

황산 수용액 내 듀플렉스 스테인리스강 (UNS S32205)의 부식거동에 미치는 용접프로세스 및 필거압연 공정의 영향

장유성¹ · 백규빈² · 박진성³ · 홍승갑³ · 김성진^{2,†}

¹한국폴리텍대학교 순천캠퍼스, 전남 순천시 기적의도서관 1길 41

²국립순천대학교 신소재공학과, 전남 순천시 중앙로 255

³포스코 기술연구원, 경북 포항시 남구 괴동로 222

(2025년 9월 25일 접수, 2025년 10월 17일 수정, 2025년 10월 20일 채택)

Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel (UNS S32205) in Sulfuric Acid Solutions: Effects of Welding Process and Pilgering

Yu Sung Jang¹, Gyu Bin Baek², Jin Sung Park³, Seung Gab Hong³, and Sung Jin Kim^{2,†}

¹Department of Industrial Facilities, Suncheon Campus of Korea Polytechnic, Suncheon 57975, Republic of Korea

²Department of Advanced Materials Engineering, Suncheon National University, Jungang-ro, Suncheon 57922, Republic of Korea

³POSCO Technical Research Laboratories, Pohang 37859, Republic of Korea

(Received September 25, 2025; Revised October 17, 2025; Accepted October 20, 2025)

This study investigated the corrosion behavior of duplex stainless steel (S32205) fabricated using plasma arc welding (PAW) and laser beam welding (LBW), followed by post-weld heat treatment (PWHT) and pilgering processes. We evaluated the impact of sulfuric acid concentrations (5% and 50%) on corrosion resistance using potentiodynamic polarization, immersion tests, and critical pitting temperature (CPT) measurements. Microstructural analysis showed that LBW produced narrower, deeper welds with finer grains and significantly lower oxide inclusion fractions compared to PAW. In 50% sulfuric acid, LBW demonstrated lower passive current densities and more stable passivation, attributed to its reduced inclusion content and suppression of local anodic dissolution. PWHT restored the δ/γ phase balance to approximately 50:50, enhancing corrosion resistance, while pilgering introduced high residual stress and caused a $\gamma \rightarrow \epsilon$ transformation, resulting in decreased CPT and increased localized attack. Weight loss in 5% sulfuric acid was negligible across all conditions, whereas in 50% acid, it increased significantly for pilgered samples. These findings suggest that LBW, particularly with optimized PWHT, provides superior corrosion performance and strong potential for applications in heat recovery steam generator (HRSG) components of combined-cycle power plants.

Keywords: Combined cycle power plant, Heat recovery steam generator (HRSG), Duplex stainless steel, Sulfuric acid corrosion, Laser beam welding

1. 서론

복합화력발전소(Combined cycle power plant, CCPP)는 천연가스(Liquefied natural gas, LNG)를 연소하여 발생하는 배기가스를 이용해 전력을 생산하고, 남은 폐열을 활용하여 보일러에서 증기로 전환시켜 스팀터빈을 구동함으로써 추가로 전력을 생산하는 방식이다 [1,2].

이때 가스터빈에서 발생하는 고온의 폐열을 이용해 증기를 발생시켜 스팀터빈을 구동하는 역할을 하는 배열회수보일러(Heat recovery steam generator, HRSG)는 전력 수요 변동에 따라 가동과 정지 상태를 반복하며 안정적인 전력 공급을 담당한다 [3]. 하지만 보일러가 정지와 가동을 반복하는 비정상 상태에서는, 외부의 찬 공기가 배기구를 통해 유입되어 내부에 습기가 발생하고, 가동 초기 저출력으로 인한 불완전 연소로 인해 SO_x 가 일부 발생할 수 있다. 이때 발생된 SO_x 는 수분과 반응하여 대략 500-600 °C의 온도 범위에서 황산으로 변환되기 시작하며, 200 °C 이하의 온도 구간에서는 대부분

[†]Corresponding author: sjkim56@scnu.ac.kr

장유성: 교수, 백규빈: 학사과정, 박진성: 연구원, 홍승갑: 연구원, 김성진: 교수

이 액체 상태의 황산으로 존재하게 된다 [4-6].



이러한 황산은 상대적으로 낮은 온도의 금속 표면에서 액체 상태로 응축될 수 있으며, 전통적인 화력발전 대비 황산의 발생량이 적은 CCPP에서도 접촉 강제 간 온도 차이가 클 경우, 수분 응결로 인한 국부적인 부식반응이 집중될 수 있어 적용소재의 사용 수명이 감소될 수 있다.

현재 복합화력발전 설비 내 소재는 주로 Seamless 형태로 제조되는 내황산강이 사용되고 있으며, 이는 Cu, Co, Sb 등 황산을 포함한 산성 환경에 내식성을 제공하는 원소들이 소량 함유된 강재이다. 구체적으로, 고농도 황산 조건에서도 Cu가 비정질 농화층을 치밀하게 형성하여 소지 강재의 부식 반응을 억제시키는 메커니즘으로 알려져 있다 [7]. 하지만, CCPP는 기존 석탄화력발전 대비 황산 배출량이 낮은 저농도 황산 수용액 환경임을 고려할 때, 탄소강 계열 대비 표면의 안정적 부동태 피막 형성이 용이한 일반 듀플렉스 스테인리스 강재 (Duplex stainless steel, DSS)의 적용 가능성이 제기된다 [8]. 다만, 복합화력발전의 환경 내 저농도의 황산 수용액 또한 반복적인 수분증발 과정에서 황산의 농도는 지속적으로 증가될 가능성 또한 배재할 수 없다.

듀플렉스 스테인리스 강재는 오스테나이트 및 페라이트의 2상 구조로 대략 1:1의 비율로 혼합된 미세조직을 가지고 있으며, 높은 인장강도, 피로강도, 저온인성, 우수한 용접성, 응력 부식 균열 저항성 등의 특성을 보인다 [9,10]. 하지만, 배관 형상 제조를 위한 조관이 이루어질 때 용접부의 내식성은 상대적으로 열위해질 수 있다. 특히, 듀플렉스 스테인리스 강재의 경우 조관 용접 후, 급냉으로 인한 용접부 및 열영향부 내 페라이트(δ)와 오스테나이트 (γ)의 상분율 불균형이 발생하여 내식성 및 기계적 특성이 저하될 수 있다 [11,12]. 이러한 문제를 극복하기 위해 산업계에서는 용접 후 열처리(post-

weld heat treatment, PWHT)를 통해 δ/γ 상분율을 1:1로 회복시키고, 응고 중 발생할 수 있는 Cr 및 Mo의 미세 편석과 금속간화합물 생성을 억제함으로써 기계적 특성과 내식성을 동시에 개선하고자 한다 [13-16].

또한 후속 공정으로 적용되는 필거압연(Pilgering)은 파이프의 외경 및 두께를 정밀하게 제어하고, 냉간 변형에 따른 강도증가를 유도하기 위한 정밀 냉간 가공 공정이다 [17]. 이 과정에서 발생하는 조직변형 및 잔류응력은 내식성 저하를 유발할 수 있어, 산업현장에서는 이에 대한 고려가 필수적인 기술적 과제라 할 수 있다. 이러한 공정 조건과 환경 변화는 파이프 소재의 국부 부식 위험을 증가시키며, 이를 고려한 내식성 평가 및 적정 가공 조건의 확립이 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 복합화력발전의 설비용 소재로서 듀플렉스 스테인리스 강재를 대상으로, 조관용접 프로세스, 후열처리 조건 및 Pilgering 가공에 따른 황산 수용액 환경 내 부식거동을 분석하였다. 이를 토대로, 내식성이 우수한 조관재 개발 및 산업적 적용을 위한 최적의 용접 및 냉간 가공 조건을 도출하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비 및 미세조직 관찰

본 연구에 사용된 시편은 듀플렉스 스테인리스(DSS (UNS 32205)) 파이프 강재로 3.5 mm 두께의 시편을 대상으로 플라즈마아크용접(Plasma arc welding, PAW) 및 레이저빔용접(Laser beam welding, LBW)을 적용하였으며, 용접 후열처리(Post weld heat treatment, PWHT)를 진행하였다. PWHT 후 Pipe 직경 및 길이 조정을 위해 Pilgering 공정(단면감소율: 50~80%)을 수행하였으며, LBW 조관용접 파이프를 대상으로 N_2 25% + H_2 75% 분위기 내에서 1080 °C 온도로 20 분간 유지 후 냉각하였다. 시편 별 화학적 조성 및 용접 조건을 각각 표 1 및 2에 나타내었다.

용접 후 미세조직 관찰을 위해, 용접부위 시편을 1 × 1 cm² 크기로 절단 후 ND (Normal direction) 방향을 관찰할 수 있도록 마운팅 한 후 SiC paper를 이용해 #2400

Table 1. Chemical composition of the tested sample (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	N	Cr	Mo
≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.03	≤0.02	4.5-6.5	0.14-0.20	22-23	3.0-3.5

Table 2. Post-weld heat treatment conditions of the tested samples

Welding Processes	Heat input	PWHT temperature	PWHT time	Atmospheric gas composition
PAW	1.75 kJ / cm	1000 ~ 1100 °C	10 ~ 20 min	Air
LBW	0.49 kJ / cm			N_2 25% + H_2 75%

까지 단계적으로 기계적 연마 후 1 μm까지 미세연마를 수행하였다. 이후, 왕수(75 mL HCl + 25 mL HNO₃) 용액에서 1분 간 화학적 에칭을 수행하였다. 이후 전계 방사형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM)을 이용하여 미세조직을 관찰하였고, 시편의 결정구조에 따른 상분석을 위해 후방산란전자 회절패턴 분석기(Electron backscattered diffraction, EBSD)를 활용하였다. 이때 방출전류, 가속전압, 측정간격(Step size)을 각각 1 nA, 12 kV, 40 nm로 설정하였다.

2.2 전기화학적 분극거동 및 임계 공식온도 실험

각 시편의 전기화학적 부식거동 분석을 위해, 기준전극(Reference electrode, RE), 상대전극(Counter electrode, CE) 및 작업전극(Working electrode, WE)로 구성된 3전극 시스템을 기반으로 동전위 분극(Potentiodynamic polarization) 실험과 임계공식온도(Critical pitting temperature, CPT) 실험이 수행되었다. 전기화학적 실험의 경우 기준전극으로 Ag/AgCl 전극, 상대전극으로는 graphite 전극을 각각 사용하였다. 실험용액은 5% (저농도) 및 50% (고농도) 황산 수용액을 사용하였으며, 상온의 용액 조건에서 개방회로전위(Open circuit potential, OCP) 기준 -0.5 ~ 1.5 V 범위에서 0.5 mV/s의 속도로 전위를 인가하며 실험을 수행하였다.

임계공식 온도 실험은 ASTM G150 [18] 규격을 토대

로 1 M NaCl 용액이 담긴 셀을 온도 조절이 가능한 항온 수조 내 분당 1°C의 온도로 상승시키며, 700 mV_{SCE} 전위를 일정하게 인가하며 전류밀도의 변화를 측정하였다. 이때, 전류밀도가 100 μA/cm²를 초과한 온도를 임계 공식온도로 판단하였다. 또한, 시편 별 개재물 형상 관찰을 위해 광학현미경(Optical microscope)을 활용하였다.

2.3 무게감량 측정 및 부식형상 관찰

각 시편의 부식감량 측정을 위해 용접부위를 중심으로 40 × 40 × 3 mm³의 크기로 절단하여 SiC 연마지로 #2000까지 연마 후, 5 및 50% 황산 수용액 내 각각 24, 48 시간동안 침지 후, 전자저울을 이용하여 무게를 측정하였으며 equation (1)을 이용하여 단위면적 당 무게 변화를 계산하였다.

$$\text{Weight loss (g/cm}^2\text{)} = \frac{W_a - W_b}{A} \quad (3)$$

여기서 W_a , W_b , A 는 각각 시편의 침지 전 무게(g), 시편의 침지 후 무게(g), 시편의 표면적(cm²)을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접(PAW, LBW) 후 열처리에 따른 미세조직 관찰

Fig. 1은 각 시편의 용접 후 열처리에 따른 단면 형상

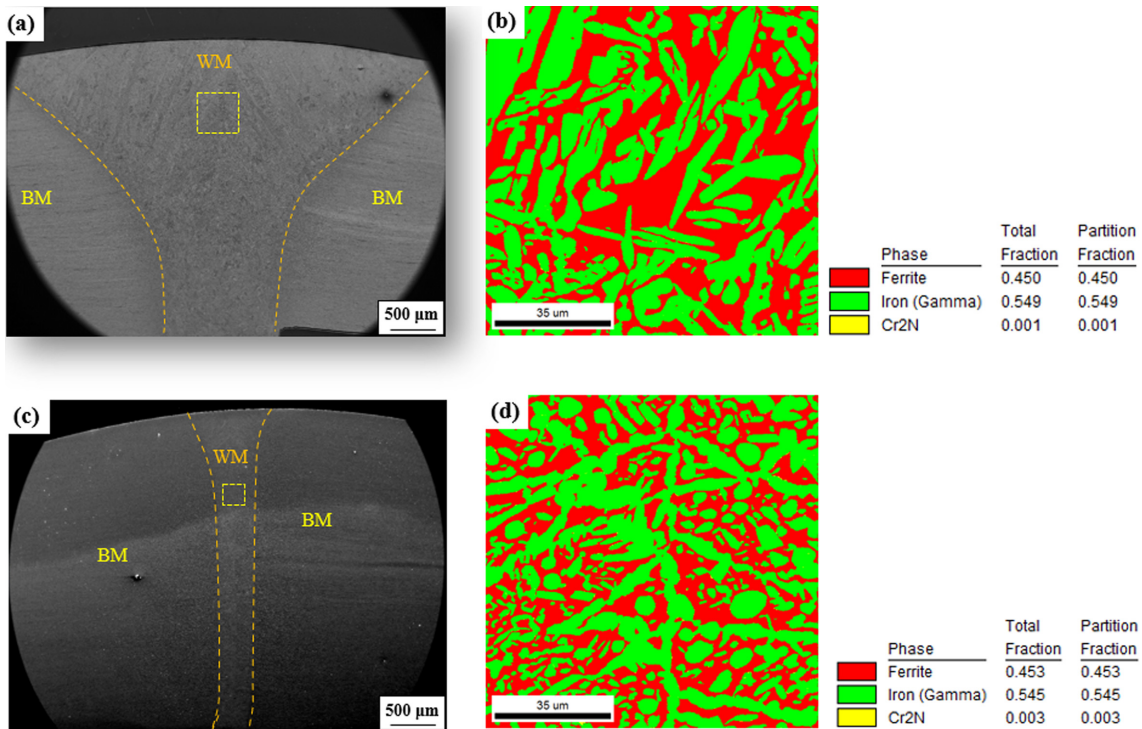


Fig. 1. (a,c) FE-SEM micrographs of the tested samples, and (b,d) corresponding EBSD phase analysis in the WM: (a,b) PAW; (c,d) LBW

및 용접부 내 δ 와 γ 의 분율 측정값을 나타낸다. PAW는 플라즈마 아크 열원을 이용하여 원뿔 형상의 아크를 발생시키는 방식으로, 비교적 넓은 면적에 열이 전달되는 반면, LBW의 경우 높은 에너지 밀도의 점 열원을 이용하는 키홀(keyhole) 방식으로 열의 집중도가 높고 상대적으로 좁고 깊은 용접부 형성이 가능하다. 또한, 10^4 W/mm^2 이상의 높은 밀도를 갖는 집속된 레이저 에너지를 이용하기 때문에 PAW 대비 용접변형의 감소 및 고속용접이 용이한 특성을 가지고 있다. Fig. 1a와 c에서 보이는 바와 같이 PAW와 LBW의 용접부 마크로 형상에 큰 차이가 있으나, 열처리 후 용접부 내 δ 와 γ 의 상분율은 대략 5:5로 측정되어, 조직 간 유의한 차이는 나타나지 않았다. 다만, LBW의 용접부 내 형성된 미세 조직의 크기가 보다 미세하게 형성되었음이 특징적이었는데, 이는 LBW의 상대적으로 높은 에너지 밀도와 국부적인 열집중 하에 응고과정 중 주변 모재로의 빠른 열확산에 기인한 결과로 판단할 수 있다. 열처리 후 두 프로세스 간 유의미한 Cr_2N 의 잔존은 나타나지 않았다.

3.2 전기화학적 분극거동 실험 및 개재물 분율 측정

Fig. 2는 상기 논의된 용접 프로세스별 후열처리 시편 대상 황산 수용액의 농도에 따른 동전위 분극 곡선을 나타낸다. 저농도 황산분위기(5%)에서 측정된 동전위 분극실험 결과, 두 시편에 있어 양극분극 시 안정적인 부동태 거동을 보이며 전위구간 내 명확한 공식 거동이 보이지 않았다. $1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ 인근 전위구간에서는 산소 발생 반응($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$)의 영향으로 전류 밀도가 급격히 증가한 것으로 판단할 수 있다. 반면, 상대적으로 고농도 황산분위기(50%)의 경우, LBW 대비 PAW의 부식전류밀도가 높은 수준이며 임계전류밀도 및 부동태 구간 내에서도 다소 높은 전류밀도와 함께 불안

정한 거동이 나타났다.

Fig. 3에서는 시편 별 무게 감량 측정 결과를 나타낸 것으로, 저농도 황산 조건의 경우 두 시편 모두 매우 낮은 감량 수준을 나타내었고 침지 장기화에 따른 무게 감량 수준은 미미하였으며 상대적 차이 또한 오차범위 내로 나타난 반면, 고농도 황산 조건의 경우 침지 장기화에 따른 감량수준은 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, LBW 시편의 감량수준이 PAW 시편 대비 상대적으로 낮은 감량 수준을 보였다. 일반적으로 DSS의 내식성은 표면 부동태피막의 구조, 연속성 및 안정성에 크게 의존하는데 용접부에 형성되는 조대한 크기의 산화성 개재물은 이러한 피막의 연속성 및 안정성을 저해하여 국부부식의 개시점으로 작용할 수 있다 [19]. 용접 프로세스상 특성 측면에서 고려해보면, PAW가 LBW 대비 높은 입열에 의해 비드 크기가 크고 냉각속도가 느림에 따라 산화성 개재물의 형성 및 응집이

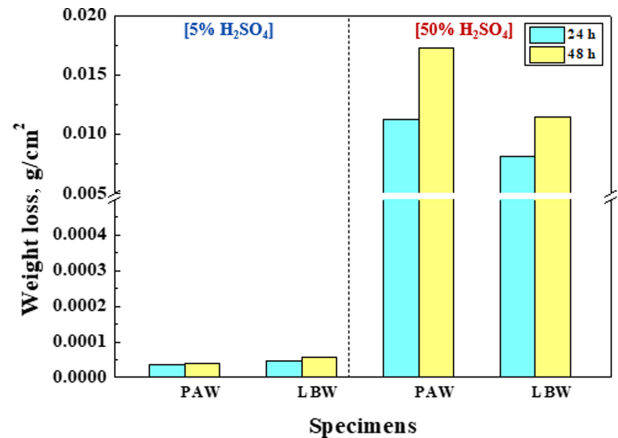


Fig. 3. Weight loss of the samples measured after 24 and 48 h of immersion

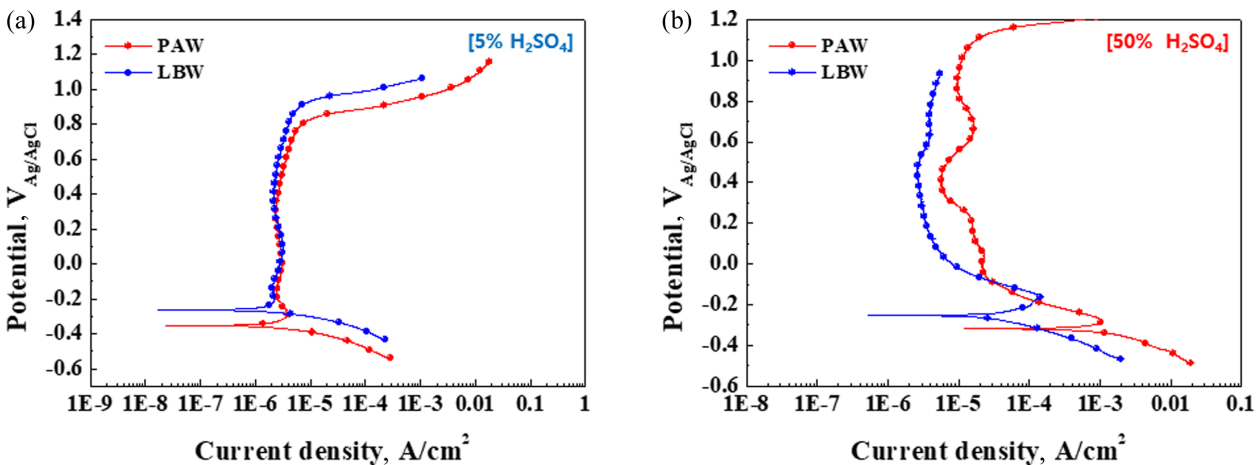


Fig. 2. Potentiodynamic polarization curves of the samples in sulfuric acid solutions with two different concentrations: (a) 5% and (b) 50%

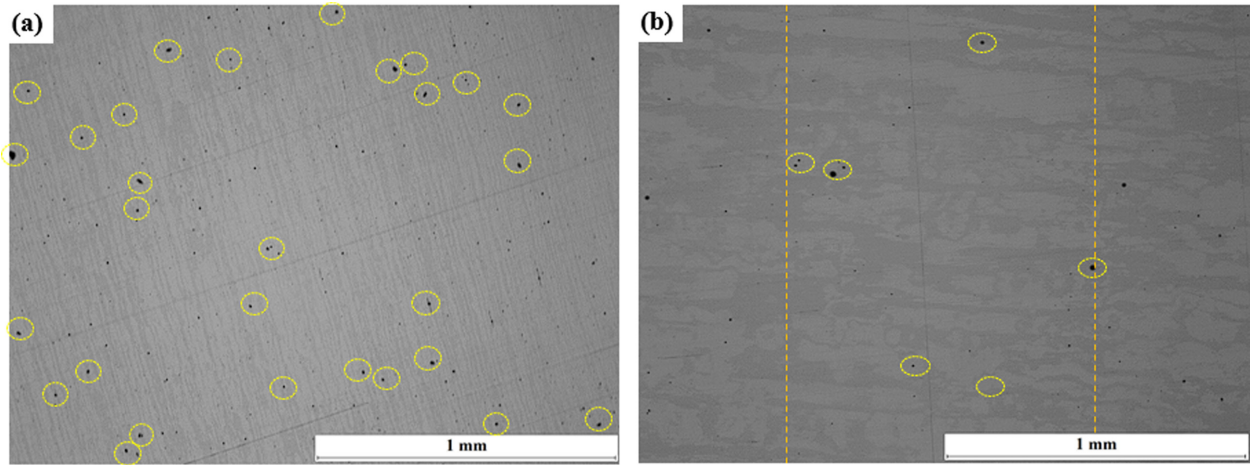


Fig. 4. Oxide inclusions observed in the weld joint region of (a) PAW and (b) LBW samples

용이할 수 있다 [20]. 이에 감소된 계면에너지와 증가된 부러운 개재물의 상부로의 부상을 야기하여 [21], 개재물의 형성수준을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이는 Fig. 4에서 제시된 두 시편의 개재물 분율 측정 결과로 뒷받침된다. 이는 시편 표면부의 Weld joint 내에서 5 개의 영역을 무작위로 선정하고, 지름 10 μm 이상의 개재물을 대상으로 단위면적당 개수로 분율을 측정하였으며, 그 결과 단위면적당 개재물 분율이 PAW에서 현저히 높게 측정되었고 LBW의 경우 매우 낮은 수준의 개재물 만이 관찰되었다. 일반적인 산화성 개재물의 용점은 본 연구에서 적용한 후열처리 온도(1080 $^{\circ}\text{C}$)

대비 높은 수준 [22,23]으로 후열처리를 통한 분율저감은 기대하기 힘들며, 따라서 내식성 측면에서 LBW의 보다 높은 적용 가능성을 예상해 볼 수 있다.

3.3 LBW의 후열처리 및 Pilgering 공정에 따른 미세조직 분석

상기 제시된 결과를 토대로 황산 수용액 내 내식성 측면에서 LBW의 적용이 보다 바람직한 것으로 판단되어, LBW 대상 후속 공정을 통한 미세조직 변화와 부식거동에 대해 보다 정밀한 분석을 수행하였다. 우선, Fig. 5(a)는 LBW 직후 용접부의 미세조직을 나타낸다.

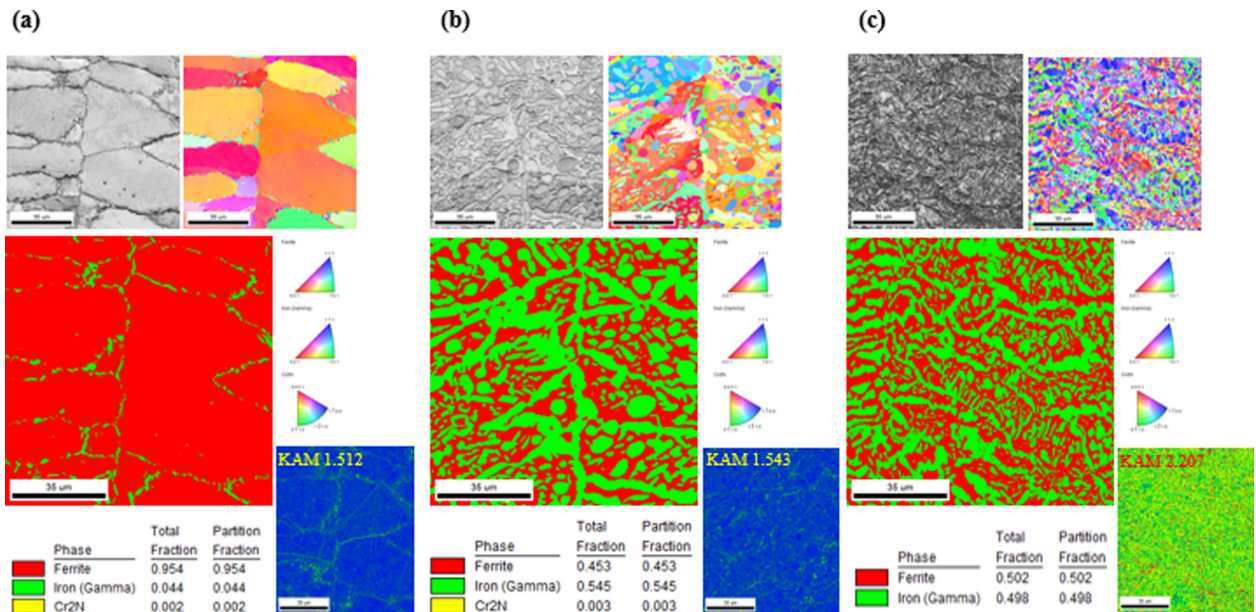


Fig. 5. The EBSE image quality (IQ) maps, inverse pole figure (IPF) maps, phase maps with phase fractions, and KAM maps with mean KAM values in the weld metal (WM) of LBW: (a) as-welded condition; (b) after PWHT; (c) after PWHT and pilgering

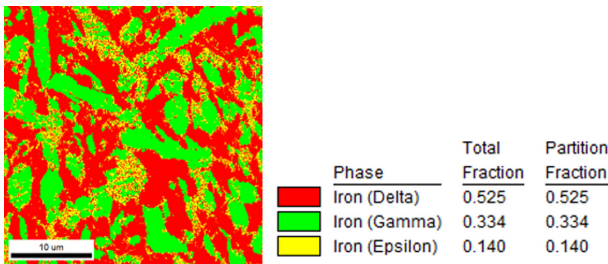


Fig. 6. EBSD phase map in the WM of the LBW sample after PWHT and pilgering

As-weld 상태의 미세조직은 δ 의 분율이 매우 높고 γ 가 매우 낮게 나타났다. 일반적으로, DSS 조직의 δ 와 γ 의 비율이 대략 5:5를 만족할 경우 내식성이 가장 우수하다고 알려져 있다 [24,25]. 하지만, Fig. 5(a)와 같이 용접부 내 상분율 불균형은 δ 와 γ 내 합금성분의 분배불균형에 의해 내식성이 현저히 낮을 것으로 예상된다. 결국 LBW As-weld는 빠른 냉각으로 γ 의 성장은 제한되고, γ 상 안정화원소인 N [26]은 Cr과 결합하여 Cr_2N 형태로 석출된다 [27]. 일반적으로 Cr_2N 은 인근영역에서 Cr의 결핍을 야기하게 공식의 우선 개시점으로 작용하여 강재의 내식성을 크게 저하시킬 수 있다 [28-30]. 비록 본 EBSD 분석에서는 Cr_2N 의 석출 수준에 대한 유의미한 결과 도출이 이루어지지 않았지만, DSS의 용접부는 조직 내 상분율 불균형에 따른 내식성 저하 수준이 높을 것으로 판단되어 후열처리 공정조건 제어를 통한 상분율 회복(Fig. 5b)이 반드시 필요하다. 이후 Pilgering 공정 적용재의 경우 상분율은 유지되는 경향을 보이거나 Kernel average misorientation (KAM) 값의 변화를 토대로 내부 잔류응력 수준이 현저히 높아졌음을 짐작할 수 있고 γ 상의 일부가 ϵ 상으로 변태된 것으로

분석되었다 (Fig. 6). 이는 일반적인 수준의 소성변형이 아닌 고도 소성변형이 반복적으로 인가되는 Pilgering 공정 중 발생하는 변형유기 상변태에 기인한 것으로 판단되며, 이에 따른 부식 손상의 증가 가능성 [31] 또한 예상해 볼 수 있다.

3.4 LBW의 후속공정에 따른 부식거동 분석

LBW의 공정조건 별 전기화학적 동전위 분석실험을 수행하여 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 상대적 저농도 황산분위기에서 대체로 안정적인 부동태 거동을 나타내며 낮은 수준의 전류밀도가 측정되었다. 다만, 후열처리재 대비 용접직 후(AW) 및 Pilgering 수반된 경우 미량의 전류밀도 증가가 나타났다. 반면, 상대적 고농도 황산분위기에서는 후열처리재를 제외하고, 부동태 구간 중 전류밀도가 급격히 증가하는 거동이 나타나 Transpassive potential (E_{Trans})의 정량적 측정 또한 가능한 것으로 판단되었다. 구체적으로, AW의 경우 E_{Trans} 값이 대략 0.5 $V_{Ag/AgCl}$ 인 반면, 후열처리재의 경우 E_{Trans} 값이 나타나지 않는 수준으로 전류밀도의 증가가 극히 미미하여 내식성의 향상이 예상된다, Pilgering 후에는 E_{Trans} 값이 대략 0.27 $V_{Ag/AgCl}$ 수준으로 감소하였고 이때의 전류밀도 또한 큰 폭으로 증가하였다. 이는 Pilgering 과정에서의 발생 가능한 표면결함 및 변형조직이 고농도 황산 환경 내 빠른 부식경로로 작용함을 시사하며, Pilgering 후 추가적인 후열처리를 통해서는 제한적 수준에서의 개선이 나타났다.

Pilgering + 후열처리 시편 대상, 황산 농도별 침지 후 단면관찰 결과(Fig. 8)에서도, 표면부식손상 및 후면부비드 인근 Pilgering 가공 시 형성된 Crack 침투 수준이 5% 대비 50%에서 보다 높게 나타났다. 따라서, 고농도

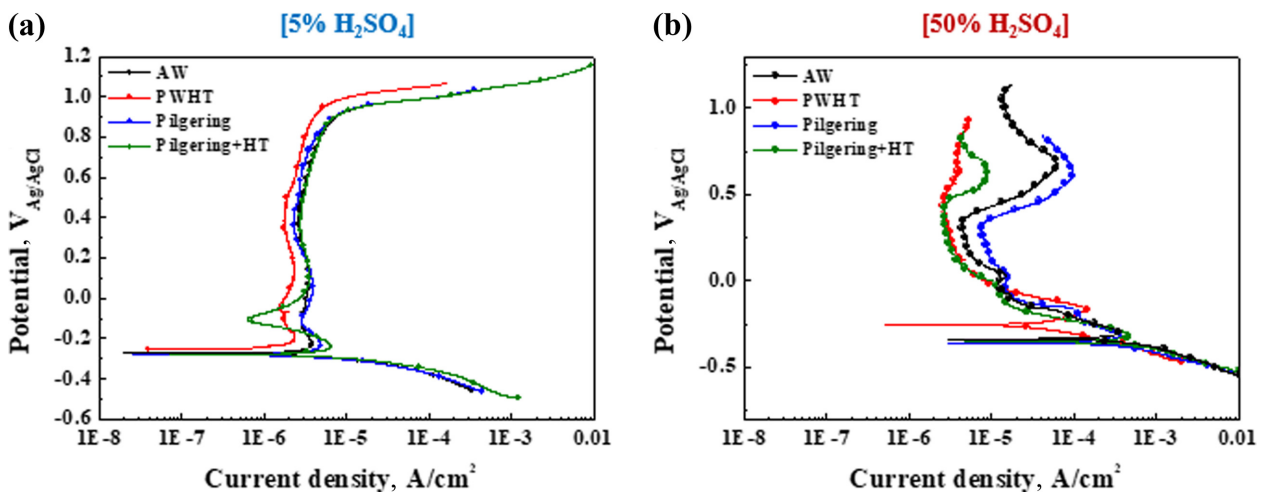


Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves of the samples in sulfuric acid solutions with four different conditions: (a) 5%, (b) 50% sulfuric acid

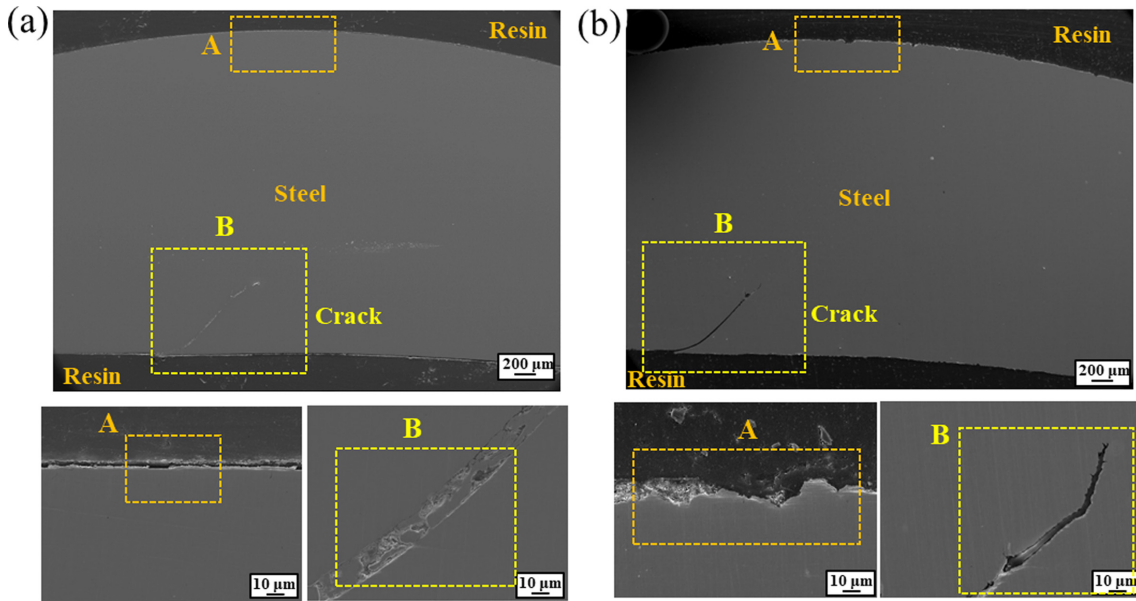


Fig. 8. Cross-sectional observations of the samples after pilgering + HT: (a) 5%, (b) 50% sulfuric acid

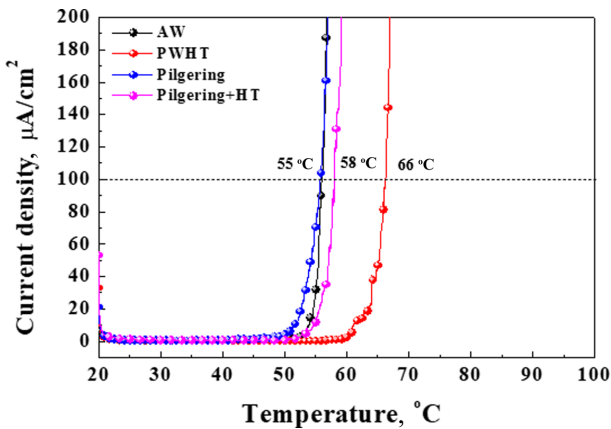


Fig. 9. Critical pitting temperature measurements of the samples with four different conditions

황산 조건에서는 미세 균열이 빠르게 전파되어 내식성 저하에 직접적으로 기여하는 것으로 판단된다.

복합화력발전 내 실 운전환경에서는 황산이 주된 부식인자로 작용하는 것으로 알려져 있으나, 냉각수나 급수 계통, 그리고 연료 내 미량의 염소화합물에 의해 염화물 혼입의 가능성 또한 존재한다. 이 경우의 국부부식 저항성에 대한 비교평가 측면에서 임계 공식온도 실험이 추가적으로 수행되었다. Fig. 9에서 LBW의 경우 As-weld 대비 PWHT 시편의 임계공식온도가 상대적으로 증가하였는데 이는 상분을 회복에 기인한 내식성 향상에 따른 결과로 보인다. 반면, Pilgering 시편의 경우 임계공식온도가 As-weld 수준으로 감소하는 경향이 나

타하는데 내부 잔류응력 증가 및 ϵ 변태에 따른 결과로 예상된다. Pilgering 이후 열처리 시편의 경우 임계공식온도가 상대적으로 증가하며 내식성을 회복하는 경향을 나타내어, ϵ 변태상 제거와 잔류응력 해소 측면에서 Pilgering 공정 이후 후열처리의 필수적 역할을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 듀플렉스 스테인리스강(S32205)을 대상으로 PAW와 LBW 후 열처리 및 Pilgering 공정을 적용하여 미세조직 변화와 내식성을 비교·평가하였다. 주요 결론은 다음과 같이 요약된다.

LBW는 PAW에 비해 좁고 깊은 용접부 형상과 보다 미세한 조직을 나타냈으며, 후열처리 후 δ 와 γ 의 상분율은 대략 5:5수준으로 회복되었고, Cr_2N 잔존은 관찰되지 않았다.

5% 황산 용액에서는 PAW와 LBW 모두 안정적인 부동태 거동을 보였으나, 50% 황산 용액에서는 LBW가 PAW 대비 낮은 부식전류밀도와 넓은 부동태 구간을 나타냈다. 이는 LBW에서 용접부 내 산화성 개재물 분율이 현저히 낮아, 국부 양극 용해 반응이 억제된 결과로 해석되었다.

LBW 시편에서 후열처리는 δ/γ 상분율을 불균형을 개선하여 내식성을 향상시켰으나, Pilgering 공정 적용 시 잔류응력 증가와 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 변태로 인해 내식성 저하가 나타났으며, 이는 임계공식온도(CPT) 감소와 부식손상 증가로 확인되었다. Pilgering 후 추가 후열처리는 제한적이

지만 내식성 회복 효과를 보였다.

이상의 결과를 토대로, LBW는 PAW 대비 개재물 형성 분율 저감과 안정된 부동태 피막 형성 측면에서 우수하며, 황산 수용액 내 복합화력발전소용 배관 및 구조재로 S32205 적용 가능성이 높다. 다만, Pilgering과 같은 고변형 가공 후에는 잔류응력 및 변태 조직에 따른 내식성 저하를 고려한 공정 제어 및 최적조건 도출이 필요하다.

Acknowledgement

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Jeollanamdo RISE center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Jeollanamdo, Republic of Korea. (2025-RISE-14-003)

References

1. X. Shi and D. Che, Thermodynamic analysis of an LNG fuelled combined cycle power plant with waste heat recovery and utilization system, *International Journal of Energy Research*, **31**, 975 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1002/er.1293>
2. X. Shi, B. Agnew, D. Che, and J. Gao, Performance enhancement of conventional combined cycle power plant by inlet air cooling, inter-cooling and LNG cold energy utilization, *Applied Thermal Engineering*, **30**, 2003 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.005>
3. B. Y. Lee, Evaluation of safety of corrosion fatigue of high pressure drum for heat recovery steam generator using transient thermal stress analysis, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, **35**, 1099 (2018). Doi: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.11.1099>
4. W. Zuo, X. Zhang, and Y. Li, Review of flue gas acid dew-point and related low temperature corrosion, *Journal of the Energy Institute*, **93**, 1666 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.02.004>
5. C. Zheng, Y. Wang, Y. Lie, Z. Yang, R. Qu, D. Ye, C. Liang, S. Liu, and X. Gao, Formation, transformation, measurement, and control of SO₃ in coal-fired power plants, *Fuel*, **241**, 327 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.039>
6. D. Fleig, M. U. Zluzeta, F. Normann, M. Abian, K. Andersson, and F. Johnsson, Measurement and modeling of sulfur trioxide formation in a flow reactor under post-flame conditions, *Combustion and Flame*, **160**, 1142 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.02.002>
7. K. W. Chan and S. C. Tjong, Effect of secondary phase precipitation on the corrosion behavior of duplex stainless steels, *Materials*, **7**, 5268 (2014). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma7075268>
8. S. Rajendrachari, *Voltammetry*, p. 77, Books on Demand, London (2019).
9. V. Muthupandi, P. B. Srinivasan, S. K. Seshadri, and S. Sundaresan, Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds, *Materials Science and Engineering: A*, **358**, 9 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00077-7)
10. W. M. M. Huijbregts and R. G. I. Lefterink, Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **51**, 173 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1108/00035590410533129>
11. J. Verma and R. V. Taiwade, Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments-A review, *Journal of Manufacturing Processes*, **33**, 3852 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.103>
12. R. Krawczyk, J. Slania, G. Golanski, and T. Pfeifer, Mechanical properties and microstructure of austenite-ferrite duplex stainless steel hybrid (laser + GMAW) and SAW welded joint, *Materials*, **16**, 29090 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16072909>
13. R. Badji, M. Bouabdallah, B. Bacroix, C. Kahloun, B. Belkessa, and H. Maza, Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds, *Materials Characterization*, **59**, 447 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.03.004>
14. D. H. Kang and H. W. Lee, Study of the correlation between pitting corrosion and the component ratio of the dual phase in duplex stainless steel welds, *Corrosion Science*, **74**, 396 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.033>
15. I. Varol, J. C. Lippold, and W. A. Baeslack, Welding of duplex stainless steels, *Key Engineering Materials*, **69-70**, 217 (1992). Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.69-70.217>
16. B. M. Sim, T. S. Hong, M. A. A. Hanim, E. J. N. Tchan, and M. K. Talari, The influence of post weld heat treatment precipitation on duplex stainless steels weld overlay towards pitting corrosion, *Materials*, **12**, 3285 (2019).

- Doi: <https://doi.org/10.3390/ma12203285>
17. T. Kim, J. Lee, and J. H. Kim, Finite element analysis of pilgering process of multi-metallic layer composite fuel cladding, *Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, **13**, 75 (2017). Doi: <https://doi.org/10.20466/KPVP.2017.13.2.075>
 18. J. H. Shin and J. B. Lee, Critical pitting temperature of 2205 duplex stainless steels using immersion and electrochemical polarization test methods, *The Korean Institute of Surface Engineering*, **39**, 18 (2006). <https://koreascience.kr/article/JAKO200624717969714.pub?orgId=kise>
 19. S. J. Kim, S. G. Hong, and M. S. Oh, Effect of metallurgical factors on the pitting corrosion behavior of super austenitic stainless steel weld in an acidic chloride environment, *Journal of Materials Research*, **32**, 1343 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.65>
 20. D. M. Cho, J. S. Park, S. G. Hong, and S. J. Kim, Corrosion behaviors according to the welding process of superduplex stainless steel welded tubes: gas tungsten arc welding vs. laser beam welding, *Corrosion Science*, **216**, 111108 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111108>
 21. Q. Pang, H. Qi, J. Cui, W. Li, J. Guo, and J. Wang, In-situ observation of the fusion zone under different high heat input for hot-rolled ship plate steel with 0.012yttrium, *Materials Research Express*, **6**, 126517 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab528f>
 22. J. L. Gamutan, C. Fujiwara, and T. Miki, Composition and morphological analysis of MnO-SiO₂-Al₂O₃ inclusions during solidification of steel, *Steel Research international*, **93**, 2200285 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202200285>
 23. X. Zhang, Q. Zhao, C. Liu, Y. Peng, Y. Huang, J. Kong, and K. Wang, On the formation of oxide inclusions in the high nitrogen chromium-manganese steel produced by the wire and arc additive manufacturing, *Journal of Materials Research and Technology*, **33**, 3852 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.103>
 24. Z. Zhang, H. Zhao, H. Zhang, J. Hu, and J. Jin, Microstructure evolution and pitting corrosion behavior of UNS S32750 super duplex stainless steel welds after short-time heat treatment, *Corrosion Science*, **121**, 22 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.02.006>
 25. Z. Zhang, H. Jing, L. Xu, Y. Han, L. Zhao, and X. Lv, Effect of post-weld heat treatment on microstructure evolution and pitting corrosion resistance of electron beam-welded duplex stainless steel, *Corrosion Science*, **141**, 30 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.030>
 26. M. B. Cortie and J. H. Potgieter, The effect of temperature and nitrogen content on the partitioning of alloy elements in duplex stainless steels, *Metallurgical Transactions A*, **22**, 2173 (1991). Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02664983>
 27. J. S. Park, D. M. Cho, S. G. Hong, and S. J. Kim, Effects of reducing atmospheres of bright annealing on the surface and corrosion characteristics of super duplex stainless steel tubes, *Surface & Coatings Technology*, **423**, 127621 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127621>
 28. N. Pettersson, R. F. A. Pettersson, and S. Wessman, Precipitation of chromium nitrides in the super duplex stainless steel 2507, *Metallurgical Transactions A*, **46**, 1062 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2718-y>
 29. A. J. Ramirez, J. C. Lippold, and S. D. Brandi, The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels, *Metallurgical Transactions A*, **34**, 1575 (2003). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0304-9>
 30. S. Herzman, The influence of nitrogen on microstructure and properties of highly alloyed stainless steel welds, *ISIJ International*, **41**, 580 (2001). Doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.580>
 31. J. H. Lee, J. S. Park, D. M. Cho, S. G. Hong, and S. J. Kim, Effects of post weld heat treatment conditions on localized corrosion resistance of super duplex stainless steel tube used for thermal power plant applications, *The Korean Institute of Surface Engineering*, **54**, 248 (2021). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2021.54.5.248>
 32. M. Y. Kim, J. W. Lee, S. Y. Cho, D. J. Park, H. M. Jung, J. Y. Lee, and K. H. Lee, Electrochemical properties of porous AuCu dendrite surface for the oxygen reduction reaction in alkaline solutions, *The Korean Institute of Surface Engineering*, **54**, 1 (2021). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2021.54.1.1>