

롤압연, 압출, 단조 등 전통 기계가공법의 모사 응용을 통한 다양한 나노패턴의 대면적 연속생산 기술 구현

옥종걸^{a*}, 곽문규^b, L. Jay Guo^c

Development of Continuous and Scalable Nanomanufacturing Technologies Inspired by Traditional Machining Protocols Such as Rolling, Pullout, and Forging

Jong G. Ok^{a*}, Moon Kyu Kwak^b, L. Jay Guo^c

^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743 Korea

^b Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University
80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea

^c Department of Mechanical Engineering; Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan,
1301 Beal Ave., Ann Arbor, MI 48109, United States

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 January 2015
Revised 29 January 2015
Accepted 6 February 2015

Keywords:

Nano-patterning
Nano-manufacturing
Continuous process
Roll-to-Roll
Mechanical machining process

ABSTRACT

We present a series of simple but novel nanopatterning methodologies inspired by traditional mechanical machining processes involving rolling, pullout, and forging. First, we introduce roll-to-roll nanopatterning, which adapts conventional rolling for continuous nanopatterning. Then, nano-inscribing and nano-channel lithography are demonstrated, whereby seamless nanogratings can be continuously pulled out, as in a pullout process. Finally, we discuss vibrational indentation micro- and nanopatterning. Similarly to the forging/indentation process, this technique employs high-frequency vertical vibration to indent periodic micro/nanogratings onto a horizontally fed substrate. We discuss the basic principles of each process, along with its advantages, disadvantages, and potential applications. Adopting mature and reliable traditional technologies for small-scale machining may allow continuous nanopatterning techniques to cope with scalable and low-cost nanomanufacturing in a more productive and trustworthy way.

1. 서론

나노구조(nanostructure) 및 나노패턴(nanopattern)은 최근 들어 전자 및 의료 소재, 에너지 및 센싱 소자, 기능성 광학 및 특수 표면 필름 등 여러 분야에 활발히 응용되고 있다^[1]. 그러나 복잡다단하고 높은 비용과 많은 시간이 요구되기 마련인 나노공정

(nanofabrication)에만 의존해서는 점증하는 나노패턴의 수요와 새로운 대면적 지향 응용 분야 발굴에 대응하기 어렵다. 따라서 이제는 나노패턴을 저비용 고효율로 보다 넓은 면적에 빠르게 형성하는 나노생산(nanomanufacturing)으로의 진일보가 요구되는 시점이다.

이러한 나노패턴의 효율적인 생산을 위해서 기존에 확립 성숙

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9012
Fax: +82-2-979-7032

E-mail address: jgok@seoultech.ac.kr (Jong G. Ok).

되어 범용되고 있는 전통적인 기계가공법에 주목할 필요가 있다. 예컨대, 압연, 압출, 단조 등의 검증된 기계가공법을 새로운 나노공정에 융합 접목시킴으로써, 공정방법론과 단가가 아직 완전히 안정되지 않은 미시스케일에서의 패턴 가공 기술에 보다 높은 생산성과 신뢰도를 부여할 수 있다. 특히, 이러한 기계가공법들은 이미 여러 산업의 생산제조 라인에 널리 쓰이고 있는 것으로도 알 수 있듯이 모두 연속적인 공정이 가능하기에, 이에 기반한 미세정밀 패턴링 역시 양산성이 높은 연속 공정화가 용이하다는 장점이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 롤압연(rolling)과 유사한 롤투롤(R2R: roll-to-roll) 나노패터닝, 압출(pullout)에 착안한 나노각인(nano-inscribing) 및 나노채널 리소그래피(nano-channel lithography), 그리고 단조(forging)에서 힌트를 얻은 진동압입 마이크로-나노패터닝(vibrational indentation micro- and nano-patterning) 등, 전통 기계가공법의 창의적인 모사를 바탕으로 한 세 가지의 연속적 대면적 나노패터닝 기술을 소개하고 특징과 장단점을 다룬다.

2. 롤압연 기반의 롤투롤 나노패터닝

2.1 공정 원리 및 특징

R2R 나노패터닝 기술(Fig. 1)^[2]은 유연한 소재의 스탬프를 둥근 롤에 감아 대상 기판에 접촉시킨 다음 롤압연과 유사하게 일정한 힘을 가한 상태에서 롤을 굴리면서 연속적으로 대상 기판에 스탬프의 반대 형상을 찍어내게 된다. Fig. 1의 경우, PDMS (polydimethylsiloxane) 소재의 유연 몰드를 사용해 직경 1.5-5 μm 대의 dot 패턴을 찍어낸 예시이다. 이때 대상 기판의 효과적인

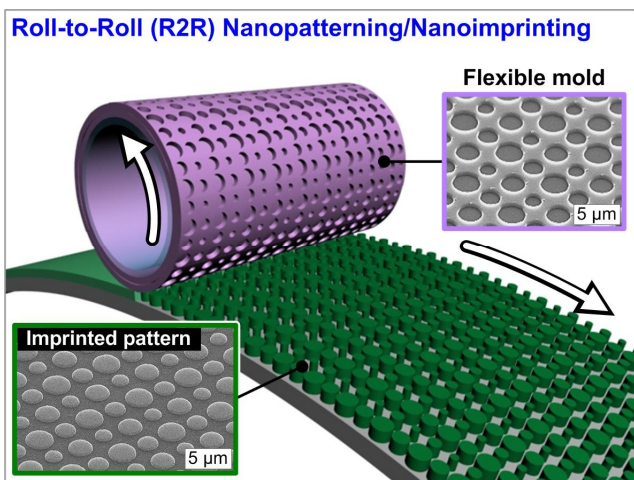


Fig. 1 Schematic illustration and representative SEM (scanning electron microscopy) images of resulting patterns of Roll-to-Roll Nanopatterning^[2]

스탬핑을 위해 대개 UV-광경화성 레진을 도포하고 롤링 공정으로 패턴링이 됨과 동시에 UV를 조사하여 경화시켜 완성한다. 레진이 몰드 쪽으로 떨어져 나오지 않고 기판 위에 잘 붙어있도록 하기 위해 종종 몰드와 기판에 각각 이형 보조 코팅 및 접착력 강화 코팅을 적용하기도 한다^[1].

R2R 나노패터닝은 경성 및 연성 기판 모두에 적용할 수 있으며 다양한 형상의 스탬핑을 연속적인 롤링을 통해 넓게 이어나갈 수 있다는 장점이 있다. 그러나 원하는 크기의 직경과 원통폭을 갖는 롤을 감쌀 수 있는 넓은 사이즈의 스탬프 몰드(mold)를 제작하는데 초기 비용과 시간이 소요되며, 이러한 유연 스탬프가 롤에 한 바퀴 감긴 후 만나 봉합되는 곳에 필연적으로 발생하는 이음매(seam) 또한 그대로 찍혀 나온다는 문제가 있다.

2.2 공정 개선 노력: 대면적 몰드의 제작 및 이음매 문제 보완

이러한 R2R 나노패터닝의 문제를 해결하기 위한 방안이 크게 두가지 방향으로 모색되고 있는데, 보다 넓은 몰드의 제작 및 이음매의 불가시화(또는 최소화)가 그것이다. 4인치에서 6-8인치, 12인치 등으로 나노공정 표준이 증대되는 발전에 힘입어 전자의 경우 Step-and-Flash(Step-and-Repeat)^[3], ArF Lithography^[4] 등 다양한 전략이 개발되고 있다. 여기서는 후자, 즉 개개의 비교적 작은 마스터 몰드를 마치 큰 벽에 타일 붙이듯이 잘 이어붙이되 사이사이의 이음매가 보이지 않도록 하여 사실상 더 큰 몰드로 사용 가능하게 만드는 기술 가운데 한 가지를 소개하고자 한다.

불가시타일링(VTT: visually tolerable tiling)로 명명된 기법(Fig. 2)^[5]에서는 적절한 레진을 사용해 작은 몰드를 반복적으로 타일링하듯 찍어 큰 몰드로 만드는데, 각 타일의 스탬핑되는 영역이 서로 약간씩 겹치게 한다. 즉, 레진을 도포해 하나의 타일을 찍고 경화한 후 다음 타일을 찍기 위해 레진을 이웃 영역에 다시 도포하는 과정에서, 경화 전의 레진이 기 경화된 레진 패턴 영역 위에서

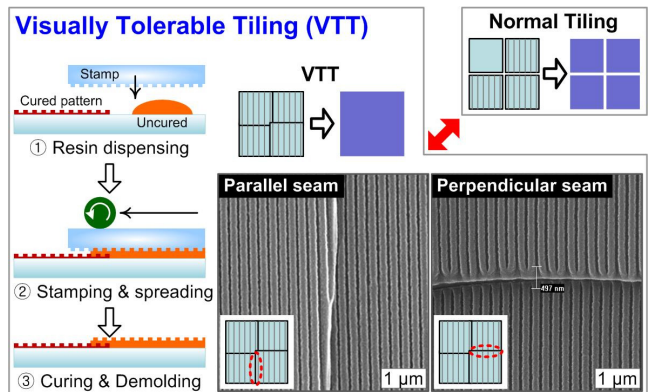


Fig. 2 Visually Tolerable Tiling (VTT) strategy to make a flexible large-area master mold by stamping small-area pattern tiles in a slightly overlapped fashion^[5]

퍼져나가지 않고 맺히는(dewetting) 특성을 갖게끔 조절하여 적절한 조건 하에 스탬핑을 하고 경화시키면 Fig. 2에서 보이듯이 이음매 영역을 500 nm 이하 수준으로 유지할 수 있다. 이렇듯 눈에 보이지 않는(visually tolerable) 이음매를 갖는 대면적 몰드를 상대적으로 간편하게 제작함으로써, 다양한 광학 필름이나 디스플레이 등의 R2R 생산에 효율적으로 대응할 수 있다.

3. 압출 기반의 나노각인 및 나노채널 리소그래피

3.1 공정 원리 및 특징

압출 공정으로부터 착안한 나노각인(Fig. 3)^[6] 및 NCL 기술은 나노패턴 형상을 포함한 날카로운 직선 모서리를 생성한 것을 보다 연질의 기판에 접촉한 후 일정 온도와 압력을 가한 상태로 수평 방향으로 끌어낸다. Fig. 3의 우측 SEM 사진에 예시하였듯이, 패턴의 형상(깊이 등)은 사용 기판의 탄성계수(modulus), 몰드와 기판 간에 가한 힘, 그리고 공정 온도 등으로 조절이 가능하다. 공정상의 차이로서 나노각인은 대상 기판(substrate)으로서 단순히 연질의 고체 폴리머 등을 사용하고, NCL은 이어서 설명하듯 광경화성 레진을 도포한 연질 기판을 사용한다.

이러한 혁신적 공정 원리는 큰 면적의 몰드가 아닌 2차원의 패턴된 엣지(edge)만으로도 이음매 없는(seamless) 그레이팅(grating) 패턴을 원하는 길이로 뽑아내는 것을 가능케 한다. 또한, 2차원 접촉 방식이므로 직선 형상 뿐만 아니라 곡선, 꺾임 형태 및 곡면 표면에 패턴이 가능하다는^[1] 이 때 몰드 엣지와 기판 표면 간의 평행 맞춤(alignment)이 중요하며, 반복 공정 후에는 다소 무뎠지는 엣지를 새로 생성할 필요가 있다. 또한 나노각인과 같이 고체 기판의 소성변형에만 의존하는 경우, 몰드 엣지가 지나간 후의 탄성회복(elastic recovery)으로 인하여 최종 패턴 형상이 약간 내려앉게 된다.

3.2 NCL: 고종횡비 그레이팅의 연속 제작

이러한 나노각인의 문제점을 보완하여 NCL 기술(Fig. 4)^[7]에서

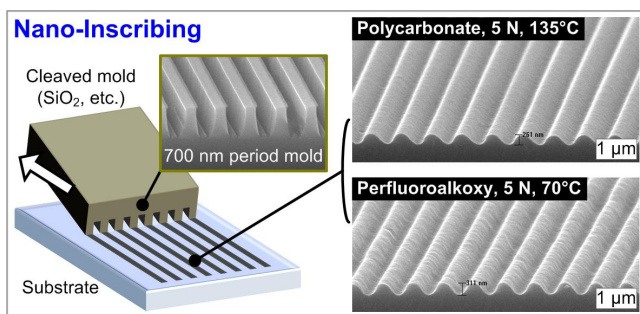


Fig. 3 Nano-Inscribing scheme with a well-cleaved SiO₂ mold containing 700 nm period grating pattern

는 고종횡비(high aspect ratio)를 갖는 그레이팅을 얻을 수 있도록 기판에 적절한 점성을 갖는 액체 광경화성 레진을 도포한 뒤 긁는다. 이때 점성 액체 박막 및 그 하부의 고체 기판이 동시에 패턴닝이 되는데, 몰드와의 접촉부를 빠져나오는 출구 쪽에서 곧바로 UV를 조사해 액체 패턴 부분이 고체 패턴 위에서 흘러내리기 전에 경화시켜 완성한다. 여기서 중요한 점은 액체 패턴이 경화되기 전까지 하부의 고체 패턴 위에 잘 머물러야 한다는 점이며, 이를 위해 해당 기판 위에서 높은 접촉각을 갖는 광경화성 점성 액체를 사용하게 된다. 좋은 예로서 Fig. 4에서는 SSQ(epoxy-silsesquioxan)를 UV 경화성 점성 레진으로, PFA(perfluoroalkoxy)를 하부 기판으로 사용하였는데, SSQ의 PFA 표면 상의 접촉각은 70°에 달할 정도로 높게 형성되므로, 막 패턴된 SSQ가 경화될 때까지 PFA 표면 위에 잘 머무를 수 있게 된다. 고체 패턴만을 사용하는 나노각인에 비해 액체 패턴까지 없어진 NCL에서는 더 높은 종횡비를 갖는 그레이팅을 만들 수 있어(Fig. 4) 편광판, 도광판 등에 보다 적합한 응용이 가능하다.

4. 단조 기반의 진동압입 마이크로-나노패터닝

4.1 공정 원리 및 특징

(앞서의 두 기술의 한계이기도 한) 나노패턴의 선행가공(prefabrication) 없이, 단순 직선 형상의 툴(tool) 엣지를 고속 수직 진동시키면서 수평 이동되는 연질 기판에 주기적으로 단조 압입 시킴으로써 그레이팅 패턴을 연속적으로 형성해 내는 기술이 VIP(vibrational indentation(-driven) patterning)이다(Fig. 5)^[8]. 전적으로 기계적 변형을 바탕으로 하므로 툴보다 경도가 낮은 어떤 연질 물질 위에도 자유로이 패턴을 생성할 수 있어, 예컨대 여타 방법으로는 직접적인 패턴 형성이 쉽지 않은 폴리이미드(polyimide 또는 Kapton) 필름도 적용이 가능하다.

이러한 VIP 기술의 특징점으로서, 수직 진동수 및 기판 이동 속

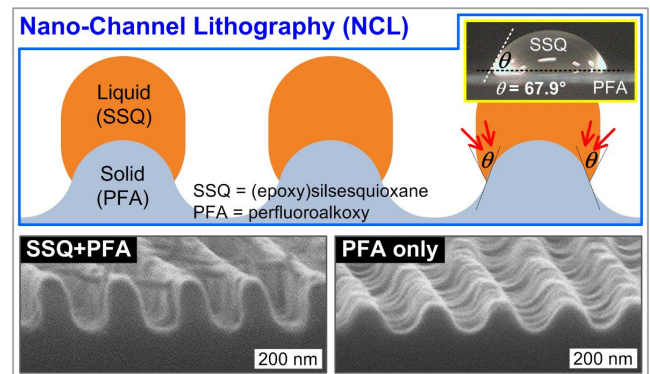


Fig. 4 Schematic explanation and comparative SEM images of Nano-Channel Lithography^[7]

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었다.

References

- [1] Ok, J. G., Ahn, S. H., Kwak, M. K., Guo, L. J., 2013, Continuous and High-Throughput Nano-patterning Methodologies Based On Mechanical Deformation, *J. Mater. Chem. C*, 1:46 7681-7691.
- [2] Ok, J. G., Youn, H. S., Kwak, M. K., Lee, K.-T., Shin, Y. J., Greenwald, A., Liu, Y., Guo, L. J., 2012, Continuous and Scalable Fabrication of Flexible Metamaterial Films Via Roll-to-Roll Nanoimprint Process for Broadband Plasmonic Infrared Filters, *Appl. Phys. Lett.*, 101:22 223102.
- [3] Resnick, D. J., Sreenivasan, S., V., Willson, C. G., 2005, Step & Flash Imprint Lithography, *Materials Today*, 8 34-42.
- [4] Ito, T., Okazaki, S., 2000, Pushing the Limits of Lithography, *Nature*, 406:6799 1027-1031.
- [5] Kwak, M. K., Ok, J. G., Lee, S. H., Guo, L. J., 2015, Visually Tolerable Tiling (VTT) for Making Large-area Flexible Patterned Surface, *Materials Horizons*, 2:1 86-90.
- [6] Ahn, S. H., Guo, L. J., 2009, Dynamic Nanoinscribing for Continuous and Seamless Metal and Polymer Nanogratings, *Nano Letters*, 9:12 4392-4397.
- [7] Ok, J. G., Park, H. J., Kwak, M. K., Pina-Hernandez, C. A., Ahn, S. H., Guo, L. J., 2011, Continuous Patterning of Nanogratings Bby Nanochannel-guided Lithography on Liquid Resists, *Adv. Mater.*, 23:38 4444-4448.
- [8] 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/Nano-scale Grating Structures With Real-time Pitch and Angle Tenability, *Adv. Funct. Mater.*, 23:37 4739-4744.