

Microstructure of Ti-6Al-4V alloy

Tae Wan Kim*, Yo Han Yoon*, Ho Ra Oh*, Jong Bum Park*^{***}, Jung-Il Lee* and Jeong Ho Ryu*[†]

*Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea
**Chunji Corporation, Yeosu 12663, Korea

(Received May 30, 2016)
(Revised June 15, 2016)
(Accepted June 17, 2016)

Abstract Ti alloys have been used for orthopedic devices, automobile and aircraft because it has several beneficial properties such as a low density, a low modulus of elasticity, excellent high-temperature strength, excellent corrosion resistance and biocompatibility. In this study, Ti-64 composition (6 wt% Al, 4 wt% V) is investigated as a representative Ti-alloy system on the crystallographic characteristics and microstructure. We investigated crystal structure of the Ti-64 sample by XRD, and analyzed microstructure by compositional differences measured using FE-SEM and EDX.

Key words Ti-Al-4V alloy, $\alpha + \beta$ phase, Microstructure

Ti-6Al-4V 합금의 미세구조 분석

김태원*, 윤요한*, 오호라*, 박종범*^{***}, 이정일*, 류정호*[†]

*한국교통대학교 신소재공학과, 충주, 27469

**천지산업 주식회사, 여주, 12663

(2016년 5월 30일 접수)
(2016년 6월 15일 심사완료)
(2016년 6월 17일 게재확정)

요약 Ti-합금은 낮은 밀도, 낮은 탄성계수, 우수한 고온강도, 내산화성 및 인체적합성으로 자동차와 항공산업 및 바이오 산업에서 구조용 재료로 널리 연구되고 있다. 본 연구에서는 Ti-합금 중 대표적인 조성인 Ti-64(6 wt% Al, 4 wt% V) 합금에 대한 결정학적 특성과 미세조직에 대해서 알아보하고자 하였다. XRD 분석을 통하여 Ti-64 샘플의 주요 결정상을 분석하였고, FE-SEM 및 EDX 분석을 통하여 Ti-64 합금 샘플의 미세구조를 화학조성의 차이에 의해 고찰하였다.

1. 서론

Ti-합금은 높은 비강도와 우수한 기계적 특성으로 과거 40~50년 전부터 현재에 이르기까지 매우 다양한 분야에 적용되어 왔으며, 그 사용량 및 적용분야는 계속 증가할 전망이다. 이와 같은 Ti-합금 중 대표적인 조성으로 Ti-6Al-4V(6 wt% Al, 4 wt% V) 합금을 예로 들 수가 있는데, 기계적 특성이 매우 우수하여 실제 상업적으로 응용되는 Ti-합금 중 60% 이상을 차지한다. Ti-6Al-4V(이하 Ti-64) 합금은 Ti-합금의 일반적인 분류 중 $\alpha + \beta$ 형 합금이며, α 형 Ti-합금의 특징과 β 형 Ti-합금의 중간적 성질을 가지기 때문에 다양한 용도로 사용된다.

또한 열처리 및 냉각 방법에 따라 철계 합금과 같이 다양한 미세조직과 기계적 성질을 얻을 수 있기 때문에 그 효율 가치가 매우 높은 합금계이다[1, 2]. 그러나 대부분의 Ti-합금, 특히 Ti-64 합금의 경우, machining cutting 등의 기계가공이 난해하기 때문에 부품 제조시 단조 및 초소성 성형 등 정형성형(near net shaping)을 목표로 하는 고온가공 법들이 다수 적용되고 있다. 특히, 전체 가공부품 중 고온 가공품, 특히 단조품의 비율이 매우 높은 편이며, 이는 최종부품 형상에 가깝게 제조가 가능하고 성형시 공정변수의 제어를 통하여 미세조직 제어가 가능하다는 이점 때문이다[3, 4].

특히, Ti-합금은 기지상이 α 상인 합금, α 상과 β 상이 공존하는 합금, β 상인 합금의 경우로 크게 분류되며, 낮은 밀도, 높은 강도, 내식성 및 우수한 고온특성 등으로 항공재료 및 국방재료 등 첨단 구조용 재료로서 널리 이

[†]Corresponding author
E-mail: jhryu@ut.ac.kr

용되고 있다[5, 6]. 전형적인 $\alpha + \beta$ Ti-합금인 Ti-64 합금은 α 상과 β 상의 부피분율, 형태(morphology), 결정학적 배열 등 미세구조의 변화에 따라 민감하게 변화하는 특성을 가지고 있으며, α 상은 β 상보다 고온에서의 강도는 높지만 상온에서의 강도는 상대적으로 낮다[7, 8]. 상온에서 Peierls-Nabarro model을 근거로 할 때 c/a 비가 1.63보다 작으면 prism slip이 basal slip보다 우세하게 작용하기 때문에, α 상은 일반적인 다른 hcp 구조에 비해 변형이 쉽게 일어나고 높은 연성을 얻을 수 있다. 반면, β 상의 경우에는 bcc 구조로서 지배적인 슬립계가 존재하지 않으므로 경도와 강도가 높고 연성이 떨어진다. 이와 같은 이유로 상온에서는 주요변형상이 α 상이 되며, 온도가 증가함에 따라 β 상의 다양한 슬립계가 활성화되고 소성 변형시 β 상의 변형저항이 급격히 감소하게 되므로 고온에서는 β 상이 주요 변형상이 된다[9, 10].

Ti-64 합금의 경우, 여러 가지 합금제조 공정, 열/기계적 가공을 통하여 얻어지는 미세조직 및 그에 따른 기계적 성질이 매우 중요하기 때문에, 미세조직에 대한 변화를 함께 고찰하고 이를 통하여 제품의 최종 특성을 예측할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Ti-64 합금의 결정구조와 미세조직 변화를 고찰하여 최종적인 제품의 기계적인 특성과의 연관성을 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 합금시편은 천지산업(주)에서 주조된 Ti-64(6 wt% Al, 4 wt% V) ingot을 방전가공을 이용하여 제조하였다. WD-XRF(Wavelength-dispersive X-ray fluorescence) 분석을 통하여 가공된 시편의 성분과 불순물 함입 여부를 조사하고 Table 1에 Ti-64 시편의 XRF 분석 결과를 나타내었다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 commercial Ti-64(6 wt% Al, 4 wt% V) 조성과 유사하게 확인되었으며, WD-XRF 장비의 측정한계 이상의 다른 금속 불순물은 분석되지 않았다. 또한 시편의 결정상을 분석하기 위하여 XRD(X-ray diffractometry) 분석을 실시하였다. Ti-64 시편의 시편들을 Kroll 용액 (H₂O 100 ml, HF 3 ml, HNO₃ 5 ml)으로 에칭한 후 광학현미경과 FE-SEM(Field emission scanning electron microscope) 및

Table 1
Chemical composition of the Ti-64 sample measured by WD-XRF

	Weight %	Atomic %
Ti	90.40	86.76
Al	5.72	9.74
V	3.88	3.50
Total	100.00	100.00

EDX(Energy-dispersive X-ray spectroscopy)으로 미세조직과 화학조성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Ti-64 샘플의 XRD 분석 결과이다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 Ti-64 샘플은 기본적으로 α 상으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 38° 근처의 β 상의 main peak와 중복되고 있기 때문에 β 상의 존재는 미세구조 분석을 통하여 확인하여야 할 것으로 판단된다. 또한 Ti와 Al 사이에 존재할 수 있는 여러 가지 금속간 화합물(Ti₃Al, TiAl, TiAl₃)들은 발견되지 않았다.

Fig. 2는 Ti-Al 합금 시스템에서의 상평형도를 보여주고 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 일반적으로 Ti 금속은 2개의 상으로 존재할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 낮은 온도에서는 hcp(hexagonal closed packed)

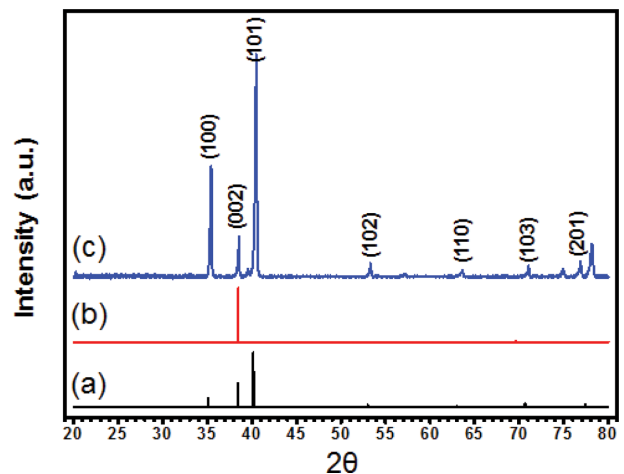


Fig. 1. XRD result of the Ti-64 sample is shown (c). The (a) and (b) shows reference data for the α -Ti and β -Ti phase, respectively.

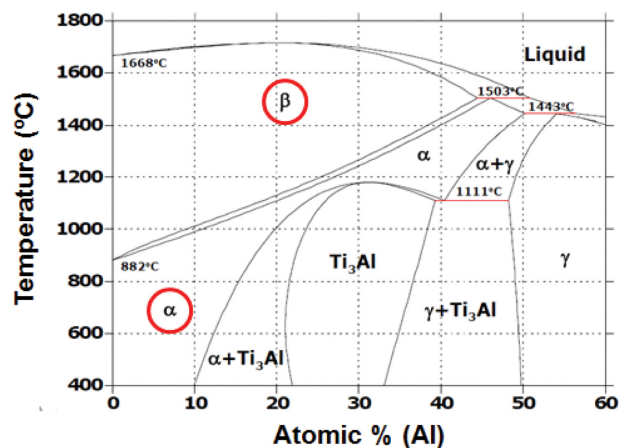


Fig. 2. Phase diagram of Ti-Al alloy system.

구조인 α 상으로 존재하고, 882°C 이상의 온도에서는 bcc(body centered cubic) 구조인 β 상이 안정한 것으로 알려져 있다[10]. 그리고 이때 α 상에서 β 상으로의 전이온도는 Ti에 첨가하는 여러 가지 alloying element에 따라서 조절할 수 있다. 이 중 β 안정제(alpha stabilizer)로 알려져 있는 Al, O, N 등이 합금되었을 경우에는 β 상으로의 전이온도를 증가시키고, β 안정제(beta stabilizer)로 알려져 있는 V, Mo, Nb, Fe, Cr 등을 합금하였을 경우에는 α 상으로의 전이온도가 낮아지는 것으로 알려져 있

다. 따라서 Ti 금속에 여러 가지 α 혹은 β 안정제를 첨가하여 열처리 공정을 통하여 상온에서 존재하는 α 상과 β 상의 비율을 조절하고 이를 이용하여 최종적인 Ti-합금의 물성을 조절할 수 있다.

따라서 본 연구의 Ti-64 샘플의 경우 Al은 α 안정제로서 작용하여 샘플의 미세구조에서 α 상 내부에서 주로 발견되고, V은 β 안정제로서 작용하여 미세구조에서 β 상에서 분석될 것으로 예상할 수 있다. Fig. 3은 광학 현미경으로 관찰한 Ti-64 샘플의 미세구조를 200배와

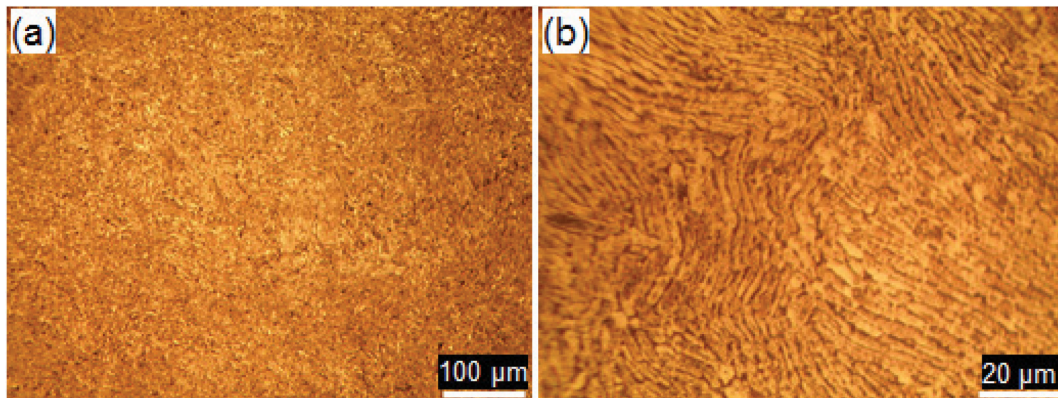


Fig. 3. A typical microstructure observed by optical microscope with magnifying power of (a) 200 and (b) 1000.

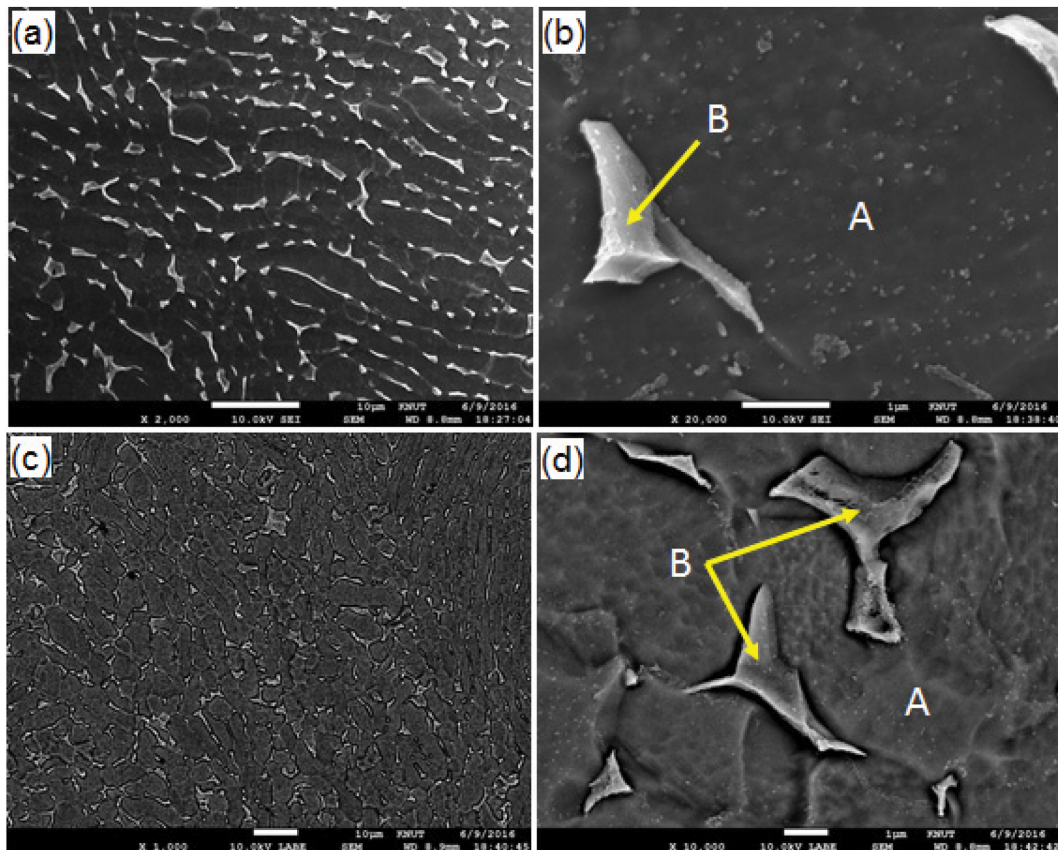


Fig. 4. A typical microstructure observed by FE-SEM with magnifying power of (a) 2000 and (b) 20,000. Back-scattered electron detector (BSD) image of the Ti-64 alloy sample are shown in (c) and (d).

1,000배의 배율로 관찰한 결과이다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 Ti-64 샘플의 미세구조는 명암이 서로 다른 두 개의 상으로 이루어져 있음을 확인할 수 있었고, 하나의 grain의 길이가 20~30 μm 정도임을 측정할 수 있었다.

보다 자세한 미세구조 관찰을 위해서 FE-SEM을 이용하여 관찰한 결과를 Fig. 4(a, b)에 나타내었다. 또한 합금 원소의 차이에 의한 보다 명확한 명암 관찰을 위해서 back-scattered detector image로 관찰한 결과를 (c, d)에 나타내었다. Fig. 4(a~d)에서 확인할 수 있듯이, Ti-64 샘플은 어두운 명암으로 표현되는 A영역과 A영역 사이에서 발견되는 밝은색 B영역으로 이루어져 있음을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 명암차이는 Ti-64에 포함되어 있는 Ti, Al, V 원소의 원자량 차이에 의한 것으로 짐작할 수 있었다.

FE-SEM에서 관찰된 두 부분의 성분분석을 EDX로 실시한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과에서 확인할 수 있듯이, Fig. 4의 A영역에서의 화학 성분은 Ti와 Al 이고 V은 검출되지 않았다. 그러나 B 영역에서는 주로 Ti와 V이 주성분으로 분석되고 Al은 소량 검출되었다. 따라서 광학현미경과 FE-SEM 상으로 확인된

A영역은 Ti과 Al의 합금으로 이루어진 α 상임을 확인할 수 있었고, B 영역은 Ti과 V으로 이루어진 β 상임을 확인할 수 있었다. 즉 Ti-64 조성의 합금이 주조된 후 냉각과정에서 α 안정제 역할을 하는 Al을 포함하는 α 상이 샘플의 대부분을 형성하고, α 상 grain boundary 영역에 β 안정제 역할을 하는 V이 포함된 β 상이 냉각과정에서도 β 상을 그대로 유지한 형태로 Ti-64 샘플의 미세구조가 이루어진 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ti-합금 중 대표적인 조성인 Ti-64 (6 wt% Al, 4 wt% V) 합금에 대한 결정학적 특성과 미세조직에 대해서 고찰하였다. XRD 분석결과 Ti-64 샘플은 α 상으로 구성되어 있었으며, 다른 TiAl 금속간 화합물은 발견되지 않았다. 광학현미경, FE-SEM 및 EDX 분석을 통하여 Ti-64 합금 샘플은 Ti와 Al의 합금원소로 이루어진 α 상의 grain들과 Ti와 V으로 이루어진 β 상 grain 사이에 분포한 형태의 미세구조로 이루어져 있었으며, 하나의 grain의 길이가 20~30 μm 정도였다.

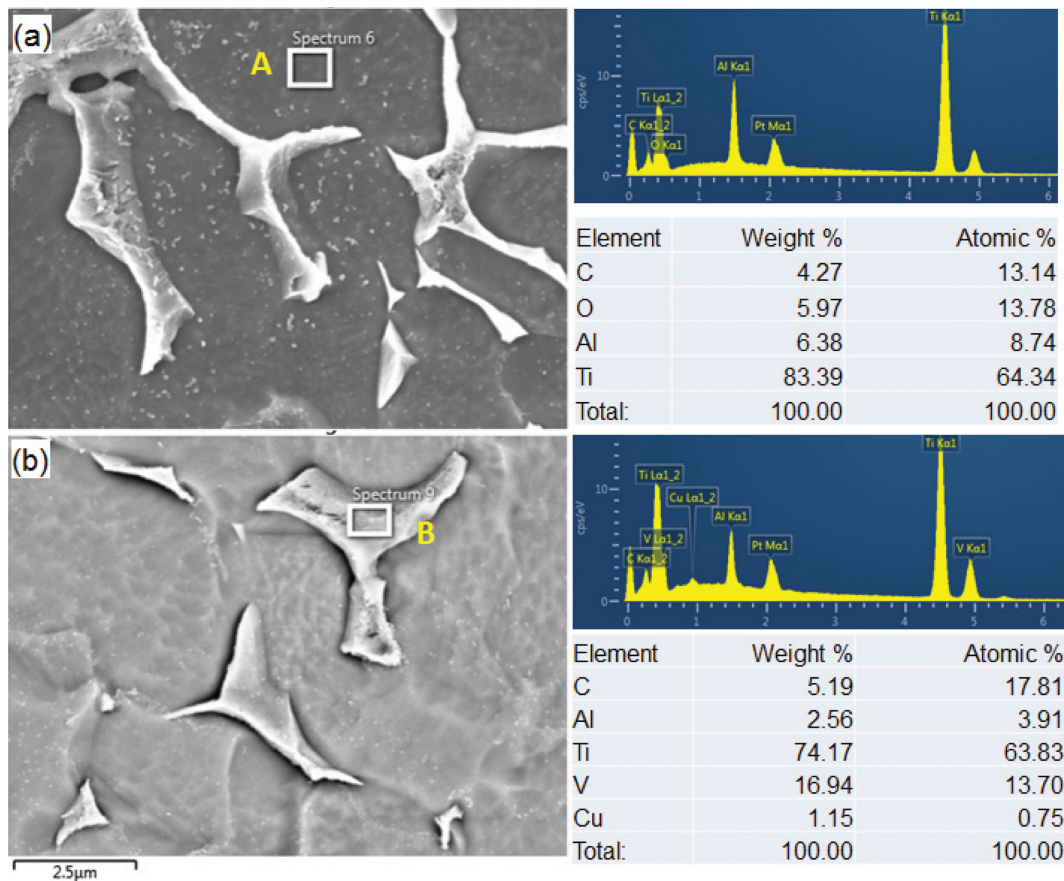


Fig. 5. The EDX results of the Ti-64 sample. Chemical composition of the A and B site are shown in (a) and (b), respectively.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음[S2296345, 자동차용 TiAl계 터보차저 터빈 휠 제조기술 개발].

References

- [1] Y.H. Lee, J.T. Yeom, N.K. Park, S.S. Hong, I.O. Shim, S.M. Hwang and C.S. Lee, "Prediction of microstructure during high temperature forming of Ti-6Al-4V alloy", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 43 (2005) 847.
- [2] D.-G. Lee, Y.H. Lee, C.S. Lee and S. Lee, "Effect of volume fraction of tempered martensite on dynamic deformation properties of Ti-6Al-4V alloy having bimodal microstructure", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 42 (2004) 455.
- [3] S.G. Pyo, J.K. Oh, N.J. Kim and M. Yamaguchi, "Al compositional dependence on the deformation behavior and mechanical properties in ultra high purity TiAl alloys", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 38 (2000) 629.
- [4] I.-S. Jung, M.-C. Kim, J.-H. Lee, M.-H. Oh and D.-M. Wee, "Phase equilibria of TiAl alloy by directional solidification", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 37 (1999) 448.
- [5] X Wu, "Review of alloy and process development of TiAl alloys", *Intermetallics* 14 (2006) 1114.
- [6] M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani and A.K. Gogia, "Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review", *Prog. Mater. Sci.* 54 (2009) 397.
- [7] S.L.R. da Silva, L.O. Kerber, L. Amaral and C.A. dos Santos, "X-ray diffraction measurements of plasma-nitrided Ti-6Al-4V", *Surf. Coat. Tech.* 116-119 (1999) 342.
- [8] J.J. Lin, Y.H. Lv, Y.X. Liu, B.S. Xub, Z. Sun, Z.G. Li and Y.X. Wu, "Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing", *Mater. Des.* 102 (2016) 30.
- [9] G.A. Ravi, C. Qiu and M.M. Attallah, "Microstructural control in a Ti-based alloy by changing laser processing mode and power during direct laser deposition", *Mater. Lett.* 179 (2016) 104.
- [10] D. Batalu, G. Cosmeleata and A. Aloman, "Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams", *U.P.B. Sci. Bull., Series B* 68 (2006) 77.