

# 미세 핫엠보싱 공정에서 폴리머의 유동특성

반준호\*, 신재구\*, 김병희#, 김현영\*\*

## Flow Behaviors of Polymers in Micro Hot Embossing Process

Jun Ho Ban\*, Jai Ku Shin\*, Byeong Hee Kim<sup>#</sup> and Heon Young Kim\*\*

### ABSTRACT

The Hot Embossing Lithography(HEL) as a method for the fabrication of the nanostructure with polymer is becoming increasingly important because of its simple process, low cost, high replication fidelity and relatively high throughput. In this paper, we carried out experimental studies and numerical simulations in order to understand the viscous flow of the polymer (PMMA) film during the hot embossing process. To grasp the characteristics of the micro patterning rheology by process parameters (embossing temperature, pressure and time), we have carried out various experiments by using the nickel-coated master fabricated by the deep RIE process and the plasma sputtering. During the hot embossing process, we have observed the characteristics of the viscoelastic behavior of polymer. Also, the viscous flow during the hot embossing process has been simulated by the continuum based FDM(Finite Difference Method) analysis considering the micro effect, such as a surface tension and a contact angle.

**Key Words** : Hot embossing(핫 엠보싱), PMMA(polymethylmethacrylate), Viscosity(점성), Contact angle(접촉각), Micro rheology(미세 레올로지)

### 1. 서론

대면적 미세 구조물을 제조하는 전자빔, 이온빔, X-ray 리소그래피 등과 같은 공정들은 재료처리량이 적고 고가라는 한계를 지니고 있다.<sup>1</sup> 기존의 광학 리소그래피 또한 빛의 회절로 인해 대략 100nm 라는 분해능의 한계를 가진다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 Chou<sup>2</sup> 외 공동연구자들에 의해 처음으로 핫엠보싱 리소그래피(hot embossing lithography)가 제안되었다. 이 공정은 폴리머를 유리전이온도

( $T_g$ ) 이상으로 가열하여 몰드(mold) 형성 후, 이를 압축하여 폴리머를 변형시키는 방법<sup>3</sup>으로 마스터와 열가소성 폴리머와의 열적·기계적 물성의 차이를 이용한다.<sup>4</sup> 핫엠보싱 공정은 10nm 이하의 분해능을 가지며 재현성도 뛰어나고 재료처리량도 크며 매우 경제적이다.<sup>5,6</sup> 그러나 구조물이 점점 작아지고 복잡해지고 있기 때문에 불완전 충전(non-fill), 불연속(discontinuity), 스트레치(stretch)등 많은 문제점이 나타나게 되었다. 이와 같은 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 성형과정에서

\* 접수일: 2004년 11월 12일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과 대학원

# 교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

E-mail kbh@kangwon.ac.kr Tel. (033) 250-6374

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

폴리머의 유동 특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 폴리머의 미세 유동특성을 파악하기 위하여 핫엠보싱 공정에 대한 기초 실험을 수행하였다. 또한 연속체 기반의 상용 FDM(finite difference method) 해석 프로그램인 FLOW-3D 를 이용하여 유동해석을 수행하여 마이크로패턴의 폴리머 성형시 그 유동특성을 파악하였다.

## 2. 성형 실험

### 2.1 PMMA 의 물성 측정

핫엠보싱 공정에서 PMMA 의 미세 유동 특성을 이해하기 위해서는 재료의 온도에 따른 점도와 접촉각(contact angle)을 알아야 한다. 본 연구에서는 마이크로 패턴 성형 실험 및 해석을 위한 PMMA 의 온도에 따른 점도와 접촉각 측정 실험을 수행하였다. Fig. 1 은 Mold-Flow 에서 제공된 PMMA 의 점도 데이터를 보여주고 있다. 고온 용융된 폴리머의 점도는 쉽게 구할 수 있으나 겔(gel) 상태의 폴리머에 대한 데이터는 전무한 상태이다.

온도의 변화에 따른 PMMA 의 접촉각을 측정하기 위하여 Fig. 2 와 같이 광학현미경과 핫 플래이트를 이용하여 접촉각 측정장치를 구성하였으며 Fig. 3 은 이를 이용하여 측정한 온도에 따른 PMMA 의 접촉각 결과이다. PMMA 는 저온( $T_g$  근처)의 경우에는 겔(gel) 상태의 거동을 보이지만 온도가 증가함에 따라 유동성이 증가하여 점성유체의 특성을 가지게 되며 니켈표면의 소수성 특성<sup>7</sup>에 따라 100° 이상의 높은 접촉각을 보이게 된다. 한편 온도가 계속 증가하면 니켈표면의 퍼짐성(wetability)이 증가하여 접촉각은 점점 감소하게 된다.

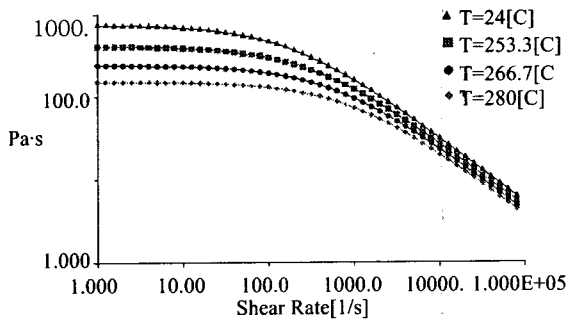


Fig. 1 Diagram of viscosity vs shear rate relationship by temperature (Mold-Flow)

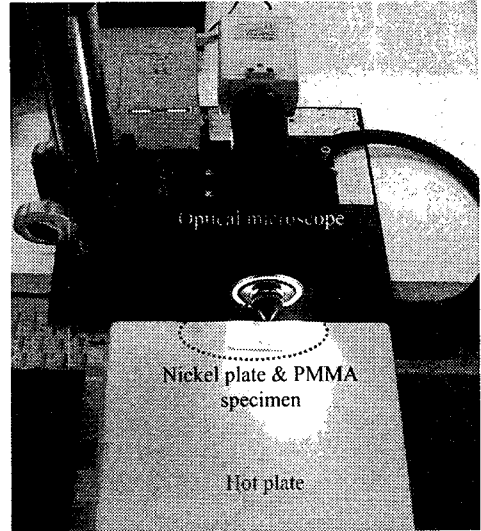


Fig. 2 Contact angle measuring system

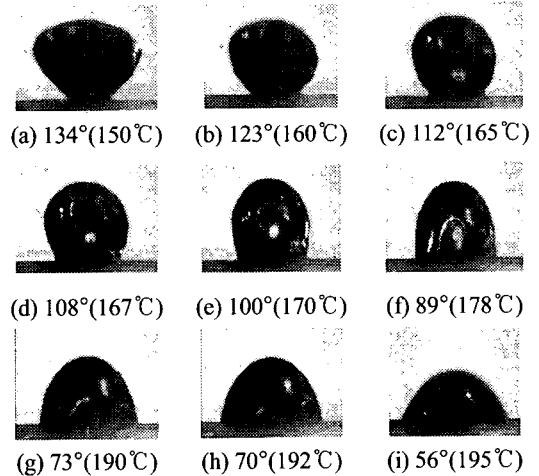


Fig. 3 PMMA's contact angle at various temperatures

### 2.2 핫엠보싱 공정

본 연구에서는 미세패턴의 성형 특성을 파악하기 위하여 패턴 폭 100  $\mu\text{m}$  트랜치(trench) 형상의 스탬프를 제작하여 성형 실험을 수행하였다. 일반적인 핫엠보싱 공정에서는 PMMA 를 기판(substrate)에 스핀 코팅(spin coating)<sup>8</sup> 하여 사용하지만 본 실험에서는 2x2cm 판재의 PMMA( $T_g$  ; 약 105°C)를 사용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4 는 핫엠보싱 공정의 개략도이다. 전체적인 실험공정은 PMMA 필름을 유리전이온도 이상으로 가열하고 압축시킨 후 일정 시간이 경과하면 온도를 유리전이온도 이하로 낮가시켜 마스터를 디몰드(de-mold)하는 순서로 수행하였다. Fig. 5 는 핫엠보싱 공정 시 시간에 따른 온도분포를 개략적으로 나타낸 것이다. 실험에서 부여된 성형 시간(embossing time)은 Fig. 5 의 그래프와 같이 성형 온도를 유지하는 시간을 말하며 패턴 성형 시 동일하게 적용하였다.

### 2.3 성형 실험 장비

실험에 사용한 엠보싱 장비는 핫엠보싱 전용이 아닌 웨이퍼 접합(wafer bonding)장비로 그 형태와 기능은 핫엠보싱 머신과 거의 유사하다. 가열과 냉각 시스템을 갖추고 있고, 공압에 의한 압축(press) 시스템과 로터리(rotary)펌프에 의한 저진공 시스템을 갖추고 있다.

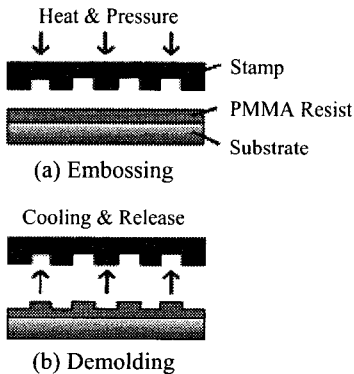


Fig. 4 Hot embossing process

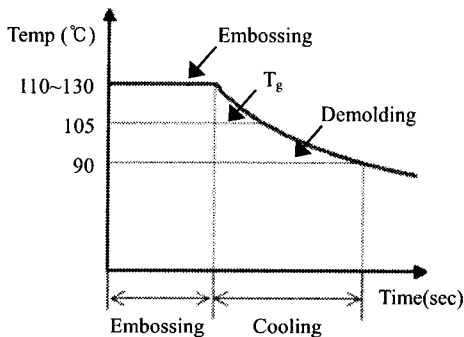


Fig. 5 Temperature control during hot embossing

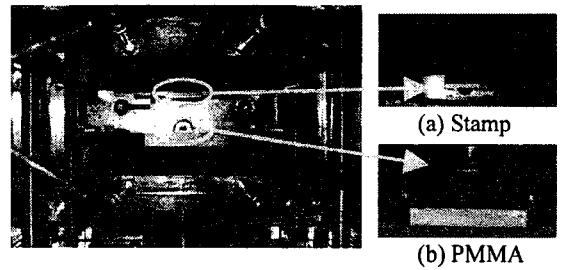


Fig. 6 Structure of inner chamber of hot embossing machine

Fig. 6 은 챔버내부의 형상을 보여주고 있다. 상부 히터블럭에는 성형을 위해 제작된 스탬프가 부착되며 하부 히터블럭에는 PMMA 가 놓여진다.

### 3. 성형 실험 및 해석

현재까지는 마이크로/나노 단위에서 완벽히 검증된 해석 사례가 보고된 바 없기 때문에 해석의 정확성을 논하기는 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 패턴 성형공정의 해석적 접근을 수행하기 위한 방법으로 FDM 을 이용하였다. 프로그램은 상용유동해석 소프트웨어인 FLOW-3D 를 사용하였다. 성형해석으로 패턴 형상에 따른 성형 특성, 접촉각과 표면장력(surface tension)의 적용여부에 따른 PMMA 의 유동 특성, A.S.S (auxiliary sinking structure : 보조함몰구조)에 의한 성형 특성을 수행함으로써 여러 매개변수들이 성형에 미치는 영향과 유동특성을 파악하여 나노패턴의 스탬프 제작 시 최적 설계에 대한 데이터와 성형 시 최적조건을 도출하는 것이 본 연구의 목적이다. 해석에 사용된 유체의 특성으로 점성(viscous flow), 비압축성(incompressible flow), 층류(laminar flow) 조건을 사용하였고, 사용단위는 mm, g, sec 이다.

#### 3.1 마이크로 패턴의 저온 성형특성

PMMA 의 저온성형 실험을 위하여 폭 100  $\mu\text{m}$  트랜치(trench)패턴을 설계하여 DRIE(Dep Reactive Ion Etching) 공정<sup>9</sup>을 사용해 스탬프를 제작한 후 40bar 의 동일한 압력 하에서 110~130°C사이의 온도조건으로 비교실험을 수행하였다.

Fig. 7 과 같이 저온( $T_g$  근처; 130°C 이하)성형에서 PMMA 는 고무처럼 거동하는 것을 확인하였다. 일반적으로 고온( $T_g$  이상; 130°C 이상)성형에서

PMMA 의 충전은 캐비티(cavity)의 벽면을 따라 충전이 시작되는데 저온성형 시에는 접촉각을 유지하면서 충전이 시작되는 것을 실험을 통해 관찰하였다. 즉, 고온의 경우에는 점성유체의 유동특성을 보이고 저온의 경우에는 점탄성 거동을 보이는 것으로 판단된다.

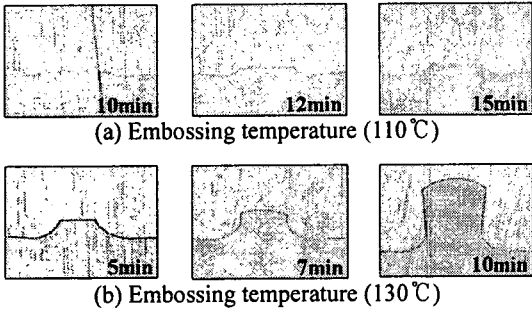


Fig. 7 Optical microscope images of microstructure formed by 100  $\mu\text{m}$  trench stamp at low temperature

### 3.2 캐비티 사이의 간격에 따른 유동 특성

Fig. 8 은 캐비티 개수와 캐비티 간 간격에 따라 폴리머가 충전되는 유동 양상을 성형해석을 통하여 관찰한 것이다.

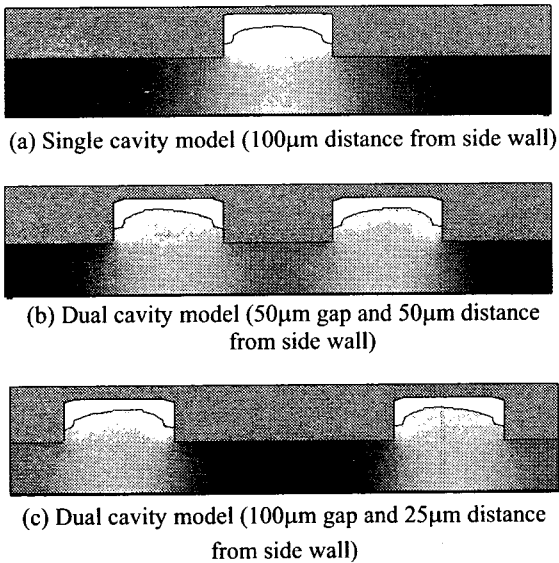


Fig. 8 Simulation result by changing the number of cavity and gap distance

150 $\mu\text{m}$  길이의 스탬프에 폭 50 $\mu\text{m}$ , 높이 20 $\mu\text{m}$ 의 캐비티 형상을 사용하였으며 캐비티의 수와 캐비티 사이의 간격을 조절하였다. 해석 결과 캐비티와 스탬프 외벽의 거리가 길어짐에 따라 PMMA 가 외벽을 따라 올라가는 현상이 관찰되었다. 또한 캐비티와 캐비티 사이의 간격이 작을 경우 고압력이 스탬프 외벽에서 발생하여 캐비티의 외측에서 폴리머가 먼저 채워지지만 캐비티 사이의 간격이 넓은 경우 캐비티 사이의 간격 중심부 압력이 증가하여 캐비티의 내측부터 폴리머가 먼저 채워지는 현상이 확인되었다.

### 3.3 접촉각과 표면장력에 따른 유동 특성

실험에서 얻은 PMMA 의 접촉각과 표면장력을 적용하여 충전해석을 수행하였다.

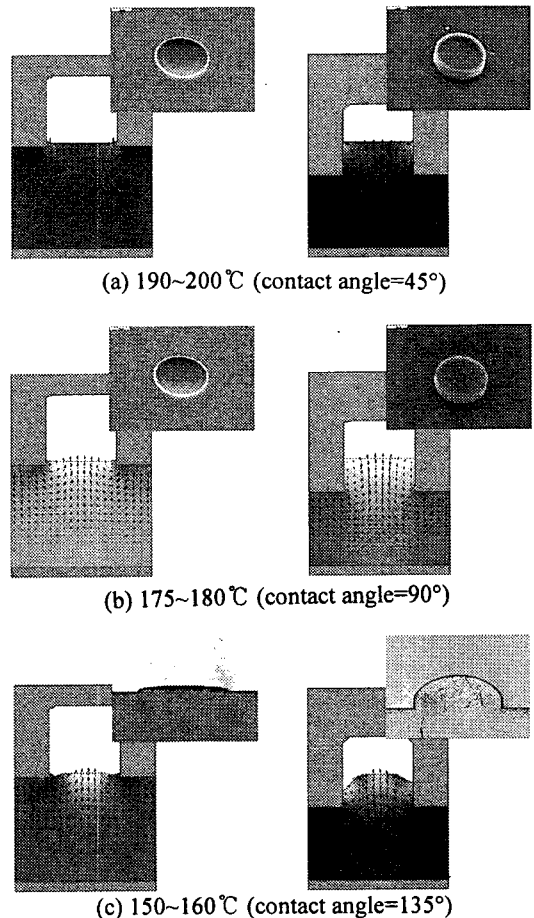


Fig. 9 Micro cavity filling at different temperatures

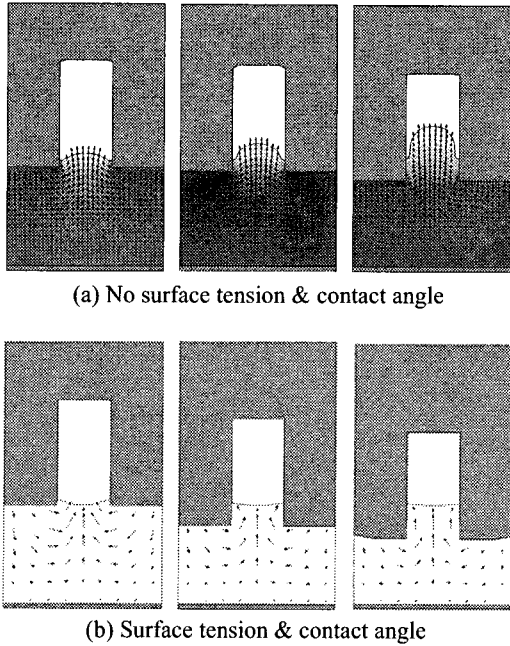


Fig. 10 Comparison of flow patterns by applying surface tension (73 dyne/cm) and contact angle (45 deg.).

Fig 9 는 각각의 성형 온도에 따라 캐비티를 채우는 PMMA 의 성형 사진과 해석결과로 마이크로 유동 양상과 온도 변화에 따른 충전특성을 보여 주고 있다. Fig. 9 (a)에서와 같이 고온에서는 PMMA 의 퍼짐성이 증가하여 표면장력이 커지기 때문에 캐비티와 작은 접촉각을 유지하며 PMMA 가 충전 되지만, Fig. 9(a)보다 상대적으로 낮은 온도인 Fig. 9 (b), (c)와 같은 경우에는 PMMA 와 니켈표면 사이의 퍼짐성이 감소하여 마운드(mound)형상으로 충전이 발생하게 된다. 이런 현상은 Fig. 7 의 성형실험 결과와 같다. Fig. 10 은 접촉각과 표면장력의 적용 여부에 따른 유동특성의 차이를 보여주고 있다. Fig. 10 (a)에서는 접촉각과 표면장력을 적용한 Fig. 10 (b)와는 달리 마운드형상의 충전이 일어남을 볼 수 있었다. 이를 통해 접촉각과 표면장력을 적용하였을 때 실제와 더 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 이는 마이크로/나노 성형 해석의 경우 접촉각과 표면장력이 성형특성을 결정하는 중요한 인자임을 나타내고 있는 것이다.

### 3.4 A.S.S 의 적용에 따른 성형 특성

패턴 성형 시 보조함몰구조(A.S.S.)의 영향을

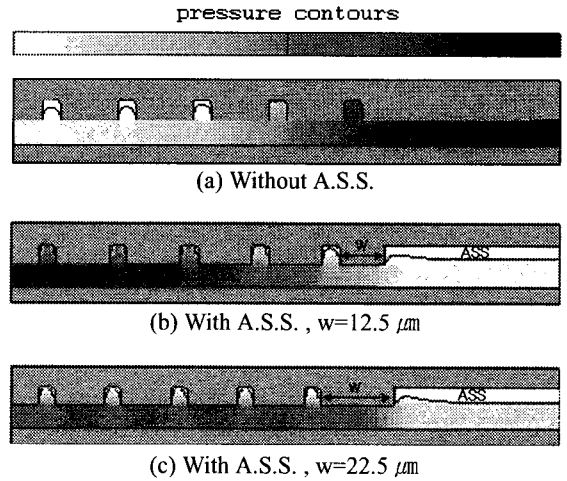


Fig. 11 Influence of A.S.S. (auxiliary sinking structure) in micro cavity filling

파악하기 위하여 다음과 같은 해석을 수행하였다. 모델은 왼쪽 면을 기준으로 좌우대칭이고 폭 5  $\mu\text{m}$ , 높이 5  $\mu\text{m}$ 의 캐비티 5 개가 각 모델에 적용되었으며 캐비티 사이의 간격은 15  $\mu\text{m}$ 로 동일하다. Fig. 11 은 A.S.S.의 적용여부에 따른 해석결과이다. A.S.S.가 적용된 Fig. 11 (b), (c) 모델에서는 A.S.S.와 인접한 부분의 피치(pitch) 크기(w)가 전체 압력분포에 어떠한 영향을 미치는지 비교하였다. PMMA 의 두께는 7.5  $\mu\text{m}$ 이며 A.S.S.의 크기는 50  $\mu\text{m}$ 이다. A.S.S.가 없는 Fig. 11 (a)의 경우에는 충전이 밖에서 안으로 순차적으로 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 성형이 이루어지는 동안 패턴 사이의 내부 스퀴즈(squeeze) 압력이 패턴이 없는 부분의 외부 스퀴즈 압력에 의해 상쇄되어 압력 불균형이 발생하기 때문으로 보인다. 이를 해결하기 위해 A.S.S.를 적용한 Fig. 11 (b), (c) 모델의 해석결과와 경우 Fig. 11 (a) 모델보다 압력분포가 균일함을 볼 수 있고, 패턴 마지막 부분 피치의 크기(w)를 변화시킴으로써 성형 시 보다 균형적인 압력분포가 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 균등한 내부 스퀴즈 압력을 유지시켜 주기 위해서는 스탬프 설계 시 패턴과 A.S.S. 사이에 적당한 크기의 피치(w)를 고려해 주어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

핫엠보싱 공정을 이용한 패턴 성형 시 미세 유동특성을 파악하기 위하여 기초성형 실험으로 PMMA 의 점도와 접촉각에 대한 물성치를 추출 하였으며 실험적인 방법으로 저온에서의 마이크로 유동특성을 관찰하고 성형해석을 통하여 비교하였다. 성형실험과 해석결과 마이크로패턴의 저온( $T_g$  근처) 성형시 PMMA 는 고무와 비슷한 점탄성 거동을 하는 것으로 관찰되었다.

성형시 캐비티 간격과 접촉각, 표면장력 및 A.S.S 유무에 따라 폴리머의 유동특성을 파악하기 위해 실험적으로 얻은 접촉각 데이터를 해석에 사용하여 충전 양상을 관찰하였다. 해석결과 스탬프 상의 캐비티와 캐비티 사이의 간격이 작을 경우 고압력이 스탬프 외벽에서 발생하여 캐비티의 외측에서 폴리머가 먼저 채워지지만 캐비티 사이의 간격이 넓을 경우 캐비티 사이의 간격 중심부 압력이 증가하여 캐비티의 내측부터 폴리머가 먼저 채워지는 현상을 확인하였다. 성형온도에 따른 특성으로 고온에서는 PMMA 의 퍼짐성이 증가하여 표면장력이 커지기 때문에 캐비티 내벽과 작은 접촉각을 유지하며 전체적인 충진이 이뤄지지만 저온에서는 PMMA 와 캐비티 내벽 간의 퍼짐성이 감소하여 마운드 형태로 충진이 발생함을 확인하였다. 또한, A.S.S. 유무에 따라 동시충전(simultaneous filling) 과 순차충전(sequential filling)이 발생하는 것을 해석을 통하여 관찰하였다.

추후 핫엠보싱 공정에 사용할 마이크로/나노 패턴의 스탬프 설계·제작 시 위와 같은 유동특성을 고려하여 주어야 최적 성형에 근접한 결과물을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 21C 프론티어 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 나노메카트로닉스 기술개발 사업의 세부과제인 “나노패턴 성형 공정기술”의 위탁과제 수행결과와 일부로 세부과제 주관기관인 연세대학교와 참여기업인 (주)JMI 의 도움에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Piraux, L., George, J. M., Despres, J. F., Leroy, C., Ferain, E., Legras, R., Ounadjela, K., Fert, A., “Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires,” Applied Physics Letters, Vol. 65, No. 19, pp. 2484-2486, 1994.
2. Chou, S. Y., Krauss, P. R., Renstrom, P. J., “Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers,” Applied Physics Letters, Vol. 67, pp. 3114, 1995.
3. Hirai, Y., Fujiwara, M., Okuno, T. and Tanaka, Y., “Study of the resist deformation in nanoimprint lithography,” Journal of Vacuum Science and Technology B, Vol. 19, No. 6, pp. 2811-2815, 2001.
4. Schiff, H., Jaszewski, R. W., David, Cand., Gobrecht, J., “Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by hot embossing lithography,” Microelectronic Engineering, Vol.46, pp. 121-124, 1999.
5. Becker, H., Heim, U., “Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 83, No. 1-3, pp. 130-135, 2000.
6. Bogdanski, N., Schulz, H., Wissen, M., Scheer, C., Zajadacz, J. and Zimmer, K., “3D-Hot embossing of undercut structures - an approach to micro-zippers,” Microelectronic Engineering, Vol. 73-74, pp. 190-195, 2004.
7. Guotuan, G., Zhijun, Z. and Hongxin, D., “Preparation and characterization of hydrophobic organic-inorganic composite thin films of PMMA/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> with low friction coefficient,” Applied Surface Science, Vol. 221, issues 1-4, pp. 129-135, 2004.
8. Chen, A., Lebib, A., Carcenac, F., Launois, H., Schmidt, G., Tormen, M., Müller, G. and Reinhoudt, N., “Micro contact printing and pattern transfer with a tri-layer processing,” Microelectronic Engineering, Vol. 53, No. 1-4, pp. 253-256, 2000.
9. Heng, Y., Minhang, B., Shaoqun, S., Xinxin, L., Dacheng, Z. and Guoyin, W., “A novel technique for measuring etch rate distribution of Si,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 79, No. 2, pp. 136-140, 2000.