

## 레이저묘화 기술을 이용한 3 차원 미세구조물 제조

정성호\*(광주과학기술원 기전공학과), 한성일(광주과학기술원 대학원)

Fabrication of three dimensional microstructures using laser direct writing technique

S. H. Jeong (Mechatronics Dept., K-JIST), S. I. Han (Mechatronics Dept., K-JIST)

### ABSTRACT

Fabrication of three dimensional microstructures by laser-assisted chemical vapor deposition of material is investigated. To fabricate microstructures, a thin layer of deposit in desired patterns is first written using laser direct writing technique and on top of this layer a second layer is deposited to provide the third dimension normal to the surface. By depositing many layers, a three dimensional microstructure is fabricated. Optimum deposition conditions for direct writing of initial and subsequent layers with good surface quality and profile uniformity are determined. Using an argon ion laser and ethylene as the light source and reaction gas, respectively, fabrication of three-dimensional carbon microstructures is demonstrated.

**Key Words :** Laser direct writing (레이저묘화), Microstructure (미세구조물), 3D Microfabrication (3 차원 미세가공)

### 1. 서론

현재 제조되고 있는 마이크로소자 및 마이크로 시스템은 대부분 실리콘을 중심으로 하는 반도체 공정에 기반을 두고 생산되고 있다. 반도체 공정은 기본적으로 2 차원 전자회로 패턴의 제조에 최적화되어 있으므로 MEMS 와 같이 움직이는 구조물이나 3 차원 형상이 요구되는 미세구조물의 제조를 위해서는 비교적 간단한 구조물의 경우에도 식각, 증착, 클리닝 등의 공정을 반복적으로 적용해야 하며, 또한 원하는 단면형상을 마스크로 제작하여 리소그라피공정을 통해 재생하므로 공정이 복잡하게 되는 어려움이 있다. 반도체 공정의 경우 소요되는 장비가 고가인데다 각 공정간의 부가적인 시간 소요에 따른 비용 상승과 함께 복잡한 형상이나 높은 세장비(aspect ratio)를 갖는 구조물의 제조에 대한 어려움으로 인해 미세 기계요소 및 MEMS 소자의 설계 자유도를 제한하여 왔다.

이러한 제한을 극복하고자 마이크로 3 차원 가공에 적합한 새로운 가공기술들이 활발히 연구되고 있으며 LIGA, 마이크로 EDM(electro discharge machining), 레이저가공과 같은 기술들이 개발되고 있다[1]. 레이저 가공의 경우 다른 가공방법에 비해 상대적으로 간단한 장비를 이용해 수십마이크로미터 이하 크기의 구조물을 용이하게 제조할 수 있어

미세가공기술로 활발한 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 레이저미세가공기술로는 레이저빔을 이용해 고체소재를 직접 가공하는 어블레이션(ablation) 가공과 레이저 유도 식각가공 (laser-induced etching), 마이크로광조형 (microstereolithography), 레이저 국소 증착(laser-induced chemical vapor deposition) 등이 있다 [2].

본 연구에서는 레이저 국소 증착기술, 특히 레이저묘화를 이용한 3 차원 미세구조물 제조에 대한 연구를 수행하였다. 레이저 국소 증착은 기존의 화학증착(chemical vapor deposition) 공정을 응용하여 국지적으로 물질을 미세하게 더해 나가는 방법이다 [3]. 레이저 국소증착은 수십마이크로미터 크기의 영역내에 용이하게 증착물을 생성할 수 있으며, 다양한 재료에 응용이 가능하고, 우수한 증착물 결합도, 전기 저항도, 순도의 증착물 생성이 가능한 장점이 있어 지난 20 여년 동안 활발하게 연구되어 오고 있다. 레이저묘화는 레이저 국소증착을 통해 미세한 형상을 시편위에 그림을 그리듯이 직접 증착시키는 기술로 주로 2 차원 패턴의 제조에 활용되어 왔다[4]. 본 연구에서는 레이저묘화를 이용하여 3 차원 미세구조물을 제조하는 적층 기술을 개발하고 이때 각 증착층의 단면형상, 표면품질에 영향을 미치는 레이저 출력, 반응가스 압력, 레이저 빔 이송 속도 등의 영향을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig.1은 실험장치 개략도이다. 증착반응을 활성화시키기 위한 에너지원으로 아르곤이온레이저(Coherent Inc., Innova 308C, 파장 514nm, TEM<sub>00</sub>)가 사용되었다. 레이저 빔의 초기직경은 1.8mm (1/e<sup>2</sup>)이며 초점크기를 작게하기 위해 초점거리 -25mm의 오목렌즈와 150mm의 볼록렌즈를 조합하여 약 9mm로 확대시킨 후 초점거리 200mm의 렌즈를 통해 집속하였으며 시편표면에서의 초점직경은 칼날방법(Knife-edge method)으로 측정된 결과 약 28μm로 확인되었다. 증착 공정은 대기압 이하의 조건에서 반응 가스가 채워진 반응 챔버(reaction chamber) 내에서 이루어진다. 시편은 챔버 하부의 벨로우즈(bellows)를 통해 외부의 정밀 이송계에 장착되어 있는 시편지지대 위에 위치하고 증착도중 이송계를 이용하여 원하는 형상을 따라 증착이 일어나도록 한다. 실험에 사용된 이송계(Suruga Seiki)는 1μm의 정밀도를 가지며 이송경로는 컴퓨터로 제어된다.

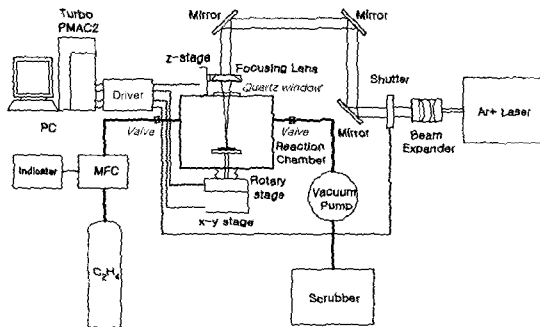


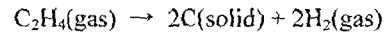
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

### 2.1 실험방법

Fig.1의 반응챔버를 반응가스로 채운후 챔버를 통해 레이저빔을 시편위에 집속하여 조사하면, 레이저빔이 조사된 초점부근의 미세한 영역이 국소적으로 가열되어 온도가 상승하게 된다. 이때 시편표면이 일정온도 이상으로 상승하면 주변의 반응가스가 시편으로부터 에너지를 공급받아 열분해를 일으키고 분해반응에서 생성된 고체는 레이저 초점부에 증착되며 기체는 밖으로 빠져나간다. 레이저모화는 위와 같은 레이저 국소증착 반응중에 Fig.2(a)에서처럼 이송계를 이용하여 시편을 움직임으로써 시편 표면에 원하는 형상이 생성되도록 하는 기술이다. 본 연구에서 제시한 레이저모화를 이용한 3차원형상 제조기술은 Fig.2(b)와 같이, 레이저모화로 생성된 증착층을 계속조형에서처럼 시편표면에 수직된

방향으로 적층하여 3차원 구조물을 제조하는 방법으로, 적층도중 각층에서의 증착물 생성 특성과 증착물의 최종 형상에 대한 공정 변수의 영향을 중심으로 조사하였다.

증착을 위한 반응가스로는 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)를 사용하였으며 열분해 반응을 통해 아래식에서와 같이 탄소증착물을 생성한다.



증착용 시편으로는 순도 99.8%, 두께 0.254mm의 그래파이트 박판(pyrolytic graphite foil : Alpha Aesar, GRAFOIL<sup>®</sup> #10832) 사용하였으며 실험에 앞서 아세톤 및 에탄올로 세척후 커버글라스(cover glass)에 부착하여 사용하였다.

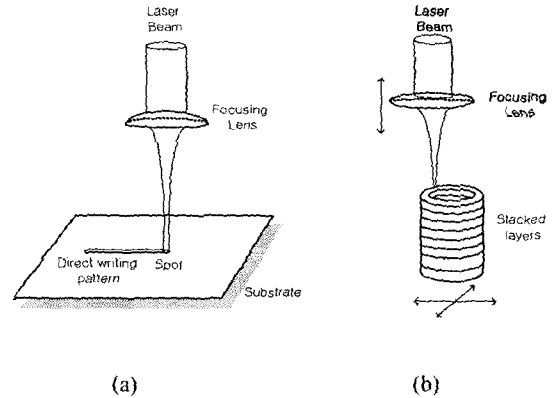


Fig. 2(a) Schematic diagram of laser direct writing (b) Method of fabricating three dimensional microstructures by stacking laser direct writing layers

## 3. 실험결과

레이저모화와 적층법을 이용한 3차원 마이크로구조물 제조시 레이저 직접모화에 의해 생성된 증착물은 이후 적층될 증착물에 대해서 기질의 역할을 하기 때문에 연속적이며 평평한 표면을 가질 필요가 있다. 만일 연속적이지 못한 증착물 위에 다시 증착하게 되면, 증착 반응이 이미 형성된 증착층에서 일어날 경우와 시편표면 위에서 일어날 경우에 성장율의 차이가 발생하며 이와 함께 기존의 증착층만큼의 높이 차이가 추가되어 원하는 형상을 만들기가 어렵게 된다.

이에 따라 우선 레이저 출력과 이송 속도에 따른 증착 반응의 연속성을 살펴보기 위해서 길이 1.5mm의 직선을 증착하였으며, 실험 결과는 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 연속선(continuous line)은 길이 1.5mm 증착에서 반응의 일시적 중단에 의해 직선 증착물 상의 공백이 생성되지 않는 것을 의미

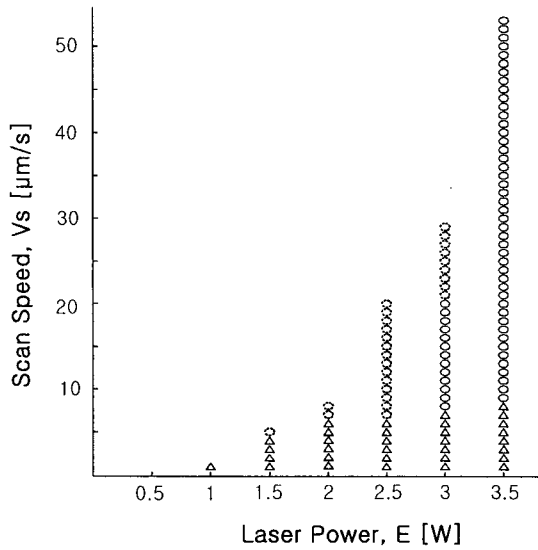


Fig. 3 Deposition results of a line pattern ( $\Delta$  : Rod,  $\circ$  : Discrete line,  $\circ$  : Continuous line)

한다. Fig.3 에서 알 수 있듯이 증착에 있어서 반응의 안정성은 레이저 출력에 가장 지배적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 1W 이하의 영역에서는 증착 반응이 거의 일어나지 않았으며, 3.5W에서는 70 $\mu\text{m/s}$ 의 이송속도에서도 두께가 얇은 증착층이 연속적으로 생성되는 것이 확인되었다. 모든 레이저 에너지에서 이송 속도가 느리게 되면 선이 증착되는 대신 주기적이고 경사진 미세 막대구조물이 만들어졌다. 본 실험조건에서는 레이저출력 3W 이하의 경우 막대나 불연속적인 증착물이 생성되었으며 3W 이상에서는 미세 막대 생성 영역과 불연속 증착 영역 사이에 연속 증착 영역이 나타난다. 그러나, 간헐적으로 아주 짧은 시간동안 증착의 중단을 보이는 3W와 비교하여 3.5W 영역에서는 안정적인 증착을 보였으며, 직선 증착물의 생성 영역도 아주 넓은 이송 속도 범위에서 관찰되었다.

따라서, 안정적인 패턴 형성을 위해서는 3.5W 이상의 레이저 출력에서 적절한 이송 속도의 선택이 필요하다.

증착층의 높이 및 표면형상은 레이저조점의 이송속도에 따라 크게 달라진다. 이송속도가 느리면 증착반응이 일어날 수 있는 시간이 길어지므로 증착층의 높이가 크고 속도가 증가할수록 높이는 점점 줄어든다. Fig.4에서 이송속도가 9에서 50 $\mu\text{m/s}$ 까지 상승할 경우 증착물의 높이는 평균 약 15 $\mu\text{m}$ 에서 3  $\mu\text{m}$ 으로 감소한다. 뿐만아니라 이송속도가 낮은 경우 증착물의 단면형상이 'm'자와 같이 가운데 부분이 움푹 꺼져 있는 소위 '도랑(trench)' 형상을

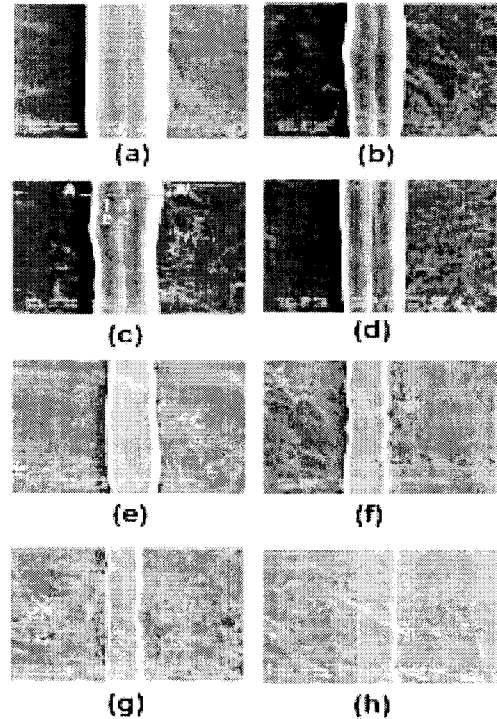


Fig. 4 SEM pictures of the micro carbon patterns deposited by direct writing with various scan speeds (unit:  $\mu\text{m/s}$ ) (a)9 (b)10 (c)11 (d)12 (e)15 (f)25 (g)30 (h)50 ( E=3.5W, P=400Torr)

갖게 되는데 이러한 형상은 적층에 의한 형상제조에는 바람직하지 못하다. 이송속도에 따른 증착물의 가운데 부분과 바깥부분의 높이차이, 즉 Fig.4(c)에서 B와 C지점의 높이차를 측정 한 결과 이송속도 30 $\mu\text{m/s}$  이상의 영역에서는 높이차이가 거의 없는 편평한 증착물이 생성되었다 (Fig.4(g) 및 (h)). 이때 생성된 증착물의 높이는 이송속도 30 $\mu\text{m/s}$ 에서 약 3 $\mu\text{m}$  정도로 측정되었다.

앞에서 설명한 것과 같이 적층에 의한 구조물 제조를 위해서는 레이저묘화에 의해 연속적이고 단면형상이 고른 증착층이 생성되어야 한다. Fig.3 및 Fig.4의 결과에서 그라파이트 시편위에 첫번째 증착층을 형성하기 위한 증착조건으로 레이저출력 3.5W, 초점 이송속도 30-40 $\mu\text{m/s}$ 를 설정하였다.

3 차원 마이크로구조물을 만들기 위해서는 Fig.2 (b)에 나타낸 것과 같이 증착층을 시편에 수직 방향으로 연속적으로 쌓아나가야 한다. 이때 이미 형성된 증착층 위에 다시 증착을 실시할 경우 그라파이트 시편에 대한 증착 결과와는 다른 특성을 보인다. 즉, 동일한 조건에서 증착반응을 유도할 경우 첫번째 증착층의 형상이 균일하더라도, 그 위의 두

번째층은 쉽게 도랑 형상을 보인다. 이러한 도랑 형상으로의 강한 경향성은 시편에 레이저빔을 조사했을 때와 이미 형성된 증착물에 레이저 빔을 조사할 때 표면에서의 열손실 형태 및 이에 따른 온도 분포가 다르게 되는데 기인하는 것으로 생각된다. 실제 증착물의 단면은 아주 얇은 층들이 수없이 포개진 형태로 구성되어 있으며 시편으로 사용한 그라파이트와는 상당히 다른 양상을 보이는데 이러한 재료의 구조적 특성이 온도분포에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이와 같이 기존증착물 위에 증착할 경우 쉽게 발생하는 도랑형상을 없애기 위해 위에서와 마찬가지로 이송속도 및 레이저 출력을 조절하였다. 그 결과 이송속도를 증가시키는 것으로는 증착물의 형상 개선에 큰 효과가 없었으나, 레이저 출력을 감소시킬 경우 좋은 결과를 나타내었으며 균일한 단면형상을 얻기 위한 레이저 출력의 제어가 상당히 까다로운 변수로 작용하는 것으로 나타났다.

Fig.5 는 위에서 설정된 최적조건에서 적층법을 이용하여 레이저묘화로 제조된 미세구조물의 전자현미경 사진이다. 반응가스 압력 400Torr 에서 30 $\mu$ m/s 의 이송 속도로 300 $\mu$ m $\times$ 150 $\mu$ m 크기의 아령모양 구조물과 150 $\mu$ m $\times$ 150 $\mu$ m 의 크기의 사각 튜브형상 구조물을 제조하였다. Fig.5(a)는 각 층의 레이저 출력을 각각 3.5W, 2.5W, 1.6W, 1.5W(4 번째층 이후 계속 유지)로 감소시킴으로써 도랑 형상이 최소화 되도록 하면서 10 회 적층시킨 결과이며, Fig.5(b)는 동일한 조건에서 각각 15 회 적층시켜 만든 구조물으로써, 적층이 많아질수록 도랑 형상의 경향이 점점 강하게 나타나 추가적인 에너지 조절이 필요함을 보여준다. 그림에서 레이저빔의 방향이 바뀌는 모서리부분에서 증착물이 다른 부분에 비해 두껍게 형성된 것을 볼 수 있는데 이것은 레이저빔의 방향이 바뀌는 과정에서 빔이 정지되었다가 다시 출발하면서 상대적으로 많은 에너지가 조사되어 증착이 많이 일어난 결과이다. 이와 같은 문제는 모서리부분에서 실시간으로 레이저 에너지를 조절하거나 연속적인 이송이 일어나도록 레이저빔 경로를 최적화함으로써 해결이 가능할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열분해성 레이저 국소 증착으로 생성된 증착물의 적층을 통하여 미소 구조물을 제조하는 방법과 레이저 묘화법을 통한 미세 패턴의 제조 시 증착 특성을 살펴보았다. 적층법의 적용을 위해 각 층별로 최적의 증착조건을 설정하였으며 이를 통해 아령형상과 사각튜브형상의 3 차원 미

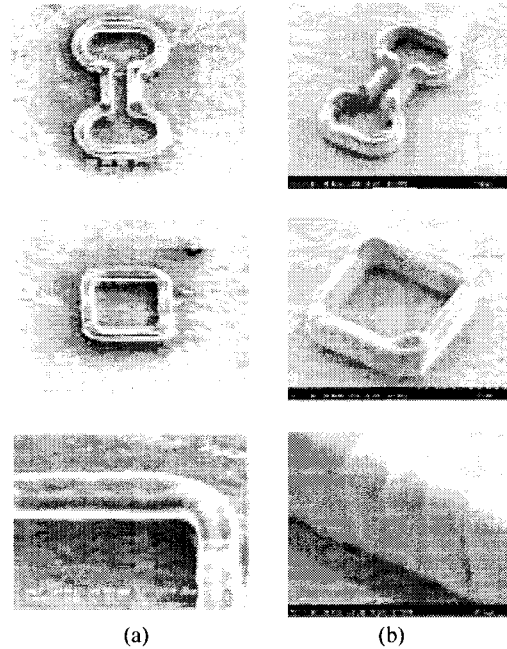


Fig. 5 Micro carbon structures (dumbbell, square tube) fabricated by stacking layer method with optimized shape conditions: P=400Torr, Vs=30 $\mu$  m/s, E<sub>1</sub>=3.5W, E<sub>2</sub>=2.5W, E<sub>3</sub>=1.6W, E<sub>4</sub>~E<sub>10</sub>=1.5W (a)10 (b)15 layers. Bottom frames of (a) and (b) shows the corner and sidewall.

소구조물을 제조함으로써 제한한 방법을 통해 3 차원 미소구조물의 제조가 가능함을 확인하였다.

#### 후 기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어개발사업 중 “지능형마이크로시스템개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. Madou, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, 2<sup>nd</sup> Ed., CRC, 2002
2. Bauerle, D., *Laser Processing and Chemistry*, 3<sup>rd</sup> Ed., Springer, 2000
3. 김진범, 이선규, 이종현, 정성호, “레이저 국소증착법에 의한 탄소 미세 구조물의 제조시 성장특성에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 제 19 권, 제 7 호, pp. 106-115, 2002
4. Lehmann, O. and Stuke, M., “Three-dimensional laser direct writing of electrically conducting and isolating microstructures”, *Mat. Lett.* 21, pp. 131-136, 1994.