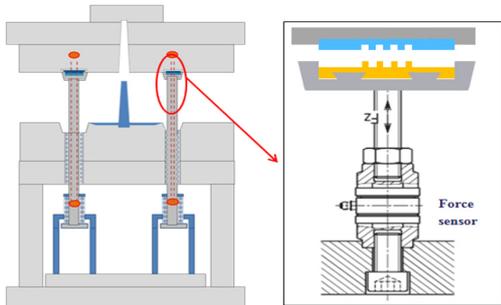


Fig. 8 Load sensor and Ni-stamper and their installation on the mold wall

Ni-stamper와 Insert core를 Fig. 7과 같이 금형 면에 부착 하였다. 이 때 Ni-stamper는 별도의 Clamp구조를 설치하여 Stamper를 잡을 수 있는 금형 구조를 제작하였으며, Insert core는 볼트로 체결하고 미세패턴부의 면적과 전체 성형 면적은 동일하게 유지하였다. Fig. 8는 이형시 성형품의 변형 등에 의한 측정 오차를 줄이고 보다 정확히 측정하기 위해 under-cut 형상부를 설계하고 여기에 Kistler 힘 센서를 부착하여 완전한 금형 형개 후 Core을 당김으로써 금형의 형개 과정에서 발생할 수 있는 요소들을 제거하고 미세 패턴부의 이형력을 직접 측정하도록 금형 설계하였다. 또한 성형 조건 중 사출 온도에 대한 영향도를 평가하기 위하여 사출 금형을 빠른 시간에 온도를 상승시키고 냉각 시킬 수 있는 전기 가열 방식으로 금형을 적용함으로써 온도를 상승시키고 동시에 충전 후 상온에서 냉각함으로써 사이클 시간이 크게 증가되지 않도록 하였다. 본 연구에서 사출 성형을 위해 사용한 사출 성형기는 스미토모(Sumitomo)사의 전동식 사출 성형기 SE50D를 사용하였으며 사용된 수지는 현대케미칼사의 PP H6110 (이하 PP), Asahi사의 PMMA 80N (이하 PMMA)이다.

3.3 패턴 측벽의 표면 거칠기에 의한 성형 조건의 영향 평가

3.3.1 금형면과 수지면의 접착력 결과

이형력에 영향을 주는 요인 중에 패턴 바닥과 윗면에서 작용하는

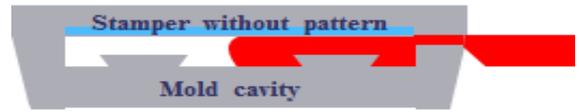


Fig. 9 Stamper Without intaglio structure

Table 2 Processing condition

	Melt Temp (°C)	Mold Temp (°C)	Packing Pressure (%)
PP	220,260	25,60,90	5,50,100,120
PMMA	260,300	25,60,90	5,50,100,120

접착력의 영향도를 알아보기 위해서 Fig. 9과 같이 패턴이 없는 Ni-stamper를 사용하여 Table 2과 같은 사출 조건으로 사출성형을 수행하였다. 그 결과 PP와 PMMA모두 이형력이 극히 미비하거나 측정되지 않았다.

식 (2)와 같이 본 실험의 경우 제품의 두께가 1 mm 이상이 되는 필 경우 사용 수지의 수축율을 고려하면 수지의 수축으로 인한 Elastic energy는 두 계면 사이의 결합력보다 훨씬 크게 된다. 즉 접착력에 의한 영향은 거의 없거나 현저히 줄어들게 됨을 알 수 있다. 따라서 보압 및 냉각 과정을 거치는 동안 이미 패턴의 바닥과 윗면에서는

탈형이 이루어지고 실제 이형과정에서 측정되는 이형력에는 영향을 미치지 않아 측정되는 이형력은 미세 패턴의 측벽에서 발생하는 마찰력의 영향으로 볼 수 있다.

3.3.2 성형 조건(금형 온도 및 보압)의 영향 평가

이형력의 또 다른 요소인 패턴 측벽에서 발생하는 마찰력을 검토하기 위하여 앞서 설명한 것과 같이 마찰력이 측벽 표면 거칠기의 영향을 받기 때문에 측벽의 표면 거칠기가 다른 Ni-Stamper와 Insert core를 사용하였다. 또한 성형 조건은 외관상 100 μm의 패턴이 완전 성형된 조건을 기준으로 보압과 금형온도를 조종하였다. 이 때 성형 조건에 따라 패턴 측벽의 표면거칠기의 충전도 영향을 받을 것이지만 이를 측정하기에는 어려움이 있어 nano 크기의 패턴의 성형성에 영향을 주는 인자인 금형 온도와 보압 조건에^[10,11,13] 대하여 이형력의 크기를 측정하였다.

일반적으로 사출 성형에서 보압을 키울수록 제품 전체의 수축은 감소하게 된다^[12]. 따라서 중심부로 수축되면서 형성되는 수축에 의한 측벽이 받는 수직 항력($p_{c,sh}$)은 감소하게 된다. 하지만 Fig. 10의 결과는 측벽의 표면거칠기가 큰 Ni-Stamper의 경우 이형력을 실제 측정한 결과 보압을 키울수록 이형력은 크게 증가하고 Insert core의 경우는 그 반대의 경향을 보여주고 있다.

이것은 Fig. 4와 같이 마찰력을 결정하는 수직항력 중에 수축에

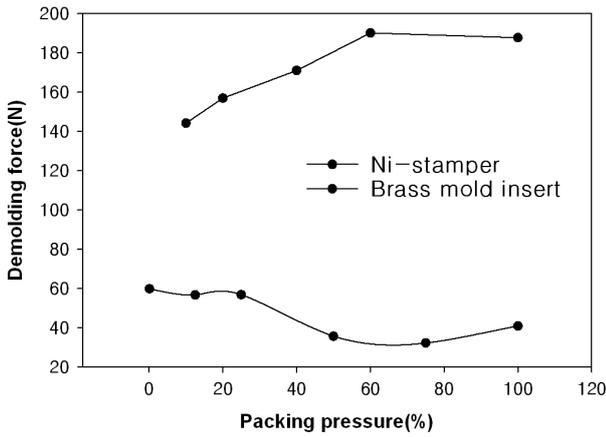


Fig. 10 Effect of packing pressure according to surface roughness

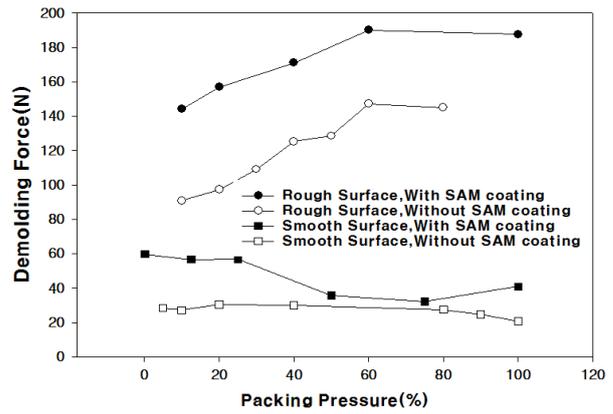


Fig. 13 Effect of surface energy in rough surface and smooth surface

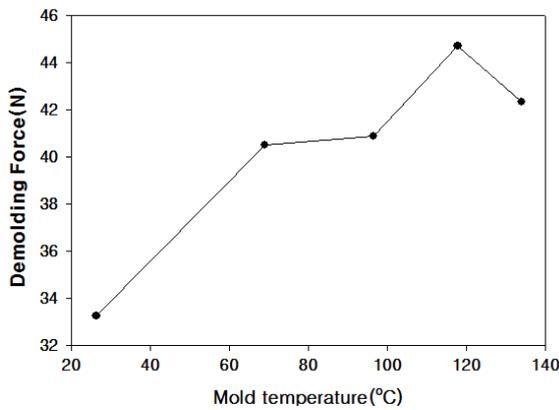


Fig. 11 Effect of the transcription for PP

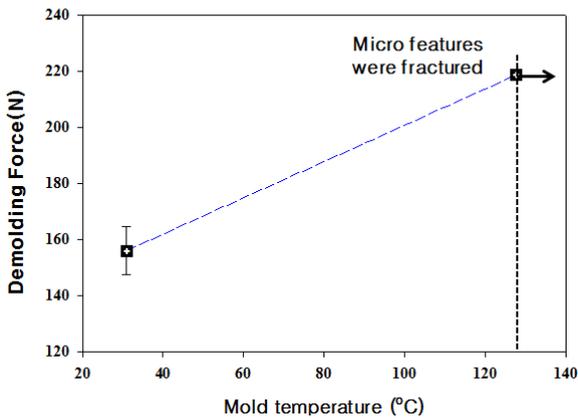


Fig. 12 Effect of the transcription for PMMA

의한 수직 항력($p_{c,sh}$) 뿐만 아니라 탈형 시 발생하는 표면 거칠기에 의한 수직항력($p_{c,r}$)이 영향을 미치기 때문이다. 이것은 보압의 증가로 표면 거칠기가 상대적으로 큰 Ni-stamper의 경우는 표면 거칠기 안쪽으로의 충전이 진행되게 되고 이로 인하여 성형된 수지와 미세 패턴 측벽의 거칠기 간의 상대적 움직임으로 인한 수직항

력($p_{c,r}$)은 증가하게 될 것이다. 이에 따라 실제 이형력의 증가가 이루어진다. 이와는 반대로 표면 거칠기가 작은 insert core는 표면 거칠기 안쪽으로의 충전은 진행되나 그 간섭량이 매우 작아 표면 거칠기로 인한 수직항력($p_{c,r}$)은 무시할 만하다. 따라서 보압이 증가 할수록 중심부로 수축량의 감소하여 수축에 의한 수직 항력($p_{c,sh}$)은 감소하게 되어 반대의 결과를 보인다.

이러한 미세패턴이 표면 거칠기 안쪽으로의 충전 현상을 설명하기 위하여 Ni-stamper를 이용하여 PP 및 PMMA를 이용해 금형 온도에 따른 이형력을 측정하였다. Fig. 11, Fig. 12과 같이 금형 온도를 올릴수록 이형력이 증가함을 할 수 있다. 이는 마이크로, 나노 사출에서 패턴의 충전도는 성형 조건 중 금형온도와 보압의 영향을 가장 많이 받는다는 연구결과^[10,11]와도 일치한다. 따라서 패턴 측벽의 표면 거칠기가 상대적으로 큰 Ni-stamper의 경우는 보압이 클수록 금형온도가 높을수록 미세 패턴 측벽의 표면 거칠기와 이 부분에 충전된 형상 간의 상대적 움직임으로 인한 수직항력($p_{c,r}$)은 증가하게 되어 이형력이 커지게 된다. 하지만 Insert core의 경우는 표면 거칠기에 의한 수직항력($p_{c,r}$)은 큰 차이를 보이지 않는 반면 보압의 증가로 인해 수축에 의한 수직항력($p_{c,sh}$)의 감소가 최종 이형력을 감소시킨다.

3.3.3 표면에너지에 의한 접착력 평가

마지막으로 표면에너지에 의한 접착력의 영향도를 평가하기 위하여 위에 사용된 Ni-stamper와 Brass insert core에 습식 기반의 SAM 코팅을 수행하였다. Fig. 13과 같이 패턴 측벽의 거칠기의 영향과는 별도로 표면 에너지를 감소시켜줌으로써 최종 이형력을 낮출 수 있었다.

이는 두 소재간의 접착력(Adhesion)의 감소로 패턴의 측벽에서 마찰력에 영향을 미치는 수직항력($p_{c,ad}$)이 감소하기 때문이다.

본 연구에서 수행된 세 가지 실험을 통하여 마이크로급 미세 패턴을 가지는 제품의 이형력에 영향을 미치는 인자에 대하여 검토를 수행하였고 전체 성형 조건과의 관계성에 대하여 검토를 수행하였다. 이를 통하여 마이크로급 미세 패턴을 사출 성형을 통해 구현하고자 할 경우 패턴의 측벽 거칠기의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 성형 조건과 이형성에 대한 기초적인 영향도도 평가할 수 있다. 즉 성형성을 높이는 일반적 조건인 금형 온도를 높이는 경우 이형력은 급격히 증가하나 보압을 증가시키는 경우는 패턴 측벽의 표면 거칠기에 따라 그 영향도가 달라짐을 알 수 있다.

4. 결론

최소 구조물의 크기가 마이크로급 패턴을 가지고 있는 제품의 경우 일반적으로 사출 성형을 통하여 제작하기 위해서는 미세 패턴의 완전 충전과 이형과정에서의 패턴의 손상을 일으키는 이형성의 두 가지 문제 중 본 연구에서는 이형성에 관한 연구를 수행하였다. 패턴이 이형성에 영향을 주는 인자는 표면에너지의 의한 접착력 및 패턴의 측벽에서의 마찰력으로 대상화 될 수 있으며 측벽에서의 마찰력에 영향을 주는 수직 항력은 소재의 수축율에 의한 수직 항력, 접착력에 의한 수직항력 그리고 측벽 거칠기에 의한 수직항력으로 단순화하였으며 성형 조건의 변경을 통하여 측벽의 표면거칠기의 영향이 매우 크다는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

References

- [1] Sasaki, T., Koga, N., Shirai, K., Kobayashi, Y., Toyoshima, A., 2000, An experimental study on ejection forces of injection molding, *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* 24 270-273.
- [2] Worgull, M., He'tu, J. F., Kabanemi, K. K., Hecke, M., 2008, Hot embossing of microstructures: characterization of friction during demolding, *Microsyst Technol.* 14 767-773.
- [3] Worgull, M., Hecke, M., 2004, New aspects of simulation in hot embossing, *Microsyst Technol* 10 432-437.
- [4] Guo, Y., Liu, G., Xiong, Y., Tian, Y. C., 2007, Analysis of the demolding forces during hot embossing, *Microsyst Technol* 13 411-415.
- [5] Fu, G., Loh, N. H., Tor, S. B., Tay, B. Y., 2006, Analysis of demolding in micro metal injection molding, *Microsyst Technol.* 12 554-564.
- [6] Guo, Y., Liu, G., Xiong, Y., Tian, Y. C., 2007, Study of the demolding process-implications for thermal stress, adhesion and friction control, *J. Micromech. Microeng.* 17 9-19.
- [7] Park, S., Song, Z., Brumfield, L., Amirsadeghi, A., Lee, J. J., 2009, Demolding temperature in thermal nanoimprint lithography, *Appl Phys A* 97 395-402.
- [8] Persson, B. N. J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A. I., Tosatti, E., 2004, On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion, *J. Phys.: Condens Matter.* 17 R1
- [9] Liu, H. C., Lin, Y. H., Hsu, W., 2003, Sidewall roughness control in advanced silicon etch process, *Microsystem Technologies* 10 29-34
- [10] Wimberger-Friedl, R., 2000, Injection molding of sub- μ m grating optical elements, *Journal of injection molding technology* 4 78-83
- [11] Yu, M. C., Young, W. B., Hsu, P. M., 2007, Micro-injection molding with infrared assisted mold heating system, *Materials Science and Engineering: A* 460-461 288-295.
- [12] Kim, H. P., Kim, Y. J., 2002, A Study on the Effects of Filling and Packing Phases on Injection Molding Process, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 11 4 44-53.
- [13] Jo, C. Y., Shin, H. G., Park, D. Y., Hong, N. P., Kim, B. H., 2006, A study on the effective molding of the micro-LGP using an injection molding system, *International Symposium on Machine Tools & Manufacturing Technology* 495-498.