

## 핫엠보싱 공정의 폴리머 점탄성 거동에 대한 연구

송남호<sup>1</sup>, 손지원<sup>1</sup>, 임성한<sup>2</sup>, 오수익<sup>#</sup>

### Experimental and numerical study on viscoelastic behavior of polymer during hot embossing process

N. H. Song, J. W. Son, S. H. Rhim, S. I. Oh

#### Abstract

In hot embossing lithography which has shown to be a good method to fabricate polymeric patterns for IT and bio components, it is very important to determine the proper process conditions of pressure, temperature, and time. It is also a key factor for predicting the optical properties of final product to calculate residual stress distribution after the embossing process. Therefore, to design the optimum process with right conditions, the ability to predict viscoelastic behavior of polymer during and after the hot embossing process is required.

The objective of the present investigation is to establish simulation technique based on constitutive modeling of polymer with experiments. To analyze deformation behavior of viscoelastic polymer, the large strain material properties were obtained from quasi-static compression tests at different strain rates and temperatures and also stress relaxation tests were executed. With this viscoelastic material model, finite element simulation of hot embossing was executed and stress distribution is obtained. Proper process pressure is very important to predict the defect and incomplete filling.

**Key Words** : Viscoelastic, Polymer, Compression Test, Stress Relaxation Test, Thermal Mechanical Test, Hot Embossing, PMMA(Polymethyl methacrylate)

#### 1. 서 론

최근 복잡한 형상의 제품 생산, 좋은 생산성, 낮은 가격이라는 장점으로 IT, 바이오 그리고 광학 분야에서 마이크로/나노 부품 생산에 폴리머 재료의 사용은 급속히 증가해 왔다. 마이크로/나노 폴리머 부품의 생산 방법으로는 사출성형(injection molding), 핫엠보싱(hot embossing) 그리고 주조(casting) 등이 있으며, 그 중 핫엠보싱은 최근 가장 주목 받는 생산방법중의 하나이며, 이 핫엠보싱 공정에 대한 실험적, 해석적 연구가 활발히 진행되어 오고 있다[1-4].

핫엠보싱 공정은 가압(molding), 유지(holding), 분리(demolding)의 3단계 공정으로 이루어진다. 우선 진공상태에서 폴리머 필름(PMMA)을 유리전이온도(glass transition temperature,  $T_g$ ) 이상으로 가열한 다음, 압력을 가하여 스탬프의 형상을 폴리머 필름에 전사하는 단계이다. 그 후, 압력을 유지하면서 유리전이온도 이하로 온도를 낮춘다. 마지막으로 폴리머 필름으로부터 스탬프를 분리한다. 간단한 프로세스이지만 온도, 압력, 시간의 적절한 공정변수를 정하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 공정변수에 따라 폴리머 필름에 전사되는 형상들에 불완전 충전(incomplete filling), 파손(fracture) 등은 문제점이

1. 서울대학교 기계항공공학부

2. 한국기술교육대학교 기계정보공학부

# 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: sioh@snu.ac.kr

발생되기 때문이다[5]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 성형과정에서 공정변수들이 폴리머의 거동에 영향을 주기 때문에 폴리머의 거동을 파악할 필요가 있다.

핫엠보싱의 가압 공정은 폴리머의 유리전이온도보다 30~40°C 높은 온도에서 이루어지는데, 이때의 온도에서 폴리머는 유리-고무 전이과정(glass-rubbery transition)을 넘어선 고무상태(rubbery plateau)이므로 폴리머 점탄성은 분자구조와 관련된 폴리머의 기계적/물리적 물성과 매우 밀접한 관련이 있다. 폴리머는 온도와 시간에 매우 의존적이다. 이것은 폴리머의 점탄성 특성 때문인데, 점탄성은 점성유체와 탄성고체의 성질을 모두 가지고 있다. 점성유체에서 변형률속도는 가해진 하중에 비례하고, 탄성고체에서 변형이 가해진 하중에 비례한다. 즉, 점성유체에서 행한 일은 열로서 소산되고, 탄성에서는 포텐셜 에너지로 저장된다. 이런 점성과 탄성의 성질을 모두 갖는 점탄성 거동을 아는 것은 매우 중요하다[6-7].

본 연구에서 핫엠보싱 공정에서 폴리머의 거동을 예측하기 위해 기초 물성 테스트를 수행하였고, 그 결과를 이용하여 ABAQUS에서 핫엠보싱 공정에 대한 점탄성 해석을 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 PMMA의 물성 실험

핫엠보싱 공정에서 PMMA의 점탄성 거동 특성을 이해하기 위해 단순 압축 실험을 수행한 후 온도에 따른 응력-변형률 선도를 구하였고, 응력완화 실험을 통하여 시간에 따른 응력완화를 구하였다. 이에 앞서 본 연구에서 사용된 PMMA의 기본 특성을 알기 위해 Thermal Mechanical Analysis 실험도 수행하였다.

이 연구에서 PMMA(polymethyl methacrylate)는 Good follow co. 에서 제작된 제품을 사용하였다. 시편은 원통형으로 지름과 높이 모두 10mm로 비율을 1:1로 맞추어 제작하였고, 모든 시편은 기계 가공 시 생긴 잔류응력, 열 이력을 제거하기 위해 각각의 시험온도에서 충분한 시간을 유지하였다.

#### 2.1.1 단순 압축 실험

폴리머 물성을 얻기 위해 다양한 온도, 변형률 속도에서 압축시험을 진행하였다. 실험 장비는 고온로를 갖춘 만능시험기(INSTRON, 5582)를 사용

하였고, 등온상태, 일정 속도로 진행하였다. 각 실험 시 온도의 등온을 유지하기 위해 시편을 고온로에 넣고 각 시험온도에서 30분 정도 유지하였다. 압축속도는 0.02mm/sec와 0.2mm/sec로 각각의 온도에서 실험을 수행하였고, 압축량은 60% 즉, 6mm 압축하였다. 시편과 상하층 플레이트와의 마찰을 최소화 하기 위해 테프론 필름을 사용하였다.

압축실험을 통하여 Fig. 1 (a)와 Fig. 1 (b)의 응력-변형률 데이터를 얻었다. Fig. 1 (a)는 60°C, 110°C, 150°C의 각 온도에서 이송속도 0.02mm/sec로 압축한 그래프이며, Fig. 1 (b)는 이송속도 0.2mm/sec에 대한 그래프이다.

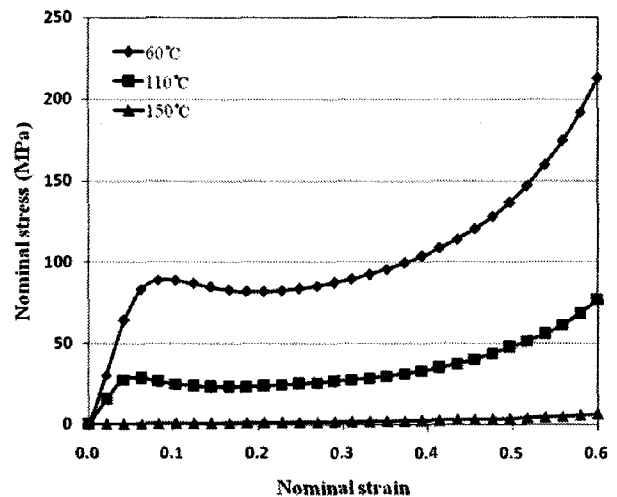


Fig. 1 (a) Stress-strain curves at 1.2mm/min

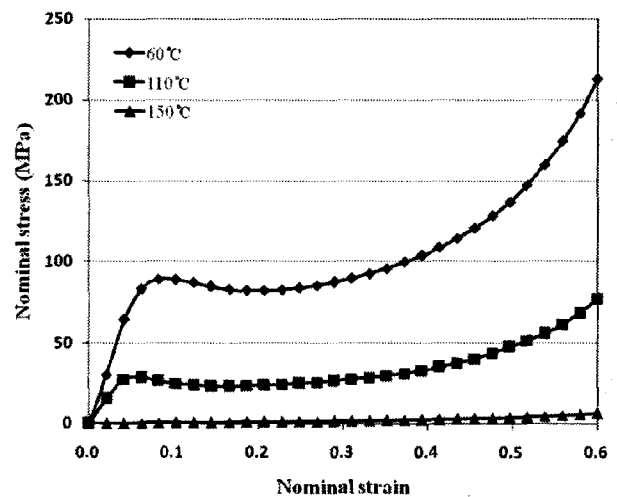


Fig. 1 (b) Stress-strain curves at 12mm/min

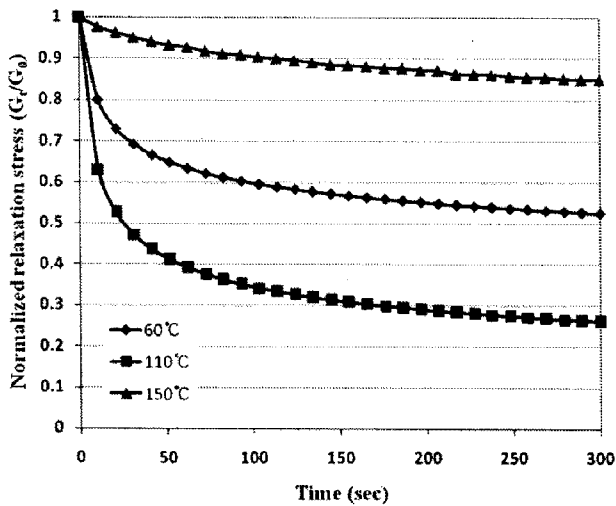


Fig. 2 Normalized stress-time curves

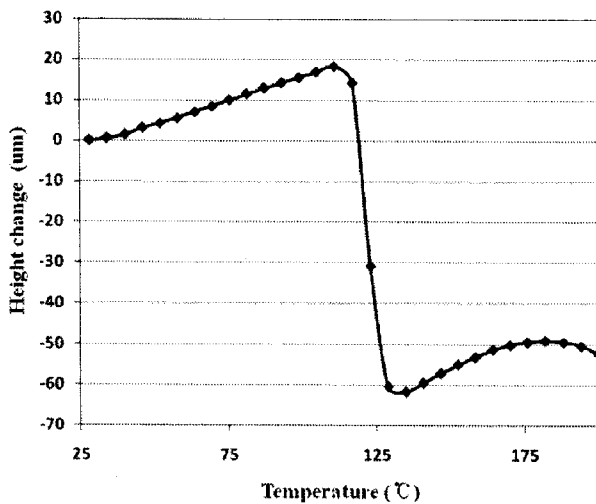


Fig. 3 Thermal Mechanical test data

### 2.1.2 응력 완화 실험

시간에 따른 응력완화 현상을 측정하기 위한 응력완화 실험은 압축시험과 동일한 장비를 사용하였고, 또한 동일한 시편과 실험온도, 압축속도로 측정하였다. 압축실험을 통해 시편을 변형시킨 후 일정한 변형률을 유지하며 5분 동안 시간에 따른 응력의 변화를 측정하였다. 온도에 따른 비교를 위하여 초기응력으로 나누어 표준화하였다. Fig. 2은 시간에 따른 응력변화의 결과이다.

### 2.1.3 Thermal Mechanical Test

PMMA의 기본적인 특성인 유리전이온도( $T_g$ ) 및

열팽창계수를 측정하기 위해 Thermal Mechanical Test를 수행하였다. Fig. 3의 결과로 본 연구에서 사용된 PMMA의 유리전이온도는  $115^{\circ}\text{C}$ 이다. 열팽창계수는 그래프의 기울기로 구해지는데, 유리전이 온도 이전의 열팽창계수는  $85.83 \times 10^{-6}/\text{K}$ , 유리전이 온도 이후의 열팽창계수는  $133.77 \times 10^{-6}/\text{K}$ 이다.

## 3. 해석

### 3.1 해석 조건

유한요소해석은 ABAQUS를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 핫엠보싱 공정의 가압 공정 온도에서 폴리머는 반용융 상태이므로 점탄성 거동을 보인다. 이런 폴리머의 점탄성 거동을 해석하기 위해서 ABAQUS에서는 초탄성(hyperelastic command)과 점탄성(viscoelastic command)을 사용한다. 초탄성을 사용하기 위해 앞서 수행한 폴리머 단순압축실험으로부터 얻은 응력-변형률 데이터를 오그든 모델(ogden model)에 적용하여 사용하였고, 응력완화 실험에서 얻은 데이터를 일반화된 맥스웰 모델(generalized maxwell model)에 적용하여 점탄성을 사용하였다. 해석모델은 스탬프와 PMMA, 기판(substrate)로 이루어졌으며, 스탬프와 기판은 강체로 처리하였다. 해석은 등온상태로  $150^{\circ}\text{C}$ 에서 수행하였고, 압력에 따른 공동(cavity)부의 채워짐과 응력분포를 해석하였다.

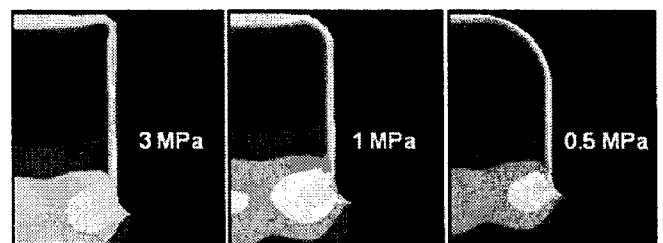


Fig. 4 Stress distribution at different pressure

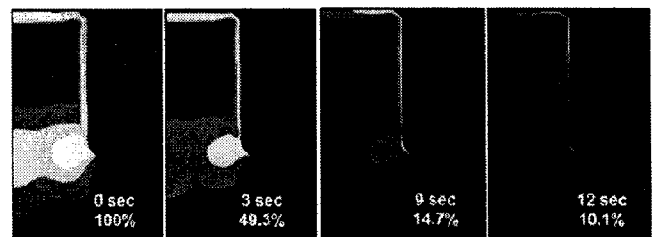


Fig. 5 Residual stress distribution in time (3MPa)

### 3.2 성형 해석

ABAQUS VISCOELSTIC 해석을 통해 각각의 압력에 따라 공동부(cavity)에 채워지는 PMMA를 비교하였으며, 응력완화 시간을 주어 잔류응력분포를 확인하였다. Fig. 4는 가압에 따른 폴리머 소재의 응력 분포를 보여 주며, Fig. 5은 가압 후 일정 시간을 주어 응력이 완화되는 과정을 보여준다. Fig. 4에서와 같이 공정 압력이 크면 공동부 내의 모서리 부분이 채워지지만, PMMA로 채워진 채널의 모서리 및 표면에 높은 잔류응력이 발생하는 것을 보여준다. 가압 후 높은 잔류응력이 스탬프의 모서리 부분 및 폴리머 표면에 발생되며, 실험 시 나타나는 결함 발생 부분과 일치한다. 공정압력이 클수록 잔류응력을 상승시키는 반면에 공정압력이 작으면 불완전충전을 발생시켜 핫엠보싱 공정에서 정확한 성형이 이루어지지 않는 결함을 발생하게 된다. 그러므로 적절한 가공압력의 선택은 매우 중요하다. Fig. 5에서처럼 핫엠보싱 성형 후에 응력이 완화되는 시간을 충분히 주게 된다면, 집중되는 응력을 완화시켜 결함을 예방할 수 있다. 그러므로 핫엠보싱 공정에서 적절한 공정압력 및 응력완화시간은 매우 중요한 인자로 충분히 고려되어야 한다.

### 4. 결론

핫엠보싱 공정 시 폴리머는 반응용 상태에서 변형을 하게 되는데, 그 때의 폴리머는 점탄성 거동을 한다. 점탄성 해석에 필요한 기초물성 실험인 단순압축실험과 응력완화실험을 수행하여 물성을 추출하였다. 핫엠보싱 공정을 공정압력에 따라 점탄성 해석을 수행하여, 압력에 따른 충전/미충전 및 응력분포를 알아 보았다. 성형 압력에 따라 미충전 및 모서리 부분에서 응력집중이 나타나는 것을 확인하였고, 이것은 결함으로 나타날 수 있음을 예측하였다. 해석을 통해 성형압력 및 응력완화시간이 핫엠보싱 공정에서 중요한 인자임을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 21세기프론티어연구개발사업의 나노메카트로닉스기술개발에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Heckeles, W. K. Schomburg, 2004, Review on micro molding of thermoplastic polymers, J. Micromech. Microeng., Vol. 14, pp. R1~R14
- [2] 김 호, 김광순, 김현영, 김병희, 2003, 핫엠보싱 공정에서의 미세 패턴 성형에 관한 연구, 한국소성가공학회 2003년도 추계학술대회 논문집, pp. 371~376
- [3] 김병희, 김광순, 반준호, 신재구, 김현영, 2004, 핫엠보싱 공정에서 PMMA의 마이크로/나노 레올로지 특성, 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 259~264
- [4] 강태곤, 권태현, 2005, 핫엠보싱 충전공정에 관한 수치해석, 한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp. 43~46
- [5] Y. Hirai, M. Fujiwara, T. Okuno, Y. Tanaka, 2001, Study of the resist deformation in nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 19, pp. 2811~2815
- [6] C. R. Lin, R. H. chen, C. Hung, 2002, The characterisation and finite-element analysis of a polymer under hot pressing, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 20, pp. 230~235
- [7] P. Krishnawanmy, M. E. Tuttle and A. F. Emery, 1990, Finite element modeling of crack tip behavior in viscoelastic materials. Part 1 : Linear behavior, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 30, pp. 371~387