

## 용접열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성 평가 - 제2보: 부식특성

안석환\* · 최문오\*\* · 김성광\*\*\* · 손창석\*\*\* · 남기우\*\*\*\*

\*부경대학교 기계공학부

\*\*부산소방본부

\*\*\*국방기술품질원

\*\*\*\*부경대학교 신소재공학부

## Evaluation of Characteristic for SS400 and STS304 steel by Weld Thermal Cycle Simulation - 2nd Report: Corrosion Characteristics

SEOK-HWAN AHN\*, MOON-OH CHOI\*\*, SUNG-KWANG KIM\*\*\*, CHANG-SEOK SON\*\*\* AND KI-WOO NAM\*\*\*\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Busan Fire Services, Busan, Korea

\*\*\*Defence Agency for Technology and Quality, Changwon, Korea

\*\*\*\*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Weld thermal cycle simulation 용접열사이클 재현, Corrosion 부식, Polarization 분극, Thermal stress 열응력, Weight loss ratio 무게감소률, Corrosion rate 부식속도

**ABSTRACT:** The welding methods have been applied in the most structural products from multi-field of automobile, ship construction and construction, and so on. The structure steel must have enough strength of structure. In this study, SS400 steel and STS304 steel were used to estimate the corrosion characteristics of the weld thermal cycle simulated HAZ. To evaluate the corrosion characteristics, also, the materials with two conditions were used in 3.5% NaCl. The one is to the drawing with diameter of  $\Phi 10$  and the other is to the residual stress removal treatment. The electrochemical polarization test and immersion test were carried out. From test results, corrosion potential, corrosion current density, weight loss ratio and corrosion rate were measured. In the kinds of SS400 steels, corrosion potential of weld thermal cycle simulated specimens after the heat treatment showed somewhat the direction of noble potential. And in the base metal to be drawing weight loss ratio and corrosion rate occurred higher than the other kinds. In the kinds of STS304 steels, the result of base metal to be drawing was similar to results of SS400 steels, too. Two kinds of 750 °C and 1300 °C of weld thermal cycle simulation after the heat treatment were rather higher than the other kinds in weight loss ratio and corrosion rate.

### 1. 서 론

최근까지 산업 전반에 걸쳐 다방면에서 용접에 의한 열영향 부에 대한 연구는 사용 재료의 기계적 물성 등을 알기 위하여 중요하게 여겨져 왔다. 현대 산업에 있어서 용접은 자동차, 조선, 건설업 등의 여러 분야에서 구조물 제작의 대부분을 차지하고 있다. 특히, 조선공업에서는 용접이 차지하는 분야는 매우 크며, 앞에서 언급한 다른 산업분야에서도 그 중요성이 크다 (이토우고로우, 1982). 이때 사용되어지는 구조용 강은 구조물에 필요한 강도 범위를 유지하고 있어야 하는데, 용접부의 국부적인 성질변화에 따른 구조물의 국부적인 기계적 특성변화

로 인해 구조물의 안정성이나 수명이 치명적인 영향을 받게 된다(방한서 등 1997; 안홍조 등, 2000; 이상기 등, 2000). 그러므로 이러한 영향을 줄이기 위해서는 사전에 용접부에 대한 재료의 특성 변화에 대한 연구가 필요하다. 용접 중의 가열에 의해 용접금속에 속하는 모재의 각 점은 bond로부터 떨어진 거리에 따라서 여러 가지 온도에 까지 급열, 급냉된다. 이와 같은 용접 열영향부의 용접열사이클은 용접성 연구에 중요하게 여겨져 왔다(스즈키와 타무라, 1980). 따라서 용접열영향부의 여러 온도 구역에서의 특성을 조사하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 구조용 재료로 많이 쓰이는 SS400강과 우수한 용접성과 내식성, 내마모성으로 인해 기계재료나 구조용 재료에 널리 사용되어지고 있는 STS304강을 사용하여 이들 강들의 실제 용접에 의한 용접 열전도에 의해 형성되는 용접열영향부를 용접열사이클 재현을 통하여 모의하였다(안석환 등,

교신저자 남기우: 부산광역시 남구 용당동 산100번지

051-620-1640 namkw@mail.pknu.ac.kr

2005).

이와 같은 용접열사이클 재현을 통하여 각각의 목적하는 모의된 여러 가지 최고가열온도에 따른 용접열사이클로부터 형성되는 용접열영향부에 대해 전기화학적 부식시험을 실시하였다. 이것으로부터 용접열사이클 재현된 SS400강과 STS304강의 부식특성을 조사하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 SS400 탄소강 및 STS304 오스테나이트 스테인리스강이며 그 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타낸다.

본 실험에 사용된  $\Phi 10$  봉의 경우, SS400강과 STS304강 모두  $\Phi 13$ 로 압연이 되어 나온 것을  $\Phi 10$ 로 만들기 위하여 인발을 하여 만들어진 봉으로써, 단면감소율은 약 40% 정도이다. 이와 같은 인발가공에 의한 가공경화로 인해 인장시험의 결과 SS400강 모재는  $72.65\text{kgf/mm}^2$ , STS304강 모재는  $79.11\text{kgf/mm}^2$ 으로 각각 나타났다. 이는  $\Phi 13$  봉의 모재와는 강도 값에서 차이가 나므로 각 재료마다 인발된 시험편과 인발 후 발생한 가공경화의 영향을 완화하기 위한 열처리를 행한 시험편의 두 종류로 하였다. 가공경화에 의한 시험 내부의 응력완화 열처리에 있어서는 SS400강의 경우  $750^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리를 한 후 공냉을 실시하였다. 또한, STS304강은  $1050^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리를 한 후 수냉을 실시하였다.

Fig. 1에는 용접열영향부의 용접열사이클 재현 실험에 사용한 시험편의 형상 및 분극시험용 시험편과 침지시험용 시험편을 각각 나타낸다. 분극시험 및 침지시험의 전기화학적 부식시험에 사용된 시험편은 Fig. 1의 시험편에서 최고가열온도로 가열된 중앙부로부터 절취하였다.

### 2.2 용접열사이클 재현

본 실험에서 사용한 용접 열사이클 재현장치로는 Dynamic System Inc.의 GLEEBLE 3200을 사용하였다. 적용된 용접 열사이클 재현 온도는 Fig. 2에서의 용접 열영향부(HAZ)의 온도 영향에 따른 충격에너지 값을 고려하여 Fig. 3과 같은 열사이클로 용접 열재현 실험을 실시하였다(환선주식회사, 1990). 목적온도까지의 도달시간은 3초이며, 목적온도에서 2초간 유지 후 90초간 열재현 장치 속에서 냉각시켰다.

### 2.3 전기화학적 부식시험

용접열사이클 재현을 실시한 시험편으로부터 용접열사이클을 가한 중앙부를 기준으로 유효면적  $10 \times 10\text{mm}$ 의 전기화학적 부식시험용 시험편을 절취하였다. Potentiostat/Galvanostat(EG&G model 273A)와 PC를 연결하여 Corrosion software를 사용해 마운팅 처리한 분극시험편에 대해서 분극실험을 실시했다. 기준전극은 포화카로멜(Saturated calomel electrode: SCE)전극이며, 보조전극을 고밀도 탄소봉으로 하여, Scan rate  $0.5\text{mV/sec}$  아래서 분극곡선을 측정했다. 시험용액으로서는 pH 8.2

Table 1 Chemical compositions of specimens (wt%)

Material	C	Mn	Si	P
SS400	0.148	0.458	0.213	0.012
STS304	0.04	1.16	0.57	0.02
S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.018	-	-	-	Bal.
0.007	20.32	8.44	0.15	Bal.

Table 2 Mechanical properties of specimens

Material	Yield strength ( $\sigma_y$ , kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength ( $\sigma_u$ , kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SS400 ( $\Phi 13$ )	$\geq 24.98$	40.79~52	$\geq 17$
SS400 ( $\Phi 10$ , drawing)	67.92	72.65	7.71
STS304 ( $\Phi 13$ )	$\geq 20.09$	$\geq 53$	$\geq 40$
STS304 ( $\Phi 10$ , drawing)	68.48	79.11	35.68

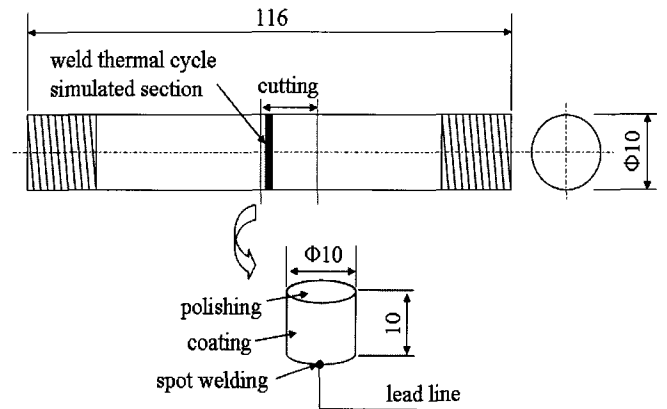


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimen (unit : mm)

의 3.5% NaCl용액을 사용하였다. 침지시험에 있어서는 40일간 인공해수에 침지시켰으며, 1회/24시간으로 부식전위 및 부식전류를 측정하였다. 40일 경과 후 시험편을 세척하여 부식생성물을 제거하고 무게감소량을 측정하였다(강홍주 등, 2003).

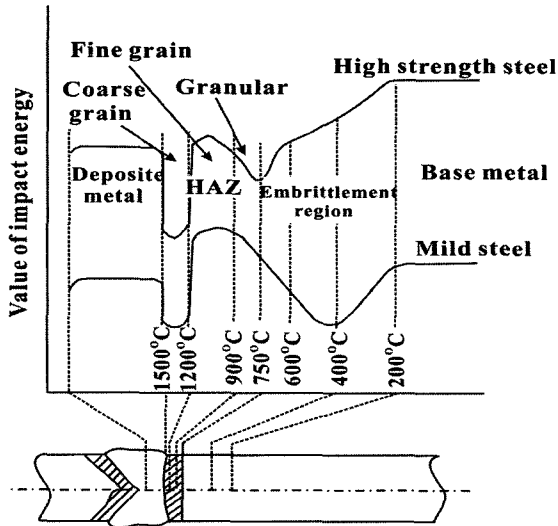


Fig. 2 Impact energy according to temperature of HAZ

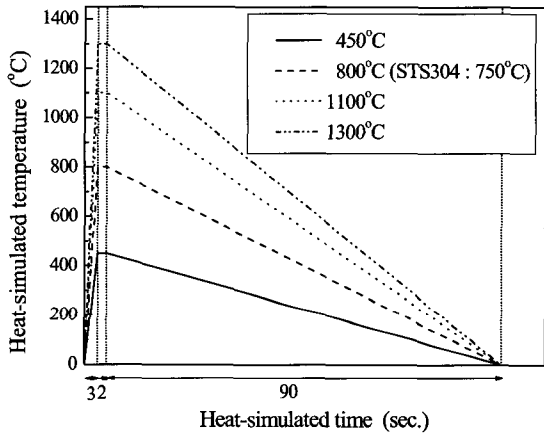


Fig. 3 Heat cycles used in the weld thermal cycle simulation test of SS400 steel and STS304 steel

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분극특성

Fig. 4는 용접열사이클 재현한 SS400강 및 STS304강의 분극곡선을 나타낸다. 그림에는 각각의 모재의 결과도 함께 나타내었다. 분극곡선에 의한 부식전류의 평가는 Cathode 분극곡선을 부식전위까지 외삽시켜 그때의 전류를 부식전류로 하였다.

Fig. 4(a)는 SS400강의 인발 후 용접열사이클 재현한 경우의 분극곡선을 나타낸다. 부식전위에 있어서는 모재에 비해 최고가열온도 1100°C 및 1300°C가 보다 (+)방향으로 귀한(Noble) 전위를 나타내고 있고, 450°C 및 800°C로 용접열사이클 재현한 경우는 보다 (-)방향으로 비한(Active) 전위를 나타내고 있다. 부식전류밀도에 있어서는 450°C의 경우가 가장 큰 값( $1 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ )을 나타낸 반면 1100°C 및 1300°C에서는

$4.7 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ 로 상대적으로 낮았다.

Fig. 4(b)는 SS400강의 인발 후 전열처리를 실시하고 용접열사이클 재현한 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)에 비해 용접열사이클 재현 시험 전에 열처리를 행한 (b)에 있어서는 모재보다도 모두 (+)방향으로 귀한 부식전위를 나타내었다. 부식전류밀도에 있어서는 모재가 가장 큰 값( $5.5 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ )을 나타내었고, (a)에 비해 전반적으로 낮은 부식전류밀도를 나타내고 있다.

SS400강의 부식전위는 인발 후 용접열사이클 재현을 실시한 경우에 비해 인발 후 전열처리를 행한 다음 용접열사이클 재현한 경우에 있어서는 전반적으로 용접열사이클 재현전의 열처리에 의해 모재에 비해 다소 귀전위 방향으로의 부식전위를 나타내고 있다. 이는 내부응력을 완화하기 위해 실시된 열처리로 인하여 재차 용접열사이클에 의한 최고가열온도로 용접열사이클 재현했을 경우 부식에 대한 민감성이 저하되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 4(c)는 STS304강의 인발 후 용접열사이클 재현한 경우의 분극곡선을 나타낸다. 부식전위는 모재가  $-195 \text{mV/SCE}$ 로서 가장 귀한 전위를 나타내었고, 나머지는 큰 차이는 없으나 1100°C에서  $-250 \text{mV/SCE}$ 로 가장 비한 전위를 나타내었다. 부식전류밀도는 1100°C에서  $7 \times 10^8 \text{A/cm}^2$ 으로서 가장 낮은 전류가 배류되고 있다.

Fig. 4(d)는 SS400강의 인발 후 전열처리를 실시하고 용접열사이클 재현한 결과를 나타낸다. 부식전위는 450°C에서  $-260 \text{mV/SCE}$ 로 가장 (-)방향으로 비한 전위를 나타내고, 나머지는  $-200 \sim -220 \text{mV/SCE}$ 로 큰 차이가 없으나 750°C의 경우 ( $-200 \text{mV/SCE}$ )가 모재( $-210 \text{mV/SCE}$ )에 비해 미미하게 귀한 방향의 전위를 나타내고 있다. 부식전류에 있어서는 거의 비슷한 값( $4 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7 \text{A/cm}^2$ )을 나타내고 있다.

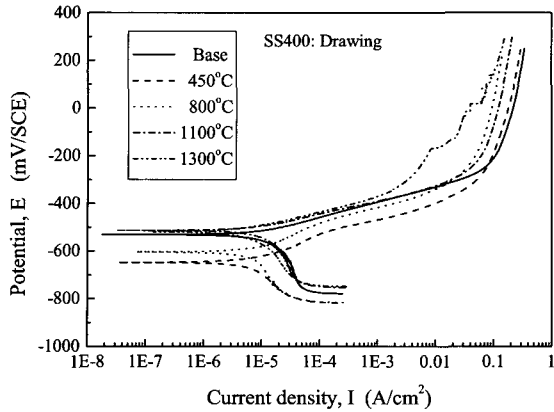
STS304강의 모재 및 용접열사이클 재현한 450°C에서는 부동태가 다소 뚜렷하게 나타나고 있고 750°C 및 이보다 높은 온도에서는 부동태의 영역이 거의 나타나지 않고 있다. 750°C 부근 이상의 용접열영향 온도구역에서의 예민화현상에 의한 것으로 생각된다. 인발 후 용접열사이클 재현 및 인발 후 전열처리를 한 다음 용접열사이클 재현한 두 경우, 모재 및 각 최고가열온도에서의 분극특성에는 큰 차이가 나타나지 않았다.

#### 3.2 무게감소를 및 부식속도

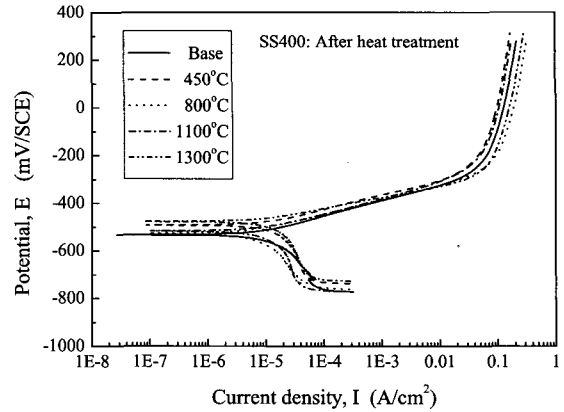
Fig. 5와 6에는 용접열사이클 재현한 SS400강 및 STS304강의 침지부식시험에 의한 무게감소율과 부식속도를 구하여 각각 나타내었다.

Fig. 5는 인발 후 및 인발 후 열처리한 다음 용접열사이클 재현한 SS400강 및 STS304강의 40일간 침지시험한 후의 결과를 나타낸다. 각 최고가열온도로 용접열사이클 재현한 시험편들의 3.5% NaCl 용액 속에서 40일간 침지시험한 후의 무게감소율을 나타낸다.

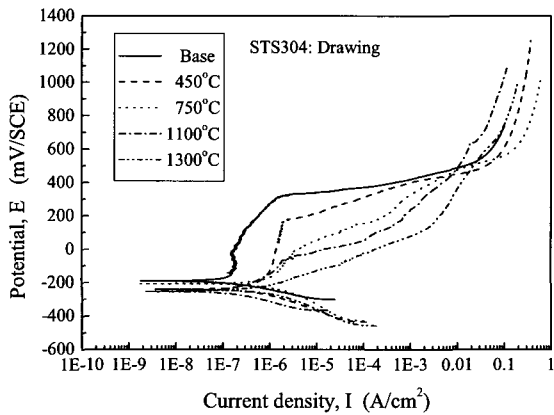
Fig. 5(a)는 SS400강의 무게감소율로서 인발 후의 용접열사이클 재현한 경우들보다도 모재에서 가장 큰 무게감소율을 나타내었다. 이후 1100°C까지는 무게감소율이 저하하다가



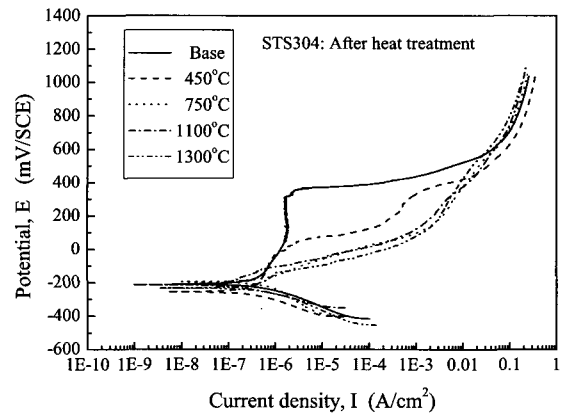
(a) SS400 (Drawing)



(b) SS400 (After heat treatment)



(c) STS304 (Drawing)



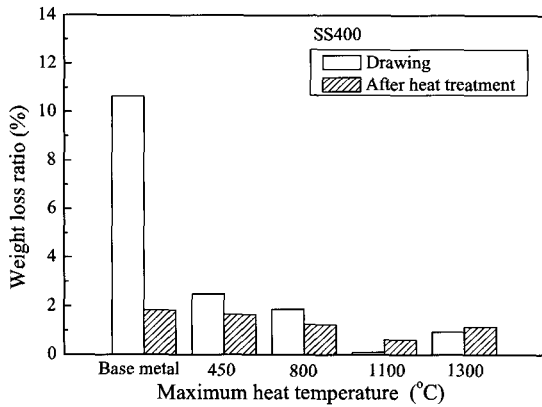
(d) STS304 (After heat treatment)

Fig. 4 Polarization curves of SS400 and STS304 steel by the weld thermal cycle simulation

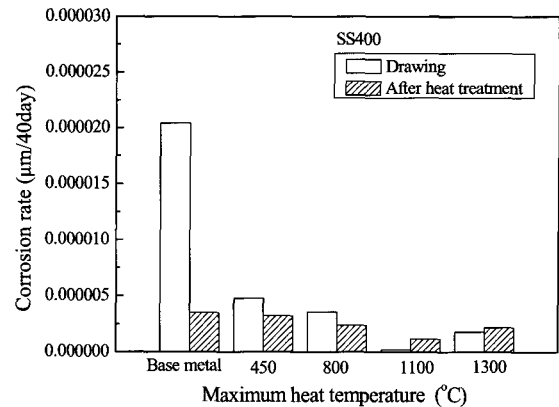
1300°C에서 미소하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 이것은  $\Phi 13$  봉을  $\Phi 10$ 으로 인발하는 과정에서 발생한 잔류응력의 영향으로 판단된다. 인발 후 전열처리를 행한 다음 재차 용접열 사이클 재현한 시험편에 있어서는 무게감소율에서 큰 차이는 나타나지 않았다. 전열처리를 행한 경우 3.5% NaCl용액 속에서 800°C까지는 열처리의 영향이 거의 나타나지 않고 있다(이 토우고로우, 1982). 전열처리를 행한 1100°C 및 1300°C에서는 오히려 전열처리를 행하지 않은 경우보다도 다소 무게감소율이 증가하고 있다. 이와 같은 이유는 1100°C 이상에서는 조직의 조립화가 부식에 영향을 미친 듯 하며, 1300°C의 경우에서 다소 무게감소율이 증가한 것은 전보(안석환 등, 2005)에 나타내었듯이 용착부에 인접한 구역의 온도로서 경화가 발생하였기 때문인 것으로 사료된다(세키쿠치와 요시무라, 1980). 이는 인발시 재료 내부에 존재하게 되는 압축잔류응력이 내부응력 완화 열처리로 인해 잔류응력의 영향이 많이 완화된 상태에서 재차 용접열사이클 재현함으로써 열응력이 발생하여, 이

열응력이 재료 내부에 또 다른 잔류응력으로 남게 됨으로써 재료의 경도가 증가한 것으로 사료되며, 이것은 용접 bond부에 가까울수록 인성이 저하되기 때문으로 생각된다.

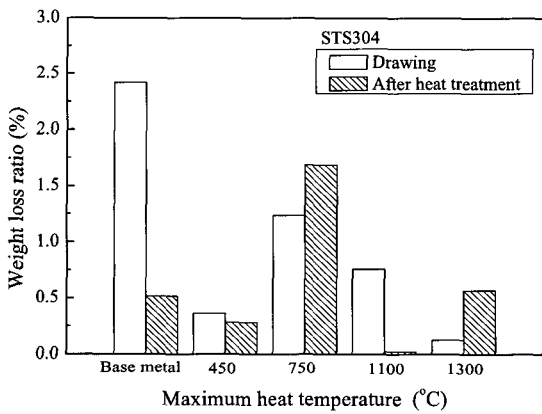
Fig. 5(b)는 STS304강의 결과로서 인발 후 모재의 무게감소율이 가장 크게 나타나고 있고 450°C에서는 다소 무게감소율이 저하하고 있으나, 750°C에서 재차 무게감소율이 증가하였다. 그러나 1100°C, 1300°C로 최고가열온도가 높아질수록 재차 무게감소율이 저하하고 있다. 750°C 및 1100°C에서는 오히려 450°C보다도 더 많은 무게감소율을 나타내고 있다. 전열처리를 행한 경우에도 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있으나 750°C 및 1300°C로 가열한 경우 전열처리를 행하지 않은 시험편보다도 무게감소율이 다소 높게 나타나고 있다. Fig. 5(b)의 750°C에서 무게감소율이 증가하고 있는 것은 용접열사이클 재현에 의한 임계온도 영역에 머무르는 시간이 상대적으로 다른 온도대에 비해 충분하여 예민화되어졌기 때문으로 생각된다. 특히, 용접열사이클 재현하기 전 인발에 의한 응력



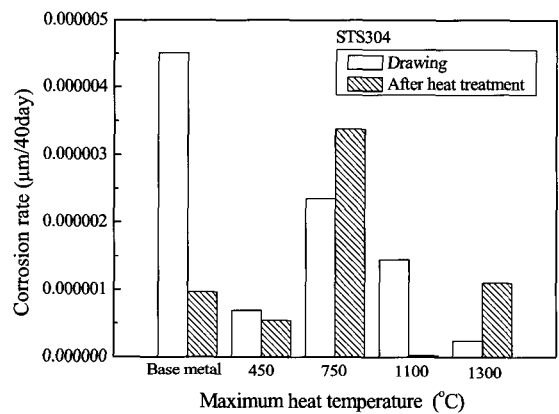
(a) SS400



(a) SS400



(b) STS304



(b) STS304

Fig. 5 Weight loss ratio of SS400 and STS304 steel after immersed 40 days in 3.5% NaCl

Fig. 6 Corrosion rate of SS400 and STS304 steel after immersed 40 days in 3.5% NaCl

을 완화하기 위해 열처리를 실시하였고, 이와 같은 예민화영역에서의 용접열사이클 재현은 고용체 상태의 탄소와의 반응할 기회를 가지지 못하기 때문에 예민화가 발생하게 되고 부식이 활성화되어졌다고 생각된다. 또한, 이후 1100°C 및 1300°C에서 부식이 덜 진행된 것은 용접열사이클 재현에 앞서 1050°C로 용체화열처리를 실시하였기 때문에 인발에 의한 변형률이 완화되었기 때문인 것으로 판단된다(이의호 등, 2002; 이토우고로우, 1982; 요시다케 와 나카무라, 1980).

Fig. 6은 Fig. 5에 적용된 무게감소량을 이용하여 구한 40일 경과한 시점에서의 부식속도를 나타낸다. 이때 부식속도는 다음 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$\mu\text{m}/\text{yr} = \frac{87600W}{DAT} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $W$ 는 무게감소량(mg),  $D$ 는 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $A$ 는 단위면적( $\text{cm}^2$ ),  $T$ 는 시간(day)을 각각 나타낸다. 식 (1)에 사용된 파라미터 중에서 시간  $T$ 에는 본 침지실험의 종료시점인 40일을 상정하였다.

Fig. 6(a) 및 (b)는 각각 SS400강 및 STS304강의 부식속도를 나타낸다. Fig. 6의 결과는 Fig. 5의 결과와 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

(1) SS400강의 부식전위는 인발 후 용접열사이클 재현을 실시한 경우에 비해 인발 후 전열처리를 행한 다음 용접열사이클 재현한 경우에 있어서 전반적으로 용접열사이클 재현전의 열처리

에 의해 다소 귀전위 방향으로의 부식전위를 나타내고 있다. 그리고 부식전류밀도에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

SS400강의 무게감소율 및 부식속도에 있어서는, 인발 후의 용접 열사이클 재현한 경우 및 인발 후 전열처리를 행한 다음 재차 용접열사이클 재현한 시험편들보다 인발 된 모재에서 무게감소율 및 부식속도가 높게 나타났다.

(2) STS304강의 인발 후 용접열사이클 재현 및 인발 후 전열처리를 한 다음 용접열사이클 재현한 두 경우, 모재 및 각 최고 가열온도에서의 분극특성에는 큰 차이가 나타나지 않았다.

STS304강의 인발 된 모재의 무게감소율 및 부식속도가 가장 크게 나타나고 있고 450℃에서는 무게감소율 및 부식속도가 다소 저하하고 있으나, 750℃에서 재차 무게감소율 및 부식속도가 증가하였다. 이후 1100℃, 1300℃로 최고가열온도가 높아질수록 무게감소율 및 부식속도가 재차 저하하고 있다. 750℃ 및 1100℃에서는 오히려, 450℃보다도 더 많은 무게감소율 및 부식속도를 나타내고 있다. 전열처리를 행한 경우에도 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있으나, 750℃ 및 1300℃로 가열한 경우 전열처리를 행하지 않은 시험편보다도 무게감소율 및 부식속도가 다소 높게 나타났다.

## 참 고 문 헌

강홍주, 남기우, 안석환, 강창룡, 도재윤, 박인덕 (2003), "수퍼 2상 스테인리스강의 부식 저항성에 관한 연구", 한국해양 공학회지, 제17권, 제2호, pp 40-46.

방한서, 차용훈, 오을권, 노찬승, 김종명 (1997). "점열탄소성 이론에 의한 용접후열처리에 대한 수치해석", 한국해양공학회지, 제11권, 제1호, pp 113-123.

세키구치 키치로, 요시무라 고로 (1980). 현대용접기술대계-용접과 재질(상), 산보출판, pp 235-260.

스즈키 하루요시, 타무라 히로시 (1980). 현대용접기술대계-용접금속학, 산보출판, pp 54-55.

안석환, 정정환, 남기우 (2005). "용접열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성 평가 - 제1보: 기계적특성 및 조직", 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 64-71.

안홍조, 이찬우, 이창희 (2000). "C-Mn 구조용강 열영향부의 결립 성장 거동 예측 모델링", 대한금속·재료학회지, 제38권, 제6호, pp 841-850.

요시다케 신야, 나카무라 하루마사 (1980). 현대용접기술대계-스테인리스강의 용접, 산보출판, pp 24-91.

이상기, 도재윤, 남기우, 강창룡, 이해우, 안석환 (2000). "수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열진전 특성에 미치는 미세조직의 영향", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 66-70.

이의호, 이학렬, 황운석, 김광근 (2002). 부식과 방식의 원리, 도서출판 동화기술, pp 363-413.

이토우 고로우 (1982). 기계공학전서 6-부식과 방식, 코로나사, pp 330-336.

환선주식회사 (1990). 용접접합편람, 일본용접학회, pp 810-811.

2007년 7월 30일 원고 접수

2007년 10월 11일 최종 수정본 채택