

## ◆특집◆ 스마트 재료의 응용

# 지능재료를 이용한 3-D MEMS의 제작

김재환\*

## Fabrication of 3-D MEMS using smart materials

Jaehwan Kim \*

**Key Words :** 3-D MEMS (3차원MEMS), Microstereolithography (MSL), Non-silicon based MEMS (비실리콘MEMS), Carbon nanotubes (탄소나노튜브), Microstructures (마이크로구조물)

### 1. 서론

Microelectromechanical Systems(MEMS)와 지능시스템(smart system)의 기술은 학제적인 분야로서 최근에 화학, 기계, 전기, 의학, 재료 그리고 식품 등의 다양한 집단의 관심을 모으고 있다. 지능시스템은 주위환경의 변화를 감지하고 재료의 성질이나 형상 또는 기계적 전기적 응답을 변화시켜서 이 변화에 대응하는 거동을 하는 디바이스를 일컫는다. 이러한 영역에 속하는 재료에는 광학적으로 작동 가능한 폴리머나 다기능 폴리머, 탄소 나노튜브, 압전 또는 다른 능동 세라믹 등이 있다. 센서와 작동기 그리고 신호처리와 제어기를 위한 전기회로를 가지는 MEMS의 제작은 반도체 산업에 근간을 둔 마이크로 제작기술의 발전에 의해 최근 10여년간 가능하게 되었다. 벌크 마이크로 머시닝, 표면 마이크로 머시닝과 같은 마이크로 제작기술은 현재 MEMS를 위하여 사용되고 있다. 이러한 기술은 그러나 큰 두께 비나 곡면을 갖는 실제적인 3 차원 MEMS에는 적합하지 못하다. 지금까지 전통적인 MEMS에서 실제적인 3 차원 물체는 평면에서 마이크로 제작된 실리콘 구조물을 접거나 조립하여 제작되었다. 이러한 기술에서 사용된 실리콘재료는 적절한 기계적 전기적 특성을 갖고 있

으며 특히 전기회로를 개발하기 위하여 매우 용이하다. 유기 박막 트랜지스터가 고안됨에 따라 유기체 MEMS 가 내장형 전기회로와 함께 제작이 가능할 것으로 보인다. 더욱이 복합된 구성기술을 응용하면 실리콘 디바이스와 폴리머 재료의 디바이스를 어렵지 않게 통합할 수 있다. 따라서 실리콘이 아닌 이러한 폴리머들을 이용한 3 차원 물체를 만들 수 있는 기법을 개발하는 것이 필요하다.

최근에 MSL(microstereolithography)기술이 다기능 폴리머 재료의 사용을 가능하게 함에 따라 MEMS 산업에 일대 혁명을 일으키고 있다. 최근 생물학, 화학, 의학분야에서는 실리콘 아닌 다른 재료의 3 차원 MEMS 의 마이크로 제작기술이 요구되고 있다. MSL, AMANDA 프로세싱, 마이크로 폴딩, soft-lithography, EFAB 등의 기술이 다양하게 개발되고 있으며 실리콘과 아울러 폴리머, 세라믹, 금속, 합금 그리고 대체 가능한 다른 지능 재료들의 이용을 연구하고 있다. 본 기고에서는 3 차원 MEMS를 만드는 마이크로 제작기술을 소개하고 폴리머뿐만 아니라 실리콘, 금속, 그리고 세라믹 등의 지능화가 가능한 재료를 이용한 3 차원 MEMS 제작에 대하여 다루고자 한다.

### 2. MEMS를 위한 마이크로 제작기술

실리콘 마이크로 가공은 MEMS의 구현에 있어서 중요한 역할을 해왔다. 실리콘 마이크로 가공은 실리콘 층 안으로 에칭을 하여 구조물을 만드

\* 인하대학교 기계공학과

Tel. 032-860-7326, Fax. 032-868-1716

Email jaehwan@inha.ac.kr

지능재료를 이용한 구조물, 디바이스, MEMS의 개발에 관심을 두고 연구하고 있다.

는 벌크 마이크로 가공과 표면에 층파 필름을 쌓아서 기계적인 층을 만드는 표면 마이크로 머시닝으로 나누어진다.

## 2.1 Bulk Micromachining

벌크 마이크로 머시닝은 실리콘 마이크로 머시닝 기술에서 가장 보편적인 기술로서 대부분의 압력센서, 실리콘 밸브, 그리고 90%의 실리콘 가속도계를 제작하는데 쓰인다. 벌크 마이크로 머시닝 이란 말은 단결정 실리콘 웨이퍼의 벌크를 선택적으로 부식의 기법을 이용하여 없앰으로써 마이크로 구조물을 만든다는 것에서 왔다. 벌크 마이크로 머시닝으로 제작된 마이크로 구조물의 두께는 마이크론 이하에서 웨이퍼의 전체 두께(200~500  $\mu\text{m}$ )까지 될 수 있으며 축면의 크기는 마이크론 이하에서 웨이퍼 전체 길이까지 이를 수 있다. 벌크 마이크로 가공기술은 실리콘 재료를 선택적으로 원하는 만큼 제거하여 웨이퍼의 한면에 박막을 만들 수도 있고, 여러 형태의 골, 구멍 또는 다른 구조물을 만들 수 있다. 벌크 마이크로 가공은 에칭제의 종류에 따라 습식 에칭과 건식 에칭으로 나누어진다. KOH 와 같은 용액을 사용하는 경우를 습식 에칭이라 하고 증기, 플라즈마와 같은 것을 사용하는 경우를 건식 에칭이라 한다. 여러 가지 좋은 etch-stop 기법들이 소개되었지만 벌크 마이크로 머시닝은 제어하기에 어려운 산업 공정이며 마이크론 미만의 가공이 어려운 단점이 있다. 또한 실리콘 웨이퍼를 많이 소모한다든가 복잡한 구석을 부식하기에 어려운 단점이 있다.

## 2.2 Surface Micromachining

표면 마이크로 머시닝은 표면에 박막을 입히거나 제거함으로써 평면의 마이크로 구조물을 만드는 기법이다. 표면에 박막을 입히는 과정의 특성에 따라 매우 얇고 평탄한 구조물을 만들 수 있다. LPCVD(low-pressure chemical vapor deposition)법에 의해 생성되는 단결정 실리콘 필름은 몇 마이크론의 높이를 갖는다. 반면에 습식 벌크 마이크로 머시닝은 웨이퍼의 두께에 의해 구조물의 두께가 제한을 받는다. 그러나 다결정 실리콘은 단결정 실리콘보다 강도가 낮으며 특히 결정의 크기가 구조물의 두께와 근접하므로 위치에 따라 재질이 불균일하다. 다결정 실리콘은 금속 필름보다 재질이 우수하고 등방성의 성질을 가지므로 단결정 실리콘보다는 설계가 용이다. 표면 마이크로 머시닝에 의해 제조되는 실리콘 층의 두께는 잔류응력과 낮은 적층률에 의해 1~2 마이크론으로 제한된다. 최근 다양하게 개발되는 기법들은 표면 마이크로 머

시닝의 응용 폭을 넓히고 있다. 그러나, 다결정 실리콘은 전기적으로 열악한 성질을 갖고 있으며 기계적 성질이 일정치 않은 단점이 있다.

## 2.3 LIGA

LIGA 는 X-ray lithography, electrodepositon 과 molding 의 복합적인 약자이다. 이 과정은 마이크론에서 센티미터에 이르는 두꺼운 X-선 저항층과 고에너지의 X-선 방사 그리고 3 차원 저항층 구조물의 생성으로 이루어진다. 연이은 electrodepositon은 저항층 물드를 금속으로 채우고, 저항층 구조물을 없애고 난 후에는 자유로운 금속 구조물이 형성된다. 이 금속 구조물은 최종 제품이 될 수도 있고 정밀 플라스틱 사출 금형의 인서트로도 사용될 수 있다. LIGA 는 IC 기술과 전통적인 가공기술이 접목된 형태의 기술로서 종래의 기술을 보완할 수 있는 가능성이 많다. 이 기술은 IC 기술에서 lithography 를 빌려오고 도금과 물드를 전통적인 가공에서 빌려온 형태이다. 따라서 여러 가지 재료와 다양한 형태를 만들 수 있는 LIGA 의 특징은 큰 aspect ratio 와 절대적인 공차를 낼 수 있는 장점으로 더불어 전통적인 기술과 매우 친근한 장점이 있다. LIGA 가 만들 수 있는 3 차원 치수는 마이크로 미만의 마이크로 구조물로부터 밀리 구조물 그리고 이들의 패키징에 필요한 커넥터 구조물에 이르기까지 그 응용 가능성이 매우 넓다. 그러나 X-선 lithography 의 사용과 표면의 조도를 매우 낮게 할 수 없는 점이 기법의 보편화를 저해하고 있다.

## 2.4 Microstereolithography (MSL)

MSL 은 3 차원의 복잡한 형상과 마이크로에서 밀리미터까지의 작은 폴리머 구조물을 만들 수 있는 새로운 마이크로 제작 기술이다. 이 기술은 마이크로 전자기술로부터 나온 기술이 아니라 RP(rapid prototyping)기술로부터 나온 것으로 액상 레진을 한층 한층 레이저 빛을 가지고 폴리머화하는 것이다. 일단 컴퓨터에서 물체를 STL 파일 형태로 만든 다음 수많은 층으로 나눈다. 패턴 생성기에서는 각 층의 형상을 빛의 빔을 조작하여 만들어준다. 이 형상은 빛에 의해 폴리머화 되는 레진의 표면에 맷히게 되고 액상 레진을 선택적으로 폴리머화하게 된다. 한 층이 폴리머화하게 되면 셔터는 빛을 막게 된다. 물체를 한층 내리고 새로운 층의 레진이 이미 폴리머화된 물체의 표면에 퍼지게 되고 레진 액상 표면이 안정화되면 다음 층에 빛을 가하게 된다. 제조 속도는 분당 3~6 층

을 만들 수 있으며 시간당 1.5  $\mu\text{m}$ 를 가공할 수 있다. MSL에서 생산성은 각 총의 형상을 빛을 가지고 얼마나 빨리 생성해 주는가에 달려있다. 이를 위해서 dynamic mask projection을 MSL에 사용한다 [1]. 그림 1은 dynamic mask projection을 채택한 MSL의 개념을 나타내고 있다. 한 총을 빛으로 완전하게 노출하여 생성하기 위하여 광원에서 나온 빛은 컴퓨터에 의해 제어되는 LCD(liquid crystal display)의 dynamic mask projection에 의해 형상을 구성하게 된다. 일반적으로 어드레스된 LCD 빛 밸브 패널이 빛을 점등하는 일종의 프로젝터로 사용된다. 액정 효과가 이러한 응용을 위하여 빛의 투과성을 조절하는데 응용되는 것이다. 액정 효과란 전기장을 인가했을 때 액정재료의 전기적, 광학적 특성이 바뀌는 것을 말한다. LCD 패널은 픽셀로 구성되어 있는데 이 패널은 나선형의 전기적 커넥션으로 분리되어 있다. 모든 픽셀은 일정한 액정상태의 물질을 담고 있는 일종의 작은 셀로서 액정 분자들의 방향을 바꿈으로써 투명하거나 불투명하게 만들 수 있다. 불투명한 상태의 픽셀은 빛을 차단하고 반면에 투명한 픽셀은 빛을 통과한다. 대개 LCD 패널은 박막 트랜지스터(thin film transistor, TFT) 배열로 어드레스 된다. 셀에 전기가 인가되면 액정의 분극 방향은 회전하지 않고 빛은 차단된다. 반면에 전기장이 제거되면 polarizer와 액정의 분극 방향이 회전하여 평행해짐에 따라 빛이 통과하게 된다. MSL의 투영에 LCD를 이용함에 있어서 3 차원 물체의 한 단면을 나타내는 CAD 파일은 공백에 따라 흰색과 검정색으로 나타내어지고 이 데이터는 컴퓨터에 의해 LCD 디바이스에 보내지는 수치제어 코드로 바뀌어진다. LCD는 따라서 제어되는 이미지에 따라 동적 마스크(dynamic mask)와 같이 동작하게 된다. MSL의 광원에서 나온 빛이 이 LCD를 통과하게 되면 CAD 모델의 현재 단면의 형태를 갖게 된다. 이 빛을 최종적으로 레진 표면에 초점을 맞추게 되면 LCD의 투명한 픽셀에 해당하는 영역 빛이 투과되어 선택적인 폴리머화가 이루어지게 된다. MSL 제품의 횡방향 치수는 LCD 마스크에 의해 결정되며 해상도가 낮아진다. 많은 픽셀을 갖는 LCD를 사용함으로써 (예: 640X480) 횡방향 해상도를 약 2X2 마이크론까지 얻은 예가 있다. 그림 2는 dynamic mask projection MSL을 사용하여 제작한 3

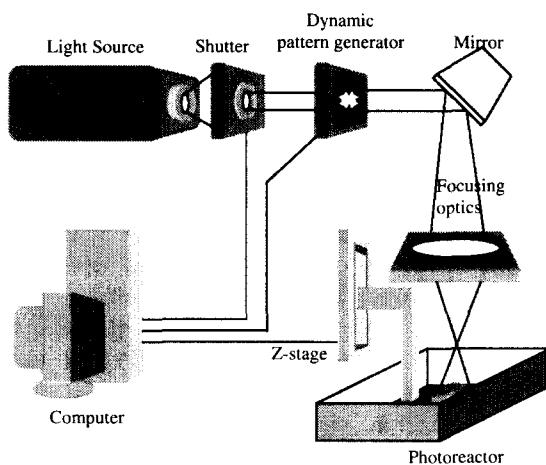


Fig. 1 Schematic diagram of dynamic mask projection MSL.

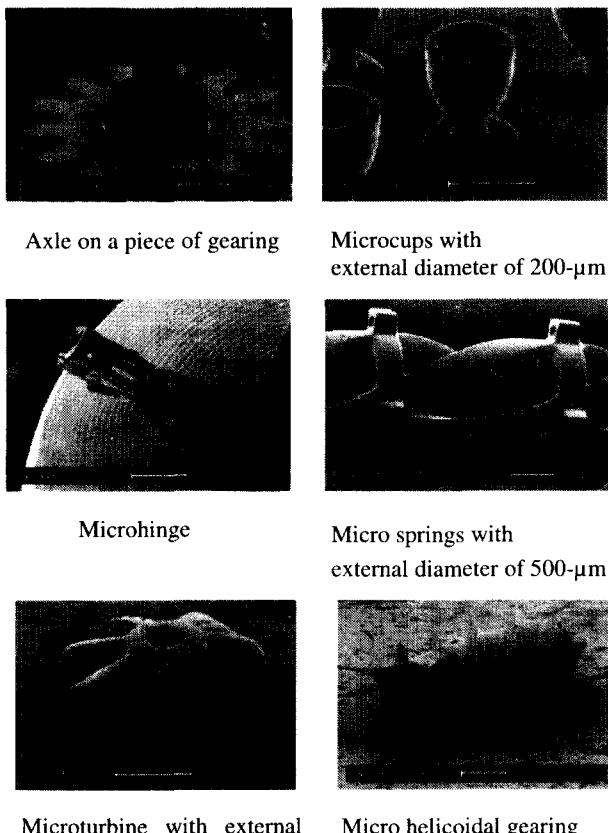


Fig. 2 3D microstructures fabricated by dynamic mask projection MSL.

차원 마이크로 구조물을 나타낸다 [2]. Dynamic mask projection 을 사용한 MSL 은 횡방향 해상도를 개선해야 하는 문제점이 있음에도 불구하고 3 차원 마이크로 시스템의 대량 제작 가능성으로 인해 각광을 받고 있으며 제작 영역도 넓어지고 있다.

### 3. 지능 재료를 이용한 MEMS

앞으로의 MEMS 는 응용분야의 조건을 만족하기 위하여 폴리머, 세라믹, 금속 또는 합금 등의 기능성 재료들을 통합한 것을 요구하고 있다. 이러한 다양한 재료의 통합화 기술은 바인더 소제(burnout), 소결(sintering), 도금 등의 기본적인 과정을 필요로 하며 이를 사용하여 압전 세라믹 MEMS 및 금속 마이크로 구조물 등을 만들 수 있다.

#### 3.1 바인더 소제 및 소결

3 차원 세라믹 또는 금속 마이크로 제작에 있어서 폴리머는 고형 입자를 붙여서 어떤 형상으로 만드는 바인더로 많이 사용된다. 대부분의 디바이스에서는 그러나 순수 금속이나 세라믹의 구조물을 요구하므로 바인더는 제거되어야 하고 마이크로 구조물은 소결을 거쳐서 밀도가 높은 구조물이 되게 된다.

일반적으로 바인더 제거에는 용매를 사용하는 방법과 열을 가하는 방법이 있다. 대부분의 광학적 형상 제작에 쓰이는 폴리머는 가교된 형태로 써 용매를 사용하기에는 부적절하고 열을 가하는 소제 과정(burnout process)이 자주 사용된다 [3]. 이 방법은 몇 개의 기본적인 과정으로 이루어진다. 열을 가하는 초기단계 동안에 액상 바인더의 열팽창은 형성된 물체에 접수 압력을 발생시킨다. 온도가 더 올라가게 되면 표면에서의 증발에 의해

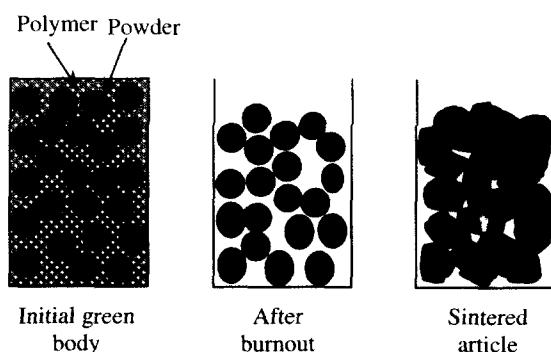


Fig. 3 Burnout and sintering process

바인더 제거가 증가하게 된다. 바인더의 포화온도가 내려가게 되면 모세관 효과에 의해 내부에 있던 액체 폴리머는 표면으로 나와서 증발하게 된다 이렇게 바인더의 제거가 계속되면 기공이 형성되게 되면 서로 연결된 그물망 형태가 된다. 결국 가스가 통과 할 수 있는 내부 구조가 되어 확산에 의해 바인더 제거가 이루어진다. 어떤 바인더 제거는 예를 들면 금속 마이크로 구조물을 위한 바인더 제거의 경우에는 산화가 이루어지면 안되므로 대기 중에서는 곤란하므로 아르곤, 질소 등을 사용하여 산화가 이루어지지 않도록 주위 환경을 제어해야 한다.

소결(sintering)은 열을 가하여 제품의 입자들을 서로 달라붙게 하는 방법이다. 소결에서는 따라서 형상적인 수축과 고밀도화가 이루어진다. 대개 소결은 재료의 용융점 가까이에서 이루어지는 데 개개 원자의 운동에 의해 입자간의 결합이 증대되게 된다. 이 온도는 재료마다 다르다. 예를 들면 철은 1250°C, 알루미늄은 1600°C, 구리는 1045°C, PZT 는 1200°C에서 소결된다. 대개 소결은 재료와 제품의 크기에 따라 수십 시간이 걸리기도 한다. 최근에 마이크로웨이브를 이용한 소결을 세라믹과 금속에 대해 적용한 연구를 하고 있는데 장점은 빠른 소결 속도이다. 그러나 부피가 큰 제품에 대해서는 비균일한 소결이 문제시되고 있는데, 마이크로 가공에서는 크기가 작으므로 문제시 될 것이 없으므로 마이크로웨이브 소결은 좋은 방법이 될 수 있다 [4].

#### 3.2 마이크로 도금 (microelectroplating)

도금은 전해질 속의 전극 사이에 전류가 흐르면서 한 쪽에 박막이 입혀지는 과정이다. 마이크로 도금 역시 도금의 원리를 사용한 것으로 두꺼운 금속 필름, 금속 마이크로 구조물과 그리고 3 차원 형상을 만들 수 있는 장점이 있다 [5]. 마이크로 도금은 마스크를 통한 도금(through-mask-plating)과 마스크가 없는 도금(maskless plating)으로 나눌 수 있다. 마이크로 도금된 부품은 기능성 디바이스의 부품으로 바로 쓰일 수도 있고 마이크로 몰딩의 볼드로도 쓰일 수 있다. 대부분의 MEMS 에서 사용하는 마이크로 도금은 마스크를 통한 도금이다. 그럼 4 는 마스크를 통한 도금의 개념을 나타내고 있다. MEMS 에서 사용하는 도금이 일반적인 도금과 다른 점은 MEMS 에서는 두꺼운 photoresist 물드를 사용한다는 점과 일반적인 전기도금에서는 단층을 사용하는 것에 반해 MEMS 에서는 금속 3 차원 마이크로 구조물과 큰 aspect ratio 를 갖는 형

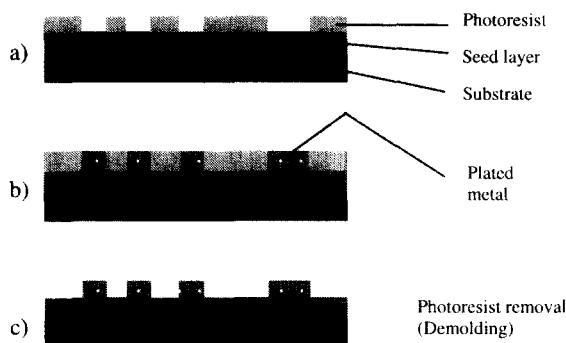


Fig. 4 Schematic diagram of through-mask plating.

상을 만들기 위해 다층 도금이 필수적이라는 점이다. 마이크로 도금에서 사용하는 재료로는 금, 구리, 알루미늄, 니켈, 그리고 이들의 합금이며 응용에 따라 달라진다.

### 3.3 세라믹 MSL

압전체와 같은 기능성 및 구조 세라믹은 높은 내열성, 내화학성, 낮은 열전도도, 강유전성, 압전성 등의 고유한 성질을 갖고 있어서 세라믹을 이용한 MEMS 의 응용은 많은 관심을 불러일으키고 있다 [6, 7]. 3 차원 세라믹 마이크로 구조물은 마이크로 엔진, 마이크로 벨브 등의 특별한 관심분야이다. 지금까지 2 차원이나 2 1/2 차원의 세라믹 마이크로 구조물은 마이크로 사출, 스크린 인쇄, 제트 폴딩, LIGA 사출 등에 의해 제작되었다. 이러한 방법과는 달리 MSL 을 이용한 복잡한 3 차원 세라믹 마이크로 구조물을 제작하는 연구가 각광을 받고 있다. 세라믹 MSL 이 폴리머 MSL 과 다른 점은 가장 먼저, 레진이 폴리머 MSL 에서 쓰이는 Monomer 와 Photoinitiator 뿐만 아니라 세라믹 분말, 분산제, 회석제 등으로 구성된다는 점이다 [8]. UV 폴리머화 과정에서 UV 빛을 받는 부분은 세라믹 입자는 폴리머에 의해 결합되며 초기 세라믹 물체가 형성된다. 일반적으로 MSL 에서 쓰이는 세라믹 입자가 혼합된 액체의 점도는 액체 폴리머의 점도보다 높으므로 각층을 준비하는데 느린다. 따라서 초정밀 블레이드(blade)를 장착하여 한 층을 굳힌 후 다른 층을 쌓기 전에 블레이드를 굽어서 균일하게 만들어준다. 두 번째로 다른 점은 MSL 에서 빛의 전달이 액체에 고체입자가 섞인 2 상 물질에서 복잡하게 된다는 점이다. 액체에 섞

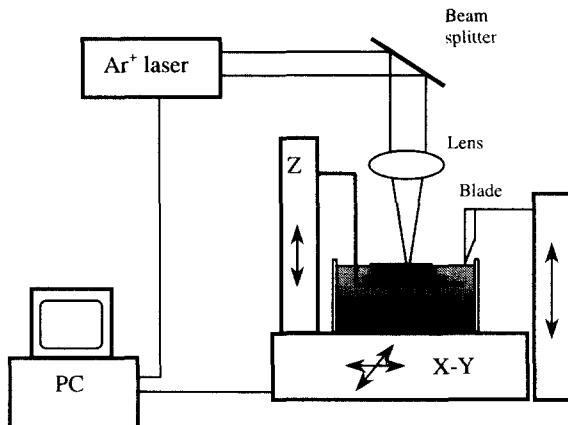


Fig. 5 MSL for ceramics.

인 세라믹 입자에 의한 빛의 산란은 응고 깊이와 선의 굵기에 영향을 미친다. 폴리머 MSL 에 비교하여 세라믹 MSL 은 세라믹 입자크기, 반사계수의 부가적인 인자들에 의하여 영향을 받는다. 따라서 세라믹 MSL 은 순수 폴리머 MSL 보다 매우 복잡하다. 최근에 몬테칼로 해석을 통하여 세라믹 MSL 의 광 폴리머화를 계산하는 시도를 하고 있다.

### 3.4 금속 마이크로 구조물

지금까지 MEMS 용 3 차원 금속 마이크로 구조물은 electrochemical fabrication(EFAB), spatial forming, localized electrodeposition, selective laser sintering, laser cladding 등을 이용하여 제작되어 왔다 [9-11].

Spatial Forming 프로세스는 미세분말로부터 금속 마이크로 구조물을 만들기 위해 여러 가지 기술을 합성하여 사용한다 (Fig. 6) [11]. MSL 과 유사하게 단면 데이터를 CAD 모델로부터 생성한 후 이 데이터를 가지고 리소그래피 인쇄판의 이미지를 나타내는 크롬 마스크의 패턴을 형성한다. 특수하게 제작된 옵셋인쇄 프레스는 세라믹 지지층에 고체부분 주위의 공간에 해당하는 네거티브재료(negative materials)를 인쇄하는데 평균 0.5 μm 두께의 유기 잉크의 여러 층으로 인쇄하며 각 층은 UV 빛에 의해 응고된다. 어느 정도 두께의 네거티브재료 층이 쌓이게 되면 (예, 30 층) 금속 분말과 혼합된 포지티브 잉크(positive ink)를 형성된 공간에 채우고 칼날로 일정하게 만든 다음 UV 빛으로 응고시킨다. 원하는 두께가 될 때까지 이 과정

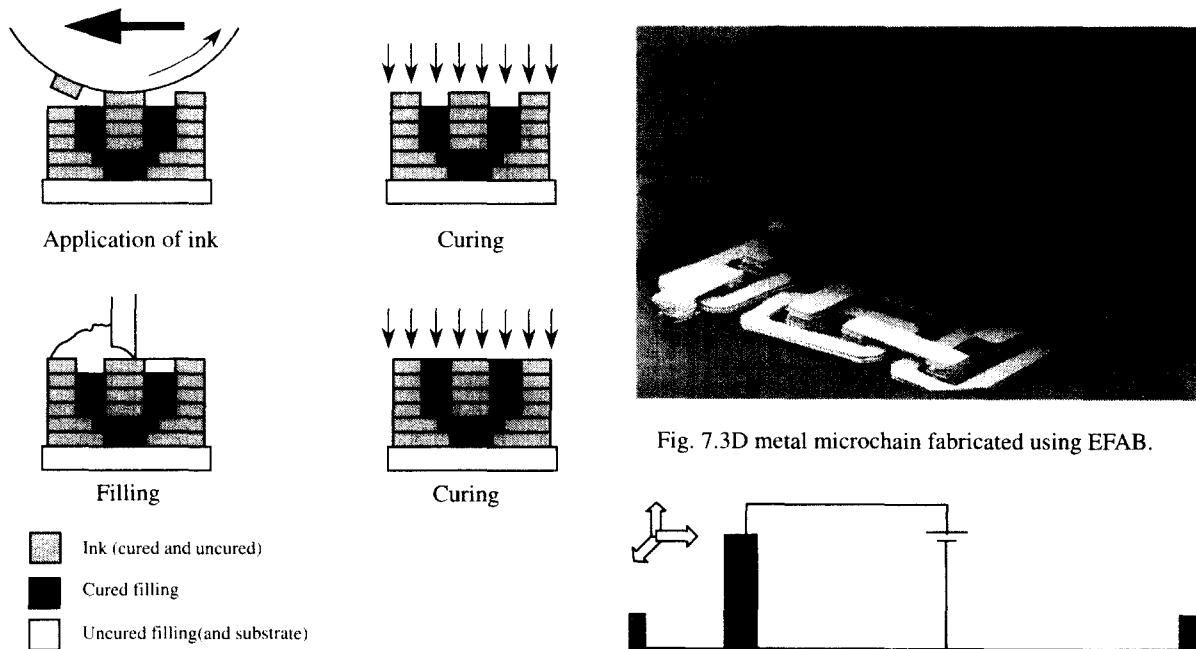


Fig. 6 Schematic diagram of spatial forming.

을 반복하여 초기의 금속 마이크로 구조물이 생성된다. 초기의 물체는 유기 바인더를 제거하고 소결을 하게 되면 최종 금속 마이크로 구조물이 형성된다.

EFAB(electrochemical fabrication)은 높은 두께의 3 차원 금속 마이크로 시스템을 만들 수 있는 기법으로 SFF(solid-free-form) 제조 원리에 기초한 기법이다 [10]. 주요과정은 인스턴트 마스킹, 선택적 도금, 블랭킷 도포, 그리고 평면화(planarization)으로 이루어진다. EFAB은 개발단계의 프로세스로서 해상도는 25  $\mu\text{m}$ 로서 래핑과 레이어가 어긋남에 의한 번짐이 정밀도에 영향을 끼친다. 더욱이 시간이 많이 걸리는 도금 단계가 많이 포함됨에 따라 제작 속도가 느린다.

Localized electrochemical deposition은 용액에 날카로운 끝을 가진 전극과 지지층을 설치하고 전극을 지지층에 아주 가깝게 접근시켰을 때 전극 아래 부분에 전기장이 생기면서 전기 화학적인 적층이 생기게 된다 (Fig.8) [9]. 원리적으로 연속된 3 차원 마이크로 구조물을 만들 수 있으면 공간 해상도는 마이크로 전극의 크기에 의해 결정된다. 특히 마이크로 전극의 기하학적 형상은 적층 형태에 매우 중요하다. 적층 속도는 6  $\mu\text{m}/\text{s}$ 이며 보통의



Fig. 7 3D metal microchain fabricated using EFAB.

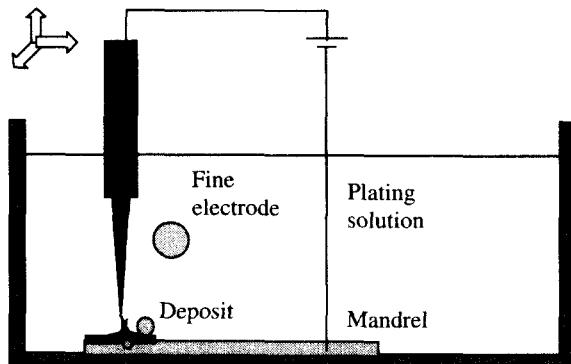


Fig. 8 Localized electrochemical deposition.

도금보다 매우 빠르다. 그러나 대량 생산과 조립의 어려운 점이 이 기법이 보편화되는데 걸림이 되고 있다.

### 3.5 금속/폴리머 마이크로 구조물

금속과 폴리머의 복합체로 된 마이크로 구조물은 미래의 MEMS에 매우 관심이 높아지고 있는 분야이다. 3 차원 물체의 도전성 층과 비도전성 층을 나누어 가공 후 조립하지 않고 동시에 적층하는 새로운 기법이 개발되었다 [12]. 그림 9는 금속-폴리머 제조과정을 나타낸다. 주요과정은 먼저 부품 I을 만들기 위해 구리를 도금 한다. 구리 도금에 연결된 도전성 재료를 얻기 위해 폴리머 위에 레이저를 이용하여 은을 적층한다. 비용해성 레진으로 MSL을 이용해 부품 II를 적층한다. 부품 I과 II 사이에 용해성 레진으로 MSL을 이용해 회생층을 만든다. 각 층의 형태를 바꿈으로서 3 차원의 복잡한 금속 구조물을 만들 수 있다. 구리 도

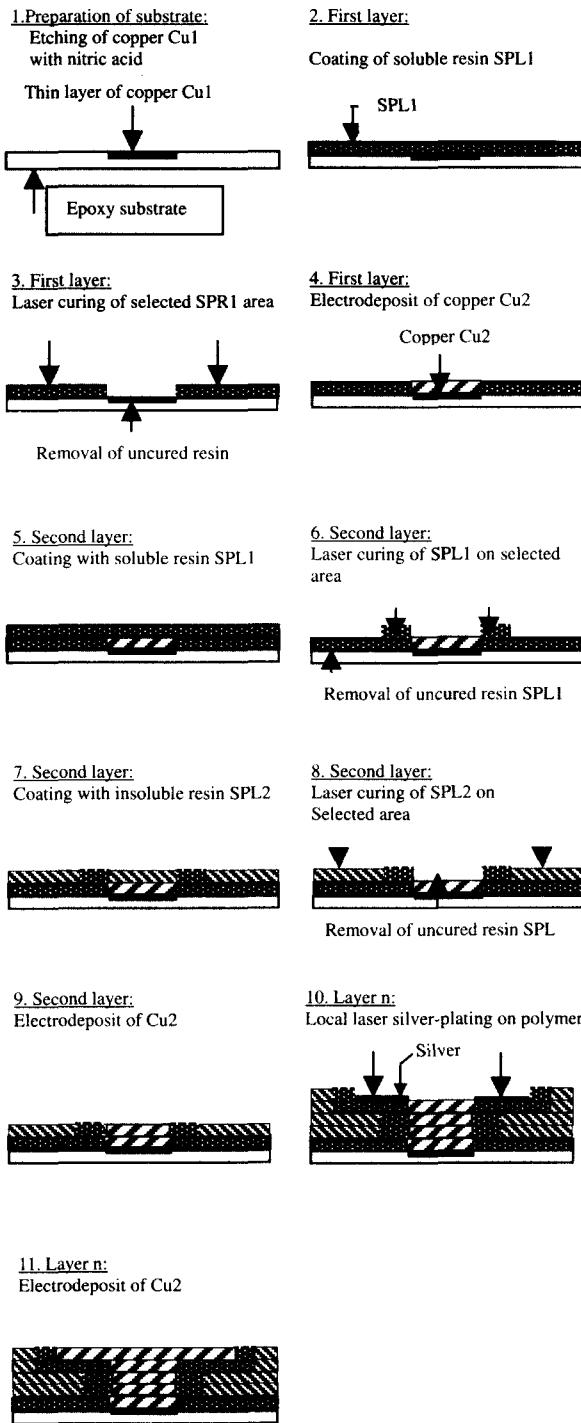


Fig. 9 Process flow for the fabrication of metal-polymer part.

금은 도전성 지지층에서만 이루어질 수 있으므로 국부적인 레이저 은 도금 기법을 이용하여 폴리머 지지층에 은을 도금하고 은 도금 층을 미리 도금된 구리 지지층에 연결한다. (단계 10). 도금과 MSL을 이용하여 모든 층을 제작하고 용해성 레진을 녹여내면 최종 금속-폴리머 마이크로 구조물이 되고 이것은 추가의 조립과정이 필요없다.

#### 4. 결론

본 고에서는 실리콘은 아닌 구조 또는 압전 세라믹, 폴리머, 금속과 같은 재료를 이용한 3 차원 MEMS 마이크로 구조물을 만드는 방법과 그 가능성에 대하여 서술하였다. 이러한 재료를 이용한 3 차원 MEMS 의 제작은 미래기술로서 필요한 기술이다. 예를 들면 폴리머 레진에 탄소나노튜브를 섞어서 MEMS 를 만드는 연구를 최근 미국에서 진행하고 있는데 이러한 지능재료는 실리콘이나 폴리머와는 차원이 다른 기계적강도와 전기적 특성을 얻을 수 있으므로, 앞으로 새로운 MEMS 및 마이크로 구조물의 장을 열게 될 것이다. 따라서, 이러한 기술의 발전과 함께 지능재료를 이용한 마이크로 센서, 마이크로 작동기, 바이오 칩 등의 나노 및 마이크로 시스템의 개발이 이루어지게 될 것이다.

#### 참고문헌

1. A. Bertsch *et al.*, "Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask generator," *Microsystem Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 42-47, 1997.
2. L. Beluze, A. Bertsch and P. Renaud, "Microstereolithography: a new process to build complex 3D objects," *Proc. SPIE*, 3680, pp. 808-817, 1999.
3. B.C. Mutsuddy and R.G. Ford, *Ceramic Injection Molding*, Chapman & Hall, New York, 1995.
4. R. Roy, D. Agrawal, J. Cheng and S. Gedevanishvili "Full sintering of powdered metal bodies in a microwave field," *Nature*, Vol. 399, No. 6737, pp. 668-670, 1999.
5. L.T. Romankiw, "A path: from electroplating through lithographic masks in electronics to LIGA in

- MEMS," *Electrochimica Acta*, Vol. 42, No. 20-22, pp. 2985-3005, 1997.
6. J.M. English and M.G. Allen, "Wireless Micromachined Ceramic Pressure Sensors," *Proc. 12<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on micro electro mechanical systems*, Orlando, FL, USA, pp. 511-516, Jan 17-21, 1999.
  7. V.K. Varadan, V.V. Varadan and S. Motojima, "Three-dimensional polymeric and ceramic MEMS and their applications," *Proc. SPIE*, 2722, pp. 156-164, 1998.
  8. X. Zhang, X.N. Jiang and C. Sun, "Microstereolithography of ceramics," *Proc. 27<sup>th</sup> Int. SAMPLE Tech. Conf.*, pp. 970-979, 1995.
  9. J.D. Madden and I.W. Hunter, "Three-dimensional microfabrication by localized electrochemical deposition," *J. Microelectromech. Sys.*, Vol. 5, pp. 24-32, 1996.
  10. A. Cohen, *et al.*, "EFAB: rapid, low-cost desktop micromachining of high-aspect ratio true 3-D MEMS," *Proc. IEEE MEMS*, pp. 244-251, 1999.
  11. C.S. Taylor *et al.*, "A spatial forming a three-dimensional printing process," *Proc. IEEE MEMS*, pp. 203-208, 1994.
  12. M. Cabrera *et al.*, "Microphotofabrication of very small objects: pushing the limits of stereolithography," *Mol. Cryst. Liq. Cryat.*, Vol. 315, pp. 223-234, 1998.