Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:3 (2018) 182~187

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.182

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

단순직선 모서리형 툴의 수평 이송 기판 상 고주기 진동압입 기반 연속적 나노패턴 생산 시스템 개발

김지엽[a], 이윤규[a], 지강민[a], 이승조[a], 문승규[a], 옥종걸[a*]

Development of Continuous Nanopattern Manufacturing System Based on High-frequency Vibrational Indentation of Flat-edge Tool on a Horizontal-feeding Polymer Substrate

Jiyeop Kim[a], Youn Kyu Lee[a], Kang Min Jee[a], Seungjo Lee[a], Seung Kyu Moon[a], Jong G. Ok[a*]

[a] *Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 April 2018
Accepted 14 May 2018

Keywords:
Vibrational indentation
Nanopatterning
Continuous process
Precision process system

ABSTRACT

We developed a continuous nanopattern manufacturing system that realizes a high-frequency vibrational indentation of a simple flat-edge rigid tool onto a horizontal-feeding polymer substrate with computer-based control. We first designed a process principle and its implementation modules, and subsequently constructed a system prototype. By controlling the tool vibration frequency and indenting force as well as the substrate feeding speed and stroke direction, we can create diverse nanopatterns with various periods and shapes including period-tunable nanogratings and multidimensional nanostructures. Such manufactured nanopatterns may be utilized in many potential applications involving precision machinery components, displays and light sources, sensors and actuators, and flexible electronics and photonics, all of which require tunable periods and shapes.

1. 서 론

마이크로-나노스케일의 주기와 형상을 갖는 정밀패턴(이하 나노패턴; nanopattern)은 정밀기계, 디스플레이 및 전자정보통신 기기, 에너지변환 소자, 바이오센서, 특수광학필름 등 여러 분야에 광범위하게 응용 연구되며 그 수요가 나날이 늘고 있다[1-5]. 이러한 나노패턴의 생산 제조에 통상 사용되어 온 진공설비 기반 리소그래피(lithography) 및 레이저간섭 관련 기술들은 복잡한 공정 및 고가의 장비를 근간으로 하며, 패턴의 주기나 형상의 변경 시 매번 마스크 형상 및 레이저간섭계를 재조정해 주어야 하는 번거로움이 수반된다. 이에 다양한 목표응용 별 여러 가지 주기 및 형상을 갖는 나노패턴의 점증하는 개발 수요에 원활히 대응하고 생산성과 확장성을 제고할 수 있는 새로운 나노패턴 제조 기술 개발이 필요한 실정이다.

이러한 점에 입각해 본 논문에서는 별도의 마스크나 몰드, 또는 복잡한 광학계의 필요 없이 단순한 직선 형상의 경질 모서리를 툴(tool)로 삼아 이의 고주기 진동을 유발시켜 그 아래로 수평 이송되는 대상 기판 상에 주기적인 압입을 가함으로써 연속적으로 나노패턴을 형성하는 공정 원리를 마련해 도입한다. 이어서 이의 정밀 구현을 위한 가공 공정 시스템의 설계 및 구축 연구와 이를 운용한

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9012
Fax: +82-2-979-7032
E-mail address: jgok@seoultech.ac.kr (Jong G. Ok).

나노패턴 제작 결과를 제시하고 향후 개선 방향 및 응용 방안을 논하고자 한다.

2. 진동압입 나노패턴 제조 공정 원리

진동압입 나노패터닝의 공정 원리 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 경도가 높은 결정성 소재를 결정면을 따라 직선 형태로 쪼개어 낸 모서리를 툴로 이용하여 이를 수직 방향으로 고주기 진동시키고, 한편으로 그 아래에서 툴의 진폭 이내의 일정한 간격을 유지하며 툴보다 연질의 기판을 수평 방향으로 정밀 이송시킨다. 이를 통해 툴 모서리가 기판 표면 상 주기적인 압입을 가하도록 함으로써 연속적인 나노패턴 제작을 수행할 수 있다.

본 공정 원리는 기본적인 선형 나노그레이팅(nanograting) 패터닝에 있어 단순한 직선 모서리를 이용한다는 점에서 해당 나노패턴의 역상 몰드(mold) 선가공 작업이 필수불가결한 대부분의 종래 나노패터닝 공정들과 차별화된다. 또한 툴의 진동 주기(f)와 기판의 이송 속도(v) 조정만으로 $\lambda=v/f$ 로 얻어지는 나노그레이팅의 주기(λ)를 다양하게 조절 가공할 수 있으며, f 또는 v의 실시간 가변 조절을 통해 한 번의 공정으로 가변주기를 갖는 나노그레이팅 제작도 가능하다[6,7]. 1차원 나노그레이팅 공정의 다차원 조합을 통한 2차원 또는 그 이상의 다차원 나노패터닝 또한 수월하게 할 수 있다[7,8]. 나아가, 직선 모서리가 아닌 특정 형상을 갖는 툴을 활용할 시 한 번의 이송 스트로크(stroke)로 특정한 다차원 나노패터닝 또한 가능하다[8]. 기판 재질은 원칙적으로 툴보다 낮은 경도를 갖는 모든 재료가 사용 가능하되, 고주기 진동 기반 단시간 내의 압입 소성가공 원리 상 높은 인성(toughness)을 갖는 연질의 폴리머 재료들이 가장 적합하다.

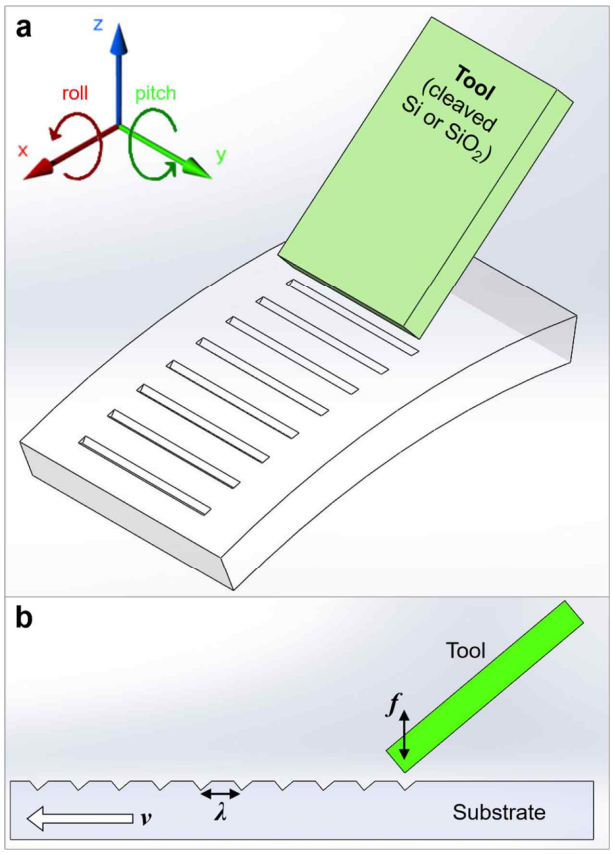

Fig. 1 Schematics of vibrational indentation-based nanopatterning principle: (a) isometric view with the coordinate, (b) front view (xz plane)

3. 진동압입 나노패턴 생산 시스템 설계 구축

상기 공정 원리를 바탕으로 한 실제적 생산제조 공정 시스템은 크게 툴 진동 모듈, 기판 이송 모듈, 그리고 이들을 정밀 구동하는 모터 제어 모듈 등으로 나누어 설계 및 구축할 수 있다. Fig. 2는 3D CAD 소프트웨어(Creo Elements/Pro (Pro/ENGINEER Wildfire 5.0), PTC, Inc.)를 이용한 전체 시스템의 조립 설계도를 나타낸다. 이 가운데, 툴의 수직 방향 고주기 진동 구현 방안 마련은 가장 중요한 점 가운데 하나이다. 툴의 수직 방향의 고주기 진동은 고속 모터에 편심질량을 장착하여 회전시켰을 때 발생하는 편심회전의 불균형으로 얻을 수 있다. 그러나 단일 편심질량 기반의 3축 편심회전 가운데, 수직(z축) 방향의 성분만을 극대화하며 좌우 또는 상하(x 및 y축) 방향 성분은 최소화하는 고려가 필요하다. 기판의 이송은 5축 자유도(x, y, z 축, roll 및 pitch 축; Fig. 1(a) 좌상단 좌표계 참조) 조절이 가능한 모터 구동 기반의 정밀 리니어 스테이지(linear stage)로 구현할 수 있으며, 이는 기존 연구에서 상세히 논한 바 있다[9]. 본 논문에서는 툴 진동 모듈 및 이를 구동하는 모터 제어 모듈의 설계 구축 과정에 대해 초점을 맞추어 다루고자 한다.

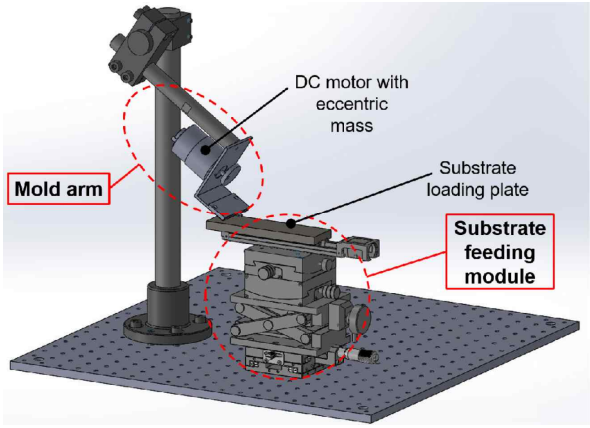

Fig. 2 3D modeling of the continuous nanopatterning system based on vibrational indentation

3.1 툴 진동 모듈의 설계 및 제작

툴 진동 모듈은 편심질량이 연결된 모터부 및 이와 브래킷(bracket)으로 체결되는 툴 탈부착부로 구성할 수 있다. 압입 진동의 주기는 모터의 회전속도에 따르며, 이와 더불어 편심질량이 압입 진폭과 힘을 좌우하게 된다. 즉, 모터의 회전속도가 빠를수록 더 고속의 진동이 발생하여 더욱 정밀한 주기의 진동 압입 패터닝이 가능하며, 이때 적당한 무게 이상의 편심질량을 통해 압입 가공을 위한 충분한 힘과 진폭을 확보할 수 있다. 따라서 모터 제원의 선정과 편심의 설계, 그리고 이를 이용한 공정 시의 진폭 및 힘의 계산 과정을 거쳐 공정에 적합한 툴 진동 모듈을 구축 제작할 수 있다.

모터를 선정함에 있어 보다 정밀하며 폭넓은 나노패턴 주기를 구현할 수 있도록 모터의 회전속도 범위를 우선순위에 두었으며, 기 구축된 기판 이송 모듈의 표준 이송속도인 6 mm/min을 고려하였을 때[9] 20,000 rpm 이상의 고속 회전 모터가 필요하다고 판단하였다. 다만 편심을 달고 회전 시 그 무게에 의해 모터의 회전 운동에 지장이 가지 않도록 980 gf cm의 견실한 토크를 가지는 모터를 선정하였다. 선정한 모터의 상세 제원을 Table 1에 나타내었다.

선정한 모터를 이용하여 불균일 회전 진동을 발생시키기 위해 필요한 편심원판을 설계 제작하였다(Fig. 3a-b). 편심원판의 재질은 모터의 성능을 최대한 활용하기 위하여 상대적으로 가벼운 금속인 알루미늄을 이용하였으며 질량은 9 g이다. 질량 대비 진폭을 극대화하기 위하여 모터 축과 결합되는 구멍을 편심원판의 가능한 한 가장자리 부근에 설계 제작하였으며, 상세 치수는 Fig. 3(b)의 도면에 표기되어 있다.

이어서, 편심원판의 모터 회전을 통한 불균일 회전 진동을 툴에 전달시킴과 동시에 툴의 탈부착부를 제공하는 브래킷을 설계 제작하였다(Fig. 3c-d). 계(system)의 전체 질량을 감소시켜 편심 회전에서 발생하는 진동에 대한 영향력을 최소화하고 진폭을 최대화하고자, 이 부분은 경량 소재(알루미늄)로 가능한 얇게 만들었으며, 이에 대한 보다 자세한 정량적 논의는 다음 절에서 다루고자 한다. Fig. 3(c)에 보이는 큰 구멍으로 툴 진동 모듈 전체를 적절한 각도로 공중에 고정할 수 있도록 각도조정 암(arm)과 연결하며, 아래의 작은 2개의 구멍 사이 공간에 직선 모서리를 가진 경질 툴을 끼운 후 툴 고정용 커버를 덮고 2개의 구멍을 통해 볼트로 체결할 수 있도록 설계 제작하였다.

공정 시스템 전체가 일체형이기에 모터의 고속 편심 회전으로 인한 진동이 시스템 전체에 전달될 수 있다. 따라서 두꺼운 진동 감쇠 고무로 시스템을 받치고, 각 모듈들을 연결하는 부분에 방진 고무를 덧대어 연결함으로써 편심 회전에 의해 발생하는 진동의 외부 전달을 최소화하는 동시에 x, y, roll 및 pitch 축 방향 시스템의 진동을 최대한 억제시켜 z 축 방향으로의 움직임만을 극대화하고자 하였다.

Table 1 Specification of a selected motor

Model: RS-750SA-8722 (Mabuchi)	
Rated Voltage (V)	DC12V
No load Speed (rpm)	24,100
No load Current (A)	3.7
Rated Speed (rpm)	21,000
Rated Torque (gfcm)	980
Rated Current (A)	23.5
Size	Φ44×60 mm
Shaft	Φ5.0×16.0 mm
Gear Boxes Available	GM60, PGM42, PGM52

3.2 진폭 및 압입 힘의 계산

툴 진동의 진폭과 기판 표면 간의 간격에 따라 기판의 압입 깊이가 결정되기 때문에 툴의 진폭은 본 공정에서 가장 중요한 역할을 담당하는 변수 중 하나이다. 진폭 X는 다음과 같은 식 (1)에 의해 계산할 수 있다[10].

$$X = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k-M\omega^2)^2+(c\omega)^2}} \tag{1}$$

여기서 m은 편심의 질량, M은 계(툴 진동 모듈) 전체의 질량이며

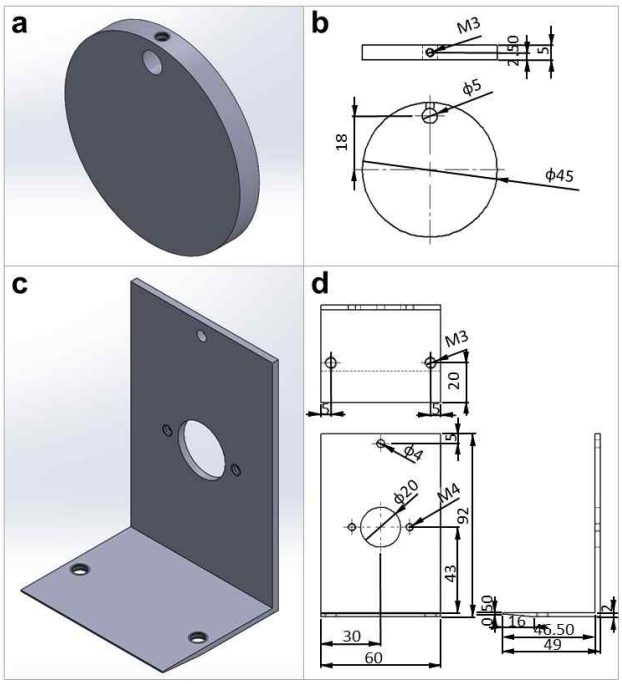

Fig. 3 2D and 3D drawings of the eccentric mass and bracket

e는 편심질량이 모터 회전축으로부터 떨어진 거리를 나타낸다. 전체 시스템 상 댐퍼(damper)가 존재하지 않기에 $c = 0$으로 계산하였다. 앞서 3.1절에서 언급한 바와 같이 브래킷의 질량을 가능한 경량화하는 등의 설계 고려로써 M의 크기를 최소화함으로써 X를 극대화시킬 수 있다. 여기서 k는 스프링상수이지만 각도조정 암 부분이 고정부이자 스프링의 역할을 한다고 가정하여 다음 식 (2)와 같은 외팔보의 등가 스프링상수 공식에 의해 계산할 수 있다[10].

$$k = \frac{3EI}{l^3} \tag{2}$$

또한 불균형 편심회전에 의해 발생하는 진동에 의한 힘의 세기는 다음과 같은 식 (3)으로 주어진다[10].

$$F_e(t) = me\omega^2 \sin\omega t \tag{3}$$

상기 계산식들을 이용하여 모터의 회전수 변화에 따른 툴의 진폭 및 압입 힘의 변화를 Fig. 4에 나타내었으며, 이는 실제 공정 시스템의 운용 시에 적용할 수 있다.

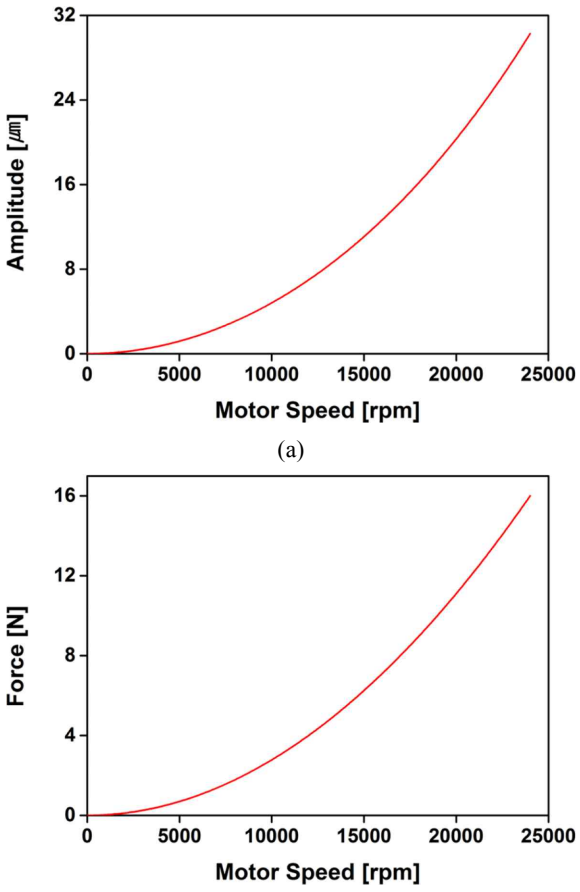

Fig. 4 Changes in amplitude and force with changes in motor speed

3.3 모터 제어 모듈 구축

모터의 회전속도는 모터에 공급되는 전압과 전류에 비례하여 조절 가능하며, 정확한 회전속도 제어는 정확한 툴 진동 발생 및 정확한 나노패터닝 공정에 직결되는 요소이다. 이 때 가장 단순하게는 파워 서플라이(power supply)에 직접 모터를 연결하여 모터에 입력되는 전압과 전류, 즉 모터의 회전속도를 파워 서플라이 상의 다이얼을 통하여 수동 제어할 수도 있지만, 매번 배선을 새로 연결해야하는 불편함과 회전속도의 정확한 정량적 변경 조절이 쉽지 않다는 점에서 진동압입 나노패턴 제조 공정의 신뢰성과 재현성확보에 제약이 따를 수 있다. 이에 본 시스템에서는 컴퓨터를 이용한 모터 제어 모듈을 설계 구축하였다. PWM (pulse with modulation) 제어 방식을 채택하였으며 제어 프로그래밍은 오픈 소스인 Arduino를 통한 코딩으로 진행하였다[11].

PWM 제어 시 사용자로부터 입력받은 속도 수치를 그대로 적용하기 위하여 모터의 최대속도인 24,100 rpm을 PWM 영역의 크기인 255로 나누어 각각 매칭되도록 코딩을 진행하였다. PWM 입력값이 1 증가할 때마다 모터의 회전속도는 94.5(= 24,100 ÷ 255)씩 증가하도록 Arduino를 통해 제어함으로써 정량적 속도 제어가 용이하다. 입 력값 Serial.parseInt()함수를 통해 입력받은 숫자 그대로 Arduino에서 처리하도록 하였으며, 입력받은 숫자가 0~255 사이일 경우에만 모터의 회전속도를 조절하도록 코딩하였다. 또한 모터의 속도 제어와 동시에 사용자에게 모터의 회전속도가 몇 rpm으로 조절되는지 동시에 시리얼 모니터 창에 출력되도록 프로그래밍하였다[11].

모터와 모터 드라이버(DMD-200, 로봇마트), 파워 서플라이, Arduino(Arduino Mega2560)의 결선도는 하단의 Fig. 5에 나타내었다. Arduino의 PWM 기능을 이용하기 위하여 전용 핀을 이용하여야 하는데, 이 때 장비 제작에 사용한 Arduino MEGA2560

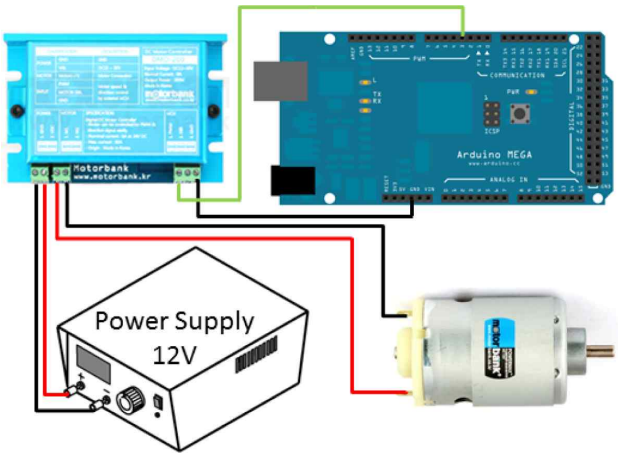

Fig. 5 Schematics of the motor control module; ports in a motor driver are GND, VDC, M1, M2, PWM, DIR, and GND in order from the left

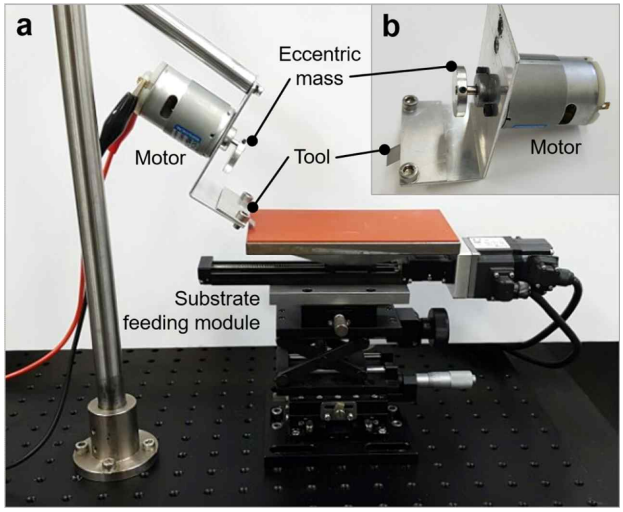

Fig. 6 Completed prototype of the continuous nanopatterning system based on vibrational indentation: (a) picture of the entire system, (b) close-up image of the motor with an eccentric mass and tool mounted

보드의 경우 2~13번 핀이 PWM 전용 핀이므로 3번 핀을 이용하여 PWM기능을 사용하였다. 모터 회전방향의 변화는 회전속도나 편심회전으로 인해 발생하는 진폭에 영향을 끼치지 않으므로 회전방향의 변환은 필요없다고 판단하여 모터 드라이버의 DIR 포트는 이용하지 않았다.

3.4 진동압입 나노패턴 생산 시스템의 완성

상기 제작한 모듈들과 기 구축된 기판 이송 모듈을 통합하여 전체 진동압입 나노패턴 생산 시스템을 완성하였다(Fig. 6). 이송 스테이지의 속도(6 mm/min = 0.1 mm/s) 및 모터의 편심회전 속도(24,000 rpm = 400 Hz)의 조합에 따라 이론상 최소 250 nm 주기(0.1 / 400 = 0.00025 mm)를 가진 나노패턴을 형성할 수 있다. 그러나 모터의 회전속도가 빨라질수록 심화되는 회전에 의한 진동이 시스템 전체에 미치는 영향 또한 증대되어 정확한 패턴 제작에 불리한 작용을 하기도 한다. 3.1 절에서 언급한 방진고무를 통한 진동감쇠를 통해서도 계 전체의 진동을 완벽히 억제할 수는 없기에 본질적으로 완전한 1축 움직임을 발생시키는 피에조 액추에이터(piezo actuator)를 이용한 개선 연구가 진행 중에 있다.

4. 진동압입 나노패턴 생산 시스템 운용을 통한 나노패턴 제조

본 진동압입 나노패턴 생산 시스템은 앞서 살펴본 공정 원리의 실제적 구현을 통해 나노패턴 샘플을 제조하는 작업을 수행한다. 즉, 선가공이 불요한 단순직선 모서리 형태의 툴을 편심질량을 장착한 모터의 회전을 통해 고속 진동시키고(툴 진동 모듈), 그 아래로 연질의 폴리머 기판을 적절한 간격을 유지하며 이송시키면서(기판 이송 모듈) 툴과 기판 간에 주기적인 압입을 일으킴으로써 나노패턴을 연속적으로 제작한다. 이 때 툴의 진폭과 진동 주기를 결정하는 중요한 파라미터인 모터의 회전은 컴퓨터 기반으로 정량적으로 정밀 제어할 수 있다(모터 제어 모듈).

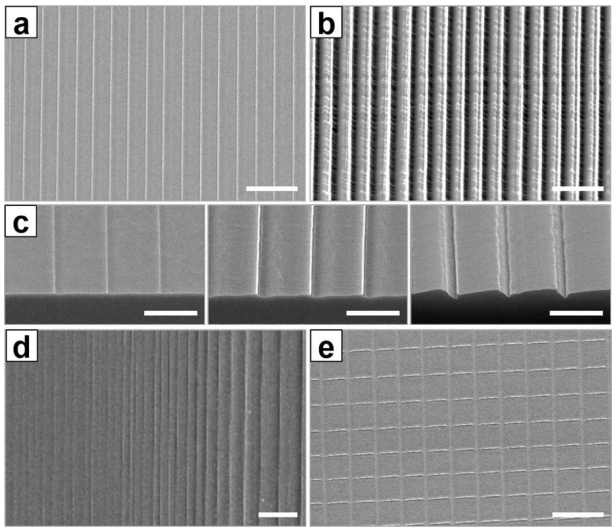

Fig. 7 Various nanopatterns manufactured by using the developed system. (a-b) 1D nanogratings with various periods and depths: (a) 3.5 μm-period, shallow nanograting fabricated on a PC film (scale bar: 10 μm), (b) 700 nm-period, deep nanograting fabricated on a PFA film (scale bar: 2 μm), (c) a set of 1 μm-period PC nanograting samples fabricated with varied indentation force (scale bars: 1 μm), (d) period-tunable nanograting fabricated by modulating the substrate feeding speed (scale bar: 10 μm), (e) 2D nanopattern fabricated by sequential combination of two nanopatterning strokes (scale bar: 5 μm)

Fig. 7은 완성된 시스템을 운용하여 다양한 주기와 형상을 갖는 나노패턴의 제조 결과들을 나타낸다. 본 연구에서 툴로는 잘 클리빙(cleaving)한 700 μm 두께의 SiO_2 웨이퍼 모서리를 사용하였고, 기판 소재는 폴리카보네이트(PC; polycarbonate) 및 PFA (perfluoroalkoxy) 필름을 이용하였다. Fig. 7(a-b)에서와 같이, 모터의 회전속도와 기판의 이송속도 등 2개의 변수를 일정한 값으로 유지하며 조합시킴으로써, 다양한 상주기(constant period)를 갖는 나노패턴을 제작할 수 있다. 툴의 진폭과 힘, 툴과 기판 간의 간격 컨트롤을 통해 나노패턴의 압입 깊이를 목표응용에 따라 얕게 또는 깊게 조절할 수 있다(Fig. 7c). 직선 모서리의 압입 원리 상, 그 결과물로 제조되는 나노패턴의 형상은 삼각 단면을 갖는 프리즘과 유사한 그레이팅, 즉 blazed grating 형태를 가짐을 알 수 있으며, 이 때의 blazed angle은 툴 진동 모듈을 지지하는 암의 각도 조정

을 통해 툴과 기판 간의 접촉각을 변화시킴으로써 다양하게 조절할 수 있다[6]. 일례로 Fig. 7(c)에 보인 결과들은 약 15°의 접촉각 기반의 진동압입을 통해 얻어진 것들이다.

1차원 상주기 나노패턴에서 나아가 모터 회전속도 또는 기판 이송속도의 실시간 조절을 통해 chirped grating 등과 같은 가변주기 나노패턴을 수월 제작할 수 있으며, Fig. 7(d)에 하나의 제작 사례를 제시하였다. 이 때 균일한 압입 깊이를 가지면서 주기만 변화시키기 위해서는 일정한 모터 회전속도, 즉 일정한 진폭을 유지하면서 기판 이송속도를 실시간 조정하는 편이 보다 적합하다. 또한 진동압입 스트로크의 다차원 조합을 통한 다차원 나노패턴도 연속적인 고속 가공이 가능하다. 일례로 Fig. 7(e)는 직교하는 두 방향으로의 진동압입 스트로크를 조합함으로써 2차원 격자형 나노패턴을 제작한 경우를 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 종래의 복잡다단하고 높은 비용의 나노패터닝 방법론 대비, 단순직선 모서리 형태의 경질 툴을 고속 진동시켜 이를 연질 기판 상에 주기적으로 압입함으로써 정밀한 미세 패터닝을 연속적으로 수행하는 단순하면서도 높은 확장성과 생산성을 갖는 공정 원리를 마련하고, 이를 실제로 구현하는 생산 공정 시스템을 설계 구축하는 과정과 이를 운용한 여러 가지 주기와 형상의 나노패턴 제작 결과를 제시하였다. 보다 정교한 진동의 컨트롤을 통해 제작 가능한 나노패턴의 주기의 대역폭을 넓히고 나노패턴 생산속도 및 면적을 제고하는 후속 심화 연구가 진행 중이다. 본 공정 기반 나노패턴 구조의 정밀기계부품, 유연전자, 특수광학필름, 투명소자 등 다양한 목표응용 별 맞춤형 응용 방안이 탐구되고 있으며, 연속적인 고속 공정 원리와 우수한 면적 확장성을 통해 위와 같은 응용 소자들의 양산 및 대면적화에 중요한 실마리를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] Seo, J. H., Park, J. H., Kim, S.-I., Park, B. J., Ma, Z. Choi, J., Ju, B. K., 2014, Nanopatterning by Laser Interference Lithography: Applications to Optical Devices, J. Nanosci. and Nanotech. 14:2 1521-1532.

[2] Ok, J. G., Shin, Y. J., Park, H. J., Guo, L. J., 2015, A Step Toward Next-generation Nanoimprint Lithography: Extending Productivity and Applicability, Appl. Phys. A 121:2 343-356.

[3] Xu, Y. H., Liu, M. L., Kong, N., Liu, J. Q., 2016, Lab-on-paper Micro- and Nano-analytical Devices: Fabrication, Modification, Detection and Emerging Applications, Microchimica Acta 183:5 1521-1542.

[4] Paik, T., Yun, H., Fleury, B., Hong, S. H., Jo, P. S., Wu, Y. T. Oh, S. J., Cargnello, M., Yang, H., Murray, C. B., 2017, Hierarchical Materials Design by Pattern Transfer Printing of Self-Assembled Binary Nanocrystal Superlattices, Nano Lett. 17:3 1387-1394.

[5] Zhang, C., Subbaraman, H., Li, Q. C., Pan, Z. Y., Ok, J. G., Ling, T., Chung, C. J., Zhang, X. Y., Lin, X. H., Chen, R. T., 2016, Printed Photonic Elements: Nanoimprinting and Beyond, J. Mater. Chem. C. 4:23 5133-5153.

[6] Ahn, S. H., Ok, J. G., Kwak, M. K., Lee, K. T., Lee, J. Y., Guo, L. J., 2013, Template-Free Vibrational Indentation Patterning (VIP) of Micro/Nanometer-Scale Grating Structures with Real-Time Pitch and Angle Tunability, Adv. Funct. Mater. 23:37 4739-4744.

[7] Ok, J. G., Ahn, S. H., Kwak, M. K., Guo, L. J., 2013, Continuous and High-throughput Nanopatterning Methodologies Based on Mechanical Deformation, J. Mater. Chem. C 1:46 7681-7691.

[8] Ok, J. G., Panday, A., Lee, T., Guo, L. J., 2014, Continuous Fabrication of Scalable 2-dimensional (2D) Micro- and Nanostructures by Sequential 1D Mechanical Patterning Processes, Nanoscale 6:24 14636-14642.

[9] Lee, S., Oh, D. K., Park, J., Kim, J. D., Lee, J. H. Ok, J. G., 2016, Development of a High-throughput Micronanopatterning System Based on the Plastic Deformation Driven by Continuous Rigid Mold Edge Inscribing on Flexible Substrates, J. KSMTE 25:5 368-372.

[10] Thomson, W. T., Dahleh, M. D., 1997, Theory of Vibrations with Applications(5th Edition), Pearson, USA.

[11] Ryu, K. J., Kim, D. R., Seo, H. J., 2016, Arduino Uno Motor Control Programming, Ohm, Seoul.