

이중 연료 엔진용 이중벽 가스 배관 이중 용접부의 매크로 및 마이크로 전기화학적 특성

김 성 중[†] · 박 재 철 · 한 민 수 · 장 석 기

목포해양대학교 기관시스템공학부
(2010년 12월 15일 접수, 2010년 12월 29일 수정, 2010년 12월 29일 채택)

Macro and Micro-electrochemical Characteristics on Dissimilar Welding Metal of Double Wall Gas Pipe for Duel Fuel Engine

Seong Jong Kim[†], Jae Cheul Park, Min Su Han, and Seok Ki Jang

Division of Marine system Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo, Korea
(Received December 15, 2010; Revised December 29, 2010; Accepted December 29, 2010)

This study compared the macro and micro electrochemical characteristics at the local area of welding metal on dissimilar welding parts for type 304 stainless steel (SS) and type 316L SS. The materials are used for double wall gas pipe of duel fuel engine for a ship. The various potentiodynamic experiments were performed several times in 10% H₂C₂O₂ · H₂O solution using macro and micro methods, respectively. The micro electrochemical experiments conducted to resolve at local area on cross-section of dissimilar welding materials by micro-droplet cell device. The micro-droplet cell techniques can be used almost electrochemical experiments to resolve corrosion characteristics of the limited electrode area of the metallic surface between wetted spot of working electrode and tip of sharpened capillary tube. The results of macro electrochemical experiments show that resistance of active dissolution reaction at welding zone was high due to low current density by formation of passivation protection film at passive region. According to the micro electrochemical experiment, the corrosion current density of welding zone and bond zone were relatively high.

Keywords : double wall gas pipe, macro and micro electrochemical experiment, micro droplet cell, welding

1. 서 론

기존 선박용 디젤엔진의 경우, 원유상승에 대한 경쟁력 확보와 운항비용 절감을 위한 목적으로 저질유를 사용해 왔다. 그러나 연소 후 배출되는 NO_x, SO_x 등의 환경 유해 배기가스로 인하여 심각하게 환경오염 문제가 대두되고 있다.¹⁾⁻²⁾ 이러한 문제로 최근 조선산업 및 육상 플랜트 산업에서 환경 친화적인 LNG 연료의 사용에 대한 관심이 증대되고 있다. 현재 이중연료(duel fuel, 이하 DF) 엔진이 액화 천연가스(liquid natural gas, 이하 LNG) 선박에 적용되고 있을 뿐만 아니라 육상 발전설비에도 DF 엔진에 대한 수요가 늘어나고 있는 추세이다.³⁾ 그러나 DF 엔진에 사용되고 있는 천연가스는 가스배관의 결함으로 인한 파손사고 발생 시 인명과 재산에 심각한 피해를 유발할 수 있다. DF 엔진 내 가스수송 배관은 이중벽(double wall)을 사용함으로써 용접결함에 따른 취성 파괴에 기인한 누출사고를 미연에 방

지하는 것이 대단히 중요하다. 이중벽 가스 배관(double wall gas pipe)에 사용되는 기자재는 거의 외국에서 고가로 수입하고 있으므로 수입대체 차원에서 국내의 자체기술을 개발하고자 하며 궁극적으로 화석에너지 고갈 및 환경 문제 등의 해결에 기여하고자 한다. 결과적으로 이중벽 가스배관에 대한 국내기술의 확립을 통해 큰 경제적 이득을 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이중벽 가스배관에 적용하기 위한 목적으로 강도 및 내식성이 우수하고 국내에서 널리 사용되는 type 304 SS와 type 316L SS에 대하여 가스텅스텐 아크 용접(gas tungsten arc welding, 이하 GTAW) 용접을 실시한 후 용접부의 내식성을 평가하였다.

2. 연구방법

본 연구에 사용된 재료는 type 304 SS와 type 316L SS이며 GTAW법을 사용하여 이중 용접을 실시하였다. 용접 그루브 형상은 V타입으로 루트깊은 2~4 mm, 개전각 60°

[†] Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of stainless steels and welding electrode

Element [wt%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	N	Fe
type 304 SS BM	0.058	0.406	1.013	0.029	0.004	18.10	8.03	0.254	0.1	0.039	balance
type 316L SS BM	0.019	0.650	1.070	0.027	0.002	16.70	10.49	0.310	2.0	0.015	balance
ER 316L	0.020	0.410	1.840	0.028	0.011	18.24	11.60	0.310	2.1	-	balance

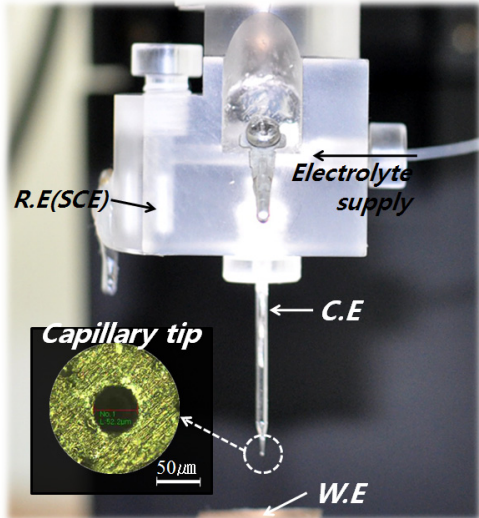


Fig. 1. Composition of the micro droplet-cell and micrograph of the capillary tip.

± 5°이며 세번의 멀티패스 용접을 실시하였다. 사용된 비활성화 기체인 Ar 가스의 유량은 10~20 ℓ/min, 극성은 직류용접의 정극성(DC electrode positive, DCEP)이며, 사용된 용가재는 ER316L을 사용하였으며 모재와 용가재의 화학조성을 Table 1에 상세하게 나타냈다. 상기 용접된 시험편의 용접부를 채취하여 10% 옥살산 용액에서 다양한 전기화학적 실험을 실시하였으며 손상된 시험편 표면을 관찰하여 부식 거동을 분석하였다. 매크로 전기화학적 실험에 사용된 시험편은 1 cm²의 면적을 노출시키기 위해 에폭시로 마운팅하고 시험 전 에머리 페이퍼 #2000까지 연마 후 아세톤과 증류수로 탈지하여 건조하였다. 전기화학 셀의 구성은 시험편을 작동전극으로 하고 백금 대극과 Ag/AgCl 기준전극(SSCE)으로 하여 2 mV/s의 주사속도로 전위를 인가하였다. 자연전위 측정 실험은 86,400초 동안 침적하여 시간에 따른 전위를 측정하였으며, 양분극 실험은 개로전위(E_{oc})로 부터 +3.0 V까지, 음분극 실험은 -2.5 V까지 인가하였다. 뿐만 아니라 DL-EPR(Double loop-electro-chemical potentiokinetic repassivation method)을 실시하여 내식성을 평가하고 다양한 조건에서의 정전류 실험 후 시험편의 표면을 3D 광학 현미경으로 촬영하여 모재, 용접부 및 열영향부 등의 각 영역별 손상 정도와 부식경향을 상호 비교·분석하였다. 뿐만 아니라 국부영역 각 용접부에

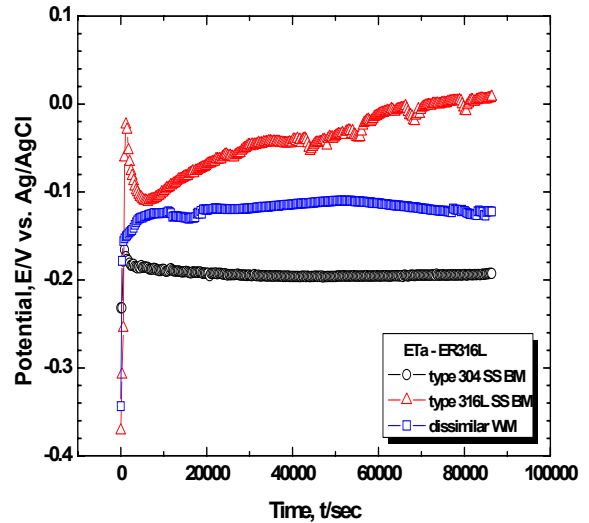


Fig. 2. Potential variation for type 304 SS, type 316L SS BM and dissimilar WM.

대한 전기화학적 특성을 평가하기 위하여 드롭렛 셀을 이용한 마이크로 전기화학적 실험을 실시하였으며⁴⁾⁻⁶⁾ 사용된 드롭렛 셀의 구성은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 드롭렛 셀은 포화 칼로멜 전극(SCE)을 기준전극으로 사용하며, 백금도선이 캐필러리 내부를 통하여 대극과 연결되어 있다. 캐필러리 끝단이 시험편에 접촉하면 내부 전해질 용액에 노출된 부분만 작동전극 면적으로 작용함으로써 전기화학적 셀을 구성하게 된다. 작동전극 면적을 마이크로 단위로 노출시키기 위하여 캐필러리 끝단의 tip 직경을 40~70 µm로 제작하였으며, 실리콘으로 실링하여 용액의 누수를 방지함으로써 노출면적을 일정하게 유지하였다. 마이크로 전기화학 실험은 매크로의 경우와 동일한 조건에서 여러 영역에 대하여 수차례 타펠 분극 실험을 실시하고 타펠 외삽법을 이용하여 측정된 부식전류밀도를 상호 비교하였다.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 2는 type 304 SS와 type 316L SS의 모재 및 이종 용접부에 대하여 10% H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 매크로 자연전위 측정 결과를 상호 비교한 것이다. type 304 SS 모재의 경우, 침지 초기에 -0.165 V(vs. SSCE, 이하 동일)의 전위를 나타낸 후 2,000초를 전후로 대략 -0.181 V의 전위를

나타냈으며 실험 종료 시까지 일정한 값을 나타냈다. 반면, type 316L SS 모재의 전위는 1,200초 이후부터 5,400초 까지 하락하였으며 이후 지속적으로 상승하여 실험 종료 시 0.0083 V의 전위를 나타냈다. 이중 용접부의 경우는 type 316L SS 모재와 같이 실험 초기 급격하게 전위가 상승하였으며 4,500초를 전후로 -0.13 V를 나타낸 후 실험 종료 시까지 거의 일정한 경향을 보였다. 귀한 전위 순으로 재료를 나열하면 type 316L SS, 이중 용접부 그리고 type 304 SS 순으로 정리되며 결과적으로 이중 용접부는 type 316L SS보다는 비하고 type 304 SS 보다는 귀하므로 부식환경에서 안정적인 거동을 나타낼 것으로 사료된다.

Fig. 3은 type 304 SS와 type 316L SS의 모재 및 이중 용접부에 대하여 10% H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 양분극 측정 결과를 상호 비교한 것이다. 모든 재료가 전위 상승에 따라 산화성 보호피막의 형성에 의해 전류밀도가 급격히 저하하는 부동태 현상을 나타냈고 type 304 SS의 경우, 개로전위 E_{oc}가 -0.245 V를 나타냈으며 양분극이 진행되면서 부동태 전위 E_p는 -0.146 V, 임계양극전류밀도 I_p는 1.190 × 10⁻⁵ A/cm²로 나타났다. 산화보호 피막의 형성으로 부동태 유지구간에서는 전류밀도가 일정하였으며 이후 산화피막의 파괴로 인하여 표면에 국부적인 부식손상인 공식이 발생하는 임계공식전위 E_i가 0.82 V로 측정되었다. 결과적으로 type 304 SS의 부동태 유지구간(E_i-E_p)은 -0.146 V에서 0.82 V까지이며 그 범위는 0.966 V가 된다. type 316L SS의 경우, E_{oc}가 -0.168 V로 측정되었으며 E_p는 -0.031 V, I_p는 1.65 × 10⁻⁵ A/cm², E_i는 0.884 V이고 부동태 유지구간의 범위는 0.915 V를 나타냈다. type 316L SS이 type 304 SS에 비해 부동태 유지구간의 범위가 좁고 I_p도 다소 높게 측정되었으나 0.23 V 이상으로 양분극 되면서 보다 견고한 부동태 피막의 형성으로 부식전류밀도가 type 304 SS에 비하여 낮게 측정되었으며 이는 실험 종료 시까지 지속되었다. 반면, 이중 용접부는 전제적인 부동태 현상이 1차와 2차로 구분되며 E_{oc}가 -0.167 V이고 1차 부동태 구간의 E_{p1}는 -0.072 V 그리고 I_p는 2.2 × 10⁻⁹ A/cm²로 개로전위 직후 부동태 특성을 나타냈다. 1차 부동태 E_{i1}는 0.417 V로써 이후 보호피막의 파괴에 따른 전류밀도의 증가현상이 나타났으며 이후 0.457 V에서 보호피막의 재생성에 따른 2차 부동태 특성을 나타냈다. 2차 부동태의 E_{i2}는 0.865 V이며 이후 전위의 증가에 따라 급격하게 전류밀도가 증가하였다. 결과적으로 이중 용접부의 부동태 유지구간은 0.937 V이며 각 모재 대비 대단히 낮은 전류밀도를 나타냈으므로 응력이 작용할 경우 용접부가 보다 우수한 응력부식균열 저항성을 나타낼 것으로 판단된다.⁽⁷⁾⁻⁸⁾

Fig. 4는 type 304 SS와 type 316L SS의 모재 및 이중 용접부에 대하여 10% H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 EPR 실험 결과를 상호 비교한 것이다. type 304 SS와 type 316L

SS 모재는 순방향 주사 시 최대전류밀도인 I_a는 각각 1.18 × 10⁻⁴ A/cm², 3.63 × 10⁻⁴ A/cm²를 나타냈으며 역방향 주사 시 최대전류밀도인 I_r이 각각 3.56 × 10⁻⁵ A/cm², 4.155 × 10⁻⁶ A/cm²로 측정되었다. 각 모재의 DOS(degree of sensitization, I_r/I_a)율은 0.302%와 0.114%이며 type 304 SS에 비해 type 316L SS이 보다 입계부식 저항성이 높은 것으로 판단된다. 이는 type 316L SS의 C함량이 type 304 SS에 비해 무려 50% 이상 적기 때문에 입계에서의 Cr₂₃C₆ 형성되는 양이 적기 때문이며 측정된 DOS율을 단계적으로 구분하면 type 304 SS의 경우, 입계부식 손상이 ditch 단계(0.05 ~ 0.3)보다 이상이나, type 316L SS은

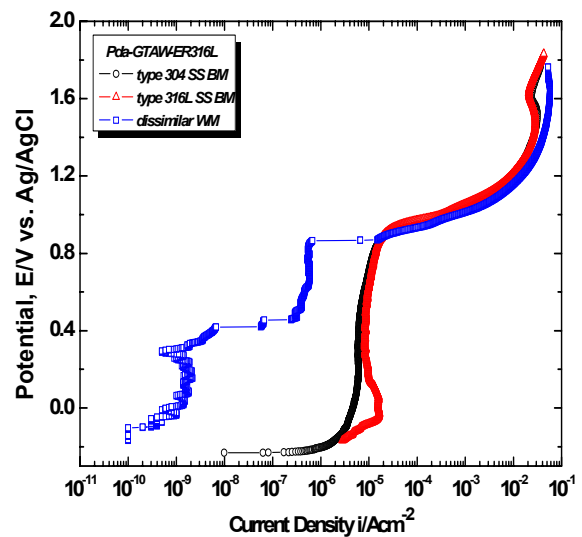


Fig. 3. Anodic polarization curves for type 304 SS, type 316L SS BM and dissimilar WM.

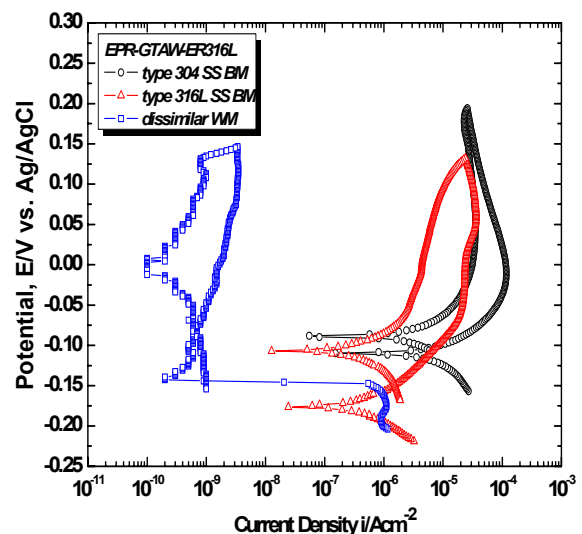


Fig. 4. Comparison of the EPR curves for type 304 SS, type 316L SS BM and dissimilar WM.

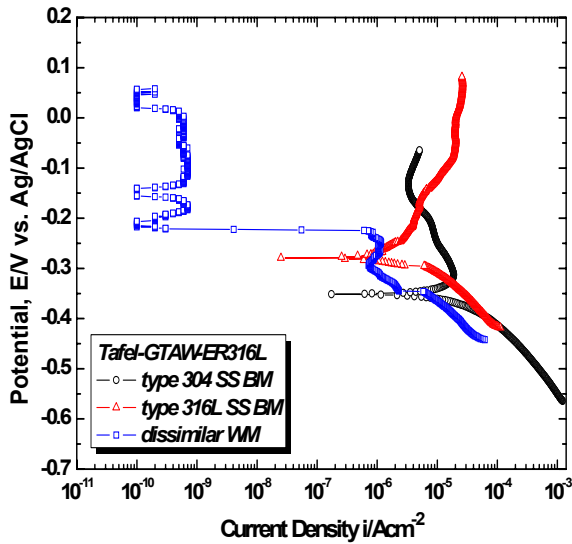


Fig. 5. Comparison of the Tafel curves for type 304 SS, type 316L SS BM and dissimilar WM.

Table 2. Result of the Tafel analysis for type 304 SS, type 316L SS BM and dissimilar WM

Tafel analysis	Corrosion potential [V]	Corrosion current density [A/cm ²]
type 304 SS BM	-0.3022	1.808 × 10 ⁻⁵
type 316L SS BM	-0.2325	4.338 × 10 ⁻⁷
Dissimilar WM	-0.2223	5.597 × 10 ⁻¹⁰

ditch 단계에 속하므로 저항성이 다소 높은 편으로 판단된다.⁹⁾ 반면, 이종 용접부는 순방향 주사 시 I_a 는 3.50×10^{-9} A/cm²이며 역방향 주사 시 I_r 이 1.0×10^{-9} A/cm²로 DOS율은 0.286%으로 나타났다. 이종 용접부의 입계부식 정도는 ditch 단계에 속하므로 type 304 SS와 type 316L SS 모재의 중간 정도의 저항성을 나타냈다. 이와 같이 모재에 비해 용접부의 입계부식 저항성이 감소하는 것은 용접 후 에민화 현상 즉, 용접 입열에 의한 Cr₂₃C₆의 발생에 기인하여 크롬 고갈영역이 형성되기 때문으로 사료된다.

Fig. 5는 type 304 SS와 type 316L SS의 모재 및 이종 용접부에 대하여 10% H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 타펠 분석을 위한 분극 경향을 상호 비교한 것이다. 타펠 분석은 동일한 조건에서 3회 이상 실시하여 평균적인 경향을 나타낸 곡선에서 각 재료별 부식전위와 부식전류밀도를 타펠 외삽법을 이용하여 측정하였다. 전체적으로 E_{oc}보다 높은 전위영역에서 뚜렷한 부동태 특성을 나타냈으며 특히 이종 용접부의 경우 대단히 낮은 전류밀도를 나타낸 반면에 E_{oc}보다 낮은 전위 영역에서는 모재와 유사한 정도의 전류밀도를 나타냈다. 각 모재와 이종 용접부의 부식전위와 부식전류밀도는 Table 2에 세부적으로 나타낸 바와 같으며, 부식전위는 이

종 용접부가 -0.2223 V로 가장 비한 값을 나타냈으나 부식 전류밀도는 5.5969×10^{-9} A/cm²으로 가장 낮은 부식속도를 보일 것으로 판단된다. 모재에 대한 타펠 분극 곡선은 E_{oc}이후의 전위 영역에서 type 304 SS 및 type 316L SS 모두 뚜렷한 부동태 특성을 나타냈으며 type 316L SS이 type 304 SS에 비해 상대적으로 귀한 전위와 낮은 부식전류밀도를 나타냈다.

Fig. 6은 type 304 SS와 type 316L SS의 이종 용접부에 대하여 10% H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 다양한 조건으로 정전류 실험 후 3D 현미경을 사용하여 각 영역별 평균 손상 깊이의 각 전류 조건에 따른 영역별 변화를 나타낸 것이다. 3D 분석 사진에 나타난 바와 같이 적용 전류밀도가 1×10^{-5} A/cm²에서는 손상 깊이가 크지 않고 모든 국부 영역의 손상 정도가 유사하게 나타났으나 적용 전류밀도가 1×10^{-4} A/cm² 이후부터는 손상 정도가 급격하게 증가하였음을 알 수 있다. 적용 전류밀도 1×10^{-4} A/cm²에서의 손상 깊이는 type 304 SS 모재의 경우에 평균 34 μm, type 316L SS은 평균 34.2 μm로 큰 차이를 보이지 않았다. 반면에 열영향부는 type 304 SS 측에서 평균 16.8 μm, type 316L SS 측은 평균 23 μm로 type 316L SS 열영향부가 더 큰 손상 깊이를 나타냈다. 용접부의 경우, 손상 깊이가 평균 18.2 μm 그리고 본드부는 평균 74.2 μm로 상호 인접한 영역임에도 불구하고 큰 차이를 나타냈다. 대체적으로 손상 깊이의 변화가 가장 적게 나타난 것은 용접부이며 다음으로 열영향부, 모재 그리고 본드부 순으로 나열된다. 조대한 결정입계를 나타내는 용접부와 열영향부는 모재보다 국부부식에 대한 저항성이 높은 것으로 사료되며 이는 결정입도와 부식전위에 기인한 것으로 입내와 입계의 전위차이로 발생하는 미소 갈바닉 셀에 의한 영향이 적기 때문에 국부부식에 대한 높은 저항성을 나타낸 것으로 판단된다. 반면, 본드부와 모재의 경우에는 용해반응이 빨라서 국부부식, 뿐만 아니라 전면적으로 부식 손상이 발생하여 손상 깊이가 증대된 것으로 판단된다. type 304 SS와 type 316L SS 이종 용접부에 대한 정전류 실험 결과, 적용 전류밀도가 1×10^{-4} A/cm²로 증가함으로써 활성 용해반응에 기인한 부동태 피막의 파괴에 따른 국부부식이 증가하는 경향을 보였다. 결과적으로 가장 국부부식의 큰 저항성을 나타낸 것은 열영향부와 용접부이며 본드부가 가장 취약한 내식성을 나타낸 것으로 판단된다. 각 영역에서 측정된 손상 깊이의 평균값을 Table 3에 세부적으로 나타냈다.

Fig. 7은 type 304 SS와 type 316L SS 이종 용접부의 마이크로 범위의 각 영역에 대하여 타펠 분석을 위한 분극 곡선을 상호 비교한 것이다. 적용된 영역은 용접부 및 type 304 SS와 type 316L SS의 모재, 열영향부 그리고 본드부이며 이러한 국부영역에 대해서 수차례의 타펠 분석을 실시하였다. 마이크로 타펠 분석 결과, 각 영역에서의 부식전류

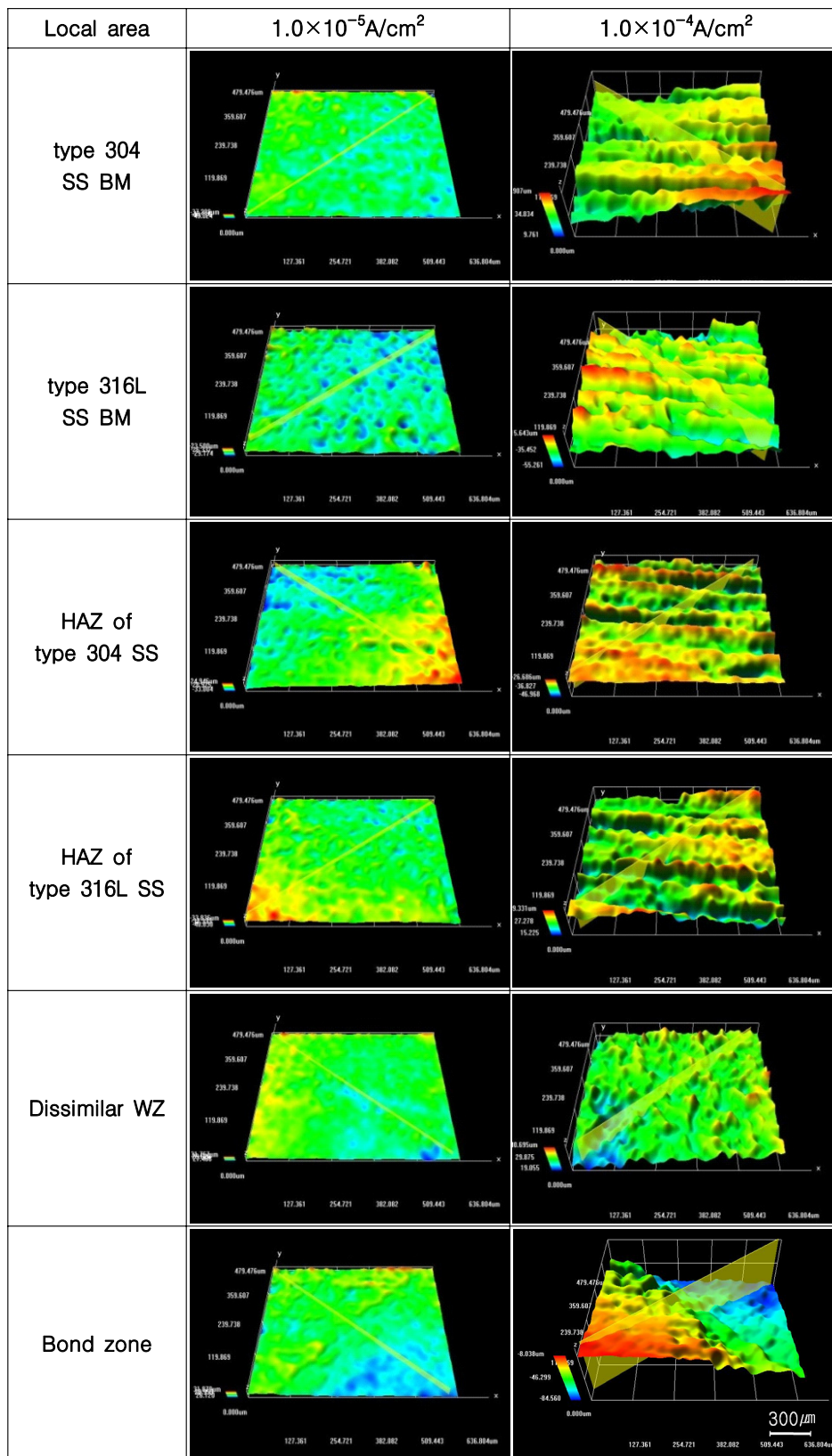


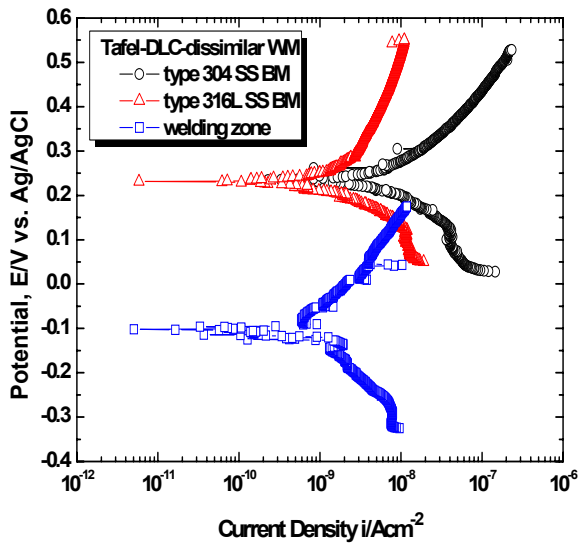
Fig. 6. 3D analysis for the micro-area of dissimilar WM in macro-galvanostatic experiments

Table 3. The average damage depth for the micro-area of dissimilar WM in macro-galvanostatic experiments at $1.0 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ and $1.0 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ (unit : μm)

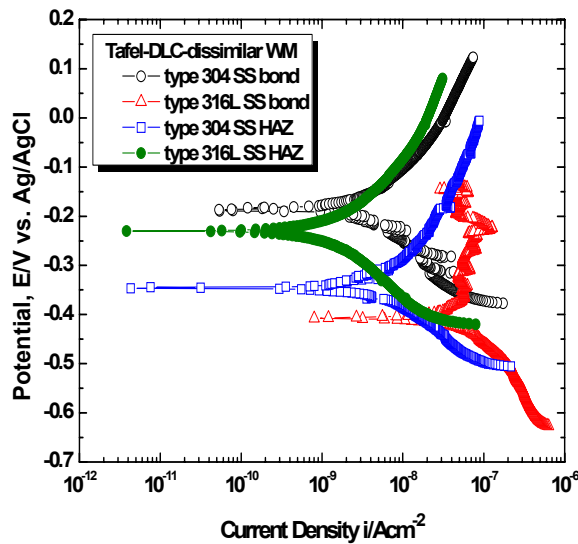
applied current density	$1.0 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$
type 304 SS BM	3.4	34.0
type 316L SS BM	6.4	34.2
type 304 SS HAZ	5.5	16.8
type 316L SS HAZ	4.5	23.0
dissimilar WM	2.6	18.2
bond zone	3.3	74.2

Table 4. Results of the Tafel analysis for local area of dissimilar welding metal parts using the droplet cell

Tafel analysis	Corrosion potential [V]	Corrosion current density [A/cm^2]
type 304 SS BM	0.22949	5.71746×10^{-9}
type 316L SS BM	0.23152	9.43535×10^{-10}
Dissimilar WM	-0.08991	6.57526×10^{-10}
type 304 SS HAZ	-0.34107	4.96736×10^{-9}
type 316L SS HAZ	-0.23611	1.36442×10^{-9}
type 304 SS bond	-0.18258	3.56788×10^{-9}
type 316L SS bond	-0.40736	4.98938×10^{-8}



(a)



(b)

Fig. 7. The micro Tafel curves for local area of dissimilar welding metal parts using the droplet cell

밀도는 type 304 SS와 type 316L SS의 모재의 경우 $5.717 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, $9.435 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 로 측정되었으며, 이중 용접부는 $6.575 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 를 나타냈다. type 316L SS 모재와 용접부는 부식전류밀도가 큰 차이를 나타내지 않았으나 type 304 SS 모재는 높게 측정되었다. 사용된 용접재료인 ER316L 용접재료의 화학조성의 차이에 따른 결과이며 이는 Ni과 Mo의 첨가에 의해 생성된 부동태 피막이 건전하고 결과적으로 높은 R_p 를 나타냄으로써 부식 속도가 낮은 것으로 판단된다.¹⁰⁾ 또한 type 304 SS와 type 316L SS 각각의 열영향부에 대한 부식전류밀도는 type 304 SS의 경우에 $4.967 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, type 316L SS은 $1.364 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ 로 측정되어 두 영역에서 큰 차이는 나타나지 않았다. 반면, 용접 후 급랭되어 미세 조직이 치밀하나 내식성이 저하하는 본드부의 경우, 측정된 부식전류밀도가 type 304 SS 측은 $3.568 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, type 316L SS 측은 $4.989 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 로 마이크로 영역 중에서 가장 큰 부식속도를 나타냈으며 그 중 type 316L SS 본드부가 type 304 SS의 본드부 보다 부식속도가 빠른 것으로 보인다. 이는 인접 영역간 전위 차이가 상대적으로 크기 때문에 미소 갈바닉 전류량의 차이에 따른 결과로 사료된다.¹¹⁾ type 304 SS와 type 316L SS 이중 용접부의 국부영역별 마이크로 타펠 분석 결과를 Table 4에 세부적으로 나타냈다. 이중 용접부에 대한 마이크로 전기화학실험 결과, 각 국부영역간의 미소 갈바닉 셀 형성 시 용접부와 열영향부는 모재와 유사한 전기화학적 특성을 나타내어 내식성이 양호한 것으로 사료되며 가장 취약한 부식손상을 나타낸 본드부에서 우선적으로 손상이 발생할 것으로 판단된다.

4. 결 론

DF 엔진 내 이중벽(double wall) 파이프에 적용되는 재료인 type 304 SS와 type 316L SS에 대하여 ER316L 용접재료를 사용하여 GTAW 용접된 용접부를 10%

H₂C₂O₂·H₂O 용액에서 매크로 및 마이크로 전기화학 실험을 실시함으로써 부식특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1) 자연전위 측정 결과, 이중 용접부는 type 304 SS보다 낮고 type 316L SS의 전위보다는 높은 중간적인 경향을 나타냈으나 양분극 실험 결과에서는 부동태 피막의 형성에 따른 대단히 낮은 전류밀도를 나타냈다.

2) EPR 실험 결과에서는 이중 용접부가 입계에서의 Cr₂₃C₆ 형성에 기인하여 type 316L SS 대비 낮은 입계부식 저항성을 나타냈다. 각 미소 영역별 손상 깊이 측정 결과, 용접부와 열영향부는 모재 및 본드부 대비 상대적으로 적은 손상을 나타냈다.

3) 마이크로 드롭렛 셀을 이용한 전기화학적 실험 결과, 본드부가 가장 높은 부식전류밀도를 나타냈으며 type 316L SS 측의 본드부가 미소 갈바닉 셀 형성에 기인하여 가장 먼저 손상될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J. G. Nam and J. W. Kim, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **29**, 612 (2005).
2. J. B. Ju, *J. Korean Inst. Gas*, **5**, 15 (2001).
3. D. S. Lee, *J. Korean Soc. Mar. Env. Safety*, **15**, 269 (2009).
4. H. Y. Ha, C. J. Park, and H. S. Kwon, *Corros. Sci.*, **49**, 1266 (2007).
5. J. J. Kim and J. B. Lee, *Kor. J. Met. Mater.*, **46**, 809 (2008).
6. M. M. Lohrengel, A. Moehring, and M. Pilaski, *Electrochim. Acta*, **47**, 137 (2001).
7. S. J. Kim, K. J. Il, and J. S. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **40**, 262 (2007).
8. S. J. Kim and J. Y. Ko, *J. of the Korean society of marine engineering*, **30**, 157 (2006).
9. Y. S. Lim, *Corros. Sci. Tech.*, **29**, 1 (2000).
10. Erwan Le Roy, E. A. Cho, H. S. Kim, and H. S. Kwon, *Corros. Sci. Tech.*, **31**, 432 (2002).
11. J. T. Yun, S. W. Kim, H. G. Hwang, Ihsan-ul-haq Toor, and M. Y. Shon, *Corros. Sci. Tech.*, **8**, 209 (2009).