

◆ 특집 ◆ 나노 패터닝 기술

다중 모세관력 리소그래피를 이용한 단일 이중 구조의 제작

Fabrication of Monolithic Dual-scale Structure by Advanced Multi-step Capillary Force Lithography (CFL)

서갑양^{1,✉}, 광노균¹, 정훈의¹
Kahp Yang Suh^{1,✉}, Rhokyun Kwak¹ and Hoon Eui Jeong¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부(Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)
✉ Corresponding author: sky4u@snu.ac.kr, Tel: 02-880-9103

Key Words: Lithography (리소그래피), Capillarity (모세관력), Polymer (고분자), Curing (경화), Hierarchy (계층)

기호설명

D = diffusivity coefficient
C = oxygen concentration
P = oxygen concentration permeated through the mold
L = the depth of polymer resin
t = UV exposure time
x = vertical direction of the polymer resin

1. 서론

최근 소프트리소그래피(soft lithography)와 나노 임프린팅리소그래피(nanoimprinting lithography) 기법이 멀티스케일 구조를 만드는 데 다양하게 이용되고 있다. 특히, 다양한 멀티스케일 구조 중에서도 마이크로스케일과 나노스케일이 합쳐진 멀티스케일 이중 구조는 단순한 단일스케일의 구조보다 향상된 구조적/전기적 기능을 가지게 되어 생체모방 디바이스,¹⁻³ 전기전자 디바이스,⁴⁻⁶ 광학디바이스,⁷⁻⁹ 마이크로 유체시스템 디바이스¹⁰⁻¹² 등에 적용되어 널리 사용되고 있다. 이러한 다양한 이용성 때문에 reversible imprinting,^{13,14} micro-transfer molding,¹⁵ direct drawing¹⁶ 과 같은 소프트 몰딩 기반의 방법뿐만 아니라 self-assembly,¹⁷ electrochemical patterning,¹⁸

phase separation¹⁹ 등 화학적 패터닝 기법까지 멀티스케일 이중구조를 만들기 위한 많은 방법들이 연구/개발되었다. 위의 이러한 방법들은 매우 유용하지만, 공정 재현성, 조절성 및 공정속도측면에서 몇 가지 중대한 단점을 가지고 있다. 소프트 몰딩 기반 방법의 경우에는 반드시 몰드 및 패턴물질의 부가적인 표면 개질이 필요하며 제작하려는 멀티스케일 이중구조의 디자인에 따라 서로 다른 표면 특성이 필요하게 되어 공정 내 구조조절이 매우 제한되어 있다. 화학적 패터닝 기반 방법의 경우에는 기본적으로 공정이 복잡하고 많은 단계가 필요하며 세밀한 컨트롤이 힘들다. 게다가, 현재 개발된 방법으로 만들어지는 멀티스케일 구조의 경우 이중의 경계면이 존재하여 구조적 단일성을 떨어뜨리는 것은 물론, 전기전자디바이스에서의 접촉 저항의 증가와 마이크로 유체시스템에서 부분적인 누수를 가져온다.

본 논문에서는 모세관력 리소그래피(capillary force lithography)를 기반으로 한 새로운 멀티스케일 이중구조제작 방법인 다중 모세관력 리소그래피(multi-step capillary force lithography)를 소개하고자 한다. 다중 모세관력 리소그래피는 말 그대로 모세관력 리소그래피 법을 다단계로 적용한 제작 방법으로 부분경화(partial curing)와 진공에 의한 압력

차를 이용한 유동(vacuum-assisted migration)이 중요한 요소로 작용한다. 먼저 부분경화는 박막코팅과 광중합(光重合)반응에서 잘 알려져 있는 현상으로 free radical 중합반응 시 산소가 있을 경우 중합반응이 방해가 되어 부분적으로만 중합이 이루어져 점착성의 표면이 나타나는 현상을 말한다.²⁰ 부분경화 현상은 중합반응측면에서는 원하지 않는 현상이지만 본 연구실에서는 이 현상을 이용하여 비가역성 채널 접합, 삼차원구조제작에 응용을 한 바 있다.^{21,22} 다음으로 진공압력 이동현상은 위의 부분 경화된 고분자의 유동을 조절하기 위해 적용한 방법이다. 잘 알려져 있다시피 미세한 채널 및 동공에서는 모세관력이 지배적인 힘으로 작용하며 고체의 벽을 타고 유동이 자연스럽게 형성된다. 하지만 부분 경화된 고분자의 경우 점탄성 특성을 보여 모세관력만으로는 유동을 형성하는데 부족하다. 따라서 로터리펌프를 이용하여 시스템의 압력을 순간적으로 낮추는 방법을 통하여 진공에 의한 압력 차를 발생시켜 이 힘을 부분경화 고분자의 유동 컨트롤에 이용한다.

부분경화와 진공에 의한 압력 차를 적용시킨 다중 모세관력 리소그래피를 통하여 제작하고자 하는 멀티스케일 이중구조는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 마이크로 스케일의 기반구조 위에 서브마이크로~나노스케일의 구조가 올라가 있는 계층구조로 다중 거칠기 구조(dual roughness surface)를 나타내며 계코 도마뱀등의 생체모방분야와 포토닉스 부분에서 사용되고 있는 구조이다. 다음으로 마이크로 스케일의 기반 구조들이 서브마이크로~나노스케일의 구조로 연결되어있는 브리지구조로 공진기(resonator)와 같은 전기전자디바이스에서 기본적으로 나타나는 구조이다. 본 논문에서 소개하고자 하는 다중 모세관력 리소그래피는 위의 두 가지 멀티스케일 이중구조에 대해 다양한 형태와 크기로 이중의 경계면 없이 넓은 면적에 대해 제작이 가능하다.

2. Fabrication

2.1 Advanced Multi-step Capillary Force Lithography (CFL)

다중 모세관력 리소그래피의 전체 프로세스 도식은 Figure 1 과 같다. 전체 프로세스는 크게 1st molding 과 2nd molding 으로 나눌 수 있으며 2nd molding 은 계층구조(hierarchical structure)와 브리지

구조(bridge structure)를 만들기 위한 두 가지 프로세스로 다시 나뉘어 진다.

먼저 1st molding 단계에서는, UV 경화성 고분자 Polyurethane acrylate(PUA) droplet 을 기판 위에 떨어뜨린 후 이를 마이크로 음각 패턴을 가진 poly(dimethylsiloxane) (PDMS) 몰드를 사용하여 눌러 준 후 high-energy mercury lamp(dose= 100 mW cm⁻²)를 이용하여 10~20 초간 UV 를 조사, PUA precursor 를 경화시킨다. 이러한 조건에서 몰딩된 고분자 마이크로 구조의 상부 층은 기체 투과성이 좋은 PDMS 몰드를 통해 들어온 공기의 산소 성분 에 의하여 광중합반응(photo-initiated radical polymerization)이 억제되며, 그 결과 마이크로 구조의 중·하부와 다르게 충분히 경화되지 못한다.²⁰ 이와 같이 부분경화된 마이크로 구조의 상부 층은 유체의 특성을 일부 가지게 되어 부가적인 몰딩이 가능하다(Fig. 1 의 첫 번째 줄).

2nd molding 단계에서는, 부분 경화된 마이크로 기반 구조에 나노 음각패턴을 가진 PUA 몰드를 접촉시킨 후 임프린팅 압력(0.1~0.5bar)을 가한다. 유체의 특성을 일부 가지는 부분 경화된 상부 층

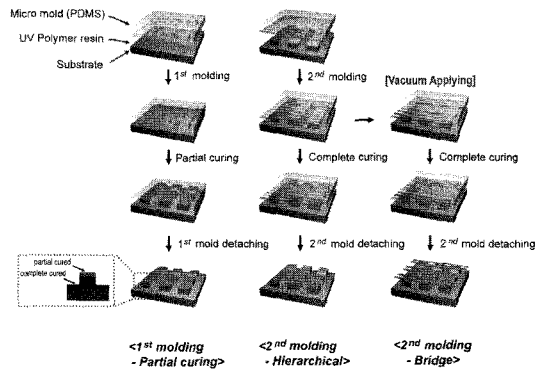


Fig. 1 A schematic illustration for the fabrication of monolithic dual-scale structure by advanced multi-step capillary force lithography. In the first partial curing step, partial cured polymer microstructures were formed by using micro-patterned PDMS mold. In the second molding step, partial-cured micro structures were imprinted by nano-patterned PUA mold. Under proper condition, if complete curing and detaching PUA mold, hierarchical structure is generated. On the other hand, if vacuum is applying before complete curing step, partial cured polymer was migrated along PUA mold and suspended bridge structure is fabricated

은 가해진 압력과 모세관력에 의해 PUA 몰드에 따라 몰딩이 된다. 위와 같이 나노스케일 몰딩이 된 상태에서 UV 를 10~20 초간 조사하여 부분 경화된 마이크로 구조 상부 층까지 완전히 경화시킨 후 몰드를 제거하면 마이크로 구조 위에 나노 구조가 있는 계층구조를 얻을 수 있다(Fig. 1 의 두 번째 줄). 브리지 구조를 얻기 위해서는 나노스케일 몰딩이 된 상태에서 완전경화를 하기 전, 로터리 펌프를 이용하여 시편이 위치한 챔버의 압력을 낮추는 진공공정을 적용한다(Fig. 1 의 세 번째 줄). 챔버의 압력이 급격히 떨어지는 경우 챔버 내 공기가 빠져나가며 마이크로 기반 구조가 몰드와 접촉한 부분과 접촉하지 않은 부분 사이에 압력 차가 발생하고 이는 부분 경화된 고분자 층의 유동을 유발, 브리지 구조가 만들어 질 수 있도록 해준다.

2.2 Fabrication results

다중 모세관력 리소그래피를 이용하여 제작한 계층구조/브리지구조의 대표적인 사진은 Figure 2 와 같다. Figure 2 의 a-b 와 c-d, e-f 는 같은 마이크로/나노몰드와 정해진 조건(1st, 2nd molding step 에서 UV 경화시간, 임프린트 압력)에서 진공공정의 적용 여부만을 다르게 하였을 경우 얻어진 계층구조와 브리지구조의 대조 사진이다. 먼저 Figure 2a-b 는 계층구조/브리지구조의 대면적 광학사진이다. 사진에서 보다시피 3cm x 3cm 의 대면적에 결점 없이 패터닝 되어있다. 계층구조 사진(Figure 2a)과 브리지구조 사진(Figure 2b)를 비교하여 보면 브리지구조의 경우 나노패턴의 반짝임이 더욱 선명하다는 것을 알 수 있다. 이는 마이크로 기반 구조 위에만 나노패턴이 있는 계층구조에 비해 브리지 구조의 경우 전면적에 대해 나노패턴이 형성되기 때문이다. Figure 2 c-d 는 마이크로스케일의 라인 기반 구조 위에 나노스케일의 라인 구조를 올림으로서 이중 라인 구조를, Figure 2e-f 는 우물구조의 마이크로 기반 구조에 라인구조의 나노브리지를 올린 구조를 만든 것이다. PUA 뿐만 아니라 다양한 UV 경화성 고분자 (poly(ethylene glycol) diacrylate(PEG-DA), perfluoropolyethers dimethacrylate(PFPE-DMA), polyester acrylate, Norland Optical Adhesives (Norland Products))에 대하여 다중 모세관력 리소그래피를 적용해 계층/브리지 구조를 만들어 본 결과 조건은 다르지만 PUA 를 이용한 실험결과와 같은 구조를 얻을 수 있었다.

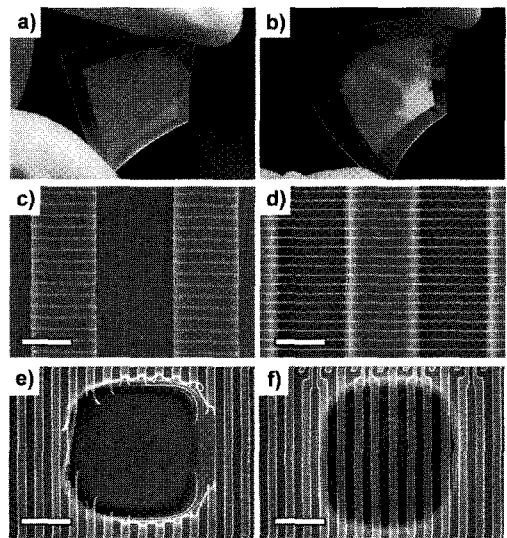


Fig. 2 a-b) Photographs for large-area fabrication (3cm x 3cm) of a) hierarchical structure and b) bridge structure and c-f) horizontal SEM images for several monolithic dual-scale structures. Dual-Line structure of c) hierarchical structure and d) bridge structure are shown for a given geometric parameters of base microstructure(width: 20 μ m, width/space ratio: 1:1, height: 13 μ m) and nanostructure(width: 450nm, width/space ratio: 1:5, height: 500nm) (scale bar = 20 μ m). Well-Line structure of e) hierarchical structure and f) bridge structure are shown for a given geometric parameters of base microstructure(width: 5 μ m, width/space ratio: 1:1, height: 5 μ m) and nanostructure(width: 550nm, width/space ratio: 1:5, height: 500nm) (scale bar = 2 μ m)

2.3 Various Dual-structures

다중 모세관력 리소그래피의 공정한계를 알아 보는 것과 동시에 이용성을 극대화시키기 위해 다양한 실험을 수행하였다. 먼저 공중에 떠 있는 브리지 형태의 구조가 얼마나 길게 제작될 수 있는지 테스트해 보았다(Figure 3a). 사선 형태의 마이크로 기반 구조에 서브나노스케일의 라인구조를 올려 10~100 μ m의 다양한 길이의 cantilever 구조 제작하였는데, Figure 3a 에서 볼 수 있듯이 수십마이크로 길이의 구조의 경우 나노몰드를 제거하는 과정에서 살짝 휘어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 몰드제거시 문제점을 제외하면 브리지구조는 100

μm 에 달하는 긴 구조를 형성 할 수 있으며 이를 형성하는 부분 경화된 고분자의 질량 또한 충분함을 알 수 있다. 다음으로는 부분 경화된 고분자 위에 올리는 나노패턴의 밀도가 낮아 브리지구조를 형성하는데 필요한 질량이 매우 적을 경우 어떠한 유동 및 구조를 형성하는지 알아보기 위해 테스트를 해 보았다(Figure 3b). 실험에 사용한 마이크로 기반 구조와 나노구조는 각각 width: $20 \mu\text{m}$, width/space ratio: 1:1, height: $13 \mu\text{m}$ 와 width: 250nm , width/space ratio: 1:39, height: 250nm 로 기반 구조의 부분 경화 깊이를 $4 \mu\text{m}$ 라 할 때(본 논문 세 번째 챕터 참조) 전체 부분경화 고분자의 질량에 비해 브리지구조를 형성하는 고분자의 질량은 0.3% 밖에 되지 않는다. Figure 3b 에서 볼 수 있듯이 위의 조건에서 제작된 브리지 구조의 기울어진 단면 SEM 사진을 보면 마이크로 기반 구조의 위 부분이 살짝 눌러 퍼져있는 것을 알 수 있다. 이렇게 눌러 퍼진 부분은 약 500nm 정도 되는 깊이로 부분 경화 깊이($4 \mu\text{m}$)에 비해 매우 적은 양이다. 이는 작은 임프린팅 압력($0.1\sim 0.5\text{bar}$)에서 변형이 일어날 만큼 경화가 되지 않은 부분은 매우 작은 양으로 나노 몰드의 밀도가 매우 작아 마이크로 기반 구조에 그대로 남게 되는 부분경화 고분자의 양이 많더라도 구조의 무너짐이 심하지 않음을 알 수 있다.

다중 모세관력 리소그래피의 공정의 적용을 고분자에서 그치지 않고 세라믹과 같은 Inorganic material 의 영역에 까지 넓힐 경우 그 이용도를 매우 확대시킬 수 있다. Figure 3c-d 는 ceramic precursor 의 한 종류로 강도와 광반응성이 매우 좋은 $\beta\text{-KION}$ 을 사용하여 테스트한 결과이다. Figure 3c-d 에서 볼 수 있듯이 진공공정의 적용 여부에 상관없이 계층구조만을 얻을 수 있었는데 이는 $\beta\text{-KION}$ 의 매우 높은 점성 때문으로 생각된다. $\beta\text{-KION}$ 또한 radical polymerization 을 이용하는 UV 경화성 물질이기 때문에 부분경화현상이 나타나 임프린트 압력을 높여 계층구조를 얻어낼 수 있었지만, 점성이 매우 높아 모세관력과 진공을 통한 압력 차로 충분한 유동을 만들어 낼 수 없기 때문이다.

마지막으로 브리지형태의 aspect ratio 가 매우 커지는 경우 관찰되는 브리지의 휘어짐 및 뭉침 현상(Figure 3a)을 해결하기 위해 bottom-up 방식의 다중 모세관력 리소그래피에 top-down 방식의 UVO etching 의 적용을 테스트 해보았다(Figure 3e-

f). 기존에 제작된 aspect ratio 가 45 정도 되는 450nm 브리지라인 구조에 UVO 를 약 15 분간 조사를 한 결과 70nm 의 브리지라인 구조를 얻을 수 있었다. 이는 aspect ratio 가 약 300 에 달하는 구조이다.

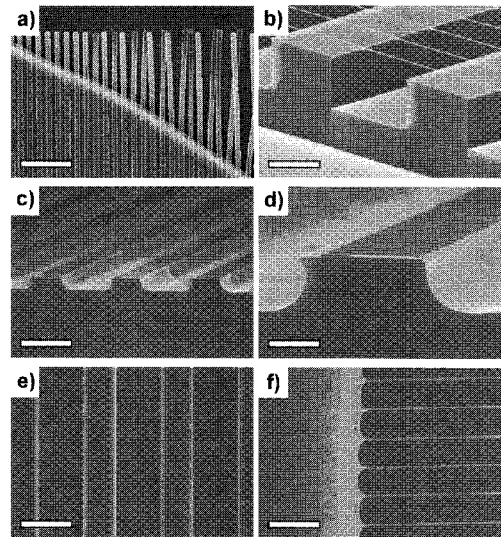


Fig. 3 SEM images of various dual-scale structures. a) Cantilever structure(width: 800 nm , width/space ratio: 1:1, height: 500nm) with various suspended length(scale bar = $20 \mu\text{m}$) and b-f) dual-line structure for a given base structure(width: $20 \mu\text{m}$, width/space ratio: 1:1, height: $13 \mu\text{m}$) showing b) tilted SEM image of dual-line structure with high width/space ratio(width: 250nm , width/space ratio: 1:39, height: 250nm) (scale bar = $20 \mu\text{m}$), c) ceramic dual-line structure fabricated with SiCN ceramic precursor(width: 450nm , width/space ratio: 1:5, height: 500nm) (scale bar = $30 \mu\text{m}$) and d) magnified view(scale bar = $10 \mu\text{m}$), e) UVO treated 70nm dual-line structure(width: 450nm , width/space ratio: 1:5, height: 500nm) (scale bar = $30 \mu\text{m}$) and f) magnified view(scale bar = $3 \mu\text{m}$)

3. Partial Curing Kinetics

UV 경화성 고분자의 부분 경화현상에 대한 이해를 위해 고분자패턴에 대한 산소기체의 1 차원 확산 식을 유도하였다. 산소기체의 확산은 패턴에 수직인 방향(x-direction)만을 고려하였다.

$$-\frac{dC_{O_2}}{dt} = -D_{O_2/Polymer} \frac{d^2C_{O_2}}{dx^2} + C_{O_2} - P \quad (1)$$

여기서 C_{O_2} 는 산소농도, $D_{O_2/Polymer}$ 는 고분자로의 산소 확산계수, C_{O_2} 는 radical polymerization 에 의한 산소농도감소량, P 는 PDMS 몰드를 통해 들어오는 산소의 량을 나타낸다. 여기서 radical polymerization 에 의한 산소농도감소량은 높은 UV exposure energy 에 의해 현존하는 산소가 모두 반응하고, PDMS 몰드를 통하여 들어오는 산소 농도량 P 은 일정하다고 가정하였다.

3.1 Kinetics: UV exposure time of partial curing

먼저 PDMS 마이크로 몰드와 UV 경화성 고분자가 만나는 표면에서 산소의 농도 C_{i,O_2} 가 UV 노출 시간 t 에 따라 어떻게 변하는지 알기 위해 공간확산에 대한 항을 무시하고 시간에 대한 미분방정식을 구한 후, 그 해를 구하였다.

$$-\frac{dC_{O_2}}{dt} = C_{O_2} - P \quad (2)$$

$$\frac{C_{O_2}}{C_{i,O_2}} = (1 - p) \exp(-t) + p, \quad p = P / C_{i,O_2} \quad (3)$$

Figure 4a 는 식(3)의 UV 노출 시간에 따른 표면 산소농도의 변화량을 그래프로 나타낸 것이다. 그 그래프에서 볼 수 있듯이 PDMS 몰드를 투과한 산소의 비율 p 의 값이 0 일때(투과량 $P=0$ 일때)에는 표면산소의 농도가 수초 내에 0 으로 떨어지는데 비하여 산소투과량이 높을수록 (p 의 값이 클수록) 표면산소농도가 높은 상태로 유지됨을 알 수 있다. 즉, PDMS 와 같이 산소투과량이 높은 경우($D=10^{-10} \sim 10^{-9} m^2 s^{-1}$)²³ 표면에서 부분 경화가 일어난다.

3.2 Kinetics: the depth of partial cured region

다음으로 부분 경화현상이 일어나는 깊이를 구하기 위해 steady state 를 가정하여 시간 항을 무시, 고분자패턴의 깊이에 따른 산소농도의 식을 얻은 후, 그 해를 구하였다.

$$0 = -D_{O_2/Polymer} \frac{d^2C_{O_2}}{dx^2} + C_{O_2} - P \quad (4)$$

$$\frac{C_{O_2}(x)}{C_{i,O_2}} = \cosh mx - \tanh mL \cdot \sinh mx \quad (5)$$

$$, m = (D_{O_2/Polymer})^{-1/2}$$

Figure 4b 는 식(5)의 고분자 깊이에 따른 산소 농도의 변화량을 일반적인 고분자의 산소투과량 ($D=10^{-12} \sim 10^{-14} m^2 s^{-1}$)²⁴ 을 이용하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 약 4 μm 이하의 위치에서는 산소의 농도가 거의 0 으로 떨어진다. 이는 UV 경화성 고분자의 상대적으로 낮은 산소투과도 때문에 나타나는 현상으로 전체 고분자 패턴에 대해 위의 층만 부분경화되고 아랫 층은

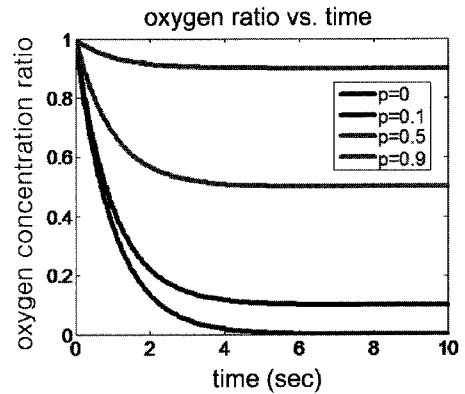


Fig. 4(a) Plot of the oxygen concentration (eq. 3) with four different penetrating ratios ($p=0 \sim 0.9$) into the surface of the UV polymer resin

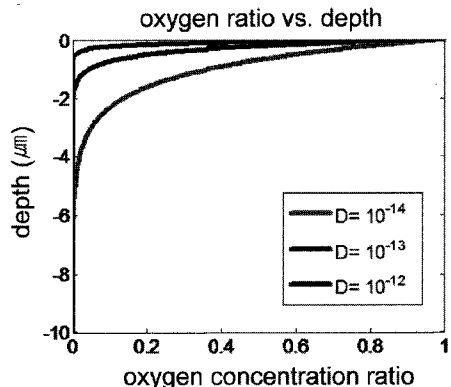


Fig. 4(b) Plot of the oxygen concentration (eq. 5) with three different diffusivities of oxygen into the UV polymer resin ($D=10^{-12} \sim 10^{-14} m^2 s^{-1}$). As shown, oxygen concentration decreases exponentially in the x direction

완전경화되어 2nd molding 시 임프린팅 압력에 의해 마이크로 기반패턴이 무너지지 않는 다는 실험결과와 일치한다.

4. 결론

본 논문에서는 부분경화현상과 진공을 이용한 압력을 모세관력 리소그래피 방법에 적용함으로써 다양한 이중구조를 형성시킬 수 있는 다중 모세관력 리소그래피 법을 소개하였다. 본 방법을 이용하여 제작할 수 있는 이중 구조는 크게 계층구조와 브리지구조로 나눌 수 있으며 두 가지 모두 간단한 공정 프로세스 컨트롤을 통하여 같은 공정조건에서 대면적으로 제작할 수 있었다. 다중 모세관력 리소그래피의 높은 공정컨트롤과 구조적인 장점을 이용하면, 스마트 전기전자디바이스, 복잡한 마이크로유체기반 디바이스 등 다양한 곳에 본 제작 방법을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구개발 사업 (MOST) (R01-2007-000-20675-0), 지식경제부 차세대신기술개발 사업 (No.10030046), 지식경제부 주관 성장동력사업 LG Display Company 의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Arzt, E., Gorb, S. and Spolenak, R., "From micro to nano contacts in biological attachment devices," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 100, No. 19, pp. 10603-10606, 2003.
2. Jeong, H. E., Lee, S. H., Kim, J. K. and Suh, K. Y., "Nanoengineered multiscale hierarchical structures with tailored wetting properties," *Langmuir*, Vol. 22, No. 4, pp. 1640-1645, 2006.
3. Ming, W., Wu, D., van Benthem, R. and de With, G., "Superhydrophobic films from raspberry-like particles," *Nano Letters*, Vol. 5, No. 11, pp. 2298-2301, 2005.
4. Feng, X. L., White, C. J., Hajimiri, A. and Roukes, M. L., "A self-sustaining ultrahigh-frequency nanoelectromechanical oscillator," *Nature Nanotech-*

- nology, Vol. 3, No. 6, pp. 342-346, 2008.
5. Li, M., Bhiladvala, R. B., Morrow, T., Sioss, J., Lew, K.-K., Redwing, J. M., Keating, C. D. and Mayer, T. S., "Bottom-up assembly of large-area nanowire resonator arrays," *Nature Nanotechnology*, Vol. 3, No. 2, pp. 88-92, 2008.
6. Melosh, N. A., Boukai, A., Diana, F., Gerardot, B., Badolato, A., Petroff, P. M. and Heath, J. R., "Ultrahigh-density nanowire lattices and circuits," *Science*, Vol. 300, No. 5616, pp. 112-115, 2003.
7. Parker, A. R. and Townley, H. E., "Biomimetics of photonic nanostructures," *Nature Nanotechnology*, Vol. 2, No. 6, pp. 347-353, 2007.
8. Vlasov, Y. A., O'Boyle, M., Hamann, H. F. and McNab, S. J., "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, Vol. 438, No. 7064, pp. 65-69, 2005.
9. Wu, C. S., Lin, C. F., Lin, H. Y., Lee, C. L. and Chen, C. D., "Polymer-based photonic crystals fabricated with single-step electron-beam lithography," *Advanced Materials*, Vol. 19, No. 19, pp. 3052-3056, 2007.
10. Cannon, D. M., Kuo, T. C., Bohn, P. W. and Sweedler, J. V., "Nanocapillary array interconnects for gated analyte injections and electrophoretic separations in multilayer microfluidic architectures," *Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 10, pp. 2224-2230, 2003.
11. Chen, G., McCandless, G. T., McCarley, R. L. and Soper, S. A., "Integration of large-area polymer nanopillar arrays into microfluidic devices using in situ polymerization cast molding," *Lab on a Chip*, Vol. 7, No. 11, pp. 1424-1427, 2007.
12. Han, J. and Craighead, H. G., "Separation of long DNA molecules in a microfabricated entropic trap array," *Science*, Vol. 288, No. 5468, pp. 1026-1029, 2000.
13. Bao, L.-R., Cheng, X., Huang, X. D., Guo, L. J., Pang, S. W. and Yee, A. F., "Nanoimprinting over topography and multilayer three-dimensional printing," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 20, No. 6, pp. 2881-2886, 2002.
14. Kehagias, N., Reboud, V., Chansin, G., Zelsmann, M., Jeppesen, C., Reuther, F., Schuster, C., Kubenz, M., Gruetzner, G. and Torres, C. M. S., "Submicron three-dimensional structures fabricated by reverse contact

- UV nanoimprint lithography,” *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 24, No. 6, pp. 3002-3005, 2006.
15. Zhao, X. M., Xia, Y. N. and Whitesides, G. M., “Fabrication of three-dimensional micro-structures: Microtransfer molding,” *Advanced Materials*, Vol. 8, No. 10, pp. 837-840, 1996.
16. Harfenist, S. A., Cambron, S. D., Nelson, E. W., Berry, S. M., Isham, A. W., Crain, M. M., Walsh, K. M., Keynton, R. S. and Cohn, R. W., “Direct drawing of suspended filamentary micro- and nanostructures from liquid polymers,” *Nano Letters*, Vol. 4, No. 10, pp. 1931-1937, 2004.
17. Xiu, Y. H., Zhu, L. B., Hess, D. W. and Wong, C. P., “Biomimetic creation of hierarchical surface structures by combining colloidal self-assembly and Au sputter deposition,” *Langmuir*, Vol. 22, No. 23, pp. 9676-9681, 2006.
18. Wang, M. F., Raghunathan, N. and Ziaie, B., “A nonlithographic top-down electrochemical approach for creating hierarchical (micro-nano) superhydrophobic silicon surfaces,” *Langmuir*, Vol. 23, No. 5, pp. 2300-2303, 2007.
19. Erbil, H. Y., Demirel, A. L., Avci, Y. and Mert, O., “Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface,” *Science*, Vol. 299, No. 5611, pp. 1377-1380, 2003.
20. Decker, C., “Kinetic study and new applications of UV radiation curing,” *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 23, No. 18, pp. 1067-1093, 2002.
21. Jeong, H. E., Kwak, R., Kim, J. K. and Suh, K. Y., “Generation and self-replication of monolithic, dual-scale polymer structures by two-step capillary force lithography,” *Small*, Vol. 4, No. 11, pp. 1913-1918, 2008.
22. Kim, P., Jeong, H. E., Khademhosseini, A. and Suh, K. Y., “Fabrication of non-biofouling polyethylene glycol micro- and nanochannels by ultraviolet-assisted irreversible sealing,” *Lab on a Chip*, Vol. 6, No. 11, pp. 1432-1437, 2006.
23. Shiku, H., Saito, T., Wu, C. C., Yasukawa, T., Yokoo, M., Abe, H., Matsue, T. and Yamada, H., “Oxygen permeability of surface-modified poly(dimethylsiloxane) characterized by scanning electrochemical microscopy,” *Chemistry Letters*, Vol. 35, No. 2, pp. 234-235, 2006.
24. Tiemblo, P., Guzman, J., Riande, E., Salvador, E. F. and Peinado, C., “Gas-transport properties in crosslinked polymers. I. Aliphatic polyurethane-acrylate-based adhesive,” *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, Vol. 39, No. 7, pp. 786-795, 2001.