



# Fe 와 Cr 첨가량이 $\beta$ 타이타늄 합금의 $\omega$ 상 형성에 미치는 영향

박선영\*, 천영범

한국원자력연구원 재료안전기술연구부

## Effect of Fe and Cr on $\omega$ Phase Formation in Metastable $\beta$ -Ti Alloy

Sun-Young Park<sup>\*</sup>, Young-Bum Chun

Materials Safety Technology Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea

This study investigated the effects of Fe and Cr contents on  $\omega$  phase formation and transformation during solution treatment and the subsequent aging process, for which four model alloys with varying Fe and Cr contents but keeping Mo equivalent of  $\sim 12.6$  were prepared by plasma arc melting and fabricated into plates by hot forging followed by hot-rolling. The athermal  $\omega$  phase was observed in all Ti alloys after solution treatment followed by water quenching through XRD and TEM analysis. The largest volume fraction of athermal  $\omega$  phase is formed in Ti alloy with only Fe 4 wt.% among all Ti alloys, leading to the highest Vickers value due to hardening effect  $\omega$  phase. It was found that not only Mo equivalent but also each characteristic of  $\beta$  stabilizing elements should be considered to understand a microstructure evolution and mechanical properties.

**Keywords:** Beta titanium alloy; Aging; Omega phase; Hardness

Received: July 15, 2025

Revised: August 20, 2025

Accepted: August 21, 2025

**\*Corresponding author:**

Sun-Young Park

E-mail: sunyoung@kaeri.re.kr

### 1. Introduction

타이타늄(Ti) 합금은 우수한 인성, 뛰어난 내식성, 경량성, 열적 안정성을 가지고 있어 생체의료기기, 항공우주, 자동차, 해양 분야 등 다양한 분야에서 각광받는 소재로 알려져있다[1-6]. 특히,  $\beta$ -Ti 합금은 낮은 탄성계수, 낮은 밀도, 높은 내식성, 높은 비강도를 나타내 생체용 임플란트 소재 및 다양한 구조용 소재로 활용하고자 하는 연구가 이루어졌다. 지난 수십여년 동안 합금의 강도, 크리프 저항성, 성형성 및 용접성을 향상시키기 위해 V, Nb, Mo, Ta, Fe 등 다양한 합금 원소들을 이용한 합금화 방법에 대해 연구되었다[7-11]. 또한 합금 원소 및 함량 조절에 따라 합금 내의 상 조성, 분율 및 분포뿐만 아니라 상변태 거동을 제어하기 위한 연구가 이루어졌다. 그 중 여러  $\beta$ -Ti 합금에서  $\omega$  상의 형성이 보고되었으며, 이는 합금의 강도 향상 또는 연성에 영향을 미친다고 알려져 있다

[12, 13]. 그러나 강도 증가가  $\omega$  상의 형성에 의한 것인지 또는 고용 원소에 의한 고용 강화 효과인지, 어떤 강화 효과 메커니즘이 지배적인 역할을 하는지에 대해 명확히 규명되지 않았다.

다양한 합금 원소 중 Fe과 Cr은 높은 강화 효과뿐만 아니라 낮은 원가로부터 경제성을 가지고 있어 Ti 합금화 원소 중 효과적인  $\beta$  안정화 원소로 알려져 있다[9, 10, 14-17]. 특히, Fe은 인체 필수 원소로써 알레르기 반응 유발 가능성이 상대적으로 낮아 생체재료로써 높은 적합성으로 인해 치과용 소재로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[17, 18]. Cr은 Ti의 양극 반응성을 조절하여 피막형성 경향을 증가시켜 내식성을 향상시키는 효과가 보고되었다[19]. 그러나 Ti 합금내에서 Fe 또는 Cr 합금원소가  $\omega$  상 형성 또는 변태에 미치는 영향에 대한 연구는 미비하고, 합금화 원소의 증가량에 따른  $\beta$  상의 안정성 및 내식성에만 초점을 맞춘 경우가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는  $\beta$ -Ti 합금 내에서 Fe와 Cr 원소의 함량에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 분석해보고자 한다. 본 연구에서는 상온에서  $\beta$  상을 안정적으로 유지하

<https://doi.org/10.4150/jpm.2025.00220>

© 2025 The Korean Powder Metallurgy & Materials Institute

기 위해 요구되는 Mo 당량(MoE)이 12가 되도록 유지하였으며 Fe 과 Cr의 조성을 변화시켜 합금을 설계하였다. 주조, 단조, 압연 과정을 통해 합금을 판재로 제조하였고, 용체화처리(Solution treatment, ST), 시효 과정에 따른 미세조직을 분석하였으며 비커스 경도 시험을 통해 기계적 특성 변화를 분석하였다.

## 2. Experimental Section

합금원소 Fe과 Cr의 첨가량에 따른 미세구조 및 경도 특성 변화를 확인하기 위해 Ti-8Cr (8Cr), Ti-3Fe-2Cr (3Fe-2Cr), Ti-4Fe (4Fe) 로 합금 설계 및 제조를 진행하였다. Fe과 Cr의 첨가량은 상온에서 β상을 유지하는데 필요한 임계량 이상으로 설정하였으며, 진공아크용해 기법을 이용하여 500g 규모의 버튼형 잉곳으로 제조하였다. 그림 1(a)과 같이 판재 제조를 위해 열간단조, 열간압연 공

정을 진행하였다. 1200℃ 온도에서 예열 한 후 70% 두께 감소율로 열간 단조 하였고, 1100℃ 온도에서 예열 한 후 2 번으로 나누어 50% 두께 감소율로 열간 압연 진행하여 약 4 mm 두께의 판재로 제조하였다. 상온에서도 β상을 유지할 수 있는 용체화처리(Solution Treatment, ST)를 위해 온도 950℃에서 30분 유지 후 수냉 공정을 진행하였고, 광학 현미경을 이용하여 압연 직후와 용체화처리 후의 미세조직을 관찰하였다.

합금의 성분 분석은 ICP-AES와 원소분석기(ONHP, Elatra)를 통해 확인하였고, 미세조직 관찰을 위해 시편을 압연 방향에 수직으로 절단 후 핫마운팅하여 #400~#2400의 SiC paper와 3 μm, 1 μm 다이아몬드 서스펜션을 이용하여 미세 연마하였다. 그 후 85% 증류수(H<sub>2</sub>O) + 5% 불산(HF) + 10% 질산(HNO<sub>3</sub>) 혼합액으로 에칭하였다. 광학현미경 및 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM, JEM 2100F, JEOL)을 이용하여 합금 원소 함

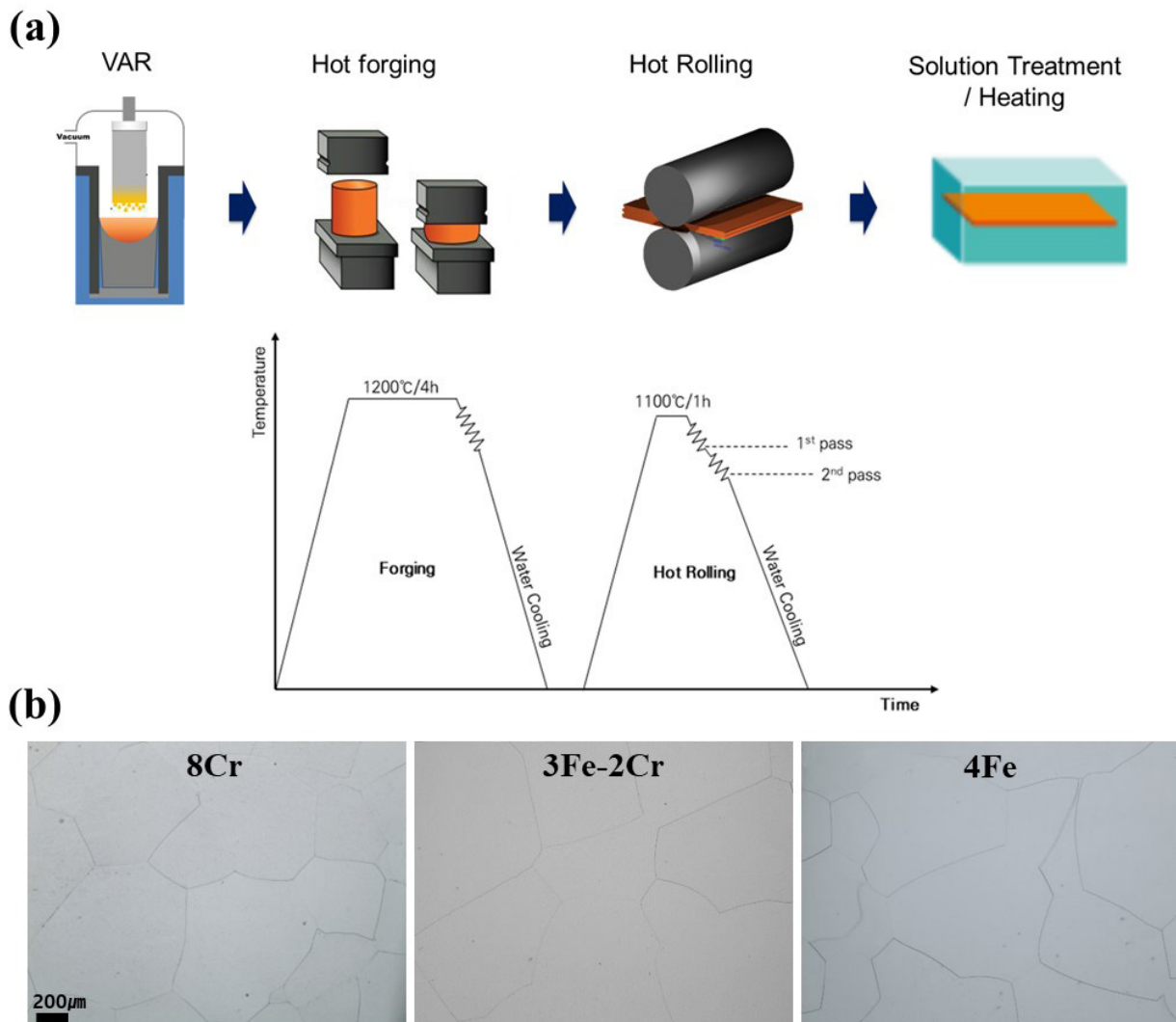


Fig. 1. (a) Schematic illustration of the procedure for fabricating Ti alloy plate (b) Typical optical microscopy images of Ti alloys.

량 변화에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다. 합금의 상 분석은 X선 회절 분석기(X-ray Diffraction, XRD, Empryan, PANalytical)를 통해 확인하였다. 또한, 상온에서의 기계적 특성을 평가하기 위하여 비커스 경도시험(Vickers hardness, HM-200, Mitutoyo)을 진행하였다. 비커스 경도시험은 0.2kgf 하중으로 10초 동안 유지하여 20 번 이상 측정하여 평균값을 도출하였다.

### 3. Results and Discussion

Ti 합금 내 β 상의 안정성은 일반적으로 Mo 당량 (MoE) 지수를 통해 정량화된다[20]. Cardoso와 Ho 등은 상온에서 β 상을 안정적으로 유지하기 위해 요구되는 최소 MoE 값이 약 10임을 보고하였다[3, 21]. 본 연구에서 설계된 Ti 합금은 다음 식 (1)을 기반으로 Fe와 Cr 원소의 중량비를 조절하였고, 표 1과 같이 모든 조성에서 MoE ≈ 12.6이 되도록 설계되었다.

$$\text{MoE (wt. \%)} = \text{Mo} + 0.67\text{V} + 0.44\text{W} + 0.28\text{Nb} + 0.22\text{Ta} + 2.9\text{Fe} + 1.6\text{Cr} + 1.25\text{Ni} + 1.7\text{Mn} \quad (1)$$

따라서, 본 합금계에서 β 상의 안정성은 강력한 β 안정화 원소인 Fe 및 Cr의 충분한 함량과 용체화 공정을 통해 확보되었으며, 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 모든 합금은 ST 후 평균 결정립 크기 약 363 μm의 등축 정립(equiaxed grains) 구조를 갖는 것을 확인하였다. 정확한 상 분석을 위해 측정된 XRD 분석 결과에 따르면, 그림 2와 같이 모든 Ti 합금에서 β 상이 주요 상으로 존재하는 것을 확인하였으며 β 상의 격자상수는 가장 강한 회절 피크인 β (110)에서의 회절 피크 값을 이용하였고, Bragg 및 구조식으로부터  $a = 0.325 \pm 0.6 \text{ nm}$ 로 계산되었다. 이는 ST 후에도 β 상이 안정적으로 유지되고 있음을 나타낸다. 또한, XRD 분석을 통해 β 상 외에 ω 상이 존재함을 알 수 있었고, 피크강도 비율( $\omega(11\bar{2}\bar{2})/\beta(110)$ )을 비교하였을 때 4Fe 합금은 13.75%, 3Fe-2Cr 합금은 1.9%, 8Cr은 4.12%로 4Fe 합금에서 타 조성에 비해 현저히 많은 양의 ω 상이 존재함을 확인할 수 있었다. Ti 합금의 미세조직 및 상 분석을 보다 정밀하게 파악하기 위해 TEM 측정을 진행하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 각 Ti 합금의 단일 결정립에서 취득한 선택영역 전자회절(SAED, Selected-Area Electron Diffraction) 패턴을 통해 ω 상의

존재를 확인하였다[22]. β 상의 [110] zone axis SAED 패턴에서 β의 (112) 면 방향의 1/3 및 2/3 위치에 회절점이 추가로 관찰되며, 이로부터 ω 상이 합금 내에 형성되었음을 알 수 있었다. 강한 회절점(빨간 점선)은 β 상에서 발생하며, 상대적으로 약한 회절점은 서로 다른 결정학적 방향을 갖는 ω 상에 해당한다. 모든 Ti 합금에서 SAED 패턴 내 ω 상에 의한 회절 강도가 명확하게 관찰되었으며, 이는 3Fe-2Cr합금과 8Cr 합금의 XRD 패턴에서 ω 상 피크가 뚜렷하게 나타나지 않았음에도 불구하고 합금 내에 ω 상이 형성되었음을 알 수 있다. 그림 3의 녹색 원으로 표시된 (1100)ω1 회절점으로부터 얻은 DF-TEM 이미지를 통해 β 상 내에 수 나노 크기의 ω 상 입자들이 분포되어 있는 것을 확인하였으며, XRD 패턴 결과 경향과 같이 3Fe-2Cr 및 8Cr 합금에서보다 4Fe 합금에서 ω 상 관찰이 뚜렷하게 나타났다.

합금 원소 및 첨가량에 따른 ω 상 형성이 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 실시한 비커스 경도 시험 결과는 그림 4와 같다. 8Cr 합금은 419±5.8 HV의 가장 낮은 경도 값을 나타냈으며, 3Fe-2Cr 합금은 484±3.8 HV, 4Fe 합금은 541±5.7 HV 경도를 나타냈다. 이로부터 Fe 함량 증가에 따라 합금의 경도 값이 뚜렷하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 선행 연구 중 유사한 베타 안정화도를 갖는 Ti-12Mo 합금의 비커스 경도 값은 약 330HV 정도로 Mo보다 Fe 및 Cr 합금에서 더 높은 경도 증가 효과를 주는 것을 알 수 있다[23]. 이러한 강화 거동에는 2가지 요인이 있는데, 합금화로부터 나타난 고용 강화 효과 (Solid solution hardening,

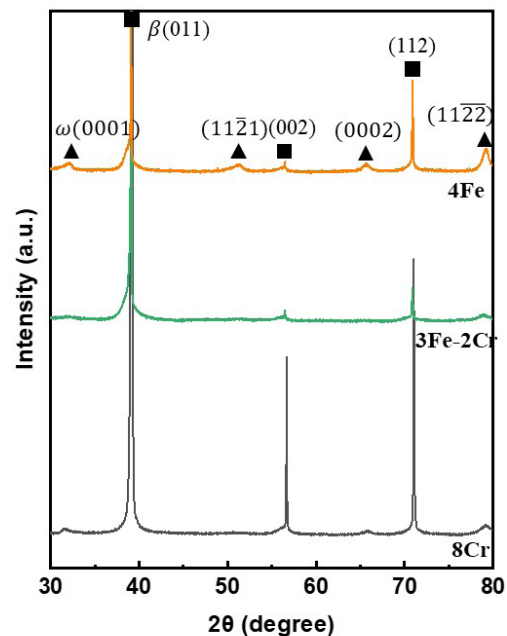


Fig. 2. XRD diffraction profiles of all Ti alloys after ST.

Table 1. Nominal composition (in wt.%) of Ti-Fe-Cr alloys, denoted 8Cr, 3Fe-2Cr, and 4Fe

	Ti	Fe	Cr	O	N	Moeq
Ti-8Cr	Bal.		7.69	0.15	0.001	12.6
Ti-3Fe-2Cr		3.15	2.03	0.16	0.002	12.7
Ti-4Fe		4.29		0.14	0.005	12.6

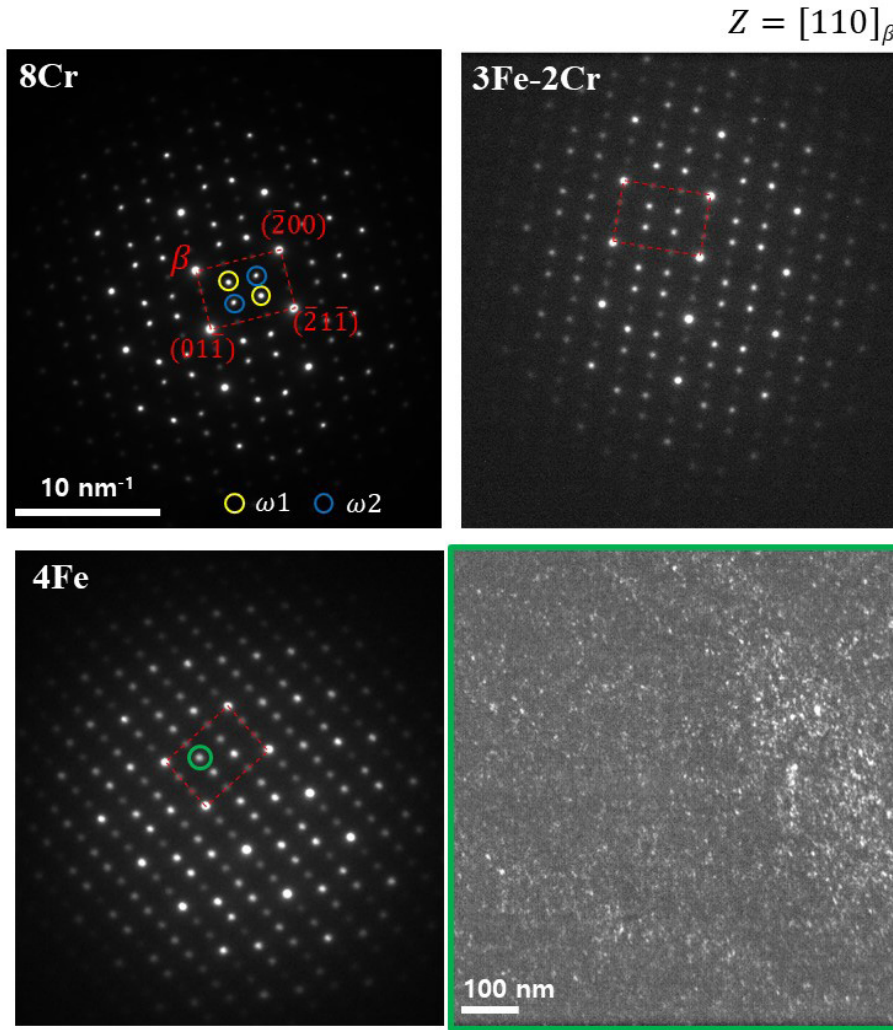


Fig. 3. SAED pattern corresponding  $[110]_{\beta}$  zone axis of Ti alloys after solution-treated at  $950^{\circ}\text{C}$  for 30min followed by water-quenched and dark field image taken using the green circle diffraction spot.

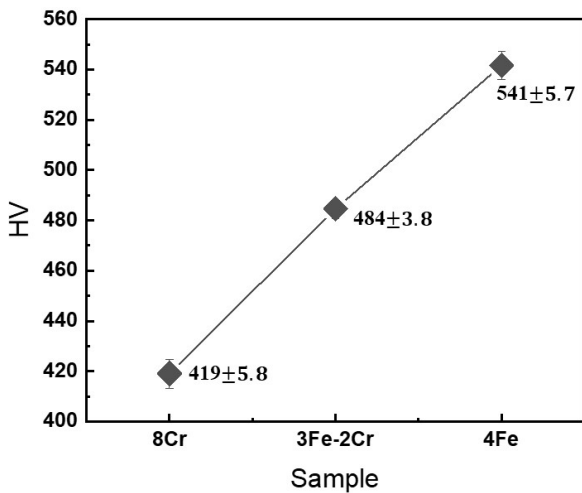


Fig. 4. The Vickers hardness of Ti alloys after ST.

SSH)와  $\omega$  상 석출에 의한 강화 효과가 함께 기여하는 것으로 볼 수 있다. 고용강화효과의 경우, Gypen and Toda-Craballo식을 이용하여 합금화에 따른 수직응력 증가량을 예측해볼 수 있다. 그 결과, 4Fe의 경우 190.9 MPa, 8Cr의 경우 286.4MPa로 8Cr 합금에서 고용강화효과가 크게 작용 할 것으로 예상 할 수 있다. 한편, 앞서 XRD 결과(그림 2)에서 본 것과 같이 4Fe 합금의 XRD 분석에서는 타 합금 대비 강한  $\omega$  상 회절 피크가 나타났으며, 이를 통해 해당 합금에서 더 많은 양의  $\omega$  상이 형성되었음을 알 수 있다. 4Fe 합금에서 가장 높은 비커스 경도를 나타낸 것으로부터 이는  $\omega$  상이  $\beta$ -Ti 합금 강화 효과에 중요한 요인으로 작용한 것을 알 수 있다. 또한  $\beta$  상 안정성 (Mo 당량)이 동일함에도 불구하고 4Fe 합금이 8Cr 합금보다 더 높은  $\omega$  상의 체적 분율(volume fraction)을 갖는 것을 확인하였다.  $\omega$  상 형성에 영향을 주는 요인에는 크게 원자 크

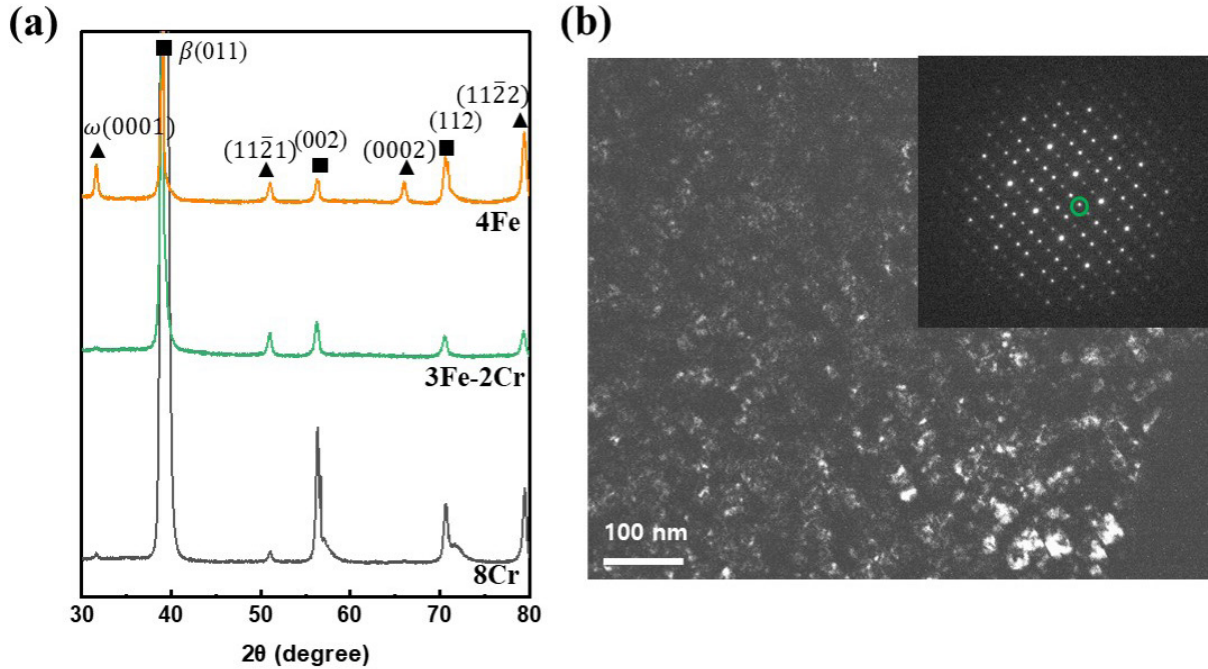


Fig. 5. (a) XRD diffraction profiles of all Ti alloys after aging time of 1hr at 400°C and (b) dark field TEM images of 4Fe alloy after aging time of 1hr at 400°C.

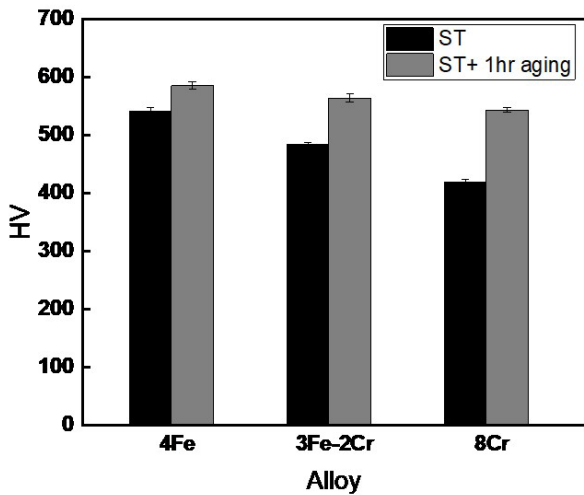


Fig. 6. The Vickers hardness of Ti alloys after ST and aging time of 1hr at 400°C.

기(atomic size)와 전자 구조(electronic effect, e/a)가 있다. 원자 크기의 경우 지지 금속인 Ti 원소와의 원자 크기 차이가 클수록 격자변형 및 응력을 유발하여 ω 상 형성을 촉진시킬 수 있다. Fe와 Cr은 각 126 pm, 128 pm 으로 Ti (147 pm)와 반경차이가 유사하므로 ω 상 형성에 미치는 영향은 유사할 것으로 볼 수 있다. 전자 구조의 경우, 같은 at.% 라고 고려할 때 Fe 원소가 Cr 보다 e/a 값

을 두 배 높게 증가시키기 때문에 Fe 원소가 ω 상 형성에 미치는 영향이 클 것으로 예상할 수 있는데, 본 연구에서는 at.% 달리함으로써 e/a 값을 유사하도록 설계하였기 때문에 이 영향 또한 유사하다고 볼 수 있다. 비열적 ω 상은 고온에서 급속 냉각 과정에서 {111} β 면에서 중간 위치로 붕괴되는 shuffle mechanism을 통해 생성되는 것으로 알려져 있다 [24-28]. 따라서 8Cr 합금의 경우 ω 상의 형성 과정에서 4Fe 보다 원자 농도가 높기 때문에 합금 내 원자의 이동이 억제되어 이로부터 ω 상의 형성이 억제된 것으로 볼 수 있다. 결과적으로 4Fe 합금은 같은 원자량 대비 높은 β 안정화 효과를 보여주고 있으며, 4Fe 합금에서 풍부한 ω 상 석출 효과가 나타나며 8Cr 합금보다 우수한 경도 값을 나타내었다.

ω 상의 성장 및 기계적 거동 효과를 확인하기 위하여 400°C에서 1시간 시효처리를 진행하였고, XRD를 이용하여 상 분석을 진행하였다. 그림 5와 같이, 시효 1시간 이후에도 β 상이 주요 상으로 유지되었으며, ST 이후에 비해 ω 상에 해당하는 회절 피크의 세기가 모든 합금에서 월등히 증가한 것으로부터 시효 과정에서 ω 상의 성장 또는 석출 분율이 증가되었음을 알 수 있었다. 또한 TEM 측정을 통해 ω 상 크기가 ST 이후보다 성장한 크기 인 것을 확인하였다. 이에 따른 경도 변화를 확인하고자 하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. ST 이후의 상태와 비교했을 때 모든 합금에서 1시간 시효처리 후 경도가 증가하는 것을 확인하였다. 4Fe가 586±6.5 HV으로 가장 높은 비커스 경도 값을 보였으며 3Fe-2Cr 합금은 564±

7.0 HV 8Cr 합금은  $544 \pm 3.6$  HV 로, 여전히 Fe 함량이 높을수록 경도가 높은 경도값을 나타내는 경향이 나타났다. XRD와 TEM 분석 결과에서 확인한 것과 같이, 이러한 Ti 합금의 강화 현상은 400°C에서의 1시간 시효 처리 동안  $\omega$  상의 성장으로부터  $\omega$  상의 강화 효과가 여전히 효과적으로 작용한 것으로 볼 수 있다.

## 4. Conclusion

본 연구에서는 Mo 당량을 약 12.6으로 유지한 상태에서 Fe와 Cr의 조성을 달리하여 설계 및 제조된  $\beta$ -Ti 합금의 미세조직 변화를 분석하고 경도 측정을 진행하였다. 소입(quenching) 과정 중 형성된 것으로 추정되는  $\omega$  상은 모든 Ti 합금에서 관찰되었으며, 특히 Fe만 4 wt.% 첨가된 조성에서 가장 높은 체적 분율의  $\omega$  상이 형성되었다. 이는 모든 합금에서  $\beta$  상 안정성이 유사함에도 불구하고 나타난 결과로, Fe원소가 Cr 보다  $\omega$  상 형성에 효과적이며 이는 석출 강화 효과를 유도시켜 가장 높은 비커스 경도를 갖는데 기여하였다. 400°C에서 1시간 시효 처리 시, 모든 Ti 합금에서  $\omega$  상의 크기가 ST 이후보다 증가하는 것을 확인하였다. 그 결과 뚜렷한 경도 강화 효과가 나타났으며 ST와 같이 4Fe합금에서 가장 높은 경도값을 나타내었다. 본 연구를 통해  $\beta$  상 안정성이 같더라도 합금화 원소에 따라  $\omega$  상 형성 분율이 달라지며 이러한 미세조직 인자가 경도에 영향을 미침을 확인하였으며, 본 연구는 향후 Ti 기반 분말 합금 설계 또는 적층 제조 설계 시에 합금 원소 변수를 제시하는 기초 연구로 기여 할 수 있을 것으로 예상된다.

## Funding

This study was supported in part by Korea Atomic Energy Research Institute R&D program (contract number: 524590-25) funded by the Korean Government (MSIT).

## Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

## Data Availability Statement

All dataset files used in this study are already provided in the manuscript.

## Author Information and Contribution

Sun-Young Park: Dr.: Conceptualization, Methodology, Val-

idation, data curation, Investigation, and Writing

Young-Bum Chun: Dr.: Conceptualization, Funding acquisition, Review, and Editing

## Acknowledgments

None.

## References

- [1] R. R. Boyer and R. D. Briggs: *JMEP*, **14** (2005) 681.
- [2] H.-C. Hsu, S.-C. Wu, T.-Y. Chiang and W.-F. Ho: *J. Alloys Compd.*, **476** (2009) 817.
- [3] F. F. Cardoso, P. L. Ferrandini, E. S. N. Lopes, A. Cremasco and R. Caram: *J. Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **32** (2014) 31.
- [4] J. D. Cotton, R. D. Briggs, R. R. Boyer, S. Tamirisakandala, P. Russo, N. Shchetnikov and J. C. Fannig: *JOM*, **67** (2015) 1281.
- [5] R. Santhosh, M. Geetha and M. N. Rao: *Trans. Indian Institute of Metals*, **70** (2017) 1681.
- [6] Y. Xu, J. Gao, Y. Huang and W. M. Rainforth: *J. Alloys Compd.*, **835** (2020) 155391.
- [7] D. Zhang, Y. F. Mao, Y. L. Li, J. J. Li, M. Yuan and J. G. Lin: *Mater. Sci. Eng. A*, **559** (2013) 706.
- [8] H.-C. Hsu, S.-C. Wu, S.-K. Hsu, W.-H. Kao and W.-F. Ho: *Mater. Sci. Eng. A*, **579** (2013) 86.
- [9] H.-C. Hsu, S.-K. Hsu, S.-C. Wu, C.-J. Lee and W.-F. Ho: *Mater. Charac.*, **61** (2010) 851.
- [10] T. Gloriant, G. Texier, F. Prima, D. Laillé, D.-M. Gordin, I. Thibon and D. Ansel: *Adv. Eng. Mater.*, **8** (2006) 961.
- [11] Y. Song, D. S. Xu, R. Yang, D. Li, W. T. Wu and Z. X. Guo: *Mater. Sci. Eng. A*, **260** (1999) 269.
- [12] W. Chen, S. Cao, W. Kou, J. Zhang, Y. Wang, Y. Zha, Y. Pan, Q. Hu, Q. Sun and J. Sun: *Acta Mater.*, **170** (2019) 187.
- [13] W. Wang, X. Zhang and J. Sun: Phase stability and tensile behavior of metastable beta Ti-V-Fe and Ti-V-Fe-Al alloys. *Mater. Charac.*, **142** (2018) 398.
- [14] W.-F. Ho, C. -H. Pan, S.-C. Wu and H.-C. Hsu: *J. Alloys Compd.*, **472** (2009) 546.
- [15] W. Xu, K. B. Kim, J. Das, M. Calin and J. Eckert: *Scr. Mater.*, **54** (2006) 1943.
- [16] D.-J. Lin, J. C. Lin and C.-P. Ju: *J. Mater. Sci. Mater. Medic.*,

- 14** (2003) 1.
- [17] D.-J. Lin, J.C. Lin and C.-P. Ju: *Biomaterials*, **23** (2002) 1723.
- [18] H. Yamaguchi, M. Takahashi, K. Sasaki and Y. Takada: *Dent. Mater. J.*, **40** (2021) 61.
- [19] B. Gunawarman, M. Niinomia, T. Akahoria, T. Soumaa, M. Ikedac and H. Toda: *Mater. Sci. Eng. C*, **25** (2005) 304.
- [20] R.P. Kolli and A. Devaraj: *Metals*, **8** (2018) 506.
- [21] W. Ho, C. Ju and J. C. Lin: *Biomaterials*, **20** (1999) 2115.
- [22] H. Liu, M. Niinomi, M. Nakai and K. Cho: *Acta Mater.*, **106** (2016) 162.
- [23] W. F. Ho, C. P. Ju and J. H. C. Lin: *Biomaterials*, **20** (1999) 2115.
- [24] B. Hickman: *J. Mater. Sci.*, **4** (1969) 554.
- [25] S. Hanada and O. Izumi: *J. Mater. Sci.*, **21** (1986) 4131.
- [26] D. Moffat and D. Larbalestier: *Metall. Trans. A*, **19** (1988) 1677.
- [27] M. J. Kriegel, A. Kilmametov, V. Klemm, C. Schimpf, B. B. Straumal, A. S. Gornakova, Y. Ivanisenko, O. Fabrichnaya, H. Hahn and D. Rafaja: *Adv. Eng. Mater.*, **21** (2019) 1800158.
- [28] D. Lin, J. C. Lin and C.-P. Ju: *Mater. Chem. Phy.*, **76** (2002) 191.