

평판형 폴리머 소재의 Hot-emboss 공정에 관한 연구 A Study on Hot-emboss Process of Plate-type Polymer

*이창수¹, 윤성원², 강충길³

* Chang-Su Lee¹, Sung-Won Youn², # Chung-Gil Kang (cgkang@pusan.ac.kr)³

¹ 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소, ² 산업기술종합연구소, ³ 부산대학교 기계공학부

Key words : Hot embossing, Plate-type polymer, Polymethylmethacrylate (PMMA), Formability, Bulging

1. 서론

Hot-embossing (Micro/nanoimprint) 기술은 미세패턴/유로가 각인된 몰드를 피 가공소재 표면에 press 하여 전사시키는 고정밀, 저비용, 고생산성 공정이다. 미소광학소자, 광결정 (photonic crystal), 평판디스플레이용 회로, 저장매체, 나노/마이크로 유로 등의 제작과 관련하여 주목을 받고 있는 기술이며, 최근에는 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 국내산업에서는 디스플레이나 바이오칩 분야를 중심으로 수요가 발생하고 있는데, 최근에는, 박막뿐만 아니라 평판형 소재로의 적용이 증대하고 있다. Hot-emboss 온도는 폴리머 소재의 유동온도 (T_f , flow temperature)보다 높게 설정하는 것이 바람직한데, 그 이유는 T_f 이상에서 저장탄성계수와 점성이 급격히 감소하기 때문이다 [2]. 즉, 성형하중을 감소시킬 수 있고, 탄성회복에 의한 치수 오차를 최소화 할 수 있다. 반면에, 평판형 소재의 경우, hot-emboss 온도가 높을수록 벌징 (bulging)에 의한 시편 전체의 변형이 발생하기 쉽다. 벌징에 의한 시편의 면적변화는 가압력을 감소시킨다. 또한, 벌징된 부분은 성형 후 후처리(절단)에 의해서 제거되어야 하므로, 시편의 벌징을 최소화 하면서 패턴을 전사시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 50%의 패턴밀도를 가지는 마이크로 몰드를 이용한 평판형 Polymethylmethacrylate (PMMA)의 hot-embossing 실험을 통해, 온도 (T_U : 상부편치온도, T_L : 하부편치온도)와 하중, 성형시간이 성형성 (전사깊이)과 벌징에 의한 시편 전체의 변형에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

2. Experimental procedure

Hot-emboss용 소재로는 2 mm 두께, 15×15 mm² 크기의 (PMMA)를 사용하였다. 우수한 생물학적 친화성, 광학적 특성을 가지는 Polymethylmethacrylate (PMMA) 소재는 비교적 낮은 유리전이온도 (T_g : 105°C) 및 성형수축율 (0.1-0.4 %)을 가지므로 나노임프린트 공정용 피 가공 소재로써도 널리 이용되고 있다 [2]. Fig. 1(a)은 hot-emboss 장치 사진을 나타내고 있다. 최대 3×3 cm² 크기의 시편의 성형이 가능하며, 최대인가하중과 가열온도는 각각 2 kN과 700°C이다. 상하부 편치는 각각 히터를 내장하고 있다. Ni 몰드는 Si micromachining과 Ni 전주공정에 의해 제작되었다. Ni 몰드의 치수 및 구성을 그림 1(b)에 나타내었다. 패턴 영역은 폭 10 μm, 깊이 10 μm인 중형비 1:1의 선형마이크로 패턴으로 구성되어 있다. Fig. 2는 시간경과에 따른 성형온도와 하중의 변화를 나타내고 있다. 상하부 편치가 설정온도까지 가열되면 상부편치에 의한 가압이 시작되는데, 가압시 온도는 일정하게 유지된다. 시편의 벌징을 감소시키기 위해서, 상하부편치의 온도를 조절하였다. 가압유지시간의 종료 후 상하부편치는 시편의 유리전이온도 이하로 자연냉각된 후, 상하부편치의 이동에 의해 이형공정이 완료된다. 몰드 및 성형된 시편의 표면형상은 광학현미경으로 관찰하였으며, 간섭계 현미경 (Zygo New View 5000)을 이용하여 패턴 중앙부의 치수를 측정하였다.

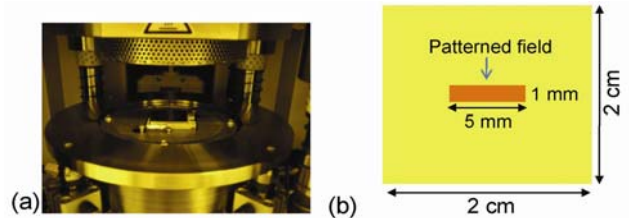


Fig. 1 (a) Photograph of hot-emboss system and (b) Schematic of mold design

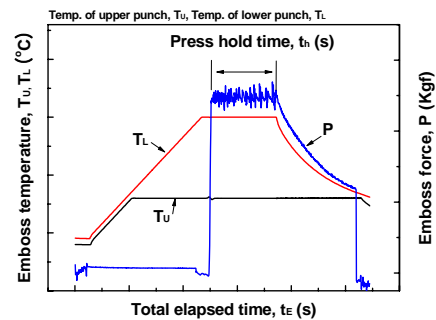


Fig. 2 Typical condition history for hot-embossing

3. 결과 및 고찰

PMMA의 마이크로 hot-embossing 공정에 대해서는 많은 연구보고자료가 있으나, 성형성에 영향을 미치는 인자 (공정조건 (온도, 압력, 시간), 박막두께, 분자량, 패턴 형상 및 치수 (중형비) 등)가 매우 다양하기 때문에, 타 연구그룹의 연구데이터를 본 연구에 그대로 적용시키기는 적합하지 않다고 판단하였다. 따라서, PMMA의 벌징을 최소화하면서 완전충진을 얻을 수 있는 조건을 조사하기 위하여 하중, 온도, 가압유지시간의 변화에 따른 hot-emboss 실험을 실시하였다. 실험조건은 벌징에 의해 증가된 최종시편면적이 몰드의 면적을 초과하지 않는 범위로 제한되었다.

Fig. 3은 하중, 온도, 가압유지시간의 변화에 따른 패턴의 전사깊이 변화를 나타내고 있다. 성형온도가 높을수록 하중증가에 따른 패턴 전사깊이의 증가율이 높았으며, 고온, 고압일수록 가압유지시간의 효과는 큼을 알 수 있었다. 그러나, 150°C 이상의 성형온도조건에서는 $P = 30$ kgf인 경우(미충진조건)에도 벌징현상에 의한 시편의 치수변화가 현저하였다. $T_U = T_L = 150^\circ\text{C}$, $P = 50$ kgf, $t_H = 300$ s일 때, 패턴의 완전충진을 얻을 수 있었다.

벌징현상을 감소시키고 동시에 완전충진을 얻기 위해서, 시편의 표면 (몰드와 접촉하는 면)보다 시편 후면의 온도 (T_U)를 80, 110, 120°C로 낮게 설정하여 hot-emboss 실험을 수행하였다. Fig. 4는 $T_U = 80, 110^\circ\text{C}$ 조건에서 성형한 시편의 사진을 나타내고 있으며, Fig. 5는 $T_U = 80^\circ\text{C}$ 시편의 간섭계 현미경 관찰 결과를 나타내고 있다.

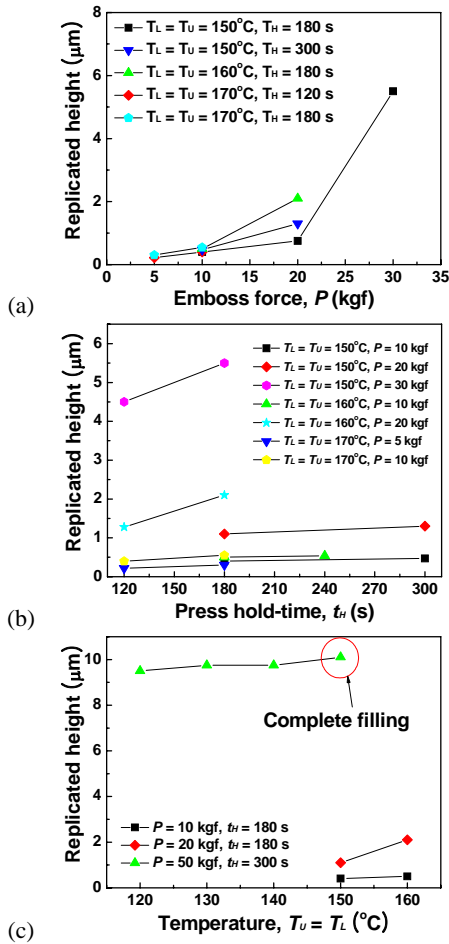


Fig. 3 The relationship between the replicated depth and the process parameters; (a) emboss force (P), (b) press-hold time (t_H) and (c) emboss temperature ($T_U = T_L$).

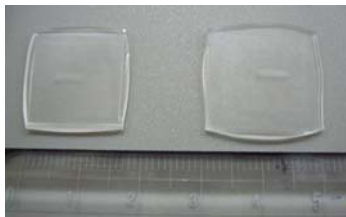


Fig. 4 Photographs of PMMA samples hot-embossed under different heating conditions (left-side) $T_U = 80^{\circ}\text{C}$, $T_L = 150^{\circ}\text{C}$, $P = 50$ kgf, $t_H = 300$ s, (right-side) $T_U = 110^{\circ}\text{C}$, $T_L = 150^{\circ}\text{C}$, $P = 50$ kgf, $t_H = 300$ s. Samples show different amount of bulging.

T_U 를 PMMA의 T_g 보다 낮은 80°C 로 설정하였을 때, 완전충진을 얻음과 동시에 별징량이 급격히 감소하였음을 관찰할 수 있었다. 마스터 패턴과 전사된 PMMA 패턴간의 치수오차는 백 수십 nm 정도였는데, 이는 PMMA의 탄성회복, Ni몰드와 PMMA의 열팽창계수의 차이 등이 원인으로 판단된다.

Fig. 6 은 t_H 에 따른 PMMA 패턴 전사깊이와 시편두께 감소율 (펀치변위/초기시편두께 $\times 100$ %)의 변화를 나타내고 있다. 상부펀치의 온도는 PMMA의 T_g 보다 낮은 80°C 로 설

정하였다. $t_H = 10$ s 에서 $10.125 \mu\text{m}$ 의 전사 깊이를 얻을 수 있었다. t_H 증가와 함께 시편두께는 감소하였으며, $t_H = 120$ s 에서 시편 두께감소율은 13.86 % 였다. t_H 증가에 따른 두께 감소율의 완만화는 별징에 의한 시편과 펀치와의 접촉 면적 증가로 인한 압력의 감소도 한 원인으로 판단된다. 예를 들면, 120 초 성형한 후의 압력은 1.78 MPa로써 초기 결보기 압력인 2.18 MPa보다 20 % 낮았다. $t_H = 10$ s 에서 패턴 영역 중앙부의 완전충진을 얻을 수 있었으나, 패턴영역 외곽부의 완전충진을 위해서는 $t_H = 300$ s 이상의 시간이 필요하였다.

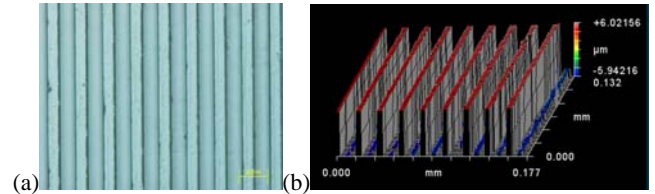


Fig. 5 (a) Optical micrograph and (b) interferometer image of the replicated PMMA sample surface hot-embossed under the complete filling conditions ($T_U = 80^{\circ}\text{C}$, $T_L = 150^{\circ}\text{C}$, $P = 50$ kgf, $t_H = 300$ s). The mean depth of pattern was $10.125 \mu\text{m}$.

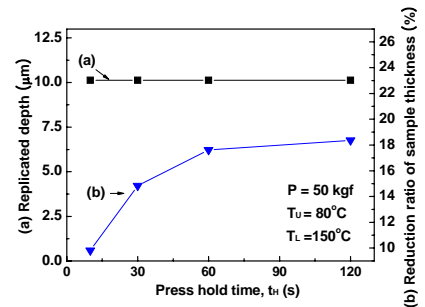


Fig. 6 Variation of the replicated pattern depth and reduction ratio of sample thickness with increasing the press hold-time. (Position for measurement: center of patterned field).

4. 요약

2 mm 두께의 평판형 PMMA의 Hot-emboss 공정에서 공정 인자 (온도, 하중, 시간)가 성형성과 별징량에 미치는 영향을 조사하였다. 시편의 표면과 후면의 가열온도를 다르게 함으로써 별징을 감소시킬 수 있었으나, 이러한 방법은 평판형 소재의 박막이 얇거나 넓은 경우 소재의 뒤틀림 현상을 초래할 수 있으므로 다양한 두께 및 크기의 시편에 대한 추가실험이 필요할 것이다. 본 연구에 사용된 몰드의 경우 $150^{\circ}\text{C} >$ 온도, 50 kgf > 가압력, 300 s > 의 가압유지시간의 조건에서 완전 충진을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 학술진흥재단의 기초연구지원 기초과학과제 (과제번호: D00309)의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. Hardt, B. Ganesan, W. Oi, M. Dirckx, and A. Rzepniewski, "Process Control in Micro-Embossing"
2. L. J. Guo, "Recent Progress in nanoimprint technology and its application", J. Phys. D. 37, 123-141, 2004