레이저 국소증착에 의한 탄소 미세 구조물 제조

Fabrication of micro carbon structures using laser-induced chemical vapor deposition

광주과학기술원 기전공학과 한성일, 김진범, J. Senthil Selvan, 정성호

Ⅰ. 서론

급속히 발전하고 있는 센서 및 엑츄에이터 등의 MEMS분야에서, 기존의 반도체 공정을 기반으로한 미세 구조물 제작방법은 대량생산의 장점이 있으나, 2차원 중심의 증착과 식각의 반복이 주요한 수단으로 사용되고 있다.[1] 따라서, 높은 세장비(aspect ratio)를 갖는 구조물이나 투영체 형상 이외의 구조물 제작에는 많은 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위한 방법 중 하나로 80년대 후반부터 레이저 국소증착(Laser-induced Chemical Vapor Deposition : LCVD)이 3차원 미세구조물 제작방법으로써 활발하게 연구 되어왔다.[2,3,4,5]

레이저 국소증착법은 원하는 부위에 레이저빔을 조사시킴으로써 증착을 국지적으로 유도, 유지시켜 물질을 미세하게 더하여 나가면서 구조물을 형성시키는 방법이다.[2] 이러한 방법을 이용하면 증착물의 재료에 거의 제한받지 않고, 복잡한 형상이나 높은 세장비의 미세 구조물을 용이하게 만들 수 있다.

본 연구에서는 열분해성 레이저 국소증착법을 이용하여 탄소 미세구조물 제조시 공정변수가 증착물의 성장속도와 지름, 그리고 표면상태에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 응용하여 원통형 구조물을 제작하였다. 또한, 레이저 라만 분광분석을 통하여 탄소 미세 구조물의 결정구조를 조사하였다.

Ⅱ. 실험방법

Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 레이저 및 광학계, 반응챔버와 반응가스 조절부, 그리고 이송장치와 제어부로 구성되어 있다. 본 실험에서는 최대출력 4W, 파장 514.5nm의 아르곤 이온 레이저(Coherent Innova 308C)가 에너지원으로써 사용되었으며, 직경 1.8mm의 레이저 빔을 지름

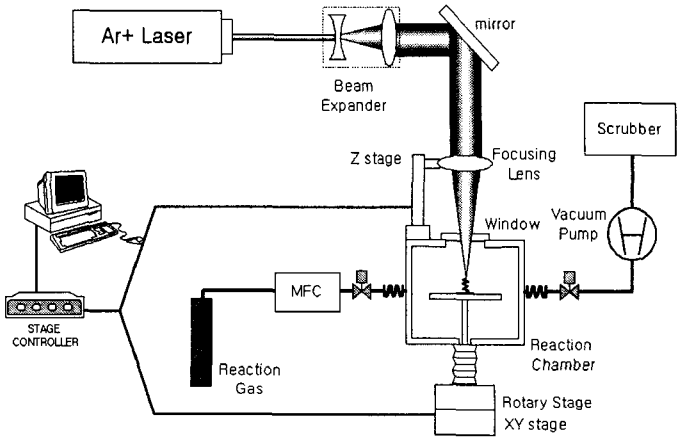

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

약 9mm로 확대한 후 초점거리 200mm의 렌즈를 통하여 챔버 내 시편에 집속하였다. 집속된 빔의 직경은 칼날방법으로 측정한 결과 약 28μm이었다. 반응가스로는 에틸렌(C_2H_4)을 사용하였으며, 시편으로는 순도 99.8%, 두께 0.254mm의 흑연 판재(Alpha Asear, #10832)를 1cm×1cm의 크기로 잘라 에탄올과 아세톤으로 세척하여 사용하였다. 실험은 먼저 반응챔버를 진공펌프로 $\sim 10^{-2}$Torr까지 압력을 낮춘 후 반응가스를 원하는 압력까지 채우고 밀폐상태에서 시편에 레이저 빔을 조사하여 증착을 유도하는 방식으로 실시하였다. 탄소 증착을 위한 에틸렌가스의 열분해 과정은 다음과 같다 :

$$C_2H_4(g) \rightarrow 2C(s) + 2H_2(g)$$

증착은 집속된 레이저 빔의 초점을 시편위에 고정하는 고정초점방식과 시편에서 출발하여 원하는 형상으로 초점의 위치를 이동시키는 이동초점방식의 두 가지로 진행되었다. 후자의 경우 x, y, z축의 선형이송장치와 회전이송장치 및 이송계 제어장치를 통하여 초점이 원하는 형상의 움직임을 가질 수 있도록 하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

먼저, 고정초점방식을 통하여 반응의 주요한 공정변수인 레이저출력과 압력이 증착물의 성장속도 및 직경과 표면상태에 미치는 영향을 조사하였다.

고정초점방식에서는 증착물이 성장하면서 끝단의 에너지 강도가 반응의 문턱조건보다 적어지면 저절로 증착이 중단된다. Fig.2는 레이저 출력에 따른 증착물의 평균성장속도를 나타낸 것이다. 레이저출력과 반응가스의 압력을 각각 0.3~3.8W, 200~600Torr에 걸쳐 실험하였으며, 평균성장속도는 증착물의 전체 높이를 레이저가 조사된 시각에서 증착완료 시각까지의 시간으로 나눈 값이다. 실험결과, 성장속도는 레이저 출력이 높을수록, 그리고 반응가스의 압력도 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 1W이하에서 성장속도는 반응기체의 압력보다는 레이저출력에 더 크게 영향 받으며, 레이저출력이 증가하게 되면 출력의 영향은 줄어들고, 반응가스 압력의 영향이 커지게 되는데, 이러한 경향은 Arrhenius식으로 표현되는 증착율과 표면온도의 상관관계와 일치한다. 본 실험에서 최대성장속도는 레이저출력 3.8W, 반응가스 압력 600Torr에서 약 30μm/s 이었으며, 0.5W이하에서는 압력에 관계없이 1μm/s이하의 낮은 성장속도를 보여 미세 구조물 제작에 적합하지 못한 것으로 나타났다.

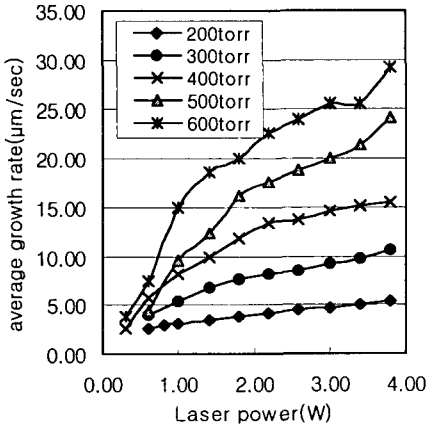

Fig.2 Average growth rate of the micro carbon rods with respect to laser power

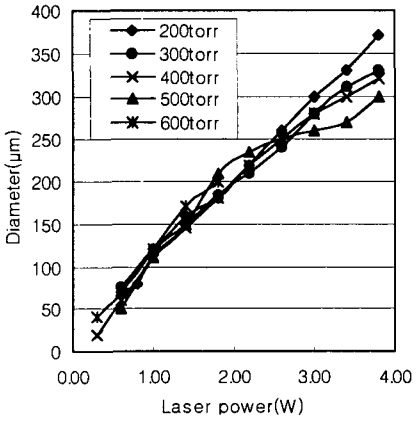

Fig.3 Diameter of micro carbon rods with respect to laser power

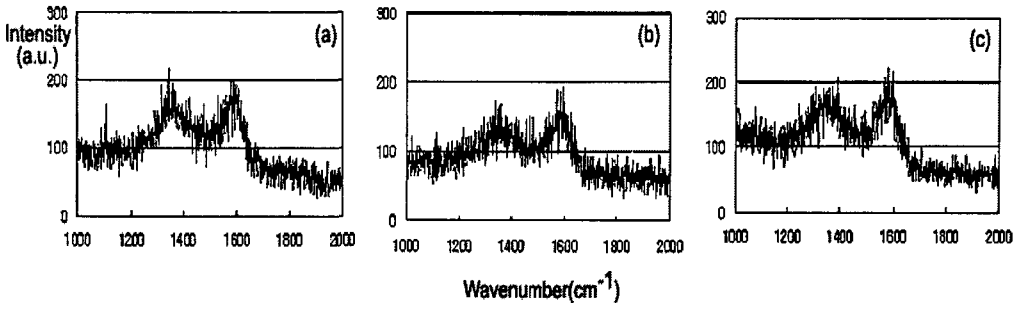

Fig.4 Raman spectra of micro carbon rods at various laser powers showing mainly graphitic carbons. Peaks at 1350cm^{-1} and 1590-1600cm^{-1} indicate D- and G-band graphitic carbons : (a) E=2.2W, (b) E=3.0W, (c) E=3.8W

미세막대의 직경은 반응가스의 압력에 관계없이 레이저출력에 따라 선형적으로 증가함을 나타내었다(Fig.3). 레이저출력이 증가함에 따른 반응부의 표면온도 증가와 증착 초기 시편표면의 반응부 확대가 미세막대의 직경증가의 원인으로 추정된다.

탄소 미세막대의 표면상태는 공정변수에 따라 다양하게 변화함을 보였으며, 동일한 구조물에서도 증착위치에 따라 각기 다른 표면상태를 보이기도 하였다. 구조물의 아랫부분, 즉 초기증착시 표면상태는 큰 조직입자로 인한 거친 표면상태를, 끝단에서는 항상 매우 매끄러운 표면을 나타내었다. 실험을 통해 증착이 반응의 문턱조건 부근에서 일어날 때 매끄러운 표면을 형성함을 알 수 있었다.

위에서 설명한 방식으로 제조된 탄소 미세막대의 재료적 특성을 알아보기 위해 레이저 라만 분광분석기(SPEX-1403)를 이용하여 결정구조를 조사하였다(Fig.4). 여기광으로는 파장 514.5nm의 아르곤 이온레이저(Coherent Innova 305)가 사용되었고, 300K에서 뒤쪽산란 배치(back scattering geometry)가 이용되었다. Fig.4에서 보이는 바와 같이 모든 경우 1350cm^{-1}와 1590-1600cm^{-1}의 두 부분에서 완만한 피크값을 보였으며, 이는 각각 D-밴드와 G-밴드의 흑연구조를 나타낸다. 따라서 열분해성 레이저 국소증착을 통해 얻어진 증착물은 비결정(amorphous) 탄소 구조로 이루어져 있음을 확인하였다.

이동초점방식의 하나로 본 실험에서는 초점렌즈가 부착된 Z방향의 선형이송계를 시편에 대해서 수직하게 이동시켜 높은 세장비를 갖는 탄소 미세막대를 제작하였다. Fig.5에서 (a)는 레이저출력 0.3W, 압력 400Torr에서 10분 동안 4μm/s의 속도로 이송시킨 결과로 제조된 미세막대로 직경 28μm, 높이 2680μm, 세장비는 100정도이다. (b)의 경우는 (a)와 동일한 조건하에서 고정초점방식으로 증착된 구조물로써, 높이 1560μm에서 반응이 멈추었으며, 직경은 끝단으로 갈수록 가늘어져 28μm에서 22μm로 감소하였다. 그러므로, 자연적인 반응중단 없이 균일한 형상으로 계속 성장시키기 위해서는, 앞서 조사된 평균성장속도로부터 이동초점방식을 이용하면 높은 세장비를 갖는 미세 구조물을 제작할 수 있다.

Fig.6은 초점을 시편에 고정시킨 상태에서 회전이송계를 이용하여 원형패턴 증착으로 얻어진 원통형 구조물을 보이고 있다. 레이저 출력 3.8W, 반응가스 압력 300Torr에서 선속도 10.0μm/s로 10회전하였으며, 그 결과 폭 50μm, 내경 950μm, 그리고 높이 150μm의 원통형 구조물을 제작하였다. 원형패턴을 반복하여 증착시킨 결과 적층된 증착층들이 구조물의 측면에 나타나있다. 첫 번째 층은 외관상 보이지 않았고, 두께는 점점 증가하여 맨 위층에서는 약 30μm정도 되었다. 이는 두께증가에 따라 증착물에서 시편으로의 열손실이 감소하므로 위로 올라갈수록 표면증착이 활발해짐에 따른 것으로 생각된다. 또한, 구조물은 전체적으로 일정하지 못한 높이를 갖는데, 이는 시편 표면의 불균일로 인해 첫 번째 증착층이 불연속적으로 생성된 데 기인한 것으로 생각된다.

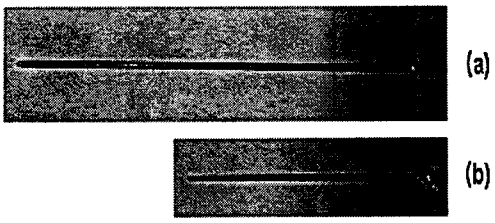

Fig.5 Comparison of micro carbon rods fabricated by (a)moving focus mode and (b)fixed focus mode (E=0.3W, P=400Torr)

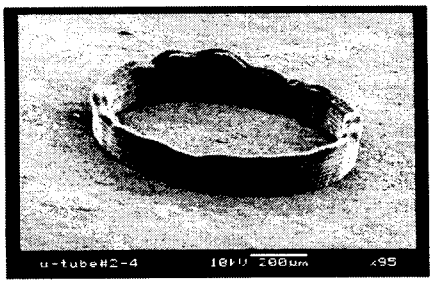

Fig.6 Micro circular structure fabricated by stacking layers : E=3.8W, P=300Torr, v=10.0μm/s

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 열분해성 레이저 국소증착법을 이용하여 탄소 미세구조물의 제조에 대한 연구를 수행하였다. 고정초점방식을 통하여 주요 공정변수인 레이저출력과 반응가스 압력이 증착물의 성장속도 및 직경, 표면상태에 미치는 영향을 조사하였다. 평균성장속도는 전반적으로 레이저출력이 높아질수록 증가하며, 1W이하의 낮은 레이저 출력에서는 압력의 영향을 거의 받지 않지만, 출력이 증가할수록 압력에 비례하여 성장속도도 증가함을 확인하였다. 증착물의 직경은 압력에 관계없이 레이저출력에 선형적으로 비례하였으며, 미세 구조물의 표면상태는 증착의 문턱조건에서 매끈한 상태의 우수한 표면을 얻을 수 있었다. 또한, 미세막대표면에 대한 레이저 라만 분광분석을 통하여 결정구조가 비결정 흑연구조를 가짐을 확인하였다. 이동초점방식을 통해 세장비 약 100의 탄소 미세 막대를 제작하였으며, 적층법을 적용한 탄소 미세 원통형 구조물의 제작을 통하여 복잡한 3차원 자유 형상 미세 구조물의 제작 가능성을 보였다.

Ⅴ. 참고문헌

1. N. Maluf, *An introduction to microelectromechanical systems enigineering*, Artech house, 2000

2. D. Bäuerle, *Laser processing and chemistry*, Springer, Berlin, 2000

3. H. Westberg, M. Boman, S. Johansson, and J. Schweitz, Truly three dimensional structures microfabricated by laser chemical processing, International conference on transducers, 1991, pp. 516-519

4. F. T. Wallenberger, P. C. Nordine, Strong, small diameter, boron fibers by LCVD, Materials Letters 14, 1992, pp. 198-202

5. K. Williams, J. Maxwell, K. Larsson, and M. Boman, Freeform fabrication of functional microsolenoids, electromagnets and helical springs using high-pressure laser chemical vapor deposition, 12th IEEE international conference on MEMS, 1999, pp. 232-237