

# 나노 복화(複畵)공정을 이용한 PDMS 스탬프 제작

박상후\* · 임태우\* · 양동열† · 공홍진\*\*

(2003년 11월 25일 접수, 2004년 4월 20일 심사완료)

## Fabrication of a PDMS (Poly-Dimethylsiloxane) Stamp Using Nano-Replication Printing Process

Sang Hu Park, Tae Woo Lim, Dong-Yol Yang and Hong Jin Kong

**Key Words :** Nano-Replication Printing Process(nRP, 나노 복화공정), Two-Photon Polymerization(이광자흡수 경화), Stamp(스탬프), Femtosecond Laser(펨토초 레이저)

### Abstract

A new stamp fabrication technique for the soft lithography has been developed in the range of several microns by means of a nano-replication printing (nRP) process. In the nRP process, a figure or a pattern can be replicated directly from a two-tone bitmap figure with nano-scale details. A photopolymerizable resin was polymerized by the two-photon absorption which was induced by a femtosecond laser. After the polymerization of master patterns, a gold metal layer (about 30 nm thickness) was deposited on the fabricated master patterns for the purpose of preventing a join between the patterns and the PDMS, then the master patterns were transferred in order to fabricate a stamp by using the PDMS (poly-dimethylsiloxane). In the transferring process, a few of gold particles, which were isolated from the master patterns, remained on the PDMS stamp. A gold selective etchant, the potassium iodine (KI) was employed to remove the needless gold particles without any damage to the PDMS stamp. Through this work, the effectiveness of the nRP process with the PDMS molding was evaluated to make the PDMS stamp with the resolution of around 200 nm.

### 1. 서론

반도체, 정보통신, 바이오 산업에서 나노 기술을 응용한 제품개발에 대한 연구가 최근 가속화되고 있으며, 그 중에서도 저비용, 대량생산이 가능한 나노/마이크로 기술 개발에 많은 연구들이 진행되고 있다. 이러한 나노 공정의 대표적인 사례로는 수정유리 스탬프 (quartz glass stamp)와 UV 광을 이용한 나노 임프린트 공정<sup>(1)</sup>과 폴리디메틸실록산 (polydimethylsiloxane)(PDMS) 스탬프를 이용한 소프트 리소그래피 (soft lithography) 공정<sup>(2,3)</sup>이 최근 까지 다양하게 개발되고 있다. 현재까지 제품개발에 직접적으로 초소형 구조물 제작에 사용되는 대

부분의 공정기술은 반도체 공정을 기반으로 하는 마이크로/나노머시닝 기술 (MEMS/NEMS)에 중심을 두고 있다. 이러한 기술들은 초소형 제품의 개발에 상당한 역할을 해 왔으며 자동차 에어백 센서, 유압센서 등의 측정산업에서 반도체, 디스플레이 산업까지 다양한 적용사례를 만들었다. 그러나 공정의 특성상 일반적으로 마스크 (mask)를 이용한 패터닝 (patterning)과 에칭 (etching)공정을 반복적으로 사용하기 때문에 재료의 손실이 크다는 단점과 나노급 정밀도 구현이 다소 어려운 문제점이 있다. 그리고 복잡한 형상이나 완전한 자유표면을 가지는 3 차원 형상을 제작하기에는 상당한 어려움이 존재한다. 따라서, 최근 다양한 연구들을 통하여 이러한 단점을 극복하기 위해 직접적으로 패턴을 제작하여 빠른 시간에 저비용으로 대량생산을 할 수 있도록 스탬프 (stamp)로 찍어서 나노 구조물을 제작하는 공정에 대한 연구가 집중되고 있다.<sup>(1-6)</sup>

소프트 리소그래피 공정은 제작된 마스터를 이용하여 PDMS 로 역 패턴 스탬프를 제작하고 제작

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : dyyang@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3214 FAX : (042)869-3210

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 물리학과

된 PDMS 스탬프에 자기조립 단량체 (self assembled monolayer)(SAM)를 증착시킨 뒤 원하는 곳에 전사하여 패턴제작을 하거나 직접적으로 스탬프에 금속을 도포하고, 물리적 가압을 하여 금속패턴을 복제하는 다양한 방법이 개발되고 있다<sup>(4)</sup>. 이러한 소프트 리소그래피의 장점으로는 마스터 패턴을 반복적으로 복제하여 사용함으로써 저비용의 생산이 가능한 것이다. 이러한 공정이 원활하게 활용되기 위해서는 나노급 정밀도를 가지는 마스터 패턴 제작을 저 비용으로 빠르고 쉽게 제작하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재까지는 전자빔 리소그래피 공정 (electron-beam lithography)을 이용하여 대부분 마스터 패턴을 제작하고 있으며 정밀도는 선 폭이 수십 나노 수준으로 우수하지만 공정비용이 고가인 단점이 있다.

본 연구에서는 나노 복화공정 (nano replication printing (nRP) process)을 이용하여 마스크 없이 직접적으로 패턴링 할 수 있는 방법을 제시하였으며, 제작된 마스터를 이용하여 Fig. 1 과 같이 PDMS 스탬프를 제작방법을 제시하였다. 본 연구에서 사용된 나노 복화공정은 펄스초 레이저의 이광자 흡수현상 (two-photon absorbed polymerization)<sup>(9-12)</sup>을 이용하여 흑백의 비트맵 (bitmap) 그림파일을 이용하여 직접적으로 선 폭이 200 nm 수준의 정밀도를 가지는 형상으로 제작하기 때문에 CAD 데이터 없이 복잡한 형상을 패턴링을 할 수 있는 장점이 있으며, 전자빔 리소그래피를 이용한 공정에 비하여 저렴한 가격으로 마스터 패턴 제작이 가능하다. 제작된 패턴을 이용한 PDMS 스탬프 제작방법을 제시함으로써 향후 소프트 리소그래피에 응용이

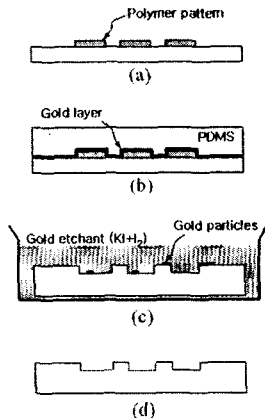


Fig. 1 Schematic fabrication process of PDMS mold using a nano replication printing (nRP) and etching process; (a) direct patterning on glass plate by the nRP process and (b) PDMS molding after thin gold layer deposition on the patterns; (c)-(d) etching process to remove residual gold particles on the PDMS mold and a finished PDMS mold

가능할 것으로 사료된다.

## 2. 나노 복화공정

### 2.1 나노 복화공정의 장치구성

Fig. 2 에는 본 연구에서 개발한 장치의 전체구성에 대하여 나타내었는데, 레이저는 펄스초 펄스를 갖는 티타늄-사파이어 레이저 (Ti-Sapphire mode-locked laser)를 사용하였으며, 작동주파수는 80 MHz, 펄스 폭은 80 fs 이하이며, 파장은 780 nm 이다. 24 nm 분해능을 가지는 갈바노미러 방식의 스캐너 (scanner)(Galvano-mirror)를 사용하여 레이저의 x, y 방향을 제어하고, 100 nm 분해능으로 제어되는 피에조 스테이지 (piezo-stage)를 장착하여 z 축 방향을 제어하도록 하였다. 또한, 서티와 스캐너 그리고 피에조 스테이지는 프로그램에 의하여 제어되도록 하였다. 레이저 빔의 거동과 패턴링 작업과정을 시각적으로 확인하기 위하여 고 배율 렌즈가 부착된 카메라를 이용하여 모니터링 하도록 하였다. UV 광에 경화되는 광경화 레진은 0.1 mm 두께의 커버 글래스 위에 주사바늘을 이용하여 극소량 방울 형태로 묻혀서 사용하며 용량은 공정에 상관이 없다. 그리고 대물렌즈와 커버 글래스 사이에 유리와 굴절률이 동일한 오일 (immersion oil)을 넣어 공기와 접촉을 차단함으로써 레이저 광이 대물렌즈를 통과한 이후에도 굴절률 변화로 인한 문제가 없도록 하였다.

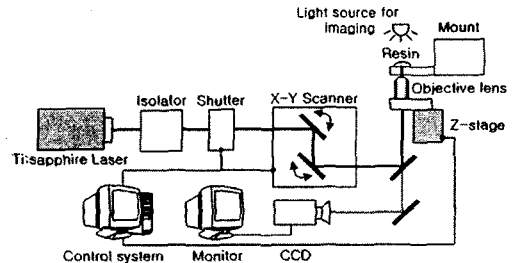


Fig. 2 Schematic diagram of the nano-replication printing system

Table 1 Principal specifications of the nano-replication printing system

ITEMS	MODEL	MAKER
fs Laser	Mai Tai	Spectra-Physics
Isolator	BB8-51	Electro-Optic Tech
Scanner	Scanjet 2	Scanlab
Shutter	6800HP	Cambridge Tech. Inc.
Z-stage	P-762.ZL	PI
X/Y stage	X/Y stage	Namil
Objective lens	100X, NA 1.25	
Glass plate	Cover glass	Fischer

서터의 속도는 생성되는 패턴의 정밀도와 관련이 있으며, 속도가 빠를수록 높은 정밀도를 구현할 수 있다. Table 1 에는 시스템의 주요 부품에 대한 사양을 나타내었다. 시스템의 각 부품별 분해능과 작동원리에 대하여 살펴보면, 티타늄-사파이어에서 발진된 레이저 광은 아이솔레이트와 2 ms 까지 개폐가 가능한 갈바노미러 방식의 서터를 지나서 입력 데이터에 따라 x, y 축 위치를 스캐너 (Galvano-mirror)에 의하여 제어하게 된다. 여기서 스캐너의 분해능은 1 스템프 약 24 nm 로 계산되었다. 이 때 레이저 광의 초점은 z 축 스테이지를 조절하면서 고배율 렌즈가 부착된 카메라를 통하여 반사된 레이저 빔을 시각적으로 확인하면서 초점 위치와 이광자 흡수 (two-photon absorption)(TPA)에 의한 경화현상을 파악하도록 하였다. 본 연구에 사용된 광경화 레진은 우레탄 아크릴레이트 (urethane acrylate) 계열의 단량체 (monomer)에 이광자 흡수 색소인 TP-Flu-TP2 를 0.1 %(w/w) 넣어서 만든 것이다. 흡수와 형광 스펙트럼을 분석한 결과 최대 흡수 및 형광 방출 파장이 411 nm 와 452 nm 에서 각각 나타났다.<sup>(13)</sup> 따라서 452 nm 파장을 갖는 빛이 방출될 때 레진 속에 있는 광 개시제 (photoinitiator)가 라디칼 (radical)을 형성하여 활성성을 가진다. 따라서 800 nm 파장의 레이저 빔을 광 경화수지에 조사할 때 단일 광자 흡수에서는 고화가 되지 않고 이광자 흡수에 의해서만 라디칼이 생성되어 아크릴계 수지가 중합됨으로서 경화가 일어나게 된다.

2.2 이광자 흡수현상에 의한 경화이론

이광자 흡수현상은 물질이 두 개의 광자를 동시에 받아들여 광자에너지가 두 배로 큰 에너지로 흡수되는 현상을 말한다. 즉, 이광자에 의하여 파장이 반으로 줄어든 하나의 광자처럼 흡수되는 현상을 말한다. 따라서 파장이 400 nm 에 반응하는 광경화 레진의 경우에는 800 nm 파장대를 가지는 펄스 레이저에 의한 이광자 흡수 조건에서만 경화된다.

레이저 광이 대물렌즈에 의하여 초점이 맺어지게 되면 초점부에는 광자 밀도 (photon density)가 높아지게 되며 재료가 단일광자를 흡수하는 방식에서는 광의 단면에서 강도 (beam intensity)의 합산은 일정하기 때문에 광학적인 광자 밀도에는 영향을 받지 않게 된다. 그러나 펄스 레이저에 의한 이광자 흡수 확률은 광자 밀도의 제곱에 비례하여 발생하기 때문에 비선형성을 가진다. 이러한 비선형 이광자 흡수에 의한 경화는 빔의 초점부 중 출력력이 높은 일부분에서만 발생하므로 빔의 회절한계 이하의 형상을 만들 수 있다.<sup>(8-12)</sup> 경화되는 복

셀 (voxel)의 크기를 나타내면 식(1), (2)와 같이 표현된다.<sup>(7,10)</sup>

$$d(P,t) = 2r_{z=0} = w_0 \left\{ \ln \left( \frac{4P^2t}{\pi^2 w_0^4 E_{th}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

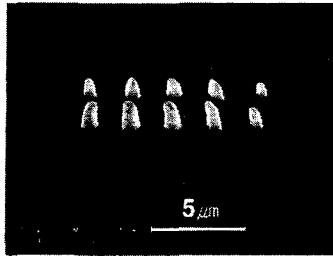
$$l(P,t) = 2z_{r=0} = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \left\{ \left( \frac{4P^2t}{\pi^2 w_0^4 E_{th}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, *d* 는 복셀의 직경, *l* 은 복셀의 길이를 의미하며, *P* 는 레이저 광의 출력 (power), *t* 는 조사시간 (exposure time), *w*<sub>0</sub> 는 레이저 광의 초점부의 반경, *E*<sub>th</sub> 는 이광자 흡수에 의하여 경화가 되는 임계에너지 (threshold energy)를 각각 의미한다. 따라서, 레이저 출력이 작을수록 그리고 조사시간이 짧을수록 복셀의 크기가 작아져서 정밀한 형상을 얻을 수 있다.<sup>(14)</sup> Fig. 3 에는 단위 복셀의 형상을 5 mW 레이저 출력에서 조사시간을 달리하여 만든 것을 나타내었다. 레이저 조사시간이 길어질수록 복셀의 크기가 증가하지만 일정시간 이상에서는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 이광자 발생이 시간의 함수이기도 하지만 레이저의 출력에 영향을 받기 때문에 특정 출력에서 복셀의 크기는 거의 정해지는 것으로 사료된다.

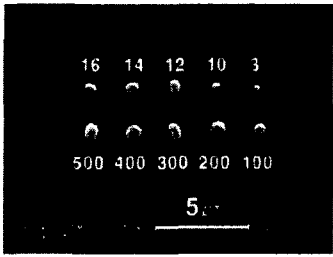
또한, 레이저의 출력에 따른 실험에서 출력이 클수록 복셀의 크기도 증가하였고, 본 연구에서 복셀 생성을 위한 최소의 레이저 출력은 3-4 mW 로 나타났지만 조사시간에 따라 국부적으로 생성이 되지 않는 경우가 발생하여 안정적으로 복셀이 생성되는 최소 출력으로 5 mW 로 판단하여 형상 제작시 출력을 5 mW 로 고정하였다. 개발된 시스템의 분해능을 알아보기 위하여 조사시간 2 ms, 레이저 출력 5 mW 로 하여 복셀을 생성해 본 결과 Fig. 4 와 같이 약 200 nm 수준으로 나타났다.

2.3 복셀 스캐닝 방법

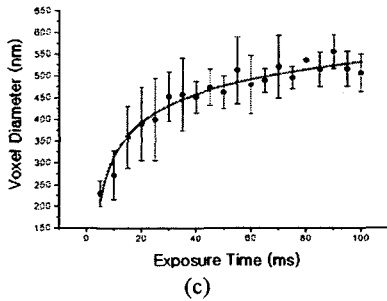
본 연구에서 제안한 나노 복화공정은 주어진 공정 변수에 따라 이산적으로 단위 복셀을 서로 중첩되게 생성하여 2 차원 형상을 제작하는 방법으로 임의의 비트맵 형태의 그림파일을 이용하여 나노급 정밀도를 가지는 극미세 형상으로 복제를 하는 방법이다. 이를 위해서 비트맵 형태의 흑백그림 파일을 먼저 0 과 1 로 표현된 아스키 형태(ASCII format)로 변환하게 된다. 이 때 그림이 있는 흑색



(a)

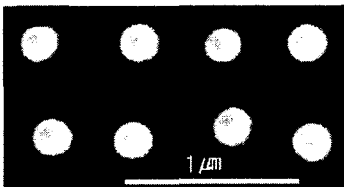


(b)



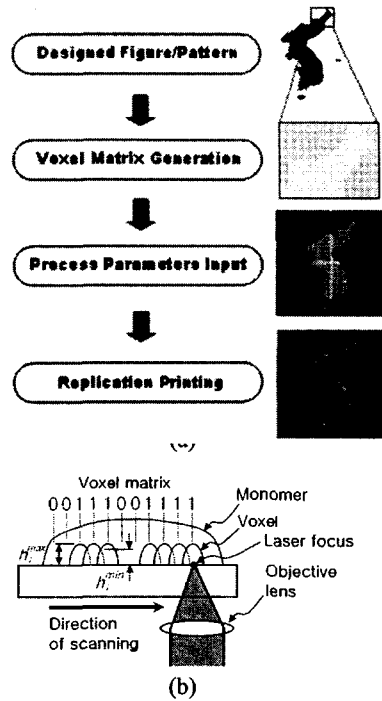
(c)

**Fig. 3** (a)~(b) SEM images of voxels with top view and inclined view. The numbers in Fig. 3(b) mean exposure time of fs-laser respectively. And (c) comparison between a voxel diameter of experimental results and that of theoretical prospects



**Fig. 4** SEM image of voxels in the condition of exposure time(2ms) and laser power(5mW); top view

부분은 1 이 되고 흰색부분은 0 으로 나타내도록 하였다. 0 과 1 로 구성된 복셀 매트릭스에서 0 인 경우에 셔터를 닫아서 레이저 광을 차단하여 복셀이 생성되지 못하도록 하고, 1 일 때는 셔터를 열어서 이광자흡수 현상에 의해 복셀이 생성되도록 하였다. 그리고 복셀 중심의 위치는 복셀 매트릭



**Fig. 5** (a) Schematic flow of nano replication printing process and (b) a voxel matrix scanning method

스의 1 에 해당하는 위치의 좌표 값이 된다. 한편, 기초 실험을 통하여 최적의 형상을 나타내는 복셀 간의 간격과 단위 복셀의 크기를 알고 있을 때 복셀 매트릭스 크기에 따라 제작되는 형상의 크기를 예측할 수 있다. 즉, 동일한 공정변수 조건하에서 복셀 매트릭스의 크기가 클수록 제작되는 형상이 커지게 된다. 따라서 제작되는 형상의 크기를 미리 예측하여 원하는 크기가 아닐 경우에는 비트맵 그림파일을 도식적으로 확대, 축소하여 복셀 매트릭스의 크기를 재구성하면 간단하게 원하는 크기의 형상을 제작할 수 있다.

Fig. 5(a)에는 나노 복화 공정의 전체 프로세스를 설명한 개념도를 나타낸 것이다. 복셀간의 간격, 단위 복셀의 조사시간 등의 공정변수는 자체 개발한 입력 프로그램을 이용하여 넣어주게 된다. 따라서, 제안된 나노 복화공정을 이용하면 복잡한 패턴의 형상에 대해서도 CAD 파일 없이 비트맵의 형태의 그림 파일만으로 마스크 없이 직접 나노급 정밀도를 가지는 형상을 제작할 수 있는 특징이 있다<sup>(7)</sup>. 그러므로 임의의 주어진 형상 또는 패턴에 대하여 그림파일 형태로 데이터를 만들어서 나노급 정밀도를 가지는 극미세 패턴링이 가능하다. Fig. 5(b)에는 복셀 매트릭스 스캐닝법에 대한 그림을 나타낸 것인데, 복셀 매트릭스에서 1 에 해당되는 위치에 레이저 광이 쬐여서 복셀이 생성되는 과정을 나타낸 것이다.

### 3. 직접적 패턴 제작

개발된 복화공정의 특성을 분석하기 위하여 마스크없이 직접적으로 몇 가지 형상에 대하여 패턴닝을 해 보았다. Fig. 6 에는 비트맵 형태의 말 그림을 이용하여 나노 복화공정으로 제작해 보았다. 공정조건으로는 레이저 파워 5 mW, 조사시간 2 ms 으로 두었다. 복화된 패턴 형상은 주어진 그림과 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 을 통하여 원하는 그림파일을 이용하여 나노 정밀도를 가지는 수 마이크로 크기의 그림과 문자를 제작할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 복잡한 패턴제작에도 개발된 공정이 유용하게 활용될 것으로 사료되며, 무엇보다도 마스크 없이 제작이 가능하고 크린룸 (clean room)과 같은 시설이 필요 없이 간단하게 저렴한 비용으로 패턴닝을 할 수 있는 장점이 있다.

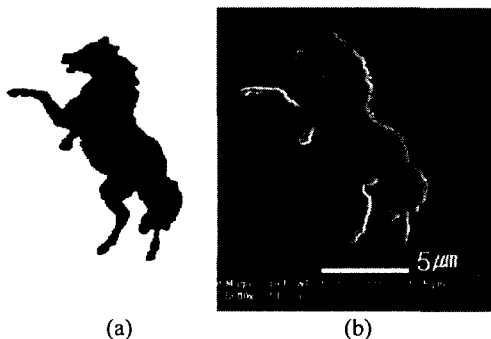


Fig. 6 (a) Bitmap image of a horse and (b) its replicated picture by using nRP process.



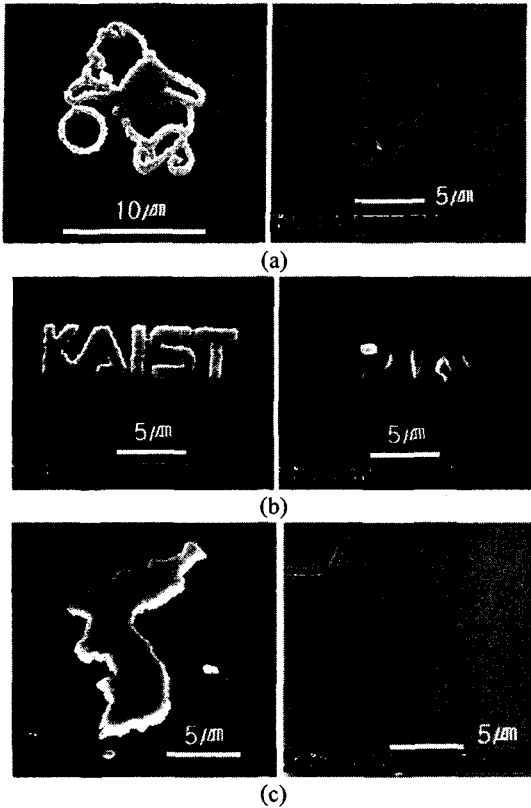
Fig. 7 SEM image of replicated letters of (a) 'KAIST' and (b) '대한민국'

### 4. PDMS 스탬프 제작

나노 복화공정으로 제작된 패턴에 PDMS 를 이용하여 스탬프 제작을 해 보았다. 먼저 나노 복화공정으로 3 절에서 기술한 프로세스에 따라 만화캐릭터인 푸우 (Pooh) 그림과 KAIST 로고 그리고 한반도 형상을 제작해 보았다. 공정조건은 레이저 출력 5 mW, 그리고 조사시간을 10 ms 으로 하였다. 나노 복화공정으로 제작된 패턴 형상과 그것을 이용하여 만든 PDMS 스탬프를 Fig. 8 에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 PDMS 재료는 Sylgard 184A (Dow Corning Inc.)와 Sylgard 184B 를 10 대 1 의 비율로 혼합하여 사용하였다. PDMS 스탬프 제작 과정을 간략하게 알아보면, 두 가지 형태의 PDMS 재료를 혼합하여, 진공 챔버에서 약 30 분 정도 두어 내부의 기포를 완전히 제거한 뒤 패턴 위에 부어서 경화시킨다. 상온의 경우에는 경화되는데 까지 약 10 시간 이상이 소요되며, 빠른 경화를 원할 때는 주변 온도를 전기로 (electric heater)를 이용하여 70 ℃정도 유지하면 1 시간 정도 걸리게 된다.

본 연구에서 개발된 나노 복화공정으로 제작된 패턴은 재질이 폴리머 (polymer)이며 커버 글라스에 접착적인 형태로 붙어있는 상태이기 때문에 패턴 위에 직접적으로 PDMS 를 붓게 되면 패턴과 PDMS 사이에 작은 반응에서도 패턴과 PDMS 를 분리할 때 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이형성을 증진시키기 위하여 제작된 패턴 위에 Au 로 30 nm 정도 미리 증착 시킨 뒤에 혼합된 PDMS 을 부어서 스탬프를 제작하였다. 이 경우에 금 박막은 패턴과 PDMS 사이에 접촉을 방지하는 역할을 하는 것이며, 패턴에서 PDMS 를 분리시킨 뒤에 미소하게 금 박막의 일부가 PDMS 에 남게 되는 경우에는 Au 를 선택적으로 에칭하는 용액에 넣어서 남아있는 Au 를 완전히 제거하여 사용하게 된다.

본 연구에서는 사용된 Au 에칭 액으로는 요오드칼륨 (potassium Iodide, DC Chemical Co.)에 옥소 (Iodine, Junsei Chemical Co., Japan)를 혼합하여 사용하였다. 혼합방법으로는 먼저 요오드칼륨 (KI) 30 g 을 탈이온화된 물 (DI water) 300 ml 와 상온에서 약 10 시간 정도 교반을 하여 완전히 용해시킨 후 옥소 (I<sub>2</sub>) 7.5 g 을 그 용액에 넣어서 다시 4 시간 정도 더 교반을 시켜서 만든다. 이렇게 만든 에칭액에 PDMS 를 약 2 분간 담그게 되면 PDMS 에 남아있는 Au 박막의 일부가 완전하게 제거가 된다. 또한, SEM 사진 결과 PDMS 의 표면이 균일하고 PDMS 가 낮은 계면에너지를 가지기 때문에



**Fig. 8** SEM images of replicated figures and its molded PDMS stamps; (a) Pooh character, (b) KAIST logo and (c) the Korean Peninsula.

사용된 에칭액에 의한 영향이 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다. 최근 연구결과에서 PDMS 184A로 전사한 경우 약 100~200nm 수준까지 패턴 전사가 가능함을 보였으며 보다 정밀한 패턴 전사를 위해서는 강도가 높은 PDMS (*h*-PDMS)와 PDMS 184A를 복합적으로 사용하면 가능한 것으로 보고되었다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서 제시한 나노 복화공정을 통하여 패턴을 마스크없이 직접적으로 제작하고 이것을 PDMS로 전사하여 스탬프를 제작하는 프로세스를 제안해 보았다. 제안된 공정을 이용한 PDMS 스탬프는 향후 소프트 리소그래피에서 다양하게 응용이 될 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 나노 복화공정을 이용하여 복잡한 그림형상을 나노급 정밀도를 가지는 형상으로 제작이 가능함을 보였다.

(2) 복제된 형상의 정밀도는 복셀 실험결과 약 200 nm 수준으로 나타났으며, 이것은 레이저의 출력과 조사시간의 함수로 나타낼 수 있다. 또한, 광학적인 특성으로 대물렌즈의 개수구 (Numerical Aperture), 레이저 빔의 직경변경 등의 공정변수를 최적화 할 경우 복셀의 정밀도가 더 향상될 것으로 사료된다.

(3) PDMS 184A를 이용하여 복제된 패턴을 전사하여 스탬프 제작이 가능함을 보였으며, 스탬프 제작시 패턴과 PDMS가 붙지 않도록 계면에 Au 박막을 미리 도포하여 이형제의 역할을 하도록 하였다. 또한, 이형 역할을 하는 Au 박막의 일부만이 전사 후 PDMS 스탬프에 남아 있는 경우 요오드칼륨과 옥소를 혼합한 에칭액을 사용하였는데 이 경우에 PDMS에는 거의 영향이 없는 것으로 판단되었다.

(4) 본 연구에서 개발된 PDMS 스탬프 제작공정을 이용하여 향후 다양한 응용이 예상된다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Chou, S.Y., Keimel, C. and Gu, J., 2002, "Ultrafast and Direct Imprint of Nanostructures in Silicon," *Nature*, vol.417, no.20, pp.835~837.
- (2) Xia, Y. and Whitesides, G.M., 1998, "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol.37, pp.550~575.
- (3) Loo, Y.L., Lang, D.V., Rogers, J.A. and Hsu, J.W.P., 2003, "Electrical Contacts to Molecular Layers by Nanotransfer Printing," *Nano Letters*, vol.3, no.7, pp.913~917.
- (4) Kim, C.S., Shtein, M. and Forrest, S.R., 2002, "Nanolithography Based on Patterned Metal Transfer and Its Application to Organic Electronic Devices," *Appl. Phys. Letters*, vol.80, no.21, pp.4051~4053.
- (5) Odem, T.W., Love, J.C., Wolfe, D.B., Paul, K.E. and Whitesides, G.M., 2002, "Improved Pattern Transfer in Soft Lithography Using Composite Stamps," *Langmuir* vol.18, pp.5314~5320.
- (6) Schmid, H., Wolf, H., Allenspach, R., Riel, H., Karg, S., Michel, B. and Delamar, E., 2003, "Preparation of Metallic Films on Elastomeric Stamps and Their Application for Contact Processing and Contact Printing," *Adv. Funct. Mater.*, vol.13, no.2,

- pp.145~153.
- (7) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Yi, S.W. and Kong, H.J., 2003, "Development of a Nano Replication Printing(nRP) Process Using a Voxel matrix scanning scheme," *The KSPE Autumn Meeting*, pp.424~427.
- (8) Sun, H.B., Maeda, M., Takada, K., Chon, J.W.M., Gu, M. and Kawata, S., 2003, "Experimental Investigation of Single Voxels for Laser Nanofabrication Via Two-Photon Photopolymerization," *Appl. Phys. Letters*, vol.83, no.5, pp.819~821.
- (9) Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T. and Takada, K., 2001, "Finer Features for Functional Microdevices," *Nature*, vol.412, no.16, pp.697~698.
- (10) Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A. and Chichkov, B.N., 2003, "Femtosecond Laser-Induced Two-Photon Polymerization of Inorganic-Organic Hybrid Materials for Applications in Photonics," *Optics letters*, vol.28, no.5, pp.301~303.
- (11) Maruo, S. and Kawata, S., 1998, "Two-Photon-Absorbed near-Infrared Photopolymerization for Three-Dimensional Microfabrication," *J. of Microelectromechanical Systems*, vol.7, no.4, pp.411~415.
- (12) Sun, H.B., Tanaka, T. and Kawata, S., 2002, "Three-Dimensional Focal Spots Related to Two-Photon Excitation," *Appl. Physics letters*, vol.80, no.20, pp.3673~3675.
- (13) Yi, S.W., Lee, S.K., Kong, H.J., Yang, D.Y., Park, S.H. and Lim, T.W., "Three-Dimensional Micro-Fabrication Using Two-Photon Absorption by Femtosecond Laser," *Proceedings of SPIE*, vol.5342, pp.137~145, 2004.
- (14) Park, S.H., Lim, T.W., Jeong, C.G., Yang, D.Y., Yi, S.W., Lee, S.K. and Kong, H.J., "Fundamental Process Development of a Ultramicro-Stereolithography Using a Femto-Second Laser for Manufacturing Nano-Scaled Features," *J. of KSPE*, vol.21, no.3, pp.180~187, 2004.