

“高張力鋼의 腐蝕疲勞에 關한 研究”
 “Study on Corrosion Fatigue of High Strength Steel”

劉憲一* · 川崎正** · 沢木洋三***
 (Heonil Yoo, T. Kawasaki · Y. Sawaki)

Abstract

In case of $K_{I\max} < K_{Isc}$, the corrosion fatigue of high strength steel in 0.1N H_2SO_4 solution and 3.5% salt water is as follows.

1. The fatigue life shortens in order of 3.5% salt water and 0.1N H_2SO_4 solution.
2. The fatigue crack growth rate in air is obtained as the following equation.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_{air} = 7.23 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.23}$$

3. The corrosion fatigue crack growth rate in environment is divided into three regions, that is, First Region, Second Region and Third Region from the small cyclic stress intensity.
4. The formation rate of the active surface on metal is slower than the mechano-chemical reaction rate in First Region. The crack growth rate depends on time and the cyclic stress intensity and is expressed as the following equation.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_t = C(\Delta K)^{\sigma}$$

5. The formation rate of the active surface is faster than the mechano-chemical reaction rate in Second Region and the synergistic effect by stress and corrosion becomes slow. In case the fatigue load is large, we have the critical crack growth rate which is not related to the cyclic stress intensity.
6. The corrosion crack growth rate by the mechano-chemical reaction is the same in H_2SO_4 solution and salt water, so Hydrogen accelerates the crack growth.
7. The environment has no effect on the corrosion-fatigue crack growth rate in Third Region.
8. In First Region and Second Region, dimple is observed on the fatigue fracture surface in 0.1N H_2SO_4 solution.
9. The striation is observed in any environment as in air in Third Region and its interval approximately coincide with the crack growth rate.

* 國民大學校工科學部 教授

*** 東北大學工學部 助教授

** 東北大學工學部 教授

1. 序 論

機械構造물의 破壞事故에는 變動하는 應力에 의해 일어나는 破壞인 疲勞에 의한 것이 大部分을 차지하고 있는 것은 周知의 事實이며⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 近年에는 에너지開發, 海洋開發, 宇宙開發등의 産業活動의 高度化에 따라 石油탱크, 化學플랜트, 파이프라인, 壓力容器, 蒸氣터빈 등의 機械構造물의 大型化, 高性能化가 要求되고 使用되는 材料도 高強度의 構造用鋼材가 開發되기에 이르렀으나 이러한 材料들이 견디어 내야 할 環境條件도 더욱 苛酷하게 되어가고 있다. 따라서 機械構造물의 破壞防止, 壽命의 推定 및 安全性 確保를 위해서 構造材料의 腐蝕疲勞特性을 明確히 하는 것이 機械設計工學分野에서의 重要한 課題로 되어있다.

強度레벨이 높은 材料일수록 一般的으로 環境感受性이 높아서 여러가지 環境에서 靜荷重을 받아 일어나는 應力腐蝕갈라짐이나 變動荷重 - 環境系에서 일어나는 腐蝕疲勞에 대한 材料의 破壞抵抗이 顯著히 低下한다.^{(4),(5)} 大部分의 構造部材는 끊임없이 變動荷重을 받고 있으며 여러가지 環境中에서 材料의 腐蝕疲勞舉動을 明確히 해 둘 必要가 있다. 이런 觀點에서 여러가지 環境-材料의 組合에 의한 腐蝕疲勞의 研究가 이루어지고 있으며,⁽⁶⁾⁻⁽¹⁴⁾ 그 研究結果는 주어진 條件에 대해서 適切한 材料를 選定하는데 實用上 크게 도움을 주고있다. 그러나 環境-材料系의 腐蝕疲勞를 支配하는 여러가지 力學的 파라메터를 밝히는데 顯著한 進歩가 있었고 金屬物理的 및 電氣化學的 立場에서 많은 研究가 있었음에도 불구하고 腐蝕疲勞의 本質的인 機構에 대해서는 아직도 明確치 못한 點들이 많이 남아있는 現狀이다. 지금까지의 많은 研究에 의하면 腐蝕疲勞는 極히 複雜한 現象이며 그 究明에는 넓은 分野에 걸쳐 學際的 總合的인 研究가 必要한 것으로 指摘되고 있다.^{(15),(16)}

環境-材料系의 腐蝕疲勞舉動이란 그 材料가 주어진 環境中에서 變動荷重을 받을때의 強度特性을 말한다. 같은 材料라도 環境이 다르면 反復荷重에 대해 다른 舉動을 나타내고 또 같은 環

境이라도 材料에 따라 다른 腐蝕疲勞舉動을 나타낸다. 侵攻的 環境中에서 材料가 靜荷重을 받을때 龜裂成長이 일어나지않는 平面 스트레인應力擴大係數의 上限을 $K_{1,occ}$ 로 表示하고 材料의 應力擴大係數 K_1 이 環境-材料系의 $K_{1,occ}$ 보다 크면 靜荷重에서도 應力腐蝕갈라짐이 일어난다. 따라서 變動荷重의 한 사이클中 K_1 의 最大値 $K_{1,max}$ 가 $K_{1,occ}$ 보다 크나 작나에 따라 腐蝕疲勞舉動은 크게 달라진다. 따라서 腐蝕疲勞舉動은 $K_{1,max}$ 가 $K_{1,occ}$ 을 境界로 낮은 경우와 높은 경우로 나누어 생각해야 한다.

$K_{1,max} > K_{1,occ}$ 의 경우에는 Wei 등에 의한 線形合의 假說⁽¹⁴⁾이 나와 있다. 이 假說은 環境中的 疲勞龜裂傳播速度는 乾燥된 空氣中的 疲勞龜裂傳播速度와 遲延破壞에 의한 龜裂傳播速度의 代數的合으로 얻어진다는 생각으로 腐蝕疲勞龜裂成長을 豫測하는 데 便利한 方法이긴 하나⁽¹⁷⁾ -⁽²²⁾ 腐蝕疲勞는 力學的인 slip 現象과 腐蝕이라는 化學的인 現象의 synergistic effect에 의한 mechano-chemical 現象이기 때문에 單純한 線形合이 成立하는 것은 特殊한 경우에 限定되고 모든 腐蝕疲勞에는 滿足될 수 없는 理論이다. 또한 強度레벨이 約 100kg/mm^2 以下の 實用構造用鋼材는 環境感受性이 敏感하지 않으며 一般的으로 $K_{1,occ}$ 値는 높아서 $K_{1,max} < K_{1,occ}$ 로 使用되는 경우가 많고 이와같은 條件下에서의 腐蝕疲勞가 實用上 強度設計의 立場에서 極히 重要하다. 그리고 $K_{1,occ}$ 以下の 腐蝕疲勞龜裂傳播速度가 空氣中的 疲勞에 比해서 아주 빠른것이 어떤 機構에 基因한 것인지 그 原因은 아직도 確實하지 않다.

이런 背景에서 本 研究는 現在 많은 機械構造物에 널리 使用되고 있는 熔接用高張力鋼을 利用하여 $K_{1,occ}$ 以下の 腐蝕疲勞에서 反復굽힘應力을 加하여 室溫의 3.5%食塩水와 0.1N硫酸熔液의 環境이 腐蝕疲勞龜裂成長에 어떤 影響을 미치는지 破壞力學的으로 整理함과 아울러 走査型 電子顯微鏡에 의한 破壞面觀察로 龜裂成長舉動과 그 機構를 檢討하여 疲勞龜裂傳播速度의 加速特性을 明確히하며 그 結果를 設計應力の 選定이나 部材의 壽命推定法의 基礎에 應用하려 한다.

2. 材料 및 實驗方法

2-1. 材料 및 試驗片

實驗에 使用된 材料는 두께 15mm로 壓延된 80킬로級高張力網으로 그 組織은 低炭素 tempered Martensite이다. 化學成分과 機械的性質은 表1 表2에 나타나 있다.

表1. 化學成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Cr
0.16	0.26	0.95	0.019	0.002	0.30	0.55	1.00

表2. 機械的 性質

Yield stress kg/mm ²	U. T. S. kg/mm ²	Elongation %
81.5	86.0	21.5

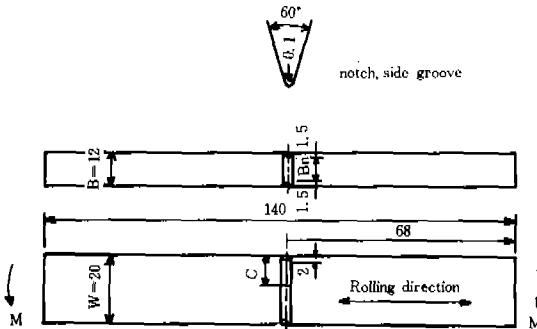


그림1. 試驗片모양 및 치수

試驗片은 그림 1에 나타난바와 같고 치수는 20×12×140 mm로 한端에서부터 68mm되는 곳에 notch와 側面홈을 넣었다. 그 모양은 先端 반지름 $\rho=0.1\text{mm}$ 의 60°의 V형으로 깊이는 notch가 2 mm, 側面홈이 1.5mm이다. 試驗片의 길이方向과 壓延方向을 一致시켰고 龜裂進度方向은 LT 方向⁽¹¹⁾이다.

2-2. 實驗裝置

實驗에 使用한 試驗機는 低速의 外判보型反復 굽힘試驗機로 容量은 50kg·m이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 外判보의 한端에 무게를 걸므로서 그대로 靜的 굽힘 試驗機가 되며 또 必要한부

게를 油壓 jack 으로 上下로 움직여 疲勞 試驗을 할 수 있다. 이 경우의 反復荷重發生裝置가 그림 3에 나타나 있다. 空氣壓縮機에서 8~10kg/cm²의 壓縮空氣가 만들어져 空氣濾過器를 거쳐 調壓器에서 壓力이 一定한 값으로 降下된다. 注油器에서 壓縮空氣에 少量의 潤滑油가 混合加壓되고 一定壓力을 가진 壓縮空氣가 solenoid valve로 供給된다. 이 벨브에는 solenoid가 2組 있어서 制御裝置로부터의 指令電流에 의해 벨브가 開閉되고 變換器를 통해 油壓으로 jack이 上下로 作動한다.

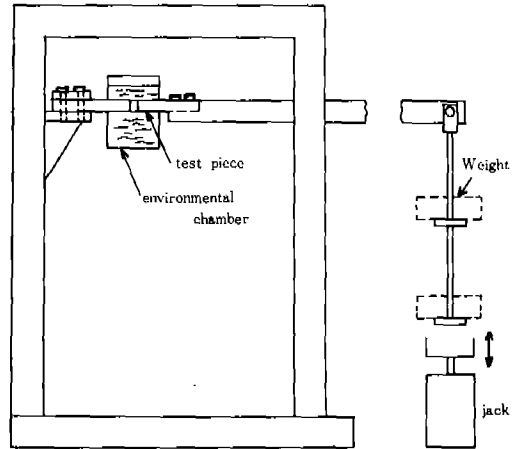


그림2. 實驗裝置의 概要

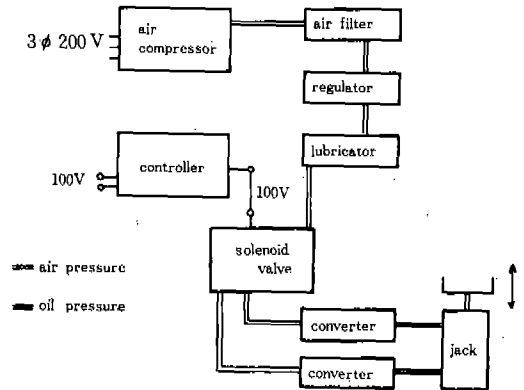


그림3. 反復荷重發生裝置

이 裝置에 의해 얻어진 疲勞荷重波形은 그림 4에 나타난바와 같이 사다리꼴波형으로 反復速度는 調壓器를 調節하여 7~16cpm의 任意값으로

로 設定할 수 있다. 荷重波形은 jack의 昇降速度와 停止時間을 調整하여 設定하고 load cell出力을 調査하여 수시로 波形을 必要한 모양으로 補正했다. 이 實驗에서는 調壓器壓力을 5 kg/cm²로 유지시킴으로써 反復速度는 最高 15.6cpm, 最低 12.3cpm로 平均 13.6cpm을 얻었다. 이때 最大荷重保有時間 t_h 와 最小荷重保有時間 t_{h_1} 는 거의 같도록 調節하였다. 또 負荷速度 \dot{M}_r 는 62.0 kg-m/sec, 除荷速度 \dot{M}_r 는 43.7kg-m/sec로 最高荷重에 관계없이 거의 一定하였다.

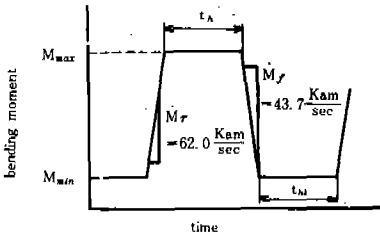


그림 4. 疲勞荷重波形

2-3 環 境

試驗片에서는 아크릴樹脂製의 環境容器를 裝着하여 環境溶液의 均一性을 유지시키기 위해 約 5 cc/min의 流量으로 徐徐히 循環시켰다. 使用된 環境溶液은 0.1N硫酸溶液 및 3.5%食鹽水로 市販되고 있는 試藥과 蒸溜水로 다음과 같이 만들었다. 硫酸溶液은 부피%가 1%가 되도록 蒸溜水 1ℓ에 대해 濃硫酸(純度95%) 10.6cc의 比率로 했다. 濃硫酸의 比重은 1.84이므로 무게%로 換算한다면 1.8%가 된다. 食鹽水는 蒸溜水 1ℓ에 대해 鹽化나트륨(純度99.5%)을 36.27g 녹여서 3.5%로 했다.

溶液溫度는 制御하지 않고 室溫으로 放置했기 때문에 하루의 溫度變化는 約 5℃ 以內였고 實驗期間中의 室內溫度는 大略 15℃ 程度였다. 環境容器와 試驗片사이에 溶液이 새지않도록 시일링을 했다.

2.4 應力擴大係數 및 龜裂傳播速度의 算出

應力擴大係數와 龜裂成長速度를 算出하기 위해서 一定한 反復사이클에 따라 疲勞龜裂 길이를

正確히 測定해야 한다. 環境容器밖에 設置한 25~50倍의 遊尺顯微鏡으로 光學的으로 龜裂길이를 測定했으며 測定된 龜裂길이로부터 다음式에 의해 應力擴大係數를 計算했다.⁽²²⁾⁽²³⁾

$$K = \frac{6M}{W^2} \sqrt{\frac{c}{BB_n}} \left\{ 1.99 - 2.47 \frac{c}{W} + 12.97 \left(\frac{c}{W}\right)^2 - 23.17 \left(\frac{c}{W}\right)^3 + 24.8 \left(\frac{c}{W}\right)^4 \right\}$$

단 $c/W \leq 0.6$ 이어야 한다.

여기서 M = 龜裂의 굽힘모멘트 (kg-mm)

c = 龜裂길이 (mm)

W = 試驗片의 너비 (mm)

B = 試驗片의 두께 (mm)

B_n = 側面翹부의 試驗片두께 (mm)

龜裂成長速度는 龜裂成長曲線으로부터 圖式的인 方法으로 求했다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1 環境中에서의 靜荷重試驗

侵攻의 環境에서는 材料는 降伏應力보다 훨씬 낮은 應力에서 構造部材의 遲延破壞가 일어나는데 그 原因은 應力腐蝕갈라짐이다. 주어진 環境 안에서 材料의 應力腐蝕感受性을 調査하는 方法은 平滑試驗片이나 notch試驗片을 使用하여 여러가지 應力레벨에서 破壞에 이르는 時間을 測定함으로써 이루어진다. 여러 試驗結果에 의하면 普通의 平滑試驗片에서는 應力腐蝕에 대한 感受性이 없는 材料라도 같은 條件에서 豫龜裂을 가진 試驗片은 높은 應力腐蝕갈라짐 感受性을 나타낸다.⁽¹⁸⁾

荷重을 一定하게 유지하고 0.1N硫酸溶液中에 放置하는 試驗을 하였다. 表 3 (a)에 나타난 2 가지 條件에서 3개의 試驗片에 實驗하기前 豫龜裂을 넣음으로써 充分한 應力이 걸리는 即時應力腐蝕갈라짐이 發生하도록 했다.⁽²⁴⁾ 實驗結果가 表 3 (b)에 나타나 있다.

實驗이 進行되는 동안 龜裂이 時間에 따라 成長되는지를 주의깊게 觀察하였으나 이 實驗에서는 龜裂은 全히 成長하지 않았다. 다만 時間이

흐름에 따라 試驗片 表面으로부터 全般的인 腐蝕이 進行되어 有効斷面積이 漸次로 減少하여 實應力增大로 破斷이 일어났다. 다시말해서 遲延破壤가 아니므로 材料-環境을 組合한 材料의 K_{Isc} 値는 얻을 수 없었다. 만약 K_{Isc} 値가 存在한다면 꽤 높은 값을 推定할 수 있다.

表3. 靜荷重試驗

(a) 豫龜裂의 條件

條件	M_{max} kg·m	M_{min} kg·m	$R = \frac{M_{min}}{M_{max}}$	環 境
(1)	22.6	4.0	0.18	Air
(2)	13.3	4.0	0.30	Air

(b) 結 果

豫龜裂條件	豫龜裂길이 c, mm	初期굽힘 應 力 σ_i , kg/mm ²	初期應力 擴大係數 K, kg/mm	破斷時間 hr	검보기 破斷應力 kg/mm ²
(1)	5.16	79.0	169.0	580	169.0
(1)	4.43	77.0	158.2	290hr에도 破斷않음	
(2)	5.90	85.0	162.6	268	160.1

3-2 疲勞壽命과 疲勞龜裂傳播

0.1N硫酸溶液과 3.5%食鹽水の 2 가지 環境中에서 表 4 에 表示된 荷重條件에 따라 疲勞試驗을 하여 얻어진 結果를 空氣中에서의 疲勞試驗 結果와 比較했다. 疲勞試驗片에는 notch에 豫龜裂를 넣지 않았다. 0.1N硫酸溶液中的 實驗에서는 試驗片表面으로부터 激烈하게 水素氣泡가 發生하여 龜裂길이를 測定하는데 때때로 困難한 경우도 있었다. 3.5%食鹽水中的 實驗에서도 氣泡의 發生이 있었으나 硫酸溶液의 경우에 比한다면 極히 적었다.

疲勞試驗에서 얻어진 S-N線圖(**)가 그림 5에 나타나있다. 橫軸은 反復回數 N_f , 縱軸은 最大굽힘모우멘트 M_{max} 을 취하여 3 가지 경우에 대한 結果는 直線關係로 나타났으며 壽命은 空氣中인 것이 가장 길고 3.5% 食鹽水, 0.1N硫酸溶液의 順으로 짧아지고 있다. 또 腐蝕疲勞의 경우에는 一定한 疲勞限度가 存在하지 않고(**,**) 反復回

數가 充分히 크고 slip이 일어날 수 있을정도로 크기의 어떤 應力에서도 破斷이 發生되므로 定해진 時間에 대한 疲勞限度를 구하는 實驗은 하지 않았다.

一定한 反復回數가 經過할 때마다 龜裂길이를 測定하여 얻어진 龜裂成長曲線이 그림 6 (a)~(d)에 나타나 있다. 橫軸은 反復回數 N , 縱軸은 龜裂길이 c (mm)로 표시되었다. 龜裂은 各사이클마다 연속적으로 늘어나는 것이 아니고 實際로는 어떤 潛伏期間後에 急激히 成長하는 階段모양의 生長을 觀察할 수 있으나 이것은 하나의 曲線으로 나타낸 것이 그림 6이다. 龜裂成長曲線을 보면 龜裂成長은 荷重增加와 腐蝕環境에 의해 현저히 加速되고 있음을 볼 수 있다. 또 各荷重條件에 따라 破斷時的 龜裂길이가 大體로 一定한 값을 갖는 것을 볼 수 있으며 따라서 破斷時的 應力擴大係數가 거의 같음을 알 수 있다.

表4. 環境 및 疲勞試驗條件

荷重條件 表示記號	最大굽힘 모우멘트 M_{max} , kg·m	最小굽힘 모우멘트 M_{min} , kg·m	$R = \frac{M_{min}}{M_{max}}$	環 境
M_1	13.3	4.0	0.30	1% H_2SO_4
M_2	18.0	4.0	0.44	1% H_2SO_4 , 3.5% NaCl Air
M_3	22.6	4.0	0.18	1% H_2SO_4 , 3.5% NaCl Air
M_4	31.9	4.0	0.13	1% H_2SO_4 , 3.5% NaCl

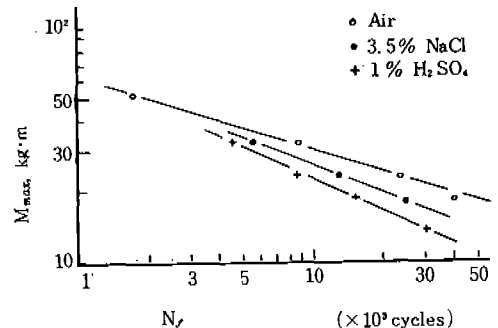


그림5. S - N線圖

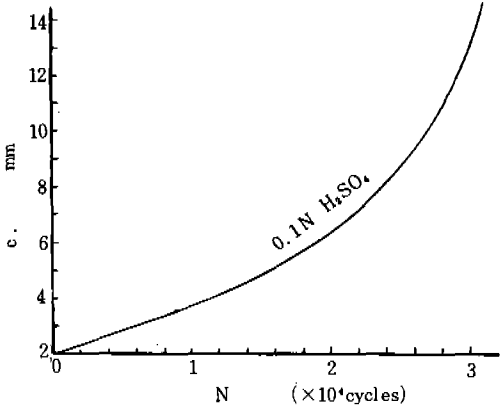


그림6(a) M₁에서의 龜裂成長曲線

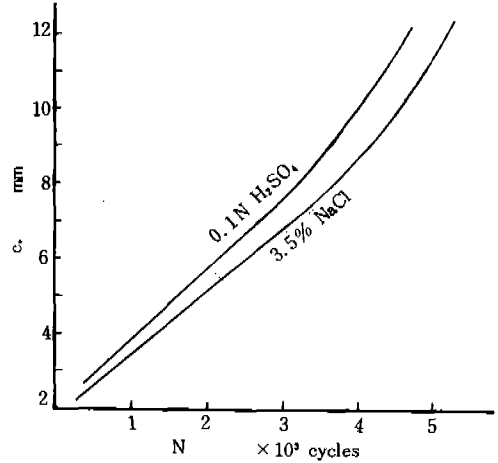


그림6(d) M₄에서의 龜裂成長曲線

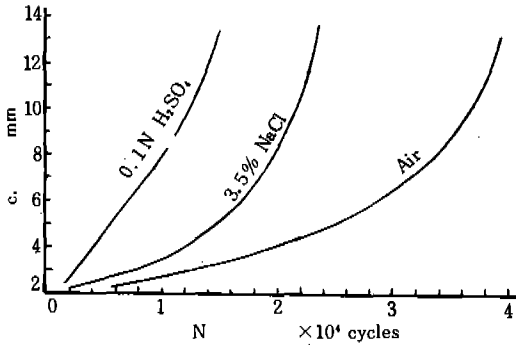


그림6(b) M₂에서의 龜裂成長曲線

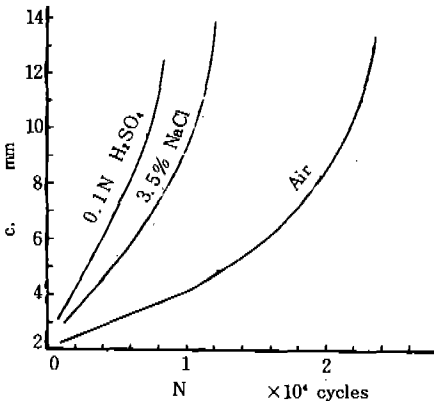


그림6(c) M₃에서의 龜裂成長曲線

써 空氣中の 龜裂成長速度 (dc/dN)_{air} 을 나타낸 것이 그림 7이다. 이 實驗範圍內에서는 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 最大荷重이나 應力比의 影響을 보이지 않고 다음과 같은 式으로 表示할 수 있다.

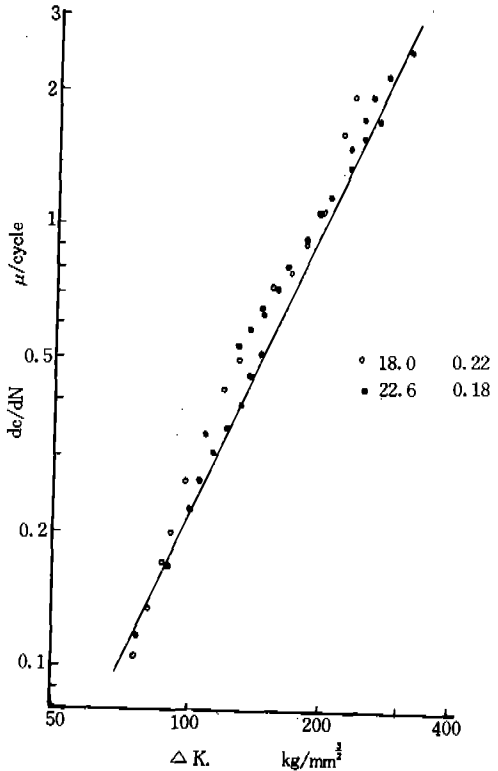


그림7. 空氣中에서 疲勞龜裂成長速度와 應力擴大係數幅과의 關係

3-3 空氣中の 疲勞龜裂成長速度

그림 6의 龜裂成長曲線으로부터 龜裂 成長速度 dc/dN 를 求하여 縱軸에 表示하고 應力擴大係數幅 ΔK 에 關係 整理해서 橫軸에 表示함으로

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_{air} = C_{air} (\Delta K)^{\delta_{air}} \dots\dots\dots(1)$$

最小 2 乘法에 의해서 위의 式의 常数를 求해보면 $C_{air} = 7.23 \times 10^{-8}$, $\delta_{air} = 2.23$ 으로 되고 다음과 같이 表示된다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_{air} = 7.23 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.23} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 單位는 ΔK 는 $kg/mm^{3/2}$ 이고 dc/dN 는 $\mu/cycle$ 이다.

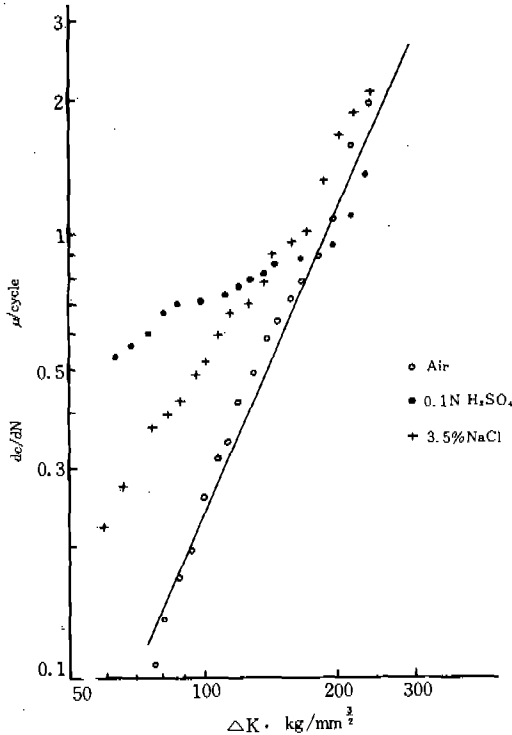


그림 8. M_2 條件에서 環境이 龜裂成長速度에 미치는 影響

3-4 腐蝕疲勞의 龜裂成長速度

環境中の 龜裂成長曲線으로부터 龜裂成長速度를 求하고 應力擴大係數幅 ΔK 를 函數로 해서 얻어진 것이 그림 8 이다. M_2 의 荷重條件에서 空氣中の 龜裂成長速度와 比較해보면 ΔK 가 큰 領域에서는 環境中の 龜裂成長速度는 空氣中の 경우와 거의 一致하고 있어서 環境의 影響이 없거나 또는 環境에 의한 加速이 아주 작게 나타나

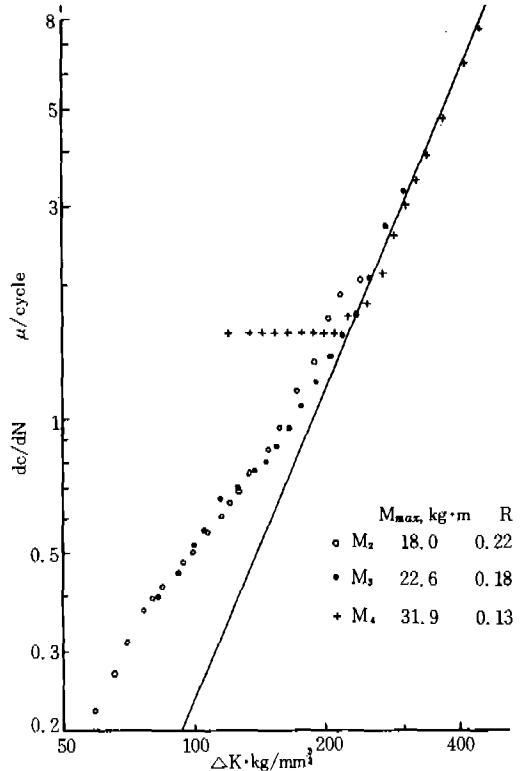


그림 9. 3.5%食鹽水의 龜裂成長速度와 應力擴大係數幅과의 關係

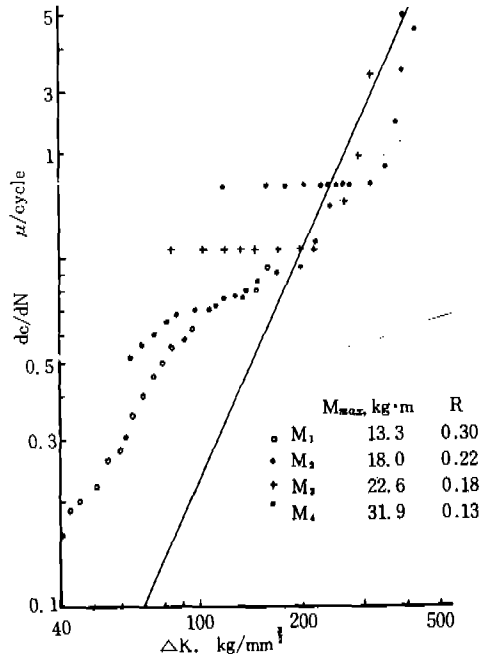


그림 10. 0.1N 硫酸溶液의 龜裂成長速度와 應力擴大係數幅과의 關係

고 있다. 그렇지만 ΔK 가 작은 領域에서는 龜裂 成長速度가 環境의 影響을 많이 받아서 현저히 加速되어 空氣中の 龜裂 成長速度에 比해서 應力 擴大係數幅 ΔK 가 $80\text{kg}/\text{mm}^2$ 附近에서는 3.5%食 鹽水의 경우 2.5倍, 0.1N硫酸溶液의 경우에는 4.5倍로 나타나서 腐蝕疲勞에 의한 龜裂 成長速度가 增加함을 알 수 있다.

주어진 荷重條件 M_1, M_2, M_3, M_4 에서 龜裂 成長速度 dc/dN 와 應力擴大係數幅 ΔK 의 關係를 3.5%食鹽水에 대해 整理한 것이 그림 9에, 0.1N硫酸溶液에 대해 整理한 것이 그림 10과 같이 나타나며, 最大荷重 M_{max} 와 應力比 R 에 의해서 다른 結果를 나타내고 있다. 따라서 最大荷重 M_{max} 와 應力比 R 中에서 環境에 影響을 주는 것을 알기 위해서 環境이 強하게 作用하고 있는 0.1N硫酸溶液의 경우를 調査했다.

應力比를 $R = 0.22$ 로 一定하게 하였을 때 最大荷重에 따라 다른 傾向을 나타냈고 한편 最大荷重 $M_{max} = 31\text{kg}\cdot\text{m}$ 로 一定하게 했을 때 거의 비슷한 龜裂 成長速度를 나타냈다. 이 實驗結果로 判斷해 볼 때 環境中の 龜裂 成長速度에 應力比의 影響은 거의 없고 最大荷重에 크게 依存하고 있음을 알 수 있다.

3-5 $K_{1max} < K_{1occ}$ 에서의 腐蝕疲勞龜裂 成長學動

表 3의 實驗結果에 의하면 $170\text{kg}/\text{mm}^2$ 까지의 初期應力擴大係數에서 應力腐蝕갈라짐이 일어나고 있지않다. 또한 腐蝕疲勞의 環境에 의한 影響은 應力擴大係數幅 ΔK 가 $200\text{kg}/\text{mm}^2$ 까지에 미치고 그 以上은 環境의 影響을 받지 않는것으로 미루어보면 本實驗範圍는 $K_{1max} < K_{1occ}$ 에 該當됨을 알 수 있다.

室溫空氣中에서는 龜裂 成長速度는 應力波形이나 反復速度에 關係없이 一定하며 反復速度가 같은 경우 環境에 의한 龜裂 成長速度는 正弦波, 三角波에서는 같은 效果를 내나 四角形波에서는 環境效果가 나타나지 않으며 K_{1occ} 以下の 腐蝕疲勞는 荷重增加期間에만 일어나고 K_{1occ} 以下の 四角形波腐蝕疲勞에서는 最大荷重 또는 最小荷重의 保持時間을 바꾸어도 疲勞에 대한 環境效

果가 없는 것으로 觀察되고 있다.⁽⁹⁾

腐蝕疲勞에 影響을 주는 荷重의 增加時間, 即 荷重時間의 크기는 本實驗과 같은 荷重狀態에서 ΔM 에 比例하게 된다. 荷重時間 t_r 가 질수복 最大荷重은 커지고 最大荷重 및 最小荷重의 保有時間 t_{A1} 과 t_{B1} 을 調節하여 荷重周期 τ 을 4.41sec로 一定하게 할 수 있으며 反復速度 f 는 $13.6\text{c}/\text{min}$ 로 一定해진다. 動歪計로 波形을 自動記錄시켜 各 荷重條件에 대한 荷重時間을 測定한 結果가 表 5에 나타나 있으며 모우멘트比와 荷重時間比가 잘 一致되고 있다.

表5. 各應力波의 荷重時間 t_r 의 比較

1	2	2	3	4	5	6
M_i	M_{max} kg·m	M_{min} kg·m	ΔM kg·m	$\frac{(\Delta M)_i}{(\Delta M)_1}$	t_r sec	$\frac{(t_r)_i}{(t_r)_1}$
M_1	13.3	4.0	.93	1.0	0.150	1.0
M_2	18.0	4.0	14.0	1.5	0.226	1.5
M_3	22.6	4.0	18.6	2.0	0.300	2.0
M_4	31.9	4.0	27.9	3.0	0.450	3.0

金屬은 電氣傳導성이 높아서 電氣化學腐蝕이 일어나기 쉽고 塑性이 높기때문에 轉位, 空孔의 增加, 偏折의 促進, 變態 및 slip帶의 生成으로 金屬이 化學活性化하여 應力이 없는 경우에는 일어나지 않는 化學的反應이 일어나는 경우가 있다. 이런 反應을 mechano-chemical 反應⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾이라 한다. 腐蝕疲勞에서는 slip에 의한 mechano-chemical 反應에 따라 金屬이 溶解하여 龜裂發生이 促進된다. 腐蝕에 의해 表面皮膜이 除去되고 또 溶解로 미끄러지기 쉽게 된다. 腐蝕疲勞는 3개의 領域으로 나누어진다. 龜裂의 發生을 包含한 第 I 領域에서는 龜裂 成長速度가 應力擴大係數幅 ΔK 에 크게 依存한다. 第 II 領域에서는 龜裂 成長速度는 腐蝕에 의해 크게 左右되고 應力의 影響은 比較的 작아진다. 應力擴大係數幅이 아주 커지면 反復周波數의 影響이 현저해진다. 第 III 領域에서는 最終破斷으로 이루어지므로 龜裂 成長速度가 크게 나타난다. 따라서 第 I 領域과 第 II 領域은 應力과 腐蝕의 synergistic eff-

ect領域으로 應力만으로 決코 일어나지 않는 現象이다.^{(24),(25)}

① 第Ⅰ領域

腐蝕疲勞의 第Ⅰ領域에서는 그림 9와 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 龜裂成長速度 dc/dN 는 空氣中の 龜裂成長速度와 견주어 볼 때 加速되고 있으며 應力擴大係數幅 ΔK 의 函數로 나타나며 空氣中 疲勞의 경우와 같은 式으로 表示할 수 있다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_I = C(\Delta K)^\delta \dots\dots\dots(3)$$

그러나 그림 7의 空氣中の 것과 比較해 보면 다른 것은 C와 δ 值가 試驗條件에 따라 다른 값으로 주워지는 것이다.

腐蝕環境에서 얻어진 그림 9와 그림 10의 結果를 dc/dN 代身에 dc/dt_r (單位負荷時間에 대한 龜裂成長速度)로 整理하면 第Ⅰ, Ⅱ領域에서는 M_{max} 에 無關하게 各各 하나의 直線上에 놓이므로 龜裂成長이 時間依存型임을 알 수 있다. 미리 언급된 mechano-chemical 反應은 하나의 速度過程이면서 時間과 같이 進行되는 現象이므로 式(3)의 C와 δ 는 材料-環境의 組合뿐만 아니라 疲勞波形이나 反復速度 등의 時間的因子에 의해 달라진다.

本實驗에서는 反復速度는 一定하고 使用된 試驗機의 性能上 負荷速度는 一定하므로 最大荷重 M_{max} 에 따라 負荷時間 t_r 가 比例하고 龜裂先端에서 塑性流動이 일어나는 時間은 M_{max} 가 높을 수록 길게된다. 이런點으로 미루어 볼때 硫酸溶液의 경우 M_1 의 경우보다 M_2 의 경우 龜裂成長速度가 더 빠르다. 空氣中の 疲勞龜裂成長速度가 環境에 의해 m배 加速된다고 생각하면

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_I = m\left(\frac{dc}{dN}\right)_{air} \dots\dots\dots(4)$$

式(1)과 式(3)으로부터 腐蝕疲勞龜裂加速係數 m을 求하면 다음과 같다.

$$m = \frac{C}{C_{air}} \cdot \frac{1}{(\Delta K)^\delta_{air} - \delta} \dots\dots\dots(5)$$

② 第Ⅱ領域

本實驗에서 얻어진 實驗結果로 第Ⅰ領域에서 第Ⅱ領域으로의 遷移를 正確히 判斷하기는 어려우나 그림 9와 그림 10에서 第Ⅱ領域에서의 龜裂成長速度는 第Ⅰ領域에 比해 曲線의 傾斜가 완만하거나 荷重條件이 甚한 경우에는 應力擴大係數幅 ΔK 에 關係없이 水平으로 나타나 있다.

Mechano-chemical 反應에서는 塑性流動으로 發生되는 金屬의 活性化表面積 S와 그 增加速度 dS/dt 등의 力學的 파라메터에 의해 影響을 받지만 한편 反應速度 dR/dt 에 의해서도 影響을 받는다. 應力擴大係數幅 ΔK 가 작은 第Ⅰ領域에서는 $dS/dt < (dR/dt)$ 의 關係로 應力과 腐蝕의 synergistic effect로 龜裂成長速度가 加速되었다. 그러나 應力擴大係數幅이 커짐에 따라 dS/dt 가 漸次로 커지고 $dS/dt > dR/dt$ 이 되면 充分한 應力과 腐蝕의 協同作用이 鈍化되어 第Ⅱ領域이 된다. 어떤 一定한 環境과 溫度에서는 反應速度 dR/dt 에 限界值가 存在하며, 金屬活性面이 많이 發生한다고 해도 腐蝕과 材料의 協同作用에 의한 dc/dt 는 限界值를 갖는다. 이런 限界值를 갖는 경우가 그림 9와 그림 10에서 第Ⅱ領域의 水平部分으로 應力擴大係數幅 ΔK 가 增加해도 龜裂成長速度 dc/dN 는 아무런 影響을 받지 않는다.

表 5의 t_r 值와 그림 9, 10의 水平部分에 해당되는 第Ⅱ領域의 dc/dN 值로부터 限界 dc/dt_r 을 計算해보면 0.1N 硫酸溶液의 M_1, M_2 의 荷重條件에서

$$\left(\frac{dc}{dt_r}\right)_{crit} = \left(\frac{1.08}{0.3}\right)_{M_1} = \left(\frac{1.56}{0.45}\right)_{M_2} = 3.5 \mu/sec \dots\dots(6)$$

3.5%食鹽水의 M_1 荷重條件에서

$$\left(\frac{dc}{dt_r}\right)_{crit} = \left(\frac{1.6}{0.45}\right)_{M_1} = 3.5 \mu/sec \dots\dots\dots(7)$$

大体로 $(dc/dt_r)_{crit}$ 가 같은 값을 나타내는 것으로 볼때 2가지 溶液에서 腐蝕에 作用하고 있는 物質은 水素로 推定된다.

③ 第Ⅲ領域

高張力鋼은 硫酸溶液과 食鹽水의 腐蝕疲勞에서 第Ⅱ領域에서는 龜裂成長速度가 環境과 荷重條件에 따라 $(dc/dt_r)_{crit}$ 以上으로 增加하지 않

는 경우도 있음을 알았다. 그러나 應力擴大係數幅 ΔK 가 漸次로 커지면 時間依存的인 dc/dN 와는 關係없이 力學的인 龜裂成長速度가 增加하여 mechano-chemical 反應의 作用에 의하지 않고 $(dc/dN)_{air}$ 의 速度로 成長하여 破斷하게된다. 이 領域이 第Ⅲ領域이고 $(dc/dN)_{III}$ 는 空氣中の 龜裂成長速度와 거의 같아진다.

3.6 破壞面觀察

巨視的인 破壞面을 觀察하면 어느것이나 龜裂先端은 側面應의 影響을 받아서 歪曲하고 있으며 中央部보다 表面部쪽이 若干 先行하고 있다. 最終破斷이 일어나는 경우에도 試驗片은 完全히 分離되지 않고 一部分이 그대로 連結되어 있다. 環境中에서는 實驗中 溶液과 反應하여 變色을 하나 連結되어 있는 部分은 溶液의 作用을 받지 않아서 白色으로 나타난다.

① 空氣中の 疲勞破壞面

寫眞1은 空氣中の 疲勞破壞面으로 큰 화살표는 龜裂成長의 方向을 表示한다. 應力 擴大係數幅이 작을때는 破壞面에 별다른 特徵은 없으나 應力擴大係數幅이 增加해서 約 150kg/mm^2 以上이 되면 寫眞1 (a)와 같이 疲勞特有的 striation (화살표c)이 나타난다. Striation은 部分的으로 나타나고 寫眞1 (a)의 화살표d가 표시한 龜裂의 branching과 寫眞1 (b)의 最終破壞部에서는 全面的으로 dimple (화살표b)이 나타나고 있다.

② 腐蝕疲勞破壞面

硫酸溶液中的 腐蝕疲勞破壞面寫眞이 寫眞2에 나타나 있다. 應力擴大係數幅 ΔK 가 約 70kg/mm^2 까지의 範圍에서는 寫眞2 (a)처럼 세로무늬 (화살표a)가 보인다.

그러나 腐蝕疲勞를 中途에서 그만두고 破壞된 試驗片의 破壞面에서는 dimple이 나타나고 세로무늬는 볼 수 없다. 따라서 세로무늬는 水素가스가 지나간 자국이며 疲勞破壞가 일어난 후 破壞面이 腐蝕된 것을 나타낸 것으로 생각된다. 應力擴大係數幅 ΔK 가 커짐에 따라 寫眞2 (b)와 같은 dimple (화살표b)이 차차로 보이고 이 dimple의 形成은 試驗片金屬表面과 環境溶液과의 化學反應에 의해 생긴 水素가스와 關係가 있는 것으로

생각된다. Dimple이 나타나는 應力擴大係數幅 ΔK 의 範圍는 M_1 의 荷重條件의 경우 約 130kg/mm^2 以下로 腐蝕疲勞의 第Ⅰ, 第Ⅱ領域에 해당된다. 應力擴大係數幅 ΔK 가 아주 커지면 striation이 나타난다. Striation이 보이는 範圍는 腐蝕疲勞의 第Ⅲ領域과 一致한다. 空氣中の 경우와 마찬가지로 striation은 全面的으로 나타나지 않는다.

寫眞3에 食鹽水中의 腐蝕疲勞破壞面 寫眞이 나타나 있다. 寫眞3 (a)는 應力擴大係數幅 ΔK 가 작은 範圍인 第Ⅱ領域의 破壞面으로 별다른 特徵이 없다. 그러나 寫眞3 (b)는 腐蝕 疲勞의 第Ⅲ領域의 破壞面으로 striation (화살표c)가 보인다. 이와같이 3.5% 食鹽水中의 疲勞破壞面은 空氣中の 疲勞破壞面과 마찬가지로 나타나고 硫酸溶液中的 疲勞破壞面처럼 세로무늬나 dimple이 보이지 않는 것은 水素發生이 적은것과 關聯이 있다.

③ Striation 間隔

破壞面寫眞으로부터 striation 間隔 s를 測定하여 龜裂成長速度 dc/dN 와 比較하여 表6에 表示했다. 表에서 s와 dc/dN 値는 같은 試驗條件에서 測定한 것으로 M_{max} , M_{min} , c, ΔK 및 環境이 表에 나타나 있다. 表에서 알 수 있는 바와같이 striation 間隔과 龜裂成長速度는 거의 一致하고 있다. 破壞面에 녹이 發生하여 觀察하기가 困難했고 疲勞破壞面과 最終破壞面 사이의 stretch zone의 特徵은 볼 수 없었다.

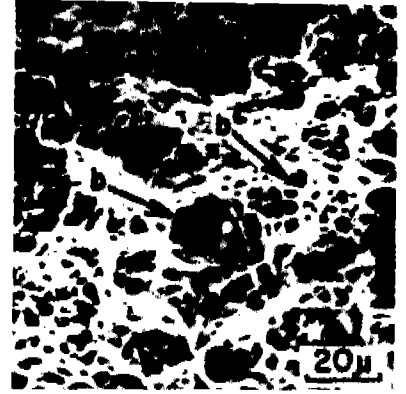
以上的 觀察로 腐蝕疲勞의 第Ⅲ領域에서는 龜裂成長은 주로 力學的인 因子에 支配되고 疲勞特有

表 6. Striation 間隔 s와 龜裂成長速度 dc/dN 의 關係

環 境	M_{max} kg·m	M_{min} kg·m	c mm	ΔK kg/mm	s μ	dc/dN $\mu/cycle$
Air	18.0	4.0	10.96	198	1.27	1.0
	18.0	4.0	11.56	219	1.07	1.2
	22.6	4.0	8.18	175	0.89	0.7
0.1N H ₂ SO ₄	31.9	4.0	5.44	180	1.77	1.6
	31.9	4.0	6.24	200	1.88	1.6
3.5%NaCl	18.0	4.0	10.97	199	1.46	1.5
	31.9	4.0	7.50	238	1.86	1.7



(a)
 $c = 11.56$
 $\Delta K = 219$



(b)
最終破壊面

寫真1. 空氣中の疲勞破壊面

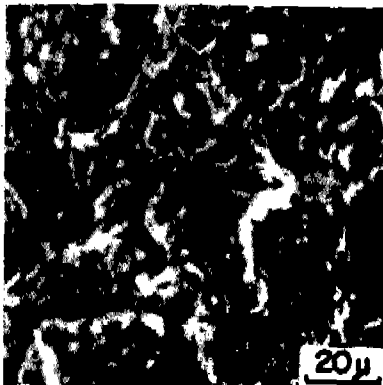


(a)
 $c = 2.33$
 $\Delta K = 40 (M_1)$

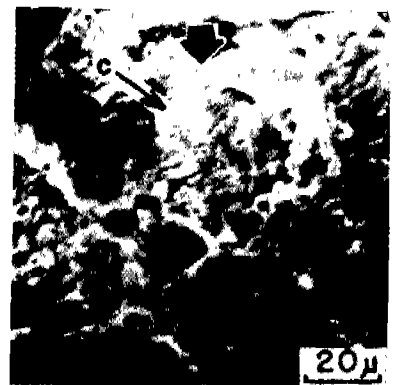


(b)
 $c = 5.28$
 $\Delta K = 120 (M_2)$

寫真2. 0.1N 硫酸溶液中疲勞破壊面



(a)
 $c = 5.47$
 $\Delta K = 184 (M_2)$



(b)
 $c = 7.50$
 $\Delta K = 238 (M_2)$

寫真3. 3.5%食塩水中疲勞破壊面

의 striation 이 나타나며 第 I, 第 II 領域에서는 이런 特徵은 보이지 않고 腐蝕疲勞龜裂이 주로 mechano-chemical 反應에 의해 進行한 것으로 뒷받침 된다.

4. 結 論

80킬로級 高張力鋼에 대해서 $K_{I,max} < K_{I,sc}$ 條件에서 0.1N 硫酸溶液과 3.5% 食鹽水中의 腐蝕疲勞試驗을 하여 다음 結論을 얻었다.

(1) 疲勞壽命은 空氣中에 비해 3.5% 食鹽水, 0.1N 硫酸溶液順으로 짧아진다.

(2) 空氣中の 疲勞龜裂成長速度는 本實驗範圍內에서는 다음式과 같이 表示된다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_{air} = 7.23 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.23}$$

單位는 dc/dN 는 $\mu/cycle$, ΔK 는 $kg/mm^{3/2}$ 이다

(3) 環境中の 腐蝕疲勞龜裂成長舉動은 應力擴大係數幅이 작은데서 부터 第 I 領域, 第 II 領域 및 第 III 領域으로 나눈다.

(4) 第 I 領域은 金屬의 活性化表面生成速度가 mechano-chemical 反應速度보다 낮은 領域으로 龜裂成長速度가 時間과 應力擴大係數에 依存하고 空氣中の 경우와 마찬가지로 다음과 같이 表示된다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_I = C (\Delta K)^{\sigma}$$

(5) 第 II 領域에서는 表面生成速度가 mechano-chemical 反應速度보다 커져서 應力과 腐蝕의 synergistic effect 가 鈍化되고 疲勞荷重이 큰 경우에는 臨界龜裂成長速度를 갖게되어 應力擴大係數幅 ΔK 에는 關係가 없게 된다.

(6) 臨界龜裂成長速度는 硫酸溶液과 食鹽水中에 같으므로 水素가 龜裂成長을 加速시키는 것으로 判斷된다.

(7) 第 III 領域에서는 應力擴大係數幅이 커서 腐蝕疲勞龜裂成長速度에 대해서 環境의 影響은 없다.

(8) 第 III 領域에서는 어떤 環境에서도 空氣中の 경우와 같이 striation 이 觀察되었고 그 間隔은 龜裂成長速度와 거의 一致하고 있다.

後 記

本 研究는 1981年度 T.學教授 國費海外派遣研究 (IBRD 教育借款)에 의해 이루어졌으며 이에 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

- (1) 村上裕則, 大南正瑛, 破壞力學入門, オーム社 (1979).
- (2) 横堀武夫, 材料強度學(第2版)岩波全書(1974).
- (3) H. O. Fuchs and R. I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons (1980)
- (4) S. W. Dean and H. R. Copson, Corrosion Vol. 21 (1965), 95.
- (5) R. W. Herzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons (1976).
- (6) Corrosion Fatigue, Chemistry, Mechanics and Microstructure, Vol. NACE-2, NACE, Houston (1972).
- (7) H. H. Johnson and P. C. Paris, J. of Engine. Fracture Mechanics, 1, No. 3 (1968).
- (8) J. M. Barsom, Corrosion Fatigue, Vol. NACE -2, Houston (1972), 424.
- (9) T. W. Crooker and E. A. Lange, ASTM STP 462. (1970).
- (10) F. J. Bradshaw and C. Wheeler, International J. of Fracture Mechanics, 5, NO. 4. (1969).
- (11) M. O. Speidel, M. J. Blackburn, T. R. Beck and J. A. Feeny, Vol. NACE-2, Houston (1972).
- (12) G. A. Miller, S. J. Hudak and R. P. Wei, J. of Testing and Evaluation, 1, NO. 6 (1973).
- (13) P. C. Paris, R. J. Bucci, E. T. Wessel, W. G. Clark and T. R. Mager, ASTM STP 513 (1972).
- (14) R. P. Wei and J. D. Landse, Materials Research and Standards, MTRSA, 9, NO. 7 (1969).
- (15) S. T. Rolfe and J. M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall (1977).

- (16) D. W. Hoepfner, Vol. NACE-2(1972), 3.
- (17) J. P. Gallagher, J. of Materials, Vol. 6 (1971), 941.
- (18) P. C. Paris, R. J. Bucci and C. D. Little, AS TM STP 513 (1972), 196.
- (19) 中佐啓治郎, 武井英雄, 朝本哲博, 日本金屬學會誌, Vol. 36 (1972), 1180.
- (20) W. A. Van Der Sluys, J. of Basic Eng. Trans., ASME, 87 (1965), 363.
- (21) W. A. Van Der Sluys, J. of Basic Eng. Trans., ASME, 89 (1967), 28.
- (22) J. P. Gallagher and R. P. Wei, Vol. NACE-2(1972), 409.
- (23) 石田誠, 日本機械學會誌, Vol. 75 (1972), 1127.
- (24) C. N. Feed and J. M. Kraft, J. of Materials, Vol. 1 (1966), 770.
- (25) B. F. Brown and C. D. Beachem, Corrosion Science, Vol. 5 (1965), 745.
- (26) 横堀武夫, 材料強度學, 技報社(1955).
- (27) L. A. Glikman, Corrosion-Mechanical Strength of Metals, Butterworths (1962).
- (28) H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons (1963).
- (29) 下平三郎, 鉄鋼腐蝕科學, 朝倉書店(1972).
- (30) H. W. Pickering and R. P. Swann, Corrosion 19, (1963), 373t.
- (31) T. J. Smith and R. W. Staehle, Corrosion 23 (1967), 117.
- (32) 高野道典, 下平三郎, 日本金屬學會誌(1965), 553.
- (33) 高野道典, 下平三郎, 日本金屬學會誌(1964), 238.
- (34) 下平三郎, 表面 Vol. 12, No. 8 (1974), 475.
- (35) 下平三郎, 日本學術振興會 第129委員會 第1・2分科會 第40回會議資料(1975), 1.