

SS41鋼의 腐蝕疲勞破壞에 미치는 海洋環境因자의 影響

金 垣 寧* · 林 鍾 汶**

The Influence of Marine Environmental Factor
on the Corrosion Fatigue Fracture of SS41 Steel

Won-Yeong Kim, Jong-Moon Lim

Abstract

Corrosion fatigue test was performed by the use of plane bending fatigue tester in marine environment having various specific resistance from 25(natural sea water) to 5000Ωcm.

It is in order to investigate the effects of marine environmental factor on the corrosion fatigue fracture of SS41 steel.

The main results obtained are as follows;

1. The aspect ratio (b/a) of corner crack growing in natural sea water is lower than that in air.
2. The surface crack growth rate (da/dN) in marine environment is faster than that in air and da/dN delays with the specific resistance increased.
3. The experimental constant m of paris rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$] decrease with the specific resistance decreased and the effect of corrosion in proportion to the specific resistance is more sensitive than that of stress intensity factor range (ΔK) under region II.
4. The accelerative factor (α) in marine environment is about 1.1~2.7 and α is increase under the low region of stress intensity factor range (ΔK).
5. The electrode potential (E_0) gets less noble potential with the specific resistance decreased.

1. 序 論

最近 産業의 發展에 따라 각종 自動車, 船舶 및

航空機 등의 運搬手段은 高速化되고 있는 추세에 따라 여러가지 형태의 振動과 荷重 및 外力에 의한 反復的인 應力을 많이 받을 수 있다.

(* 1990년 추계 학술대회에 발표된 연구논문임)

* 正會員, 韓國海洋大學 商船學部 機關學科

, ** 正會員, 浦項專門大學 自動車科

또한 海岸都市 및 海岸道路에서 運行되고 있는 自動車와 海洋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 일어나고¹⁾, 이들 構造物의 腐蝕要因은 海洋霧圍氣中の 電氣傳導度, 氣象, 鹽分濃度, pH, 溫度, 溶存酸素, 溶存이온, 汚染, 結露, 附着生物 및 流速 등에 依存하지만, 基本的인 腐蝕要因은 海水가 強電解質이므로 電池作用에 의한 것으로 평가되고 있다^{1,2)}.

이와같이 海洋霧圍氣 및 反復的인 荷重周波數로 인한 腐蝕疲勞現象이 金屬構造物 部材의 損傷 및 破壞에 重要한 因子가 되고 있으므로^{3,4,5)}, 각종 金屬構造物은 각각의 使用環境 아래서 장시간에 걸쳐 充分한 安全性을 확보하기 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 絶실히 要求되고 있다^{6,7)}.

이러한 要求에 대하여 海洋霧圍氣中에서 鐵鋼材料를 중심으로 하여 腐蝕疲勞破壞에 관한 多數의 研究가 오래전부터 行해져 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^{8,9)10)}에 局限된 것으로서 船舶, 航空機, 自動車, 橋梁 및 海洋構造物 等의 疲勞破壞에 있어서 더욱 重要하다고 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 充分히 밝혀져 있지 않다^{11,12)}.

한편, 低炭素 構造用鋼인 SS41鋼은 鐵鋼材料中에서 가장 광범위하게 사용되고 있다. 이 鋼은 低炭素 含有量으로 우수한 溶接性과 加工性 및 經濟性 등으로 인해서 一般機械構造物, 船舶 및 海洋構造物 등에 그 活用度가 높다^{13,14)}.

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로부터 比抵抗값의 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, 腐蝕疲勞龜裂 進展速度

를 空氣中の 疲勞龜裂 進展速度와 比較한 後, 龜裂進展速度에 미치는 腐蝕環境의 因子와 機械的 因子를 考察함과 동시에 加速係數를 定量的으로 구함으로써 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.

2. 試驗片 및 實驗方法

2-1. 試驗片

本 實驗에 사용된 試驗材料는 一般構造用 壓延鋼材(SS41)로서 그 化學的成分과 機械的 特性은 Table 1과 같다.

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

이와같은 板材로부터 切取하여 제작한 試驗片 및 노치(notch)의 形狀은 Fig.1에 보인다. 이러한 시험편은 그 길이 방향이 壓延方向과 동일하도록 제작하였다.

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 다음의 式으로 計算하였다¹⁵⁾.

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

여기서 $\Delta \sigma$: 굽힘 應力振幅(kgf/mm²)

a : 表面龜裂길이(mm)

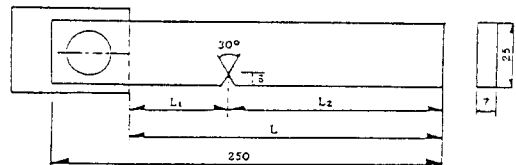


Fig. 1 Dimension of test specimen(mm)

한편 試驗片 表面은 사포 2000번까지 研磨한 後 아세톤으로 탈지하고, 試驗片 表面의 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 노치 先端을 제외한 試驗片 全表面을 투명한 에폭시 樹脂로 被覆 絶緣 시켰다.

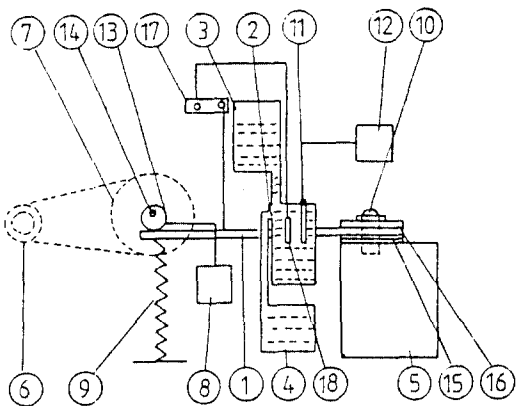
2-2 實驗裝置

本 實驗에 사용한 偏心輪式 定變位 平面압힘 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 덜개로 덜어 볼트로 고정하고 自由端은 偏心輪의 回轉이 依하여 平面압힘 反復應力을 받게 하였다.

平面압힘 應力은 電動機에 依해 구동되는 偏心輪에 依해 받으며, 應力反復回數는 폴리축에 연결된 카운터 미터(counter meter)로 測定하였다.

그리고 Fig.1과 Fig.2에 나타난 偏心輪의 偏心量, 固定端과 荷重點과의 길이(L)및 固定端과 노치와의 길이(L₁)를 變化시킴으로써 應力을 微細하게 調節할 수 있도록 하였으며, 이때 反復荷重의 速度는 모두 600rpm(f=10Hz)로 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.3은 反復應力波形을 나타내 보인 것이고, 應力比 R=0으로 一定하게 維持하였다.

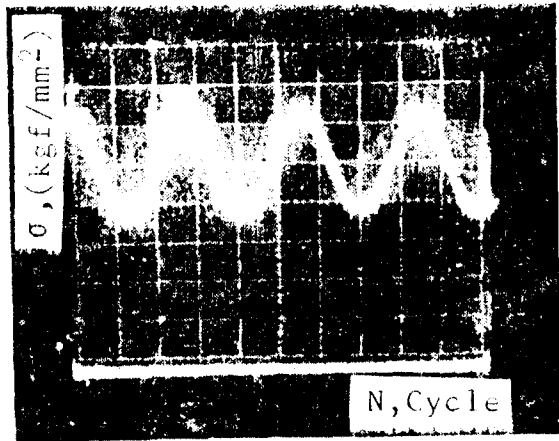


Fig. 3 Stress wave from stress ratio, R=0

2-3 實驗方法

腐蝕環境槽는 플라스틱으로 製作하였으며 腐蝕溶液으로는 天然海水에 蒸溜水를 소량씩 혼합하여 比抵抗 ρ를 각각 25(天然海水), 200, 1000 및 5000Ωcm되게 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 C1 이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 爲하여 시간당 4/의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕生成物에 依한 電氣化學的인 影響을 除去하기 爲하여 순환회로 配管에 絶緣性 필터를 使用하였다.

龜裂成長길이(crack growth length)는 一定한 反復荷重을 가한 後 20배의 移動式 顯微鏡으로 疲勞 및 腐蝕疲勞 龜裂初期段階로 부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 龜裂成長의 形狀變化에 미치는 腐蝕의 影響

Photo. 1의 (a)는 空氣中과 (b)는 比抵抗 25Ωcm인 天然海水中에서 두께 t=7mm인 平滑平板材의 片側貫通 노치로 부터 平面압힘 反復荷重에 依해 모서리龜裂이 成長되어진 疲勞와 腐蝕疲勞龜裂破壞까지의 破面에 대한 비치마크를 나타낸

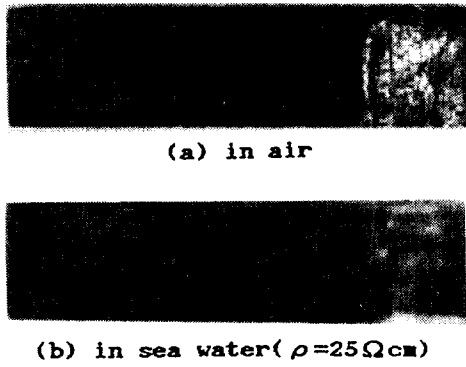


Photo. 1 Beach marks of fracture surface

것이며, 여기서 비치마크는 人工的으로 挿入한 것이다.

이에 의하면 Photo. 1의 (a)는 空氣中에서 모서리龜裂이 成長되어진 疲勞破面은 비치마크가 뚜렷하게 觀察되지만, Photo. 1의 (b)는 天然海水中에서 모서리龜裂이 成長되어진 腐蝕疲勞破面은 腐蝕生成物의 얇은 피막에 의해 變色(tranishing) 되어짐으로 인해서 最終 비치마크를 除外하고는 觀察이 어려울 정도이다.

Fig.4는 모서리龜裂이 成長되어진 疲勞와 腐蝕疲勞龜裂破壞까지의 破面에 대한 비치마크의 巨視的破面 樣相을 나타내 보이고 있다.

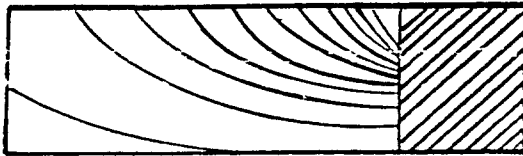


Fig. 4 Macrograph of beach marks of fracture surface

Photo. 1과 Fig.4에 의하면 平滑平面材의 平面 荷重 反復荷重에 의한 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 龜裂成長舉動은 片側貫通노치로부터 龜裂이 成長된 四分橢圓形의 모서리 龜裂進展特性을 나타내고 있다.

Fig.5는 四分橢圓形의 모서리龜裂成長에 있어서 形狀變化에 미치는 腐蝕의 影響을 具體的으로 考察하기 위해 表面龜裂길이 a 와 龜裂길이 b 와의 比인 形狀比 b/a 의 값에 대한 龜裂길이 b 와의 關係

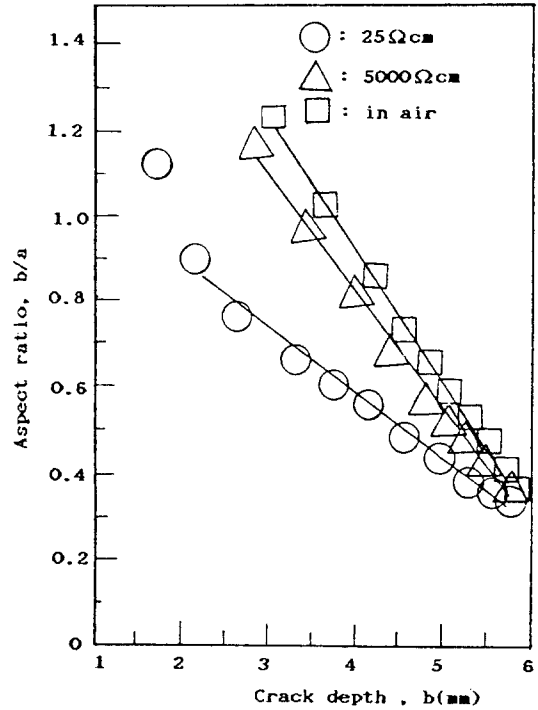


Fig. 5 Aspect ratio of corner crack vs crack depth in air and various specific resistance

를 정리하여 나타낸 것이다.

이 結果에 의하면, 모서리 龜裂의 形狀比는 空氣中에서 보다 오히려 腐蝕溶液中에서 낮아지고, 특히 比抵抗값 $25\Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서 가장 낮게 나타나고 있다. 그리고 龜裂길이의 成長初期에 있어서 形狀比는 크게 나타나지만 龜裂길이가 成長되면서 形狀比는 減少하는 傾向을 보이고 있다.

Fig.6은 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長에 있어서 一定한 表面龜裂길이에 대한 龜裂길이의 成長에 미치는 腐蝕의 影響을 直接 比較 考察하기 위해 나타낸 것이다.

이에 의하면 一定한 表面龜裂길이의 成長에 대한 龜裂길이의 成長은 空氣中에서 가장 길게 進展되었으며 腐蝕環境의 比抵抗값이 낮을수록 遲延되고 比抵抗값이 $25\Omega\text{cm}$ 인 天然海水에서 가장 늦은 傾向을 보이고 있다.

이와 같이 腐蝕溶液中에서 一定한 表面龜裂길이에 비해 龜裂길이의 成長이 空氣中에서 보다 遲延되는 理由는 腐蝕溶液中에서의 表面龜裂先端은 最

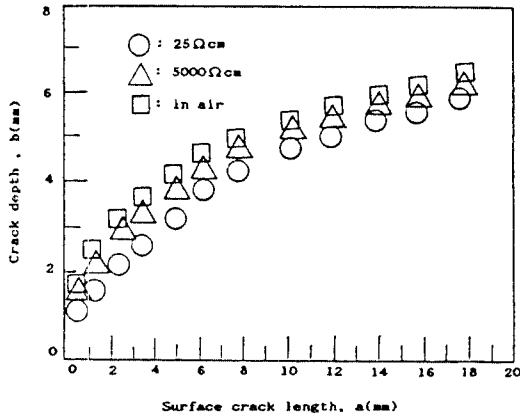


Fig. 6 Relation between surface crack length and crack depth in air and various specific resistance

大 平面均質 應力이 부가될 때에는 引張應力에 의한 應力腐蝕과 같이 陽極活性化 腐蝕作用에 의해 表面龜裂成長이 빨라지나, 두께 l방향으로는 龜裂 길이의 先端에 腐蝕成長物이 부착함으로써 陽極活性化 腐蝕이 抑制되기 때문인 것으로 생각된다⁶⁾.

3.2 腐蝕疲勞龜裂 進展速度와 應力擴大 係數範圍(ΔK)의 關係

Fig.7은 空氣中과 腐蝕環境中의 比抵抗값 變化에 따른 腐蝕疲勞龜裂 進展速度 da/dN 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 나타낸 것이다. 여기서 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 單位應力反復回數에 대하여 成長한 龜裂 길이의 증분량을 나타내며, 이를 計算하기 위해서는 ASTM에서 제시한 포인트 對 포인트 技法(Point-to-point technique)을 이용하였다¹⁶⁾.

이에 의하면 比抵抗값 ρ 가 25 Ω cm인 天然海水中에서 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 가장 빠르고, 比抵抗값이 높아질수록 表面龜裂 進展速度는 遲延되고 있으며, 空氣中에서 疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 가장 크게 遲延되었다.

그리고 龜裂初期의 應力擴大係數範圍 ΔK 값에 있어서 擬下限界應力擴大係數範圍(Quasi threshold stress intensity factor range) ΔK_{th} 와 같은 樣相은 本 實驗의 試驗片에 疲勞노치로 부터 反復荷重을 附加한 것이 아니고, V노치를 加工하여 實驗함으로써 노치 先端에 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의

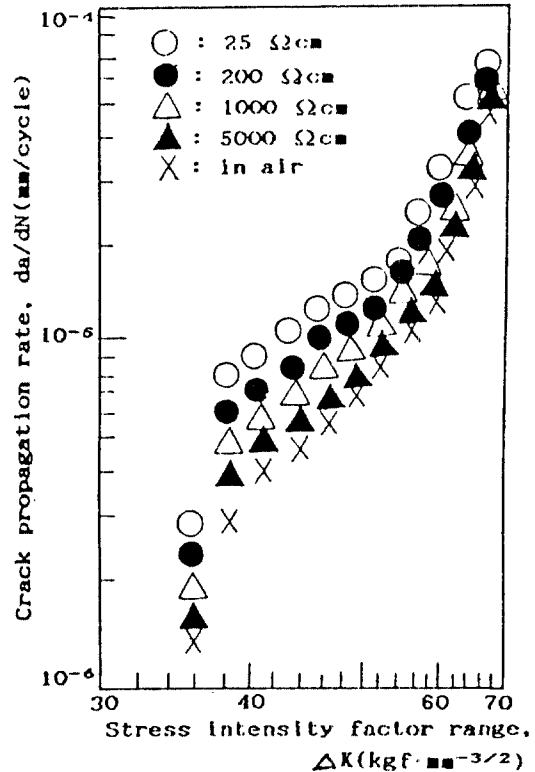


Fig. 7 Relation between crack propagation rate and stress intensity factor in various specific resistance

한 龜裂이 發生하기 까지의 潛伏期間의 現象이라 思料된다.

應力擴大係數範圍 ΔK 값이 급격히 커지는 領域 III에서는 腐蝕環境의 比抵抗값이 變化함에 따른 각각의 比抵抗값에서의 表面龜裂進展速度는 큰 차이가 나타나지 않지만 全 環境에 걸쳐 급격히 빨라지고 있다. 그러나 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域 II에서는 比抵抗값의 變化로 인해서 表面龜裂進展速度에 미치는 影響은 크게 나타나고 있다.

따라서 SS41鋼材만 實驗하였으므로 Paris rule에 의해 材料常數 대신에 環境常數, 즉 實驗常數를 領域 II에서 구할 수 있다.

여기서 腐蝕疲勞龜裂 進展速度 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^{17,18)}

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

Table 2는 Fig.3의 領域 II의 實驗值를 Paris rule에 의해 電算化한 實驗常數 C 와 m 값을 정리하여 보인 것이다.

Table 2 The experimental constants C and m of Paris rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$] for SS41 steel

Experimental constant Environment (Ω cm)	C	m
25	5.15×10^{-9}	2.12
200	5.88×10^{-10}	2.15
1,000	4.77×10^{-10}	2.54
5,000	2.08×10^{-10}	2.71
in air	9.39×10^{-12}	3.48

이 結果에 의하면 領域II에서는 空氣中 보다 腐蝕性 霧圍氣인 모든 比抵抗中의 實驗常數 C 값은 커지고 있는데 비해 實驗常數 m 값은 작아지고 있는 樣相을 나타내고 있다. 그리고 腐蝕環境의 比抵抗값이 減少할수록 實驗常數 C 의 값은 2.08×10^{-10} 으로 부터 5.15×10^{-9} 으로 커지고 m 의 값은 2.71로부터 2.02로 작아지면서 表面龜裂 進展速度는 빨라지는 傾向을 보이고, 本實驗에 있어서 Paris rule의 實驗常數 m 값은 鐵鋼의 m 값인 0.5~8의 範圍內에 있음을 알 수 있다¹⁹⁾.

Fig.8은 table 2의 比抵抗값 25 및 5000 Ω cm의 實驗常數 C 및 m 값을 Paris rule에 代入하여 計算한 수치를 이용하여 領域 II에 表面龜裂進展速度 da/dN 에 대한 應力擴大計數範圍 ΔK 값과 關係를 나타낸 것이다. 이에 의하면 實驗常數 m 값이 가장 작은 25 Ω cm(天然海水)에서의 表面龜裂進展速度 da/dN 는 應力擴大係數範圍 ΔK 값의 機械的인 影響 보다 腐蝕의 影響이 더 민감해지고 있다. 그러나 實驗常數 m 값이 가장 크게 되는 5000 Ω cm에서의 表面龜裂進展速度 da/dN 는 腐蝕의 影響은 적게 받는 반면에 機械的인 影響因子가 더 크게 支配되기 때문인 것으로 풀이할 수 있다. 이러한 傾向은 지금까지의 腐蝕疲勞破壞의 研究와 잘 일치하고 있다²⁰⁾. 그리고 材料, 應力反復回數, 應力比 및 荷重波形的 形狀이 一定하다면 領域II에서 腐蝕이 심한 環境일 수록 表面龜裂進

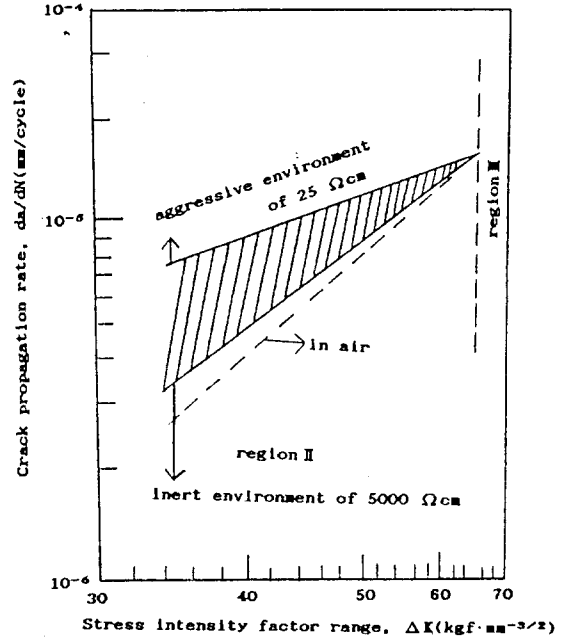


Fig. 8 Influence of stress intensity factor range on the crack propagation rate in marine environment (Constant: material, frequency, R value and load wave shape)

展速度 da/dN 는 빨라져 比抵抗값 25 Ω cm의 化살표 방향이 될 것이며, 腐蝕의 影響이 적은 環境에서는 表面龜裂進展速度 da/dN 는 遲延되어 比抵抗값 5000 Ω cm의 化살표 방향과 같이 될 것으로 생각된다¹⁰⁾.

3.3 腐蝕環境中의 比抵抗값 變化에 따른 加速係數

Fig.9는 腐蝕環境中의 比抵抗값 變化에 따른 表面龜裂進展速度의 加速變數 α 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 나타낸 것이다.

여기서 加速係數 α 는 腐蝕疲勞의 表面龜裂進展速度 [da/dN]_{corr}에 대한 空氣中의 疲勞의 表面龜裂進展速度 [da/dN]_{air}의 比로 計算한 것이다²¹⁾.

이 結果에 의하면 表面龜裂進展速度의 加速係數는 약 1.1에서 2.7로 나타나고, 腐蝕環境의 比抵抗값이 낮아질수록 表面龜裂進展速度의 加速係數

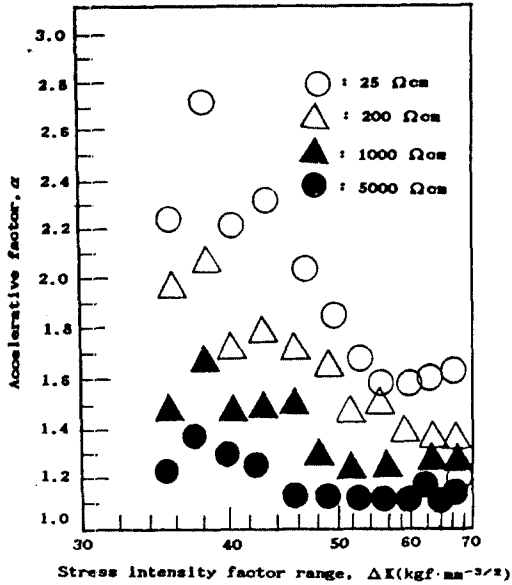


Fig. 9 Relation between accelerative factor $[(da/dN)_{corr.}/(da/dN)_{air}]$ and Stress intensity factor range, ΔK ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$) under various specific resistance

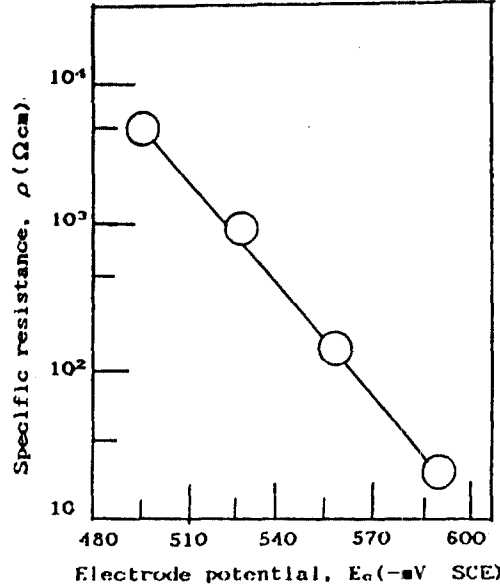


Fig. 10 Specific resistance vs electrode potential for SS41 steel.

는 높게 나타나고 있으며, 比抵抗값이 25 Ωcm 인 天然海水에서 加速係數가 가장 높은 값을 보이고 있다. 그리고 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域에서는 加速係數값 α 값이 높게 나타나지만 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 큰 領域에서는 加速係數값 α 값은 작아진다. 이러한 樣相은 比抵抗값이 낮아질수록 더욱 현저하게 나타남으로써 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域에서의 加速係數값 α 값은 機械的인 影響因子보다 腐蝕의 影響因子가 더 支配的인 임을 알 수 있다.

지금까지의 結果에 있어서 比抵抗값이 낮아질수록 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 빨라짐과 加速係數가 높게 나타나는 傾向을 電氣化學的인 側面에서 考察하기 위하여, Fig.10에 腐蝕溶液中的 比抵抗값을 變化시킴에 따른 SS41鋼의 電極電位 E_0 를 飽和甘汞電極으로 測定하여 나타낸 것이다. 이에 의하면 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 빨라짐과 加速係數가 높게 나타나는 腐蝕環境, 즉 比抵抗값이 낮아지는 環境일수록 電極電位 E_0 는 이와 점차 卑電位化되고 있음을 보이고 있다. 이와 같이 比抵抗값이 낮아지는 環境

일수록 電極電位 E_0 가 卑電位化되는 것은 腐蝕溶液이 強電解質로 되어 電氣化學的인 腐蝕의 影響을 많이 받기 때문에 表面龜裂 進展速度가 빨라지고 加速係數가 높게 나타나는 것으로 思料된다¹⁾.

4. 結 果

平面굽힘 腐蝕疲勞試驗機를 사용하여 海洋環境中的 比抵抗값이 變化함에 따른 SS41鋼材의 腐蝕疲勞破壞에 미치는 影響을 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 모서리 龜裂의 形狀比(b/a)는 空氣中에서 보다 오히려 天然海水($\rho = 25\Omega\text{cm}$)에서 더 낮아지고 있다.
- 2) 海洋環境中에서 表面龜裂 進展速度(da/dN)는 공기중에서 보다 빠르고, 比抵抗값이 增加할수록 da/dN 는 遲延된다.
- 3) 腐蝕環境의 比抵抗값이 減少할수록 Paris rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$]의 實驗常數 m 값은 작아지면서 比抵抗값의 變化에 따른 腐蝕의 影響이 應力擴大係數範圍 ΔK 값에 의한 影響보다 더 敏感하다.

4) 加速係數는 약 1.1에서 2.7이고, 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域下에서 加速係數 α 값이 增加된다.

5) 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 빨라지는 腐蝕環境, 즉 比抵抗값이 낮아지는 環境일 수록 電極電位 E_0 는 점차 卑電位化된다.

參考文獻

- 1) 榮 幸雄; 海洋霧圍氣での腐蝕要因の分析, 金屬材料, 10, 9, p. 13-16(1970).
- 2) American Society for Metals; Metals Handbook, Vol. 8, Mechanical Testing, p. 403-430. (1985).
- 3) 腐蝕防蝕協會; 金屬防蝕技術便覽, 機電研究社, p. 169-186(1984).
- 4) Jaske, C. E., D. Broek, J.E. Stater, and W.E. Anderson; Corrosion Fatigue of Structural Steel in Sea water and for Offshore Application, ASTM STP 642 p. 19-47(1978).
- 5) 鈴木 揚之助; 海水中における軟鋼の疲勞き裂傳播, 防食技術, 32, 6, p. 318-323(1983).
- 6) 駒井謙治郎; 應力腐蝕割れ及び腐食疲勞への破壊力學の應用, 日本 溶接學會誌, Vol. 52, No. 3, p. 23-32(1983).
- 7) 駒井謙治郎; 腐蝕疲勞研究の現狀と展望, 日本鐵と鋼, Vol. 61, No. 7, p. 8(1988).
- 8) H C Rhee and M M Salama; Fracture mechanics in offshore industry, ASME Book, p. 23-105(1985).
- 9) John J. Burke and Volker Weiss; Fatigue Environment and temperature effects, Plenum press, p. 41-79(1983).
- 10) Z.A. Foroulies; Environment sensitive fracture of engineering materials, the metallurgical society of AIME, p. 521-639 (1983).
- 11) 田大熙, 金垣寧, 金基準, 李義鎬; 造船用高張力鋼材와 普通強度鋼材間의 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣方式에 관한 研究, 韓國韓國船用機關學會誌, 第 14卷 第 3號, 1990機關學會誌, Vol. 8, No. 2, p. 39-50(1984).
- 12) 林祐助, 李秀柄, 李鎮烈; 船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 進展特性과 그 抑制에 관한 研究, 韓國漁業技術學會誌, 25, 2, p. 87-104(1989).
- 13) 吳世旭; 3.5% NaCl 水溶液의 溫度變化가 SS41鋼의 腐蝕疲勞破壞에 미치는 影響, 東亞大學校 附設 海洋資源研究所 研究報告誌, Vol. 1, No. 1, p. 49-58(1988).
- 14) 鋼材俱樂部; 鋼製魚礁用組材標準仕樣, p. 14-27(1986).
- 15) 川原正言, 栗原正好; 表面き裂の疲勞による傳播成長過程に關する豫備的考察, 日本造船學會論文集, 137, p. 297-306(1975).
- 16) ASTM E647-83; Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above 10m/cycle, p. 754-755(1083).
- 17) J.P. Gallagher and R.P. Wei; Corrosion fatigue crack propagation behavior in steels, Corrosion fatigue NACE-2, p. 408-409(1971).
- 18) W.W. Gerberish, R.H. Van stone and A.W. Gunderson; Fatigue Properties of carbon alloy steel, application of fracture mechanics for selection of Metallic structural materials, ASM, Metals park, Ohio, p. 65-67(1982).
- 19) Hideo Kidagawa; Application of Fracture mechanics for fatigue crack, JSME75, p. 1068-1088(1972).
- 20) J.G Opdam; Oceanology international 75, Vol. 10, p. 3-6(1975).
- 21) 中島等; 材料, 第31卷, 第346卷, p. 710-716(1982).