

## 레이저 국소증착을 통한 미세 탄소구조물 및 패턴 제조

정성호(광주과학기술원 기전공학과) 김진범(광주과학기술원 대학원)  
이선규(광주과학기술원 기전공학과) 이증현(광주과학기술원 기전공학과)

### Fabrication of Micro Carbon Structures and Patterns with Laser-assisted Chemical Vapor Deposition

S.H. Jeong( Dept. of Mechatronics K-JIST), J.B. Kim( Dept. of Mechatronics K-JIST)  
S.K. Lee( Dept. of Mechatronics K-JIST), J.H. Lee( Dept. of Mechatronics K-JIST)

#### ABSTRACT

Fabrication of micro carbon structures and patterns using laser-assisted chemical vapor deposition is studied. Argon ion laser and ethylene were used to grow micro carbon rod through pyrolytic decomposition of the reaction gas. The influence of reaction gas pressure and incident laser power on the diameter and growth rate of the micro carbon rod was experimentally investigated. The diameter of micro carbon rods increases linearly with respect to the laser power but is almost independent of the reaction gas pressure. Growth rate of the rod changes little with gas pressure when the laser power remains below 1W. When the carbon rod was grown at near threshold laser power, a very smooth surface is obtained on the rod. By continuously moving the focusing lens in the direction of growth, a micro carbon rod with a diameter of 28 $\mu$ m and aspect ratio of 100 was fabricated.

**Key Words** : LCVD (레이저 국소 증착법), Carbon structure (탄소 구조물), Micro structure (미세 구조물), Surface quality (표면상태)

#### 1. 서론

실리콘 미세 가공 기술을 바탕으로 한 미세 부품의 제작은 다량생산이 가능한 장점이 있으나 기본적인 가공의 형태가 증착 및 식각을 반복하는 2차원 가공이 중심이므로 세장비(aspect ratio)가 큰 부품의 가공이 어렵다는 단점이 있다. MEMS 를 이용한 센서, 액츄에이터 및 보다 복잡한 형태의 미세 시스템의 경우 2 차원 가공만으로는 원하는 형태와 기능을 갖춘 완성품 제작에 한계가 있으므로 3 차원 가공기술의 도입이 요구된다. 기존에 개발되고 있는 3 차원 가공기술 중에 다층구조물 형태의 가공이나 LIGA 기술을 통해 세장비가 큰 미세 구조물을 가공하는 방법이 있기는 하지만, 기본적으로는 직선구조에 국한되며 곡선이나 비직선을 갖는 3 차원 구조물의 가공은 거의 불가능하다.

레이저 국소증착 가공은 기존의 방식과는 달리

증착에 의하여 원하는 형상을 따라 물질을 미세하게 더하여 나가면서 3 차원 구조물을 만드는 방법으로 재료에 제한을 거의 받지 않으며, 복잡한 형상이나 세장비가 큰 미세 구조물을 가공하는데 용이하다는 장점이 있어 최근에 금속, 반도체, 절연체 등 다양한 재료에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구에서는 열분해성 레이저 국소증착법을 이용한 미세 탄소구조물 제조시 생성된 구조물의 성장속도, 표면상태, 크기 등과 같은 성장특성을 실험을 통하여 분석하였다. 구체적으로는 레이저 출력 및 반응가스 압력에 따른 미세 막대의 성장속도 지름, 형상, 표면 거칠기 등의 변화와 우수한 표면 품질 및 균일한 크기의 구조물을 얻기 위한 가공조건을 제시하였으며 이동 초점방식에 의해 세장비 100 이상의 3 차원 미세구조물 및 자유 패턴의 제조를 실현하였다.

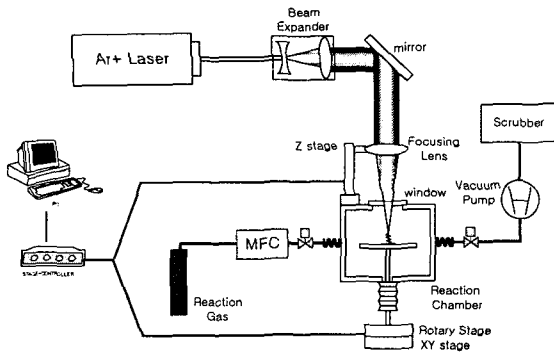


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1 은 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸다. 증착을 유도하는데 필요한 에너지를 공급하는 에너지원인 아르곤 이온 레이저(Argon ion laser, Coherent Innova 308)는 파장 514.5nm, 최대출력 4W, 직경이 1.8mm 로 가우스(Gaussian) 분포를 갖고 있고 집속된 빔의 시편표면에서의 직경은 약 28 $\mu$ m 이다. 증착을 위해 스텐인레스강으로 제조된 반응실에 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)을 반응가스를 주입하며, 3 차원 미세구조물을 제조하기 위해서는 시편을 공간상에서 움직일 수 있는 X-Y 이송계 및 회전이송계를 벨로우즈(flexible bellows)를 통해 반응실 내부와 연결하였다. 증착을 위한 시편으로는 두께 0.254mm 의 그라파이트 판(Graphite sheet, Alpha aesar, #10832)을 약 1cm x1cm 크기로 잘라 사용하였다. 실험에 사용할 모든 시편은 에탄올과 아세톤으로 세척 후 슬라이드 글라스에 부착하여 증착을 실시하였다.

증착을 위해서는 반응실 내부로 반응가스를 연속적으로 공급하는 방법과 반응실 전체를 원하는 압력의 반응가스로 채우고 밀폐된 상태에서 반응실 내부의 가스만을 이용하여 증착시키는 방법이 있는데 본 실험에서는 후자의 방법을 선택하였다. 위와 같이 반응실을 밀폐시킨 상태에서 증착을 일으킬 경우 실제 증착에 의해 생성된 구조물의 질량과 반응실내 전체 반응가스에 포함된 탄소의 질량을 대기압 상태를 기준으로 계산한 결과 최소 10<sup>3</sup> 이상의 차이가 나는 것을 확인하였으며 이것은 반응가스의 소모에 따른 증착현상의 변화는 무시할 수 있다는 것을 의미한다.

실험은 고정초점방식과 이동초점방식의 두 가지로 실시하였으며 고정초점방식에서는 시편표면상의 한 위치에 레이저 초점이 오게한 후 증착이 일어날 수 있는 범위내에서 반응가스의 압력과 레이저출력을 설정하여 증착이 일어나도록 유도하며 일단 증

착이 진행되기 시작하면 증착물은 계속 성장하지만 레이저 초점의 위치와 시편은 원래의 상태로 계속 유지된다. 이동초점방식의 실험은 증착이 일어나는 중에 Z 방향 이송계를 이용하여 레이저빔의 초점을 증착물의 성장 방향으로 계속 이동시킴으로써 증착 반응이 중단되지 않고 유지되도록 하는 경우와 증착이 일어나는 중에 회전 이송계를 이용하여 시편을 회전시킴으로써 시편 표면에 원형의 증착물이 생성되도록 하는 두가지 경우에 대해 실험하였으며, 이를 통해 3 차원 구조물 제조의 가능성을 제시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

고정초점방식에 의해서 성장하는 미세 막대는 일정높이 만큼 성장하다가 자동적으로 성장이 멈추게 되는데 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 렌즈를 통과한 빔은 초점(시편표면)에서부터 멀어질수록 단면의 크기가 증가한다. 증가한 빔의 크기는 빔 강도의 감소로 이어지고, 이는 막대 끝단에서의 온도 상승량을 감소시킨다. 즉, 막대가 높이 성장하면 할수록, 에너지를 받는 부분이 초점평면으로부터 멀어지게 되어 막대표면의 온도 상승량이 줄어들어 결국에는 증착이 중단된다.

Fig.2 는 레이저 출력에 따른 평균성장속도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 평균성장속도는 성장된 막대의 전체 높이를 증착을 일으키기 위해 레이저빔이 조사된 시점부터 증착이 완료된 시점까지의 시간으로 나눈 값을 말한다. 반응가스의 압력이 400Torr 보다 낮은 구간의 경우 레이저 출력이 0.5W 보다 낮으면 증착 속도가 1 $\mu$ m/sec 보다 느려 3 차원 구조물을 제작하기 위한 방법으로 적절치

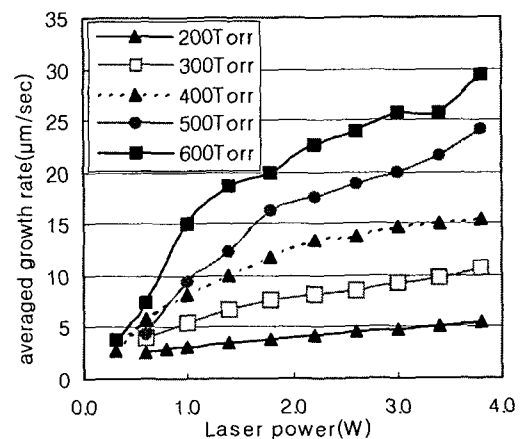


Fig.2 Averaged growth rate of the micro carbon rods with respect to laser power

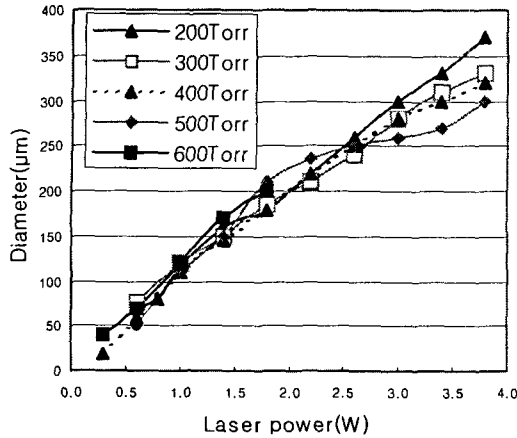


Fig. 3 Diameter of the micro carbon rods with respect to laser power

않았다. 본 연구의 실험범위 내에서는 증착물의 평균성장속도는 반응가스 압력 200Torr, 레이저 출력 0.6W 에서 약 2.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$  로 가장 느렸으며, 반응가스 압력 600Torr, 레이저 출력 3.8W 에서 약 29.3 $\mu\text{m}/\text{sec}$  로 가장 빨랐다. 성장속도는 실험결과에서 볼 수 있듯이 레이저 출력이 높을수록, 반응가스의 압력이 높을수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 레이저 출력이 높을수록 표면의 온도가 높아지고, 반응가스의 압력이 높을수록 반응가스의 농도 또한 높아지기 때문이다.

Fig.2 에서 레이저 출력이 0.5W 정도로 낮을 경우에는 증착물의 성장속도가 압력에 따라서 크게 변하지 않다가 레이저 출력이 증가함에 따라 성장속도의 차이가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 레이저 출력이 낮을 경우에는 증착율이 거의 온도에만 영향을 받으나(Kinetically limited regime) 출력이 증가함에 따라 표면온도에는 덜 민감해지면서 증착에 필요한 반응가스의 공급속도에 영향을 받게 되

는 (Mass transport limited regime) 것으로 생각되어진다. Fig.2 에서 알 수 있는 것처럼 Kinetically limited regime 에서 Mass transport limited regime 으로의 변화는 레이저 출력 1.0W 전후 구간에서 일어나는 것으로 판단되며 실험데이터의 경향은 Arrhenius 식으로 표시되는 증착율과 온도 관계와 유사한 것으로 확인되었다.

Fig.3 은 레이저 출력에 따른 미세 막대의 직경 변화를 나타낸다. 증착물의 지름은 반응가스의 압력 400Torr, 레이저 출력 0.3W 에서 25 $\mu\text{m}$  로 가장 작았고, 반응가스의 압력 200Torr, 레이저 출력 3.8W 에서 370 $\mu\text{m}$  로 가장 큰 값을 가졌다. 그림에서 볼 수 있듯이 증착물의 지름은 레이저 출력에 대해서 거의 선형적인 관계를 보이는데 이는 레이저 출력이 증가할 경우 보다 넓은 면적의 시편이 증착가능한 온도 이상으로 가열되어 반응부가 넓어지기 때문이다. 또한 증착물의 지름은 그림에서와 같이 반응가스의 압력과는 관계없이 거의 일정함을 보이지만, 레이저 출력이 2.4W 보다 큰 구간에서는 압력이 낮을수록 구조물의 지름이 증가하는 경향이 나타났다

Fig.4 는 반응가스 압력 400Torr 에서, 레이저 출력이 1.5W 일 때와 0.3W 일 때의 미세 막대의 표면을 전자현미경(Scanning electron microscope)으로 촬영한 것이다. 레이저출력이 높을 때 관찰되는 표면의 불균일성이 에너지가 감소할수록 줄어들고 반응가스 압력이 400Torr 에서의 문턱조건(near threshold condition)인 0.3W 에서는 표면이 매우 깨끗하고 균일한 미세막대를 얻을 수 있었다. Fig.4 에서 보여준 것과 같이 레이저 출력에 따른 표면품질의 차이에 대한 원인은 아직 정확히 밝혀져 있지 않다. 그러나 실험결과를 통해 출력이 높을 때는 증착부의 온도가 올라가서 증착을 위한 핵생성(nucleation)이 막대의 표면에서 동시에 발생하여 차츰 연결되면서 Fig.4(a)와 같이 미소한 분할영역이 생성되고 출

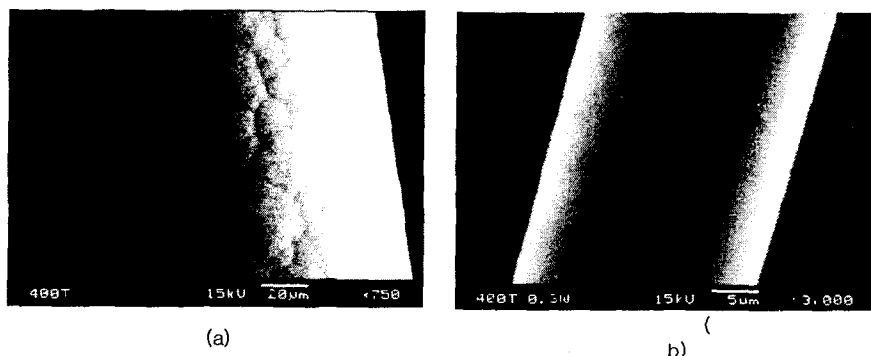


Fig. 4 Surface quality of the micro carbon rods for different laser powers: p = 400Torr, (a) E = 1.5W, (b) E = 0.3W

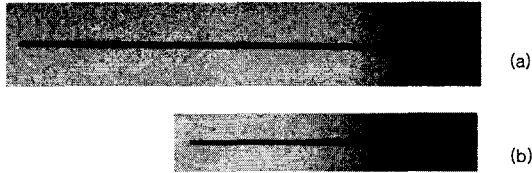


Fig. 5 Micro carbon rod with high aspect ratio fabricated by translating the focus along the growth direction; E = 0.3W, p = 400Torr, reaction time = 10minute (a) translation speed = 4 $\mu$ m/sec, diameter = 28 $\mu$ m, height = 2680, (b) translation speed = 0 $\mu$ m/sec, diameter = 22-28 $\mu$ m, height = 1560 $\mu$ m

력이 낮을 때는 핵생성이 기체와 고체의 경계면인 증착물의 끝부분에서만 일어나서 연속적이고 매끈한 표면을 형성했을 것으로 추정된다.

Fig.5 는 반응가스 압력 400Torr, 레이저 출력 0.3W 의 동일한 실험 조건에서 10 분 동안, (a)의 경우에는 Z 방향으로 4 $\mu$ m/sec 의 속도로 이송 시키면서 증착을 유도한 것이고, (b)의 경우는 Z 방향으로 이송 시키지 않고 고정초점방식으로 증착을 유도한 것이다. (a)의 경우는 10 분동안 계속해서 증착이 일어났으며 (b)는 도중에 증착이 중단되어 그림과 같이 높이 차이가 생겼다. Fig.5(a)의 구조물 높이는 2680 $\mu$ m 로, Z 방향 이송속도 $\times$ 증착 시간(4 $\mu$ m/sec  $\times$  600sec = 2400 $\mu$ m)와 거의 같은 높이로 성장하였으나 (b)의 경우는 1560 $\mu$ m 에서 성장이 멈추었다. 여기서 (a) 의 경우 10 분 후에 인위적으로 증착을 중단하지 않았다면 훨씬 큰 높이로 성장시킬 수 있지만 비교를 위해 성장을 중단시킨 결과이다.

또한 (a)의 경우는 높이에 따라서 구조물의 직경이 26-28 $\mu$ m 로 거의 일정하게 유지되었으나 (b) 경우는 막대의 아래쪽과 위쪽을 비교할 때 위쪽의 직경이 약 23 $\mu$ m 로 약 20% 감소하였다. 이를 통해 Fig. 5(a)에서 보인 것처럼 레이저 국소증착을 통해 종횡비가 100 이상의 미세 막대를 쉽게 빨리 제조할 수 있다는 것을 보였다.

Fig.6 은 회전이송계를 이용하여 시편표면에 집속된 레이저 빔을 원형으로 스캔하면서 증착을 유도하여 만든 높이 13-15 $\mu$ m, 직경 1500 $\mu$ m 의 패턴이다. 이 방법으로 원형 뿐만아니라 임의의 2 차원 패턴을 시편위에 증착시킬 수 있다. 또한 앞의 막대구조물 제조에서와 마찬가지로 증착층 위에 반복해서 증착을 유도함으로써 3 차원 구조물도 제조가 가능하며 약 50 $\mu$ m 정도의 높이를 갖는 원통을 제조하였다.

#### 4. 결론

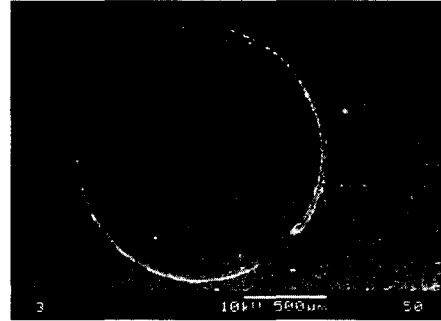


Fig. 6 Deposition of a circular pattern: E = 3.8W, p = 300Torr, translation speed = 7.8 $\mu$ m/sec

본 논문에서는 열분해성 레이저 국소증착법에 의한 탄소 미세 구조물 제조에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 국소증착 기술은 LIGA 나 리소그래피 (lithography) 등과 같은 기존의 3 차원 가공기술에 비해 장비의 구조가 간단하고 기술의 활용도 쉬우며 상대적으로 증착물의 가공속도가 매우 빠르다는 것과, 다른 3 차원 가공기술에 비해 매우 세장비가 크거나 복잡한 임의의 3 차원 구조물도 비교적 손쉽게 제조할 수 있는 장점으로 인해 새로운 3 차원 미세구조물 가공기술로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 후 기

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

www.microsystem.re.kr

#### 참고문헌

1. F. T. Wallenberger, P. C. Nordine, “Strong, small diameter, boron fibers by LCVD”, Materials Letters 14, 1992, 198-202
2. K. Williams, J. Maxwell, “Freeform Fabrication of Functional microsolenoids, Electromagnets and Helical Springs Using High-Pressure Laser Chemical Vapor Deposition”, MicroElectroMechanical Systems 1999, MEMS '99 Twelfth IEEE international conference on 1999, p232-237