

선박재료용 SS400강의 내식성에 대한 용접후열처리효과에 관한 전기화학적 연구(I)

김성중* · 김진경** · 문경만***

A Electrochemical Study on the Effect of Post-Weld Heat Treatment about Corrosion Resistance Property of SS400 Steel for Ship's Materials

S. J. Kim · J. G. Kim · K. M. Moon

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

Abstract

The effect of Post-Weld Heat Treatment(PWHT) of SS400 Steel was investigated with parameters such as micro vickers hardness, corrosion potential, polarization behaviors, galvanic current, Al anode generating current, Al anode weight loss etc. Hardness of each parts(HAZ, BM, WM) by PWHT is lower than that of each parts by Non Post-Weld Heat Treatment(NPWHT). However hardness of WM area was the highest among those three parts in case of both PWHT and NPWHT. Corrosion potential of HAZ part was the highest among those three parts and HAZ area was also acted as cathode without any case of heat treatment. Potential difference between each three parts by PWHT is smaller than that of three parts by NPWHT and Corrosion current by galvanic cell of these three parts by PWHT was also smaller compared to NPWHT. Therefore, it is suggested that Corrosion resistance property is increased by PWHT. However both Al anode generating current and anode weight loss was also decreased by PWHT compared to NPWHT when SS400 steel is cathodically protected by Al anode.

1. 서 론

최근 산업의 급격한 발전과 함께 조선공업 역시

빠른 성장을 거듭하였으며, 이와 함께 점점 활발해지는 무역 물동량증가에 따른 선박 및 선박의 계선 시설이나 방파시설 등의 항만구조물을 포함하여

* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 10월)

** 해양수산연수원 기관학과 교수

*** 한국해양대학교 기계소재공학부 교수

해양개발플랫폼, 부선가(艇船架), 해양위락시설, 해양탐사, 해저자원탐사용 구조물 등은 점점 대형화 되고 있는 추세이다. 그리고 선박 및 이러한 구조물들은 대부분 강구조물로 되어 있으므로 육상으로부터 해안으로 유입되는 하천수, 공장폐수 등으로 인한 해양오염과 조류, 파랑, 기후 등의 영향으로 더욱 가혹한 부식환경에 노출되어 있다. 더우기 이러한 대형 해양구조물 제작시 급속가열, 급속냉각하는 용접공정은 필수불가결한 것이며, 이에 따른 경도와 열적, 조직적 변화 등으로 인하여 용접부 각 부위별 전위차가 발생하게 되어 갈바닉부식을 초래하게 된다. 특히 해양구조물용 강과 일이나 수도배관용 전봉강관 용접부의 구상부식에 대한 문제점이 자주 대두되고 있다.¹¹⁻⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 일반구조용강으로 널리 사용되고 있는 SS400강⁷¹⁻⁹⁾의 용접부 주위 부식특성에 미치는 용접후열처리효과의 영향에 대해서 각 부위별 부식특성효과를 전기화학적 방법 등으로 비교·고찰하였다. 본 연구의 결과는 선박 및 해양환경구조물 설계시공시에 용접부 부식의 억제대책에 좋은 참고자료가 되리라 기대된다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 실험용 재료 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편은 길이 150mm, 폭 150mm, 두께 12mm인 SS400강으로 화학적 조성은 Table 1과 같으며, 4φ인 저수소계(Low Hydrogen type : E4316)용접봉을 사용하여 아크전압 40V, 아크전류 125~130A로 피복아크용접을 Double V형 양면 3층용접을 실시하였다. 저수소계용접봉은 피복제에 유기물 및 수소원을 포함하지 않은 석회석(CaCO₃), 형석(CaF₂)등을 주성분으로 한 용접봉이며 피복제에서 발생하는 수소량이 적고, 또 탄산염이 분해해서 발생하는 탄산가스가 아크를 시일드하기 때문에 용착급속의 수소량은 다른 피복제에 비해서 1/10정도로 대단히 적다. 그 때문에 용착급속의 기계적 성질은 물론 인성, 내균열성 등도 가장 좋으며 또한 고장력강, 저합금강 및 중탄소강등의 용접에 사용해도 비드의 밀균

Table 1. Chemical compositions of SS400 specimen

| Compositions | C | Si | Mn | S | P |
|-------------------|------|------|------|-------|---------|
| Weight Percent(%) | 0.13 | 0.24 | 0.98 | 0.020 | <0.0027 |

열, 비드균열의 결함을 발생하는 일은 거의 없다. 따라서 해양구조물, 선박 등의 용접에 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 결점으로는 아크가 약간 불안정해서 비드 또는 이음매에 블로우홀이 발생하기 쉽고, 비드가 불룩하게 되는 경향이 있으며 또한 사용시에는 상당한 속도도가 요구된다. 그리고 이 저수소계 용접봉은 습기를 흡습하기 쉽기 때문에 사용하기 전에 300~350℃정도로 1~2시간 정도 건조시켜 사용해야 하는 특징을 가지고 있다.¹⁰¹⁻¹³⁾ 이러한 용접법으로 제작된 시험편을 시간당 80℃씩 증온하고, 625℃에서 1시간 유지한 후 응력제거풀림처리를 위하여 노냉시키는 방법으로 용접후열처리를 실시하였다.

2.2 경도실험

시험편을 2000번까지 샌드페이퍼로 연마한 후 나이탈에칭 처리하고 용접부, 열영향부, 모재 부위별 마이크로비커스 경도기를 사용해서 측정하여 상호 비교·분석하였다.

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

시험편을 2000번까지 샌드페이퍼로 연마하고, 나이탈에칭 처리한 후, 시험편 뒷면에 트레이싱페이퍼를 놓고 각 부위별 위치를 체크한 후 노출면적이 8mm²이 되도록 한 상태에서 고저항 전위차계인 Fluke 87 RMS Multimeter와 기준전극으로 포화카로멜전극을 사용하여 부식전위를 420분동안 측정하였으며, 분극실험은 백금전극을 대극으로, 기준전극은 포화카로멜전극을 사용하였고, 분극시험용 포텐쇼스타트는 미국 Gamry사의 CMS100 전기화학적 부식측정 시스템을 사용하여 실시하였다.¹⁴⁾ 그리고 각 부위별 동일노출면적(8mm²)끼리 갈바닉 셀을 형성하여 양단간 흐르는 부식 전류량을 900분동안 연속 측정하였다.

2.4 희생양극 시험법

면적이 0.123cm²인 알루미늄합금 희생양극을 이용하여, 용접금속의 노출면적이 6.5cm²을 음극으로 하여 2리터용량의 비커에 해수용액을 채워서 부식셀을 형성하여 정지중인 상태와 유동중(3cm/sec)인 상태에서 168시간동안 시간변화에 따른 양극, 음극의 전위변화측정과 양단간 흐르는 전류량 및 실험전·후 양극소모량 등을 비교·분석하였다. 이때 사용된 알루미늄합금 희생양극의

Table 2. Chemical compositions of Al alloy sacrificial anode

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

화학조성은 Table 2와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 저수소계 용접봉으로 피복아크용접한 후 용접후열처리(응력제거 열처리, 625℃에서 1시간 유지한 후 노냉) 유무(SR : Stress Relieving, NSR : Non-Stress Relieving)에 따른 용접최종층 표면 비드에 대해 직각 방향으로 각 부위별로 측정된 경도분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 용접후 열처리하지 않은 경우(Non-Stress Relieving : NSR)에 비해서 열처리한 경우(Stress Relieving : SR)가 전 부위에 걸쳐서 경도가 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 특히 용착부에서는 NSR의 경우 186~192Hv 정도이고, SR의 경우 184~189Hv정도의 경도값을 나타내고 있다. 그리고 열처리 유무에 관계없이 용착부(WM)의 경도가 가장 높고, 열영향부(HAZ)와 모재부(BM)로 갈수록 경도값이 낮아지는 경향을 알 수 있다.

Photo 1은 용접후열처리 유무에 따른 표면 조직 사진의 변화를 보여주고 있다.

Photo 1에서 알 수 있듯이 모재부에서는 NSR의 경우 흰 부분의 페라이트와 검은 부분의 퍼얼라이트가 혼재해서 나타나고 있음을 알 수 있으며, SR의 경우에는 퍼얼라이트의 영역이 다소 감소하는

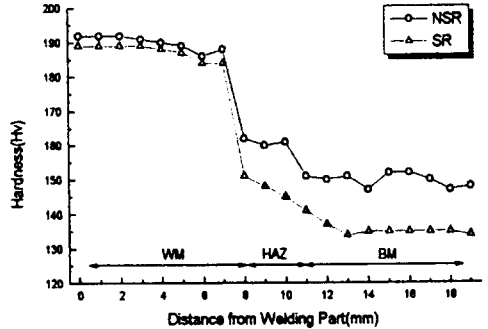


Fig. 1 Variation of micro-vickers hardness both non-stress relieving specimen and stress relieving specimen

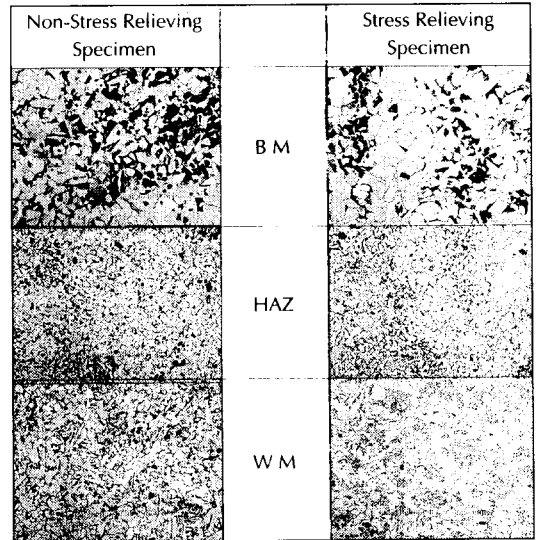


Photo 1 Microstructures of non-stress relieving specimen and stress relieving specimen (×200)

경향이 있음을 알 수 있었다. 그리고 열영향부의 경우 페라이트와 퍼얼라이트의 조직이 열처리에 관계없이 미세하게 나타나고 있음을 알 수 있으며 용착부의 경우에는 열영향부에 비해서 페라이트의 조직이 다소 조대화 되었음을 알 수 있으며, NSR의 경우 퍼얼라이트의 조직이 국부적으로 존재했으나 SR의 경우에는 퍼얼라이트조직이 거의 사라지고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 2는 용접후열처리를 하지 않은 NSR의 경우 시간변화에 따른 부식전위의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전 부위에 걸쳐서 시

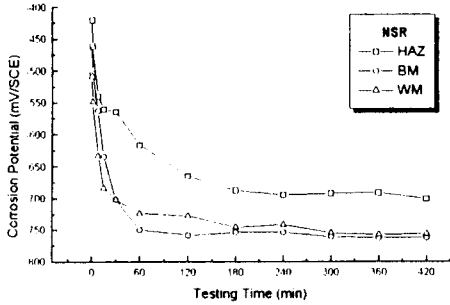


Fig. 2 Variation of corrosion potential of non-stress relieving specimen as a function of immersion time in natural sea water solution

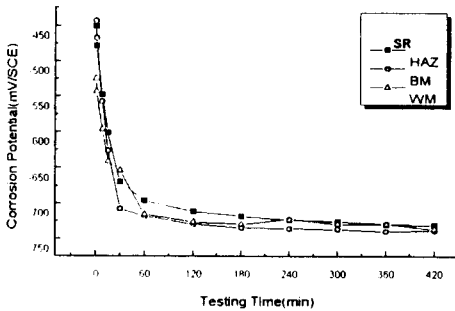


Fig. 3 Variation of corrosion potential of stress relieving specimen as a function of immersion time in natural sea water solution

간적 변화에 따라 부식전위는 낮아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 열영향부의 부식전위가 가장 높고 용착부, 모재부순으로 전위가 낮아지고 있음을 알 수 있으며, 침지 420분 후 HAZ와 WM의 부식전위 변화폭은 약 62mV였으며, WM과 BM의 전위차는 약 13mV의 값을 나타내었다. 이러한 부식전위의 차이에 의해서 갈바닉 셀(Galvanic Cell)이 형성되어 부식전류가 흐르게 되며 또한 부식속도가 증가하게 되는 것으로 사료된다. Fig. 3은 용접후열처리를 실시한 SR의 경우 침지시간의 변화에 따른 부식전위의 시간적 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 부식전위차가 낮아지는 경향은 Fig. 2의 NSR의 경우와 비슷하나 침지 420분 후의 각 부위별 부식전위의 변화폭은 약 8mV정도로 현저하게 감소되어 갈바닉셀에 의한 부식속도가 감소할 수

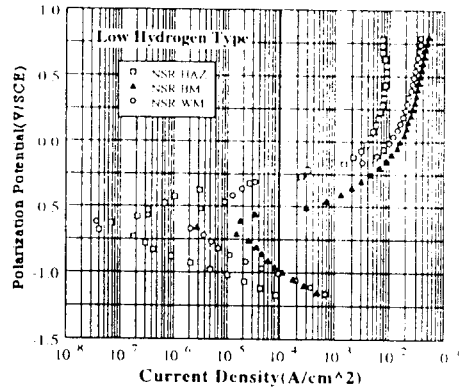


Fig. 4 Cathodic and anodic polarization curves of non-stress relieving specimen in natural sea water solution

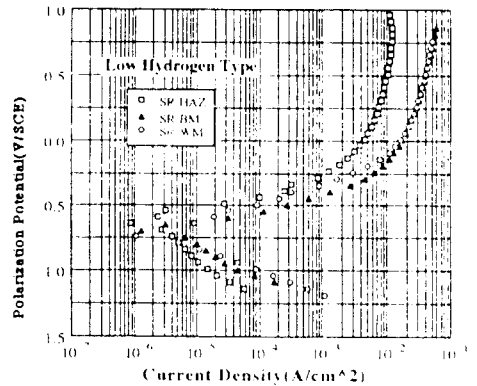


Fig. 5 Cathodic and anodic polarization curves of stress relieving specimen in natural sea water solution

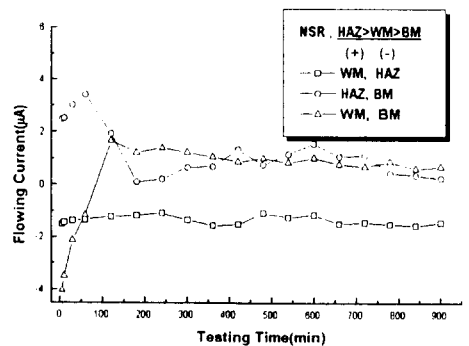


Fig. 6 Flowing current of among each parts as a function of immersion time in natural sea water solution

있을 것으로 사료된다. 그리고 NSR의 경우에는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 BM부가 가장 낮은 전위값을 나타내었으며, 또한 SR의 경우에도 BM부가 역시 가장 낮은 전위값을 나타내었다. Fig. 4는 NSR시험편의 각 부위별에 대한 양극 및 음극분극 곡선의 변화를 나타내고 있다.

양극분극곡선의 경우 그림에서 알 수 있듯이 $10^{-2}A/cm^2$ 에서의 분극전위값이 HAZ부가 가장 크며, WM부, BM부 순으로 작아지는 경향을 알 수 있다. 따라서 HAZ부가 가장 분극저항이 크며, WM부 및 BM부로 갈수록 분극저항이 적어지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와같은 경향을 Fig. 2의 부식전위값과 비교하면 부식전위값이 높을수록 분극저항은 커지며 부식전위값이 낮을수록 분극저항은 적어지는 상관관계가 있음을 알 수 있었다. Fig. 5는 SR시험편의 각 부위별에 대한 양극 및 음극 분극곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 SR의 경우에도 역시 HAZ부가 가장 분극저항이 컸으며, 전술한 Fig. 3에서 BM부의 부식전위가 가장 낮았고 또한, Fig. 5에서도 분극저항이 가장 적은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이와같은 경향은 Fig. 4 및 Fig. 2의 관계와 일치한다고 사료된다. 따라서 부식전위가 높을수록 분극저항이 커서 부식에 대한 저항성이 크며, 부식전위가 낮을수록 분극저항이 적어서, 부식에 대한 저항성이 감소한다는 사실을 본 실험을 통하여 알 수 있었다. Fig. 6은 NSR의 시험편에 대한 각 부위별 영역을 전류계의 양극 및 음극 단자에 연결하였을 경우 갈바닉셀에 의해서 두 부위사이에서 흐르는 부식전류를 측정 한 결과이다. WM부를 적색단자, BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우 양단에 흐르는 전류는 플러스 전류를 나타내었고 침지 420분 후에는 안정된 $0.88\mu A$ 의 플러스 전류값을 나타내었다. 따라서 WM부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그리고 HAZ부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는 전류는 플러스 전류를 나타내었다. 따라서 HAZ부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 WM부를 적색단자에 HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는 침지 시부터 마이너스 전류가 $1.43\mu A$ 전후로 거의 일정

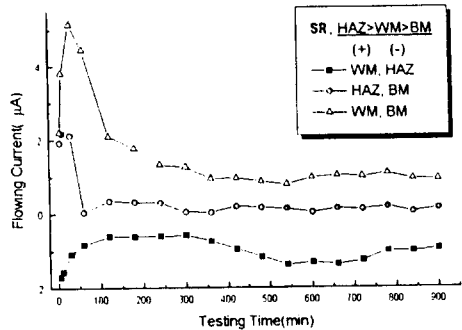


Fig. 7 Flowing current of among each parts as a function of immersion time in natural sea water solution

Table 3. Relationship between anode and cathode when galvanic cell were formed by each three parts.

| | NSR Specimen | | SR Specimen | |
|--------|--------------|---------|-------------|---------|
| | ANODE | CATHODE | ANODE | CATHODE |
| WM-HAZ | WM | HAZ | WM | HAZ |
| HAZ-BM | BM | HAZ | BM | HAZ |
| WM-BM | BM | WM | BM | WM |

한 마이너스 전류가 측정되었다. 따라서 HAZ부가 음극으로 WM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 SR의 시험편에 대한 각 부위별 영역을 전류계의 적색과 흑색단자에 연결하였을 경우 측정된 전류값의 변화를 나타내고 있다. SR의 경우에는 WM부를 적색단자에 그리고 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우 플러스 전류가 측정되었다. 이것은 Fig. 6의 경우 플러스 전류가 측정된 결과와 같은 현상으로 SR의 경우에도 BM부가 양극, WM부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그리고 WM부를 적색단자에 HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우 양단자에 흐르는 전류는 NSR과 동일한 마이너스 전류가 흘렀으나 NSR의 경우 침지 900분 후의 $1.43\mu A$ 에 비해서 $0.94\mu A$ 의 적은 전류가 흘렀음을 알 수 있었다. 이와 같은 실험결과는 열처리에 의해서 각 부위별 전위차가 감소되어 갈바닉셀에 의한 부식전류도 감소되었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 7의 실험결과에서 각 부위가 양극과 음극으로 작용한 경우 분류를 Table 3에 정리하여 보았다.

Table 3에서 알 수 있듯이 열처리 유무에 관계없

이 음극으로 작용한 부위는 HAZ부이며, 양극으로 작용한 부위는 BM부임을 알 수 있었다. 지금까지 열처리 유무에 따라 각 부위별 부식전위의 변화와 분극거동 및 갈바닉셀에 의한 양극과 음극 사이에 흐르는 부식전류의 대소등에 대해서 검토하였다. 실험결과에 의하면 열처리를 함으로써 각 부위별 간의 갈바닉셀 전위차를 줄일 수 있으며, 결과적으로 내식성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.¹⁵⁾ 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 부위별로 음극방식되도록 하였으며 양극

과 음극의 면적비는 1 : 53으로 실험하였다. Fig. 8은 용액이 유동하지 않는 경우 Al양극과 시험편과의 사이에 흐르는 전류의 변화를 나타내고 있다. NSR의 경우에는 실험시작 약 10시간 정도에서 양극의 발생전류가 최고치를 나타내었으며, SR의 경우에는 실험시작 약 24시간 정도에서 최고치를 나타내었으며, 그 이후 점차 양극 발생전류는 감소되고 있음을 알 수 있다. 그리고 SR의 경우가 NSR의 경우에 비해서 양극의 발생전류가 적은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 용액을 유동시켰을 경우 NSR 및 SR시험편과 Al양극 사이에 흐르는 전류변화를 나타내고 있다. 특이한 점은 NSR의 경우에는 용액이 유동하지 않은 경우보다 약간 큰 피크 전류치를 나타냈으나, SR의 경우에는 피크 피크치의 전류가 나타나지 않고 점진적으로 양극의 발생전류가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 용액이 유동하는 경우에도 SR인 경우가 발생전류가 적은 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 용액의 유동과 열처리 효과에 따른 Al양극의 소모량을 나타내고 있다. 열처리한 경우가 열처리하지 않은 경우에 비해서 양극소모량이 감소되고 있음을 알 수 있으며 또한 용액이 유동할수록 양극소모량이 증가하고 있음을 알 수 있었다.

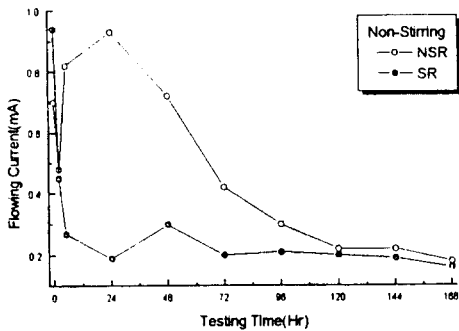


Fig. 8 Variation of flowing current between Welding metal and Al anode in natural sea water solution (Area ratio, Al : Welding metal = 1 : 53)

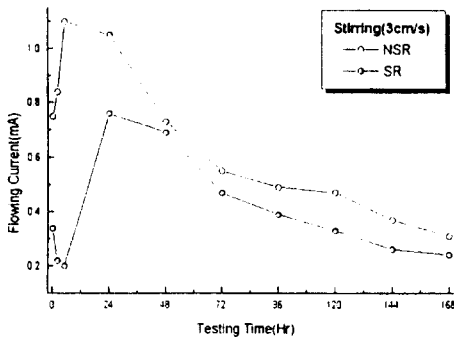


Fig. 9 Variation of flowing current between Welding metal and Al anode in natural sea water solution (Flow rate : 3cm/s, Area ratio, Al : Welding metal = 1 : 53)

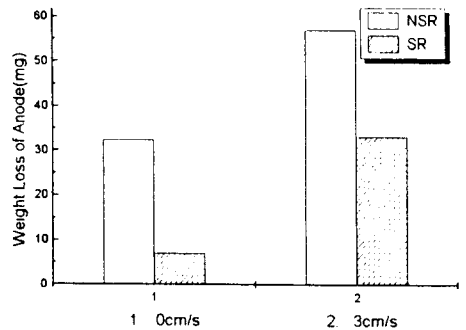


Fig. 10 Comparison of Al anode weight loss quantity between nonstress relieving and stress relieving specimen as a function of velocity 0cm/sec and 3cm/sec

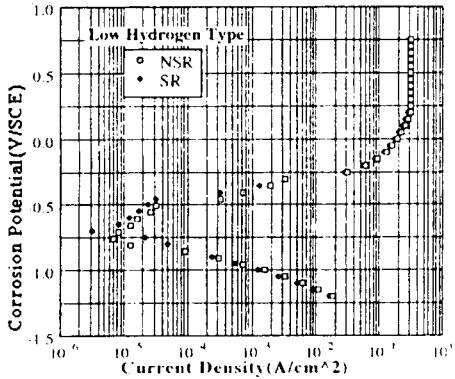


Fig. 11 Cathodic and anodic polarization curves of stress relieving specimen and non-stress relieving specimen in natural sea water solution

하게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 희생양극을 이용하여 음극방식시킬 경우 양극의 발생전류와 양극소모량은 SR의 경우가 NSR에 비해서 감소하는 실험결과가 나왔다. 그리고 양극의 발생전류는 AI양극과 시험편사이의 전위차의 대소에 의해서 결정되므로 SR의 경우가 NSR에 비해서 시험편의 각 부위별 전위차가 적으므로 마이크로셀 부식¹⁰⁾이 빨리 억제되어 AI양극과 시험편의 전위차가 적어져서 양극발생전류와 양극소모량이 감소되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

지금까지 SS400강을 저수소계 용접봉을 이용하여 피복아크용접을 실시 한 후 해수중에서의 내식성에 대한 용접후 열처리효과에 대해서 전기화학적 방법으로 실험·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용접후열처리한 시험편(SR)의 경우가 그렇지 않은 시험편(NSR)에 비해 경도는 전체적으로 낮은 값을 나타내었으며, 두 시험편 모두 용착부에서 가장 높은 값을 나타내었고, 모재부가 가장 낮은 값을 나타내었다.
2. 부식전위는 열영향부가 열처리유무에 관계없이 가장 貴한 값을 나타내었으며, 갈바니셀에 의한 부식전류의 측정에서도 다른 부위에 대

해서 음극으로 작용하였다.

3. 용접후열처리를 함으로써 각 부위별 갈바니셀에 의한 부식전류가 감소되었으며 따라서 내식성을 향상시킬 수 있다고 사료된다.
4. 시험편을 AI양극에 의해서 음극방식하였을 경우 용액의 유동에 관계없이 SR의 경우가 NSR에 비해서 양극의 발생전류와 양극소모량이 감소하였다.

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. 염규생, 임재규, 배인진, 인공해수에 의한 해양구조용강 용접부의 침식-부식거동, *대한용접학회 춘계 학술발표회*, pp. 227~230, 1997.
8. 김원녕, 임종문, SS41강의 부식피로파괴에 미치는 해양환경인자의 영향, *한국박용기관학회지*, 제 15권, 제1호, pp. 51~58, 1991.
9. 김기철, 이종봉, 윤승렬, 해양구조용강 용접부의 염수부식에 관한 연구, *한국부식학회지*, 제12권, 제3호, pp. 9~16, 1983.
10. 대한용접학회, 용접·접합 편람, pp. 531~536, 1998.
11. 安藤精一外2人, 溶接材料, 産報出版, pp. 19~136, 1979.
12. 日本規格協會, 實用溶接データブック, pp17~32, 1985.
13. 日本規格協會, 新版 溶接材料選擇のポイント, pp. 36~86, 1992.

14. Gamry Instruments, Ins. CMS100 Framework Software, Operator,s Manual, 1994.
15. Denny A. Jones, Principles and prevention of CORROSION, Maxwell, Machillan International Editions, pp. 322~330, 1992.
16. 電氣防食技術, Korea Electrotechnology Research Institute, 1998. p. 11, 1998.

저 자 소 개



김성종(金晟鍾)

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



김진경(金鎭京)

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



문경만(文慶滿)

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