

〈技術論文〉

人工海水中에서 軟鋼 熔接部の 表面龜裂 成長舉動

李宗基* · 鄭世喜**

(1989年 10月 31日 接受)

Study on Surface Crack Propagation Behaviour of Mild Steel Weldment in Synthetic Sea Water

Jong Gi Lee and Se Hi Chung

Key Words : Heat Affected Zone(HAZ 熔接熱影響部), Post Weld Heat Treatment(PWHT 熔接後 熱處理), Corrosion Fatigue(腐蝕疲勞), Stress Intensity Factor Range(ΔK 應力擴大係數 範圍), Crack Growth Rate(dc/dN 龜裂成長率), Free Corrosion(自然腐蝕), Cathodic Protection(陰極防蝕), Electric Potential(電位), Reference Electrode(基準電極)

Abstract

It was known that the fracture incidences of offshore structure were mostly originated from the surface defects. Especially, in the case of the welded structures, since the welded region has some defects and incomplete beads which are apt to behave like the surface cracks, it has been necessary to evaluate the environmental effects on crack growth at HAZ for the design criterion of the offshore structures. Therefore, this study was conducted to investigate the surface crack growth behaviour at multi-pass HAZ for SWS41 steel under free corrosion and cathodic protection(-0.9V vs Ag/AgCl) conditions. The results are summarized as follows; (1) Crack growth rate of the as weld in air was faster than that of the parent and PWHT specimens over all ΔK range. (2) In free corrosion test, surface crack growth rate of the as welded was decreased in comparison with that of the parents. (3) In fatigue test under cathodic protection, cathodic electric potential(-0.9V vs Ag/AgCl) for the SWS41 steel parent was effective, while for the as welded ineffective. (4) There was a tendency that the exponent(m) of the Paris' equation was decreased in order of microhardness magnitude in air and under cathodic protection conditions and vice versa in free corrosion. (5) Fracture surface has dimples and ductile striations in air test, but transgranular cracks and brittle striations under cathodic protection test.

1. 序 論

船舶, 海底石油 窟鑿裝置, 海洋 플랫폼, 비 해

*正會員, 全北産業大學 機械工學科

**正會員, 全北大學 工科大學 精密機械工學科

底 파이프라인 등의 海洋構造物은 苛酷한 環境에서 使用되기 때문에 構造物의 安定性和 強度를 評價함에 있어서 力學的 因子, 材料的 因子 및 環境的 因子를 考慮하여야 한다. 이러한 因子들은 相乘作用으로 腐蝕疲勞에 影響을 미치므로 어느 한 쪽만을 考慮하는 것은 適切하지 않다고 생각된다^(1~3).

또한 海洋構造物은 熔接에 의해서 製作되고 있으며 熔接部, 특히 熔接熱影響部(HAZ)는 熔接熱로 인한 材質의 變化와 殘留應力의 存在로 海水의 腐蝕에 敏感하기 때문에 이 部分에 對한 腐蝕強度의 評價는 대단히 重要한 問題로 擡頭되고 있다^(4,5).

또한 海洋構造物의 熔接 施工過程에서 熔接部의 缺陷 또는 熔接後 熱處理(PWHT)의 結果로 熔接熱影響部의 粗大域에 發生한 再熱龜裂이 表面龜裂의 形態로 存在하는 것이 普遍的이기 때문에 海水中에서 表面龜裂의 成長舉動을 把握하는 것이 아주 重要하다.

그러나 깊이방향 龜裂길이의 正確한 測定이 어렵고 應力擴大係數에 對한 理論的 解析을 行하는 것이 어려우므로 이 分野에 對한 研究가 行하여지지 않은 實情이다⁽⁶⁾.

따라서 本 研究에서는 人工海水中에서 SWS41鋼 熔接部의 表面에 存在하는 表面龜裂이 어떠한 成長舉動을 하는지 알아보기 위하여 鋼 熔接熱影響部에 半橢圓 노치를 加工한 後, 純粹압힘 反復荷重을 加하여 空氣中의 疲勞試驗, 人工海水中의 自然腐蝕 및 防蝕試驗을 實施하여 龜裂의 成長舉動을 破壞力學 및 電氣化學的인 面에서 解析하고자 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 實驗材料 및 試驗片 加工

本 實驗에 使用된 材料는 一般的으로 海洋構造物의 製作에 使用되는 板 두께 25mm의 SWS41 鋼板으로 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1과 같다.

疲勞 및 腐蝕疲勞試驗을 위한 熔接試驗片을 採取하기 위하여 鋼板을 200mm×350mm의 小板으로 切斷한 後 熔接을 行하기 위하여 壓延方向과 直角으로 깊이 20mm의 45° 톱날형 홈을 機械加工하였다. 노치부를 아세톤으로 닦아낸 다음 表面의 濕氣除去, 熔接線의 改善 및 延性 등을 좋게하기 위하여 200°C⁽⁷⁾까지 豫熱을 한 後 自動潛弧熔接機를 使用하여 Table 2에 表示한 條件으로 熔接을 實施하였다.

熔接後熱處理의 試片을 얻기 爲하여 熔接後熱處理는 650°C⁽⁸⁾까지 自動溫度調節器를 使用하여 加熱하였고 加熱速度 220°C/hr로 熱處理 維持時間은 1/4 時間, 10時間의 두 種類⁽⁹⁾로 行하였으며 熱處理를 行한 後 爐冷시켰다. 熔接 및 熱處理後의 鋼板을

Table 1 Chemical composition and mechanical properties for SWS41 steel

(a) Chemical composition (wt%)

| C | Si | Mn | P | S |
|------|------|------|-------|-------|
| 0.19 | 0.06 | 0.64 | 0.012 | 0.014 |

(b) Mechanical properties

| Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) |
|----------------------|------------------------|----------------|
| 260 | 423 | 42.4 |

Table 2 Welding condition

| Heat input (KJ/cm) | Preheating temperature (°C) | Current (A) | Voltage (V) | Welding speed (cm/min) | Wire diameter (mm) |
|--------------------|-----------------------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------|
| 30 | 200 | 700 | 35 | 49 | 4.0 |

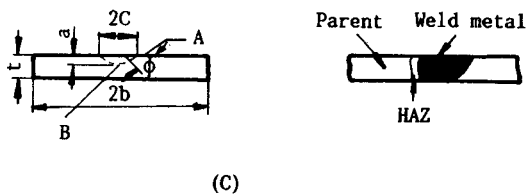
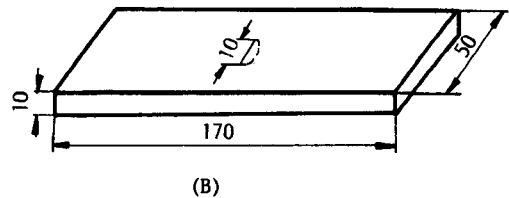
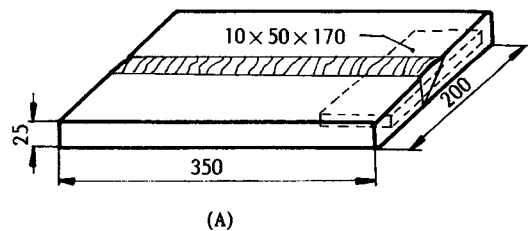


Fig. 1 Welding plate configuration and specimen dimensions for fatigue test

所定の 크기로 切斷한 後 2% nital溶液으로 腐蝕하여 熔接組織을 確認한 다음 Fig. 1과 같은 치수로 機械加工하였다. 노치는 壓延方向과 直角이 되도록 HAZ의 粗大한 結晶域에 두께 0.14mm cut-off wheel를 使用하여서 ASTM E740⁽¹⁰⁾에 의거 깊이방향 1mm, 表面方向 10mm의 形狀을 가진 半橢圓 노치를 만들었다.

2.2 實驗裝置 및 方法

本 實驗에 使用된 試驗機는 25톤型 electro-hydraulic testing machine으로서 實驗裝置의 概略圖는 Fig. 2와 같다.

空氣 및 海水中에서 疲勞試驗은 25±2°C의 溫度에서 1/6Hz 正弦波形式으로 實施하였고 應力比는 0.1이었다.

疲勞壽命에 대한 表面거칠기의 影響을 減少시키기 爲하여 #1200 에머리페이퍼로 研磨한 다음 ASTM E647⁽¹¹⁾에 의거하여 荷重減少法으로 豫備의 疲勞龜裂을 만들었다.

龜裂成長舉動을 觀察하기 爲하여 實驗中에 周波數를 變化시켜 beach mark가 만들어진 破面으로부터 龜裂길이를 測定하였다. 腐蝕 및 防蝕試驗의 環境은 ASTM D1141⁽¹²⁾方法에 의거하여 製造된 人工海水中으로 PH는 8.2이었으며 大氣開放狀態에서 腐蝕疲勞試驗을 實施하였다. 腐蝕槽와 貯藏탱크

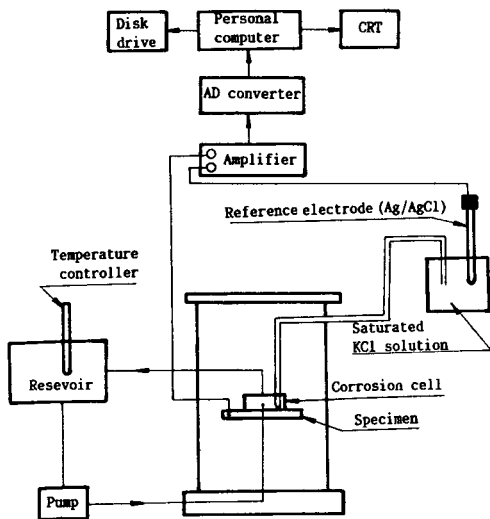


Fig. 2 Apparatus for corrosion fatigue test in synthetic sea water

사이에 펌프를 設置하여 腐蝕液의 循環流量을 600 ml/min로 維持하였으며 自動溫度調節器를 使用하여 탱크내의 溶液溫度를 一定하게 維持하였다.

陰極腐蝕下에서 腐蝕試驗의 實驗裝置는 Fig. 2와 同一하나 外部電源에 의하여 試驗片에 防蝕電流를 흐르게 하는 것만이 다르고, 電氣化學的 測定과 制御는 Ag/AgCl 基準電極(reference electrode)과 Pt 對極(counter electrode)을 設定하여 定電壓裝置(potential-stat)로 行하였다. 이 때의 防蝕電位는 -0.9V vs Ag/AgCl⁽¹³⁾로 維持하였다.

2.3 各 試驗片의 材料特性把握을 위한 試驗

表面龜裂 成長舉動을 解析하기 위한 材料特性 把握試驗으로서 硬度, 熔接部의 殘留應力 및 模擬 試驗片에 의한 自然腐蝕電位를 腐蝕時間의 經過에 따라 測定하였다.

(1) 硬度試驗

熔接 및 PWHT로 因한 熔接熱影響部의 機械的 性質의 變化는 各 試驗材料의 硬度值로써 比較하였다. 硬度值는 龜裂進展의 經路인 熔融線 近處의 HAZ를 對象으로 10點 以上 測定하여서 그 平均値를 求하였다. 硬度測定은 微小硬度計를 使用하였으며 測定荷重은 200gf으로 硬度測定의 結果는 Table 3과 같다.

Table 3 Micro vickers hardness value of HAZ

| Parent | 1/4hr PWHT | 10hr PWHT | As welded |
|--------|------------|-----------|-----------|
| 162 | 178 | 168 | 185 |

(2) 殘留應力の 測定

疲勞試驗에 提供된 熔接鋼板의 殘留應力을 測定하기 爲하여 熔接材의 殘留應力 測定部位를 #600 에머리페이퍼로 研磨한 다음 스트레인게이지를 接着하고 應力弛緩法에 의해서 殘留應力을 測定하였다. 本 測定에는 multi-point digital strainmeter DPU101를 利用하였고 使用된 스트레인 게이지는 게이지 抵抗 120Ω, 게이지 係數 2.07이며, 이를 10mm 간격으로 熔接線의 方向과 熔接線의 直角方向에 따라 T形을 1組로 하여 熔着金屬, HAZ, 母材部位에 附着시켜 殘留應力을 測定한 結果는 Fig. 3과 같다.

(3) 電氣化學的 自然腐蝕 電位測定

腐蝕液內 金屬表面은 環境依存性을 갖고 있는 電

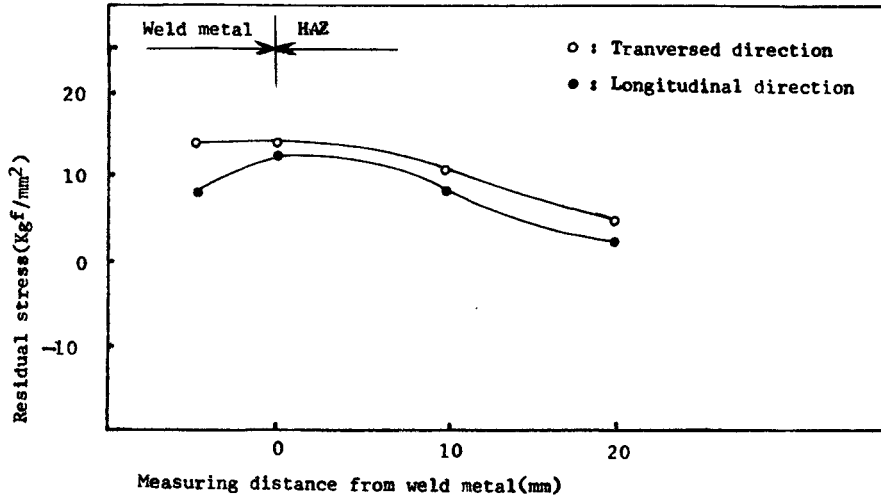
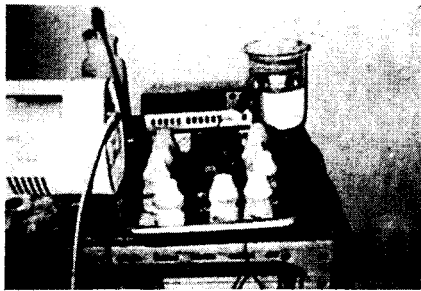


Fig. 3 Distribution of residual stress on welded block surface for SWS41 steel



Photograph for electric potential measurement.

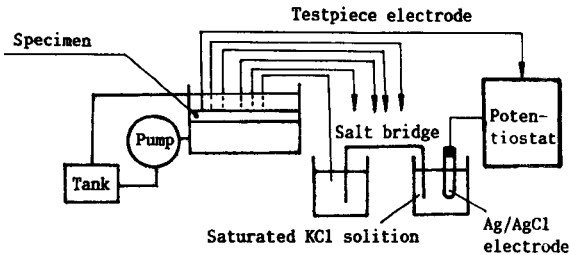


Fig. 4 Schematic diagram for electric potential measurement at crack tip

位 및 腐蝕生成皮膜의 安定性에 의하여 腐蝕 反應 速度가 다르게 나타난다. 本 實驗에서의 自然腐蝕 電位測定은 腐蝕疲勞試驗에 提供된 材料의 母材와 熔接材의 HAZ를 對象으로 Fig. 4와 같은 裝置를

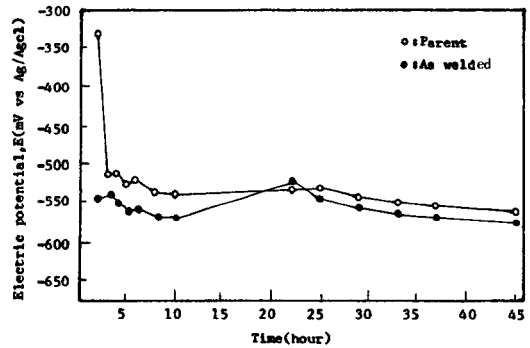


Fig. 5 Potential change vs elapsed time at each region of Parent and Weld HAZ

使用하여 腐蝕電位를 測定하였다. 試驗環境은 大氣 開放狀態의 人工海水中으로 循環流量은 50ml/min 로 一定하게 維持하였으며 各 試驗片의 電位測定 結果는 Fig. 5와 같다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 龜裂成長量과 荷重反復數의 關係

Fig. 6(a)와 (b)는 空氣中 純粹금屬하에서 表面龜裂을 갖는 試驗片에 反復荷重을 加했을 때 表面 및 깊이방향의 龜裂成長量과 荷重反復數의 關係를 試驗環境에 따라 考察한 實驗 結果이다.

Fig. 6(a)에서는 表面方向의 龜裂成長量(c)이 反復 荷重數의 增加와 더불어 서서히 增加하고 있다가

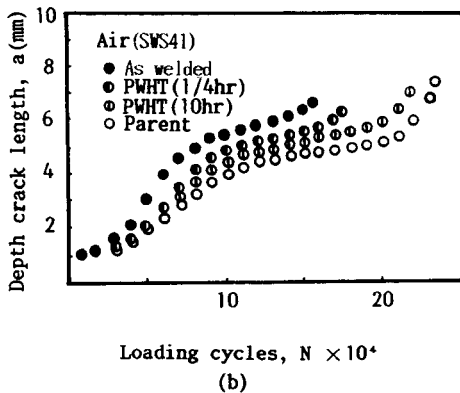
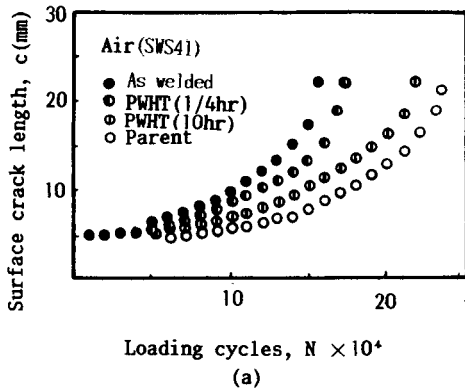


Fig. 6 Surface and depth crack length vs number of loading cycle for SWS41 specimens in air

어떤 荷重反復數에서는 龜裂成長量이 急増하는 現象을 보이고 있다. 한편 깊이 방향의 龜裂成長量(a)과 荷重反復數의 關係를 Fig. 6(b)에 나타냈으며 表面方向 龜裂成長의 舉動과는 아주 다른 樣相을 보이고 있다. 여기서 龜裂길이 1.2~5mm 사이에서 龜裂成長量이 急増하다가 5mm 部近에서부터는 龜裂成長量的 增加가 鈍化하는 現象을 보이고 있다.

이것은 純粹금屬 狀態下에서의 應力分布의 特性 때문이다. 空氣中에서 疲勞壽命은 母材가 가장 길고 PWHT材, 熔接材順으로 짧아지고 있으며 이것은 熔接材에 殘存하는 引張殘留應力, 機械的 性質, 組織의 變化 때문이라 判斷된다⁽¹⁴⁾.

Fig. 7(a)와 (b)는 人工海水中에서 SWS41鋼의 腐蝕疲勞試驗의 結果로서 空氣中의 疲勞試驗과 比較하여 疲勞壽命이 아주 짧게 나타나고 있다. 人工海水中 疲勞壽命의 順序는 空氣中의 順序와 反對로 熔接材가 疲勞壽命이 길고 母材가 짧게 나타나고

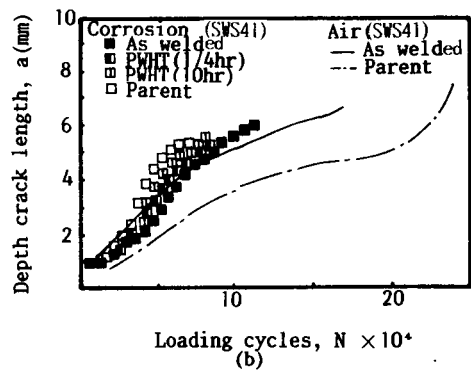
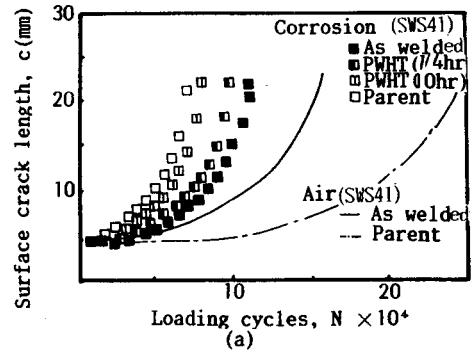


Fig. 7 Surface and depth crack length vs number of loading cycles for SWS41 specimens in synthetic sea water

있는데 다음과 같은 두 가지 理由로 判斷된다. 첫째는 人工海水中에서 延性이 豊富한 母材는 龜裂先端이 슬립帶의 形成이 容易함으로 슬립으로 因한 新生面이 電氣化學的 活性域으로 되기 때문에 溶解反應으로 龜裂成長이 加速된다⁽⁶⁾.

둘째는 熔接材의 HAZ가 母材보다 腐蝕電位가 낮기 때문에 腐蝕作用에 의한 腐蝕生成物의 龜裂 단형현상으로 龜裂成長이 늦어진다고 報告⁽¹⁵⁾되고 있다.

Fig. 8은 SWS41鋼을 $-0.9V$ vs $Ag/AgCl$ 의 電位로 陰極防蝕을 行하였을 때 腐蝕疲勞試驗한 結果이다. 이 그림은 空氣中의 各 組織에 對한 SWS41鋼의 疲勞壽命의 順序와 같으나 自然腐蝕 疲勞試驗時 疲勞壽命의 順序와는 反對로 나타나고 있다. 이것은 防蝕下에서 腐蝕生成物이 發生하지 않았으므로 龜裂단형을 招來하지 않았기 때문으로 判斷되며 母材의 경우는 自然腐蝕보다 防蝕下의 龜裂成長率

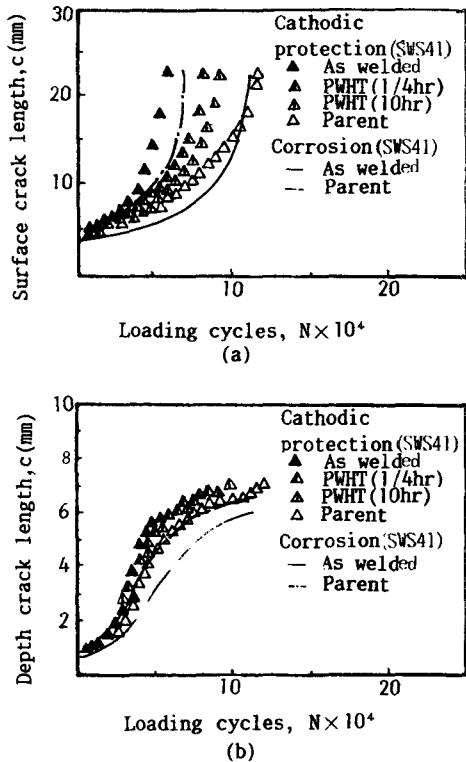


Fig. 8 Surface and depth crack length vs number of loading cycles for SWS41 specimens in cathodic protection

이 減少하는 現象을 나타내고 있다.

3.2 龜裂成長率과 應力擴大係數範圍의 關係

3次元 龜裂인 表面龜裂을 갖는 有限平板이 引張 및 굽힘하중을 받을 때 Newman과 Raju⁽¹⁶⁾는 有限要素法을 使用하여 龜裂先端의 應力擴大係數에 對한 式을 다음과 같이 樹立하였다.

$$K = (\sigma_t + H \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \cdot F\left(\frac{a}{t}, \frac{c}{b}, \frac{a}{c}, \phi\right) \tag{1}$$

여기에서 $0 \leq \frac{a}{t} < 1.0$, $0 < \frac{a}{c} \leq 1.0$, $\frac{c}{b} < 0.5$, $0 < \phi \leq \pi$ 일 때 윗식이 滿足되며 Q는 形狀係數이다. 式(1)에서 H와 F는 引張應力과 굽힘應力이 作用할 때 修正係數로서 a/t , c/b , a/c , ϕ 의 函數이며 式(1)를 純粹 굽힘 狀態에서 整理하면 다음과 같다.

$$\Delta K = \frac{3L}{bt^2} \cdot H (P_{max} - P_{min}) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

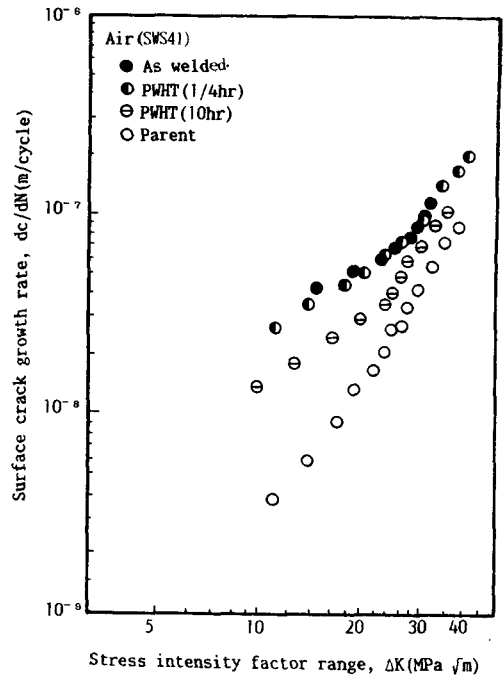


Fig. 9 Relationship between surface crack growth rate and stress intensity factor range for SWS41 specimens in air

$$F\left(\frac{a}{t}, \frac{c}{b}, \frac{a}{c}, \phi\right) \tag{2}$$

여기서 P_{max} : 最大荷重

P_{min} : 最小荷重

L : 試驗片의 支持點과 荷重作用點 사이의 거리

修正係數 (H)의 變數中에서 離心角 (ϕ)이 0° 과 $\pi/2$ 인 龜裂先端에서의 應力擴大係數가 最大值와 最小値를 나타내고 있으므로 $0^\circ < \phi < \pi/2$ 에서의 應力擴大係數를 考慮할 必要가 無다고 생각된다. 따라서 最深點인 $\phi = \pi/2$ 에서는 應力擴大係數範圍에 對한 龜裂成長率의 關係가 散布되어 있었으므로 Paris 方程式으로 表現이 困難하여서 除外하였으며 表面方向인 $\phi = 0^\circ$ 에서만 應力擴大係數範圍 (ΔK)와 龜裂成長率 (dc/dN)의 關係를 7點 増分多項式法으로 求하였다.

Fig. 9는 表面方向에서 SWS41鋼의 空氣中 龜裂成長舉動을 나타낸 것이다. 母材의 龜裂成長率이 熔接材, PWHT材와 比較하여 가장 작게 나타나고 있는데, 이것은 龜裂先端에서 塑性域의 形成이 容

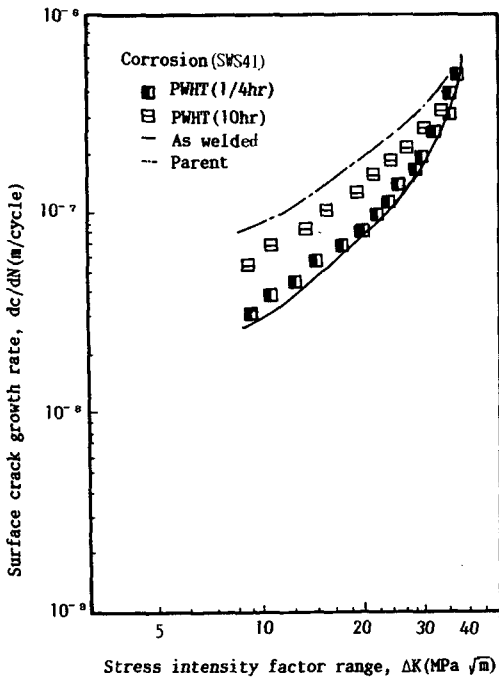


Fig. 10 Effect of holding time during PWHT on fatigue crack growth rate in synthetic sea water

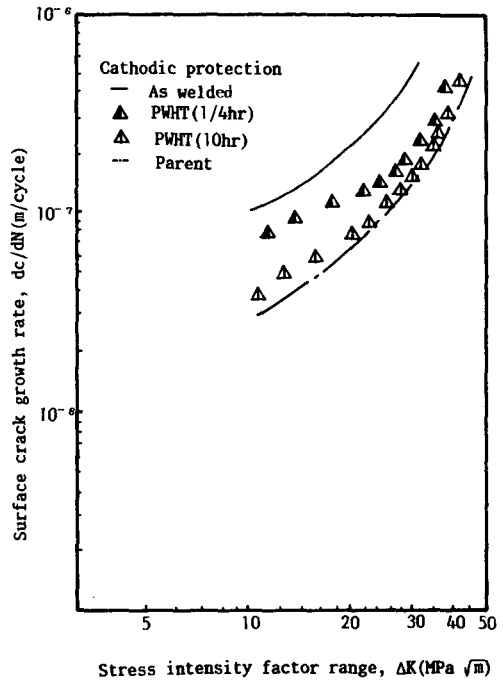


Fig. 11 Effect of cathodic protection(-0.9V vs Ag/AgCl) on fatigue crack growth rate of SWS41 specimens in synthetic sea water

易함으로 塑性誘起 균열단립현상으로 因하여 龜裂成長이 늦어지고, 熔接材의 경우는 引張殘留應力의 影響으로 龜裂成長이 加速된 것으로 판단되며 村上⁽¹⁷⁾ 등의 研究結果와 一致하고 있다. 熱處理材는 PWHT 維持時間에 따라 殘留應力의 解放을 가져오기 때문에 熔接材의 龜裂成長率이 減少하고 있다.

Fig. 10은 人工海水中에서 SWS41鋼의 母材, 熱處理材 및 熔接材의 表面龜裂成長率을 나타낸 것으로 空氣中の 舉動과는 다르게 母材보다 熔接材의 龜裂成長率이 減少하고 있다. 이러한 原因은 熔接材보다 母材의 硬度值가 작고 延性이 豊富하기 때문에 슬립帶의 形成이 容易함으로 人工海水에 敏感하여 龜裂이 加速된다.

Fig. 11은 陰極防蝕下의 人工海水에 對한 SWS41鋼의 腐蝕疲勞舉動을 나타낸 것으로서 母材, 熱處理材, 熔接材의 順으로 龜裂成長率이 크게 나타나고 있다. 여기서 母材보다 熔接材의 龜裂成長率이 크게 나타나고 있는 것은 첫째, 母材의 自然腐蝕電位가 熔接材의 것보다 높으므로 防蝕電位에 의한 Ca^{+2} , Mg^{+2} 을 含有하는 白色의 防蝕生成物이 發

生하기 때문에 龜裂 단립현상으로 龜裂成長率이 늦어지며, 둘째는 熔接材에 存在하는 引張殘留應力의 影響으로 判斷된다⁽¹⁸⁾. 또한 PWHT材는 熱處理維持時間이 길어짐에 따라 母材의 成長舉動에 接近하고 있다.

Fig. 12는 陰極防蝕下의 腐蝕疲勞舉動을 自然腐蝕狀態의 舉動과 比較를 行한 것으로 應力擴大係數範圍와 龜裂成長率의 關係를 나타낸 것이다. 熔接材의 경우에 空氣中の 腐蝕疲勞龜裂成長率은 自然腐蝕龜裂成長率보다 약간 작은 값을 나타내고 있으나, 陰極防蝕의 경우에는 龜裂成長率이 $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 $2 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, 自然腐蝕時에는 $7.4 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 로서 自然腐蝕中の 것보다 防蝕時의 腐蝕疲勞 龜裂成長率이 約 2.7배가 빠르다. 이것은 熔接材가 母材의 硬度보다 크고 組織이 不均一함으로서 防蝕時의 發生水素를 吸着하는 것이 容易하여서 龜裂成長率에 影響을 미친다고 판단된다. 熔接材의 경우는 防蝕效果가 없었으나 母材의 경우에 防蝕效果가 나타나고 있는 理由로서는 첫째, 熔接材가 母材보다 硬度가 크고 組織이 不均一함으로

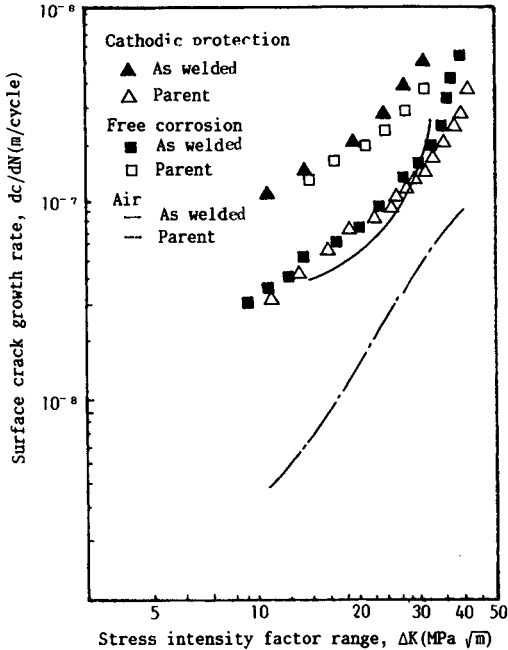


Fig. 12 Relationship between surface crack growth rate and stress intensity factor range for SWS41 specimens in cathodic protection, free corrosion and air

Table 4 Constant and exponent values of Paris' equation for SWS41 steel in air and synthetic sea water

| Condition | Environment | A | m |
|------------|--|------------------------|------|
| As welded | Air | 1.94×10^{-9} | 2.0 |
| 1/4hr PWHT | Air | 5.12×10^{-10} | 2.3 |
| 10hr PWHT | Air | 1.95×10^{-11} | 2.4 |
| Parent | Air | 8.43×10^{-12} | 3.0 |
| As welded | Synthetic sea water | 1.1×10^{-9} | 2.22 |
| 1/4hr PWHT | | 1.82×10^{-9} | 2.2 |
| 10hr PWHT | | 3×10^{-9} | 2.0 |
| Parent | " | 9.28×10^{-9} | 1.93 |
| As welded | Cathodic Protection (-0.9V vs Ag/AgCl) | 2.24×10^{-7} | 1.70 |
| 1/4hr PWHT | | 1.23×10^{-6} | 1.74 |
| 10hr PWHT | | 1.09×10^{-7} | 1.76 |
| Parent | " | 4.85×10^{-8} | 1.83 |

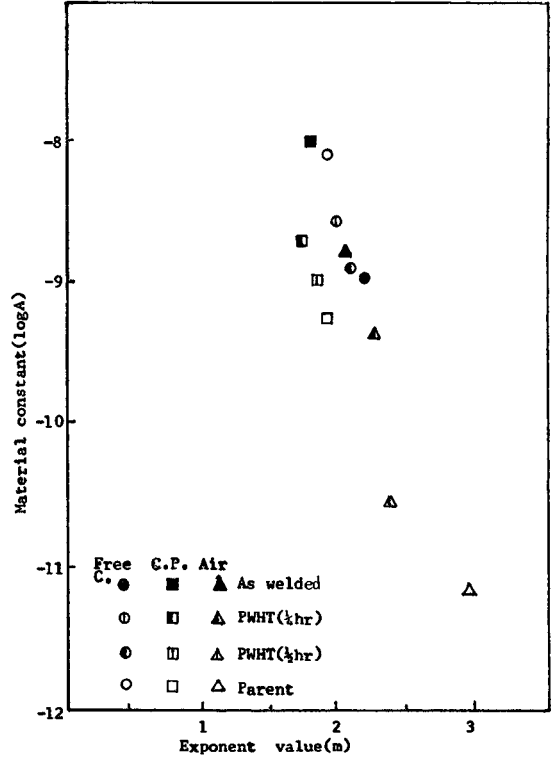


Fig. 13 Exponent vs material constant of Paris' equation for corrosion fatigue in synthetic sea water

水素脆化에 敏感하며, 둘째는 母材는 熔接材보다 延性이 豊富하고 過防蝕으로 因하여 생긴 防蝕生成物이 龜裂단합현상을 招來하기 때문에 熔接材보다 母材의 龜裂成長率이 늦어진다고 판단된다.

Table 4는 龜裂이 安定하게 成長하는 $\Delta K = 20 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 을 택하여 Paris 方程式 $dc/dN = A (\Delta K)^m$ 에⁽¹⁹⁾ 適用하였을 때 常數 A와 指數 m를 구한 結果이며 Fig. 13에 나타냈다. 空氣中の 疲勞試驗 및 防蝕試驗時에는 硬度的 增加와 더불어 m의 값이 減少하고 있는 것은 Gurney⁽²⁰⁾ 등의 研究 結果와 一致하고 있다. 그러나 自然腐蝕 疲勞試驗의 경우에는 m의 값이 오히려 增加하는 現象을 나타내고 있으며, 이 原因은 腐蝕生成物로 인한 龜裂 단합현상으로 판단된다.

3.3 破斷面 觀察

空氣中の 疲勞試驗 및 人工海水中的 腐蝕疲勞試驗에서 龜裂成長學動을 解析하기 위하여 走査電子

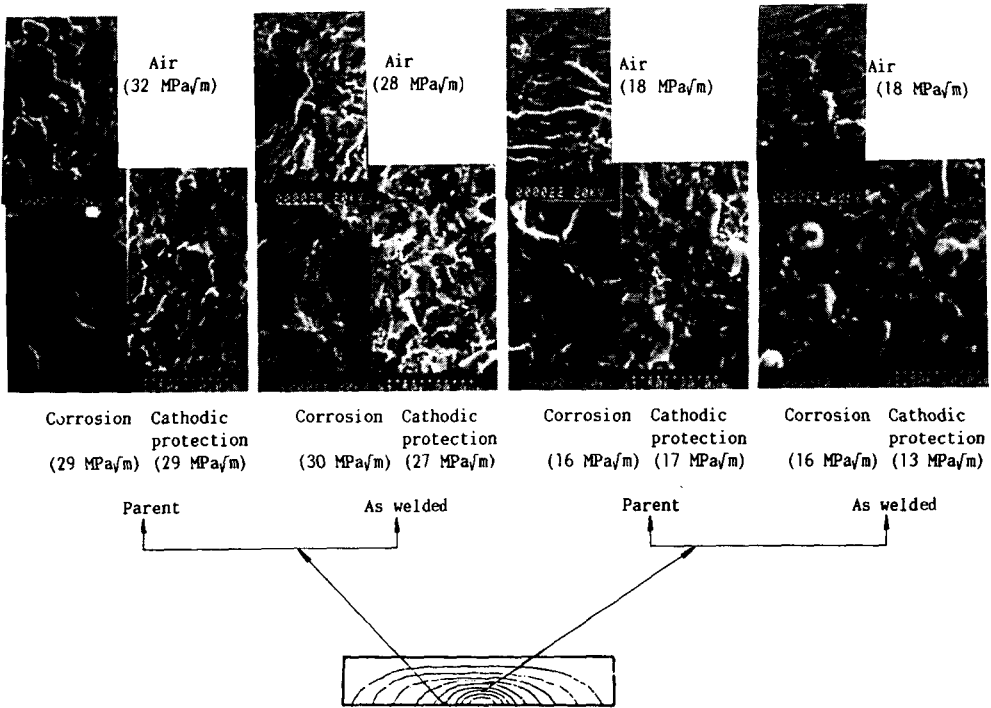


Fig. 14 Fractograph of fatigue specimens for SWS41 steel in free corrosion and cathodic protection

顯微鏡(SEM)을 사용하여 疲勞破斷面의 觀察을 行하였다. 自然腐蝕 및 防蝕狀態에서의 試驗片은 生成物로 因하여 破斷面의 特徵觀察이 어려웠으므로 生成物의 除去를 위하여 電解方法을 使用하였으며 電解質은 5%의 H_2SO_4 水溶液에 0.2%의 有機物 抑制劑를 만들었고 使用電壓은 $0.2V/cm^2$ 로 維持 하였다.

- Fig. 14는 空氣와 人工海水中에서 SWS41鋼의 破斷面을 나타낸 것으로서 空氣中의 母材破斷面은 약간의 덩플과 延性 스트라이에이션을 갖는 破面으로 粒內龜裂이 混在하고 있다. 自然腐蝕狀態의 破面은 腐蝕生成物의 存在로 因하여 破面의 特徵을 認識하기는 어려웠으나, 破面의 一部에는 孔蝕現像이 나타나 있다. 熔接材의 경우는 自然腐蝕電位가 낮기 때문에 破面上에 腐蝕生成物이 많이 存在하고 孔蝕現像도 母材보다 심하게 나타나고 있다. 또한 熔接材의 경우는 粒內龜裂보다 粒界龜裂이 많이 存在하며 脆性的인 스트라이에이션을 나타내고 있다. 防蝕下에서 試驗片의 破斷面은 대부분의 粒界龜裂을 갖고 있으며 防蝕生成物도 母材보다 熔接材가 많이 存在한다.

4. 結 論

空氣 및 人工海水中에서 鋼 熔接部에 存在하는 表面龜裂이 어떠한 成長舉動을 하는지 알아보기 위하여 SWS41鋼의 熔接材 및 PWHT된 HAZ를 對象으로 疲勞 및 腐蝕疲勞를 試驗한 結果는 다음과 같다.

(1) 空氣中에서 引張殘留應力을 갖는 熔接材의 龜裂成長率은 全 應力擴大係數 範圍에서 母材와 熔接後熱處理의 것보다 크다.

(2) 自然腐蝕 疲勞試驗에서 自然腐蝕電位 및 材料의 微視組織의 影響으로 熔接材의 表面龜裂 成長率은 母材의 것보다 크다.

(3) 防蝕下의 疲勞試驗에서 $-0.9V$ vs $Ag/AgCl$ 의 陰極防蝕電位는 母材에 대하여 效果의이나 熔接材에 있어서는 效果가 없다.

(4) 空氣 및 陰極防蝕下에서는 硬度 크기의 順으로 Paris 方程式의 指數(m)가 減少하며 自然腐蝕下에서는 增加한다.

(5) 空氣中 疲勞試驗의 破面은 덩플과 延性 줄무

너를 가지나, 陰極防蝕下의 疲勞破面은 粒界龜裂과 脆性 줄무늬를 나타내고 있다.

參 考 文 獻

- (1) 角田方衡, 1986, “海洋構造物用強力材料의 疲勞特性에 關する 研究”, 島律科學機器ニコス, Vol. 27, No. 5, 10.
- (2) Sprowls, D.O. and Brown, R.H., 1978, “Pro. of Ohio State Conf. on Fundamental Aspects of SCC”, NACE. 67.
- (3) Copper, T.D., 1978, “Fatigue in Machine and Structure”, ASM, Materials Science Seminar.
- (4) 成田岡郎, 1980, “熔接構造物의 品質確保と熔接施工管理”, 日本熔接學會誌, Vol. 49, No. 7, pp. 7~12.
- (5) 飯田, 1976, 日本造船學會誌, 第569號, pp. 545~551.
- (6) 岡村弘え, 高野太刀雄, 1987, “3次元腐蝕疲勞き裂進展特性”, 鐵鋼の環境強度部會 第3回 シンポジウム 前刷集, pp. 204~218.
- (7) Lancaster, J.F., Metallurgy of Welding, pp. 70~73.
- (8) ASTM, Boiler Pressure Vessel UCS-56, p. 138.
- (9) 林載奎, 1984, “Cr-Mo鋼 熔接熱影響部의 環境靱性에 미치는 熔接後熱處理의 影響”, 全北大學校 博士學位 論文, pp. 35~47.
- (10) “Fracture Testing with Surface Crack Tension Specimens”, ASTM E 740.
- (11) “Tentative Test Method for Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-6} m/Cycle”, Annual Book of ASTM, E647.
- (12) “Standard Specification for Substitute Ocean Water”, ASTM D1141 75.
- (13) 壺子哲雄, 高橋秀明, 帝藤幹男等, 1987, “低ひずみ速度試驗特性”, 鐵鋼の環境強度部會, 第3回 シンポジウム 前刷集, pp. 96~104.
- (14) 鄭世喜, 林載奎, 李宗基, 1988, “鋼熔接部의 表面龜裂 成長舉動에 關한 研究(1)”, 大韓熔接學會誌, 第6卷, 第2號.
- (15) Cullen, W., Gabetta, G. and Hanninen, H., 1985, “NUREG/CR 4422, MEA 2078, RF, R5, pp. 1~11.
- (16) Newman, J.C. Jr. and Raju. I.S., 1979, “Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension and Bending Loads”, NASA TP 1578.
- (17) 村上理一, 秋園幸一, 1984, “高張力鋼係數의 疲勞き裂成長速度に及ぼす引張および壓縮殘留應力ならびに應力比の影響”, 日本材料學會誌, 第34卷, 第377號, pp. 68~73.
- (18) 驅井謙治郎, 箕弘二, 金貴植, 1987, “人工海水中における80キ口級高張力鋼熔接材の腐蝕疲勞き裂發生舉動”, 日本材料學會論文集, 第36卷, 第401號, pp. 141~146.
- (19) Paris, P.C., Erdogan, F., 1963, Trans. ASME, D85, 528.
- (20) Gurney, T.R., 1968, Weld ienst. Res. Report, E. 18/12/68.