

대면적 광 정보저장매체의 나노성형에 대한 기술 개발

신홍규*, 반준호*, 조기철*, 김현영**, 김병희#

Nano Molding Technology for Optical Storage Media with Large-area Nano-pattern

Hong Gue Shin*, Jun Ho Ban*, Ki Chul Cho*, Heon Yong Kim** and Byeong Hee Kim#

ABSTRACT

Hot embossing lithography(HEL) has the production advantage of comparatively few process step, simple operation, a relatively low cost for embossing tools(Si), and high replication accuracy for small features. In this paper, we considered the nano-molding characteristic according to molding parameters(temperature, pressure, times, etc) and induced a optimal molding condition using HEL. High precision nano-patter master with various shapes were designed and manufactured using the DRIE(Deep Reactive Ion Etching), LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) and thermal oxidation process, and we investigated the molding characteristic of DVD and Blu-ray nickel stamp. We induced flow behaviors of polymer, rheology by shapes and sizes of the pattern through various molding experiments. Finally, with achieving nano-structure molding with high aspect ratio, we will secure a basic technology about the molding of large-area nano-pattern media.

Key Words : Blu-ray disc(블루레이 디스크), Hot Embossing (핫엠보싱), Micro rheology(마이크로 유동학), Nano-molding(나노 성형)

1. 서론

대면적 미세 구조물을 제조하는 전자빔, 이온빔, X-ray 리소그래피 등과 같은 공정들은 재료처리량이 적고 고가라는 한계를 지니고 있다.¹ 기존의 광학 리소그래피 또한 빛의 회절로 인해 대략 100nm 라는 분해능의 한계를 가진다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 Chou² 외 공동연구자들에 의해 처음으로 핫엠보싱 리소그래피(hot embossing lithography)

가 제안되었다. 이 공정은 폴리머를 유리전이온도(T_g) 이상으로 가열하여 몰드(mold) 형성 후, 이를 압축하여 폴리머를 변형시키는 방법³으로 마스터와 열가소성 폴리머와의 열적·기계적 물성의 차이를 이용한다.⁴ 핫엠보싱 공정은 10nm 이하의 분해능을 가지며 재현성도 뛰어나고 재료처리량도 크며 매우 경제적이다.^{5,6} 그러나 구조물이 점점 작아지고 복잡해지고 있기 때문에 불완전 충전(non-fill), 불연속(discontinuity), 수축(shrinkage)등과 같은

☞ 접수일: 2005년 8월 26일; 게재승인일: 2006년 3월 3일

* 강원대 기계메카트로닉스공학부 대학원

** 강원대 기계메카트로닉스공학과

교신저자: 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

E-mail kbb@kangwon.ac.kr Tel. (033) 250-6374

많은 문제점이 나타나게 되었다. 이와 같은 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 고정밀도의 스탬프와 최적화된 성형조건이 요구된다.

본 연구에서는 나노 복제기술로 널리 알려진 핫엠보싱 공정을 이용하여 나노 패턴 미디어의 성형 특성에 대한 연구를 수행하였다. 성형 파라미터인 온도, 압력, 시간 등의 변화에 따른 나노 성형 특성을 고찰하여 다양한 나노 미세 패턴의 최적성형조건을 도출하였다. 광 정보저장 매체인 DVD와 블루레이(Blu-ray) 스탬프를 이용하여 성형 특성을 파악하였으며, 고 종횡비(high aspect ratio)를 갖는 다양한 형상의 나노 패턴 스탬프를 이용하여 성형 파라미터에 따른 레올로지 특성을 규명하고 최적조건을 정립하였다.

2. 대면적 나노 성형

2.1 핫엠보싱 공정

본 연구에서는 패턴 폭 400 nm인 DVD 니켈 스탬프와 150 nm인 블루레이 스탬프를 이용하여 성형 실험을 수행하였다. 일반적인 핫엠보싱 공정에서는 PMMA를 기판(substrate)에 스피ن 코팅(spin coating)하여 사용하지만 본 실험에서는 2x2cm 판재의 PMMA를 사용하였다. Fig. 1은 핫 엠보싱 공정의 개략도이다. 전체적인 실험공정은 PMMA 필름을 유리전이온도 이상으로 가열하고 압축시킨 후 일정 시간이 경과하면 온도를 유리전이온도 이하로 냉각시켜 마스터를 이형하는 순서로 수행하였다.

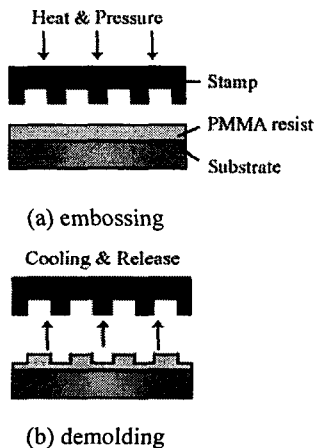


Fig. 1 Schematic representation of hot embossing

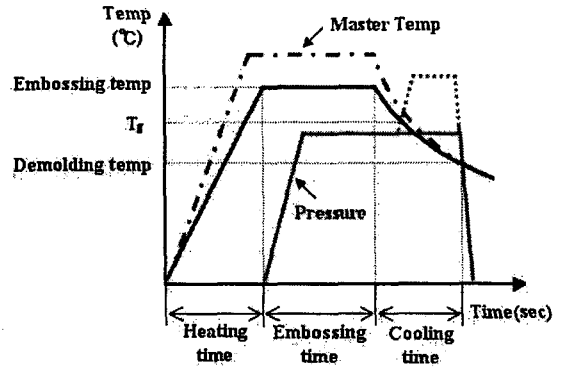


Fig. 2 Temperature variation during hot embossing

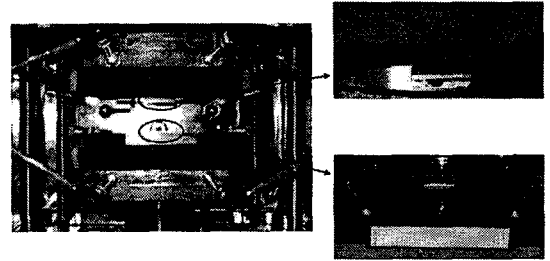


Fig. 3 Structure of hot embossing machine

Fig. 2는 핫엠보싱 공정 시 시간에 따른 온도분포를 개략적으로 나타낸 그래프이다. 실험에서 부여된 성형 시간(embossing time)은 그래프상의 성형 온도를 유지하는 시간을 의미하며 DVD와 블루레이 패턴 성형 시 동일하게 적용하였다. 또한 동일 온도에서 압력과 시간에 따른 기본성형 실험을 바탕으로 최적성형 조건을 찾기 위하여 여러 가지 성형 조건을 바꿔가며 실험을 수행하였다.

2.2 성형실험장비

본 연구에 사용된 기초 엠보싱 실험장비는 핫엠보싱 전용이 아닌 웨이퍼 본딩장비로 그 형태와 기능은 핫엠보싱 장비와 유사하다. 핫엠보싱 장비는 가열과 냉각 시스템 및 공압에 의한 압축(compression) 시스템과 회전(rotary) 펌프에 의한 저진공 시스템으로 구성된다. 기존 냉각방식은 질소 가스를 히팅 블럭에 불어 넣어 챔버를 냉각하는 간접냉각방식이기 때문에 냉각시간이 상당히 소요되었다. 이런 단점을 극복하기 위하여 질소가스 주입 방식에서 냉각수가 히팅 블럭을 강제 순

환하는 직접냉각 방식을 구현하였다. Fig. 3 은 챔버 내부의 형상과 냉각장치의 형상을 보여주고 있다. 상부 히팅 블럭에는 성형 실험에 사용된 DVD 와 블루레이 스탬프가 부착되며 하부 히팅 블럭에는 PMMA 가 놓여진다. 그리고 성형하기 전, 스탬프와 PMMA 가 분리됨에 따라, 상부와 하부의 독립적인 가열이 가능하다.

2.3 성형 시 열 분포

성형 실험 시 인가된 온도와 스탬프와 PMMA 의 온도분포를 정확히 파악하기 위하여, 적외선 카메라(Infrared camera)를 사용하여 측정하였다. 적외선 카메라를 이용하여 Fig. 4 와 같이 각 공정 별 챔버 내부의 상하부 히팅 블럭과 스탬프, PMMA 의 온도분포 결과를 나타냈다. 성형 전 초기상태에서의 온도분포는 Fig. 4(a)이다. 그리고 Fig. 4(b)는 상하부 히터를 작동하여 설정온도 110℃에 도달했을 때 온도분포로서 설정온도와의 오차가 거의 없음을 보여주며, Fig. 4(c)는 압축성형 후 냉각공정 중 유리전이온도에서의 온도분포를 나타낸다.

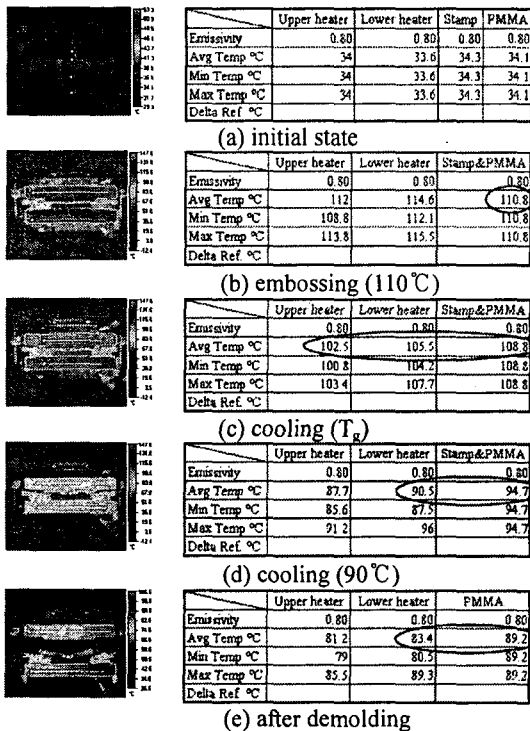


Fig. 4 Temperature distribution in the inner chamber photographed by Infrared camera

여기서 히팅 블럭과 스탬프/PMMA 의 냉각속도가 30 초 정도 차이가 발생 하였다. 그리고 Fig. 4(d) 에서와 같이 냉각온도가 이형온도인 90℃에 도달하였을 때 스탬프와 PMMA 의 온도는 약 4℃ 높은 상태를 나타냈다. 그 이유는 설정된 이형온도보다 높은 온도에서 이형 됨에 따라 이형 시 패턴형상의 수축(shrinkage)이 발생할 수 있음을 의미한다. 그러므로 Fig. 4(e)의 결과와 같이 이형 후 하부 히팅 블럭의 온도와 그 위에 놓여진 PMMA 의 온도 차이가 약 6℃ 정도 발생하기 때문에 냉각속도차이에 의한 온도 오차 보정이 필요할 것으로 판단된다. 성형 실험 시 발생된 챔버 내부 각 부분의 온도차이는 상하부 히팅 블럭과 스탬프/PMMA 의 사이에 다른 물질의 층이 게재됨으로써 온도전도도의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 전체적인 공정에서 시간에 따른 온도 변화는 Fig. 5 와 같다. 이와 같이 챔버 내부 각 부분의 온도 차이는 상하부 히터 블럭과 스탬프/PMMA 사이에 다른 물질의 층이 게재됨으로써 온도 전도도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

3. 나노 패턴 성형

나노 패턴의 공정변수에 따른 성형특성을 파악하기 위하여 패턴 폭 400 nm인 DVD 니켈 스탬프와 150 nm인 블루레이 스탬프를 이용하여 성형실험을 수행하였다. 또한 엠보싱 공정시간을 단축하기 위해 110, 120℃의 저온성형 실험을 수행하였다. 또한 DVD 와 블루레이 스탬프의 레올로지 특성을 비교하기 위하여 동일한 압력, 시간, 이형온도를 사용하였다. 성형압력은 40, 80, 120bar 를 사용하였고, 성형시간은 10, 30, 60, 120 초로 수행하였으며, 이형온도는 90℃로 고정하여 시험하였다.

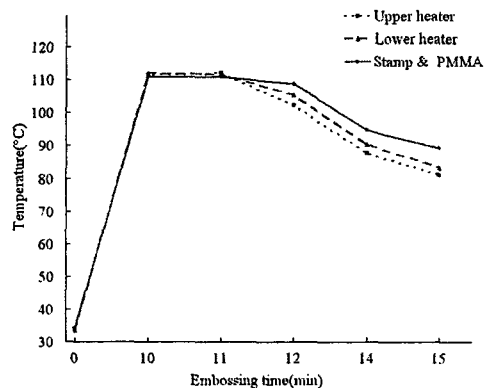


Fig. 5 Embossing temperature sequence in process

성형 시 기본 조건 실험을 바탕으로 성형품질에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 변수를 달리하여 시험하였으며, 두 가지 스탬프 모두 동일한 온도, 압력, 시간으로 시험함으로써 패턴의 치수효과(size effect)에 대한 영향을 파악하였다.

3.1 DVD 패턴 성형특성

DVD 니켈 스탬프는 패턴 폭 400 nm, 패턴 높이 140 nm, 트랙피치 740 nm이며 패턴 길이는 최소 400 nm에서 최대 1860 nm까지 양각의 형상을 가지고 있다. Fig. 6 은 다양한 조건에 대하여 FE-SEM 과 AFM 을 이용하여 측정 결과이다. Case 1 은 기본조건 실험으로써 스탬프 온도와 PMMA 온도를 동일하게 유지하여 실험한 결과이며, Case 2 는 빠른 이형 시험으로써 다른 시험과 달리 PMMA 의 온도가 10℃ 높은 상태에서 이형 하였을 때의 결과이다. Case 3 은 스탬프와 PMMA 의 성형온도를 달리 인가하는 차별적 온도 시험으로써 스탬프 온도를 10℃ 낮게 하였을 때의 성형 결과이며, 끝으로 Case 4 는 압력증가 시험으로써 냉각 공정 시 유리전이온도 근처에 도달하였을 때 인가압력보다 40bar 의 압력을 더 인가하여준 시험결과이다. 전체적으로 120℃ 성형에서 패턴 깊이가 110℃보다 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 110℃ 성형에서 빠른 이형과 압력상승이라는 조건하에서는 표준 엠보싱 시험의 전사성 보다 저하하는 것을 알 수 있었으며, 이는 성형온도가 유리전이온도 근방이기 때문에 폴리머의 높은 점성에 기인한 결과로 판단된다. 또한, 동일 조건하의 120℃ 성형에서 표준 조건과 유사하게 향상된 전사성을 확인할 수 있었다. 따라서, 빠른 공정시간에 고품질의 나노 성형을 위해서는 온도조건의 정량화가 필수적이다.

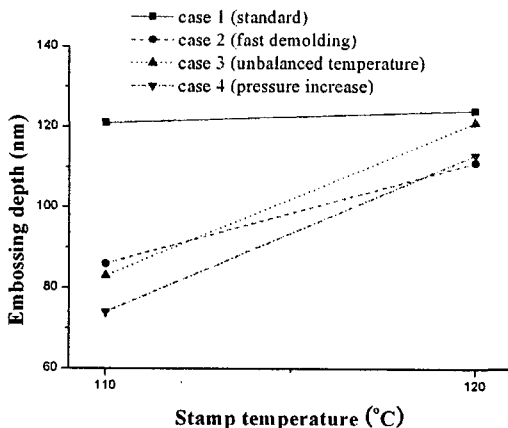


Fig. 6 Embossing depth distribution w.r.t. various embossing condition

3.2 블루레이(Blu-ray) 패턴 성형특성

블루레이 1 세대 니켈 스탬프는 패턴 폭 150 nm, 패턴 깊이 76 nm, 트랙피치 320 nm로써 음각의 형태를 지니고 있다. 실험 조건은 DVD 와 동일한 조건으로 실험을 수행하였으며, AFM 으로 측정하였다. DVD 스탬프를 이용한 성형에 비하여 블루레이 스탬프를 이용한 성형이 치수효과(size effect)로 인하여 전사성이 낮게 나타났다. 특히, 차별적 온도 시험의 경우 패턴 전사가 전혀 이뤄지지 않았다 (case 3). 시험결과 스탬프 온도가 유리전이온도 이하일 경우 블루레이 패턴 성형 시 160bar 이상의 높은 압력이 요구되었다.

120℃ 성형에서도 110℃와 마찬가지로 차별적 온도 시험의 경우 패턴 전사가 전혀 이뤄지지 않았다. DVD 패턴 성형과 동일한 조건하에서 블루레이 패턴 성형이 이뤄지지 않는 것은 패턴 크기의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다. 따라서, 마스터 패턴 폭이 작아질수록 완전성형을 위해서는 높은 압력이 요구되며 동시에 최적 조건의 성형온도도 중요하게 작용한다. 그리고, 120℃ 성형의 경우, 스탬프 깊이보다 전사되는 PMMA 의 패턴 높이가 증가되는 현상이 발견되었다. 원인은 시험 조건의 오차일수도 있으나 스탬프 패턴이 음각의 형상 때문인 것으로 판단된다. 즉, 이형 시 발생하는 표면의 마찰에 의한 리프트(lift) 현상으로 이형온도가 유리전이온도에 가까울수록 더욱 크게 나타났다. 따라서, 패턴의 리프트현상을 피하기 위해서는 이형 전 충분한 냉각이 요구된다.

3.3 고 증황비 나노 패턴 성형

나노 패턴 성형시험을 위하여 제작된 고 증황비 (high aspect ratio)의 실리콘(Si) 스탬프를 이용하여 다양한 성형조건으로 실험을 수행하였다. 스탬프 모양은 사각, 원, 트렌치(trench)와 격자(grating) 및 방사형 원 형상 등 다양하게 제작하였다. 또한 패턴의 크기는 마이크로 선폭(width ≈ 1.6μm)부터 나노 선폭(width ≈ 300nm)까지 동일한 형상에 크기별로 제작되어 치수효과에 대한 성형특성도 동시에 관찰하였다.

성형 온도(100~130℃), 성형 압력(80~200bar), 성형 시간(1~10min)의 성형 조건으로 온도, 압력, 시간별 성형시험을 수행한 후 복제된 PMMA 시편을 FE-SEM 및 a-step 장비를 이용하여 형상 및 전사된 패턴 높이를 측정하였다. 시험에 사용된 실리콘 스탬프 및 복제된 PMMA 시편은 패턴 간격이 50 μm로 스캐닝 범위가 100 μm 이내인 AFM 의 측

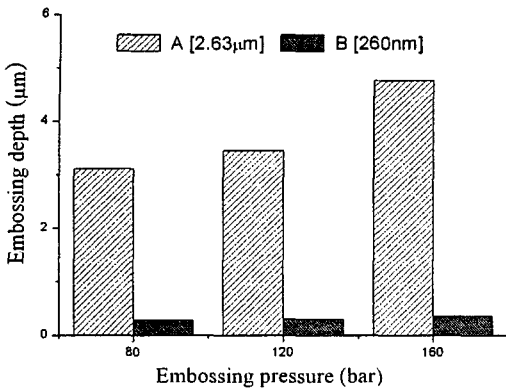


Fig. 7 Embossing depth distribution w.r.t. embossing pressure (E_T & E_t : 120°C & 60sec)

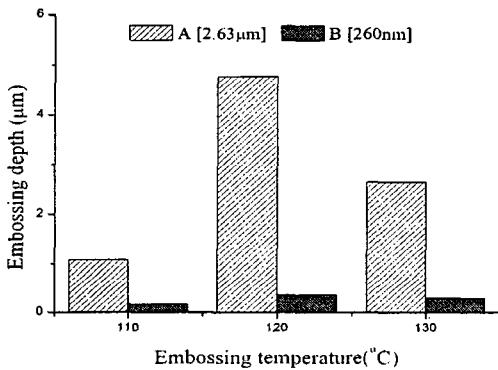


Fig. 8 Embossing depth distribution w.r.t. embossing temperature (E_P & E_t : 160bar & 60sec)

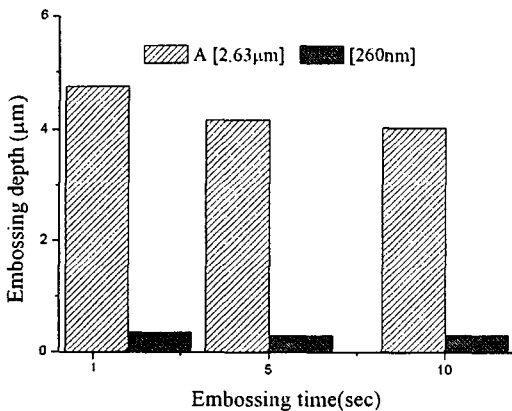


Fig. 9 Embossing depth distribution w.r.t. embossing time (E_T & E_P : 120°C & 160bar)

정 한계가 있어 α -step 을 이용하여 획득한 패턴 정보(profile)를 그래프화 하여 성형 특성을 비교/분석 하였다.

3.3.1 압력에 따른 성형 특성

압력에 따른 성형 특성을 파악하기 위하여, 성형 온도 120°C, 성형 시간 60 초로 동일하게 적용한 후, 성형 압력을 80~160bar 로 변화시켜 압력에 따른 성형 특성을 관찰하였다. 시험결과 120°C의 성형 시 성형 압력의 상승은 패턴 전사성을 향상시켰다. Fig. 7 과 같이, 160bar 의 압력에서 종횡비는 1.4~1.8 정도 충전 되었다.

3.3.2 온도에 따른 성형 특성

성형 온도는 핫 엠보싱 공정에서 가장 중요한 성형 조건이다. 앞서 언급한 압력에 따른 성형 특성에서 우수한 전사성을 보였던 160bar 의 압력에서 성형 온도의 변화에 따른 충전 높이를 파악하였다. Fig. 8 은 성형 후, α -step 으로 측정된 데이터를 각각의 패턴크기에 대하여 충전 높이를 파악하여 정리한 그래프이다. 110°C에서는 낮은 에스펙트비(<1)의 패턴 전사가 이루어 졌고 120°C에서 가장 높은 충전이 이뤄졌다. 그리고 130°C의 온도에서는 충전율이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 성형압력이 가해지는 과정에서 PMMA 가 패턴 내부로 유입되려는 유동보다 스탬프 자체의 외부로 밀려나는 유동이 먼저 발생되기 때문이다. 즉, 폴리머가 패턴 안으로 유입되기 위한 스퀴즈(squeeze) 압력이 스탬프 자체의 외곽에서 발생하는 압력에 의해 상쇄되어 충전이 어느 정도 진행되다가 폴리머의 잔류두께만 얇아지는 현상이다.

3.3.3 시간에 따른 성형 특성

성형 시간에 대한 충전량을 비교실험하기 위하여 성형 온도와 성형 압력을 120°C, 160bar 로 동일하게 적용한 후 엠보싱 시간을 1분에서 10 분까지 변화 시켜가며 공정을 수행하였다. Fig. 9 의 그래프와 같이 부여된 온도, 압력 조건하에서 1 분 이내에 충전될 수 있는 양이 결정되었다. 오히려 성형시간을 길게 부여할 경우 전체적인 공정시간만 늘어나는 결과를 가져온다. 시험 결과 시간에 따른 성형 특성은 뚜렷하게 차이가 나지 않았으며 나노 패턴의 경우 충전되는 시간은 수 초 이내로

판단된다. 특히 DVD 및 Blu-ray 의 성형에서 관찰하였듯이 10 초 이내로 성형하여도 1 분을 성형한 결과와 비슷하게 나타났다. 최적 성형을 위한 조건으로는 성형압력이 지배적이며 시간은 2 차적인 성형 파라미터로 판단된다.

4. 결론

나노 패턴의 공정변수에 따른 성형특성을 파악하기 위하여 패턴 폭 400 nm인 DVD 니켈 스탬프와 150 nm인 블루레이 스탬프를 이용하여 성형실험을 수행하였다. DVD 와 블루레이 패턴 마스터를 이용한 성형 실험을 통해 치수효과(size effect)에 대한 특성을 고찰하고, 공정 변수에 따른 패턴 전사성을 파악함으로써 고 종횡비(high aspect ratio)의 나노 구조물의 성형을 위한 기본적인 성형 조건을 확립하였다. 또한 나노 패턴 성형 시 압력의 증가는 폴리머의 충진율을 높여주고, 유리전이온도 이상의 높은 온도에서는 스탬프 외곽에서 발생하는 압력이 패턴 내부의 스퀴즈(squeeze) 압력을 감소시켜 충진율을 저감 시키는 조건이 되며, 과도한 성형 시간은 전체적인 공정시간을 증가시킬 뿐 패턴의 전사특성을 향상시키지는 못한다. 핫 엠보싱 공정에서 성형 중 압력의 증가는 폴리머의 충진을 향상시키는 역할을 하며 스탬프와 폴리머의 차별적인 최적 온도조건에 따라 공정 시간을 단축하면서 높은 성형품질을 획득할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21C 프론티어 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 나노메카트로닉스 기술개발 사업의 세부과제인 “나노 사출 성형 공정 및 응용 기술개발” 의 위탁과제 수행결과의 일부로 세부과제 주관기관인 (주)JMI 와 협동기관인 연세대학교의 도움에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Alan, E., Christopher, J., “Next generation DVD : application requirements and technology,” Signal Processing: Image communication, 2004.
2. Thomas, G, Helen, E., Paul, A., “Precision manufacture of optical disc master stampers,”

- Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 53-62, 1997.
3. Schiff, H., David, C., Gabriel, M., Gobrecht, J., Heyderman, L., Kaiser, W., Koppel, S., Scandella, L., “Nanoreplication in polymers using hot embossing and injection molding,” Microelectronic Engineering, Vol. 53, No. 1-4, pp. 171-174, 2000.
4. Stephen, Y., Peter, R., Preston, J., “Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers,” Applied Physics Letters, No. 67, pp. 3114, 1995.
5. Yoshihiko, H., Masaki, F., Takahiro, O., Yoshio, T., “Study of the resist deformation in nanoimprint lithography,” Journal of Vacuum Science and Technology B, Vol. 19, No. 6, pp. 2811-2815, 2001.
6. Schiff, H., Jaszewski, R., David, C., Gobrecht, J., “Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by Hot Embossing Lithography,” Microelectronic Engineering, Vol. 46, pp. 121-124, 1999.