

## 수중 용접봉으로 용접한 누수배관 용접부위의 부식 특성 평가

문경만\* · 이성열\*\* · 김윤해\* · 이명훈\*\*\* · 김진경†

(원고접수일 : 2008년 8월 7일, 원고수정일 : 2008년 10월 18일, 심사완료일 : 2008년 11월 14일)

### Evaluation of Corrosion Characteristics on Welding Zone of Leakage Seawater Pipe Welded by Underwater Welding Electrode

Kyung-Man Moon\* · Sung-Yul Lee\*\* · Yun-Hae Kim\* · Myung-Hyoon Lee\*\*\* · Jin-Gyeong Kim†

**Abstract :** Leakage trouble on the sea water pipeline in engine room is often resulted from a localized corrosion due to severe corrosive environment caused by both high speed and high pressure of sea water flowing through the inner pipe. In addition, when the ship is in stand-by or emergency condition, underwater welding to control the leakage of sea water from a hole of its pipe is very important in an industrial safety point of view. In this study possibility of underwater welding to control leakage of sea water and corrosion property of its welding zone were investigated with the electrochemical methods by parameters of welding methods and welding electrodes when underwater welding is achieved with a such case that sea water is being leaked out with a height at 50mm from a hole of 2.5mm $\phi$  of test pipe. Corrosion resistance of weld metal zone is better than the base metal and its hardness is higher than that of the base metal. However corrosion potential of weld metal zone showed a negative value than that of the base metal, therefore weld metal zone is preferentially corroded rather than the base metal by performance of galvanic cell due to difference of corrosion potential between weld metal zone and base metal. Eventually it is suggested that leakage of sea water is successfully controlled by underwater welding,

**Key words :** Localized corrosion(국부부식), Underwater welding(수중용접), Corrosion resistance(내식성), Weld metal zone(용접금속부), Base metal zone(모재부)

#### 1. 서 론

최근 산업사회의 급격한 발전과 함께 육,해상의

강구조물의 수요는 급격히 증가하고 있으며, 이들 강구조물은 물론, 선박의 건조시 선체와 선체내부의 각종 구조물의 제작을 위해서 주로 이용되고 있

† 교신저자(한국해양수산연수원 교육연구처, Email:jg21kim@naver.com. Tel : (051)620-5768)

\* 한국해양대학교 공과대학 기계소재공학부

\*\* 한국해양대학교 공과대학 기계소재공학부

\*\*\* 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

는 기술은 용접이라 할 수 있을 것이다. 따라서 용접의 역할과 그 중요성은 익히 알고 있는 사실이며, 또한 여기에 대한 많은 연구결과가 있으며, 예를 들면 구조물의 용접부에 대한 기계적 특성<sup>[17][8]</sup> 등에 대한 결과가 많이 발표되고 있다. 그리고 용접에 의한 강구조물 등은 가혹한 부식환경 하에 있는 경우가 많으며 이 경우 용접부의 부식으로 인한 경제적 손실과 함께 안전재해 사고를 유발 할 수도 있으므로 일반 강구조물의 용접부 부식에 대한 연구결과<sup>[9][14]</sup>도 상당수 있으나, 선박의 기관실내의 해수배관이 누수되는 부위의 용접부 부식에 대한 연구결과는 거의 없는 것으로 사료된다. 한편 선박의 기관실내의 해수파이프 내부에는 최대 3m/s의 유속<sup>[15]</sup>으로 해수가 유동하며,  $2\text{kgf/cm}^2 \sim 3\text{kgf/cm}^2$ 의 수압을 유지하고 있으므로 파이프나 밸브등은 항상 응력을 받고 있는 상태, 즉 피로를 받고 있다고 해도 과언이 아니다. 그리고 해수파이프 내부의 표면은 용융아연도금처리를 하여 해수에 의한 부식을 억제 하고 있으나 전술한 해수의 유속과 끊임없는 응력피로 등에 의한 가혹한 부식환경 하에 있으므로 응력피로 또는 염소이온에 의한 피막의 파괴와 염화물의 가수 분해현상에 의해서 국부부식의 발생위험성을 항시 내포하고 있다<sup>[16]-[17]</sup>. 그리고 이러한 국부부식의 진전에 의해서 예기치 못한 파공의 발생에 의한 누수를 적절한 방법으로 차단하는 응급조치는 극히 중요한 사안이라 할 수 있을 것이다.

그 이유는 황천 향해 중이거나 입,출항시 해수나 청수의 배관으로부터 물이 누수할 경우 선박의 주기관과 보조기관의 작동에 지장을 주어 예기치 못한 선박의 안전사고를 유발할 수 있기 때문이다. 따라서 배관의 누수부분에 대해서는 고무밴드 등으로 일시적으로 차단하나 나중에는 용접으로 누수를 완전 차단하게 된다.

누수부분에 대한 용접의 경우 통상 누수를 정지시키고 물기를 제거한 후에 하는 것이 관례이나 본 연구에서는 누수가 진행되고 있는 상태 즉, 일정 압력으로 물이 누수되고 있는 상태에서 몇 종류의 수중용접봉으로 용접하였을 경우 용접부 주위의 부식 특성에 대해서 비교고찰 하였다. 본 연구 결과는

누수되고 있는 상태에서의 수중용접의 가능성과 수중용접봉의 상대적인 성능비교를 통한 최적의 수중용접봉을 선택하고 이 용접봉으로 누수용접을 실시함으로써 경제적인 측면에서 파이프의 장기 수명유지를 위한 좋은 참고자료가 되리라 기대된다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 1개의 수조(120cm x 100cm x 80cm)와 1대의 원심펌프(출력: 7.5kW, 압력:  $4\sim 6\text{kgf/cm}^2$ ) 그리고 용접 실험용 해수배관은 길이 400mm 직경 40mm (JIS SRPG38) 의 탄소강관을 이용하였다. 누수 용접을 위한 용접용 파이프의 양끝에 플랜지를 부착하여 쉽게 탈착 할 수 있도록 하였다.

그리고 용접용 파이프의 중앙부에 직경 2.5mm의 구멍을 뚫고 양측에 있는 조절밸브로 압력을 조절하면서 구멍으로부터 50mm의 높이로 해수가 솟아 오르고 있는 상태에서 용접을 하였다. 사용한 용접기는 디지털 교류 용접기(85V, 300A) 직류용접기 (32V, 300A) 두 대를 사용하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1 과 같다.

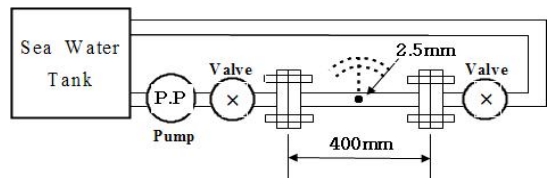


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

그리고 Table 1에서와 같이 3종류의 수중용접봉으로 직류(D3,DA,DE)와 교류(A1,A3)로 용접하였다. 그리고 용접시의 공급된 전류는 A1:125A, A3:120A, D3:120A, DA:165A, 및 DE:160A이며 사용된 용접봉의 직경은 3.2mm이다. 또한 용접한 후 모재부(BM:Base Metal)와 용접부(WM:Weld Metal)를 포함하여 세로 3cm 가로 2cm로 절단하여 시험편을 제작하였다.

시험편의 표면은 샌드페이퍼로 2000번까지 연마한 후 용접부와 모재부의 면적을 각각  $0.04\text{cm}^2$ 로 노출 시킨 후 다른 부분은 에폭시로 절연하였다.

**Table 1 The welding characteristics for welding method and welding electrodes.**

Kinds	Size of hole	Underwater welding electrode					Remark
		AC	DC	E4301	E4313	70XX	
A1	φ 2.5	○		○			Korea
A3		○			○		Korea
D3			○		○		Korea
DA			○			○	USA
DE				○		○	England

그리고 3m/s(PIV:Particle Image Velocimetry)의 해수용액유동상태에서 부식전위의 변화, 양극 및 음극 분극곡선, 사이클릭 볼타모그램 및 교류임피던스 등을 측정하였다. 실험에 사용된 측정장치는 CMS-100프로그램이며 기준전극은 SCE 전극, 대극은 백금을 사용하였고 주사속도는 1mv/s, 그리고 초기 지연시간은 1800초로 하였다. 단 사이클릭 전도 변화 측정은 +1.5V ~ -0.5V 영역에서 30mv/s의 주사속도로 측정하였다. 그리고 시험편의 표면을 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(etching)하여 용접과 모재부의 경도를 3회 측정하여 평균값을 구하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

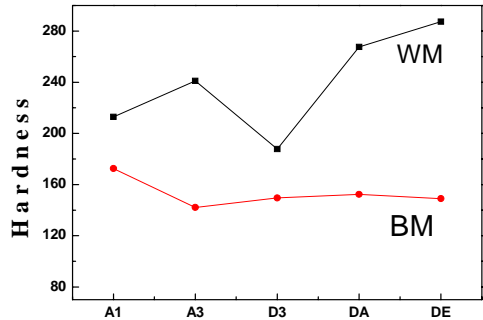
Fig. 2는 직류와 교류로 용접한 5종류의 시험편에 대해서 모재부와 용접금속 경도를 측정한 결과이다. 모재부에 비해서 용접부의 경도가 전체적으로 높은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 DA, DE 용접부가 다른 용접부에 대해서 비교적 높은 경도값을 나타내고 있다.

모재부의 경우에는 교류와 직류에 관계없이 거의 균등한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 용접부는 첨가성분의 영향 그리고 용접금속의 급냉에 의한 조직의 조대화 그리고 용착금속과 모재부사이의 성분이동 등에 의해서 경도의 변화가 일어나는 것으로 보고되고 있다<sup>[3]-[4],[18]-[19]</sup>.

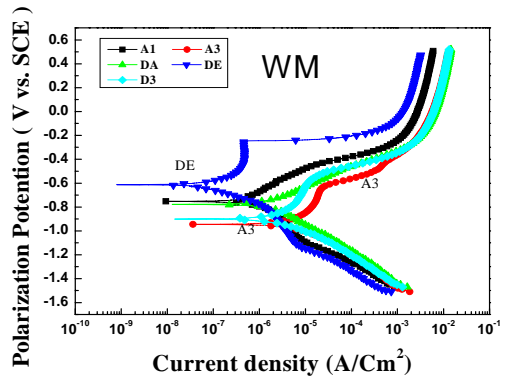
본 실험에서 용접부가 모재부에 비해서 경도가 높은 실험결과를 얻을 수 있었다<sup>[20]</sup>.

Fig. 3은 용접부에 대한 양극 및 음극 분극선을

나타내고 있다. DE의 경우 양극 분극곡선에서 뚜렷한 부동태가 나타나고 있음을 알 수 있으며 또한 분극곡선상의 부동태전류밀도가 가장 적은 즉 정성적으로 내식성도 가장 양호한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 A3의 경우 분극곡선의 형상에서 비교적 내식성이 가장 좋지 않은 경향을 알 수 있다.



**Fig. 2 Variation of hardness of WM and BM**



**Fig. 3 Cathodic and anodic polarization curves of weld metal zone in sea water solution**

Fig. 4는 모재부의 분극곡선을 보여주고 있다. 모재부의 경우에는 사용한 용접봉과 용접조건 등이 다소 다를 수 있으나 결국 같은 금속이므로 분극곡선의 형태도 거의 같은 양상을 보여주고 있는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 Fig. 3과 Fig. 4의 분극곡선에서 타펠 외삽법으로 구한 부식전류밀도를 나타내고 있다.

용접부의 부식전류밀도가 모재부에 비해서 비교적 적은 경향을 알 수 있으며 DE가 가장 적은 부

식전류 밀도 값을 나타내고 있다. 그리고 A3가 용접부와 모재부 모두 다른 시험편에 비해서 부식전류밀도가 비교적 큰 경향을 나타내었다.

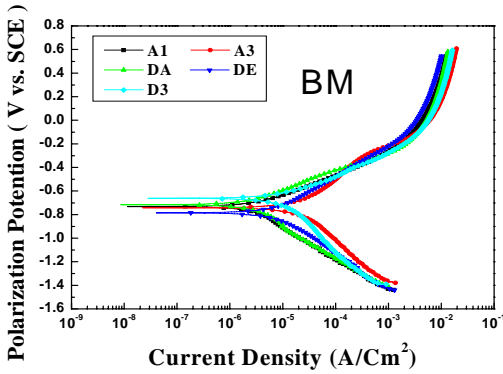


Fig. 4 Cathodic and anodic polarization curves of BM in sea water solution

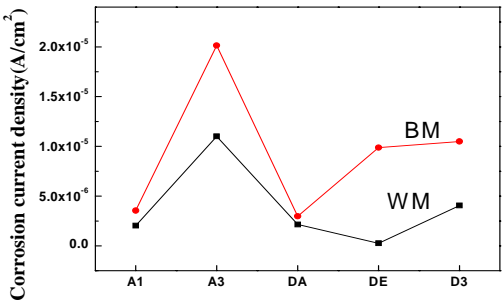


Fig. 5 Variation of corrosion current density of WM and BM in sea water solution

Table 2는 해수 용액중에 침지 1시간 후의 용접부와 모재부의 부식전위를 측정된 결과이다. 용접부의 부식전위가 모재부에 비해서 상대적으로 낮은 경향을 알 수 있다. 일반적으로 용접부의 내식성은 첨가성분의 영향에 의해서 모재부에 비해서 우수한 것으로 보고되고 있다<sup>[20]-[21]</sup>. 그러나 부식전위는 첨가성분 각각의 평형전위의 영향을 받아 용접부의 부식전위가 모재부에 비해서 높은 경우<sup>[20],[21]</sup>와 오히려 용접부가 모재부에 비해서 낮은 실험결과<sup>[22]</sup>가 있으나 본 실험의 결과는 전술한 바와 같이 용접부가 모재부에 비해서 낮은 부식전위 값을 나타내었다.

Table 2 Variation of corrosion potentials of BM and WM zone after immersed 1 hour in sea water

	Corrosion potential	
	Base Metal	Welding Metal
A1	-0.645	-0.682
A3	-0.579	-0.706
D3	-0.595	-0.670
DA	-0.607	-0.669
DE	-0.643	-0.715

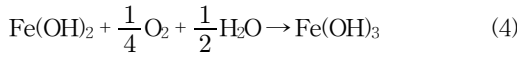
Fig. 6은 각각의 시험편에 대한 용접부의 임피던스 측정결과를 나타내고 있다. 10mHz에서 A3가 가장 높은  $1.938 \times 10^3 \Omega$ 의 임피던스 값을 나타내고 있으며 DE가 가장 낮은  $5.6 \times 10^2 \Omega$ 의 임피던스 값을 보여주고 있다. 임피던스 측정은 도장된 시험편의 경우 도막의 내식성을 평가 할 때 자주 사용하는 전기화학적 측정방법이며 임피던스 값이 클수록 도막의 내식성이 양호한 것으로 평가된다. 그런데 본 실험에서는 분극곡선상에서 내식성이 우수한 것으로 평가된 DE시험편의 경우 임피던스 측정에서는 역으로 임피던스 값이 가장 적고 오히려 내식성이 가장 좋지 않은 A3시험편이 임피던스 값이 가장 큰 결과를 얻었다. 그리고 Fig.7에서 알 수 있듯이 A1시험편의 경우 용접부의 임피던스가 10mHz에서  $1.81 \times 10^3 \Omega$ 으로 모재부의  $2.82 \times 10^3 \Omega$ 에 비해서 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 다른 시험편의 경우에도 모재부의 임피던스가 용접부 보다 높은 결과를 얻을 수 있었다. 결국 용접부의 내식성이 모재부에 비해 우수함에도 불구하고 임피던스 값은 오히려 반대 현상이 나타났음을 알 수 있다. 이것은 임피던스 측정시 한시간 까지 부식전위를 측정된 후 임피던스 측정이 시작되며 마지막 10mHz의 측정까지 약 3시간 이상의 시간이 소요된다. 따라서 시험편이 해수용액에서 임피던스 측정도중에 내식성이 좋지 않을 수록 빨리 부식생성 산화물이 표면에 형성되어 이들 부식생성물이 표면의 임피던스 값을 오히려 증대시키는 것으로 사료된다. 즉,



(1)과 (2)의 반응에 의해서



(3) 식은 다시



Fe(OH)<sub>3</sub>은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·n H<sub>2</sub>O의 형태로 표면에 흡착되어 내식성이 좋지 않을 수록 임피던스값을 증가시키는 것으로 사료된다.

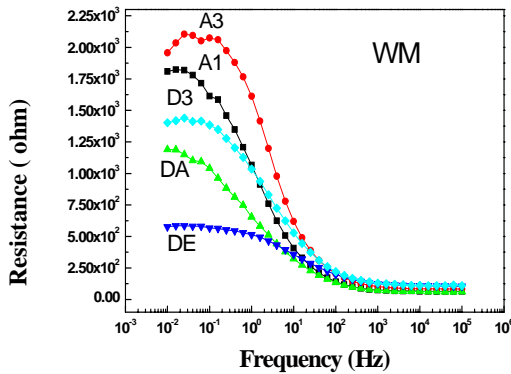


Fig. 6 Variation of bode plots of WM in sea water solution

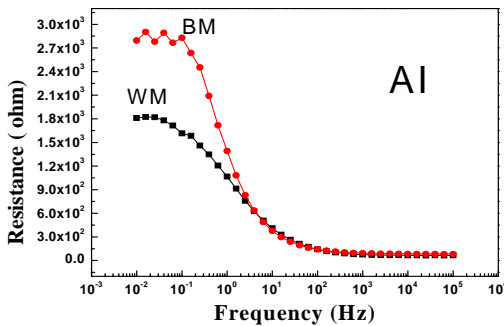


Fig. 7 Variation of bode plots for WM and BM of A1 specimen

Fig. 8은 A3 시험편 모재부의 사이클릭 볼타모그램의 전도 변화를 나타내고 있다. 사이클릭 횟수가 증가 할수록 양분극시의 전도가 오른쪽으로 이

행하고 음분극시에는 왼쪽으로 이행하는 경향을 알 수 있다. 이것은 사이클릭 횟수가 증가 할수록 양분극시에 표면의 산화막이 파괴되어 활성태 영역으로 변하기 때문에 사료된다. 그러나 Fig. 9의 용접부의 경우에는 사이클 횟수가 증가 할수록 양분극시의 전도는 왼쪽으로 기울고 있음을 알 수 있다. 이것은 용접부는 사이클 횟수가 증가 할수록 표면의 산화막이 파괴되지 않고 오히려 형성되어 분극저항이 증가하는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

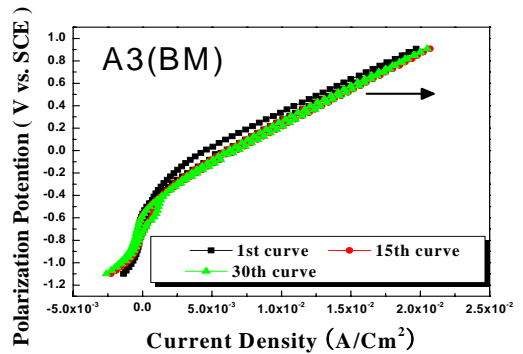


Fig. 8 Variation of cyclic voltammogram of BM in sea water solution

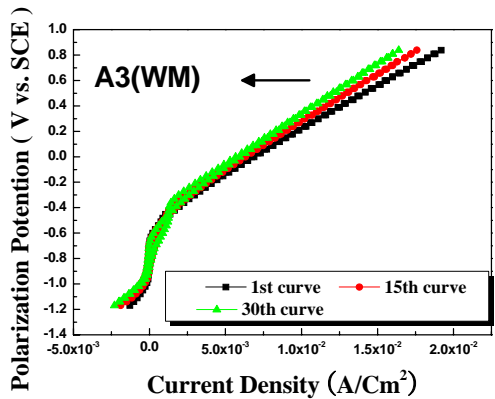


Fig. 9 Variation of cyclic voltammogram of WM in sea water solution

Fig. 10은 모재부와 용접부를 포함한 시험편 전체를 침지전과 해수용액에 침지 10일 후의 부식된 표면 상태를 보여 주고 있다. 시험편의 종류에 관계 없이 용접부에 붉은 녹의 생성물이 관찰되고 있음을 알 수 있다. 분극곡선과 임피던스의 측정결과에

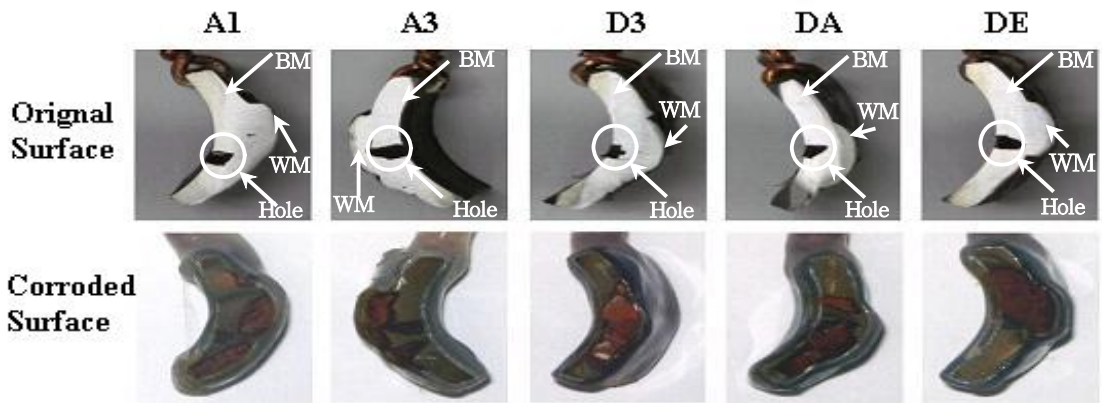


Fig. 10 Appearance of both original and corroded surface after immersion 10 days in sea water solution

서 용접부가 모재부에 비해서 내식성이 우수한 경향을 알 수 있었으나 Fig.10의 결과에서는 용접부가 모두 부식되고 모재부의 부식 정도가 적음을 알 수 있다.

이것은 전술한 바와 같이 용접부가 모재부에 비해서 부식전위가 낮기 때문에 부식전위차에 의한 갈바닉 전지가 형성되어 비전위의 용접부가 양극으로 작용하여 부식된 것으로 사료된다<sup>[21]</sup>. 따라서 본 실험의 결과에 의하면 누수상태에서 용접을 하였을 경우 용접으로 누수를 차단 할 수 있으나 장기간의 누수차단효과를 얻기 위해서는 비록 용접부가 모재부보다 내식성이 양호하지만 부식전위차에 의한 갈바닉 부식으로 용접금속부가 모재부보다 먼저 부식되므로 용접금속부의 비드 두께를 증대시킬 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

지금까지 누수되고 있는 해수 배관파이프를 교류와 직류 및 용접봉을 변수로 하여 용접하였을 경우 누수차단 효과 및 용접부와 모재부의 부식특성 비교를 전기 화학적인 방법으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용접부의 경도가 모재부에 비해서 높은 경향을 나타내었으며 내식성 또한 용접부가 모재부에 비해서 우수하였다.
2. 사용한 용접봉의 종류에 따라서 내식성의 차

이가 있었으며 DA,DE의 용접부는 경도와 내식성이 다른 시험편에 비해서 양호 하였다.

3. 내식성이 우수한 용접부의 임피던스가 오히려 모재부에 비해서 적은 값을 나타내어 도장시험편의 임피던스현상과 상이한 실험결과를 얻을 수 있었다.

4. 누수하고 있는 해수배관을 용접으로 누수를 차단 할 수 있었으나 다만 용접부가 모재부보다 갈바닉 부식 될 수 있는 가능성이 있으므로 용접비의 두께를 증대시킬 필요가 있다고 사료되었다.

#### 참고문헌

- [1] 김민남, 김복인, 한정동, “습식수중 용접봉의 기계적 성질에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp. 56-61, 2000.
- [2] 김복인, 노창석, 정교현, 김민남, “피복성분에 의한 수중용접봉의 아크 안정성 개선에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp. 75-79, 2001.
- [3] 김진경, 강명신, 김영식, “선박용 디젤기관의 주철 부품 보수 용접 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제20권, 제2호, pp. 41-45, 2006.
- [4] 안석환, 정정환, 남기우, “용접 열사이클재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성평가”, 한국해양공학회지, 제19권, 제4호, pp. 64-71, 2005.

- [5] 오종인, 김영표, 박호경, 방한서, “선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp64-68, 2007.
- [6] S.K.Jang and J.I.Jeon, “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, 2006.
- [7] J.D.Kim, B.L.Kil and C.J.Lee, “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, 2006.
- [8] 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.
- [9] P.D.Bilmes, C.L.Liorente, Saire Huaman, L.M.Gassa and C.A.Gervasi, “Microstructure and Pitting Corrosion of 13CrNiMo Weld Metal”, Corrosion Science, Vol.48, pp. 3261-3270, 2006.
- [10] 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. 31, No. 5, pp. 219-224, 2003.
- [11] 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.
- [12] K.M.Moom, 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.
- [13] 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.
- [14] L.W.Tsay, W.L.Lin, S.W.Chenct 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.
- [15] S.H.Frederick, H.Capper, “Materials for Marine Machinery”, Marina Media Management, p. 221, 1976.
- [16] 전대회, “부식과 방식의 관리” 일중사, pp. 101-103, 1985.
- [17] Takeo, “Effect of Various Factors, Mechanism and Prvention Methods of grooving corrosion of ERW and CBW Carbon Steel pipes”, Kawasaki Seidetsugihō, Vol. 11, No. 3, pp. 326-330, 1979.
- [18] 전대회, 부식과 방식의 관리, 일중사, pp. 294-298, 1985.
- [19] 신민교, 기계공작법, 아성출판사, pp. 242-245, 1987.
- [20] 김진경, 조황래, 이명훈, 김윤해, 문경만, “5% 황산 용액에서 배기벨브 보수 용접부의 부식 특성에 미치는 용접방법과 용접봉의 영향”, 한국 마린 엔지니어링 학회지, 제31권, 제6호, pp. 744-752, 2007.
- [21] D.A.Jones, “Principles and Prevention

of Corrosion”, Original American Edition Published by Prentice-Hall, Inc., p. 314, 1998.

- [22] 김진경, 원창욱, 조황래, 이명훈, 김윤희, 문경만, “용접재료별 해수배관 용접부위의 부식특성에 관한 전기화학적 평가”, 한국해양공학회지, 제21권, 제5호, pp. 34-46, 2007.



김진경(金鎭京)

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

**저 자 소 개**



문경만(文慶萬)

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



이성열(李成烈)

1979년 부산대학교 금속공학과 졸업(공학사). 1985년 일본 동북대학 대학원 졸업(공학석사). 1989년 일본 동북대학 대학원 졸업(공학박사). 1979-82년 국방품질검사소 연구원. 현 한국해양대학교 기계소재공학부 교수



김윤희(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



이명훈(李明勳)

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