

5% 황산용액에서 배기밸브 보수 용접부의 부식 특성에 미치는 용접방법과 용접봉의 영향-1

김진경* · 조황래** · 이명훈*** · 김윤해** · 문경만†

(원고접수일 : 2007년 7월 4일, 심사완료일 : 2007년 9월 14일)

Effect of Welding method and Welding Material to Corrosion Property of Repair Weld Zone for Exhaust Valve in 5% H₂SO₄ Solution -1

Jin-Gyeong Kim* · Hwang-Rae Cho** · Myung-Hoon Lee*** · Yun-Hae Kim** · Kyung-Man Moon†

Abstract : Recently a fuel oil of the diesel engine in the ship is being changed with low quality as the oil price is higher more and more. Therefore the wear and corrosion in all parts of the engine like cylinder liner, ring groove of piston crown, spindle and seat ring of exhaust valve are increased with using of heavy oil of low quality. In particular the degree of wear and corrosion in between valve spindle and seat ring are more serious compared to the other parts of the engine due to operating in severe environment such as the high temperature of exhaust gas and repeating impact. Thus the repair weld to the valve spindle and seat ring is a unique method to prolong the life of the exhaust valve in an economical point of view. In this study, corrosion property of both weld metal zone and base metal was investigated with some electrochemical methods such as measurement of corrosion potential, cathodic and anodic polarization curves, cyclic voltammogram and polarization resistance etc. in 5% H₂SO₄ solution, in the case of being welded with some welding methods and welding materials to the exhaust valve specimen as the base metal. In all cases, the values of hardness of the weld metal zone were more high than that of the base metal. And their corrosion resistance were also superior to the base metal. The weld metal of A2F(AC SMAW: 2 pass welding with foreign electrode) showed a relatively good results to the corrosion resistance as well as the hardness compared to the other welding methods and welding materials. Moreover it indicated that hardness of the weld metal by the domestic electrode was considerably high compared to that of the foreign electrode.

Key words : Repair weld(보수용접), Wear(마모), Exhaust valve(배기밸브), Corrosion resistance(내식성), Weld metal(용접금속), Base metal(모재금속)

† 교신저자(한국해양대학교 기계소재공학부), E-mail:lab@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4352

* 한국해양수산연수원 교육연구처

** 한국해양대학교 공과대학 기계소재공학부

*** 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

1. 서 론

세계적인 유가의 상승으로 연료비가 앙등함에 따라 C 중유를 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 홈의 마멸 증대 및 중유 중에 함유되어 있는 바나듐(V)과 황화(S)에 의한 고온부식과 저온부식 등⁽¹⁾으로 인해 실린더 헤드의 소손과 균열 발생 등이 야기되고 있다. 더욱이 연소실을 구성하는 주요한 요소인 배기 밸브는 표면 온도가 제일 높은 분위속에서 개폐되기 때문에 강한 반복 충격을 받고 있는 동시에 연소 가스를 끊임없이 배출하면서 개폐하는 열악한 조건에서 사용되어지고 있으므로 밸브 스펀들과 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 보수용접을 통하여 재사용함으로써 수명연장에 따른 경제적인 효과를 얻고 있다.

이처럼 손상된 배기밸브의 보수용접 뿐만 아니라 일반적으로 강구조물의 제작에는 여러 가지 용접법이 사용되고 있다. 따라서 지금까지 선박과 관련된 강구조물의 제작을 용접으로 할 경우, 이런 구조물의 용접부에 대한 기계적 특성⁽²⁾⁻⁽⁹⁾과 부식⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁵⁾ 등에 관한 연구도 많이 발표되고 있다. 그리고 상기한 부품들의 수명연장을 위한 보수용접에 대해서도 다양한 용접방법이 사용되어지고 있으나 이들 용접방법에 따라 보수 용접을 하였을 경우 모재부와 용접금속부의 기계적 성질과 내식성 비교 평가 등에 대한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 배기밸브의 한 부분을 모재부로 하고 여기에 보수용접을 하였을 경우 보수용접 방법과 국산과 외산의 용접재료에 따른 모재부와 용접금속부의 내식성 비교 평가를 전기화학적인 측면에서 비교 고찰하였다. 따라서 본 연구의 결과는 보수용접 방법에 따른 내식성의 차이와 국산과 외산 용접봉의 성능을 비교함으로써 효율적인 보수

용접 방법과 국산 용접봉의 사용 가능성에 대한 참고자료를 제공하는데 그 의미가 클 것으로 사료된다.

2. 시험편 재료 제작 및 실험 방법

가혹한 조건에서 작동되고 있는 흡배기밸브의 재료는 크롬계 내열강 또는 니켈-크롬계 내열강을 많이 사용하고 있다. 그리고 흡기밸브보다 온도가 높은 연소가스가 배출되는 배기밸브의 경우가 많이 손상되기 때문에 크롬계 내열강봉(STR 3)을 사용하고 있다.

본 실험의 경우 크롬계 내열강(KS규격:STR 3)의 배기밸브를 모재부(BM: Base Metal)로 사용하였으며 배기밸브에 사용된 보수용접은 스텔라이트 용접봉을 사용하였다. 그리고 본 실험에 사용된 용접 방법은 교류 피복아크용접(AC Shielded Metal Arc Welding: AC SMAW)과 가스 용접(Gas Welding: GW) 즉 산소 아세틸렌 용접이며 피복아크용접의 경우 교류 1층 외산 용접봉 용접(A1F), 교류 2층 외산 용접봉 용접(A2F), 교류 1층 국산 용접봉 용접(A1D), 교류 2층 국산 용접봉 용접(A2D)으로 하였으며 산소 아세틸렌 용접의 경우 1층 외산 용접봉 용접(G1F)으로 하였다. 용접 방법의 상세는 Table 1과 같다.

Table 1 Various welding methods with applied current and electrode

Symbol	AC SMAW				GW
	A1F	A2F	A1D	A2D	G1F
Pass No	1	2	1	2	1
Amp.	90A	90A	90A	90A	Red.flam
Elect. (stellite)	Fore.	Fore.	Dome.	Dome.	Fore. (bare)
Elect.(mm)	3.2	3.2	4	4	3.2

※Fore: Foreign, Dome: Domestic

그리고 배기밸브의 일부를 절단하여 원형(직경 36mm, 두께 10mm)으로 가공한 후 모재부(Base Metal)로 하고 모재부의 중앙부에 상기한 5가지의 용접방법으로 직경 20mm의 용접을 실시하였다.

그리고 용접된 시험편(WM: Weld Metal)과 모재부(BM)를 샌드페이퍼 100번에서 2000번까지 연마한 후 노출면적 1cm²만을 남기고 나머지는 실리콘 수지로 절연 시켰으며 가장자리에 구멍을 뚫고 동선을 연결하여 시험편을 제작하였다. 시험 용액은 5% 황산용액을 사용하였으며 3cm/s (PIV: Particle Image Velocimetry 로 측정)의 속도로 용액을 유동시키면서 측정하였다. 측정 방법은 부식전위 변화와 부식전류 변화에 따른 표면의 분극저항(Rp)을 측정하고 양극 및 음극분극 곡선의 측정과 부식전류밀도를 측정하였다. 그리고 사이클릭 선도변화를 측정하고 표면의 경도와 사이클릭 볼타모그램으로 15사이클 후의 부식된 표면을 관찰하였다.

실험에 사용된 측정장치는 Won. A. Tech사가 수입 판매하는 CMS-100 프로그램이며 기준전극은 SCE전극, 대극은 백금을 사용하였고 주사속도는 1mV/s, 그리고 delay time은 1800초로 하였다. 단 사이클릭 선도변화 측정은 +1.5V ~ -0.5V 영역에서 30mV/s의 주사속도로 하였으며 부식된 표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometech사, Model: SV35)으로 100배 배율로 관찰하였다. 그리고 시험편의 표면을 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(etching)하여 용접 금속 중심부와 모재부의 경도를 각각 7회 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Table 2는 모재부와 5종류의 용접금속부의 성분 분석결과를 나타내고 있다. 모재부의 경우 크롬과 니켈이 주요 첨가 성분으로 되어 있으며 용접금속부의 경우에는 모재부에 비해서 크롬 함량이 높고 코발트(Co)와 텅스텐(W)이 다량 함유되어 있는 것이 특징이라 사료된다.

피복 아크 용접시에 국산 용접봉(A1D, A2D)의 경우가 외산 용접봉(A1F, A2F)에 비해서 크롬(Cr) 및 코발트(Co) 함량이 높고 대신 텅스텐(W) 함량은 다소 적은 것을 알 수 있다. 국산과 외산에 관계없이 1층 용접에 비해서 2층 용접의 경우가 크

롬, 코발트 및 텅스텐의 함량이 높게 나타나고 반면에 철 성분은 오히려 1층 용접이 많이 함유되어 있음을 알 수 있는데, 이것은 1층 용접 시에는 2층 용접에 비해서 용접봉의 성분이 모재부에 확산되어 용접봉의 주요 성분이 적어지고 철 성분이 증가하는 것으로 사료된다.

Table 2 Chemical composition of various WM and BM

	C	Si	Cr	Fe	Co	W	Ni
A1D(WM)	2.84	0.70	29.46	19.49	41.61	5.91	-
A2D(WM)	1.38	0.21	31.48	10.45	48.91	7.57	-
G1F(WM)	3.70	1.39	31.62	3.03	53.88	6.39	-
A1F(WM)	1.55	0.79	17.63	21.07	35.18	12.86	10.61
A2F(WM)	1.43	0.32	18.54	11.19	41.75	16.24	10.53
BM	0.42	2.21	15.27	68.99	-	-	13.11

Fig. 1은 각종 시험편의 침지시간 변화에 따른 부식전위의 변화를 나타내고 있다. 모든 용접금속부의 부식전위가 모재부에 비해서 높은 부식전위 변화를 나타내고 있으며 A1D 용접금속부의 부식전위가 가장 높고 다음이 A2F이며 G1F의 용접금속부가 비교적 낮은 부식전위 변화를 나타내고 있다.

일반적으로 용접금속부의 부식전위는 첨가성분의 조절에 의해서 모재부 보다 높기 때문에 갈바닉 전지가 형성되었을 경우 음극으로 작용하여 대양극 소음극 형태로 용접금속부의 부식이 억제 되는 것으로 알려져 있다^[16].

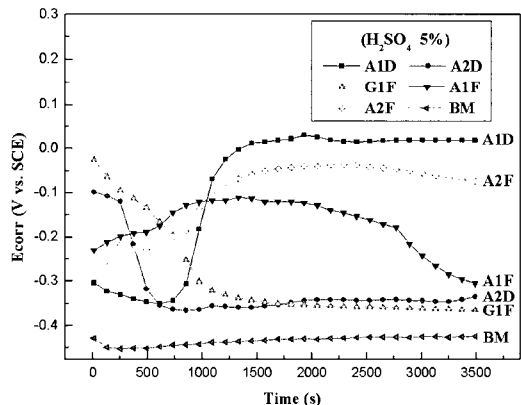
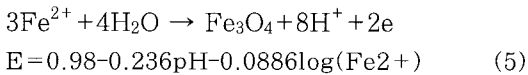
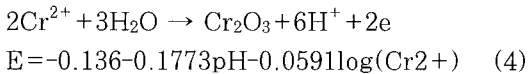
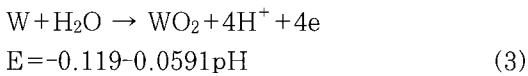
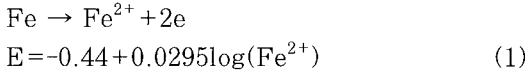


Fig. 1 Variation of corrosion potential with immersion time in 5% H₂SO₄ solution

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 텅스텐 등이 많이 함유되어 있으며 이들의 평형전위식은 다음과 같다⁽¹⁷⁾.



상기의 평형전위식에서 코발트와 텅스텐 및 크롬의 표준전극 전위값은 철의 표준전극 전위 -0.44V 보다 높은 -0.277V , -0.119V 그리고 -0.136V 를 나타내고 있다. 따라서 이들의 첨가성분에 의해서 용접금속부의 부식전위 값이 모재부에 비해서 높은 것으로 사료된다. 그리고 A1D의 부식전위가 가장 높은 것은 크롬과 코발트 및 텅스텐 함량이 A2D,

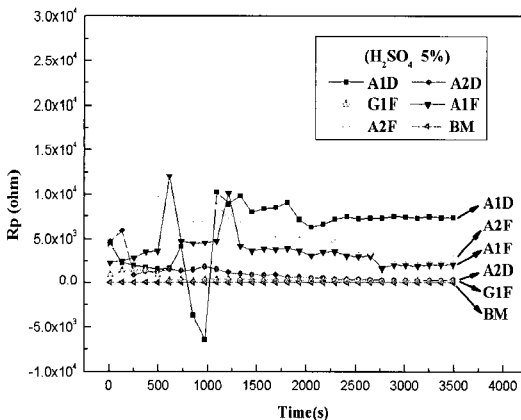


Fig. 2 Variation of polarization resistance with corrosion potential variation in 5% H₂SO₄ solution

G1F에 비해서 적으나 철 성분이 많으므로 철은 초기에 산화되어 제 2가 이온으로 변하지만 상기의 (5)식에 의해서 산화막의 형성에 따른 표준전극 전위값이 0.98V 의 높은 값을 나타내는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 침지시간에 따른 즉 부식전위의 변화에 따른 표면의 분극저항을 측정(CMS-100 프로그램)한 값을 나타내고 있다. A1D의 경우가 가장 높은 분극저항 값을 나타내고 있으며 모재부가 가장 낮은 분극저항 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 3은 A1D 용접금속부의 경우 부식전위 변화와 분극저항 변화를 함께 나타내고 있다. 부식전위가 낮을수록 분극저항 값도 낮으며 부식전위가 높을수록 분극저항 값도 상승하는 경향을 알 수 있다.

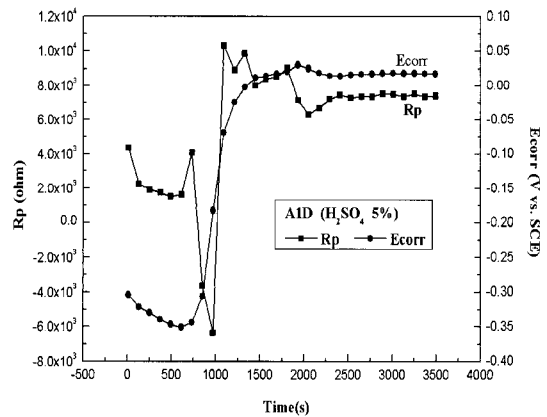


Fig. 3 Relationship between corrosion potential and polarization resistance in 5% H₂SO₄ solution

다른 시험편의 측정 결과에서도 같은 경향을 나타내었다. 따라서 부식전위와 분극저항은 서로 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 침지 1000초 이후 부식전위가 급격하게 상승한 것은 용접금속부 표면의 크롬 등이 산화막을 형성함으로써 양극분극이 증대하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 각 시험편에 대한 양극 및 음극분극 곡선을 나타내고 있다. 모든 시험편의 경우 양극분극 곡선에서는 산화막(Cr₂O₃, Ni₂O₃, Mn₃O₄, W₂O₅ 및 Co₃O₄ 등)⁽¹⁷⁾등의 형성에 의한 부동태 현상이 나타나고 있음을 알 수 있으며 음극 분극 곡선에서

는 산성용액이므로 용존산소 환원반응($O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$)과 수소발생 반응($2H^+ + 2e \rightarrow H_2$)에 따른 활성화분극이 함께 존재하는 것으로 사료된다. 그리고 부동태 전류 밀도는 A2F가 가장 적으며 G1F가 가장 큰 부동태 전류밀도를 나타내고 있다.

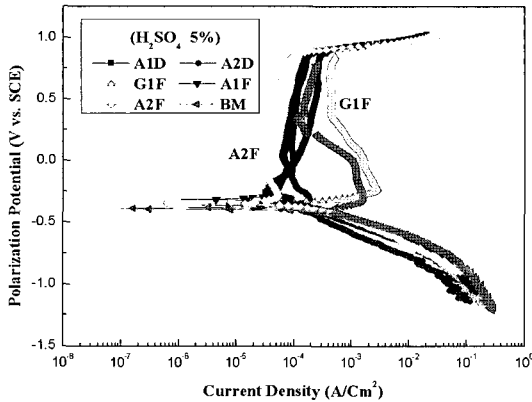


Fig. 4 Cathodic and anodic polarization curves of BM and WM in 5% H₂SO₄ solution

Table 2의 성분분석에 의하면 A2F의 용접금속부는 다른 용접금속부에 비해서 즉 A1D, A2D 및 G1F에 비해서 크롬함량은 적으나 텅스텐과 니켈 함량이 높고 G1F용접금속부는 크롬함량은 가장 높으나 탄소(C)가 A2F용접금속부 보다 많고 규소(Si)가 다소 함유 되어 있다. 그리고 코발트(Co) 함량이 다소 많은 것을 알 수 있다. 따라서 이들 첨가 성분의 함량비가 부동태 전류밀도의 대소에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

그리고 Fig. 4에서 각각의 시험편에 대한 양극 및 음극분극 곡선에서 Stern-Geary식(CMS-100 프로그램 이용)에 근거한 부식 전류밀도를 구하여 Fig. 5에 나타내었다.

모재부의 부식 전류밀도가 가장 높고 용접금속부는 전체적으로 모재부에 비해서 부식전류밀도가 낮음을 알 수 있다. 그리고 용접금속부에서는 A1D가 가장 적은 부식 전류밀도를 나타내었으며 다음으로 A1F A2F, G1F 순으로 적은 부식전류 밀도를 그리고 A2D가 가장 큰 부식 전류밀도를 나타내었다.

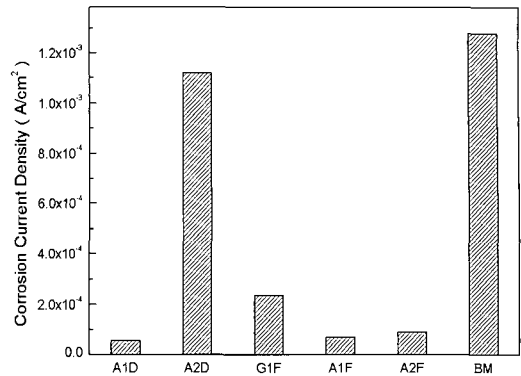


Fig. 5 Variation of corrosion current density for various WM and BM in 5% H₂SO₄ solution

A2D는 다른 용접금속부에 비해서 탄소와 규소의 함유량이 적으며 A1F A2F에 비하여 코발트는 다소 많이 함유되어 있으나 텅스텐 함량이 적고 니켈이 전혀 함유되어 있지 않음을 알 수 있다. 따라서 이들 성분의 함량이 부식속도에 영향을 미치는 것으로 사료된다. Fig. 5의 결과는 Fig. 1, 2 및 Fig. 3의 부식전위와 분극저항의 실험 결과와도 잘 일치하는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 6은 부식전류밀도와 비커스 경도값의 상관 관계를 나타내고 있다. 모재부의 부식전류밀도는 용접금속부에 비해서 가장 높으나 경도값은 가장 낮다. 그리고 용접금속부의 경도값이 모재부에 비해서 전반적으로 높은 것을 알 수 있다. 그리고 A1D 와 G1F 용접금속부는 부식전류밀도는 모재

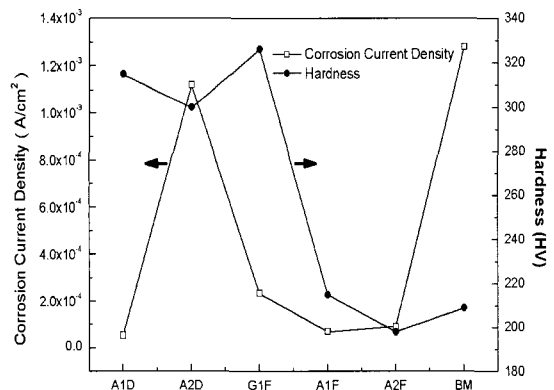


Fig. 6 Relationship between corrosion current density and vickers hardness of various WM and BM

부에 비해서 낮으나 경도값은 모재부보다 훨씬 높은 경향을 나타내었다.

반면에 A2D 용접금속부의 경우 부식전류밀도는 모재부 보다 다소 낮았으나 경도는 역시 모재부 보다 높았다. 그러나 A1F와 A2F 용접금속부의 부식전류밀도는 모재부에 비해서 훨씬 낮았으나 경도는 모재부와 거의 같은 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 모재부는 용접금속부에 비해서 비록 니켈(Ni)은 다량 함유하고 있으나 크롬(Cr) 함량이 적고 코발트(Co)와 텅스텐(W)이 함유되어 있지 않은 관계로 내식성과 경도가 용접금속부에 비해서 떨어지는 것으로 사료된다. 일반적으로 용접금속부는 첨가성분의 영향, 용착금속의 급냉에 의한 조직의 조대화 그리고 용착금속과 모재부 사이의 성분이동 등에 의해서 경도의 변화가 일어나는 것으로 보고되고 있다^{[4]-[5],[18]-[19]}. 그러나 용접금속부의 경우 경도가 모재부에 비해서 높으면 내마모성은 있으나 반복 충격에 의한 충격흡수가 용이하지 않으므로 균열발생의 위험이 있다. 따라서 내식성이 우수하면서 경도는 오히려 모재부에 가까운 A2F가 가장 이상적인 용접법으로 사료된다.

Fig. 7은 배기밸브 모재부의 사이클릭선도 변화를 나타내고 있다. 약 -0.28V(SCE)부근에서 활성태 피크전류밀도가 나타나고 있으며 사이클릭 횟수가 증가 할수록 피크 전류밀도가 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 활성태 영역에서는 피막 생성물에 의해서 오히려 분극 전위가 상승하고 있음을 알 수 있다.

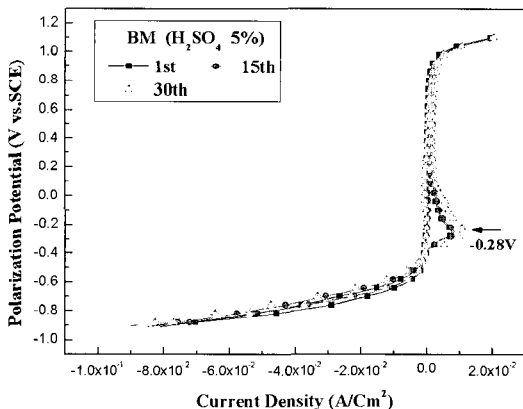


Fig. 7 Variation of cyclic voltammogram of BM in 5% H₂SO₄ solution

Fig. 8은 A1D 용접부의 사이클릭 선도변화를 나타내고 있다. 사이클릭 횟수가 증가 할수록 오히려 분극저항이 증가하고 있음을 알 수 있으며 약 1.0V(SCE)분극전위 영역까지 부동태가 형성되고 그 이상의 분극전위에서는 공식 영역으로 이행하고 있음을 알 수 있다.

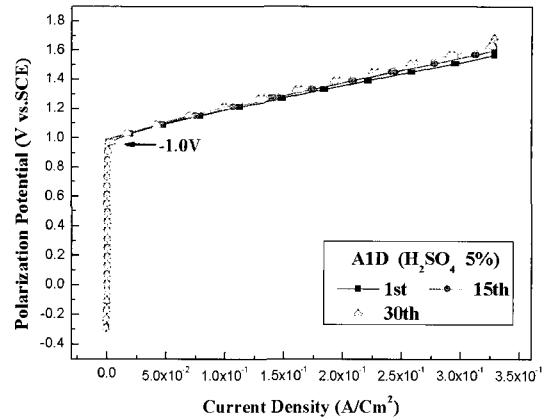


Fig. 8 Variation of cyclic voltammogram of A1D WM in 5% H₂SO₄ solution

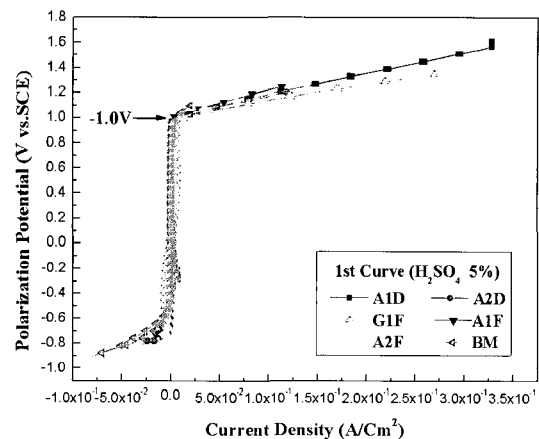


Fig. 9 Variation of cyclic voltammogram of various WM and BM in 5% H₂SO₄ solution

Fig. 9는 모재부와 용접금속부의 첫 번째 사이클릭 선도 변화를 나타내고 있다. 모재부와 용접금속부 모두 공식전위는 약 1.0V이며 그 이상 분극전위에서는 공식영역으로 이행하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 사이클 횟수가 증가해도 같은 경향을 나타내었으며 마지막 30사이클에서도

공식영역으로 이행하는 공식전위 값은 첫 번째 사이클과 거의 같은 값을 나타내었다. 이와 같은 현상은 모재부와 용접금속부 모두 내식성이 강한 니켈, 크롬 등의 성분이 첨가되어 내 공식성이 우수하기 때문으로 사료된다.

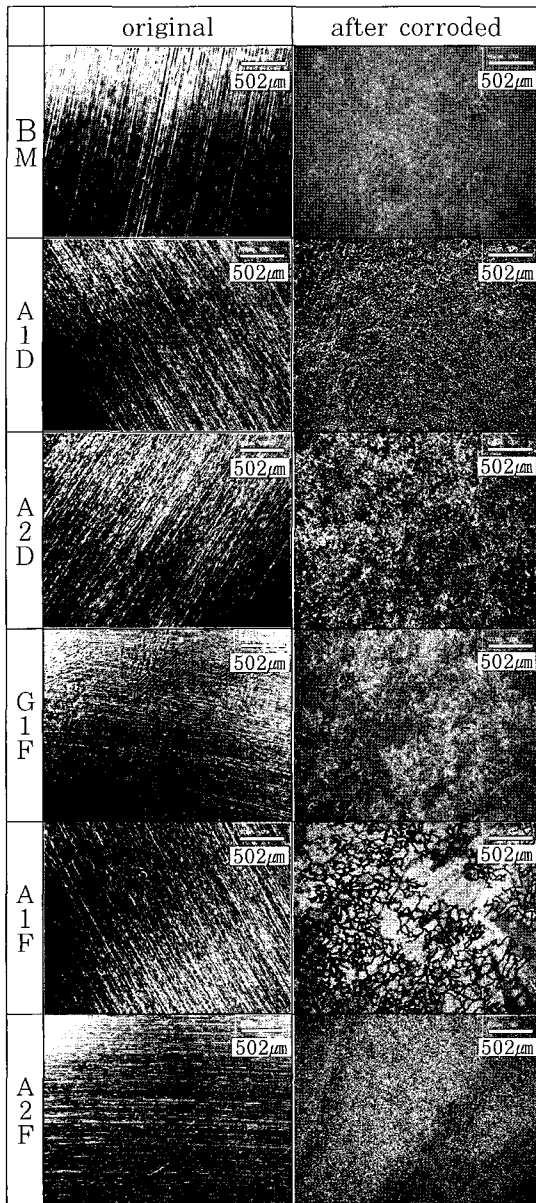


Fig. 10 Morphology of corroded surface after 15 cycle by cyclic voltammogram and original surface of various WM and BM

Fig. 10은 사이클릭 볼타모그램에 의한 15사이클 후의 용접금속부 모재부의 부식된 표면과 부식전의 표면사진을 보여주고 있다. 모재부는 부식된 표면에 아주 미세한 공식이 드물게 보이나 전반적으로 균일하게 부식된 형태를 나타내고 있다. 그러나 용접금속부에서는 모재부 보다 부식된 표면이 균일하지 않고 오목 볼록으로 나타나는 이른바 국부부식의 형태에 가까운 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 A1F용접금속부의 부식된 표면에서는 미세한 입계부식이 나타나고 있음을 알 수 있다. 모재부는 배기밸브 본체이므로 압연강재이나 용접금속부는 용착금속이므로 주강으로 되어 텐트 라이트 조직이 되기 쉬우며 양극 산화시에 코발트 등이 선택적으로 부식되어지기 때문으로 사료된다. 그리고 A1F의 경우에는 용접봉 중에서 크롬(Cr) 함량이 적고 철(Fe)의 함량이 많으므로 입계에서 이온화 에너지가 낮은 철과 크롬결핍 영역이 선택적으로 부식되는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 A2F용접금속부의 경우에는 부식된 표면이 모재부와 거의 흡사한 치밀한 형태를 나타내고 있다. 지금까지의 실험결과에서 모든 용접금속부는 모재부에 비해서 내식성이 우수하였으며 또한 외산 용접봉을 사용한 경우가 국산용접봉에 비해서 경도 값이 비교적 낮은 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 배기밸브 모재부에 용접 방법 및 용접봉의 변수에 따라 보수 용접을 한 후 모재부와 용접금속부의 내식성에 대해서 전기화학적 관점에서 비교 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 부식전위가 귀한 방향으로 이행할수록 분극저항은 증가하고 부식전류밀도는 감소하는 경향을 알 수 있었다.
2. 배기밸브를 보수용접 하였을 경우 모재부에 비해서 용접금속부가 전반적으로 내식성이 우수하였으며 반면에 경도는 모재부에 비해서 높은 경향을 나타내었다.
3. 용접금속부 중에서는 A1D가 가장 내식성은

우수 하였으나 경도값이 모재부에 비해서 훨씬 높았으며 A2D는 내식성도 좋지 않았으며 경도값도 높은 결과를 나타내었다.

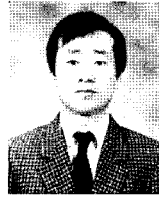
4. A2F 용접금속부는 모재부에 비해서 내식성도 우수하였으며 경도값도 모재부에 가까운 낮은 값을 나타내었다.

5. 국산 용접봉의 경우 내식성은 모재부 보다 양호하였으나 경도는 외산 용접봉에 비해서 비교적 높은 경향을 나타내었다.

참고문헌

- [1] 전대회, 부식과 방식의 관리, 일중사, pp. 426-428, 1985.
- [2] 김민남, 김복인, 한정동, "습식수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제 14권, 제 4호, pp. 56-61, 2000.
- [3] 김복인, 노창석, 정교현, 김민남, "피복성분에 의한 수중용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제 15권, 제 4호, pp. 75-79, 2001.
- [4] 김진경, 강명신, 김영식, "선박용 디젤기관의 주철 부품 보수 용접 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제 20권, 제 2호, pp. 41-45, 2006.
- [5] 안석환, 정정환, 남기우, "용접 열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제4호, pp. 64-71, 2005.
- [6] 오종인, 김영표, 박호경, 방한서, "선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제 21권, 제 1호, pp. 64-68, 2007.
- [7] S. K. Jang and J. I. Jeon, "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, 2006.
- [8] J. D. Kim, B. L. Kil and C. J. Lee, "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, 2006.
- [9] J. D. Kim, S. J. Yoo and J. S. Kim, "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, 2006.
- [10] P. D. Bilmes, C. L. Liorente, Saïre Huaman, L. M. Gassa and C. A. Gervasi, "Microstructure and Pitting Corrosion of 13CrNiMo Weld Metal", Corrosion Science, Vol. 48, pp. 3261-3270, 2006.
- [11] Y. H. Lee, Y. H. Kim and H. Kim, "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, 2003.
- [12] I. H. Lo, M. C. Lee, K. Y. Lim, W. Ho, G. C. Y. Yang and W. T. Tsai, "Effect of Heat Treatment on the Pitting Corrosion Behavior of 347SS Weld Overlay", CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol. 31, No. 5, pp. 361-367, 2002.
- [13] K. M. Moon, M. H. Lee, K. J. Kim, J. G. Kim and S. J. Kim, "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, 2003.

- [14] V. S. Raja, S. K. Vershney, R. Raman and S. D. Kulkarni, "Influence of Nitrogen on the Pitting Corrosion Behavior of 904L Weld Clad", Corrosion Science, Vol. 40, No. 10, pp. 1609-1625, 1998.
- [15] L. W. Tsay, W. L. Lin, S. W. Chen and G. S. Leu, "Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking of 2.25 Cr-Mo Steel Weldments", Corrosion Science, Vol. 39, No. 7, pp. 1165-1176, 1997.
- [16] D. A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Original American Edition Published by Prentice-Hall, Inc., pp. 314, 1998.
- [17] J. V. Muijder and M. Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution", Ed. by M. Pourbaix, Rergomon press and cebelcor, pp. 260-509, 1966.
- [18] 전대회, 부식과 방식의 관리, 일중사, pp. 294-298, 1985.
- [19] 신민교, 기계공작법, 아성출판사, pp. 242-245, 1987.



이명훈(李明勳)

1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업(학사) 1987년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 1994년 일본 나고야대학 졸업(박사), 현 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수



김윤해(金允海)

1983. 2. 한국해양대학교 졸업, 1990. 3. 일본도쿠시마대학교 대학원 졸업(공학석사), 1993. 3. 일본규슈대학교 대학원 졸업(공학박사), 1997. 8. 미국국립표준과학연구소 객원교수, 2006. 3 한국해양대학교 기계소재공학부 교수



문경만(文慶萬)

1976년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1978년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 1992년 일본 나고야대학 졸업(박사), 현 한국해양대학교 공과대학 기계소재공학부 교수

저 자 소 개



김진경(金鎮京)

1976년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1982년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 1989 한국해양대학교 대학원 졸업(박사), 현 한국해양 수산연수원 기관시스템교육팀 교수



조황래(趙凰來)

1997년 한국해양대학교 기계소재공학부 입학, 2004년 한국해양대학교졸업 및 동 대학원의 석사과정 입학, 2006년 한국해양대학교재료공학대학원 석사과정 이수