

SCM440강 용접부의 내식성에 미치는 용접후 열처리효과에 관한 전기화학적 연구

김성종* · 김진경** · 김종호*** · 김기준*** · 김영식**** · 문경만****

Electrochemical Study on the Effect of Post-Weld Heat Treatment Affecting to Corrosion Resistance Property of the Weldment of SCM440 Steel

S-J Kim* · J-K Kim** · J-H Kim*** · K-J Kim*** · Y-S Kim**** · K-M Moon****

Key words : PWHT(용접후열처리), Micro-Vickers Hardness(마이크로 비커스 경도), Electrochemical Property(전기화학적특성), Corrosion Resistance(내식성), Corrosion Potential(부식전위), Galvanic Cell(갈바닉 전지)

Abstract

The effect of post-weld heat treatment(PWHT) of SCM440 steel was investigated with parameters such as micro-Vickers hardness, corrosion potential, polarization behaviors, galvanic current, Al anode generating current and Al anode weight loss, etc. Each hardness of three parts(HAZ, BM, WM) by PWHT is lower than each of as-welded parts. However, hardness of WM area was the highest among those three parts in case of both PWHT and as-welded. Corrosion potential of WM part was the highest among those three parts and WM area was also acted as cathode without regard to PWHT. The magnitude of corrosion potential difference among three parts by PWHT was larger than that of three parts of as-welded, and corrosion current by galvanic cell of these three parts by PWHT was also larger compared to as-welded. Therefore, it is suggested that corrosion resistance property of SCM440 steel is decreased by PWHT than as-welded. However, both Al anode generating current and anode weight loss were also increased by PWHT compared to as-welded when SCM400 steel is cathodically protected by Al anode.

* 한국해양대학교 대학원(원교접수일 : 2000년 8년)

** 해양수산연수원 교수

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

**** 한국해양대학교 기계소재공학부 교수

1. 서 론

최근 산업의 급격한 발전과 함께 기계구조물은 점점 초대형화, 고속화, 고효율화되어 가고 있으며 또한 가혹한 부식환경조건 등에서의 사용빈도가 점차 증가되어가고 있는 추세에 있다. 따라서 기계재료도 내식성, 내열성, 고인성 및 고강도 등이 요구되고 있는 것이 현 실정이다. 또한 해양탐사, 석유시추선 및 해저자원탐사용 구조물 등은 점점 대형화 되고 있는 추세에 있으며 이러한 기계구조물이 위치한 환경조건도 더욱 가혹화되고 있다. 기계구조용강인 SCM강은 보통 대형압력용기나 크랭크축, 치차 등과 같은 곳에 사용되는 고강도 재료이다. 또한 이 재료는 베인이나 임펠러 등과 같은 해수펌프용 부품에도 사용될 수 있으므로 내식성 및 내에로전(anti-erosion)성 평가도 중요하다고 사료된다. 또한 이러한 각종 기계구조물용 재료는 해양분위기에서의 수요가 점차 증가될 것으로 예측된다.

한편 해양분위기하의 해양구조물은 제작시 급속가열, 급속냉각하는 용접공정은 필수불가결한 것이며, 용접시 발생하는 잔류응력이나 수소의 흡수 또는 용접열로 인한 금속조직의 변화 등에 의한 기계적 성질의 저하를 초래하며, 상기와 같은 여러 가지 복합적인 원인으로 인하여 갈바닉(galvanic)부식을 초래하게 된다. 특히 해양구조물용 강과일이나 수도배관용 전봉강판 용접부의 구상부식에 대한 문제점이 자주 대두되고 있다.^{1)~6)} 이러한 갈바닉 부식이나 잔류응력제거, 인성향상 등을 목적으로 용접후열처리(post-weld heat treatment, PWHT)를 시행하나 이 열처리는 600°C 이상의 고온에서 행해지기 때문에 열영향부가 뜨임과 같은 효과를 받게 되어 용융선에 가까운 조립역은 고용된 첨가원소 또는 탄화물의 거동에 의해 취화될 뿐만 아니라, 용접시 잔존된 잔류응력에 의해 뜨임취화를 일으키는 것으로 알려져 있으며, 특히 용접구조물에서는 용접후열처리시 용접부에 잔존된 잔류응력에 의해 불순원소나 탄화물들이 입계에 석출되기도 한다.⁷⁾ 본 연구에서는 통상 행하여지고 있는 SCM440강의 용접후열처리 조건이 용접부 주위

부식특성^{8)~10)}에 미치는 영향에 대해서 각 부위별 부식특성을 천연해수분위기하에서 전기화학적 방법 등으로 비교·고찰하였다. 본 연구의 결과는 부식환경에 노출되어 있는 기계구조물의 설계시공시에 용접부 부식의 억제대책에 참고자료가 되리라 기대된다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험용 재료 및 용접조건

본 연구에 사용된 SCM440강 시험편 용접부의 형상은 Fig. 1과 같으며 화학적 조성은 Table 1과 같다.

그리고 직경 $\phi 1.6$ 인 E91T1-B3 용접와이어를 사용하여 아크전압 25V, 아크전류 300~350A로 밀러(miller)용접기를 사용하여 플럭스코어드 아크 용접(flux cored arc welding, FCAW)을 실시하였다.

한편 용접후열처리 조건¹⁰⁾은 Table 2와 같다.

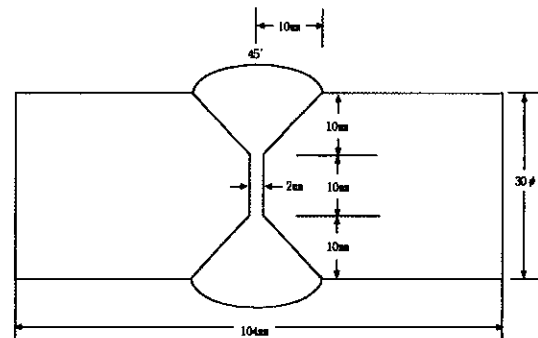


Fig. 1 Schematic diagram of welding groove

Table 1. Chemical compositions of SCM440 steel specimen

Compositions	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Cu
Weight percent(%)	0.43	0.24	0.60	<0.0008	0.026	1.2	0.15	0.10

Table 2. Condition of post-weld heat treatment

	Heating speed	Maintenance temperature	Cooling speed
SCM440 steel	80° C/hr.	3hr.	furnace cooling

2.2 경도실험

시험편을 2000번까지 사포로 연마한 후 나이탈(nital)로 에칭하여 용접부, 열영향부, 모재 부위를 마이크로비커스 경도기를 사용해서 측정하여 상호 비교·분석하였다.

2.3 각 부위별 부식전위와 분극곡선 측정 및 탄소봉과 각 부위별 양단간 흐르는 부식 전류량 측정

시험편을 원주방향에서 중심방향으로 5mm정도 절단한 후 평활면을 2000번까지 샌드페이퍼로 연마하고, 나이탈로 에칭 처리한 후, 시험편 윗면에 트레이싱페이퍼를 놓고 각 부위별 위치를 체크한 다음 노출면적이 8mm²이 되도록 한 상태에서 고저항 전위차계인 Fluke 87 RMS Multimeter와 기준전극으로 포화카로멜전극을 사용하여 부식전위를 420분동안 측정하였으며, 분극실험은 백금전극을 대극으로, 기준전극은 포화카로멜전극(SCE)을 사용하였고, 분극시험용 포텐쇼스타트(potentiostat)는 미국 Gamry사의 CMS100 전기화학적 부식측정 시스템을 사용하여 실시하였다.¹¹⁾ 그리고 탄소봉(직경: 10mm, 노출면적: 0.785cm²)과 각 미세부위별 갈바닉 셀(galvanic cell)을 형성하여 양단간 흐르는 부식 전류량을 420분동안 연속 측정하였다.

2.4 희생양극 시험법

용접금속(노출면적: 6.5cm²)을 음극으로 하고 알루미늄 합금(노출면적: 0.123cm²)을 희생양극으로 하여 두 금속을 전선으로 연결한 후 부식셀(Cell)에 침지시켰다. 부식셀은 2l의 용량에 천연해수를 채웠으며, 용액을 정지중인 경우와 유동중(3cm/sec)중인 경우에 대해서 각각 비교검토하였다. 이 경우 168시간동안 침지시간변화에 따른 양극, 음극의 전위변화측정과 양단간 흐르는 전류량

Table 3. Chemical compositions of Al alloy sacrificial anode

Composition Weight	Fe	Si	Cu	Zn	In	Al
percent(%)	0.084	0.0375	0.0325	5.24	0.0175	Balance

및 실험전·후 양극소모량 등을 비교·분석하였다. 이때 사용된 알루미늄합금 희생양극의 화학조성은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 E91T1-B3 용접와이어로 플럭스코어드 아크용접한 후 용접후열처리(PWHT: post weld heat treatment, 700°C에서 3시간 유지한 후 노냉)한 경우와 하지 않은 경우(As-welded)에 따른 용접최종층 표면 비드에 대해 직각 방향으로 각 부위별로 측정된 경도분포를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 용접후 열처리하지 않은 경우(As-welded)에 비해서 용접후열처리(PWHT)한 경우가 전 부위에 걸쳐서 경도가 낮아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 용접으로 경화된 조직이 용접후열처리로 인하여 다소 연화되었기 때문인 것으로 사료된다. 특히 용착부에서는 As-welded의 경우 355~370Hv 정도이고, PWHT의 경우 338~356Hv정도의 경도값을 나타내어 약 14~17Hv의 경도저하를 나타내었다. 모재(base metal, BM)부에서도 상기한 값과 유사한 경도저하를 나타내었으나 열영향부(heat affected zone, HAZ)가 용접후열처리에 따른 경도저하가 가장 적었음을 알 수 있었다. 그리고 용접후열처리 유무에 관계없이 용착부(weld metal, WM)의 경도가 가장 높고, HAZ와 BM로 갈수록 경도값이 낮아지는 경향을 알 수 있다.

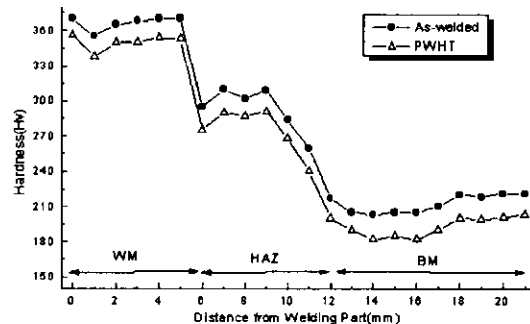


Fig. 2 Variation of micro-Vickers hardness of SCM440 steel both As-welded specimen and PWHT specimen

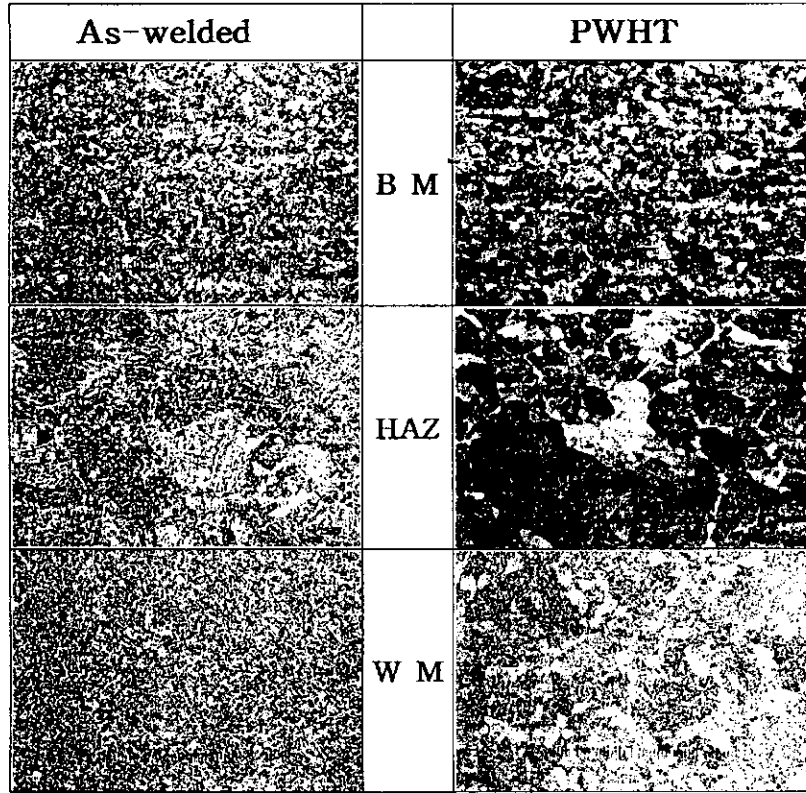


Photo 1 Microstructures of As-welded specimen and PWHT specimen in case of SCM440 steel(×200)

Photo 1은 용접후 열처리 유무에 따른 미세 각 부위별 조직사진의 변화를 보여주고 있다.

Photo 1에서 알 수 있듯이 As-welded의 경우 BM부에서는 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)의 압연조직을 나타내고 있으며, 미소한 펄라이트 밴드를 볼 수 있으나, PWHT의 경우는 같은 페라이트, 펄라이트조직을 나타내고 있으나 결정입자의 크기가 증대된 것을 알 수 있다. 그리고 As-welded의 경우 HAZ부에서는 기지오스테이트(prior austenite) 조직에 베이나이트(bainite)와 마르텐사이트(martensite)의 중간조직에 가까운 침상형태의 조직을 나타내고 있는 것으로 사료되며, PWHT인 경우는 결정입계부분에서 페라이트가 성장했음을 알 수 있다. 또한 As-welded의 경우 WM부에서는 prior 오스테나이트조직과 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트와 마르텐사이트의 혼합조직으로 사료되며, 한편 PWHT인 경우는 페라이트와 펄라이트 및 베이나이트조직이 혼재되어

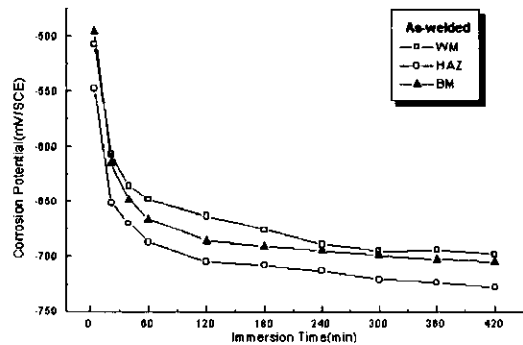


Fig. 3 Relationship between corrosion potential and immersion time in case of As-welded of SCM440 specimen in natural sea water solution

있으며, 페라이트가 결정입계에서 성장했음을 알 수 있다. Fig. 3은 용접후 열처리를 하지 않은 As-welded의 경우 침지시간의 경과에 따른 부식전위의 변화를 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이 전 부위에 걸쳐서 침지 시간의 경과에 따라 부식전위가 비(卑)방향으로 이행하는 경향을 나타냈으나 180분 정도부터 다소 안정되어 가고 있음을 알 수 있다. 그리고 용착부의 부식전위가 가장 높고 모재부, 열영향부순으로 전위가 낮아지고 있음을 알 수 있으며, 침지 420분 후 HAZ부와 WM부의 부식전위 변화폭은 약 30mV였으며, WM부와 BM부의 전위차는 약 7mV의 값을 나타내었다. 이러한 부식전위의 차이에 의해서 갈바닉셀(Galvanic Cell)이 형성되어 부

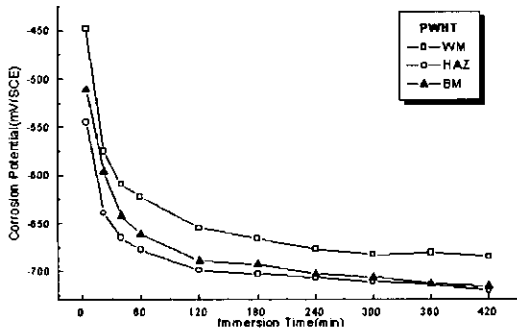


Fig. 4 Relationship between corrosion potential and immersion time in case of PWHT of SCM440 specimen in natural sea water solution

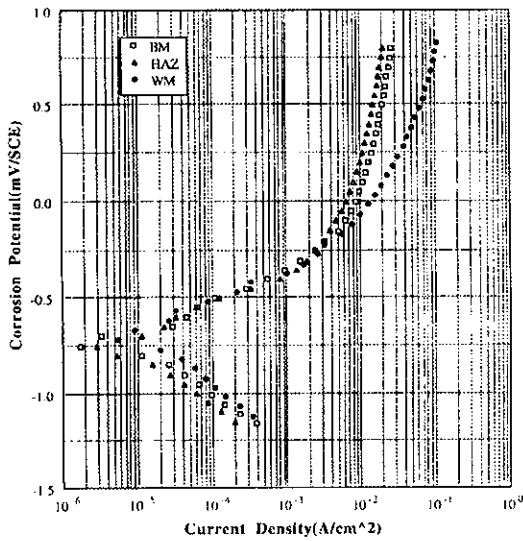


Fig. 5 Cathodic and anodic polarization curves of SCM440 steel As-welded specimen in natural sea water solution

식전류가 흐르게 되며 또한 부식전위가 가장 낮은 HAZ부에서 갈바닉부식 발생 가능성이 가장 높을 것으로 사료된다.

Fig. 4는 용접후열처리를 실시한 PWHT의 경우 침지시간의 변화에 따른 부식전위의 시간적 변화를 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이 전체적으로 침지시간의 경과에 따른 부식전위의 변화 경향은 Fig. 3의 As-welded의 경우와 비슷하나 침지 420분 후 WM부와 HAZ부의 전위차는 약 35mV정도로 오히려 증가되어 갈바닉셀에 의한 HAZ부의 부식은 As-welded보다 역으로 증가될 것으로 사료된다. 그리고 특기할 점은 As-welded보다 PWHT에서 BM부의 부식전위는 더욱 낮아져 HAZ부의 부식전위에 가까운 값을 나타내고 있으며, 용접후열처리에 관계없이 HAZ부가 역시 가장 낮은 전위값을 나타내었으므로 HAZ부가 갈바닉 셀 형성에 의한 부식발생가능성이 가장 높을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 As-welded 시험편의 각 부위별 양극 및 음극분극곡선의 변화를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 양극분극곡선의 경우 외관상 큰 차이를 나타내지는 않으나 부식전위값이 WM부가 가장 높고, BM부, HAZ부 순으로 낮아지

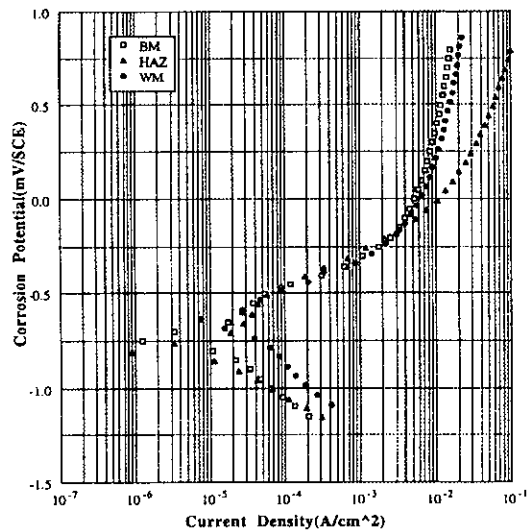


Fig. 6 Cathodic and anodic polarization curves of SCM440 steel PWHT specimen in natural sea water solution

는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3의 부식전위 측정결과와 유사한 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

Fig. 6은 PWHT를 시행한 시험편의 각 부위별 양극 및 음극 분극곡선이다.

그림에서 알 수 있듯이 PWHT의 경우에도 역시 양극분극곡선에서 외관상 큰 차이를 나타내지 않고 있음을 알 수 있었다.

이와같이 Fig. 5, 6의 분극곡선상에서는 전술한 바와 같이 외관상으로 뚜렷한 부식속도의 차이를 구분할 수 없었다. 따라서 각 부위별 분극저항과 부식전류밀도 및 타펠기울기 등을 CMS 부식측정 시스템을 이용하여 구하고 이들의 값을 Table 4에 정리하여 보았다. 일반적으로 부식전류밀도를 구하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 실험에서는 Stern-Geary식을 이용하였다.¹²⁾ 즉

$$i_{corr} = \frac{1}{2.3} \frac{I_{(applied)}}{\Delta\phi} \left(\frac{\beta_c \cdot \beta_a}{\beta_c + \beta_a} \right) \quad (1)$$

상기식에서 $i_{(applied)}$ 는 인가전류밀도, $\Delta\phi$ 는 분극전위값, β_c , β_a 는 음극, 양극반응의 타펠 기울기이다.

Table 4에서 알 수 있듯이 용접후 열처리를 시행하지 않은 경우 All(노출면적 : 6.5cm², BM, WM 및 HAZ부를 동시에 노출)인 경우는 부식전류밀도와 부식율(Corrosion Rate)은 각 미세부위에 비해 가장 작게 나타났으며, 각 미세부위별로 보면 BM부가 가장 크게 나타났으며, WM, HAZ순으로 작게 나타났다. 그리고 부식율은 BM부 0.619mm/yr, WM부 0.593mm/yr 및 HAZ부는 0.212mm/yr로 나타났다. 한편 용접후 열처리를 시행한 시험편

의 All인 경우는 부식전류밀도와 부식율 모두 용접후 열처리를 시행하지 않은 경우와 같이 각 미세부위에 비해 가장 작게 나타났으며, 각 미세부위별로 보면 용접후 열처리를 시행하지 않은 경우와 같이 BM부가 가장 크게 나타났으며, WM, HAZ순으로 작게 나타났다. 또한 부식율은 BM부 1.126mm/yr, WM부 0.928mm/yr 그리고 HAZ부는 0.612mm/yr로 나타났다.

그리고 전체적인 경향은 용접후 열처리를 시행한 경우가 용접후 열처리를 시행하지 않은 경우에 비해 부식전류밀도와 부식율 모두 큰 값을 나타내는 것으로 보아 SCM440강의 경우는 본 실험에서 채택된 용접후 열처리 온도는 내식성 측면에서 오히려 열악한 특성을 나타내고 있다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 7은 As-welded 시험편에 대한 각 부위와 탄소봉과의 갈바닉 셀을 형성하였을 때 침지시간 변화에 따른 양단간 흐르는 전류량을 나타낸 그래프

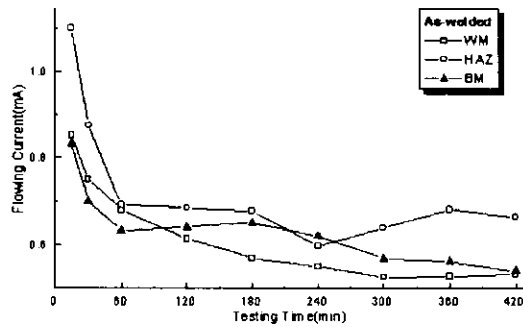


Fig. 7 Flowing current between As-welded SCM440 specimen and carbon electrode in natural sea water solution

Table 4. Result of Tafel polarization test

		$i_{corr}(A/cm^2)$	$\beta_a(mV/decade)$	$\beta_c(mV/decade)$	$R_p(Ohm \cdot cm^2)$	Corr' Rate(mm/yr)
As-welded	All	2.948×10^{-6}	356.9	144.8	1.518×10^4	0.013
	BM	4.631×10^{-5}	412.6	539.9	2.193×10^3	0.619
	WM	1.297×10^{-5}	426.4	255.1	5.345×10^3	0.593
	HAZ	9.25×10^{-6}	113.0	246.0	3.636×10^3	0.212
PWHT	All	3.55×10^{-6}	324.6	137.4	1.360×10^4	0.014
	BM	1.17×10^{-4}	670.4	612	1.182×10^3	1.126
	WM	2.031×10^{-5}	478.5	419.7	4.780×10^3	0.928
	HAZ	1.340×10^{-5}	378.0	254.1	4.925×10^3	0.612

이다.

그래프에서 알 수 있듯이 탄소봉과의 큰 전위차 이로 인하여 HAZ부에서는 침지초기에 1.098mA 정도의 큰 전류량을 보였으며 침지 60분까지는 급격한 전류감소변화를 나타내었으나 그 이후 다소 안정되어가는 것을 알 수 있다. 420분 경과한 후의 전류량을 비교해 보면 HAZ부가 0.664mA 정도로 가장 높았으며, BM부 그리고 WM부순으로 전류량이 적게 흐르고 있는 것으로 보아 HAZ부가 탄소봉과의 가장 큰 전위차로 인하여 BM부, WM부에 비해 갈바닉부식 전류량이 가장 많이 흐르고 있는 것으로 사료되며, 이는 Fig. 3, 4 부식전위 측정 결과에서도 HAZ부가 가장 비(卑)한 전위를 나타내어 정성적인 부식감수성이 큰 경향과 무관하지 않은 실험결과라고 사료된다.

Fig. 8은 PWHT를 시행한 시험편에 대한 각 부위와 탄소봉과의 갈바닉 셀을 형성하였을 때 침지 시간 변화에 따른 양단간 흐르는 전류량을 나타낸 그래프이다.

그래프에서 알 수 있듯이 초기에는 각 부위별 모두 낮은 전류량을 나타냈으나 시간의 경과에 따라 점차 증가해 가는 경향을 알 수 있다. 특히 HAZ부에서 그 경향이 뚜렷히 나타났으며, BM부와 WM부에서는 약 180분후부터 거의 안정된 전류량을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 침지 420분 경과한 후의 전류량은 HAZ부에서는 0.958mA, BM부에서는 0.798mA, WM부에서는 0.75mA를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 Fig. 8의 As-welded경우보다 전 부위에 걸쳐서 전

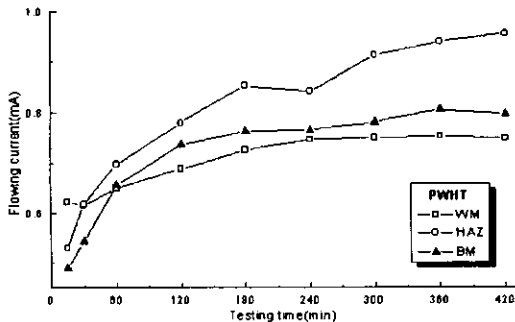


Fig. 8 Flowing current between PWHT SCM440 specimen and carbon electrode in natural sea water solution

류량이 증가되었음을 알 수 있으며, 특히 HAZ부에서는 시간경과에 따라 더욱 많은 전류량을 나타내는 것으로 보아 소양극-대음극현상으로 인하여 HAZ부에서 집중적인 부식이 일어날 가능성이 있기 때문에 주의해야 할 것으로 사료된다.

지금까지의 실험결과에 의하면 용접후열처리를 시행함으로써 각 부위간의 갈바닉셀형성에 의한 부식전위차가 증가하여 내식성을 저하시키는 결과가 나타났으며, 탄소봉과의 갈바닉 실험에 의해서도 용접후열처리를 시행함으로써 오히려 양단간 흐르는 전류량을 증가시키는 결과를 나타냈다. 일반적으로 용접후열처리를 시행하는 목적은 잔류응력제거에 의한 인성향상과 내식성 향상등을 도모하기 위한 것¹⁵⁻¹⁶⁾으로 사료되나 본 실험의 결과는 용접후열처리에 의해서 갈바닉 셀에 의한 전위차 증가로 인하여 내식성은 역으로 저하된 실험 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 용접부 주위 세 부위(WM부, BM부, HAZ부, 노출면적 : 6.5cm²)가 동시에 포함된 시험편에 대해서 양극과 음극의 분극곡선 변화를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 열처리 유무에 따른 분극

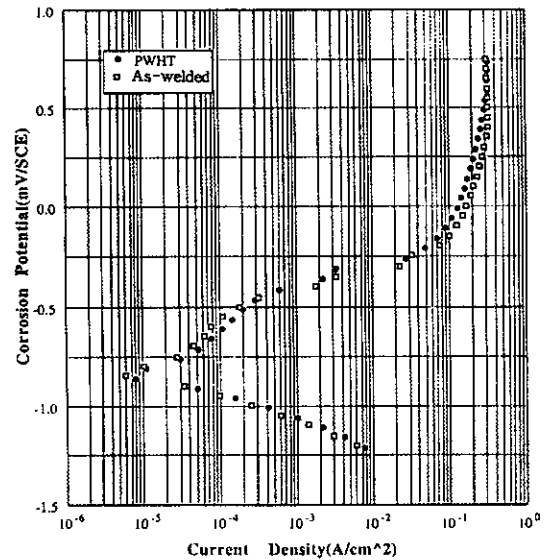


Fig. 9 Cathodic and anodic polarization curves of PWHT specimen and As-welded specimen of SCM440 steel in natural sea water solution

거동은 분극곡선상에서는 현저한 차이가 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 회생양극을 이용하여 음극방식시킬 경우 전술한 바와 같이 양극의 발생전류와 양극소모량은 PWHT의 경우가 As-welded인 경우에 비해 증가하는 실험결과가 나왔다. 그리고 양극의 발생전류는 Al양극과 시험편사이의 전위차의 대소에 의해서 결정되므로 PWHT의 경우가 As-welded인 경우에 비해서 시험편의 각 부위별 전위차가 오히려 증가하여 양극발생전류와 양극소모량이 증대된 것으로 사료된다.

일반적으로 모재와 Cr함유량이 다른 용접봉을 사용하면 특정온도(예민화 온도영역)에서 용접후 열처리를 시행하였을 경우 Cr이 적은 재료에서 Cr이 많은 재료쪽으로 탄소의 이동이 일어나서 침탄층이 발생하게 되며, 이 침탄층의 폭은 PWHT온도가 높을수록 또 유지시간이 길수록 크게 되는 특징¹⁶⁾이 있는 것으로 보고되고 있으며, 이때 이동한 탄소와 Cr이 결합하여 크롬카바이드($Cr_{23}C_6$)가 HAZ부의 입계에 석출되어 HAZ부의 내식성이 저하된다고 보고하고 있다.¹⁷⁾ 그리고 R. K. Singh 등¹⁸⁾은 2.25Cr-1Mo강을 773K에서 500시간 동안 대기조건에서 용접부의 미세부위별 산화거동 실험을 실시하여 미세부위 중에서 HAZ부가 BM부나 WM부에 비해 훨씬 큰 무게 감소를 나타낸다는 사실을 밝혔다. 또한 이러한 입계부식을 방지하기 위해서는 입계부식에 가장 민감한 온도(오스테나이트 스텐레스강의 경우, 425°C-815°C) 이상에서

크롬카바이드를 분해하기 위한 용체화처리를 시행하는 방법과 입계에서 크롬카바이드 석출을 하지 못하도록 탄소함량을 0.03%이하로 낮추거나 또는 Nb이나 Ti과 같은 안정화제를 첨가하는 방법 등이 있다.¹⁹⁾ 본 실험의 경우에도 용접후열처리에 의해 HAZ부에서의 부식속도가 증가된 것은 상기한 이유에 기인된 것으로 사료된다.

한편 이들의 시험편을 회생양극에 의해서 음극방식 시킬 경우 두 극 사이에 흐르는 발생전류와 양극소모량 등에 대해서 용접후열처리 효과와 용액의 유동효과에 대해서 함께 실험·고찰하여 보았다. 그리고 회생양극에 의해서 음극방식을 할 경우에는 각 부위를 동시에 노출(WM+BM+HAZ)시켜 음극방식되도록 하였으며 양극과 음극의 면적비는 1 : 53으로 실험하였다.

Fig. 10은 용액이 정지중인 경우 Al양극과 시험편과의 사이에 흐르는 전류의 변화를 나타내고 있다.

용접후열처리(PWHT)를 시행한 경우에는 실험 시작 약 10시간 정도에서 양극의 발생전류가 최고치를 나타내었으며, 용접후열처리를 시행하지 않은 경우(As-welded)에는 실험 초기부터 안정된 전류량은 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 As-welded인 경우가 PWHT를 시행한 경우보다 양극의 발생전류가 적은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 용액을 유동시켰을 경우 As-welded 및 PWHT시험편과 Al양극 사이에 흐르는

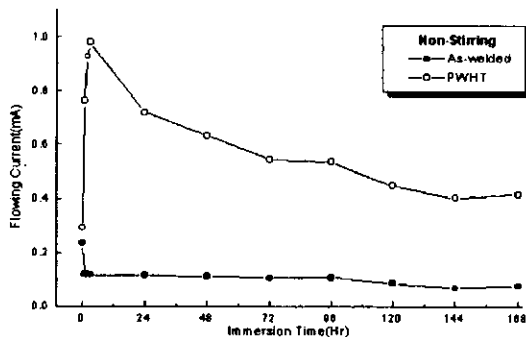


Fig. 10 Variation of flowing current between SCM440 steel weldment and Al anode in natural sea water solution (Area ratio, Al : Weldment = 1 : 53)

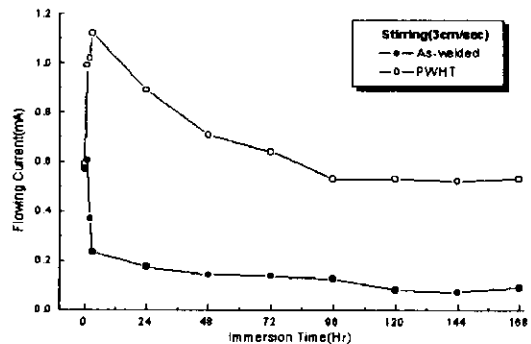


Fig. 11 Variation of flowing current between SCM440 steel weldment and Al anode in natural sea water solution (Area ratio, Al : Weldment = 1 : 53)

전류변화를 나타내고 있다.

그래프에서 보는 바와 같이 Fig. 10의 정지중인 경우와 유사하게 As-welded의 경우가 PWHT의 경우에 비해서 양극의 발생전류가 적은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으나 정지중인 경우에 비해 전체적으로 높은 양극발생전류량을 나타내고 있다는 사실을 알 수 있다.

한편 Fig. 12는 용액의 유동과 용접후열처리 효과에 따른 Al양극의 소모량을 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이 용접후열처리한 경우가 용접후열처리를 시행하지 않은 경우에 비해서 양극소모량이 증가하였음을 알 수 있으며 또한 용액이 유동할수록 양극소모량이 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이는 해수의 상대적인 운동으로 인하여 금속표면 즉 음극의 용존산소환원반응에 따

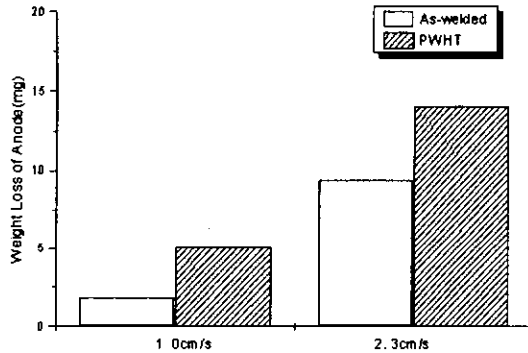


Fig. 12 Comparison of Al anode weight loss quantity between As-welded specimen and PWHT specimen as a function velocity 0cm/sec and 3cm/sec

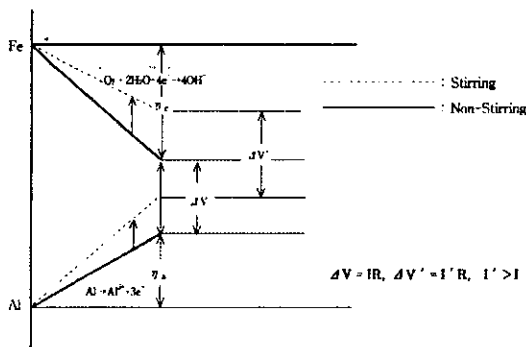


Fig. 13 Schematic diagram for potential difference (ΔV , $\Delta V'$) and flowing current (I , I') between Al anode and Fe cathode

른 농도분극의 저하로 인하여 알루미늄합금양극과 시험편의 전위차가 더 커지게 되어 양극의 발생전류가 증가하며, 이로 인하여 양극소모량이 증대된 것으로 사료된다.

즉, Fig. 13에서 알 수 있듯이 용액이 정지중에 있을 경우에는 두 극의 전위차(ΔV)가 작기 때문에 Al양극에서 발생하는 전류(I)가 적다. 그러나 용액이 유동할수록 두 극의 전위차($\Delta V'$)가 커지게 되어 즉 ($\Delta V'$) > (ΔV)가 되어 발생하는 전류 역시 $I' > I$ 가 되어 커지게 된다.²⁰⁾

4. 결 론

지금까지 SCM440강 용접부의 내식성에 미치는 용접후열처리효과에 관한 전기화학적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용접후열처리한 시험편(PWHT)의 경우가 용접후열처리를 시행하지 않은 시험편(As-welded)에 비해 경도는 전체적으로 낮은 값을 나타내었으며, 두 시험편 모두 용착부에서 가장 높고, 모재부에서 가장 낮은 값을 나타내었다.
2. 부식전위는 용착부가 용접후열처리유무에 관계없이 가장 귀(貴)한 값을 나타내었으며, 열영향부에서 가장 비(卑)한 전위를 나타내었다. 따라서 갈바닉 부식은 열영향부에서 발생할 가능성이 가장 클 것으로 사료된다.
3. 용접후열처리를 함으로써 각 부위별의 부식전위차가 증대되어 갈바닉셀에 의한 부식전류의 증가와 함께 내식성이 저하된 실험결과를 얻을 수 있었다.
4. 시험편을 Al양극에 의해서 음극방식하였을 경우 용액의 유동에 관계없이 용접후열처리를 시행하지 않은 경우가 용접후열처리를 시행한 경우에 비해서 양극의 발생전류와 양극소모량이 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.
5. 이상의 실험결과 통상 행하여지는 SCM440강의 용접후열처리조건은 내식성을 향상시키는 측면에서 볼 때 바람직하지 않은 것으로 사료되며, 인성과 내식성을 함께 향상시키는 최적의 용접후열처리 조건은 향후 연구검토

되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. C. Duran, E. Treiss, and G. Herbsleb, The resistance of high frequency Inductive welded pipe to grooving corrosion in salt water, *Materials Performance*, pp. 41~48, Sep 1986.
2. 正村克身, 松島巖, 電縫鋼管のみぞ狀腐食の事例解析, 防食技術, 31, pp. 332~335, 1982.
3. 正村克身, 電縫鋼管の溝狀腐食, 防食技術, 33, pp. 181~182, 1984.
4. J. D. Dobis, Failure of Seam-Welded Low-Chrome Refinery Piping, *Materials Performance*, pp. 61~64, Dec 1995.
5. Neil Rothwell, Corrosion Problems Associated with Weldments, *Materials Performance*, pp. 55~58, Feb 1990.
6. 橋本哲之祐, 溶接の腐食に及ぼす影響, 防食技術, 37, pp. 559~565, 1988.
7. J. C. Murza, C. J. McMahon Jr, The Effects of Composition and Microstructures on Temper Embrittlement in 21/4Cr-1Mo Steel, *ASME Oct. Vol. 102*, pp. 369~375, 1980
8. 高松利男, Cr-Mo鋼のクリープ脆化におよぼす溶接後熱處理の影響, 鐵と鋼, 第6號, pp. 774-783, 1981.
9. 門間改三, 鐵鋼材料學, 實教出版株式會社, pp. 336~346, 1992.
10. 社團法人日本高壓力技術協會應力燒鈍委員會編, 應力燒鈍基準とその解説, 日刊工業新聞社, pp. 58, 128~137, 1982.
11. Gamry Instruments, Ins. CMS100 Framework Software, Operator,s Manual, 1994.
12. 문경만, 알기쉬운 문답식 실용전기화학, 효성출판사, pp. 131~138, 1999.
13. Denny A. Jones, Principles and prevention of CORROSION, Maxwell, Machillan International Editions, pp. 322~330, 1992.
14. 河村敏一, これからの現地溶接後熱處理施工, 溶接技術, pp. 120-124, 1991.
15. A. K. Bhaduri et al, Optimized PWHT Procedures for 17-4 PH Stainless Steels, *Welding Resuarch Supplement*, pp. 153s-159s, 1995, May.
16. 社團法人日本高壓力技術協會 應力燒鈍委員會編, 應力燒鈍基準とその解説, 日刊工業新聞社, pp. 47~57, 1982.
17. A. JOHN SEDRIKS, Corrosion of Stainless Steel, *Wiley Interscience*, pp. 231~266, 1996.
18. R. K. SINGH RAMAN, J. B. GNANAMOORTHY, Oxidation Behavior of Weld Metal, HAZ and Base Metal Regions in Weldments of Cr-Mo Steels, *Welding Research Supplement*, pp. 133s~139s, 1995, April.
19. Denny A. Jones, Principles and prevention of CORROSION, Maxwell, Machillan International Editions, pp. 291~303, 1992.
20. 정경수, 이명훈, 김기준, 문경만, 해수의 유속과 오염도 및 피방식 체 표면상태가 분극기동 및 양극발생전류 및 소모율에 미치는 영향에 관한 연구(I), 한국부식학회, 제28권, 제6호, pp. 454~463, 1999.

저 자 소 개



김성중(金晟鍾)

1968년생. 1991년 한국해양대학교기관공학과졸업. 1997년 동대학원 기관공학과 졸업(석사). 1998~현재 동대학원 박사과정



김기준(金基俊)

1956년 8월생. 1979년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1981년 한국해양대학교 기관학과 대학원 졸업(석사). 1992년 미국 Florida Atlantic University 졸업(공학박사). 1982년~현재 한국해양대학교 기관시스템 공학부 교수.



김진경(金鎭京)

1963년생. 1976년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1982년 동대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1989년 동대학원 졸업(박사). 1992~현재 해양수산 연수원 기관학과 교수



김영식(金永植)

1944년 10월생. 1967년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1973년 동대학원 졸업(석사). 1979년 동경공업대학교 졸업(박사). 1974년~현재 한국해양대학교 재료공학과, 당학회 부회장, 대한응집학회 회장, 한국선급 금속전문위원, 중소기업 기술혁신 개발사업 평가위원.



김종호(金宗鎭)

1958년 10월생. 1982년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1990년 동대학원 졸업(석사). 1995년 동대학원 졸업(박사). 1987년~1996년 3월 한국선급, 1996년 4월~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 당학회 회원.



문경만(文慶萬)

1954년. 1976년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1979년 동대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1986년 일본나고야대학원 재료공학과 졸업(박사). 현재 한국해양대학교 기계소재공학부 교수.