

# 레이저 클래딩을 이용한 Ti-6Al-4V 의 Zirconia 세라믹 분말 코팅

## Zirconia Ceramic Powder Coating of Ti-6Al-4V by Laser Cladding

강경호<sup>1</sup>, 김재도<sup>2,✉</sup>

Kyung Ho Kang<sup>1</sup> and Jae Do Kim<sup>2,✉</sup>

1 인하대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha Univ.)

2 인하대학교 기계공학부 (Division of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

✉ Corresponding author: kimjaedo@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7316

Manuscript received: 2011.1.4 / Revised: 2011.3.28,4.14 / Accepted: 2011.4.17

*The recent development of bio-ceramic material is being studied in various bio-material engineering field. There are lots of technical difficulties because manufacturing or bonding technique are required bio-friendliness, cleanliness and persistence. Zirconia ceramic powder is cladded on Ti-6Al-4V metallurgically by laser cladding processing. Laser cladding system with powder feeding delivery is designed and manufactured for optimum processing condition. Increasing of manufacturing speed and good quality of clad layer are achieved by application of preheating of substrate before laser cladding. The thin dilution and good clad layer on the substrate are obtained for applications of bio-materials such as the dental materials and the articulated joints of human body.*

Key Words: Laser Cladding (레이저 클래딩), Ti-alloy (티타늄합금), Zirconia Ceramic (지르코니아 세라믹)

### 1. 서론

생체 재료는 과학 기술의 발달로 인간의 수명이 연장되면서 노쇠해가는 인체의 일부분이나 질병 또는 사고 등으로 잃어버린 기능을 치환 혹은 보충하기 위해서 생체에 직접 이용되는 인공 재료를 말한다. 인공뼈나 치과재료 등의 경조직 대체용 기능재료와 인공혈관, 인공기관 등의 연조직 대체 재료가 있으며 금속, 고분자, 세라믹 재료와 금속-고분자, 금속-세라믹 등의 복합 재료도 많이 사용되거나 연구되고 있다.<sup>1,2</sup>

생체 분야에 있어서 다양한 재료 개발에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으나 복합 재료를 제조하거나 특정 형상을 만드는 가공 기술은 높은 지속성과 청정성이 요구되기 때문에 기존의 가공 방법이나 접합 방법으로는 적용하기 어려운 점이 있

다.

레이저 클래딩 기술은 금속이나 세라믹 등의 재료의 적층 기술로써 레이저를 이용하는데 필요한 부분에 국부적으로 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 생체 부품에 대한 레이저 클래딩 기술의 적용을 위하여 특별한 조건이나 형상의 제약이 없으며, 생체 적용에 유리한 다공성의 표면을 생성할 수 있고 재료의 변형을 최소화할 수 있는 장점을 갖고 있다.<sup>3-5</sup>

본 논문에서는 레이저 클래딩 기술을 이용하여 생체 재료로 사용되는 Ti-6Al-4V 합금에 지르코니아 세라믹 분말을 이중 적층하는 방법 및 다공성 층의 생성 방법에 대하여 실험적으로 연구하고 분석하였다. 지르코니아 세라믹은 인체 뼈와 결합력을 향상시킬 수 있고 내마모성이 좋은 특성을 갖고 있다. 레이저 클래딩을 위하여 레이저 빔의 출

력 및 모재의 이송 속도 등에 대한 가공 변수에 대한 실험과 모재의 예열을 통한 클래딩층의 변화 및 세라믹 분말 입도의 영향을 분석하였다.

## 2. 레이저 클래딩 가공 실험

### 2.1 레이저 클래딩

레이저 클래딩은 표면 합금화와 달리 모재와 다른 성질을 가진 재료를 기저 금속 표면에 용융시켜 적층시키는 것이다. 레이저 클래딩은 성질이 다른 특성을 갖는 복합 재료의 생산과 손상된 부분에 대한 보수에 사용되고 있다.

본 연구에서는 의료용 생체 재료로 사용되는 티타늄합금에 지르코니아 세라믹을 적층하기 위하여 레이저 클래딩을 적용하였다. 인공 관절용 생체부품 등에 사용하는 티타늄 합금에 높은 내마모성 특성과 파괴인성이 우수한 지르코니아 세라믹을 레이저 클래딩 방법으로 적층하는 방법을 수행한 것이다.

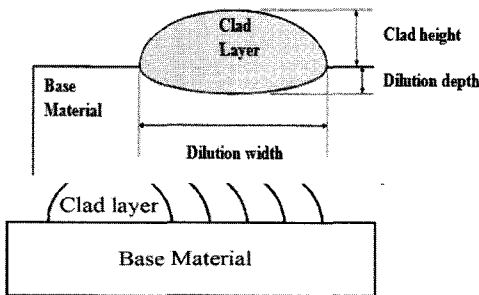


Fig. 1 Laser cladding layer

레이저 클래딩은 Fig. 1 과 같이 모재에 레이저를 이용하여 일정 두께의 클래딩 층을 생성하는 것으로써 모재와 클래딩 재료간의 희석층(dilution)에서 두 재료가 혼합되어 결합이 이루어지며 모재와 클래딩 재료는 원상태 그대로 유지되어 서로 다른 물리적 특성을 유지하는 것이 특징이다. 한 트랙의 직선가공 후에 연속적으로 트랙을 오버랩시키면서 클래딩 면을 생성하는 가공이 이루어지게 된다.<sup>7,8</sup>

### 2.2 실험 장치 및 재료

Fig. 2 와 같이 레이저 클래딩 시스템을 구성하

였다. 실험 장치는 최대출력 4kW 이고 TEM<sub>00</sub> 모드의 CW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였고 포커스된 빔 크기는 3.2mm 이며 노즐에서 초점 거리는 약 5mm 이다. 레이저 집속 광학장치와 모재를 이송시키기 위한 이송 테이블과 지르코니아 분말을 공급하기 위한 분말 공급 장치, 모재의 예열을 위한 가열부 및 제어장치 등으로 구성되어 있다. 분말 공급 장치는 30-60g/min 의 공급량을 유지할 수 있으며, 모재의 예열은 최대 800℃로 설정할 수 있고 온도는 조절 가능하다. 모재의 최대 이송(x-y 축)은 450×450 mm 이며, 높이 방향(z)의 이송도 가능하다.

본 연구에서 사용한 레이저 실험 재료로 모재는 Ti-6Al-4V 합금이며 클래딩층의 재료는 Zirconia (ZrO<sub>2</sub>) 세라믹 분말이다. Table 1 에는 실험에 사용한 재료의 물성치를 나타내었다. 가공 실험을 위하여 100×100×5mm 크기의 Ti-6Al-4V 을 준비하였고, 지르코니아 분말의 평균 직경은 0.3, 0.8, 1.5 μm 를 사용하였다.

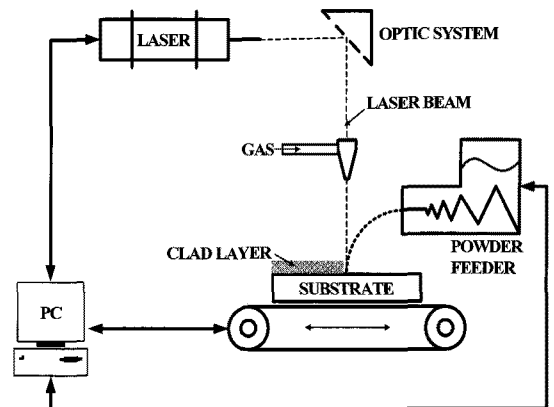


Fig. 2 Diagram of laser cladding system

Table 1 Mechanical properties of laser cladding materials

	Ti-6Al-4V	ZrO <sub>2</sub> +3mol%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Elastic modulus (GPa)	110	201
Strength (GPa)	970	2000
Hardness (Hv)	1250	1200
Melting point(°C)	1660	2700

### 2.3 레이저 클래딩 가공 실험

#### 2.3.1 레이저 출력 및 모재 이송속도

레이저 클래딩 가공에 있어서 기본적인 입열량을 결정하는 조건인 레이저 빔의 출력(power)과 모

재의 이송속도(feed rate)를 결정하기 위한 실험으로 Table 2 와 같은 조건별 실험을 하였다. 조건별 실험 결과로 가공 표면의 결합력 비교를 통해 레이저 출력과 이송속도의 기초적인 가공 조건을 얻을 수 있었다. 두께 2-3mm 의 클래딩 층을 얻기 위한 레이저 출력과 이송속도, 분말공급량의 조건을 변화시켜 클래딩 층 생성 유무, 클래딩 층의 두께 및 폭 등을 측정하였고, 클래딩 층 절단면의 현미경 사진을 통하여 내부 균열 및 기공의 여부, 정도 측정을 하였다.

Table 2 Experimental conditions of laser power, feed rate and powder feeding rate

	condition	unit
Laser power	0.6, 1.2, 1.6	kW
feed rate	4, 8, 12	mm/s
powder feeding	35	g/min
Preheating temperature	100, 300, 500, 700	℃

### 2.3.2 모재 예열 실험

모재부의 예열로 클래딩 가공시 모재의 온도를 높이면 레이저에 의해 가열되어야 하는 입열을 줄일 수 있기 때문에 레이저 출력량을 낮게 할 수 있으며 가공속도를 상대적으로 높일 수 있다. 가공물 표면에서의 잔류응력 또한 감소시킬 수 있고 클래딩 층의 균열 감소 효과를 얻을 수 있다. 클래딩 공정의 특성상 이종재료인 두 재료 사이의 열전도도와 용융 온도의 차이가 존재하고, 모재의 상부에서 공급되는 분말에 의해 레이저빔이 가려지는 효과 때문에 레이저 에너지의 손실이 생긴다. 따라서 두 재료 모두 충분히 용융될 수 있고 과도한 입열이 발생하지 않도록 모재 하부에서의 예열을 통해 두 재료의 온도 차이를 줄여 줄 수 있고 가공속도의 증가도 기대할 수 있다.

모재의 바닥면의 열선 가열방식에 의한 가열로 모재의 온도를 각각 100, 300, 500, 700℃로 설정하였다. 이때 모재 표면에서 레이저 빔 조사시 최초 용융되는 시간을 측정하였고 현미경 관찰을 통해 금속 조직에 대한 열영향 및 균열과 기공을 관찰하였다.

### 2.3.3 분말 입도

분말공급장치에서 세라믹 분말 공급이 이루어지면 분말은 레이저 빔과 모재의 상부에서 떨어져

면서 가열 및 용융되고 낙하 후 모재 표면과 결합하고 냉각되면서 결합이 이루어진다. 이때 분말의 크기가 레이저 빔의 입열량에 비해 작으면 모재에 도착하기 전에 기화하거나 열적 변형을 일으키게 되어 좋지 않은 결과를 얻게 되고, 반대로 크게 되면 충분한 용융이 이루어지지 못하고 분말 입자간 결합력이 약해질 수 있다.

실험에 사용한 지르코니아 분말의 크기는 각각 평균입도 0.3, 0.8, 1.5 μm 이다. 분말공급장치를 통해 일정한 분말공급량 35g/min 으로 분말을 공급하고 레이저 클래딩 가공 실험을 하였다. 입도에 따른 영향을 분석하기 위해 클래딩 표면에서의 표면 기공 상태 및 결합 상태를 관찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 클래딩 실험

레이저 출력과 이송속도를 조절하여 이종 재료간 상호 결합이 이루어지고 일정한 클래딩 두께를 얻기 위한 실험 조건과 결과를 Table 3 에 나타내었다. 낮은 에너지 조건에서는 레이저 클래딩 가공이 이루어지지 않았다. 클래딩 층의 높이는 입력 에너지의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이송 속도의 감소는 레이저 입력 에너지를 증가시키고 용융된 분말이 위에 계속 적층되며 급냉이 이루어져 폭 방향보다는 높이 방향으로 적층이 증가되는 것으로 판단된다. 또한 입력 에너지가 증가하더라도 클래딩 폭의 증가는 제한적으로 증가하고 있다.

Table 3 Clad width and height according to energy input

Energy input (kW·s/mm)	Clad Width (mm)	Clad Height (mm)
0.1	2.0	0.9
0.15	2.5	2.3
0.2	3.0	2.2
0.3	2.8	3.4
0.4	3.1	3.8

(Powder feeding =35g/min)

Table 3 의 다섯번째 조건으로 클래딩한 경우는 Fig. 3 과 같은 불규칙한 표면 형상으로 레이저 클래딩 가공이 이루어졌다. Fig. 4 는 내부 단면 사진으로 모재층과 클래딩층에 균열 및 기공이 다수 존재함을 관찰할 수 있다. 과도한 입열량 때문에

모재층의 과도한 용융과 냉각에 의해 용융 풀에서 가스가 배출되지 못하여 생성된 기공과 급냉으로 인하여 클래딩 층의 미세 균열이 생성되어 조직의 건전성을 악화시키고 있음을 알 수 있다. 따라서 클래딩 가공에 있어서 높은 에너지의 입열은 가공 속도를 증가시키지만 클래딩 층의 품질을 저하시키는 원인이 될 수 있음을 알 수 있다.

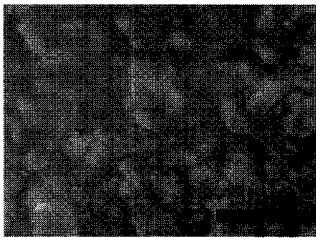


Fig. 3 Cladding surface in laser power 1.6kW, feed rate 4mm/s (energy input 0.4 kW.s/mm) and powder feeding 35g/min

3.2 모재 예열

레이저 출력을 0.6, 1.2 kW 로 하고 모재의 예열을 각각 상온, 100, 300, 500, 700℃로 설정하여 모재가 용융될 때까지의 시간을 측정하였다.

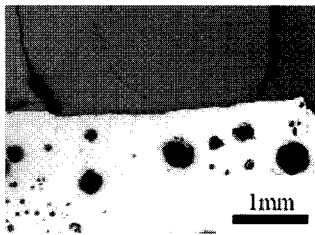


Fig. 4 Pores and crack of clad layer in laser power 1.6kW, feed rate 4mm/s (energy input 0.4kW.s/mm) and powder feeding 35g/min

Fig. 5 에서와 같이 1.2kW 출력에서 예열이 없는 경우 약 2.3 초의 용융 시간이 필요하였으나 500℃ 예열의 경우 약 0.5 초로 감소하였다. 모재에 예열을 하게 되면 모재가 용융되는데 필요한 시간은 감소됨을 알 수 있다. 상대적으로 모재의 이송속도를 높일 수 있기 때문에 생산 속도의 향상도 기대할 수 있다.

예열 온도에 따른 생성된 클래딩 층의 회석층(dilution) 깊이를 Fig. 6 에 나타내었다. 예열온도가 증가할수록 모재와 클래딩 재료의 혼합이 이루어

지는 회석층의 두께가 증가하고 있으며 두 이종 재료간의 상호 결합력 증가를 의미한다. 500℃에서 회석층의 두께는 약 1.2mm 였다. 과도한 열영향을 받았을 경우 클래딩의 높이에 비해 회석층의 크기가 커질 수 있고 이 비율이 낮은 경우 상호 결합이 약하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

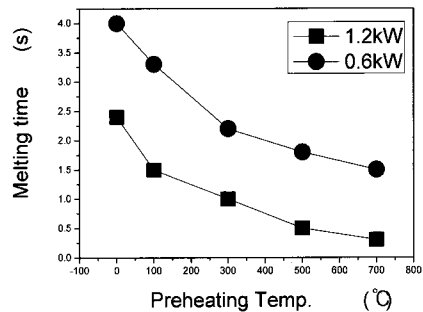


Fig. 5 Melting time according to preheating temperature

Fig. 7 은 경도를 측정된 결과이다. 클래딩층과 모재층의 계면에서 경도 차이가 존재함을 알 수 있다. 클래딩 재료인 지르코니아 분말과 모재인 Ti-6Al-4V 합금의 경도는 각각 1400-1500 HV<sub>0.1</sub>, 350-450 HV<sub>0.1</sub> 로서 원래 경도값과 비슷한 값을 가진지며, 다일루션을 제외하면 클래딩층과 모재층의 혼합이나 열영향이 거의 없음을 알 수 있다. 다일루션 영역인 깊이 300-700 μm 부분에서는 두 이종재료의 경계부분으로 급격한 경도 변화를 볼 수 있다. 경도값이 깊이 300-500 μm 부근에서는 증가하였다가 깊이 500 μm 이후 급격히 모재의 경도값까지 떨어지고 있음을 볼 수 있다. 즉 경도값이 상승한 부분은 클래딩 가공시의 열영향부(HAZ)임을 알 수 있다.

Fig. 8 은 예열처리한 후 레이저 클래딩한 단면 사진이다. Fig. 8(a)는 예열온도 300℃인 경우의 사진으로 예열이 없는 경우보다 미소 균열과 기공이 감소되었음을 알 수 있다. 예열온도 500℃에서는 Fig. 8(b)와 같이 기공은 발생하지 않았고 클래딩 층에 작은 미소 균열이 일부 존재하고 있다.

미소 균열은 주로 클래딩 가공의 트랙과 트랙 사이의 경계 부분에서 발생하며 한 트랙의 내부에서는 균열이 발생되지 않았다. 예열을 통하여 모재의 빠른 용융을 유도할 수 있으며 동시에 가공 후 모재의 급냉을 방지하여 내부 균열의 발생을 억제할 수 있었다.

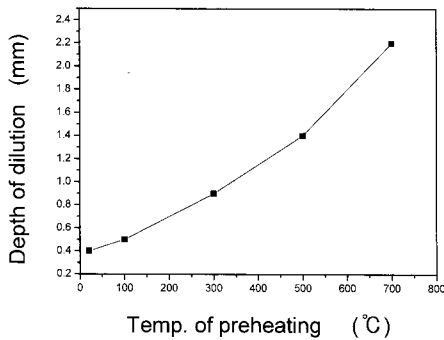


Fig. 6 Dilution depth according to preheating temperature in laser power 1.2kW and feed rate 8mm/s (energy input 0.15 kW.s/mm)

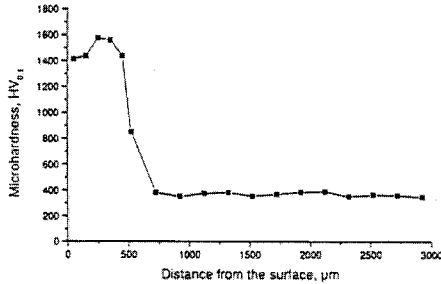


Fig. 7 Microhardness profile of laser-clad in laser power 1.2kW and feed rate 8mm/s (energy input 0.15 kW.s/mm)

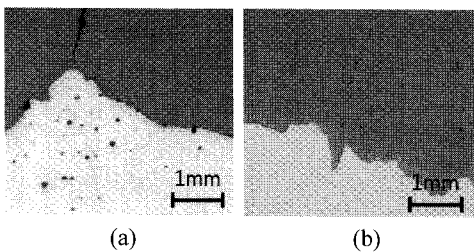


Fig. 8 Clad boundaries in laser power 1.2kW, feed rate 4mm/s (energy input 0.3 kW.s/mm), powder feeding 35g/min and preheating temperature of (a) 300°C, (b) 500°C

### 3.3 분말 입도

지르코니아 분말의 입도를 0.3, 0.8, 1.5 μm 의 세가지 종류를 각각 사용하여 레이저 클래딩 실험을 하였다. 레이저 출력과 이송속도는 각각 1.2kW, 8mm/s 으로 하고, 분말공급량은 35g/min 이었고, 500°C의 예열상태에서 실시하였다. Table 4 에 입도 별 클래딩 표면과 클래딩층의 단면을 나타내었다.

0.3μm 의 분말의 경우에 클래딩층 표면에서는 다공성 형상이 나타나지 않고 내부에 몇몇 다공성 형태가 관찰되었다. 0.8 과 1.5μm 크기의 분말에서는 0.3μm 과 비교하여 표면에서의 다공형상이 관찰되었으며 내부에서도 뚜렷한 다공성 형상이 생성됨을 알 수 있었다.

표면에서 입도가 큰 분말의 경우 레이저 빔에 의해 충분한 용융이 이루어지지 못하고 분말의 일부 표면에서만 용융이 이루어지면서 분말 상호간 부분적인 접합이 일어나 사진에서 관찰할 수 있듯이 그물형 구조가 생성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 구조가 적층되면서 클래딩 층 내부에서도 불규칙적인 다공성 구조가 생성되게 된다. 입도가 커지면서 빈 공간의 수와 크기도 함께 증가되는 것도 관찰할 수 있다. 따라서 분말의 입도 및 분말 공급량과 조사되는 레이저 빔의 출력을 제어하여 세라믹 분말 표면의 용융량을 조절할 수 있으며, 이것은 클래딩층 표면 및 내부에 생성되는 다공성 형상의 정도를 조절할 수 있음을 의미한다.<sup>9,10</sup>

Table 4 Surface of clad layer according to powder size

Size (μm)	Top	Cross-section
0.3		
0.8		
1.5		

### 4. 결론

본 연구에서는 생체 재료로 사용되는 Ti-6Al-4V 합금에 지르코니아 세라믹 분말을 레이저로 클

래딩하여 국부적으로 기계적·금속학적 성능 개선을 이룰 수 있는 방법을 연구하였다. 레이저 출력 1.2kW, 이송속도 8mm/s (energy input 0.15kW.s/sec), 분말 공급 35g/min 조건에서 안정적인 레이저 클래딩 층을 얻을 수 있었으며, 500°C 이상의 모재의 예열을 통하여 균열과 기공이 없는 클래딩 층이 생성될 수 있음을 확인하였다. 또한 세라믹 분말의 입도에 따라 생성되는 클래딩 층에 생성되는 다공성 표면의 정도를 조절할 수 있었고 이러한 다공성 표면은 생체 부품과 인체 세포간의 친화력과 접합력을 증가시키는 중요한 부분으로 사용될 수 있다. 레이저 클래딩 기술은 레이저 빔에 의한 비접촉 가공으로 청정성을 유지시킬 수 있으며, 재료의 변형이 최소한으로 이루어지므로 생체 적용을 위한 코팅 기술로 적용할 수 있다. 향후 부품 지속성 및 수명을 저하시킬 수 있는 클래딩 층의 미소 균열 및 기공 생성 문제에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 본 연구를 기초하여 의료 기구 개발 및 개선에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 인하대학교 교내연구비에 의해서 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Hench, L. and Wilson, J., "An introduction to bioceramics," World Scientific Pub. Co. Inc., pp. 65-84, 1993.
2. Daculsi, G., Laboux, O., Malard, O. and Weiss, P., "Current state of the art of biphasic calcium phosphate bioceramics," J. of Materials Science : Materials in Medicine, Vol. 14, No. 3, pp. 195-200, 2003.
3. Jouvard, J., "Continuous wave Nd:YAG laser cladding modeling: A physical study of track creation during low power processing," J. of Laser Applications, Vol. 9, No. 1, pp. 43-50, 1997.
4. Xiaoyan, Z., Beidi, Z., Zengyi, T. and Kun, C., "Analysis of energy conditions for laser cladding ceramic-metal composite coatings," Surface and Coatings Technology, Vol. 79, No. 1-3, pp. 162-169, 1996.
5. Shengfeng, Z., Xiaoqin, D. and Haizhong, Z., "Analytical modeling and experimental investigation of laser induction hybrid rapid cladding for Ni-based WC composite coatings," Optics & Laser Technology, Vol. 43, No. 3, pp. 613-621, 2010.
6. Cui, C., Guo, Z., Liu, Y., Xie, Q., Wang, Z., Hu, J. and Yao, Y., "Characteristics of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding," Optics & Laser Technology, Vol. 39, No. 8, pp. 1544-1550, 2007.
7. Zhou, S., Dai, X. and Zeng, X., "Effects of processing parameters on structure of Ni-based WC composite coatings during laser induction hybrid rapid cladding," Applied Surface Science, Vol. 255, No. 20, pp. 8494-8500, 2009.
8. Kim, J. and Peng, Y., "Plunging method for Nd:YAG laser cladding with wire feeding," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 299-309, 2001.
9. Christian, S., Erhard, L., Renate, G., Jörg. K. and Georg, B., "Femtosecond laser induced fixation of calcium alkali phosphate ceramics on titanium alloy bone implant material," Acta Biomaterialia, Vol. 6, No. 8, pp. 3318-3324, 2010.
10. Koch, C. F., Johnsona, S., Kumarb, D., Jelinekc, M., Chriseyd, D. B., Doraiswamy, A., Jine, C., Narayane, R. J. and Mihailescuf, I. N., "Pulsed laser deposition of hydro-xyapatite thin films," Materials Science and Engineering : C, Vol. 27, No. 3, pp. 484-494, 2007.