

SS41鋼의 腐蝕疲勞龜裂 成長舉動에 미치는 海洋環境因子の 影響(Ⅱ) (모서리 龜裂의 形狀比와 破壞面積成長速度를 中心으로)

金 垣 寧* · 林 鍾 汶** · 林 祐 助***
韓國海洋大學 商船學部 機關學科*
浦項專門大學 自動車科**
釜山水產大學校 工科學 機械工學科***

The Influence of Marine Environmental Factor on the Corrosion Fatigue Crack Growth Behaviour of SS41 Steel(Ⅱ) (About aspect ratio and fracture surface area growth rate)

Won-Yeong Kim* · Jong-Moon Lim** · Uh-Joh Lim***
*Dept. of Marine Eng., Korea Maritime University**
*Dept. of Automobile Pohang College***
*Dept. of Mechanical Eng. National Fisheries University of Pusan****

Corrosion fatigue test was performed by the use of plane bending fatigue tester in air and marine environment (25 and 500Ωcm).

The purpose of this study is to investigate the effects of marine environmental factor on the corner crack propagation behaviour of SS41 steel by corrosion fatigue.

The main results obtained are as follows:

1. The aspect variation of the corner crack growing under each environment can be estimated according to the following equation:

$$b/a = \kappa - \tau \cdot b/t$$

where

a : crack length

b : crack depth

t : specimen thickness

κ, τ : experimental constants

2. The values of aspect ratio, b/a of corner crack in air is larger than that in natural sea water.
3. The fracture surface area propagation rate, dA/dN in natural sea water (25Ωcm) is faster than that in air.
4. The propagation rate of fracture surface area is more useful to estimate the corner crack growth rate by corrosion fatigue comparing with that of surface crack.

I. 序 論

海岸都市 및 海岸道路에서 運行되고 있는 自動車와 海洋中에서 運航되고 있는 船舶 그리고 海洋構造物 等은 海洋霧圍氣中の 海鹽因子에 의해 腐蝕作用이 일어나고,^{1, 2)} 이들 構造物은 여러가지 形態의 振動과 荷重 및 外力에 의한 反復의인 應力을 많이 받으므로써 腐蝕疲勞現象에 의해 海鹽因子가 없는 環境에서 보다 疲勞強度가 현저하게 低下한다.^{3~7)}

그러므로 各種 金屬構造物은 각각의 使用環境 아래서 長時間에 걸쳐 充分한 安全性을 確保하기 위해서는 材料強度에 미치는 腐蝕環境效果의 解明과 環境強度 設計基準의 확립이 實질히 要求되고 있다.^{8, 9)}

이러한 要求에 대하여 海洋霧圍氣中에서 鐵鋼材料를 중심으로 하여 腐蝕疲勞環境에 관한 多數의 研究가 오래전부터 行하여져 왔으나 이들의 研究는 主로 海水中이나 人工海水中에서 引張, 壓縮荷重에 의한 貫通龜裂과 回轉 굽힘 腐蝕疲勞試驗에 의한 腐蝕疲勞龜裂 成長舉動에 관한 實驗·報告^{10~14)}에 局限된 것으로서 船舶, 航空機, 自動車, 橋梁 및 海洋構造物 等の 疲勞破壞에 있어서 더욱 중요하다고 생각되는 平面굽힘荷重에 의한 表面龜裂 및 龜裂깊이에 미치는 腐蝕環境因子의 影響에 관한 研究는 몇 편의 研究結果에도 불구하고, 腐蝕疲勞龜裂 成長舉動이 충분히 밝혀져 있지 않다.^{15~17)}

이와 같은 觀점에서 低炭素 含有量으로 우수한 溶接性和 加工性등으로 인해서 一般機械構造物, 船舶 및 海洋構造物 等に 鐵鋼材料中에서 가장 광범위하게 사용되고 있는 SS41鋼^{18, 19)}을 空氣중과 海洋環境中에서 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗을 行하여 腐蝕感受性, 表面龜裂깊이와 龜裂깊이의 成長速度에 미치는 腐蝕의 影響을 前報(第1報)²⁰⁾에서 檢討하였다. 그러나 모서리 龜裂의 形狀比와 破壞面積의 成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響에 대해서는 밝혀져 있지 않다.

따라서 本 研究는 天然海水의 比抵抗을 變化시킨

腐蝕溶液中에서 SS41鋼의 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗을 行하여 平滑平板材의 腐蝕疲勞破壞舉動을 觀察, 調查하였다.

이 實驗의 結果로 부터 腐蝕環境의 變化에 따른 모서리 龜裂의 表面龜裂깊이와 龜裂깊이에 미치는 腐蝕의 影響을 究明하고, 表面龜裂成長速度와 破面面積成長速度에 대한 應力擴大係數範圍값과의 相關關係를 考察함으로써 海鹽因子가 존재하는 海洋霧圍氣中에서 사용되는 SS41鋼材의 腐蝕疲勞破壞에 대한 基礎設計資料로서 寄與하고자 한다.

II. 試驗片 및 實驗方法

試驗片 및 實驗方法은 前報(第1輯)와 같다. 다시 간략하게 설명하면 다음과 같다.

2.1 試驗片

本 實驗에 사용한 試驗材料는 一般構造物 壓延鋼材(SS41)로 그 化學的 成分과 機械的 特性을 Table. 1과 같다.

이와 같은 板材로 부터 切取하여 제작한 試驗片 및 노치(notch)의 形狀은 Fig. 1에 보인다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material

| | | | | | |
|------------------------------|---|------|---------------------------------------|-------|----------------|
| Chemical composition (Wt. %) | C | Si | Mn | P | S |
| | 0.115 | 0.29 | 0.59 | 0.015 | 0.011 |
| Mechanical properties | Tensile strength (kgf/mm ²) | | Yield strength (kgf/mm ²) | | Elongation (%) |
| | 42.4 | | 25.8 | | 32 |

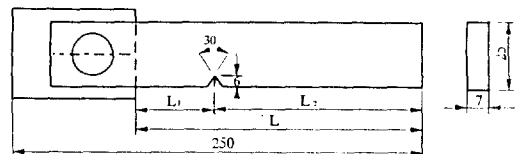


Fig. 1 Dimension of test specimen(mm)

그리고 試驗片 形狀의 노치 先端에 있어서 應力 擴大係數範圍(stress intensity factor range) ΔK 값은 Kawahara 등이 提示한 다음 式으로 計算하였다.²¹⁾

$$\Delta K = 1/2 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (1)$$

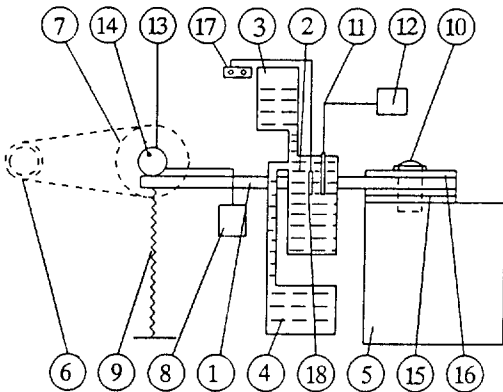
여기서, $\Delta \sigma$: 굽힘 應力 振幅(kgf/mm²)

a : 表面 龜裂 길이(mm)

2.2 實驗裝置

本 實驗에 使用한 偏心輪式 定變位 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗機의 全體 系統圖는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 腐蝕疲勞試驗機에 板狀 試驗片의 一端은 釘개로 덮어 볼트로 고정하고 自由端은 偏心輪의 回轉에 의하여 平面굽힘 反復應力을 받게 하였다.

Fig. 3은 反復應力 波形을 나타내 보인 것이고, 應力比 R - 0으로 一定하게 維持하였다.



- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Specimen | 10. Adjusting nut |
| 2. Corrosion cell | 11. Electrode |
| 3. Feed water tank | 12. Conductivity meter |
| 4. Drain water tank | 13. Eccentric cam |
| 5. Bed | 14. Shaft |
| 6. Motor | 15. Liner |
| 7. Pulley | 16. Cover plate |
| 8. Counter meter | 17. Potentiometer |
| 9. Spring | 18. Reference electrode |

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

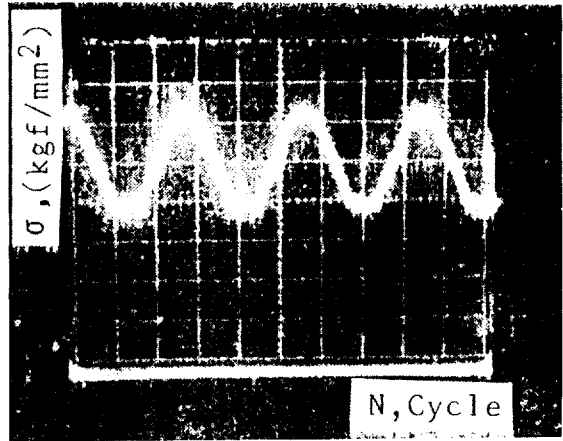


Fig. 3 Stress wave form(stress ratio, R=0)

2.3 實驗方法

腐蝕環境槽는 플라스틱으로 製作하였으며 腐蝕溶液으로는 比抵抗값 ρ를 25(天然海水) 및 5000Ωcm로 각각 固定시키고, 實驗中의 水溫은 室內溫度로 維持하였다. 이때 實驗中의 腐蝕溶液은 Cl이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 위하여 시간당 4ℓ의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 影響을 除去하기 위하여 순환회로 配管에 絶緣性 필터를 使用하였다.

Photo. 1은 空氣中에서 두께 t = 7mm인 平滑平板材의 片側貫通 노치로 부터 平面굽힘 反復荷重에 의해 龜裂이 成長된 疲勞破面의 비치마크를 나타낸 것이고, 여기서 비치마크는 實驗中 人工的으로 挿入한 것이다.

表面龜裂成長길이는 一定하게 反復荷重을 가한 後 20배의 移動式 顯微鏡으로 測定하였으며, 각각의 環境中에서 實驗한 後, 破面의 비치마크를 顯微鏡



Photo. 1 Beach marks of fracture surface in air

으로 表面龜裂길이 a 에 대한 두께 t 방향의 龜裂깊이 b 를 龜裂初期段階로 부터 破斷까지 測定하였다.

Ⅲ. 結果 및 考察

3.1 龜裂成長의 形狀變化

前報에서 發表한 腐蝕疲勞에 의한 片側貫通노치로부터 龜裂傳播된 四分橢圓形 모서리龜裂進展의 破壞面積形狀을 Fig. 4에 보이고 있다.

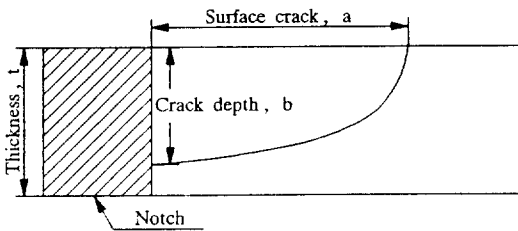


Fig. 4 Corner crack growth of Quarter elliptical

이와같은 四分橢圓形의 모서리 龜裂成長에 있어서 形狀變化를 考察하기위해, 空氣中과 比抵抗값 ρ 가 25 및 5000 Ωcm 인 腐蝕溶液中에서 表面龜裂길이 a 와 龜裂깊이 b 와의 比인 形狀比(Aspect ratio) b/a 값에 대한 應力反復回數 N 와의 關係를 정리하여 나타내면 Fig. 5와 같다.

이 結果에 의하면 모든 環境條件에 있어서 모서리 龜裂의 形狀比 b/a 는 낮은 應力反復荷重에 있어서 높은 값을 가지고, 또 形狀比 b/a 는 空氣中보다 天然海水中에서 더 빨리 나타나고 있다. 그리고 모서리 龜裂의 形狀比 b/a 는 應力反復回數 N 가 增加함으로써 空氣中에서나 腐蝕霧圍氣中에서 거의 直線적으로 減少하는 傾向이다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 環境條件下에서 表面龜裂길이 a 와 龜裂깊이 b 와의 比인 形狀比(Aspect ratio) b/a 값에 대한 龜裂깊이 b 와 試驗片 두께 t 와의 比 b/t 값과의 關係를 나타낸 것이다.

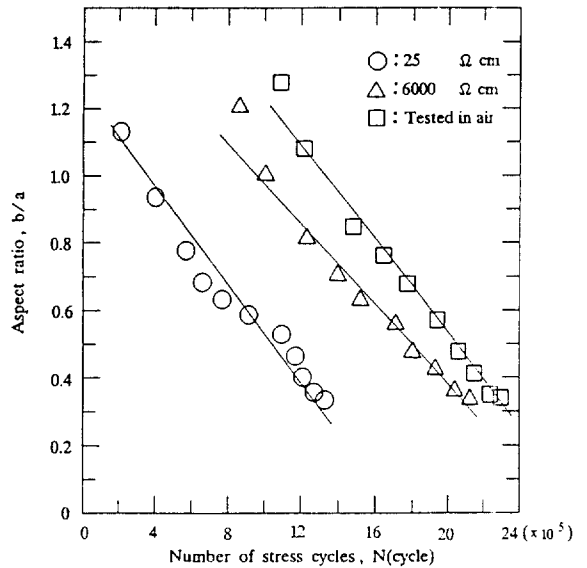


Fig. 5 Aspect ratio of corner crack vs number of stress cycles in air and marine environment

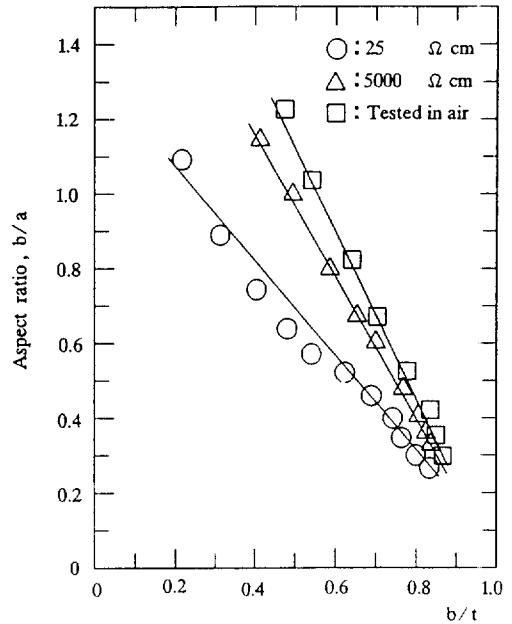


Fig. 6 Shape of corner crack by corrosion fatigue in air and marine environment

이에 의하면 形狀比(Asspect ratio) b/a 와 b/t 와 의 關係는 각각의 環境條件中에서 다음과 같은 相關關係가 있다.²²⁾

$$b/a = \kappa - \gamma(b/t) \dots\dots\dots(2)$$

단, κ, γ : 實驗常數

그리고 天然海水中에서 形狀比 b/a 의 기울기는 空氣中에서 보다 더 작아지고, 空氣中의 b/a 값은 天然海水中보다 더 큰 값을 나타내는 傾向을 보이고 있다. 이러한 傾向은 腐蝕環境條件에 따라서 모서리 龜裂의 形狀比 b/a 에 미치는 腐蝕의 影響이 크게 作用하고 있음을 알 수 있다.

3·2 腐蝕疲勞破面の 面積成長舉動에 미치는 環境條件의 影響

Fig. 7은 空氣中과 比抵抗값 ρ 가 25 및 5000 Ω cm인 腐蝕溶液中에서의 應力反復回數 N 에 대하여 表面 龜裂길이 a 와 龜裂깊이 b 의 成長舉動을 나타낸 것이다.

이 結果는 이미 前報(第1報)에서 考察된 것으로 각 環境條件이 變化함에 따라 表面 龜裂길이와 龜裂

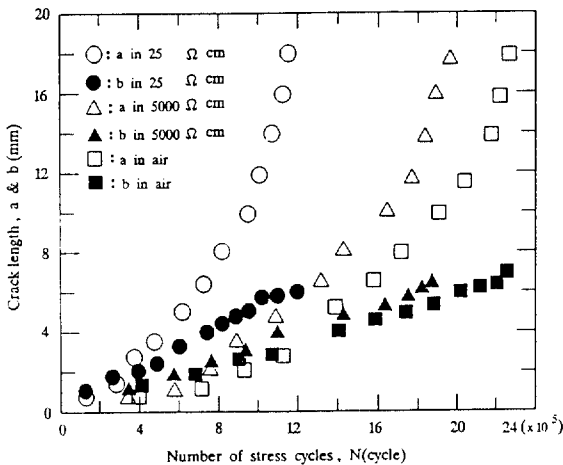


Fig. 7 Surface crack length and crack depth vs number of stress cycles in air and merine environment

깊이의 成長舉動은 각각 다른 傾向을 보이고 있다

Fig. 5~7에서 보인 바와 같이 環境條件이 變化함에 따라서 應力反復回數에 대한 表面 龜裂길이와 龜裂깊이가 進展되는 形狀이 서로 다른 樣相을 나타내고 있다.

이와같은 모서리 龜裂의 非貫通 龜裂과 貫通 龜裂의 表面 龜裂成長에 따른 破面成長을 比較하기 위해서 Fig. 8의 (A), (B)에 나타내 보인 것이고, 下部의 화살표는 龜裂成長方向을 나타낸 것이다.

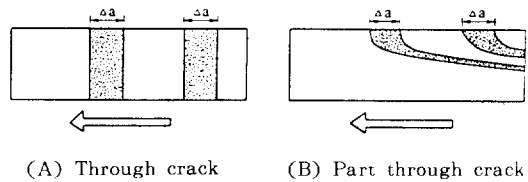


Fig. 8 Comparision of fracture surface growth rate of through and part through crack by corrosion fatigue

여기서 初期의 表面 龜裂成長길이 Δa 만큼 進展하였을 때와 일정한 길이로 進展한 後 같은 表面 龜裂成長길이 Δa 만큼 成長하였을 때의 증가된 破壞面의 面積을 比較해 보면, (A)의 貫通 龜裂인 경우는 破面이 一定하게 증가하나 (B)의 四分橢圓形 모서리 龜裂의 경우에는 表面 龜裂成長과 더불어 증가된 破面의 面積은 일정치 않고²³⁾, 특히 각각의 環境條件下에서 表面 龜裂成長길이 Δa 만큼 進展하였을 때의 증가된 破壞面의 面積은 龜裂깊이의 成長이 腐蝕環境條件에 따라서 다르기 때문에 더욱 일정치 않음을 알 수 있다.

따라서 疲勞破壞의 斷面減少率의 建지에서 생각하면, 非貫通 龜裂인 모서리 龜裂의 疲勞 龜裂 成長舉動을 考察함에 있어서는 應力反復回數(N)에 對한 破面面積(A)의 關係를 究明함이 타당하며²⁴⁾ 특히 Fig. 5, 6에서 보인바와 같이 腐蝕環境條件이 變化함에 따른 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 成長舉動을 考察함에 있어서 破面面積(A)의 成長舉動

을 究明함이 더욱 필요하다고 생각된다.

Fig. 9는 각각의 環境條件下에서 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 破面面積에 대한 應力反復回數와의 關係를 整理하여 보인 것이다. 여기서 모서리龜裂의 破面形狀은 Fig. 4와 같이 四分橢圓形이므로, 表面龜裂길이와 龜裂깊이와의 關係를 이용하여 腐蝕疲勞 破壞面의 面積을 다음과 같이 구하였다.

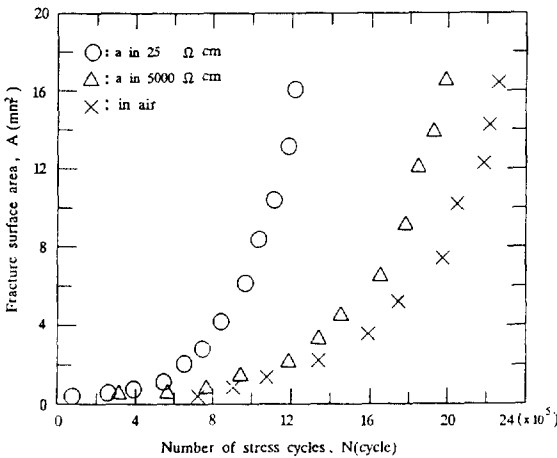


Fig. 9 Relation between fracture surface area rate and Number of stress cycles in air and marine environment

$$A = 1/4\pi ab \dots\dots\dots(3)$$

여기서 a : 表面龜裂길이(Surface crack length)

b : 龜裂깊이(Crack depth)

이 結果에 의하면 龜裂成長初期에는 環境條件의 變化에 關係없이 거의 일정한 破壞面積의 成長을 나타내지만 應力反復回數가 增加함에 따라서 破壞面積의 成長은 급격히 빨라지며 空氣中에서 보다 天然海水中에서의 破壞面積의 成長이 더욱 빨라지는 樣相이다. 이를 좀더 具體的으로 考察하면, 破面의 成長面積이 거의 일정한 약 10mm^2 에서의 應力反復回數는 空氣中에서보다 天然海水中에서 약 5×10^5 Cycle정도 더 빠르나, 破面面積 S가 급격히 빨라지는 약 40mm^2 에서의 應力反復回數 N치는 空氣中에서

보다 天然海水中에서 약 1×10^6 Cycle로 더 빨라지나 타남으로써 腐蝕影響因자의 變化에 따른 破壞面積의 成長이 급격하게 증가하고 있다. 따라서 天然海水中에서의 金屬構造物 部材의 斷面減少率이 크게 增加함에 따라서 疲勞強度와 疲勞壽命이 空氣中에서 보다 현저하게 低下함을 알 수 있다.

3.3 腐蝕疲勞에 의한 破面面積成長 速度 特性

疲勞 및 腐蝕疲勞 龜裂成長에 따른 成長速度를 구하기 위하여, Fig. 7과 9의 a-N曲線과 A-N曲線에서 각점의 기울기로 부터 表面龜裂成長速度 da/dN 와 破面面積成長速度 dA/dN 을 구하였다.

여기서 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 成長速度는 單位 應力反復回數에 대하여 成長한 龜裂길이와 破面面積의 증분량을 나타내며, 이를 計算하기 위해서는 ASTM에서 제시한 Point-to-point technique을 이용하였다.²⁵⁾

Fig. 10은 空氣中과 比抵抗값이 25 및 5000Ωcm인 腐蝕溶液中에서 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 破面面積 成長速度 dA/dN 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 天然海水中(25Ωcm)에서의 破面面積 成長速度 dA/dN 는 空氣中에서 보다 빨라지고 특히 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 낮은 領域下에서는 더욱 빨라지고 있다. 그리고 全 環境條件에서 龜裂初期段階를 제외한 破面面積成長速度 dA/dN 는 ΔK 값이 커짐에 따라서 직선적으로 빨라지고 있는 傾向을 나타내고 있으므로 Paris rule에 의해 材料常數 대신에 環境常數, 즉 實驗常數를 구할 수 있다.

여기서 破面面積成長速度 dA/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 相關係를 考察하기 위해, 다음과 같은 Paris rule을 적용하였다.^{26), 27)}

$$dA/dN = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots(4)$$

Table 2는 Fig. 9의 實驗值를 Paris rule에 의해 電算化한 實驗常數 C와 m값을 정리하여 보인 것

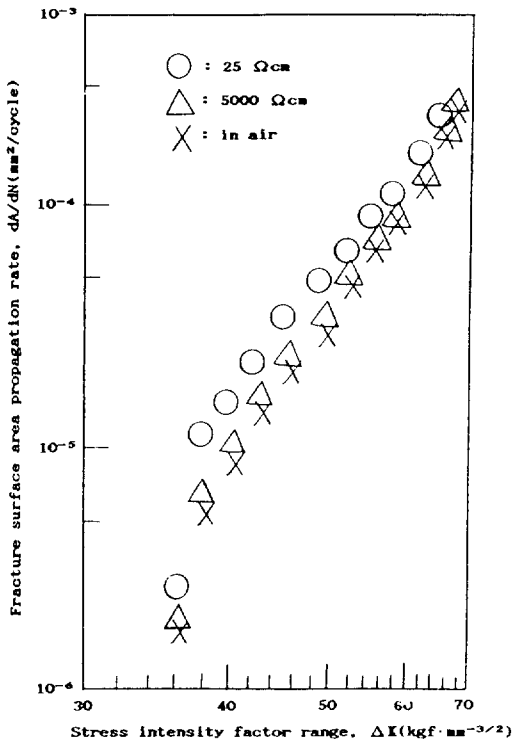


Fig. 10 Relation between fracture surface area propagation rate and stress intensity factor range in air and marine environment

Table 2. The experimental constants C and m of Paris rule for the propagation rate of fracture surface area [$dA/dN = C(\Delta K)^m$]

| Experimental constant | C | m |
|-----------------------|------------------------|------|
| Environment(Ωcm) | | |
| 25 | 1.40×10^{-13} | 5.12 |
| 5,000 | 6.23×10^{-14} | 5.23 |
| in air | 2.41×10^{-14} | 5.34 |

이다.

이 結果에 의하면 空氣中에서 보다 腐蝕性 霧圍 氣인 天然海水中에서의 實驗常數 C값은 커지고 있는데 비해 實驗常數(指數) m값은 작아지고 있는 樣相을 나타내고 있다.

또한 破面面積成長速度 dA/dN 와 應力擴大係數 範圍 ΔK 값의 相關關係와 表面龜裂成長速度 da/dN 와 ΔK 값의 相關係數를 比較 考察하기 위하여, Fig. 11에 空氣中과 比抵抗값이 25 및 5000Ωcm인 腐蝕溶液中에서 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂成長速度 da/dN 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 나타낸 것이다.

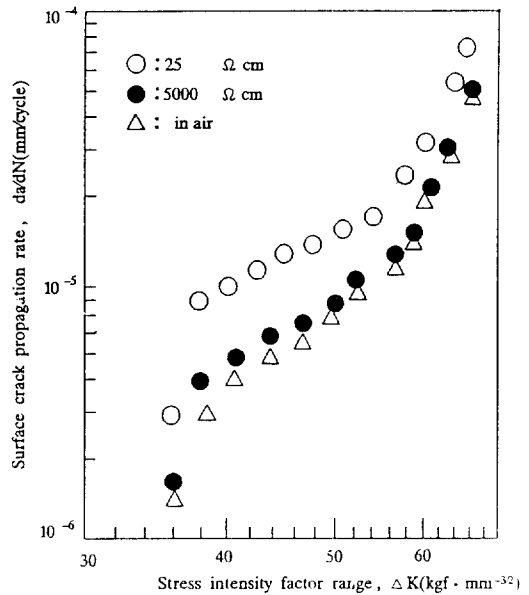


Fig. 11 Relation between surface crack propagation rate(da/dN) and stress intensity factor range, ΔK ($kgf \cdot mm^{-3/2}$) in air and marine environment

이에 의하면 腐蝕環境條件에 따른 表面龜裂成長速度 da/dN 와 ΔK 값과의 關係는 Fig. 10과 類似한 結果를 보이고 있으나 ΔK 값이 급격히 커지는 領域 III에서 腐蝕環境條件의 變化에 따른 表面龜裂進展速度 da/dN 의 차가 작으면서 급격히 빨라지고 있다. 그러나 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域 II에서는 環境條件의 變化에 따른 表面龜裂進展速度 da/dN 에 미치는 腐蝕의 影響은 크게 나타나고, 表面龜裂成長速度 da/dN 는 ΔK 값이 커짐에 따라서 직선적으로 빨라지고 있는 傾向을 나타내고 있

으므로 Paris rule에 의해 環境常數, 즉 實驗常數를 구할 수 있다.

Table. 3은 Fig. 10의 實驗值(領域 II)를 Paris rule에 의해 電算化한 實驗常數 C와 m값을 정리하여 보인 것이다.

Table 3. The experimental constants C and m of Paris rule for the propagation rate of surface crack length[$da/dN=C(\Delta K)^m$]

| Experimental constant | C | m |
|----------------------------|------------------------|------|
| Environment (Ωm) | | |
| 25 | 5.15×10^{-9} | 2.02 |
| 5,000 | 2.08×10^{-10} | 2.71 |
| in air | 9.39×10^{-12} | 3.48 |

이에 의하면 環境條件의 變化에 따른 實驗常數 C 및 m값은 Table 2와 類似한 傾向을 나타내고 있다.

그리고 Table 2, 3에 의하면 本 實驗에 있어서 Paris rule의 實驗常數 m값은 鐵鋼의 m값인 0.5~8의 範圍內에 있음을 알 수 있다.²⁶⁾ 이를 根據로 하여 Fig. 10과 11에서 Paris rule에 의해 考察하고자 할 때, Fig. 11의 경우는 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域 II에서만 Paris rule을 적용할 수 있으나 Fig. 10의 경우는 應力擴大係數範圍 ΔK 값의 거의 全領域에 걸쳐 Paris rule을 적용할 수 있다.

따라서 이미 Fig. 5, 6 및 8에서도 考察한 바와 같이 環境條件의 變化에 따른 모서리龜裂의 경우에 있어서 表面龜裂成長速度 da/dN 와 ΔK 값의 相關係數보다 破面面積成長速度 dA/dN 와 ΔK 값의 相關關係에 의해 評價함이 더 合理的임²⁹⁾을 알 수 있다.

IV. 結 論

平面굽힘 腐蝕疲勞試驗機를 사용하여 海洋環境變化가 SS41鋼材의 腐蝕疲勞龜裂成長舉動에 미치는

影響을 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 모서리 龜裝의 表面 龜裝길이 a, 表面龜裂 깊이 b 및 두께 t에 대한 形狀比(Asspect ratio) b/a 와 b/t 와의 關係는 각각의 環境條件中에서 다음과 같은 式에 의해 評價될 수 있다.

$$b/a = \kappa - \gamma(b/t)$$

단, κ, γ : 상수

2. 모서리 龜裂의 경우, 空氣中에서 形狀比, b/a 의 값은 天然海水中에서 보다 더 큰 값을 나타내고 있다.

3. 天然海水中(25 Ωm)의 破面面積成長速度 dA, dN 는 空氣中 보다 더욱 빨라지고 있다.

4. 腐植疲勞에 의한 모서리 龜裂의 경우, 表面龜裂成長速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 와의 相關係數에 의한 것보다 破面面積成長速度 dA, dN 와 ΔK 와의 相關關係에 의한 評價가 더 合理的이다.

참 고 문 헌

1. 榮 幸雄, 金屬材料, 10, 9, p.13(1970)
2. American Society for Metals: Metals Handbook, Vol.8, Mechanical Testing, p.403(1985)
3. 腐蝕防蝕協會, 金屬防蝕技術便覽, 機電研究社, p.169(1984)
4. Jaske, C.E., D. Broek, J.E. Stater, and W.E. Anderson, ASTM STP 642 p.19(1978)
5. 鈴木 揚之助, 防蝕技術, 32, 6, p.318(1983)
6. 益本 功 揚之助, 防蝕技術, 32, 6, p.318(1983)
7. T. Howard Rogers, Marine Corrosion, Great Britain, p.4(1968)
8. 駒井謙治郎, 日本溶接學會誌, Vol.61, No.7, p.8(1983)
9. 駒井謙治郎, 日本と鋼, Vol.61, No.7, p.8(1983)
10. H.C. Rhee and M. M. Salama, ASME Book, p.23(1988)

11. John J. Burke and Volker Weiss, Plenum press, p.41(1983)
12. Z.A. Forouli, the metallurgical society of AIME, p521(1983)
13. A.J. McEvily and R.W. Staehle, Corrosion fatigue, National association of corrosion Engineers, p.25. p.324(1972)
14. H.L. Craig, T.W. Crooker and D.W. Hoepfner, Corrosion fatigue technology. Lutherville timonium. Md., p.19(1978)
15. 田大熙, 金垣寧, 李義鎬, 韓國船用機關學會誌, Vol. 8, No.2, p39(1984)
16. 임우조, 김인철, 김백운, 한국부식학회지, Vol.18, No.1, p.49(1982)
17. 林祐助, 金秀炳, 李鎮烈, 韓國漁業技術學會誌, 25, 2, p.87(1989)
18. 吳世旭, 東亞大學校附設海洋資源研究所 研究報告誌, Vol.1, No.1, p.49(1988)
19. 鋼材俱樂部: 鋼製魚礁用組材標準仕様, p.14(1986)
20. 金垣寧, 林鍾文, 林祐助, 한국부식학회지, Vol.19, No.2 p. (1990)
21. 川原正言, 栗原正好, 日本造船學會 論文集, 137, p.297(1975)
22. 金永植, 金英鍾, 韓國船用機關學會誌, Vol.8, No. 1, p.49(1984)
23. 前掲書(22), p.56
24. 金永植, 趙相明, 大韓機械學會論文集, Vol.6, No. 3, p.232(1982)
25. ASTM E647-83, p.754(1983)
26. J.P. Gallagher and R.P. Wei, Corrosion fatigue NACE-2, p.408(1971)
27. W. W. Gerberich, R. H. Van stone and A.W. Gunderson, ASM, Metals park Ohio, p.65(1982)
28. Hideo Kindagawa, JSME75, p.1068(1972)
29. 前掲書(22), p.57