

열방식 마이크로 임프린트 공정을 위한 고분자 재료의 수치적 모델링과 해석

란 슈하이¹, 이수훈², 이혜진¹, 송정한¹, 성연욱², 김무종², 이문구^{3#}

Numerical Investigation of Micro Thermal Imprint Process of Glassy Polymer near the Glass Transition Temperature

Shuhuai Lan¹, Soo-Hun Lee², Hye-Jin Lee¹, Jung-Han Song¹, Yeon-Wook Sung², Moojong Kim², Moon G. Lee^{3#}

(Received Month Day, Year / Revised Month Day, Year / Accepted Month Day, Year)

Abstract

The research on miniature devices based on non-silicon materials, in particular polymeric materials has been attracting more and more attention in the research field of the micro/nano fabrication in recent years. Lots of applications and many literatures have been reported. However, the study on the micro thermal imprint process of glassy polymer is still not systematic and inadequate. The aim of this research is to obtain a numerical material model for an amorphous glassy polymer, polycarbonate (PC), which can be used in finite element analysis (FEA) of the micro thermal imprint process near the glass transition temperature (T_g). An understanding of the deformation behavior of the PC specimens was acquired by performing tensile stress relaxation tests. The viscoelastic material model based on generalized Maxwell model was introduced for the material near T_g to establish the FE model based on the commercial FEA code ABAQUS/Standard with a suitable set of parameters obtained for this material model from the test data. As a result, the feasibility of the established viscoelastic model for PC near T_g was confirmed and this material model can be used in FE analysis for the prediction and improvement of the micro thermal imprint process for pattern replication.

Key Words : Viscoelastic Model, Glassy Polymer, Micro Thermal Imprint Process, Glass Transition Temperature.

1. 서 론

최근 비실리콘 재료를 기반으로 하는 마이크로 또는 나노 패터닝에 대한 연구는 고분자 재료가 관심을 끌고 있다. 폴리머 중심의 마이크로 및 나노 공정 기술은 매우 빠르게 발전되고 있으며 많은 연구 결과가 발표되고 있다. 나노임프린트 (NIL), Roll-to-Roll (R2R) 제조 기술은 매우 빠르게 발전되고 있다. 마이크로 열방식 임프린트 공정은 많은 분야에서 적용 가능한데 그 분야로는 광학 센서, 바이오 Cell, DNA 시퀀스, 질병진단 장비 등

이 있다.

제조기술 분야에서 비결정질 폴리머는 매우 중요하다. 레진 필름에 사용되는 PMMA의 경우 NIL 공정 시 실리콘 기판에 코팅이 되며, PC는 열방식 마이크로 엠보싱(Embossing) 공정이라고도 부르는 마이크로 열방식 임프린트 공정에서 기판으로 사용된다. 마이크로 및 나노 패턴 성형에 사용되는 비정질 폴리머의 열방식 임프린트는 광학 분야, 태양 에너지, 바이오-기계, 화학칩 등 폭넓게 적용된다. X.C. Shan 등은 마이크로 열 방식 임프린트 광학 스위치 제작에 사용하였으며[3], Patrick W. leech 등은 폴리프로필렌 기판 위에 마이크로 구조물을 제작하였다[4]. Joseph 등은 세포(cell)를 성장시키기 위해 마이크로 폴리머 기판을 준비

1. 한국생산기술연구원

2. 아주대학교 기계공학부

교신저자: 아주대학교 기계공학부,
E-mail:moongulee@ajou.ac.kr

하기 위해 열 엠보싱 공정 (Hot- embossing process)을 사용하는 제조 방법을 제안하였다[5]. Rean-Der Chien은 DNA/ RNA 테스트에 사용되는 유동적인 마이크플랫폼을 제작하여 적용하였다[6].

비정질 폴리머의 재료특성에 관해 연구한 많은 논문이 존재한다. 그리고 일반적으로 하중, 온도에 많이 종속되는 성향이 있다고 알려져 있다. 비정질 폴리머 재료의 변형 특성은 온도와 상관관계에 있다. 이는 온도에 따라 세가지 상(Phase)으로 분류할 수 있는데 이는 Fig.1에 잘 표현되어 있다[7]. 유리 전이온도(T_g) 보다 온도가 낮을 때 비결정질 폴리머는 고체 상태가 된다. 이때의 변형은 원상태로 돌아갈 수 있다. 온도가 증가할 때 비정질 폴리머는 고무와 비슷한 상태가 된다. 이는 비선형적인 변형을 보이고, 탄성 외에 점성도 존재하고 비압축성을 보인다. 유리 전이온도(T_g)는 정확한 온도로 존재하는 것이 아니고 어떠한 영역으로 존재하는데 이것을 전이영역이라 한다. 전이영역의 온도 범위는 5~20 °C 인데 폴리머의 특성에 따라 정해진다[8]. 전이영역에서부터 고무 영역까지 폴리머는 외부응력에 대해 가역과 비가역 변형의 특성을 모두 갖는다. 이러한 특성을 소위 점탄성이라고 한다. 온도가 더 높아지면 고무 상태를 지나서 폴리터가 녹아 액체 상태가 되는데 이것은 점성을 가진 비뉴턴(non-newtonian) 액체이다. 이 재료의 변형은 비가역적이다.

폴리머를 이용한 마이크로 열방식 임프린트 공정에서 보통 가열, 임프린팅, 이형(Releasing)의 세 가지 단계를 가진다. 패턴 품질을 결정하는 임프린팅 단계는 유리 전이온도(T_g) 근처에서 일정한 열적상태를 유지하며 진행된다. 공정시간, 재료의 열응력, 몰드와 기판재료의 열적 팽창이 주원인이 되는 패턴 성형의 반복도 오차를 최소화하기 위해서는 임프린팅 온도를 T_g 보다 높게 설정한다. 반면에 이형 온도는 보다 약간 낮게 한다. 다시 말하면 작동온도 범위를 T_g 근처이다. 이것은 열방식 임프린트 공정 시 비정질 폴리머는 전이영역 안에 있다는 것을 의미한다. 그러므로 폴리머는 점탄성 물질을 기반으로 모델링을 해야 한다.

그러나 전이온도 영역에서 임프린트를 할 때 폴리머 기판의 점탄성 특성에 관한 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 몇몇 문헌에서만 고무 상태에서의 PMMA에 관해 보고되고 있고 점탄성 재

료로써 모델링을 하고 있다 [9-11].

이 논문의 주요목적은 임프린팅 공정 단계에 대해 FEM 모델을 정립하는 것이며, 유리질 폴리머 재료의 특성을 포함하여 마이크로 열방식 임프린트 공정을 체계화시키는 것이다.

이 연구에서는 먼저 폴리머 재료의 점탄성 특성을 측정하였으며, T_g 근처에서 장력응력의 완화시험 (Tensile stress relaxation test)을 수행하여, 수치적 모델의 위한 변수들 추정하였다. 그리고 이 변수들을 이용한 모델과 실험 데이터를 비교하며 검증을 수행하였다. 결과적으로 마이크로 열방식 임프린트 공정 연구에서 패턴 성형에 대해 유한 요소해석을 수행하는데 있어서 이 재료 모델을 이용하였고 실제 공정을 잘 반영하는지를 평가하였다.

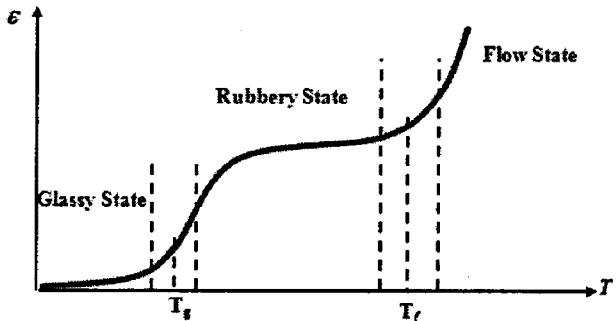


Fig. 1 Material deformation versus temperature in three states

2. 재료 모델링

위에서 언급한 대로 마이크로 열방식 임프린트 공정은 유리 전이온도(T_g)에서 작동한다. 이때 폴리머는 점탄성 재료의 특성을 보인다. 지속적인 하중을 받으며 재료는 두 단계의 변형을 가지는데 먼저 매우 짧은 시간 동안 탄성변형이 일어나며 다음으로 연속적으로 점성변형이 일어난다. 점성변형에서 하중이 약해진다. 현상적인 관점에서 이 특성은 스프링과 댐퍼로 구성된 기계적 모델로 설명할 수 있다. 스프링은 탄성적 특성을 의미하고 댐퍼는 점성적 특성을 의미한다. 점탄성 폴리머에서 응력이 완 특성은 일반적인 맥스웰 (Maxwell) 모델에서 N 맥스웰 구성요소(Maxwell units, 스프링과 댐퍼를 직렬 연결함)와 스프링의 병렬로 설명 될수 있다. 교차 결합된 폴리머에서 Maxwell units 중 하나는 스프링으로 대체된다. 응

력은 0보다는 크나 어느 한계선 까지 감소하게 될 것이다. 이것은 Fig.2에 나타나 있다.

구성요소의 특징은 응력 완화 형태로 표현된다.

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t) + \int_0^t E(t-\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (1)$$

여기서 $\sigma(t)$ 는 응력이고, ε_0 는 변형률의 초기 값이다. t 와 ξ 는 현재와 과거의 시간을 나타낸다. $E(t)$ 는 이완계수이다. 응력이완 함수는 지수급수로 표현된다.

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

$$E_0 = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \quad (3)$$

여기서 E_0 는 순간적인 반응에 따른 계수이다. E_∞ 는 $E(t)$ 가 시간 t 가 무한이 지속될 때 평형 상태에 도달하는 값이다. E_i 와 λ_i 는 i 번째의 일반적인 맥스웰(Maxwell) 모델에서 특정시간에서의 이완계수와 그 지수급수의 상수이다. N 은 맥스웰 구성요소(Maxwell units)의 수이다. 식(2)와 식(3)을 각각 나누면, 식(2)과 식(3)을 식(4)와 같이 변환시킬 수 있다. 이것은 일반적인 응력이완 함수이다.

$$e(t) = 1 - \sum_{i=1}^N e_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right)\right) \quad (4)$$

$$1 = e_\infty + \sum_{i=1}^N e_i \quad (5)$$

온도의 상관관계는 점탄성 특성 중 두드러진 특징의 하나이다. 시간과 온도의 중첩원리를 기반으로 재료의 성질 중 온도의 영향은 온도의 함수인 순간응력에 대한 의존성과 시간의 함수인 응력이완에 대한 의존성으로 나누어 표현 할 수 있다 [12]. 식(1)의 표현을 다시 표현하면,

$$\sigma(t, T) = \int_\infty^t E^\eta \left(\frac{t-\xi}{A(T)} \right) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (6)$$

여기서 $A(T)$ 는 T_0 와 연관성이 있는 T 에서 시간 감소요소이고, E^η 는 온도 T_0 의 계수이다.

T_0 에서 반응함수를 기반으로 T 는 재료반응을 예측하는데 꼭 필요하다. T 와 T_0 의 관계성은 식

(7)으로 표현될 수 있다. 윌리암-란데-페리(Williams-Lande-Ferry, WFL)식을 사용하면 재료의 시간 이완 요인은 식(8)로 표현 될 수 있다.

$$E^\eta(t) = E^\eta_0(t/A(T)) \quad (7)$$

$$\log(A(T)) = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \quad (8)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 재료의 고유특성으로써 T_0 에서 일정하다[13]. 이 모델은 유리질 폴리머의 점탄성적 특성을 예측할 수 있게 하고, 수치적 시뮬레이션 분석을 가능하게 한다. 다음 장에서는 이를 설명한다.

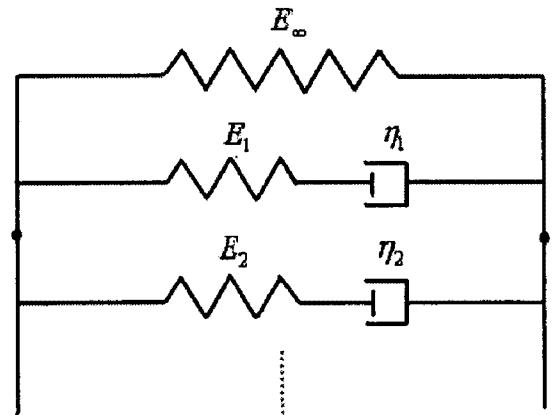


Fig. 2 Schematic diagram of viscoelastic model

3. 실험

유리 전이온도(T_g) 근처에서의 유리질 폴리머의 점탄성적인 특성을 연구하기 위해서는 두가지의 테스트를 할 수 있다. 이는 응력이완 테스트(Stress relaxation test)와 크리프 테스트(Creep test)다. 응력이완 테스트(Stress relaxation test)에서는 순간적으로 초기 변형률이 시편에 가해진다. 그리고 일정한 변형을 유지하면서 응력의 변화를 측정한다. 크리프 테스트(Creep test)에서는 대조적으로 일정한 응력을 가하고 이에 따른 변형율의 변화를 측정한다. 장력 이완 테스트(Tensile stress relaxation test)를 선택하였다. 이것은 샘플의 변형이 거의 없어 이 실험에서 전이영역의 힘 변화를 쉽게 측정 할 수 있기 때문이다. 그러나 높은 온도와 긴 시간에서 샘플은 심각한 뒤틀림과 균일하지 않은 형상을 갖게 된다. 이러한 원인은 부정확한 측정을 야기 시킨다.

실험에서 유리질 폴리머 시편은 유리 전이온도 (T_g)가 약 150 °C 인 PC 이다. 이 정보는 Arystal.Co.Ltd 에서 제공된 것이다[14]. Fig. 3 시험 용 샘플의 치수를 나타내었다. 테스트는 모델 653.0 가 설치된 재료 테스트 시스템(MTS 810 FlexTest™) 을 사용하여 진행되어졌다. 고온의 노 (furnace)는 오차범위가 1 °C 이고, 가장 높은 온도는 1400 °C 이다. 이는 외부 환경과 거의 고립된 상태에서 측정한 온도에 도달하도록 시편을 가열 할 수 있다.

장력 이완 테스트(Tensile stress relaxation test)의 유한요소 모델은 ABAQUS/Standard 를 사용하였다. 시편은 Fig.2 의 점탄성 재료로 모델을 한다. 식에서 재료의 파라미터들은 150 °C 에서 장력 이완 테스트(Tensile stress relaxation test)를 수행해서 얻을 수 있다.

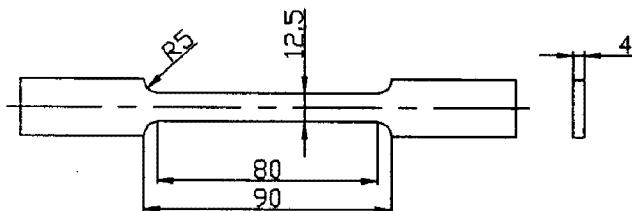


Fig. 3 Specimen shape for material test

4. 결과와 토의

여러 번의 장력 이완 테스트(Tensile stress relaxation test)를 150 °C 에서 서로 다른 순간적 특성에 따라 수행하여 Fig.5 와 같은 곡선을 구할 수 있다. 응력 이완(Stress relaxation) 곡선에서 수행된다. 이 곡선은 모델 변수를 평가하는데 사용되었다. 곡선의 견본은 Fig.4 에서 확인할 수 있다. 시편은 순간 변형률 $\varepsilon_0 = 0.005, 0.010, 0.015$ 이 적용되었다. 그리고 하중은 시간에 대해 측정되었다. 정규화 과정은 초기 응력 σ_0 과 시간함수인 $\sigma(t)$ 에 대하여 수행하였다. 정규화는 측정 오차를 최소화하고 쉽게 비교하기 위해서 절대값을 상대값으로 변환시킨다. 응력 이완 테스트의 경우 전체 테스트를 하는 동안 변형률은 일정하다. 정규화된 응력 이완 형태는 측정된 $F(t)$ 와 초기 힘 F_0 같은 비율로 간주된다. 표준화된 응력 이완 함수 $e(t)$ 는 계수 $E(t)$ 와 초기 계수값 E_0 의 비율이다. 150 °C 에서 3 가지 초기 순간 변형률의 정규화된 이완 곡

선은 Fig.5 에 나타난다. 이 연구에서 표준화 이후 3 가지 곡선이 거의 겹치는 것을 확인 할 수 있다.

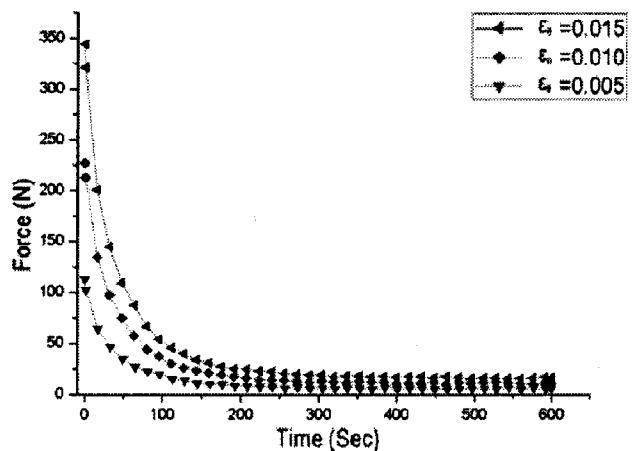


Fig. 4 Stress relaxation results with various initial instantaneous strains at 150 °C

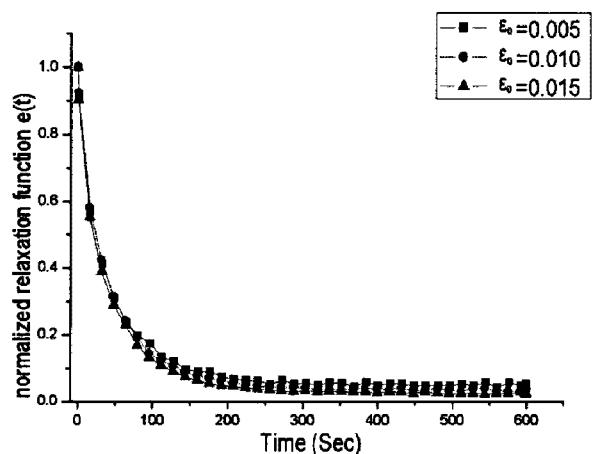


Fig. 5 Normalized relaxation curves with various initial instantaneous strains at 150 °C

Table 1. Parameters of the generalized Maxwell model for PC at 150 °C

N	e_i	λ
1	0.04309	0.06307
2	0.20989	4.05292
3	0.56332	33.160
4	0.1562	75.408

이전에 표현된 일반적인 Maxwell 모델의 변수는 응력 이완 곡선을 회귀분석하여 계산된 것이

다. 여기에는 Levenberg-marquardt(LM) 알고리즘이 Universal Global Optimization(UGO) 과 결합하여 사용되었다[15]. 일정한 시간에서 정규화된 이완계수와 급수의 지수는 N=4 까지 다음과 같은 Table 1.에서 얻을 수 있다.

150 °C에서의 재료의 특성은 ABAQUS로 재료를 모델링 할 때 점탄성 재료의 정보로 제공되었다. 그리고 유리 전이온도(T_g)는 언급된 온도에서 설정되었다. 장력 이완 테스트(Tensile relaxation test)의 수치적 시뮬레이션이 수행되었다. 150 °C에서 실험과 시뮬레이션의 결과 비교는 Fig.6에 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 실험 데이터와 잘 일치한다. 그리고 이 것은 모델의 변수가 150 °C에서 알맞은 것으로 보인다.

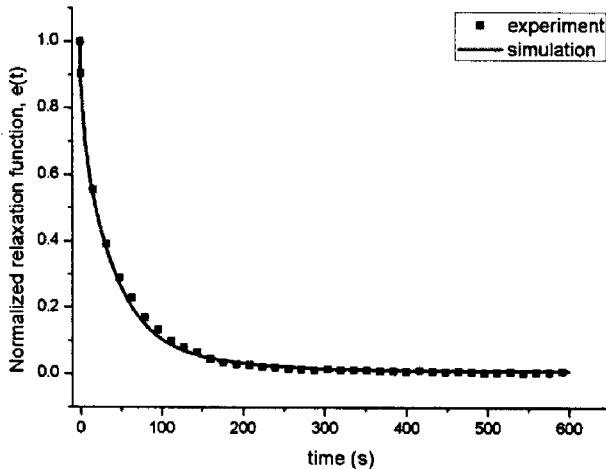


Fig. 6 Comparison of stress relaxation between experiment data and simulation results at 150 °C

제안된 점탄성 모델의 변수를 검증하기 위해 다른 온도에서 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과와 실험 data를 비교하였다. 155 °C, 160 °C 와 165 °C에서 장력 이완 테스트(Tensile relaxation test)를 진행하였다. 실험 데이터에서 얻은 WLF 시간 이완 요소는 Table. 2에서 확인 할 수 있다. 폴리머의 특성은 155 °C, 160 °C 와 165 °C에서의 점탄성 모델을 사용해 예측할 수 있다. 시뮬레이션 결과와 실험 데이터의 비교는 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. 그림은 시뮬레이션에서 사용한 재료의 변수가 실험데이터와 잘 일치함을 보여주고 있다. 그러므로 점탄성 모델은 마이크로 열방식 임프린트 공정시 T_g 근처의 다양한 온도에서의 PC의 변형특성을 잘 모

사하고 있다.

Table 2. Parameters of WLF shift factors for PC at 150 °C

WLF : T_0 (°C)	C_1	C_2 (°C)
150	7.2	88.5

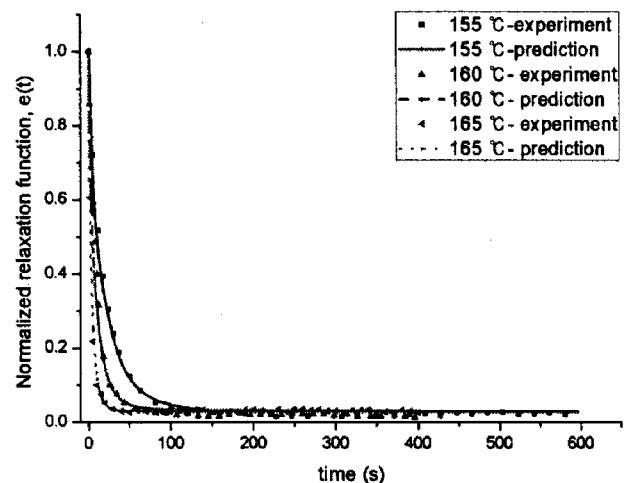


Fig. 7 Comparison of stress relaxation between experiment data and simulation results at different temperature

전형적으로 유리질 폴리머의 3단계의 열방식 임프린트 공정은 가열, 임프린팅, 이형(releasing)이다. 보통 임프린팅 단계에서는 일정한 열적 상태에서 공정이 진행된다. 이 단계는 중요한 단계인데 최종적인 패턴의 품질이 결정된다. 이전에 개발했던 PC의 점탄성 모델을 이용하여 임프린팅 단계는 유한요소 방법인 ABAQUS/Standard를 사용한 시뮬레이션으로 예측 가능하다. 일정한 마이크로 선 패턴(line-pattern) 몰드는 Fig. 8(a)에서 표현되었다. 이것은 전체 패턴을 하나의 패턴으로 표시하고 두 개의 치수로 모델을 간략화 할 것이다. Fig.8(b)는 이를 표현하고 있다. 경계조건은 규칙적이고 대칭적인 몰드로 가정하였다. 반복된 패턴의 움푹 들어간 부분은 넓이와 깊이는 $2w$ 와 h 로 간주한다. 그리고 $2s$ 는 반복된 패턴의 넓이이다. 유한요소 모델에서 작은 필렛($R=5 \mu m$)은 실험 중 몇몇 손상을 피하기 위해 만들어준다. 예를 들면 몰드의 날카로운 부분에 필렛을 준다. 폴리머

기판은 패턴의 움푹 들어간 부분 보다 많이 두껍기 때문에 초기 폴리머의 두께는 고려 하지 않았다. 점탄성 모델의 유용성에 대해 예시를 들기 위해 시간, 온도, 압력의 의존성을 이번 장에서 확인한다.

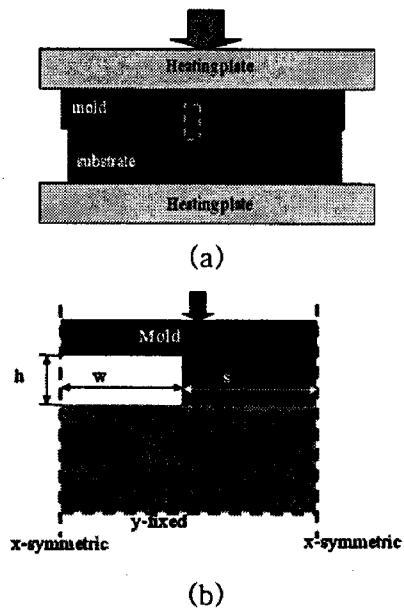


Fig. 8 (a) Schematic diagram of experiment setup (b) simplified plain strain analytical model

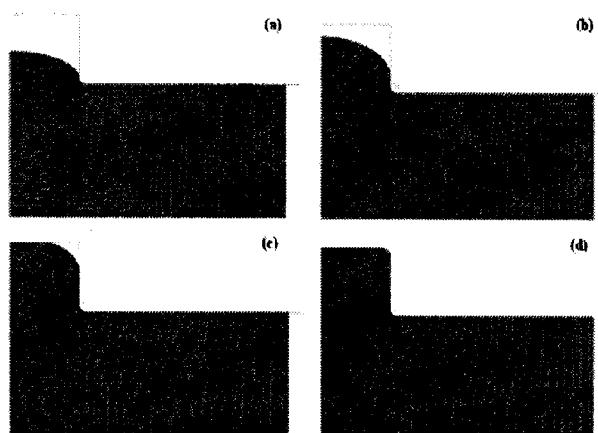


Fig. 9 Simulation results of time dependence of polymer deformation : (a) 10 s (b) 25 s (c) 50 s (d) 100 s

온도 165 °C, 압력 7.5 MPa의 조건에서 임프린팅 시간은 10 s부터 100 s까지의 공정의 변화를 Fig. 9에서 보여준다. 긴 임프린팅 시간은 더욱 많은 폴리머가 몰드의 움푹 파인 곳에 충전되도록 하는 경향이 있다. 초기 단계(10 s ~ 25 s)에서 충전

속도는 마지막 단계(50 s ~ 100 s) 보다 같다. 그 이유는 점탄성 폴리머의 응력 완화 현상 때문이다. 응력의 감쇠는 마지막 단계보다 초기 단계가 빠르다.

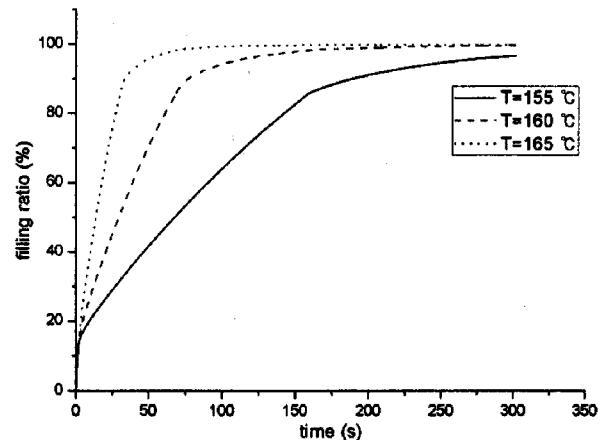


Fig. 10 Temperature dependence of polymer deformation with pressure of 7.5 MPa

온도와 압력에 의해 움푹 패인 곳의 폴리머 변형의 상관관계를 조사하기 위해 충전 비율은 움푹 패인 곳에 충전된 폴리머의 부피로 정의 된다. Fig. 10에서 보는 것처럼 155 °C, 160 °C와 165 °C에서의 세가지 공정과 동일한 압력 7.5 MPa에서 시뮬레이션을 해석했다. 공정 온도가 증가 할 수록 폴리머를 100% 충전 하는 임프린팅 시간이 줄어든다. 그리고 초기 단계에서의 충전비율 증가율은 높은 온도일수록 크다. 이것은 완화 테스트(relaxation test)의 경우 더욱 높은 온도에서의 응력의 평형값은 더욱 빠르게 감소하기 때문이다. Fig.11은 폴리머 변형의 압력의존도를 보여준다. 세가지 다른 압력과 165 °C의 동일한 온도를 적용한 결과이다. 더 높은 압력에서 초기 단계에서의 충전 비율의 증가율이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 100% 충전되는 시간이 더욱 짧아지는 것을 확인 할 수 있었다. Fig.10과 Fig.11의 그림에서 충전 비율의 곡선의 경우 초기부분에서 약 90%의 충전비율을 나타낸다. 이것은 폴리머가 움푹 패인 곳의 표면의 정상에 도달하는 것을 나타낸다. 그래서 폴리머와 몰드의 접촉면적을 증가 시킨다. 이것은 충전비율의 증가율을 작게 하는 결과를 야기한다. Fig.10과 Fig.11을 비교할 때 본 연구에서 공정 온도의 증가는 압력증가와 같

은 영향을 미친다는 것을 발견하였다. 이는 온도와 압력이 서로 상호 작용을 한다는 것을 의미한다.

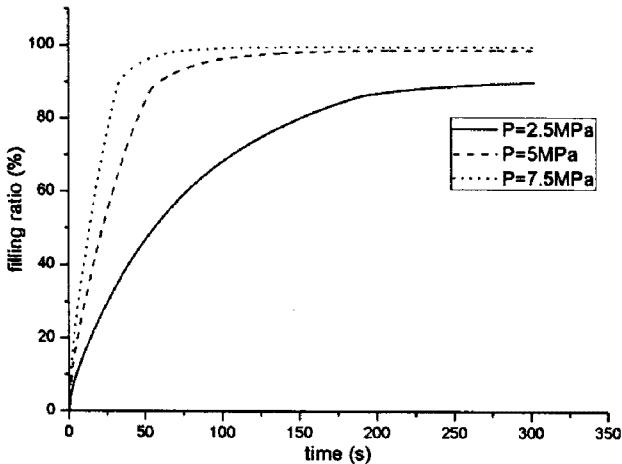


Fig. 11 Pressure dependence of polymer deformation at temperature of 165 °C

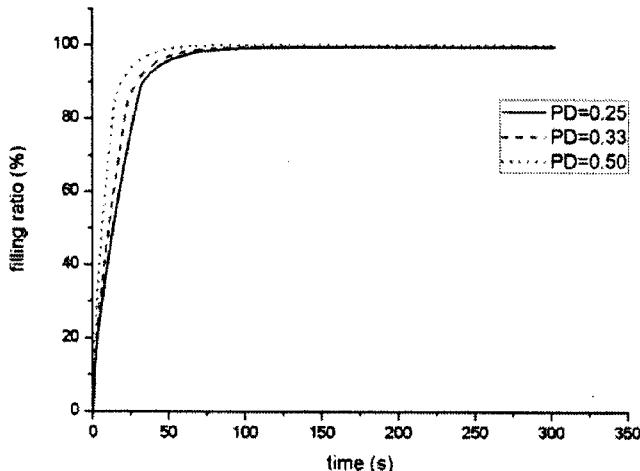


Fig. 12 Pattern density dependence of polymer deformation at temperature of 165 °C and pressure of 7.5 MPa

임프린팅 공정에서의 몰드의 패턴 형상의 영향을 연구하기 위해서 패턴 밀도를 $PD=w/(s+w)$ 로 정의 하였다. 본 연구의 시뮬레이션은 몰드와 기판 사이에 한 패턴의 음폭 패인 곳의 전체 접촉 면적은 $2(s+w)$ 이며 400 um 정도로 고정 되어있다. PD는 0.25, 0.33, 0.50의 서로 다른 세 가지의 값을 가진다. 임프린팅 온도 165 °C, 압력 7.5 MPa, 임프린팅 시간 300 s의 조건 속에서 세가지 몰드는

서로 다른 PD 값이 시뮬레이션에 적용된다. 그리고 충전 비율은 Fig.12에서 나타나있다. 그림으로부터 본 연구는 PD가 증가할 때 충전 시간이 더 짧아지고 충전 비율이 높아지는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 몰드와 기판의 실제 접촉 지역이 PD가 증가 할수록 작아진다. 또한 기판 위에 임프린팅 압력이 높아지는 결과를 초래한다. 좀더 작은 패턴 밀도의 몰드에서 높은 압력과 높은 임프린팅 온도가 필요하다.

5. 결론

유리 전이온도(T_g) 근처에서 유리질 폴리머 PC의 변형특성에 관한 실험 및 연구를 수행하였으며 마이크로 열방식 임프린트 공정을 하기 위해 T_g 근처에서의 PC의 점탄성적 모델의 실현가능성을 검증하였다. 우선, 일반적인 Maxwell 모델을 기반으로 점탄성적 재료의 모델은 응력 이완 테스트(Stress relaxation tests)에서 T_g 에서 모델 파라미터들을 얻었다. 파라미터는 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 비교하므로 검증하였다. PC의 점탄성적 재료 모델 기반으로 유한요소 모델은 마이크로 열방식 임프린트 공정의 임프린팅 단계에서 시뮬레이션을 발전시켰다. 폴리머 변형의 시간, 온도, 압력 의존성은 음폭 패인 곳의 충전 비를 계산하므로 증명하였다. 마이크로 열방식 임프린팅 공정에서 점탄성 재료의 모델과 유한요소 모델의 개발은 공정의 변수를 분석하기에 유용하다. 수치적 시뮬레이션의 결과에서 몇몇 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 공정 온도가 T_g+15 °C(165 °C)로 증가할 때 폴리머는 매우 짧은 시간(25 s 이하)의 평형 값에서 이완한다. 7.5 MPa의 압력 아래에서는 음폭 패인 곳의 충전 비율이 약 20 s에서 90 %에 도달 할 수 있다.
- (2) 충전 비율이 약 90 %로 증가 할 때 폴리머의 흐름은 음폭 패인 곳의 표면 정상에 도달 한다. 폴리머와 몰드의 접촉 표면의 증가는 음폭 패인 곳의 나머지 공간을 채우는데 더 많은 시간이 걸리도록 한다.
- (3) 임프린팅 온도와 열방식 임프린트 공정의 압력은 상호 연관성이 존재한다. 장비의 상황에 따라서 두 가지 변수를 잘 조정 하면

최적화를 할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 또한 본 연구는 지식경제부 주관 전략기술개발사업 "마이크로 기능성 초정밀 핵심요소부품 제조기반 기술개발"의 제 3 세부 "마이크로 액추에이터용 초소형 부품 제조 및 모듈화 기술"의 결과로써 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Chou S.Y., Krauss P.R., Renstrom P.J., 1995, Imprint of sub-25nm vias and trnches in polymers, Appl Phys Lett, 67, pp.3114.
- (2) Makela T., Haatainen T., Majander P., Ahopelto J., 2007, Continous roll to roll nanoimprinting of inherently conducting polyaniline, Microelectron Eng, 84, pp.877~879.
- (3) Shan X.C., Ikehara T., Murakoshi Y., 2005, Applications of micro hot embossing for optical switch formation, Sensor Actuat A Phys, 119, pp.433~440.
- (4) Leech P.W., Lee R.A., Sexton B.A., Smith F, 2007, Hot embossing of micrographic elements in polypropylene, Microelectron Eng, 84, pp.109~113
- (5) Charest J.L., Bryant L.E., Garcia A.J., King W.P., 2004, Hot embossing for micropatterned cell substrates, Microelectron Eng, 84, pp.109~113.
- (6) Chien R.D., 2006, Hot embossing of microfluidic platform, Int commun Heat mass, 33, pp.645~653.
- (7) Guo L.J., 2004, Recent progress in nanoimprint technology and its applications, J. Phys D Appl Phys, 37, pp.123~141.
- (8) Show M.T., MacKnight W.J., 2005, Introduction to Polymer Viscoelasticity, 1st ed. Hoboke, New Jersey:John Wiley & Sons.
- (9) Hirai Y., Onishi Y., Tanabe T., Shibata M., Iwasaki T., Iriye Y., 2008, Pressure and resist thickness dependency of resist time evolutions profiles in nanoimprint lithography, Microelectron Eng, 85, pp.842~845.
- (10) Takagi H., Takahashi M., Maeda R., Onishi Y., Iriye Y., Iwasaki T., Hirai Y., 2008, Analysis of time dependent polymer deformation based on a viscoelastic model in thermal imprint process, Microelectron Eng, 85, pp.902~906.
- (11) Kim N.W., Kim K.W., Sin H.C., 2008, Finite element analysis of low temperature thermal nanoimprint lithography using a viscoelastic model, Microelectron Eng, 85, pp.1858~1865.
- (12) ABAQUS Inc., 2007, Documentation, version 6.7.
- (13) Williams M., Landel R.F., Ferry J.D., 1954, J. Am Chem Soc., 77, pp.3701.
- (14) <http://www.arystal.co.kr>
- (15) <http://www.7d-soft.com>