

# 열 임프린트 미세성형을 위한 폴리머 소재의 점탄성 해석 및 실험적 고찰

## Viscoelastic Analysis and Experimental Study of Polymer Deformation in Thermal Imprint Process of Micro Patterns

\*#김홍석<sup>1</sup>, 박희수<sup>1</sup>

\*#Hong Seok Kim(hongseok@snut.ac.kr)<sup>1</sup>, Hee Su Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 기계공학과

Key words : Thermal Imprint, PMMA, Viscoelastic model, The generalized Maxwell model

### 1. 서론

최근 바이오, 전자, 에너지 등 다양한 산업분야에서 마이크로/나노급 정밀부품에 대한 수요가 증가하면서 열 임프린트(thermal imprint)<sup>1</sup> 공정이 가공 기술로서 많은 주목을 받고 있다. 열 임프린트 공정은 전자빔 가공(electron beam writing), 집속이온빔 가공(focused ion beam writing), X 레이 리소그래피(X-ray lithography), SPM 리소그래피(scanning probe microscope lithography) 등과 비교할 때 높은 생산성을 실현할 수 있고 가공비용도 상대적으로 낮아 실용화 측면에서 매우 유망한 기술로 간주되고 있다.

성공적인 열 임프린트 공정을 실현하기 위해서는 가공소재의 변형특성에 대한 정확한 이해가 선행되어야 하며, 이에 근거하여 다양한 공정조건에서의 공정변수가 적절히 선정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 폴리머 소재인 PMMA를 대상으로 열 임프린트 실험을 실시하여 유리전이온도(glass transition temperature) 근처에서 소재의 변형 특성 및 공정변수의 영향을 고찰하였다. 또한 폴리머 소재의 점탄성(viscoelastic) 거동을 이용한 유한요소해석을 실시하여 해석모델의 정확성과 견실성을 검증하였다.

### 2. 본론

유리전이온도 근처에서 폴리머 소재에 하중을 가하면 탄성효과와 점성효과가 동시에 작용하여 소재는 시간에 따라 점진적으로 변형하는 특성을 보인다. 이와 같은 소재의 점탄성 거동은 맥스웰 모델(the generalized Maxwell model)<sup>2</sup>에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma(t) = E(t)\epsilon_0 + \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

여기서  $\sigma(t)$ 는 응력,  $\epsilon_0$ 는 초기변형률,  $t$ 와  $\tau$ 는 각각 현재시간과 과거시간을 의미한다.  $E(t)$ 는 완화탄성률(relaxation modulus)로 다음과 같이 표현된다.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (2)$$

여기서  $E_\infty$ 는  $E(t)$ 의 평형상태 값이고,  $E_i$ 와  $\lambda_i$ 는 맥스웰 모델  $i$ 번째 성분의 완화탄성률과 시정수를 의미한다.

폴리머 소재의 온도 의존성은 Willams-Landel-Ferry(WLF)<sup>3</sup> 관계식의 변환인자  $\alpha_T$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (3)$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 계수,  $T_0$ 는 참조온도(reference temperature)를 의미한다.

위 모델에 근거한 PMMA 소재의 특성 값<sup>4</sup>을 이용하여 유한요소해석을 실시하였고, 실험결과와의 비교를 통하여 모델의 정확성과 견실성을 고찰하였다. 열 임프린트 실험은 소재를 T=105 °C 로 가열한 후 성형압력과 성형시간을 변화시키면서 실시하였고, 삼각형 채널의 충전율(filling ratio)로부터 성형성능을 판단하였다.

Fig. 1은 동일한 공정조건에서 열 임프린트 실험결과를 유한요소해석과 비교한 결과를 보여주고 있다. 유한요소모델은 PMMA의 변형특성을 비

교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 충전율의 절대적인 값은 10% 이상의 오차를 보이고 있어 경계면의 마찰특성 고려, 실험조건 변화 등 모델의 건설성 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다

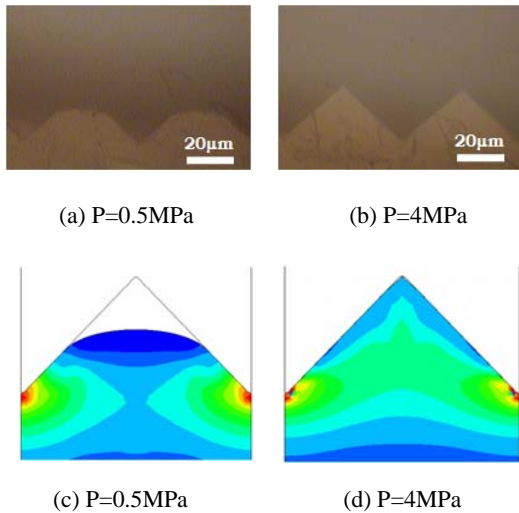


Fig. 1 Thermal imprint results of PMMA at different pressures ( $T=105^{\circ}\text{C}$ ,  $t=2\text{min}$ )

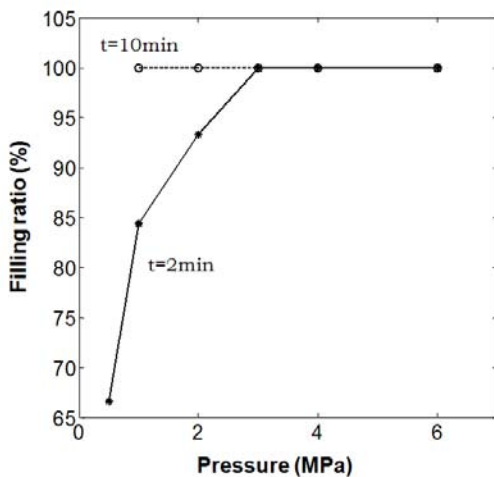


Fig. 2 Filling ratio of PMMA at different pressures and holding times ( $T=105^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2는 열 임프린트 공정에서 성형압력과 성형시간이 변화함에 따라 나타나는 성형성능의 변화

를 보여주고 있다. 성형시간이 2분인 경우는 3MPa 이상의 압력에서 완전한 패턴을 성형할 수 있었으나, 성형시간을 10분으로 증가하였을 경우에는 1MPa 이하의 낮은 압력에서도 미세패턴을 성형할 수 있었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 PMMA 소재의 미세성형 공정을 유한요소해석과 열 임프린트 실험을 통하여 고찰하였다. 맥스웰 모델에 기초한 소재의 점탄성 모델은 유리전이온도 근처에서 소재의 변형특성을 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 하지만 추가적인 공정변수를 고려하여 모델의 건설성을 증가시키는 연구가 필요하다. 열 임프린트 공정에서 온도, 시간, 압력 등이 성형성능을 결정하는 주요한 인자로 파악되며 유한요소해석의 활용은 향후 복잡한 형상의 마이크로/나노급 미세성형에서 다양한 공정변수들을 최적화하는 유용한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

### 후기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구사업 (No. 2010-0015507)의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참고문헌

1. Chou, S. Y., Krauss, P. R., and Renstrom, P. J., "Imprint of sub-25nm vias trenches in polymers," *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114-3116, 1995.
2. Yan, W., Ying, J., and Chen, W., "A three-dimensional solution for laminated orthotropic rectangular plates with viscoelastic interfaces," *Acta Mechanica Solida Sinica*, **19**, 181-188, 2006.
3. Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D., "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids," *Journal of the American Chemical Society*, **77**, 3701-3701, 1955.
4. Kim, N. W., Kim, K. W., and Shin, H. C., "Finite element analysis of low temperature thermal nano-imprint lithography using a viscoelastic model," *Microelectronic Engineering*, **85**, 1858-1865, 2008.