

$\alpha+\beta$ 타이타늄 합금의 미세조직 제어에 따른 기계적 특성

황유진* · 박양균* · 김창림* · 김진영** · 이동근*†

*순천대학교 신소재공학과, **주알앤더블유

Mechanical Properties Variation of Ti-6Al-4V Alloy by Microstructural Control

Yu-Jin Hwang*, Yang-Kyun Park*, Chang-Lim Kim*, Jin-Yung Kim**, Dong-Geun Lee*†

*Department of Materials Metallurgical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

**R&W Co., Ltd., 9, Yeonbannonggong-gil, Seokgok-myeon, Gokseong-gun 57556, Korea

Abstract The mechanical properties of Ti-6Al-4V can be improved by microstructural control through the heat treatment in $\alpha+\beta$ region. The heat treatment was carried out with a variety of heat treatment temperatures and holding times to find the optimized heat treatment conditions and it was analyzed by linking the microstructural characteristics and mechanical properties. The part of β phase with 10 ± 2 wt% vanadium was transformed into α'' martensite phase after quenched, so the hardness and tensile properties were decreased below 900°C . The higher the heat treatment temperature is, the smaller is the vanadium-rich region, which leads to transformation into hcp α' martensite above 900°C . The hardness and tensile properties were improved due to the hard α' martensite. As the holding times were longer, the hardness and tensile properties decreased below 900°C because of the softening effect by the grain growth. When varying the holding times above 900°C , the change of mechanical properties was slight because the softening effect of grain growth and the strengthening effect of α' phase were counteractive. Therefore, the best conditions of heat treatment, which is in the range of $920\sim 960^\circ\text{C}$, 40 min, WQ, can effectively improve the mechanical properties of Ti-6Al-4V.

(Received August 5, 2016; Revised August 25, 2016; Accepted September 5, 2016)

Key words : Ti-6Al-4V, Solution treatment, Holding time, Mechanical properties, α' martensite, α'' martensite, β -stabilizer

1. 서 론

타이타늄 및 타이타늄 합금은 다양한 공정기술을 통해 기계적 특성을 변화시킴으로써 자동차 산업, 항공 산업, 생체재료 등의 분야에서 널리 이용되고 있다. 열처리를 통해 생성되는 상들은 기계적 특성에 큰 영향을 미치며, 파괴인성, 피로강도, 고온 크리프 강도 등의 특성을 향상시킬 수 있다. Ti-6Al-4V 합금과 같은 $\alpha+\beta$ 타이타늄 합금의 경우 β -변태점을 기준으로 그 이상 또는 그 이하의 온도에서 열처리를 수행함으로써 미세조직을 다양하게 변화시킬 수 있으며[1], 기계적 특성 또한 제어된 미세조직에 직접적 영향을 받는다. 타이타늄의 미세조직은 대표적으로 등축정조직, 층상조직, 혼합조직 등으로 구분되며, 공

정조건에 따라 변한다. 등축정 조직은 강도, 연성 등이 우수한 특징을 갖고 있고[2], 층상조직은 파괴인성 크리프 강도 등이 좋고 피로 균열개시는 늦지만 전파속도는 빠르다는 특징을 갖고 있다[3]. 혼합조직의 경우에는 우수한 크리프 및 파단강도를 많이 유지하면서 피로성질도 향상시킬 수 있다는 특징을 갖고 있다[4].

타이타늄 및 타이타늄 합금은 다른 금속과 달리 수냉 후에 시효처리를 하지 않아도 인성이 저하되지 않고 오히려 특성이 향상되는 것으로 보고된다[5]. Ti-6Al-4V합금의 경우 β -변태점이 약 998°C 인데, β -변태점 아래의 영역에서 용체화 처리를 수행하면 α 상, 잔류 β 상 그리고 불안정한 β 상이 급랭을 통해 변태한 마르텐사이트상이 생성됨으로써 우수한 특성

†Corresponding author. E-mail : lechodg@sunchon.ac.kr

Table 1. Chemical composition of as received Ti-6Al-4V

	Al	V	C	O	N	Fe	H	Ti
wt%	6.36	4.27	0.01	0.14	0.01	0.2	<0.001	Bal.

을 기대할 수 있다[5]. Ti-6Al-4V합금은 β 안정화 원소의 함량과 용체화 처리온도에 따라 생성되는 마르텐사이트상이 다르다. 10 ± 2 wt%의 V(β 안정화원소)을 포함한 β 상이 750~900°C의 온도 범위에서 급랭될 때, 일부는 연한 사방정계(orthorhombic) 마르텐사이트상으로 변태하며, 일부는 bcc구조를 갖는 β 상으로 잔존하게 된다. 900°C 이상의 온도에서는 β 상 내부에 V-rich 영역이 감소하게 되고, 그로 인해 육방정계(hexagonal)인 α' 마르텐사이트상으로 변태하게 된다[6, 7]. 한편, β 안정화원소인 V 함량이 15 wt% 이상일 경우 β 상은 안정화되며, 급랭을 하더라도 체심입방정계(bcc) 결정구조를 갖게 된다.

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금을 β -변태점 아래의 다양한 온도 조건에서 열처리 유지시간을 변화시킴으로써 기계적 특성을 제어하고자 하였다. Ti-6Al-4V 합금의 열처리 공정 조건을 최적으로 제어함으로써 구성 상(phase), 결정립 등 미세조직학적 인자들을 변화시켰으며 이를 물성과 연계하여 평가하였다.

2. 실험방법

실험에 이용된 Ti-6Al-4V은 Daido Steel Co.,Ltd에서 제조한 소재로써 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 열처리를 수행할 때 α 상, β 상, 마르텐사이트상의 특징이 모두 나타나도록 β 변태점(~998°C) 아래에서 다양한 온도와 시간의 조건을 잡아 실험을 수행하였다. 구체적으로 880°C, 920°C, 960°C 등 세 온도에서 유지시간을 각각 20분/40분/60분 실시함으로써 총 9종류의 열처리 조건에 대해 실험을 수행하였다. 이후에는 마르텐사이트상을 생성시키기 위해 수냉(water quenching)을 실시하였다. 용체화 처리한 시편과 미세조직 및 기계적 특성 등을 비교하기 위해 as-received 시편을 준비하였다.

시편의 미세조직을 관찰하기 위해 1 μm 단위까지 미세연마를 수행하였으며, Kroll 용액(H₂O 100 ml + HNO₃ 5 ml + HF 3 ml)으로 수 초간 에칭하여 광학현미경으로 각 시편들의 미세조직을 관찰하였다.

**Fig. 1.** Optical micrograph of the as-received Ti-6Al-4V ($\times 500$).

용체화 처리를 각 조건별로 수행한 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 성질을 평가하기 위하여 경도, 상온 인장 시험을 수행하였다. Mitutoyo사의 마이크로 비커스 경도 측정기를 이용하여 경도를 측정하였다. 인장 시험을 위해 봉상의 시험편을 ASTM E8 규격에 부합하게 가공하였고, SHIMADZU사의 AG-250 kN XPLUS 만능 시험기를 이용해 항복구간까지 1.5 mm/min, 항복 구간 이후로는 5.0 mm/min의 변형 속도로 인장 및 항복강도, 연신율, 탄성계수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

As-received 시편과 880°C, 920°C, 960°C에서 20분, 40분, 60분간 용체화 처리 후 수냉시킨 시편들의 미세조직을 관찰한 광학현미경 사진을 Figs. 1~4에 나타내었다. 모든 조건의 광학현미경 사진에서 등축정 조직을 관찰할 수 있었고, α 상 결정립의 삼중점에서 β 상이 형성된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 1)[8]. 급냉 후 생성된 마르텐사이트상의 자세한 분석을 위해 주사전자현미경을 이용해 미세조직을 관찰한 결과, β 상 기지 내에 침상형으로 생성된 마르텐사이트상을 확인할 수 있었다(Fig. 5). 열처리 온도가 올라감에 따라 결정립 성장이 보다 활발하게 이루어져 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

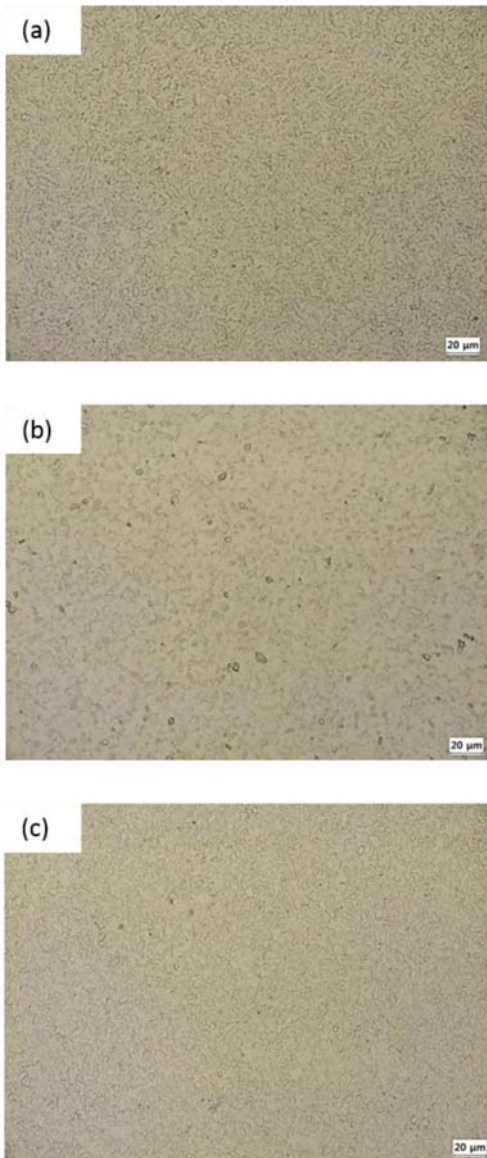


Fig. 2. Optical micrograph of the heat-treated Ti-6AL-4V samples for 20 min at (a) 880°C, (b) 920°C, and (c) 960°C, WQ ($\times 500$).

각각의 열처리 시편들의 비커스 경도를 측정된 결과, Fig. 6에서 알 수 있듯이 온도가 증가할수록 평균 경도값이 증가하였다. 880°C, 920°C에서는 유지시간이 길어짐에 따라 경도값이 감소하였고 960°C에서는 유지시간이 길어짐에 따라 경도값이 증가하였다. Fig. 7에는 상온 인장시험을 수행한 결과값을 나타내었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 인장 및

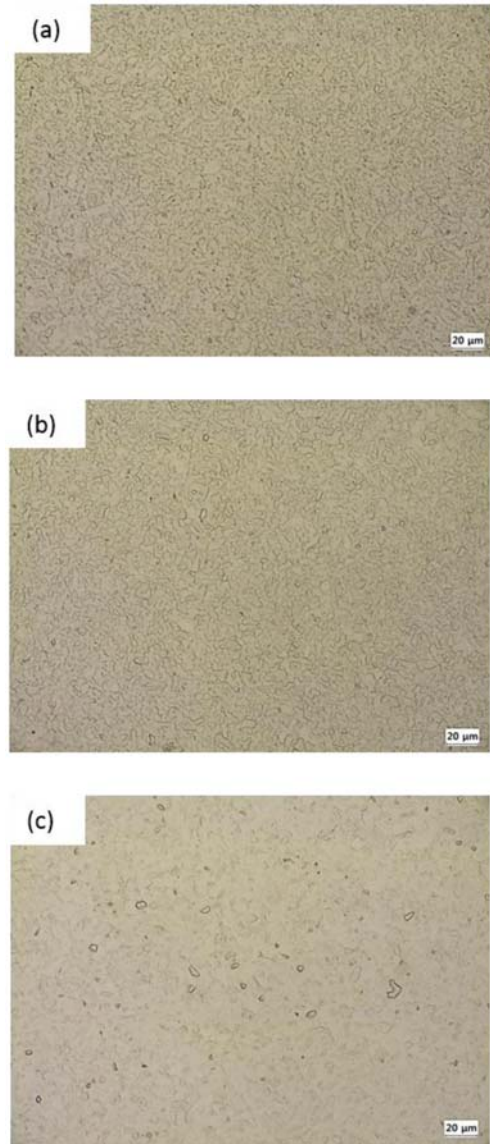


Fig. 3. Optical micrograph of the heat-treated Ti-6AL-4V samples for 40 min at (a) 880°C, (b) 920°C, and (c) 960°C, WQ ($\times 500$).

항복강도 값이 증가하였고 연신율은 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유지시간이 길어짐에 따라서 880°C에서는 인장강도가 감소하는 경향을 보였고 920°C, 960°C에서는 40분 유지했을 때 인장강도 값이 가장 높았으나 이후 감소하는 경향을 보였다.

열처리 온도가 β -변태점에 가까워질수록 β 상의 분율은 증가하게 된다. 상대적으로 β 안정화원소의 함

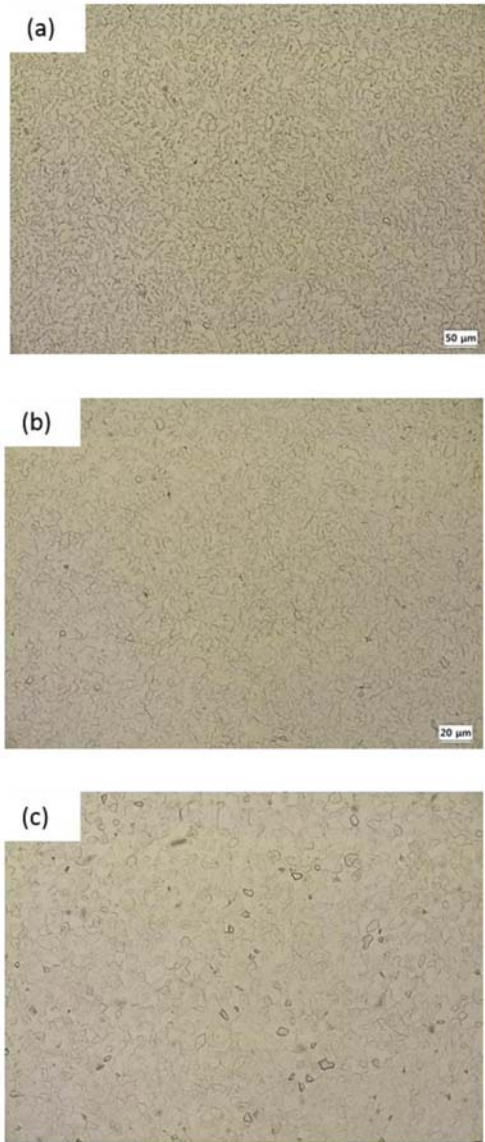


Fig. 4. Optical micrograph of the heat-treated Ti-6Al-4V samples for 60 min at (a) 880°C, (b) 920°C, and (c) 960°C, WQ ($\times 500$).

량은 줄어든다. 상태를 통해 β 상의 평형 부피 분율을 구할 수 있는 식이 Picu et al.에 의해 보고되었다[9].

$$C_{\beta} = \left(\frac{T}{1270} \right)^{10} \quad (1)$$

식 (1)로 각 온도에서 평형 β 상의 분율을 구하였으며, 880°C에서는 38%, 920°C에서는 53.5%,

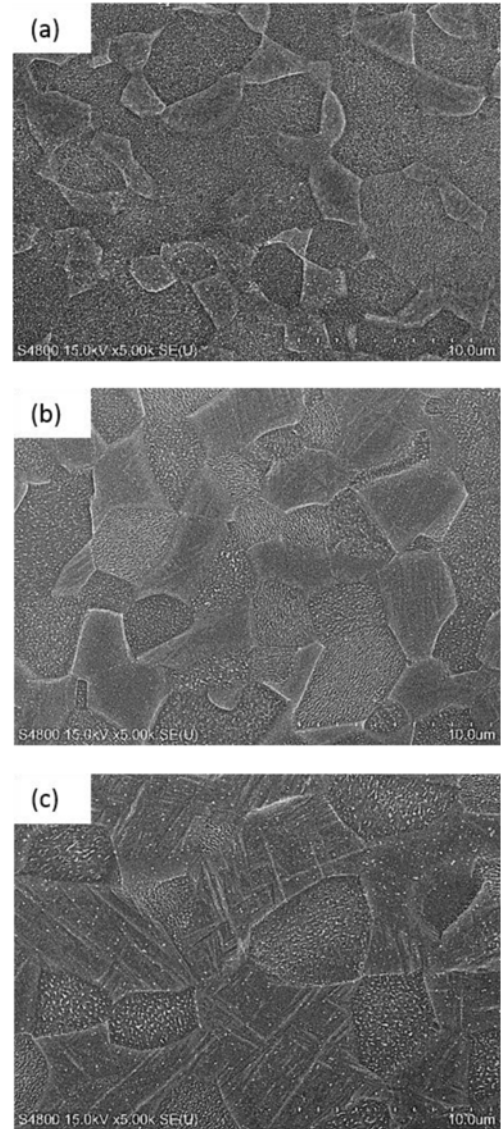


Fig. 5. SEM images of the 60 minutes heat treated Ti-6Al-4V samples at (a) 880°C, (b) 920°C, and (c) 960°C, WQ.

960°C에서는 74.4%로 계산되었다. β 상의 분율은 880°C에서 960°C까지 약 2배 증가한다[5, 10]. 준안정 β 상의 분율이 증가해 마르텐사이트상으로 변태할 수 있는 β 상의 분율도 증가하게 된다. 또한 열처리 온도가 증가할수록 급랭 후에 α 상 내에서 β 상 안정화원소가 밀려나고 밀려난 안정화 원소는 β 상을 안정화시킨다[5]. β 상 내 β 상 안정화원소의 함량에 따라 생성될 수 있는 마르텐사이트상의 종류가 다르다.

급냉 후에 변태 완료된 상 중에서 α 상은 기계적 특성에 미치는 영향이 상대적으로 적은 반면, β 상과 α' 마르텐사이트상, α'' 마르텐사이트상이 기계적 특성에 주요한 영향을 끼친다. α' 마르텐사이트 상은 타이타늄의 상 중에서 가장 낮은 강도 값과 탄성계

수 값을 갖고 상의 크기와 양이 많지 않아 연신율에는 큰 영향을 끼치지 않는 반면, α' 마르텐사이트 상은 α 상보다 강도와 경도가 높다[4]. 따라서, 용체화 온도가 β -변태점 근처까지 상승함에 따라 β 상 내에 β 안정화 원소의 함량이 감소하게 됨으로써 앞서 설명한 바와 같이 급냉시 연한 α' 마르텐사이트 상보다 경한 α' 마르텐사이트상으로의 변태가 많이 이루어져 전체 미세조직에 분포함으로써 온도 상승에도 불구하고 기계적 특성의 강화현상을 야기시키게 되는 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯 880°C에서는 강도값과 탄성계수 값이 as-received 시편보다 낮고 연신율에서는 별 차이가 없었다. 항복강도 값은 as-received 시편에 비해 200 MPa 정도 감소하였다. α'' 마르텐사이트상이 생성됨으로써 강도값과 탄성계수 값을 낮춘 것으로 분석된다. 또한 열처리 온도가 증가할수록 α' 마르텐사이트상의 분율이 증가해 강도 값과 탄성계수 값이 증가하는 한편, 열처리 온도 증

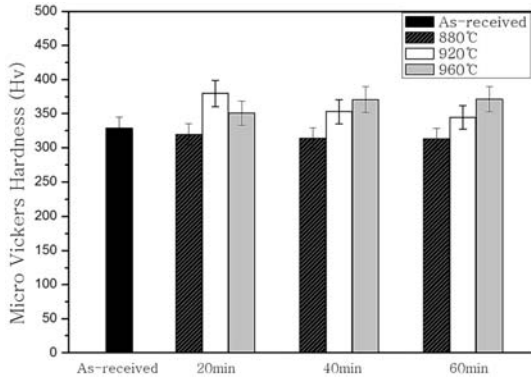
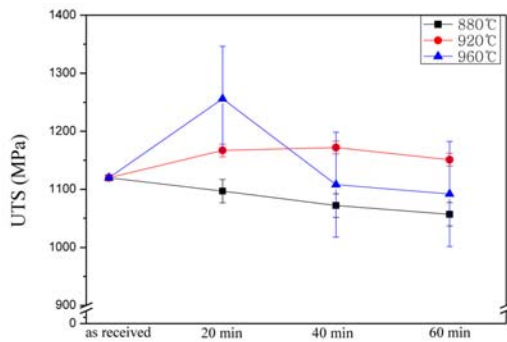
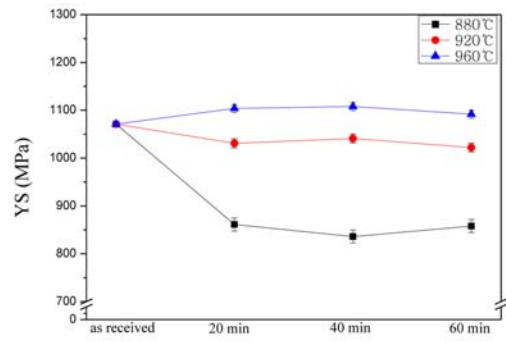


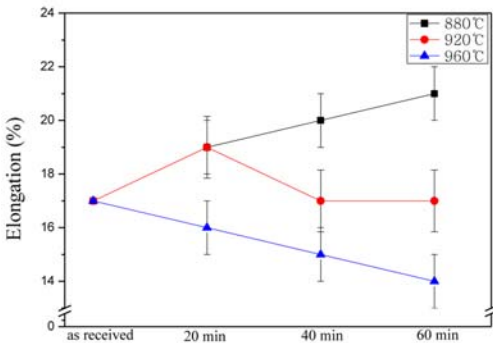
Fig 6. Hardness results of microvickers for Ti-6Al-4V.



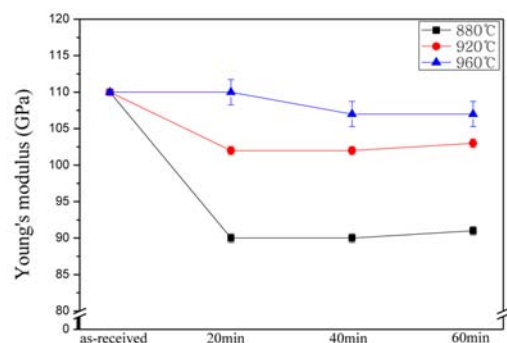
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig 7. Tensile properties of the heat-treated samples; (a) ultimate tensile strength, (b) yield stress, (c) elongation, and (d) young's modulus.

가에 따라 경도값이 214, 345, 372 Hv로 증가하는 이유 또한 상기 메커니즘에 의한 설명과 일치하는 것을 알 수 있다. 경한 α' 마르텐사이트상이 생성됨으로써 연신율은 감소하였다.

Ti-6Al-4V 합금의 Time-Temperature-Transus(TTT) 곡선[11]에 따르면 880°C, 920°C, 960°C에서 용체화 처리 시 모두 수십초 내에 변태가 완료된다. 변태가 완료되어도 열처리 온도를 유지함에 따라 원자의 확산에 의해 결정립이 성장하게 된다. 또한 BCC 구조의 β 상이 HCP 구조의 α 상보다 원자가 느슨하

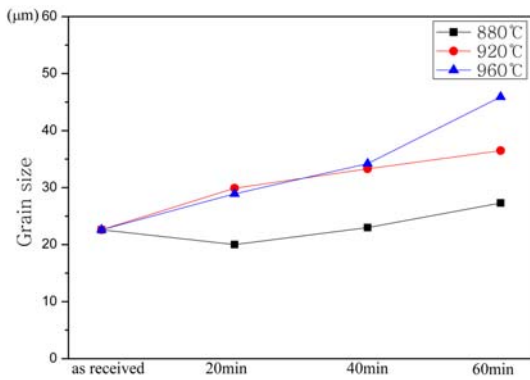


Fig. 8. The variation of grain size as a function of holding times and heating temperatures.

게 충전되어 있어 더 빠르게 확산한다. 광학현미경으로 찍은 미세조직 사진 위에 원을 그려 그 선에 걸치는 결정립과 선 안에 들어가는 결정립의 수를 세어 결정립의 크기를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 열처리 온도가 상승함에 따라 880°C에서는 최대 20.7%, 920°C에서는 최대 61.5%, 960°C에서는 최대 103.1% 성장하였으며, 동일온도에서 열처리 유지시간이 증가함에 따라 as-received 조직의 결정립 22.6 μm 에서 880°C에서는 27.3 μm 까지, 920°C에서는 36.5 μm 까지, 960°C에서는 45.9 μm 까지 결정립 성장이 이루어졌다. 각 열처리 온도에서 유지시간이 길어짐에 따라 결정립이 성장하게 되며 이에 따라 경도와 인장 강도 등이 다소 감소하는 일반적인 경향을 나타내었다. 이는 유지시간이 길어짐에 따라 원자의 확산에 의해 결정립이 성장하는데 원자 충전율이 느슨한 BCC구조의 β 상에서의 원자 확산이 HCP 구조의 α 상보다 더 빨라 β 상 결정립이 더 빨리 성장하게 되고, β 안정화 원소가 α 상에서 밀려나 β 상을 안정화시킨다. 안정화된 β 상의 양이 많아지면서 마르텐사이트로 변태하는 준안정 β 상의 양은 감소하게 된다. 880°C에서는 유지시간이 증가함에 따른 평형 β 상의 양이 다른 온도 조건에서보다 적으므로 마르텐사이트로 변태하는 준안

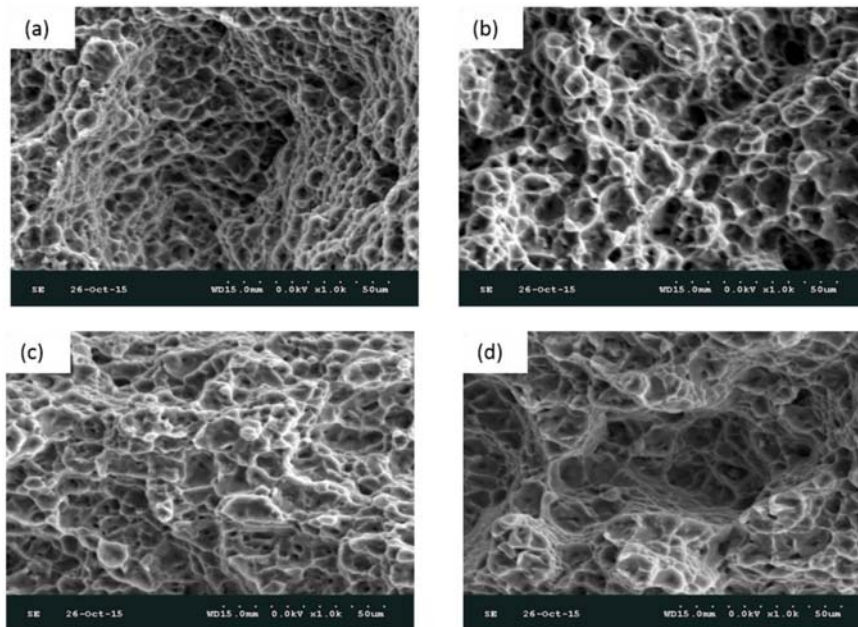


Fig. 9. Tensile fractographs of the heat-treated Ti-6Al-4V; (a) as received, (b) at 880°C, (c) at 920°C, and (d) 960°C.

정 β 상의 양의 감소보다 결정립 크기의 성장이 인장 강도 및 경도 감소에 더 큰 영향을 끼치게 되는 것이다. 920°C에서는 원자가 확산하면서 안정화된 β 상의 양이 증가해 마르텐사이트상으로 변태되는 준안정 β 상의 양이 줄기 때문에 인장 강도 값이 다소 감소한 것으로 분석되고 α' 마르텐사이트상의 양 또한 줄어들어 경도 값이 감소하게 된다. 960°C에서는 앞서 설명한 바와 같이 온도 증가에 따라 β 안정화 원소 함량의 감소에 따른 α' 마르텐사이트의 변태 우세로 인해 상대적으로 높은 경도특성을 나타내었으나, 결정립 성장에 의한 연화 효과로 인해 인장강도 등 전체적인 기계적 특성에는 큰 변화를 미치지 않았다. 이와 같이 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 특성을 제어하기 위한 용체화 처리 온도와 유지 시간을 상 변태 등 미세조직학적 특성과 연계하여 평가 분석하였으며, $\alpha+\beta$ 영역인 920~960°C의 온도 범위에서 용체화 처리 유지 시간을 40분 이내로 유지하는 것이 상온 인장 특성, 경도 특성 및 미세조직 특성을 효과적으로 제어하는데 유리하다는 것을 알 수 있었다.

상온 인장시험 시편의 인장 파면을 주사전자현미경을 이용해 관찰한 결과, 모든 용체화 조건에서 연성 파괴의 대표적 특징인 뚜렷한 형상의 덩플이 관찰되었다(Fig. 9). 880°C에서 덩플의 흰 색 경계가 가장 선명하였으며 덩플이 선명할수록 연성을 띄는데, 이는 Fig. 7에서 나타난 연신을 결과값과 일치하였다. 또한 용체화 처리 온도가 상승함에 따라 덩플의 크기도 함께 증가하는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 열처리 온도의 상승에 따라 결정립이 성장하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 β -변태점 아래의 다양한 온도와 유지시간의 공정조건으로 용체화 처리를 수행함으로써 나타나는 기계적 특성의 변화를 미세조직학적 상 구성과 연계하여 분석하였다.

1. Ti-6Al-4V 합금을 880°C에서 열처리 한 후 급랭한 시편의 경도 및 상온 인장특성은 유지 시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 결정립 성장에 의한 연화효과뿐만 아니라, β 상의 연한 α'' 마르텐사이트상으로의 변태에 의한 연화효과가 추가되었기 때문이다.

2. 920°C, 960°C의 경우 경도 및 상온인장 특성이 모두 증가하였으며, 이것은 β 상 내부에 V-rich 영역이 감소하게 되어 경한 α' 마르텐사이트상이 생성되었기 때문이다. 또한 β -변태점 근처로 온도가 상승할수록 α' 상의 부피분율이 증가하여 강도의 상승을 야기한다.

3. 900°C 이상의 온도에서 열처리 유지시간이 증가함에 따라 결정립성장상에 의한 연화효과가 발생하지만, 준안정 β 상의 α' 마르텐사이트로의 변태량 증가로 인한 강화효과가 상호 보완되면서 전체적인 기계적 특성의 변화는 크게 나타나지 않았다.

4. Ti-6Al-4V 합금의 열처리조건을 최적화하기 위해 미세조직학적 특성과 연계하여 물성을 분석한 결과, $\alpha+\beta$ 영역인 920~960°C, 40분 이내의 조건에서 기계적 특성과 미세조직학적 특성을 효과적으로 제어할 수 있었다.

후 기

본 연구논문은 2016년도 순천대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Matthew J. Donachie, Jr. : Titanium A Technical Guide, 2nd ed., ASM international, Materials Park (2000) 55.
2. D. G. Lee, Y. G. Kim, D. H. Nam, S. M. Hur and S. H. Lee : Mater. Sci. Eng., A **391** (2005) 221.
3. G. Lütjering : Mat. Sci. A. **243** (1998) 32.
4. 이용태 : 타이타늄, S&M 미디어(주), 서울시 서초구 (2009) 66.
5. M. A. Imam, and C. M Gilmore : Metall. Trans. A **14** (1983) 233.
6. Y. T. Lee, M. Peters and G. Welsch : Metall. Trans. A **22** (1991) 709.
7. G. Welsch : Materials properties handbook: Titanium alloys, ASM international, Materials Park (1994) 483.
8. D. G. Lee, S. H. Lee, and Y. T. Lee : Mater. Sci. Eng., A **486** (2008) 19.
9. R. C. Picu and A. Majorell : Met. Sci. A. **326** (2002) 306.
10. S. L. Semiatin, S. L. Knisley, P. N. Fagin, F. Zhang and D. R. Barker : Metall. Trans. A **34** (2003) 2377.
11. S. Malinov, P. Markovskiy, W. Sha and Z. Guo : J. Alloys Compd. **314** (2001) 181.