

## 선박재료용 SS400강의 내식성에 대한 용접후열처리효과에 관한 전기화학적 연구(Ⅱ)

김성중\* · 김진경\*\* · 문경만\*\*\*

### An 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(용접 후열처리), Micro Vickers Hardness(마이크로 비커스경도),  
Electrochemical Property(전기화학적특성), Corrosion Resistance(내식성),  
Galvanic Cell(갈바닉 전지), Corrosion Potential(부식전위)

#### Abstract

When SS400 steel was welded with low hydrogen type and ilmennite type welding, the effect of post-weld heat treatment(PWHT) 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. Hardness of each parts(HAZ, BM, WM) by PWHT in case of low hydrogen type and ilmennite type welding was lower than that of each parts by As-welded. However hardness of WM area in case of low hydrogen type and ilmennite type welding was the highest among those three parts regardless of PWHT. Corrosion potential of HAZ part in case of low hydrogen type welding was the highest among those three parts and HAZ area was also acted as cathode regardless of PWHT, Whereas in case of ilmennite type welding, WM area was the highest potential among these three parts on galvanic potential series with As-welded while BM area was the highest potential among these three parts by PWHT on the contrary. And in case of low hydrogen type welding, galvanic corrosion and micro cell corrosion of welding parts was decreased with PWHT. However, It was increased with PWHT in case of ilmennite type welding. Moreover Al anode generating current and anode weight loss in case of low hydrogen type was decreased by PWHT compared to As-welded but, which was increased than that of As-welded in

---

\* 한국해양대학교 대학원  
\*\* 한국해양수산연수원 교수  
\*\*\* 한국해양대학교 교수

case of ilmennite type welding. Therefore, it is suggested that Corrosion resistance property in case of low hydrogen type welding is increased by PWHT. However its property was decreased with PWHT in case of ilmennite type welding.

## 1. 서 론

최근 산업의 급격한 발전과 함께 조선공업 및 해양관련산업 역시 빠른 성장을 거듭하였으며, 이와 함께 점점 활발해지는 무역 물동량증가에 따른 선박 및 선박의 계선시설이나 방파시설 등의 항만구조물을 포함하여 해상공항, 해상교량, 해저터널, 해양개발플랫폼, 해양탐사, 해저자원탐사용 등과 같은 해양구조물들의 시설증대가 두드러지고 있는게 현실이다. 그리고 이러한 구조물들은 파랑, 조류, 해수 등에 의한 가혹한 부식환경에 노출되어 있으며, 또한 모래 등의 마찰에 의한 마모, 지진, 폭풍우 등과 같은 모든 악조건상황의 기후조건에도 견딜수 있어야 한다. 이와 같이 해양은 육상과는 비교할 수 없을 정도의 심한 부식환경상태에 있으며, 더우기 이러한 가혹한 부식환경에 노출되어 있는 대형 해양구조물을 제작시 급속가열, 급속냉각하는 용접공정은 필수불가결한 것이라 할 수 있다. 그리고 이러한 용접공정후의 용접부 금속의 경도와 열적, 조직적 변화 등으로 인하여 용접부의 각 부위별 전위차가 발생하게 되어 갈바니부식을 초래하게 된다. 이러한 갈바니 부식에 의한 영향을 줄이기 위해 용접후열처리(post-weld heat treatment, PWHT)를 시행하는 경우도 있다.<sup>1)</sup> 일반적으로 용접후열처리는 용접시에 생긴 열에 의한 영향을 저감하고, 용접구조물로서의 성능을 향상시키기 위한 것으로 용접잔류응력의 완화, 용접금속, 열영향부의 조직개선과 경도의 저감 그리고 강중의 수소 제거에 의한 수소취성파괴 방지, 내식성 향상, 크리프 특성 및 피로강도의 개선 등을 통한 용접이음부의 성능향상을 가져오게 된다.<sup>2)~4)</sup> 그리고 전술한 바와 같이 가혹한 부식환경에 노출되어 있는 해양구조물의 경우 용접부 부식으로 인한 손상문제는 결코 경시할 수 없는 사안이라고 사료되며, 용접후열처리에 의한 내식성 향상의 시도는 큰 의미가 있다고 사료된다. 따라서 본 연구에

서는 일반구조용강으로 널리 이용되고 있는 SS400강<sup>5)~7)</sup>을 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉을 사용하여 용접부 주위의 부식특성에 미치는 용접후열처리효과에 대해 전기화학적 방법으로 비교·고찰하였다. 그러므로 본 연구결과는 선박 및 해양환경구조물 설계시공시에 용접부 부식특성과 억제대책에 좋은 참고자료가 될 것으로 기대된다.

## 2. 시험편 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)용접봉과 일미나이트계(ilmennite Type : E4301)용접봉을 사용하여 아크전압 40V, 아크전류 125~130A로 피복아크용접을 Double V형 양면 3층용접을 실시하였다.

일반적으로 저수소계용접봉은 해양구조물, 선박, 교량, 기계 등과 같은 중요 강도부재에 사용되며, 용착금속의 내균열성, 기계적 성질이 극히 우수하나, 사용전 300~350°C에서 1시간이상 건조하여 사용해야하는 특징을 가지고 있다. 그리고 일미나이트계 용접봉은 조선의 중요부분이나 일반구조물, 보일러 등에 사용되며, 기계적 성질 및 작업성이 뛰어나며, 고능률용접에 적합하고, 비교적 사용범위가 넓다는 특징이 있다.<sup>8)~11)</sup> 이러한 용접법으로 제작된 시험편을 시간당 80°C씩 증온하고, 625°C에서 1시간 유지한 후 노냉시키는 방법으로

Table 1. Chemical compositions of SS400 steel specimen

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

용접후열처리를 실시하였다.

## 2.2 경도시험

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

## 2.3 각 부위별 부식전위, 타펠시험, 분극 저항시험 및 부위별 양단간 흐르는 부식 전류량 측정

시험편을 2000번까지 샌드페이퍼로 연마하고, 나이탈에칭 처리한 후, 노출면적이  $8\text{mm}^2$ 이 되도록

특한 상태에서 고저항 전위차계인 Fluke 87 RMS Multimeter와 기준전극으로 포화카로멜전극(SCE)을 사용하여 부식전위를 420분동안 측정하였다. 그리고 분극시험은 백금전극을 대극으로, 기준전극은 포화카로멜전극을 사용하였고, 분극시험용 포텐쇼스타트는 미국 Gamry사의 CMS100 전기화학적 부식측정 시스템을 사용하여 실시하였다.<sup>12)</sup> 그리고 각 부위별 동일노출면적( $8\text{mm}^2$ )끼리 갈바닉 셀을 형성하여 양단간 흐르는 부식 전류량을 900분동안 연속 측정하였다.

## 2.4 희생양극 시험법<sup>13)~15)</sup>

Fig. 1은 면적이  $0.123\text{cm}^2$ 인 알루미늄합금 희생

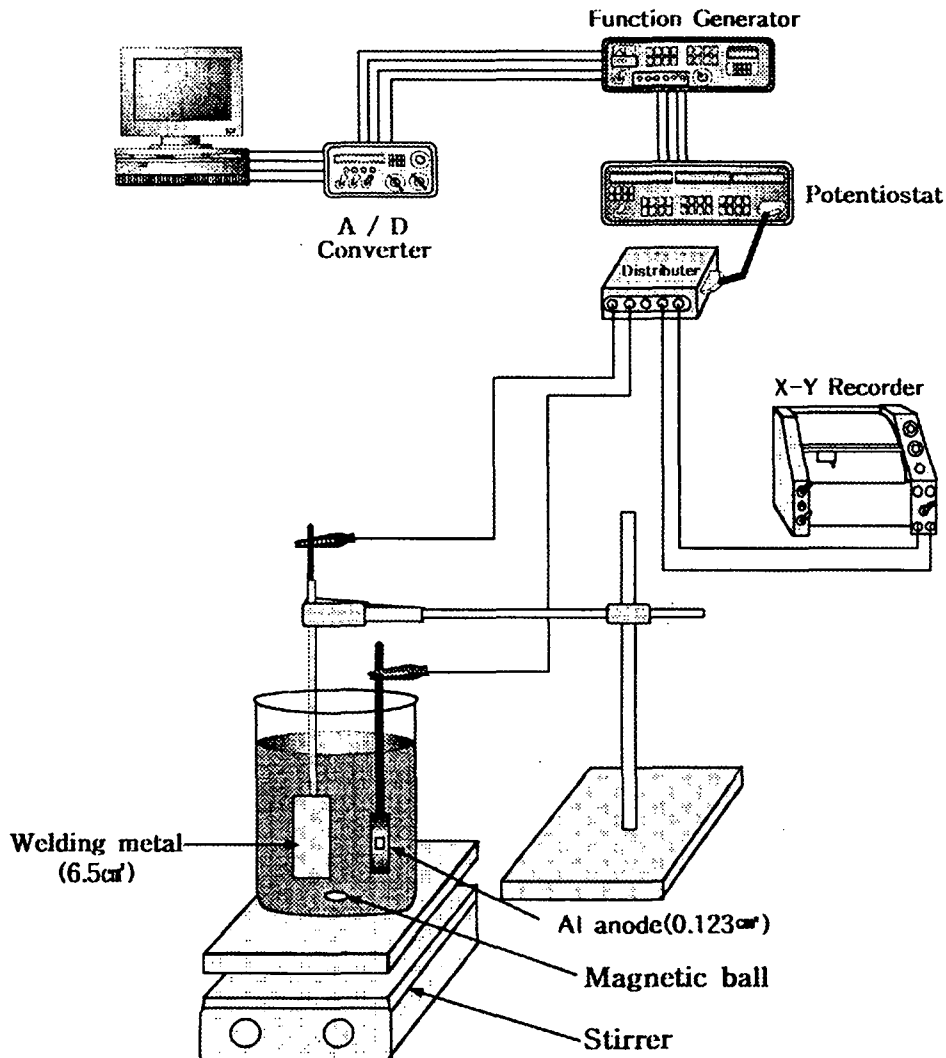


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus by Al sacrificial anode test method

**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 |

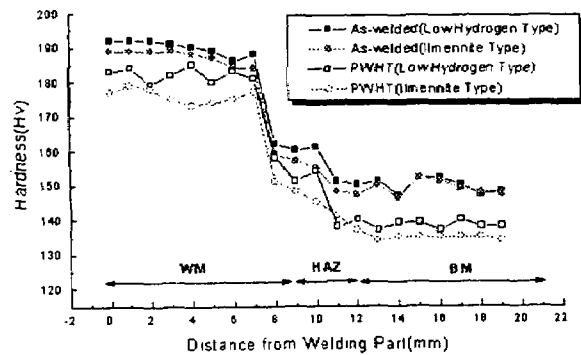
양극을 이용하여, 용접금속의 노출면적 6.5cm<sup>2</sup>을 음극으로 하여 2리터용량의 비커에 해수용액을 채워서 부식셀을 만든 후 용액이 정지중인 상태와 유동중(3cm/sec)인 상태에서 각각 168시간동안 침지시켰을 경우 시간적 변화에 따른 양극과 음극 양단 간 흐르는 전류량 및 양극소모량 등을 상호 비교·분석하였다.

이때 사용된 알루미늄합금 희생양극의 화학적 조성은 Table 2와 같다.

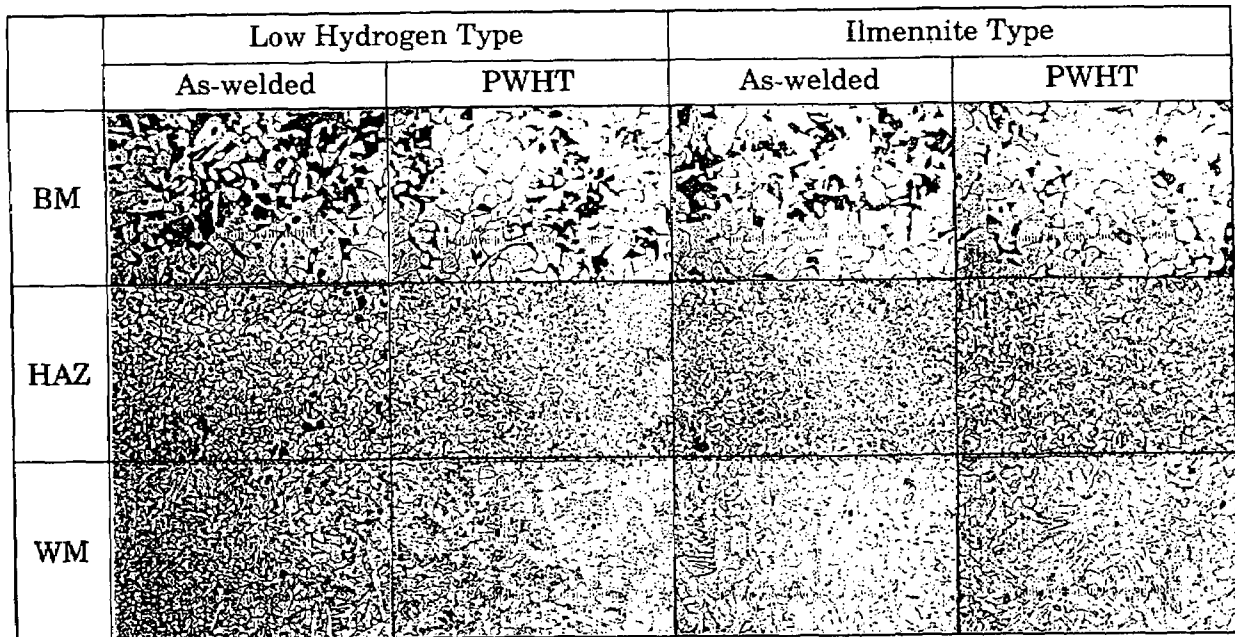
### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉으로 피복아크용접한 후 용접후열처리(625°C에서 1시간 유지한 후 노냉) 유무(PWHT : post weld heat treatment, As-welded)에 따른 용접 표면 비드에 대해 직각 방향으로 각 부위별로 측정된 경도분포를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 용접봉 변수에 관계없이 용착부(WM)의 경도가 가장 높고 열영향부(HAZ), 모재부(BM)순으로 경도가 낮아지는 경향을 알 수 있다. 그리고 저수소계 용접봉을 사용한 경우와 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우 모두 용접후열처리를 않는 경우에 비해서 용접후열처리를 한 경우가 전 부위에 걸쳐서 경도가 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이것은 용접으로 경화된 조직이 용접후열처리로 인하여 다소 연화되었기 때문으로 사료된다. 그리고 저수소계 용접봉을 사용한



**Fig. 2 Variation of micro-vickers hardness both As-welded specimen and PWHT specimen in case of low hydrogen type and ilmennite type welding**



**Photo. 1 Microstructures of As-welded and PWHT specimen in case of low hydrogen type and ilmennite type welding of SS400 steel**

경우가 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우에 비해서 전부위에 걸쳐 경도가 용접후열처리에 관계없이 높은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Photo 1은 저수소계 용접봉과 일미나이트 용접봉을 사용한 경우 용접후열처리 유무에 따른 표면 조직사진의 변화를 보여주고 있다.

Photo 1에서 저수소계 용접봉을 사용한 경우 모재부에서는 용접후열처리를 시행하지 않은 경우 페라이트(흰부분)와 퍼얼라이트(검은 부분)가 혼재해서 나타나고 있음을 알 수 있으며, 용접후열처리를 시행한 경우에는 퍼얼라이트의 영역이 확산으로 인하여 다소 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 그리고 열영향부의 경우 페라이트와 퍼얼라이트의 조직이 용접후열처리유무에 무관하게 미세화되었음을 알 수 있었다. 그리고 용착부의 경우에는 열영향부에 비해서 페라이트의 조직이 다소 조대화 되었음을 알 수 있으며, 용접후열처리를 시행하지 않은 경우 퍼얼라이트의 조직이 국부적으로 존재했으나 용접후열처리를 시행한 경우에는 퍼얼라이트조직이 거의 사라지고 있음을 알 수 있었다. 그리고 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우는 저수소계 용접봉을 사용한 경우와 거의 유사한 특징을 나타내고 있다. Fig. 3은 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우 용접후열처리 유무에 따른 각 미세 부위별 침지 420분 경과 후의 부식전위를 나타낸 그래프이다.

Fig. 3에서는 저수소계 용접봉을 사용하고 용접후열처리를 하지 않은 경우(As-welded)가 HAZ부

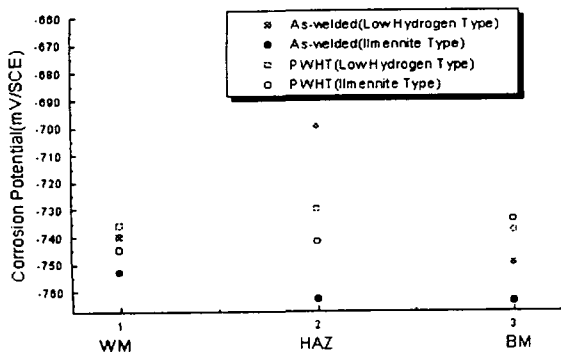


Fig. 3 Variation of corrosion potential of As-welded specimen and PWHT specimen in case of low hydrogen type and ilmennite type welding after immersed time 420min in natural sea water solution

에서 가장 귀한 전위를 나타냈으며, BM부에서 가장 비한 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 미세 부위간의(WM, HAZ 및 BM) 최대 전위차는 약 50mV이상 차이가 나타났으나 용접후열처리를 실시한 경우(PWHT)에는 최대 전위차는 약 8mV정도 차이가 나는 것으로 보아 용접후열처리를 시행한 경우가 각 부위간의 전위차에 의한 갈바닉 부식 발생 가능성이 현저히 줄어들 것으로 사료된다. 그러나 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우는 용접후열처리를 시행하지 않은 경우 WM부에서 가장 귀한 전위를 나타냈으며, BM부에서 가장 비한 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 각 미세부위간 최대 전위차는 약 11mV정도 차이가 나타났으나, 용접후열처리를 실시한 경우는 전부위에 걸쳐서 전위가 귀(貴)방향으로 이행하였으며 그리고 각 부위별 전위차가 약 15mV정도 차이가 나는 것으로 보아 용접후열처리를 실시한 경우가 갈바닉 부식발생 가능성이 오히려 증가할 것으로 사료된다. 일반적으로 용접후열처리를 시행할 경우 대체적으로 부식에 대한 저항성 즉, 내식성이 향상되는 특징을 가지는 경우가 대부분이나 후자의 용접봉을 사용하였을 경우와 같이 반대의 현상도 나타날 수 있다는 사실을 배제할 수 없다고 사료되며,<sup>16)</sup> 이것은 용접에 사용된 용접봉의 특성에 기인하는 것으로 사료되나 정량적인 해석이 필요하며, Fig. 4에서 다시 고찰하기로 한다.

Fig. 4는 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉을 사용하였을 경우 용접후열처리 유무에 따른

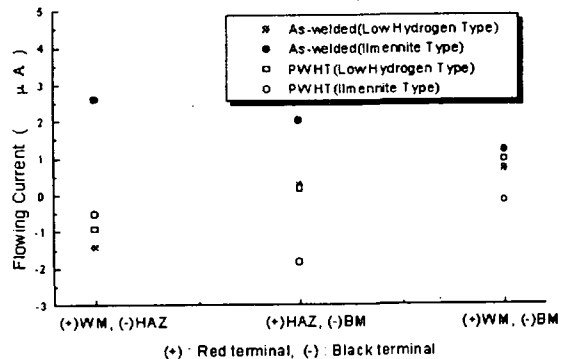


Fig. 4 Flowing current of among each parts of As-welded and PWHT specimen in case of low hydrogen type and ilmennite type welding after immersed time 900min in natural sea water solution

각 미세 부위별 갈바닉 셀 형성에 따른 양단간 전류량을 900분 시험후의 결과를 나타낸 그래프이다.

용접후열처리를 시행하지 않은 일미나이트계 용접봉을 사용하였을 경우 WM부를 적색단자, HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우 양단간 흐르는 전류는 침지 900분 후에 안정된  $2.61\mu\text{A}$  정도의 플러스 전류값을 나타내었다. 따라서 WM부가 음극으로 HAZ부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그리고 HAZ부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $2.01\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내었다. 따라서 HAZ부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 WM부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $1.19\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내었다. 따라서 WM부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그리고 용접후열처리를 시행한 일미나이트계 용접봉을 사용하였을 경우 WM부를 적색단자, HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우 양단간 흐르는 전류는 침지 900분 후에 안정된  $-0.52\mu\text{A}$ 의 마이너스 전류값을 나타내었다. 따라서 WM부가 양극으로 HAZ부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 용접후열처리 전의 경우에 비해서 양극과 음극이 반대로 되었으며, 또한 양단간 흐르는 전류는 감소되었음을 알 수 있다. 그리고, HAZ부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $-1.84\mu\text{A}$ 의 마이너스 전류를 나타내었으므로 HAZ부가 양극으로 BM부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 WM부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $-0.18\mu\text{A}$ 의 마이너스 전류를 나타내었다. 따라서 WM부가 양극으로 BM부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 용접후열처리를 함으로써 각 부위간의 양극과 음극이 모두 바뀌었으며 각 부위간 흐르는 갈바닉 부식 전류는 용접후열처리전보다 다소 감소하는 경향을 알 수 있었다. 따라서 전술한 Fig. 3에서 각 부위간 전위차는 용접후열처리후의 경우가 다소 크게 나타났으므로 내식성이 저하된 것으로 간주되었으나 Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 용접후열처리에 의해서 갈바닉 부식이 다소 억제될 수 있다고 사료된다. 한편 용접후열처리를 시행하지

않은 저수소계 용접봉을 사용하였을 경우 WM부를 적색단자, HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우  $-1.43\mu\text{A}$ 의 마이너스 전류값을 나타내었다. 따라서 WM부가 양극으로 HAZ부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그리고 HAZ부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $0.26\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내었으므로 HAZ부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 WM부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $0.69\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내는 것으로 보아 WM부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 한편 용접후열처리를 시행한 저수소계 용접봉을 사용하였을 경우 WM부를 적색단자, HAZ부를 흑색단자에 연결하였을 경우  $-0.94\mu\text{A}$ 의 마이너스 전류값을 나타내었으므로 WM부가 양극으로 HAZ부가 음극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 용접후열처리 전의 양극과 음극이 동일하였고 양극간 흐르는 전류는 용접후열처리에 의해서 감소되었다. 그리고 HAZ부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $0.16\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내었으므로 HAZ부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 WM부를 적색단자에 BM부를 흑색단자에 연결하였을 경우에는  $0.93\mu\text{A}$ 의 플러스 전류를 나타내었다. 따라서 WM부가 음극으로 BM부가 양극으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 저수소계 용접봉을 사용하였을 경우에는 일미나이트계와 반대로 용접후열처리 전후의 각 부위별 양극과 음극의 극성이 동일하였고 양극간에 흐르는 전류는 용접후열처리에 의해서 감소되었음을 알 수 있었다. Fig. 4의 실험결과에서 용접후열처리 전후에 따라 각 부위가 양극과 음극으로 작용한 경우를 Table 3에 정리하여 보았다.

Table 3에서 알 수 있듯이 용접후열처리를 시행하지 않은 저수소계 용접봉인 경우 HAZ부가 가장 귀한 전위값을 BM부가 가장 비한 전위값을 나타내었음을 알 수 있으며, 이는 갈바닉 셀 형성시 HAZ부가 갈바닉 부식이 발생할 가능성이 가장 적으며, BM부가 크다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 한편 용접후열처리를 시행한 경우도 마찬가지로

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

|        | Low Hydrogen Type(E4316) |         |                   |         | Ilmennite Type(E4301)  |         |                   |         |
|--------|--------------------------|---------|-------------------|---------|------------------------|---------|-------------------|---------|
|        | As-welded<br>HAZ>WM>BM   |         | PWHT<br>HAZ>WM>BM |         | As-welded<br>WM>HAZ>BM |         | PWHT<br>BM>HAZ>WM |         |
|        | Anode                    | Cathode | Anode             | Cathode | Anode                  | Cathode | Anode             | Cathode |
| WM-HAZ | WM                       | HAZ     | WM                | HAZ     | HAZ                    | WM      | WM                | HAZ     |
| HAZ-BM | BM                       | HAZ     | BM                | HAZ     | BM                     | HAZ     | HAZ               | BM      |
| WM-BM  | BM                       | WM      | BM                | WM      | BM                     | WM      | WM                | BM      |

Table 4 The data of corrosion current density and corrosion rate obtained on the welding part by Tafel test and polarization resistance test in natural sea water solution

|                                | Polarization Resistance Test |                       |                           | Tafel Test                 |                           |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                                | $i_{corr}(A/cm^2)$           |                       | Corrosion Rate<br>(mm/yr) | $i_{corr}$<br>( $A/cm^2$ ) | Corrosion Rate<br>(mm/yr) |
|                                | I                            | II                    |                           |                            |                           |
| Ilmennite Type<br>As-welded    | $1.607 \times 10^{-5}$       | $2.04 \times 10^{-5}$ | 0.187                     | $2.61 \times 10^{-5}$      | 0.303                     |
| Ilmennite Type<br>PWHT         | $1.978 \times 10^{-5}$       | $2.80 \times 10^{-5}$ | 0.230                     | $5.51 \times 10^{-5}$      | 0.639                     |
| Low Hydrogen Type<br>As-welded | $1.898 \times 10^{-5}$       | $2.28 \times 10^{-5}$ | 0.220                     | $2.77 \times 10^{-5}$      | 0.321                     |
| Low Hydrogen Type<br>PWHT      | $6.995 \times 10^{-6}$       | $1.23 \times 10^{-5}$ | 0.081                     | $1.81 \times 10^{-5}$      | 0.21                      |

로 HAZ부가 가장 갈바닉 부식이 일어날 가능성이 작으며, BM부가 갈바닉 부식이 일어날 가능성이 가장 크다는 사실을 알 수 있다. 그리고 갈바닉 부식시에 BM부가 양극으로 작용하므로 '대양극-소음극'에 의한 부식이 일어나게 되므로 국부부식의 위험은 없을 것으로 사료된다. 그리고 일미나이트계 용접봉을 사용한 경우 용접후열처리 전의 경우에는 WM부의 전위가 가장 높고 BM부의 전위가 가장 낮았으나 용접후열처리에 의해서 반대로 BM부의 전위가 가장 높고 WM부의 전위가 가장 낮은 결과가 나왔다. 따라서 용접후열처리에 의해서 오히려 소양극(WM)-대음극(BM)의 갈바닉부식이 일어날 수 있음을 배제할 수 없다고 사료된다. 즉 WM부가 갈바닉 부식 발생 가능성이 가장 큰 경향을 나타내고 있으므로 WM부가 갈바닉 부식에 대한 저항성이 열악할 것으로 사료된다. 상기의 실험결과에서 알 수 있듯이 저수소계 용접봉을 사용하였을 경우에는 용접후열처리에 의해서 갈바닉부식 억제효과가 있으나 일미나이트계 용접봉을 사용하였을 경우에는 용접후열처리에 의해서 오히려 국부부식의 위험이 커질 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 일반적으로 해양환경하의

SS400강은 양극 및 음극분극곡선을 측정하였을 경우 음극분극곡선은 용존산소환원반응( $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$ )에 따른 활성화 분극과 농도분극이 나타나며, 양극분극곡선에서는 철의 산화반응( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$ )에 따른 활성화분극이 일어난다. 전술한 실험방법에 의해 양극 및 음극분극곡선을 이용하여 각 조건별로 Tafel시험과 분극저항시험을 통하여 구한 부식전류밀도와 부식속도를 Table 4에 정리하여 보았다.

일반적으로 부식전류밀도로 구하는 방법에는 여러가지가 있으나 본 실험에서는 Tafel식과 분극저항법 즉 Stern-Geary식을 이용하여 부식속도값을 구하여 비교 고찰하였다.<sup>17)</sup> 즉

$$\text{Tafel식} : \Delta\psi = \frac{RT}{\alpha nF} \ln i_{corr} + \frac{RT}{\alpha nF} \ln i = a + b \log i \quad (1)$$

$$\text{Stern-Geary식} : i_{corr} = \frac{1}{2.3} \frac{I_{(applied)}}{\Delta\psi} \left( \frac{\beta_c \beta_a}{\beta_c + \beta_a} \right) \quad (2)$$

$\Delta\psi$  : 분극전위값, R : 기체상수, T : 절대온도,  $\alpha$  : 전이계수,  $i_{(applied)}$  : 인가전류밀도,  $\Delta\psi$  : 분극전

위값,  $\beta_c$ ,  $\beta_a$  : 음극과 양극의 기울기이다. 상기의 (1)식은 타펠직선기울기가 적어도 100mV영역까지 나타나는 경우에 적용되며, (2)식의 경우에는 양극과 음극의 분극전위가  $\pm 20\text{mV}$ 영역의 적은 분극전위에서 적용된다. 그리고 해수에서 용존산소의 환원반응에 의해서 부식되고 있을 경우에는 확산한계전류밀도를 부식전류밀도로 간주하는 경우도 있으며<sup>18)</sup>, 이 경우에는 음극의  $\beta_c$ 는 무한대로 커지게 된다. 따라서 이 경우에는 다음의 (3)식에 의해서 부식전류밀도를 구하게 된다. 즉

$$i_{\text{corr}} = -\frac{\beta_a}{2.3} \frac{I_{\text{applied}}}{\Delta\phi} \quad (3)$$

그리고 Table 4에서 상기의 (2)식과 (3)식에서 구한 부식전류밀도값을 각각 I 과 II 에 정리하였다. 그리고 타펠식에 의해서 구한 전류밀도값이 비교적 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, I, II 중 II의 경우가 대체적으로 높은 값을 나타내고 있으나 경향은 유사하다는 사실을 알 수 있었다. 한편 Stern-Geary식에 의해서 구한 부식속도는 일미나이트 용접봉을 사용한 경우 용접후열처리를 시행한 경우가 오히려 용접후열처리를 시행하지 않은 경우에 비해 증가하였으며, 저수소계 용접봉을 사용한 경우 부식속도는 용접후열처리를 시행한 경우가 감소하였다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 5는 용접봉 변수와 용접후열처리 변수에 따라 Table 4와 같은 실험방법으로 구한 각 미세 부

위별 부식속도를 나타낸 그래프이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 일미나이트계 용접봉을 사용하여 용접후열처리를 시행하지 않은 경우 미세부위별 큰 부식속도의 차이는 나타나지 않으나 BM부는 0.693mm/yr, WM부는 0.191mm/yr를 나타냈다. 그리고 HAZ부는 0.706mm/yr로 가장 큰 부식속도를 나타냈다. 그리고 용접후열처리를 실시한 경우에는 Table 3에서 WM부가 갈바닉 계열상 가장 전위가 낮은 경우이며, Fig. 5에서 부식속도가 가장 높은 결과가 나왔다. 따라서 열처리 후에는 WM부가 갈바닉부식과 함께 부식속도가 가장 커질 수 있음을 배제 할 수 없다고 사료된다.

한편 저수소계 용접봉을 사용하여 용접후열처리를 시행하지 않은 경우는 HAZ부가 가장 부식속도가 컸으며, BM 그리고 WM순으로 작게 나타났다. 그리고 용접후열처리를 시행한 경우는 세 부분 모두 거의 유사한 부식속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. Table 3의 경우에는 용접후열처리에 관계없이 갈바닉 계열상 HAZ부가 가장 전위가 높고 BM부가 가장 전위가 낮았다. 따라서 갈바닉 부식의 경우에는 HAZ부가 부식될 위험이 없으나 미크로 셀에 의한 부식속도는 Fig. 5에서와 같이 다소 높게 나타났으며, 용접후열처리에 의해서 거의 균등한 값이 되었음을 고려할 때 저수소계 용접봉의 경우에는 HAZ부의 부식 위험성은 적으며 BM부의 전면부식이 일어날 가능성이 높다고 사료된다. 한편 용접부 시험편을 Al양극을 사용하여 희생양

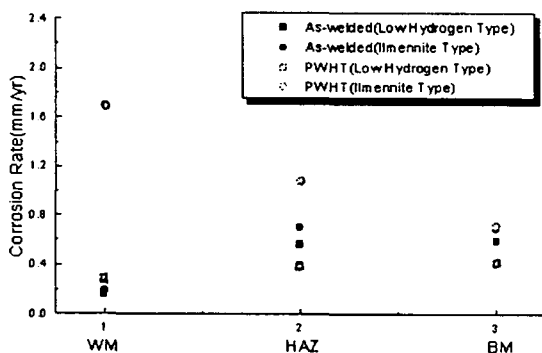


Fig. 5 Relationship between corrosion rate and each parts of As-welded and PWHT specimen in case of low hydrogen type and ilmennite type welding in natural sea water solution

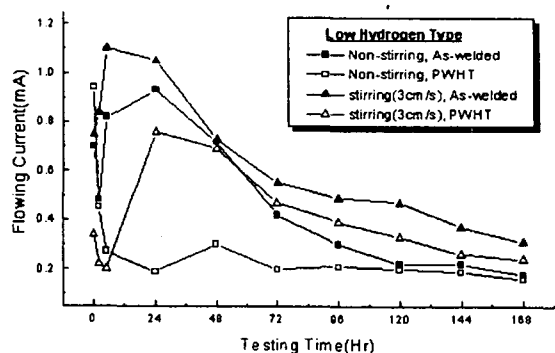


Fig. 6 Variation of flowing current between welding metal and Al anode of As-welded and PWHT specimen in case of low hydrogen type as a function of velocity 0cm/sec and 3cm/sec (Area ratio, Al : Welding metal = 1 : 53)



극범으로 음극방식시켰을 경우 알루미늄양극과 용접금속사이에 흐르는 양단간 전류량의 변화를 168시간동안 측정하였으며, 이때 양극과 음극의 면적비는 1 : 53으로 실험하였다. Fig. 6은 저수소계 용접봉을 사용한 시험편을 용접후열처리 유무와 유동유무에 따라 양단간 흐르는 전류를 나타낸 그래프이다.

그래프에서 보는 바와 같이 용접후열처리를 시행한 경우 용액이 정지중인 상태만 제외하고, 그외의 경우 약 24시간까지는 높은 발생전류값을 나타내었으며, 이 후 서서히 안정되어가는 것을 볼 수 있다. 이는 실험초기에는 양단간 큰 전위차가 분극되면서 서서히 안정되어가기 때문인 것으로 사료

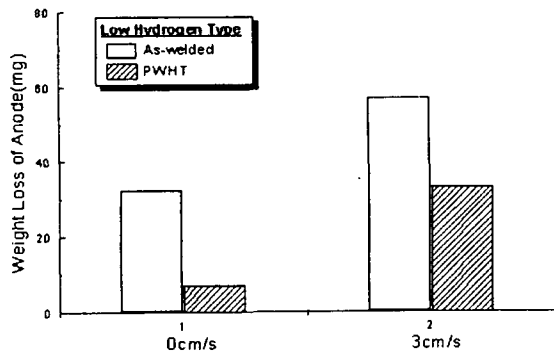


Fig. 7 Relationship between Al anode weight loss quantity and both As-welded and PWHT specimen in case of low hydrogen type as a function of velocity 0cm/sec and 3cm/sec in natural sea water solution

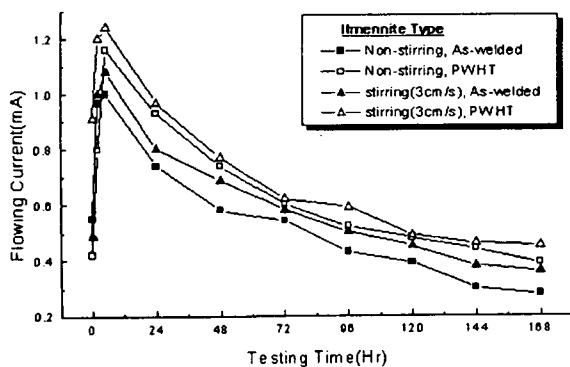


Fig. 8 Variation of flowing current between welding metal and Al anode of As-welded and PWHT specimen in case of ilmennite type as a function of velocity 0cm/sec and 3cm/sec (Area ratio, Al : Welding metal = 1 : 53)

된다. 그리고 전체적으로는 용접후열처리를 시행하지 않은 시험편이 용접후열처리를 시행한 시험편에 비해 양단간 흐르는 전류량이 컸으며, 또한 유동중인 시험편이 정지중인 시험편에 비해 양단간 흐르는 전류량이 크게 나타나는 사실을 알 수 있었다. Fig. 7은 저수소계 용접봉을 사용하여 용접한 시험편을 희생양극법으로 방식하였을 경우의 알루미늄 양극소모량을 나타낸 그래프이다.

전체적으로 보아 용접후열처리를 시행하지 않은 경우가 시행한 경우에 비해 양극소모량이 많았으며, 유동중인 경우가 정지중인 경우에 비해 소모량이 많다는 사실을 알 수 있었다. 이는 유속의 증가에 따라 해수의 상대적인 운동으로 인하여 금속 표면 즉, 음극의 용존산소환원반응에 따른 농도분극이 감소되어 알루미늄양극과 시험편의 전위차가 더 커지게 되어 양극의 발생전류가 증가하며, 동시에 양극소모량도 증대된 것으로 사료된다.<sup>19)</sup>

Fig. 8은 일미나이트계 용접봉을 용접후열처리 유무와 유동유무에 따라 희생양극법으로 방식하였을 경우 양단간 흐르는 전류를 나타낸 그래프이다.

그래프에서 보는 바와 같이 모두 10시간 정도에서 가장 높은 발생전류값을 나타내었으며, 이후 서서히 안정되어가는 것을 볼 수 있다. 그리고 전체적으로는 용접후열처리를 시행한 시험편이 용접후열처리를 시행하지 않은 시험편에 비해 오히려 양단간 흐르는 전류량이 크게 나타났으며, 이는 저수소계 용접봉을 사용한 경우와 상반되는 특성을

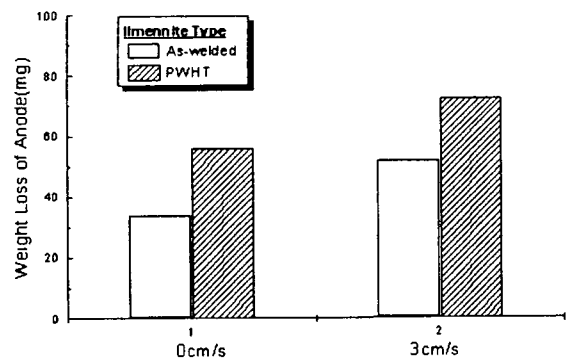


Fig. 9 Relationship between Al anode weight loss quantity and both As-welded and PWHT specimen in case of ilmennite type as a function of velocity 0cm/sec and 3cm/sec in natural sea water solution

나타냈다. 그리고 유동중인 시험편이 정지중인 시험편에 비해 양단간 흐르는 전류량이 크게 나타났다. Fig. 9는 일미나이트계 용접봉을 사용하여 용접한 시험편을 회생양극법으로 방식하였을 경우 알루미늄 양극소모량을 나타낸 그래프이다.

용접후열처리를 시행한 시험편이 시행하지 않은 시험편에 비해 오히려 양극 소모량이 컸으며, 이는 부식전위측정 실험이나 음극 및 양극분극시험을 통해 나타난 결과와 동일하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 유동중인 경우가 정지중인 경우에 비해 소모량이 많았다는 사실을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

SS400강을 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉을 사용하여 용접한 경우의 내식성에 대한 용접후열처리효과에 관한 전기화학적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 저수소계 용접봉과 일미나이트계 용접봉을 사용하여 용접한 경우 용접후열처리를 시행한 시험편은 용접후열처리를 행하지 않은 시험편에 비해 경도는 전체적으로 낮은 값을 나타내었으며, 그리고 시험편 모두 용착부에서 가장 높은 값을 나타내었고, 모재부가 가장 낮은 경도값을 나타내었다.
2. 저수소계 용접봉 및 일미나이트계 용접봉을 사용하였을 경우 용접후열처리에 의해서 각 부위간의 갈바닉 셀에 의한 부식전류가 감소되었다. 그러나 저수소계 용접의 경우에는 용접후열처리에 관계없이 갈바닉 전위계열상 HAZ부가 가장 높고 BM부가 가장 전위가 낮았으나 일미나이트계 용접의 경우에는 용접후열처리 전의 경우에는 WM부가 전위가 가장 높고 BM부가 가장 전위가 낮았으며, 용접후열처리에 의해서 WM부와 BM부의 전위가 반대로 되었다.
3. 용접후열처리에 의해서 저수소계 용접의 경우에는 각 부위간의 갈바닉 부식과 각 부위별 자체의 마이크로 셀에 의한 부식을 억제할 수 있었으며 용접부의 국부부식보다는 BM부의 균일 부식이 발생할 수 있다고 사료된다.

4. 일미나이트계 용접의 경우에는 용접후열처리에 의해서 각 부위간의 갈바닉 부식은 다소 억제될 수 있었으나 소양극-대음극의 형태에 의한 HAZ부와 WM부의 국부부식이 오히려 용접후열처리에 의해서 증가될 수 있음을 알 수 있었다.
5. 저수소계 용접의 경우 용접후열처리를 시행한 경우가 회생양극에 의해서 음극방식할 경우 양극소모량이 감소되었으나, 일미나이트계 용접의 경우에는 오히려 열처리를 시행한 경우가 시행하지 않은 경우에 비해서 양극소모량이 증대되었다.

#### 참고문헌

1. Denny A. Jones, Principles and prevention of CORROSION, Maxwell, Machillan International Editions, pp. 322~330, 1992.
2. 日本高壓力技術協會, 應力燒鈍委員會編, 應力燒なまし基準とその解説, pp. 3~66, 1982
3. A. K. Bhaduri, S. Sujith, G. Srinivasan, T. P. S. Gill and S. L. Mannan, Optimized PWHT procedures for 17-4 PH stainless steels, Welding research supplement, pp. 153~159, 1995 May.
4. C. Bloch, J. Hill, D. Connell, Proper PWHT can stop stress-induced corrosion, Welding journal, pp. 31~41, 1997 May.
5. 염규생, 임재규, 배인진, 인공해수에 의한 해양구조용강 용접부의 침식-부식거동, 대한용접학회 춘계 학술발표회, pp. 227~230, 1997.
6. 김원녕, 임종문, SS41강의 부식피로파괴에 미치는 해양환경인자의 영향, 한국박용기관학회지, 제15권, 제1호, pp. 51~58, 1991.
7. 김기철, 이종봉, 윤승렬, 해양구조용강 용접부의 염수부식에 관한 연구, 한국부식학회지, 제12권, 제3호, pp. 9~16, 1983.
8. 日本規格協會, 新版 溶接材料選擇のポイント, pp. 36~86, 1992.
9. 대한용접학회, 용접·접합 편람, pp. 531~536, 1998.
10. 安藤精一外2人, 溶接材料, 産報出版, pp. 19~136, 1979.

11. 日本規格協會, 實用溶接データブック, pp17~32, 1985.
12. Gamry Instruments, Ins. CMS100 Framework Software, Operator's Manual, 1994.
13. 中川雅央, 電氣防食法の實際, 地人書館, pp. 54~280, 1967.
14. Denny A. Jones, Principles and prevention of CORROSION, Maxwell, Machillan International Editions, pp. 437~474, 1992.
15. 전대회, 부식과 방식의 관리, 일중사, pp. 333-382, 1985
16. 大早徹太郎, 應力除去熱處理による低炭素ステンレス鋼の耐食性の劣化, 材料と環境, Vol. 44, pp. 112~113, 1995
17. 문경만, 알기쉬운 문답식 실용전기화학, 효성출판사, pp. 131~143, pp. 176~179, 1999
18. 紫田夫訊, 腐食と酸化, 産業書, p 69, 1983
19. 中川雅央, 電氣防食法の實際, 地人書館, p 33, 1967