

용접 재료 별 해수 배관 용접부위의 부식 특성에 관한 전기화학적 평가

김진경* · 원창욱* · 조황래** · 이명훈*** · 김윤해** · 문경만**

*한국해양수산연수원 교육연구처

**한국해양대학교 공과대학 기계소재 공학부

***한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

An Electrochemical Evaluation of the Corrosion Property on the Welded Zone of Sea Water Pipe according to Welding Materials

JIN-GYEONG KIM*, CHANG-UK WON*, HWANG-RAE JO**, MYUNG-HOON LEE***,
YUN-HAE KIM** AND KYUNG-MAN MOON**

*Education and Research Division, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical and Materials Engineering, Korea Maritime Univ. Busan, Korea

***Dept. of Marine System Engineering, Korea Maritime Univ. Busan, Korea

KEY WORDS: Corrosion potential 부식전위, Galvanic cell 갈바닉 전지, Welding metal 용접금속, Heat affected zone 열영향부, Shielded metal arc welding, 금속피복아크용접, Inert gas arc welding 불활성가스 아크용접

ABSTRACT: The sea water pipe of a ship's engine room is a severely corrosive environment caused by fast flowing sea water containing chloride ions and high conductivity. Therefore, leaking of sea water may occur as a result of local corrosion of the welded zone. Leaking is usually controlled by various welding methods. In this study, when the sea water pipe is welded with certain welding methods and welding electrodes, the corrosion resistance of WM (Welding metal) and HAZ (Heat affected zone) was investigated using electrochemical methods. Although the corrosion potential of the HAZ is higher than that of WM, the corrosion resistance of WM is superior to HAZ. However, when WM and HAZ are both opened to the sea water, the WM part with the anode was more seriously corroded than was the HAZ of the cathode by performance of a galvanic cell due to difference of the corrosion potential between HAZ and WM. In particular TIG welding showed relatively good results in corrosion resistance of both HAZ and WM compared to other welding methods.

1. 서 론

최근 산업사회의 급격한 발전과 함께 육해상의 각종 강구조물의 설비는 급격히 증가하고 있으며 또한 이들 강구조물은 용도와 사용조건에 따라 용접을 이용하여 제작된다고 하여도 과언은 아니다. 따라서 용접의 중요성은 널리 인지되어 왔으며 용접에 관련된 즉 용접부 주위의 강도의 물리적 기계적 성질의 변화에 관한 연구가 많이 보고 되고 있다(김민남 등, 2000; 김복인 등, 2001; 김진경 등, 2006; 안석환 등, 2005; 오종인 등, 2007; Jang and Jeon, 2006; Kim et al., 2006; Kim et al., 2006). 그리고 이들 강구조물이 가혹한 부식 환경 하에 있을 경우 용접부 주위의 부식으로 인한 경제적 손실과 안전재해 사고를 유발 할 수 있으므로 일반강의 용접부식에 대한 연구 결과

(Bilmes et al., 2006; Lee et al., 2003; Lo et al., 2002; Moon et al., 2003; Raja et al., 1998; Tsay et al., 1997)도 다소 있으나 선박의 해수 배관의 용접부식에 대한 연구는 그렇게 많지 않은 것으로 사료된다.

한편 선박의 해수 배관의 용접 방법은 신조선의 경우 탄산가스 아크 용접이나 불활성가스 텅스텐 아크 용접을 주로 이용하고, 선령이 오래된 노후선의 경우는 보수 용접으로 피복아크 용접을 선박 자체 내에서 실시하고 있다. 그런데 해수 배관의 파이프 내부는 최대 3m/s의 유속으로 해수가 유동하며 2kgf/cm²~3kgf/cm²의 수압을 받고 있으므로 항상 가혹한 부식 환경 하에 노출되어 있다. 따라서 용접부위에 부식이 많이 발생하여 파공으로 인한 누수에 의해서 선박의 안전운항에 지장을 초래하기도 한다. 본 연구는 현재 해수배관의 파이프에 대한 조선소 및 선박 자체내부의 보수 용접에 사용하는 몇가지 용접방법 및 용접재료를 사용하여 용접을 한 후 각 용접부위에 대한 부식성을 전기 화학적 방법으로 평가하여, 내식성이 우수한 해수배관 강관용 용접방법 및 용접재료를 규명 하고자 수 정비를 위한 유익한 참고 자료가 됨으로써 경제적인 측면과

교신저자 문경만: 부산광역시 영도구 동삼2동

051-410-4352 lab@hhu.ac.kr

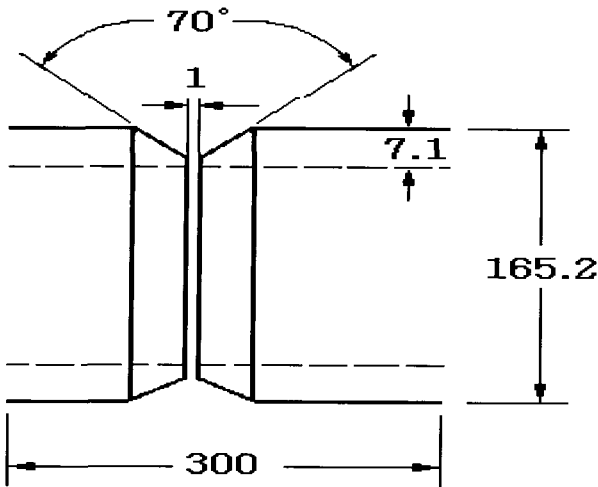


Fig. 1 Schematic diagram of welding specimen of pipe

안전재해 예방 차원에서 그 의미가 크다고 사료된다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 용접 재료

실험에 사용한 해수 배관용 강관은 주로 많이 사용하는 KS SPPS 38(JIS STPG 38)로서, 사용한 재질의 치수는 $\phi 165.2 \times 7.1T \times 150L$ 이며 Fig. 1과 같이 가공하여 맞대기 용접을 한 후 용접 부위만 비드를 중심으로 $20B \times 7.1T \times 10L$ 로 제작하였다.

사용한 용접 방법 및 용접 재료는 탄산가스 아크 용접의 경우 AWS E71T-1 $\phi 1.2$, 불활성가스 텅스텐 아크의 용접 재료는 AWS ER70S-G $\phi 2.0$ 이고, 피복 아크 용접 재료는 KS E4301, E4311, E4313 및 E4316의 $\phi 3.2$ 로 모두 6 종류의 용접봉을 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 용접 방법

전술한 바와 같이 용접시험편으로 사용된 해수 배관 재료는 치수 $\phi 165.2 \times 7.1T \times 150L$ 의 KS SPPS 38(JIS STPG 38)이며 상기한 모든 용접을 하기 전에 전부 예열을 하지 않는 상태로 하였고, 2층 이상은 층간 온도를 150°C 로 유지하면서 용접을 하였다.

$\phi 1.2$ 의 와이어를 사용한 탄산가스 아크 용접(CO_2 arc welding)의 조건은 Table 1과 같이 2층 용접을 직류 역극성으로 하였고, $\phi 2.0$ 의 용가재로 불활성가스 텅스텐아크 용접(TIG arc welding)의 조건은 Table 2와 같이 2% 톨륨 텅스텐봉 $\phi 2.4$ 로 3층 용접을 직류 정극성으로 하였다.

그리고 피복 아크 용접(SMAW; Shielded metal arc welding)에서는 $\phi 3.2$ 인 E4301과 E4311의 용접봉을 사용하였을 경우 1층과 2층에 공급된 전류는 각각 90A와 110A, E4313은 85A와 105A, 그리고 E4316은 95A와 115A 전후의 전류를 사용하였다.

Table 1 CO_2 welding condition

Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	Gas flow (ℓ /min)
1	200	22	34~35	14~15
2	195	24	35~36	15~17

Table 2 TIG welding condition

Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	gas flow (ℓ /min)
1	163	11	9~10
2	183	12	13~15
3	183	12	13~15

Table 3 Welding methods, welding electrodes and their symbol

Welding method and electrode	CO_2 arc welding	TIG welding	Shielded metal arc welding			
			E4301	E4311	E4313	E4316
Symbol	C	T	0	1	3	6

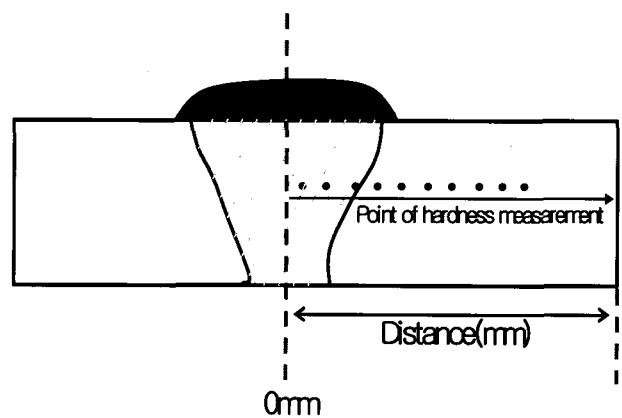


Fig. 2 Test specimen of weldment zone cut with a right angle against welding direction

각각의 용접 방법 및 용접 재료에 따르는 특성을 Table 1, 2 및 3과 같이 정리 하였다.

2.2.2 용접부위의 경도 및 전기화학적 실험

각각의 용접부위에 대한 경도와 부식에 대한 전기화학적 실험을 하기 위하여, Fig. 2와 같이 시험편을 용접 방향과 직각 방향으로 기계 절단, 가공 한 후 샌드페이퍼로 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(Etching)하여 용접 금속 중심부에서 모재부 방향으로 1mm 간격으로 경도를 측정하였고, 부식 전위와 분극곡선 등을 측정하기 위하여 각 부위의 면적을 0.25cm² 만을 노출시키고 다른 부분은 에폭시로 절연한 후 각종 전기화학적 실험을 실시하였다.

전기화학적 실험은 해수를 3cm/s(PIV: Particle image velocimetry로 측정)의 유동 상태에서 부식 전위 변화, 양극 및 음극 분극곡선(측정장치: Won. A.Tech Garmy사의 CMS-100 시스템, 주사속도: 1mV/s 대극: 백금, 기준전극: SCE), 사이클릭 볼타모그램(주사속도: 30mV/s, 측정영역: -0.5V~1.5V) 및 교류임피던스 등을 측정하였으며, 조직과 부식 표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometech사, Model: SV35) 으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 Fig. 2의 용접부(WM; Welding metal) 중심(0 mm)에서 오른쪽으로 1mm간격으로 경도를 측정한 값을 나타내고 있다(단 경도값은 Fig. 2의 점선을 중심으로 상하 방향으로 각각 한 포인트를 측정하여 합계 3포인트의 경도를 측정한 값의 평균값을 나타냄). TIG용접의 경우 경도값이 다른 용접에 비해서 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며 5mm 포인트 이후 급격한 경도의 저하를 보이고 있다.

피복아크 용접(E4313)의 경우 2mm지점 이후 경도의 저하를 나타내다가 5mm지점에서 다시 경도의 상승을 나타 내었다. CO₂용접의 경우에는 2mm지점 이후 급격한 정도의 저하를 나타내다가 5mm지점부터 안정된 값을 나타내기도 하였다.

일반적으로 용접열영향부(HAZ: Heat affected zone)가 급냉에 의한 퀴칭효과에 의해서 경도가 상승하고 용접부의 경도가 낮아지는 경우가 있으나 경우에 따라서는 용접금속부의 성분이 모재부로 혹은 모재부의 성분이 용접금속부로 확산 이동하여 용접금속부의 경도가 높고 열영향부의 경도가 오히려 낮아지는 경우도 있다(김진경 등, 2006; 신민교, 1987; 전대회, 1985). Fig. 3의 경도 측정 결과는 어느 특성의 열영향부가 존재해서 경도가 상승하지는 않았으며 오히려 용접금속부의 경도가 높고 열영향부, 모재부로 갈수록 경도가 저하하는 경우도 있었으며 어느 특정 지점에서 오히려 경도가 낮아지고 다시 경도가 상승하는 경향도 있었다.

따라서 Fig. 4와 같이 열영향부 보다 용접금속부가 덴드라이트 조직으로 변하면서 결정입자의 조대화(안석환 등, 2005; 신민교, 1987)와 함께 경도가 상승하며 어느 일정 지점에서 경도가 저하하는 것은 모재부의 탄소가 용착부로 이행하여 용착부에 인접한 본드부 근처에서 경도의 저하가 발생하는 것으로 사료된다. 특히 TIG용접의 경우 다른 용접에 비해서 경도가 높고

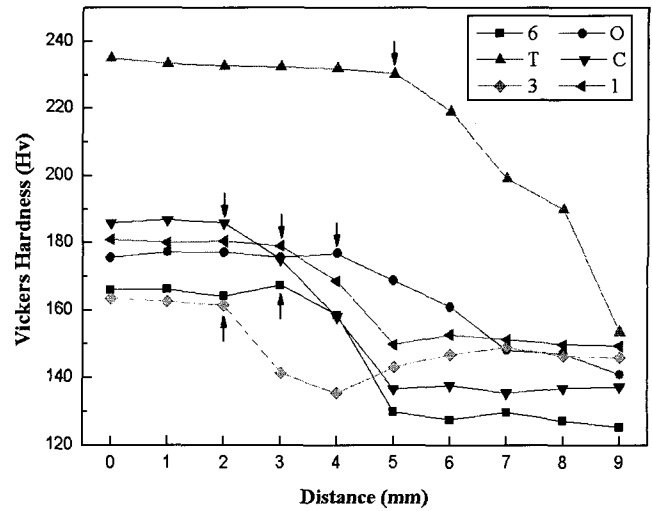


Fig. 3 Variation of vickers hardness with distance from WM to HAZ for various welding method

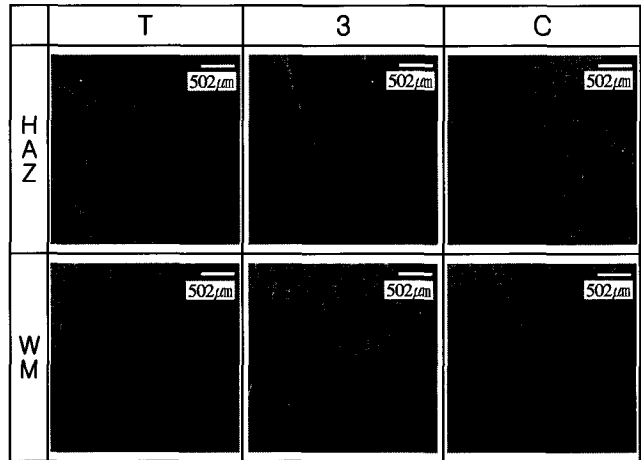


Fig. 4 Variation of microstructures of HAZ and WM in case of TIG, SMAW(E4313) and CO₂ welding methods

5mm지점 이후 경도가 하강하는 것은 직류 정극성으로 용접입열량 다른 용접에 비해서 크므로 퀴칭효과에 의한 경도상승이 크며 모재부에서 용접금속부로 탄소성분이 이동이 활발한 것에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 TIG용접을 하였을 경우 용접금속부와 열영향부의 부식전위의 변화를 나타내고 있다. 침지 초기 열영향부의 부식전위가 높았으며 침지 1800초 후에도 열영향부가 용접금속부에 비해서 약 30mV의 높은 값을 나타내었다.

Fig. 6은 CO₂ 아크 용접을 했을 경우 용접금속부와 열영향부의 부식전위 변화를 나타내고 있다. 열영향부가 용접금속부에 비해서 부식전위가 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며 침지 1800초 후에는 약 260mV의 전위차가 발생하였다. 다른 시험편에서도 마찬가지로 열영향부가 용접금속부에 비해서 부식전위가 모두 높게 나타 났었다.

일반적으로 용접금속부가 모재부에 비해서 부식전위가 높기

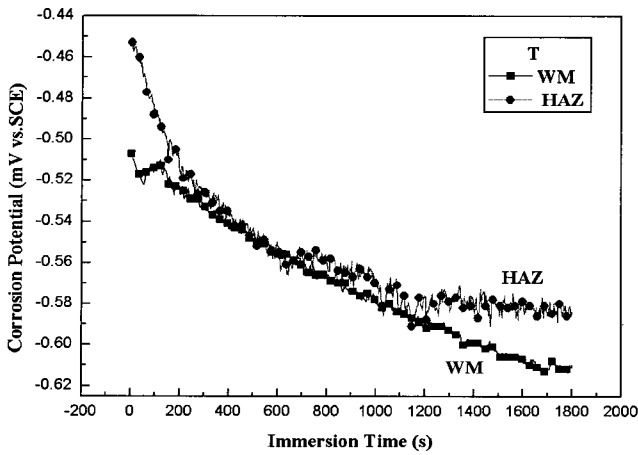


Fig. 5 Variation of corrosion potential of WM and HAZ with immersion time in case of TIG welding in sea water solution

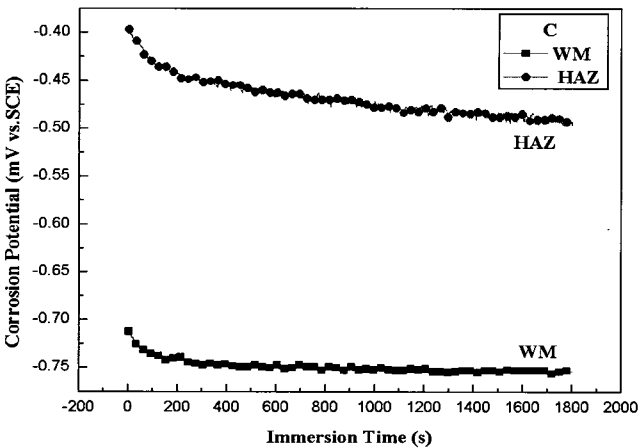


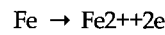
Fig. 6 Variation of corrosion potential of WM and HAZ with immersion time in case of CO₂ arc welding in sea water solution

Table 4 Chemical composition of various WM and BM

	C	Si	Mn	P	S	Remark
SPPS 38 (BM)	0.25	0.35	0.30	0.04	0.04	
C(WM)	0.06	0.50	1.31	0.015	0.012	CO ₂ welding
T(WM)	0.09	0.72	1.08	0.013	0.010	TIG welding
O(WM)	0.09	0.10	0.44	0.016	0.016	SMAW E4301
1(WM)	0.10	0.20	0.45	0.015	0.012	SMAW E4311
3(WM)	0.09	0.18	0.34	0.017	0.011	SMAW E4313
6(WM)	0.08	0.64	0.84	0.012	0.010	SMAW E4310

때문에 갈바닉전지가 형성되었을 경우 소음극으로 작용하며 모재부는 대양극으로 되어 용접부의 부식이 억제되는 것으로 알려져 있다(Jones, 1998). 그러나 본 실험의 결과 이처럼 용접 금속부가 오히려 열영향부에 비해서 부식전위가 낮게 나타나는 것은 용접금속부와 모재부의 첨가성분의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

Table 4는 용접금속과 모재부의 첨가성분의 일례를 나타내고 있다. Table 4의 성분분석에 의하면 모재부의 탄소(C)와 인(P), 유황(S)의 함량이 용접금속부에 비해서 비교적 많으며 한편 용접금속부는 모재부에 비해서 망간(Mn)함량이 비교적 많이 함유되어 있다. 각각의 첨가성분에 대한 평형전위식을 고찰하면 다음과 같다(Mulder and Pourbaix, 1966).



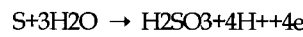
$$E = -0.440+0.0295\log(Mn^{2+}) \quad (1)$$



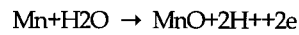
$$E = 0.627-0.0591pH+0.0295\log(HCO_2H) \quad (2)$$



$$E = -0.248-0.1182pH+0.0591\log(H_2PO_2^-) \quad (3)$$



$$E = 0.449-0.0591pH+0.0148\log(H_2SO_3) \quad (4)$$



$$E = -0.727-0.0591pH \quad (5)$$



$$E = -1.179+0.0295\log(Mn^{2+}) \quad (6)$$

상기의 평형전위 식에서 알 수 있듯이 탄소의 표준전극전위는 (2)식에서 0.627V로 (1)식의 철의 표준전극전위 -0.44V보다 높고 인(P)의 표준전극전위와 유황(S)의 표준전극전위도 철의 표준전극전위보다 높다. 그리고 망간(Mn)의 표준전극전위는 (5)식과 (6)식에서 알 수 있듯이 철의 표준전극전위보다 훨씬 낮다. 따라서 탄소와 인, 유황을 많이 함유하고 있는 열영향부는 상대적으로 높은 부식전위를 나타내며 용접금속부는 철보다 낮은 표준전극전위를 나타내는 망간을 많이 함유하고 있어 열영향부에 비해서 상대적으로 낮은 부식전위를 나타내는 것으로 사료된다. 따라서 전술한 바와 같이 Fig. 5의 TIG용접의 경우 열영향부와 용접금속부의 부식전위차가 적고 Fig. 6의 CO₂용접에서는 용접금속부와 열영향부의 부식전위차가 큰 이유는 CO₂용접의 경우, 직류역극성 용접으로 용접 입열량이 적으므로 Table. 4에서 알 수 있듯이 평형전위가 낮은 망간(Mn)이 모재부로 이동하지 않고 용접금속부에 잔류한 양이 TIG용접에 비해서 많으며 TIG용접은 직류 정극성으로 용접입열량이 크므로 용접금속부와 모재부 사이에 성분이동이 활발하여 망간(Mn)이 모재부로 많이 이동하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 TIG용접을 했을 경우 용접금속부와 열영향부의 양극 및 음극 분극곡선을 나타내고 있다. 열영향부가 용접금속부에 비해서 정성적으로 부식전류밀도가 높다는 사실을 알 수 있다.

모든 시험편에서도 Fig. 7과 같이 용접금속부가 열영향부에

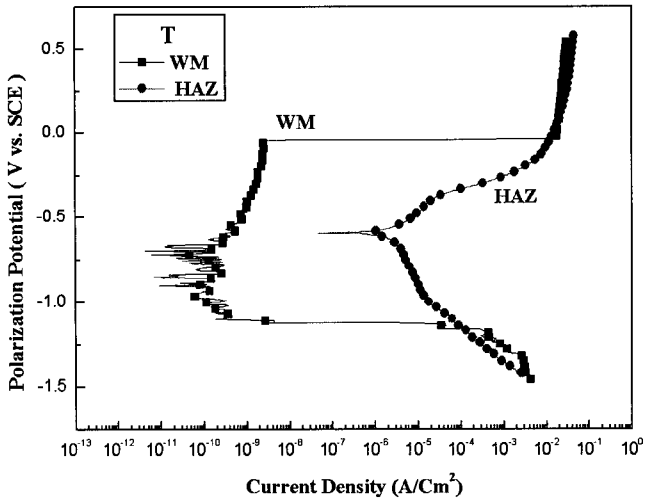


Fig. 7 Variation of polarization curves of WM and HAZ in case of TIG welding in sea water solution

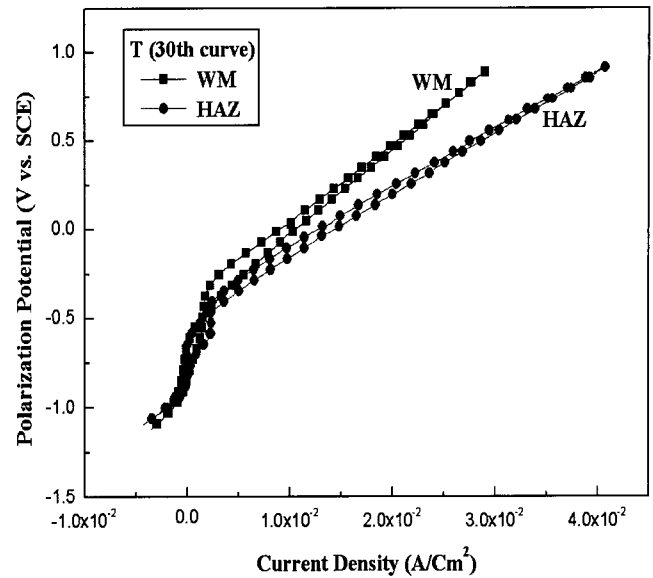


Fig. 9 Cyclic voltammogram of 30th curves of WM and HAZ in case of TIG welding in sea water solution

Table 5 The data of corrosion current density obtained by cathodic and anodic polarization curves of WM and HAZ with various welding materials and welding methods

	WM (icor, A/cm ²)	HAZ (icor, A/cm ²)
T	1.65×10 ⁻¹¹	5.02×10 ⁻⁶
C	1.92×10 ⁻⁵	3.70×10 ⁻⁵
0	1.01×10 ⁻¹⁰	5.01×10 ⁻⁶
1	3.50×10 ⁻¹¹	6.74×10 ⁻⁵
3	1.25×10 ⁻⁸	9.70×10 ⁻⁶
6	1.08×10 ⁻⁶	1.98×10 ⁻⁵

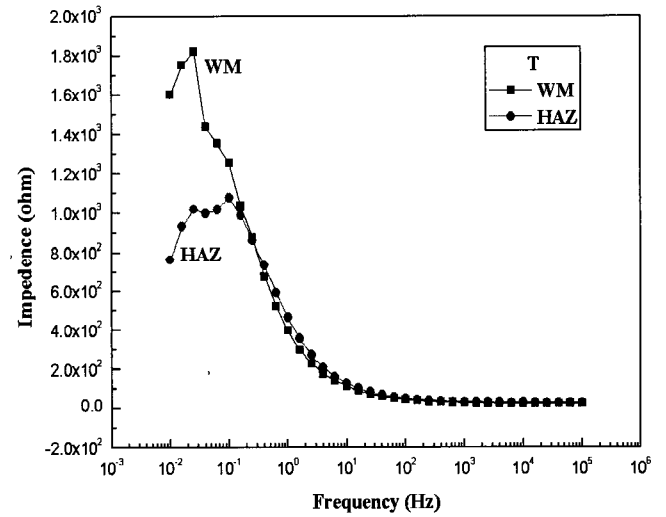


Fig. 10 Variation of bode plots of WM and HAZ in case of TIG welding in sea water solution

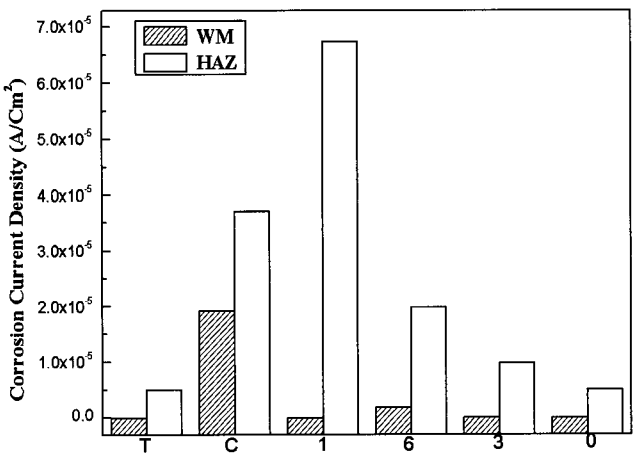


Fig. 8 Variation of corrosion current density between WM and HAZ

비해서 내식성이 좋은 경향을 나타내었다. Fig. 7의 분극곡선에서 Stern-Geary식에 근거한(GMS-100프로그램) 부식전류밀도를 구하여 Table 5 및 Fig. 8에 나타내었다.

용접금속부에서는 TIG용접의 경우가 가장 내식성이 양호 하였으며 열영향부 역시 TIG용접이 가장 내식성이 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 피복아크 용접의 경우에는 E4311용접봉을 사용하였을 경우 용접금속부의 부식전류밀도는 가장 낮았으나 열영향부의 내식성은 오히려 가장 좋지 않았다. 그리고 E4301과 E4313, E4316용접봉의 경우에는 열영향부와 용접금속부 모두 비교적 내식성이 양호함을 알 수 있었다. 또한 모든 용접에 있어서 용접금속부의 내식성이 열영향부에 비해서 우수한 실험 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 TIG용접의 경우 30번째의 사이클릭 전도 변화를 나타내고 있다. 용접금속부의 전도가 왼쪽으로 기울고 있으며 열영향부의 전도가 오른쪽으로 기울고 있다. 따라서 일정 전류밀도에 대한 분극전위는 용접부가 열영향부에 비해서 높다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 10은 TIG용접의 경우 용접금속부와 열영향부의 교류 임피던스 값의 변화를 나타내고 있다. 10mHZ에서 용접금속부의 임피던스 값이 열영향부에 비해서 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 용접금속부의 경도가 열영향부에 비해서 높았으나 Fig. 7, 8, 9 및 10의 결과에서 용접금속부가 열영향부에 비

해서 내식성이 좋다는 결론을 얻을 수 있었다. 이와 같이 용접금속부가 열영향부에 비해서 경도는 높으나 내식성이 좋은 것은 용접금속부의 성분이 탄소, 인 및 유황 등의 불순물이 적고 망간의 함량이 많아 표면에 치밀한 산화막의 형성에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 용접시험편을 해수에 침지하여 20일 경과한 후의 부식된 표면사진을 보여주고 있다. 열영향부에 비해서 용접금속부에서 붉은 녹의 생성물이 나타났으며 전체적으로 용접금속부가 열영향부에 비해서 부식이 심하게 발생하였음을 알 수 있었다. 그리고 CO₂용접의 경우 본드부에서 국부적으로 부식되었음을 알 수 있었다.

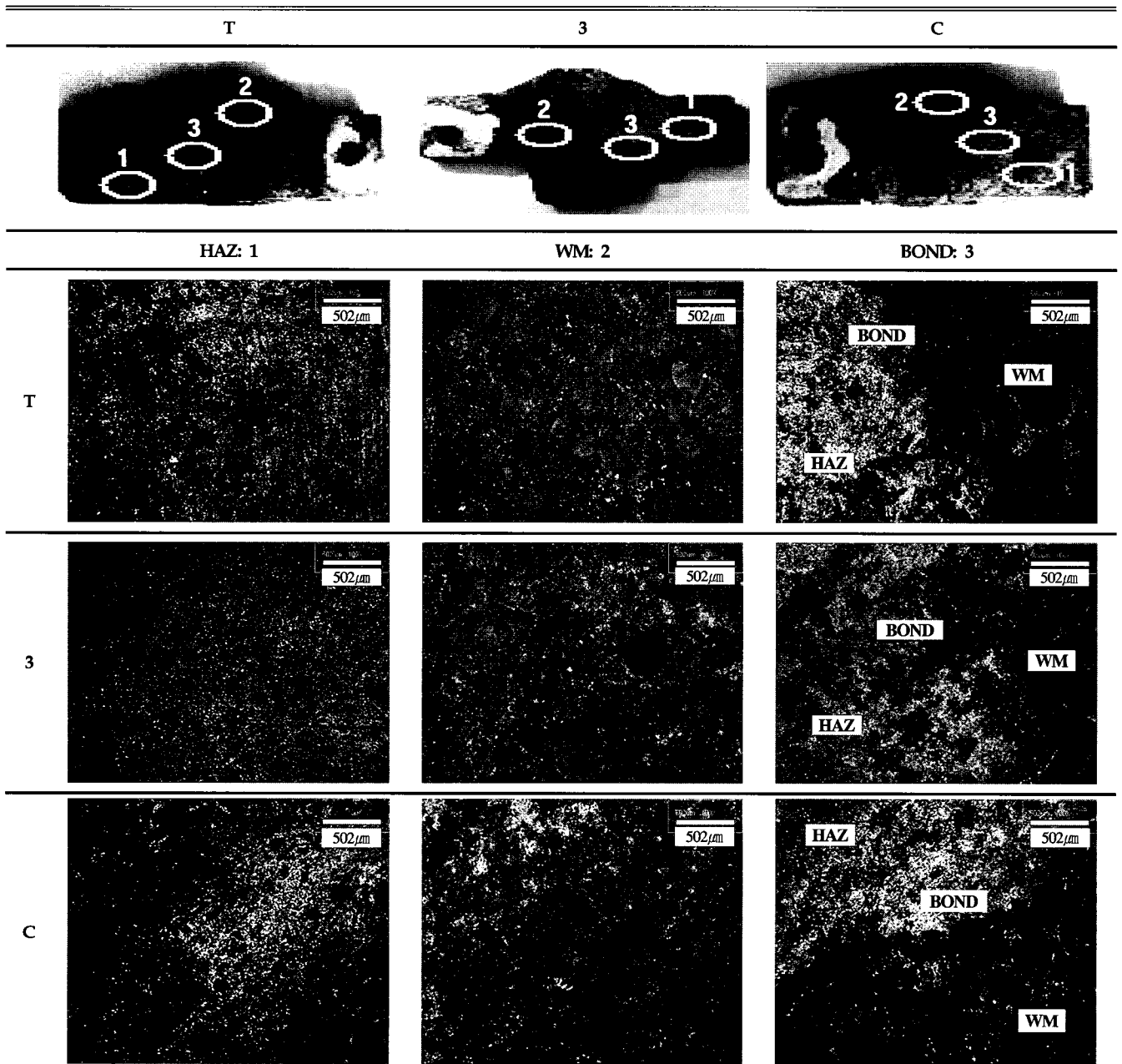


Fig. 11 Photographs of corroded surface of WM, HAZ and BOND area after immersion 20 days in sea water solution

전술한 바와 같이 용접금속부와 열영향부에 대해서 각각 내식성 실험을 하였을 경우에는 용접금속부의 내식성이 양호하였으나 Fig. 11처럼 용접금속부와 열영향부를 함께 해수에 노출 시켰을 경우에는 오히려 용접금속부가 열영향부에 비해서 부식이 심하게 발생하는 것은 Fig. 5, 6에서 알 수 있듯이 열영향부의 부식전위가 용접금속부에 비해서 높기 때문에 갈바닉 전지의 형성에 의해서 부식전위가 높은 열영향부가 음극이 되고 용접금속부가 양극이 되어 오히려 용접금속부가 부식이 심하게 발생하는 것으로 사료된다. 그리고 CO₂용접의 경우에는 직류역극성으로 용접하였기 때문에 용접 입열량이 적어 용접금속부와 모재부의 성분이동이 적어 용접금속부와 열영향부 사이의 부식전위차가 가장 크므로(Fig. 6 참조) 본드부 근처의 용접금속부가 국부적으로 부식된 것으로 사료된다.

4. 결 론

지금까지 용접방법 및 용접재료를 변수로 하여 용접부와 열영향부에 대한 내식성을 전기화학적으로 고찰한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

(1) 모든 용접부의 경도가 높고 열영향부의 경도가 오히려 낮아지는 경향을 알 수 있었다. 이것은 용접부의 급냉에 의한 결정입자의 조대화와 열영향부로 부터 탄소 등의 성분이 용접부로 이동하였기 때문으로 사료된다.

(2) 용접부에는 부식전위를 낮추는 Mn의 함유량이 많고 전위를 높이는 P, S 등의 성분이 적게 함유되어 있어 용접부의 부식전위가 열영향부에 비해서 현저하게 낮아지는 경향을 나타내었다.

(3) 분극곡선, 사이클릭 볼타모그램 및 임피던스의 측정에서 용접부가 열영향부에 비해서 내식성이 양호하다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 해수에 함께 노출되어 있을 경우에는 갈바닉 전지가 형성되어 부식전위가 낮은 용접부가 오히려 양극이 되어 열영향부에 비해서 다소 부식이 심한 경향을 알 수 있었다.

(4) 본 실험의 결과 TIG용접이 용접부와 열영향부 모두 내식성이 양호하였으며 CO₂용접의 경우 부식전위가 낮은 본드부 부근의 용접부가 국부적으로 부식되는 경향이 있었다.

(5) 피복아크 용접의 경우 용접부의 경도는 다른 용접에 비해서 비교적 낮았으며 E4313, E4301 용접봉의 경우 열영향부와 용접부의 내식성이 모두 비교적 양호 하였다.

참 고 문 헌

김민남, 김복인, 한정동 (2000). "습식수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 56-61.

김복인, 노창석, 정교현, 김민남 (2001). "피복성분에 의한 수중용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 75-79.

김진경, 강명신, 김영식 (2006). "선박용 디젤기관의 주철 부품 보수 용접 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제20권, 제2호, pp 41-45.

신민교 (1987). 기계공작법, 아성출판사, pp 242-245.

안석환, 정정환, 남기우 (2005). "용접 열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제4호, pp 64-71.

오종인, 김영표, 박호경, 방한서 (2007). "선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 64-68.

전대회 (1985). 부식과 방식의 관리, 일중사, pp 294-298.

Bilmes, P.D., Liorente, C.L., Saire Huaman, Gassa L.M. and Gervasi, C.A. (2006). "Microstructure and Pitting Corrosion of 13CrNiMo Weld Metal", Corrosion Science, Vol 48, pp 3261-3270.

Jang, S.K. and Jeon, J.I. (2006). "Weldability of Al 7075 Alloy According to Different Tools and Welding Conditions by F.S.W.", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol 30, No 1, pp 30-41.

Jones, D.A (1998). Principles and Prevention of Corrosion, Original American Edition Published by Prentice-Hall, Inc., pp 314.

Kim, J.D., Kil, B.L. and Lee, C.J. (2006). "The Weldability of laminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser[II]", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol 30, No 5, pp 629-635.

Kim, J.D., Yoo, S.J. and Kim, J.S. (2006). "Optimization of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Conditions for Sealing of Lithium-ion Battery", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol 30, No 5, pp 623-628.

Lee, Y.H., Kim, Y.H. and Kim, H. (2003). "Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steel in Natural Sea Water with Different Post Welding Treatment", CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol 2, No 5, pp 219-224.

Lo, I.H., Lee, M.C., Lim, K.Y., Ho, W., Yang, G.C.Y. and Tsai, W.T. (2002). "Effect of Heat Treatment on the Pitting Corrosion Behavior of 347SS Weld Overlay", CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol 31, No 5, pp 361-367.

Moon, K.M., Lee, M.H., Kim, K.J., Kim, J.G. and Kim, S.J. (2003). "A Study on the Post-Weld Heat Treatment Effect to Mechanical Properties and Hydrogen

- Embrittlement for Heating Affected Zone of a RE36 Steel", CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol 2, No 6, pp 283-288.
- Muylder, J.V and Pourbaix, M. (1966). Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, Ed. by M. Pourbaix, Rergomon press and cebelcor, pp 260-509.
- Raja, V.S., Vershney, S.K., Raman, R. and Kulkarni, S.D. (1998). "Influence of Nitrogen on the Pitting Corrosion Behavior of 904L Weld Clad", Corrosion Science, Vol 40, No 10, pp 1609-1625.
- Tsay, L.W., Lin, W.L., Chenct, S.W. and Leu G.S. (1997). "Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking of 2.25 Cr-Mo Steel Weldments", Corrosion Science, Vol 39, No 7, pp 1165-1176.
-
- 2007년 6월 15일 원고 접수
2007년 10월 17일 최종 수정본 채택