

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

趙約來 · 林祐助* · 李鍾樂* · 李相烈**

釜山機械工業高等學校

*釜山水產大學校

**浦項專門大學

(1992年 6月 16日 接受)

Effect of Specimen Thickness to Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of Structure Rolled Steel

Yag-Lae CHO, Uh-Joh LIM*, Jong-Rark LEE* and Sang-Yeol LEE**

Pusan Mechanical Technical High School

*National Fisheries University of Pusan

**Pohang college

(Received June 16, 1992)

In this paper, the corrosion fatigue crack propagation behavior of structure rolled steel (SWS 41C) was investigated by changing the thickness, and this experiment was done by the three point bending corrosion fatigue tester.

The main results obtained are as follows :

- 1) As the thickness of specimen becomes thicker, the corrosion sensitivity to initial stage crack becomes some sensitive, and that to fatigue life becomes more sensitive.
- 2) The crack growth rate to initial stage crack (da/dN) was retarded as the thickness of specimen becomes thicker. But after initial stage crack, as the thickness of specimen is more thicker, da/dN is more rapid.
- 3) As the corrosion fatigue crack length grows, the accelerative factor of thick specimen ($t=12\text{ mm}$) is more higher than that of thin specimen ($t=6\text{ mm}$).
- 4) As the corrosion fatigue crack length grows, the corrosion potential of both thick specimen and thin specimen becomes more less noble potential, however thick specimen ($t=12\text{ mm}$) tends to more less noble potential than that of thin specimen ($t=6\text{ mm}$).

1. 序 論

工業의 발전과 더불어 機械 및 船舶의 構造物은 그 크기가 大型化, 複雜化, 大容量化 되므로 인하여 機械的 要素인 破壞가 일어날 수 있으며¹⁾, 이러한 破壞現狀은 사용상 불가피하게 접촉하는 다양한 環境의 影響을 받음과 동시에 여러가지 形態의 振動, 荷重 및 外力 等에 의한 反復應力을 받게 됨에 따라서 腐蝕疲勞破壞가 초래된다.

이들 部材의 腐蝕疲勞破壞를 防止하기 위해서, 이들 각종 部材들이 각 使用環境아래에서 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 있다²⁾.

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 內部에 존재하는 각종 應力集中部나 缺陷으로부터 腐蝕疲勞龜裂의 發生 및 傳播舉動은 使用材料, 荷重形態³⁾, 크랙모양⁴⁾ 및 環境 등 많은 因子들에 의하여 복합적으로 작용할 것으로 생각된다.

또한 降伏點보다 낮은 사용 反復荷重下에서도 部材內部의 缺陷 및 部材의 形狀不連續部 等의 應力集中部를 기점으로 발생하여 臨

界 龜裂길이 (critical crack length)에 이르게 되면, 순식간에 전체에 破斷을 초래하게 된다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動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 행하여 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動을 比較, 調查하였다. 이 실험을 통하여, 疲勞龜裂初期段階와 腐蝕疲勞壽命에 미치는 試驗片 두께變化의 影響을 究明하고, 이때의 腐蝕感受性을 定量的으로 구하였다. 또한 腐蝕環境中에서 試驗片 두께변화가 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 에 미치는 加速係數를 定量的으로 구하고, 機械的 및 電氣化學的인 측면에서 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動에 미치는 原因을 究明하므로써 空氣中과 海水中에서 試驗片(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

본 실험에 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 特性은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of used material

a) Chemical composition (wt%)

Description	C	Si	Mn	P	S	Cu
SWS41C	0.16	0.06	0.58	0.018	0.011	0.10

b) Mechanical properties

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

Fig. 1은 본 실험에 사용한 試驗片 形狀을 나타낸 것이다. 試驗片의 길이方向이 壓延方向이 되도록, 龜裂進展 方向은 壓延直角 方向이 되도록 채취한 후 두께 13mm인 壓延鋼材를 밀링머신을 이용하여 두께 6, 8, 10 및 12mm가 되도록 평면 가공하였다. 평면가공시 熱影響이 極小化되도록 平面部는 앤드밀과 정면커터, 노치부는 메탈슬리팅소오(metal slitting saws)로 가공하였다.

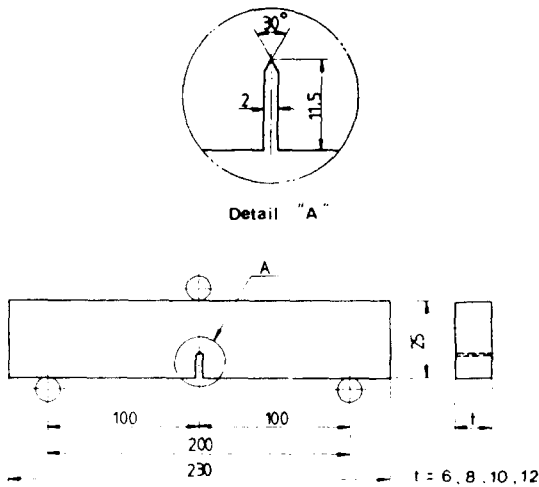
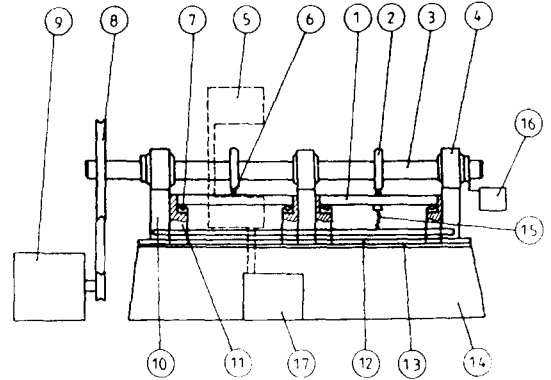


Fig. 1. Specimen dimension and notch position for corrosion test (unit: mm).

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 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 실험에 사용한 편심륜식 정변위 3점 굽힘 疲勞試驗機의 全體系統圖는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 3점 굽힘 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.



- | | |
|--------------------|----------------------|
| 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.

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시키므로써 反復應力을 微細하게 調節할 수 있도록 하였고, 3점 굽힘 反復應力은 모터에 의해 구동되는 偏心輪에 의해 받도록 하였으며, 反復應力의 形態는 應力比 $R=0$ 이다.

反復荷重은 소규모 항복조건을 만족하기 위해서는 疲勞應力이 항복응력보다 적어야 하며, 보통 항복응력의 0.8배 이하로 제한하고 있으므로⁶⁾, 본 실험에서도 反復荷重은 항복응력의 37%인 10.2 kgf/mm^2 으로 하였고, 應力周波數는 450rpm(7.5 Hz)이다. 이때 反復荷重의 回轉數 측정에는 펄스(pulse)식 센서(sensor)와 電子積算回轉計(digital integration counter)를 이용하였다.

2.3 實驗方法

腐蝕環境槽는 아크릴로 제작하였으며 腐蝕

氛圍氣는 海水를 사용하였고, 그 比抵抗 값이 $\rho=25 \Omega \cdot cm$ 되게 固定시키고, 試驗片의 두께를 6, 8, 10 및 12 mm로 變化시켜 가면서, 腐蝕疲勞試驗을 行하였다.

이때 실험중의 腐蝕溶液은 Cl 이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 防止하기 爲하여 시간당 4l의 양으로 계속하여 循環시켰으며, 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 影響을 제거하기 爲하여 절연성필터를 사용하여 腐蝕疲勞試驗을 行하였다.

龜裂성장길이(crack growth length)는 일정한 反復荷重을 가한 후 20배의 이동식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 가정하고, 이하 龜裂初期段階라고 함)로 부터 疲勞壽命까지 연속적으로 측정하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 龜裂初期段階 및 疲勞壽命에 미치는 두께의 影響

Fig. 3은 大氣中과 海水中에서 試驗片의 두께변화에 따른 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂初期段階까지의 應力反復回數를 정리하여 나타낸 것이다.

大氣中이나 海水中에서 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 龜裂初期段階까지의 應力反復回數는 전반적으로 遲延되고, 또한 海水中에서 보다 大氣中에서 龜裂初期段階까지의 應力反復回數는 더 遲延되는 양상을 나타내고 있으며, 두께가 두꺼워질수록 遲延되는 양상이 더 크게 나타난다.

Fig. 4는 空氣中과 海水中에서의 試驗片의 두께변화에 따른 疲勞 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數를 나타낸 것이다.

두께가 두꺼워질수록 疲勞 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數는 감소하므로써 龜裂

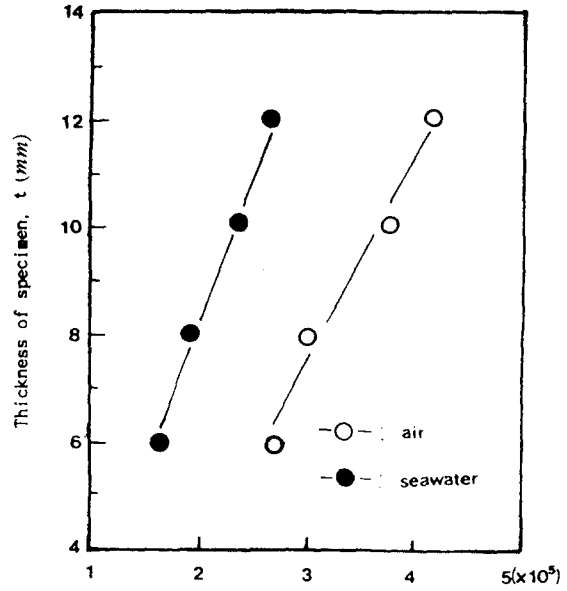


Fig. 3. Thickness of specimen vs number of stress cycles to initial stage crack ($a_1 = 0.5 \text{ mm}$) in air and seawater.

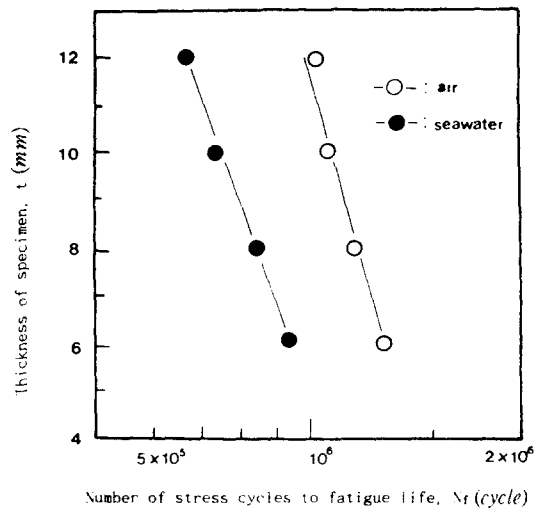


Fig. 4. Thickness of specimen vs number of stress cycles to fatigue life in air and seawater.

初期段階와는 상반되는 양상을 보이고 있다. 그러나 疲勞 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數는 전반적으로 海水中에서 보다 空氣

中에서 더 遲延되는 양상을 나타내고 있으며, 두께가 얇아질수록 더욱 더 遲延됨을 알 수 있다. 또한 두께가 두꺼워질수록 空氣中과 海水中에 있어서 疲勞 및 腐蝕疲勞壽命의 차는 크게 됨을 알 수 있다.

3.2 腐蝕感受성에 미치는 두께의 影響

Fig. 3 및 4에서 두께가 두꺼워질 수록 海水中에서 보다 空氣中에서 더 遲延되는 양상은 龜裂初期段階와 疲勞壽命에서 유사한 양상을 보임으로써 海水中에서 두께에 따른 腐蝕의 影響을 좀더 定量的으로 검토하기 위해, 空氣中에서 疲勞龜裂初期段階 및 疲勞壽命까지의 應力反復回數에 대한 海水中에서 腐蝕疲勞龜裂初期段階 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數의 비를 계산하여 나타낸 腐蝕感受性 S는 다음 (1)式과 같이 정의할 수 있다.

$$S = N_{air} / N_{cor} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,

N_{air} : 空氣中에서 疲勞龜裂初期段階 및 疲勞壽命까지의 應力反復回數

N_{cor} : 海水中에서 腐蝕疲勞龜裂初期段階 및 腐蝕疲勞壽命까지의 應力反復回數

(단, 空氣中에서 疲勞龜裂은 腐蝕의 影響이 없는 것으로 간주함)

Fig. 5는 海水中에서 試驗片의 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂初期段階까지의 腐蝕感受性 S_1 와 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性 S_2 를 계산하여 정리한 것이다.

이 결과에 의하면 試驗片의 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂初期段階까지의 腐蝕感受性은 약 1.52-1.59, 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性은 약 1.42-1.73으로 나타났으며, 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 初期段階까지의

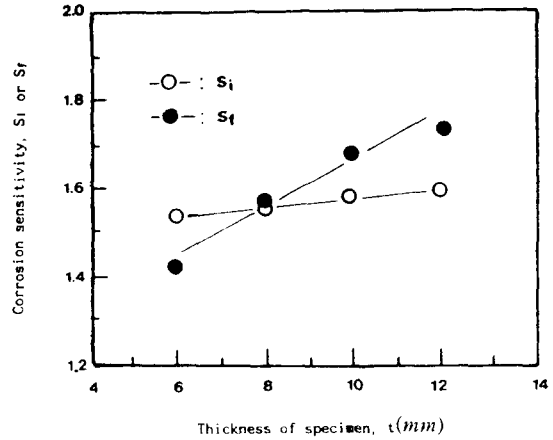


Fig. 5. Corrosion sensitivity to initial stage crack and fatigue life in air and seawater.

腐蝕感受性은 약간 민감해지고 있으나 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性은 더욱 敏感해지고 있다. 특히 본 실험에서 試驗片의 두께가 가장 얇은 6mm의 試驗片을 제외하고는 腐蝕疲勞龜裂初期段階까지의 腐蝕感受性보다 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性이 더 敏感함을 알 수 있다.

3.3 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 龜裂길이 a와의 관계

Fig. 6은 空氣中에 있어서 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 龜裂길이 a와의 관계를 나타낸 것이다.

龜裂初期段階까지의 성장길이에 대한 疲勞龜裂傳播速度는 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 遲延되지만, 疲勞龜裂傳播速度는 龜裂初期段階 이후 부터 龜裂이 성장함에 따라서 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 빨라짐을 알 수 있다. 그리고 두께가 가장 얇은 6mm의 試驗片이 가장 두꺼운 12mm의 試驗片보다 龜裂初期段階에서 疲勞龜裂傳播速度가 빨랐으나 龜裂성장길이 약 4mm에서 교차되면서 오히려 遲延되는 양상을 보이고 있다.

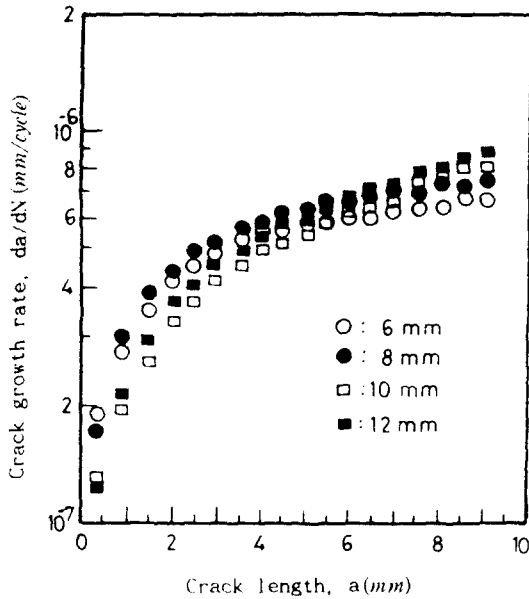


Fig. 6. Crack growth rate vs crack length in air.

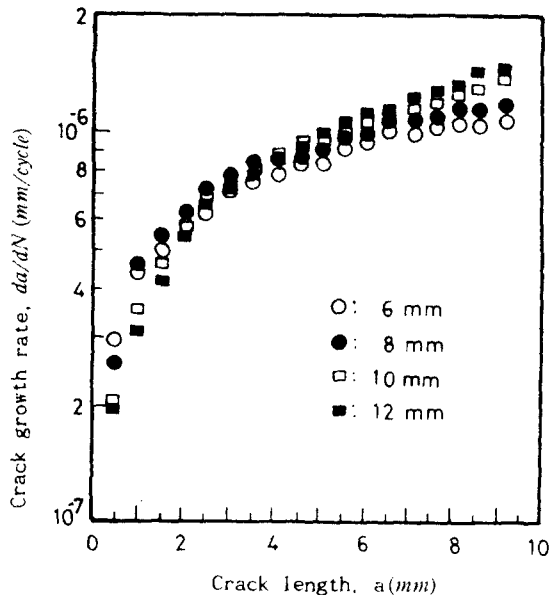


Fig. 7. Crack growth rate vs crack length in seawater.

Fig. 7은 海水中에서 試驗片의 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂傳播速度 da/dN 와 龜裂길이 a 와의 關係를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 空氣中の 龜裂성장길이에 대한 龜裂傳播速度和 비슷한 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 空氣中보다 빠른 傳播速度로 進展되고 있으며, 또한 龜裂성장길이 약 2.3mm에서 두께가 얇은 6mm 試驗片의 傳播速度가 두꺼운 12mm 試驗片의 傳播速度보다 遲延되므로써 Fig. 6의 空氣中에서 보다 海水中の 腐蝕環境下에서 더 敏感함을 알 수 있다.

3.4 두께의 變化가 加速係數에 미치는 影響

두께의 變化가 腐蝕疲勞龜裂傳播速度에 미치는 影響을 定量的으로 究明하기 위하여, 腐蝕疲勞에 의한 6 및 12mm 試驗材의 加速係數 α 에 대한 龜裂성장길이 a 와의 關係를 Fig. 8에 나타낸 것이다.

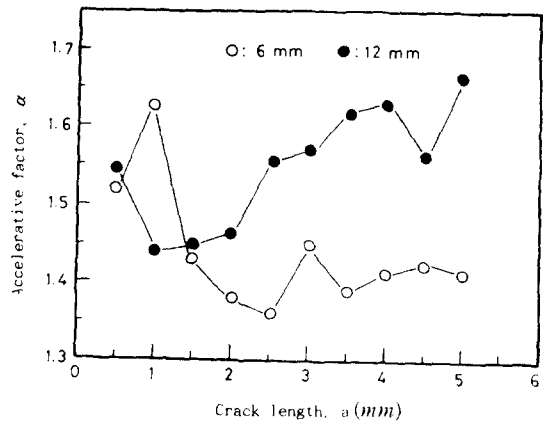


Fig. 8. Relation between accelerative factor and crack length in seawater.

여기서 加速係數 α 는 Fig. 6 및 7의 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 式(2)와 같다⁸⁾.

$$\alpha = [(da/dN)_{cor}] / [(da/dN)_{air}] \dots\dots(2)$$

(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)

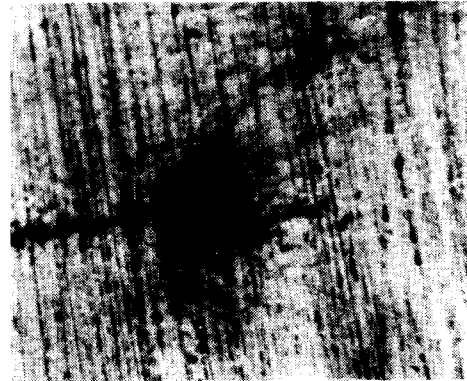
이 結果에 의하면 龜裂初期段階로 부터 龜裂성장길이 약 1.5mm까지는 6mm와 12mm의 加速係數가 서로 교차되므로써 6 및 12mm의 試驗片에 應力과 腐蝕이 서로 교차되면서 影響을 미치나 腐蝕疲勞龜裂길이 점차 성장됨에 따라서 12mm의 加速係數가 6mm의 加速係數보다 더 높게 나타나므로써 12mm의 試驗片이 6mm의 試驗片보다 腐蝕의 影響이 더 敏感함을 알 수 있다.

3.5 두께변화에 따른 腐蝕疲勞龜裂 傳播機構

3.5.1 機械的인 影響

Fig. 6-7에 의하면 疲勞와 腐蝕疲勞龜裂初期의 傳播速度는 얇은 試驗片일수록 빨라지다가 龜裂이 성장함에 따라서 傳播速度는 遲延되고, 두꺼운 試驗片일수록 龜裂初期段階까지는 遲延되다가 龜裂이 성장됨에 따라서 傳播速度는 빨라지면서 腐蝕의 影響이 크게 나타났었다. 이와 같이 試驗片의 두께변화에 따른 疲勞龜裂傳播機構는 두께가 두꺼운 試驗片의 應力狀態는 平面應力狀態가 점차 감소하면서 平面變形率狀態(plane-strain condition)가 支配의임으로 龜裂發生은 遲延되지만 일단 龜裂이 發生하면 塑性變形보다 작아지면서 두께방향으로 變形되므로써 龜裂傳播速度는 빨라지고, 두께가 얇은 試驗片의 應力狀態는 平面應力狀態(plane-stress condition)가 支配의이기 때문에 龜裂發生은 빠르지만 龜裂이 成長되면서 龜裂先端에 塑性變形이 더 크게 형성되므로써 龜裂先端에 機械的인 龜裂閉口現狀에 의해 龜裂傳播速度가 遲延되는 것으로 思料된다⁸⁻¹¹⁾.

이와 같은 結果를 空氣中에서 試驗片의 두께가 가장 얇은 6mm와 가장 두꺼운 12mm에 대하여 龜裂이 6.5mm까지 成長된 龜裂先



(a) $t = 6 (mm)$



(b) $t = 12 (mm)$

Photo. 1. Macro-graph of fatigue crack tip (Crack length, $a=6.5 mm$).

端의 塑性變形樣相을 Photo. 1에 실제로 보인 것이다.

두께 12mm 試驗片의 龜裂先端에는 塑性變形이 거의 나타나지 않았으나 두께 6mm 試驗片의 龜裂先端에는 塑性變形의 樣相이 명확히 나타나고 있다. 그러므로 龜裂先端의 塑性變形에 의해 두께 6mm 試驗片의 경우 龜裂初期段階까지는 두께 12mm 試驗片보다 龜裂이 빨리 발생하지만 龜裂傳播速度는 점차 遲延되는 것으로 생각된다.

3.5.2 電氣化學的인 影響

Photo. 1과 같이 두께가 얇을수록 龜裂先端에 塑性變形이 크게 됨에 따라 腐蝕氛圍氣인 海水中에서도 龜裂先端의 閉口現狀에 의해

두께 6mm 試驗片의 龜裂先端이 두께 12mm 試驗片의 龜裂先端보다 陽極活性化腐蝕이 抑制되므로써 두께 12mm 試驗片의 腐蝕電位보다 더 卑轉位化될 것으로 생각된다. 이러한 腐蝕電位變化의 양상을 실제로 Fig. 9에 試驗片의 두께 6 및 12mm에 대한 海水中の 腐蝕電位 E_c 와 龜裂길이 a 와의 관계를 나타내었다.

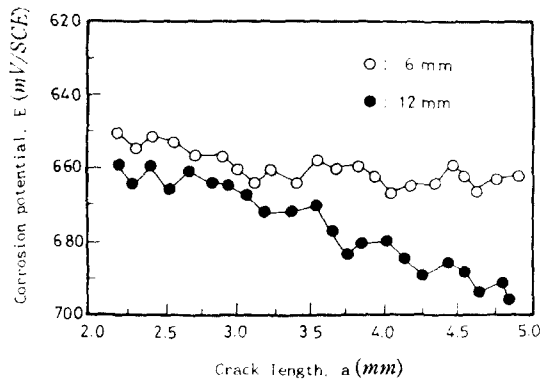


Fig. 9. Corrosion potential vs. crack length in seawater ($t=6, 12mm$).

이에 의하면 腐蝕疲勞龜裂이 성장됨에 따라 試驗片의 두께 12mm와 6mm의 腐蝕電位는 卑電位化되지만 試驗片의 두께가 가장 얇은 6mm보다 가장 두꺼운 12mm 試驗片의 腐蝕電位가 더 卑電位化되는 경향을 나타내고 있다. 따라서 이와 같은 卑電位化의 경향이 陽極生活化腐蝕을 促進시킴으로써 Fig. 5에서 두께 12mm 試驗片의 腐蝕感受性이 두께 6mm 試驗片의 腐蝕感受性보다 더 敏感하고, 龜裂이 성장함에 따라 Fig. 8에서 12mm의 加速係數가 6mm의 加速係數보다 더 높게 되는 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 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動에 미치는 試驗片 두께($t=6, 8, 10, 12mm$)의 影響을 研究한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 初期段階까지의 腐蝕感受性은 약간 敏感해지고 있으나 腐蝕疲勞壽命까지의 腐蝕感受性은 더욱 敏感해지고 있다.

2) 龜裂初期段階까지의 龜裂傳播速度는 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 遲延되지만 龜裂初期段階 이후 부터 試驗片의 두께가 두꺼워질수록 빨라진다.

3) 腐蝕疲勞龜裂길이 성장됨에 따라서 12mm 試驗片의 加速係數가 6mm 試驗片의 加速係數보다 더 높게 나타나고 있다.

4) 腐蝕疲勞龜裂이 성장됨에 따라 試驗片의 두께 12mm와 6mm의 腐蝕電位는 卑電位化되어지나 試驗片의 두께가 얇은 6mm보다 두꺼운 12mm의 腐蝕電位가 더 卑電位化되는 경향을 나타내고 있다.

參 考 文 獻

- 1) 駒井謙治郎(1983) : 應力腐蝕割れ及び腐蝕疲勞への破壊力學の應用. 日本熔接學會誌, 52(3), 23.
- 2) 駒井謙治郎(1983) : 腐蝕疲勞研究の現狀と展望. 日本鐵と鋼, 61(7), 8.
- 3) 宋森弘, 元時太(1985) : 過大過小應力下의 疲勞크랙 발생 舉動(I). 大韓機械學會論文集 9(3), 301-308.
- 4) Yoshio Kitsunai (1984) : Effect of specimen Size and Configuration of Fatigue Crack Growth Behavior or Mild Steel Butt Welding Joints. Materials 320, 66-71.
- 5) David Broek (1978) : Elementary Engineering Fracture Mechanics. Sijthoff and Noordhoff, Netherlands, 80-

- 86.
- 6) G.T.Hahetal(1980): Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth. Metall, Trans. 1189-1202.
 - 7) 中島等(1982): 材料, 第31卷, 710-716.
 - 8) 西谷 弘信(1985): 總合材料強度學講座 6. 疲勞強度學, オ-ム社, 160-163.
 - 9) ROLFE.BARSOM (1982): Fracture and Fatigue Control in Structures. Application of Fracture Mechanics, 274.
 - 10) A.J. McEvily, R.W.Staehle (1972): Corrsion Fatigue. Chemistary, Mechanics and microstructure, NACE-2, 290-191.
 - 11) 林祐助, 李鍾樂, 李鎮烈(1980): 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, 韓國海洋工學會志, 2(2), 322-328.