

변형 LIGA 공정을 통해 제작된 Microlens 의 모델링 및 시뮬레이션

김동성[†] · 이성근^{*} · 양상식^{*} · 권태헌^{**} · 이승섭^{**}

(2002년 3월 16일 접수, 2002년 6월 28일 심사완료)

Modeling and Simulation of Microlens Fabricated by Modified LIGA Process

Dong Sung Kim, Sung-Keun Lee, Sang Sik Yang, Tai Hun Kwon and Seung S. Lee

Key Words : Microlens (마이크로 렌즈), Modified LIGA Process (변형 LIGA 공정), Glass Transition Temperature (유리 전이 온도: T_g), Free Volume Theory (여유 부피 이론)

Abstract

In this paper, we present modeling and simulation of microlens formation by means of a deep X-ray lithography followed by a thermal treatment of a PMMA (Polymethylmethacrylate) sheet. According to this modeling, X-ray irradiation causes the decrease of molecular weight of PMMA, which in turn decreases the glass transition temperature and consequently causes a net volume increase during the thermal cycle resulting in a swollen microlens. In this modeling, the free volume theory including the relaxation process during the cooling process was considered. The simulation results indicate that the modeling in this study is able to predict the fabricated microlens shapes and the variation pattern of the maximum heights of microlens which depends on the conditions of the thermal treatment. The prediction model could be applied to optimization of microlens fabrication process and to designing a micro mold insert for micromolding processes.

기호설명

| | |
|--|--|
| <p>A_s : PMMA 기판의 노출 면적</p> <p>c : PMMA 기판의 열용량</p> <p>D : X-선 조사량</p> <p>G_s : 고분자가 100eV 의 에너지를 흡수할 경우 사슬이 절단되는 양</p> <p>G_x : 고분자가 100eV 의 에너지를 흡수할 경우 가교화되는 양</p> <p>h : PMMA 기판의 깊이 방향의 두께</p> <p>h_{max} : PMMA 기판의 총 두께</p> <p>h_i : 열전달 계수</p> <p>$H(T)$: Heaviside 계단함수</p> <p>K : 고분자 특정 상수</p> | <p>M_0 : 단분자의 분자량</p> <p>M_w : 질량 평균 분자량(weight average molecular weight)</p> <p>M_{w0} : PMMA 기판의 초기 분자량</p> <p>N_A : 아보가드로 수</p> <p>r : 방사방향 좌표</p> <p>R : 마이크로 렌즈의 반지름</p> <p>R_f : 가상 이완율(fictive relaxation rate)</p> <p>t : 냉각 과정의 경과 시간</p> <p>T : 가열 온도</p> <p>T_{cool} : 냉각 과정 중 PMMA 기판의 온도 변화</p> <p>T_f : 가상 온도(fictive temperature),</p> <p>T_g : 유리 전이 온도</p> <p>$T_{g,\infty}$: 유리 전이 온도의 접근값</p> <p>T_i : 초기 가열 온도</p> <p>u_r : 방사 방향 변위</p> <p>u_h : 두께 방향 변위</p> <p>V : PMMA 기판의 총 부피</p> <p>$V_{exposed}$: X-선에 의해 조사된 부피</p> |
|--|--|

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

^{*} 포항공과대학교 기계공학과

^{**} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : thkwon@postech.ac.kr

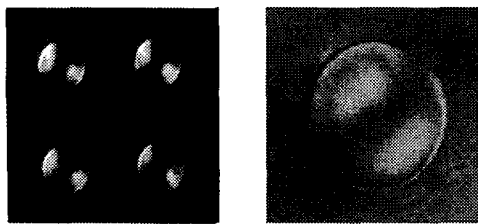
TEL : (054)279-2175 FAX : (054) 279-5899

| | |
|--------------------|--|
| $V_{non\ exposed}$ | : X-선에 의해 조사되지 않은 부피 |
| ΔV | : 최종 부피 증가(마이크로 렌즈의 부피) |
| X_n | : 수평균 사슬 길이(number-averaged chain length) |
| y_{max} | : 2차 다항식의 최대값(마이크로 렌즈의 최대 높이) |
| α_r | : 유리 상태에서의 부피 열팽창 상수 |
| α_g | : 고무 상태에서의 부피 열팽창 상수 |
| β | : 가상 이완율의 비지수성(nonexponentiality) |
| δ_V | : 냉각 과정 후 여유 부피의 평형 상태에 대한 상대 이탈(relative departure) |
| σ | : 가상 이완율의 비선형성(nonlinearity) |
| ρ | : PMMA 기관의 밀도 |

1. 서론

최근 마이크로 렌즈는 광통신, 광스토리지, 생의학 기구 등 여러 범주에 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 중요성에 입각하여 Ruther 등은 PMMA 에 깊은 X-선(deep X-ray) 노광을 이용하여 마이크로 렌즈를 제작하였다⁽¹⁾. 또한 최근 본 연구 그룹의 Lee 등은 마이크로 렌즈 제작을 위한 새로운 개념의 제조 공정을 제안한 바 있다.⁽²⁾ 새로이 제시된 마이크로 렌즈의 제조 공정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 우선 깊은 X-선을 이용하여 PMMA 기관을 특정의 조사량(dose)으로 노광한다. 노광된 PMMA 기관을 온도가 지정된 오븐에 넣고 일정 시간 유지시킨 후 (본 논문에서는 이 지정온도를 "가열 온도(heating temperature)"라 명명한다.) 오븐에서 꺼내어 상온에서 식히게 된다. 이러한 일련의 과정을 통해 Fig. 1 과 같은 마이크로 렌즈를 제조하는 것이 가능하다.⁽²⁾

하지만 본 연구 그룹이 조사한 바에 의하면, 위에서 설명한 변형 LIGA 공정을 통한 마이크로 렌즈의 형성에 관련된 물리적 현상에 대해 이론적으로 수행된 연구 결과는 아직까지 보고된 바 없다. 이 때 물리적 이해를 바탕으로 한 마이크로 렌즈의 형성과정에 대한 정확한 예측이 가능한다면, 마이크로 렌즈를 원하는 형상으로 만들기 위한 공정조건을 최적화나 마이크로 렌즈의 대량 생산을



(a) ϕ 500 μ m microlenses (b) ϕ 300 μ m microlens
Fig. 1 Fabricated PMMA microlenses

위한 마이크로 몰딩 공정의 마이크로 몰드 인서트 의 디자인에 적용할 수 있다. 결과적으로 마이크로 렌즈 원형의 제작 비용 및 마이크로 렌즈의 개발 시간을 단축하는 것이 가능해진다. 따라서 근본적인 고분자의 물리적 성질에 기반을 둔 마이크로 렌즈 형성의 예측 모델의 필요성은 의심할 바 없이 중요하며, 이러한 관점에서 본 논문은 변형 LIGA 공정을 통해 얻어지는 마이크로 렌즈의 형성과정에 대한 단순 예측 모델의 물리적 예측 모델을 제시하여 변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 물리적 모델링

2.1 마이크로 렌즈의 형성 메커니즘

깊은 X-선 노광에 있어서, 특정 흡수 조사량은 El-Kholi 등⁽³⁾의 실험 결과에 따라 PMMA 기관의 깊이 방향으로만 변화한다고 가정하는 것이 가능하다. PMMA 기관에 조사된 X-선은 그 조사량에 따라 다른 양의 고분자의 사슬 절단(chain scission)을 유도한다. 이러한 사슬 절단은 결과적으로 고분자의 질량 평균 분자량(weight average molecular weight: M_w)의 감소를 가져오게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 연관관계를 정량화하기 위해, El-Kholi 등⁽³⁾의 실험 결과에서 X-선의 조사량과 이에 따른 PMMA 기관의 깊이 방향 분자량 변화 데이터에 최적 곡선 맞추기(optimal curve fitting)를 실시하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$M_w(h) = 0.6824h^{2.0255} \quad (1)$$

$$D(h) = 5.5346 \times 10^6 h^{-1.7582} \quad (2)$$

이 때 D 와 h 는 각각 X-선 조사량과 PMMA 기관의 깊이 방향의 두께를 의미한다. 또한 PMMA 의 초기 분자량은 $M_{w0} = 2.05 \times 10^6$ g/mol 을 이용하였다. 이러한 최적 곡선 맞추기를 통해 얻은 식 (1)과 (2)의 각각의 결과를 Figs. 2 와 3 에 나타내었다.

X-선 조사후의 분자량 변화는 조사량의 크기와 함께 흡수되는 에너지에 대한 고분자의 사슬 절단율(chain scission rate) 및 고분자의 가교화율(cross-linking rate)에 의해 다음과 같이 특성화 할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{1}{M_w} = \frac{1}{M_{w0}} + \frac{(G_s - 4G_x)D}{200N_A} \quad (3)$$

이 때 G_s 와 G_x 는 각각 고분자가 100eV 의 에너지를 흡수할 경우 사슬의 절단량과 가교화되는 양을 의미한다. 또한 N_A 는 아보가드로 수를 의미한다.

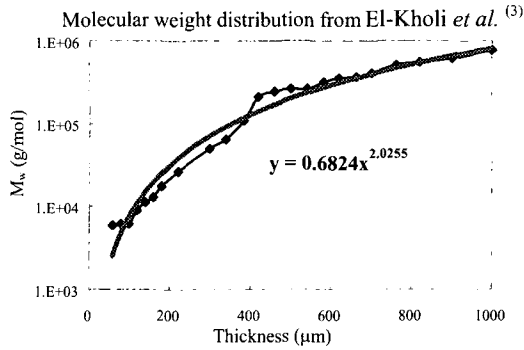


Fig. 2 Molecular weight distribution in the thickness direction of PMMA from the data of Ref.

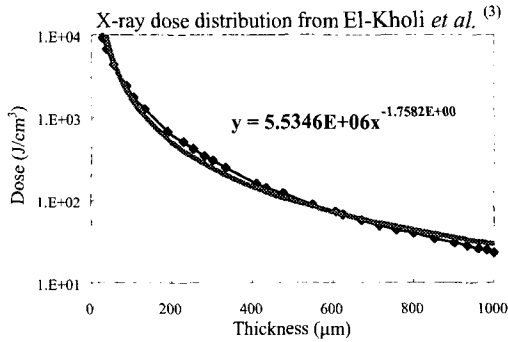


Fig. 3 X-ray dose distribution in the thickness direction of PMMA sheet from the data of Ref.

식 (3)의 이론에 따르면, G_s 와 G_x 는 X-선 조사량과는 무관한 온도만의 함수이어야 할 것이다. 하지만 El-Kholi 등⁽³⁾의 실험 결과들은 이 값들이 조사량에 대해 영향을 받고 있음을 극명하게 보여 준다. 따라서 본 연구에서는 G_s 와 G_x 가 조사량에 대한 비선형 함수들임을 가정하였다. 결국 El-Kholi 등⁽³⁾의 실험 결과로부터 얻어진 식 (1)과 (2)를 이용하면 G_s 와 G_x 의 조사량의 크기에 대한 복합적인 효과를 $G(D)$ 로 정의함으로써, 식 (3)을 다음과 같이 다시 서술할 수 있다.

$$G(D) \equiv (G_s - 4G_x) = \frac{200N_A}{D(h)} \left(\frac{1}{0.6824} \left(\frac{D(h)}{5.5346 \times 10^6} \right)^{1.15203} - \frac{1}{M_{w0}} \right) \quad (4)$$

이 때 $G(D)$ 는 X-선 조사에 대한 PMMA 고유의 특성으로 간주할 수 있으며, 본 연구에서 수행된 실험과 함께 해석에도 이 값을 사용하였다.

본 연구의 실험에서는 Fig. 4(a)와 (b)에 보인 포항 방사광 가속기(PLS)의 LIGA 전용 빔 라인의 X-선을 사용하였다. 이 때 사용된 X-선의 조사량

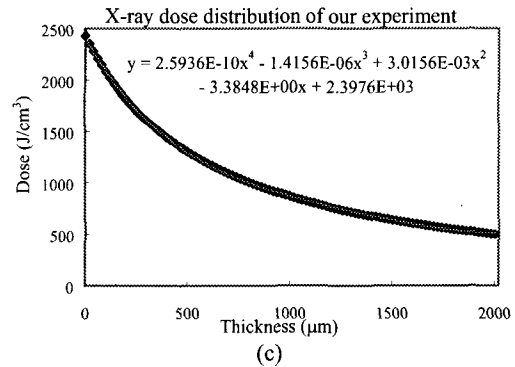
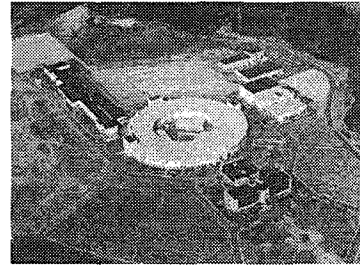
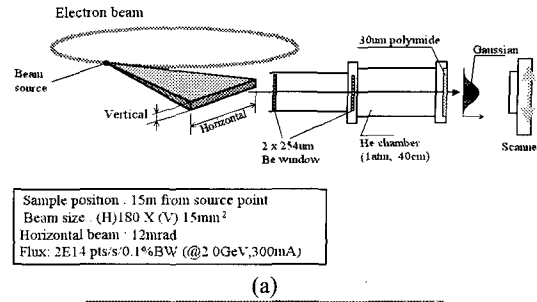


Fig. 4 The PLS LIGA beamline: (a) the specifications, (b) the panoramic photograph of the PLS and (c) X-ray dose distribution in the thickness direction of PMMA sheet

은 Fig. 4(c)에 나타내었으며, 이는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$D(h) = 2.5936 \times 10^{-10} h^4 - 1.4156 \times 10^{-6} h^3 + 3.0156 \times 10^{-3} h^2 - 3.3848 + 2397.6 \quad (5)$$

결과적으로 본 연구의 실험에서 얻을 수 있는 PMMA 기판의 분자량 분포는 식 (4)의 G 인자와 함께 식 (5)의 조사량 분포를 이용함으로써, 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

X-선 조사에 의한 분자량의 감소는 유리 전이 온도(T_g)의 감소를 낳게 된다. 이러한 연관관계의 설명을 위해서, 본 연구에서는 T_g 와 고분자의 사슬 길이 사이의 관계에 대하여 가장 널리 사용되는 식인 Flory 와 Fox 에 의해 제시된 다음과 같은 식을 사용하였다.^(5,6)

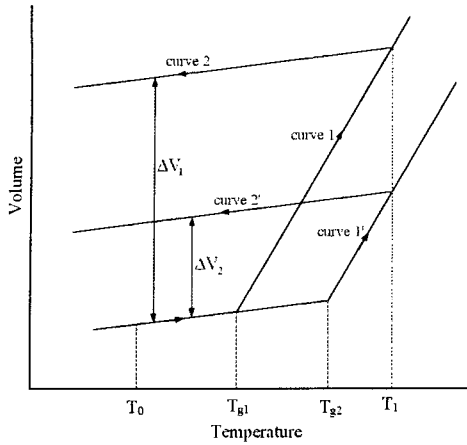


Fig. 5 The mechanism of microlens formation

$$T_g = T_{g,\infty} - \frac{K}{X_n} \quad (6)$$

이 때 X_n 은 수평균 사슬 길이(number-averaged chain length)를 나타내며, 질량 평균 분자량은 $M_w = M_0 X_n$ 와 같이 계산될 수 있다. 여기서 M_0 는 단 분자의 분자량에 해당하며, PMMA 의 경우 $M_0 = 100$ 이 된다. 또한 식 (6)에서 K 는 고분자의 특정 상수에 해당하며, $T_{g,\infty}$ 는 유리 전이 온도의 점근값으로 T_g 는 분자량이 증가할수록 이 값에 가까워지게 된다. 본 연구에서는 $T_{g,\infty}$ 와 K 값을 각각 $384 \pm 1(K)$ 과 1607 ± 170 으로 사용하였다.⁽⁶⁾

고분자 재료의 여유 부피 이론(free volume theory)에 따르면, 가열과 이에 뒤따른 냉각 과정에 의해 여유 부피의 증가를 기대할 수 있다. 결국 두께 방향의 T_g 의 변화는 이러한 이론에 따라 마이크로 렌즈의 형성에 가장 중요한 역할을 담당한다. 이러한 부피 증가의 메커니즘을 Fig. 5 에 도식적으로 보였으며, 이를 설명하면 다음과 같다.

서로 다른 유리 전이 온도, T_{g1} 와 T_{g2} 를 갖는 PMMA 의 부피는 T_0 에서 T_1 으로 가열하는 과정 동안 각각 곡선 1 과 1' 을 따라간다. 하지만 이에 뒤따른 T_1 에서 T_0 로의 급속 냉각과정에 있어서는 각각 곡선 2 와 2' 을 따라가게 된다. 결과적으로 가열과정과 이에 뒤따른 급속 냉각과정에 의해 각각 ΔV_1 과 ΔV_2 의 최종 부피 증가를 얻을 수 있게 된다. 이러한 과정에 기초하여 보다 낮은 유리 전이 온도는 보다 많은 최종 부피 증가, ΔV 를 낳게 된다. 하지만 가열 온도가 유리 전이 온도보다 낮게 될 경우에는 동일한 메커니즘에 의해 최종 부피 증가를 얻을 수 없게 된다. 이렇게 얻게 되는 최종 부피 증가의 전체 합은 열처리 과정을 거치 않게 되는 마이크로 렌즈의 형성에 밀접하게 관련

되어 있다. 또한 이러한 마이크로 렌즈 형성 메커니즘에 의해 최종 마이크로 렌즈 형상의 최대 높이는 가열 온도에 따라 변화하게 된다.

위에서 설명한 열처리 과정 시에, T_1 에서 T_0 로의 냉각과정에 이완 과정(relaxation process)이 포함되며,⁽⁷⁾ 결과적으로는 Fig. 5 에서 보인 ΔV 보다 작은 최종 부피를 낳는다. 본 절에서는 마이크로 렌즈 형성의 메커니즘에 대한 이해를 돕기 위해 이 과정에 대한 설명은 생략하였으나, 다음 절에서 냉각과정 중에 도입되는 이완과정에 대해 자세히 설명한다.

결과적으로 Fig. 5 에서 보인 열처리 과정에 의해 생성되는 최종 잉여 부피 증가는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta V = \int_{V_{exposed}} \Delta\alpha(T - T_g(h))H(T - T_g(h))dV - \int_{V_{non\ exposed}} \Delta\alpha(T - T_{g,\infty})H(T - T_{g,\infty})dV \quad (7)$$

이 때 $V_{exposed}$ 와 $V_{non\ exposed}$ 는 각각 X-선에 의해 조사된 부피와 조사되지 않은 부피에 해당한다. 즉 X-선에 의해 조사된 부피에서 생성되는 여유 부피에서 X-선에 의해 조사되지 않은 부피의 여유 부피를 제하면 마이크로 렌즈의 형태로서 나타나는 실제 잉여 부피를 계산할 수 있는 것이다. $\Delta\alpha = (\alpha_r - \alpha_g)$ 을 의미하며, α_r 과 α_g 는 각각 유리 상태와 고무 상태에서의 부피 열팽창 상수에 해당하며 본 연구에서는 PMMA 기판의 두께 방향으로 이 값들이 일정하다고 가정하였으며, α_r 과 α_g 의 값은 각각 $490 \times 10^{-6}/K$ 과 $213 \times 10^{-6}/K$ 로 두었다.⁽⁸⁾ 또한 식 (7)에서 T 는 각 열처리 과정의 가열 온도에 해당하며, $H(T - T_g(h))$ 는 Heaviside 계단 함수로서 가열 온도, T 와 관련하여 X-선에 조사되어 PMMA 기판의 두께 방향으로 변화하는 $V_{exposed}$ 의 유리 전이 온도를 고려하기 위해 도입되었다. 즉 계단 함수, $H(T - T_g(h))$ 는 가열 온도가 임의의 두께 방향 유리 전이 온도보다 낮을 경우 최종 부피 증가가 생성되지 않도록 유도한다. 마찬가지로 $H(T - T_{g,\infty})$ 는 가열 온도가 X-선에 의해 조사되지 않은 부위의 유리 전이 온도보다 높아질 경우, $V_{non\ exposed}$ 가 최종 잉여 부피의 형성에 관여되도록 하는 역할을 한다

2.2 냉각 과정 동안의 이완과정

특정 유리 전이 온도, T_g 를 갖는 고분자의 냉각 과정 동안의 부피 변화를 도식적으로 그려보면 Fig. 6 와 같다. 이 때 점 B 에서 점 C 로의 부피 변화를 이완 과정이라 하며, 점 B 와 C 에서의 부

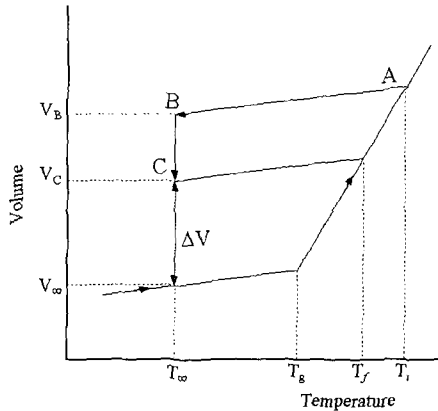


Fig. 6 Free volume theory: relation between temperature and volume of polymer

피는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_B &= V_\infty + \delta_V^0 V_\infty \\ V_C &= V_\infty + \delta_V V_\infty \end{aligned} \quad (8)$$

이 때 V_∞ 는 평형 상태에 도달했을 때의 부피를 의미하며, δ_V^0 는 냉각 과정 후 $t=0$ 에서의 여유 부피의 평형 상태에 대한 초기 상대 이탈(relative departure)을 의미하며, δ_V 는 상대 이탈의 시간에 따른 변화를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_V(t) = \frac{V(t) - V_\infty}{V_\infty} \quad (9)$$

따라서 냉각 과정 후의 이완 과정이 고려된 경우의 최종 잉여 부피는, 식 (7)의 잉여 부피를 $\Delta V_{(7)}$ 으로 하면 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_C - V_\infty = V_B - V_\infty + (\delta_V + \delta_V^0) V_\infty \\ &= \Delta V_{(7)} + \Delta \delta_V V_\infty \end{aligned} \quad (10)$$

이 때 Fig. 6의 C 상태를 표현할 수 있는 가상 온도(fictive temperature), T_f 를 정의하면,⁽⁹⁾ 다음과 같은 가상 이완율(fictive relaxation rate), R_f 를 통해 냉각 과정 중의 재료의 거동을 잘 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

$$R_f = - \left[\frac{dT_f}{d(\log t)} \right] \quad (11)$$

여기서 $\delta_V(t) = \Delta \alpha [T_f(t) - T_g]$ 임을 이용하여, 가상 이완율을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$R_f = - \frac{1}{\Delta \alpha} \left[\frac{d\delta_V}{d(\log t)} \right] \quad (12)$$

위와 같이 정의된 가상 이완율은 비지수성(nonexponentiality), β 와 비선형성(nonlinearity), σ 의 두 특징으로 구분 지어지며, 대부분의 비결정 고

분자에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹²⁾

$$R_f = 2.303 \left[\frac{e}{\Delta T \beta} + \sigma \right]^{-1} \quad (13)$$

여기서 e 는 자연 로그를 의미하며, 여기서 β 와 σ 는 Narayanaswamy & Moynihan model^(13,14)에 따라 각각 0.35와 0.77/K으로 결정되며, ΔT 는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\Delta T = \begin{cases} T_g - T(t), & T_i \geq T_g \\ T_i - T(t), & T_i < T_g \end{cases} \quad (14)$$

결과적으로 X-선 조사 후 가열 온도로 가열되었던 PMMA 기판의 냉각 과정에서의 온도 변화를 알게 되면 식 (13)을 통해 가상 이완율을 계산할 수 있으며, 다시 식 (12)를 통해 상대 이탈의 시간에 대한 변화를 계산할 수 있다. 마지막으로 식 (10)을 이용하면, 열처리 과정에서 이완 과정이 포함된 마이크로 렌즈의 실제 잉여 부피를 계산할 수 있게 된다. 본 연구에서는 PMMA 기판의 냉각 과정에서 총괄 용량법(lumped capacitance method)을 이용하여 온도 변화, $T_{cool}(t)$ 를 다음과 같이 계산하였다. (실제 실험에서 가열은 총 5분간 진행되었다. PMMA 기판의 온도는 총괄 용량법에 따라 계산하면 5분 내에 PMMA 기판이 가열 온도에 도달하는 것을 알 수 있었으며, 이는 오븐에서 PMMA 기판은 평형 상태에 도달했음을 의미한다.)

$$\frac{T_{cool}(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{h_i A_s}{\rho V c} \right) t \right] \quad (15)$$

이 때 T_i 와 T_∞ 는 각각 초기 가열 온도와 주위 냉각 온도(25°C)를 나타내며, h_i, A_s, ρ, V, c 그리고 t 는 각각 열전달 계수, PMMA 기판의 노출 면적, 밀도, 총 부피, 열용량 그리고 냉각 과정 동안의 경과 시간을 의미한다. 또한 h_i, ρ 그리고 c 의 값은 각각 15W/m²K, 1.19g/cm³ 그리고 1.4kJ/kgK에 해당한다.⁽¹⁵⁾

이 때 식 (12)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며,

$$-\Delta \alpha \cdot 2.303 \left[\frac{e}{\Delta T \beta} + \sigma \right]^{-1} \frac{dt}{t \ln 10} = d\delta_V \quad (16)$$

$\Delta T = T_g(h) - T_{cool}(t)$ 과 실제 실험에서 냉각 시간이 15분에 해당함을 고려하면, 상대 이탈의 X-선에 조사된 PMMA 기판 두께 방향에 대한 변화를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\delta_V(h) = \int_1^{15} \left\{ -\Delta\alpha \cdot \left[\frac{e}{(T_g(h) - T_{cool}(t))\beta} + \sigma \right]^{-1} \right\} \cdot H(T - T_g(h)) \frac{dt}{t} \quad (17)$$

결과적으로 PMMA 기관의 X-선에 조사에 의해서로 다른 유리 전이 온도를 가지는 각 층은 식 (17)에 의해 이완되는 양이 달라지게 된다. 즉 정성적으로 유리 전이 온도가 낮으면, 냉각 과정 후에 겪게 되는 이완 과정이 적게 됨을 알 수 있다.

3. 해석

본 연구에서는 마이크로 렌즈의 형성과정에 대해 개발된 모델링의 가능성을 시험하기 위한 가장 단순한 추정을 위해, 마이크로 렌즈의 단면 형상을 2 차 다항식으로 가정하였다. 이 때 2 차 다항식이 사용된 이유는 2 차 다항식이 실제 마이크로 렌즈의 단면 형상에 가장 유사하게 맞춤(fitting)이 이루어졌기 때문이며, 레이저를 이용한 범프(bump)의 형성에도 2 차 다항식이 범프의 모양을 잘 표현하기 때문이다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서 사용된 2 차 다항식은 다음과 같다.

$$y = \frac{y_{\max}}{R^2} (-r^2 + R^2) \quad (18)$$

이 때 r , y_{\max} 그리고 R 은 각각 방사방향의 좌표, 본 연구에서 사용된 2 차 다항식의 최대값(마이크로 렌즈의 최대 높이) 그리고 마이크로 렌즈의 반지름을 나타낸다. 식 (18)을 기반으로 2 차 다항식에 의해 만들어지는 회전체(solid of revolution)의 부피를 식 (7)의 부피, ΔV 로 대체하게 되면, 이완 과정이 고려되지 않을 때의 마이크로 렌즈의 최대 높이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y_{\max} = 2 \int_0^{h_{\max}} \Delta\alpha(T - T_g(h)) H(T - T_g(h)) dh - 2 \int_0^{h_{\max}} \Delta\alpha(T - T_{g,\infty}) H(T - T_{g,\infty}) dh \quad (19)$$

이 때 h_{\max} 는 PMMA 기관의 총 두께를 의미한다.

식 (19) 및 식 (10)을 기반으로 냉각 과정 중의 이완 과정이 고려될 경우의 마이크로 렌즈의 최대 높이를 계산하면 다음과 같다.

$$y_{\max} = 2 \int_0^{h_{\max}} [\Delta\alpha(T - T_g(h)) + \Delta\delta_V(h)] H(T - T_g(h)) dh - 2 \int_0^{h_{\max}} [\Delta\alpha(T - T_{g,\infty}) + \Delta\delta_{V,plate}] H(T - T_{g,\infty}) dh \quad (20)$$

이 때 $\Delta\delta_{V,plate}$ 는 PMMA 기관의 X-선에 조사되지 않은 부분의 상대 이완을 의미하며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\delta_{V,plate} = \int_1^{15} \left\{ -\Delta\alpha \cdot \left[\frac{e}{(T_{g,\infty} - T_{cool}(t))\beta} + \sigma \right]^{-1} \right\} \cdot H(T - T_{g,\infty}) \frac{dt}{t} \quad (21)$$

4. 결과 및 토의

본 연구에서 제시된 마이크로 렌즈의 형성에 대한 모델링과 이를 통한 시뮬레이션의 결과는 다음과 같다. 식 (3)-(5)를 통해 구해진 M_w 의 두께 방향 분포는 Fig. 7 과 같다. 이렇게 구해진 분자량의 변화에 따라 식 (6)을 통해 계산되어진 T_g 의 두께 방향 분포는 Fig. 8 에 도시되어 있다. Fig. 9(a) 와 (b)는 가열 온도 105°C 와 115°C 에 대하여 각각 실제 실험을 통해 제작된 마이크로 렌즈의 형상과 식 (19)와 (20)의 최대 높이 계산에 기초하여 식 (18)을 이용하여 그려진 마이크로 렌즈의 형상을 보여준다. 마지막으로 Fig. 10 은 온도 변화에 대해 변화되는 마이크로 렌즈의 최대 높이를 실험을 통해 얻어진 데이터(이 때 마이크로 렌즈의 반지름은 각각 500, 700, 1000 그리고 1500 μm 이다.) 와 본 연구의 모델링에 의한 식 (19)와 (20)을 통해 얻은 데이터를 각각의 가열 온도에 대해 변화하는 모습을 도시한 것이다.

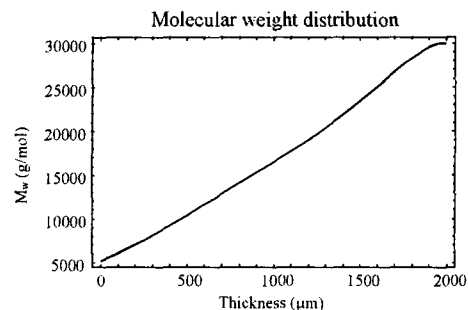


Fig. 7 Molecular weight distribution in the thickness direction of PMMA

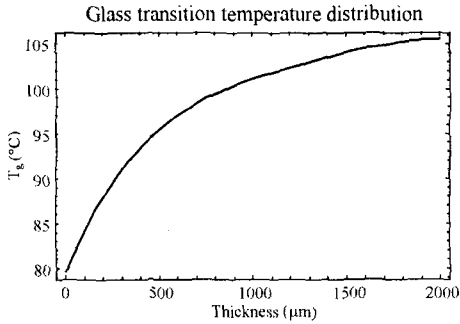
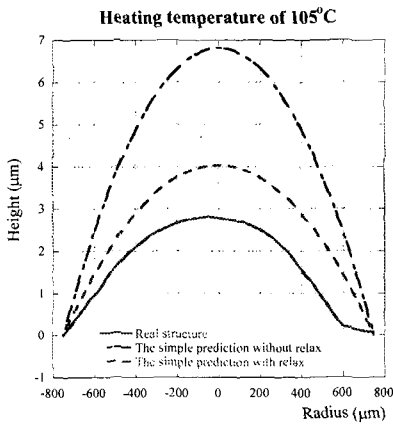
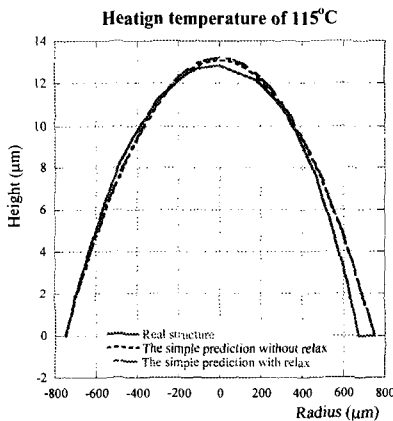


Fig. 8 Glass transition temperature distribution in the thickness direction of PMMA sheet



(a) 105°C case



(b) 115°C case

Fig. 9 Microlens shapes of real structure (solid line) and predictions not considering the relaxation process (dotted line) and considering the relaxation process (broken line) analyses at two different heating temperatures of: (a) 105°C (b) 115°C

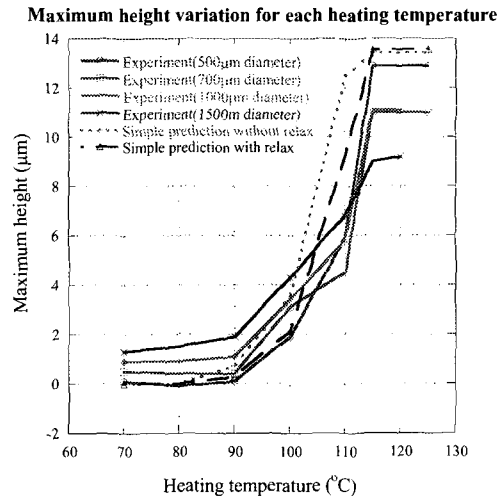


Fig. 10 Comparison of the maximum heights of microlenses from experiments (solid lines) and predictions not considering the relaxation process (dotted line) and considering the relaxation process (broken line) analyses

우선 Fig. 9 를 살펴보면, 가열 온도 105°C 의 경우 냉각 과정에서의 이완 과정의 고려를 통해 실제 마이크로 렌즈의 크기와 근접하게 접근하는 것을 알 수 있다. 이 때 가열 온도 115°C 의 경우 이완 과정이 고려된 상태와 그렇지 않은 상태가 아주 비슷한 것을 확인할 수 있다. 이는 실제로 냉각 과정에서 이완 과정이 고려되었음에도 불구하고, 가열 온도가 PMMA 기판이 가지는 유리 전이 온도를 넘어서면서 X-선이 조사된 부분과 조사되지 않은 부분 모두에서 이완 과정이 나타나 결과적으로 최종 잉여 부피에 대해서는 이완 과정의 효과가 상쇄되는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 10 을 살펴보면, 시뮬레이션 결과가 실험 데이터를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 특히 실험 데이터에 있어서, 유리 전이 온도 근처에서 급격한 마이크로 렌즈 최대 높이의 상승이 나타나는 것과 이를 지나서 최대 높이 상승의 안정기(plateau)에 들어서는 것 모두를 시뮬레이션이 표현하고 있음을 알 수 있다. 이 때 본 연구에서는 X-선 조사량이 방사 방향에 관계없이 두께 방향으로만 변화한다고 가정하였으므로, 실제 실험에서 보여지는 어느 정도의 마이크로 렌즈 최대 높이 변화와 마이크로 렌즈 반지름 간의 상관관계를 예측할 수 없음을 알 수 있다. 하지만 X-선 조사량에 따른 반지름 방향의 영향력을 실험으로 알 수 있다면, 마이크로 렌즈 최대 높이의 반지름 영향력을 고려할 수 있으리라 생각되며, 반지름 영향력이 고려된다면 위에서 설명한 최대 높이의

전체적인 추세는 변화하지 않으리라 사료된다. 또한 위에서 설명한 바와 같이 냉각 과정 중에 이완 과정이 고려된 결과, PMMA 기판의 유리 전이 온도 이하에서는 최대 높이가 줄어들게 되며 유리 전이 온도를 넘어서면서 이완의 효과가 무시되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 변형 LIGA 공정을 통해 제작된 마이크로 렌즈의 형성 과정에 대한 모델링과 시뮬레이션을 수행하였으며, 이러한 과정을 통해 마이크로 렌즈의 형성에 대한 물리적 원리를 이해할 수 있었다. 또한 본 연구에서 제시된 모델링은 마이크로 렌즈의 형상 뿐 아니라, 마이크로 렌즈 최대 높이의 변화 패턴을 성공적으로 예측할 수 있었다. 이러한 모델링 및 시뮬레이션 방법은 원하는 마이크로 렌즈의 제작 공정 최적화 및 마이크로 렌즈의 대량 생산을 위한 마이크로 몰딩(micromolding)의 몰드 인서트의 디자인에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 사업(2000-N-NL-01-C-148)의 연구지원으로 이루어졌으며, 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Ruther, P., Gerlach, B., Goettert, J., Ilie, M., Mohr, J., Mueller, A. and Ossmann, C. et al., 1997, "Fabrication and Characterization of Microlenses Realized by a Modified LIGA Process," *Pure Appl. Opt.*, Vol. 6, pp. 643~653.
- (2) Lee, S.-K., Lee, K.-C. and Lee, S.S., 2002 "Microlens Fabrication by the Modified LIGA Process," *IEEE MEMS 2002*, pp. 520~523.
- (3) El-Kholi, A., Mohr, J. and Nazmov, V., 2000, "Study of Properties of Irradiated PMMA by the Method of Thin Sections," *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.*, Vol. 448, pp. 497~500.
- (4) Juey H. Lai, 1989, "Polymers for Electronic Applications," *CRC Press*, pp. 2~14.
- (5) Fox, T.G. and Flory, P.J., 1950, "Second-Order Transition Temperatures and Related Properties of Polystyrene. I. Influence of Molecular Weight," *J. Appl. Phys.*, Vol. 21, pp. 581~591.
- (6) O'Driscoll, K. and Sanayei, R.A., 1991, "Chain-Length Dependence of the Glass Transition Temperature," *Macromolecules*, Vol. 24, pp. 4479~4480.
- (7) Ferry, J.D., 1980, "Viscoelastic Properties of Polymers," *John Wiley & Sons*, pp. 280~290.
- (8) Bicerano, J., 1993, "Prediction of Polymer Properties," *Marcel Dekker*, pp. 50~54.
- (9) Tool, A.Q., 1946, "Relation Between Inelastic Deformability and Thermal Expansion of Glass in Its Annealing Range," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 29, pp. 240~253.
- (10) Kovacs, A.J., 1963, "Glass Transition in Amorphous Polymers. Phenomenological Study," *Fortschr. Hochpolym. Forsch.*, Vol. 3, pp. 394~507.
- (11) Malek, J., 1998, "Rate-Determining Factors for Structural Relaxation in Non-Crystalline Materials II. Normalized Volume and Enthalpy Relaxation Rate," *Thermochim. Acta*, Vol. 313, pp. 191~200.
- (12) Malek, J., 1998, "Volume and Enthalpy Relaxation Rate in Glassy Materials," *Macromolecules*, Vol. 31, pp. 8312~8322.
- (13) Narayanaswamy, O.S., 1971, "A Model of Structural Relaxation in Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 54, pp. 491~498.
- (14) Moynihan, C.T., Easteal, A.J., DeBolt, M.A. and Tucker, J. 1976, "Dependence of the Fictive Temperature of Glass on Cooling Rate," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 59, pp. 12~16.
- (15) Technical Data from Goodfellow Corp. (www.goodfellow.com).
- (16) Shiu, T.R., Grigoropoulos, C.P., Cahill, D.G. and Greif, R., 1999, "Mechanism of Bump Formation on Glass Substrates during Laser Texturing," *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, pp. 1311~1316.