

|||||||
論 文
|||||||

Ti-Nb계 합금의 미세조직 및 경도변화에 미치는 열처리 조건의 영향

이도재[†]·이경구·이광민·황주영

The Effect of the Heat Treatment Conditions on the Microstructure and Hardness of Ti-Nb Alloys

Doh-Jae Lee[†], Kyung-Ku Lee, Kwang-Min Lee and Ju-Young Hwang

Abstract

Ti-3wt.%Nb(α type), Ti-20wt.%Nb($\alpha+\beta$, type) and Ti-40wt.%Nb(β type) alloys were melted by vacuum arc remelting. The specimens were homogenized at 1050°C for 24 hr and were then hot rolled to 50% reduction. Each alloys were solution heat treated at β zone and $\alpha+\beta$, zone after homogenization, and then aged. The microstructural and hardness changes in Ti-Nb alloys with Nb contents were investigated by SEM, XRD and hardness tester. The microstructural change from equiaxed to acicular and the increase of β phase in Ti-Nb alloys were obtained when the Nb content increased. The higher hardness value of $\alpha+\beta$ type alloy was obtained compared to the other alloys. (Received July 28, 2003)

Key words : VAR, Ti-Nb, Widmanstätten, Biomaterial

1. 서 론

Ti 합금은 상의 종류와 합금원소의 함량에 따라 α 형, $\alpha+\beta$ 형, β 형 합금으로 구분하며 Al, Sn, Ga 등이 첨가된 α 형 Ti 합금은 β 형 Ti 합금에 비해 용접성, 내식성, 고온 creep 저항성 등이 우수하나 강도나 인성이 약한 것으로 알려져 있다[1,2]. $\alpha+\beta$ 형 Ti 합금은 α 안정화 원소와 β 상 영역을 확대시키는 Mo, V, Nb, Ta을 동시에 첨가하여 그 상을 얻을 수 있으며 이 합금은 고온강도, 소성가공, 용접성 및 주조성이 우수하고, 널리 쓰이는 대표적인 합금의 예로 Ti-6Al-4V을 들 수 있다[3]. 또한 β 형 Ti 합금은 α 형과 비교하여 탄성률이 낮고, 인성과 피로강도가 우수하며, 비교적 낮은 온도에 단조가공이 가능하고, 가공 열처리에 의해 조직제어가 가능하며 우수한 내식성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[4].

근래에 Ti 합금에 대한 생체재료로서의 적합성이 알려지면서 골절된 뼈의 접합이나 손상된 무릎의 인공관

절 및 인공장기, 인공치아 등과 같은 인공대체물에 많은 적용이 진행되고 있다. 그러나 생체재료로 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V합금의 경우 V이 세포독성 및 발암성 문제, Al이 알츠하이머형 치매와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되었으며[5], V의 유해성과 Al의 신경계 독성 가능성에 대한 문제점이 제기되었다[6,7].

국내에서 사용되는 생체용 Ti 및 Ti 합금의 경우 용해, 주조, 가공이 어려워 소재를 전량 수입하여 부품들을 일부 가공하여 사용하는 단계이며, 일부 대학의 Ti 연구 또한 기존의 Ti-6Al-4V 합금에 열처리를 통한 조직 변화 및 기계적 성질에 대한 연구나 Ti에 수산화 아파타이트를 이용한 표면개질로 골과의 결합력을 증진시키고자 하는 연구가 주로 진행되고 있으며, β 안정화 원소를 이용한 Ti 합금의 연구는 거의 되어 있지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 생체용 Ti 합금의 제조를 위한 기초 연구로서 소모성 아크 용해법을 이용하여 제조된 Ti-Nb계 합금의 열처리 조건에 따른 미세조직 및

전남대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Chonnam National University)

[†]E-mail : djlee@chonnam.ac.kr

경도 특성을 분석하였다. Nb의 첨가는 3wt%, 20wt%, 40wt%로하여 α , $\alpha+\beta$, β 형 합금을 제조하였으며, 용체화 처리후 시효에 따른 경도 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

합금 제조를 위한 주성분인 Ti는 ASTM grade 2급을 사용하였으며 첨가원소인 Nb은 분말형태로 하여 사용하였다. 시편 표면에 존재하는 산화피막과 불순물을 제거하여 불순물의 영향을 최소화하고자 하였다. 합금의 제조는 상태도를 이용하여 α 형 Ti-3wt.%Nb, $\alpha+\beta$ 형 Ti-20wt.%Nb 및 β 형 Ti-40wt.%Nb 시편을 설계, 제조하여 각 조성에 대한 성질 차이를 비교, 분석하였다.

합금의 제조는 각각의 조성을 무게 비(wt%)로 칭량한 후 수냉동(Cu) 하스(hearth)에 장입하여 10^{-5} torr의 진공분위기를 형성한 후 정제된 아르곤 가스를 챔버에 충전하고, 다시 진공을 유지하는 방법으로 챔버내의 분위기를 Ar가스 분위기로 하였다. 또한 챔버 내에 존재하는 산소를 최소화하기 위하여 합금 용해 시 시료를 용해하기 전에 스펀지 상 Ti을 용해하여 잔존하는 산소량을 최소화하였다. 그 후 합금의 균질한 용해를 위하여 텅스텐 전극봉을 회전시켜 시편을 8회 반복하여 용해하고 용해 전과 후의 중량차가 0.1% 이하인 것만을 선택하여 실험을 수행하였다. 이와 같이 제조된 시료는 다시 소모성 아크 용해법을 사용하여 용해하여 직경 15 ϕ mm의 시료를 제조하였다. 제조된 Ti 합금은 ICP분석과 EDS분석을 통해 화학적 성분비를 조사하였으며 분석 결과 특정 성분의 손실은 거의 없는 것으로 나타났다.

제조된 시편은 아르곤 분위기 하의 관상로에 장입하여 1050 $^{\circ}$ C에서 24시간 균질화 열처리를 실시한 후 열간 압연시 발생될 수 있는 산화에 대한 문제점을 방지하기 위해 스테인레스 강관에 진공 봉입 하였다. 봉입된 각 시료는 주조조직 및 결함을 제거하고 가공에 따른 미세조직의 변화를 살펴보기 위해 β 변태점보다 100 $^{\circ}$ C 높은 온도에서 압연율 50%를 목표로 열간압연하였고, 마무리 처리는 β 변태점보다 100 $^{\circ}$ C 낮은 온도에서 압연하였다. 가공 중 발생할 수 있는 잔류응력은 β 변태점보다 300 $^{\circ}$ C 낮은 온도에서 60분간 유지하여 제거하였으며, 응력제거 된 시편은 방전가공 및 고속 연마기를 이용하여 실험하고자 하는 규격에 맞게

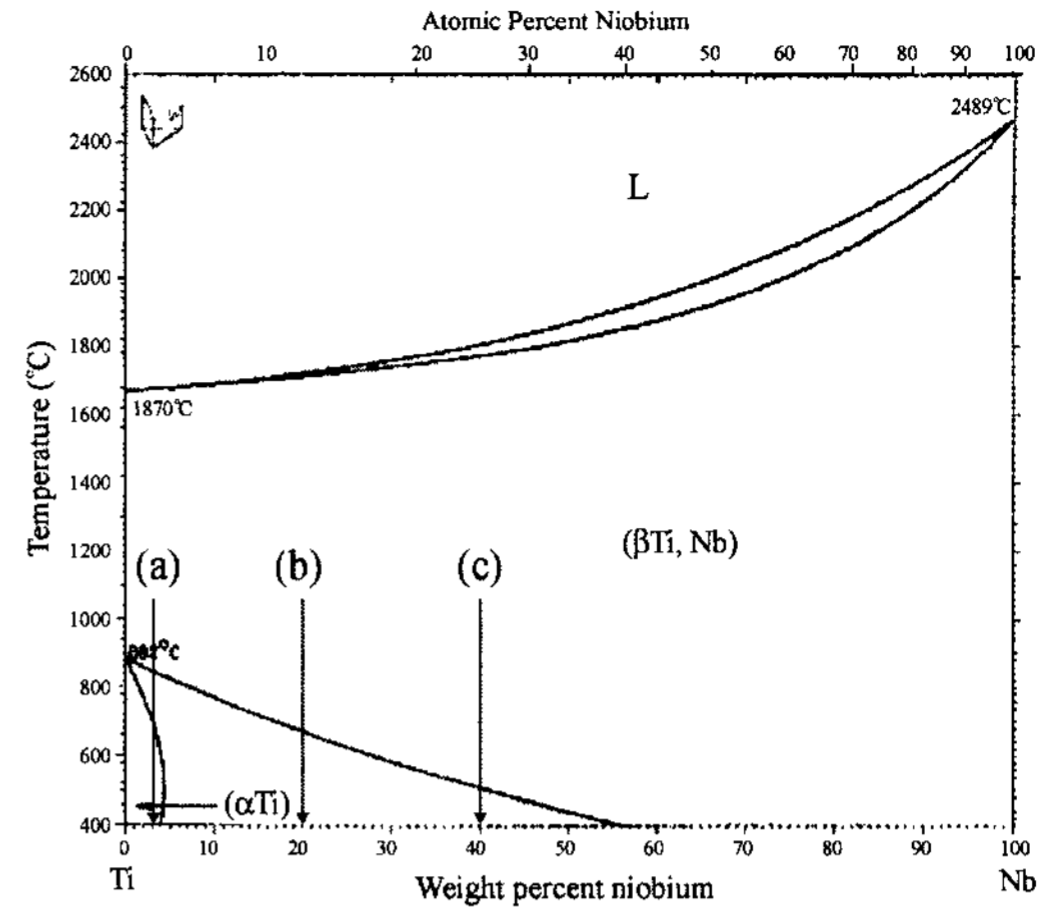


Fig. 1. Binary phase diagram of Ti-Nb system. (a) Ti-3Nb, (b) Ti-20Nb and (c) Ti-40Nb(wt.%).

절단하였다.

β 영역과 $\alpha+\beta$ 영역에서의 열처리에 따른 특성변화를 조사하기 위해 Fig. 1의 상태도를 이용하여 β 영역은 시편 모두를 1050 $^{\circ}$ C에서 2시간동안 용체화 처리를 하였으며, $\alpha+\beta$ 영역은 CP Ti과 Ti-3Nb합금은 820 $^{\circ}$ C에서 Ti-20Nb합금은 630 $^{\circ}$ C로 Ti-40Nb합금은 430 $^{\circ}$ C에서 2시간 동안 각각 용체화 처리한 후 수행하였다. 시효처리는 CP Ti과 Ti-3Nb합금은 600 $^{\circ}$ C에서 그 외 합금들은 400 $^{\circ}$ C에서 4시간 유지한 후 공랭 하였으며 시편을 석영관에 넣어 진공상태를 유지하도록 하였다.

미세조직 관찰을 위한 시험편은 고속 정밀절단기를 이용하여 적당한 크기로 절단한 후 2000 grit의 SiC 연마지까지 단계적으로 습식 연마하고 최종적으로 1 μ m의 알루미나 분말로 마무리 연마한 후 초음파 세척을 하였다. 준비한 시편은 2 ml HF+3 ml HCl+5 ml HNO₃+190 ml H₂O Keller's 용액으로 에칭한 후 광학 현미경(Olympus Co., PMG-3)과 SEM을 이용하여 기조직의 변화를 관찰하였으며 각 시료에 대한 생성 상과 성분변화를 확인하기 위하여 EDS, XRD 분석을 하였다. 경도시험은 록크웰 경도시험기를 사용하여 A 스케일로 실시하였으며 각 시편의 경도는 10회 이상 측정된 후 최고 및 최저 값을 제외한 나머지 값을 평균한 것으로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Ti합금에 Nb첨가량을 달리하여 아크 용해

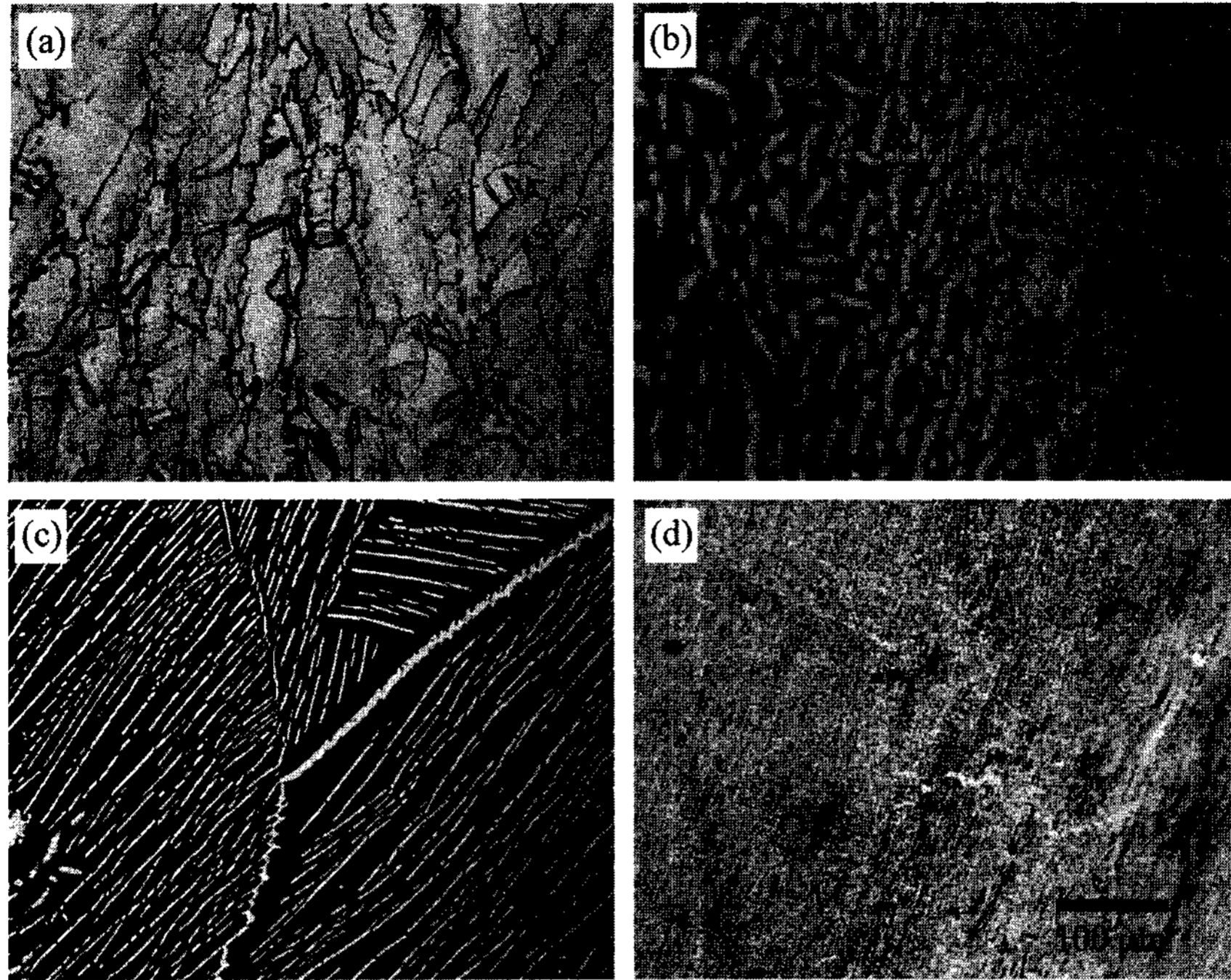


Fig. 2. Optical microstructures of Ti alloys. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

법에 의해 합금을 제조한 후 균질화 열처리를 실시한 후, 압연율 50%로 진공 열간 압연한 시료의 미세조직을 관찰한 사진이다. 균질화 열처리는 1050°C에서 24시간 동안 실시하였으며, 열간압연 후 β변태점 300°C 이하에서 응력제거 열처리를 실시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Nb함량의 증가에 따라 백색의 상이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 3wt.% Nb까지는 백색의 등축상이 나타나며, 20wt.%이상이 되면서 침상으로 변화함을 알 수 있다. Fig. 2a는 cp Ti의 미세조직 사진으로 시편전체에 걸쳐 등축형의 α상을 관찰할 수 있으며 (b)는 Nb을 3%첨가한 경우로 등축상의 α크기가 작아지면서 α상 사이에 불규칙한 상이 석출되었음을 알 수 있다. 이와 같은 흑색상은 β상으로 판단되며, 이러한 β상은 Nb 함량이 증가한 (c)의 경우 더 많이 나타났음을 알 수 있고 40wt.%가 첨가된 (d)의 경우 조대한 β단상으로 인해 상을 구분하기 어려우나 Nb-Ti계 합금의 미세조직과 유사한 형태를 보였다[8]. Fig. 2에서 Nb 첨가량에 따라 침상의 α상 조직이 나타나고, β상의 부피분율도 상대적으로 증가함을 알 수 있는데, 이는 Nb이 Ti합금에 β안정화 원소로 작용하여 β로부터 α의 석출온도를 낮추어서 β상의 잔류를 용이하게 한 결과로 생각된다. 일반적으로 Ti 합금의 미

세조직 상에서 침상인 α상의 크기와 폭, α상과 β상의 부피분율은 재료의 강도와 연성 등 물성에 영향을 미치며, 침상 α상의 크기가 작을수록 인장 강도와 피로특성이 우수하고, β상이 α결정립 계면에서 void의 형성에 의한 파괴를 저지하여 creep 강도, 파괴인성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[9,10].

Fig. 3은 광학현미경으로 관찰한 Fig. 2의 시편들을 SEM 관찰한 사진이며 Table 1은 EDS 분석 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 전반적으로 합금에 첨가한 Nb 함량이 높을수록 광학현미경 상에서 나타난 β상의 증가를 알 수 있다. Ti-20Nb합금의 경우, 침상의 α상(p.7, 8)에서는 Ti 함량이 89.54~90.18%를 나타냈으나 β상(p.9, 10)에서는 76.82~77.16%로 침상의 α상은 Ti-rich를 보였으며, Nb 함량은 침상 α상에서는 9.82~10.46%를 나타냈으나 β상(p.9, 10)에서는 22.84~23.18%로 β상은 Nb-rich로 이루어진 것을 확인할 수 있었다. Ti-40Nb합금의 경우에는 기지 내(p.11, 12)에 다량의 Nb이 광범위하게 함유되어 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 Nb첨가량을 달리하여 제조된 Ti-Nb계 합금의 상 분석을 위한 XRD 결과이며 열간압연 된 시료를 응력제거 열처리한 후 분석하였다. 그림에서 Nb의

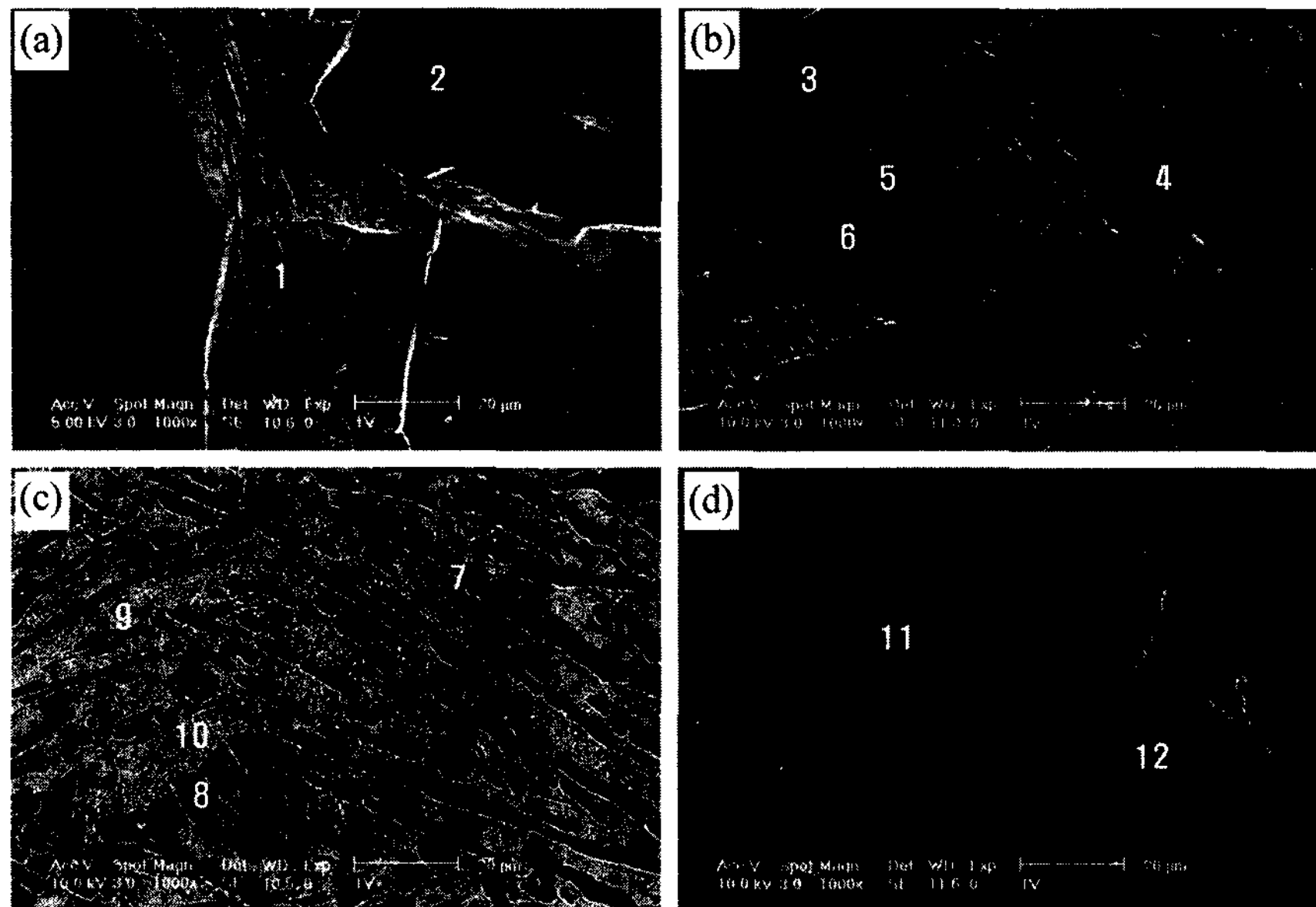


Fig. 3. SEM micrographs of Ti alloys. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

Table 1. The result of EDS analysis on the area shown in Fig. 3.

Point	Ti(wt.%)	Nb(wt.%)	Phase	Alloy
1	bal.	-	α	Ti
2	bal.	-		
3	bal.	1.88	α	Ti-3wt.%Nb
4	bal.	2.19		
5	bal.	7.64	β	Ti-20wt.%Nb
6	bal.	8.46		
7	bal.	9.82	α	Ti-20wt.%Nb
8	bal.	10.46		
9	bal.	22.84	β	Ti-40wt.%Nb
10	bal.	23.18		
11	bal.	38.74	β	Ti-40wt.%Nb
12	bal.	37.82		

첨가량에 따라 β 상이 증가함을 알 수 있으며, 40%Nb가 첨가된 경우에는 대부분 β 상의 피크만이 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 Nb첨가에 따른 β 상의 증가는 Nb이 Ti의 β 상 안정화 원소이기 때문이며 상기의 결과는 미세조직과 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5는 Ti-Nb계 합금을 열간 압연 후 석영관에 시편을 장입하고 β 영역 온도인 1050°C에서 2시간 동안 유지한 후 수중에 급랭시켜 용체화시킨 시료의 미세조직이다. Fig. 5(a, b)의 경우 Fig. 2(a, b)에서 나타난 등축상의 형상이 사라지고 침상의 미세조직이 나

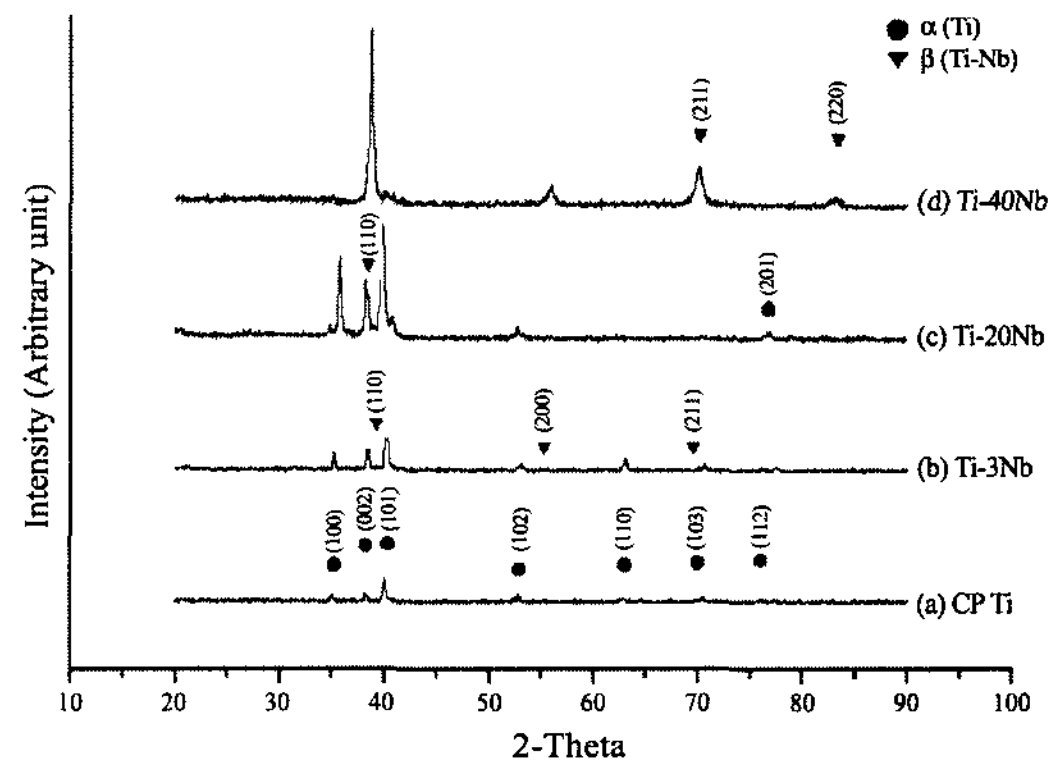


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of Ti alloys with Nb contents.

타남을 알 수 있다. 이러한 미세조직 상에서 침상으로 나타난 부분은 판상의 α 상이 특정 방향으로 배열된 Widmanstätten조직으로 알려져 있으며[11], 이러한 미세조직은 균질화 및 용체화 열처리에 의해 형성되는 α 형 Ti합금의 전형적인 미세조직 형태이다. Fig. 5(b)의 경우에도 α -Ti합금의 전형적인 미세조직인 침상이 나타나고 있으며, (c)의 경우 Nb의 첨가량이 증가함에 따라 판상의 형상이 사라지고 β 상의 기지에 α 상이 침상으로 성장하였음을 알 수 있다. 이러한 미세조직은 $\alpha+\beta$ 형 합금을 β 영역이상에서 급랭하여 $\alpha+\beta$ 영역을 빠르게 통과할 경우에 나타나는 것으로 bcc구조

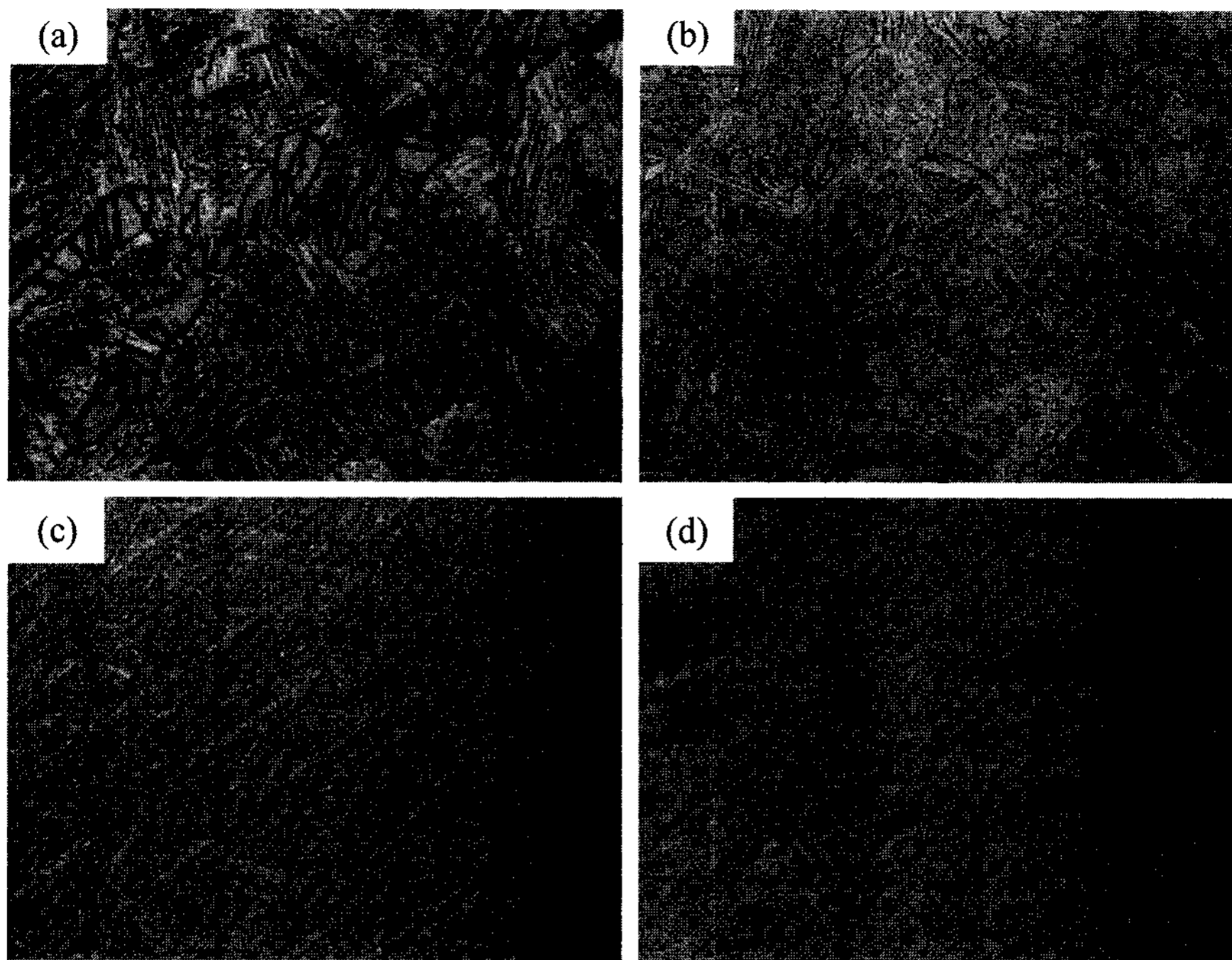


Fig. 5. Optical microstructures of Ti alloys with solution treatment at 1050°C for 2hr. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

의 β 로부터 복잡한 전단기구(shear mechanism)에 의하여 hcp와 유사한 마르텐사이트 상으로 빠르게 변태하기 때문으로 보고되고 있다[12]. (d)의 경우에는 단상을 보였으며 이는 Terlinde가 주장한[13] β 형 합금을 β 영역에서 용체화 처리시 조대한 등축형의 상이 나타난다는 것과 일치하였다. Ti합금의 미세조직은 열처리와 제조과정에 의해 크게 영향을 받으며, 침상이나 층상의 α 상은 냉각시 β 로부터 생성된 가장 일반적인 변태이며, β 기지보다 먼저 결정학적 면에서 핵생성과 성장이 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 6은 $\alpha+\beta$ 상 영역에서 용체화한 조직사진을 보인 것으로 Ti와 Ti-3Nb합금은 820°C, Ti-20Nb합금 630°C, Ti-40Nb합금은 430°C에서 2시간 동안 용체화 처리 후 수랭하였다. β 영역에서 용체화 처리한 Fig. 5보다 결정립들이 성장된 경향을 나타내므로 용체화처리 온도가 미세조직에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)는 Ti의 미세조직으로 Fig. 2(a)에 비해 등축상의 크기가 성장하였으며, (b)의 경우에도 등축상의 결정입자가 더 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 $\alpha+\beta$ 구역에서 열처리가 이루어짐으로서 α 상의 성장이 안정되게 이루어져 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 6의 시료를 β 상보다 200°C 낮은 온도에서 4시간 동안 시효처리 한 미세조직으로 용체화 처리에서와 미세조직상의 차이는 나타나지 않았다. 이와 같은 이유는 Ti-3Nb합금은 near- α 형 Ti합금에 가까우며 대부분의 조직 변화는 β 상의 변태에 의해 이루어지기 때문으로 판단된다. Ti-20Nb합금의 미세조직인 Fig. 7(c)는 basket weave구조로[14] 판상의 widmanstätten이 발달된 구조를 나타내고 있는데, 일반적으로 이러한 현상은 α 상의 핵생성과 성장속도는 빨리 일어나므로 냉각속도가 느리거나 β 안정화 원소를 첨가하여 상온까지 냉각할 때 widmanstätten α 상이 α 상과 β 상 사이에 동일한 우선 결정 방위면을 따라 핵생성과 성장에 의해 colony packet가 형성된 것으로 알려져 있다[15]. Fig. 7(d)는 Ti-40Nb합금의 조직으로 용체화 처리한 조직과 유사한 형태로 조대한 β 상의 결정구조를 나타내었다.

Fig. 8은 $\alpha+\beta$ 영역에서 시효 처리한 시편을 SEM을 통하여 미세조직을 관찰한 것으로 Fig. 8(a)의 CP Ti 경우 조대한 α 상에 침상의 α 상이 혼합된 조직을 볼 수 있다. Fig. 8(b)의 Ti-3Nb합금의 경우에는 등축형의 α 상과 침상의 α 상 구조를, Ti-20Nb합금은 판상

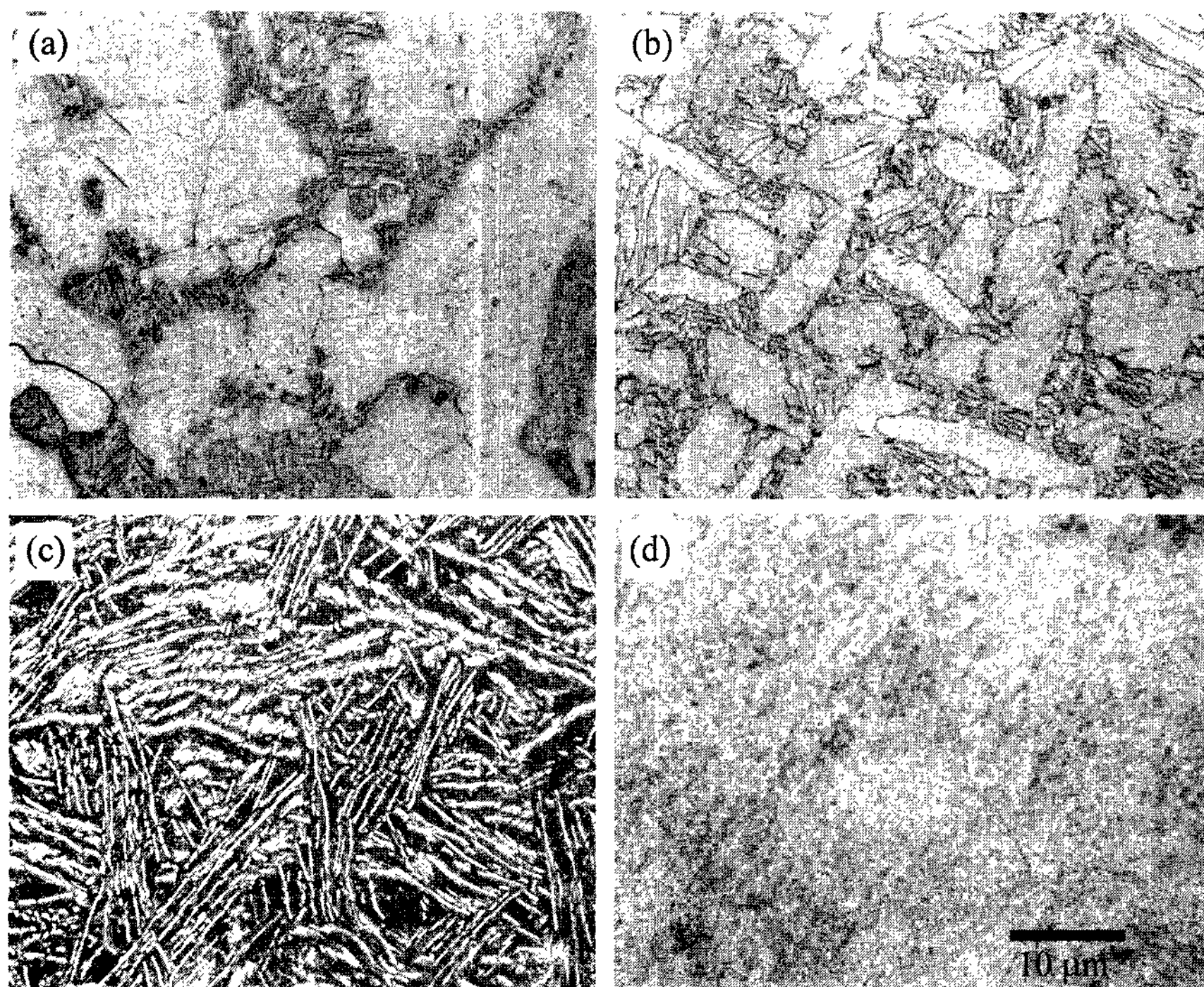


Fig. 6. Optical microstructures of Ti alloys with solution treatment at $\alpha+\beta$ temperature region for 2hr. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

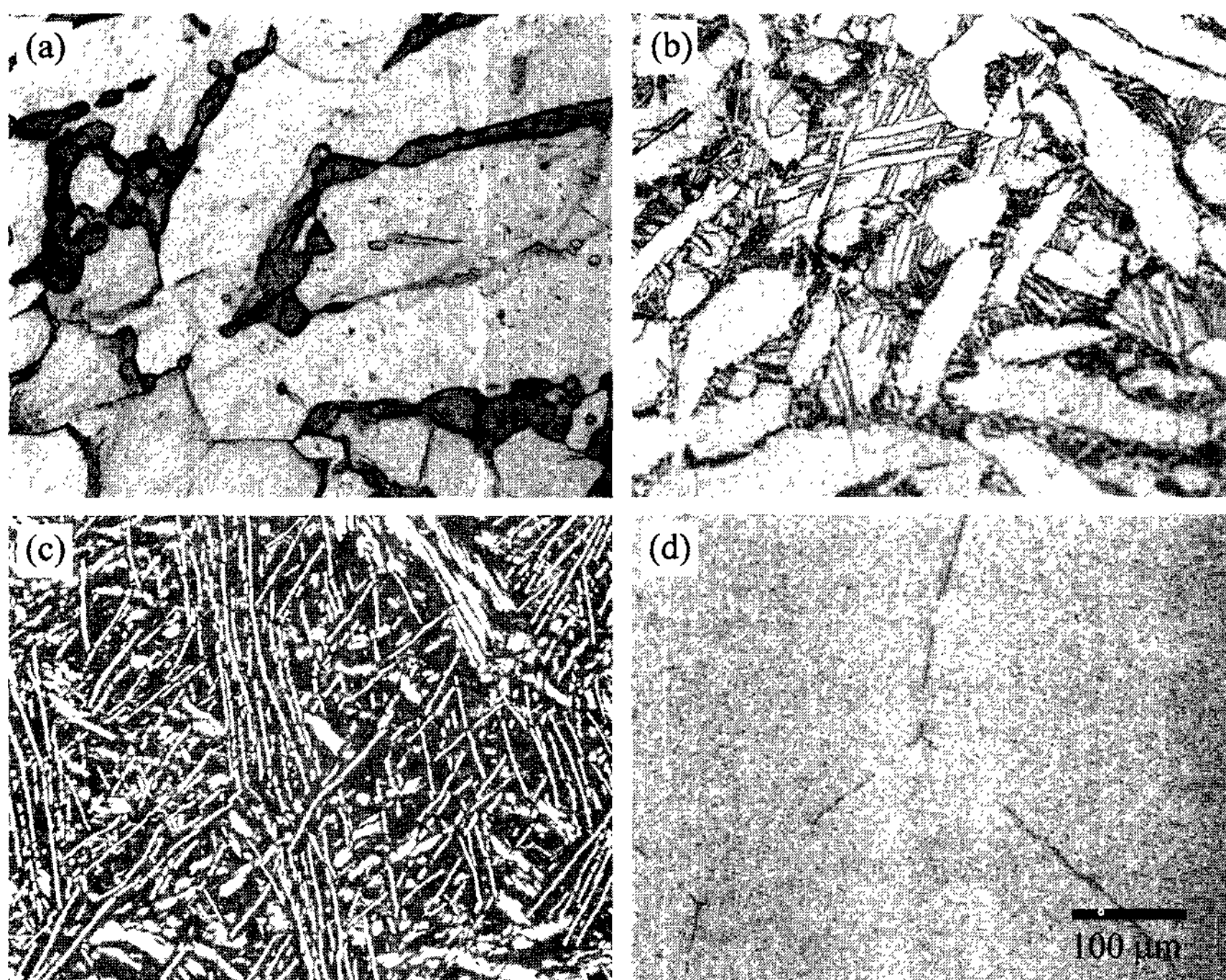


Fig. 7. Optical microstructures of Ti alloys with aging treatment. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

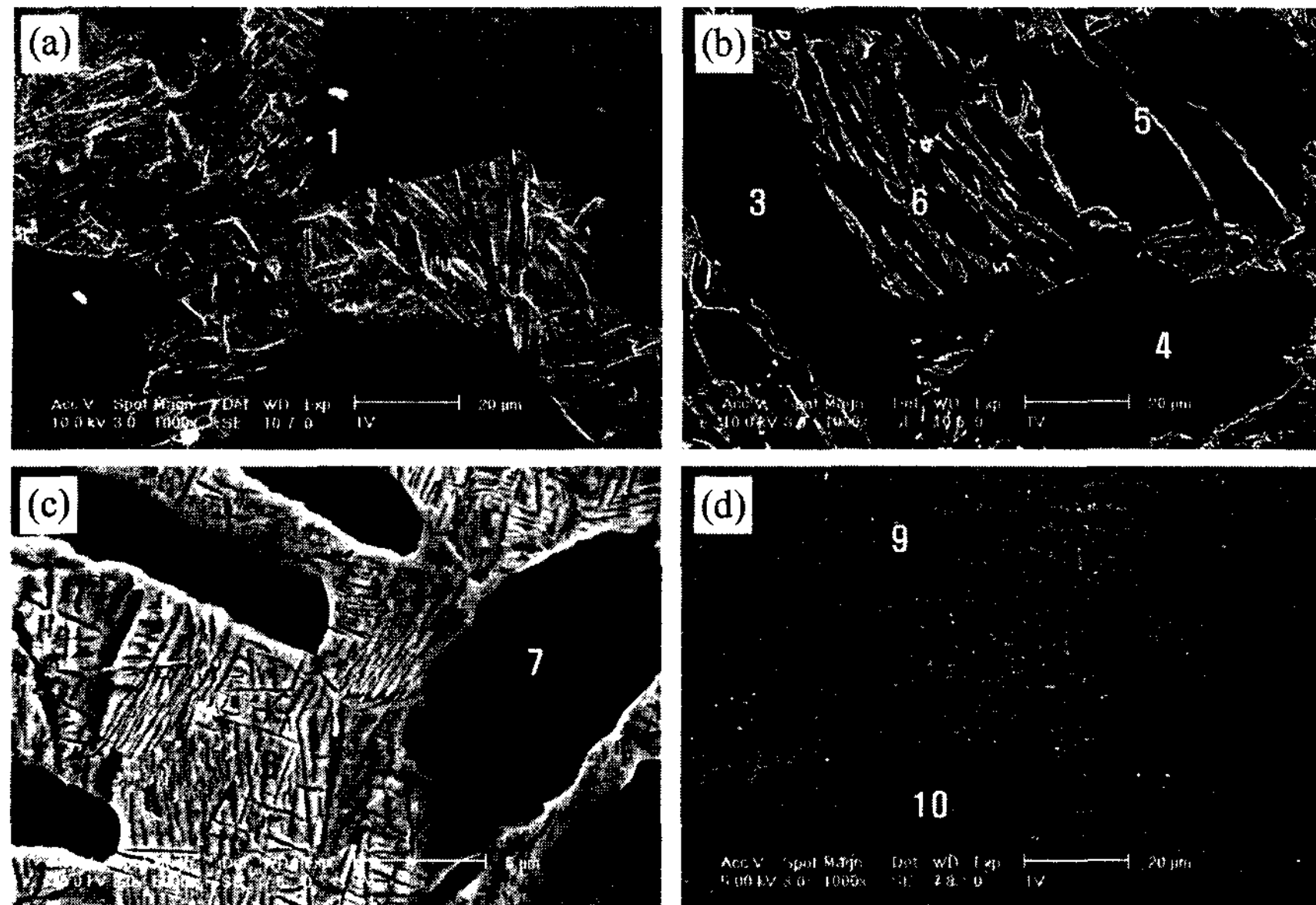


Fig. 8. SEM micrographs of Ti alloys with aging treatment. (a) CP Ti, (b) Ti-3Nb, (c) Ti-20Nb and (d) Ti-40Nb(wt.%).

의 α 상과 β 상이 혼합한 형태를 이루고 있으며 Ti-40Nb합금은 β 상 변태로 α' 의 석출이 가능하며 이는 β 변태 온도 직하인 $\alpha+\beta$ 영역에서 급랭 시에 잔류하고 있던 bcc 결정구조의 초기 β 상이 과포화 된 hcp 결정구조의 α' 상으로 변태를 일으키는 것으로 알려져 있다[15]. Table 2는 $\alpha+\beta$ 영역 용체화처리 한 후 시효 처리한 시편의 EDS 분석결과로 Ti-3Nb합금의 등축형 α 상(point 3)은 Ti-rich로 나타났으며 침상조직(point 5)은 Nb-rich 현상을 보였다. Ti-20Nb합금의 경우에는 α 상(point 7)은 Ti-rich이며 β 상(point 8)은 Nb-rich로 이루어진 것을 EDS를 통하여 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 Nb 첨가량과 열처리조건에 따른 Ti-Nb계

Table 2. The result of EDS analysis on the area shown in Fig. 8.

Point	Ti(wt.%)	Nb(wt.%)	Phase	Alloy
1	bal.	-		Ti
2	bal.	-	α	
3	bal.	1.9		Ti-3wt.%Nb
4	bal.	1.14	α	
5	bal.	9.88	α	
6	bal.	9.19		Ti-20wt.%Nb
7	bal.	9.10	α	
8	bal.	23.72	β	Ti-40wt.%Nb
9	bal.	39.79	β	
10	bal.	40.55		

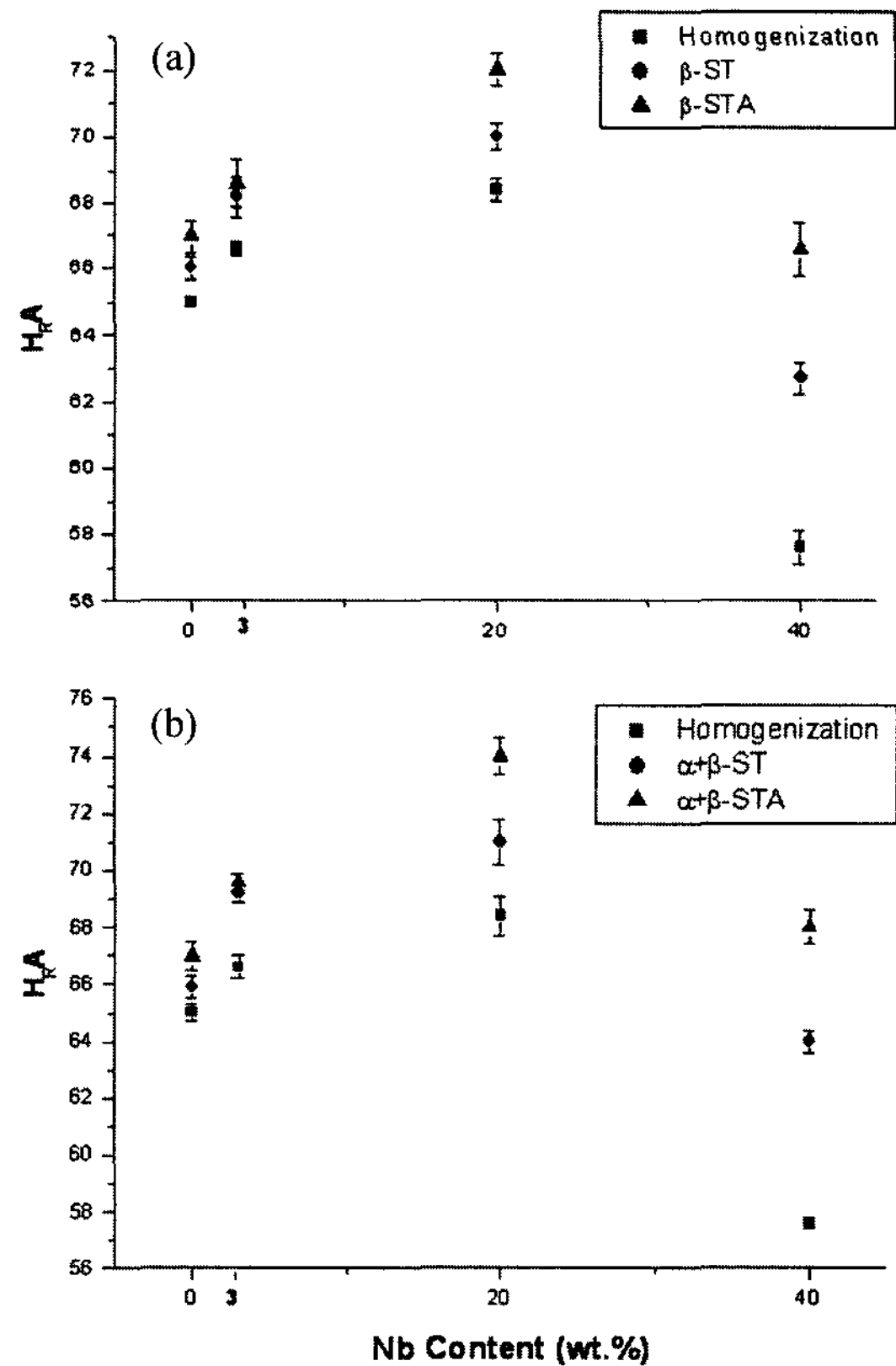


Fig. 9. The hardness variation of Ti alloys with (a) β and (b) $\alpha+\beta$ region heat-treatment condition.

합금의 경도를 측정한 것으로 $\alpha+\beta$ 형 Ti-20Nb합금이 가장 높은 경도를 나타내며 β 형 Ti합금인 Ti-40Nb합금이 가장 낮은 경도를 보이고 CP Ti과 Ti-3Nb합금의 경도 차이는 미약하게 나타났다. 용체화 영역조건(β , $\alpha+\beta$ 영역)을 달리할 경우 경도차이는 미미하게 나타났는데 이러한 현상은 β 결정립 조대화에 영향을 미치는 온도와 시간이 경도에 미치는 것이 낮은 것으로 알려진 결과와 일치하는 경향을 보였다[15]. 경도는 전 시편에 걸쳐 균질화처리, 용체화처리, 시효처리 순으로 증가하는 경향을 보였다. CP Ti과 Ti-3Nb합금의 경우 열처리조건에 따른 경도 변화는 미미하나 Nb을 20% 첨가하였을 경우 용체화 처리 후 시효처리 하였을 때 높은 경도를 보였는데 이러한 현상은 Nb의 고용강화 효과로서 Ti의 기지에 합금원소가 첨가되어 고용되면서 용질원자 주위의 결정격자 탄성적 스트레인(elastic strain)에 의해 전위의 이동을 억제함에 따라 금속이 강화되었기 때문으로 생각된다[16,17]. 이는 시효처리에 의한 과포화 고용체인 상들이 석출되면서 고용되어있던 용질원자들이 전위나 결함부위에 미세하게 분산강화 되었거나 β 상이 α 상으로 석출되면서 β 상의 감소에 따른 부피분율(volume fraction)의 변화에 기인한 것으로 알려진 내용과 일치하는 경향이다.

4. 결 론

기존 생체재료로 사용되고 있는 Ti에 β 안정화 원소인 Nb을 첨가하여 α 형(Ti-3wt.%Nb), $\alpha+\beta$ 형(Ti-20wt.%Nb), β 형(Ti-40wt.%Nb) Ti-Nb계 합금을 제조하여 상변화와 열처리 조건이 Ti-Nb계 합금의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Ti에 Nb가 첨가되면 첨가량에 따라 β 상의 형성이 진행되었으며, Ti-40wt.%Nb의 경우 미세 조직상에서 α 의 흔적을 찾을 수가 없었다.

2) Ti-Nb계 합금을 β 영역 온도인 1050°C에서 2시간 동안 유지한 후 수중에 급랭시켜 용체화 시킨 결과 균질화 열처리에 따른 등축상의 형상이 사라지고 침상의 미세조직이 나타남을 알 수 있었다.

3) Nb 첨가에 따른 경도특성은 $\alpha+\beta$ 형 합금인 Ti-20wt.%Nb 조성에서 가장 우수하였으며, β 형 합금으로 되면서 경도 감소가 나타났다.

4) 열처리에 따른 경도변화는 균질화처리, 용체화처

리, 시효처리 순으로 증가하는 경향을 보였다

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. J. Prendergast : J. Biomed Eng., 12(1990), 379.
- [2] R. Boyer, G. Welsch, E. W. Collings : Materials properties of Handbook, Titanium alloys, ASMI (1994).
- [3] D. M. Brunette, P. Tengvall, M. Textor, P. Thomsen : Titanium in medicine, Engineering materials, Springer (2001).
- [4] E. W. Collings : The physical metallurgy of Titanium alloys, ASM (1986).
- [5] Okazaki Y, Kyo K, Ito Y, Tateishi T : J. Japan Inst. Metals, "Effect of Mo and Pd on corrosion resistance of V-free titanium alloys for medical implantation", 10 (1995), 1061.
- [6] T. Ahmed, M. Long, J. Silvestri, C. Ruiz, H. J. Rack : Titanium 95 science and technology, 2 (1995), 1760.
- [7] S. G. Steinemann : Evaluation of Biomaterials, "Corrosion of Surgical Implants in-vivo and on-vitro Tests", John Wiley & Sons Ltd. 1 (1980).
- [8] S. M. Allameh, R. W. Hayes, M. Li, E. A. Loria, D. J. Srolovitz, W. O. Soboyejo : Materials science and engineering, "Microstructure and mechanical properties of β Nb-Ti based alloy", A328 (2002), 122.
- [9] M. A. Daeubler, D. Helm, G. Lutjering : Titanium 95 Science and Technology, (1995), 709.
- [10] H. J. Cho, J. H. Lee : Material Research, "Microstructure and tensile characteristics of Ti-6Al-4V alloy by double solution treatment", 4,6 (1994), 626.
- [11] Y. U. Kim et al., : J. Korean Foundrymen's Society, 18, 5 (1998), 76.
- [12] H. J. Cho, J. H. Lee : K. J. Material Research, 4, 6 (1994), 626.
- [13] G. Terlinde, G. Fischer : Titanium 95, Science and Technology, (1995), 2177.
- [14] Matthew J. Donachie, Jr. : Titanium a technical guide 2ed., ASMI (2000).
- [15] Dujovne A. R. et al. : The journal of arthroplasty, "Mechanical compatibility of noncemented hip prostheses with the human femur", 8 (1993), 7.
- [16] E. Kobayashi, H. Doi, T. Yoneyama, H. Hamanaka : J. of materials science, materials in medicine, "Influence of aging heat treatment on mechanical properties of biomedical Ti-Zr based ternary alloys containing niobium", 9 (1998), 625.
- [17] Chiaki Ouchi, Hideaki Fukai, Kohei Hasegawa : Materials science and engineering, "Microstructural characteristics and unique properties obtained by solution treating or aging in β -rich α/β titanium alloy", A263(1999), 132.