

< 논문 >

레이저 화학증착을 이용한 3차원 쾌속조형에 관한 실험적 연구

이 영 림* · 유 재 은*

(2004년 4월 3일 접수, 2004년 12월 6일 심사완료)

Experimental Study of 3-Dimensional Rapid Prototyping by Laser Chemical Vapor Deposition

Young Lim Lee and Jae Eun Ryu

Key Words: Rapid Prototyping(쾌속 조형), Laser Chemical Vapor Deposition(레이저 화학증착), Tetramethylsilane(테트라메틸사일레인), Silicon Carbide(실리콘 카바이드)

Abstract

Laser chemical vapor deposition can be an effective technique for a rapid prototyping with ceramic materials, in particular. The objective of the study is to fabricate several 3-dimensional objects by stacking multi-layers as well as to find out some basic aspects of a rapid prototyping with laser chemical vapor deposition such as deposition characteristics with traversing speed of the laser, possible problems in stacking multi-layers etc. The limit speed of the laser that can grow a tilted SiC rod was found in this study, and laser directing writing that occurs over the limit speed was also investigated. Finally, a zigzag-shaped rod, a spiral-shaped rod, a wall and a square duct were successfully fabricated with laser chemical vapor deposition of tetramethylsilane

1. 서 론

기호설명

- T : 온도
- M : 레이저빔 질(quality)
- f : 초점거리
- D : 빔 직경
- W_0 : 초점에서 빔 직경
- $torr$: 압력단위
- W : 레이저 출력

그리스문자

- λ : 레이저 파장

오늘날과 같은 다변화된 시장 환경에서는 경쟁력 있는 제품을 개발하는 데에 산업디자인의 역할이 더욱 중요시되고 있다. 이에 부응하는 산업 디자인 프로세스를 개발하기 위하여 새로운 신기술과 방법들이 공학 및 기술분야로부터 디자인 프로세스에 지속적으로 도입되고 있으며, 제품 개발에 활용되어 그 효용성을 인정받고 있다 이러한 기술 가운데 하나로서, 1990년대 3차원 컴퓨터 모델링 기술과 제어기술을 이용하여 개발된 쾌속조형(rapid prototyping)은 컴퓨터로 모델링(modeling)된 제품의 3차원 가상 형태를 실물 형태로 신속하게 제작해 주는 혁신적인 기술이다. 쾌속조형기술 중 레이저 화학증착 기술은 아직 연구단계에 있고 특히 세라믹을 쾌속조형 하거나, 마이크로 단위의 물체를 조형하는데 유리하다. 이러한 레이저 화학증착 기술은 Zong 등⁽¹⁾이 레이저를 이송시켜 3차원 물체를 연속적인 레이어(layer)로 조형하는 Selective Area Laser Deposition

† 책임저자, 회원, 공주대학교 기계공학부
E-mail : ylee@kongju.ac.kr
TEL : (041)850-8615 FAX : (041)854-1449
* 공주대학교 대학원

(SALD) 기술을 발표하면서 패속조형 기술의 하나로써 시도되기 시작하였다. 그들은 아세틸렌(C_2H_2)을 이용하여 레이저가 움직이지 않을 때 생성되는 탄소로드(carbon rod) 및 레이저 이송시 형성되는 탄소라인(carbon line)에 대하여 연구하였다. 이러한 기술은 Birmingham⁽²⁾의 vapor infiltration을 이용한 SALD 기술, Harris와 Marcus⁽³⁾의 Si_3N_4 원통 파이프 joining, Thissell⁽⁴⁾의 다이아몬드 증착 등의 연구로 확장되었다. 최근 들어 Jacubenas⁽⁵⁾는 $TiCl_4$ 로부터 TiO_2 를 증착하였고 Maxwell⁽⁶⁾ 등은 $Ni(CO)_4$ 로부터 니켈을 레이저 화학증착하여 온도제어를 통해 침착율이 제어 가능함을 보여주었으며, Lee⁽⁷⁾ 등은 tetramethylsilane (TMS)을 반응가스로 이용하여 SiC 로드 성장 특성을 알아보았다. 또한, Lee⁽⁸⁾는 TMS로부터 SiC의 레이저 화학 증착에 관한 이론적 연구를 발표하였으며, Figueras⁽⁹⁾ 등은 TMS를 이용하여 일반적인 화학증착 과정에서 SiC 증착률과 물성치를 발표하였다.

본 연구에서는 레이저 화학증착을 이용하여 멀티레이어(multi-layer)를 구현하고 이러한 적층을 통하여 비교적 단순한 모양의 3차원 SiC 물체를 조형하고자 한다. 모가스(precursor)로는 TMS를 사용하고 이것의 열분해하기 위한 레이저는 Nd-Yag 레이저를 사용한다. 먼저, 기존의 고정된 레이저 빔 연구^(7,8)에 계속해서 레이저의 이송속도 및 빔 모드에 따른 증착 특성을 살펴보고 멀티레이어 적층시 발생할 수 있는 문제점도 검토한다. 또한, 이러한 기초 실험을 바탕으로 본 연구에서는 새로이 지그재그 모양의 로드, 나선형의 로드, 벽, 사각단면을 가진 관 등의 패속조형을 시도하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

레이저 화학증착을 이용하여 3차원 패속조형을 구현하는 실험을 위해 레이저로는 Nd-Yag laser를 사용하였고 빔 확장기(beam expander)와 초점 렌즈(focus lens)로 레이저 빔 사이즈를 줄여 레이저의 집광성을 높였다. 또한, 진공챔버를 XY 이송테이블 위에 장착하여 레이저의 조사 부위를 이동 가능하게 하였고 레이저빔이 지나가는 통로는 폐쇄하여 안전을 도모하였다. 이 외에 전체

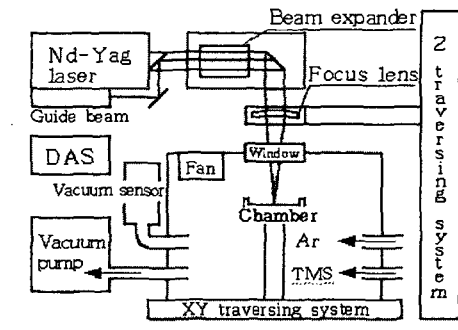


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

압력을 10^{-3} torr 까지 낮출 수 있는 진공펌프와 화학반응시 증착부위에서 발생하는 부산물이 빔이 통과하는 창을 오염시키지 않도록 작은 팬(fan)을 챔버내에 장착하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다.

2.1.1 레이저 장치

TMS 열분해를 위한 레이저로서 CO_2 레이저와 Nd-Yag 레이저를 고려할 수 있겠으나 TMS 가스가 CO_2 레이저의 에너지를 흡수하는 특성 때문에 본 연구에서는 Nd-Yag 레이저를 사용하였다. Nd-Yag 레이저는 파장이 $1.06 \mu m$ 로써 CO_2 레이저 파장의 1/10에 해당하며 싱글모드(TEM₀₀) 형태로 정격출력 10 W 정도를 낼 수 있으며 멀티모드로는 최대 30 W 정도 가능하다. 멀티모드의 경우 높은 출력을 얻을 수 있지만 상대적으로 빔면적이 늘어나 빔 강도(intensity)는 크게 증가하지 않고 빔의 모양도 가우스 분포에서 벗어난다. 본 실험에서는 집광성이 좋은 싱글모드를 주로 사용하면서 멀티모드도 비교를 위해 사용하였다.

또한 레이저빔의 사이즈를 조절하기 위하여 1 mm의 레이저빔을 빔 확장기로 10 mm까지 확장한 후 다시 초점 렌즈를 통해 최종적으로 레이저빔이 모체에 조사되는 빔의 사이즈는 $44 \mu m$ 로 조절하였다. 초점렌즈를 이용하여 줄여진 빔의 두께를 구하는 식은 다음과 같다.

$$W_0 = \frac{M^2 \lambda f}{D} \quad (1)$$

여기서 M 은 빔질로서 TEM₀₀의 경우 1.1의 값을 가지고, λ 는 레이저의 파장으로서 Nd-Yag 레이저의 경우 1064 nm 이다. f 는 사용된 초점 렌즈의 초점거리(203 mm)이며 D 는 초점렌즈로 입

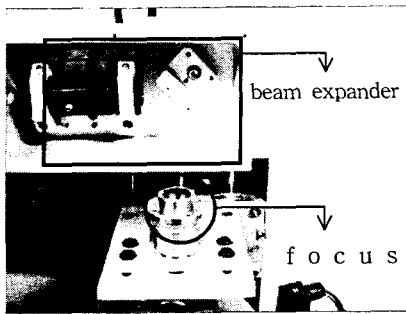


Fig. 2 Z traversing system for a focus lens

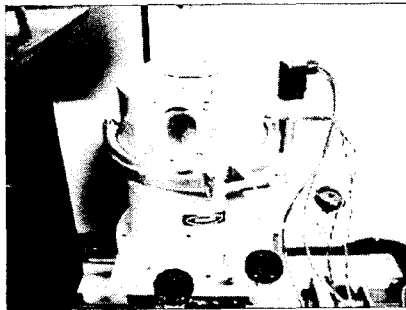


Fig. 3 Vacuum chamber

사되는 빔직경(10 mm)이다. 이 때, 증착되는 로드의 높이에 따라 레이저의 초점을 이동시켜 주어야 하는데 이를 위해 초점 렌즈를 Z방향으로 이송할 수 있도록 Fig. 2와 같은 수동 이송장치를 사용하였다.

2.1.2 반응 챔버

본 연구에서 제작한 반응챔버는 원통형의 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 네 개의 포트(port)와 두 개의 윈도우(window)가 장착되었다. 세 개의 포트는 각각 진공펌프, TMS 및 압력센서에 연결되었고 마지막 포트는 챔버 내의 잔여 공기를 최대한 줄이기 위해 Ar과 같은 불활성 기체를 제공해 주기 위해 사용되었다.

두 개의 윈도우 중 챔버 덮개에 있는 윈도우는 파장 10.6 μm 의 레이저 빔이 통과하여 챔버 내부로 들어오는 곳이며 다른 하나는 반응영역을 직접 육안으로 관찰할 수 있는 윈도우이다. 이 외에 화학반응시 생기는 부산물이 레이저가 통과하는 윈도우를 오염시키지 못하도록 작은 팬을 설치하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 반응챔버를 보여주고 있다.

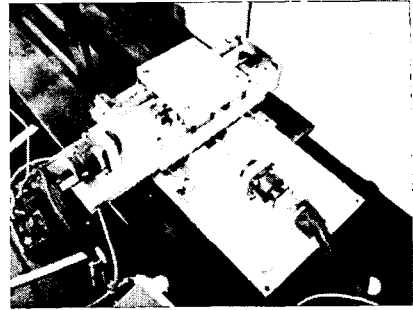


Fig. 4 XY table

2.1.3 이송테이블

이송장치로는 MITSUBISHI Electric의 서보 모터가 탑재된 자동 XY 테이블과 초점 렌즈의 Z방향 이송을 위하여 피치 5 mm의 나사선으로 구성된 수동 이송장치를 설치하였다. XY 테이블의 제어를 위하여 ATMEL사의 AT985C52 마이크로 칩을 사용하였으며, 프로그램은 Microsoft의 Visual Basic 6.0을 이용하였다. Fig. 4는 XY 테이블을 보여준다.

2.2 실험방법

본 실험은 레이저 화학증착을 이용하여 3차원 물체를 패속조형 하는 것이며 모가스로는 TMS를 이용하였고 모체로는 SiC 분말을 사용하였다. 먼저, 증착에 앞서 안정된 레이저 출력을 얻기 위하여 냉각수 온도를 15.5°C에 설정하고 레이저 파워가 안정적인지 확인한 후 실험을 시작한다. 챔버 안과 레이저가 입사되는 윈도우도 실험 전 메탄올로 깨끗이 세척한다. 이후 챔버에 모체를 넣고 진공센서의 절대압력이 10^{-3} torr가 될때까지 진공펌프를 가동시킨다. 마지막으로 TMS의 공급 포트에 설치되어 있는 니들밸브를 조금씩 열어 원하는 압력을 설정한 후 레이저의 초점을 모체에 위치시켜 조사한다.

먼저 챔버 충전 압력이 50 torr일대 싱글모드를 사용하여 얼마나 오랫동안 안정적인 증착물이 얻어지는지 알아보았다. 또한, 3차원 조형물을 만들기 위한 기초실험으로써 챔버가 놓여진 이송테이블의 속도를 변화시켜 가며 생성되는 SiC 증착물의 특성을 살펴보았다.

레이저를 지속적으로 이송시키면 로드가 경사지게 자라게 되는데 이송속도에 따른 경사각변화 및

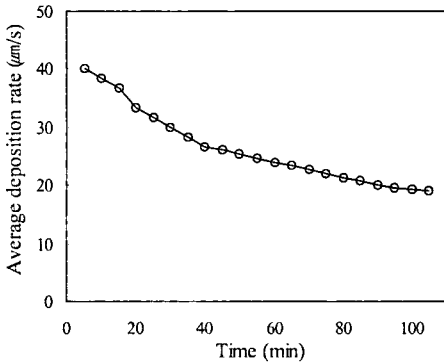


Fig. 5 Variations of growth rate of SiC rod with reaction time

로드를 성장시킬 수 있는 한계 이송속도를 살펴 보았다. 또한, 한계속도 이상의 고속에서는 레이저 선긋기(laser direct writing)가 되는데 이송속도에 따른 선긋기 특성 변화도 알아보았다. 마지막으로 적층법을 이용하여 여러 가지 단순한 모양의 3차원 구조물을 패속조형 하여 보았다.

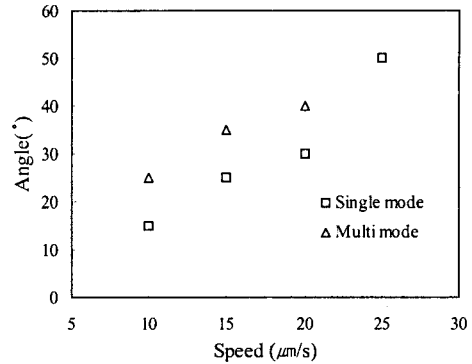
3. 결과 및 고찰

3.1 반응시간에 따른 로드들의 성장률 변화

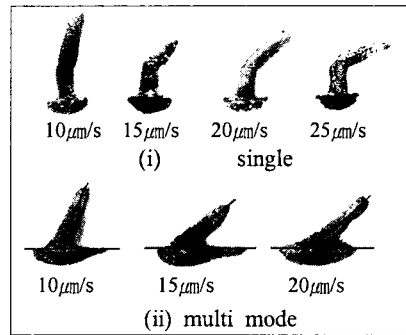
3차원 패속조형을 위한 증착조건으로 레이저 정격출력 10 W 및 충전압력 50 torr를 사용하였다. 이 때의 로드지름은 약 0.75 mm이고 성장속도는 약 40 $\mu\text{m/s}$ 이다. 본 실험에서는 50 torr TMS의 1회 충전으로 얻어낼 수 있는 SiC 증착물과 증착 특성을 알아보기 위해서 TMS 충전 후 5분 간격으로 레이저를 이동시켜 가며 조사하였다.

로드의 성장률은 Fig. 5에서와 같이 시간이 지남에 따라 점진적으로 감소하는데 초기 15분 동안은 초당 약 35 $\mu\text{m/s}$ 이상의 증착률을 유지하나 80분 이후에는 로드 증착률이 약 20 $\mu\text{m/s}$ 로 줄어들었다.

로드의 성장률은 3차원 조형물을 만드는데 있어서 중요한 요소 중의 하나이므로 본 연구에서는 50 torr의 1회 충전으로 약 15분 동안 증착을 한 후 더 이상 레이저를 조사하지 않고 제충진함으로써 성장률을 항상 초당 35 μm 이상으로 유지시켰다.



(a) Tilted angles



(b) Rod images

Fig. 6 Variations of rod growth with traversing speed

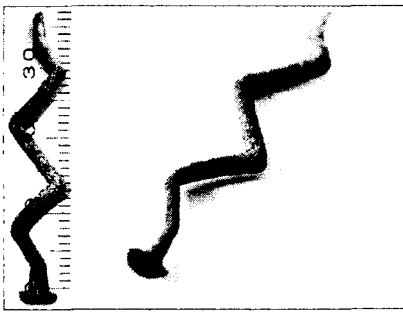
3.2 이송속도에 따른 로드들의 경사각 변화

이송테이블의 속도에 따라 로드들이 성장하는 특성을 살펴보기 위하여 이송속도를 10, 15, 20, 25, 30 $\mu\text{m/s}$ 로 각각 변화시켰다. 또한, 레이저 빔은 싱글모드 10 W와 멀티모드 15 W를 각각 고려하였다.

Fig. 6은 이송속도에 따른 로드 성장 특성을 보여 준다. 로드는 이송속도가 증가할수록 점점 더 큰 경사각을 가지고 성장하는데 한계 속도에 이르면 로드가 더 이상 자라지 않고 레이저가 모체 위에 선을 그리게 된다. 먼저, 싱글모드의 경우 이송속도를 10 $\mu\text{m/s}$ 부터 15, 20, 25 $\mu\text{m/s}$ 까지 점진적으로 증가시키면 로드는 수직선으로부터 15 $^{\circ}$, 25 $^{\circ}$, 30 $^{\circ}$, 50 $^{\circ}$ 의 경사각을 가지고 성장한다. 하지만, 이송속도를 30 $\mu\text{m/s}$ 로 더욱 증가시키면 로드가 더 이상 자라지 않고 레이저 선긋기(laser direct writing)가 된다. 한편, 멀티모드의 경우 20



(a) Single mode



(b) Multi mode

Fig. 7 Deposition of SiC rod by zigzagging the laser

$\mu\text{m/s}$ 의 이송속도에서 로드는 40° 의 임계각을 가지고 그 이상의 속도에서는 로드가 더 이상 형성되지 않는다. 증착된 로드의 지름은 멀티모드일 때 훨씬 크고 로드의 길이는 싱글 모드일 때가 높은 증착률로 인해 길어지게 된다. 따라서, 3차원 지그재그 구조 및 나선형 구조를 만드는데 있어서 피치가 작고 세밀한 조형을 하기 위해서는 로드의 지름이 작고 좀 더 큰 경사각을 얻을 수 있는 싱글모드가 유리하다.

3.3 로드의 경사각을 이용한 3차원 물체 조형

본 연구에서는 이송속도에 따른 로드의 경사각을 이용하여 단순 모양의 3차원 SiC 조형물을 제작하여 보았다. 먼저, 레이저 빔을 좌우 교대로 이동시키며 지그재그(zigzag) 모양을 가진 로드를 조형하여 보았다. 충전압력은 50 torr를 사용하였고, 레이저 출력은 싱글모드 10 W 및 멀티모드 15 W를 이용하였다. 또한, 이송속도는 선행 실험 결과로부터 로드가 도중에 끊어지지 않도록 싱글모드 및 멀티모드일 때 각각 $25 \mu\text{m/s}$ 와 $20 \mu\text{m/s}$ 로 설정하였다.

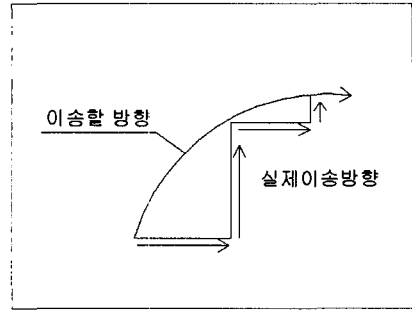
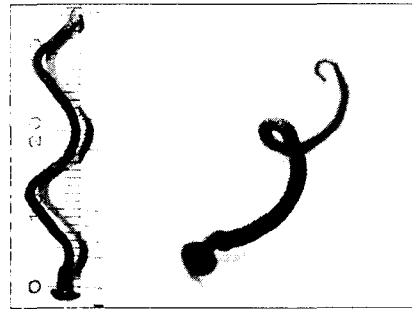


Fig. 8 Approximations of a curve with the XY table



(a) Single mode



(b) Multi mode

Fig. 9 Deposition of a SiC spiral-shaped rod

한편, 모체가 분말이기 때문에 각도를 가지고 자라는 로드 증착시 무게중심의 이동으로 넘어질 수 있으므로 로드를 증착시키기 전에 분말 모체 표면에 얇은 기초(base)를 넓게 증착시켰다. TMS는 증착을 시작한 후 약 15분마다 한번씩 재충전하였다.

Fig. 7은 두 가지 레이저 모드에서 증착시킨 지그재그 모양의 3차원 조형물을 보여주고 있다.

멀티모드의 경우 약 42°의 각을 가진 지그재그 모양의 구조물이 패속조형 되었으며 생성된 구조물은 멀티모드의 특성으로 인해 두께가 두껍고 약간의 회색 빛을 띠었다. 싱글모드의 경우 약 47°의 경사각을 가진 지그재그 모양의 조형물이 완성되었는데 멀티모드의 조형물보다 가늘고 세밀하였으며 색깔은 검은 색을 나타내었다.

다음으로 이송테이블을 원모양으로 이송시키며 지름 5 mm의 나선형 조형물을 제작하여 보았다. 본 연구에서 사용된 이송테이블은 XY 테이블로써 회전(rotation)이 되지 않는다. 따라서, 나선형 조형물을 만들기 위해 지름 5 mm의 원을 320개의 호(arc)로 분할하였고 각각의 호는 Fig. 8에서와 같이 직선으로 근사시켜 레이저 빔을 이송시켰다.

또한, 이송테이블은 두 개의 서보모터로 각각의 축을 이송시키지만 동시에 두 모터를 제어할 수 있는 형식이 아니어서 한 축씩 번갈아 가며 이송시켰다. 이송속도는 싱글모드와 멀티모드일 때 각각 20 $\mu\text{m/s}$ 와 25 $\mu\text{m/s}$ 를 사용하였다.

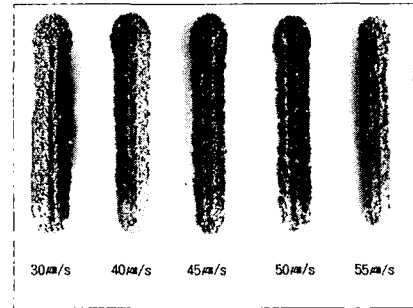
Fig. 9는 두 가지 레이저 모드에 따른 나선형 증착물의 모습을 보여주고 있다. 멀티모드의 경우 피치(pitch)가 25 mm이고 두께가 2 mm인 나선형의 조형물이 생성되었고, 싱글모드의 경우 피치가 16 mm이고 두께 1 mm의 나선형 조형물을 얻을 수 있었다. 나선형 구조물 역시 싱글모드를 사용하였을 때가 좀더 세밀한 화학증착 조형물이 얻어졌다.

3.4 SiC 라인(line) 형성 및 벽(wall) 적층

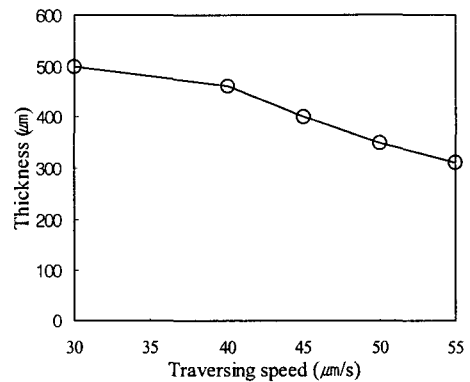
레이저의 이송속도를 더욱 높이면 더 이상 로드가 자라지 않고 모체 표면에 SiC 라인이 형성된다. 본 연구에서는 이송속도에 따른 SiC 라인이 증착되는 특성을 알아보기 위하여 이송속도를 30~55 $\mu\text{m/s}$ 까지 5 $\mu\text{m/s}$ 단위로 변화시켰다. 이 때, 충전압력은 50 torr이고 레이저는 싱글모드 8 W를 사용하였다.

Fig. 10에 이송속도에 따른 증착된 SiC 라인과 라인의 두께를 나타내었다. 이송속도가 높을수록 증착되는 두께와 폭은 줄어들었으며 55 $\mu\text{m/s}$ 의 이송속도에서 두께와 폭이 각각 300 μm 와 850 μm 정도의 비교적 얇은 라인이 형성되었다.

한편, 이러한 라인의 적층을 통한 패속조형의 가능성을 알아보기 위하여 Fig. 11에서와 같이 모



(a) Images of SiC deposits



(b) Thickness vs traversing speed

Fig. 10 Variations of thickness of SiC deposits with various traversing speed

체 표면을 레이저로 여러 번 이송하여 적층시킨 벽(wall)을 조형하여 보았다. 먼저, 증착이 비교적 두꺼운 15 W의 멀티모드를 사용하여 이송속도는 55 $\mu\text{m/s}$ 를 선택하였고 적층할 벽의 폭은 1 cm로 정하였다. 이 때 1회 충전으로 증착시간이 15분을 넘지 않도록 2회 왕복마다 TMS를 재충전 시켜주었다.

Fig. 11(a)에 레이어를 20회 적층한 결과를 나타내었는데, 두께 약 1.5 mm, 높이 약 6 mm의 SiC 벽이 만들어 졌다. 적층된 벽의 높이는 4 mm 이상부터 매우 불균일하며 중간이 함몰된 형상을 보여준다. 이는 레이저 출력의 불균일성, 분말 모체 표면의 요철, 레이저 스캔속도의 불균일성 등 여러 가지 원인에 의하여 야기될 수 있는데 증착 초기의 불규칙한 작은 증착 높이 변화가 시간이 갈수록 증폭되는 것을 알 수 있었다. 특히, 멀티모드의 경우 높은 출력으로 인하여 증착 부위에

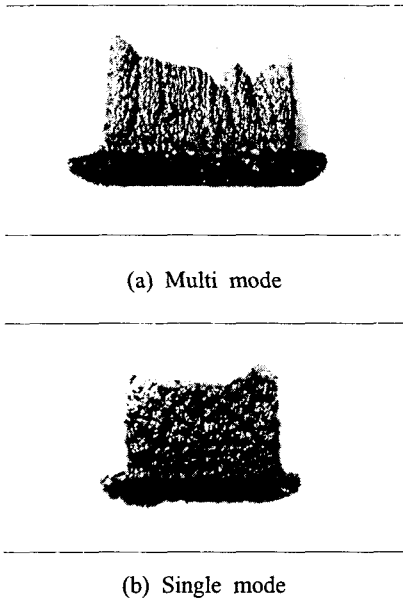


Fig. 11 Fabrication of a SiC wall by stacking layers

서 다량의 부산물이 생성되는데, 반응이 시작한 후 40분이 지나자 팬을 가동시켜도 윈도우의 대부분을 오염시켜 레이저의 조사를 방해하였다.

한편, 싱글모드의 경우 벽의 폭을 5 mm로 하고 8 W의 출력으로 10회 적층하여 두께 1 mm와 높이 4 mm인 벽을 조형하였다. 벽의 높이는 멀티모드인 경우에 비해 비교적 균일하였고 표면 거칠기에서도 육안상 좀더 나은 결과를 보여 주었다. 하지만 적층법을 이용한 임의의 3차원 SiC 물체를 조형하기 위해서는 적층 균일도를 더욱 향상시킬 필요가 있는데 이는 앞서 언급한 인자들의 정밀 제어를 통해 달성될 수 있을 것으로 기대된다.

3.5 사각형 단면을 가진 관의 적층

본 연구에서는 한 변의 길이가 5 mm인 정사각형 단면을 가진 관을 조형하였는데 50 torr 및 8 W의 싱글모드를 사용하였다. Fig. 12은 두 개의 레이저를 적층한 결과를 보여 주는데, 네 개의 꼭지점에서 돌출물이 형성되고 있음이 발견되었다. 이는 레이저가 꼭지점에서 체류시간이 길어 발생한 것으로 이후의 정상적인 적층을 방해하였다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 레이저가 꼭지점에 도달하면 레이저를 끄고 선풍

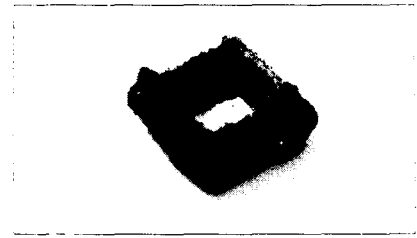


Fig. 12 SiC square duct fabricated by stacking 2 layers



Fig. 13 SiC square duct fabricated by stacking 20 layers

두께의 $\frac{1}{2}$ 만큼 레이저를 이동시킨 후 다시 증착하는 방법을 채택하였다. Fig. 13는 레이저를 20회 적층하여 성공적으로 생성한 사각형 모양의 관을 보여준다. 향후, 적층 균일도가 향상된다면 더욱 정밀한 모양의 SiC 관을 제조할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 레이저 화학증착을 이용하여 3차원 SiC 물체의 폐속조형에 대한 연구를 수행하였다. 3차원 조형물을 얻어내기 위한 공정의 주요 변수 중에서 반응시간에 따른 증착률 변화, 이송속도에 따른 증착 특성, 레이저 빔 모드의 영향 등을 알아보았고 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 50 torr로 1회 충전된 챔버에서 약 15분동안 35 $\mu\text{m/s}$ 이상의 높은 증착률을 얻을 수 있다.

(2) 로드는 수직선을 기준으로 하여 최대 50°까지 경사지게 성장시킬 수 있었고 이를 응용하여 지그재그 모양 및 나선형 로드를 성공적으로 조형하였다. 레이저빔의 경우 멀티모드보다는 싱글모드일 때 증착물이 더욱 세밀하게 생성되었다.

(3) 레이저를 30 $\mu\text{m/s}$ 이상의 속도로 모체 위로 이송시키면 로드는 더 이상 자라지 않고 라인이

생성되는데, 이송속도가 증가할수록 라인의 두께와 폭은 줄어들어 55 $\mu\text{m/s}$ 에서는 두께가 약 300 μm , 폭이 약 850 μm 가 된다.

(4) 10회의 적층을 통하여 벽을 조형하였고 20회의 적층을 통해 성공적으로 정사각형 관을 제작하였다.

향후 증착온도 제어, 레이저 이송속도 조절, 최적의 모체 선택을 통해 증착 라인의 분해능(resolution)을 높이고 좀 더 균일한 적층을 실현한다면 레이저 화학증착 기술은 세라믹으로 직접 패속조형을 가능하게 해주는 매우 효과적인 방법이 될 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01069-0)로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Zong, G-S, 1991, "Solid Freeform Fabrication Using Gas Phase Selective Area Laser Deposition," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- (2) Birmingham, R. B., 1995, "Laser Based Solid Freeform Fabrication of Ceramic and Metal/Ceramic Shapes," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- (3) Harrison, S. and Marcus, H. L., 1999, "Gas-phase Selective Area Laser Deposition (SALD) Joining of SiC," *Materials & Design*, Vol. 20, pp. 147~152.
- (4) Thissell, W. R., 1994, "Processing and Control of Selective Area Laser Deposition from Methane and Hydrogen," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- (5) Jakubenas, K. J., Sanchez, J. M. and Marcus, H. L., 1998, "Multiple Material Solid Free-Form Fabrication by Selective Area Laser Deposition," *Materials & Design*, Vol. 19, pp. 11~18.
- (6) Maxwell, J. L., Pegna, J., Messia, D. and DeAngelis, D., 1996, "Direct Feedback Control of Gas-Phase Laser-Induced Deposition," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas at Austin, pp. 227~237.
- (7) Lee, Y. L., 2002, "Study of Laser Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide from Tetramethylsilane," *Trans. of the KSME*, Series B, Vol. 26, No. 9, pp. 1226~1233.
- (8) Lee, Y. L. and Ryu, J. E., 2004, "Experimental Study of the Growth of the SiC Rod Using Nd-Yag Laser Chemical Vapor Deposition," *Trans. of the KSME*, Series A, Vol. 28, No. 4, pp.481~488.
- (9) Figueras, A., Garelik, S., Santiso, J., Rodriguez-Clemente, R., Armas, B., Combescure, C., Berjoan, R., Saurel, J. M. and Caplain, R., 1992, "Growth and Properties of CVD-SiC Layers Using Tetramethylsilane," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. B, No. B11, pp. 83~87.