반도체디스플레이기술학회지 제9권 제2호(2010년 6월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 9, No. 2. June 2010.

대면적 UV 임프린팅 공정에서 고무 롤러에 의한 압력분포

김남웅 · 김국원*† · 이우영**
동양미래대학 기계공학부, *순천향대학교 공과대학 기계공학과, **한국기술교육대학교 기계정보공학부

Pressure Distribution by Rubber Roller in Large-area UV Imprinting Lithography Process

Nam Woong Kim, Kug Weon Kim*† and Woo-Young Lee**
School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul 152-714, Korea
*†Dept. of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea
**School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

ABSTRACT

In recent years there have been considerable attentions on nanoimprint lithography (NIL) by the display device and semiconductor industry due to its potential abilities that enable cost-effective and high-throughput nanofabrication. Although one of the current major research trends of NIL is large-area patterning, the technical difficulties to keep the uniformity of the residual layer become severer as the imprinting area increases more and more. In this paper we consider the roll-to-plate type imprinting process. In the process a glass mold, which is placed upon the 2nd generation TFT-LCD glass sized substrate(370¥470 mm), is rolled by a rubber roller to achieve a uniform residual layer. The pressure distribution on the glass mold by rolling of the rubber roller is crucial information to analyze mold deformation, transferred pattern quality, uniformity of residual layer and so forth. In this paper the quantitative pressure distribution induced by rolling of the rubber roller was calculated with finite element analysis under the assumption of Neo-Hookean hyperelastic constitutive relation. Additionally the numerical results were verified by the experiments.

Key Words : Nanoimprint Lithography, Rubber, Roller, Hyperelasticity

1. 서 론

나노 임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography, NIL) 공정은 1990년대 중반 Chou 등[1,2]에 의해 최초 제안된 이래, 반도체 및 디스플레이 산업에서 기존 고가의 포토 리소그래피 공정을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 활발한 연구가 이루어지고 있다. NIL은 몰드(혹은 스탬프)에 기 형성되어 있는 나노 구조의 패턴 형상을 기계적 가압을 통해 반복적으로 기판에 전사시키는 기술로서, 사용되는 레지스트의 종류 및 경화시키는 방법에 따라 대체적으로 열 나노임프린트 리소그래피 (Thermal NIL)와 자외선 나노임프린트 리소그래피 (UV NIL)로 구별된다[3,4]. 이중 특히, UV NIL은 상온 및 저압 조건에서 공정이 이루어지기 때문에 생산성 면에서 Thermal NIL에 비해 강점을 갖는다.

최근 임프린팅 공정의 상용화에 있어, 주요한 연구의 방향은 역시 공정의 고속화와 대면적화에 있다고 볼 수 있다. 이중 대면적화에 따른 기술적 문제를 살펴보면 다음과 같다. 임프린팅 면적이 증가할수록, 몰드 상면 전면적에 걸쳐 균일한 압력으로 가압하기가 점점 더 어려워진다. 나아가 상면에 균일한 압력을 가한다 할지라도, 몰드에 형성되어 있는 패턴의 형상 및 크기가 일정치 않고 다양하다면, 몰드와 기판 사이의 레지스트에 압력불균형이 발생하고 이는 결국 기판에 전사되는 패턴의 잔류층 불균일을 초래하게 된다[5]. 더욱이 기판의 두께 공차나 스테이지의 편평도 공차를 고려한다면, 잔류층 불균일은 더욱 커지게 되는 것이다.

†E-mail : kimkug1@sch.ac.kr

이러한 문제를 해결하기 위하여, 강성이 낮은 몰드를 사용하여, 종래의 전면 가압과 달리 롤러(Roller)를 사용하여 가압하는 방법이 제안되어 연구되고 있다[6].

한편 롤링에 의한 가압방식을 사용한다면, 레지스트의 유동, 몰드의 변형, 전사된 패턴의 형상, 최종 잔류층 두께 등 공정 전반을 분석하기 위하여 롤러에 의해 발생하는 몰드 상면의 압력 분포가 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 2세대 TFT-LCD 유리기판(370×470 mm)을 대상으로 하는 롤링 방식의 임프린팅 공정[7]에서 고무 롤러에 의한 압력분포를 유한요소해석을 통하여 계산하였다. 고무 모델은 초탄성 재료의 구성 방정식인 Neo-Hookean 모델이 사용되었고[8,9], 검증을 위하여 고무 롤러의 가압에 의해 발생하는 몰드상면에서의 접촉길이를 측정, 수치해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 롤링방식 UV 임프린팅 공정 소개

롤링 방식의 UV 임프린팅 장비 개략도를 나타내면 Fig. 1과 같다. 그림에서 굵은 화살표는 롤링 공정 중, 고무 롤러와 컨택 헤드의 이송 방향을 나타낸다. 공정은 다음과 같은 순서로 수행된다. 최초에 글라스 기판이 스테이지 상부에 놓이게 되고, 스테이지의 진공 흡착에 의해 고정된다. 이어 글라스 기판에 UV 레지스트가 도포되고, 글라스 몰드가 좌측의 컨택 헤드를 통해 일정한 경사를 유지하며 글라스 기판위에 위치하게 된다. 고무 롤러는 미리 정의된 초기 위치에서 Fig. 1 (a)와 같이 가압장치에 의해 하부로 가압되고, 이에 따라 글라스 몰드의 선단부는 기판에 접촉하게 된다. 연이어 Fig. 1 (b)에 보인 바와 같이, 선형 운동 가이드(Linear Motion Guide) 등의 평행이송 장치를 통해, 고무 롤러는 글라스 몰드 상부를 가압하는 동시에 구름 운동을 함으로써 글라스 몰드 상부에 대한 롤링 공정을 수행하게 된다. 롤링 공정 중에는 컨택 헤드가 하부로 연동함에 따라, 롤링을 종료할 시점에는 몰드와 기판이 완전한 접촉을 이루게 된다. 롤링 공정을 수행하는 동안에, 기판에 산재해 있던 UV 레지스트는 유동을 일으켜, 몰드와 기판 사이의 모든 패턴 캐비티를 충전하게 되고, 잔류층을 균일하게 만드는 것이다. 롤링 공정이 끝나면, UV조사를 통하여 레지스트는 중합화(Polymerization) 과정을 거치게 되고, 이후 이형(Demolding) 공정을 통해 몰드는 기판으로부터 분리되게 된다. 최종적으로 에칭공정을 수행함에 따라 기판에 패턴을 전사하게 되는 것이다.

롤링 방식 임프린팅 공정의 핵심은 롤러의 이송 속도와 압력, 롤링의 횟수 등을 적절히 조절하여 최소한의 공정시간으로 잔류층을 최소화 및 균일화 시키는 것이다. 이와 같이 공정 조건을 최적화하기 위해서는, 롤링에 따른 레지스트의 유동, 유연 몰드와 레지스트와의 탄성유체윤활(Elastohydrodynamic Lubrication)에 의한 상호 작용, 몰드 변형 및 치수 공차, 패턴의 형태 및 크기, 잔류층 두께 등 공정 전반에 걸쳐 실험적, 수치해석적 연구가 광범위하게 이루어져야 한다. 이중 특히 고무 롤러에 의해 몰드 상면에 가해지는 압력 분포는 기본적으로 필요한 정보라 할 수 있다.

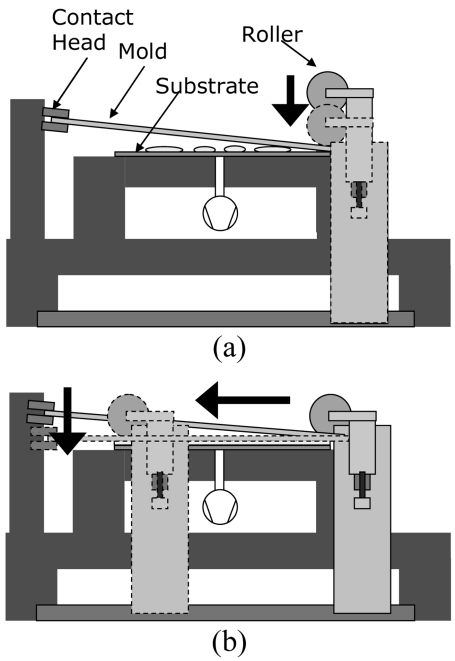


Fig. 1. Schematics of rolling-type UV imprinting processes and system; (a) pressing, (b) pressing and rolling.

본 연구에서 고려하고 있는 고무 롤러의 제원은 Fig. 2와 같다. 롤러는 내부 SUS, 외부 실리콘 고무 재질의 동축 구조로서, 직경C와 B는 각각 ϕ30, ϕ40 mm 이다. 롤러의 길이 A는 몰드의 액티브 영역(글라스 기판으로 패턴 전사가 이루어지는 영역)을 포함하는 치수로서 290 mm 이다. 실리콘 고무의 경도는 Duro 40으로 설정하였다. 본 연구에서 제작 중인 롤링방식 임프린팅 장비에서는 최대 50 kgf의 힘으로 롤러를 가압할 수 있다.

3. 해석 방법 및 모델링

3.1. 기본 가정

고무 롤러의 가압에 의해 글라스 몰드 상부에 가해

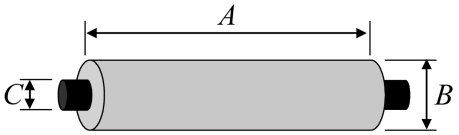


Fig. 2. Specifications of rubber roller; diameter of SUS core and silicon rubber, C and B, are ϕ30 and ϕ40 respectively, and length of roller, A, is 290 mm. Hardness of silicon rubber is Duro 40.

지는 압력분포를 유한요소해석을 통해 계산하기 위해 다음과 같은 기본 가정을 취하였다.

- 롤러는 직경에 비해 충분히 긴 형상을 가지므로 평면 변형률 응력 상태에 있다고 가정한다.
- 본 연구의 롤링은 수 mm/s 이하의 느린 속도로 수행되므로, 압력분포 계산시 구름 운동은 무시하고, 롤러를 누르는 힘만 고려한다.
- 해석의 대상으로 롤러, 글라스 몰드, 하부의 글라스 기판만 고려한다. 글라스 몰드 하부의 미세 패턴, 글라스 기판 상부에 도포되는 레지스트, 스테이지는 무시한다.
- 몰드 및 기판의 평탄도 및 두께 오차는 고려하지 않는다.
- 롤러의 외피인 실리콘 고무의 초기 응력(Initial Stress)은 고려하지 않으며, 실리콘 고무와 내부의 SUS 재질은 완전 접착 조건이다.
- 등온 과정(Isothermal) 조건이다.

3.2. 고무의 초탄성 거동 모델

고무 및 고무 유사 재료는 일반적으로 변형률 약 500%까지 탄성거동을 보인다. 이러한 재료를 일반적인 탄성체와 구별하여 특별히 초탄성체(Hyperelastic Material)라 한다. 초탄성체의 구성방정식은 변형률 에너지 함수를 이용하여 나타낼 수 있다. 롤러의 외피 재료는 실리콘 고무이기 때문에, 롤러의 압축 변형을 정확히 계산하기 위해서는 초탄성 거동을 반드시 고려하여야 한다. 본 연구에서는Neo-Hookean 모델을 사용하였다. Neo-Hookean 모델은 일반적으로 신장률 150 % 까지의 비교적 작은 범위 내에서는 고무의 변형을 잘 모사한다고 알려져 있으므로, 본 연구의 롤러 변형을 계산하는데 적합한 모델로 사료된다. Neo-Hookean 모델의 변형률 에너지 함수는 다음과 같다[10].

$$U = C_0(I_1 - 3) \tag{1}$$

여기서 U는 변형률 에너지 함수(Strain Energy Function), I_1은 변형률 불변계수, C_0는 모델 상수다. C_0는 일반적으로 단순 인장이나 단순 전단 등의 재료 시험을 통해 얻어진 하중-변형관계로부터 결정되는 값이다. 식 (1)에서 단축 인장, 비압축성 조건을 사용하면, 탄성계수 E와 신장률 λ 와의 관계는 다음 식을 만족하게 된다.

$$E(\lambda) = 2C_0\left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2}\right) \tag{2}$$

식 (2)에서 신장률을 1로 가정하면 고무 재료의 탄성계수 E는 근사적으로 $6C_0$와 같아진다. 이 관계는 고무의 탄성계수로부터 Neo-Hookean 재료 상수를 구할 수 있는 근거가 된다. 한편 고무의 탄성계수나 초탄성계수는 일반적으로 고무 재료의 사양서에는 포함되어 있지 않다. 고무 업계에서는 고무의 탄성을 나타내는 물성으로 주로 경도를 사용해왔기 때문에, 경도와 탄성계수와의 관계를 밝히는 연구가 다수 있었다. 이중 Yeoh[11]와 Gent[12]의 연구가 주목할 만하다. 다음은 본 연구에서 사용한 Gent의 경험식을 나타낸다.

$$E_g = \frac{56 + 7.66H_r}{2.67r(254 - 2.54H_r)} \tag{3}$$

여기서 r은 경도측정기의 압입반경이며, 근사적으로 0.0515 cm의 값을 사용한다. H_r은 Shore 경도이며, 탄성계수 E_g의 단위는 kg/cm^{2}이다. 상기식의 유용성은 저자들의 이전 연구에서 입증된 바 있다[8,9]. 다음은 Gent의 식을 이용해서 추정된 실리콘 고무의 Neo-Hookean 재료 상수를 나타낸다.

Table 1. Neo-Hookean model constants of silicon rubber

Duro Hardness	C_0
30	0.1909
40	0.2825
50	0.4106

3.3. 유한요소 모델링

본 연구의 해석에는 상용 비선형해석 전문 유한요소해석 프로그램인 MARC가 사용되었다. 3.1절에 전술한 기본 가정에 따라 평면 변형률 요소를 사용하였다. 경계조건 및 하중 조건은 다음과 같다.

- 글라스 기판의 하부 영역을 고정한다.
- 롤러의 자중을 고려한다.
- 롤러에는 500 N 까지 순차적으로 가압력을 높이면서 하중 조건을 부여한다.
- 고무 롤러와 글라스 몰드 사이의 접촉 조건을 고려

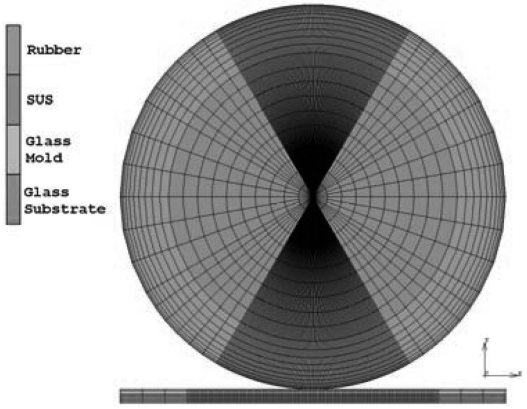


Fig. 3. Finite element model of roller, glass mold and glass substrate.

한 비선형 해석을 수행한다. 구체적으로는 탄성체간(Deformable-to-Deformable) 접촉조건을 고려하기 위해 MARC의 직접 구속조건 방법(Direct Constraint Method)을 사용하였다. 한편 수직하중이므로 마찰력은 무시하였다.

Fig. 3은 해석에서 고려된 롤러, 글라스 몰드 및 글라스 기판의 유한요소 모델을 나타낸다.

4. 해석 결과

4.1. 접촉 길이 측정 및 해석 결과 검증

유한요소 해석 결과의 타당성를 검증하기 위하여, 일정 하중에 대하여 롤러의 고무 재료가 몰드 상면에 눌려서 발생하는 접촉길이를 측정하고 이를 해석치와 비교하였다. 접촉 길이의 측정은 먹지(Carbon Paper)를 이용하여 고무 재료의 접촉 면적을 백지엔 전사하고 이를 측정하는 방식으로 수행되었다. 보다 자세히 설명하면 다음과 같다. 즉, Fig. 1에 나타낸 롤링 임프린팅 장비의 스테이지 위에 글라스 기판과 몰드를 정렬시켜 포개 놓은 다음, 그 위에 백지와 먹지를 위치시킨다. 먹지의 상부를 롤러를 사용하여 특정 하중으로 가압하게 되면 백지에 롤러의 변형에 의한 접촉 면적이 전사되는데 이 면적으로부터 접촉 길이를 측정하는 것이다. 본 연구에서는 특정 하중에 대한 접촉 길이를 3회 측정한 후, 앙상블 평균을 취하였다. Duro 40 롤러의 측정치와 Duro 30 ~ Duro 50까지의 계산치를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

해석치와 계산치를 비교해보면, 먼저 하중에 대한 접촉길이의 증가 추세가 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편 Duro 40 경도의 롤러에 대한 접촉 길이 측정치가, Duro 30과 Duro 40 경도로 가정한 해석치 사이에 있음을 확인할 수 있다. 이 차이는 해석시 물성치를 재료시험을 통해 직접 구하지 않고, Gent의 경험식을 사용한 점, 롤러의 고무 외피의 초기 응력을 고려하지 않은 점, 혹은 롤러에 사용된 고무의 사양서상 경도에 오류가 있을 가능성을 들 수 있으나, 전반적으로 경도 5도 범위안에서 해석치와 측정치가 비교적 일치하는 결과를 보이는 바, 해석치의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

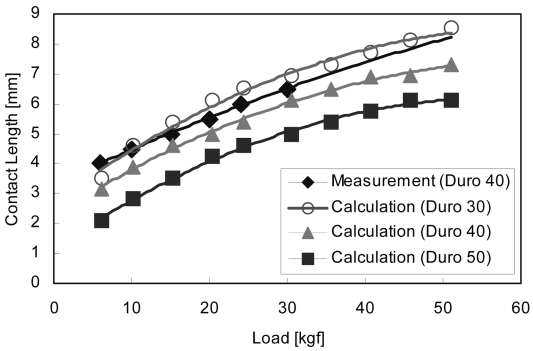
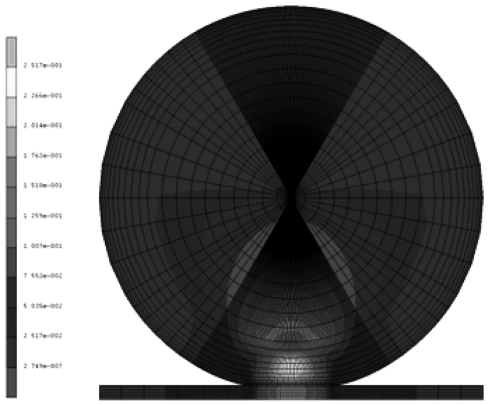


Fig. 4. Contact length of roller; comparison between calculations by finite element analysis and measurements.

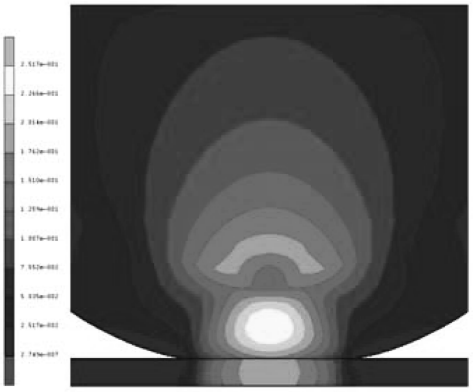
4.2. 롤러의 가압에 의한 글라스 몰드 상면의 압력 분포

먼저 롤러의 가압에 의해 롤러에 발생하는 응력과 변형을 살펴보면 Fig. 5와 같다. 고무 재료 부분이 변형하여 글라스 몰드 상부에 접촉하여 있고, 이 부분을 통하여 롤러의 하중이 글라스 몰드와 기판 사이의 레지스트에 전달되는 것이다.

글라스 몰드 상면의 압력분포는 접촉면(ZX면)에 발생하기 때문에 요소 응력으로부터 직접 구할 수 없다. 따라서 글라스 몰드 상부와 접촉을 이루고 있는 롤러의 절점(Node)들에 대해 접촉 반력을 구하고, 해당 요소(Element)의 면적으로 나누어 접촉부의 압력 분포를 계산하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 고무의 경도가 높아질수록 압력 구배차가 보다 심해지고 최대 응력 및 평균 응력이 동반 상승하는 것을 잘 나타내고 있다. 롤링 임프린팅 공정에서 롤링 공정 중 발생하는 압력의 크기, 특히 최대 압력의 크기는 레지스트의 잔류층 불균일을 최소화하고 공정을 고속화 하는데 주요한 역할을 하는 공정변수이다. 따라서 압력분포의 정량적 계산은 공정 최적화의 기본이 될 수 있다. 최종적으로 Table 2에 Duro 30 및 Duro 40 롤러에 대해 하중의 변화에 대한 접촉면의 최대 압력을 계산하여 나타내었다.



(a)



(b)

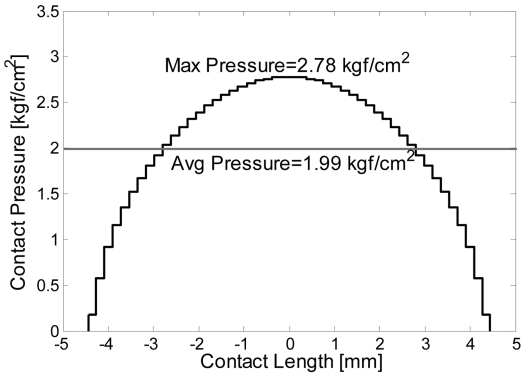
Fig. 5. Von Mises stress distribution and deformation of rubber roller of Duro 30; (b) is a detail view of (a).

5. 결 론

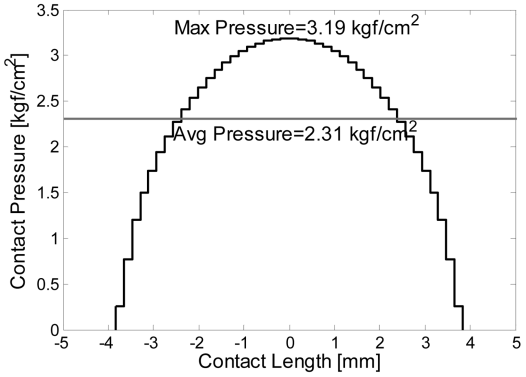
본 논문에서는 롤링 임프린팅 공정에서 롤링에 의해 발생하는 글라스 몰드 상부의 압력 분포를 계산하기 위하여, 고무의 초탄성 구성방정식과 접촉 경계 조건을 고려한 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과는 측정치와 잘 합치하는 결과를 보였고, 따라서 본 해석의 타당성을 확인할 수 있었다.

Duro 30과 Duro 40의 경도를 갖는 고무를 사용하는 직경 40 mm, 길이 290 mm의 롤러를 상정할 때, 최대 압력은 각각 2.78, 3.19 kgf/cm^{2}로 계산되었다.

대면적 공정을 지향하는 롤링 임프린팅 공정에서, 롤링 공정시 발생하는 압력은 잔류층 균일화에 지대한 역할을 하는 공정 변수로서 반드시 최적화될 필요가 있다. 본 논문에서 구한 몰드 상부의 정량적인 압력분포는, 향후 몰드의 유연성 즉, 몰드 변형을 고려한 레지스트의 유동 해석에 필수적인 정보로 사용될 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6. Pressure distribution induced by pressing of rubber roller; load is 500 N; (a) Duro 30, (b) Duro 40.

Table 2. Maximum pressure by rubber roller

Load [N]	Maximum Pressure [kgf/cm^2]	
	Duro 30	Duro 40
150	1.37	1.61
300	2.03	2.35
500	2.78	3.19

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2009-0074260)과 엔엔디㈜의 기술적 도움을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chou, S. and Krauss, P., “Imprint lithography with

sub-10nm feature size and high throughput," Microelectronic Engineering., Vol. 35, pp. 237-240, 1997.
2. Guo, L. J., "Recent progress in nanoimprint technology and its applications," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 37, pp. R123-R141, 2004.
3. Kim, N. W., Kim, K. W., and Sin, H.-C., "Finite element analysis of low temperature thermal nanoimprint lithography using a viscoelastic model," Microelectronic Engineering., Vol. 85, pp. 1858-1865, 2008.
4. Kim, N. W., Kim, K. W., and Sin, H.-C., "A mathematical model for slip phenomenon in a cavity-filling process of nanoimprint lithography," Microelectronic Engineering., Vol. 86, pp. 2324-2329, 2009.
5. Heyderman, L. J., Schift, H., David, C., Gorbrecht, J., and Schweizer, T., "Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography," Microelectronic Engieering, Vol. 54, pp. 229-245, 2000.
6. Ahn, S. H. and Guo, L. J., "High-speed roll-to-roll nanoimprint lithography on flexible plastic substrates," Advanced Materials, Vol. 20, pp. 2044-2049, 2008.
7. Bae, J., Kim, Chang, J., and Lim, S., "Large area UV nanoimprint lithography for TFT-LCD devices," Proceeding of The 7th International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology, pp. 186-187, 2008.
8. 김국원, 김남웅, "부틸고무의 변형률 에너지 함수 예측," 대한기계학회논문집 A권, 제30권, pp. 1227-1234, 2006.
9. 김국원, 김남웅, "치수공차가 고려된 광디스크 드라이브의 방진마운트 설계에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제12권, pp. 661-667, 2002.
10. Treloar, L. R. G., 1975, "The physics of rubber elasticity", 3rd Ed., Clarendon, Oxford Press.
11. Yeoh, O. H., "On hardness and Young's modulus of rubber," Plastics and Rubber Processing and Appl., Vol. 4, pp. 141-144, 1984.
12. Gent, A. N., "On the relation between indentation hardness and young's modulus," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 31, pp. 896-906, 1958.

접수일: 2010년 5월 31일, 심사일: 2010년 6월 9일
게재확정일: 2010년 6월 15일