한국기계가공학회지, 제21권, 제1호, pp. 56～65(2022.01) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 56~65(2022.01) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.01.056

장시간 시효 열처리된 오스테나이트계 304강의 미세조직과 부식 특성

허채을*, 김정석**,#

*조선대학교 첨단소재공학과, **조선대학교 신소재공학과

Microstructure and Corrosion Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel Subjected to Long-term Aging Heat Treatment

ChaeEul Huh*, ChungSeok Kim**,#

*Department of Advanced materials and Engineering, Chosun UNIV.

**Department of Materials Science and Engineering, Chosun UNIV.

(Received 10 November 2021; received in revised form 19 November 2021; accepted 24 November 2021)

ABSTRACT

The electrochemical corrosion properties of austenitic AISI 304 steel subjected to a long-term-aging heat treatment were investigated. AISI 304 steel was aged at 700 ℃ for up to 10,000 h. The variation in the microstructure of the aged specimens was observed by optical microscopy and scanning electron microscopy. Electrochemical polarization experiments were performed to obtain the corrosion current density (Icorr) and corrosion potential (Ecorr). Analyses indicated that the metastable intermetallic carbide $M_{23}C_6$ formed near the γ/γ grain boundary and coarsened with increasing aging time; meanwhile, the δ-ferrite decomposed into the σ phase and into $M_{23}C_6$ carbide. As the aging time increased, the current density increased, but the corrosion potential of the austenitic specimen remained high (at least 0.04 μm/cm^2). Because intergranular carbide was absent, the austenitic annealed specimen exhibited the highest pitting resistance. Consequently, the corrosion resistance of austenitic AISI 304 steel decreased as the aging heat treatment time increased.

Keywords : Austenitic 304 Sainless Steel(오스테나이트 304강), Long-term Aging(장시간 시효), Corrosion(부식), Sensitization(예민화)

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 내식성, 고강도, 용접성이 우수한 Cr-Ni 합금강이다. 이 우수한 내식성은 표면에 산화물 보호막 을 형성하는 16% 이상의 Cr 함량 때문이다. 따라서 발전소, 화학 공업, 의료용, 구조 시설 등 선박 및 배관의 필수 재료로 널리 사용되고 있다. 이러한 오스테나이트계 구조재는 기계적 물성 및 내식성이 우수하지만 고온, 고압, 장기간 사용에 따라 열화된다[1-3]. 이전의 많은 연구에서 재료 열화가 보고되었지만, 오스테나이트 강에서 10,000시간 동안 고온에서 장시간 재료열화와 부식특성에 대한 보고가 매우 부

Corresponding Author : chs2865@chosun.ac.kr
Tel: +82-62-230-7197, Fax: +82-62-230-7197

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

족하다[4,5]. 따라서 고온에서 가동되는 고온 발전설비의 설비소재에 대한 열화기구 및 손상해석에 많은 어려움이 있다.

오스테나이트계 스테인리스강이 600℃에서 800℃ 사이의 온도에 노출되면 예민화되기 쉽다. 예민화 과정에서 Cr이 풍부한 탄화물은 입계와 쌍정경계를 따라 생성되어 입계 부근의 Cr 원자가 고갈된다. 대부분의 보고에서 스테인리스 강의 예민화 메커니즘은 준 안정된 금속간 석출물의 생성으로 인해 Cr이 고갈되어 입계의 Cr양이 12%이하로 떨어진다. Tekin 등은 AISI 316 오스테나이트계 스테인리스강이 550℃에서 750℃ 사이의 온도에서 시효되는 동안 입계 예민화 및 탈 예민화를 연구했다. 그들은 Cr 함량이 입계의 Cr 고갈로 인해 13%이하로 떨어졌다고 보고했다[6]. Rhouma 등은 550℃~700℃ 범위에서 시효된 AISI 스테인리스강의 입계 부식 거동을 연구했다. 그들은 각 온도에서 시효되는 동안 입계 근처의 Cr 농도를 측정했으며, Cr 농도가 입계에서 12%이하로 감소했다고 보고했다[7].

체심입방 결정구조인 δ-페라이트는 응고 중에 형성되며 스테인리스강의 입계를 따라 실온에서 남아있다. 그것은 전위 이동에 대한 강력한 장벽으로 성공적으로 작용하고, 결정립의 성장을 늦추며, 상간의 경계가 전위 이동에 대한 강력한 장벽으로 작용하기 때문에 기계적 강도를 향상시킨다[8]. 또한, δ-페라이트는 열처리를 통해 오스테나이트에서 σ상으로 변화될 수 있으며, σ상은 정방정 구조의 금속간 화합물이다. σ상의 화학적 조성은 주조, 열처리 등의 가공환경에 따라서 미소하지만 매우 다양하게 변화되어 정형화된 화학적 조성으로 정의하는 것은 매우 어렵다. δ-페라이트로부터 σ상의 석출 속도는 Cr 함량과 확산으로 인해 오스테나이트에서보다 약 100배 더 빠르다[9]. σ상은 단단하고 부서지기 쉬우며 비자성이기 때문에 인성 및 연성과 같은 기계적 특성에 부정적인 영향을 미친다. 일반적으로 δ-페라이트의 존재는 σ상 생성의 잠복기를 감소시킨다. 따라서 오스테나이트계 스테인리스강의 용접으로 인한 고온 균열 및 취성 σ상을 방지하기 위해 1% 미만의 작은 δ-페라이트가 권장된다. 따라서 장시간 시효 과정에서 페라이트와 오스테나이트의 분해를 식별하고 부식거동에 대한 특정 영향을 이해하기 위해 크롬 고갈을 정량화하는 것이 매우 중요하다. 지금까지도 σ상과 δ-페라이트가 내식성에 미치는 영향은 명확하지 않고 충분히 연구되지 않았다.

따라서 본 연구의 목적은 AISI 304강의 전기 화학적 부식 특성에 대한 장시간 시효의 영향을 조사하는 것이다. AISI 304강은 700℃의 온도에서 최대 10,000시간까지 오랜 시간 동안 시효 처리하고 시효시간을 변화로 하여 단계별 시료를 제작하였다.

2. 실험 방법

실험 재료는 오스테나이트계 AISI 304 스테인리스강이다. 시편의 조성은 표 1과 같으며 유도 결합 플라즈마 질량 분석법 (ICP-MS)으로 분석하였다. 장시간 시효된 시편의 미세조직을 관찰하기 위해 시효 시편을 10mm x 10mm 크기로 절단한 후 마운팅 수지를 이용하여 저온 마운팅하여 준비하였다. 관찰 면은 #220에서 #2000까지 기계적 연마 후 1㎛의 알루미나 페이스트를 사용하여 차례로 연마하였다. 연마면은 화학적 에칭을 통해 표면 부식 하였고, 부식액은 비엘라 시약(Glycerol 45ml + Nitric acid 15ml + Hydrochloric acid 30ml) 용액으로 상온에서 약 1분 정도 담그고 부식시킨 후 깨끗이 세척하여 광학 현미경(Optical Microscope; OM, ZEISS AXIO Vert.A1), 주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope; SEM, AIS2000C)으로 관찰하였다.

열처리 시간에 따른 정밀한 표면 원소 분석을 하기 위하여 전자 탐침 미량분석기(Elecrtron Probe Micro-Analysis; EPMA)를 사용하여 분석하였다. 가속전압 15kV, 빔 전류 20nA, 빔 크기 1㎛로 하여 원소분석을 수행하였다.

Table 1 The chemical composition of AISI 304 stainless steel(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.038	0.62	1.48	0.014	0.025
Mo	Ni	Cr	Cu	Fe
0.40	8.68	18.27	0.60	bal.

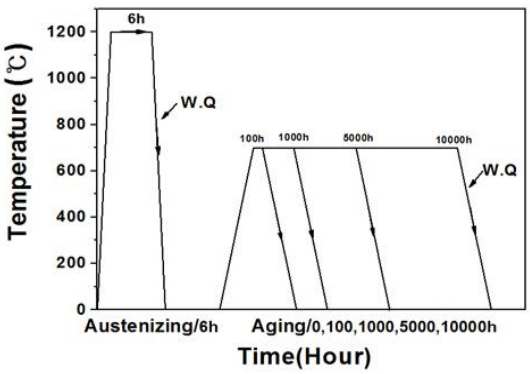

Fig. 1 Heat treatment condition of AISI 304 stainless steel showing austenitizing treatment at 1200 ℃ and artificial aging at 780 ℃ with different aging time

Fig. 1에서 보는 바와 같이 시험편은 1200 ℃에서 6시간 오스테나이징처리를 하고 퀜칭 후에 700 ℃에서 인공 시효 시켰다. 각각 100시간, 1,000시간, 5,000시간, 10,000시간과 같이 시효 시간이 다른 시편을 제작하였다. AISI 304 강은 오스테나이트 계 스테인리스강으로 기지는 오스테나이트 상이며 면심입방정 구조를 갖는다.

또한, 일반적으로 주조 시 형성된 δ-페라이트가 입계에 존재한다. 이러한 결정상 구조 변화를 관찰하기 위해 X선 회절 분석을 수행하였다. X선 회절기(X-ray diffraction; XRD, Rigaku; X'pert PRO MPD, JAP)를 사용하여 30도에서 100도까지 스캔 간격은 0.01도로, 유지시간 1s로 2θ 스캔으로 수행하였다. X선은 CuKa(λ=1.54060) 타깃 조건으로 전류 30mA, 튜브전압 40kV로 설정하였다.

전기 화학적 부식 실험은 표준 세 개 전극시스템(WonATech; ZIVE SP1, KOR)를 사용하였다. AISI 304시편이 1cm2 면적으로 노출된 작업전극, 포화 칼로멜 전극을 기준 전극으로 사용하고 백금와이어 전극을 보조 전극으로 사용했다. 모든 부식 실험은 실온에서 0.75%NaCl 용액에서 수행되었다. 실험은 SM6 프로그램을 사용하여 수행되었으며 전위 범위는 −0.5Vsce ~ 1.5Vsce로 설정하고 열린회로를 이용하였다. 스캔 속도는 1mV/s, 전류(I) 범위는 10mA, 실험시간은 약 30분이었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세구조 분석

Fig. 2는 각 시효 처리 된 시편의 광학 현미경으로 관찰한 미세구조의 모습을 보여준다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이, 오스테나이트화 된 시편의 초기 시효 상태는 결정립이 다각형 모양이고, 일반적인 어닐링 쌍정이 관찰되었다. Song 등은 어닐링 쌍정이 등축립의 오스테나이트 결정립 내부에 존재한다고 보고하였다[10]. 무엇보다도 입계를 따라 석출물이 없기 때문에 입계가 명확하지 않다. Fig. 2(b)는 100시간 열처리 후의 광학 현미경 사진으로 입계가 선명하게 나타나기 시작하고 입계의 ɣ/ɣ 경계면에 어두운 부분으로 존재하는 δ-페라이트가 존재한다. Fig. 2(c)는 1,000시간 열처리 시편의 현미경 사진으로 입계를 따라 석출되어 입계가 더욱 선명해지고 입계가 원형으로 변하기 시작한다. Fig. 2(d)는 5,000시간의 열처리 시편의 현미경 사진이다. 입계 이외에도 5,000시간 열처리 후 결정립 내부에서 석출물이 관찰되었으며, 이 현상은 Fig. 2(e)와 같이 10,000시간 열처리 시편에서 더욱 두드러진다. 열처리 시간이 길어짐에 따라 입계의 ɣ/ɣ 계면과 입계 내부에도 많은 석출물이 형성되었다.

Fig. 3은 SEM에 의해 관찰된 입계의 현미경 사진을 보여준다. 오스테나이트화된 시편의 초기 상태에서는 Fig. 2에서 이미 언급한 바와 같이 입계를 따라 석출물이 관찰되지 않았다, 그러나 열처리 시간이 길어짐에 따라 Cr-rich로 알려진 금속간 탄화물이 생성되고 입계를 따라 조대화되어 석출된다[11]. 100시간 시효된 시편에서 입계를 따라 많은 금속간 탄화물 $M_{23}C_6$이 생성된다. 그러나 입계 외에도 Fig. 3(c)처럼 결정립 내부에서도 석출물이 발생하기 시작한다. 결정립 내부의 석출물은 5,000시간의 시효 후에 지배적이다. Fig. 4는 입계를 따라 δ-페라이트 상의 SEM 현미경 사진을 보여준다. δ-페라이트 분해는 시효 시간이 증가함에 따라 빠르게 진행되고, δ-페라이트는 현미경 사진에서 볼 수 있듯이 시효 시간이 증가함에 따라 $M_{23}C_6$, σ상 및 새로운 오스테나이트로 분해되는 것을 볼 수 있다[12].

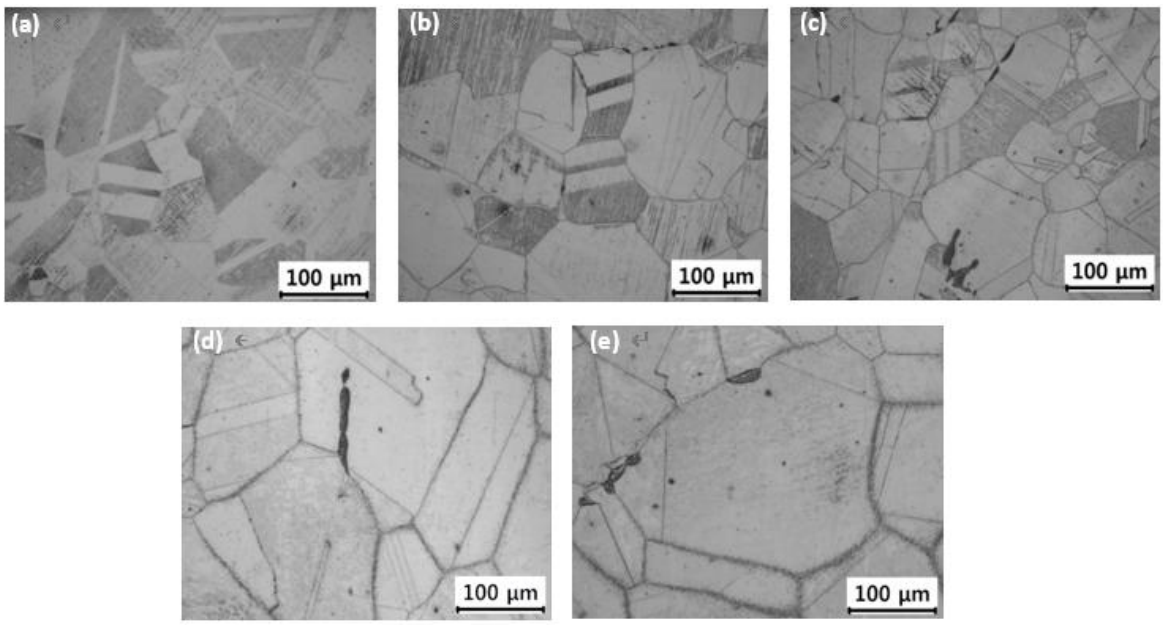

Fig. 2 Optical micrographs of long-term degradation of AISI 304 stainless steel showing surface micro structure at each aging treatment; (a) 0h, (b) 100h (c) 1,000h, (d) 5,000h and (e) 10,000h.

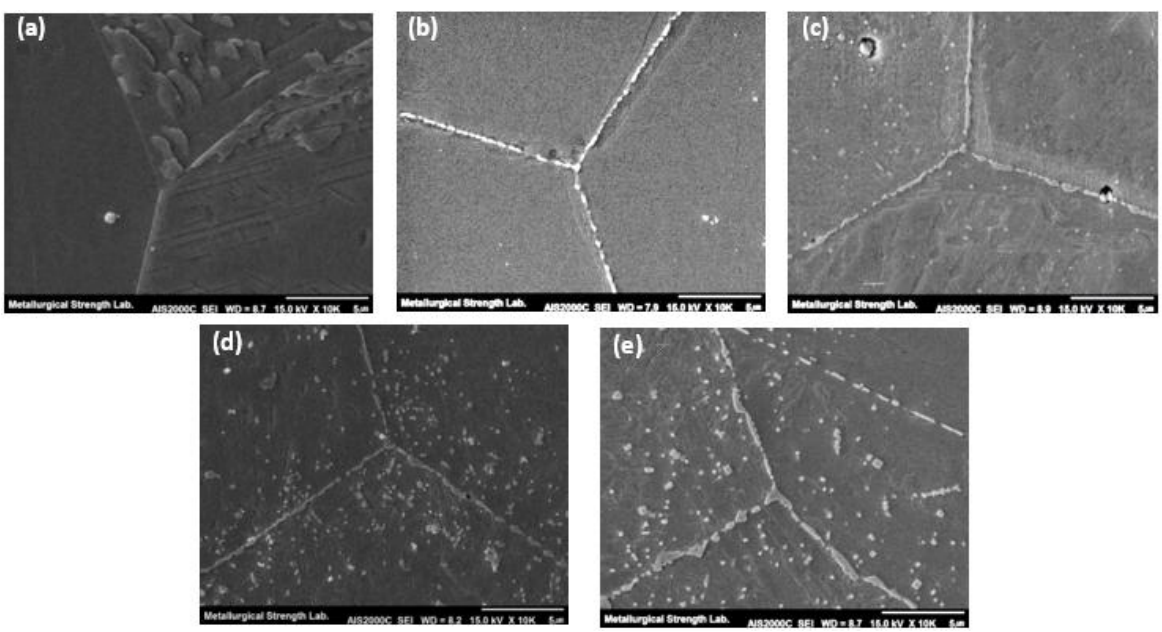

Fig. 3 SEM micrographs of grain boundary precipitation of AISI 304 stainless steel showing generation and coarsening of precipitation along grain boundaries; (a) 0h, (b) 100, (c) 1,000h, (d) 5,000h, (e) 10,000h.

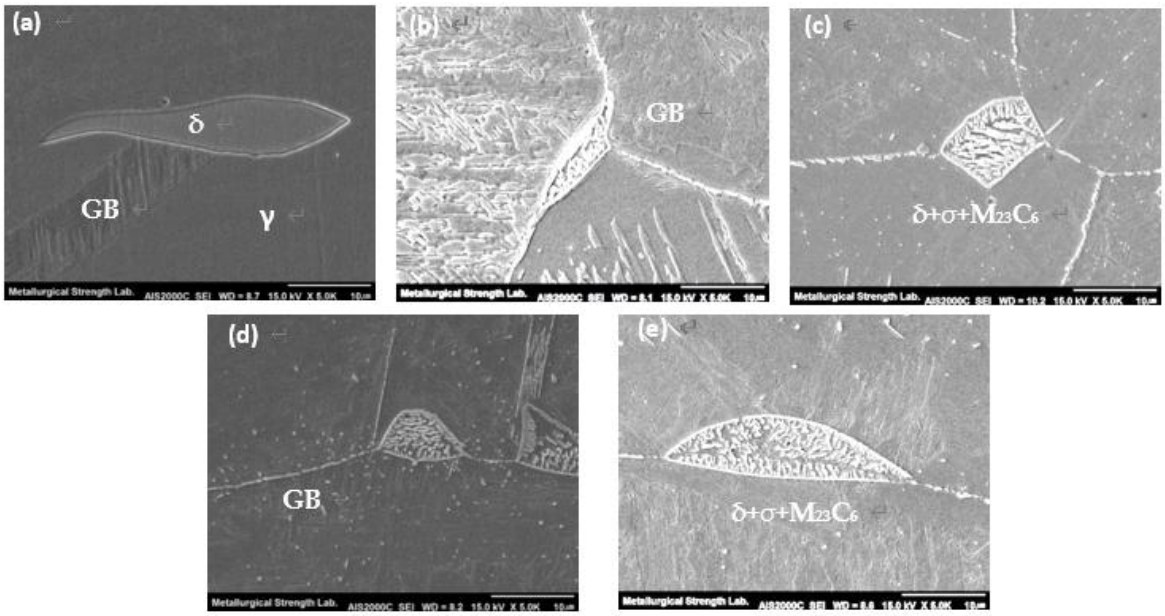

Fig. 4 SEM micrographs of delta ferrite along grain boundary of AISI 304 stainless steel showing the decomposition of delta ferrite with aging time; (a) 0h, (b) 100h, (c) 1000h, (d) 5,000h, (e) 10,000h.

δ-페라이트 변태는 하나의 상 두 가지 다른 상으로 변하는 것으로 확인되며, 변태는 다음의 반응에 의해 설명될 수 있다[12].

$$\delta \leftrightarrows M_{23}C_6 + \gamma \quad (1)$$

$$\delta \leftrightarrows \sigma + \gamma \quad (2)$$

Fig. 5는 Fig. 4와 같이 δ-페라이트에서 오스테나이트 및 σ상으로 분해 모델을 개략적으로 나타낸 것이다. σ상의 형성에 필요한 Cr의 양은 δ-페라이트가 함유한 크롬의 양을 초과한다는 점을 고려하면 크롬이 추가적으로 공급되어야 한다. 이 크롬은 σ상과 함께 오스테나이트가 동시에 변태될 수 있게 δ-페라이트 영역에서 공급 되어진다. 따라서 새로운 오스테나이트는 δ-페라이트에 비해 Cr이 고갈된다. 상 균형 또한 Ni에 대한 분할이 필요로 한다. σ상/δ-페라이트 모두 함량이 낮다. 따라서 σ상 형성을 위해 δ-페라이트/σ상 계면에서 Ni 함량이 감소한다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Ni과 Cr의 분리는 공석 오스테나이트 및 δ-페라이트 계면을 따라 확산함으로써 쉽게 나타난다.

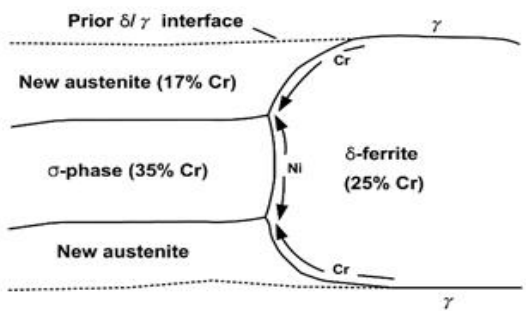

Fig. 5 Schematic illustration of the transformation mechanism for delta ferrite to sigma phase plus austenite reaction [13].

이러한 계면 확산은 비교적 낮은 어닐링 온도와 벌크 상을 통한 체적 확산과 비교해 보았을 때, 치환형 원소(Ni, Cr)의 이동을 촉진시키는 것이다.

Fig. 6은 EPMA를 통한 δ-페라이트내 구성원소를 분석한 결과로 흑백의 이차전자이미지인 델타페라이트와 구성원소의 농도를 저농도의 파란색에서 고농도의 빨간색의 wt%를 칼라 스케일로 나타내었다. 각각의 시험편에 대해서 대표적인 합금원

소인 Fe, Cr, Ni, 그리고 Mo에 대한 원소함량을 나타내었다. Fig. 6(a)는 오스테나이트화 된 샘플의 EPMA 분석 결과를 보여주는 사진이다. Fe 원소 함량은 δ-페라이트보다 오스테나이트 기지에서 더 높은걸 볼 수 있다. 그러나 Cr 원소 함량은 각 상에서 Cr 원소 함량의 차이로 인해 오스테나이트 기지보다 δ-페라이트에서 더 높다. Fig. 6(b)는 100 시간 시효 시편의 EPMA 분석 결과를 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 δ-페라이트 열처리에 의해

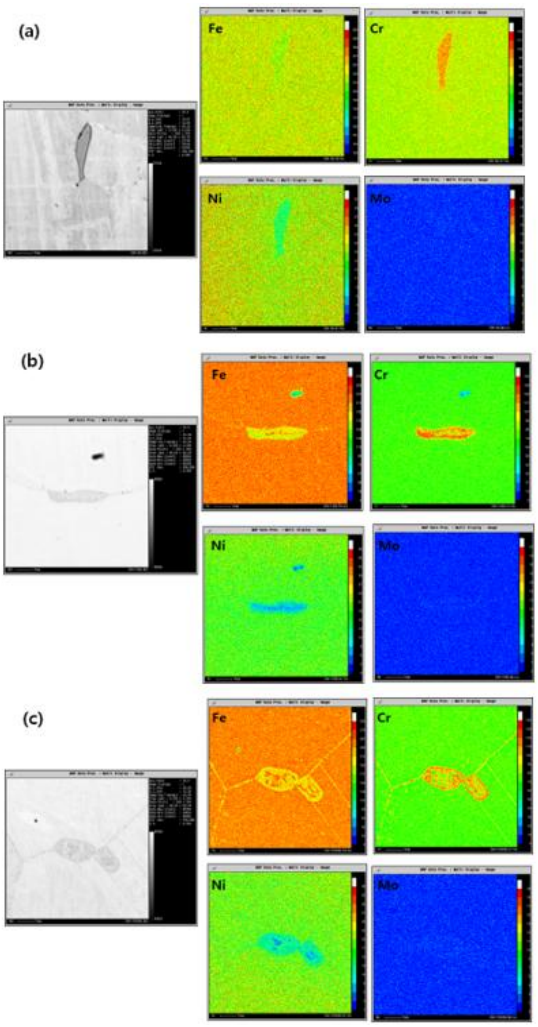

Fig. 6 The EPMA elemental mapping of AISI 304 at each long-term aging time; (a) 0 h, (b) 100h, (c) 10,000h.

분해될 수 있다. 이 단계에서 δ-페라이트는 이미 σ상, $M_{23}C_6$ 및 새로운 γ-오스테나이트 생성으로 인해 δ-페라이트 내부 중심 내에서 증가하였다. 이 변화는 Fig. 6(c)에 표시된 것처럼 10,000시간 시효 이후에 현저하게 나타난다.

오스테나이트 AISI 304 강의 예민화 과정에서 금속간 탄화물 $M_{23}C_6$은 입계와 쌍정 경계를 따라 석출되었다. 따라서 Cr 원자 고갈은 이러한 경계 근처에서 발생한다. 따라서 예민화된 오스테나이트 강에서 입계와 계면은 마르텐사이트 변태, 예민화 유기 마르텐사이트 변태에 더 취약하다. 장시간 시효에 따른 예민화 유기 마르텐사이트를 분석하기 위해 X선 회절 분석, 페라이트 스코프, 자기력 현미경 (MFM)을 통하여 분석해보았다.

Fig. 7(a)는 X선 회절 분석 결과를 보여준다. 광학 현미경과 이차전자 현미경에서 관찰 하였듯이, δ-페라이트와 마르텐사이트 변태의 영향으로 인해 열처리 시간이 증가함에 따라 δ- α‘ 의 피크가 증가하는 것을 X선 회절 분석에서도 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 페라이트 스코프 측정 결과이다. 이러한 결과로부터 열처리 시간이 길수록 페라이트 분율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 광학 현미경과 주사 전자 현미경을 통해 이미 관찰된 바와 같이 δ-페라이트는 열처리 시간이 길어짐에 따라 σ상, $M_{23}C_6$ 및 새로운 γ-오스테나이트로 분해된다. 보통 δ-페라이트만이 오스테나이트화 된 시편의 자기적인 성질을 나타내기 때문에 자기력 현미경을 통해 자성 특성을 평가하였다. Takaya 등은 자기력 현미경을 통해 입계 주변의 마르텐사이트 형성을 관찰했다[13]. Fig. 8은 0시간 5,000시간 10,000시간의 실험 시편에 대한 MFM 현미경 사진을 보여준다. 이 실험에서도 0시간에서 도메인이 관찰되지 않았고, 예민화 유기 마르텐사이트 변태의 발생으로 인해 5,000시간 및 10,000시간 열처리 후 입계 근처에서 도메인이 관찰되었다. 이 연구에서 X선 회절 분석의 피크 증가와 페라이트 스코프 값의 증가는 예민화 유기 마르텐사이트가 실제로 유도되었음을 의미한다. 이러한 예민화 유기 마르텐사이트를 전해연마후 관찰이 가능하며 결정립내에 생성된 마르텐사이트를 Fig. 9에 나타내었다.

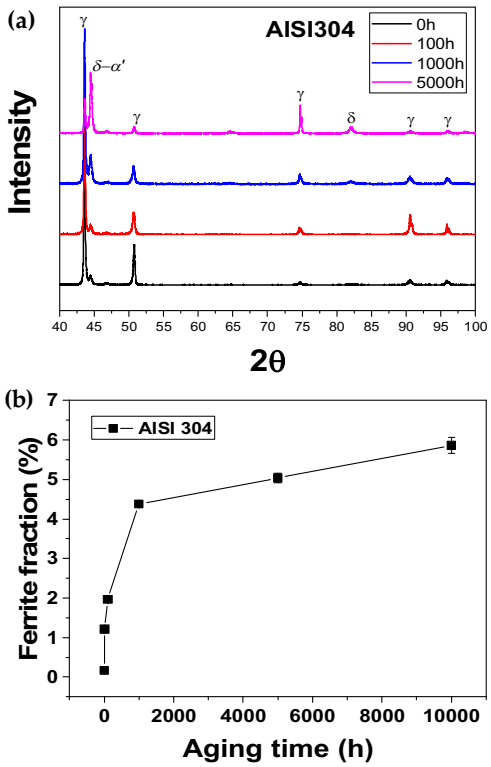

Fig. 7 Variation in delta-ferrite with long-term aging of AISI 304; (a) XRD patterns and (b) ferrite fraction.

3.2 부식특성

전기 화학적 분극 실험을 수행하고 Fig. 10과 같이 Tafel 외삽법을 사용하여 분극 곡선에 대한 부식 전위(Ecorr) 및 부식 전류 밀도(Icorr)를 구했다. 오스테나이트화 된 시편의 부식 전위는 -293mV를 나타냈으며 -238mV까지 100시간 동안 약간 증가했다. 또한 1,000시간의 시효 동안 부식 전위는 최소값 -405mV를 나타낸다. 시효 과정은 준 안정성 금속간 $M_{23}C_6$인 입계 탄화물의 생성으로 인해 시편의 활성 용해를 촉진시킨다. 다음으로 부식 전위는 5,000시간 시효시 -308mV, 10,000시간 시효시 -231mV로 각각 증가했다. 그러나 장시간 시효 동안 부식 전위의 차이에도 불구하고 부식 전류 밀도는 시효 시간에 따라 지속적으로 증가한다. 부식 전류 밀도는 중요한 값으로 부식 전위보다 부식 저항과 밀접한 관련이 있다[14].

패러데이 법칙을 기반으로 한 부식 속도에 정비례하기 때문에 부식 전류 밀도를 고려하여 장시간 시효 시편의 부식 거동을 추정할 수 있다. 오스테나이트화 된 시편의 부식 전류 밀도는 0.04 μA/cm^2 로 최소값을 보였으며, 충분히 예민화 되지 않아 100시간 시효 했을 때와 동일한 값이다. 1,00시간 시효의 경우 0.09 μA/cm^{2}로 증가하고 10,000시간 시효의 경우 최대 5.8 μA/cm^{2}까지 증가했다. 분극 실험 동안 음극 스캔이 종료되고 양극 스캔이 시작되면 시편 표면에 산화가 발생한다. 산화막이 매우 느리게 형성되기 시작하고 실험에 노출된 금속 표면이 완전히 덮일 때 부식 전류는 전위와 무관하게 된다. 일반적으로 부식전류가 더 낮으면 재료가 전기 화학적 반응성(즉, 부동태화 전류 밀도, Ipass)을 잃는 것이 더 쉽다는 것을 의미한다[15,16]. 더 쉬운 부동태화는 1,000시간 시효까지 관찰되었으며, 5,000시간 시효 후 많이 감소 되었다. 공식에 대한 저항성은 나타나지만, 시효 시간이 증가함에 따라 명확하게 나타나지는 않는다. 공식에 대한 저항성이 가장 높은 오스테나이트화 된 시편은 탄화물의 부재와 탈 예민화로 인해 가장 높은 공식 전위를 보였다.

합금원소 확산의 경우 입계를 따른 확산이 충분히 빠르며 입계 근처에서 금속간 화합물을 생성한다. Cr이 풍부한 결정상인 준 안정된 금속간 탄화물 $M_{23}C_6$은 γ/γ 입계 경계면 부근과 페라이트 상 내부에서 Cr 고갈의 원인이 된다[17]. 이 Cr 고갈은 입계 근처의 예민화를 촉진하고 장시간 시효에 따라 전류 밀도를 증가시킨다. 이 현상은 이전에 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 결정립 내부에 Cr이 풍부한 탄화물의 형성으로 인해 5,000시간 시효 후 우세하다. 따라서, 전류 밀도가 급격히 증가하여 내부식성이 감소했다. 이 Cr 고갈은 $M_{23}C_6$ 탄화물의 생성과 직접적인 관련이 있다. 따라서 부식 저항성에 대한 석출물의 영향을 평가할 때 장시간 시효 동안 탄화물의 크기와 분포도 고려해야 한다. 내식성에 대한 탄화물의 영향을 조사하기 위해 추가 연구를 위해 탄화물의 Cr 고갈, 크기 및 분포를 정량적으로 평가해야 한다. 입계 근처의

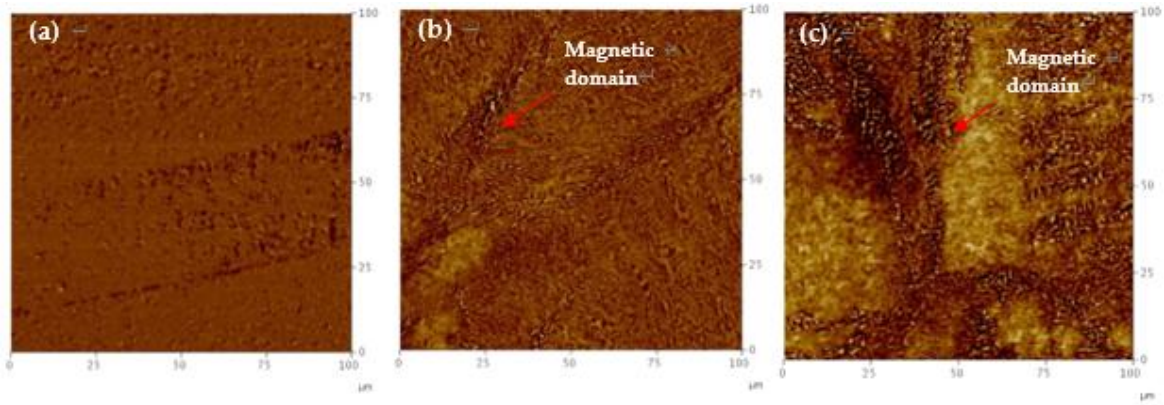

Fig. 8 MFM micrographs at each long-term aging time showing magnetic domain; (a) 0h, (b) 5,000h, (c) 10,000h.

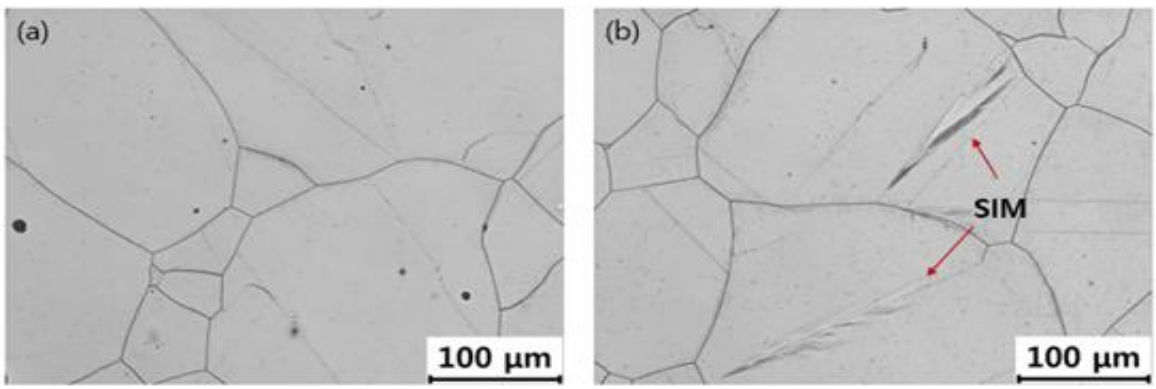

Fig. 9 OM micrographs at each long-term aging time showing sensitization induced martensite(SIM) of AISI 304 stainless steel; (a) 0h, (b) 5,000h.

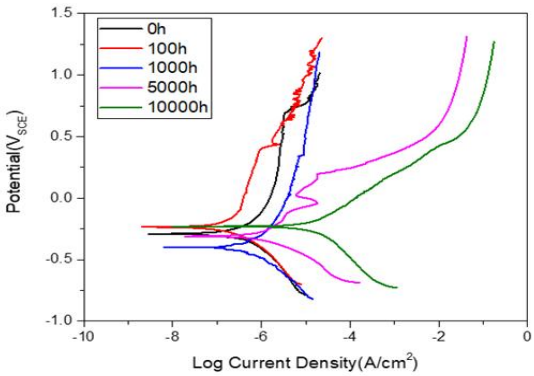

Fig. 10 Polarization curves of long-term aging of AISI 304 at each aging time

Cr 고갈과 더불어 입계를 따라 존재하는 페라이트 상은 σ상으로 분해된다. σ상 형성을 위해서는 페라이트 및 오스테나이트 기지에서 추가 Cr을 공급해야 한다. 따라서 γ/δ 계면 부근에서 Cr 고갈이 가속화되어 장시간 시효에 따른 내식성이 저하될 수 있다. 분극 실험의 최종 결과로, 장시간 열 시효를 한 AISI 304 스테인리스강의 내식성은 시효시간에 따라 감소한다. 미세구조 분석 결과는 이 결과를 잘 뒷받침한다.

4. 결 론

오스테나이트 304강의 장시간 시효가 전기 화학적

부식 특성에 미치는 영향은 최대 10,000시간 동안 700℃의 온도에서 조사 되었으며 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 오랜 시간 시효가 진행됨에 따라 준 안정된 금속간 탄화물 $M_{23}C_6$ 은 γ/γ 입계 부근에서 생성되고 시효 시간에 따라 조대해진다. 입계 외에도 결정립 내부에서 금속간 화합물이 생성된다.
2. 시효 시간이 증가함에 따라 δ-페라이트는 σ상과 $M_{23}C_6$ 탄화물로 분해된다. δ-페라이트의 이러한 용해는 주로 Cr 탄화물의 석출로 인한 δ-페라이트 및 γ/δ 계면의 과도한 Cr 고갈에 기인한다.
3. δ-페라이트 상은 오스테나이트 계 스테인리스강에서 σ상과 $M_{23}C_6$ 탄화물로 분해될 수 있지만 X선 회절 분석에서는 페라이트 피크가 증가한 것으로 나타났다. 이는 장시간 열화로 인한 Cr 고갈과 입계 근처의 예민화 유기 마르텐사이트 때문이며 전해연마를 통해 현미경으로 관찰하였다.
4. 시효 시간이 길어짐에 따라 전류 밀도는 증가하였으나 오스테나이트화된 시편의 부식 전위는 예민화가 충분하지 않아 최소 0.04 μA/cm^{2}를 나타냈다. 1,000시간 시효까지 더 용이한 부동태화가 관찰되었으며, 탄화물이 없기 때문에 오스테나이트화된 시편에서 가장 높은 공식 저항성을 나타냈다.

후 기

“이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2020R1I1A3A0403690312)”

REFERENCES

1. Stoter, L. P., "Thermal ageing effects in AISI type 316 stainless steel," Journal of Materials Science, Vol. 16 No. 4, pp. 1039–1051, 1981.
2. Goyal, S., Sandhya. R., Valsan. M., Bhanusankararao. K., "The effect of thermal ageing on low cycle fatigue behaviour of 316 stainless steel welds," Internal Journal of Fatigue, Vol. 31 No. 3, pp. 447–454, 2009.
3. Jayakumar, T., Mathew, M. D., Laha, K., “High Temperature Materials for Nuclear Fast Fission and Fusion Reactors and Advanced Fossil Power Plants," Procedia Engineering, Vol. 55 No. 8, pp. 259–270, 2013.
4. Takeuchi, T., Kakubo, Y., Matsukawa, Y., Nozawa, Y., Toyama, T., Nagai, Y., Nishiyama, Y., Katsuyama, J., Yamaguchi. Y., Onizawa. K., "Effects of thermal aging on microstructure and hardness of stainless steel weld-overlay claddings of nuclear reactor pressure vessels," J. Nucl. Mater., Vol. 452 No. 1-3, pp. 235–240, 2014.
5. Vach, M., Kunikova, T., Domankova, M., Sevc, P., Caplovic, L., Gogola, P., Janovec, J., "Evolution of secondary phases in austenitic stainless steels during long-term exposures at 600, 650 and 800 C," Mater. Charact., Vol. 59 No. 12, pp. 1792–1798, 2008.
6. Tekin, A., Martin, J. W., Senior, B. A., "Grain boundary sensitization and desensitization during the ageing of 316L(N) austenitic stainless steels," Journal of Materials Science, Vol. 26 No. 9, pp. 2458–2466, 1991.
7. Rhouma, A. B., Amadou, T., Sidhome, H., Braham. C., "Correlation between microstructure and intergranular corrosion behavior of low delta-ferrite content AISI 316L aged in the range 550–700 C," Journal of Alloys Compounds, Vol. 708, pp. 871–886, 2017.
8. Dippenaar, R. J., Phelan, D. J., "Delta-ferrite recovery structures in low-carbon steels. Metall," Mater. Trans. B, Vol. 34 No. 5, pp. 495–501, 2003.
9. Gigovic-Gekic, A., Oruc, M., Muhamedagic. S., "Effect of the delta-ferrite content on the tensile properties in Nitronic 60 steel at room temperature and 750 C," Materials Technology, Vol. 46 No. 5, pp. 519–523, 2012.
10. Lo, K. H., Zeng, D., Kwok, C. T., "Effects of sensitisation-induced martensitic transformation on the tensile behaviour of 304 austenitic

stainless steel," Mater. Sci. Eng. A, Vol. 523 No. 3, pp. 1003–1007, 2011.
11. Park, S. H. C., Sato, Y. S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., Inagaki, M., "Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel," Scr. Mater., Vol. 51 No. 2, pp. 101–105, 2004.
12. Song, R., Xiang, J., Hou, D., "Characteristics of Mechanical Properties and Microstructure for 316L Austenitic Stainless Steel," J. Iron Steel Res. Int., Vol. 18 No. 11, pp. 53–59, 2011.
13. Takaya, S., Suzuki, T., Matsumoto. Y., Demachi. K., Uesaka. M., "Estimation of stress corrosion cracking sensitivity of type 304 stainless steel by magnetic force microscope," J. Nucl. Mater., Vol. 327 No. 1, pp. 19–26, 2004.
14. Zhang, X. G., "Corrosion Potential and Corrosion Current In Corrosion and Electrochemistry of Zinc," Springer: Boston, pp. 125–156, 1996.
15. Zhang, G. A., Cheng, Y. F., "Micro-electrochemical characterization and Mott–Schottky analysis of corrosion of welded X70 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution," Electrochim. Acta, Vol. 55 No. 1, pp. 316–324, 2009.
16. Li, B., Huan, Y., Zhang, W., "Passivation and Corrosion Behavior of P355 Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution at pH 12.5 to 14," Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 12 No. 11, pp. 10402–10420, 2017.
17. Warren, A. D., Griths, I. J., Flewitt, P. E. J., "Precipitation within localised chromium-enriched regions in a Type 316H austenitic stainless steel," J. Mater. Sci., Vol. 53 No. 8, pp. 6183–6197, 2018.