

Ta 첨가원소 대체 Ti 첨가형 저방사화 페라이트/마르텐사이트 강의 미세조직과 기계적 특성

설우경^{***} · 이창훈^{**†} · 문준오^{**} · 이태호^{**} · 장재훈^{**} · 강남현^{*†}
^{*}부산대학교 재료공학과, ^{**}한국기계연구원 부설 재료연구소 철강재료연구실

Microstructures and Mechanical Properties of Reduced-activation Ferritic/Martensitic (RAFM) Steels with Ti Substituted for Ta

Woo-Kyoung Seol^{***}, Chang-Hoon Lee^{**†}, Joonoh Moon^{**}, Tae-Ho Lee^{**},
Jae Hoon Jang^{**}, Namhyun Kang^{*†}

^{*}Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

^{**}Ferrous Alloy Department, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Gyeongnam 51508, Korea

Abstract The aim of this study is to examine a feasibility to substitute Ti for Ta in reduced activation ferritic/martensitic (RAFM) steel by comparing a Ti-added RAFM steel with a conventional Ta-added RAFM steel. The microstructures and mechanical properties of Ta-, and Ti-added RAFM steels were investigated and a relationship between microstructures and mechanical properties was considered based on quantitative analysis of precipitates in two RAFM steels. Ta-, and Ti-added RAFM steels were normalized at 1000~1040°C for 30 min and tempered at 750°C for 2 hr. Both RAFM steels had very similar microstructures, that is, typical tempered martensite with relatively coarse $M_{23}C_6$ carbides at boundaries of grain and lath, and fine MX precipitates inside laths. The MX precipitates were identified as TaC in Ta-added RAFM steel and TiC or (Ti, W)C in Ti-added RAFM steel, respectively. It is believed that these RAFM steels show similar tensile and Charpy impact properties due to similar microstructures. Precipitate hardening and brittle fracture strength calculated with quantitative analysis of precipitates elucidated well the similar behaviors on the tensile and Charpy impact properties of Ta-, and Ti-added RAFM steels.

(Received February 28, 2017; Revised March 8, 2017; Accepted March 28, 2017)

Key words : RAFM steel, Ti, Microstructures, Mechanical properties, Precipitate

1. 서 론

일본 후쿠시마 원자로 사고 이후 전세계적으로 친환경 대체 에너지를 찾기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[1]. 태양열, 풍력 등의 신재생에너지부터 핵융합 에너지까지 다양한 대체 에너지원이 연구되고 있으나, 이 중에서 미래의 대량 에너지원으로 가장 큰 주목을 받고 있는 것이 핵융합 에너지이다[1]. 핵융합 에너지는 고온/고압의 플라즈마 환경에서 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응으로 생성되는 14 MeV의 고에너지를 이용하는 것으로, 이 고에너지를 대량의 에너지원으로 활용하기 위해서는 핵융합로 건설이

필요하고 수많은 관련 기술이 개발되어야 한다. 그 중에서도 핵융합로 구조용 소재의 개발은 필수적이다[1]. 핵융합 구조물 중 내부의 고온의 플라즈마와 핵융합 반응에 대한 차벽 역할을 하는 블랭킷(blanket)용 소재는 중성자 내조사성, 저방사성, 크리프 저항성, 고강도-고인성, 용접성 등 다양한 특성이 요구된다[2-5]. 현재 블랭킷의 후보 소재로는 산화물 분산강화강(Oxide Dispersion Strengthened steel, ODS), SiC_i/SiC 복합재료, 저방사 철강(Reduced Activation Ferritic/Martensitic steel, RAFM) 등이 존재하는데, 대량 생산성과 용접성을 고려하였을 때 저방사 철강 소재가 블랭킷 재료로 적용될 가능성이 가장

[†]Corresponding author. E-mails : lee1626@kims.re.kr (C-H Lee), nhkang@pusan.ac.kr (Nh Kang)
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

높을 것으로 예상된다[6-8].

RAFM강은 9Cr-1MoVNb계 내열강에서 저방사화 특성을 만족시키기 위해 고방사화 원소인 Mo와 Nb을 저방사화 원소인 W와 Ta으로 각각 대체한 합금 조성을 가지며, 유럽에서 개발중인 9Cr-1W계의 EUROFER97, 일본의 8Cr-2W계인 F82H가 가장 대표적인 RAFM강이다[9-11]. 가장 방대한 데이터베이스를 가지는 F82H는 9Cr-1W계의 EUROFER97에서 용접성 향상을 위해 Cr의 함량을 9 wt.%에서 8 wt.%으로 낮추는 대신, 강도 저하를 보강하기 위해 W의 함량을 1 wt.%에서 2 wt.%로 상향한 8Cr-2W계 합금조성을 가지게 되었다. 또한, Ta을 0.05 wt.% 첨가하여 석출 강화 효과를 일으켜 고온 강도와 크리프 강도를 향상시킨 것이 특징이다[11-13]. 비록 Cr과 W의 함량에서는 차이를 나타내지만, 대체적인 물성은 EUROFER97과 F82H가 유사한 수준으로 보고되고 있다[12-14].

전세계적으로 개발 중인 RAFM강은 저방사 특성, 석출 강화 등을 위해 Ta을 함유하고 있지만, 저방사 원소 중 Ti 또한 RAFM강에서 Ta과 유사한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 기존 연구에서 W을 함유하는 철강소재에서 Ti의 첨가는 수 nm 수준으로 미세하고 고온 안정성이 우수한 (Ti, W)C의 석출을 조장하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있음을 보고하고 있다[15]. Jang 등[15]은 다양한 타입의 MX 석출물의 생성에너지, 계면에너지 등을 제 일원리를 이용하여 계산한 결과와 모델합금을 활용한 실험을 통해 Ti와 Mo를 함유하는 저탄소강에서 석출되는 나노미터 수준의(Ti, Mo)C 탄화물은 Mo를 W으로 대체한 저탄소강에서는 미세한(Ti, W)C 탄화물로 석출함을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 Ta 첨가 RAFM강과 Ti 첨가 RAFM강의 미세조직과 인장, 충격특성 등의 기계적 특성의 관찰을 통해 RAFM강에서 Ti의 Ta 대체 가능성을 확인해보고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편 제작 및 열처리

본 연구에서 사용된 Ta 첨가 RAFM강(Ta-RAFM)과 Ti 첨가 RAFM강(Ti-RAFM)의 합금조성을 Table 1에 나타내었다. Ta-RAFM 시험편은 8Cr-2W계의 F82H와 유사한 합금조성을 가지고, Ti-RAFM은 9Cr-1W계의 EUROFER97에서 Ta를 Ti로 대체한 합금조성을 가진다. 기존 연구에서는 8Cr-2W계의 F82H와 9Cr-1W계의 EUROFER97은 Cr과 W의 함량에서 1 wt.% 정도의 차이가 있지만, 미세조직, 강도 및 충격 특성 등은 대체로 유사한 것으로 보고하고 있다[12-14]. 본 연구에 사용된 시험편에서도 Cr과 W의 함량의 차이가 있지만, 본 논문에서의 실험 결과를 Ta와 Ti 첨가로 인한 효과로 해석해도 무리가 없을 것으로 판단된다. 두 시험편은 진공유도용해로를 이용하여 50 kg의 잉곳을 제조하여 12 mm 두께로 열간압연하였다. 그리고, 열처리를 위해 75 mm × 115 mm × 12 mm 사이즈의 블록형태로 가공하였다. F82H와 유사한 합금성분의 Ta-RAFM은 기존 문헌에서 제시한 F82H와 동일한 열처리 조건을 거쳤다. 즉, 1040°C에서 30분 동안 노말라이징 후, 750°C에서 2시간 동안 템퍼링 열처리를 거쳤다. Ti-RAFM은 1000°C에서 30분 동안 노말라이징 후, 750°C에서 2시간 동안 템퍼링 열처리를 진행하였다. 상세한 시험편 열처리 조건은 Table 2에 나타내었다.

2.2 미세조직 및 기계적 특성 분석

열처리된 시험편의 미세조직 관찰을 위해 폴리싱 후, 1%의 피크릭 용액(Picric Acid 1 g + 염산 5 ml

Table 2. Heat treatment conditions of the investigated steels

Specimens	Normalizing	Tempering
Ta-RAFM	1,040°C, 0.5 hr, WQ	750°C, 2.0 hr, WQ
Ti-RAFM	1,000°C, 0.5 hr, WQ	750°C, 2.0 hr, WQ

Table 1. Chemical compositions of the investigated steels (in wt.%)

Steels	C	Si	Mn	Cr	W	V	Ta	Ti	N
Ta-RAFM	0.09	0.12	0.54	8.17	1.95	0.21	0.08	-	0.0026
Ti-RAFM	0.08	0.12	0.45	9.09	1.07	0.21	-	0.07	0.0019

+ 에탄올 100 ml)으로 에칭을 실시하였다. 주사전자 현미경(SEM, JSM-7001F)과 EDS를 사용하여 미세 조직 관찰과 석출물 성분 분석을 실시하였다. 석출물의 정량 분석을 위해서는 최소 5장의 SEM 이미지와 Image J 프로그램을 활용하였고, 이를 통해 석출물의 개수, 크기 및 분포 등의 결과를 도출하였다.

인장 시험은 ASTM E8 시험법에 따라 subsize 판상 시편을 가지고 10톤 중량의 Instron 5882 시험기를 이용하여 상온에서 2 mm/min 인장 속도로 실시하였다. 충격 시험은 ASTM E23 시험법에 따라 10 mm × 10 mm × 55 mm 표준크기의 사피충격 시편으로 -100°C, -80°C, -60°C, -40°C, -20°C, 0°C, 상온까지의 7개 온도 범위구간에서 실험하여 충격흡수에너지를 측정하였고, 이를 바탕으로 상부흡수에너지(Upper Shelf Energy, USE)와 연성-취성 천이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature, DBTT)를 도출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직 및 석출물

본격적인 실험에 앞서 두 시험금의 평형 상태도를 Thermo-Calc 열역학 프로그램을 활용하여 계산하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Thermo-Calc 열역학 계산 프로그램으로 계산된 Ta-RAFM과 Ti-RAFM의 평형 상태도이다. 두 시험금 모두 노말라이징 열처리 온도에서 오스테나이트상으로 존재하며 일부 MX 형태의 석출물이 형성되는 것으로 계산되었다. MX 석출물은 Ta-RAFM에서는 대부분이 TaC

로, Ti-RAFM강에서는 Ti(C, N)으로 석출됨을 알 수 있었고, Ti(C, N)이 TaC에 비해 보다 높은 온도에서 석출되는 것으로 예측되었다.

Fig. 2에 SEM을 이용하여 관찰한 노말라이징 열처리된 Ta-RAFM과 Ti-RAFM 시험편의 미세조직을 나타내었다. 두 시험편은 래스와 팩킷 구조가 발달한 전형적인 마르텐사이트 조직을 보이며, 결정립 내부에 미세한 석출물이 형성되었다. 이러한 미세한 석출물은 EDS 분석 결과, Ta-RAFM에서는 Ta 첨가 MX, 그리고 Ti-RAFM에서는 Ti 첨가 MX로 관찰되었다. Fig. 1의 열역학 계산 결과와 기존 연구결과[16, 26, 27]로 볼 때, 노말라이징 온도에서 미용해된 TaC, TiC로 판단된다.

Ta-RAFM과 Ti-RAFM 시험편을 750°C에서 2시간 동안 템퍼링 열처리 후 얻은 미세조직을 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 두 시험편 모두 결정립과 래스 경계에 상대적으로 조대한 석출물이 존재하고, 내부에는 미세한 석출물이 존재하는, 템퍼드 마르텐사이트 조직을 나타내었다(Fig. 3). 고배율의 관찰과 EDS 분석을 통해 결정립 또는 래스 경계의 석출물과 내부의 미세한 석출물을 분석하고자 하였다. Fig. 4에는 고배율 관찰과 EDS 결과를 나타내었는데, 결정립과 래스 경계에 상대적으로 조대한 석출물은 Cr 함량이 높은 $M_{23}C_6$ 탄화물로, 결정립 내부의 미세한 석출물은 MX 석출물로 확인되며, 미세 MX 석출물은 Ta-RAFM에서는 TaC, Ti-RAFM에서는 TiC 또는 (Ti, W)C로 판단되었다. 상기의 석출물 분석 결과는 Fig. 1의 열역학 계산 결과와 기존 연구결과[17, 18, 26, 27]와도 일치하는 것으로 나타났다.

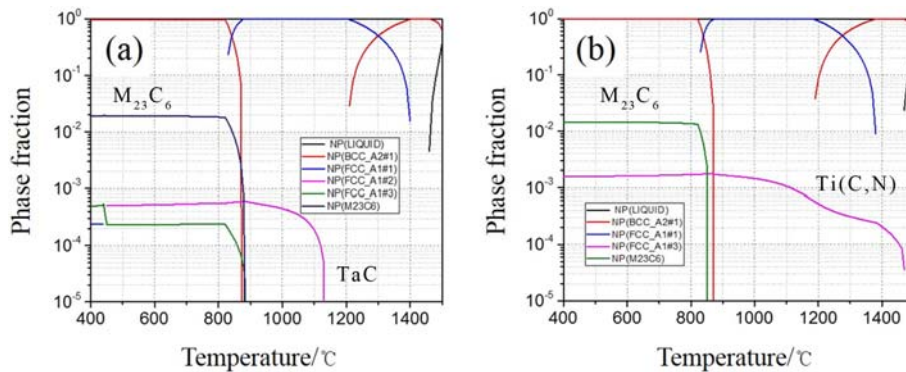


Fig. 1. Phase diagrams of the investigated steels calculated by Thermo-Calc program: (a) Ta-RAFM and (b) Ti-RAFM.

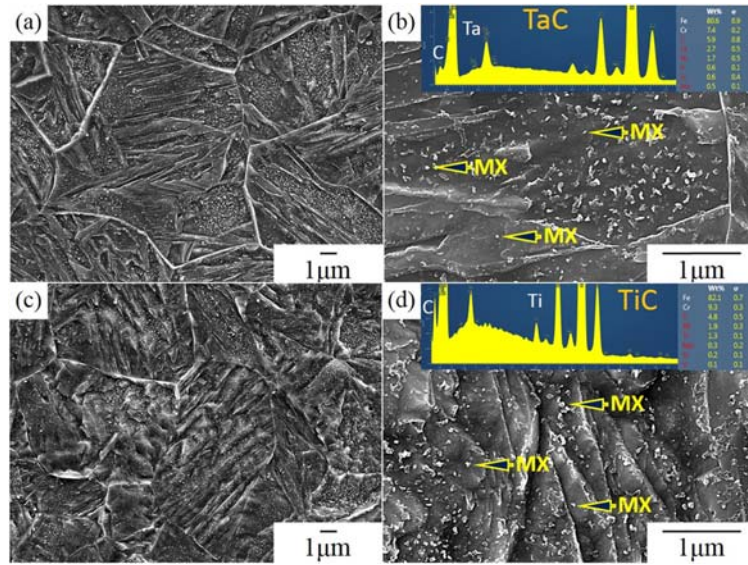


Fig. 2. SEM micrographs and EDS results after normalizing: (a, b) SEM image and EDS for particles in Ta-RAFM and (c, d) SEM image and EDS for particles in Ti-RAFM.

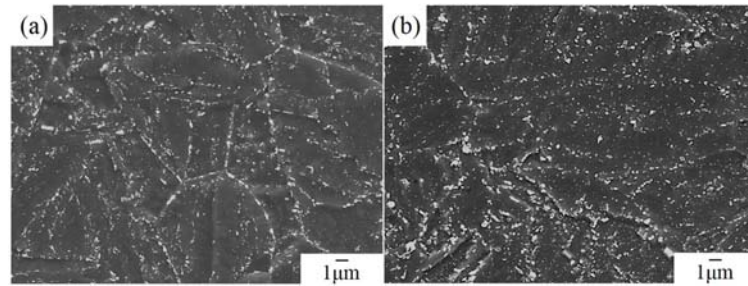


Fig. 3. SEM micrographs after tempering: (a) Ta-RAFM and (b) Ti-RAFM.

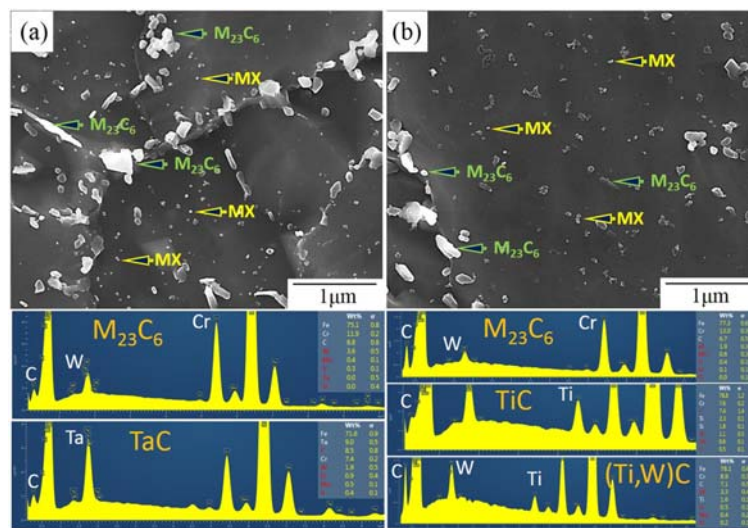


Fig. 4. SEM micrographs at higher magnification and EDS results after tempering: (a) Ta-RAFM and (b) Ti-RAFM.

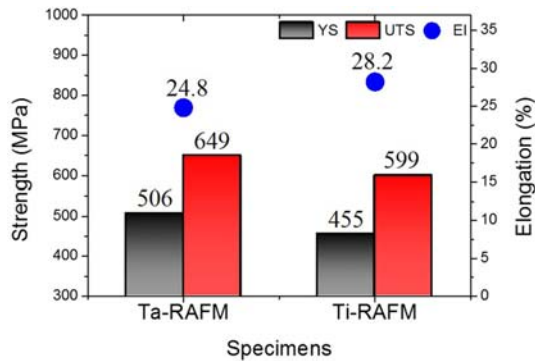


Fig. 5. Tensile properties of Ta-RAFMs and Ti-RAFMs after tempering.

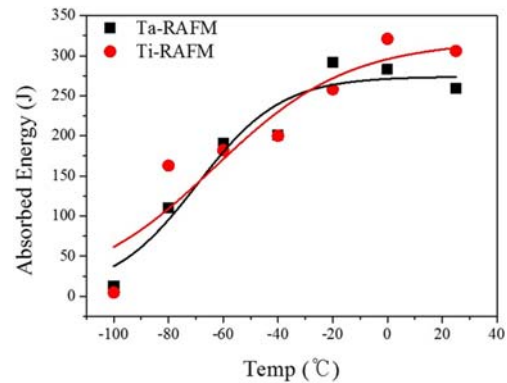


Fig. 6. Charpy impact properties of Ta-RAFMs and Ti-RAFMs after tempering.

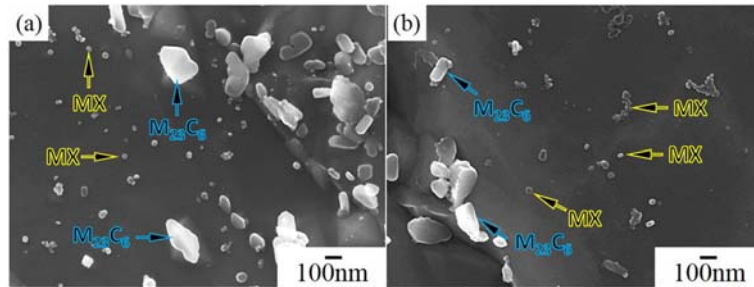


Fig. 7. SEM micrographs for quantitative analysis of precipitates: (a) Ta-RAFMs and (b) Ti-RAFMs.

3.2 기계적 특성

RAFMs에서 Ti의 Ta 대체가 기계적 물성에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 인장 및 충격 시험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 먼저, Fig. 5에 템퍼링된 Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs의 상온 인장 특성을 나타내었다. Ta-RAFMs의 경우, 항복강도와 인장강도가 각각 506 MPa, 649 MPa였으며, 연신율은 24.8%로 측정되었는데, 이는 F82H의 기존 결과와도 유사하였다[19]. Ta를 Ti로 대체한 Ti-RAFMs은 항복강도 455 MPa, 인장강도 600 MPa, 그리고 연신율은 28.2%로 Ta-RAFMs과는 비교하였을 때 강도가 약 50 MPa 낮게 측정되었으나, 연신율에 있어 더 높은 값을 나타내었다. Fig. 6에 템퍼링된 두 시험편의 다양한 온도영역에서의 사피충격흡수에너지를 나타내었는데, 대체로 유사한 충격 거동을 보였다. 상부흡수에너지(USE)는 Ti-RAFMs이 306J, Ta-RAFMs이 259J로 측정되었고, 연성취성 천이온도(DBTT)는 에너지천이온도(Energy Transition Temperature, ETT)를 바탕으로 분석하

였는데, Ti-RAFMs이 -72°C , Ta-RAFMs이 -66°C 로 측정되었다. 충격 특성은 두 시험편에서 경미한 차이를 나타내지만, 대체로 유사한 것으로 판단된다. 결과적으로 Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs은 대체로 유사한 인장 및 충격 특성을 나타내었다.

3.3 미세조직과 기계적 특성의 상관관계

Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs은 템퍼링 후 MX 석출물의 종류가 TaC, TiC 또는 (Ti, W)C로 다른 것을 제외하고 대체로 유사한 미세조직을 나타내었다. 두 시험금의 유사한 미세조직으로 인하여 인장 및 충격 특성 또한 유사한 수준을 나타낸 것으로 보인다. Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs의 미세조직과 기계적 특성의 상관관계를 규명하기 위하여 미세조직, 특히 강도와 파괴에 중요한 영향을 미치는 석출물에 대해서 정량 분석을 실시하였다. 석출물의 정량 분석에 활용한 SEM 이미지를 Fig. 7에 나타내었다. 미세조직 결과에서도 전술했듯이, 상대적으로 크고 타원 형태의 석출물은 M_{23}C_6 이며, 미세한 원형의 석출물은 MX로

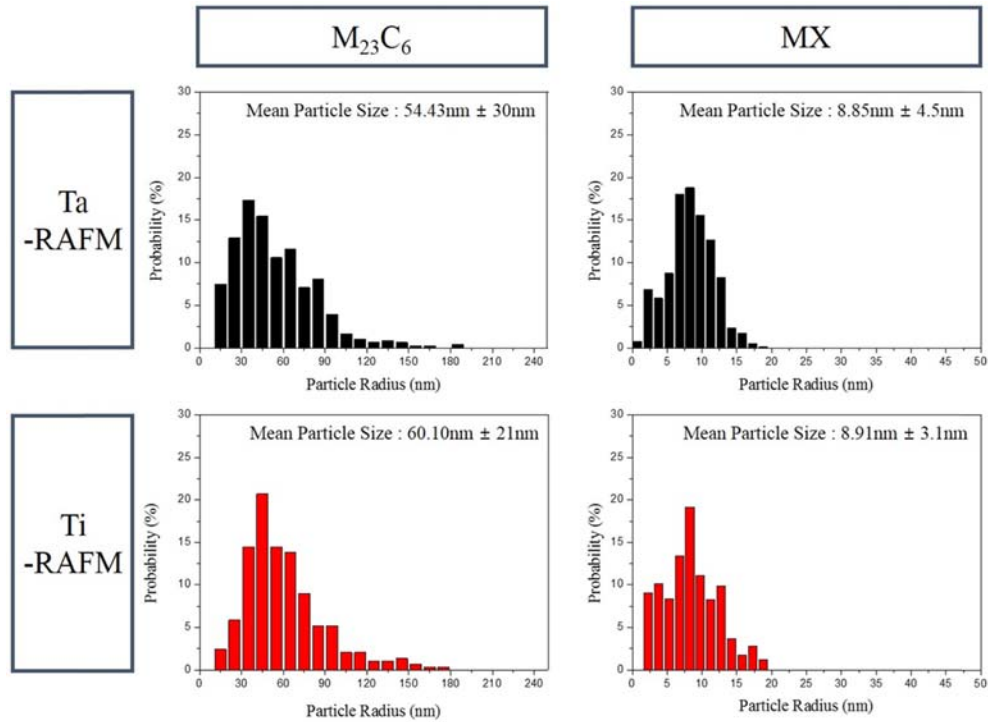


Fig. 8. Size distribution of precipitates of Ta-RAFMs and Ti-RAFMs after tempering.

Table 3. Summary of quantitative analysis of precipitates in Ta-RAFMs and Ti-RAFMs after tempering

Precipitate	Specimens	Mean precipitate size (nm)	Precipitates area fraction (%)	Interparticle spacing (μm)
$M_{23}C_6$	Ta-RAFMs	54.43	10.7	0.61
	Ti-RAFMs	60.10	9.2	0.79
MX	Ta-RAFMs	8.85	0.71	1.65
	Ti-RAFMs	8.91	0.68	1.73

구분하였다. 최소 5장 이상의 상기 SEM 이미지와 Image J 프로그램을 활용하여 두 시험편의 $M_{23}C_6$ 와 MX 석출물의 평균 크기와 분율을 각각 측정하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 두 시험편 모두에서 $M_{23}C_6$ 와 MX 형태의 석출물 반경은 대부분 100 nm 이하로 측정이 되었고, 상대적으로 조대한 $M_{23}C_6$ 의 평균 반경이 Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs에서 각각 54.4 nm와 60.1 nm로 측정이 되었지만 편차를 고려하였을 시 유의할 수준의 차이는 없는 것으로 판단된다. 수 nm의 크기를 가지는 MX 석출물의 반경은 Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs에서 각각 8.85 nm, 8.91 nm의 비슷한 크기로 측정되었다. 석출물의 크기 이외에 분율, 상호 거리 등의 결과를 Table 3에 상

세히 나타내었다.

석출물은 석출 강화를 통해 재료의 강도에 영향을 미치는데, 그 기구는 Orowan 강화 기구(Eq. 1)로 많이 설명된다[20-21]. Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs의 두 시험편에서 관찰되는 상대적으로 조대한 $M_{23}C_6$ 와 미세한 MX 석출물 중, 수 nm 수준의 MX 석출물이 석출 강화에 보다 효과적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다[22]. 측정된 MX 석출물 분율은 Eq. 2를 통해 석출물 간격으로 계산되는데, Ta-RAFMs과 Ti-RAFMs의 MX 석출물 간격은 각각 1.65 μm 그리고 1.73 μm 로, 대체로 유사하게 계산되었다. 따라서 두 시험편에서 석출 강화로 인한 강도 상승은 유사한 수준으로 예측되고, 실제 인장 시험 결과와도 일치하

는 것을 확인할 수 있었다.

$$\tau_{Oro} = \frac{Gb}{\lambda} \quad (1)$$

τ_{Oro} : Orowan 응력, G : 전단계수(Shear modulus), b : 버거스 벡터(Burgers vector), λ : 입자 간의 거리

$$\lambda = \frac{4(1-f)r}{3f} \quad (2)$$

λ : 입자 간의 거리, f : 석출물 분율, r : 석출물 평균 크기

충격 특성의 경우, 철강재료에서의 취성 파괴강도는 일반적으로 Griffith 모델(Eq. 3)로 주로 설명된다[23-24]. 그리고, 고Cr강 또는 RAFM강에서는 결정립 또는 래스 경계에 존재하는 상대적으로 조대한 $M_{23}C_6$ 가 취성 파괴의 시작점으로 많이 알려져 있어, $M_{23}C_6$ 를 취성 파괴에 영향을 미치는 미세조직 인자로 가정하여 취성 파괴강도를 계산한 결과들이 보고되고 있다[25]. 템퍼링된 Ta-RAFM과 Ti-RAFM에서 $M_{23}C_6$ 또한 54.4 nm와 60.1 nm로 대체로 유사하게 측정되었고, 그 분율의 차이도 크지 않았다. 유사한 $M_{23}C_6$ 의 크기 및 분율로 인해 두 시험편의 충격 거동 또한 유사한 것으로 판단되었다.

$$\sigma_F = \left(\frac{\pi E \gamma_p}{(1-\nu^2)d} \right)^{1/2} \quad (3)$$

σ_F : 파괴응력, E : 영률, γ_p : 미세균열의 유효 표면에너지, ν : 푸아송비, d : 석출물 크기

결과적으로, RAFM강에서 Ta를 Ti로 대체하였을 경우, MX 석출물의 종류가 TaC에서 TiC 또는 (Ti, W)C로 바뀌는 것을 제외하고, 전체적인 미세조직과 $M_{23}C_6$ 탄화물에 있어 큰 차이를 나타내지 않았다. 이로 인하여 인장 및 충격 특성 또한 유사한 수준으로 측정되었다. 크리프, 피로, 용접성 등 기타 특성에 대해서도 정밀한 연구가 진행되어야겠지만, 인장 및 충격 특성 면에서는 Ti와 Ta의 효과는 유사한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ta 첨가형 RAFM강과 Ti 첨가형 RAFM강의 미세조직과 기계적 특성의 비교를 통해

Ti의 Ta 대체 효과를 확인하고자 하였고 주요 결과는 다음과 같다.

1. Ta-RAFM과 Ti-RAFM은 노말라이징과 템퍼링 열처리 후, 유사한 미세조직을 나타내었다. 템퍼드 마르텐사이트 조직으로, 결정립 또는 래스 경계에 상대적으로 조대한 $M_{23}C_6$ 탄화물과 래스 내부에 미세한 MX 석출물이 형성되었다. 다만, MX 석출물은 Ta-RAFM에서는 TaC, Ti-RAFM에서는 TiC 또는 (Ti, W)C로 확인되었다. 이러한 유사한 미세조직으로 인해 인장 및 충격 특성 또한 유사하게 나타났다.

2. 미세조직, 특히 $M_{23}C_6$ 와 MX 석출물을 정량 분석한 결과, Ta-RAFM과 Ti-RAFM에서 유사한 수준의 석출물의 크기, 분율 등을 확인하였다. 이를 통한 석출 강화 정도와 충격 파괴 강도가 두 시험금에서 유사한 수준으로 예측되었고, 이는 인장 및 충격 특성 실험 결과와 일치하였다.

3. 다른 물성에 대한 추가적인 평가가 필요하겠지만, Ti 첨가형 RAFM강은 기존 Ta 첨가형 RAFM강과 유사한 인장 및 충격 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단사업(NRF-2016M1A7A1A01005873와 NRF-2016M1A7A1A01005874)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. G. McCracken, P. Stott, Fusion : The Energy of the Universe, Academic Press (2005).
2. A. A. F. Tavassoli : J. Nucl. Mater. **302** (2002) 73.
3. R. L. Klueh, D. S. Gelles, S. Jitsukawa, A. Kimura, G. R. Odette, B. van der Schaaf and M. Victoria : J. Nucl. Mater. **307** (2002) 455.
4. T. Muroga, M. Gasparotto and S. J. Zinkle : Fusion Eng. And Des. **61** (2002) 13.
5. S. M. Park, S. I. Hong and T. K. Kim : Korean J. Met. Mater. **52** (2013) 713.
6. Baldev Raj and T. Jayakumar : J. Nucl. Mater. **417** (2011) 72.
7. A. Alamo, J. C. Brachet, A. Castaing, C. Lepoittevin and F. Barcelo : J. Nucl. Mater. **258** (1998) 1228.
8. T. Shibayama, A. Kimura and H. Kayano : J. Nucl.

- Mater. **233** (1996) 270.
9. Qunying Huang, Jiangang Li and Yixue Chen : J. Nucl. Mater. **329** (2004) 268.
 10. Jinnan Yu, Qunying Huang and Farong Wan : J. Nucl. Mater. **367** (2007) 97.
 11. T. Jayakumar, M. D. Mathew, K. Laha, S. K. Albert, S. Saroja, E. Rajendra Kumar, C. V. S. Murthy, G. Padmanabham, G. Appa Rao and S. Narahari Prasad : Fusion Sci. Tech. **65** (2014) 171.
 12. M. Rieth, M. Schirra, A. Falkenstein, P. Graf, S. Heger, H. Kempe, R. Lindau and H. Zimmermann : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe (2003).
 13. R. L. Klueh : Current Opinion in Solid State and Mater. Sci. **8** (2004) 239.
 14. E. Wakai, T. Taguchi, T. Yamamoto and F. Takada : J. Nucl. Mater. **329** (2004) 1133.
 15. J. H. Jang, C. H. Lee, Y. U. Heo and D. W. Suh : Acta Mater. **60** (2012) 208-17.
 16. L. Tan, Y. Yang and J. T. Busby : J. Nucl. Mater. **442** (2013) S13-S17.
 17. S. Kano, H. L. Yang, R. Suzue, Y. Matsukawa, Y. Satoh, H. Sakasegawa, H. Tanigawa and H. Abe : Nucl. Mat. Energy. **9** (2016) 331-337.
 18. L. Pilloni, F. Attura, A. Calza-Bini, G. De Santis, G. Filacchioni, A. Carosi and S. Amato : J. Nucl. Mater. (1998) 258-263.
 19. P. Fernandez, A. M. Lancha, J. Lapena, M. Serrano and M. Hernandez-Mayoral : J. Nucl. Mater. **307** (2002) 495.
 20. E. Orowan : Symposium on International Stresses, Inst. of Metal, London (1947) 451.
 21. M. A. Meyers and K. K. Chawla : Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall Inc., New Jersey (1999) p. 484, 491.
 22. J. Moon, S. Kim, J.-i. Jang, J. Lee and C. Lee : Mat Sci Eng A **487** (2008) 552-557.
 23. T. Hanamura, G. Yin and K. Nagai : ISIJ Int. **44**(3) (2004) 610-617.
 24. D. A. Curry and J. Knott : Met Sci, 12:11 (1978) 511-514.
 25. A. Moitra, Arup Dasgupta, S. Sathyanarayanan, G. Sasikala, S. K. Albert, S. Saroja, A. K. Bhaduri, E. Rajendra Kumar and T. Jayakumar : Procedia Engineer. **86** (2014) 258-263.
 26. C.-H. Lee, J. Moon, M.-G. Park, T.-H. Lee, M.-H. Jang, H.C. Kim, and D.-W. Suh : J. Nucl. Mater. **455** (2015) 421-425.
 27. C.-H. Lee, J.-Y. Park, W.-K. Seol, J. Moon, T.-H. Lee, N. Kang, and H. C. Kim : Fus. Eng. Des, submitted.