

船舶用 알루미늄 합금材의 腐蝕疲勞龜裂 進展特性에 관한 研究

임우조·이종락·이진열*
부산수산대학 한국해양대학*
(1988년 7월 31일 접수)

Study on the Characteristics of the Corrosion Fatigue Crack Propagation of Al-Alloy used for the Shipbuilding

Uh-Joh LIM, Jong-Rark LEE and Jin-Yel LEE*
National Fisheries University of Pusan Korea Maritime University*
(Received July 31, 1988)

Recently with the rapid development in marine and shipbuilding industries such as marine structures, ship, and chemical plants, there occurs much interest in the study of corrosion fatigue characteristics was closed up an important role in mechanical design.

In this study, the 5086 Al-Alloy was tested by use of a rotary bending fatigue tester and was investigated under the environments of various specific resistance and air.

The specific resistance, as a corrosion environment, was changed 15, 20, 25 and 5000Ω·cm.

The corrosion fatigue crack initiation sensitivity was quantitatively inspected for 5086 Al-Alloy in the various specific resistance.

The experimental constants of Paris rule were examined in the various specific resistances, and the influences of load and corrosion with affect the crack growth rate were compared with.

Main results obtained are as follows:

- (1) Number of stress cycles to corrosion fatigue crack initiation delaies and corrosion fatigue crack initiation sensitivity decreases with the increasing for the specific resistance.
- (2) The experimental constant *m* of Paris rule decreases with the decreasing for specific resistance. Hence the effect of corrosion is more susceptible than that of stress intensity factor.
- (3) The corrosion fatigue crack of 5086 Aluminium Alloy appears intergranular fracture.
- (4) Corrosion sensitivity is decreased with the increasing stress intensity factor and is nearly uniform when stress intensity factor is over $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3/2}$.

序 論

最近 工業의 發展과 더불어 機械 構造物 등은 더욱 輕量化 및 高速化가 되고 있으며, 이들 構造物이 사용되는 분위기는 더욱 環境汚染의 深化 및 多樣化 되고 있다^{1,2)}.

이러한 경향에 대해서 각종 機械 構造物은 각 使用環境 아래서 장시간에 걸쳐 충분한 안정성을 확보 하기 위해서는 材料強度에 미치는 環境 특히, 腐蝕

性 環境効果의 해명과 環境強度 設計基準의 확립이 절실히 요구되고 있다^{3,4)}.

金屬材料의 環境強度로서는 靜荷重하의 水素脆化 龜裂을 포함한 應力腐蝕龜裂과 動荷重하의 腐蝕疲勞 破壞가 우선적으로 거론되고 있다. 應力腐蝕龜裂은 環境과 材料가 특정한 組合에 의해 發生하는 현상이지만, 腐蝕疲勞破壞는 이와 같은 限定이 없고 항상 일어날 수 있는 것이다⁵⁾.

腐蝕環境중에서 동시에 反復應力을 받을 때 현저

하게 強度가 低下하는 것은 1917년에 Haigh에 의하여 알려졌고, 이것을 腐蝕疲勞라고 불렀다^{6,7)}.

한편 알루미늄 합금은 輕量性, 耐蝕性, 加工性 및 熔接性이 양호하고, 또한 低溫에서도 機械的 性質의 低下가 일어나지 않는다⁸⁾. 이 때문에 최근 漁船, 高速旅客船, 高速艦艇, LNG船과 같은 特殊船舶, 海洋構造物, 低溫裝置 및 車輛 등에 널리 사용된다⁹⁾. 그러나 이들이 海水 및 海洋大氣에 사용될 경우 波浪 및 船體振動 등에 의한 反復應力 및 기타 反復的인 外部應力의 作用에 의해 腐蝕疲勞作用을 받는다. 이 腐蝕疲勞作用은 船舶部材의 損傷 및 破壞에 중요한 因子가 되고 있다¹⁰⁻¹⁴⁾.

따라서 本 研究에서는 特殊船舶의 製作에 많이 사용하는 Al-Mg系 合金材(5000계)중 5086-H116 알루미늄 合金材를 여러가지 腐蝕環境과 空氣중에서 平面 굽힘 腐蝕疲勞試驗을 행하여 表面龜裂 發生 및 進展特性을 觀察 調查하고자 한다.

이 實驗을 통하여 腐蝕環境에 따른 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 破斷에 여러가지 環境이 미치는 腐蝕 感受性을 定量的으로 究明하고자 한다. 특히, 여러가지 比抵抗의 環境에서 腐蝕疲勞龜裂 進展速度特性을 Paris rule을 적용하여 전산에 의한 實驗常數를 구하고, 이 結果에 의해 腐蝕疲勞龜裂에 미치는 應力強度係數와 腐蝕에 의한 影響을 研究함으로써 여러가지 比抵抗의 環境에 사용되는 船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞破壞에 대한 基礎設計資料로서 기여하고자 한다.

試驗片 및 實驗方法

1. 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗材料는 두께 7.1 mm인 5086 알루미늄 合金材로, 그 化學的 成分과 機械的 特性은 Table 1에 보인다. 이와 같은 板材로부터 절취하여 제작한 試驗片 및 노치의 形狀을 Fig.1에 보인다. 이러한 試驗片은 그 길이 方向이 壓延方向과 동일하도록 제작하였다.

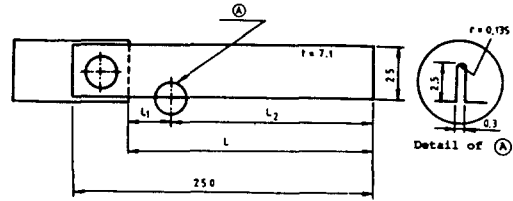


Fig. 1. Dimension of test specimen(mm).

이러한 試驗片 形狀의 노치(notch) 先端에 있어서의 應力強度 係數範圍(stress intensity factor range) ΔK 값은 Kawahara 등이 제시한 다음 식으로 계산하였다¹⁵⁾.

여기서

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta S \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ΔS : 굽힘應力振幅 (kg/mm^2)

$\Delta S = S_{max} - S_{min}$

a : 龜裂길이 (mm)

疲勞試驗에서 굽힘應力(bending stress) S 는 다음과 같이 구하였다¹⁶⁾.

굽힘 변형량 $\delta = PL^3/3EI$ 에서

하중 $P = 3EI\delta/L^3$ 이므로

굽힘應力 $S = M/Z = P(L-L_1)/Z$

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

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

$$\therefore S = 1.5 E\delta t(L-L_1)/L^3 \quad (2)$$

여기서

E = 영 계수 (kg/mm^2)

I = 단면 2차모멘트 ($bt^3/12$)

L = 시험편 고정부에서 응력부까지 거리(mm)

L_1 = 시험편 고정부에서 노치와의 거리 (mm)

t = 시험편두께 (mm)

Z = 단면계수 ($bt^2/6$)

δ = 굽힘 변형량 (mm)

한편 試驗片 表面은 사포 2000번까지 研磨한 후 아세톤으로 脫脂하고 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 전표면을 투명한 에폭시 樹脂로 被覆絶緣시켰다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of used material(5086-H116)

Chemical composition (wt %)	Mn	Cr	Cu	Mg	Si	Ti	Fe	Al
		0.36	0.132	0.02	3.7	0.05	0.015	0.24
Mechanical properties	Tensile strength(kg/mm^2)			Yield strength(kg/mm^2)			Elongation (%)	
	42			30			12	

2. 實驗裝置

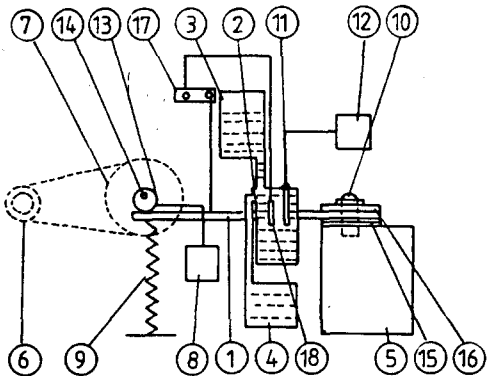
本實驗에 사용한 片心輪式 定變位 平面굽힘 疲勞 試驗機의 全體 系統圖는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 腐蝕疲勞 試驗機는 自작한 것으로 板狀試驗片의 一端은 釘개로 덮어 볼트로 固定하고 自由端은 片心輪의 回轉에 의하여 平面굽힘 反復應力을 받게 하였으며, 試驗片은 동시에 4개까지 裝置할 수 있도록 하였다.

그리고 Fig. 1에 나타낸 片心輪의 片心量, 固定端과 荷重點과의 길이(L) 및 固定端과 노치와의 길이(L1)를 變化시킴으로서 應力을 미세하게 調節할 수 있도록 하였다.

平面굽힘 應力은 motor에 의해 구동되는 片心輪에 의해 받으며, 反復回數는 pulley 축에 연결되어 있는 counter meter 로써 測定하였다.

이 實驗에 사용한 應力의 各 形態는 Fig. 3과 같이 a)는 應力比 R=0인 一定片振 應力이며 b)는 過荷重시 過荷重比가 1.52인 一端片振 應力이다. 이때 反復荷重의 速度는 모두 310 rpm (f=5.17 Hz)으로 하였다.

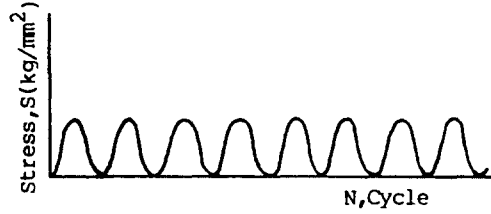


- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Specimen | 10. Adjusting nut |
| 2. Corrosion cell | 11. Electrode |
| 3. Feed water tank | 12. Conductivity meter |
| 4. Drain water tank | 13. Eccentric cam |
| 5. Bed | 14. Shaft |
| 6. Motor | 15. Liner |
| 7. Pulley | 16. Cover plate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

Fig. 2. Schematic diagram of test apparatus.

3. 實驗方法

腐蝕環境槽는 플라스틱으로 제작하였으며, 腐蝕環境은 天然海水에 淸明한 水道水와 鹽化水素(HCl, 35%)를 소량씩 混合하여 그 比抵抗이 15, 20, 25 및



Stress ratio (R = 0)

Fig. 3. Stress wave forms.

5000 Ω·cm 로 되게 하여 각각 固定하였으며, 實驗中의 水溫은 室內溫度로 하였다.

또한 腐蝕槽內의 溶液은 Cl⁻ 이온의 濃度 및 電解液의 傳導度의 變化를 防止하기 위하여 시간당 4 l의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 絶緣性 필터를 사용하여 腐蝕疲勞 試驗을 행하였다.

腐蝕疲勞 進展길이는 20배의 확대경으로 腐蝕疲勞 龜裂初期(a=0.4 mm)부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

結果 및 考察

1. 腐蝕疲勞龜裂에 미치는 比抵抗의 影響

Fig. 4는 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 發生에 미치는 比抵抗의 影響을 조사하기 위하여 初期 應力強度係數값을 一定하게 했을 때 空氣중과 여러가지 比抵抗에 대한 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生(a=0.4 mm)까지의 反復回數와의 關係를 보인 것이다.

이에 의하면 여러가지 比抵抗 環境에서 보다 空氣중에 있어서 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復回數는 遲延되는 現象이며, 比抵抗이 감소할수록 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復回數는 현저하게 감소

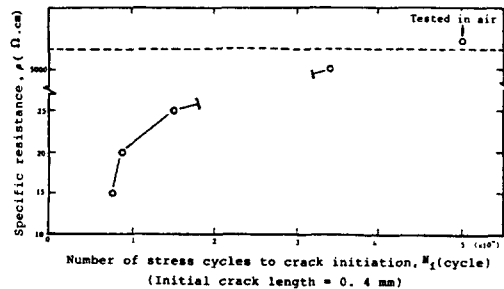


Fig. 4. Specific resistance versus number of stress cycles to crack initiation at $K_{I1} = 23.0 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$.

하는 경향을 보이고 있다.

Fig.5는 이상과 같은 경향을 좀더 定量的으로 검토 하기 위해 空氣중에 있어서의 初期 疲勞龜裂 發生까지의 反復回數에 대한 여러가지 比抵抗에 있어서의 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復回數에 대한 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 평가하여 보인 것이다.

이에 의하면 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 感受性は 比抵抗이 감소할수록 증가하는 樣相을 보이고 있다.

Fig.6은 空氣중과 여러가지 腐蝕環境의 比抵抗에서 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 破斷까지의 反復回數를 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 空氣중에서의 疲勞破斷보다 모든 比抵抗의 環境에서의 腐蝕疲勞破斷이 빨라졌으며, 또

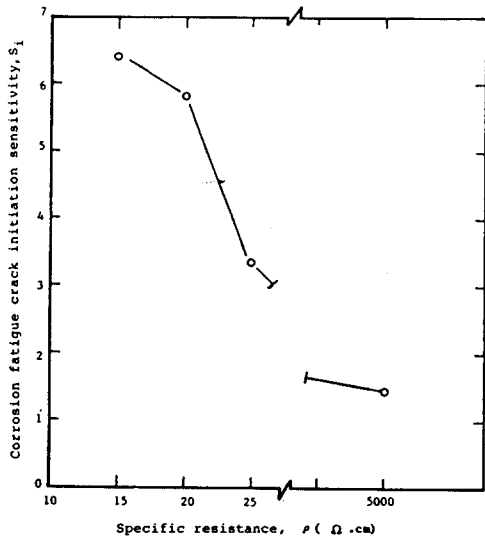


Fig. 5. Specific resistance versus corrosion fatigue crack initiation sensitivity at $K_{Ii} = 23.00 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$.

(S_i = Number of stress cycles to crack initiation in air / Number of stress cycles to crack initiation in various specific resistance)

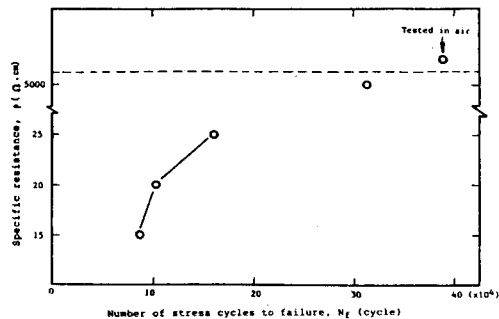


Fig. 6. Relation between various specific resistance and number of stress cycles to failure.

한 比抵抗이 증가할수록 腐蝕疲勞龜裂 破斷까지의 反復回數는 遲延되고 있는 樣相을 보이고 있다.

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6의 結果에 의하면 比抵抗이 감소함에 따라서 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 및 破斷까지의 反復回數는 빨라지고, 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生 感受性は 증가되는 樣相을 보이고 있다.

이 原因은 比抵抗이 감소할수록 Cl^- 이온의 濃度와 傳導度가 높게 되어 試驗片 노치先端의 不動態 皮膜의 破壞가 쉽게 일어나고, 또한 再不動態 皮膜의 形成이 어렵게 되기 때문이다. 따라서 노치先端이 陽極으로 되어 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된다¹⁷⁾.

2. 腐蝕疲勞龜裂 進展速度特性

Fig. 7은 腐蝕環境의 比抵抗이 15, 20, 25 및 5000 $\Omega \cdot \text{cm}$, 그리고 空氣중에서 初期 應力強度係數값을 일정하게 했을 때 腐蝕疲勞龜裂 進展길이의 反復回數와의 關係를 정리하여 보인 것이다.

이 結果에 의하면 比抵抗 15 $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 環境에서 腐蝕疲勞龜裂이 가장 빠르게 進展하며, 比抵抗이 증가함에 따라 腐蝕疲勞龜裂 進展이 遲延되는 樣相을 보이고, 空氣중에서 龜裂 進展이 가장 遲延되었다.

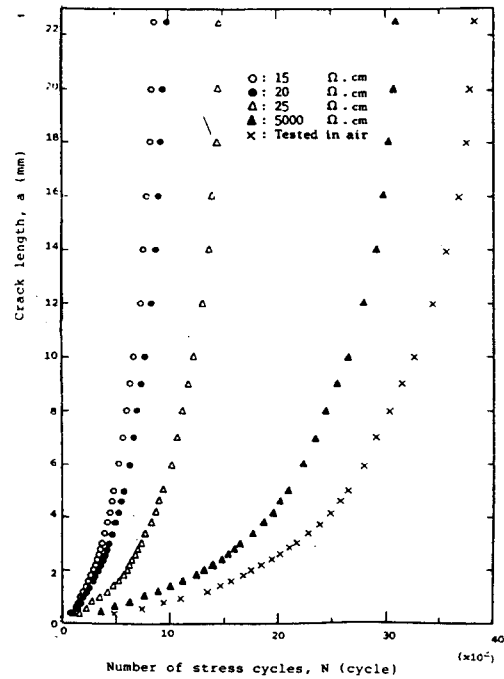


Fig. 7. Fatigue crack length versus number of stress cycles in air and various specific resistance.

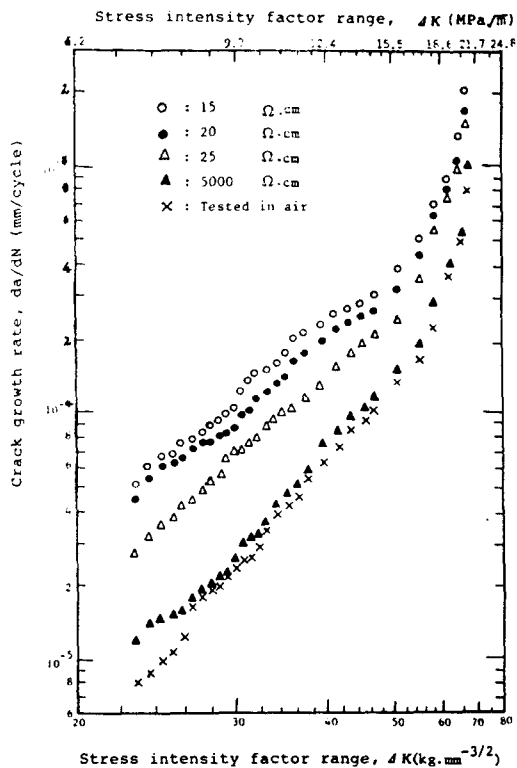


Fig. 8. Crack growth rate versus stress intensity factor range for various specific resistance.

Fig. 8은 여러가지 比抵抗과 空氣중에서 腐蝕疲勞龜裂 進展速度와 應力強度係數範圍 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다.

이에 의하면 모든 應力強度係數範圍에 있어서 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 比抵抗 $15 \Omega \cdot \text{cm}$ 일 때 가장 빨랐으며, 比抵抗이 증가할수록 龜裂進展速度는 遲延되고, 특히 空氣중에서 龜裂進展速度가 가장 느렸다.

Table 2는 Fig. 8의 實驗值를 Paris rule에 의해 電算化한 實驗常數 C 와 m 의 값을 정리한 것이다 (8, 19).

Table 2. The experimental constants C and m of Paris rule for 5086 Al-Alloy

Environments	Experimental Constants	C	m
15 $\Omega \cdot \text{cm}$		2.33×10^{-8}	2.49
20 $\Omega \cdot \text{cm}$		1.93×10^{-8}	2.50
25 $\Omega \cdot \text{cm}$		5.07×10^{-9}	2.80
5000 $\Omega \cdot \text{cm}$		4.38×10^{-10}	3.24
Tested in air		1.43×10^{-10}	3.51

Paris rule: $da/dN = C(\Delta K)^m$

이 結果에 의하면 空氣중에서 보다 모든 比抵抗의 環境에서 實驗常數 C 값은 커지고 實驗常數 m 값은 작아지고 있으며, 또한 比抵抗이 감소할수록 實驗常數 C 의 값은 커지면서 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生進展速度는 빠르게 나타나고, 또한 實驗常數 m 의 값은 작아지면서 腐蝕疲勞龜裂 進展速度에 미치는 效果는 應力強度係數값에 의한 影響에 비해 腐蝕에 의한 影響이 점차 敏感해져 가는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 여러가지 比抵抗과 空氣에 대하여 腐蝕疲勞龜裂 進展速度와 應力強度係數와의 관계를 Paris rule에 의해 計算한 것을 線圖로 나타낸 것이다.

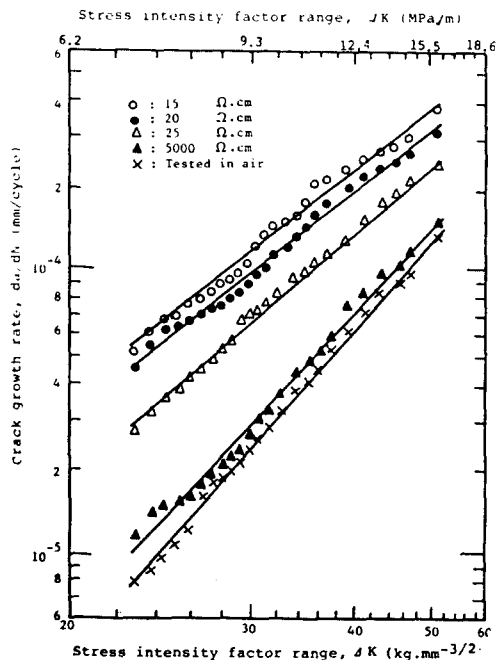


Fig. 9. Crack growth rate versus stress intensity factor range for various specific resistance and air.

이에 의하면 比抵抗 $15 \Omega \cdot \text{cm}$ 일 때 경사가 가장 완만하고 比抵抗이 증가할수록 경사가 급격해지고 있으며, 空氣중에서 경사가 가장 급격하다.

또한 應力強度係數範圍 ΔK 가 작아질에 따라 比抵抗 $15 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 腐蝕環境에서의 龜裂進展速度와 空氣중의 龜裂進展速度와의 차가 커지는 樣相을 보이고 있다. 이는 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 應力強度係數값 K_I 에 의한 影響보다 腐蝕에 의한 影響을 많이 받는 것으로 思料된다.

그리고 應力強度係數값 K_I 가 증가함에 따라 比抵抗 $15 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 龜裂進展速度와 空氣중의 龜裂進展速

度와의 차는 작아지는 現象을 보이고 있다. 이는 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 腐蝕에 의한 影響이 점점 明確되어 가면서 應力強度係數값에 의한 影響이 크게 되는 것으로 思料된다.

3. 腐蝕疲勞龜裂 進展에 미치는 腐蝕特性

Fig.10은 여러가지 比抵抗에 대해서 應力強度係數 範圍와 腐蝕感受性과의 關係를 나타낸 것이다. 이때 腐蝕感受性은 각각의 比抵抗의 腐蝕疲勞龜裂 進展速度를 空氣의 疲勞龜裂 進展速度로 나눈 값이다.

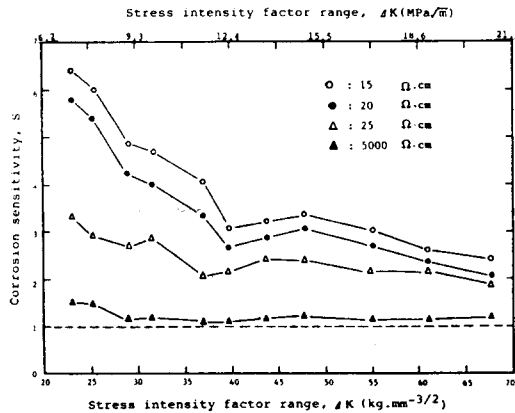


Fig.10. Corrosion sensitivity versus stress intensity factor range for various specific resistance.
(S=Crack growth rate of various specific resistance/Crack growth rate of air)

이에 의하면 모든 應力強度係數값에서 比抵抗 15 Ω·cm 일 때 腐蝕感受性이 가장 높으며, 比抵抗이 증가할수록 腐蝕感受性은 낮아진다. 그리고 應力強度係數값이 증가함에 따라 腐蝕感受性은 감소되는 現象을 나타내고 應力強度係數값이 40 kg·mm^{-3/2} 이상 일 때는 腐蝕感受性의 變化는 거의 균일하게 나타나고 있다.

일반적으로 龜裂進展速度 da/dN와 應力強度係數 範圍 ΔK의 線圖에서 세 領域으로 나누어지는데, Fig.8과 Fig.10에서 比較하면 應力強度係數값이 40 kg·mm^{-3/2} 이하일 때는 腐蝕에 의한 影響을 많이 받는 第II 領域으로 생각되며, 應力強度係數값이 40 kg·mm^{-3/2} 이상일 때는 腐蝕에 의한 影響보다 應力強度係數값에 의한 影響이 많은 第III 領域으로 생각된다²⁰⁾.

Photo.1은 比抵抗 25 Ω·cm에서 腐蝕疲勞龜裂의 巨視적인 樣相을 보인 것이다.

Photo.2는 比抵抗 25 Ω·cm에서 腐蝕疲勞龜裂 表面을 走査型 電子顯微鏡으로 觀察한 것이다.

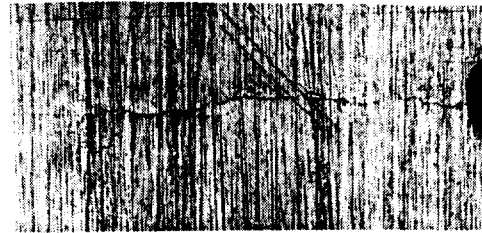


Photo.1. Micro-graph of corrosion fatigue crack propagation under $\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$.

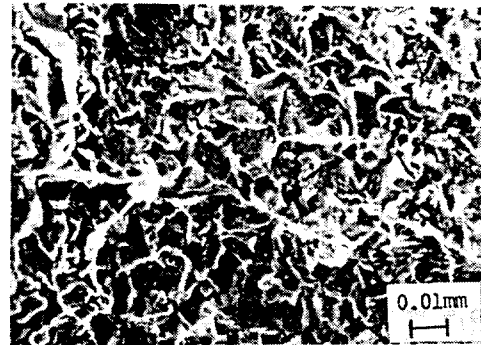
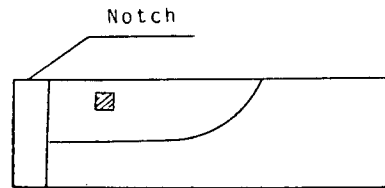


Photo.2. Scanning electron micrograph of corrosion fatigue crack under $\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$.

이에 의하면 알루미늄 合金(5086) 板材의 腐蝕疲勞龜裂은 粒界龜裂 破壞의 樣相을 보이고, 脆性破壞의 樣相은 거의 보이지 않으므로 水素龜裂에 의한 것 보다는 陽極活性化 腐蝕에 의한 것이라 思料된다⁷⁾.

4. 結 論

平面 굽힘 腐蝕疲勞 試驗機를 사용하여 船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞破壞에 관한 研究를 한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 比抵抗이 증가함에 따라서 初期 腐蝕疲勞龜裂 發生까지의 反復回數는 遲延되고, 그 腐蝕感受性은 감소하는 樣相을 나타낸다.

2. 比抵抗이 감소할수록 Paris rule의 實驗常數 m

값은 작아지면서 應力強度係數값에 비해 腐蝕에 의한 影響이 더욱 敏感해 진다.

3. 알루미늄 5086 合金의 腐蝕疲勞龜裂은 粒界龜裂破壞의 樣相을 보이고 있다.

4. 應力強度係數값이 증가함에 따라 腐蝕感受性은 감소되어지고 應力強度係數값이 $40 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 이상일때 腐蝕感受性은 거의 균일하게 된다.

參 考 文 獻

- 1) 田大熙(1985): 우리나라 腐蝕界의 어제와 오늘. 한국부식학회지. 14(1), 33,
- 2) 向井嘉彦 · 村田雅人(1979): 스텐레스鋼의力應 腐蝕割れ에對する破壞力學의適用について. 日本 溶接學會誌 48(11), 5.
- 3) 駒井謙治都(1983): 應力腐蝕割れ及び腐蝕疲勞への 破壞力學의應用. 日本溶接學會誌 52(3), 23.
- 4) 駒井謙治都(1983): 腐蝕疲勞研究의現狀と展望. 日本鐵と鋼 61(7), 8.
- 5) 松田誠吾 · 松島巖(1975): 腐蝕反應とその制御. 産業圖書株式會社, 東京, 71.
- 6) 木島茂(1980): 防食工學. 日刊工業新聞社, 東京, 186-187.
- 7) 遠藤吉都 · 駒井謙治都(1982): 金屬의腐蝕疲勞と 強度設計. 養賢堂, 東京, i-ii, 19-22, 91.
- 8) 水野政夫口章(1972): 알루미늄とその合金의 溶接. 産業出版株式會社, 99.
- 9) 山田盛雄(1985): 알루미늄技術便覽. 輕金屬 出版株式會社, 東京, 1519-1521.
- 10) 内藤(1982): 船舶におけるアル材利用의現狀. N. E. S. J 7(2), 68-75.
- 11) Booth, G. S., and I. G. Wylede(1979): Fatigue consideration in offshore steel structures in the North sea. The welding Institute Research Bulletin- 19(3), 69-72.
- 12) Jaske, C. E., D. Broek, J. E. Stater and W. E. Anderson (1978): Corrosion fatigue of structural steels in seawater and offshore application. ASTM STP 642, 19-47.
- 13) Jaske C. E., J. H. Payer and V. S. Balirt(1981): Corrosion fatigue of metals in marine environments. 1st ed., Springer-Verlag, Heidelberg.
- 14) Scott, P. M., (1979): Effects of environment in crack propagation, development in fracture mechanics-1. Applied Science Publisher LTD., London, 222-253.
- 15) 川原正言 · 栗原正好(1975): 表面き裂の疲勞いよる傳播成長過程い關する豫備的考察. 日本造船學會論文集 137, 297-306.
- 16) 吳世旭(1982): 材料力學. 東明社, 228-229.
- 17) 大谷南海男(1972): 金屬の塑性と腐蝕反應. 産業圖書, 東京, 82-85.
- 18) Gallagher, J. P., and R. P. WEI(1971): Corrosion fatigue crack propagation behavior in steels. Corrosion Fatigue NACE-2, 408-409.
- 19) Gerberish, W. W., R. H. Van Stone and A. W. Gunderson(1982): Fatigue properties of carbon alloy steel, application of fracture mechanics for selection of metallic structural materials. ASM, Metals Park, Ohio, 65-67.
- 20) Foroulis, Z. A., (1977): Environment-sensitive fracture of engineering materials. The Metallurgical Society of AIME, Florham Park, New Jersey, 5-8.