

## 오스테나이트系 스테인레스鋼의 腐蝕疲労龜裂 進展特性에 관한 研究

임우조 · 김부안

부산수산대학 이공학부 박용기계공학

## Study on Characteristics of Corrosion Fatigue Crack Propagation for Austenitic Stainless Steel

Uh-Joh Lim · Bu-Ahn Kim

*Department of Mechanical Engineering  
 National Fisheries University of Pusan*

The characteristics of the corrosion fatigue cracking of both TIG weld heat affected zone and base metal for austenitic stainless steel were investigated under the environments of various specific resistance and the air.

The corrosion fatigue crack initiation sensitivity was quantitatively investigated for SUS 304 weldments in the various specific resistances. Also, the characteristics of corrosion fatigue cracking for the weldments were investigated from mechanical, electrochemical, and microstructural point of view. Main results obtained are as follows;

- (1) The corrosion fatigue crack initiation sensitivity on the base metal and weld heat affected zone increases as the specific resistance of corrosion environment decreases, and the sensitivity of the weld heat affected zone appears increasing more than that of the base metal.
- (2) The corrosion potentials of various specific resistances are almost constant in initial corrosion fatigue cracking, but the corrosion potential becomes less noble promptly with the corrosion fatigue crack growth as the specific resistances decrease.
- (3) The corrosion fatigue crack growth of the weld heat affected zone is more rapid than that of the base metal, because of the softening and the less noble potential caused by welding heat cycle.

(Received August 27, 1987)

### 1. 序 論

最近 工業의 發達과 더불어 각종 機械 構造物들은 더욱 輕量化 · 高速化되고, 사용되는 環境은 훨씬 多樣化되어 가므로 이에 따른 金屬材料는 高強

度, 耐蝕性, 耐熱性 등을 요구하고 있다.<sup>(1)</sup>

機械 構造物은 장시간에 걸쳐서 충분한 안정성을 가지게 하기 위해 材料強度에 미치는 環境 특히, 腐蝕性 環境效果의 해명과 環境強度 設計基準의 確立이 요망된다.<sup>(2)</sup>

특히, 腐蝕性 環境中에서 反復應力을 받으면 현저하게 強度가 低下하는 것은 1917년에 Haigh에 의해서 알려졌고 이것을 腐蝕疲勞라고 불렀다. 그 후 미국의 McAdam 등은 腐蝕疲勞에 대한 많은 연구 성과를 발표하고 있다.<sup>3,4)</sup>

그러나 腐蝕性 環境下에서의 疲勞에 관한 特性은 아직 만족할만한 성과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 이러한 疲蝕疲勞龜裂은 清水, 海水, 酸溶液 뿐만 아니라 대기중에서도 露點의 변화에 따른 표면 피막의 吸着性등 상대습도 50% 이상에서는 腐蝕疲勞의 影響이 미친다.<sup>4)</sup>

한편, 스테인레스강材는 우수한 耐蝕性을 가지고 있으므로 工業用 耐蝕合金 材料의 대표적 지위를 차지할 뿐 아니라 耐熱性 熔接性도 상당히 우수하다.<sup>5)</sup>

따라서 스테인레스강은 BWR原子力플랜트, 선박의 소형보일러, 열교환기, 해수 및 연료유 여과기, 압력용기, 화학기기, 운환유 및 연료유 펌프축, 프로펠러 블레이드, 및 증기터어빈 블레이드, 지하철전동차 등 이 방법의 사용이 現在와 같은 비약적인 發展을 이루고 있다. 따라서 이에 의한 사고건수도 해마다 증가하고 있는 실정이다.<sup>6)</sup>

특히 이들 構造物의 破壞는 거의 腐蝕疲勞와 應力腐蝕龜裂에 의한 것이 대부분이며, 여기에 대해서는 環境이 큰 影響을 미치고 있다.

따라서 本 研究에서는 오스테나이트계 스테인레스강材의 母材와 熔接熱影響部의 腐蝕疲勞龜裂 進展特性을 調査 및 考察하기 위하여 여러가지 環境의 比抵抗과 공기중에서 反復疲勞 引張試驗을 행하고자 한다.

이 實驗을 통하여 比抵抗의 변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 破斷에 미치는 環境 感受性을 定量的으로 구하며, 電位 변화에 따른 疲蝕疲勞龜裂 樣相을 究明하고자 한다.

또한 熔接部 부위에 있어서 機械의 硬度, 電氣-化學的인 電位 및 組織的인 特性을 조사하여 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 進展기동 변화의 원인을 考察하고자 한다.

## 2. 試驗片 및 實驗方法

### 2.1 試驗片

本 實驗에 사용된 試驗片 材料는 두께 3mm인 市販의 오스테나이트계 스테인레스강材로 그 化學的 成分과 機械的 特性을 Table 1에 보인다. 熔接

棒은 오스테나이트계 스테인레스강 TIG 熔接用 熔接棒 Y 308(JIS規格, 直徑: 1.5mm)을 이용하였으며, 이때 熔接條件은 入熱量 9.6KJ/cm이며 熔接電流는 75Amp이다.

熔接棒의 化學的 成分과 機械的 特性은 Table 1에 함께 표시되어 있다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material

#### (a) Chemical compositions (wt %)

Material	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Base metal (SUS 304)	0.05	0.83	0.59	0.027	0.015	8.42	18.56
Electrode (Y 308)	0.04	1.97	0.32	-	-	10.1	20.6

#### (b) Mechanical properties

Material	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Base Metal (SUS 304)	60	60
Electrode (Y 308)	62.0	43.0

腐蝕疲勞 試驗片 및 노치의 形狀을 Fig. 1에 보인다. 이러한 試驗片은 그 길이 방향이 압연 방향과 동일하도록 제작하였다. 여기서 母材 및 熔接熱影響部에 노치의 위치가 오도록 각각 별개의 試驗片으로 제작하였다.

이러한 試驗片 形狀의 노치先端에 있어서의 應力強度係數範圍는 Srawley에 의한 다음 식으로 계산하였다.<sup>7)</sup>

$$\Delta k = \frac{\Delta P \sqrt{a}}{t \cdot w} \left\{ 1.99 - 0.41 \left( \frac{a}{w} \right) + 18.70 \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right\} \dots \dots (1)$$

여기서,  $\Delta P$ 는 荷重의 變動範圍로써

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$$

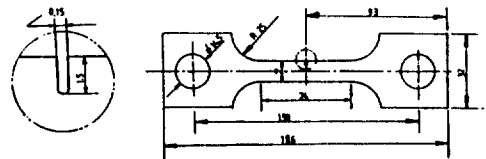


Fig. 1 Dimension of test specimen (unit: mm).

t는 試驗片 두께, w는 試驗片 板幅,  
a는 均열길이이다.

한편, 試驗片 표면은 사포 2000번까지 연마한 후 아세톤으로 脱脂하고 試驗片 표면의 孔蝕에 의한 영향을 제거하기 위하여 노치先端을 제외한 試驗片 전 표면을 투명한 에폭시 樹脂로 피복하여 절연시켰다.

2.2 實驗裝置

本 實驗에 사용한 腐蝕疲勞試驗裝置의 全體 系統圖는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 腐蝕疲勞 試驗機는 본 실험실에서 제작한 것으로 Lever의 上·下운동으로써 試驗片에 反復引張應力을 가할 수 있도록 하였다. 이러한 反復引張應力은 Motor에 의해서 구동되는 편심 Cam에 의해서 發生하며 이러한 反復引張의 反復數는 Pulley축에 연결되어 있는 Counter로서 測定하였다.

Lever의 上·下운동으로 인한 충격을 완화시키기 위해 Lever의 끝에 Buffer를 設置하였으며 응력비 (Stress Ratio) R에 영향을 미치는 Cam과 Lever 사이의 간격은 Leading block에 연결되어 있는 거리 조정 Nut로써 하였다.

試驗片에 걸리는 反復應力은 Load cell에 부착되

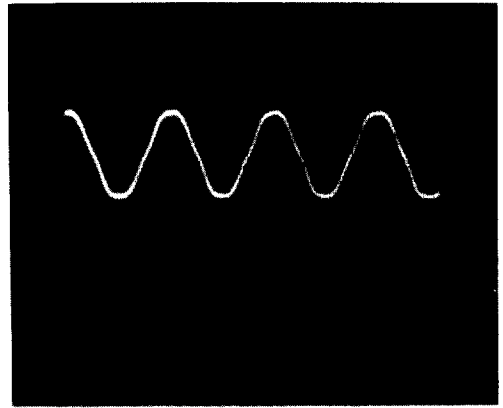


Photo. 1 Stress wave forms.  
(R=0)

어 있는 Strain gauge를 통하여 Strain meter 로써 測定하였다.

Photo. 1은 試驗片에 걸리는 應力의 變化를 Oscilloscope를 통하여 나타낸 應力波形이다. 이 때 응력비 R은 0이며 주파수 f는 8 Hz이다.

2.3 實驗方法

腐蝕環境槽은 플라스틱으로 제작하였으며 腐蝕環境은 比抵抗이 25 Ω·cm인 天然海水와 淸明한 水道水를 少量씩 混合하여 그 比抵抗이 25, 500, 1000 및 5000 Ω·cm로 되게 하여 각각 固定하였으며, 實驗中의 水温은 約 14~16°C로 維持하였다.

또한 腐蝕槽內의 溶液은 Cl<sup>-</sup> 이온의 濃度 및 比抵抗의 變化를 방지하기 위하여 시간당 4ℓ의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕槽內의 壓力은 大氣壓과 같게 하였다.

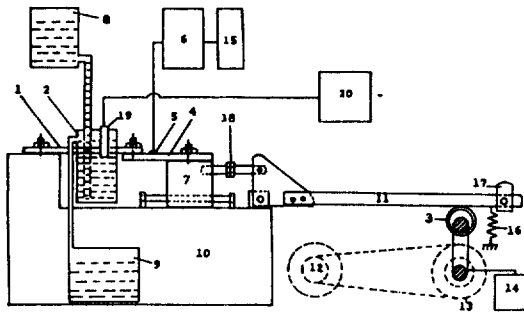
腐蝕疲勞龜裂 進展길이는 10배의 확대경으로써 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生(a=0.2mm)부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

그리고 腐蝕疲勞龜裂 進展때 腐蝕環境槽에 직접 飽和 카로멜電極 (SCE)을 浸漬하여 高抵抗 電壓計 (內部低抗: 10<sup>7</sup> Ω/V)로 電位를 測定하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 腐蝕疲勞龜裂에 미치는 比抵抗의 影響

Fig. 3은 SUS 304鋼 熔接部의 腐蝕疲勞龜裂 發



- |                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| 1. Specimen         | 11. Lever              |
| 2. Corrosion cell   | 12. Motor              |
| 3. Eccentric cam    | 13. Pulley             |
| 4. Load cell        | 14. Counter            |
| 5. Strain gauge     | 15. Oscilloscope       |
| 6. Strain meter     | 16. Spring (Buffer)    |
| 7. Leading block    | 17. Weight (Load)      |
| 8. Feed water tank  | 18. Adjusting nut      |
| 9. Drain water tank | 19. Electrode          |
| 10. Bed             | 20. Conductivity meter |

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus.

生에 미치는 比抵抗의 影響을 조사하기 위하여 여러가지 比抵抗에 대한 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 ( $a=0.2\text{mm}$ )까지의 反復數와의 關係를 보인 것이다.

이에 의하면 比抵抗이 감소할 수록 母材와 熔接熱影響部의 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復數는 현저하게 감소하는 경향을 보이며, 또한 母材와 熔接熱影響部의 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復數 차이도 커지고 있다.

Fig. 4는 以上과 같은 현상을 좀더 定量的으로 검토하기 위해 공기중에 있어서의 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지 反復數의 比를 計算하여 比較함으로써 여러가지 比抵抗에서 腐蝕疲勞龜裂 發生 感受性を 定量的으로 평가하여 보인 것이다.

이에 의하면 SUS 304鋼 熔接部の 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 感受性は 腐蝕環境의 比抵抗이 감소할 수록 거의 선형적으로 증가하고 있으며 母材보다 熔接熱影響部의 感受性이 더 크게 되고, 또한 그 차이도 比抵抗이 감소할수록 크게되는 樣相을 나타내고 있다.

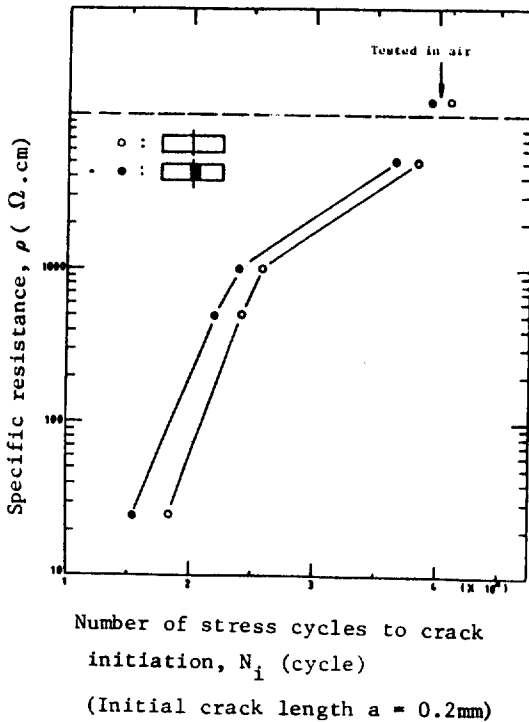


Fig. 3 Specific resistance versus number of stress cycles to crack initiation for base metal and HAZ.

Fig. 3 및 Fig. 4의 結果에 의하면 比抵抗이 감소함에 따라서 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復數는 빨라지고, 그 感受性は 증가되는 樣相을 보이고 있다.

이 原因은 比抵抗이 감소할수록  $\text{Cl}^-$  이온의 濃度和 傳導度가 높게 되어 試驗片 notch先端의 不動態皮膜의 破壞 및 再不動態 形成이 어렵기 때문으로 생각되며, notch先端에서 腐蝕 活性化의 影響이 커지기 때문에 腐蝕疲勞龜裂 感受性は 증가하는 것으로 思料된다.

Fig. 5는 여러가지 環境의 比抵抗에서 母材와 熔

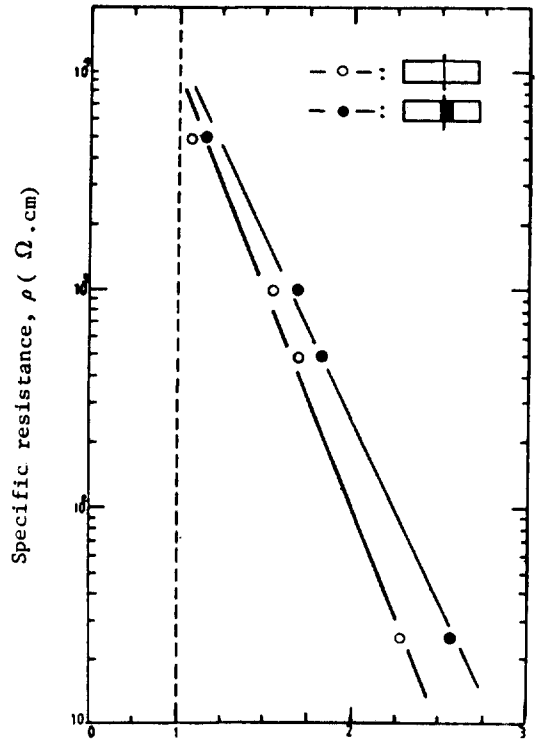


Fig. 4 Relation between specific resistance and corrosion fatigue crack initiation sensitivity for base metal and HAZ.  
(when  $K_{Ii} = 5.66 \text{ kg.mm}^{-3/2}$ )

Fig. 4 Relation between specific resistance and corrosion fatigue crack initiation sensitivity for base metal and HAZ.

(Corrosion fatigue crack initiation sensitivity = Number of stress cycles to crack initiation in air / Number of stress cycles to crack initiation in various specific resistance.)

接熱影響部の 腐蝕疲勞龜裂 破斷까지의 反復數를 보인 것이다.

이에 의하면 比抵抗이 증가할수록 母材와 熔接熱影響部の 腐蝕疲勞龜裂 破斷까지의 反復數는 크게 지연되고 있으며 또한, 母材와 熔接熱影響部の 腐蝕疲勞龜裂 反復數도 큰 차이를 보이고 있다.

이러한 원인은 比抵抗의 증가와 함께 腐蝕疲勞龜裂 進展速度가 熔接熱影響部에 비해 母材가 더 작기 때문에 熔接熱影響部보다 母材의 腐蝕疲勞龜裂 破斷까지의 反復數가 지연되는 것으로 推定된다.

3.2 腐蝕疲勞龜裂 進展特性

Fig. 6 은 腐蝕環境의 比抵抗이 25, 500, 1000 및 5000 Ω·cm, 그리고 공기중에서 初期 應力強度係數를 일정하게 했을 때 母材에 대한 腐蝕疲勞龜裂 進展길이와 反復數와의 관계를 정리하여 보인 것이다. 이 結果에 의하면 比抵抗 25 Ω·cm의 環境에서 腐

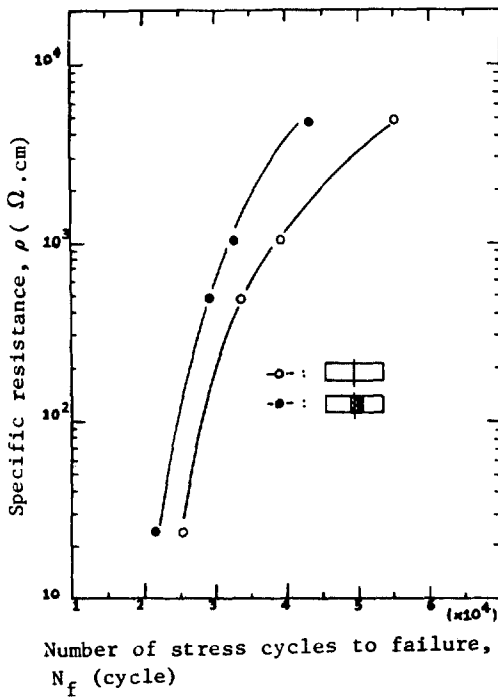


Fig. 5 Relation between various specific resistance and number of stress cycles to failure for base metal and HAZ.

蝕疲勞龜裂이 가장 빠르게 進展하며, 比抵抗이 증가함에 따라 腐蝕疲勞龜裂 進展이 遲延되고 있다.

Fig. 7 은 環境의 比抵抗이 25, 500, 5000 Ω·cm 중에서 SUS 304鋼에 대한 腐蝕疲勞龜裂 進展의 反復數에 따른 腐蝕電位 (E<sub>corr</sub>)의 變化를 보인 것이다.

이 結果에 의하면 어느 比抵抗에서나 約 -180mV (SCE)電位에서 初期 腐蝕疲勞龜裂이 發生되지만, 比抵抗이 감소할수록 腐蝕疲勞龜裂의 進展과 함께 급격히 卑方向으로 移行되고 있다.

이러한 이유는 龜裂先端에서 腐蝕疲勞龜裂 進展과 더불어 不動態皮膜의 破壞와 再形成 過程에 있어서 比抵抗이 감소함에 따라 龜裂先端에서 不動態皮膜의 再形成이 腐蝕疲勞龜裂 進展에 追從하지 못하기 때문에 龜裂의 進展과 함께 급속히 卑化되는 것으로 생각되어진다.<sup>(4)</sup>

Fig. 8 은 母材와 熔接熱影響部에 대해서 比抵抗 25 Ω·cm의 腐蝕環境과 공기중에서 龜裂進展길이와 反復數와의 관계를 보인 것이다.

이에 의하면 環境의 比抵抗 25 Ω·cm에서의 熔接熱影響部가 가장 빠른 腐蝕疲勞龜裂 進展樣相을 보이고 있으며, 공기중에서의 母材가 가장 느리게 나타내고 있다.

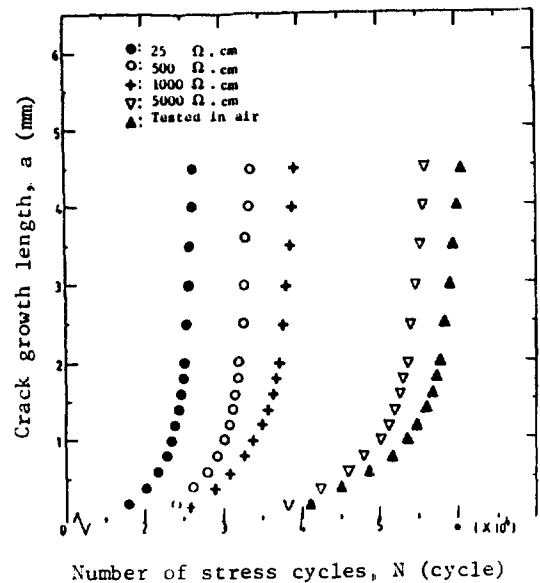


Fig. 6 Fatigue crack growth length versus number of stress cycles for base metal in air and in various specific resistance.

Photo. 2는 應力比 (Stress ratio)  $R=0$ ,  $f=8\text{Hz}$ , 比抵抗  $25\ \Omega\cdot\text{cm}$ 의 腐蝕環境에서 熔接熱影響部の 腐蝕疲労龜裂의 巨視的 樣相을 나타낸 것이다.

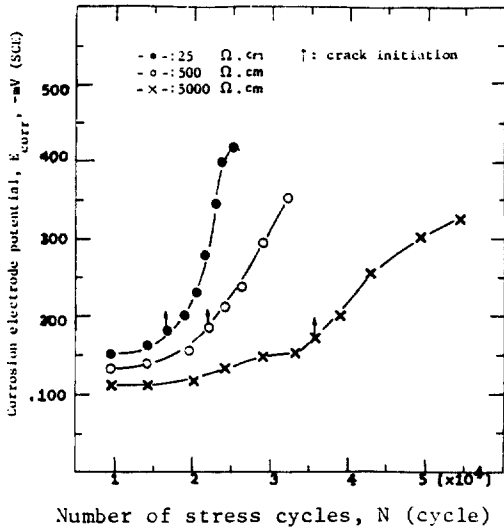


Fig. 7 Electrode potential versus number of stress cycles in various specific resistance of SUS 304 stainless steel.

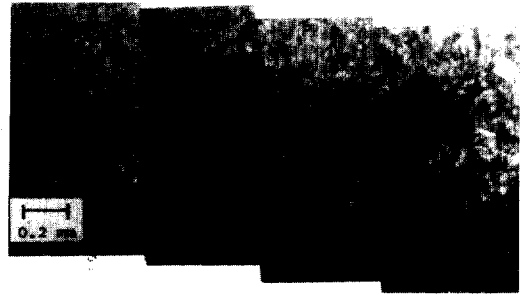


Photo. 2 Macro-graph of corrosion fatigue propagation.

### 3. 3 熔接部の 機械的, 電氣-化學的 및 組織的 特性變化

以上에서 오오스테나이트系 스테인레스鋼材 熔接部の 腐蝕疲労龜裂 發生 感受性 및 進展은 어떤 腐蝕環境에서도 熔接熱影響部가 母材보다 빠른 것으로 나타났다.

이의 原因을 分析하기 위해 熔接部の 機械的인 硬度和 衝擊值, 電氣-化學的인 電位 및 組織的 特性을 조사하여 그 結果를 Fig. 9, Table 2 및 Photo. 3에 보인다.

Fig. 9는 SUS 304鋼 熔接部の 硬도를 나타낸 것으로 일반 炭素鋼 熔接部와는 달리 熔接熱影響部가 母材나 熔着金屬部에 비해 軟化되어 있음을 보여 준다.

이것은 塑性加工에 의해 加工硬化된 오오스테나이트系 스테인레스鋼 母材 原質部가 熔接時의 熱影響을 받아 일어나는 再結晶현상으로 인해 軟化된 것으로 考察된다.<sup>8)</sup>

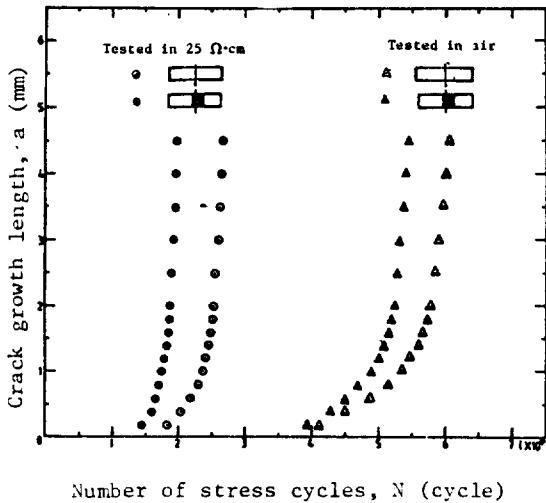


Fig. 8 Relation between crack growth length and number of stress cycles for base metal and HAZ in air and in 25 Ω·cm.

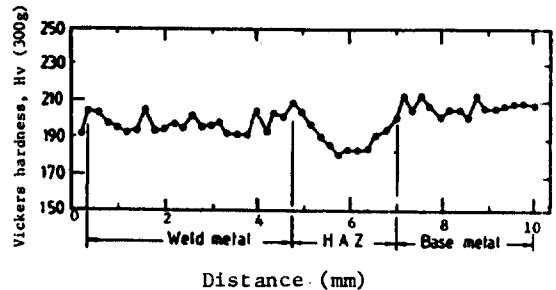


Fig. 9 Vickers hardness on the welded zone.

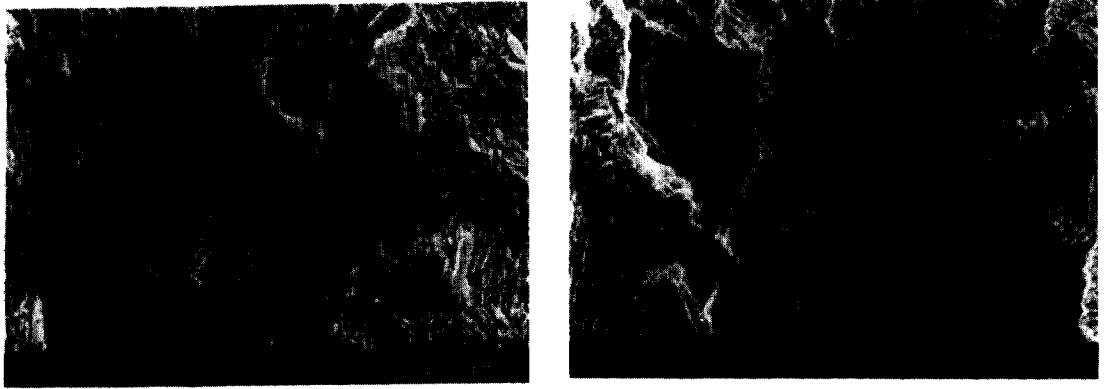


Photo. 3 Scanning electron micrograph of fracture surface of specimens of SUS 304 weldment.

a) B. M.  $\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$  b) HAZ,  $\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$  .

Table 2 Electrode potential on the weldment  
(Solution : 35%  $\text{MgCl}_2$ , 80°C)

Test position	Specimen No.	Electrode potential (mV), SCE
B. M.	1	-321
B. M.	2	-322
B. M.	3	-320
HAZ	4	-332
HAZ	5	-338
HAZ	6	-339

이와 같이 용접열影響部가 軟化됨에 따라 他部分에 비해 塑性變形이 쉽게 發生하고 이러한 塑性變形은 스테인레스鋼材의 不動態 皮膜의 빠른 破壞를 초래하여 빠른 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 進展에 기여하는 것으로 推定된다.

Table 2는 母材와 용접열影響部の 試驗片을 각각 35%  $\text{MgCl}_2$ 溶液 (溫度 : 80°C)에서 飽和 카로멜 電極 (SCE)으로 測定한 自然電位の 結果이다.

이에 의하면 용접熱影響部の 電位가 母材의 電位보다 낮다. 이것은 용접熱사이클로 인한 銳敏化 현상으로서 粒界附近의 Cr 炭化物的 析出에 의해 不動態化가 어렵게 되기 때문이다.<sup>9)10)</sup>

따라서 Cr缺乏部の 自然電極電位の 卑化<sup>9)11)</sup>로 인하여 노치先端에서의 活性熔解가 加速됨으로 용접熱影響部の 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 進展 感受性を 母材에 비해 더욱 높이는 結果를 가져온 것으로 思料된다.

이들의 結果에 의하면 용접熱影響部가 母材에 비하여 軟化됨으로써 塑性變形이 쉽게 發生하여 노치先端의 腐蝕 活性化에 따른 두가지 중첩된 效果에 의해서 용접熱影響部가 母材보다 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 進展이 빠른 것으로 생각된다.

Photo. 3은 比抵抗 25  $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 腐蝕環境에서의 용접熱影響부와 母材에 대한 腐蝕疲勞龜裂 破面을 透視 電子현미경으로 觀察한 것이다.

이에 의하면 比抵抗 25  $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 環境에서 破面은 腐蝕된 樣相을 나타내고 있으며, 또한 母材보다 용접熱影響部가 더 많은 腐蝕破面을 보임과 동시에 더 넓은 軟性破面의 領域을 나타내고 있다.<sup>4)12)</sup>

#### 4. 結 論

腐蝕疲勞 試驗機를 사용하여 오오스테나이트系 스테인레스鋼 TIG 熔接部에 대한 腐蝕疲勞龜裂 進展 特性을 研究한 結果 다음과 같은 結果를 얻었다.

- (1) 母材 및 용접熱影響部の 腐蝕疲勞龜裂 初期 發生 感受性は 腐蝕環境의 比抵抗이 감소할 수록 증가하며, 母材보다 용접熱影響部の

感受성이 더 크게 나타났다.

- (2) 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 時의 電位는 比抵抗에 關係없이 一定하나 腐蝕疲勞龜裂 進展에 따른 電位는 比抵抗이 감소할 수록 급격히 卑化된다.
- (3) 熔接熱影響部의 腐蝕疲勞龜裂 進展은 母材에 비해 熔接熱사이클로 인한 軟화와 軟電位化 현상의 두가지 중첩된 效果에 의해 더욱 빨라진다.

### 參考文獻

1. 駒井謙治郎：腐食疲勞研究의 現狀と展望, 日本鐵と鋼, Vol. 61-7,8(1983).
2. 駒井謙治郎：應力腐食割れ及び腐食疲勞への破壞力學의 應用, 日本 溶接學會誌, Vol. 52-3,23(1983).
3. 木馬茂：防食工學, 日刊工業新聞社, 東京, p.186-187(1980).
4. 遠藤吉郎, 駒井謙治郎：金屬의 腐食疲勞と強度設計, 養賢堂, 東京, i-ii, p.19-21, 91(1982).
5. 向井喜彦：オーステナイト ステンレス鋼의 溶接部의 腐食, 日本溶接學會誌, Vol. 41-2, 41-51(1972).
6. 藤咲衝, 山本勝美：ステンレス鋼 溶接部의 代表的 腐食事例에 について, 日本溶接學會誌, Vol. 3-1, 218-219(1985).
7. 安藤柱, 小倉信和, 四岡 久：疲勞き裂近傍의 塑性學動とき裂傳ば速度의 結晶粒徑 依存性, 日本機械學會論文集, Vol. 44, 387-389(1979).
8. 渡邊正記, 向井喜彦：ステンレス鋼의 溶接, 日刊工業新聞社, 東京, pp. 12-13(1975).
9. 藤田輝夫：ステンレス鋼의 熱處理, 日刊工業新聞社, 東京, p. 119-121(1977).
10. 荒木透弓：鐵鋼의 溶接, 朝倉書店, 東京, p. 171(1976).
11. 日根交男：腐食工學의 概要, 化學同人, 東都, p. 91, 92, 103(1977).
12. M.E.Fine and R.O.Ritchie：Fatigue-Crack Initiation and Near-Threshold Crack Growth, Fatigue and Microstructure, ASM, Metals Park, Ohio, p. 216(1978).