

# 패턴드 미디어 제작을 위한 나노 사출성형 공정에 관한 연구

## Nano Injection Molding Process with Passive Heating System for Patterned Magnetic Media

최의선\*, 이남석\*, 한정원\*, 김영주\*\*, 강신일†

Euisun Choi, Namseok Lee, Jeongwon Han, Young-Joo Kim and Shinill Kang

### Abstract

Perpendicular patterned magnetic media have been regarded as a prime candidate to achieve an ultra-high magnetic recording density of over 1 Tera-bits/inch<sup>2</sup>. Patterned magnetic media with nanoscale patterns have been fabricated using various nanopatterning technologies. We focused on the two technical issues of nano injection molding technology. Firstly, we have investigated a cost-effective method to fabricate metallic stamps. Secondly, we focused on the analysis of nano injection molding with passive heating, where the replication of 50 nm nanopillar arrays was successful. The effect of the thermal insulation layer on the replication quality was examined by analytical and experimental methods. Finally, we deposited a magnetic layer on a injection molded nanopillars and measured. Our methodology can provide cost-effective mass-production for patterned magnetic media.

**Key Words :** 패턴드 미디어 (Patterned Media), 나노 사출성형, 수동가열 (passive heating)

### 1. 서론

정보 지식 기반의 디지털 사회가 발달함에 따라 더 많은 양의 정보를 저장하기 위한 고밀도 대용량 정보저장 매체의 필요성이 증대되고 있다. 수직기록방식 패턴드 미디어는 1 Tera-bit/inch<sup>2</sup> 이상의 기록밀도가 가능한 대용량, 고밀도 정보저장매체로 자기정보저장매체 중 가장 실현 가능성이 높은 매체로 주목 받고 있다. 이러한 패턴드 미디어를 제작하기 위해서는 기관상에 나노 크기의 패턴이 요구 되고 이를 위해 다양한 나노 패턴 제작 기술들이 연구되어 왔다 [1-4]. 전자빔 리소그래피 (E-beam lithography)와 집속이온빔(focused Ion Beam) 등의 기술을 이용하여 나노패턴을 직접 제작하여 패턴드 미디어에 응용 하는 방법은 미세 나노 패턴 제작에는 유용하게 이용될 수 있으나, 공정시간이 길고 단가가 높아 대량생산에 적합하

지 않다. 나노 임프린트 리소그래피 (nanoimprint lithography) 와 나노 사출성형 (nano injection molding) 기술과 같은 복제기술은 짧은 공정 사이클 타임 (cycle time) 과 낮은 제작단가 등의 장점이 있어 대량 생산에 적합한 것으로 알려져 있다 [5-9].

본 연구에서는 패턴드 미디어에 적용을 위하여 나노 사출성형기술을 통한 나노 패턴을 제작하였다. 이를 위해 두 가지 기술적 이슈를 검토 하였다. 첫 번째는 나노 사출성형 공정에 적용할 금속 스탬프의 저가 제작 기술에 관한 것이다. 이를 위해 전자빔 리소그래피 그리고 ICP (inductive coupled plasma) 공정을 이용하여 실리콘 나노 마스터를 제작하고 이를 UV 나노임프린팅 (UV nanoimprinting) 공정을 이용하여 전주공정 (electroforming) 을 위한 폴리머 나노 마스터를 제작하였다. 이후 전주공정을 통해 금속 스탬프를 제작하였다. 본 연구에서 UV 임프린팅을 응용한 금속 스탬프 제작 공정은 비싼 Si 나노 마스터를 반복적으로 사용할 수 있으므로 저가의 나노 스탬프 제작이 가능하다. 두 번째는 나노 사출성형 공정 시 나노 패턴의 전사 특성향상을 위한 기술에 관한 것이다. 나노 사출성형 공정 시 고온의 용융

---

† 연세대학교 기계공학부  
E-mail : snlkang@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2829

\* 연세대학교 기계공학부

\*\* 연세대학교 대학원 정보저장공학과

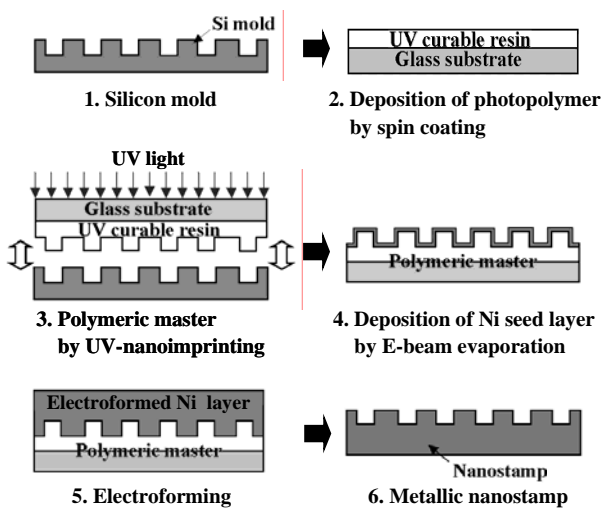


Fig. 1 Fabrication process of metallic stamp

된 폴리머가 저온의 금속 스탬프의 표면과 접촉 하면서 급속히 고화되는 현상이 발생한다 [10-11]. 이러한 현상은 용융된 폴리머의 캐비티 (cavity) 충진을 제약하여 복제된 폴리머 패턴의 품질을 저하시키는 원인이 된다. 이러한 현상을 막기 위해 단열층을 이용하여 스탬프 표면온도를 용융된 폴리머가 캐비티를 완전히 채울 때까지 유리전이 온도 이상으로 유지시켜 주는 수동가열 (passive heating) 시스템을 고안하였다. 수동가열 시스템의 유용성을 분석하기 위하여 고화층의 성장과 용융된 폴리머의 흐름을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 그리고 수동가열 시스템유무에 따른 사출성형공정을 진행하여 전사 특성을 비교 분석하였다. 또한 제작한 폴리머 나노 패턴 상에 자성 층을 증착하여 패턴드 미디어로의 응용 가능성을 보이고자 하였다.

## 2. 금속 나노 스탬프 제작

나노 사출성형을 통해 나노 패턴을 제작하기 위해서는 금속 나노 스탬프를 저가에 제작하기 위한 공정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 1 에서와 같은 금속 나노 스탬프 제작 기술을 제안하였다. 금속 나노 스탬프를 제작하기 위해서 전자빔 리소그래피와 건식 식각 공정을 통하여 음각의 Si 마스터를 제작하였다. 음각의 Si 마스터를 UV 임프린팅 공정을 통해 양각의 폴리머 마스터를 제작하고 이 폴리머 마스터를 전주공정을 통해 복제 하여 음각의 금속 스탬프를 제작하였다. 전자빔 리소그래피 공정을 응용하여 음각의 마스터를 제작하기 위해서 ZEP520 전자빔 레지스트가 사용되었다. 반복 사용이 가능한 마스터를 제작하

기 위하여 레지스트 패턴을 barrier 로 이용 ICP 건식 식각 공정을 통해 음각패턴을 가지는 Si 마스터를 제작하였다. 전자빔 리소그래피를 이용한 패턴링 제작은 미세한 나노 패턴을 제작하는데에는 유용하나, 공정비용이 비싸고 공정시간이 길다. 따라서 Si 마스터의 손상을 막고 대량 생산에 적용하기 위하여, 제작된 음각의 Si 마스터를 UV 임프린팅 공정을 통해 복제하여 양각의 폴리머 마스터를 제작하였다 [12]. 제작된 폴리머 마스터에 E-beam evaporation 공정을 이용 니켈 seed layer 증착 후 전주공정을 통하여 금속 스탬프를 제작하였다. 전주공정은 잔류응력과 수축을 제어하기 위해 17 시간 동안 295  $\mu\text{m}$  두께의 니켈층을 제작하는 매우 느린 속도로 수행되었다. Fig. 2 는 제작된 전자빔 마스터 패턴, Si 마스터, 폴리머 마스터와 금속 스탬프의 SEM 및 AFM 이미지이다. 제작된 패턴들은 직경 50 nm 피치 100 nm의 크기를 가진다. 그리고 제작된 금속 스탬프는 35 nm의 캐비티를 지닌 295  $\mu\text{m}$ 의 두께, 지름 86 mm의 니켈 스탬프이다.

## 3. 나노 사출성형 시 고화층 형성 분석

일반적으로 사출성형 공정 중에 발생하는 고화층의 낮은 유동성으로 인해 용융된 폴리머가 스탬프의 미세패턴에 충진되는 것을 방해한다. 이는 복제품의 품질을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이러한 현상을 방지하는 방법은 충진과정 동안 스탬

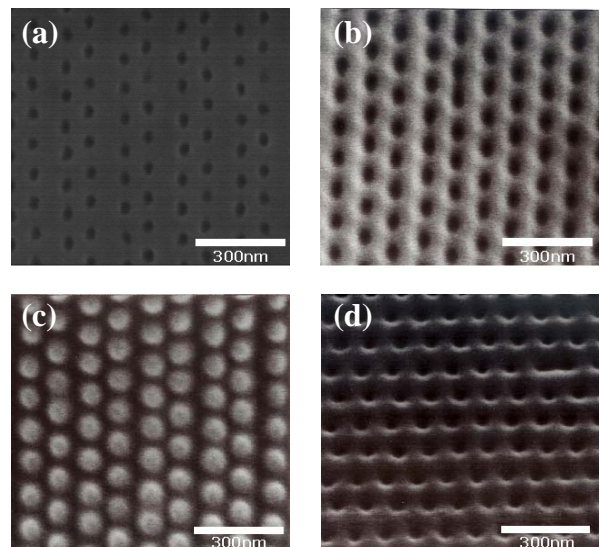
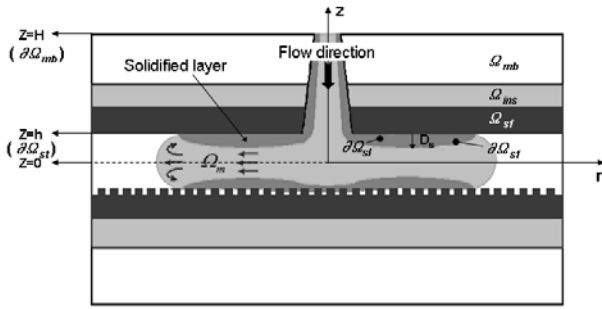


Fig. 2 SEM image of nanocavities and nanopillars on an (a) E-beam master pattern, (b) silicon mold, (c) polymeric master, and (d) metallic nanostamp



**Fig. 3** Schematic of multi-layer structure for numerical analysis

프 표면온도를 유리전이 온도 이상으로 유지시켜 고화층의 형성을 지연시키는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 스탬프 후면에 단열층을 제작하는 것으로 수동가열 방식의 스탬프를 제작하였다. 폴리머 고화층 형성 시 수동가열의 영향을 평가하기 위해서는 수동가열 적용 시의 용융된 폴리머의 유동 분석이 필요하다 [11]. 시뮬레이션을 위해서 몰드 캐비티의 두께는 1.2 mm, 지름은 86 mm로 설정하였다. 이는 일반적인 패턴드 미디어 기판 크기와 일치한다. 시뮬레이션 시 용융된 폴리머의 초기온도는 300℃로 설정하였다. 그리고 몰드 표면의 온도는 100℃로 설정하였다. 이는 사출 성형 시, 단열층의 유무와 관계 없이 몰드 표면의 온도가 유지되는 온도이다.[13] 폴리머 재료로는 폴리카보네이트 (polycarbonate) 를 선정하였고, 금속 스탬퍼의 재료는 실제 제작된 스탬프와 동일한 니켈로 하였다. 그리고 몰드 블록과 단열층의 재료는 각각 tool steel 과 폴리이미드 (polyimide)로 하였다. 또한 초기 사출속도와 사출압력은 각각 14.15cm<sup>3</sup>/s 와 3920 N/cm<sup>2</sup> 로 설정하였다. 이는 일반적인 CD 혹은 DVD 사출성형 공정 조건과 같다. 이를 통하여 일반적인 사출 성형과 수동가열 방식의 사출 성형과의 사출 특성을 비교하였다. 수치해석을 위해 캐비티와 스탬프, 단열층 그리고 몰드 블록을 Fig. 3 과 같이 설정하였다. 수동가열이 적용된 나노 사출성형 시스템을 분석하기 위해 캐비티 (Ω<sub>m</sub>) 와 스탬프 (Ω<sub>st</sub>), 단열층 (Ω<sub>ins</sub>) 그리고 몰드 블록 (Ω<sub>mb</sub>)을 설정해주고 캐비티를 채우는 용융된 폴리머의 흐름(Ω<sub>m</sub>)은 미디어의 기판 중심을 기준으로 선대칭적인 유동으로 가정하였다. 그러므로 다음 (1)~(4)의 질량, 운동량, 그리고 에너지 식은 Hele-Shaw approximation 을 따르게 된다 [14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u}{\partial r} = 0, \quad r \in \Omega_m \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0, \quad r, z \in \Omega_m \quad (2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad z \in \Omega_m \quad (3)$$

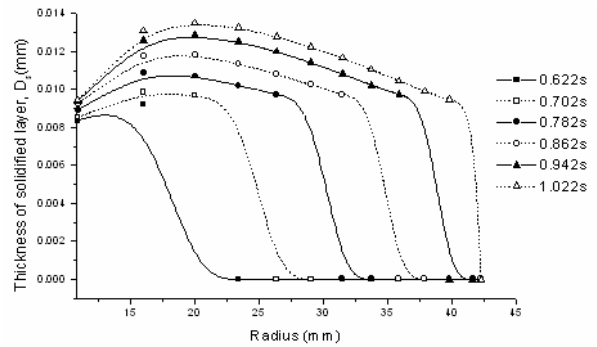
$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2, \quad z \in \Omega_m \quad (4)$$

여기서 ρ, T, t, u, 그리고 w 는 각각 밀도, 온도, 시간, 용융된 폴리머의 r 방향 z 방향의 속도이다. 또 K 는 열전도도 Cp 는 비열, η 는 점도,  $\dot{\gamma}$  는 shear rate 를 뜻한다. 고화층의 형성을 예측하기 위해서, p-v-T 상태방정식에 의해 유리전이 온도가 구해졌다 [15]. 고화층의 전면부 두께인 D<sub>s</sub> 를 구하기 위한 식은 아래와 같이 정의될 수 있다.

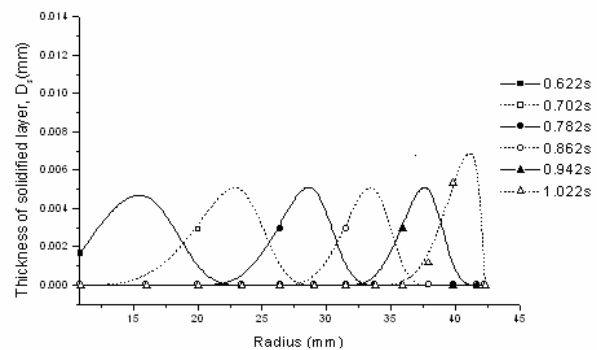
$$D_s = h - \left\{ z_i + \left( \frac{T_i - T_g}{T_i - T_{i-1}} \right) \Delta z \right\} \quad (5)$$

여기서 h, z<sub>i</sub> 그리고 T<sub>i</sub> 는 각각 캐비티 두께의 절반, i 번째 노드의 높이, 그리고 i 번째 노드의 온도이다. T<sub>g</sub> 는 유리전이 온도이다.

Fig. 4 는 시뮬레이션을 통해 얻어진 단열층이 없는 경우 폴리머가 캐비티에 충전되는 약 1 초 동안의 고화층의 형성 정도를 나타낸다. 단열층이



**Fig. 4** Advancement of solidified front with respect to time: without insulation layer

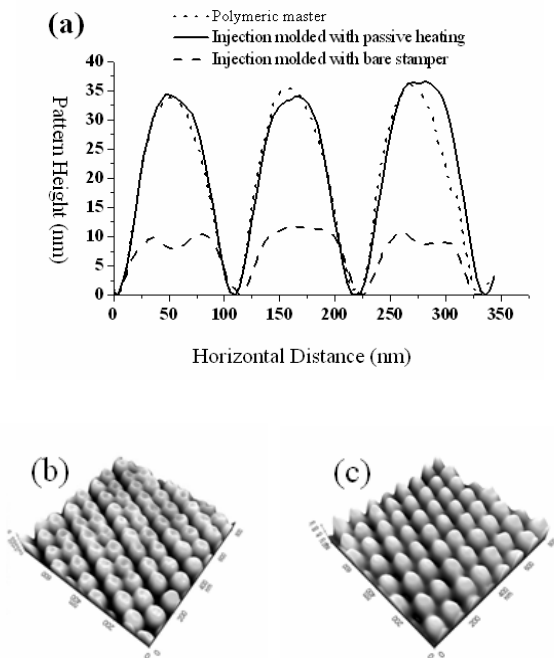


**Fig. 5** Advancement of solidified front with respect to time: insulation layer (Thickness 75 μm)

없는 경우 용융된 폴리머가 캐비티를 채우는 동안 상당한 두께의 고화 층이 형성되는 것을 분석을 통해 예측 할 수 있다. Fig. 5 는 75  $\mu\text{m}$  두께의 폴리이미드 단열층이 있는 경우 고화층의 형성 정도를 수치해석을 통해 분석한 것이다. 이 경우 용융된 폴리머가 캐비티를 채우는 동안 단열층에 의하여 금속 스탬프 표면온도가 유리전이 온도 이상으로 유지되어 고화층의 두께가 급격하게 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 수동가열이 적용된 스탬프를 이용 나노 패턴을 나노 사출성형 공정을 통해서 제작 할 때, 복제되는 패턴의 품질을 높여주는데 적절하다는 것을 입증해준다.

#### 4. 나노 사출성형 공정을 통한 나노 필라 패턴 제작

단열층을 이용한 수동가열 시스템이 적용된 나노 사출성형 시스템을 구축하였다. 단열층으로는 두께 75  $\mu\text{m}$ 의 폴리이미드 필름이 사용되었다. 나노 사출성형 시 폴리머는 폴리카보네이트 (Lexan OQ 1020c-112)가 사용되었다. 폴리머는 300 $^{\circ}\text{C}$ 까지 균일하게 가열 되었다. 폴리머 충전 시간은 1 초, 공정 사이클 시간은 12 초였다. Fig. 6 은 UV 임프린

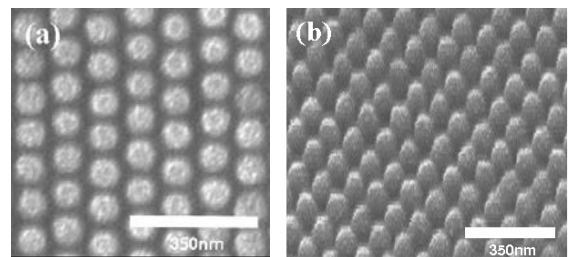


**Fig. 6** (a) Comparison of surface profiles between polymeric master and injection molded nano pillar pattern with and without passive heating, AFM image of Injection molded media (b) without passive heating (c) with passive heating

팅 공정으로 통해 제작된 폴리머 마스터와 나노 사출성형 공정으로 통해 제작된 폴리머 기판의 표면형상 비교이다. 단열층이 없는 스탬프를 이용한 나노 사출성형 공정을 통해서 는 약 12.83 nm 높이를 가지는 pillar 패턴이 제작되었다. 스탬프 상의 패턴 깊이가 평균 35 nm 이므로 패턴의 전사 정도가 좋지 않음을 알 수 있다. 그에 비해 수동가열이 적용된 나노 사출성형 공정을 통해 제작된 폴리머 기판의 경우 나노 필라 패턴의 높이 평균이 약 34.4 nm로 측정되었다. 그리고 UV 임프린팅을 통해 제작된 폴리머 마스터 패턴과 나노 사출성형을 통해 복제된 나노 패턴의 높이 편차는 약 2 nm 였다. 폴리머 마스터 패턴의 경우 RMS 표면 거칠기가 약 0.95 nm 였으며 복제된 폴리머 기판의 경우 RMS 표면 거칠기가 약 1.28 nm 였다. 이러한 결과는 폴리머 마스터 패턴이 전주공정을 통해 금속 스탬프로 결함 없이 복제되었고, 패시브 히팅 시스템이 적용된 나노 사출성형 공정을 통해서 고품질의 나노 패턴 기판이 제작 되었음을 보여준다.

#### 5. 자성박막 증착 및 패턴드 미디어 적용

나노 사출성형 공정을 통해 제작된 폴리머 나노 필라 패턴을 패턴드 미디어에 적용하기 위해 자성 박막을 증착 하였다. 자성박막을 증착하기 위해 고진공(High vacuum) sputtering system 이 사용되었다. 폴리머 나노 필라 패턴 상부에 Ru/Ta 층을 하부층으로 우선 증착하고 그 위에 Co-Cr-Pt (CCP) 합금을 증착하였다. 증착한 CCP 합금 층의 두께는 12 nm 였다. 아래 Fig. 7 은 자성 박막이 증착된 폴리머 나노 필라 패턴을 SEM 을 통해 측정할 결과이다. 측정결과 폴리머 나노 필라 패턴 상에 자성 박막이 균일하게 형성되었음을 확인 할 수 있다. 이러한 측정 결과는 나노 사출성형 공정으로 제작된 폴리머 나노 필라 패턴이 패턴드 미디어로 적용 가능함을 보여준다.



**Fig. 7** SEM image for nanopillar array of 50nm diameter and 100nm pitch. (a) top view, and (b) 45 $^{\circ}$  oblique angle view

## 6. 결론

본 연구에서는 수직자기기록 방식 패턴드 미디어의 저가 대량생산을 위한 방안으로 나노 사출성형을 통한 나노 패턴 제작을 제안하였다. 이를 위하여 전자빔 리소그래피를 이용하여 Si 마스터를 제작하고, UV 임프린팅 공정을 통하여 폴리머 마스터를 제작하였다. 이 폴리머 마스터 상에 니켈 seed layer를 증착하고 전주공정을 통해 금속 스탬프를 제작하였다. 나노 사출성형 시 나노 패턴의 전사 특성을 향상 시키기 위해 단열층을 이용한 수동가열 시스템을 고안하였다. 고안한 수동가열 시스템의 평가를 위해 나노 사출성형 시 폴리머 유동을 수치해석을 통해 분석하여 수동가열 시스템의 가능성을 확인하였다. 그리고 실제 수동가열 시스템이 적용된 나노 사출성형 공정을 통하여 나노 필라 패턴을 제작하고 제작된 나노 패턴 상에 자성박막을 증착 패턴드 미디어를 제작하여 제안한 방안이 유용함을 보였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21 세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원 (M102KN010005-07K1401-00530)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

[1] White, R. L., New, R. M. H., and Pease, R. F. W., 1997, "Patterned Media: A Viable Route to 50 Gbit/in<sup>2</sup> and Up for Magnetic Recording?," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, pp.990-995.

[2] Aoyama, T., Uchiyama, K., Kagotani, T., Hattori, K., Wada, Y., Okawa, and et al., 2001, "Fabrication and Properties of CoPt Patterned Media With Perpendicular Magnetic Anisotropy," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, pp.1646-1648.

[3] Hao, Y., Walsh, M., Farhoud, M., Ross, C. A., Smith, H. I., and et al, 2000, "In-Plane Anisotropy in Arrays of Magnetic Ellipses," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, pp.2996-2998.

[4] Lohau, J., Moser, A. C., Rettner, T., Best, M. E., and Terris, B. D., 2001, "Writing and Reading Perpendicular Magnetic Recording Media Patterned by a Focused Ion Beam," Applied Physics Letters, Vol.78, pp.990-992.

[5] Chou, S. Y., 1997, "Patterned Magnetic Nanostructures and Quantized Magnetic Disks," Proceedings of the IEEE, Vol.85, pp.652-671.

[6] Lebib, A., Chen, Y., Bourneix, J., Carcenac, F., Cambril, E., and et al., 1999, "Nanoimprint

Lithography for a Large Area Pattern Replication," Microelectronic Engineering, Vol.46, pp.319-322.

[7] Lee, N., Kim, Y., Kang, S., and Hong, J., 2004, "Fabrication of Metallic Nano-stamper and Replication of Nano-patterned Substrate for Patterned media," Nanotechnology, Vol.15, pp.901-906.

[8] McFarland, A. W., Poggi, M. A., Bottomley, L. A., and Colton, J. S., 2004, "Injection Moulding of High Aspect Ratio Micron-scale Thickness Polymeric Microcantilevers," Nanotechnology, Vol.15, pp.1628-1632.

[9] Han, J., Choi, M., Lee, N., Han, Y., Hong, J., and et al, 2006, "Nanoimprint Molding of 50 nm Pillar Arrays for Perpendicular Patterned Magnetic Media," Applied Physics Letters, Submitted.

[10] Liou, M. J. and Suh, N. P., 1989, "Reducing Residual Stresses in Molded Parts," Polymer Engineering and Science, Vol.29, pp.441-447.

[11] Kim, Y., Bae, J., Kim, H., and Kang, S., 2004, "Modelling of Passive Heating for Replication of Sub-micron Patterns in Optical Disk Substrates," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.37, pp. 1319-1326.

[12] Kim, S., Kim, H., and Kang, S., 2006, "Development of a UV-imprinting Process for Integrating a Microlens Array on an Image Sensor," Optics letters, Vol.31, pp.2710-2712.

[13] Kim, Y., Bae J., Kim H., Kang S., 2004, "Modeling of passive heating for replication of sub-micron pattern in optical disk substrate", Journal of Physics D: Applied physics, Vol.37, pp.1319-1326.

[14] Hieber, C. A., and Shen, S. F., 1980, "A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol.7, pp.1-32.

[15] Chen, B. S., and Liu, W. H., 1994, "Numerical simulation of the post-filling stage in injection molding with a two-phase model," Polymer Engineering and Science, Vol.34, pp.835-846.