

마이크로/나노 고분자 복제를 위한 나노몰드 표면온도 제어기술

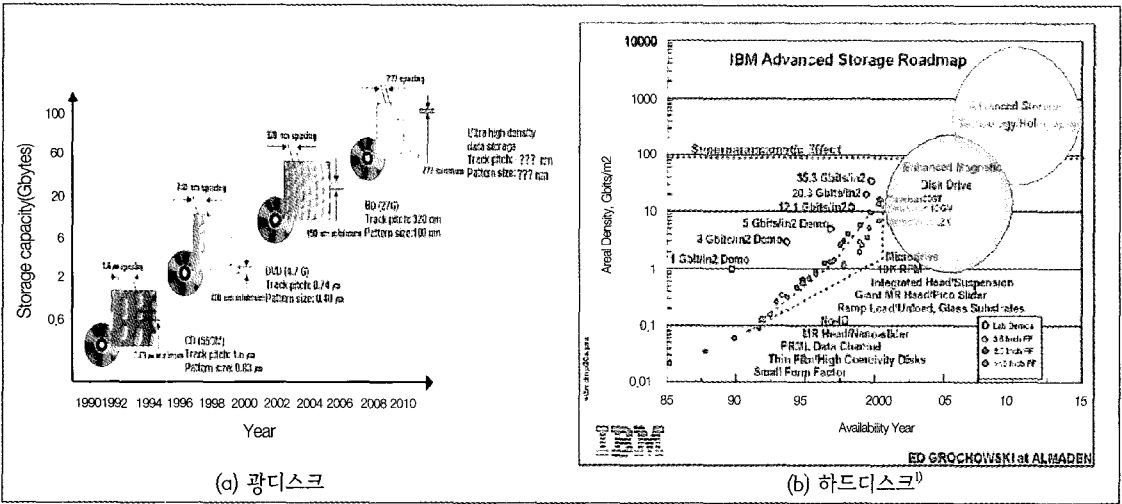


글 • 강 신 일 / 연세대학교 기계공학부, 교수
e-mail • snlkang@yonsei.ac.kr

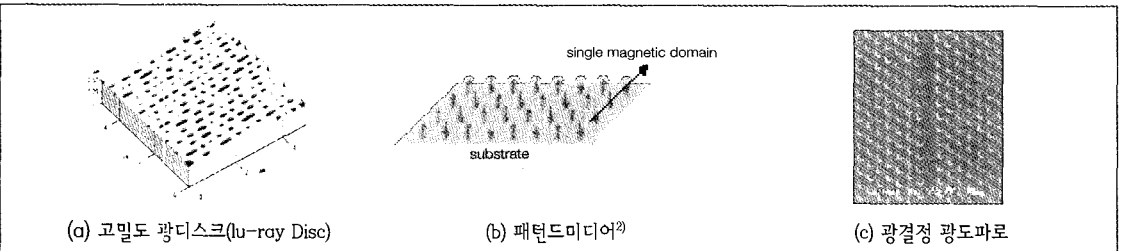
이 글에서는 최근 마이크로/나노 구조물에 대한 고분자 나노복제 공정에 있어서 그 중요성이 대두되고 있는 나노몰드 표면온도 제어기술에 대해 소개하고자 한다.

최근, 정보저장기기 및 광전자소자 등 첨단 기기에 있어서 고밀도화 고기능화가 요구됨에 따라, 마이크로/나노 패턴을 가지는 고분자 제품의 중요성이 급격히 증가하고 있다. 정보저장기기의 경우, 멀티미디어 기술의 발

전에 따라 요구되는 정보저장기기에 요구되는 저장용량이 지속적으로 증가하여 광 디스크의 경우, 현재 트랙피치 0.32 μm 급의 미세 패턴을 가지는 고밀도 광디스크가 개발되었으며 멀티프로브방식, 근접장 방식 등 새로운



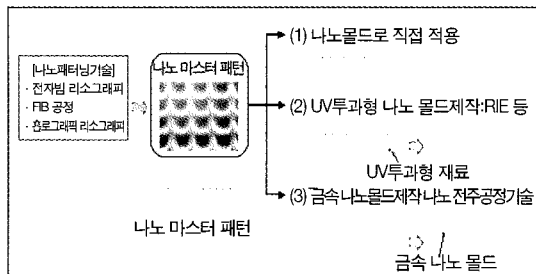
정보저장기기의 개발 추이



마이크로/나노 고분자 제품

1) <http://www.ibm.com/storage>

2) S. Kang et al. "Fabrication of Metallic Nano-stamper and Replication of Nano-patterned Substrate for Patterned Media" Nanotechnology, Vol. 15, pp. 901-906, 2004.



나노몰드 제작기술³⁾

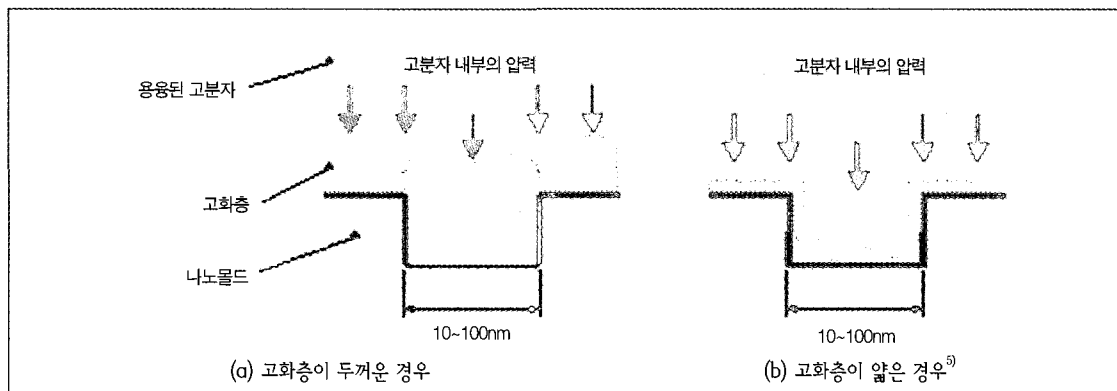
개념을 적용하여 더욱 감소된 크기의 패턴을 가지는 저장매체를 구현하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행 중이다. 차세대 하드 디스크로 대두되고 있는 패턴미디어 (patterned media)의 경우, 기존 자기 기록방식의 정보저장기기의 저장밀도 한계를 극복하기 위해 나노 패턴을 형성하고 각각의 패턴을 자화시켜 정보를 저장한다. 또한, 서브미크론(sub-micron) 크기의 미세패턴을 가지는 광결정(photonic crystal)의 특성을 활용할 경우 광통신의 핵심부품인 광도파로

뿐만 아니라 광집적 회로소자의 구현이 가능하다.

이러한 마이크로/나노 구조물을 가지는 고분자 제품을 성형함에 있어 나노몰드 제작기술은 그 핵심기술 중 하나이다.⁴⁾

나노몰드는 성형하고자 하는 고분자에 직접 나노패턴을 전사하는 역할을 하게 되는데 특히, 사출성형에서는 고온으로 용융된 고분자와 나노몰드와 접촉이 일어나면서 나노패턴의 복제가 일어난다. 이 과정에서 몰드표면과의 현저한 온도 차이에 의해 고화층 (solidified layer)이 형성되고 형성된 고화층은 마이크로/나노 구조물에 대한 전사성을 저하시키고 고분자의 유동성을 감소시켜 최종성형품의 기계적, 광학적 특성을 악화시키는 결과를 초래한다.

마이크로/나노 구조물을 성형함에 있어서 고화층에 의한 전사성 저하는 성형품의 성능에 치명적인 문제를 유발하게 된다. 이에 기존의 몰드온도 제어기술에서는 마이크로/나



고화층에 의한 전사성 저하

3) S. Kang, "Replication Technology for Micro/Nano Optical Components", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, pp. 5706-5716, 2004.

4) S. Kang et al. "Replication qualities and optical properties of UV-moulded microlens arrays" Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.36, pp. 2451-2456, 2003.

5) Masaki Yoshii et al., "Experimental Study of Transcription of Minute Width Grooves in Injection Molding" Poly. Eng. Sci, Vol. 34, pp. 1211-1217, 1994.



노 고분자 복제를 위해 몰드전체를 성형하고자 하는 고분자의 유리전이온도(폴리카보네이트의 경우 약 145°C 이상으로 가열하여 충전을 완료하고 다시 몰드전체를 취출 가능한 온도로 냉각하는 방법을 사용하기도 하였다. 하지만 이 경우에는 공정시간이 수 분으로 증가하는 문제가 발생하는 문제가 발생한다. 이에 공정시간의 증가 없이 효과적으로 몰드표면을 가열하기 위한 방법이 요구된다.

일반적인 몰드온도제어방법을 이용하여 몰드 전체를 수 초 이내 100°C 이상 온도를 변화시키는 것은 불가능하다. 이에 열관성(thermal inertia)이 상대적으로 큰 몰드전체는 일정온도로 유지한 상태로 열관성이 작은 몰드표면의 부근 온도만을 가열/냉각함으로써 수 초 동안 몰드표면을 고분자의 유리전이온도 이상으로 가열하였다가 다시 냉각시켜 마이크로/나노 고분자 복제에 적용할 수 있는 기술의 개발이 요구되는 것이다. 이 글에서는 마이크로/나노 고분자 복제를 위해 제시된 몇 가지 몰드표면온도 제어기술들을 소개하고자 한다.

단열층을 이용한 몰드표면 가열

몰드표면 부근에 몰드재료보다 열전달계수가 큰 재료를 삽입함으로써 고온의 용융된 고분자로부터 몰드로의 열전달을 지연시켜 몰드표면을 간접적으로 가열할 수 있다. 수동적 가열(passive heating)의 경우, 이러한 열전달의 지연에 의한 간접적 가열을 이용하기 때문에 단열재료의 열전달계수와 고분자의 용융온도, 몰드온도 등에 의해 몰드표면온도가 결정된다. 몰드표면온도 상승은 초미세

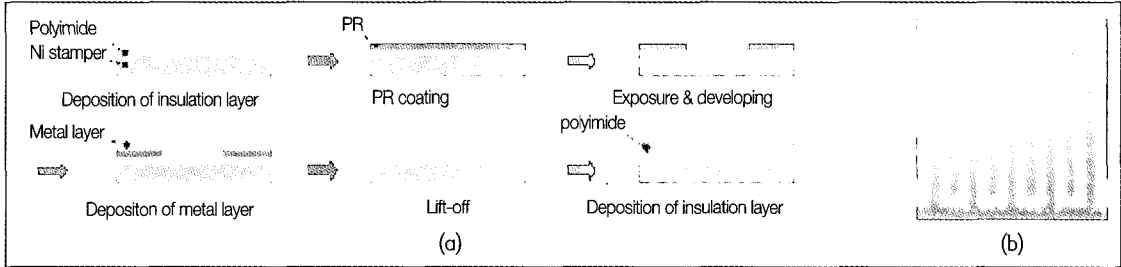
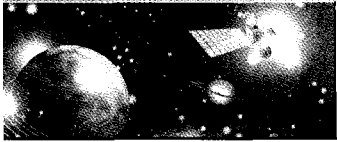
패턴에 대한 전사성과 용융된 고분자의 유동성을 향상시킨다. 이에 수동적 가열을 적용하여 초고밀도 광디스크 기판과 같은 초미세 패턴을 가지는 성형품을 제작한 사례들도 보고되고 있다.⁶⁾

하지만, 수동적 가열의 경우, 부가적인 히터의 부재로 인해 몰드표면온도의 증가에 한계를 가지게 되어 몰드표면을 유리전이온도 이상으로 가열하기 용이하지 않으며 과도하게 단열조건을 부가할 경우 그에 따라 몰드표면의 냉각시간이 증가하여 수 초가 소요되는 일반 사출성형의 공정시간(cycle time)을 유지하면서 공정을 진행함에 있어 한계가 존재하게 된다.

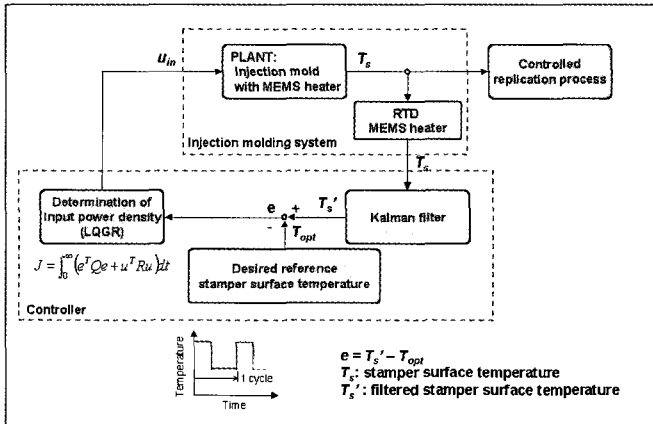
MEMS 히터 및 MEMS 센서를 이용한 몰드표면 가열

수동적 가열에 의해 발생하는 문제점들은 히터를 이용한 능동적 가열(active heating)을 통해 해결할 수 있다. 즉, 히터의 성능을 조절함으로써 몰드표면을 유리전이온도 이상으로 용이하게 가열할 수 있으며 공정시간의 증가를 방지할 수 있다. 일반적으로 몰드표면을 가열해주기 위해서는 줄열(joule heating)을 이용한 전기히터 및 유도가열을 이용한 전기히터, 그리고 적외선 레이저를 이용한 가열이 적용될 수 있다. 하지만, 공정시간의 증가가 없이 마이크로/나노 고분자 복제를 수행하기 위해서는 수 초 내에 100°C 이상으로 가열/냉각 가능한 히터가 요구된다. 일반적인 히터는 이와 같은 조건을 만족시킬 수 없기 때문에 MEMS 공정기술을 이용한 MEMS 히터의 제작이 요구된다. MEMS 히

6) S. Kang et al. "Effect of Insulation Layer on Transcribability and Birefringence Distribution in Optical Disk Substrate", Optical Engineering, Vol.41, pp. 2276-2281, 2002.



MEMS 온도센서 : (a) MEMS 온도센서 제작공정, (b) 제작된 MEMS 온도센서의 SEM 이미지⁷⁾



마이크로/나노 고분자 복제를 위한 몰드 표면온도 제어시스템⁷⁾

술을 이용한 박막형 온도센서의 제작이 필요하다. 박막형 온도센서의 경우, 온도에 따라 저항값이 변화하는 금속재료를 이용하는 방식으로 응답속도가 열전대에 비해 월등히 뛰어나며, MEMS 공정기술을 기반으로 하고 있기 때문에 측정면적의 초미세화가 가능하여 몰드표면 측정이 열전대에 비해 용이하다. 온도센서 대응 금속박막은 주로 백금, 니켈 등과 같은 온도에 대해 저항값의 변화가 선형에 가까운 재료가 이용된다.

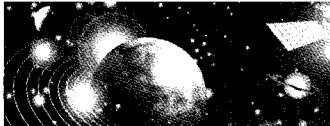
터 역시 줄열을 이용하여 가열되지만 박막의 형태를 가지고 있어 급격한 가열/냉각이 용이하다.

몰드에 대한 온도측정은 열전대(thermocouple)를 직접 몰드에 삽입하여 측정하는 방법이 많이 이용되고 있지만, 이러한 경우, 몰드표면에 근접한 측정이 용이하지 않으며 측정면적이 성형되는 패턴에 비해 매우 크며 느린 반응속도로 인해 급격한 온도 변화를 측정함에 있어서 문제점을 유발한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는, MEMS 공정기

몰드표면온도 능동제어기술

몰드표면의 온도이력은 성형품의 주요 특성들에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 특히, 마이크로/나노 고분자 복제에 있어서는 단순히 몰드표면을 가열/냉각하는 것이 아니라 몰드표면이 최적의 온도이력을 가지도록 제어할 수 있는 기술이 요구된다. 기존의 히터에 의한 자동온도 제어시스템은 일반적으로 감열부와 전로개폐부로 구성된 서모스탯(thermostat)

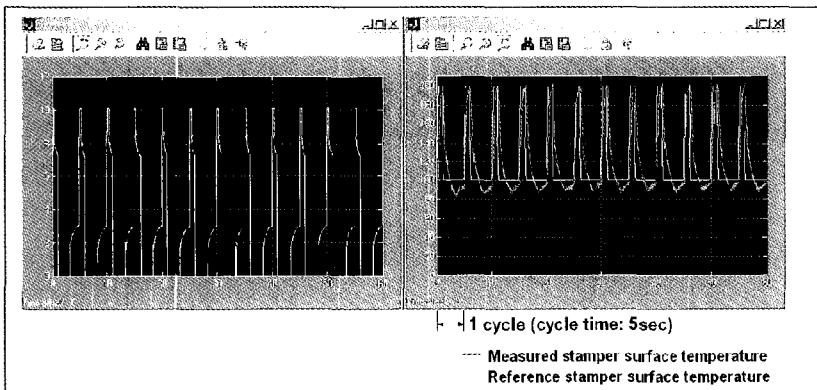
7) S. Kang et al. "Improvement of Replication Quality of High Density Optical Disc Using MEMS Sensors and Heater", International Symposium on Optical Memory 2004, pp.14-15.



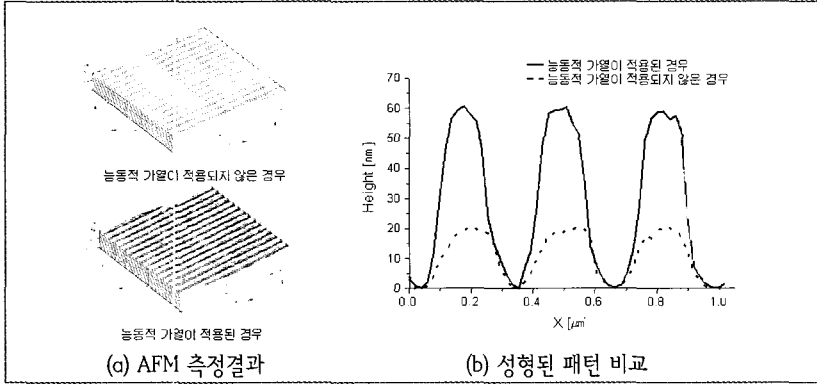
을 이용하여 임의의 온도까지 상승하면 회로를 끌고 강하되면 회로를 닫아 일정한 온도를 유지하는 시스템에 적용되었다. 하지만, 마이크로/나노 복제공정을 위한 몰드표면온도 제어 시스템은 수초 내에 몰드표면의 온도를 원하는 온도이력에 따라 온도의 제어가 가능해야 한다. 이를 위해서는 마이크로/나노 복제용 나노몰드에 대응할 수 있는 초정밀 히터 제작 기술, 공정 중 실시간 몰드표면온도 측정기술, 그리고 측정된 몰드표면온도를 기반으로 원하는 목표 몰드표면온도를 구현하기

위한 히터 제어기술 등이 요구된다. 목표 몰드표면온도를 구현하기 위한 히터 제어는 칼만 필터(Kalman filter)와 선형이차 가우시안 보상기(linear quadratic gaussian regulator)를 설계·구동함으로써 구현이 가능하다. 박막형 온도센서에 의해 측정된 몰드표면 온도에는 히터와 센서, 데이터 취득 시스템 등에 의해 노이즈가 인가된다. 정확한 제어를 위해서는 실시간으로 이러한 노이즈를 제거해야 하는데 이는 칼만 필터를 구축함으로써 해결할 수 있다. 칼만 필터

는 제어하고자 하는 시스템에 대한 모델링을 기반으로 측정된 값을 노이즈가 제거된 최적의 값으로 실시간 변환하는 기능을 가지고 있다. 노이즈가 제거된 온도는 목표 온도와의 비교를 통해 그 이값이 계산되고 이 값을 바탕으로 목표 몰드표면온도 이력을 구현하기 위한 히터의 최적 입력값을 결정한다. 결정된 최적의 입력값은 히터에 인가되어 몰드표면이 목표 몰드표면 온도를 가지도록 제어한다.



능동제어에 의한 몰드표면의 온도이력⁸⁾



몰드표면온도 능동제어에 의한 성형결과

8) S. Kang et al. "Replication of High Density Optical Disc Using Injection Mold with MEMS heater", Information Storage and Processing Systems Conference 2004.