

유연기판을 위한 나노임프린트리소그래피 시스템 설계

Design and Implementation of Nanoimprint Lithography System for Flexible Substrates

임형준^{1,✉}, 이재종^{1,2}, 최기봉¹, 김기홍¹, 류지형²
Hyung Jun Lim^{1,✉}, Jae Jong Lee^{1,2}, Kee-Bong Choi¹, Gee Hong Kim¹ and Ji Hyeong Ryu²

1 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부 (Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials)

2 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (Department of Nano Mechatronics, University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: hjlim@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7072

Manuscript received: 2010.8.2 / Revised: 2010.12.16 / Accepted: 2011.1.27

The NIL processes have been studied to implement low cost, high throughput and high resolution application. A RNIL(roller NIL) is an alternative approach to flat nanoimprint lithography. RNIL process is necessary to transfer patterns on flexible substrates. Compared with flat NIL, RNIL has the advantages of better uniformity, less pressing force, and the ability to repeat the patterning process continuously on a large substrate. This paper studies the design, construction and verification of a thermal RNIL system. The proposed RNIL system can easily adopt the flat shaped hot plate which is one of the most important technologies for NIL. The NIL system can be used to transfer patterns from a flexible stamp to a flexible substrate, from a flexible stamp to a Si substrate, and from a roller stamp to a flexible substrate, etc. Patterning on flexible substrates is one of the key technologies to produce bendable displays, solar cells and other applications.

Key Words: Nanoimprint Lithography (나노임프린트리소그래피), Roller (롤러), Flexible Substrate (유연기판), Flexible Electronic Device (유연전자소자)

기호설명

M = mass of the press roller (kg)

x = horizontal position of the center of the press roller (mm)

z = position of the vertical stage slider for the press roller (mm)

Δz = position of the vertical stage slider for the press roller after the press roller contacts to the hot plate (mm)

F = load or pressing force of the press roller (N)

k_t = sum of stiffness values of the upper springs (N/mm)

k_b = sum of stiffness values of the lower springs (N/mm)

l_{ti} = initial deformation of the upper springs (mm)

l_{bi} = initial deformation of the lower springs (mm)

1. 서론

나노임프린트리소그래피(Nanoimprint Lithography, NIL)는 1995 년 처음 소개된 후 다양한 형태로 발전하며 종래의 포토리소그래피(Photolithography)에 의존해 오던 반도체 등 각종 소자 제조방법의 다른 형태로 자리잡고 있다.^{1,2} 주로 웨이퍼 기반으로 이루어지는 포토리소그래피와는 달리 임프린트리소그래피는 롤 기반 연속 생산이 가능하다. 롤 기반의 나노임프린트리소그래피 역시 국내외에서 다양한 형태로 연구되고 있지만,³⁻⁵ 여전히 해결해야 할 과제들이 많이 남아 있다. 이와 유사한 롤투롤(Roll-to-roll) 프린팅 기법은 유연한 기판을 기반으로 태양광 발전 및 디스플레이 분야에 생산성을

향상시키는 방안으로써 다양한 연구가 수행되어 오고 있다.⁶⁻⁹ 그러나, 롤 기반의 나노임프린트리소그래피는 롤투롤 프린팅 기법과는 달리 접촉 및 가압에 기반을 둔 기술이므로 두 방식이 외형은 유사하나 패턴전사 메커니즘은 전혀 다르다고 할 수 있다. 나노임프린트리소그래피 공정의 필수 요소인 스탬프 제작을 위해 웨이퍼 등 평면 기판을 기반으로 한 전자빔리소그래피(E-beam Lithography, EBL) 공정 등에 의존해야 하므로, 이를 롤 기반의 나노임프린트리소그래피 공정에 적용하기 위해서 별도의 수단에 의한 롤 스탬프의 제작이 필요하다. 따라서 평면 기판에 존재하는 패턴을 유연기판으로 전사하는 공정은 향후 롤 기반 나노임프린트리소그래피를 구현함에 있어 필요한 기술이다. 즉, 패턴전사가 이루어진 유연기판을 롤에 부착하는 형태로 롤 스탬프 제작이 가능하며, 또는 직접 유연기판을 스탬프로 하여 또 다른 유연기판에 패턴 전사를 수행할 수 있는 등 그 활용도는 다양하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 방법의 구현을 위한 핵심요소인 롤 기반 가압 메커니즘에 대해 소개하고 새로운 형태의 롤 기반 나노임프린트리소그래피 방법에 적합한 롤러 가압 메커니즘의 설계 및 구현, 그리고 성능검증을 통해 마이크로 혹은 나노 스케일의 패턴 전사를 시도하고자 한다.

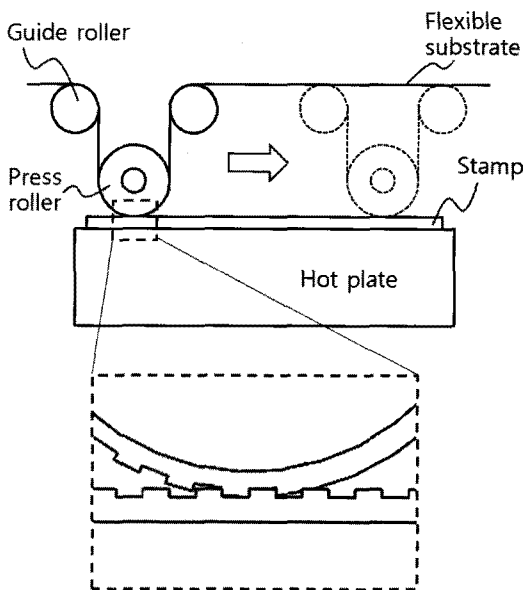


Fig. 1 Conceptual drawing of the proposed imprint lithography system for a flexible substrate

2. 롤러나노임프린트리소그래피 시스템

2.1 기존 시스템 분석

일반적인 롤 기반의 프린팅 혹은 나노임프린트리소그래피 장치는 스탬프 롤러를 포함한 두 개의 롤러를 맞대어 회전시키며 그 사이로 기판이 통과하도록 하여 스탬프 롤러의 표면에 존재하는 패턴을 기판에 전사한다.^{4,5} 이는 시스템 구성이 비교적 용이하며, 단단한 기판 혹은 유연한 기판 모두 적용이 가능한 장점이 있다. 그러나, 롤러 형태의 스탬프를 제작해야 하는 어려움을 안고 있다. 롤러 형태의 스탬프를 제작하기 위해서는 유연스탬프를 롤러에 부착하거나 롤러에 직접 패턴링을 수행해야 한다. 그 밖에도 스탬프와 기판의 접촉 및 가압이 발생한 상황에서 가열 또는 자외선 조사를 등을 수행하기 위해서는 롤러 형태로 된 가열장치를 별도로 개발해야 하는 등 일반적인 평면 기반의 나노임프린트 관련 기술을 적용하는데 많은 어려움이 따르게 된다.

2.2 시스템 개념 및 구성

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 평면 형태의 스탬프에 존재하는 패턴을 직접 유연기판에 전사시킬 수 있는 방법을 사용하고자 한다. 이는 유연기판에 대해서만 적용이 가능한 시스템이지만 원형 또는 사각형 등 평면 형태의 실리콘, 유리 와 같은 스탬프를 직접 활용할 수 있어 일반적인 롤 기반의 장비에 비해 보다 다양한 조합의 패턴링이 가능하다. 즉, 유연스탬프에서 유연기판으로의 패턴전사(Roll-to-roll)뿐 아니라 평면스탬프에서 유연기판으로의 패턴전사(Plate-to-roll) 및 유연스탬프에서 평면기판으로의 패턴전사(Roll-to-plate) 등 다양한 형태로 패턴링이 가능한 시스템이다. 무엇보다도 평면 형태의 가열장치 또는 자외선 조사장치를 직접 적용할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1 의 가압롤러 이동 방법을 보면, 가압롤러(Press roller)의 전후에 가이드롤러(Guide roller)가 위치하며 하나의 모듈 형태로 구성되어 있다. 이 모듈 내에서 가압롤러만 상하운동을 하여 기판과 스탬프 사이에 선 접촉(Line contact)이 이루어지도록 한 후, 가압롤러와 가이드롤러 모듈이 수평이동을 하여 순차적으로 유연기판과 스탬프가 가압이 되도록 유도한다. 이때 공급 및 회수롤러와 가이드롤러가 동일한 높이를 가지도록 유지하여 기판이 수평이 유지되도록 함으로써 가압롤러가 좌우로

이동하는 경우에도 유연기관의 길이 변화가 발생하지 않도록 한다.

스탬프의 길이에 해당하는 구간만큼 임프린트 과정이 진행된 후에는 다시 가압롤러가 상방향으로 이동, 기관과 스탬프를 분리시킨 후 다시 처음의 과정으로 되돌아가 다음 구간을 반복하게 된다.

3. 가압용 롤러 메커니즘 설계 및 제작

3.1 가압용 롤러의 구성

일반적인 가압롤러와 달리 본 시스템의 가압롤러는 가압의 역할을 수행함과 동시에 수평 이동이 가능해야 하므로 수평 및 수직 이송이 가능한 이송장치에 가압롤러가 탑재되어야 한다. 따라서, 수직 이송장치의 이동 거리에 의해 가압하는 힘 또는 압력을 발생해야 하므로 수직 이송 거리에 대한 힘의 변화, 최대 발생 가능한 힘의 크기 등이 중요한 변수가 될 것이다.

또한, 평면 스탬프와의 평행도 유지를 위해 가압롤러가 이송장치를 기준으로 각도오차 보상이 가능하도록 해야 한다. Fig. 2 는 가압롤러 및 가압롤러의 수직이송을 위한 이송장치에 대한 개념도를 보여준다. 가압롤러는 베어링에 의해 좌우가 각각 가압롤러 홀더에 장착이 되어 회전하며 가압롤러 홀더 또한 가압롤러용 슬라이더와 각도 보상이 가능하도록 연결되어 있다. 가압롤러용 슬라이더와 수직 이송장치 사이에는 스프링이 삽입되어 있어 가압하는 힘의 세기를 조절할 수 있다. 즉, 수직이송장치의 이동거리에 따라 가압력을 조절할 수 있게 된다.

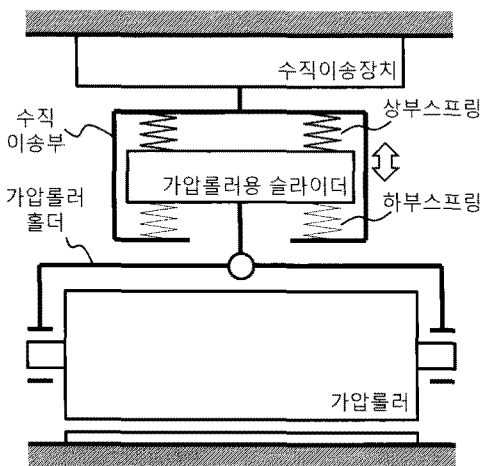


Fig. 2 Mechanism of the press roller

가압 상태에서 롤러를 수평으로 이동시키면 앞 절의 Fig. 1 에서와 같은 이동을 수행할 수 있으며 결국 스탬프와 유연기관이 연속적으로 선접촉을 이루으로써 전면적에 대한 임프린트 작업이 가능하다.

3.2 가압 메커니즘

Fig. 2 와 같이 가압 메커니즘을 위한 스프링은 가압롤러용 슬라이더의 상부 및 하부에 각각 위치하도록 한다. 상부에 위치한 스프링은 수직이송부의 이동에 의하여 얻어지는 압축을 이용, 가압의 역할을 수행하며, 하부에 위치한 스프링은 가압용 롤러의 자중에 의한 처짐을 받쳐주는 기능을 하고 있다. Fig. 3 은 가압롤러의 자중(M), 장착된 스프링의 탄성계수(k_t, k_b), 수직 이송장치의 이동 거리(Δz)와 가압하는 힘(F)의 관계를 보여준다. 장착된 스프링은 시스템의 안정성을 위해 여러 개 사용 가능하며 이때에는 모든 스프링 탄성계수의 합으로 전체 탄성계수를 결정하게 된다. 가압이 이루어지기 전 가압롤러의 자중에 의한 힘의 관계를 포함, 가압이 이루어지는 과정에서 발생하는 스프링상수와 힘의 관계는 식(1) 및 식(2)과 같이 표현되므로, 결국 식(3)과 같이 얻어진다.

$$- Mg = k_t l_{ti} - k_b l_{bi} \quad (1)$$

$$F - Mg = k_t (l_{ti} + \Delta z) - k_b (l_{bi} - \Delta z) \quad (2)$$

$$F = (k_t + k_b) \Delta z \quad (3)$$

여기서 l_{ti} 와 l_{bi} 는 각각 가압 롤러의 자중에 의한 초기 변형의 정도이며, 스프링 고정부의 설계 치수에 따라 초기 변형량의 합 $l_{ti} + l_{bi}$ 를 결정할 수 있다.

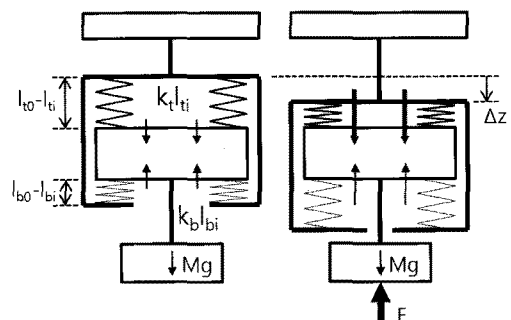


Fig. 3 Force equilibrium of the press roller

식(2)의 경우 스프링의 변형량이 허용 가능한 압축 길이 이상으로 변형하거나, 초기 길이가 이상으로 인장되어 가압롤러 홀더로부터 스프링이 이탈하는 상황이 발생하지 않도록 하기 위해서는 이송 장치의 이동 거리를 적절한 수준으로 제한해야 한다.

향후 시스템의 가압력 측정 및 제어를 위해 Fig. 2 의 가압롤러용 홀더에 로드셀(Loadcell)을 탑재하여 가압이 이루어진 이후 발생하는 가압력의 크기를 실시간으로 측정하기로 한다. 즉, 가압이 이루어지기 직전의 로드셀 출력값을 0 으로 오프셋 보정을 하여 가압용 롤러의 자중, 유연기관의 장력 등에 의한 영향이 제거된 가압력을 측정하게 된다. 그러나, 실제로 수직이송부와 가압롤러용 슬라이더는 가이드에 의해 상하방향으로만 이동이 이루어지도록 해야 하지만 이들 사이에 마찰이 발생할 수 있다. 또한, 장착된 스프링 외에도 가압롤러용 홀더 등 구조물의 변형이 발생할 수 있어 실제로 얻어지는 가압력의 특성은 식(3)과는 차이가 발생할 가능성이 있으므로, 시스템 구현 및 검증을 통해 이를 확인할 필요성이 있다.

3.3 파라미터 설계 및 시스템 제작

본 논문을 통해 실제 제작하고자 하는 시스템의 경우 최대 8 인치까지 대응이 가능하도록 가압용 롤러의 직경을 100 mm 로 설계했으며, 롤러의 폭은 200 mm 로 두었다. 가압의 성능에 대한 설계 조건으로는 Table 1 과 같이 최대 가압력을 450 N 이상, 가압력의 분해능을 수직이동거리 10 μ m 당 2 N 이하, 그리고 최대 가압력까지 도달 속도를 5 초 이내로 설정하였다. 또한, 초기 장착 및 사용 중 발생하는 스프링의 변형량 관리를 위해 10 mm 이내로 제한하고자 한다.

이미 3.2 절에 언급한 것과 같이 상부 스프링은 가압의 기능을 하므로 스프링상수가 비교적 큰 값을 가져야 한다. 한편, 하부 스프링은 가압용 롤러의 처짐을 받쳐주는 기능을 하므로 초기 변형량을 줄이기 위해서는 스프링상수가 큰 값을 가져야 한다. 그러나 스프링상수가 커질수록 식(1)에 의해 상부스프링의 초기 변형량도 함께 증가하므로 상부스프링의 탄성범위를 충분히 활용하는 데에 제한이 따르게 된다. 따라서, 이 범위 내에서 적절한 값을 선택해야 한다.

상하에 위치한 가압용 스프링은 수평방향 이동 중 전후 및 좌우 균형을 유지하도록 하기 위해 각

각 4 개씩 장착하였으며, 초기 압축량에 대해 앞 절에서 정의한 초기 변형량의 합($l_{ti}+l_{bi}$)는 10 mm 가 되도록 설계하였다. 이에 따라 가압용 롤러의 자중에 의해 변형되는 스프링의 처짐량이 결정된다. 이러한 값들을 포함하여 Table 2 와 같이 가압롤러 메커니즘에 관련한 설계변수를 도출할 수 있었다. 가압 시작 4.8 초 후면 최대 가압력은 470 N 에 도달 가능하다. 이때, 상부 스프링의 초기 변형량은 2.68 mm, 최대 가압 후 변형량은 6.5 mm 이며, 하부 스프링의 초기 변형량은 7.32 mm, 최대 가압 후 변형량은 3.5 mm 이다.

Table 2 에서 얻어진 스프링상수, 초기 길이 및 최대 이동거리 등 설계변수를 근거로 Fig. 4 와 같이 가압용 롤러 메커니즘을 제작하였다. 그리고, 가압용 롤러 메커니즘 외에 Fig. 1 에서 소개한 가이드롤러, 가열 및 냉각장치 등 실제 롤러 나노임프린트 리소그래피를 수행하기 위한 시스템이 Fig. 5 와 같이 구성되었다.

Table 1 Design constraints

Design Target	Range
Maximum force	More than 450 N
Press time (to max. force)	Within 5 s
Force resolution	Less than 2 N / 10 μ m
Deformation of springs	Less than 10 mm

Table 2 Design parameters of the press mechanism

Parameter		Designed value
Press roller	Weight (M)	7.8 kg
	Stroke	4 mm (after contact)
Stage	Maximum speed	0.833 mm/s
	Length (l_i)	40 mm
Upper spring	Stiffness(k_i)	78.5 N/mm (=19.62 N/mm \times 4)
	Initial deformation (l_{ti})	2.68 mm
Lower spring	Length(l_b)	40 mm
	Stiffness(k_b)	39.2 N/mm (=9.81 N/mm \times 4)
Force	Initial deformation(l_{bi})	7.32 mm
	Resolution	1.18 N / 10 μ m
	Maximum force	470 N (at 4 mm)

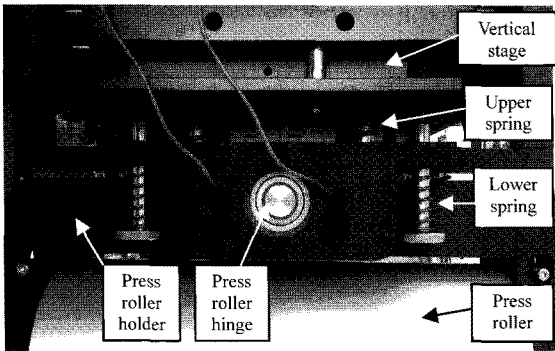


Fig. 4 Side view of the implemented press roller mechanism of the RNIL system

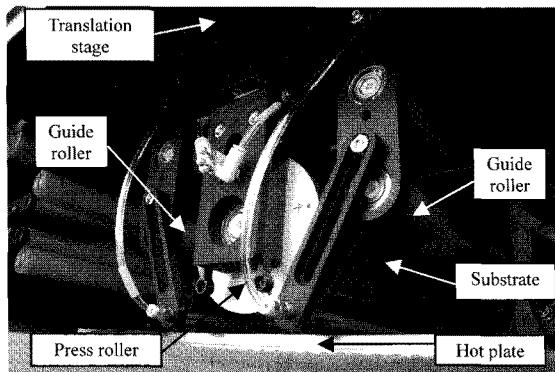


Fig. 5 Picture of roller mechanism of the RNIL system

4. 시스템 성능 평가

4.1 수직 이동에 의한 하중변화

롤러 메커니즘의 가압 성능을 확인하기 위해 가압롤러의 수직이송부의 상하 운동을 통해 인가되는 압력을 측정했으며 그 결과는 Fig. 6 과 같다. 측정결과 수직 변위의 방향전환에 따라 일종의 백래시(Backlash) 및 히스테리시스(Hysteresis) 특성을 가지며 변위의 오프셋 값으로는 약 0.3 mm, 힘의 크기로 환산하면 약 41 N 수준이다. 본 시스템의 수직이송부는 유성기어, 웜기어 등으로 이루어져 있으므로 이에 의한 백래시가 영향을 준 것으로 예상된다. 또한, 수직이송부를 이루고 있는 선형가이드에 의한 마찰과 가압롤러를 구성하고 있는 부품들의 국소적인 변형 등에 의한 영향도 이러한 비선형적인 특징에 영향을 주는 것으로 판단된다.

수직방향 변위에 따른 가압력의 비례계수는

Fig. 6 으로부터 약 130 N/mm 으로 측정되었으며, 이는 식(3) 및 Table 2 로부터 얻어지는 설계값 117.7 N/mm 보다 10% 크게 측정된 값이다.

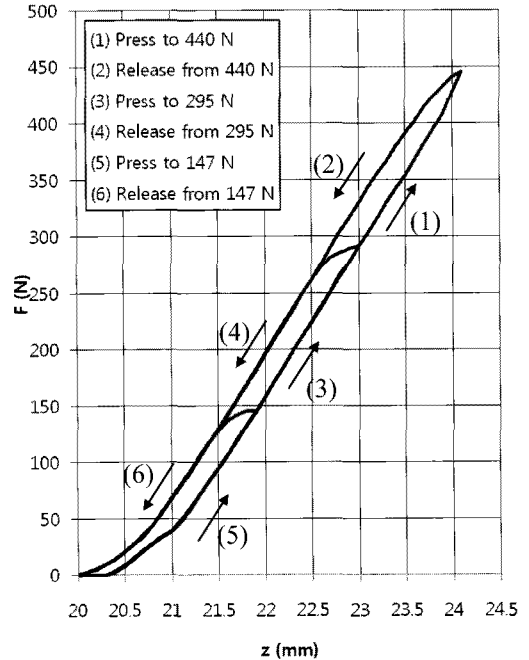


Fig. 6 Pressing force due to the displacement of the vertical slider for press roller

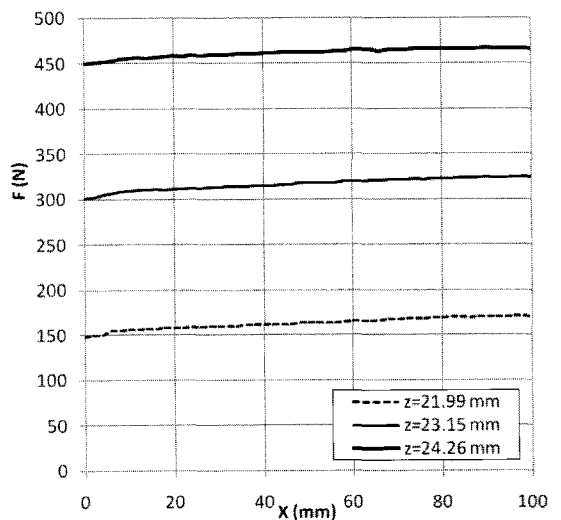


Fig. 7 Pressing force variation due to the translation displacement of the press roller. (constant vertical displacement)

4.2 수평 이동에 의한 하중변화

수직이송부를 특정위치에 오도록 하여 가압을 수행한 상태에서 가압용 롤러를 수평방향으로 이동하는 과정 중 발생하는 가압력의 변화를 측정된 결과가 Fig. 7 과 같다. 본 실험 조건에 따르면 시작위치를 기준으로 수평방향 100 mm 이동 후 가압력이 약 20 N 증가한다. 이 값을 Fig. 6 의 실험 결과를 이용하여 변위로 환산하면 약 150 μm 수준의 높이편차에 해당된다. 따라서, 스탬프 장착면의 평면도 및 롤러의 진원도 등을 포함한 높이 편차가 약 150 μm 수준임을 확인할 수 있다.

본 시스템은 3.2 절에 언급한 바와 같이 가압용 롤러홀더 연결부에 탑재된 로드셀을 통해 가압력을 측정한다. 이렇게 측정된 값으로 수직이송부의 위치를 보정함으로써 수평 이동 및 기타 요인으로 인한 가압력의 변화를 최소화 하고자 한다. 그리고, 가압 롤러의 수직 및 수평 이동을 위한 스테이지 구동, 유연기관의 공급과 장력 조절을 위한 공급 롤러의 구동, 유연기관의 회수와 위치 조절을 위한 회수 롤러의 구동, 그리고 스탬프의 가열 및 냉각 등의 기능을 포함해야 하므로 전체 시스템 운영을 위해 PLC 기반 컨트롤러를 활용하였다.

Fig. 7에서 측정된 수준의 압력변화를 보상하기 위해 가압력의 허용한계를 설정한 후 이를 벗어나는 경우에 대해 수직 이동 스테이지의 위치를 보상하는 형태로 간단한 위치제어를 수행하는 실험 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9 에 나타내었다. 가압력 기준 값은 147 N으로 설정하였고, 허용한계는 ± 1 N 및 ± 2 N으로 설정하였으며 각각에 대한 수직이동 스테이지의 위치 및 가압력의 변화를 측정하였다. 이때, 수직이동 스테이지의 반응속도를 포함한 시스템 특성에 의한 위치제어 조건을 설정하기 위해 수직위치의 보상 속도를 1 mm/min 부터 4 mm/min 까지 변화하였다. 보상속도가 느린 경우에는 Fig. 8(a) 및 Fig. 9(a)에서와 같이 급격한 압력 변화에 대해 둔감하게 반응하여 설정된 허용한계를 넘어서는 시간이 길어지며, 반대로 보상속도가 빠른 경우에는 Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)에서 볼 수 있듯이 보상이 이루어진 후 반대방향으로 허용한계를 넘어서는 경우가 발생하여 시스템이 불안정해지는 문제가 발생할 수 있다. 이를 바탕으로 가압력의 허용한계를 ± 1 N, 수직위치의 보상 속도는 2 mm/min 으로 설정한 경우, 가압 롤러가 수평방향으로 이동하는 동안 발생하는 가압력 오차는 약 ± 2 N 수준임을 확인할 수 있었다.

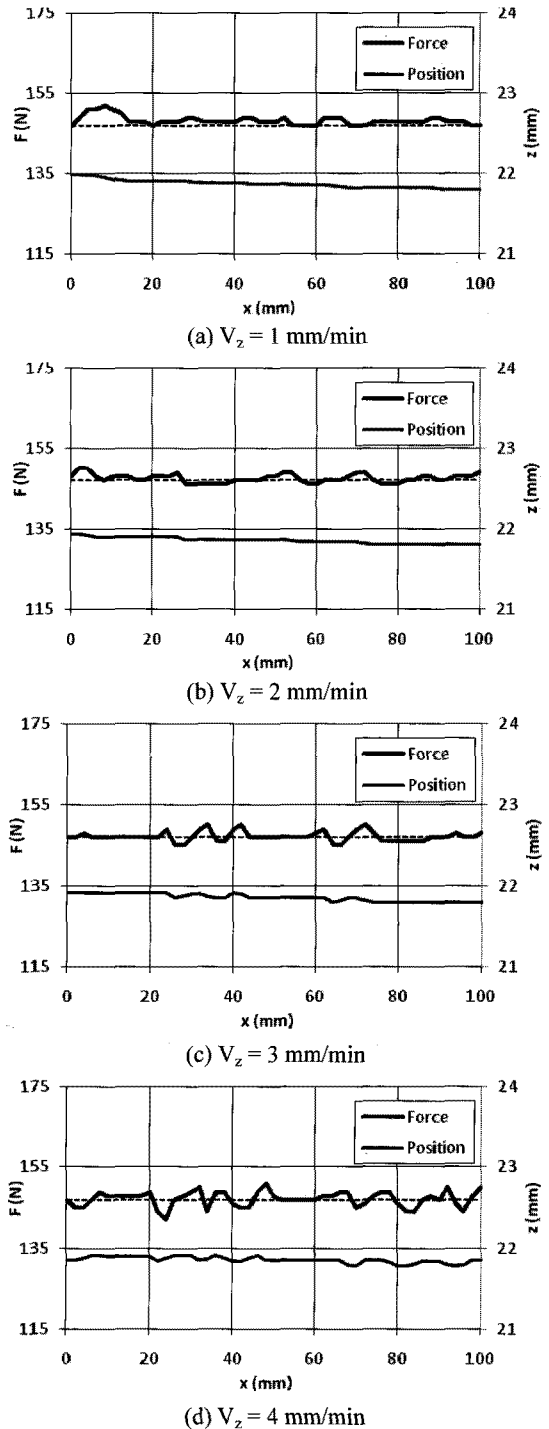


Fig. 8 Variation of the pressing force and vertical position by the translational movement of the press roller. (force compensation mode with ± 1 N of allowable pressing force error)

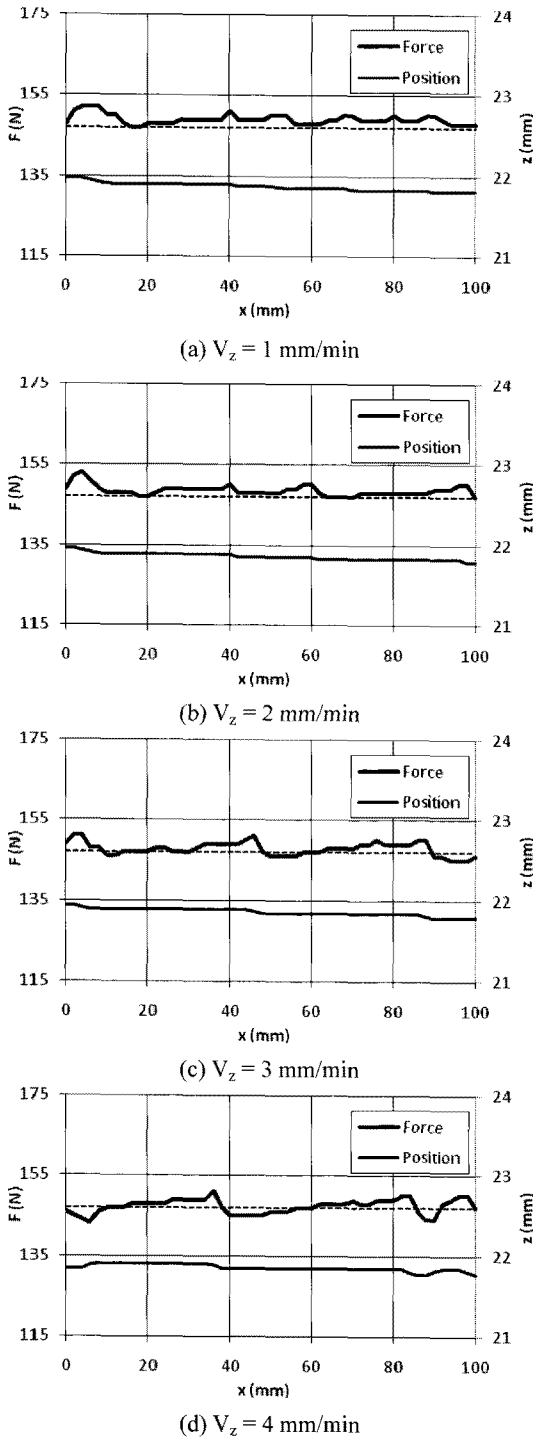


Fig. 9 Variation of the pressing force and vertical position by the translational movement of the press roller (force compensation mode with ± 2 N of allowable pressing force error)

4.3 패턴전사 결과

본 시스템의 성능 검증을 위해 스탬프에 존재하는 패턴을 유연기판에 전사하는 실험을 수행하였다. 스탬프로는 6 인치 실리콘 웨이퍼를, 유연기판으로는 두께 0.38 mm, 폭 150 mm의 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 필름을 이용하였다. 가열 조건은 가열장치 온도값 기준으로 165°C로 폴리카보네이트의 유리화온도($T_g = 150^\circ\text{C}$) 이상으로 설정하였으며, 가압력은 440 N, 가압력의 허용한계는 ± 1 N 으로 설정했다. 가압용 롤러가 가압을 수행한 후 압력 보상을 위한 수직방향 이동 속도는 2 mm/min, 연속 가압 수행을 위한 수평방향 이동 속도는 15 mm/min 이다.

Fig. 10 은 이러한 조건으로 얻어진 패턴 형상을, Fig. 11 은 반복적인 임프린트 공정을 수행함으로써 얻어진 폴리카보네이트 필름을 보여준다. Fig. 10(a)의 동심원 패턴의 선폭은 2.1 μm , Fig.10(b)의 사각형상에 대한 패턴폭은 5.9 μm 로 측정되며, 각각에 대한 스탬프 패턴폭 2.0 μm 과 6.0 μm 에 비해 5% 이내의 변형을 가짐을 확인할 수 있다.

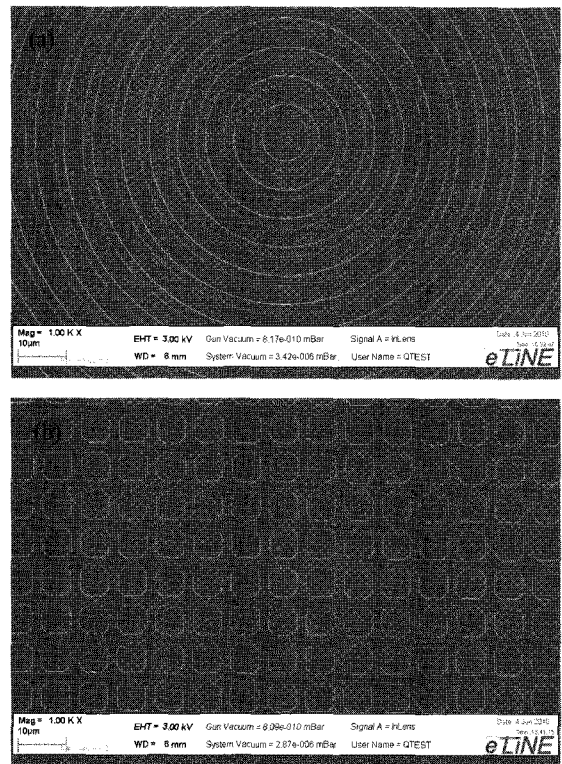


Fig.10 Transferred micro pattern images on the PC substrate by the RNIL system



Fig. 11 Micro patterned PC film by RNIL system

5. 결론

본 논문을 통해 새로운 형태의 롤러 나노임프린트리소그래피를 위한 가압 메커니즘을 설계 및 구현하였으며 가압 성능 검증과 함께 마이크로 및 나노패턴 전사를 수행하였다. 롤 기반 나노임프린트리소그래피 시스템은 다양한 소재 및 부품의 제작에서 가장 중요한 생산성 문제를 해결하기 위해 제안된 전도유망한 방법이다. 또한 유연 디스플레이, 유연 태양전지 등의 생산 공정에 적합한 방법이다. 스탬프와 기판 사이에 적절한 압력이 가해지도록 하는 롤러의 가압 메커니즘은 이를 위한 핵심 기술요소 중 하나이다. 본 논문에서는 다양한 설계 변수를 선정하고 이를 바탕으로 가압 메커니즘을 제작하였다. 본 가압 메커니즘은 Fig. 1에서 제안한 형태 외에도 유연 스탬프와 유연 기판간의 패턴 전사, 유연 스탬프와 실리콘 기판간의 패턴전사, 롤 스탬프와 유연 기판간의 패턴 전사 등 다양한 형태로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 산업계연계형 ACE 과제인 “유연스탬프기반 나노임프린트장비 응용기술 개발” 의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., “Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, No. 21, pp. 3114-3116,

1995.

2. Lee, J. J., Choi, K. B., Kim, K. H. and Park, S. Y., “Technology for the Multi-layer Nanoimprint Lithography Equipments,” *J. of KSPE*, Vol. 26, No. 6, pp. 21-25, 2009.
3. Tan, H., Gilvertson, A. and Chou, S. Y., “Roller nanoimprint lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16, No. 6, pp. 3926-3928, 1998.
4. Han, J., Choi, S., Lim, J., Lee, B. S. and Kang, S., “Fabrication of transparent conductive tracks and patterns on flexible substrate using a continuous UV roll imprint lithography,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 11, Paper No. 115503, 2009.
5. Ahn, S. H. and Guo, L. J., “Large-Area Roll-to-Roll and Roll-to-Plate Nanoimprint Lithography: A Step toward High-Throughput Application of Continuous Nanoimprinting,” *ACS Nano*, Vol. 3, No. 8, pp. 2304-2310, 2009.
6. Krebs, F. C., “Polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods: Knife-over-edge coating, slot-die coating and screen printing,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, No. 4, pp. 465-475, 2009.
7. Izu, M. and Ellison, T., “Roll-to-roll manufacturing of amorphous silicon alloy solar cells with in situ cell performance diagnostics,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 78, No. 1-4, pp. 613-626, 2003.
8. Zang, H. M. and Liang R. C., “Microcup electronic paper by roll-to-roll manufacturing processes,” *The Spectrum*, Vol. 16, No. 2, pp. 16-21, 2003.
9. Kim, C. H., Kim, M. S., You, H. I., Choi, B.-O., Lee, S.-H. and Kim, D. S., “Roll-to-Roll Contact Printer with Multiple Printing Methods,” *J. of KSPE*, Vol. 27, No. 9, pp. 7-10, 2010.