

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

*#김홍석¹, 박희수¹

*#Hong Seok Kim(hongseok@snut.ac.kr)¹, Hee Su Park¹

¹서울과학기술대학교 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)¹ 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)²에 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, ϵ_0 는 초기변형률, t 와 τ 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_∞ 는 $E(t)$ 의 평형상태 값이고, E_i 와 λ_i 는 맥스웰 모델 i 번째 성분의 완화탄성률과 시정수를 의미한다.

폴리머 소재의 온도 의존성은 Willams-Landel-Ferry(WLF)³ 관계식의 변환인자 α_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 값⁴을 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 현실성 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다

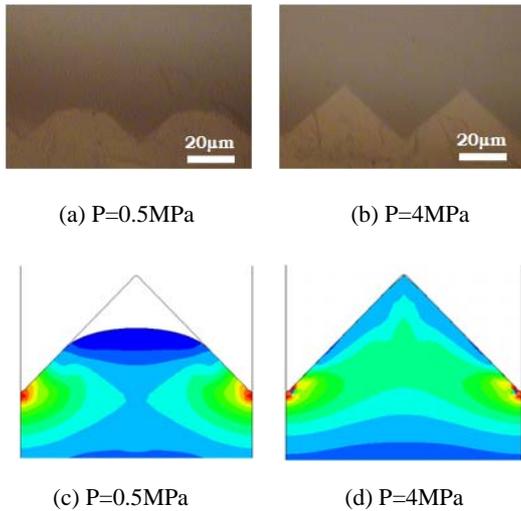


Fig. 1 Thermal imprint results of PMMA at different pressures ($T=105^{\circ}\text{C}$, $t=2\text{min}$)

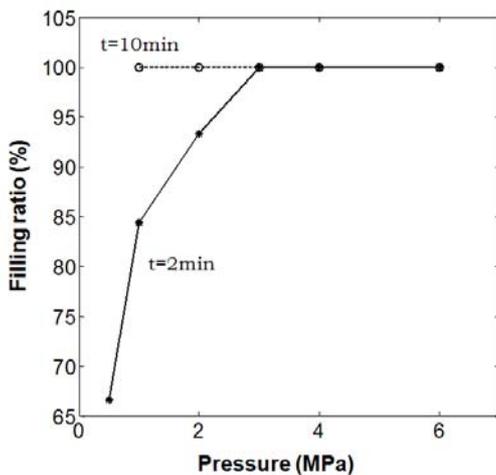


Fig. 2 Filling ratio of PMMA at different pressures and holding times ($T=105^{\circ}\text{C}$)

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 현실성을 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.