한국해양공학회지 제22권 제3호, pp 82-88, 2008년 6월 (ISSN 1225-0767)

배기밸브 보수 용접부의 부식 특성에 관한 전기화학적 연구

문경만* · 이규환*** · 조황래* · 이명훈** · 김윤해* · 김진경***
*한국해양대학교 공과대학 기계소재공학부
**한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부
***한국해양수산연수원 교육연구

An Electrochemical Study on Corrosion Property of Repair Welding Part for Exhaust Valve

KYUNG-MAN MOON*, KYU-HWAN LEE***, HWANG-RAE CHO*, MYUNG-HOON LEE**,
YUN-HAE KIM* AND JIN-GYEONG KIM***

*Dept. of Mechanical and Materials Engineering, Korea Maritime Univ. Busan, Korea
**Dept. of Marine System Engineering, Korea Maritime Univ. Busan, Korea
***Education and Research Division, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea

KEY WORDS: Repair weldment 보수용접, Weld metal 용접금속, Plasma welding 프라즈마용접, Corrosion potential 부식전위, Corrosion resistance 내식성

ABSTRACT: *The diesel engine of the merchant ship has been operated in severe environments more and more, because the temperature of the exhaust gas of a combustion chamber is getting higher and higher with increasing use of heavy oil of low quality, due to the significant increase in the price of oil in recent some years. As a result, the degree of wear and corrosion between exhaust valve and seat ring is more serious compared to other engine parts. Thus the repair welding of exhaust valve and seat ring is a unique method to prolong the life of the exhaust valve, from an economical point of view. In this study, the corrosion property of both weld metal and base metal was investigated using electrochemical methods such as measurement of corrosion potential, cathodic and anodic polarization curves, cyclic voltammogram, and polarization resistance in 5% H2SO4 solution. The test specimen was a part of an exhaust valve stem being welded as the base metal, using various welding methods. In all cases, the corrosion resistance as well as hardness of the weld metal zone was superior to the base metal. In particular, plasma welding showed relatively good properties for both corrosion resistance and hardness, compared to other welding methods. In the case of DC SMAW (Shielded metal arc welding), corrosion resistance of the weld metal zone was better than that of the base metal, although its hardness was almost same as the base metal.*

1. 서 론

최근 해양물류산업의 급격한 발전과 함께 대형선박의 건조에 따른 국내 조선기자재산업이 호황기를 누리고 있다. 그러나 세계적인 유가의 앙등으로 C중유를 사용하는 대형 선박 디젤기관 연료는 더욱 저질화 되어 연료자체의 비중은 물론 불순물의 함량 또한 증가 되었다. 그리고 이러한 조건에서 운전하는 디젤기관의 경우 저질 중유의 사용으로 인한 실린더라이너와 피스톤 크라운의 링 홈 마멸증대 및 중유 중에 함유되어 있는 바나듐(V)과 유황(S)에 의한 고온부식과 저온부식등(전대희, 1985)으로 인해 실린더 헤드의 소손과 균열 발생등이 야기되고 있다. 더욱이 연소실을 구성하는 주요한 요소인 배기 밸브는 표면 온도가 제일 높은 분위기속에서 강한 반복 충격을 받고 있는 동시에 연소 가스를 끊임없이 배출하면서 개폐하는 열악한 조건에서 사용되어지고 있으므로 밸브 스핀들과 시트링 접촉면에서는 고온 하에서의 반복 충격과 압력으로 인한 물리적인 마멸과 전기화학적 부식으로 인한 마멸량이 증대 되고 있다. 따라서 전술한 실린더 헤드, 피스톤 크라운 및 배기 밸브의 손상부분은 용접을 통하여 재사용함으로써 수명연장에 따른 경제적인 효과를 얻고 있다.

이처럼 손상된 배기밸브의 보수용접 뿐만 아니라 일반적으로 강구조물의 제작에는 용접이 주로 사용되어 지고 있다. 따라서 지금까지 다양한 용접법이 개발 되었고, 또한 이들 강을 용접하였을 경우 구조물의 용접부에 대한 기계적 성질(김민남 등, 2000; 김복인 등, 2001; 김진경 등, 2006; 안석환 등, 2005; 오종인 등, 2007; Jang and Jeon, 2006; Kim et al., 2006a; Kim et al., 2006b)과 부식(Bilmes et al., 2006; Lee et al., 2003; Lo et al., 2002; Moon et al., 2003; Raja et al., 1998; Tsay et al., 1997)등에 관한 연구도 많이 발표되고 있다. 그리고 상기한 부품들의 수명연장을 위한 보수용접에 대해서도 다양한 용접방법이 사용되어지고 있으나 이들 용접방법에 따라 보수 용접을

교신저자 문경만: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
051-410-4352 lab@hhu.ac.kr

하였을 경우 모재부와 용접금속부의 기계적 성질과 내식성 비교평가 등에 대한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 배기 밸브의 재료로 사용되고 있는 크롬계 내열강을 모재부로 하고 여기에 몇 가지의 보수용접을 할 경우 보수 용접방법에 따른 모재부와 용접금속부의 내식성 비교평가를 전기화학적인 측면에서 비교 고찰하였다. 따라서 본 연구의 결과는 보수 용접 방법에 따른 내식성의 차이를 비교함으로써 효율적인 보수 용접 방법과 이들 보수용접의 특성에 대한 참고자료를 제공하는데 그 의미가 크다고 사료된다.

2. 시험편 제작 및 실험 방법

가혹한 조건에서 작동되고 있는 흡 배기밸브의 재료는 크롬계 내열강 또는 니켈-크롬계 내열강을 많이 사용하고 있다. 그리고 흡입 밸브보다 온도가 높은 연소가스가 배출되는 배기밸브의 경우 손상을 많이 입기 때문에 인장강도가 높고 마르텐사이트 조직인 크롬계 내열강이 많이 사용되고 있다.

본 실험에서는 크롬계 내열강(KS규격: STR 3)(유영상, 2003)의 배기밸브를 모재부(BM: Base metal)로 사용하였으며, 배기밸브에 사용된 보수용접은 외국산 스텔라이트(Stellite) 용접봉을 모두 사용하였다. 그리고 본 실험에 사용된 용접 방법은 직류 피복아크용접(DC SMAW: Shielded matal arc welding)(UNITOR, 2005)과 불활성가스 텅스텐아크용접(TIG,Tungsten inert gas)(Annete, 2004)과 프라즈마(Plasma) 아크용접(Annete, 2004; ISOTEC, 1998)이며, 피복아크용접의 경우 직류 1층 외산용접봉 사용(D1F), 직류 2층 용접(D2F), 불활성 가스 텅스텐 아크용접의 경우 불활성가스 1층 용접 (T1F)과 2층 용접(T2F) 그리고 프라즈마 1층 용접(P1F)과 2층 용접(P2F)등이다. 그리고 전술한 용접 방법의 상세는 Table 1과 같다.

배기밸브의 일부를 절단하여 원형(직경 36mm, 두께 10mm)으로 가공한 후 모재부(BM)로 하고 그 위에 상기한 6가지의 용접방법으로 직경 20mm의 용접을 실시하였다.

용접된 시험편 즉 용접금속부(WM: Weld metal)와 모재부(BM)를 샌드페이퍼 100번에서 2000번까지 연마한 후 노출면적 1㎠만을 남기고 나머지는 실리콘 수지로 절연시켰으며, 가장자리에 구멍을 뚫어 동선을 연결하여 시험편을 제작하였다. 시험용액은 5% 황산 용액을 3㎝/s(PIV: Particle image velocimetery로 측정)로 유동시키면서 측정하였다. 측정 방법은 부식전위 변화와 부식전위 변화에 따른 표면의 분극저항(Rp)을 측정하고, 양극 및 음극분극곡선의 측정과 부식전류밀도를 측정하였다. 그리고 사이클릭 선도변화를 측정하고 표면의 경도와 사이클릭 볼타모그램으로 15번째 사이클 후의 부식된 표면을 관찰하였다.

실험에 사용된 분극 측정장치는 Won. A. Tech사의 GMS-100 프로그램이며, 기준전극은 SCE전극, 대극은 백금을 사용하였다. 그리고 주사속도는 1㎷/s, delay time은 1800초로 하였다. 단 사이클릭 선도변화 측정은 +1.5V ~ -0.5V 영역에서 30㎷/s의 주사속도로 하였으며, 부식된 표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometech사, Model: SV35)으로 100배 배율로 관찰하였다. 또한 경도 측정은 시험편 표면을 2000번까지 연마한 후 각 부위를 5회씩 측정하여 평균값을 구하였다.

Table 1 Various welding methods with property of electrode

Methods	SMAW(DC)		TIG		Plasma	
Symbol	D1F	D2F	T1F	T2F	P1F	P2F
Pass No.	1	2	1	2	1	2
Elect. (stellite)	Fore	Fore	Fore (bare)	Fore (bare)	Fore (powder)	Fore (powder)
∅(mm)	3.2	3.2	3.2	3.2		
Amp.	90A	90A	140	140	130	125

Fore: Foreign electrode

Table 2 Chemical composition of various WM and BM

Element Specimens	C	Si	Cr	Fe	Co	W	Ni
D1F(WM)	-	-	18.26	21.42	35.63	13.97	10.73
D2F(WM)			18.86	10.42	44.08	16.55	10.08
T1F(WM)	2.08	1.23	23.68	29.54	32.32	4.43	6.72
T2F(WM)	1.88	1.06	24.47	25.47	35.81	5.16	6.16
P1F(WM)	-	-	24.35	28.61	33.35	7.00	6.68
P2F(WM)	-	-	28.75	18.17	38.49	8.05	6.54
BM	0.42	2.21	15.27	68.99	-	-	13.11

3. 실험 결과 및 고찰

Table 2는 모재부와 6종류의 용접부의 성분분석을 나타내고 있다. 모재부의 경우 크롬(Cr)과 규소(Si)가 주요 첨가 성분으로 되어 있으며, 용접부의 경우에는 모재부에 비해서 크롬 함량이 비교적 높고 코발트(Co)와 텅스텐(W)이 다량 함유되어 있는 것이 특징이라 사료된다.

피복아크용접을 비롯한 모든 용접에서 모재부에 비해서 용접금속부의 크롬(Cr)함량이 높고 코발트(Co)와 텅스텐(W)이 다량 함유되어 있음을 알 수 있다. 그리고 모든 용접방법에서 1층 용접에 비해서 2층 용접의 경우가 크롬, 코발트 및 텅스텐 함량이 높게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이것은 1층 용접의 경우 2층 용접에 비해서 용접봉의 성분이 모재부에 확산되어 용접봉의 주요성분이 용접금속부에 적게 분포되고 철성분이 오히려 증가하는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 1은 각종시험편의 침지시간에 따른 부식전위 변화를 나타내고 있다. 용접금속부에 비해서 모재부의 전위가 가장 낮은 경향을 나타내고 있으며, 용접금속부의 경우에는 P2F와 P1F가 3600초후 가장 높은 부식전위 값을, 그리고 T1F와 T2F가 가장 낮은 전위 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 용접금속부의 부식전위는 첨가성분의 영향으로 모재부 보다 높기 때문에 갈바닉 전지가 형성되었을 경우 음극으로 작용하여 대양극 소음극 형태로 용접금속부의 부식이 억제 되는 것으로 알려져 있다(Jones, 1998). 본 실험의 결과에서도 용접금속부의 부식전위가 모재부에 비해서 높게 나타나는 것은 첨가 성분의 영향에 기인한 것으로 사료된다. 전술한 바와 같이 용접금속은 모재부에 비해서 크롬과 코발트 및 텅스텐등이 많이 함유되어 있으며 이들의 평형전위식은 다음과 같다(Muylder and Pourbaix, 1966).

$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e$

$E=-0.44+0.0295\log(Fe^{2+})$ (1)

$Co \rightarrow Co^{2+}+2e$

$E=-0.277+0.0295\log(Co^{2+})$ (2)

$W+H_2O \rightarrow WO_2+4H^{+}+4e$

$E=-0.119-0.0591pH$ (3)

$2Cr^{2+}+3H_2O \rightarrow Cr_2O_3+6H^{+}+2e$

$E=-0.136-0.1773pH-0.0591\log(Cr^{2+})$ (4)

$Si + 2H_2O - SiO_2 + 4H^{+} + 4e$

$E=-0.857 - 0.0591pH$ (5)

상기의 평형전위식에서 코발트와 텅스텐 및 크롬의 표준전극 전위(NHE)값은 철의 표준전극 전위 -0.44V보다 높은 -0.277V, -0.119V 그리고 -0.136V를 나타내고 있다. 따라서 이들의 첨가성분에 의해서 용접금속부의 부식전위 값이 모재부에 비해서 높은 것으로 사료된다. 그리고 T1F와 T2F의 부식전위가 다른 용접금속부에 비해서 가장 낮은 것은 Table 2에서 알 수 있듯이 표준전극 전위값이 낮은 규소(상기(5)식 참조)를 함유 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 2는 침지시간의 경과에 따라 부식전위가 변화할 경우 표면의 분극저항을 측정(GMS-100 프로그램)한 값을 나타내고 있다. P2F의 분극저항값이 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 모재부가 가장 낮은 분극저항 값을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3 은 P2F의 분극저항값과 부식전위 변화 값을 함께 나타내고 있다. 부식전위가 점차 귀한 방향으로 이행할 수록 분극저항값도 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다른 시험편에서도 P2F같은 경향을 나타내었다. 따라서 부식전위와 분극저항은 서로 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉 Fig. 1에서 3600초 후의 P2F의 부식전위가 가장 높고 모재부의 부식전위가 가장 낮은 경향을 나타내었으며, Fig. 2에서는 부식전위가 가장 높은 P2F가 분극저항이 가장 큰 값을 그리고 부식전위가 가장 낮은 모재부가 가장 적은 분극저항을 보여주고 있음을 알 수 있었다. P2F는 Table 2에서 알 수 있듯이 용접금속부의 크롬과 코발트 함량이 가장 많음을 알 수 있다. 이들 성분이 표면에 치밀한 산화막의 형성과 함께 양극분극저항을 증대시켜 부식전위의 상승과 함께 분극저항 값도 높게 나타내는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 각종 용접금속부와 모재부의 양극 및 음극 분극곡선 변화를 나타내고 있다. 모든 용접금속부와 모재부의 양극분극곡선에서 부동태 현상이 나타나고 있으며 특히 P2F의 부동태 전류밀도가 가장 적으며 다음 순으로 P1F 였다. 그리고 모재부의 부동태 전류밀도는 비교적 큰 값을 나타내고 있으며

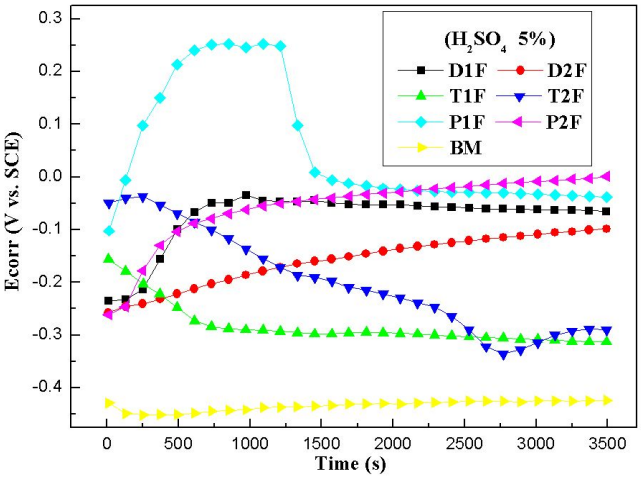

Fig. 1 Variation of corrosion potential with immersion time in 5% H_2SO_4 solution

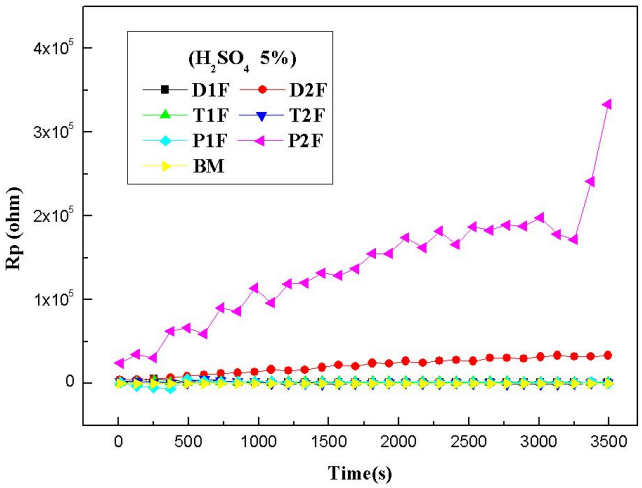

Fig. 2 Variation of polarization resistance with corrosion potential variation in 5% H_2SO_4 solution

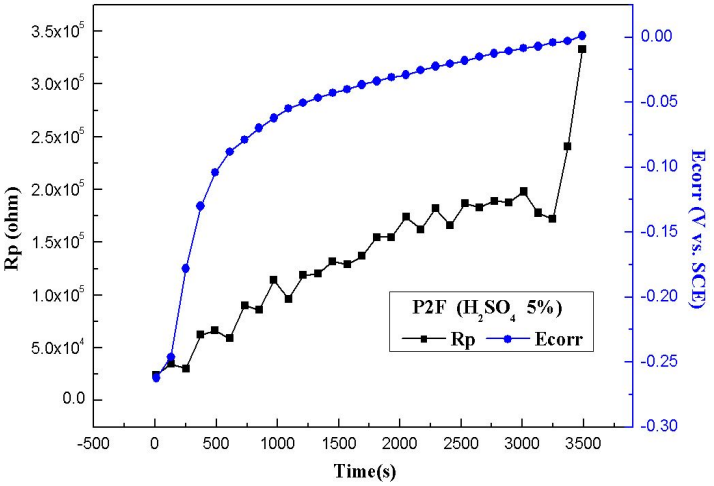

Fig. 3 Relationship between corrosion potential and polarization resistance in 5% H_2SO_4 solution

음극 분극시의 환원반응($O_2+4H^++4e\rightarrow 2H_2O$, $2H^++2e\rightarrow H_2$)에 대한 분극저항도 용접금속부에 비해서 비교적 적은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

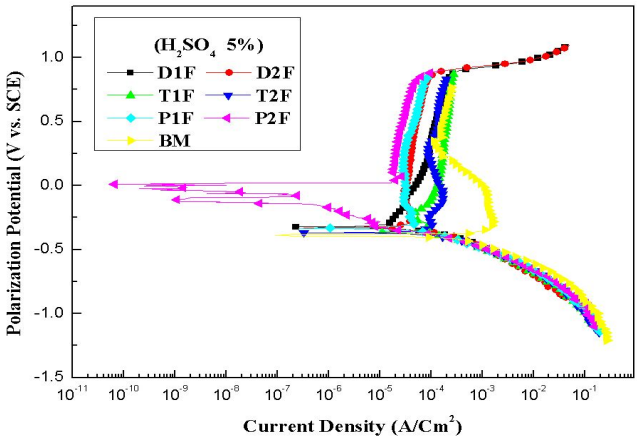

Fig. 4 Cathodic and anodic polarization curves of BM and WM in 5% H_2SO_4 solution

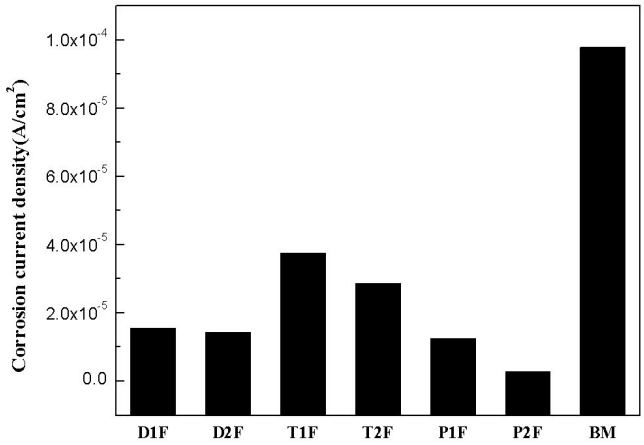

Fig. 5 Variation of corrosion current density for various welding metal in 5% H_2SO_4 solution

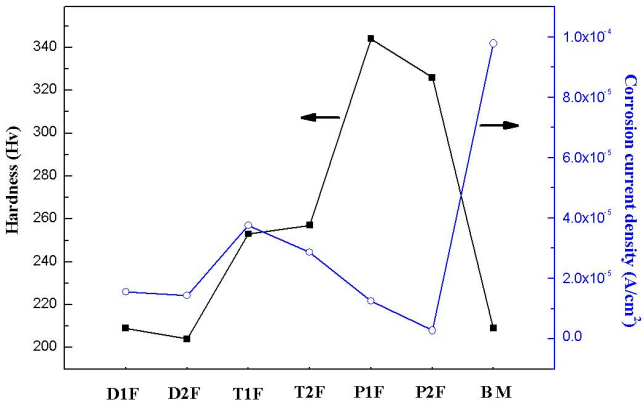

Fig. 6 Relationship between corrosion current density and vickers hardness of various WM and BM

P1F와 P2F의 용접부의 첨가성분은 전술한 바와 같이 크롬과 코발트의 함량이 높고 이들 첨가성분에 의한 치밀한 산화피막 형성에 의해서 부동태 전류밀도 값이 적은 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 4 의 양극 및 음극 분극곡선에서 Stern-Geary식(CMS-100 프로그램이용)에 근거한 부식전류밀도를 구하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 모재부의 부식전류밀도가 가장 크며, 용접금속부의 부식전류밀도는 모재부에 비해서 비교적 적은 경향을 나타내었으며, 특히 P2F의 부식전류밀도가 가장 적은 값을 보여주고 있다. 그리고 용접금속부의 경우 TIG용접이 다른 용접에 비해서 비교적 부식전류밀도가 크며 피복아크용접, 프라즈마용접 순으로 내식성이 좋은 경향을 나타내었다. Fig. 5의 결과는 Fig. 1, 2 및 Fig. 3의 부식전위와 분극저항의 측정결과 그리고 Fig.4의 부동태전류밀도와 거의 일치하는 경향을 알 수 있었다.

Fig. 6은 부식전류밀도와 비커스 경도 값의 상관관계를 나타내고 있다. 모재부의 경우 부식전류밀도는 크나 역으로 경도 값은 가장 적은 값을 나타내었으며, 용접금속부의 경도 값은 모재부에 비해서 전반적으로 높은 값을 나타내었으며, 특히 P1F, P2F의 경도 값이 다른 용접금속부에 비해서 가장 높은 값을 나타내었다.

결과적으로 프라즈마 용접의 경우 용접금속부의 내식성도 양호하고 경도값 또한 높아 내마모성 역시 우수한 것으로 사료된다. 그러나 직류 피복아크용접은 내식성은 우수하나 경도 값은 모재부와 거의 가까운 그다지 높지 않은 값을 나타내었다. 그리고 모재부는 용접금속에 비해서 니켈(Ni)을 다량 함유하고 있으나 크롬 함량이 비교적 적고 코발트와 텅스텐이 함유되어 있지 않아 내식성과 경도가 함께 떨어지는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 배기벨브 모재부의 사이클릭선도변화를 나타내고 있다. 약 -0.28V(SCE)부근에서 활성태 피크 전류밀도가 나타나고 있으며, 사이클릭 횟수가 증가할수록 피크 전류밀도가 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 활성태 영역(약 -0.9V에서 -0.5V영역)에서는 피막생성물에 의해서 사이클릭 횟수가 증가할수록 오히려 일정 공급전류밀도에 대한 분극전위가 상승하는 경향을 나타내었다. 그리고 부동태 영역에서 공식전위 영역으로 이행하는 전위는 약 1.0V이며 사이클횟수가 증가해도 공식전위 영역의 변화는 거의 없었다.

Fig. 8은 P2F 용접금속부의 사이클릭 선도변화를 나타내고 있다. 부동태영역에서 공식전위로 이행하는 분극전위는 사이클 횟수에 관계없이 약 1.0V로 모재부와 거의 같은 값을 나타내었다. 그리고 사이클 횟수가 증가할수록 음극분극전위 -0.8V를 유지하기 위한 음극전류밀도는 증가하는 경향이 있었으며, 공식전위 영역에서도 양극분극전위 약 1.2V를 유지하기위한 양극전류밀도역시 증가하는 경향을 알 수 있었다. 이것은 사이클 횟수가 증가할수록 양분극 또는 음분극 영역에서 분극저항이 감소하고 있음을 미루어 알 수 있다. 그리고 부동태 전류밀도는 사이클횟수에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었으며, 또한 Fig. 7의 모재부와 같이 -0.28V 부근에서 활성태 피크 전류는 나타나지 않았다. 다른 용접금속부에서도 P2F와 거의 같은 경향을 나타내었다.

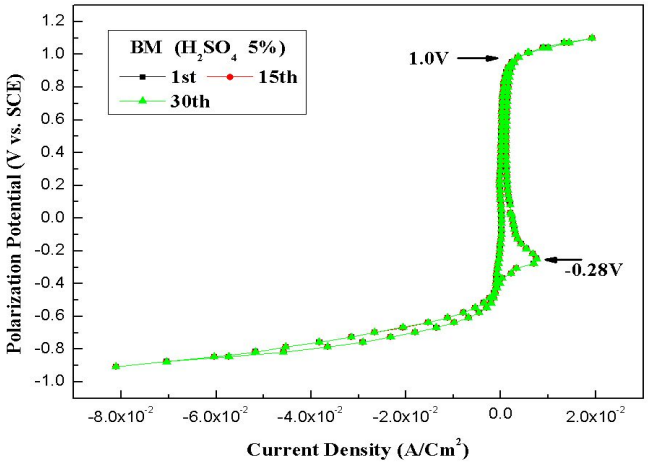

Fig. 7 Variation of cyclic voltammogram of BM in 5% H_2SO_4 solution

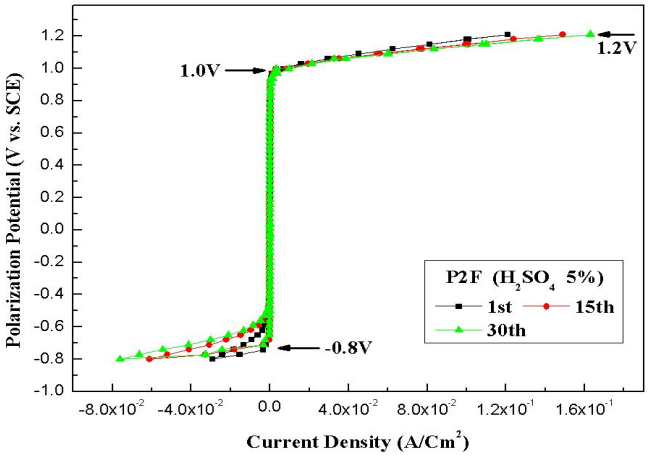

Fig. 8 Variation of cyclic voltammogram of WM for P2F in 5% H_2SO_4 solution

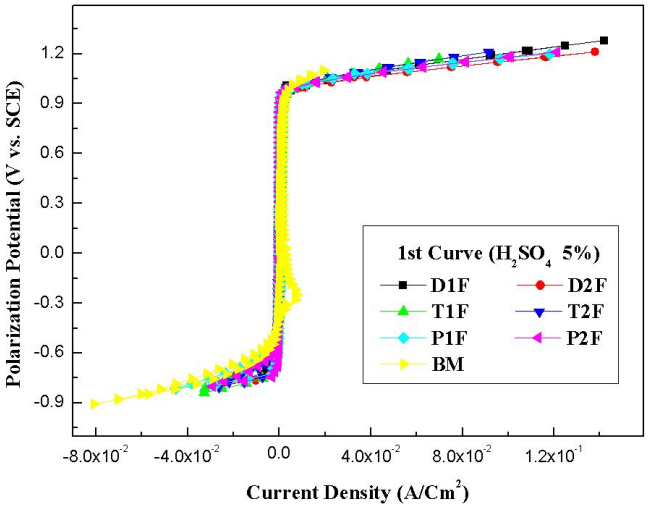

Fig. 9 Variation of cyclic voltammogram of various WM and BM in 5% H_2SO_4 solution

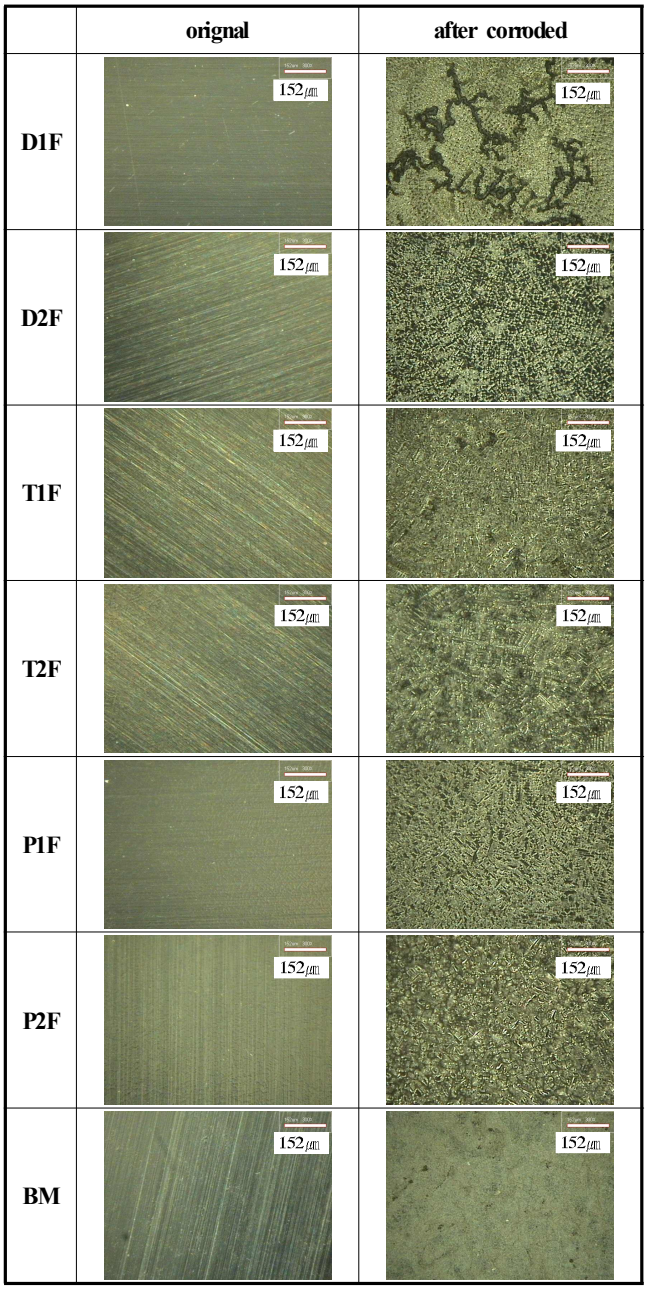

Fig. 10 Morphology of corroded surface(after 15 cycle by cyclic voltammogram) and original surface of various WM and BM

Fig. 9는 모재부와 용접금속부의 첫 번째 사이클 선도변화를 나타내고 있다. 모재부와 용접금속부 모두 1.0V 이상에서 공식전위로 이행하고 있음을 알 수 있다.

사이클 횟수가 증가해도 부동태 영역에서 공식전위 영역으로 이행하는 분극전위 1.0V는 거의 변하지 않고 있음을 알 수 있다. 그리고 모재부는 활성태 피크전류가 나타나는 특이한 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 모재부의 경우 초기에는 철의 산화에 의해서 활성태 영역이 나타나지만 약 -0.28V 부근에서 크롬과 니켈의 산화막 형성에 의해서 부동태 영역으로 이

행하면서 피크전류가 나타나는 것으로 사료된다. 그리고 용접금속부에서는 모재부와는 달리 활성태 피크전류밀도가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이것은 모재부에 함유되어 있지 않은 코발트와 텅스텐이 용접금속부에 함유되어 있어 이들 성분이 초기부터 산화막의 형성을 유도하여 부동태 영역으로 변화시키는 역할을 하는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 사이클릭 볼타모그램에 의한 15회 사이클 후의 용접금속부와 모재부의 부식된 표면과 사이클릭 볼타모그램 측정전의 표면사진을 보여주고 있다. 모재부의 경우 부식된 표면에서 아주 미세한 공식이 드물게 보이나 전반적으로 균일하게 부식된 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 용접금속부에서는 모재부보다 부식된 표면이 균일하지 않고 오목 볼록으로 나타나는 이른바 국부부식의 형태로 나타나고 있다. 특히 D1F의 용접금속 표면에서는 표면에 균열이 진전되는 느낌을 주는 입계부식의 양상을 보여주고 있다.

모재부는 배기밸브 본체이므로 압연강재이나 용접금속부는 용착금속이므로 급냉으로 인한 텐드라이트 조직이 되기 쉬우며 양극 산화시에 입계에 존재하는 크롬 결핍영역이 선택적으로 부식되거나 혹은 크롬과 코발트 및 텅스텐과 합금화 되지 못한 철성분이 선택적으로 부식되기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 배기밸브 모재부에 용접 방법을 변수로 하여 보수용접을 한 후 모재부와 용접금속부의 내식성에 대해서 전기화학적인 관점에서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 배기밸브를 보수용접 할 경우 모재부에 비해서 용접금속부가 전반적으로 경도값이 높고 내식성 또한 우수한 경향을 나타내었다..

(2) 프라즈마용접이 다른 용접에 비해서 경도값이 높고 내식성 또한 우수한 경향을 나타내었다.

(3) 직류피복 아크용접의 경우 용접금속부의 내식성은 모재부에 비해서 비교적 양호하나 경도는 모재부와 거의 같은 값을 나타내었다.

(4) 부식전위가 귀한 방향으로 이행할수록 표면의 분극저항은 증가하고 부식전류밀도는 감소하는 경향을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

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

김복인, 노창석, 정교헌, 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.

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

유영상 (2003). KS D 3731, 한국표준협회.

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

전대희 (1985). 부식과 방식의 관리, 일중사, pp 426-428.

Annette, O.B. (2004). WELDING HANDBOOK, Vol 2 (9th edition), AWS, pp 136, 331-332.

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.

ISOTEC (1998). PTA-Welding Systems, ISOTEC, pp 3-4.

Jang, S.K. and Jeon, J.I. (2006). "Wedability 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. (2006a). "The Weldability of haminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser[I]", 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. (2006b). "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.

UNITOR (2005). Maritime Welding Handbook (9th edition), UNITOR ASA, pp 170-171.

2008년 3월 13일 원고 접수
2008년 5월 14일 최종 수정본 채택