

레이저 국소증착법에 의한 탄소 미세 구조물의 제조시 성장특성에 관한 연구

김진범*, 이선규**, 이종현**, 정성호**

Growth Characteristics of Micro Carbon Structures Fabricated by Laser-Assisted Chemical Vapor Deposition

Jin Beom Kim*, Jong Hyun Lee**, Sun Kyu Lee** and Sungho Jeong**

ABSTRACT

Growth characteristics of micro carbon structures fabricated by laser-assisted chemical vapor deposition are studied. Argon ion laser and ethylene were used as the energy source and reaction gas, respectively, to grow micro carbon rod through pyrolytic decomposition of the reaction gas. Experiments were performed at various conditions to investigate the influence of process parameters on growth characteristics such as the diameter or growth rate of the micro carbon rod with respect to reaction gas pressure and incident laser power. Reaction gas pressure in experiments ranges from 200 to 600Torr and the incident laser power from 0.3 to 3.8W. For these conditions, the diameter of the rod 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. For a constant reaction gas pressure, the growth rate increase with increasing laser power, but the rate of increase decreases gradually, implying that the chemical vapor deposition condition changes from a kinetically-limited regime to a mass-transport-limited regime. 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 μ 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 및 MEMS (MicroElectro-Mechanical System) 기술을 바탕으로 한 미세 부품의 제작은 다량생산이 가능한 장점이 있으나 기본적인 가공의 형태가 증착 및 식각을 반복하는 2

차원 가공이 중심이므로 세장비(aspect ratio)가 큰 부품의 가공이 어렵다는 단점이 있다. MEMS 를 이용한 센서, 액추에이터 및 보다 복잡한 형태의 미세 시스템의 경우 2 차원 가공만으로는 원하는 형태와 기능을 갖춘 완성품의 제작에 한계가 있으므로 3 차원 가공기술의 도입이 요구된다. 기존에

.. 2002년 2월 8일 접수
* 광주과학기술원 대학원 기전공학과
** 광주과학기술원 기전공학과

개발되고 있는 3 차원 가공기술 중에 다층구조물 형태의 가공이나 LIGA 기술 등을 통해 세장비가 큰 미세 구조물을 가공하는 방법이 있기는 하지만, 기본적으로는 직선구조에 국한되며 곡선이나 비직 선을 갖는 3 차원 구조물의 가공은 거의 불가능하다.

레이저 국소증착 가공은 기존의 방식과는 달리 증착에 의하여 원하는 형상을 따라 물질을 미세하게 더하여 나가면서 구조물을 만드는 방법으로 재료에 제한을 거의 받지 않으며, 복잡한 형상이나 세장비가 큰 미세 구조물을 가공하는데 용이하다는 장점이 있다. 레이저 국소증착법에 의한 미세구조물 가공 기술은 1980 년대 후반부터 연구되기 시작하여 급속박막증착¹ 및 보론 섬유가공² 등에 대한 연구가 수행되었으며 1990 년대 후반 들어 미세구조물에 대한 관심이 증가하면서 탄소^{3,4} 및 세라믹⁵ 재료를 이용한 3 차원 미세구조물 제조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Maxwell 등은 레이저 국소증착 매카니즘 및 공정 개발에 대한 연구를 다양한 재료에 대해 수행하였다.^{3,4,6}

본 연구에서는 열분해성 레이저 국소증착법을 이용한 미세 탄소구조물 제조시 생성된 구조물의 성장속도, 표면상태, 크기 등과 같은 성장특성을 실험을 통하여 분석하였다. 레이저 출력 및 반응 가스 압력에 따른 미세 막대의 성장속도와 지름, 형상, 표면 거칠기 등의 변화와 특히 우수한 표면 품질 및 균일한 크기의 구조물을 얻기 위한 조건을 제시한다. 또한 이동 초점방식에 의해 세장비 100 이상의 3 차원 미세구조물 및 자유 패턴의 제조에 대해 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 레이저 국소증착법의 원리

레이저 국소증착은 기체상태의 물질에 에너지를 가하여 기체와 고체로 화학적으로 분해하여 분해과정의 부산물인 고체의 증착을 유도하는 기상 증착법의 하나로, 기체상태의 물질을 분해하기 위한 에너지를 레이저를 통해 공급하는 기술이다. Fig. 1 은 3 차원 레이저 국소증착법의 원리를 나타내고 있다. 우선 증착물을 생성시키기 위한 시편이 들어있는 반응실에 반응가스를 공급하면서 렌즈를 이용하여 집속된 레이저 빔이 시편 표면에

조사되도록 한다. 레이저빔이 조사된 시편은 표면의 온도가 급속히 상승하며 이때 표면 근처의 반응가스는 시편으로부터 열을 받아 열분해를 일으키게 된다. 열분해를 통해 생성된 고체는 시편의 표면에 증착되고 부산물 가스는 반응실 밖으로 빠져나간다. 시편을 가열하는 레이저빔은 시편 표면에서 수십 마이크로미터의 매우 작은 크기로 집속되므로 가열되는 영역 및 증착이 일어나는 영역은 레이저 빔의 초점크기와 유사한 매우 작은 영역에 국한된다.

위에서 설명한 국소증착 방법으로 시편에 증착층을 형성한 후 이 증착층 위에 다시 국소증착을 시킴으로써 증착물의 두께를 계속해서 증가시킬 수 있으며, 나아가 레이저 빔을 국소위치에 연속적으로 조사함으로써 증착물이 시편 표면에 수직된 방향으로 자라도록 할 수가 있다. Fig. 1 에서와 같이 임의의 3 차원 구조물을 제조하기 위해서는 증착이 일어나는 동안 집속된 빔을 이동시키거나 시편을 이송계를 이용하여 방향을 조정하면서 이동시켜 레이저 빔의 궤적을 따라 마치 그림을 그리듯이 증착이 일어나도록 유도한다.

2.2. 레이저 에너지의 흡수와 물질의 온도 상승

재료표면에 조사되는 레이저 빔은 소재의 반사율에 따라 일부가 반사되고 나머지 에너지는 표

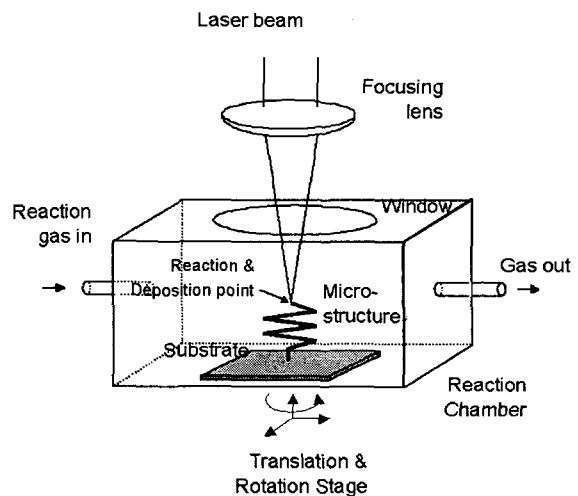


Fig. 1 Schematic diagram of laser-assisted chemical vapor deposition for 3-D fabrication

면에서부터 빛의 세기가 지수적으로 감소하면서 소재에 흡수된다. 재료에 흡수된 빛 에너지는 열에너지로 변환되면서 재료의 온도를 증가시키고 재료에 열영향부를 형성한다.

가우시안 분포의 빔이 초점렌즈를 통하여 재료의 표면에 수직으로 입사하였을 경우에 표면의 온도는 빔의 중앙에서 최대가 되며, 식(2.1)과 같이 표현된다.⁷

$$T_{\max} = \frac{(1 - R)P_0}{2\sqrt{\pi k \omega_0}} \quad (2.1)$$

식(2.1)에서 R 은 표면의 반사율, P₀는 레이저의 출력, k 는 재료의 열전도도, ω₀는 빔의 반지름을 의미한다. 표면에서 높은 온도를 얻기 위해서는 높은 출력의 레이저를 사용하고 반사율과 열전도도가 낮은 재료에 작은 초점크기로 레이저 빔을 집중시켜야 한다.

표면온도에 따른 증착속도는 식(2.2)와 같이 Arrhenius 관계식을 통해 나타낸다.

$$R_n = K_0(p, T) \exp \left\{ -\frac{E_a}{RT} \right\} \quad (2.2)$$

여기서 K₀ 는 반응가스의 농도에 의해 결정되는 반응상수, p는 반응가스의 압력, T는 표면의 온도, R 은 이상기체상수, E_a는 활성화에너지이다.

식(2.2)에서 알 수 있듯이 압력이 일정할 경우 증착속도는 활성화에너지와 표면온도에 의해서 결정된다. 표면온도를 증가시키면 증착율은 온도에 따라 지수적으로 증가하다가 더 이상 온도에 영향을 받지 않게 되는데 이때 증착은 물질전달에 의해 지배되는 영역에 이르게 되었다고 하며 증착속도는 반응물질의 농도에 의해서 주로 결정된다.

3. 실험장치 및 실험방법

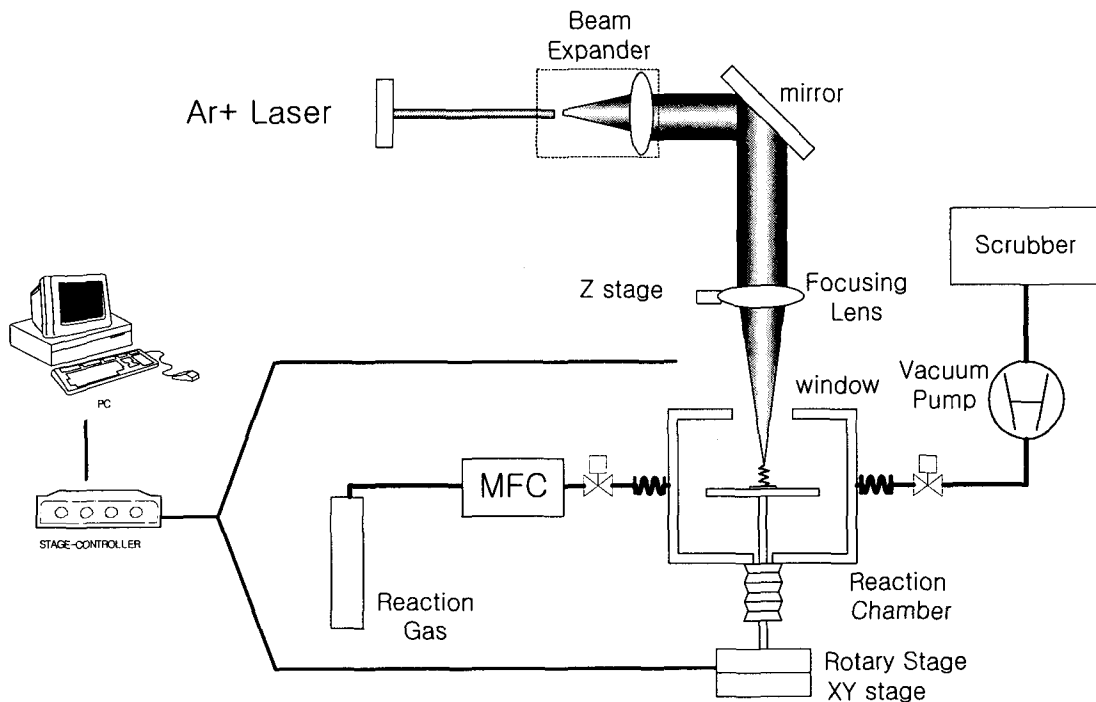


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

Fig. 2 는 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸다. 실험장치는 레이저 및 레이저에서 나온 빛을 반응실로 인도하기 위한 광학계, 반응실과 반응가스 조절부 및 미세구동 이송계와 이송계 제어부의 세 부분으로 구성되며 각 부분에 대해서는 아래에 설명한다.

3.1 레이저 및 빔 이송부

증착을 유도하는데 필요한 에너지를 공급하는 에너지원으로 아르곤 이온 레이저(Coherent Innova 308)를 사용하였으며 레이저에서 출력되는 빔은 파장 514.5nm, 최대출력 4W, 1/e² 지점에서의 빔 직경이 1.8mm로 가우스 분포를 갖고 있다.

가우스분포를 갖는 빔의 집속 후 초점크기는 집속렌즈에서의 빔 직경에 반비례하므로 본 연구에서는 시편표면에서 보다 미세한 초점을 얻기 위해 레이저에서 나온 빔을 초점거리 150mm 의 볼록렌즈와 초점거리 -25mm 의 오목렌즈를 조합하여 Fig. 2 에서와 같이 지름 약 9mm로 확대하였다. 이와 같이 확대된 빔은 집속 후 작은 초점을 가질 뿐아니라 집속렌즈에 도달할 때까지 통과하는 광학거울면에서의 에너지 밀도를 낮추게 되어 거울면 손상을 예방하는 효과도 추가적으로 얻을 수 있다. 이송된 레이저빔은 반응실 바깥쪽에서 초점거리 200mm 의 렌즈를 사용하여 집속된 후 반응실에 설치된 창을 통해 반응실 내부의 시편 표면에 집속된다. 이와 같이 집속된 레이저빔의 초점면에서의 직경은 칼날방법으로 측정한 결과 약 28 μ m 임을 확인하였다.

3.2 반응실 및 이송계

반응실은 화학반응에 안정한 스테인레스강으로 제작하였으며 반응가스 공급, 진공 펌프에 의한 가스의 배기 및 압력 조절, 시편을 넣고 꺼내기 위한 개폐식 문, 반응실 내의 압력측정, 진공을 파괴하기 위한 공기 주입구, 레이저빔 입구, 반응과정을 관찰하기 위한 관찰창 등이 부착되어 있다.

반응실 내부로 유입되는 반응가스의 유량은 유량조절기(Brooks Instruments 5850E)를 사용하여 측정하였으며 반응실의 압력은 진공펌프(Alcatel, PASCAL 2005SD)를 이용하여 조절하였다.

3 차원 미세구조물을 제조하기 위해서는 시편을 공간상에서 움직일 필요가 있는데 이를 위해

시편반집대를 반응실 하부에 설치된 벨로우즈를 통해 반응실 밖의 이송계와 연결하였다.

반응실 하부의 이송계는 시편 표면과 평행한 평면상을 움직이는 2 축선형이송계(X-Y 방향)와 회전이송계가 결합된 형태로 구성되어 있으며 시편 표면에 수직인 방향으로의 이송을 위해서는 반응실 상부에 별도의 선형이송계(Z 방향)를 설치하여 증착중에 렌즈의 초점을 상하로 이동할 수 있도록 하였다. 각 이송계는 하나의 이송계 커트roller (Surga Sciki, D74 MS)에 연결되어 원하는 형상에 따라 움직이도록 제어할 수 있게 하였다.

3.3 반응가스와 시편

본 실험에서는 에틸렌(C₂H₄)을 반응가스로 사용하여 미세 탄소구조물을 제조하였다. 에틸렌을 반응가스로 선택한 이유는 대부분의 증착용 반응가스가 독성이 강하여 안전성 확보에 어려움이 있는데 반해 에틸렌은 독성이 없고 비교적 안전하기 때문이다. 탄소구조물 증착을 위해서는 아세틸렌(C₂H₂)이나 메탄(CH₄) 등의 사용도 가능하나 이들 기체에 비해 에틸렌이 상대적으로 분해 가능한 최저온도가 낮아(예, 메탄 3500K, 에틸렌 2400K) 증착이 용이하게 일어나는 점을 고려하였다.³

증착을 위한 시편으로는 두께 0.254mm 의 그라파이트 판(Alpha Aesar, #10832)을 약 1cm x 1cm 크기로 잘라 사용하였다.

3.4 실험방법

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 10³ 이상의 차이가 나는 것을 확인하였으며 이것은 반응가스의 소모에 따른 증착현상의 변화는 무시할 수 있다는 것을 의미한다.

실험은 시편과 이송계가 고정된 상태에서 증

착을 일으키는 고정초점방식과, 회전이송계 혹은 Z 방향이송계를 이용하여 집속된 빔의 위치를 변화시키면서 증착을 유도하는 이동초점방식의 두 가지로 실시하였다. 고정초점방식에서는 시편표면상의 한 위치에 레이저 초점이 오게한 후 증착이 일어날 수 있는 범위내에서 반응가스의 압력과 레이저출력을 설정하여 증착이 일어나도록 유도한다. 일단 증착이 진행되기 시작하면 증착물은 계속 성장하지만 레이저 초점의 위치와 시편은 원래의 상태로 계속 유지되도록 한다. 이와 같은 방식으로 반응가스의 압력과 레이저출력을 변화시키면서 평균 증착속도와 증착으로 얻어진 미세 막대의 직경변화를 관측하였다. 또한 실험조건에 따른 증착물의 표면상태를 관찰하여 좋은 표면을 얻기 위한 실험조건을 제시하였다.

이동초점방식의 실험은 두 가지 방식으로 실시하였다. 첫째는 증착이 일어나는 중에 Z 방향이송계를 이용하여 레이저빔의 초점을 증착물의 성장 방향으로 계속 이동시킴으로써 증착반응이 중단되지 않고 유지되도록 하는 방식으로 고정초점방식에서보다 큰 세장비를 갖는 미세 막대를 제조하였다. 둘째로 증착이 일어나는 중에 회전 이송계를 이용하여 시편을 회전시킴으로써 시편 표면에 원형의 증착물이 생성되도록 하였으며, 같은 위치에 반복적으로 증착물을 생성시켜 적층 시킴으로써 3 차원 구조물 제작의 가능성을 제시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고정초점방식

4.1.1 미세 막대의 성장특성

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. 3 은 레이저 출력에 따른 평균성장속도의 변화를 나타낸 것이다. 반응가스의 압력 및 레이

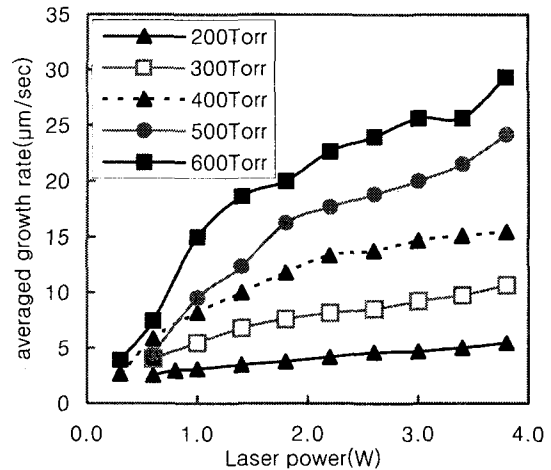


Fig. 3 Averaged growth rate of the micro carbon rods with respect to laser power

저 출력을 각각 200-600Torr 및 0.3-3.8W 까지 변화시키며 실험하였다. 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 1μm/sec 보다 느려 3 차원 구조물을 제작하기 위한 방법으로 적절치 않았다. Fig. 3 은 성장속도가 1μm/sec 보다 큰 경우에 대한 결과이다. 본 연구의 실험범위 내에서는 증착물의 평균성장속도는 반응가스 압력 200Torr, 레이저 출력 0.6W 에서 약 2.5μm/sec 로 가장 느렸으며, 반응가스 압력 600Torr, 레이저 출력 3.8W 에서 약 29.3μm/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. 3 에서 레이저 출력이 0.5W 정도로 낮은 경우에는 증착물의 성장속도가 압력에 따라서 크게 변하지 않다가 레이저 출력이 증가함에 따라 성장속도의 차이가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 2 장에서 설명하였던 것처럼 레이저 출력이 낮은 경우에는 증착율이 거의 온도에만 영향을 받으나 출력이 증가함에 따라 표면온도에는 덜 민감해지면서 증착에 필요한 반응가스의 공급속도에 영

향을 받게 되는 것으로 생각되어진다. Fig. 3 에서 증착율이 온도에만 영향을 받는 영역에서 반응가스 공급속도에 영향을 받는 영역으로의 변화는 레이저 출력 1.0W 전후에서 일어나는 것으로 판단되며 실험데이터의 경향은 식(2.2)로 표시되는 증착율과 온도 관계의 이론적 예측과 유사한 것으로 확인되었다.

증착이 일어나는 동안 반응부에서는 밝은 빛과 함께 그을음 혹은 검은색의 연기가 발생하는 것이 관찰되었으며, 연기는 압력 및 레이저 출력이 높을수록 많이 발생하였다. 증착도중의 이와 같은 빛 발생은 고온의 반응부에서 발생하는 복사현상과 반응가스가 고체와 기체로 분해되는 과정에서 발생하는 라디칼 등에 의해 생성되는 것으로 생각된다.³ 특히 반응가스 압력 500Torr, 레이저 출력 3.0W 이상일 경우 혹은 반응가스 압력 600Torr, 레이저 출력이 2.2W 이상일 경우에는 증착도중 연기가 격렬하게 발생하였다. 검은색 연기가 격렬하게 발생하는 조건에서는 증착 과정이 불안정적으로 진행되는 것으로 생각되며 Fig. 4 와 같이 모양이 변형되거나 표면형상이 불균일한 막대가 생성되므로 미세한 구조물을 만들기 위한 조건으로는 적절하지 않다.

Fig. 5 는 레이저 출력에 따른 미세 막대의 직경 변화를 나타낸다. 증착물의 지름은 반응가스의 압력 400Torr, 레이저 출력 0.3W 에서 25 μ m 로 가장 작았고, 반응가스의 압력 200Torr, 레이저 출력 3.8W 에서 370 μ m 로 가장 큰 값을 가졌다. 그림에서 볼 수 있듯이 증착물의 지름은 레이저 출력에

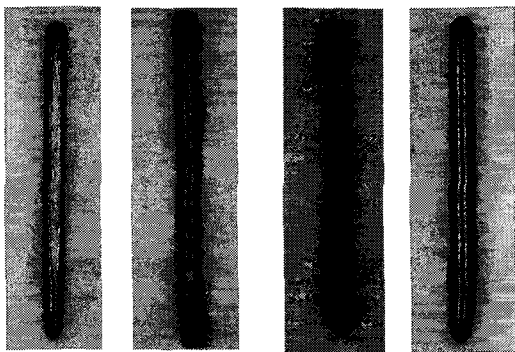


Fig. 4 Inconsistent surface and shape of the micro carbon rods fabricated at high power and high pressure conditions

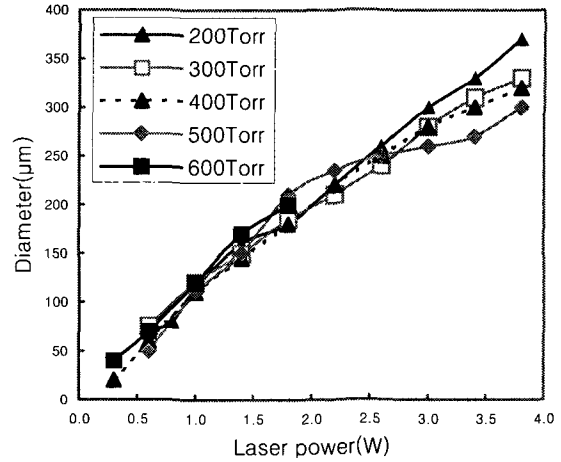


Fig. 5 Diameter of the micro carbon rods with respect to laser power

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 일정한 함을 보이지만, 레이저 출력이 2.4W 보다 큰 구간에서는 압력이 낮을수록 구조물의 지름이 증가하는 경향이 나타났다. 레이저 출력이 비교적 낮은 경우에는 입사되는 레이저 에너지와 시편 및 주변 기체로의 열손실이 비교적 작은 영역 안에서 균형을 이룰 것으로 예상되며 이로 인해 증착이 일어나는 단면의 크기는 Fig. 5 에서와 같이 압력에 크게 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 한편 높은 레이저 에너지에서는 입사되는 에너지량에 비해 증착에 소모되는 에너지량이 상대적으로 크지 않으므로 나머지 에너지는 열전도를 통해 시편의 보다 넓은 영역을 증착가능 온도까지 상승시킬 수 있다. Fig. 5 에서 레이저 에너지가 약 2.5W 이상에서는 압력이 낮을수록 크기가 증가하는 것을 알 수 있는데 이와 같이 낮은 압력에서는 Fig. 3 에서 본 바와 같이 증착율이 매우 낮아 잉여 에너지에 의해 직경이 큰 막대가 생성되는 것으로 생각된다.

4.1.2 미세 막대의 표면 거칠기 특성

고정초점방식으로 제조한 미세 막대의 표면은 실험조건에 따라서 다를 뿐만 아니라 같은 조건하에서 성장한 막대라도 위치에 따라서 다른 모양의

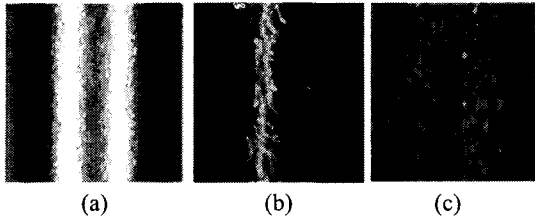


Fig. 6 Typical surface profiles observed on the micro carbon rods fabricated at different laser power (a) $E = 3.4W$, $p = 760Torr$, (b) $E = 3.4W$, $p = 400Torr$, (c) $E = 3.0W$, $p = 760Torr$

표면이 생성되는 것으로 나타났다. Fig. 6 은 일반적으로 많이 관찰되는 표면의 형상들로서 막대의 표면에 줄무늬, 비늘무늬, 기포무늬 등 다양한 형태가 나타나며 이 가운데 한가지 형태가 지배적으로 넓게 나타나거나 Fig. 7 에서처럼 하나의 막대에 모든 형상이 위치별로 나타나기도 하였다. 그러나 막대의 아래부분이 끝부분 보다 상대적으로 더 거칠고 불균일한 표면을 갖는다는 것 이외에는 일정한 경향성이 관찰되지 않았다.



Fig. 7 Example of a micro carbon rod with varying surface quality ($E = 2.8W$, $p = 760Torr$)

고정초점방식에서는 앞에서 기술한 바와 같이 증착이 진행되어 증착물 끝단의 높이가 초점으로 부터 멀어지면 증착이 중단되는데, 이렇게 자동적으로 중단되어 만들어진 막대의 끝은 항상 매끄러운 표면을 갖는 것을 관찰하였다. 이를 통하여 증착에 필요한 충분한 에너지를 흡수할 때와 달리 증착의 문턱조건 근처에서 성장한 증착물의 표면은 일정하게 매끈하다는 가정을 세우고, 일정 압력 하에서 다양한 레이저 출력에 대해서 증착물을 성장시킴으로써 위의 가정이 옳다는 것을 확인하였다.

Fig. 8 은 반응가스 압력 400Torr 에서, 레이저 출력을 1.5W 부터 0.3W 까지 감소시키면서 성장시킨 미세 막대의 표면을 전자현미경으로 촬영한 것

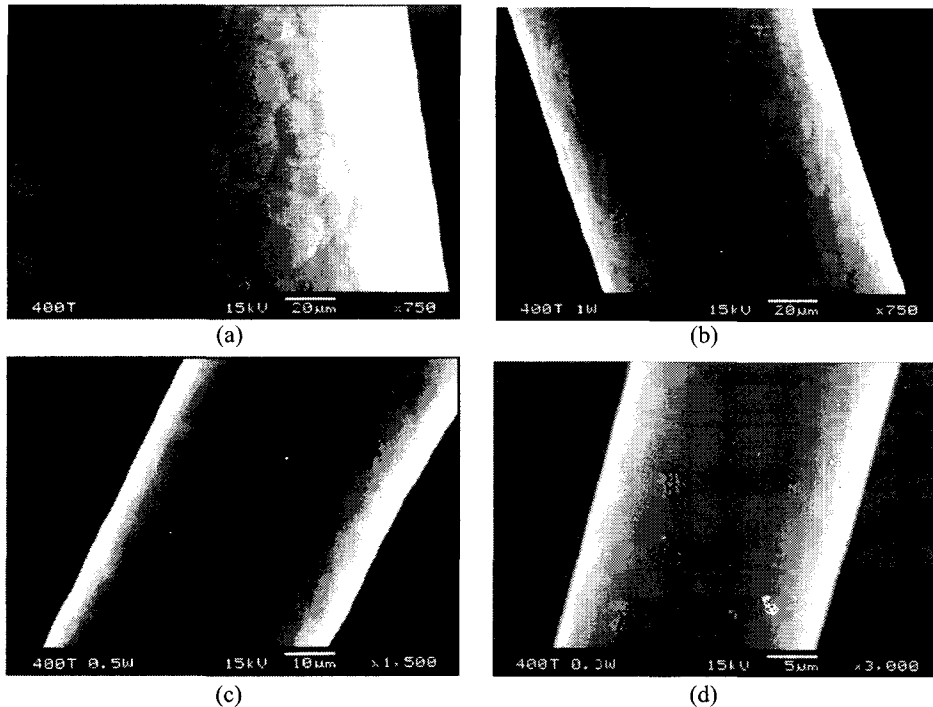


Fig. 8 Variation of surface quality of the micro carbon rods as a function of decreasing laser power: $p = 400Torr$, (a) $E = 1.5W$, (b) $E = 1.0W$, (c) $E = 0.5W$, (d) $E = 0.3W$

이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 레이저출력이 높을 때 관찰되는 표면의 불균일성이 에너지가 감소할수록 줄어들고 반응가스 압력이 400Torr 에서의 문턱조건인 0.3W 에서는 표면이 매우 깨끗하고 균일한 미세막대를 얻을 수 있었다.

Fig. 8 에서 보여준 것과 같은 레이저 출력에 따른 증착 매카니즘 차이는 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. 8(a)와 같이 미소한 분할영역이 생성되고 출력이 낮을 때는 핵생성이 기체와 고체의 경계면인 증착물의 끝부분에서만 일어나서 연속적이고 매끈한 표면을 형성했을 것으로 추정된다.

4.2 이동초점방식

4.2.1 세장비가 큰 구조물의 제조

고정초점방식에 의한 미세 막대의 제조에서는 막대가 성장하면서 끝단의 에너지 강도가 감소하여 저절로 성장이 멈춘다는 것을 앞에서 설명하였다. 따라서 만일 레이저 초점을 구조물의 성장속도에 맞춰 성장방향으로 연속적으로 이동시키면 증착 반응이 멈추지 않고 계속해서 일어나도록 할 수 있다. 이를 위해 본 실험에서는 초점렌즈가 부착된 Z 방향 선형이송계를 시편표면에 수직인 방향으로 이송시킴으로써 세장비가 큰 구조물을 제조할 수 있었다. Fig. 9 는 반응가스 압력 400Torr, 레이저 출력 0.3W 의 동일한 실험 조건에서 10 분 동안, (a)의 경우에는 Z 방향으로 4 μ 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 분 동안 계속해서 증착이 일어났으며 (b)는 도중에 증착이 중단되어 그림과 같이 높이 차이가 생겼다. Fig. 9(a)의 구조물 높이는 2680 μ m 로, Z 방향 이송 속도 \times 증착시간(4 μ m/sec \times 600sec = 2400 μ m)과 거의 같은 높이로 성장하였으나 (b)의 경우는 1560 μ m 에서 성장이 멈추었다. 여기서 (a) 의 경우 10 분 후에 인위적으로 증착을 중단하지 않았다면 훨씬 큰 높이로 성장시킬 수 있다.

또한 (a)의 경우는 높이에 따라서 구조물의 직경이 26-28 μ m 로 거의 일정하게 유지되었으나 (b) 경우는 막대의 아래쪽과 위쪽을 비교할 때 위쪽의

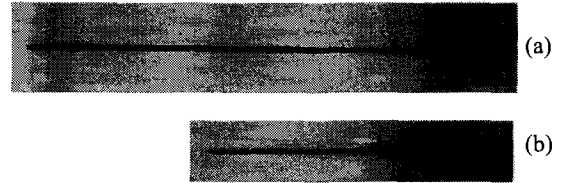


Fig. 9 Micro carbon rod with high aspect ratio fabricated by translating the focus along the growth direction; E = 0.3W, p = 400Torr, reaction time = 10 minute (a) translation speed = 4 μ m/sec, diameter = 28 μ m, height = 2680 μ m, (b) translation speed = 0 μ m/sec, diameter = 22-28 μ m, height = 1560 μ m

직경이 약 23 μ m 로 약 20% 감소하였다. 이를 통해 Fig. 9(a)에서 보인 것처럼 레이저 국소증착을 통해 세장비가 100 이상의 미세 막대를 쉽게 빨리 제조할 수 있다는 것을 증명하였다.

Fig. 9 에서 증착물의 아래쪽 시편과 접하는 부분이 둥근 볼 형태로 생긴 이유는, 시편에 증착을 처음 유도할 때에는 많은 에너지를 필요로 하지만, 일단 증착이 시작되면 보다 적은 에너지로도 증착을 유지할 수 있다는 사실을 발견해서, 처음에는 레이저 출력을 3.8W 로 증착을 시작하고 증착이 시작되면 레이저 출력을 0.3W 로 낮추는 방식을 채택하여 생긴 부산물이다.

4.2.2 회전방향이송에 의한 원형 패턴제작

Fig. 10 은 회전이송계를 이용하여 시편표면에 집속된 레이저 빔을 원형으로 이송하면서 증착을 유도하여 만든 높이 13-15 μ m, 직경 1500 μ m 의 패턴이다.

Fig. 10 에서 (b)는 증착물의 위쪽표면의 사진으로 가운데가 움푹 들어간 형상을 하고 있다. 이는 물질전달속도에 영향을 받는 영역에서 생기는 현상으로 증착물의 중앙까지 반응가스가 공급이 되지 못하고 바깥쪽에서 모두 증착이 일어난 결과다.⁸

위와 같은 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 가능하다. Fig. 11 은 Fig. 10 과 같은 실험조건에서 이송계를 3 회전 시켜서 얻은 결과로

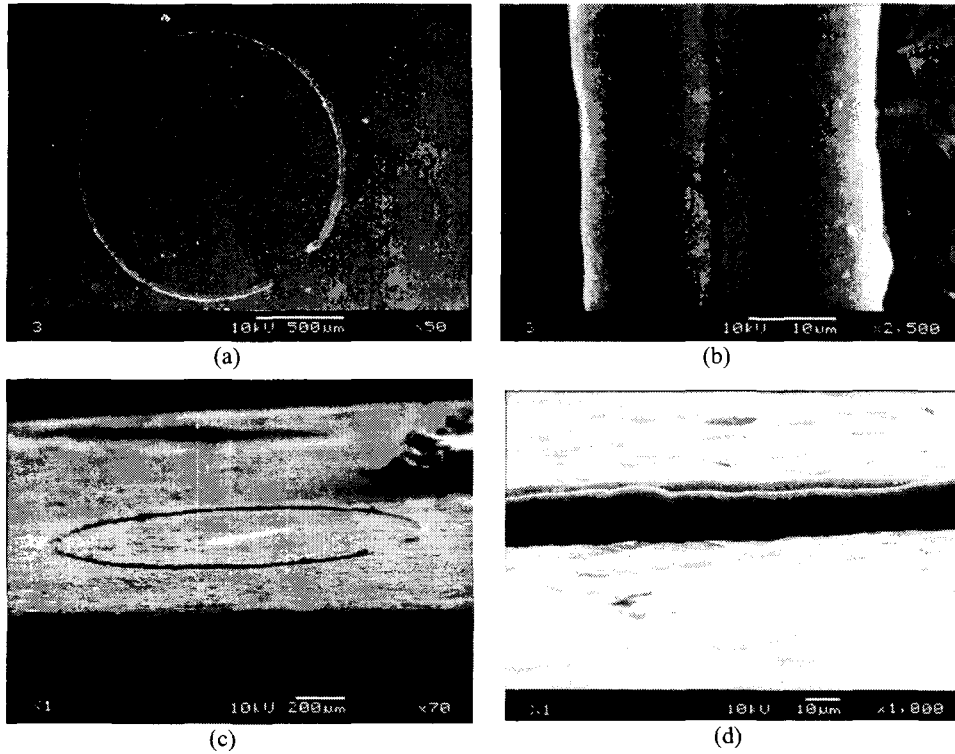


Fig. 10 Deposition of a circular pattern: $E = 3.8W$, $p = 300Torr$, translation speed = $7.8\mu m/sec$ (a), (b); top view (c), (d); side view

높이 약 $50\mu m$ 정도의 원통형으로 제조하였다.

위의 레이저 국소증착에 의한 3차원 패턴 제조 기술을 활용하여 임의 형상의 3차원 구조물 제조가 가능하며 더구나 제조시간이 매우 짧고 제조방법이 간단한 장점이 있다. 나아가 위에 제시한

연구결과들은 모두 증착물의 성장방향이 시편표면에 수직인 경우에 한정하였지만 시편을 적절한 속도로 이송하거나 증착 도중 레이저빔의 입사각을 조정함으로써 임의의 방향으로 증착이 일어나도록 유도할 수 있으며 복잡한 형상의 3차원 구조물 제

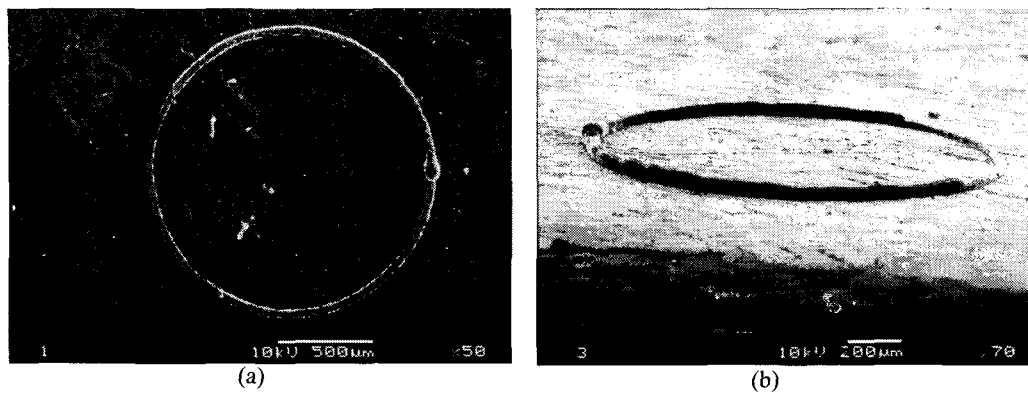


Fig. 11 Fabrication of micro tube by repeated circular deposition; $E = 3.8W$, $p = 300Torr$, translation speed = $7.8\mu m/sec$ (a) top view (b) side view

조도 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 열분해성 레이저 국소증착법에 의한 탄소 미세 구조물 제조에 관한 연구를 수행하였다. 특히 미세 막대 구조물의 제조를 통해 레이저 출력이 낮은 경우에는 증착율이 반응가스 압력에 거의 영향을 받지 않지만 출력이 증가할수록 압력에 비례하여 증착율도 증가한다는 것이 확인되었다. 또 증착물의 크기는 레이저 출력에 선형적으로 비례하며 압력에는 거의 영향을 받지 않는다. 레이저 국소증착에 의해 제조된 구조물의 표면거칠기 및 형상은 레이저 출력 및 반응가스 압력에 크게 영향을 받으며 보다 근본적으로는 증착 반응의 안정성에 의존하는 것으로 생각된다. 특히 문턱조건 부근에서 증착을 시킬 경우 매우 우수한 표면품질을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 레이저 국소증착 기술은 LIGA나 리소그라피 등과 같은 기존의 3차원 가공기술에 비해 장비의 구조가 간단하고 기술의 활용도 쉬우며 상대적으로 증착물의 가공속도가 매우 빠르다는 것과, 또한 다른 3차원 가공기술에 비해 세장비가 크거나 복잡한 구조물도 비교적 손쉽게 제조할 수 있는 장점으로 인해 새로운 3차원 미세구조물 가공기술로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어개발사업 중 “지능형마이크로시스템개발사업단 (www.microsystem.re.kr)”의 연구비지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

1. T. H. Baum, C. E. Larson, “Laser-induced Chemical Vapor Deposition of Aluminum,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, No. 12, Sep., pp. 1264-1266, 1989.
2. F. T. Wallenberger, P. C. Nordine, “Strong, small diameter, boron fibers by LCVD,” *Materials Letters* 14, 198-202, 1992.
3. J. Maxwell, “Three-Dimensional Laser-Induced

Pyrolytic Modeling, Growth Rate, Control and Application to Micro-Scale Prototyping,” Ph. D. thesis, Rensselaer Polytechnical Institute, Troy, New York, 1996.

4. J. L. Maxwell, J. Pegna, D.V. Messia, “Real-time volumetric growth rate measurements and feedback control of three-dimensional laser chemical vapor deposition,” *Appl. Phys. A* 67, pp. 323-329, 1998.
5. M. C. Wanke, O. Lehmann, K. Muller, Q. Wen, and M. Stuke, “Laser Rapid Prototyping of Photonic Band-Gap Microstructures,” *Science* 275, 1284-1286, 1997.
6. 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*, pp. 232-237, 1999.
7. M. Lax, “Temperature rise induced by a laser beam,” *Journal of Applied physics*. Vol. 48, No. 9, pp. 3919-3924, September 1977.
8. N. Arnold, P. B. Kargl, D. Bäuerle, “Modeling of Pyrolytic laser direct writing: Noncoherent structures and instabilities,” *J. Appl. Phys.* 82(3), 1 August 1997.