

## 船舶用 알루미늄 합금材의 腐蝕疲勞 龜裂 進展遲延에 미치는 變動荷重의 影響

임우조\*·이종락\*·이진열\*\*

\*부산 수산 대학 \*\*한국 해양 대학

### The Effect of Variable load on the Propagation Retardation of Corrosion Fatigue Crack in Al-Alloy used for the Shipbuilding

U. J. LIM \* J. R. LEE \* and J. Y. LEE \*\*

\* *National Fisheries University of Pusan*

\*\* *Korea Maritime University*

Recently with the rapid development in marine and shipbuilding industries such as marine structures, ships and chemical plants, there occurs much interest in the study of corrosion fatigue characteristics which 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.

The retardation effect of variable load on the corrosion fatigue crack propagation in sea environment was quantitatively studied.

1. The retardation effect of corrosion fatigue crack propagation is largely eminent when the variable load ratio is 1.52.
2. The corrosion fatigue crack propagation by variable load is delayed by the reduction of residual compressive stress and corrosion electric current from plastic deformation of crack tip.
3. The delayed phenomenon of corrosion fatigue crack growth rate by variable load decreases as the  $\Delta K$  value of stress intensity factor range is increasing.
4. The corrosion sensitivity by variable load is also decreased as the  $\Delta K$  value of stress intensity factor range is sensible.

### 1. 序 論

최근 모든 工業의 발전과 더불어 機械 構造物 등은 더욱 輕量化, 高強度化 및 高速化되고 있는 추

세에 있으며<sup>1,2)</sup>, 특히 特殊船舶에 있어서도 輕量化에 의한 高速化 및 에너지 절약을 위해 輕量性의 高強度 알루미늄 합금材의 이용이 비약적으로 증대되고 있다<sup>3,4)</sup>.

이들 特殊船舶 建造에는 Al-Mg계 合金(A5000계)과 Al-Mg-Si계 合金(A 6000계)이 주로 이용된다.

특히 Al-Mg계 合金中 A5086은 船舶에 適當한 強度와 耐蝕性, 熔接性 및 加工性이 양호하여, 현재 國內에서 建造되는 特殊船舶은 이 알루미늄 合金材(A5086)로 建造되고 있다.

이들이 海水 및 海洋大氣에 사용될 경우 波浪 및 船舶振動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 있으며, 특히 실제 船舶에 있어서 일정한 振幅의 反復荷重을 받는 것은 드물고 불규칙한 크기의 反復荷重을 받는 경우가 많다. 따라서 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展舉動에 미치는 環境의 影響을 검토할 필요가 있다.

그러나 空氣中에서 變動荷重을 負荷한 直後 疲勞龜裂 進展遲延舉動에 관한 많은 研究가 있었으나, 腐蝕環境條件下에서 變動荷重을 加한 直後 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延에 미치는 環境의 影響에 대해서는 거의 찾아 볼 수 없다.<sup>11,12</sup>.

따라서 本 研究에서는 特殊船舶의 製作에 많이 사용하는 Al-Mg계 合金材(A 5000계)중 5086-H116 알루미늄 合金材를 海洋環境과 空氣中에서 變動荷重에 의한 平面 굽힘 腐蝕疲勞試驗을 행하여 表面龜裂發生 및 進展遲延舉動을 觀察 調查하였다.

이 實驗을 통하여 一定 片振 굽힘應力을 加한 경우와 여러가지 變動荷重比로 1단 片振 굽힘應力을 加한 直後의 腐蝕疲勞龜裂 進展 및 遲延樣相을 비교하고 變動荷重의 影響과 그 進展遲延機構을 고찰하고자 한다.

그리고 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延

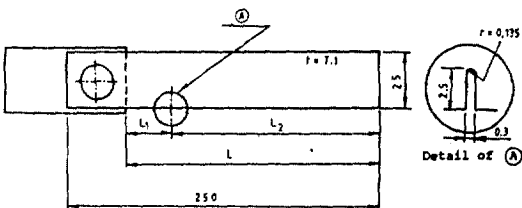


Fig. 1. Dimension of test specimen (mm).

速度와 應力強度係數範圍와의 關係를 정리하여 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延에 미치는 腐蝕感受性을 究明함으로써 海洋環境中에서 사용되는 船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞設計에 대한 기초資料로 기여하고자 한다.

## 2. 試驗片 및 實驗方法

### 2.1. 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗材料는 두께 7.1mm인 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은 Fig.1과 같다. 이러한 試驗片은 그 길이 方向이 壓延方向과 동일하도록 제작하였다.

이와같은 試驗片 形狀의 노치(notch)先端에 있어서의 應力強度係數範圍(stress intensity factor range)  $\Delta K$  값은 Kawahara 등이 제시한 다음 식으로 계산하였다.<sup>13</sup>

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

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

$$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

a : 龜裂길이 (mm)

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	Res.
Mechanical properties	Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )		Yield Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)			
	42		30		12			

疲勞試驗에서 굽힘應力(bending stress)  $\sigma$ 는 다음과 같이 구하였다.<sup>14</sup>

$$\text{굽힘 변형량 } \delta = PL^3 / 3EI \text{에서}$$

$$\text{하중 } P = 3EI \delta / L^3 \text{ 이므로}$$

$$\text{굽힘應力 } \sigma = M/Z = P(L-L_1) / Z$$

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

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

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

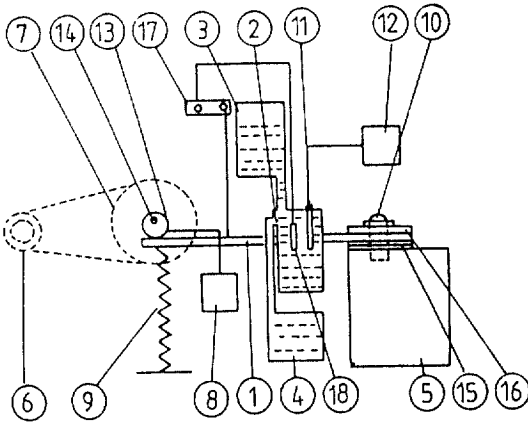
- 여기서
- E = 영 계수 (kg/mm<sup>2</sup>)
  - I = 단면 2차모멘트 (bt<sup>3</sup>/12)
  - L = 시험편 고정부에서 응력부까지 거리 (mm)
  - L1 = 시험편 고정부에서 노치와의 거리 (mm)
  - t = 시험두께 (mm)
  - Z = 단면계수 (bt<sup>2</sup>/6)
  - δ = 굽힘 변형량 (mm)

한편 시험편 표면은 사포 2000번까지 研磨한 후 아세톤으로 脱脂하고 시험편 표면의 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 노치先端을 제외한 시험편 전표면을 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 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 자작한 것으로 板狀



- |                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Specimen         | 10. Adjusting nut       |
| 2. Corrosion cell   | 11. Electrode           |
| 3. Feed water tant  | 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.

시험片的 一端은 釘개로 釘어 볼트로 固定하고 自由端은 偏心輪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 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시킴으로서 應力을 미세하게 調節할 수 있도록 하였다.

平面 굽힘 應力은 motor에 의해 구동되는 偏心輪에 의해 받으며, 反復回數는 pulley축에 연결되어 있는 counter meter로써 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 變動荷重 負荷에 있어서 變動荷重比가 1.52인 一端 片振 應力이다.

여기서 變動荷重比는 다음과 같이 計算하였다. 變動荷重比 = 一定振幅의 最大荷重 / 變動振幅의 最大荷重.

이때 反復荷重의 速度는 모두 310rpm (f=5.17Hz)으로 하였다.

2.3. 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 및 25Ω·cm로 되게 하여 각각 固定하였으며, 實驗中の 水温은 室內溫度로 하였다.

또한 腐蝕槽內的 溶液은 Cl<sup>-</sup>이온의 濃度 및 電解液의 傳導度의 變化를 防止하기 위하여 시간당 4ℓ의 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=0.4mm)부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

그리고 첫번째 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞 龜裂 進展遲延舉動은 一定 굽힘 反復應力(R=0)의 龜裂成 長길이 a=0.5mm의 위치에서 1cycle을 回轉시켜 偏心量을 조정하면서 變動荷重을 負荷하였으며, 變動

荷重을 負荷한 後 다이얼 게이지로 측정하여 試驗片에 變動荷重 前과 같은 deflection 되도록 하여 腐蝕疲勞試驗을 行하였다.

### 3. 結果 및 考察

#### 3.1. 變動荷重에 따른 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延舉動

Fig. 4는 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延舉動에 미치는 影響을 검토하기 위하여, 比抵抗 25 Ω·cm의 腐蝕環境에서 Fig. 3과 같이 變動荷重比

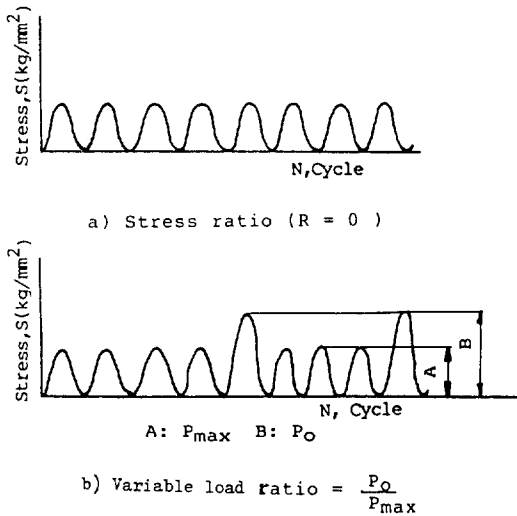


Fig. 3. Stress wave forms.

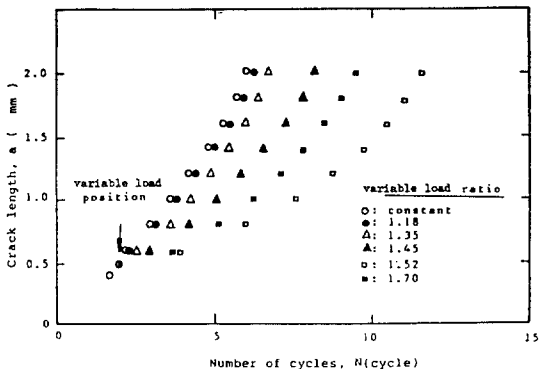


Fig. 4. Relation between number of cycles and crack length according to variable load ratio under  $\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$ .

를 1.18, 1.35, 1.45, 1.52, 1.70으로 加한 直後의 경우와 일정한 振幅의 複合 應力을 加한 경우에 대해서 龜裂 進展 길이 a와 反復 回數 N과의 關係를 나타내었다.

이에 의하면 變動荷重을 加한 直後의 龜裂 進展은 일정한 振幅의 複合 應力을 가했을 때 보다 遲延되는 樣相을 보이고 있으며 變動荷重比가 증가할수록 龜裂 進展은 遲延되었다. 특히 變動荷重比가 1.52일 때 龜裂 進展이 가장 遲延되었으 며, 變動荷重比가 1.70일 때의 龜裂 進展은 1.52보다 오히려 빠른 樣相을 보이고 있다.

따라서 Fig. 4에 있어서 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延에 미치는 變動荷重比의 效果가 가장 크게 되는 1.52를 基準으로 하여, 空氣中과 여러가지 比抵抗의 環境中에서 變動荷重에 의한 龜裂 進展遲延 樣相을 究明하고자 한다.

Fig. 5는 空氣中에서 變動荷重直後의 疲勞龜裂 進展遲延舉動을 檢討하기 위하여 일정한 振幅의 複合 應力을 加한 경우와 變動荷重比를 1.52로 加한 경우에 대해서 龜裂 進展 길이 a와 反復 回數 N의 關係를 나타낸 것이다. 이에 의하면 龜裂 進展은 變動荷重直後에 현저히 遲延되는 樣相을 보이고 있다.

Fig. 6은 變動荷重을 加한 直後의 여러가지 腐蝕環境中에서 變動荷重比를 1.52로 負加한 경우와

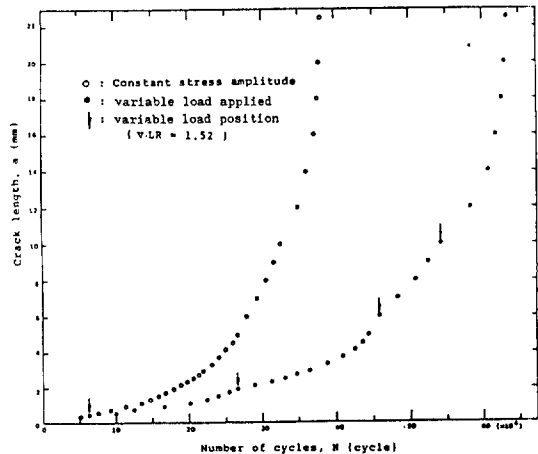


Fig. 5. Retardation as a result of variable load in air.

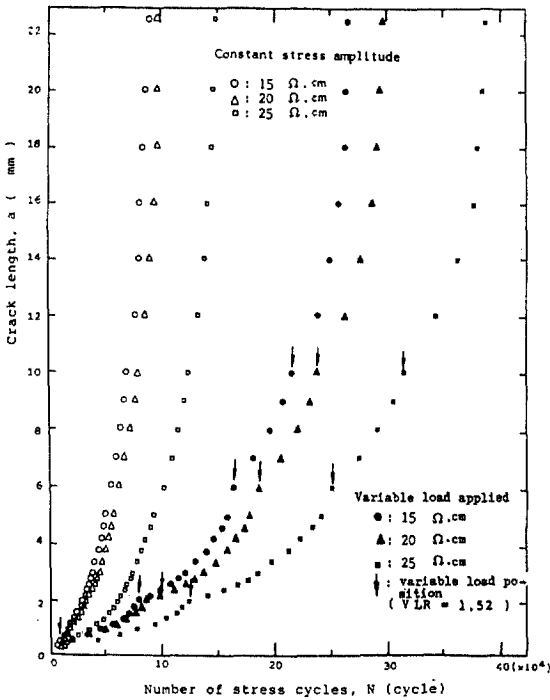


Fig. 6. Retardation as a result of variable load under various specific resistance.

定 振 幅 応 力 を 加 した 場 合 に 對 して 龜 裂 進 展 長 이 a 와 反 復 回 數 N 의 關 係 를 示 した 事 實 이 だ.

이 에 의 하 면 여 러 가 지 腐 蝕 環 境 中 에 서 變 動 荷 重 比 를 1.52 로 負 加 한 場 合 도 空 氣 中 과 같 이 腐 蝕 疲 勞 龜 裂 進 展 은 현 저 히 느 린 樣 相 을 보 이 고 있 으 며, 比 抵 抗 이 증 가 할 수 록 腐 蝕 疲 勞 龜 裂 進 展 이 더 욱 遲 延 되 는 樣 相 을 보 이 고 있 だ.

3.2. 變 動 荷 重 에 따 른 腐 蝕 疲 勞 龜 裂 進 展 遲 延 機 構

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6 에 서 보 인 바 와 같 이 空 氣 中 과 腐 蝕 環 境 條 件 下 에 서 變 動 荷 重 을 加 한 直 後 腐 蝕 疲 勞 龜 裂 進 展 이 遲 延 되 는 樣 相 을 나 타 내 고 있 だ.

이 러 한 空 氣 中 과 腐 蝕 環 境 中 에 서 變 動 荷 重 을 加 한 直 後 腐 蝕 疲 勞 龜 裂 進 展 遲 延 機 構 는 機 械 的 및 電 氣 化 學 的 인 側 面 에 서 다 음 과 같 이 생 각 된 だ.

Fig. 7 은 變 動 荷 重 에 의 하 여 龜 裂 先 端 에 생 기 ン 塑 性 變 形 에 의 한 殘 留 壓 縮 應 力 의 形 態 이 だ.

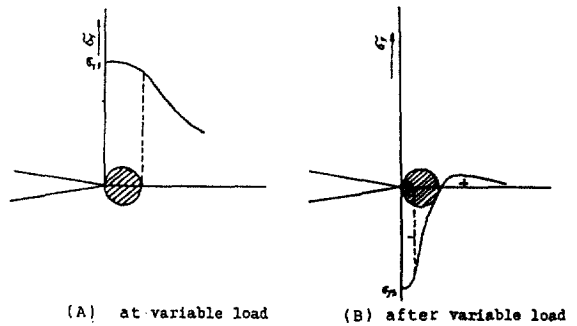


Fig. 7. Residual compressive stress at crack tip as a result of variable load

Fig. 7 (a) 에 나 타 낸 것 처 럼 變 動 荷 重 에 의 하 여 넓은 塑 性 領 域 이 초 래 되 어 材 料 의 部 分 的 인 變 形 이 일 어 나 지 만 應 力 을 제 거 하 면 塑 性 領 域 은 彈 性 材 料 에 돌 러 싸 이 게 된 だ. 彈 性 領 域 에 돌 러 싸 인 龜 裂 先 端 주 위 의 塑 性 領 域 내 에 는 彈 性 領 域 의 材 料 에 의 하 여 壓 縮 應 力 이 作 用 하 고, 그 결 과 Fig. 7 (b) 와 같 이 殘 留 應 力 이 나 타 난 だ. 이 殘 留 應 力 은 疲 勞 龜 裂 進 展 機 構 인 龜 裂 先 端 에 서 의 開 閉 作 用 이 일 어 나 지 못 하 도 록 방 해 하 는 方 向 으 로 作 用 한 だ. 그 러 므 로 疲 勞 龜 裂 進 展 遲 延 은 龜 裂 閉 口 現 象 (crack closure) 에 의 한 機 械 的 인 側 面 과<sup>10,13)</sup> 여 러 가 지 比 抵 抗 의 腐 蝕 環 境 中 에 서 는 龜 裂 先 端 의 壓 縮 應 力 과 龜 裂 閉 口 現 象 에 의 한 腐 蝕 電 位 와 腐 蝕 電 流 의 감 소 에 따 른 電 氣 化 學 的 인 側 面 에<sup>14)</sup> 의 하 여 일 어 난 것 으 로 推 定 된 だ.



Photo. 1. Macro-graph of plastic deformation at crack tip as a result of variable load.

Photo.1은 應力比  $R=0$  條件下의 疲勞龜裂成長 과정에 있어서 變動荷重比 1.52로 變動荷重을 加했을 때의 龜裂進展 先端에 發生한 塑性變形의 巨視的 樣相을 실제로 보인 것이다.

그리고 이러한 龜裂進展遲延은 應力反復回數  $N$ 이 증가하여 이 殘留應力을 극복해야만 다시 龜裂進展이 일어나서 원래의 龜裂進展速度로 돌아오는 것으로 생각된다.

3.3. 變動荷重에 의한 龜裂進展遲延의 腐蝕感受性

Fig.8은 여러가지 比抵抗과 空氣중에 대하여 應力強度係數範圍와 變動荷重후의 腐蝕疲勞龜裂 進展速度와의 關係를 나타낸 것이다.

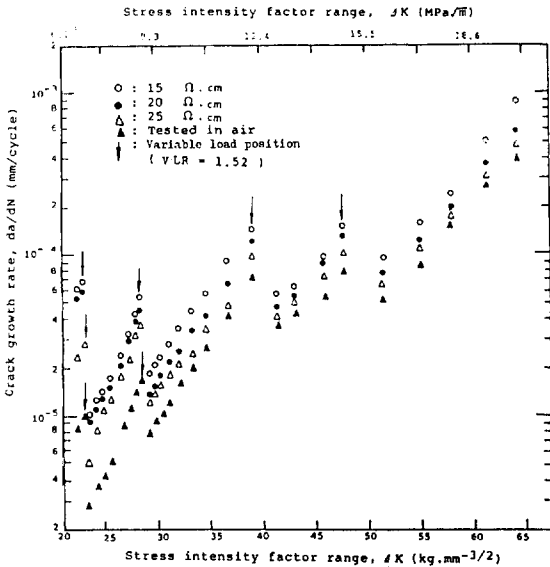


Fig. 8. Crack growth rate after variable load versus stress intensity factor range for various specific resistance and air.

여기서 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延速度를 구하기 위해서, Fig.5와 6의 a-N 曲線에서 각 점의 기울기로 부터 龜裂進展遲延速度  $\frac{da}{dN}$ 을 구하였다.

이 龜裂進展遲延速度는 단위 反復回數에 대하여 成長한 龜裂길이의 증분량을 나타내며, 이를 계산하기 위해서는 ASTM에 제시한 point-to-point technique을 이용하였다<sup>15)</sup>

이에 의하면 變動荷重을 加한 후 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 현저히 遲延되다가 回復하고 다시 變動荷重을 주었을 때 腐蝕疲勞龜裂 進展速度는 遲延되었다가 回復하는 양상을 되풀이하고 있으며, 이러한 腐蝕疲勞龜裂 進展速度의 遲延効果는 比抵抗이 감소할수록 둔화된다.

그리고 應力強度 係數範圍  $\Delta K$ 값이  $23.5 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1/2}$ 에서 첫번째 變動荷重을 負荷했을 때, 龜裂進展速度의 遲延現象이 가장 크게 나타나고, 應力強度 係數範圍  $\Delta K$ 값이 크게 될수록 龜裂進展速度의 遲延現象은 감소됨을 보인다.

이는 應力強度 係數範圍  $\Delta K$ 값이 커짐에 따라 殘留應力을 쉽게 극복할 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.9은 위와 같은 양상을 좀더 定量的으로 검토하기 위하여 여러가지 比抵抗의 環境條件에 있어서 變動荷重후의 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 여러가지 比抵抗에 있어서 變動荷重을 加한 후의 腐蝕疲勞龜裂 進展速度를 공기에서 變動荷重을 加한 후의 腐蝕疲勞龜裂 進展速度로 나눈 값이다.

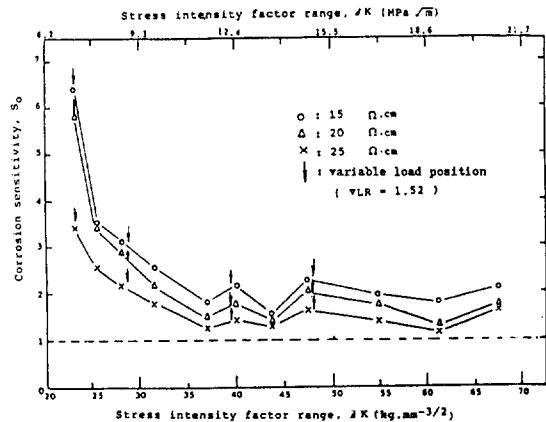


Fig. 9. Corrosion sensitivity versus stress intensity factor range in various specific resistance by variable load ( $S_0$ =Crack growth rate after variable load in various specific resistance/Crack growth rate after variable load in air)

이에 의하면 應力強度係數範圍  $\Delta K$  값이 낮을수록 變動荷重에 의한 腐蝕感受性의 값은 크게 감소되고 있으며, 특히 첫번째인 應力強度係數範圍  $\Delta K = 23.5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 에서 過負荷한 直後の 腐蝕感受性이 가장 크게 둔화하는 경향을 나타내고 있다.

그리고 모든 應力強度係數範圍  $\Delta K$  값에 있어서 比抵抗이 증가함에 따라 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延의 腐蝕感受性は 낮아지고 있음을 알 수 있다.

이는 應力強度係數範圍  $\Delta K$  값이 낮을 때는 應力보다는 腐蝕에 의한 影響을 많이 받으므로써 變動荷重을 加한 후, 龜裂先端의 殘留壓縮應力에 의해서 腐蝕電流가 급격히 감소되어 지기 때문에 낮은 應力強度係數範圍에서 腐蝕感受性이 급격히 감소되는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 比抵抗  $25 \Omega \cdot \text{cm}$  중에 있어서 一定 荷重 應力을 加한 경우와 變動荷重후의 腐蝕疲勞龜裂 進展에 대한 應力強度係數範圍와 腐蝕感受性에 대해서 나타낸 것이다.

變動荷重 後의 腐蝕疲勞龜裂 進展에 대한 腐蝕感受性이 一定 反復應力을 가했을 때의 腐蝕疲勞龜裂 進展에 대한 腐蝕感受性보다 모든 應力強度係數範圍에 걸쳐서 현저히 낮아지는 樣相을 보이고 있다.

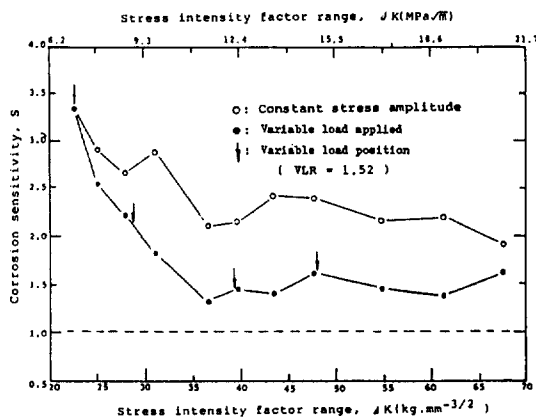


Fig. 10. Corrosion sensitivity versus stress intensity factor range in  $25 \Omega \cdot \text{cm}$ .  
(S=Crack growth rate after variable load in various specific resistance/crack growth rate after variable load in air.)

#### 4. 結 論

平面 荷重 腐蝕疲勞 試驗機를 사용하여 船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延에 미치는 變動荷重의 效果를 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 變動荷重化 1.52일때, 腐蝕疲勞龜裂 進展遲延效果가 가장 크게 된다.
2. 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展은 龜裂先端의 塑性變形에 따른 殘留壓縮應力과 腐蝕電流의 감소에 의해 遲延된다.
3. 變動荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂 進展速度의 遲延現象은 應力強度係數範圍  $\Delta K$  값이 커질수록 감소된다.
4. 應力強度係數範圍  $\Delta K$  값이 낮을수록 變動荷重에 의한 腐蝕感受性は 민감해진다.

#### 參 考 文 獻

- 1) 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,” 日本溶接學會誌, 52, 3, 23 (1983)
- 2) 駒井謙治郎, “腐食疲勞研究の現狀と展望,” 日本鐵と鋼, 61, 7, 8 (1983)
- 3) 水野政夫口章, “アルミニウムとその合金の溶接,” 産業出版株式會社, 99 (1972)
- 4) 山田盛雄, “アルミニウム技術便覽,” 輕金屬出版株式會社, 東京, 1519~1521 (1985)
- 5) 内藤, “船舶におけるアル材利用の現狀,” M. E. S. J 7 (2)
- 6) G. S. Booth and I. G. Wyld, “Fatigue Consideration in Offshore Steel Structures in the North Sea,” The welding Institute Research Bulletin, 19, 3, 69~72 (1978)
- 7) Jaske, C. E., D. Broek, J. E. Stater and W. E. Anderson, “Corrosion Fatigue of Structural Steels in Seawater and Offshore Application,” ASTM STP 642, 19-47 (1978)
- 8) C. E. Jaske, J. H. Payer and V. S. Balirt, “Corrosion Fatigue of Metals in Marine Envir-

- onments," 1st ed., Springer-Verlag, Heidelberg (1981)
- 9) Scott, P. M. "Effects of Environment in Crack propagation," Development in Fracture Mechanics-1, Applied Science Publisher LTD., London, 222-253 (1979)
- 10) 西谷弘信, 疲勞強度學, オーム社, 東京, 221, 274 (1985)
- 11) W. W. Gerberich, 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, 65-67 (1982)
- 12) Z. A. Forouli, "ENVIRONMENT-SENSITIVE FRACTURE OF ENGINEERING MATERIALS," The Metallurgical Society of AIME, Florham Park, New Jersey, 5-8 (1977)
- 13) G. R. Chanai, "Investigation of Effects of Salt-water on Retardation Behavior of Aluminum Alloys," Corrosion-Fatigue Technology, ASTM STP 642 (1978)
- 14) 大谷南海男, "金屬の塑性と腐食反應," 産業圖書, 東京, 82~85 (1972)
- 15) Standard test method for constant-load amplitude fatigue crack growth rate above  $10^{-6}$ m/cycle, ASTM E647-83 (1985)