

2205 2상 스테인리스강의 내식성에 미치는 텅스텐 치환의 영향

김기엽[†] · 안용식* · 정병호*

(원고접수일 : 2003년 3월 11일, 심사완료일 : 2003년 7월 4일)

Effect of Tungsten-Substitution on the Corrosion Resistance of 2205 Duplex Stainless Steel

Gi-Yeob Kim[†] · Yong-Sik Ahn* · Byong-Ho Jung*

Key words : Duplex Stainless Steel(2상 스테인리스강), Tungsten-Substitution(텅스텐 치환),
Corrosion Resistance(부식저항성), Aging Heat Treatment(시효열처리)

Abstract

The effect of partial substitution of tungsten for molybdenum on the microstructure and corrosion resistance in 22Cr-5Ni-3Mo duplex stainless steel(DSS) aging heat treated in a temperature range of 600~1000°C has been investigated. Electrochemical tests were carried out for the evaluation of corrosion resistance. Aging treatment had hardly influenced the general corrosion resistance. With the increase of aging time, the pitting corrosion resistance of the DSS had decreased. After aging for 2min at 700~900°C, the pitting potential of the 3Mo steel decreased remarkably, while that of the W-substituted steel hardly changed. During aging, the intermetallic σ and secondary austenite(γ_2) phases were precipitated, and the pitting corrosion and intergranular corrosion resistance were significantly decreased after aging at 700~750°C for 10 h, which could be caused by the γ_2 formation. The γ_2 phase could affect the depletion of molybdenum and chromium in the γ_2/α and γ_2/σ boundaries.

1. 서 론

2상 스테인리스강(Duplex Stainless Steel, DSS)은 해수와 같이 염소이온이 많은 용액에서도

높은 내공식성 및 응력부식저항성을 나타내므로 해양구조물, 화학 및 발전소플랜트 설비로서 널리 사용되고 있으며, 특히 DSS는 AISI 316L stainless steel^{[1]-[4]}과 비교하여 고온에서도 높

[†] 책임저자(울산기능대학 재료과 조교수), E-mail:gykim@kopo.or.kr, T:(052)290-1552

* 부경대학교 신소재 공학부 교수

은 강도를 가지고 있어 그 적용범위 및 사용량이 매년 증가하고 있다. 또한 DSS는 통상 기계적 성질 및 내식성의 향상을 위하여 Cr, Mo, Ni과 같은 다양한 합금원소들을 포함하고있어, 이러한 합금원소들 때문에 생산과정 또는 용접시 σ 및 χ , Cr_2N 등과 같은 2차상들을 석출시키기도 한다. 이러한 석출상들은 합금의 내식성을 감소시키거나 취약하게 하는 원인이 되며, 특히 650~1000°C 영역에서 석출되는 σ 상은 취약한 금속간화합물로서 내식성을 저하시킬 뿐 아니라 충격인성도 급격히 저하시킨다고 알려져 있다^[5]. DDS에서 σ 상의 석출은 강에 첨가되어 있는 Mo 원소에 의해서 발생한다. 그러나 Mo 원소는 한편으로 염소 이온 분위기에서 내공식성 및 틈부식저항성을 향상시키는 가장 중요한 원소이기^[6] 때문에 제거하거나 감소시킬 수 없다. 이에 따라 최근의 연구에서는^[7], Mo 원소를 텅스텐(W) 원소로 일부 치환하여 합금을 제조하면 σ 상의 석출을 지연시키고 DSS의 충격인성을 향상시킬 수 있다고 보고되고 있지만, 내식성에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Mo 원소를 W으로 치환한 22Cr-5Ni 2상 스테인리스강을 제조하여 여러 가지 조건에서 열처리한 후 W 치환이 강의 내식성에 미치는 영향을 전기화학적 방법을 이용하여 체계적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 재료는 진공유도가열에 의한 용해로에서 30kg의 잉곳(Ingot)으로 용해 주조되었으며, Table 1에 주조된 각 시료의 화학성분을 나타낸다. Table 1에서와 같이 주조된 시료는 22Cr-5Ni-3Mo의 상업적인 2205 2상 스테인리스강을 기본으로, 일부 Mo 성분을 W 원소로 치환

하여 그 특성을 비교하고자 하였다. 주조된 잉곳은 1080°C에서 30분 용체화처리(solution annealing)하였고, 1000~1270°C 범위에서 최종 두께가 3mm가 되도록 열간압연하였다. 열간압연된 판재는 다시 1mm 두께까지 냉간압연하였고, 냉간압연 후 1100°C에서 3분간 어닐링(annealing)하고 공냉하였다. 그리고 어닐링된 시편은 600~1000°C 범위에서 2~600분 동안 시효(aging) 열처리하였다.

광학현미경 관찰용 시편들은 모두 압연방향에 평행하게 절단하였고, 기계적 연마 후 10% 옥살산용액에서 전류밀도 2~3 A/cm²로 전해에칭 하였다. 그리고 석출물 등의 관찰 및 분석은 SEM-EDS(Kevex-delta series)를 사용하였다.

시험편의 내식성을 측정하기 위해 Potentiostat/Galvanostat(EG&G 273A)을 사용하여 전기화학 분석시험을 실시하였는데, 분석시험시 상대전극(counter electrode)은 고밀도 탄소봉, 기준전극(reference electrode)은 포화감홍전극(saturated calomel electrode, SCE)을 사용하였으며, 시험편은 12mm ϕ 의 디스크 형태로 가공 후 시험홀더에 장착하여 실시하였다.

General corrosion 과 pitting corrosion 시험시 각각 0.5M H_2SO_4 와 0.1M NaCl(pH=6) 전해액을 30분간 아르곤가스를 주입시켜 탈기하였으며, 분석시험을 시작하기 전 먼저 -700mV_{SCE}에서 강제 환원시켜 시험편의 표면에 존재할 수 있는 산화물을 제거하고 개방회로 전위(open circuit potential)하에서 5분간 안정화 시켜준 뒤 일정한 주사속도(scanning rate)로 계속 상승시키는 동전위 분석시험을 실시하였다. 이때 양극방향으로의 주사속도는 -400mV_{SCE} ~ 1100mV 범위에서 200mV/min 이었고, 용액의 온도는 전실험에서 동일하게 30°C에서 실시하였다. 한편,

Table 1. Composition of duplex stainless steels. (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N
3Mo	0.026	0.40	1.49	0.020	0.003	22.27	6.03	2.92	-	0.20	0.180
1.5Mo-1.5W	0.025	0.42	1.50	0.019	0.003	22.15	5.95	1.49	1.50	0.20	0.160
1.7Mo-2.3W	0.026	0.42	1.52	0.019	0.003	22.00	5.96	1.62	2.24	0.20	0.160

double EPR 시험은 입계부식 저항성을 조사하기 위한 것으로, 전해액으로는 시험 강종의 높은 내식성을 고려하여 Majidi 와 Streicher⁽⁸⁾가 수정 제안한 30°C의 20M H₂SO₄ + 0.01M KSCN + 0.5M NaCl 혼합용액을 사용하였다. 이때 주사속도는 100mV/min이었으며, 양극방향으로 전위를 올려 부동태 피막을 형성하는 구역인 400mV_{SCE} 까지 전위를 인가한 후 다시 역방향으로 주사속도는 그대로 유지한 상태에서 전위를 주사방향과 반대로 하여 부식전위까지 다시 낮춰 활성주사(active scan)시의 최대전류밀도(I_a)에 대한 역주사(revers scan)시의 최대전류밀도(I_r)의 비(I_r/I_a)를 비교함으로써 입계에민화도(degree of sensitization, DOS)를 측정하여 부식특성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전면 부식(General corrosion)

1080°C에서 30분간 용체화처리 후 시편의 미세조직을 광학현미경으로 예비관찰한 결과, 오스테나이트(austenite)와 페라이트(ferrite)의 체적분율은 약 50:50으로 나타났으며 그 외의 석출물 등은 관찰되지 않음이 확인되었다.

Fig. 1은 0.5M H₂SO₄에서 전면부식 시험한 양극분극곡선으로 (a)는 용체화처리만 하여 퀀칭(quenching)된 각각의 시편에 대한 것이고 (b)는 3.0Mo DSS의 용체화처리 및 700°C에서 시효열처리 하였을 경우를 나타낸다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서와 같이 모든 시편은 열처리 조건에 관계없이 모두 유사한 10⁻⁵A/cm²의 부식전류밀도(I_{corr})와 -280mV의 부식전위(E_{corr})를 나타내고 있으며, 다른 온도에서 열처리한 시편들 및 W 치환된 강종에서도 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 사실은 W 치환 및 600~900°C 범위에서의 열처리는 DSS의 전면부식 저항성에는 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. Ahn and Kang⁽⁷⁾은 동일한 강종으로 700~850°C에서 30분간 열처리 후 미세조직을 관찰한 결과 금속간화합물 형태의 σ상이 30~40 vol.% 석출되

어 충격인성을 급격히 감소시켰다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 1의 양극전위 분석시험 결과, 이러한 석출물들의 출현이 일반적인 전면부식저항성에는 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다.

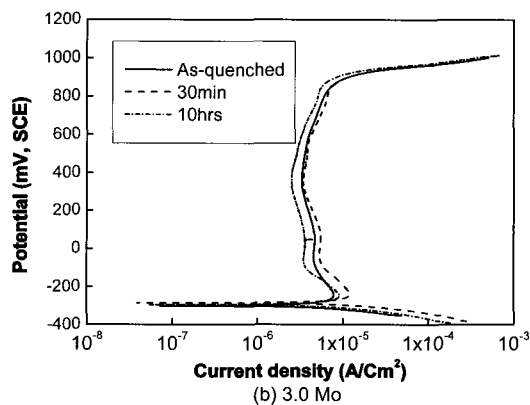
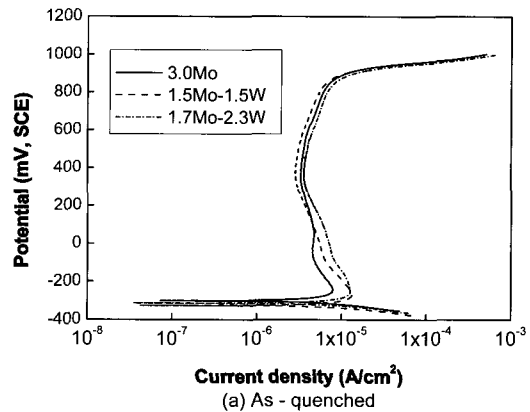


Fig. 1 The polarization curves of general corrosion test in 0.5M H₂SO₄ of (a) DSS as-quenched and (b) 3.0Mo DSS aged at 700°C.

3.2 공식저항성(Pitting corrosion resistance)

스테인리스강의 공식저항성을 평가하는 지표로서 흔히 Pitting resistance equivalent number (PREN)가 사용되며 이것은 다음의 식으로 주어진다.

$$PREN = [Cr]\% + 3.3[Mo\%] + 16[N\%]^{(9)}$$

이 후 Okamoto⁽¹⁰⁾는 W원소의 효과를 고려하여 수정식을 제안하였으며 이것을 PREN라 명명하여 다음의 식으로 나타내었다.

$$PREN = [Cr]\% + 3.3[Mo\% + 0.5W\%] + 16[N\%]$$

윗식의 PREN에서 나타난 텅스텐(W)원소의 배가인자 0.5는 두원소의 원자량 차이(Mo(96), W(184))에서 나온 것이다. Mo 원소는 위의 두 식에서 나타난 바와 같이 PREN을 증가시켜 내공식성을 향상시키지만, 고온에서 σ 상의 석출을 증가시켜 충격인성^[7]을 저하시키는 역할을 한다. 따라서 PREN 지수의 저하 없이 Mo 함량을 감소시키는 연구는 매우 중요하다. 그리고 Potential-PH diagram^[11]을 보면 합금원소로서 W은 산성분위기에서 매우 안정된 WO_3 부동태 피막을 형성하지만, 알칼리 및 중성분위기에서는 WO_4^{2-} ion의 용출이 발생하므로 본 연구에서는 0.1M NaCl (pH=6)을 함유하는 중성용액을 공식저항성 시험에 사용하였다. Fig. 2 는 용체화처리 직후 각 시편들의 분극곡선을 나타낸다.

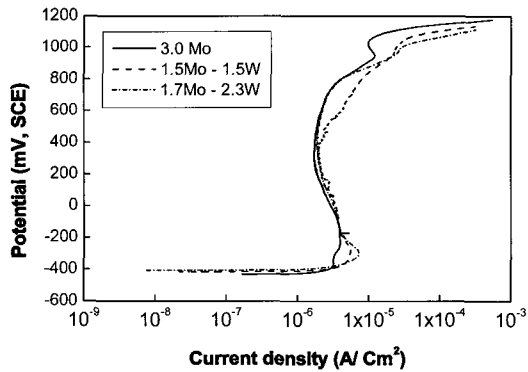
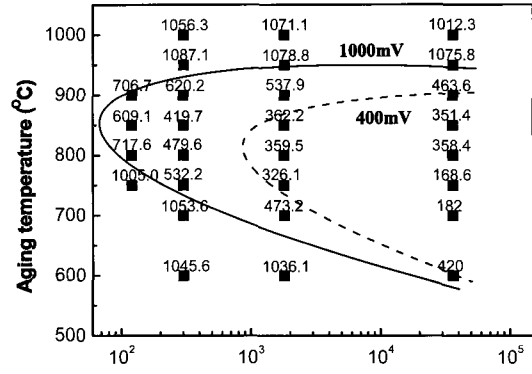


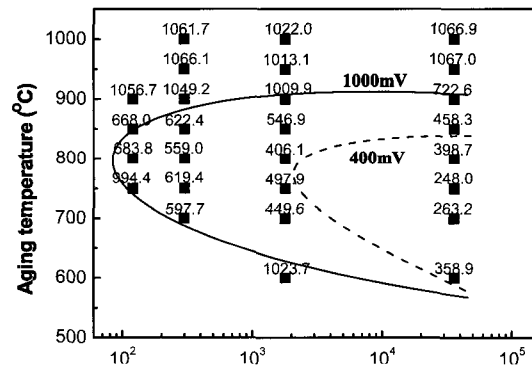
Fig. 2 The polarization curves of pitting corrosion test in 0.1M NaCl of DSS after solution annealing treatment.

Fig. 2에서와 같이 모든 시편의 공식전위 (pitting potential, E_p)는 1000mV 이상을 나타내고 있으며, W 치환된 시편은 치환되지 않은 3Mo DSS에 비해 약간 낮은 E_p 를 보여주고 있다. 한편, 시효열처리된 DSS들의 E_p 는 어닐링 직후의 시편 즉 시효되지 않은 DSS들에 비해 낮게 나타났는데, 각 조건에서 제조된 시편들의 공식저항성의 비교를 쉽게 하기 위하여 각 시편들의 E_p 를 Fig. 3과 같이 Time-Temperature-Pitting

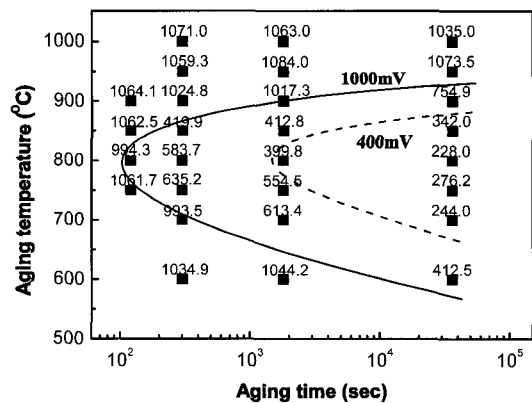
corrosion potential (TTP) diagram으로 나타내었다. Fig. 3에서 각 시효온도 및 시간에 따른



(a) 3.0Mo



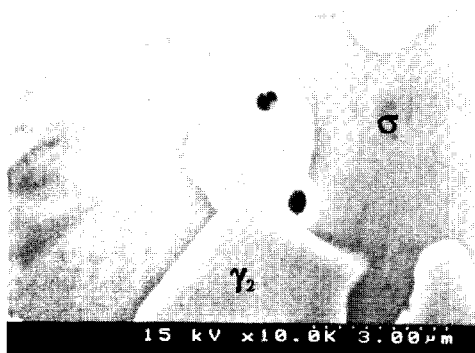
(b) 1.5Mo-1.5W



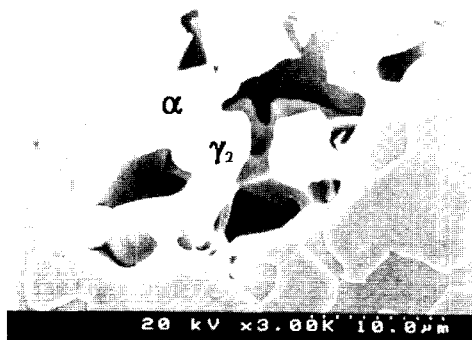
(c) 1.7Mo-2.3W

Fig. 3 Time - Temperature - Pitting corrosion potential diagram in 0.1M NaCl at 30°C as the functions of aging condition.

각 DSS의 내공식성을 비교하기 위하여 1000mV와 400mV의 두가지 공식전위(E_p)를 경계선으로 하였다. Fig. 3에서 보면 3가지 DSS 모두에서 700~950°C의 시효열처리 후 E_p 가 현저히 감소하고 있다. 이러한 시효온도는 대부분의 금속간화합물이 석출한다고 알려져 있는 온도구간⁽⁷⁾이며 E_p 의 가장 큰 감소가 발생한 것은 800°C 부근에서 시효열처리한 강으로 나타나고 있다. 또, Fig. 3에서와 같이 시효열처리 시간이 증가함에 따라 E_p 는 감소하며 열처리의 영향을 받는 온도영역이 넓어지고 있다. 그리고 W 치환 강종인 1.5Mo1.5W 강과 1.7Mo2.3W 강의 PREN지수는 각각 32.1과 34.0로 치환되지 않은 3Mo강의 34.19보다 낮지만 치환강종의 E_p 경계선이 3Mo강에 비해 더 우측에 위치하고 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Micrographs of pits after pitting corrosion tests of duplex stainless steel in 0.1M NaCl.

이것은 낮은 PREN지수에도 불구하고 W 치환된 DSS의 내공식성이 더 우수하다는 것을 의미한다. 또한 750~850°C에서 30분간 시효열처리한 3Mo 강의 E_p 는 400mV보다 낮지만, W 치환 강종의 E_p 는 더 높으며, 시효시간이 10시간 이상 증가하면 공식저항성은 모든 강종에서 매우 낮게 나타나고 있다. 이것은 시효열처리가 발생하는 미세조직의 변화에 기인한다고 생각된다. 한편, 동일한 강종으로 열처리가 발생하는 미세조직의 변화를 체계적으로 조사한 Ahn⁽⁷⁾의 연구에 의하면, 3Mo 강의 경우 750~850°C에서 30분간 시효열처리 후 금속간화합물인 σ 상이 석출되었지만 W 치환강에는 석출되지 않았었다. 그러나 700~900°C에서 10시간 이상 시효열처리한 후에는 W 치환강에도 동일한 석출물이 발견되었다고 보고되고 있다. 이와 같은 연구결과를 토대로 본 연구의 W 치환강에 대한 TTP-diagram을 살펴보면 단시간의 시효열처리 후에는 높은 E_p 를 나타내다가 장시간 시효 후에는 E_p 의 급격한 감소가 발생하고 있는데, 이것은 시효 시 발생하는 미세조직의 변화와 일치한다고 볼 수 있으므로 E_p 의 감소는 σ 상의 석출이 원인이라고 생각된다. Fig.4의 (a)와 (b)는 공식시험 후 공식이 발생하고 성장한 부위의 형태를 SEM으로 관찰한 것이다. Fig. 4에서와 같이 대부분의 핏트(pit)는 α/γ_2 또는 σ/γ_2 의 상경계부에서 발생하는 Intergranular pitting의 형태를 나타내고 있으며, 핏트의 바닥에는 넓은 공동이나 핏트를 연결하는 터널이 관찰되고 있음을 알 수 있다.

3.3 입계부식(Intergranular Corrosion (IGC))

오스테나이트계 스테인리스강의 일반적인 IGC 시험에는 전해액으로 주로 0.5M H_2SO_4 + 0.01M KSCN이 사용되고 있지만, 본 실험에 사용된 DSS를 동일한 전해액으로 시험해 본 결과, 모든 강종에서 IGC 저항성이 너무 높게 나타나 그 저항성을 상대적으로 비교할 수가 없었다. 이와 같이 DSS의 IGC 저항성을 평가하는 방법은 아직 표준화되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 Majidi 와 Streicher⁽⁸⁾가 사용하였던 20M

H₂SO₄ + 0.01M KSCN + 0.5M NaCl 전해액을 사용하여 시험하였다. Fig.5는 700°C에서 시효한 강종을 사용하여 Double EPR 시험한 결과이다. IGC 저항성은 EPR곡선에서 역주사시의 최대전류밀도(I_r)와 활성주사시의 최대전류밀도(I_a)의 비율인 Ir/Ia 크기로 평가하며, 이 비를 예민화도(Degree of Sensitization (DOS))로 표시한다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 부동태피막이 형성

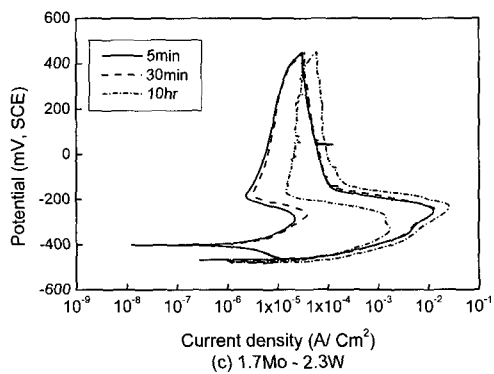
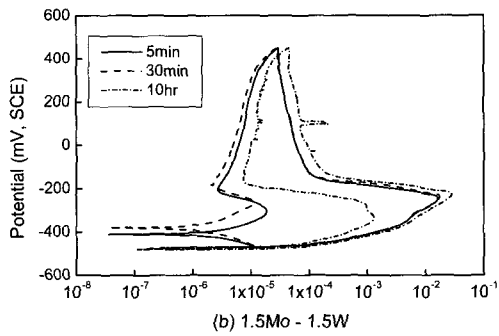
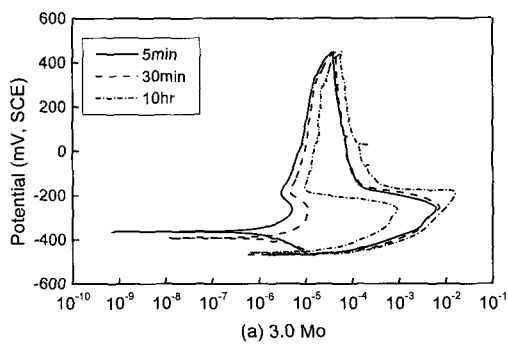


Fig. 5 The polarization curves of double EPR tests in 20M H₂SO₄ + 0.01M KSCN + 0.5M NaCl of the specimens after aging at 700°C.

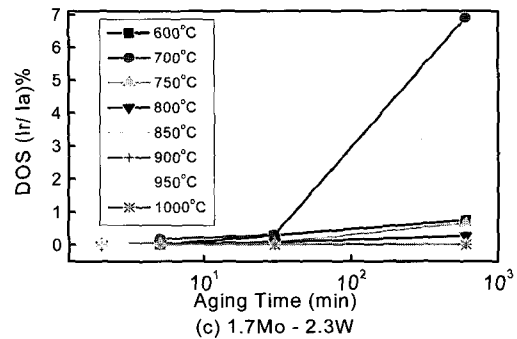
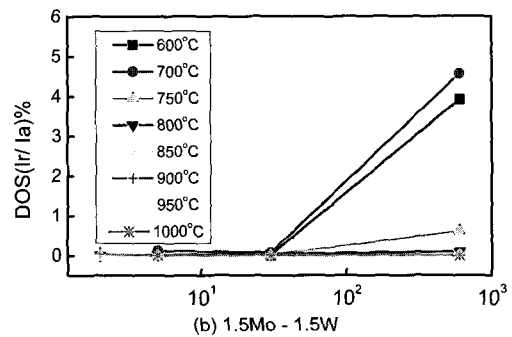
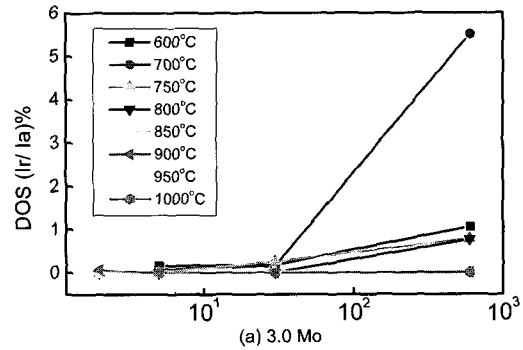


Fig. 6 Degree of sensitization in a solution of 20M H₂SO₄ + 0.01M KSCN + 0.5M NaCl of the specimens after aging with various conditions.

된 후 역주사시 전류밀도가 다시 높게 나타난다는 사실은 활성주사시 입계부식이 이미 발생하였다는 것을 의미하므로 이 비가 높으면 입계부식이 심하게 발생한다는 사실을 의미한다. Fig. 6은 DOS를 여러 가지 시효 조건에서 나타낸 결과로, Fig. 6에서 알 수 있듯이 모든 시효온도 범위에서 시효시간이 30분까지는 매우 낮은 DOS를 나타내고 있다. 특히 700°C, 10시간 시효한 경우 3가지로

강종 모두가 급격히 상승된 DOS를 나타내고 있으며, 그 외 600°C, 10시간 시효 후의 경우 3.0Mo와 1.7Mo-2.3W 강은 약간 상승된 DOS를 나타내는 반면 1.5Mo1.5W 강은 높은 DOS를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 EPR 시험 후 3Mo 강의 표면에 대한 SEM 사진으로, 입계부식이 발생한 형태를 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 입계부식은 결정입계 또는 상경계의 Cr-결핍(depletion)현상에 의해 발생됨을 알 수 있다.

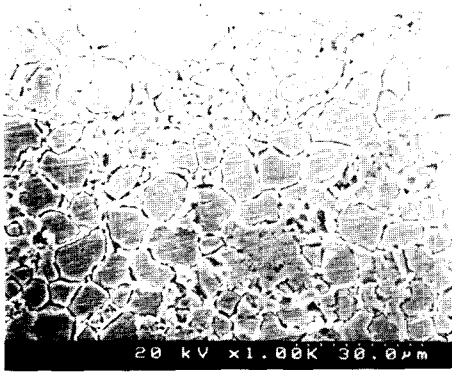
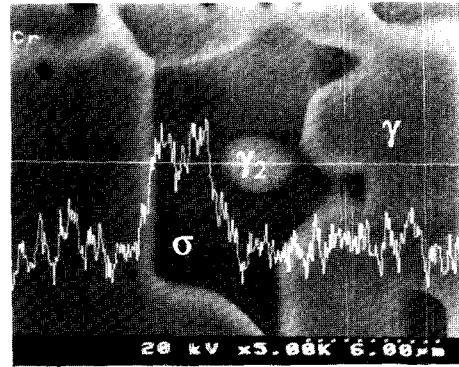


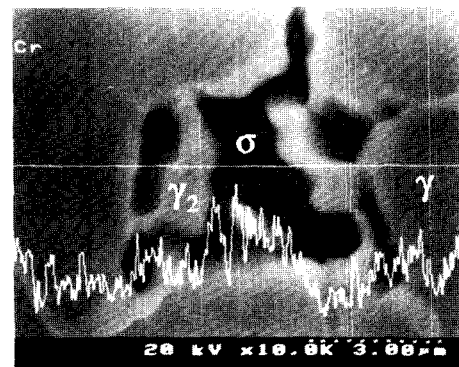
Fig. 7 Micrograph showing surface of specimen aged at 700°C for 10h after intergranular attack.

Fig. 8은 상경계부를 SEM-EDS로 분석한 결과이며 σ/γ 및 σ/γ_2 의 경계에서 Cr함량이 급격히 변화하고 있음을 알 수 있다. 미세조직의 변화를 집중적으로 관찰한 이전의 연구⁽⁷⁾ 의하면, 3Mo 합금의 경우 750~900°C에서 30분간 시효 열처리 후 5~15 vol.%의 σ 상이 석출하였으나, 1.5Mo1.5W와 1.7Mo2.3W 합금에서는 아무런 석출물이 발생하지 않았다는 보고와 더불어 750~900°C에서 10시간 가열할 때에는 3 종류 시편 모두에서 40vol.% 이상의 σ 상이 석출하였고, 석출된 σ 상의 최대함량은 800°C~850°C에서 시효한 강에서 나타났다고 보고하였다. 그러나 Fig. 6과 같이 본 연구에서 수행한 Double EPR 시험의 결과에 의하면 800°C~850°C 시효 열처리 후 DOS 값의 변화가 전혀 발생하지 않았으며, 실제 DOS 값의 최대감소는 600~700°C에서 시효열처리한 강에서 나타났음을 알 수 있다. 이것은 예상과 달

리 σ 상의 석출이 입계부식에 직접적으로 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 2상 스테인리스강(DSS)에서 Cr, Mo 및 W의 성분은 조직 내의 오스테나이트상보다 페라이트상에서 더 많이 분배되어 있으며, 이 성분들의 확산속도 역시 BCC 격자구조를 가지고 있는 페라이트상에서 더 빠르기 때문에 석출되는 σ 상의 대부분이 페라이트상에서만 발생하였기 때문이며, 그 변태과정의 식은 $\alpha \rightarrow \gamma_2 + \sigma$ 로 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉 변태반응 동안에 페라이트의 α 상 내에 존재하는 많은 Cr과 Mo 성분들이 석출되는 σ 상 쪽으로 빠져 나가면서, Cr과 Mo-rich σ 상의 주위에는 Cr, Mo 성분의 결핍이 발생하게 되고, 이 부분에서 2차 오스테나이트상(γ_2)이 발생한다.



(a) 3.0Mo



(b) 1.7MO-2.3W

Fig. 8 Scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometry analysis of specimens aged at 700°C for 10 h.

Table 2. The alloying content of each phase in duplex stainless steels after aging for 10 hours at 700°C analysed by EDS. (wt%)

steel	phase	Cr	Ni	Mo	W	Fe
3.0Mo	γ	21.268	6.01	2.86	-	bal.
	α	25.12	4.22	4.72	-	bal.
	γ_2	20.86	5.31	-	-	bal.
	σ	30.2	3.53	5.41	-	bal.
1.7Mo - 2.3W	γ	19.59	5.28	1.88	1.72	bal.
	α	25.77	2.84	4.38	2.51	bal.
	γ_2	17.52	5.00	-	-	bal.
	σ	30.26	3.2	5.15	3.48	bal.

그리고 시효시간의 증가와 함께 Cr과 Mo 성분의 α/γ 분배계수($[X]_{\alpha}/[X]_{\gamma}$)가 감소하고 Cr과 Mo의 결핍층(depleted zone)도 줄어들면서 IGC 저항성이 다시 증가하게 된다는 것이다. 이러한 이론은 본 연구에서 나타난 결과와 잘 일치되어 설명된다. 즉, 금속간화합물인 σ 상이 800~900°C에서 최대로 석출함^[7]에도 불구하고, Fig.6에서와 같이 DOS의 최대값은 800~900°C가 아닌 700°C 시효 후에 관찰되었다고 판단된다. 한편 Ravindranath 등^[12]은 DSS강의 시효 후 침적시험을 실시한 결과, IGC저항성은 800°C 시효 열처리 후 10시간까지 계속 감소하였다고 하였는데, 이러한 이유는 σ 와 Cr_2N 상 주위에 발생하는 수백 nm 두께의 Cr 또는 Mo 결핍층에 의한 입계에민화(grain boundary sensitization)때문이라고 보고하였다. 이 이론에 따르면, 만약 장시간 또는 고온에서 시효할 경우 상경계 부위의 결핍이 Cr, Mo의 확산에 의해 약해져 예민화가 감소하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 σ 또는 Cr_2N 의 석출이 활발한 온도가 아닌 600~700°C 범위에서 최대의 DOS값이 나타났기 때문에, IGC 저항성의 감소 원인이 근본적으로 σ/γ 또는 Cr_2N/γ 경계에서 발생하는 Cr, Mo 결핍 때문이라고 말할 수 없다. 따라서 본 연구에서 나타난 결과를 토대로 시효열처리 후 입계부식 저항성의 감소 원인을 다음과 같이 다르게 분석하여 보았다. Table 2는 700°C에서 10시간 시효한 3Mo와 1.7Mo-2.3W강에서 각 상의 합금성분 함량을 SEM-EDS에 의해 분석한 결과를 나타낸다(단, γ_2 상에서의 W은

너무 미량이어서 SEM-EDS에 의해서 분석되지 않았음). Table 2에서와 같이 γ 상은 α 상보다 Cr 및 Mo의 함량이 낮으며, 2차 오스테나이트(γ_2)상은 두 시편 모두에서 가장 낮은 Cr, Mo 성분을 함유하고 있다. 이러한 사실은 시효한 강에서 γ_2 상이 내식성에 가장 약하며 갈바닉(Galvanic)부식에서도 양극으로 작용할 것이라는 사실을 의미한다^[13]. 실제 γ_2 상은 앞서 식으로 나타난 바와 같이 600~700°C 온도에서 공정반응에 의해서 형성되며 온도가 더 높으면 γ 상과 같은 화학성분으로 변하게 되며 1.5Mo-1.5W강의 경우 600°C에서 시효열처리를 한 후에도 많은 χ 상과 γ_2 상이 관찰되었다고 보고되고 있다.^[7] 이러한 결과로 볼 때 γ_2 상이 입계부식에 가장 치명적인 영향을 준 것으로 사료되며, 이것은 Fig.6에서 나타난 바와 같이 600~700°C 시효 후 DOS값의 급격한 증가가 나타난 원인이라고 판단된다.

4. 결 론

2상 스테인리스강(DSS)의 내식성에 미치는 텅스텐(W) 치환의 영향을 조사하기 위하여, 22Cr-5Ni 강을 여러 가지 조건에서 시효열처리한 후, 전기화학적으로 내식특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 600~1000°C 범위에서 시효열처리를 실시하여도 DSS의 전면부식성에는 영향을 미치지 않았다.
2. 700~900°C에서 시효할 경우 시효시간이 증가함에 따라 DSS의 공식저항성은 감소하였고 W

치환강의 공식저항성은 더 높게 나타났다.

3. EPR 시험 결과, 3Mo 강과 W 치환강 모두 700°C에서 10시간 시효 후 입계부식저항성의 감소가 가장 크게 나타났다.

4. 공식 및 입계부식은 대부분 γ_2/α 또는 γ_2/σ 상 경계에서 발생하였으며, γ_2 상에서 Mo과 Cr 성분의 함량이 가장 낮게 나타났다. 따라서 시효 열처리 중 발생하는 γ_2 상이 DSS에서 공식 및 입계부식저항성을 저하시킨 가장 큰 원인이었다.

5. 참고문헌

- [1] H. D. Solomen and T.M. Devine, Jr., "Duplex Stainless Steels - A Table of Two Phases", Proc. Conf. "Duplex Stainless Steels", American Society for Metals, Metals Park, OH, pp. 693~756, 1983.
- [2] T. A. Debold, "Duplex stainless steel - microstructure and properties", J. Met, Vol. 41, No.3, pp. 12~16, 1989.
- [3] H. Eriksson and S. Bernhardsson, "The Applicability of Duplex Stainless Steels in Sour Environments", Corrosion, Vol.47, No.9, pp. 719~726, 1991.
- [4] Robert N. Gunn, "Duplex Stainless Steels", Abington publishing, pp. 14-47, 1997.
- [5] J.E. Truman and K.E. Pirt, "Properties of a Duplex (Austenitic-Ferritic) Stainless Steel and Effect of Thermal History", ASM Congress Oct. 1982.
- [6] A.J. Sedriks, "Corrosion of Stainless Steels", John Wiley & Sons, 1979.
- [7] Y.S. Ahn and J.P. Kang, "Effect of Aging Treatments on Microstructure and Impact Properties of Tungsten Substituted 2205 Duplex Stainless Steel", Mat. Sci. Technol., vol.14, No.4, pp. 382~388, 2000.
- [8] A.P. Majidi, M.A. Streicher, "Double Loop Reactivation Method for Detecting Sensitization in AISI 304 Stainless Steels", Corrosion, Vol.40, No.9, pp. 584~592, 1984.
- [9] J. Pleva, and S. Nordin, "Properties of Different MMA-Welds on Modified Type 329 Ferritic -Austenitic Stainless Steel", Proc. conf. "Duplex Stainless Steels '82", St. Louis, ASM, pp. 603~629, 1983.
- [10] H. Okamoto, "The effect of Tungsten and Molybdenum on the Performance of Super Duplex Stainless Steels", Proc. conf. "Application of Stainless Steel '92", Stockholm Sweden, pp. 360~367, 1992.
- [11] Marcel Pourbaix: "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", Pergamon Press, New York, 1996.
- [12] K. Ravindranath and S.N. Malhotra, "The Influence of Aging on the Intergranular Corrosion of 22Cr-5Ni Duplex Stainless Steel", Corrosion Science, Vol.37, No.1, pp. 121~132, 1995.
- [13] J. O. Nilsson, A. Wilson, B. Josefsson, and T. Thorvaldsson, "Relationship between Pitting Corrosion, Toughness and Microstructure for Isothermally Heat Treated Super Duplex Stainless Steel", Proc. conf. "Application of Stainless Steel '92", Stockholm Sweden, pp. 280~289, 1992.

저 자 소 개



김기엽 (金琪燁)

1963년 10월생, 1995년 부경대학교 금속공학과 졸업(학사), 1998년 부경대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 재료공학과 박사과정수료, 현재 울산기능대학 재료과 조교수



안용식 (安龍植)

1959년 6월생. 1982년 부산대학교 재료공학과 졸업(학사). 1984년 동 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1989년 독일 슈트트가르트 대학교 대학원 재료공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 신소재 공학부 교수



정병호 (鄭炳琥)

1950년 9월생. 1973년 부산대학교 금속공학과 졸업(학사). 1978년 부산대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 졸업(박사). 현재 부경대학교 신소재 공학부 교수