

一般構造用 壓延鋼材의 腐蝕疲勞龜裂傳播速度에 미치는 試驗片 두께의 影響

趙 約 來*·林 祐 助**·李 鍾 樂**

*釜山機械工業高等學校 電子機械科

**釜山水產大學校 工科大學 機械工學科

Influence of Specimens Thickness to Corrosion Fatigue Crack Propagation Rate of Structure Rolled Steel

Yag-Lae Cho*, Uh-Joh Lim**, Jong-Rark Lee**

*Dept. of Electronic Mech., Pusan Mechanical Technical High School

**Dept. of Mechanical Eng., National Fisheries University of Pusan

In this paper, the corrosion fatigue crack propagation rate of structure rolled steel(SWS 41C) by changing the thickness was investigated, and this experiment was done by the Three Point Bending Corrosion Fatigue Tester.

The main results obtained are as follows :

- 1) When stress intensity factor range(ΔK) is low, the crack growth rate(da/dN) of thin specimen is faster than that of thick specimen. As stress intensity factor range increases, crack growth rate of thin specimen is more delayed, and those facts are more sensitive in seawater than in air.
- 2) The value of m , as experimental constant of Paris'rule 「 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 」, becomes larger as thickness becomes thicker.
- 3) The accelerative factor by corrosion fatigue is more sensitive thick specimens than thin specimens.

1. 序 論

工業의 발전과 더불어 機械 및 船舶의 構造物은 그 크기가 大形化, 複雜化, 大容量化되므로 인하여 機械的 要素의 破壞가 일어날 수 있으며¹⁾, 이러한 破壞現象은 사용상 불가피하게 접촉하는 다양한 環境의 影響을 받음과 동시에 여러가지 形態의 振動,

荷重 및 外力 등에 의한 反復應力을 받게 됨에 따라서 腐蝕疲勞破壞가 초래된다.

이들 부재의 腐蝕疲勞破壞를 防止하기 위해서, 이들 각종 부재들이 각 使用環境아래서 장시간에 걸쳐 충분한 安定性을 확보하여 그 기능을 발휘하기 위해서는 材料強度에 미치는 環境, 특히 腐蝕性環境이 미치는 影響을 解明함과 더불어 環境強度 設

計基準의 確立이 절실히 要求되고 있다.²⁾

특히 腐蝕疲勞破壞에 있어서 더욱 중요하다고 생각되는 것은 굽힘反復荷重에 의한 龜裂의 發生과 傳播로써 機械構造物의 部材外部에 존재하는 각종 應力集中部나 缺陷으로 부터 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動은 使用材料, 荷重形態, 크랙모양 및 環境 등 많은 因子들에 의하여 복합적으로 작용할 것으로 생각된다.³⁾

또한 降伏點보다 낮은 反復荷重下에서도 部材内部의 缺陷 및 部材의 形狀不連續部 등의 應力集中部를 기점으로 龜裂이 發生하여 臨界龜裂길이(Critical crack length)에 이르게 되면, 순식간에 전체의 破斷을 초래하게 된다.⁴⁾

따라서 本 研究에서는 腐蝕疲勞龜裂傳播速度에 影響을 주는 여러 因子中 試驗片두께를 變化시켜 空氣中과 海水中에서 一般構造用 壓延鋼材(SWS41C)의 3점 굽힘 腐蝕疲勞試驗을 行하였다.

이 實驗을 통하여, 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 에 미치는 實驗片 두께의 變化에 따른 環境을 空明하였으며, 이 때의 da/dN 와 應力疲勞龜裂傳播速度 ΔK 값을 Paris'rule에 적용하여 電算에 의한 實驗常數를 구하고, 이 결과에 의해 實驗材料의 두께에 따른 腐蝕과 ΔK 값이 腐蝕疲勞龜裂傳播速度에 미치는 影響을 고찰하였다. 그리고 加速係數를 구하고, 두께變化가 da/dN 에 미치는 機構를 究明함으로써 海洋環境中에서 一般構造用 壓延鋼材의 두께變化에 따른 疲勞破壞 및 腐蝕疲勞破壞에 대한 基礎設計資料로써 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(SWS41C)로 그 化學的 成分과 機械的 持性은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 本 실험에 사용한 試驗片 形狀을 나타낸 것이다. 試驗片의 길이방향이 壓延방향이 되도록, 龜裂進展방향은 壓延直角방향이 되도록 채취한 후

Table. 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material

a) Chemical composition(wt%)

Description	C	Si	Mn	P	S	C ₁
SWS41C	0.16	0.08	0.58	0.018	0.011	0.01

b) Mechanical properties

Material	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SWS41C	43.5	27.5	25

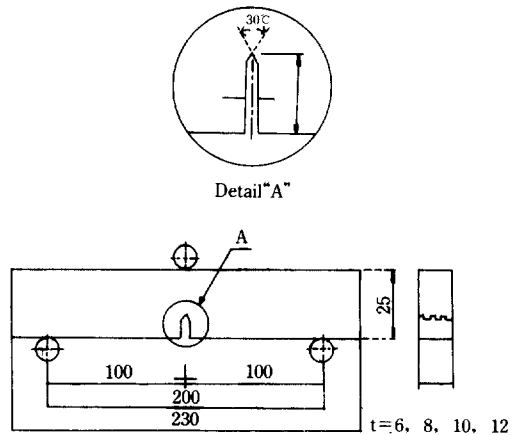


Fig. 1 Specimen dimension and notch position for corrosion test(unit : mm)

두께13mm인 壓延鋼材를 밀링머신을 이용하여 두께 6, 8, 10 및 12mm가 되도록 평면가공하였다. 평면가공시 熱影響이 극소화되도록 平面部는 앤드밀과 정면커터, 노치부는 메탈슬리팅소오(Metal Slitting Saws)로 주의를 기울여 가공하였다.

이러한 試驗片 刑狀의 노치(Notch)先端에 있어서 應力擴大係數範圍(Stress intensity factor range) Δk 값은 J. E. Srawley등이 제시한 다음 식으로 계산하였다.⁵⁾

$$\Delta k = \Delta \sigma_o \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad (1)$$

$$F(\xi) : 1.107 - 2.210\xi + 7.71\xi^2 - 13.55\xi^3 + 14.25\xi^4$$

$$(L = 8w, \pm 0.2\% \text{ for } \xi < 0.6)$$

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

$$\text{굽힘變形量} \delta = PL^3 / 48EI \text{에서}$$

$$\text{하중} P = 48EI\delta / L^3 \text{이므로}$$

$$\text{굽힘응력} \sigma_b = M/Z \text{에서}$$

$$M = PL/4 \text{ (兩端支持)}$$

$$\sigma = 3PL / 2tw^2$$

여기서 σ : 굽힘應力(kg/mm²)

δ : 굽힘변형량(mm)

P : 作用荷重(kg)

L : 試驗片 길이(mm)

E : 영계수(kg/mm²)

I : 단면2차모우멘트(wt³/12)

t : 試驗片 두께(mm)

w : 試驗片 폭(mm)

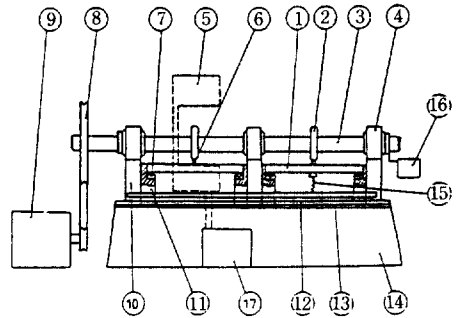
한편 試驗片 表面은 사포 2000까지 研磨한 후 아세톤으로 脫脂하고, 試驗片 表面의 電氣化學的인 影響을 除去하기 위하여 노치先端을 제외한 全表面을 투명한 에폭시수지로 被覆·絶緣시켰다.

2.2 實驗裝置

본 실험에서 사용한 편심륜식 정변위 3점 굽힘 疲勞試驗機의 全體系統圖는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 3점굽힘 疲勞試驗機는 自作한 것으로 試驗片의 兩端은 지지롤러(Support roller)에 의해 지지되고 中心은 偏心輪의 回轉에 의하여 3점굽힘 反復荷重을 받게 하였다.

그리고 Fig. 1에 나타난 試驗片의 길이와 Fig. 2에 보인 荷重點에서 偏心輪의 偏心量을 變化시킴으로서 反復應力을 微細하게 調節할 수 있도록 하였고, 3점 굽힘 反復應力은 motor에 의해 구동되는 偏心輪에 의해 받도록 하였으며, 反復應力의 形態는 應力比 R=0이다.

反復荷重은 소규모 항복조건을 만족하기 위해서는 反復應力이 항복응력보다 적어야 하며, 보통 항



- | | |
|--------------------|----------------------|
| 1. Specimen | 10. Bearing support |
| 2. Eccentric cam | 11. Specimen support |
| 3. Shaft | 12. Bed plate |
| 4. Bearing | 13. Rubber plate |
| 5. Feed water tank | 14. Bed(Concrete) |
| 6. Load roller | 15. Spring |
| 7. Support roller | 16. Counter meter |
| 8. Pulley | 17. Drain water tank |
| 9. Motor | |

Fig. 2. Schematic diagram of test apparatus

복응력의 0.8배 이하로 제한하고 있으므로⁶⁾, 본 실험에서 反復荷重은 항복응력의 37%인 10.2 kgf/mm²로 하였고, 應力周波數는 450rpm(7.5Hz)이다. 이때 反復荷重의 回轉數 측정에는 펄스(pulse)식 센사(sensor)와 電子積分回轉計(digital integration counter)를 이용하였다.

2.3 實驗方法

腐蝕環境槽은 아크릴로 製作하였으며 腐蝕雰圍氣는 天然海水를 사용하였고, 그 比抵抗 값이 $\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$ 되게 固定시키고, 試驗片의 두께를 6, 8, 10 및 12mm로 變化시켜 가면서, 腐蝕疲勞試驗과 空氣中에서의 疲勞試驗을 행하였다.

이때 실험중의 腐蝕溶液은 Cl이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 防止하기 위하여 시간당 4ℓ의 양으로 계속하여 循環시켰으며, 腐蝕生性物에 의한 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 절연성필터를 사용하여 腐蝕疲勞試驗을 행하였다.

龜裂成長길이(Crack growth length)는 일정한 反復荷重을 가한 후 20 배의 이동식 현미경으로 反復 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 가정하고, 이하 龜裂初期段階라고 함)로 부터 연속적으로 측정하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動

Fig. 3은 大氣中에서 疲勞에 의한 試驗片의 두께 변화에 따른 應力反復回數에 대한 龜裂成長길이를 보인 것이다.

두께가 가장 얇은 試驗片(6 mm)의 龜裂初期段階까지의 應力反復回數는 가장 빨리 나타났고, 가장 두꺼운 試驗片(12 mm)에 있어서 龜裂初期段階까지의 應力反復回數는 가장 遲延되었다. 그러나 龜裂成長이 약 4mm에서 부터 얇은 試驗片(6 mm)의 龜裂傳播는 두꺼운 試驗片(12 mm)의 龜裂傳播보다 점차 遲延되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 海水中에서 腐蝕疲勞에 의한 試驗片의 두께 변화에 따른 應力反復回數에 대한 龜裂成長길이를 보인 것이다.

이 결과를 살펴보면 얇은 試驗片(6 mm)과 두꺼운

試驗片(12 mm)의 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動은 大氣中과 거의 유사한 樣相을 나타내고 있으나 腐蝕疲勞龜裂成長長이가 약 2.5mm에서 부터 얇은 試驗片(6 mm)의 腐蝕疲勞龜裂傳播는 두꺼운 試驗片(12 mm)의 腐蝕疲勞龜裂傳播보다 더 遲延됨으로써 두께 변화가 龜裂進展에 미치는 影響은 空氣中에서 보다 海水中에서 더 敏感함을 알 수 있다.

3.2 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 와의 관계

疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 龜裂이 成長함에 따른 龜裂傳播速度 da/dN 를 구하기 위하여, Fig. 3 및 Fig. 4의 a-N곡선에서 각 점의 기울기로 부터 龜裂傳播速度 da/dN 을 구하였으며, 이를 계산하기 위해서는 ASTM⁷⁾에서 제시한 Point-to-Point Technique를 이용하였다.

Fig. 5는 大氣中에서 試驗片의 두께 변화에 따른 疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍

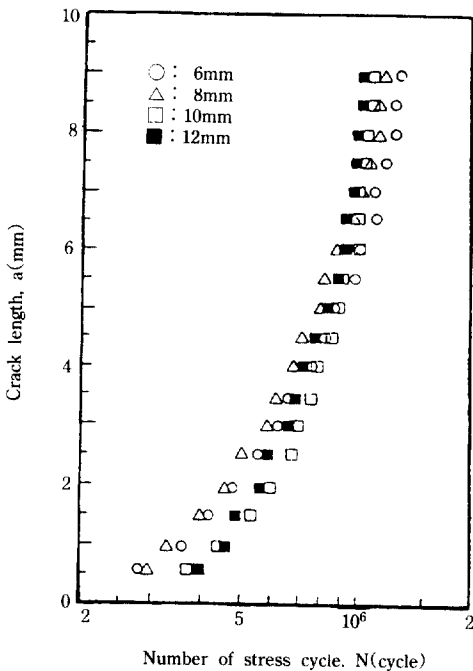


Fig. 3 Crack length vs number of stress cycle in air

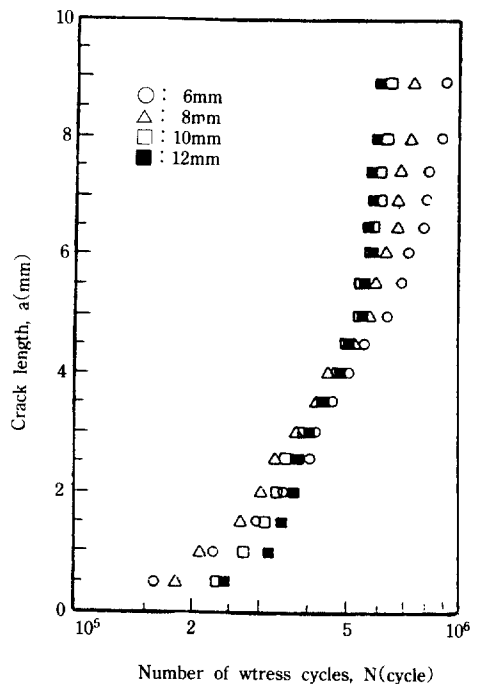


Fig. 4 Crack length vs number of stress cycle in seawater

ΔK 와의 관계를 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 낮을 때는 두께가 얇은 試驗片의 疲勞龜裂傳播速度 da/dN 가 두꺼운 試驗片의 da/dN 보다 더 빠르고, ΔK 값이 증가할 수록 두께가 얇은 試驗片의 傳播速度는 점차 遲延되는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 海水中에서 試驗片의 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 와의 관계를 정리하여 보인 것이다.

海水中에서 大氣中에서 보다 應力擴大係數範圍 ΔK 가 더 낮은 값에서 大氣中과 유사한 경향을 나타내고 있으므로 두께변화가 龜裂傳播速度에 미치는 影響은 大氣中에서 보다 海水中에서 더 敏感함을 알 수 있으며, 海水中에서 腐蝕疲勞龜裂傳播速度가 空氣中の 疲勞龜裂傳播速度보다 전반적으로 빨라지고 있다.

여기서 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 와의 相關關係를 고찰하기 위하여, Fig. 5와 Fig. 6에서 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂傳播速度를 Fig. 7에 領域으로 나타내었다.

各 環境條件下에서 龜裂傳播速度 da/dN 는 應力

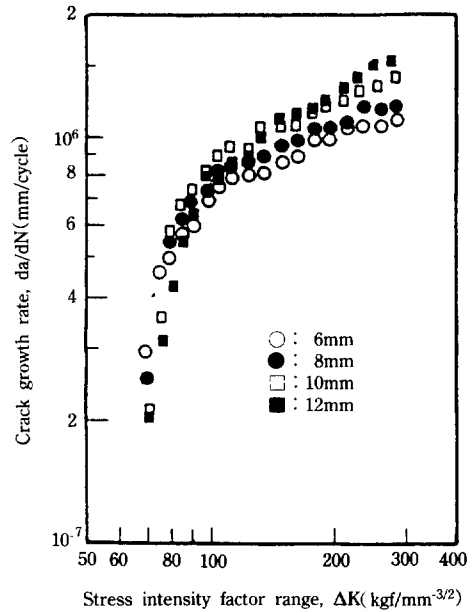


Fig. 6 Crack growth rate vs stress intensity factor range in seawater

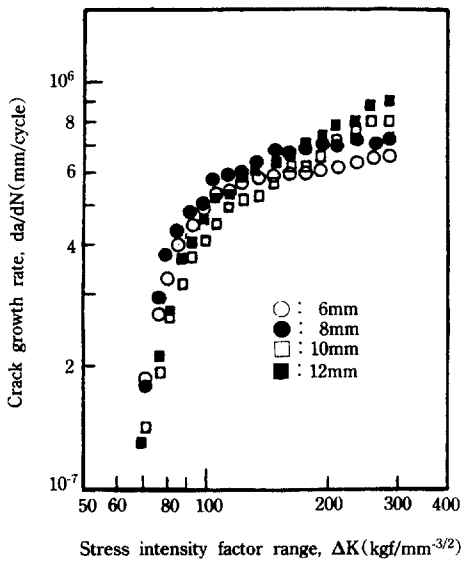


Fig. 5 Crack growth rate vs stress intensity factor range in air

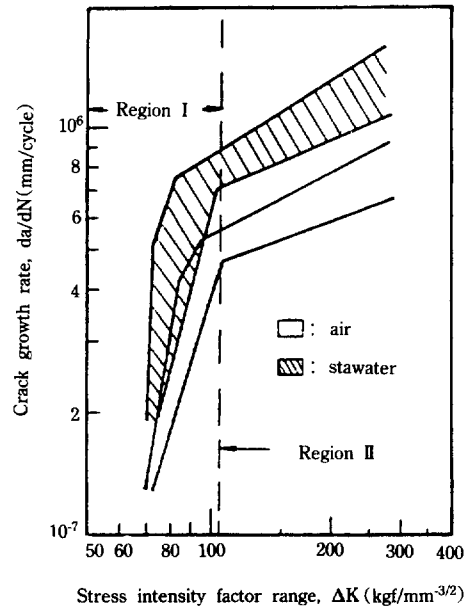


Fig. 7 Effect of stress intensity factor range on crack growth rate

擴大係數範圍 Δk 값 약 $110 \text{ kg/mm}^{-3/2}$ 를 기준하여 領域 I과 領域 II의 두 領域으로 나눌 수 있다. 여기서 領域 II는 一般的으로 破壞力學試驗에서, 試驗片 두께에 대하여 應力擴大係數範圍 ΔK 를 해석하는데 대해서 이론적인 ΔK 의 범위를 넘어서는 領域이며,⁸⁾ da/dN 와 ΔK 와의 相關關係를 考察하기는 어렵다. 따라서 da/dN 와 ΔK 와의 相關關係를 考察하기 위해서 領域 I의 data를 중심으로 다음(2)式과 같은 Paris'rule을 適用하고자 한다.^{9, 10)}

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

- 여기서 a : 龜裂길이
- N : 應力反復回數
- ΔK : 應力擴大係數範圍
- C, m : 實驗常數

Table 2는 Fig. 5 및 6에서 領域 I의 實驗值를 (2)式에 의해 電算化한 實驗常數 C와 m의 값을 정리하여 보인 것이다.

Table 2에 의하면 試驗片의 두께를 6~12mm로 변화함에 따라 空氣中에서 기울기인 實驗常數 m값은 약 1.85~2.62의 범위에 비해 海水中에서 두께에 따른 m값은 약 1.75~2.60으로 더 작게 됨을 알 수 있으며, 이것은 鐵鋼의 경우 m가 0.5~8사이에 있다고 한 結果의 범위내에 있고,¹¹⁾ 또 空氣中에서 보다 海水中에서 m값이 작아지는 原因은 海水中에서의 腐蝕疲勞龜裂傳播速度는 應力擴大係數範圍 ΔK 값외에 腐蝕의 影響을 받기때문에 空氣中에서

보다 m값은 작아지는 것으로 思料된다.¹²⁾ 그리고 試驗片의 두께가 6mm로 부터 12mm로 두께가 두꺼워질 수록 空氣中이나 海水中에서 기울기인 m의 값은 점차 크게 됨을 알 수 있다.

3.3 加速係數에 미치는 腐蝕의 影響

두께의 변화가 腐蝕疲勞龜裂傳播速度에 미치는 腐蝕의 影響을 空明하기 위하여, 腐蝕疲勞에 의한 6 및 12mm의 加速係數 α 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 Fig. 8에 나타내었다.

여기서 加速係數 α 는 Fig. 5 및 6의 實驗值에 의해 海水中에서 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂進展速度 $[(da/dN)_{cor}]$ 에 대한 空氣中에서 疲勞에 의한 表面龜裂進展速度 $[(da/dN)_{air}]$ 의 比로 計算한 것이며 식(3)과 같다.¹³⁾

$$\alpha = [(da/dN)_{cor}] / [(da/dN)_{air}] \quad (3)$$

(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 간주함)

이 結果에 의하면 龜裂初期段階에서는 6 mm와 12 mm의 加速係數가 서로 交叉되어 應力과 腐蝕의 影響이 支配되나 應力擴大係數값이 점차 크게 됨에 따라서 12 mm의 加速係數가 6 mm의 加速係數보다 더 높게 나타남으로써 應力보다는 腐蝕의 影響이 더 클 것으로 생각된다. 그리고 應力擴大係數값이 증가할 수록 6 mm와 12 mm의 加速係數는 두께가 두꺼운 試驗片이 얇은 試驗片보다 더 敏感하다.

Table. 2 Experimentally determined coefficient for $da/dN = (\Delta K)^m$ in Region I

Experimental Constants Thickness, t(mm)	C		m	
	Air	Seawater	Air	Seawater
6	9.33×10^{-10}	2.16×10^{-9}	1.85	1.75
8	3.49×10^{-10}	9.95×10^{-10}	2.08	1.94
6	4.93×10^{-11}	1.21×10^{-11}	2.46	2.37
6	2.57×10^{-11}	4.42×10^{-11}	2.62	2.60

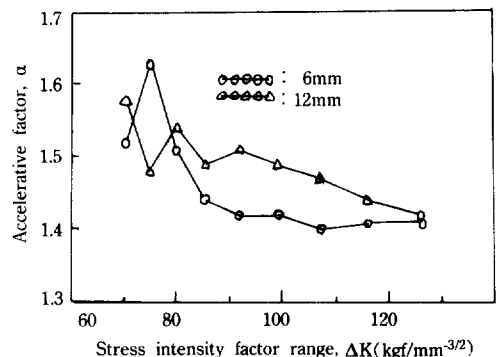


Fig. 8. Relation between accelerative factor and stress intensity factor range (t=6, 12mm)

3.4 두께변화가 龜裂進展速度에 미치는 機構

Fig. 3~Fig. 8에 의하면 一般構造用 壓延鋼材(SWS41C)의 疲勞와 腐蝕疲勞龜裂初期의 進展速度는 얇은 試驗片일 수록 빨라지다가 應力擴大係數範圍값이 점차 커짐에 따라서 進展速度는 遲延되고, 두꺼운 試驗片일 수록 龜裂初期段階까지는 遲延되다가 應力擴大係數값이 점차 커짐에 따라서 進展速度는 빨라지면서 腐蝕의 影響이 크게 나타났다. 이와 같이 試驗片의 두께변화가 龜裂進展速度에 미치는 機構를 空明하기 위해, Fig. 9에 疲勞龜裂先端的 塑性變形樣相을 나타내었다.¹⁴⁾ 이에 의하면 疲勞龜裂이 성장하면서 두께가 두꺼운 試驗片의 應力狀態는 平面應力狀態가 점차 감소하면서 塑性變形의 크기는 작아지고, Fig. 9(a)와 같은 平面變形率狀態(plane-strain condition)가 支配的이다. 한편 두께가 얇은 試驗片의 應力狀態는 疲勞龜裂이 성장하면서 塑性變形의 크기가 Fig. 9(a)의 塑性變形보다 더 커지면서 平面應力狀態(plane-stress condition)가 支配的이다. 그러므로 疲勞龜裂이 성장되면서 두께가 두꺼운 試驗片은 Fig. 9(b)에 보인 얇은 試驗片의 塑性變形보다 작아지면서 두께방향으로 變形됨으로써 龜裂進展速度는 빨라지는 것으로 생각된다. 또한 두께가 얇은 試驗片의 應力狀態는 Fig. 9(b)와 같은 平面應力狀態(plane-stress condition)가 支配的이기 때문에 龜裂發生은 빠르지만 龜裂이

成長되면서 Fig. 9(a)보다 龜裂先端에 塑性變形이 더 크게 형성됨으로써 이 塑性變形의 領域에 殘留 壓縮應力과 後方의 龜裂壁은 引張變形이 남게 됨으로써 龜裂은 原來的 龜裂閉口變位보다 적게 閉口하게 되는 龜裂閉口(crack closure)현상이 일어난다.^{15~18)} 따라서 두께가 얇을 수록 機械的인 龜裂閉口現像이 더 支配的이므로 龜裂進展速度의 遲延과 腐蝕의 影響이 鈍感해지는 것으로 思料된다.

4. 結 論

편심륜식 정변위 3점 굽힘腐蝕疲勞試驗機를 사용하여 一般構造用 壓延鋼材(SWS41C)의 腐蝕疲勞 龜裂進展舉動에 미치는 試驗片 두께변화(t=6, 8, 10, 12mm)의 影響을 研究한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 낮을 때는 두께가 얇은 試驗片의 龜裂進展速度가 두꺼운 試驗片의 龜裂進展速度보다 더 빠르며, 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 증가할 수록 두께가 얇은 試驗片의 進展速度는 점차 遲延되는 樣相이고, 이러한 樣相은 空氣中에서 보다 海水中에서 더 敏感하다.
- 2) Paris rule『 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 』의 實驗常數로서 기울기인 m값은 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 m값이 크게 된다.
- 3) 腐蝕疲勞에 의한 加速係數는 두께가 두꺼운 試驗片이 얇은 試驗片보다 더 敏感하다.

參 考 文 獻

1. 駒井謙治郎, 應力腐蝕割れ及び腐蝕疲勞への破壞力學の應用, 日本熔接學會誌, Vol. 52, No. 3, p. 23(1983)
2. 駒井謙治郎, 腐蝕疲勞研究の現象と展望, 日本鐵と鋼, Vol. 61, No. 7, p. 8(1983)
3. Yoshio Kitsunai, Effect of specimen Size and Configuration of Fatigue Crack Growth Behavior for Mild Steel Butt Welding Joints, Mate-

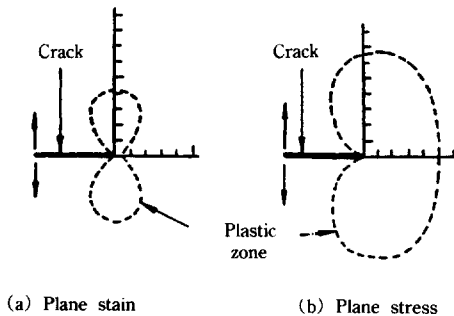


Fig. 9 Plastic-zone around cracks estimated from elastic stress field

- rials 320, p. 66-71(1984)
4. David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff and Noordhoff, Netherlands, p.80-86(1978)
 5. J. E. Srawley, Wide Range Stress Intensity Factor Express for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens, Int. J. Frac. Mech., 12, p. 475-476
 6. G. T. Hanetal, Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth, Metall. Trans, p. 1189-1202
 7. ASTM E647-83, Standard Test Method for Constand-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above 10^{-8} m/cycle, p. 754-755 (1983)
 8. 日本材料學會, 材料強度學, p. 77-79(1988)
 9. J. P. Gallagher and R. P. Wei, Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior in Steels, Corrosion Fatigue NACE-2, p. 408-409(1971)
 10. 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)
 11. Hideo Kidagawa, Application of Fracture Mechanics for Fatigue Crack, JSME 75, p. 1068-1088(1972)
 12. M. O. SPEIDEL, M. J. BLACKBURN, T. R. BECK and J. A. FEENEY, Corrosion Fatigue and Stress Corrosion Crack Growth in High Strength Aluminium Alloys, Corrosion Fatigue NACE-2, p. 325(1971)
 13. 中島等, 材料, 第31卷, p. 710-716(1982)
 14. A. J. McEvily, R. W. Staehle, Corrosion Fatigue, Chemistry, Mechanics and microstructure, NACE-2, p. 290-291(1972)
 15. 前掲書(8), p. 129-130
 16. 西谷 弘信, 總合材料強度學講座 6, 才一ム社, p. 160-163(1985)
 17. ROLFE. BARSOM, Fracture and Fatigue Control in Structures, Application of Fracture Mechanics, p. 274(1982)
 18. 林祐助, 李鍾樂, 李鎮烈, 過荷重에 의한 船舶用 알루미늄合金材의 腐蝕疲勞 破壞遲延에 관한 研究, 韓國海洋工學會誌, 第2卷, 第2號, p. 322-328(1988)