

<학술논문>

PDMS 유연 몰드를 이용한 구리 마이크로 메쉬 시트의 제작

정순녕* · 강창근* · 정임덕** · 배공명* · 박치열* · 정필구* · 고종수†
(2007년 8월 20일 접수, 2007년 10월 27일 심사완료)

Fabrication of Copper Micromesh Sheets Using PDMS Flexible Mold

Sun Nyeong Jung, Chang Kun Kang, Im Deok Jung, Kong Myeong Bae, Chi Yeol Park,
Phill Gu Jung and Jong Soo Ko

Key Words : Flexible Mold(유연몰드), PDMS(폴리디메틸실록산), Electroforming(전주도금), Polymer Replication(폴리머 복제), Micromesh(마이크로메쉬), Microcasting(마이크로캐스팅)

Abstract

A unique fabrication method for a copper micromesh is proposed and demonstrated. A PDMS mold was fabricated using a microcasting process and then used as a flexible mold in copper electroplating. The fabricated copper micromesh was well formed and connected without any cracks within the entire mold area. The experimental results verified that the fabricated features of the copper micromesh accurately followed the shape of the microstructures of the PDMS mold. This unique fabrication method provides an easy yet precise means of producing three-dimensional metal microstructures.

1. 서 론

최근 마이크로 가공기술은 잘 정립된 반도체 가공기술을 그대로 이용할 수 있는 실리콘 재질을 벗어나 폴리머 및 금속 재질로 그 외연을 크게 확대하고 있다. 이는 폴리머 및 금속 재질을 극미세 크기로 가공할 수 있는 각종 가공장비의 개발과 이를 이용한 대량생산의 가능성에 힘입은 바 크다. 단백질칩 또는 DNA 칩을 포함한 바이오칩 분야⁽¹⁾

와 백라이트유닛(BLU)과 같은 광분야^(2,3)에서는 대량생산에 적합한 마이크로/나노 폴리머 복제기술 개발이 매우 중요하며, 이를 위하여 폴리머 대량 복제에 필수적인 요소인 금속 몰드의 제작이 큰 관심을 받고 있다. 금속재질로 만들어지는 대부분의 마이크로 몰드는 실리콘 웨이퍼와 같은 기판 위에 사진공정과 금속 증착 공정 그리고 전주도금 공정을 거쳐 제작되고 있다.⁽⁴⁾ 이는 실리콘 웨이퍼 위에 감광막을 이용하여 원하는 패턴의 몰드를 제작한 다음, 금속 씨앗층을 증착하고 니켈이나 구리 도금용액을 이용하여 전주도금을 수행하는 일련의 과정을 거친다. 전주도금물을 실리콘 웨이퍼로부터 분리하기 위해서는 통상 실리콘 웨이퍼와 감광막 그리고 씨앗층을 차례로 식각하거나 강제로 떼어낸다. 이러한 과정 중에 실리콘 위에 형성된 각종 마이크로/나노 구조물은 제거되거나 파손

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
부산대학교 정밀정형및금형가공연구소(ERC/NSDM)
E-mail : mems@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2488 FAX : (051)514-0685

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 미세기계전자시스템협동과정

되어 재사용이 힘들어지게 된다.

한편 Harvard University 의 Whitesides 그룹에서 PDMS 를 이용한 마이크로 캐스팅 공정이 개발된 이후⁽⁶⁾로 단순한 공정과 저렴한 공정비용, PDMS 의 유연성과 생체적합성으로 인하여 미세 유체소자,⁽⁶⁾ 랩 온 어 칩(LOC),⁽⁷⁾ 인공 촉각센서를 포함한 인공피부,^(8,9) 생체전극⁽¹⁰⁾ 등 광범위한 분야에서 연구 및 개발이 이루어지고 있다. PDMS 를 이용한 공정으로는 회전 스탬프를 이용하여 대면적에 패턴을 전사하는 마이크로 집착인쇄(microcontact printing)와 PDMS 몰드를 진공을 이용하여 변형시키고 그 위에 UV 경화성 폴리머를 복제하여 렌즈를 제작하는 복제 몰딩(replica molding)기술이 이미 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾ 최근에는 PDMS 몰드에 형성되어 있는 수백나노 크기의 패턴을 곡면에 전사하는 소프트리소그래피 방법이 소개되었다.⁽¹¹⁾ 반면에 PDMS 는 금속과의 접착력이 상당히 낮아 생체 전극이나 촉각센서를 제작하는데 어려움이 있으며, 금속과의 접착력을 향상시키기 위해 산소 플라즈마(oxygen plasma)처리를 이용해 PDMS 표면의 거칠기를 향상시켜 접착력을 증가시키는 방법을 사용하기도 한다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 PDMS 캐스팅과 구리 전주도금을 결합하여 구리 메쉬 시트를 제작하는 새로운 공정을 제안하고자 한다. 마이크로 캐스팅 공정으로 제작된 PDMS 구조물은 도금을 위한 몰드로

사용되고, 도금된 구리 구조물은 PDMS 위에서 복제된다. 이러한 가공방법은 금속 몰드로부터 폴리머 구조물을 복제하는 기존의 가공방법과 반대되는 개념이다.

2. 설계 및 제작

2.1 기본개념과 마이크로 패턴 설계

PDMS 몰드를 이용하여 마이크로 구멍이 형성된 구리시트를 제작하는 기본개념을 Fig. 1 에 나타내었다. Fig. 1(a)에서와 같이 마이크로 돌출부가 형성되어 있는 PDMS 몰드 위에 전자빔증착기(electron beam evaporator) 또는 열증발증착기(thermal evaporator)를 이용하여 금속 전도성 씨앗층을 증착한다. PDMS 몰드의 돌출부 윗면에 증착된 금속층은 돌출부 하단면에 증착된 금속층과는 절연이 된다. 다음으로 Fig. 1(b)에서처럼 돌출부 하단면에 증착된 금속층에 전기를 연결하여 전주도금을 수행한다. 마지막으로 PDMS 몰드를 제거하면 돌출부의 형상대로 구멍이 형성된 금속 마이크로 메쉬 시트를 획득할 수 있다. PDMS 는 금속과의 접착력이 낮으며 유연하기 때문에 도금된 금속층은 PDMS 몰드와 쉽게 분리되며, 분리된 몰드는 재사용이 가능하다.

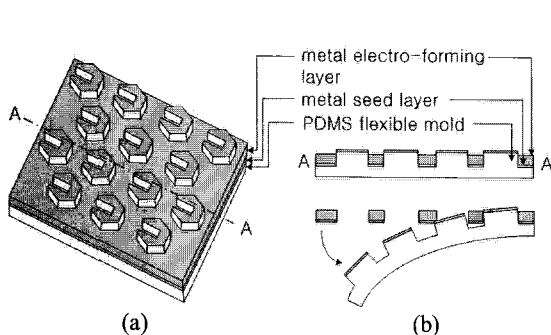


Fig. 1 The proposed concept for microfabrication of copper micromesh sheets: (a) PDMS mold. The elastomeric mold is coated with nickel seed layer and copper electro-forming layer; (b) copper electro-forming on the PDMS flexible mold and separation of micro-patterned copper sheet from the PDMS mold. These are the cross-sectional views along A-A of Fig. 1(a)

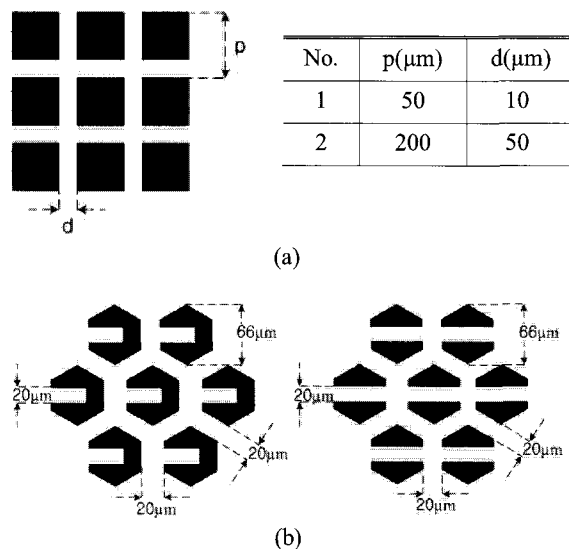


Fig. 2 The proposed patterns for copper micromesh sheets and their dimensions: (a) square patterns; (b) Hexagonal patterns

본 연구에서 제작하고자 하는 마이크로 패턴은 Fig. 2 에 도시한 바와 같이 정사각형과 정육각형 두 종류이다. 정사각형은 Fig. 2(a)에서와 같이 피치와 패턴 사이의 간격을 달리한 두 종류이며, 정육각형은 Fig. 2(b)에서와 같이 중앙을 가로지른 외팔보와 양단지지보 형태로 설계하였다. 정육각형의 내부에 외팔보 또는 양단지지보 형상을 넣은 이유는 본 논문에서 제안하는 제작공정으로 복잡한 구조의 금속 구조물을 제작할 수 있는지를 확인하기 위함이다. 각 패턴에 대한 구체적인 치수는 Fig. 2 에 상세히 기재되어 있으며, 제안한 형상과 치수에 근거하여 포토마스크를 제작하였다.

2.2 PDMS 몰드 제작 공정

구리 마이크로 메쉬 시트는 사진공정, 마이크로 캐스팅, 전주도금의 일련의 공정을 거쳐서 제작된다. 전체 제작공정은 그림 Fig. 3 에서 보는 바와 같다. 이 중 Fig. 3(a)~(e)는 PDMS 몰드 제작공정을 나타내며, Fig. 3(f)~(i)는 구리전주도금 공정을 나타낸다.

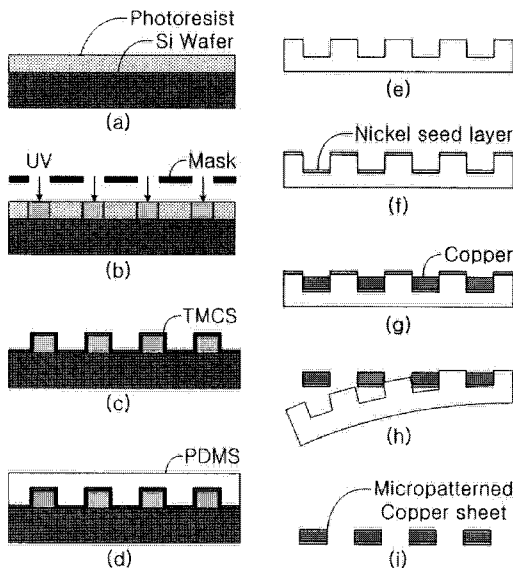


Fig. 3 The fabrication process of copper micromesh sheets: (a) photoresist coating on a silicon substrate; (b) photolithography; (c) TMCS evaporation; (d) PDMS casting; (e) separation of PDMS mold from the silicon substrate; (f) nickel seed layer evaporation onto the PDMS mold; (g) copper electro-forming; (h) removal of the PDMS mold; (i) fabricated copper micromesh sheet

PDMS 캐스팅 공정을 위해서는 우선 사진공정을 이용하여 마이크로 구조물을 형성하여야 한다. 먼저 높은 구조물 제작에 적합한 SU-8 을 실리콘 웨이퍼 위에 코팅한 후[Fig. 3(a)], UV 노광을 실시한다[Fig. 3(b)]. 다음으로 감광막을 현상하여 마이크로 구조물을 형성한 후, 실리콘 웨이퍼와 PDMS 의 이형을 쉽게하기 위하여 TMCS(Tri-MethylChloroSilane) 1 ml 를 50°C 온도에서 기화시켜 실리콘 웨이퍼 표면에 기상 증착한다[Fig. 3(c)]. 그리고 PDMS 주체와 경화제를 10:1 체적비율로 혼합하여 실리콘 기판 위에 부은 후, 10⁻³ torr 의 진공분위기에서 30 분 동안 기포를 제거한 다음, 100 °C에서 1 시간 동안 경화한다[Fig. 3(d)]. 사용된 PDMS 는 Dow Corning 사의 SYLGARD® 184D 이다. 경화된 PDMS 를 실리콘 기판으로부터 분리하여 전주도금을 위한 PDMS 몰드를 완성한다[Fig. 3(e)]. PDMS 몰드에 형성된 마이크로 구조물의 형상은 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8 으로 형성된 구조물의 역상이 된다.

2.3 구리 메쉬 시트 제작 공정

구리 전주도금을 수행하기 위하여 열증발증착기를 이용하여 PDMS 몰드 위에 1200Å 두께의 니켈을 증착한다[Fig. 3(f)]. Fig. 3(f)에서 볼 수 있듯이 니켈은 PDMS 구조물의 상부와 하부에만 증착되고, 측면에는 증착되지 않기 때문에 구조물 상부의 니켈층과 하부의 니켈층은 전기적으로 절연된다. 구조물 하부에 증착된 니켈은 전주도금을 위한 전도성 씨앗층 역할을 한다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 구조물 하부에 증착된 니켈층은 전면이 연결되어 있으므로 전면에 전기가 흐른다. 구리 전주도금을 위하여 구조물 하부의 니켈층에 음극을 연결하고 도금용액에 양극을 연결하여 구리 전주도금을 수행한다[Fig. 3(g)]. PDMS 몰드의 돌출부분에 증착된 니켈 금속에는 전기가 통하지 않아 구리가 석출되지 않으며 PDMS 몰드의 바닥부분에 증착된 니켈 씨앗층에는 구리가 석출되어 몰드의 패턴 형상대로 구리 시트를 이루게 된다. 최종 도금물의 두께는 PDMS 구조물의 높이보다 크지 않게 하여야, 구멍이 형성된 메쉬 형태의 시트 제작이 가능하다. 만약 도금을 PDMS 구조물보다 매우 높게 하여 금속 스탬프형으로 제작한다면 금속 몰드로 사용이 가능하다. 본 연구에 사용된 도금용액은 황산구리 혼합액이며 도금용액의 조성과 공정 조건은 Table 1 과 2 에서 보는 바와 같다. 도금을 완료한 후 구리 시트로부터 PDMS 몰드를 분리하

여 구리 마이크로 메쉬 시트를 완성한다[Fig. 2(h), (i)]. 이때 PDMS 는 유연하며 금속 씨앗층과의 접착력이 낮기 때문에 분리가 쉽게 이루어진다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4(a)는 Fig. 2(a)의 No.1 의 설계안으로 제작된 정사각형태의 PDMS 몰드 제작 예를 보여준다. 정사각형 PDMS 구조물 중 피치가 50 μm , 구조물 사이의 간격이 10 μm 인 구조물을 50 μm 의 높이로 제작하였을 때, 구조물간에 붙는 현상이 발생하여 몰드로 사용하기에 부적합하였다. 이는 PDMS 와 같은 탄성 중합체가 안고 있는 근본적인 문제점의 하나로써, PDMS 의 중합비를 낮게 하거나 구조물 사이의 간격을 넓히면 해결이 가능하다. 하지만 본 연구에서는 도금 두께를 고려하여 PDMS 구조물의 높이를 최소 50 μm 로 정하였으므로 본 형상은 사용하지 않았으며, 다만 피치 200 μm , 구조물 사이의 간격이 50 μm 인 구조물을 50 μm 의 높이로 제작하였을 때는 Fig. 4(b)에서와 같이 구조물 간에 붙는 현상이 발생하지 않았다.

Table 1 Composition of the copper electro-forming solution

Copper Sulfate	Sulfuric acid	Chlorine ion	Brightner (sp-95)
200 g/L	60 g/L	60 mg/L	2.0 ml/L

Table 2 Copper electro-forming condition

Current Density	PH	Temp.	Time
20 mA/cm ²	3.2	22 °C	45 min

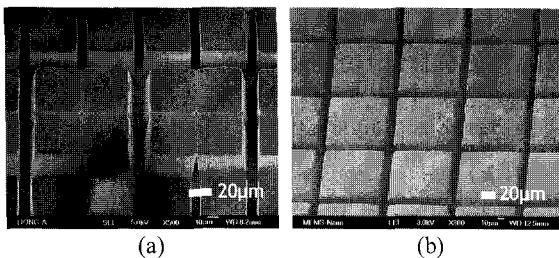


Fig. 4 SEM images of the fabricated flexible PDMS mold: (a) pairing between pillars with the area of the square pillars of 40 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, the height of 50 μm , and the gap between pillars of 10 μm ; (b) no pairing with the area of 90 $\mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$, the height of 50 μm , and the gap of 10 μm

Fig. 5 는 정육각형의 마이크로 구조물 제작 과정에서의 주요공정을 확대 촬영한 사진이다. Fig. 5(a)는 PDMS 몰드를 촬영한 것이고, Fig. 5(b)는 니켈 씨앗층을 증착한 사진이다. Fig. 5(c)는 구리 전주도금을 수행한 결과를 찍은 사진으로써, PDMS 몰드를 제거하지 않은 상태이다. Fig. 5(a)로부터 PDMS 몰드의 형상에서 정육각형의 모서리가 뚜렷이 형성되지 않은 것을 볼 수 있는데, 이는 필름 포토마스크를 사용한 관계로 포토마스크의 정밀도가 다소 떨어졌으며, 노광 시 포토마스크와 감광막 사이에 완전한 밀착이 되지 않아 빛이 측면방향으로 산란되었기 때문으로 생각된다. Fig. 5(c)로부터 구리 전주도금이 구조물의 하부 평면에만 진행된 것을 확인할 수 있는데, 이로부터 구조물의 상부에 증착된 니켈이 하부 평면에 증착된 니켈 씨앗층과 절연이 되었음을 알 수 있다.

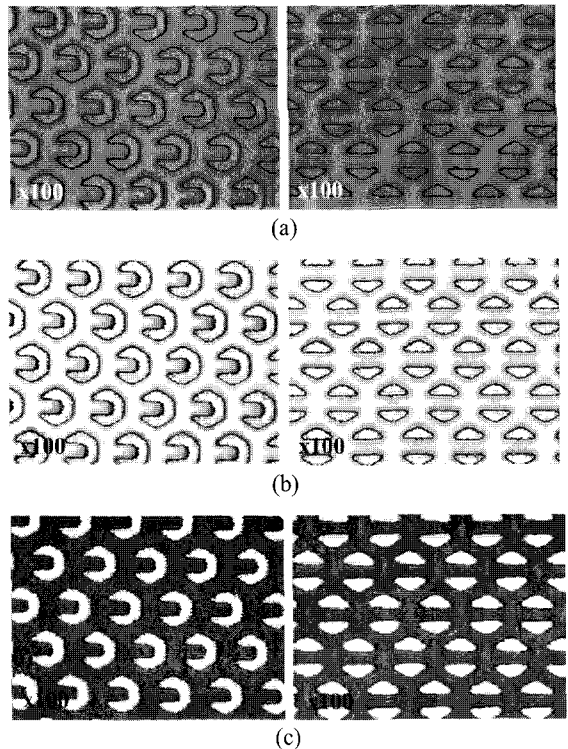


Fig. 5 Microscopic images of the PDMS flexible mold: (a) The PDMS flexible mold has hexagonal patterns on the mold's surfaces; (b) Nickel evaporation on the PDMS flexible mold; (c) Copper electro-forming on the PDMS flexible mold

각 형상별로 제작된 구리 마이크로 메쉬 시트는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 각 그림의 왼쪽은 광학현미경 사진이며, 오른쪽은 주사전자현미경 사진이다. Fig. 6(a)의 정사각형 메쉬 구조의 경우 - Fig. 2(a)의 No. 2의 설계안으로써 - 구조물의 피치가 200 μm 이고 패턴 사이의 간격이 50 μm 인 PDMS 몰드를 이용하여, 구리 전주도금을 40 μm 의 두께로 실시한 결과이다. 외팔보 및 양단지지보 형태에서도 Fig. 6(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 40 μm 의 두께의 구리 메쉬 시트가 성공적으로 제작되었음을 확인할 수 있다. 주사전자현미경 사진으로부터 제작된 구리 메쉬 시트의 표면이 매우 거칠음을 알 수 있다. 이는 구리 전주 도금 용액의 조성 및 도금조건에 따라 개선이 가능하다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

한편, PDMS 구조물이 구리 메쉬 내에 갇혀 있다고 하더라도, PDMS의 탄성 때문에 PDMS 몰드와 구리 메쉬 시트 분리가 매우 용이하였다. PDMS 몰드와 구리 메쉬 시트의 분리 시 PDMS 몰드에 증착되었던 니켈 씨앗층은 구리 메쉬 시트에 부착되어 떨어졌다. 이는 니켈 씨앗층과 구리

도금층과의 접착력이 PDMS 몰드와의 접착력보다 크기 때문이다. 증착된 니켈 씨앗층이 PDMS 몰드로부터 깨끗하게 분리되기 때문에 부가적인 세정 작업 없이 곧바로 PDMS 몰드의 재사용이 가능하다.

4. 결론

마이크로 캐스팅공정을 이용하여 제작한 PDMS 구조물을 몰드로 사용하여, 구리 전주도금으로 구리 마이크로 메쉬 시트를 제작하는 새로운 공정을 제안하였고 실험적으로 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 PDMS 몰드는 기존의 딱딱한 실리콘 또는 금속 몰드에 비하여 많은 장점을 가진다. 먼저, PDMS는 탄성체이기 때문에 복잡한 형태의 PDMS 마이크로 구조물이 도금물에 갇혀 있어도 몰드 및 도금물 양쪽에 손상 없이 분리가 가능하다. 또한 PDMS는 금속과 낮은 접착력을 가지고 있으므로 구리 메쉬 시트와 PDMS 몰드를 분리할 때, 전도성 씨앗층이 구리 메쉬 시트와 함께 제거되기 때문에 거의 원형에 가까운 깨끗한 PDMS 몰드를 획득할 수 있다. 그러므로 부가적인 세정 공정 없이 PDMS 몰드를 반복적으로 재사용할 수 있다. 아울러 PDMS 몰드는 제작 방법이 매우 간단하고 제작 시간이 짧으며, 제작 비용이 거의 들지 않는다는 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 PDMS 몰드는 예시한 구리 마이크로 메쉬 시트 제작을 넘어서 다양한 금속 구조물 제작에 활용될 수 있다. 일례로, 구리 전주도금을 PDMS 마이크로 구조물의 높이를 넘어서 충분히 두껍게 수행할 경우, 도금된 금속구조물은 단일 덩어리 형태가 될 것이며, 이는 마이크로 사출성형에 적합한 금속 몰드 또는 핫엠보싱 공정에 적합한 금속 스탬프로 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유학술과제연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Chang Jun-Keun, 2002, "Molding Technology of the Plastic Lab-on-a-Chip," *Journal of the KSME*, Vol. 42, No. 6, pp. 54~58.
- (2) Hwang, C. J., Ko, Y. B., Kim, J. S. and Yoon, G. H., 2006, "A Study on the Fabrication Method of LCD-BLU by Continuous Micro-Lens : I. Optical Analysis

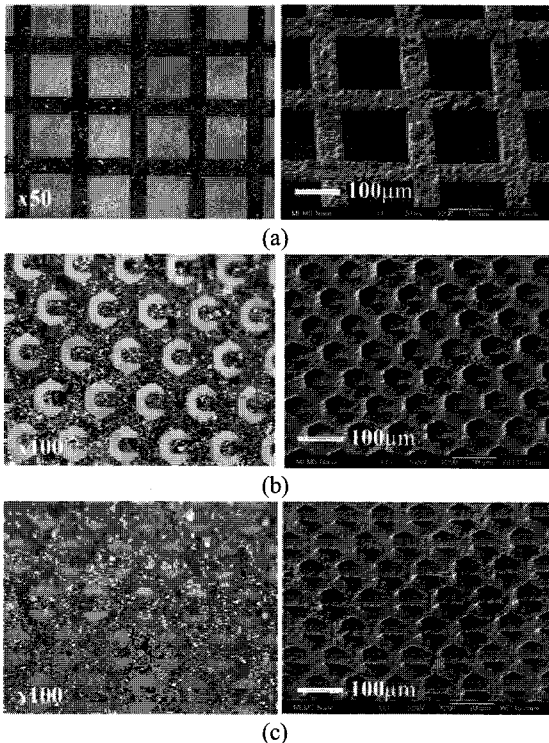


Fig. 6 Fabricated copper micromesh sheet (left: microscopic images, right: SEM images): (a) square pattern; (b) and (c) hexagonal patterns

- and Design," *The Optical Society of Korea Summer Meeting*, pp. 95~96.
- (3) Hwang, C. J., Ko, Y. B., Kim, J. S. and Yoon, G. H, 2006, "A Study on the Fabrication Method of LCD-BLU by Continuous Micro-Lens : II. Mold and Optical Characteristics," *The Optical Society of Korea Summer Meeting*, pp. 557~558.
- (4) Kim Kyoung Min, 2006, "Fabrication of High Aspect Ratio Micro Polymer Structure Using Micro Injection Molding," *Master Thesis of Pusan National Univ.*, pp.1~3.
- (5) Younan Xia and George M. Whitesides, 1998, "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 37, pp. 550~575.
- (6) Ji Ho Seong and Lee Sang Joon, 2006, "Experimental Study on Flow Characteristics in a Micro-stenosis Inside a Microchannel," *Journal of the KSME(B)*, Vol. 30, No.3, pp. 255~261.
- (7) Choi Joon-Young, Ahn Yoomin and Hwang Seung-Yong, 2006, "PDMS/Glass Based DNA Microbiochip for Restriction Enzyme Reaction and Electrophoresis Detection," *Journal of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 1, pp. 26~31.
- (8) Lee Hyung-Kew, Chang Sun-Il and Yoon Euisik, 2005, "A Modular Expandable Tactile Sensor Using Flexible Polymer," *The 7th Korea MEMS Conference*, pp. 77~80.
- (9) Choi Woo-Chang, Kwon Hyun-Jun and Kim Jong-Ho, 2006, "Fabrication of a Three-Axial Flexible Tactile Sensor Based on Polymer Micromachining," *The 8th Korea MEMS Conference*, pp. 410~413.
- (10) Baek Ju-Yeoul, Kwon Gu-Han and Lee Sang-Hoon, 2005, "Fabrication and Evaluation of the Flexible and Implantable Micro Electrode," *The 7th Korea MEMS Conference*, pp. 491~494.
- (11) Choi Won Mook and Park O Ok, 2004, "The Fabrication of Submicron Patterns on Curved Substrates Using a Polydimethylsiloxane Film Mould," *Nanotechnology*, Vol. 15, pp. 1767~1770.
- (12) Park Byung Nam, Kang Hyun Jae and Choi Sie Young, 2003, "Growth and Annealing Effect of Cu thin Films Using Electroplating Technique," *Journal of the IEEK*, Vol. 40, No. 10, pp. 735~742.
- (13) Woo Tae-Gyu, Seol Kyeong-Won, Lee Hyun-Woo, Park Il-Song, Yoon Young-Min, Yoon Jeong-Mo and Woo Kyeong-Nyong, 2006, "The Effect of Additives and Current Density on the Copper Electrodeposition Using Galvanostatic Mode," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 44, No. 8, pp. 575~580.
- (14) Min Byung Seung, Chung Won Sub and Kim In Gon, 2002, "Effect of Frequency on Properties of Film in Cu Electroplating using Square Pulse Current," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 40, No. 12, pp. 1281~1286.