

선택적 레이저 용융법으로 제조된 Ti6Al4V 시편의 열처리가 결정구조와 화학적 조성에 미치는 영향

송호준¹, 박영준¹, 문원진², 정완길², 조선신³, 강병모⁴, 윤택림^{3,5,*}

¹전남대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실 및 치과재료연구소

²한국기초과학지원연구원 광주센터

³인터메디, ⁴휴먼테크

⁵전남대학교 의과대학 정형외과학교실

The effect of heat treatment of the Ti6Al4V specimen fabricated by selective laser melting method on the crystalline structure and chemical compositions

Ho-Jun Song¹, Yeong-Joon Park¹, Won-Jin Moon², Wan-Gil Jung²,
Seon-Shin Cho³, Byeong-Mo Kang⁴, Taek-Rim Yoon^{3,5,*}

¹Department of Dental Materials and Dental Materials Research Institute, School of Dentistry, Chonnam National University, Gwangju, Korea

²Korea Basic Science Institute, Gwang-Ju Center, Gwangju, Korea

³Inter-Medi Co., Gwangju, Korea

⁴Human Tech Co., Industry Support Center for Convergence Medical Devices, Gwangju, Korea

⁵Department of Orthopedic Surgery, Medical School, Chonnam National University, Gwangju, Korea

In this study, the Ti6Al4V specimens were fabricated using selective laser melting (SLM) method (Ti6Al4V-AS group). These specimens were performed to heat treatment at 950°C and 550°C using vacuum electric furnace (Ti6Al4V-HT group). The mechanical properties, metallographic shape, crystalline structure, and chemical compositions of the alloy specimens before and after heat treatment were analyzed. The Ti6Al4V-AS group showed ultimate tensile strength (UTS) and low elongation values. Acicular crystal grains were observed in metallographic image and the α' -Ti phase was dominant. After heat treatment (Ti6Al4V-HT group), the UTS was lowered and the elongation was increased. In addition, a lamellar structure in which columnar crystal grains are arranged was observed, $\alpha + \beta$ -Ti phase was formed, and crystallinity increased. As a result of analyzing the chemical composition, the Ti6Al4V-AS specimen contained a higher carbon content than the Ti6Al4V-HT specimen. This high carbon content could be related to the formation of α' -phase, high strength and low elongation of the Ti6Al4V-AS specimen. Ti6Al4V-HT specimen showed that the overall carbon content was low, but the carbon content was locally high in the α' -Ti phase region. Therefore, it is necessary to control effectively the incorporation of carbon gas in the production of Ti6Al4V specimens using SLM.

Keywords : Selective laser melting, Ti6Al4V alloy, 3D printer, Crystalline structure, Chemical composition

Ho-Jun Song (ORCID: 0000-0002-0489-6364)

Yeong-Joon Park (ORCID: 0000-0003-0382-8535)

Won-Jin Moon (ORCID: 0009-0003-7708-381X)

Wan-Gil Jung (ORCID: 0000-0002-4983-6293)

Seon-Shin Cho (ORCID: 0009-0004-1849-6996)

Byeong-Mo Kang (ORCID: 0009-0008-2714-2689)

*Correspondence: Taek-Rim Yoon (ORCID: 0000-0001-8282-1723)

Affiliation: Department of Orthopedic Surgery, Medical School, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

Tel: [REDACTED]

E-mail: tryoon@jnu.ac.kr

Received: Jun, 07, 2023; Revised: Jun, 28, 2023; Accepted: Jun, 29, 2023

서 론

티타늄 및 티타늄계 합금은 뛰어난 생체적합성, 높은 부식 저항성, 우수한 기계적 특성으로 말미암아 정형외과와 치과용 임플란트로 널리 사용되고 있다(1). 티타늄계 합금 중 Ti6Al4V:ELI 합금은 CP-Ti과 유사한 생체적합성, 부식저항성을 가지면서도 CP-Ti에 비하여 높은 강도를 가지기 때문에, 강한 응력이 가해지는 보철물이나 임플란트, 교정재료, 수술용 도구 등으로 사용되고 있다(2-4).

Ti6Al4V 합금 제품은 단순한 형상의 경우 기계적 가공 작업에 의하여, 복잡한 형태의 보철물은 주조 방법을 이용하여 제조할 수 있다. 그러나 티타늄 금속은 고온에서 탄소, 산소, 질소와 같은 가스들과 매우 친화성이 높아서 표면에 두꺼운 산화물을 형성하기 때문에 주조 방법을 이용할 경우 특수한 주조 장비가 필요하고, 술자에 따른 기술 의존성이 매우 높은 단점을 가지고 있다(5, 6).

3D 프린팅 기술의 발전에 따라, 금속 분말을 이용하여 복잡한 형상을 갖는 보철물을 빠르고 정확하게 제조하는 기술들이 발전되어 왔다(7, 8). 선택적 레이저 용융(selective laser melting; SLM) 방법은 고에너지 레이저 빔을 사용하여 연속적인 쌓이는 금속 분말 층을 선택적으로 용융시켜 최종 형상의 제품을 제작하는 3D 프린팅 기술로 알려져 있다(9-11). 이 방법을 이용하면 컴퓨터 소프트웨어 기술을 바탕으로 3D 디지털 모델을 빠르고 유연하게 구현한 후 임플란트나 보철물들을 바로 출력할 수 있기 때문에 빠른 시간내에 환자 맞춤형 치료가 가능하다(12, 13).

그러나 고출력 레이저를 이용하여 금속 분말을 순간적으로 용융시킨 후에 빠르게 냉각시키기 때문에 높은 잔류 응력과 기공 발생이나 부분적으로 불완전한 용융 영역들이 존재할 가능성이 있다. 이러한 결함의 발생에 따라 제조 후 높은 인장강도를 보여주지만, 낮은 연신율과 낮은 피로강도를 갖는 문제가 발생한다(14, 15). 따라서 1차 SLM 처리 후 열처리, 열간 정수압 성형(hot isostatic pressing; HIP) 처리, 표면 마무리 등 후처리를 통하여 기계적 결함의 단점을 극복하고자 하는 연구들이 이루어져 왔다(16-18). 특히 SLM 방법으로 제조된 티타늄 합금을 열처리하는 합금의 잔류 응력을 해소시키고, 결정립들을 성장시키며, β -상의 형성, 연신율 증가 등 미세 구조와 기계적 특성의 변화를 가져오는

것으로 보고되어 왔다(19).

지금까지 SLM 방법으로 제조된 시편에 대한 열처리 효과에 대하여 기계적 특성과 결정성 변화에 대하여 많은 연구들이 보고되어 왔지만, 각 결정립들에서의 화학적 조성의 변화 특히 가스(C, O, N) 함량의 변화에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 SLM 방법으로 제조된 시편과 열처리 후 시편들의 기계적 특성, 미세 결정 조직과 결정 구조 및 화학적 조성의 차이를 분석하여, 열처리에 따른 합금의 결정구조의 변화와 화학적 조성 분포의 특성에 대하여 연구하였다.

재료 및 방법

1. SLM 방법을 이용한 Ti6Al4V 합금 시편 제조

SLM 장비(3D SYSTEMS, DMP Flex 350, Rock Hill, SC, USA)를 이용한 시편 제조는 직경이 15-50 μm 범위인 구형의 Ti6Al4V 분말(하나에이엠티(주), Korea)을 원료로 사용하였다. Ti 기관상에 분말을 반복적으로 적층하고 시편의 3D 모델 데이터에 따라 선택적으로 융합하는 방식으로 시편이 제조되었다. 시편의 산화를 방지하기 위하여 보호가스로서 아르곤 가스가 사용되었다. SLM 공정은 레이저 출력 125 W, 스캔 속도 1000 mm/s, 층 두께 30 μm 로 진행하였다.

시편은 Figure 1에 나타난 바와 같이 ASTM E 8M 표준에 따라 총 길이 60 mm, 게이지 길이 30 mm 및 게이지 직경 6.1 mm인 원통형 인장강도 측정 시편으로 제조하여 Ti6Al4V-AS군으로 명명하였다.

2. 제조된 합금의 열처리

Ti6Al4V-As 시편의 열처리를 위하여 진공열처리로(STI Co., SFTS-80, Daegu, Korea)에 시편들을 위치한 후에 2×10^{-5} torr의 압력으로 진공을 유지하였다. 열처리 온도구배는 상온에서 4시간 동안에 950 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승시킨 후에 950 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4시간 동안 유지하여 열처리를 수행하고, 다시 3시간 동안에 550 $^{\circ}\text{C}$ 까지 하강시킨 후 6시간 동안 시효처리를 수행하였으며, 그 후 상온까지 노냉하였다. 이와 같이 열처리한 시편을 Ti6Al4V-HT군으로 명명하였다.

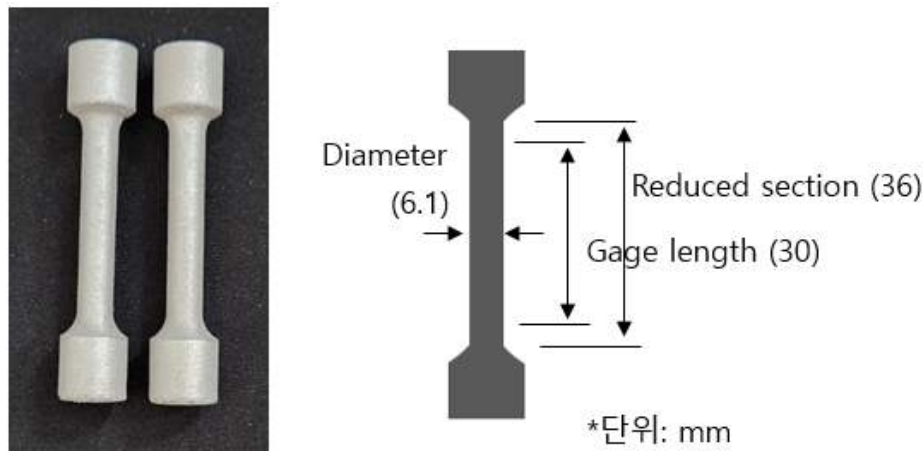


Figure 1. Images of Ti6Al4V-AS specimens fabricated by SLM method, and design of specimen.

3. 제조된 합금의 기계적 특성 분석

Ti6Al4V-AS와 Ti6Al4V-HT 시편들의 기계적 특성은 만능 물성시험기(Shimadzu, AG-50kNXPlus, Kyoto, Japan) 이용하여 수행하였다. 각 군당 2개의 시편을 인장강도 측정을 위한 지그에 장착한 후에 10 mm/min의 속력으로 인장력을 가하였다. 이와 같은 시험을 통하여 변위와 하중 값을 얻은 다음 응력-변형률(stress-strain) 곡선으로 환산하여 최대 인장강도 (ultimate tensile stress; UTS) 값을 계산하였다. 또한 파절 후 시편의 길이를 측정하여 연신율을 계산하였다.

4. 제조된 시편의 결정구조 및 화학적 조성 특성 분석

시편의 결정구조, 금속 조직, 및 화학적 조성의 변화를 관찰하기 위하여 다음과 같은 방법으로 시편의 전처리를 수행하였다.

열처리 전후의 시편들을 두께 1.5 mm의 두께로 절단하고, SiC 연마지를 이용하여 #300부터 #1200까지 주수하에 순차적으로 연마하였다. 이 시편들을 다시 0.5 μm 크기의 Al_2O_3 분말 슬러지를 이용하여 경면 연마한 후, 에탄올과 증류수로 초음파 세척을 하였다. 합금의 표면 금속 조직을 관찰하기 위하여 연마를 마친 후에 Kroll 용액을 이용하여 각 시편들을 20초 동안 에칭처리 하였다.

X-선 회절분석기(X-ray diffractometer; XRD; PANalytical, X'Pert PRO, Amsterdam, Netherlands)를 이용하여 각 시편

들의 결정구조를 분석하였다. 사용된 X-선은 Cu-K α 선(30 mA, 40 kV)을 사용하였으며, 10-90° 범위에서 0.067°/s의 속도로 측정하였다.

시편의 광학적 표면 조직 형상은 금속현미경(Zeiss, Axio Vert A1, Oberkochen, German)을 이용하여 관찰하였다.

전계방사형 주사전자현미경(field emission-scanning electron microscopy; FE-SEM, Hitachi, S-4700, Tokyo, Japan)을 이용하여 시편들의 표면 미세형상을 관찰하고, 부대장비인 에너지분산형 X-선 분광기(energy dispersion X-ray soectroscopy; EDS)를 이용하여 화학적 조성을 분석하였다.

또한 X-선 광전자 분광기(x-ray photoelectron spectroscopy; XPS; K-Alpha, Thermo Scientific, Massachusetts, USA)를 이용하여 시편 표면의 Ti, Al, V, O, C, N 원소들의 화학적 조성 및 결합 상태를 분석하였다. 시편 분석은 아르곤 이온으로 10초 동안 표면을 에칭한 후에 수행되었다.

결과 및 고찰

1. 제조된 시편의 기계적 물성 분석

SLM법으로 제조된 Ti6Al4V-AS 군의 경우 두 개의 시편의 최대 인장강도 값은 각각 1221 MPa과 1213 MPa로 평균

1217 MPa의 값을 보여 주었으며, 소성적 변형 영역이 작았다 (Figure 2). 열처리를 수행한 Ti6Al4V 군의 경우 최대 인장강도 값은 두 시편 모두 923 MPa로 Ti6Al4V-AS 시편에 비하여 더 낮은 값을 나타내었다. 그러나 최대 인장강도에서 전형적인 소성변형 영역이 넓은 변형률에 걸쳐 나타났다. 인장강도 측정 후 연신율을 측정하여 본 결과 Ti6Al4V-AS군의 경우 9.7%과 11.3%로 평균 10.5%였으며, Ti6Al4V-HT 군의 경우 14.2%와 13.6%로 평균 13.9%의 값을 보여주었다. 따라서 열처리 후 시편의 연신율이 증가하였다. Ti6Al4V-AS 시편의 경우 Ti6Al4V-HT 시편에 비하여 심한 네킹(necking) 현상이 발생하며 파절되었다.

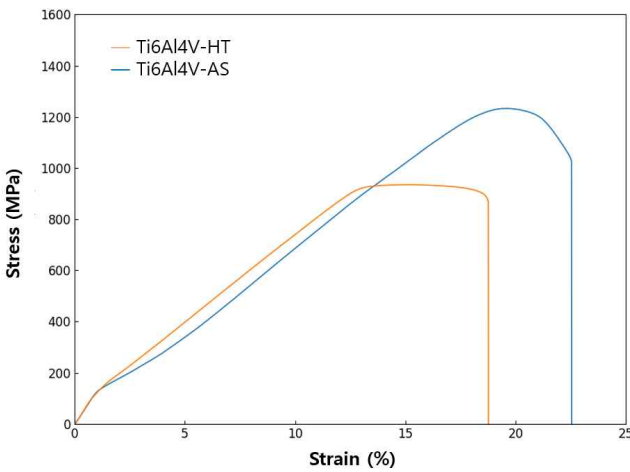


Figure 2. Strain-stress curves of Ti6Al4V-AS and Ti6Al4V-HT groups.

2. 광학현미경을 이용한 금속 조직 분석

Figure 3의 광학현미경 사진에서 Ti6Al4V-AS 시편의 경우 수십 마이크로미터 길이의 침상형 결정립들이 관찰되고 있다. 이러한 구조들은 구형의 Ti6Al4V 입자가 용융 후에 급속 냉각되는 비평형 조건에서 층상 구조를 형성하면서 나타날 수 있는 구조이다. 이렇게 형성되는 결정 조직들은 α -형 결정구조보다 침상형 α' -형의 마르텐사이트 구조를 갖는 것으로 알려져 있다(21). 열처리를 수행한 Ti6Al4V-HT 시편의 경우 주상(columnar) 형상의 결정립들이 배열되어 있는 층상 구조가 관찰되었다.

3. XRD를 이용한 결정구조 분석

Figure 4에 나타난 XRD 패턴을 살펴보면 Ti6Al4V-AS 시편의 경우 α' -Ti 상이 주로 관찰되고 있지만, 열처리를 수행한 Ti6Al4V-HT 시편에서는 β -Ti 상에 해당하는 패턴 ($2\theta = 40.0^\circ$)이 새롭게 관찰되었다. 전체적으로 XRD 패턴들의 피크의 폭(full-width half maximum; FWHM)을 비교하여 보면, Ti6Al4V-AS 시편의 FWHM 값이 Ti6Al4V-HT 시편의 값보다 더 넓었다. 대표적으로 (110) 결정면에 해당하는 피크의 FWHM 값은 Ti6Al4V-AS와 Ti6Al4V-HT 시편의 경우 각각 0.360과 0.148로 분석되었다. 이와 같이 XRD 패턴의 FWHM 값이 열처리후 매우 낮아져서 열처리에 의하여 결정립들의 조대화과 결정화가 진행되었다는 것을 알 수 있다.

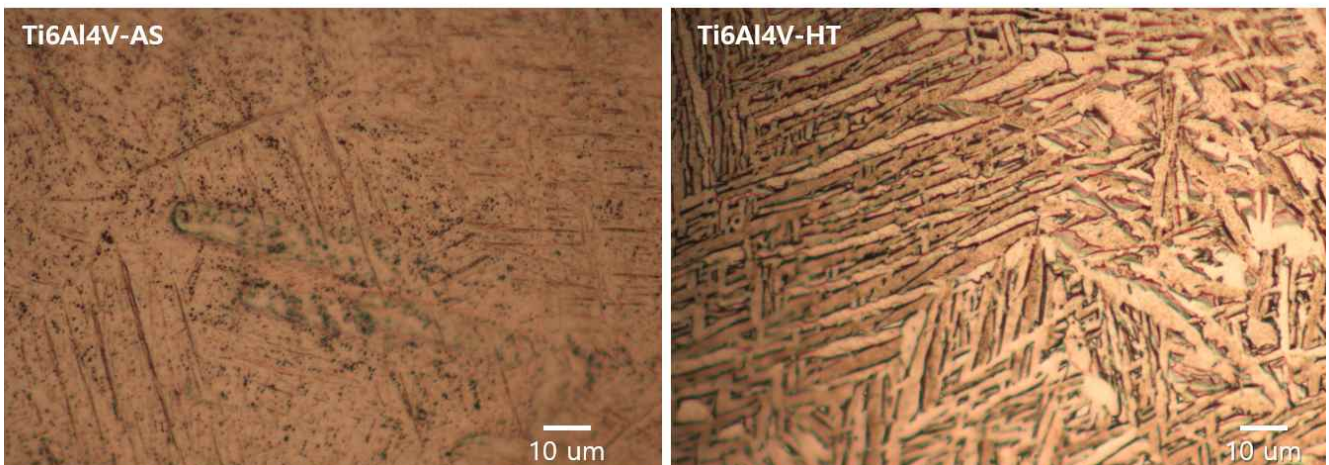


Figure 3. Optical micrographs of Ti6Al4V-AS and Ti6Al4V-HT groups.

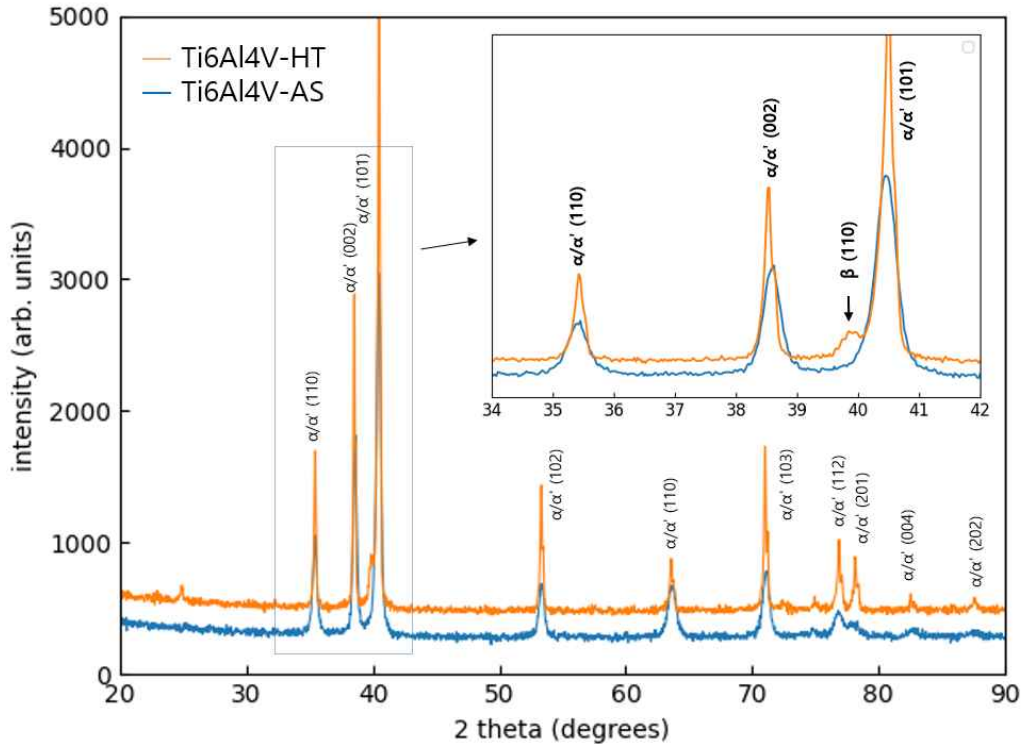


Figure 4. X-ray diffraction patterns of Ti6Al4V-AS and Ti6Al4V-HT groups.

4. FE-SEM을 이용한 미세 표면 형상 및 화학적 조성 분석

Figure 5는 각 시편에 대한 SEM 이미지에서 대문자로 표시된 영역에서 화학적 조성 분석을 수행하여 Table 1에 나타내었다. Figure 5(a)와 (b)에서와 같은 낮은 배율에서 전체적으로 조성을 분석한 경우 열처리 전후에 화학적 조성 값은 유사하게 측정되었다. Ti6Al4V-AS 시편의 경우 Figure 5(c)에서와 같이 미세 영역에 대한 조성 분석 결과 탄소와 산소 조성에서 차이를 보여주지만 금속 성분은 유사한 조성을 나타낸다. 그러나 Ti6Al4V-HT 시편의 경우 Figure 5(d)에서 같이 막대형 구조의 결정립에 대한 조성의 경우 12.7 wt%의 높은 바나듐 함량을 보여주고 있고, matrix에 해당하는 영역에서 바나듐은 0.8 wt%의 아주 낮은 값으로 측정되었다. 티타늄 합금에서 바나듐은 β -Ti 상의 안정화 원소로 작용을 하기 때문에 G 영역의 막대형 결정립은 Ti- β 상으로 예측된다. 이러한 결정들에 기인하여 Figure 4의 XRD 패턴에서 열처리 후 Ti- β 상이 관찰된 것으로 해석된다. EDS를 이용하여 탄소와 산소와 같은 경량 원소들의 정확한 정량

분석은 한계가 있지만, 측정 영역에 따라서 이러한 기체들의 함유량이 상당한 차이를 보여주고 있다.

5. XPS를 이용한 화학적 조성 분석

Figure 6은 각 시편들을 10초 동안 아르곤 이온으로 에칭한 후에 측정되어진 XPS survey 스펙트럼이다. 이 스펙트럼으로부터 각각의 원소들에 대하여 피크 면적을 계산하여 Table 2에 나타내었다. XPS는 시편의 표면에서의 화학적 조성 정보를 잘 제공하는데, 탄소와 산소가 상당히 높은 비율로 존재하는 것을 알 수 있다. 두 시편의 상대적인 조성비를 비교하기 위하여 티타늄 금속에 대한 비율로 계산하여 Table 2에 나타내었다. 두 시편군에서 가장 크게 차이를 보여주는 조성은 C1s로서 Ti6Al4V-AS와 Ti6Al4V-HT 시편에서의 C_{area}/Ti_{area} 비율은 각각 10.4와 1.1로 계산되었다. 이 결과는 EDS 분석에서 보여준 Table 1의 A와 B 영역에서의 탄소와 산소 조성 값과 차이를 보이지만, EDS의 경우 경량 원소(C, O, N)의 양이 작을 때 정량 분석이 많은 오차를 포함하고 있다는 것을 고려할 때, XPS에서 관찰된 명확한

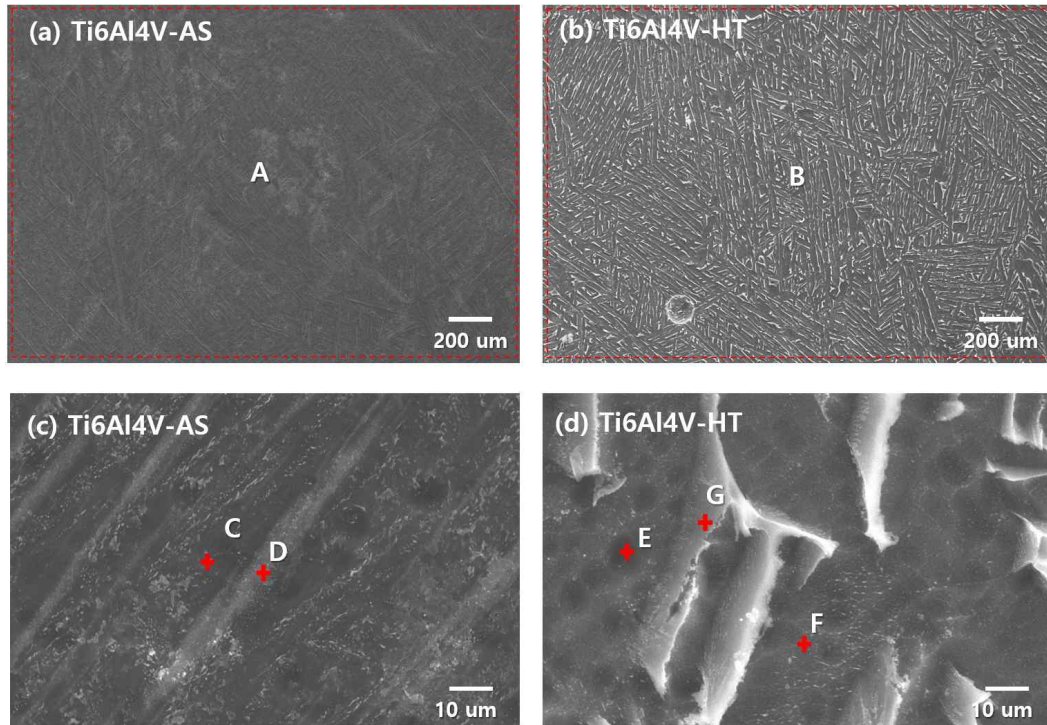


Figure 5. FE-SEM images of Ti6Al4V-AS (a and c) and Ti6Al4V-HT (b and d) groups, (a and b: $\times 500$, c and d: $\times 10,000$). Red squares (A and B) and crosses (C, D, E, F, and G) in the images were regions where chemical compositions analyzed using EDS.

Table 1. Chemical compositions analyzed using EDS in the area marked with capital letters in the Figure 5.

(Unit: wt%)

	A	B	C	D	E	F	G
Ti	82.9	84.0	84.4	80.3	81.9	78.4	73.2
Al	6.5	6.5	6.9	7.1	5.5	7.0	3.9
V	3.1	3.6	2.2	2.3	4.5	0.8	12.7
O	4.4	4.1	6.6	4.1	4.9	3.2	7.9
C	1.2	1.8	2.8	6.2	3.2	10.6	2.35

탄소의 조성 차이가 더 정확한 결과를 보여준다고 할 수 있다. 따라서 Ti6Al4V-AS 시편이 Ti6Al4V-HT 시편에 비하여 더 많은 양의 탄소를 함유하고 있고, 이 탄소들은 진공 열처리 과정에서 상당량 제거된 것으로 보인다. 그러나 Table 1의 F 영역에서처럼 α -Ti 상 내에 국소적으로 많은 양의 탄소가 함유되고 있으며, 이러한 탄소는 α -Ti 상의 안정화 원소로 작용을 한다.

전체적으로 Ti6Al4V-AS 시편내에 많은 양의 탄소가 함유되어 있으며, 이러한 탄소는 시편을 제조하는 과정에서 보호 가스로서 아르곤 가스가 사용되고 있지만 여전히 탄소가 시편 내로 혼입되는 것으로 생각된다. 티타늄 금속에서 탄소의 역할은 침입형 고용체 강화 효과로 재료의 강도를 증진시킬 수 있으며, 높은 강도를 갖는 티타늄 카바이드(TiC) 화합물을 생성시켜 합금의 경도와 내마성이 향상되기도 한다.

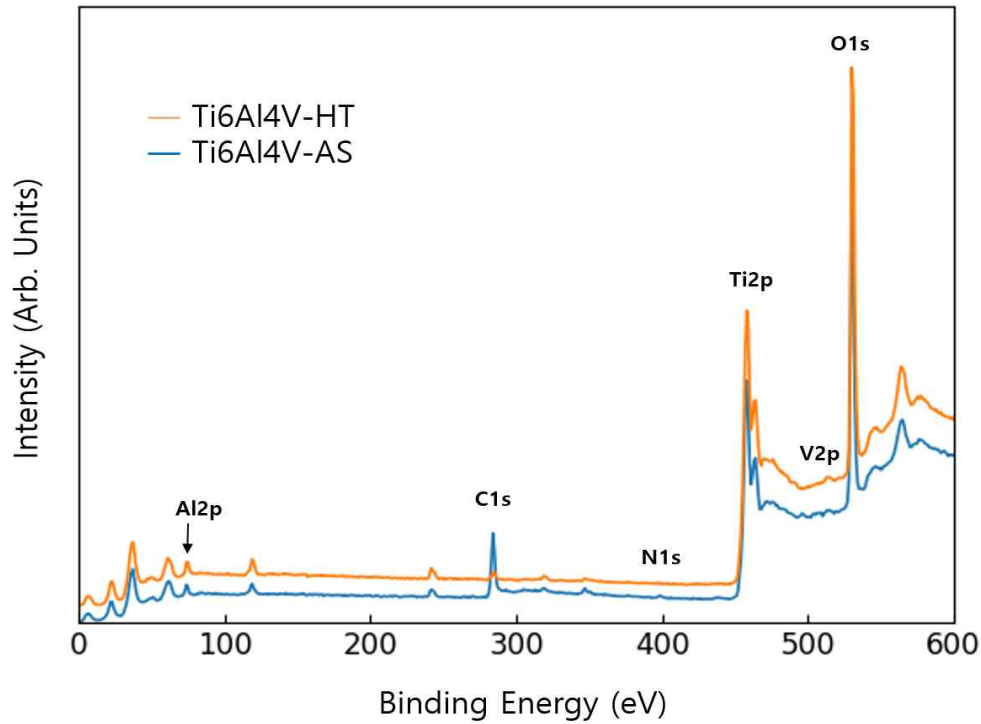


Figure 6. XPS survey spectra of Ti6Al4V-AS and Ti6Al4V-HT groups.

Table 2. Peak area of each element observed from the XPS survey spectra (X: name of each element)

		Ti2p	Al2p	V2p3	O1s	C1s	N1s
Ti6Al4V-AS	Area	8080	1634	44	17094	8391	102
	$X_{\text{area}}/Ti_{\text{area}}$	100	20.2	0.5	21.2	10.4	1.3
Ti6Al4V-HT	Area	10570	2267	185	22285	1211	0
	$X_{\text{area}}/Ti_{\text{area}}$	100	21.4	1.8	21.1	1.1	0

또한 탄소는 α -Ti 상의 안정화 원소로서 고온에서 α -상을 안정화시키는 역할을 한다. 그러나 지나치게 높은 탄소의 함유는 탄화물 생성의 증가로 말미암아 연성과 인성의 부족과 같은 기계적 특성에 영향을 미치기도 한다(21, 22).

이상을 살펴볼 때 SLM 방법으로 제조된 Ti6Al4V 시편은 높은 탄소 함량을 함유하고 있고 용융 후 빠른 냉각으로 말미암아 침상형의 결정들이 분포하는 주로 α' -상으로 형성된다. 이 시편은 높은 항복강도를 보여주지만 연신율이 낮아 취성 특성을 가지고 있다. 그러나 진공 전기로를 이용한

950°C 열처리 과정에서 합금이 잔류응력이 해소되어지고 (23), 탄소 함량이 감소되면서 고온 안정상인 β -상이 형성되어진다. 그리고 국소적으로 β -안정화 원소인 바나듐의 양이 증가하면서 시편이 냉각 후에 $\alpha+\beta$ 상의 전형적인 Ti6Al4V 합금의 상이 나타나는 것으로 해석된다. 이 때 침상 구조의 미세한 결정들이 조대해지고 결정화 되면서 연신율이 크게 증가한다. 그러나 국소적으로 α -상 내에 존재하는 높은 탄소 함유량이 Ti6Al4V-HT 시편의 낮은 UTS 값의 원인이 될 수 있다고 추론된다.

결론

본 연구에서는 SLM 방법을 사용하여 Ti6Al4V 합금 시편을 제조한 다음, 진공 전기로에서 950℃와 550℃로 열처리를 수행하였다. 열처리 전후 시편들의 기계적 특성, 결정 조직 형상 관찰, 결정구조 분석 및 화학적 조성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Ti6Al4V-AS군은 열처리 후 항복강도 값은 낮아지고, 연신율은 증가하였다. Ti6Al4V-AS 시편의 결정 조직 이미지에서 침상의 결정립들이 관찰되었으며, 결정구조 분석 결과 α' -상이 지배적이었다. Ti6Al4V-HT 시편은 주상 형의 결정립들이 배열된 층상 구조의 결정 조직이 관찰되었으며, $\alpha + \beta$ 상이 형성되었고, 결정성은 증가하였다.

화학적 조성을 분석한 결과, Ti6Al4V-AS 시편이 Ti6Al4V-HT 시편에 비하여 높은 탄소의 함량을 함유하고 있었으며, 이 탄소의 함량이 Ti6Al4V-AS 시편의 α' -상의 형성과 높은 강도 그리고 낮은 연신율에 영향을 미치는 것으로 해석하였다. Ti6Al4V-HT 시편의 경우 전체적인 탄소의 함량은 낮았지만, 국소적으로 α -상 영역에서 높은 탄소 함량을 보여주었다.

사사

본 연구는 광주연구개발특구육성사업 지원에 의해 수행되었음(2021-GJ-RD-0044)

참고문헌

1. Ananth H, Kundapur V, Mohammed HS, Anand M, Amarnath GS, Mankar S. A review on biomaterials in dental implantology. *Int. J. Biomed. Sci.* 2015;11(3): 113-20.
2. Kaur M, Singh K. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Mater. Sci. Eng. C.* 2019;102:844-62.
3. Omoniyi PO, Akinlabi ET, Mahamood RM. Heat treatments of Ti6Al4V alloys for industrial applications: An overview. *InIOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* 2021;1107:012094.
4. Hamza HM, Deen KM, Haider W. Microstructural examination and corrosion behavior of selective laser melted and conventionally manufactured Ti6Al4V for dental applications. *Mater. Sci. Eng. C.* 2020;113:110980.
5. Li HF, Qiu KJ, Yuan W, Zhou FY, Wang BL, Li L, Zheng YF, Liu YH. Screening on binary Ti alloy with excellent mechanical property and castability for dental prosthesis application. *Sci. Rep.* 2016; 6(1):1-10.
6. Taira M, Moser JB, Greener EH. Studies of Ti alloys for dental castings. *Dent. Mater.* 1989;5(1):45-50.
7. Buchanan C, Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Eng. Struct.* 2019;180: 332-48.
8. Velásquez-García LF, Kornbluth Y. Biomedical applications of metal 3D printing. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2021;23:307-38.
9. Levy GN. The role and future of the laser technology in the additive manufacturing environment. *Phys. Procedia.* 2010;5:65-80.
10. Harun WS, Manam NS, Kamariah MS, Sharif S, Zulkifly AH, Ahmad I, Miura H. A review of powdered additive manufacturing techniques for Ti-6al-4v biomedical applications. *Powder Technol.* 2018;331:74-97.
11. Zadpoor AA, Malda J. Additive manufacturing of biomaterials, tissues, and organs. *Ann. Biomed. Eng.* 2017;45:1-11.
12. Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br. Dent. J.* 2015;219(11): 521-9.
13. Chen J, Zhang Z, Chen X, Zhang C, Zhang G, Xu Z. Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology. *J. Prosthet. Dent.* 2014;112 (5):1088-95.

14. He B, Wu W, Zhang L, Lu L, Yang Q, Long Q, Chang K. Microstructural characteristic and mechanical property of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting. *Vacuum*. 2018;150:79-83.
15. Yavari SA, Wauthlé R, van der Stok J, Riemsdag AC, Janssen M, Mulier M, Kruth JP, Schrooten J, Weinans H, Zadpoor AA. Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. C*. 2013;33(8):4849-58.
16. Yu H, Yang J, Yin J, Wang Z, Zeng X. Comparison on mechanical anisotropies of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy and 304 stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017;695:92-100.
17. Vrancken B, Thijs L, Kruth JP, Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *J. Alloys Compd*. 2012;541:177-85.
18. 양동훈, 김영균, 황유진, 김명세, 이기안. 선택적 레이저 용융법으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 고 주기 피로 특성에 미치는 건식 전해 연마의 영향. *한국분말야금학회지*. 2019;26(6):471-6.
19. Zhang XY, Fang G, Leeflang S, Böttger AJ, Zadpoor AA, Zhou J. Effect of subtransus heat treatment on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy. *J. Alloys Compd*. 2018;735:1562-75.
20. Vilaro T, Colin C, Bartout JD. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metall. Mater. Trans. A*. 2011;42(10):3190-9.
21. Chen ZQ, Li YG, Loretto MH. Role of alloying elements in microstructures of beta titanium alloys with carbon additions. *Mater. Sci. Technol*. 2003;19(10): 1391-8.
22. Zhao DP, Ebel T, Yan M, Qian M. Trace carbon in biomedical beta-titanium alloys: recent progress. *Jom*. 2015;67:2236-43.
23. Sallica-Leva E, Caram R, Jardini AL, Fogagnolo JB. Ductility improvement due to martensite α' decomposition in porous Ti-6Al-4V parts produced by selective laser melting for orthopedic implants. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater*. 2016;54:149-58.

선택적 레이저 용융법으로 제조된 Ti6Al4V 시편의 열처리가 결정구조와 화학적 조성에 미치는 영향

송호준¹, 박영준¹, 문원진², 정완길², 조선신³, 강병모⁴, 윤택림^{3,5,*}

¹전남대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실 및 치과재료연구소

²한국기초과학지원연구원 광주센터

³인터메디, ⁴휴먼테크

⁵전남대학교 의과대학 정형외과학교실

본 연구에서는 우수한 생체적합성과 부식저항성 그리고 기계적 특성을 갖는 Ti6Al4V 합금을 선택적 레이저 용융 (selective laser melting; SLM)법을 이용하여 시편을 제조하였다(Ti6Al4V-AS군). 이 시편들을 진공전기로를 이용하여 950℃와 550℃에서 열처리를 수행하였다(Ti6Al4V-HT군). 열처리 전후 합금 시편들의 기계적 특성, 금속 조직 형상, 결정구조 및 화학적 특성을 분석하였다.

Ti6Al4V-AS 합금은 높은 항복강도와 낮은 연신율 값을 보여주었다. 금속 조직 이미지에서 침상의 결정립들이 관찰되었으며, 결정구조 분석 결과 α' -Ti 상이 지배적이었다. 열처리를 수행한 Ti6Al4V-HT 합금은 항복강도 값이 낮아지고 연신율은 증가하였다. 또한 주상 형의 결정립들이 배열된 층상 구조의 조직이 관찰되었으며, $\alpha + \beta$ -Ti 상이 형성되었고, 결정성은 증가하였다. 각 시편들의 화학적 조성을 분석한 결과, Ti6Al4V-AS 시편이 Ti6Al4V-HT 시편에 비하여 높은 탄소의 함량을 함유하고 있었으며, 이 탄소의 함량이 Ti6Al4V-AS 시편의 α' - 상의 형성과 높은 강도와 및 낮은 연신율에 영향을 미치는 것으로 해석되었다. Ti6Al4V-HT 시편의 경우 전체적인 탄소의 함량은 낮았지만, 국소적으로 α -상 영역에 탄소의 함량이 높았다. 따라서 SLM법을 이용한 Ti6Al4V 시편 제조 시 탄소 가스의 혼입을 효과적으로 제어할 필요가 있음을 알 수 있었다.

색인단어 : 선택적 레이저 용융, Ti6Al4V 합금, 3D 프린터, 결정구조, 화학적 조성
