

## 腐蝕疲勞에 의한 低炭素鋼의 모서리龜裂 進展特性에 관한 研究

林 鍾 汶\* · 金 垣 寧\*\*

### The Study on the Characteristics of Corner Crack Propagation for the Low Carbon Steel by Corrosion Fatigue

*Jong-Moon Lim\* · Won-Yeong Kim\*\**

#### Abstract

Recently, with the rapid development in the industries such as automobiles, ships and marine structures, it is enlarged by the use of the SB41 steel. Much interest in the study of corrosion fatigue fracture characteristics was concerned with an important role in mechanical design.

Corrosion fatigue test was performed by the use of plane bending fatigue tester in air and in marine environments having various specific resistance from 25  $\Omega$ cm to 5000  $\Omega$ cm.

The purpose of this study is to investigate the effects of marine environmental factor on the corner crack propagation behaviour of SB41 steel by corrosion fatigue.

The main results obtained are as follows :

- 1) The values of aspect ratio  $b/a$  of corner crack growing in air is larger than that in natural sea water.
- 2) The aspect variation of the corner crack growing under each environment can be estimated according to the following equation ;

$$b/a = \alpha - \gamma \cdot b/t$$

where

$a$  : crack length                       $b$  : crack depth  
 $t$  : specimen thickness               $\alpha, \gamma$  : experimental constant

- 3) A possible model of corner crack propagation by corrosion fatigue was presented on the base of stress and corrosion products at notch tip area.

\* Po-hang Junior College, Pohang 790, Korea.

\*\* Korea Maritime University, Pusan 606, Korea.

4) Corrosion sensitivity of initial stage crack and corrosion fatigue life in the marine environment is about 1.17~2.20, coprosion sensitivity of initial stage crack is more susceptible than that of corrosion fatigue life with the specific resistance decreased.

5) The surface crack propagation rate  $da/dN$  and crack depth propagation rate  $db/dN$  in marine environment is faster than that in air and  $da/dN$  and  $db/dN$  delays with the specific resistance increased.

6) As the specific resistance decreases, the exponent value  $m$  decreases and the value of  $C$  increases for Paris' rule [ $da/dN = C(\Delta K)^m$ ], and so the effect of corrosion is more susceptible than that of stress intensity factor range  $\Delta K$  under region II.

7) The accelerative factor  $\alpha$  in marine environment is about 1.1~2.7 and  $\alpha$  is to increase under the low region of stress intensity factor range( $\Delta K$ ).

8) In the case of estimating the corner crack by corrosion fatigue, it is more reasonable to consider the propagation rate of fracture surface area than that of surface crack length.

記號說明

(Nomenclature)

- $a$  : Surface crack length(表面龜裂길이, mm)
- $A$  : Fracture surface area(破壞面의 面積, mm<sup>2</sup>)
- $\alpha$  : Accelerative factor(加速係數)
- $b$  : Crack depth(龜裂깊이, mm)
- $b/a, b/t$ : Aspect ratio(形狀比)
- $C, m$  : Experimental constants of Paris' rule(Paris' rule의 實驗常數)
- $da/dN$  : Surface crack propagation rate(表面龜裂進展速度, mm/cycle)
- $dA/dN$  : Fracture surface area growth rate(破面面積成長速度, mm<sup>2</sup>/cycle)
- $db/dN$  : Crack depth propagation rate(龜裂깊이進展速度, mm/cycle)
- $\delta$  : Axial deflection(굽힘 變形量, mm)
- $\Delta\sigma$  : Bending stress range(굽힘 應力振幅, kgf/mm<sup>2</sup>)
- $Ec$  : Potential of electrode(電極電位, mV)
- $\Delta K$  : Stress intensity factor range(應力擴大係數範圍, kgf · mm<sup>-3/2</sup>)
- $\Delta K_{th}$  : Quasi threshold stress intensity factor range(擬下限界應力擴大係數範圍, kgf · mm<sup>-3/2</sup>)
- $K, \gamma$  : Experimental constants at aspect ratio(形狀比의 實驗常數)
- $N$  : Number of stress cycles(應力反復回數, Cycle)

- $N_i$  : Number of stress cycles to initial stage crack(龜裂初期段階까지의 應力反復回數, Cycle)
- $N_f$  : Number of stress cycles to corrosion fatigue life(腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數, Cycle)
- $R$  : Stress ratio(應力比)
- $S$  : Corrosion sensitivity(腐蝕感受性)
- SCE : Saturated calomel electrode(飽和카로멜電極)
- $S_i$  : Corrosion sensitivity to initial stage crack(龜裂初期段階의 腐蝕感受性)
- $S_f$  : Corrosion sensitivity to fatigue life(腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性)
- $t$  : Thickness(實驗片的 두께, mm)
- $\rho$  : Specific resistance(比抵抗,  $\Omega\text{cm}$ )

## 1. 序 論

最近 産業의 發展에 따라 각종 自動車, 船舶 및 航空機 等の 運搬手段은 高速化되고 있는 趨勢에 따라 여러가지 형태의 振動과 荷重 및 外力에 의한 反復的인 應力을 많이 받는다.

또한 除雪劑를 사용한 道路나 海岸都市 및 海岸道路에서 運行되고 있는 自動車, 海洋中에서 運航되고 있는 船舶 및 각종 海洋構造物 等は 鹽化物에 의해 腐蝕作用이 일어 날 수 있다<sup>1,2)</sup>.

이들 각종 金屬構造物의 腐蝕要因은 海水中的의 電氣傳導度, 鹽分濃度, pH, 溫度, 溶存酸素, 溶存이온, 流速 및 大氣中的의 汚染, 氣象, 結露 等に 依存하지만, 鹽化物이 溶存되어 있는 電解質溶液에서 金屬構造物의 基本的인 腐蝕要因은 電池作用에 의해 腐蝕을 일으키게 되는 電氣化學的過程으로 評價되고 있다<sup>3,4)</sup>.

이와 같이 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 重要的인 因子가 되고 있다<sup>5-8)</sup>.

특히 腐蝕霧圍氣中에서 平面 굽힘 反復荷重에 의한 金屬構造物의 表面龜裂은 降伏点보다 더욱 낮은 사용 反復荷重下에서도 機械構造物의 內部 缺陷, 部材의 形狀不連續部, 리벳팅部의 加工缺陷 및 腐蝕피트(pit) 等の 應力集中部를 起點으로 發生하여 臨界龜裂길이(critical crack length)에 이르게 되면 순식간에 金屬構造物 전체의 破斷을 초래하게 된다<sup>9)</sup>.

한편, 低炭素 構造用鋼인 SB41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 等으로 인해서 一般 機械構造物, 船舶 및 海洋構造物 等に 그 活用度가 높다<sup>10,11)</sup>.

이러한 各種 金屬構造物의 設計에서 考慮되는 사항중 材料를 節約하면서 가장 알맞는 最適設計를 해야하지만, 腐蝕에 의한 金屬構造物의 破損 때문에 耐蝕性의 高價材料를 사용하거나 필요 이상의 高强度 材料를 사용해야하는 過剩設計 그리고 腐蝕에 의해 機械裝置의 故障 및 效率低下로

인해서 經濟的 損失이 直接 및 間接으로 많기 때문에 金屬構造物의 腐蝕에 대한 基礎設計資料는 매우 중요하다<sup>12,13)</sup>.

그리고 各種 金屬構造物에 많이 사용되는 構造用鋼의 腐蝕疲勞舉動을 명확히 하는 것이 事故를 미연에 防止하는 측면에서 중요한 의미를 갖게 됨으로써<sup>14)</sup> 각종 金屬構造物이 각각의 使用 環境條件 아래서 장시간에 걸쳐 충분한 安全性을 확보하기 위해서는 材料強度에 미치는 環境, 특히 腐蝕性 環境效果의 解明과 環境強度 設計基準의 확립이 요구되고 있으며<sup>15,16)</sup>, 最近에는 海洋開發의 氣運과 함께 腐蝕의 重要性이 한층 더해 지고 있다.<sup>4)</sup>

이러한 요구에 대하여 1917年 Haigh에 의해 腐蝕霧圍氣中에서 反復荷重을 받으므로서 材料強度가 현저하게 低下하는 것이 알려졌으며 이것을 腐蝕疲勞라고 하였고<sup>17-19)</sup>, 그 以後 現在까지 鐵鋼材料를 중심으로 하여 腐蝕疲勞破壞에 관한 多數의 研究가 행하여져 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 회전굽힘 疲勞破壞에 관한 實驗·報告들이었다<sup>20-22)</sup>. 그리고 破壞力學의 進歩와 더불어 腐蝕疲勞破壞에 있어서도 破壞力學的 취급의 試圖가 활발히 展開되어 腐蝕疲勞龜裂에 대한 각종 進展機構의 究明과 여러가지 데이터의 蓄積이 이루어 지고 있다<sup>23,24)</sup>.

특히 船舶, 自動車, 航空機, 橋梁 및 海洋構造物 等の 腐蝕疲勞破壞에 있어서 더욱 중요하다고 생각되는 平面굽힘 反復荷重에 의한 龜裂 成長舉動에 관한 研究는 몇 편의 研究結果에도 불구하고<sup>25-27)</sup>, 海洋環境中에서 SB41鋼의 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 成長舉動에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다<sup>28-30)</sup>.

따라서 本 研究는 一般 機械構造物, 船舶 및 海洋構造物 等に 가장 광범위하게 사용되어 지고 있는 SB41鋼을 海洋環境中에서 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 進展特性에 관한 研究를 하기 위하여, 比抵抗을 變化시킨 海洋霧圍氣下에서 SB41鋼을 平面굽힘 疲勞 및 腐蝕疲勞試驗을 행하여 腐蝕成長舉動을 觀察, 調查하였다.

이 實驗의 結果로 부터 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 表面龜裂과 龜裂깊이 방향의 破面樣相, 龜裂成長舉動 및 形狀變化에 미치는 腐蝕의 影響에 대해서 考察하고, 比抵抗의 變化에 따른 SB41鋼의 電氣化學的인 特性을 調查하였다. 그리고 이를 根據로 하여 이 鋼材의 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 進展機構를 究明하였다.

또한 海洋環境中の 比抵抗을 變化시킴에 따른 腐蝕疲勞에 의한 龜裂成長舉動을 空氣中の 疲勞에 의한 龜裂成長舉動과 比較하여 考察한 後, 腐蝕感受性を 定量的으로 求하였다.

다음으로 腐蝕環境中에서 모서리龜裂의 表面龜裂進展速度와 破面面積成長速度에 대한 應力擴大係數範圍 값을 Paris' rule에 적용하여 電算에 의한 環境常數를 求하고, 腐蝕과 機械的인 應力이 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 進展速度에 미치는 影響을 究明하고, Paris' rule의 적용에 있어서 應力擴大係數範圍 값에 대한 破面面積成長速度의 적용 合理性을 考察함으로써 鹽化物이 존재하는 道路나 海洋霧圍氣中에서 사용되는 SB41鋼材의 腐蝕疲勞破壞에 대한 基礎設計資料로서 寄與하고자 한다.

## 2. 試料 및 實驗方法

### 2.1 試驗材料 및 試驗片

本 實驗에 사용된 試驗材料는 市販의 一般構造用 壓延鋼材(SB41)로 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
	0.11	0.29	0.59	0.01	0.01
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)
	42.4		25.8		32

이와 같은 板材로부터 切取하여 製作한 試驗片 및 노치(notch)의 形狀은 Fig.1과 같다. 이러한 試驗片은 그 길이 방향이 壓延方向과 동일하도록 製作하였다.

그리고 試驗片 形狀의 노치先端에 있어서 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값은 Kawahara 等이 提示한 다음 式으로 計算하였다<sup>31)</sup>.

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

여기서  $\Delta \sigma$  : 굽힘 應力振幅(kgf/mm<sup>2</sup>)

a : 表面龜裂길이(mm)

疲勞試驗에서 굽힘應力(bending stress)은 다음과 같이 구하였다.

굽힘 變形量  $\delta = PL^3/3EI$ 에서

荷重  $P = 3EI\delta/L^3$ 이므로

굽힘 應力  $\sigma = M/Z = P(L-L_1)/Z \quad (2)$

$$= 3EI\delta(L-L_1)/ZL^3$$

$$= 1.5E\delta t(L-L_1)/L^3$$

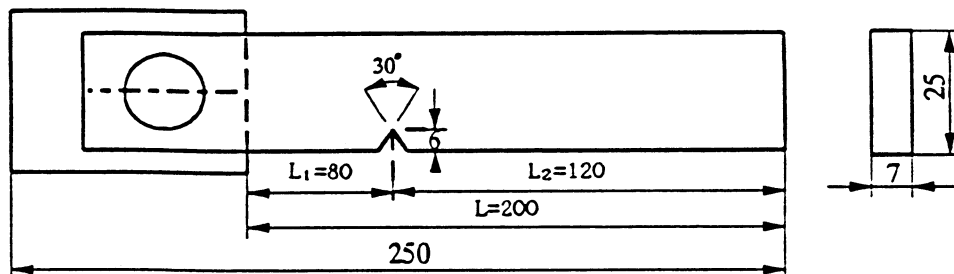


Fig 1. Dimension of test specimen (mm)

여기서  $E$  = 영 계수 ( $\text{kgf/mm}^2$ )

$I$  = 斷面 2차 모멘트 ( $\text{bt}^3/12$ )

$L$  = 試驗片 固定部에서 應力部까지의 距離 ( $\text{mm}$ )

$L_1$  = 試驗片 고정부에서 노치까지의 距離 ( $\text{mm}$ )

$t$  = 試驗片 두께 ( $\text{mm}$ )

$Z$  = 斷面係數 ( $\text{bt}^2/6$ )

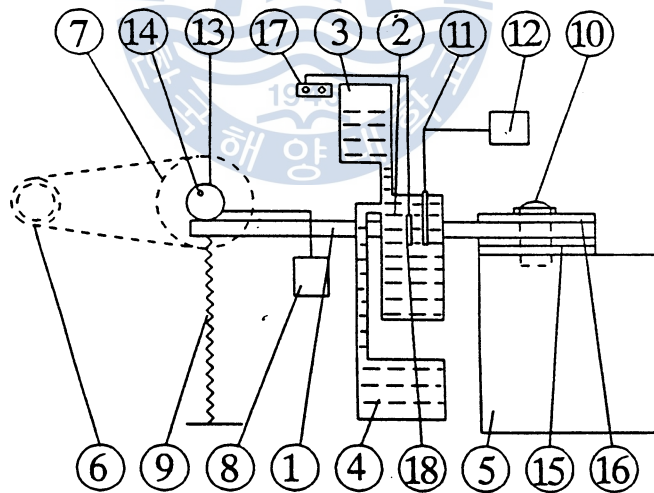
$\delta$  = 굽힘 變形量 ( $\text{mm}$ )

$b$  = 試驗片 幅 ( $\text{mm}$ )

한편 試驗片 表面은 사포 600-2000번까지 研磨한 後 아세톤으로 탈지하고, 試驗片 表面의 電氣化學的인 影響을 제거하기 위해 노치先端을 제외한 試驗片 全表面을 투명한 실리콘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굽힘 腐蝕疲勞試驗機의 全體系統圖는 Fig. 2와 같고, Photo. 1은 本 實驗裝置의 外觀이다.



- |                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| 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

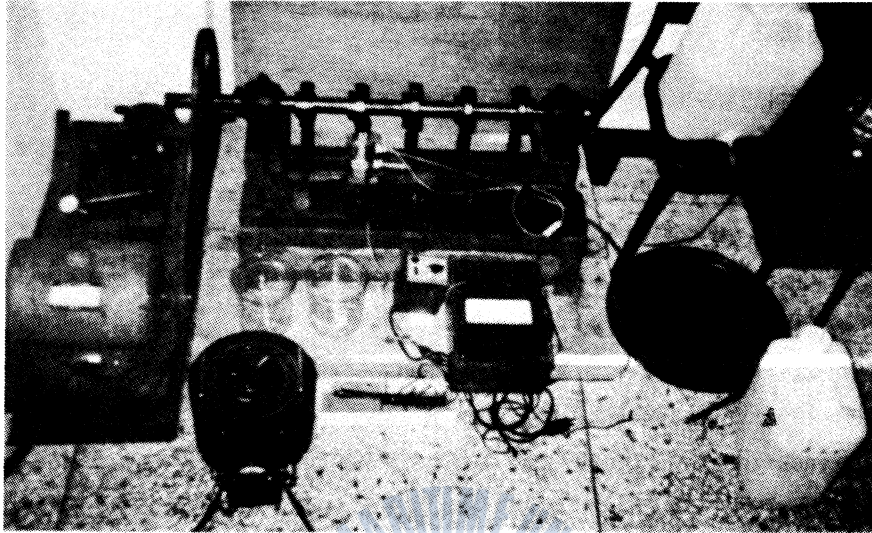


Photo 1. Appearance of experimental apparatus

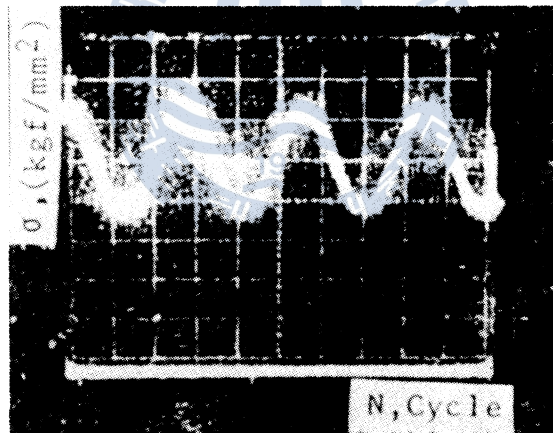


Fig 3. Stress wave form(stress ratio,  $R=0$ )

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.

平面 굽힘 應力은 모모터에 의해 구동되는 偏心輪에 의해 받으며, 應力反復回數는 폴리軸에 연결되어 있는 積算回轉計로 測定하였다.

그리고 Fig.1과 Fig.2에 나타낸 偏心輪의 偏心量, 固定端과 荷重點과의 길이( $L$ ) 및 固定端과 노치와의 길이( $L_1$ )를 變化시킴으로서 應力을 微細하게 調節할 수 있도록 하였으며, 이때 反復荷重의 速度는 모두 600 rpm( $f=10\text{Hz}$ )로 維持하였다.

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

### 2.3 實驗方法

腐蝕環境水槽는 플라스틱으로 製作하였으며, 腐蝕溶液으로는 天然海水에 蒸溜水를 소량씩 혼합하면서 比抵抗  $\rho$ 를 電導度計로 測定하여 그 값을 각각 25(天然海水), 200, 1000 및 5000  $\Omega\text{cm}$ 되게 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 Cl 이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 위하여 시간당 4리터의 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 絕緣性 필터를 사용하였다.

이들 각각의 比抵抗의 環境中에서 SB41鋼의 電極電位는 飽和카로멜 電極(SCE)에 의해 高抵抗 電壓計(內部抵抗:  $10^7\Omega/V$ )로 測定하고, 鹽濃度는 鹽分計로 測定하였다.

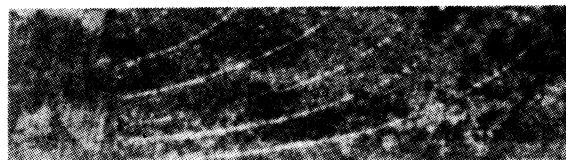
龜裂成長길이(crack growth length)는 初期應力擴大係數範圍  $\Delta K_i$  값을  $34.7 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 으로 一定하게 反復荷重을 부가한 後 20배의 移動式 顯微鏡으로 疲勞 및 腐蝕疲勞 龜裂初期段階( $a_1=0.5\text{mm}$ )를 龜裂初期段階로 假定하고, 이하 龜裂初期段階라 함)로 부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

## 3. 實驗結果 및 考察

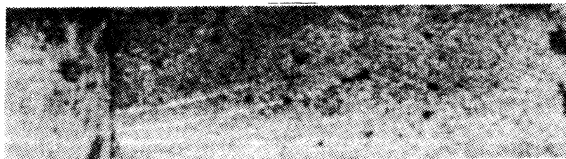
### 3.1 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 破面特性

#### 3.1.1 모서리 龜裂의 巨視的 破面

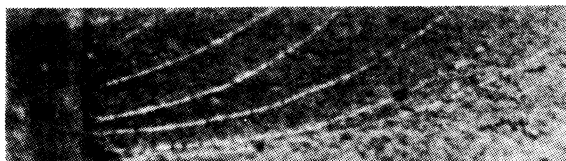
Photo. 2는 初期 應力擴大係數範圍값  $\Delta K_i=34.7 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 으로 일정하게 反復荷重을 附加하



(a) 25  $\Omega\text{cm}$



(b) 5000  $\Omega\text{cm}$



(c) in air

Photo 2. Beach marks of fracture surface(x3)



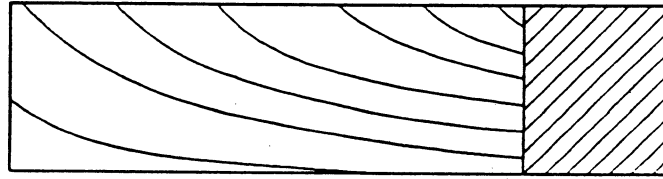


Fig 4. Macrograph of beach marks of fracture surface

있을 때, 腐蝕環境中の 比抵抗  $\rho=25 \Omega\text{cm}$ (a)와  $\rho=5000 \Omega\text{cm}$ (b) 그리고 空氣中(c)에서 두께  $t=7\text{mm}$ 인 平滑平板材의 片側貫通 노치로 부터 平面굽힘 反復荷重에 의해 모서리 龜裂이 成長되 어진 疲勞와 腐蝕疲勞龜裂發生으로 부터 破壞까지의 破面에 대한 비치마크를 보인 것이고, 여기서 비치마크는 人工的으로 插入한 것이며 腐蝕溶液中에서의 腐蝕疲勞破面은 腐蝕生成物에 의한 타니싱(tarnishing)때문에 觀察이 어려워 알코올로 洗滌하여 나타낸 것이다.

그리고 Fig. 4는 비치마크의 巨視的 破面의 樣相을 보인 것이다.

Photo. 2와 Fig. 4에 의하면 鋼板材의 平面굽힘 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노치로 부터 龜裂이 成長된 四分橢圓形의 모서리 龜裂進展特性을 보이고 있다. 그리고 모서리 龜裂初期段階에는 板材의 表面에 나타난 비치마크 간격의 크기는 두께방향에 나타난 비치마크 간격의 크기에 비해 더 작게 成長되지만, 龜裂이 점차 成長함에 따라 表面에 나타난 비치마크 간격의 크기가 龜裂깊이에 나타난 비치마크 간격의 크기에 비해 현저하게 커지고 있는 傾向이다<sup>32)</sup>. 특히 이들 비치마크 간격의 크기에 의하면 각각의 環境條件 변화에 따라 表面 龜裂길이와 龜裂깊이의 龜裂成長舉動이 각각 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.1.2 모서리 龜裂의 破面變化

Fig. 5는 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長舉動에 미치는 影響因子를 考察하기 위해, 表面 龜裂길이 a와 龜裂깊이 b의 破斷面을 나타낸 것이다. 그리고 Photo. 3은 Fig. 5의 (A)部分과 (B)部分을 走査形 電子顯微鏡으로 촬영한 空氣中에서의 疲勞破面寫眞(fractograph)을 보인 것이고, Photo. 4는 Fig. 5의 (A)部分과 (B)部分에 대한 比抵抗  $\rho=25 \Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서의 腐蝕 疲勞破面寫眞을 보인 것이다.

Photo. 3의 空氣中에서 疲勞破面寫眞에 의하면 表面 龜裂先端인 (A)部分에 의하면 疲勞破面의 특징인 스트라이에이션(striation)이 不規則하게 나타나 있고, 結晶粒界龜裂은 극히 적다. 그러나

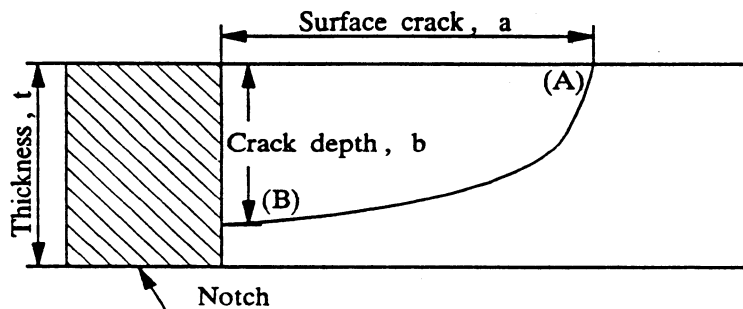


Fig 5. Corner crack growth of quarter elliptical

龜裂깊이의先端인 Photo. 3의 (B)部分에 의하면 스트라이에이션 보다도 延性破面の 특징인 딥플 (dimple)이 많이 나타나 있고, 高速疲勞破壞面에서와 같은 結晶粒界龜裂의 破面樣相을 보이고 있다. 따라서 表面龜裂과 龜裂깊이의先端은 별개의 進展機構에 의해 龜裂이 成長되고 있음이 觀察 된다<sup>33)</sup>.

Photo. 4에 의하면 天然海水中에서 (A)部分은 腐蝕溶解와 腐蝕生成物의 固着 때문에 疲勞破面의 特徵인 스트라이에이션은 明瞭하게 나타나지 않지만 심한 腐蝕孔의 樣相을 보이고 있으나<sup>34)</sup>, 結晶粒界龜裂이 空氣中の (A)部分 보다 적은 것은 주로 腐蝕溶解에 의하여 龜裂이 進展되는 것으로 생각된다<sup>35)</sup>. Photo. 4의 (B)部分은 腐蝕溶解와 腐蝕生成物의 固着은 되어 있지만 Photo. 4의 (A)部分 보다 腐蝕孔이 심하지는 않지만 高速疲勞破壞面에서와 같은 結晶粒界龜裂이 더 많이 成長되어 있는 破面樣相을 보이고 있다.

따라서 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 表面龜裂과 龜裂깊이의先端은 별개의 進展機構에 의해 龜裂이 成長되고 있을 것으로 推察된다.

### 3.2 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 形態變化

#### 3.2.1 모서리 龜裂의 成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響

Fig. 6은 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 成長舉動에 미치는 腐蝕環境의 影響을 具體的으로 考

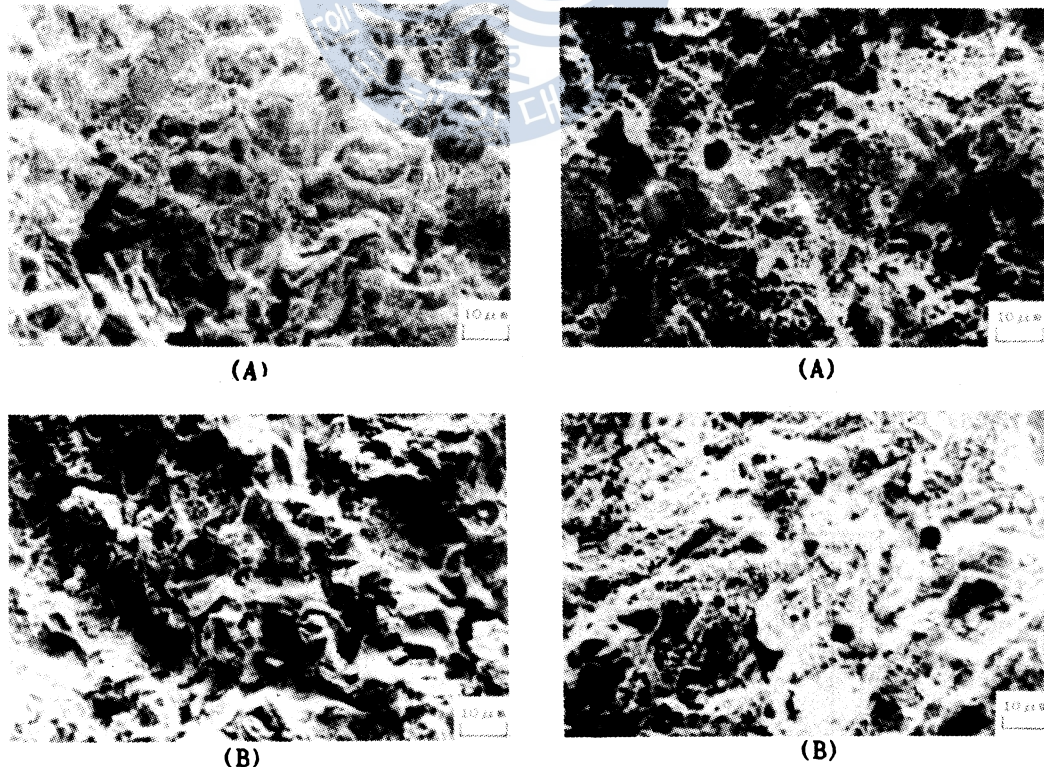


Photo 3. Fractographs of corner crack by fatigue in air

Photo 4. Fractographs of corner crack by corrosion fatigue in 25 Ωcm

察하기 위해, 空氣中과 腐蝕溶液中の 比抵抗  $\rho$ 를 25 및 5000  $\Omega\text{cm}$ 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.

이에 의하면 比抵抗이  $\rho=25 \Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서의 表面龜裂길이  $a$ 의 成長이나 龜裂깊이  $b$ 의 成長이 가장 빠르며, 比抵抗이 증가된  $\rho=5000 \Omega\text{cm}$ 인 環境中에서의 모서리 龜裂의 成長은 天然海水中에서 보다 遲延되고, 空氣中에서의 모서리 龜裂이 가장 遲延되었다.

그리고 空氣中과 腐蝕環境中에 있어서 龜裂初期에는 表面龜裂길이에 비해 龜裂깊이가 빨리 成長되고, 龜裂이 成長됨에 따라 龜裂깊이에 비해 表面龜裂길이가 더욱 빨리 進展되지만 龜裂깊이의 成長은 오히려 더 완만하게 進展되는 傾向이다.

여기서 龜裂發生初期에 두께方向의 龜裂깊이가 表面龜裂길이에 비해 더 많이 成長하는 理由는 疲勞荷重이 附加되어질 때 平面굽힘 應力이 主로 作用하지만 두께方向의 貫通노치先端에 微小하나 剪斷應力이 作用하기 때문인 것으로 思料된다<sup>36)</sup>.

또한 龜裂깊이의 成長보다 表面龜裂길이의 成長이 더 빨라지기 시작하는 樣相을 各各의 環境條件에 따라 좀더 具體的으로 考察하면, 이러한 樣相은 比抵抗  $\rho=25 \Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서 약 2 mm로 가장 빨리 나타나며, 比抵抗이 증가된  $\rho=5000 \Omega\text{cm}$ 인 環境中에서 약 3 mm로 天然海水中에서 보다 더 늦게 나타나고, 空氣中에서 약 4 mm로 가장 늦게 나타남으로써 모서리 龜裂의 表面龜裂길이에 대해 龜裂깊이의 成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響이 크게 지배됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 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깊이의 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길이  $a$ 의 成長에 대한 龜裂깊이  $b$ 의 成長은 空氣中에서 가장 깊게 成長되었으며, 腐蝕環境의 比抵抗이 큰 값에서 보다 比抵抗이 낮은 腐蝕環境中에서 一定한  $a$ 에 대한  $b$ 의 龜裂進展은 더 遲延되는 傾向을 나타내고 있다.

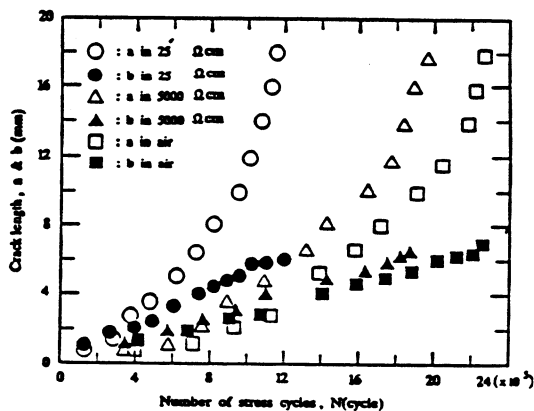


Fig. 6. Surface crack length and crack depth vs number of stress cycles in air and various specific resistance

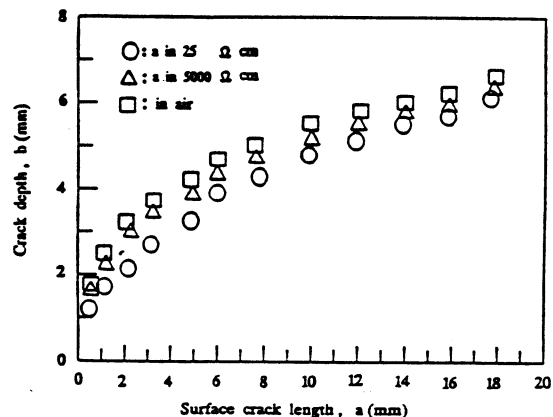


Fig. 7. Relation between surface crack length and crack depth in air and various specific resistance

3.2.2 모서리 龜裂의 形狀比에 미치는 腐蝕의 影響

Fig. 8은 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적으로 考察하기 위해, 表面 龜裂길이  $a$ 와 龜裂깊이  $b$ 와의 比인 形狀比  $b/a$ 의 값에 대한 龜裂깊이  $b$ 와의 關係를 정리하여 나타낸 것이다.

이 結果에 의하면, 龜裂깊이의 成長初期에 있어서 形狀比  $b/a$ 는 크게 나타나지만 龜裂깊이가 成長됨에 따라 形狀比  $b/a$ 는 減少하는 傾向을 보이고 있다. 그리고 같은 龜裂깊이에 대한 모서리 龜裂의 形狀比는 空氣中에서 보다 오히려 腐蝕溶液中에서 낮아지며, 比抵抗이 큰  $\rho=5000 \Omega\text{cm}$ 에 서 보다  $\rho=25 \Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서  $b/a$ 는 가장 낮게 나타나고 있다.

Fig. 9는 四分橢圓形의 모서리 龜裂成長下에서 表面 龜裂길이  $a$ 와 龜裂깊이  $b$ 와의 比인 形狀比  $b/a$ 의 값에 대한 龜裂깊이  $b$ 와 試驗片 두께  $t$ 와의 比  $b/t$  값과의 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 形狀比  $b/a$ 와  $b/t$ 와의 關係는 각각의 環境條件中에서 대체로 다음과 같은 關係가 있다<sup>37,38)</sup>.

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

단,  $k, \gamma$ ; 實驗常數

(3)

式(3)과 Fig. 9에 의하면 天然海水中에서의 기울기는 空氣中에서 보다 더 작아진다. 그리고 Fig. 8과 9에 의하면 모서리 龜裂의 成長初期에 있어서 空氣中에서의 形狀比  $b/a$ 는 天然海水中에 서의  $b/a$ 보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 成長初期에 있

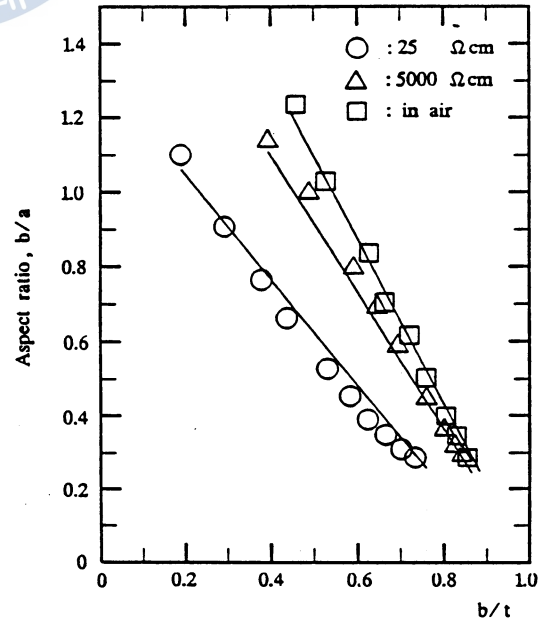
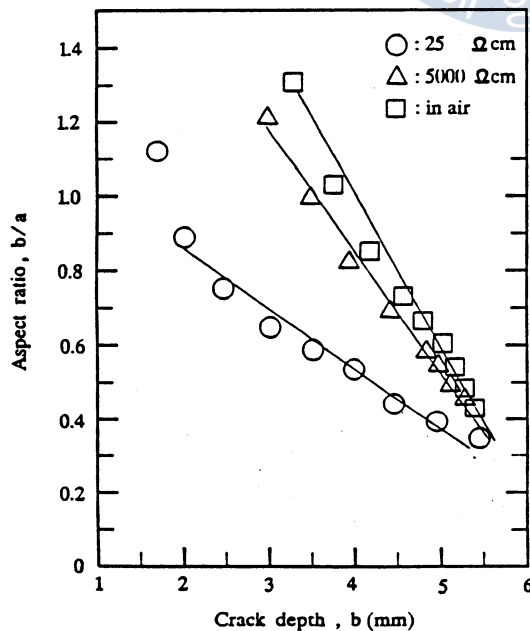


Fig 8. Aspect ratio of corner crack vs crack depth in air and specific resistance

Fig 9. Shape change of corner crack by corrosion fatigue

어서 形狀比에 미치는 腐蝕의 影響이 크게 支配하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 腐蝕疲勞龜裂成長舉動에 미치는 比抵抗의 特性

Fig. 6에 의하면 比抵抗이 큰 값에서 보다 낮은 값에서 表面龜裂길이  $a$ 와 龜裂깊이  $b$ 의 成長이 빨라지는 傾向, 즉 腐蝕溶液의 比抵抗이 減少할 수록 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響이 敏感하게 나타나는 樣相을 電氣化學的인 側面에서 좀더 具體的으로 考察하기 위하여, 腐蝕溶液의 比抵抗의 變化에 대한 SB41鋼의 電極電位  $E_c$ 와 鹽分濃度(NaCl, Wt%)의 變化에 대해 調查하여 Fig. 10과 11에 정리하여 보인 것이다.

Fig. 10은 腐蝕溶液中的 比抵抗을 變化시킴에 따른 SB41鋼의 電極電位  $E_c$ 를 飽和카로멜電極(SCE)으로 測定하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 進展速度가 가장 빨라지며 加速係數가 높게 나타나는 腐蝕環境, 즉 比抵抗이 減少되어지는 環境일수록 SB41鋼의 電極電位  $E_c$ 는 선형적으로 점차 卑電位化되고 있는 傾向을 보이고 있다.

Fig. 11은 腐蝕溶液中的 比抵抗의 變化에 대한 鹽分의 濃度(NaCl, Wt%)를 나타낸 것이다.

이 結果에 의하면 比抵抗이 낮아질수록 鹽分의 濃度は 급격히 增加하고 있는 樣相을 나타내고 있다.

이상의 Fig. 10과 11에 의하면 比抵抗이 낮아 지는 環境일수록 SB41鋼의 電極電位  $E_c$ 가 卑電位化됨과 동시에 鹽分의 濃度は 급격히 增加함으로써 腐蝕溶液은 強電解質로 되어질 것이다<sup>39)</sup>.

따라서 比抵抗이 낮은 強電解質인 腐蝕環境中에서 試驗片의 龜裂先端은 電氣化學的인 腐蝕의 影響을 많이 받게 됨으로써 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響이 敏感하게 나타나게 될것으로 推察된다.

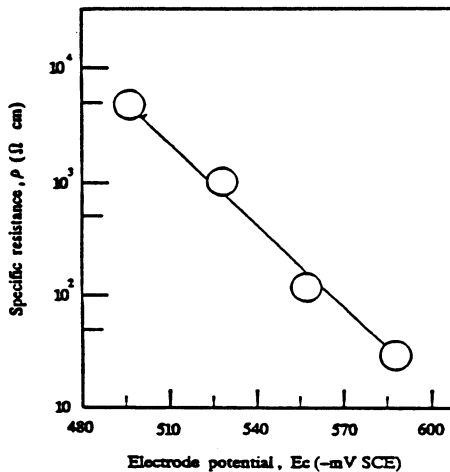


Fig 10. Specific resistance vs electrode potential for SB41 steel

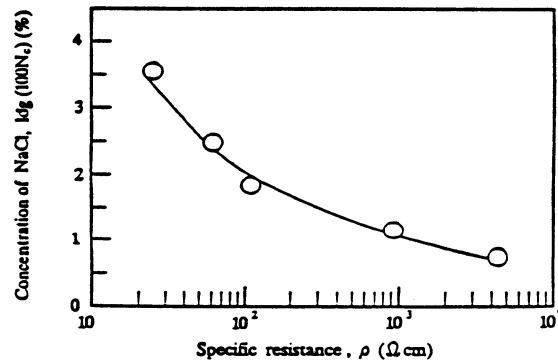


Fig. 11 Relation between concentration of NaCl and specific resistance

### 3.4 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 進展機構

腐蝕環境中에서 疲勞龜裂成長機構는 일반적인 貫通龜裂의 腐蝕疲勞破壞 모델은 腐蝕生成物이 反復荷重에 의한 開閉作用을 妨害하는 모델이 近似한 것으로 思料된다<sup>40,41)</sup>.

그러나 모서리 龜裂의 경우, Fig. 6에 보인 바와 같이 腐蝕環境中에서의 表面龜裂길이  $a$ 나 龜裂 깊이  $b$ 의 成長舉動은 空氣중에서 보다 더 빨라지고, 空氣中이나 腐蝕環境中에서 龜裂이 成長됨에 따라 龜裂깊이에 비해 表面龜裂길이 가 더욱 빨리 進展되는 樣相이지만 Fig. 7-9에 의하면 空氣中에서의 一定한 表面龜裂길이  $a$ 의 成長에 대한 龜裂깊이  $b$ 의 成長은 腐蝕環境中에서 보다 더 깊게 進展되는 傾向을 나타내고 있다. 또한 Photo. 3 및 4에 의하면 疲勞 및 腐蝕疲勞破面은 表面龜裂 成長部分과 두께방향의 龜裂깊이 成長部分과 각각 별개의 破面樣相을 보이고 있다.

따라서 本 研究에서와 같이 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長舉動의 樣相은 表面龜裂과 龜裂깊이 가 進展함에 따라 각각의 龜裂先端에 크기가 다른 反復應力效果和 腐蝕生成物의 效果를 附加한 觀點에서 推察해야만 할 것으로 생각된다.

그러므로 腐蝕環境條件에 관계 없이 동일하게 附加되는 反復應力效果를 究明하기 위하여, Fig. 12는 表面龜裂의 先端에 作用하는 平面굽힘應력과 두께  $t$  方向의 龜裂깊이의 先端에 作用하는 平面굽힘應력을 式(2)에 의해 각각 나타낸 것이다.

이에 의하면 모서리 龜裂이 成長함에 따라서 表面龜裂先端에 作用하는 最大 平面굽힘應力振幅의 크기는 항상 일정하게 作用함으로써 Photo. 3의 空氣中에서 表面龜裂先端의 (A)部分은 스트라이에이션이 不規則한 疲勞破壞인 것으로 생각된다.

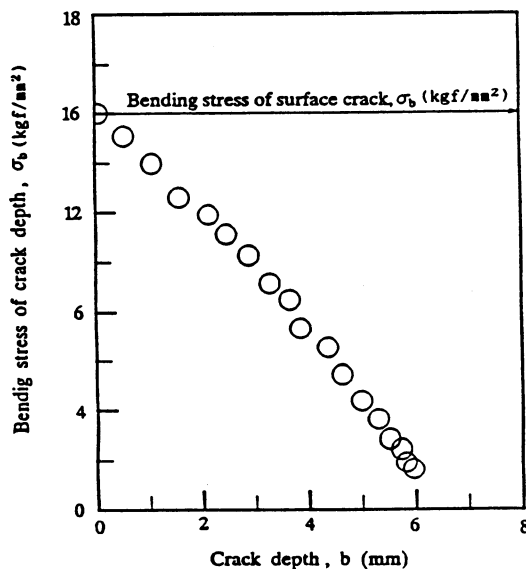


Fig. 12 Influence of crack growth on the bending stress of crack depth and surface crack

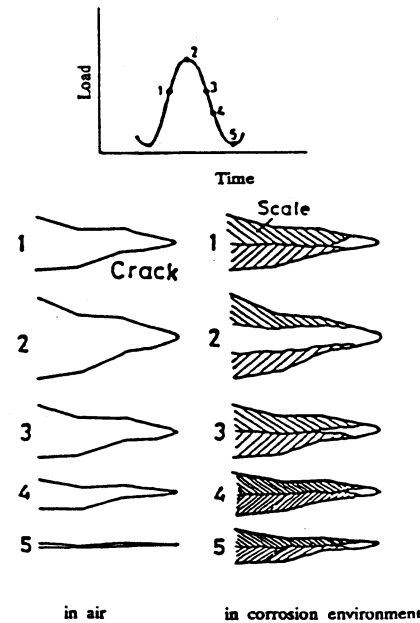


Fig. 13 Wedgy effect by scale of corrosion product

그러나 龜裂이 發生하기 前, 初期에는 表面龜裂成長 方向이나 두께 方向에 作用하는 最大 平面 굽힘 應力의 크기는 같으나, 龜裂깊이가 進展됨에 따라 두께  $t$ 가 작아짐으로써 平面굽힘應力振幅의 크기는 점차 작아지기 때문에 모서리 龜裂이 成長되면서 龜裂깊이의 進展은 Fig. 6-8에서 보인 바와 같이 表面龜裂깊이의 進展 보다 점차적으로 遲延될 것이다. 이와 같은 龜裂깊이의 遲延樣相을 Photo. 3의 (B)部分에서 관찰하면, 延性破面の 특징인 딴플이 많이 나타남과 동시에 高速度 疲勞破壞面에서의와 같은 結晶粒界龜裂이 發生됨으로써 두께 방향의 龜裂깊이의 成長舉動은 表面龜裂깊이가 어느 정도만큼 성장한 후에는 어느 순간에 龜裂깊이는 延性的으로 어느 정도의 깊이 만큼 점프하는 것으로 思料된다<sup>2)</sup>.

다음으로 電氣化學的인 腐蝕에 의한 腐蝕生成物의 效果를 究明하기 위하여, 腐蝕雰圍氣中에서 腐蝕生成物이 反復荷重으로 인한 開閉作用에 미치는 影響을 空氣中과 比較하여 Fig. 13에 模式圖로 나타내 보인 것이다.

이에 의하면 腐蝕環境中에서 모서리 龜裂成長舉動은 (1) 龜裂先端에 荷重이 附加되면 模式圖에 나타난 1과 2의 과정에서 應力과 腐蝕으로 인한 相乘作用의 影響을 받고, (2) 龜裂先端에 荷重이 負荷되지 않을 때는 模式圖에 나타난 4와 5의 過程間에서 空氣中은 龜裂先端이 완전히 닫혀지지만 腐蝕環境中은 腐蝕溶液이 非壓縮性 및 腐蝕生成物의 量에 따라 龜裂先端이 완전히 닫혀지지 않을 수도 있으므로 表面龜裂과 龜裂깊이의 表面部는 항상 腐蝕環境에 露出된다. 따라서 (1)과 (2)의 重疊效果에 의해 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長舉動은 空氣中에서 보다 더 빨라지는 것으로 생각된다.

그러나 腐蝕環境中에서 龜裂發生初期에는 表面龜裂先端이나 龜裂깊이先端은 開閉作用中 항상 陽極活性化腐蝕이 일어나지만 龜裂이 成長되면서 腐蝕成長物이 龜裂깊이先端의 넓은 領域에 부착되어진다. 이와같이 腐蝕生成物이 부착된 大部分의 龜裂깊이先端은 模式圖에 나타난 3, 4 및 5 過程間에서 閉口時에 陽極活性化 腐蝕의 抑制과 腐蝕溶液의 非壓縮性과 腐蝕生成物이 反復荷重으로 인한 開閉作用을 妨害하는 重疊效果에 의해 龜裂깊이의 成長은 遲延됨으로써 腐蝕環境中에서의 形狀比  $b/a$ 는 空氣中에서의  $b/a$ 보다 더욱 작게 되는 傾向이고, 이러한 傾向은 腐蝕環境中の 比抵抗이 낮아질 수록 腐蝕電位는 卑電位化됨으로써 더 敏感할 것으로 思料된다.

### 3.5 比抵抗의 變化가 表面龜裂에 미치는 腐蝕의 影響

Fig. 5-8 그리고 Photo. 2에 의하면 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長에 있어서 龜裂깊이의 成長에 비해 表面龜裂깊이의 成長이 더 빨라지며 腐蝕의 影響도 많이 받는 傾向을 보이고 있다.

따라서 腐蝕環境의 比抵抗이 變化함에 따른 表面龜裂 成長舉動에 미치는 腐蝕의 影響을 좀더 具體的으로 考察하기 위해 Fig. 14-16에 나타내 보인다.

#### 3.5.1 比抵抗의 變化에 따른 表面龜裂成長舉動

Fig. 14는 空氣中과 比抵抗  $\rho$ 를 25, 200, 1000 및 5000  $\Omega\text{cm}$ 로 變化시킨 각각의 腐蝕環境條件中에서 初期應力擴大係數값  $\Delta Ki = 34.7\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 으로 일정하게 反復荷重을 加한 後, 表面龜裂成

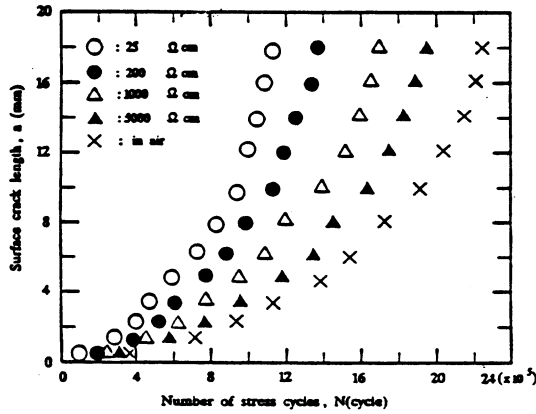


Fig. 14 Surface crack length and crack depth vs number of stress cycles in air and various specific resistance

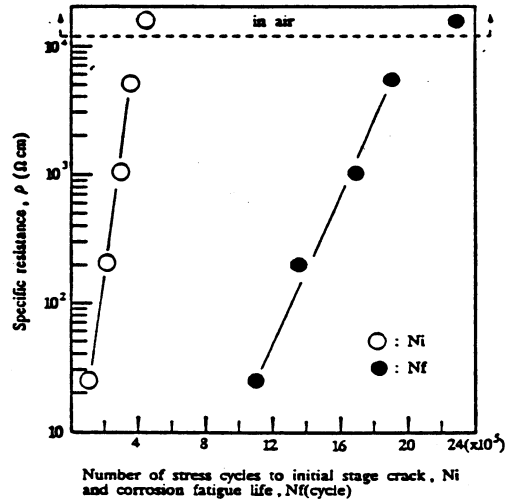


Fig. 15 Specific resistance vs number of stress cycles to initial stage crack and corrosion fatigue life

長길이  $a$ 에 대한 應力反復回數  $N$ 과의 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 比抵抗  $\rho$ 가 25  $\Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂 길이의 成長이 가장 빠르게 進展되고, 比抵抗  $\rho$ 가 높아질수록 表面龜裂 길이의 成長이 遲延되는 舉動을 보이고 있으며, 空氣中에서 疲勞에 의한 表面龜裂 길이의 成長이 가장 크게 遲延되었다.

그리고 각각의 腐蝕環境條件下에서 初期에는 表面龜裂 길이의 成長이 遲延되다가 應力反復回數가 增加할수록 表面龜裂 길이의 成長이 점차 빨라지는 樣相을 보이고 있으며, 이러한 樣相은 腐蝕溶液의 比抵抗값  $\rho$ 가 減少할수록 더 빨리 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 Fig. 14에 의해 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 龜裂初期段階까지의 應力反復回數  $N_i$ 와 疲勞 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數  $N_f$ 에 대한 空氣中과 腐蝕溶液의 比抵抗  $\rho$ 의 變化에 따른 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 腐蝕環境中에서 龜裂初期段階까지의 應力反復回數  $N_i$ 와 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數  $N_f$ 는 空氣中에서의  $N_i$ 와  $N_f$  보다 더 빨리 나타나며, 比抵抗  $\rho$ 가 높게 됨에 따라서  $N_i$ 와  $N_f$ 는 더욱 遲延되는 樣相을 보이고,  $N_i$ 와  $N_f$ 의 차는 比抵抗  $\rho$ 가 減少할수록 작아지는 傾向을 보이고 있다.

### 3.5.2 比抵抗의 變化에 따른 腐蝕感受性

Fig. 16은 海洋環境中의 比抵抗이 變化함에 따른 表面龜裂 成長舉動에 미치는 影響을 조금더 定量的으로 檢討하기 위하여, 空氣中에서 疲勞龜裂初期段階와 疲勞壽命까지의 應力反復回數  $N_{air}$ 에 대한 여러가지 比抵抗의 變化에 따른 腐蝕溶液中에서 腐蝕疲勞龜裂初期段階와 腐蝕疲勞壽命까지 應力反復回數  $N_{cor}$ 의 比를 計算에 의하여 比較함으로써, 腐蝕環境의 比抵抗이 變化함에 따른 腐蝕感受性  $S$ 을 評價하여 보인 것이다. 여기서 腐蝕感受性은 다음式으로 計算하였다.



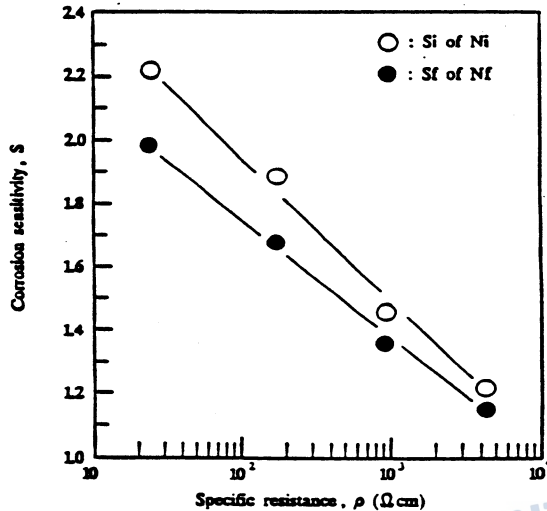


Fig. 16 Corrosion sensitivity to initial stage crack and corrosion fatigue life vs specific resistance

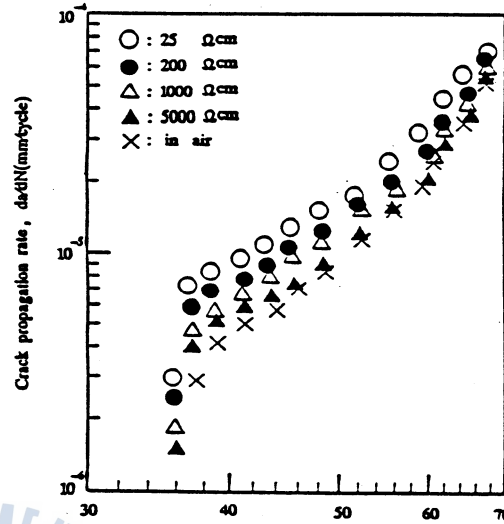


Fig. 17 Relation between crack propagation rate and stress intensity factor in various specific resistance

$$S = N_{air} / N_{cor} \quad (4)$$

(但, 空氣中에서의 疲勞龜裂成長에서  $N_{air}$ 은 腐蝕의 影響이 없는 것으로 간주함)

이 結果에 의하면, 龜裂初期段階와 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性은 약 1.17~2.20이며, 比抵抗이 減少할 수록 腐蝕感受性은 敏感해지고 있는 傾向이다. 그리고 龜裂初期段階의 腐蝕感受性  $S_f$ 가 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性  $S_r$ 보다 比抵抗이 減少할수록 더 敏感해지고 있다.

### 3.6 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 進展速度特性

#### 3.6.1 表面龜裂進展速度 $da/dN$ 와 應力擴大係數範圍 $\Delta K$ 의 關係

疲勞龜裂傳播速度를 破壞力學的으로 취급하는 경우, Irwin 等の 많은 研究에서 龜裂傳播速度를 應力擴大係數範圍  $\Delta K$  값의 概念을 導入하여 究明하였다<sup>43)</sup>.

따라서 本 研究에서도 Kawahara 等이 提示한 式(1)의 應力擴大係數範圍  $\Delta K$  값을 적용하여 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 進展速度特性을 究明하고자 하였다.

Fig. 17은 空氣中과 腐蝕環境中の 比抵抗의 變化에 따른 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 에 대한 應力擴大係數範圍  $\Delta K$  값과의 關係를 정리하여 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 點點技法(Point-to-point-technique)을 이용하였으며<sup>44)</sup>, 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂進展速度를 求하기 위하여, Fig. 14의 a-N 曲線에서 各점의 기울기로부터 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 을 求하였다.

이에 의하면 比抵抗  $\rho$ 가 25  $\Omega$ 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이 높아 질수록 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 $\Delta K$ 값에 있어서 擬下限界應力擴大係數範圍  $\Delta K_{th}$ 와 같은 樣相은 本 實驗의 試驗片에 疲勞노치로 부터 反復荷重을 附加하여 實驗한 것이 아니고, V노치를 加工하여 實驗함으로써 노치 先端에 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 龜裂이 發生하기 까지의 潛伏期間의 現狀 때문이라 思料된다.

應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 급격히 커지는 領域 III에서는 腐蝕環境의 比抵抗이 變化함에 따른 각각의 比抵抗에서의 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  $\Delta K$ 값이 領域 III에서 보다 작은 領域 II에 있어서 比抵抗의 變化에 따라 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 에 미치는 腐蝕因子의 影響은 크게 나타나고 있으며, 또한 각각의 腐蝕環境條件下에서  $da/dN$ 는  $\Delta K$ 값이 커짐에 따라서 直線적으로 빨라지고 있는 傾向을 나타내고 있으므로 Paris' rule을 적용할 수 있다.

따라서 本 研究의 경우, SB41鋼材만 實驗하였으므로 Paris' rule에 의해 材料常數 대신에 腐蝕環境의 比抵抗의 變化에 따른 環境常數, 즉 實驗常數를 領域 II에서 구할 수 있다.

여기서 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 와 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값과의 相關關係를 考察하기 위해, 다음과 같은 Paris' rule을 適用하였다<sup>45,46)</sup>.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

Table 2는 Fig. 17의 領域 II의 實驗值를 Paris' rule에 의해 電算化한 實驗常數  $C$ 와  $m$ 값을 정리하여 보인 것 이다.

이 結果에 의하면 領域 II의 空氣中 보다 腐蝕性 雰圍氣인 여러가지 比抵抗中에서의 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 比抵抗面龜裂進展速度  $da/dN$ 는 다른 環境中에서 보다 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값의 機械的인 影響 보다 腐蝕의 影響이 더 敏感해지고 있다. 그러나 實驗常數  $m$ 값이 다른 腐蝕環境中에서 보다 가장 크게 되는 5000  $\Omega\text{cm}$ 中에서의 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 크기 支配되기 때문인 것으로 풀이할 수 있다.

Table 2. The experimental constants  $C$  and  $m$  of Paris' rule [ $da/dN = C(\Delta K)^m$ ] for SB41 steel

Experimental constant Environment ( $\Omega\text{cm}$ )	C	m
25	$5.15 \times 10^{-9}$	2.02
200	$5.88 \times 10^{-10}$	2.51
1,000	$4.77 \times 10^{-10}$	2.54
5,000	$2.08 \times 10^{-10}$	2.71
in air	$9.39 \times 10^{-12}$	3.48

이러한 傾向은 지금까지의 腐蝕疲勞破壞의 研究와 잘 일치하고 있어 減少할 수록 實驗常數  $C$ 의 값은  $2.08 \times 10^{-10}$ 으로부터  $5.15 \times 10^{-9}$ 으로 현저히 커지고  $m$ 의 값은 2.71로 터 2.02로 작아 지면서 表面龜裂速度는 빨라지는 傾向을 보이고 있다. 이와 같은 傾向에서 腐蝕疲勞龜裂傳播速度特性을 究明하고자 할 때는 實驗常數  $m$ 값에 대해서만 評價할 것이 아니라 腐蝕環境의 比抵抗의 變化에 따라 현저하게 달라지는 實驗常數  $C$ 값도 評價하는 것이보다 더 妥當性이 있으리라고 생각된다.

이러한 傾向은 지금까지의 腐蝕疲勞破壞의 研究와 잘 일치하고 있어 減少할 수록 實驗常數  $C$ 의 값은  $2.08 \times 10^{-10}$ 으로부터  $5.15 \times 10^{-9}$ 으로 현저히 커지고  $m$ 의 값은 2.71로 터 2.02로 작아 지면서 表面龜裂速度는 빨라지는 傾向을 보이고 있다. 이와 같은 傾向에서 腐蝕疲勞龜裂傳播速度特性을 究明하고자 할 때는 實驗常數  $m$ 값에 대해서만 評價할 것이 아니라 腐蝕環境의 比抵抗의 變化에 따라 현저하게 달라지는 實驗常數  $C$ 값도 評價하는 것이보다 더 妥當性이 있으리라고 생각된다.

Fig. 18은 腐蝕環境中에서 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 가 가장 빠른 比抵抗 25  $\Omega\text{cm}$ 와  $da/dN$ 가 늦은 比抵抗 5000  $\Omega\text{cm}$ 의 實驗常數  $C$  및  $m$ 값(Table 2)을 Paris' rule에 代入하여 計算한 數値를 이용하여 領域 II에 表面龜裂 進展速度  $da/dN$ 에 대한 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값과의 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 實驗常數  $m$ 값이 가장 작은 25  $\Omega\text{cm}$ (天然海水)에서의 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 는 다른 環境中에서 보다 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값의 腐蝕의 影響이 機械的인 影響보다 더 敏感해지고 있다. 그러나 實驗常數  $m$ 값이 다른 腐蝕環境中에서 보다 가장 크게 되는 5000  $\Omega\text{cm}$ 中에서 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 풀이 할 수 있다. 이러한 傾向은 지금까지의 腐蝕疲勞破壞의 연구와 잘 일치하고 있다<sup>47)</sup>. 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 進展速度  $da/dN$ 는 빨라져 比抵抗값 25  $\Omega\text{cm}$ 의 화살표 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되는 比抵抗 5000  $\Omega\text{cm}$ 의 화살표 방향과 같이 될 것으로 생각된다<sup>48)</sup>.

### 3.6.2 腐蝕環境中の 比抵抗의 變化에 따른 加速係數

Fig. 19는 腐蝕環境中の 比抵抗의 變化에 따른 表面龜裂 進展速度의 加速係數  $\alpha$ 에 대한 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값과의 關係를 나타낸 것이다.

여기서 加速係數  $\alpha$ 는 Fig. 16의 實驗值에 의해 比抵抗의 變化에 따른 腐蝕疲勞의 表面龜裂進展

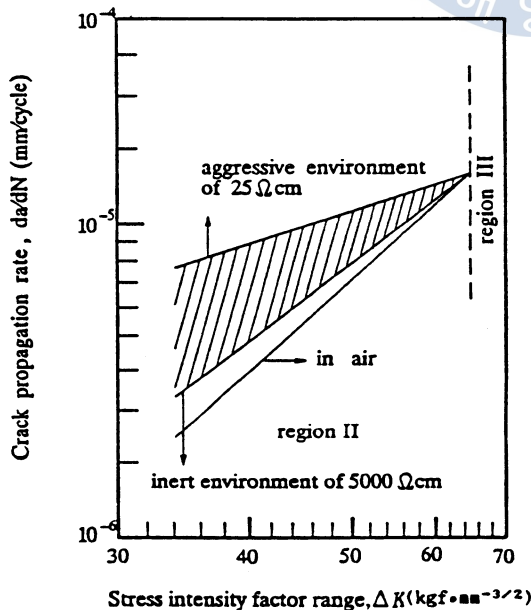


Fig. 18 Influence of stress intensity factor range on the crack propagation rate in marine environment

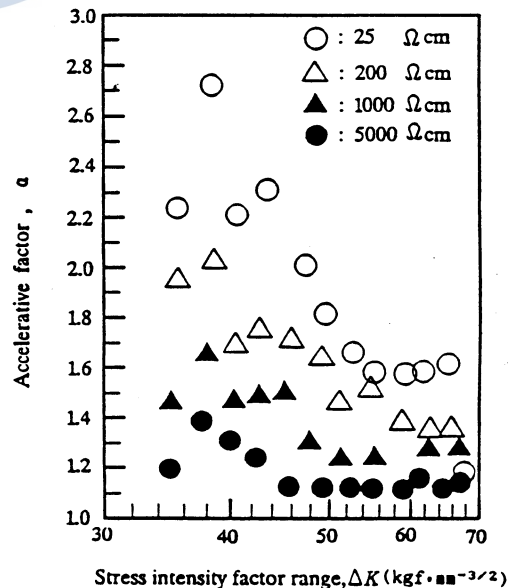


Fig. 19 Relation between accelerative factor and stress intensity factor range under various specific resistance

速度 $[(da/dN)_{cor}]$ 에 대한 空氣中에서 疲勞의 表面龜裂進展速度 $[(da/dN)_{air}]$ 의 比로 計算한 것이 며 式(6)과 같다<sup>49)</sup>.

$$\alpha = [(da/dN)_{cor}] / [(da/dN)_{air}] \quad (6)$$

(但, 空氣中에서의 表面龜裂進展速度  $(da/dN)_{air}$ 는 腐蝕의 影響이 없는 것으로 간 주함)

이 結果에 의하면 表面龜裂進展速度的 加速係數는 약 1.1에서 2.7로 나타나고, 腐蝕環境의 比抵抗이 減少할 수록 表面龜裂進展速度的 加速係數는 높게 나타나고 있으며, 比抵抗이 25  $\Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서의 加速係數가 가장 높은 값을 보이고 있다. 그리고 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 작 은 領域에서의 加速係數값  $\alpha$ 값이 높게 나타나지만 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 큰 領域에서의 加 速係數값  $\alpha$ 값은 작아지고, 이러한 樣相은 比抵抗이 減少할 수록 더욱 현저하게 나타남으로서 應 力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 작은 領域에서의 加速係數값  $\alpha$ 값은 機械的인 影響因子보다 腐蝕의 影響 因子가 더 支配的인 것을 알 수 있다.

### 3.6.3 모서리 龜裂의 進展速度特性

Fig. 20은 腐蝕環境의 比抵抗이 25 및 5000  $\Omega\text{cm}$ 인 溶液中과 空氣中에서 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의 한 龜裂깊이進展速度  $db/dN$ 에 대한 龜裂깊이  $b$ 와의 關係를 정리하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 比抵抗이 25  $\Omega\text{cm}$ 인 天然海水中에서 龜裂깊이進展速度  $db/dN$ 가 空氣中에서 보다 더 빨리 進展되고, 龜裂깊이進展速度는 龜裂깊이가 成長됨에 따라 遲延되고 있으며 이러한 樣相 은 空氣中에서 보다 天然海水(25  $\Omega\text{cm}$ )中에서 더욱 敏感하게 나타나고 있다.

Fig. 17과 Fig. 20에서 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 와 龜裂깊이進展速度  $db/dN$ 에 대한 巨視的인 傾向만을 比較考察하면, 모서리 龜裂이 成長함에 따라 表面龜裂進展速度는 급격히 빨라지나 龜裂 깊이進展速度는 오히려 遲延되는 傾向이다.

이러한 傾向의 原因은 이미 本 研究의 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂進展機構의 究明에서 表面 龜裂先端과 龜裂깊이先端에 각각 작용하는 反復應力과 腐蝕에 의한 것임이 밝혀졌다.

## 3.7 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 破面面積成長特性

### 3.7.1 모서리 龜裂의 破面面積成長學動

Fig. 5-8에서 보인 바와 같이 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂의 경우, 應力反復回數에 대한 表面 龜裂깊이와 龜裂깊이의 龜裂이 進展되는 形狀이 腐蝕環境條件이 變化함에 따라서 서로 다른 樣相 을 나타내고 있다.

本 研究에서와 같은 腐蝕環境中에서의 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하면 Fig. 21의 (A), (B)와 같고, 下部의 화살표는 龜裂成長方向을 나타낸 것이다.

여기서 初期에 表面龜裂成長길이  $\Delta a$  만큼 進展하였을 때와 일정한 길이로 進展한 後 같은 表面

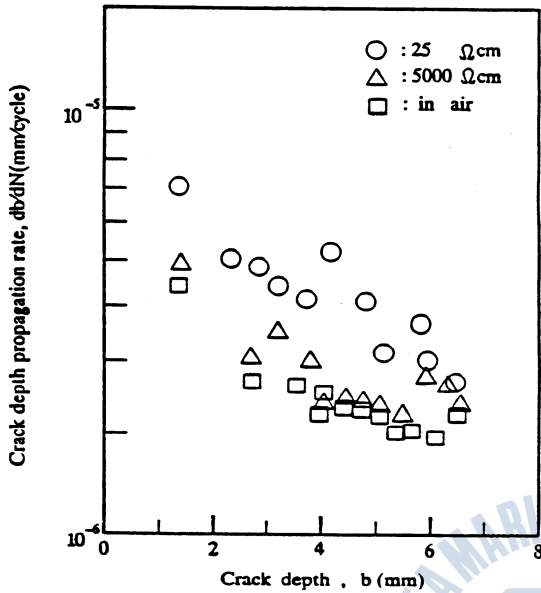


Fig. 20 Crack depth propagation rate vs crack depth in air and various specific resistance

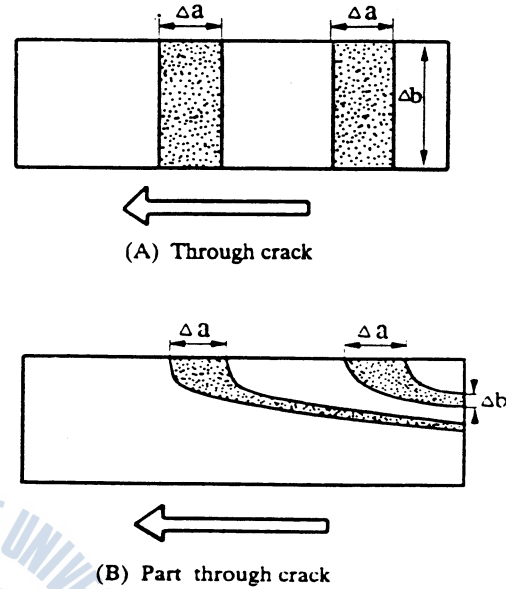


Fig. 21 Comparison of fracture surface growth of through and part through crack by corrosion fatigue

龜裂成長길이  $\Delta a$ 만큼 進展하였을 때의 증가된 破壞面의 面積을 比較해 보면, (A)의 貫通龜裂인 경우에는 龜裂길이  $\Delta b$ 의 進展길이 서로 같기 때문에 破面面積이 一定하게 증가하나 (B)의 四分橢圓形 모서리 龜裂의 경우에는 龜裂길이  $\Delta b$ 의 成長이 각각 달라지므로 破面面積은 일정치 않고, 또 Fig.6-9에서 보인 바와 같이 腐蝕環境條件이 變化함에 따라서 모서리 龜裂의 表面龜裂 成長길이  $\Delta a$ 만큼 進展하였을 때의 두께방향의 龜裂길이 成長은 腐蝕環境의 比抵抗의 變化에 따라 달라지므로써 증가된 破壞面의 面積은 腐蝕의 影響因子로 인해 더욱 일정치 않음을 알 수 있다.

따라서 腐蝕疲勞破壞의 斷面減少率의 견지에서 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 대한 成長되어진 破面面積  $A$ 의 關係를 究明함이 타당할 것으로 생각된다<sup>50</sup>. 특히 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. 22는 初期應力擴大係數範圍  $\Delta K_I$ 값을 일정히 負荷한 後, 腐蝕環境中の 比抵抗의 變化에 따른 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 破面面積  $A$ 에 대한 應力反復回數  $N$ 와의 關係를 計算하여 整理해 보인 것이다.

여기서 모서리龜裂의 破面形狀은 Fig. 5와 같이 四分橢圓形이므로, 表面龜裂길이  $a$ 와 龜裂깊이  $b$ 와의 關係를 이용하여 腐蝕疲勞 破壞面의 面積  $A$ 를 다음과 같이 求하였다.

$$A = 1/4(\pi ab) \quad (7)$$

여기서  $a$  : 表面龜裂길이

$b$  : 龜裂깊이

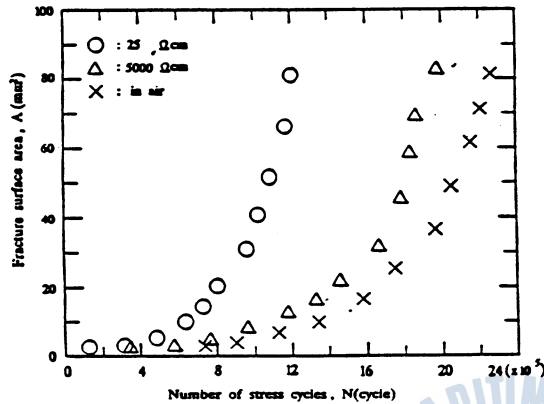


Fig. 22 Relation between fracture surface area and number of stress cycles in air and various specific resistance

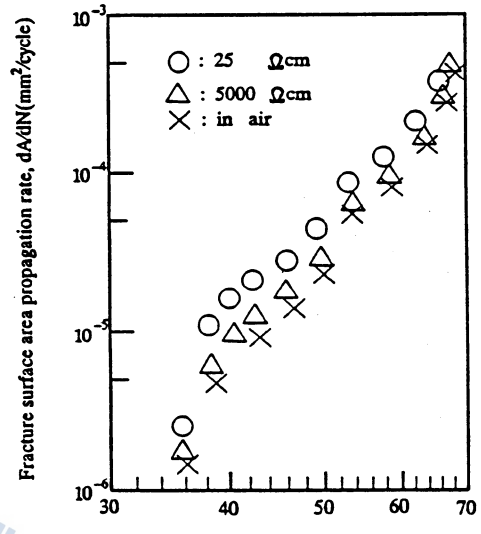


Fig. 23 Relation between fracture surface area propagation rate and stress intensity factor range

이 결과에 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  $10 \text{ mm}^2$ 에서의 應力反復回數는 空氣中에서 보다 天然海水中에서 약  $5 \times 10^5 \text{ Cycle}$  정도 빠르나, 破面面積  $A$ 가 급격히 빨라지는 약  $40 \text{ mm}^2$ 에서의 應力反復回數  $N$ 는 空氣中에서 보다 天然海水中에서 약  $1 \times 10^6 \text{ Cycle}$ 로 더 빨리 나타남으로써 모서리 龜裂에서 破壞面積의 成長舉動은 應力反復回數가 증가될 수록 腐蝕因子에 의한 影響이 더 敏感해진다.

따라서 空氣中에서 보다 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.

### 3.7.2 모서리 龜裂의 破面面積成長速度特性

疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂成長에 따른 破面面積成長速度  $dA/dN$ 를 구하기 위하여, Fig. 22의  $A-N$ 曲線에서 각점의 기울기로부터 破面面積成長速度  $dA/dN$ 을 구하였다.

Fig. 23은 空氣中과 腐蝕溶液의 比抵抗을 25 및  $5000 \text{ } \Omega\text{cm}$ 로 하였을 때의 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  $\Delta K$ 값과의 關係를 정리하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 天然海水中( $25 \text{ } \Omega\text{cm}$ )에서의 破面面積成長速度  $dA/dN$ 는 空氣中에서 보다 더 빨라지고, 특히 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 낮은 領域下에서는 더욱 빨라지고 있다. 그리고 각각의 環境條件下에서 龜裂初期段階를 제외한 破面面積成長速度  $dA/dN$ 는 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 커

짐에 따라서 직선적으로 빨라지고 있는 傾向을 나타내고 있으므로써  $dA/dN$ 와  $\Delta K$ 와의 相關關係를 考察하기 위해 Paris' rule을 應用하여 다음과 같은 式을 적용하고자 한다.

$$dA/dN = C(\Delta K)^m \quad (8)$$

Table 3은 Fig. 23의 實驗值를 式(8)과 같이 應用된 Paris' rule에 의해 電算化한 實驗常數  $C$ 와  $m$ 값을 정리하여 보인 것이다.

이 結果에 의하면 空氣中에서 보다 腐蝕性 雰圍氣인 天然海水中에서의 實驗常數  $C$ 값은 커지고 있는데 비해 實驗常數(指數)  $m$ 값은 작아지고 있는 樣相을 나타내고 있다. 또 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값에 대한 破面面積成長速度  $dA/dN$ 와 表面龜裂成長速度  $da/dN$ 에 미치는 腐蝕因子와 機械的因子的 影響을 究明하고자 할 경우, Fig. 15와 Fig. 23에서 Paris' rule을 適用함에 있어서 어느쪽이 더 合理的인가를 比較·考察하고자 한다.

Table 3. 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 Environment ( $\Omega\text{cm}$ )	C	m
25	$1.40 \times 10^{-13}$	5.12
5,000	$6.23 \times 10^{-14}$	5.23
in air	$2.41 \times 10^{-14}$	5.34

먼저 Table 2 및 3에 의하면 本 實驗에 있어서 Paris' rule의 實驗常數  $m$ 값은 鋼材의  $m$ 값인 2-7의 範圍內에 있음을 알 수 있으며<sup>51)</sup>, 이를 根據로하여 Fig. 17의 表面龜裂進展速度와 Fig. 23의 破面面積成長速度를 Paris' rule에 의해 이들 速度特性을 比較·考察하고자 한다.

첫번째 Paris' rule을 적용할 수 있는 측면에서 Fig. 17의 경우는 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 작은 領域 II에서만 Paris' rule을 적용할 수 있으나 Fig. 23의 경우는 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값의 거의 全 領域에 걸쳐 Paris' rule을 적용할 수 있다.

두번째 이미 Fig. 5-8에서도 考察한 바와 같이 腐蝕環境條件의 變化에 따른 모서리 龜裂의 경우에 있어서 表面龜裂과 龜裂깊이의 成長舉動은 각각 다른 樣相이다.

위의 두가지 측면에 의하면 表面龜裂成長速度  $da/dN$  보다 破面面積成長速度  $dA/dN$ 에 의해 評價함이 더 合理的임을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

本 研究에서는 SB41 鋼材를 대상으로 海洋環境中에서 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗을 行하여, 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 進展機構를 機械的인 굽힘應力, 破面組織 및 電氣化學的인 側面에서 究明하고, 腐蝕環境中の 比抵抗이 變化함에 따른 모서리龜裂 進展舉動에 대해서 究明하였다.

중요한 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 空氣中에서 모서리龜裂의 形狀比  $b/a$  값은 天然海水中에서 보다 더 큰 값을 나타내고 있다.
- 2) 모서리龜裂의 龜裂길이  $a$ , 龜裂깊이  $b$  및 두께  $t$ 에 대한 形狀比  $b/a$ 와  $b/t$ 와의 關係는 각각의 環境條件中에서 다음과 같은 式에 의해 評價될 수 있다.

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

단,  $x, \gamma$  ; 試驗常數

- 3) 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂進展機構는 表面龜裂과 龜裂깊이의 先端에 作用하는 應力의 크기와 腐蝕生成物에 關係가 있음을 알았다.
- 4) 海洋環境中에서 龜裂初期段階와 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性은 약 1.17~2.20이며, 比抵抗이 減少할 수록 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性 보다 龜裂初期段階의 腐蝕感受性이 더 敏感해진다.
- 5) 海洋環境中에서의 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 와 龜裂깊이進展速度  $db/dN$ 와 空氣中에서 보다 더 빠르고, 比抵抗이 增加할 수록  $da/dN$ 와  $db/dN$ 는 遲延된다.
- 6) 腐蝕環境의 比抵抗이 減少할 수록 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 에 미치는 Paris' rule [ $da/dN = C(\Delta K)^m$ ]의 實驗常數  $m$ 값은 작아지고,  $C$ 값이 커지면서 腐蝕의 影響이 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값에 의한 影響보다 더 敏感하다.
- 7) 加速係數  $\alpha$ 는 약 1.1에서 2.7이고, 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 값이 작은 領域下에서  $\alpha$ 값이 增加된다.
- 8) 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 경우, 表面龜裂進展速度  $da/dN$ 와 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 와의 相關關係에 의한 것보다 破面面積成長速度  $dA/dN$ 와  $\Delta K$ 와의 相關關係에 의한 評價가 더 合理的이다.

#### 參考文獻

- 1) 田大熙, 腐蝕과 防蝕의 管理(補訂版), 一中社, pp.489-490(1985)
- 2) 榮 幸雄, 海洋雰圍氣での腐蝕要因の分析, 金屬材料, Vol.10, NO.9, pp.13-16(1970)
- 3) American Society for Metals, Metals Handbook, Vol.8, Mechanical Testing, pp.403-430(1985)
- 4) 腐蝕防蝕協會, 金屬防蝕技術便覽, 機電研究社, pp.169-186(1984)
- 5) Jaske, C. E., D. Broek, J. E. Stater, and W. E. Anderson, Corrosion Fatigue of Structural Steel in Seawater and for Offshore Application, ASTM STP 642 pp.19-47(1978)
- 6) 鈴木 揚之助, 海水中における軟鋼の疲勞き裂傳播, 防蝕技術, Vol.32, No.6, pp.318-323(1983)
- 7) 益本 功, 赤石 撒, 鋼材および熔接継手の 3% NaCl 水溶液腐蝕疲勞에 關する研究(第1報), 日本熔接學會誌, Vol.44, No.3, pp.60-65(1975)
- 8) T. Howard Rogers, Marine Corrosion, Great Britain, pp.4-10(1968)
- 9) David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff and Noordhoff, Netherlands, pp.80-86(1978)
- 10) 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, pp.49-58(1988)
- 11) 鋼材俱樂部, 鋼製魚礁用組材標準仕様, pp.14-27(1986)
- 12) 鄭善謨, 韓東哲, 標準機械設計學, 東明社, pp.2-6(1987)
- 13) 前掲書(1), pp.7-8



- 14) H.C.Rhee, Melvin F Kanninen, Opportunities for application of fracture mechanics for offshore structures, Fracture mechanics in offshore industry, pp.23-35(1988)
- 15) 駒井謙治郎, 應力腐食割れ及び腐食疲勞への破壊力學の應用, 日本 熔接學會誌, Vol.52, No. 3, pp. 23(1983)
- 16) 駒井謙治郎, 腐蝕疲勞研究の現狀と展望, 日本鐵と鋼, Vol.69, No.7, pp.8(1983)
- 17) 木烏 茂, 防蝕工學, 日刊工學新聞社, 東京, pp.186-187(1980)
- 18) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 金屬腐食疲勞強度設計, 養賢堂, 東京, pp.21-33(1982)
- 19) 日本金屬學會, 金屬材料の強度と破壊, 東京, 丸善, pp.465-467(1971)
- 20) H.C.Rhee and M.M.Salama, Fracture mechanics in offshore industry, ASME Book, pp.23-105(1988)
- 21) John J. Burke and Volker Weiss, Fatigue Environment and temperature effects, Plenum press, pp.41-79(1983)
- 22) Z. A. Forouli, Environment-sensitive fracture of engineering materials, the metallurgical society of AIME, pp.521-639(1983)
- 23) A. J. McEvily and R. W. Staehle; Corrosion fatigue, National association of corrosion Engineers, pp. 25-29, pp.289-345(1972)
- 24) H. L. Craig, T. W. Crooker and D. W. Hoepfner, Corrosion fatigue technology, Lutherville-timonium. Md.,pp.19-50(1978)
- 25) 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 電氣防蝕에 관한 研究, 韓國船用機關學會誌, Vol.8, No.2, pp.39-50(1984)
- 26) 임우조, 김인철, 김백운, 航空用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 傳播舉動에 미치는 應力比의 영향, 한국부식학회지, Vol.18, No.1, pp.49-55(1989)
- 27) 林祐助, 金秀柄, 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, Vol.25, No.2, pp.87-104(1989)
- 28) Harwell, UK, The effect of seawater on corrosion fatigue in structural steels, Corrosion fatigue, pp. 89-100(1980)
- 29) David W.Hoepfner, Corrosion fatigue considerations in materials selections and Engineering Design, Corrosion fatigue, pp.3-11(1972)
- 30) 金永植, 金英種, 平面 굽힘 疲勞荷重에 의한 알루미늄 合金材의 모서리균열 傳播舉動에 관한 研究, 韓國船用機關學會誌, Vol.8, No.1, pp.49-63(1984)
- 31) 川原正言, 栗原正好, 表面き製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, pp.297-306(1975)
- 32) 前掲書(30), pp.57
- 33) 前掲書(9), pp.52-62
- 34) 前掲書(18), pp.22-23
- 35) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 喜多禎人, 80キロ級高張力鋼の腐蝕疲勞き裂進展舉動, 日本機械學會論文集, Vol.49, No445, pp.1032(1984)
- 36) 한문식, 김상철, 대한용접학회지, Vol.6, No.3, pp.43-55(1988)
- 37) 前掲書(30), pp.57
- 38) 前掲書(31), pp.301-303
- 39) 前掲書(2), pp.15
- 40) 石塚鐵夫, 應力擴大係數における鋼材の腐蝕疲勞龜裂傳播に關する研究, 日本科學研究費補助金研究成果報告書, pp.6(1989)
- 41) 前掲書(16), pp.8-10

- 42) 前掲書(30), pp. 54
- 43) H. O. Fuchs, Metal fatigue in engineering, pp.4-5(1980)
- 44) ASTM E647-83, Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above  $10^{-8}$  m/cycle, pp. 754-755(1983)
- 45) J. P. Gallagher and R. P. Wei, Corrosion fatigue crack propagation behavior in steels, Corrosion fatigue NACE-2, pp.409-410(1971)
- 46) 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, pp.65-67(1982)
- 47) 羅義均, 林載奎, 趙圭種, 鄭世喜, 海水環境에서 鋼鎔接部の 環境強度評價에 관한 研究(II), 大韓熔接學會誌, Vol. 7, No. 1, pp. 56(1989)
- 48) A. J. McEvily and R. W. Staehle, Corrosion fatigue, National association of corrosion Engineers, pp. 25-29, pp.324-335(1972)
- 49) 鄭世喜, 金台永, 羅義均, 海水環境에서 鋼鎔接部の 環境強度評價에 관한 研究(II), 大韓熔接學會誌, Vol. 6, No. 2, pp. 58(1988)
- 50) 前掲書(30), pp. 57
- 51) 西谷 弘信, 疲勞強度學 6, オ-ム社, pp. 254(1985)

