

海洋環境中에서 自動車 프레임用 鋼材의 腐蝕疲勞龜裂傳播舉動에 관한 研究

李 相 烈* 林 鍾 汶* 林 祐 助** 李 鍾 樂**

(1992년 4월 23일 접수)

Study on the Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of Steel Used for Frame of Vehicles in Marine Environment

Sang Yoel Lee* · Jong Moon Lim* · Uh Joh Lim** and Jong Rark Lee**

Key Words : Corrosion Fatigue(腐蝕疲勞), Aspect ratio(形狀比), Stress intensity factor range(應力擴大係數範圍), Accelerative factor(加速係數), Potential of electrode(電極電位), Less noble potential(卑電位)

Abstract

In this study, corrosion fatigue test of SAPH45 steel was performed by the use of plane bending fatigue tester under marine environment and investigated to surface crack growth behavior of base metal (BM) and heat affected zone (HAZ) of SAPH45.

The main results obtained are as follows :

1) The more aspect ratio (b/t) of corner crack decreases, the more aspect ratio (b/a) takes greatly effect by corrosion.

2) The correlation between the stress intensity factor range (ΔK) and crack growth rate (da/dN) for weldment in seawater is given by Paris rule as follow :

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

Where m is constant, and the value is 3.82-3.84.

3) The accelerative factor (α) of BM and HAZ under seawater is about 1.1-1.9, and α of HAZ increases more and more under the low ΔK region.

4) HAZ is more susceptible to corrosion than BM because of potential of electrode (E_c) of HAZ becomes more less noble potential than that of BM.

* 浦項專門大學 自動車科

** 正會員 釜山水產大學校 工科大学 機械工學科

1. 序 論

最近 産業의 發展에 따라 각종 自動車, 船舶 및 航空機 等の 運搬手段은 高速化되고 있는 趨勢에 있고, 여러가지 형태의 振動, 荷重 및 外力에 의한 反復的인 應力을 많이 받는다.

특히 除雪劑를 사용한 道路나 海岸都市 및 海岸 道路에서 運行되고 있는 각종 自動車들은 鹽化物에 의해 腐蝕作用이 일어 날 수 있다.¹⁾

이와 같이 鹽化物의 腐蝕霧圍氣 및 反復的인 荷重周波數로 인한 腐蝕疲勞現象이 金屬構造物인 自動車 部材의 損傷 및 破壞에 重要한 因子가 되고 있다.²⁻⁵⁾

腐蝕霧圍氣中에서 平面굽힘 反復荷重에 의한 金屬構造物의 表面龜裂은 降伏点보다 더욱 낮은 사용 反復荷重下에서도 機械構造物의 内部 缺陷, 部材의 形狀不連續部, 리벳팅部의 加工缺陷 및 腐蝕 핏트(pit) 等の 應力集中部를 起點으로 發生하여 臨界龜裂길이(critical crack length)에 이르게 되면 순식간에 金屬構造物의 破斷을 초래하게 된다.

특히 船舶, 自動車, 航空機, 橋梁 및 海洋構造物 等の 腐蝕疲勞破壞에 있어서 重要하다고 생각되는 平面굽힘 反復荷重에 의한 龜裂成長舉動에 관한 研究는 몇편의 研究結果에도 불구하고, 鹽化物霧圍氣中에서 構造用鋼의 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂 成長舉動에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다.⁶⁻¹⁴⁾

한편, 自動車 프레임에는 自動車 構造用 熱間壓延鋼板인 SAPH45가 주로 사용되고 있다.

따라서 本 研究는 車輛의 프레임용으로 사용되는 自動車 構造用 熱間壓延鋼板인 SAPH45의 熔接部位를 海洋霧圍氣中에서 腐蝕疲勞에 의한 龜裂 進展特性을 明確히 하기 위하여, 海水中에서 SAPH45의 熔接部位를 平面굽힘 疲勞 및 腐蝕疲勞試驗을 행하여 龜裂成長舉動을 觀察·調査하였다.

이 實驗의 結果로 부터 모서리龜裂의 表面龜裂과 龜裂길이 방향의 形狀變化에 미치는 腐蝕의 影響에 대해서 考察하였다. 또한, 腐蝕環境中에서 모서리 龜裂의 表面龜裂進展速度에 대한 應力擴

大係數範圍 값을 파리스식(Paris' rule)에 적용하여 電算에 의한 母材와 熔接熱影響部의 環境常數를 求하고, 熔接部位의 腐蝕疲勞龜裂進展에 미치는 影響을 電氣化學的 組織的인 측면에서 究明함으로써 鹽化物이 존재하는 道路나 海洋霧圍氣下에서 運行되는 車輛 프레임用 SAPH45鋼材의 腐蝕疲勞破壞에 대한 基礎設計資料로서 寄與하고자 한다.

2. 試驗片과 實驗方法

2.1. 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗材料는 自動車 構造用 熱間壓延鋼板(SAPH45)으로 그 化學的成分과 機械的性質은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of used material.

(a) Chemical compositions(wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SAPH 45	0.146	0.07	1.08	0.016	0.009
Welding Wire	0.120	0.039	2.57	0.026	0.013

(b) Mechanical properties

Material	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SAPH 45	54.6	38.4	23

이와 같은 板材를 母材로 하여 熔接棒 H14(φ 4.8 mm)을 이용하여 서브머지드(Submerged)熔接을 하였으며, 熔接入熱量은 28 KJ/cm이다.

上述한 板으로부터 그 길이方向이 壓延方向과 同一하도록 취하여 製作한 試驗片 및 노치의 形狀은 Fig. 1과 같으며, 여기서 母材 및 熔接熱影響部에 各各 노치의 位置가 오도록 하여 試驗片을 製作하였다.

그리고 試驗片 形狀의 노치先端에 있어서 應力擴大係數範圍 ΔK값은 Kawahara 등이 提示한 다음 式으로 計算하였다.¹⁵⁾

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

여기서 $\Delta\sigma$: 굽힘應力振幅(kgf/mm²)
 a : 表面龜裂길이(mm)

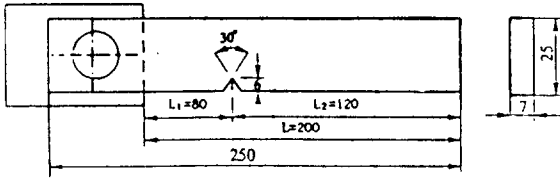
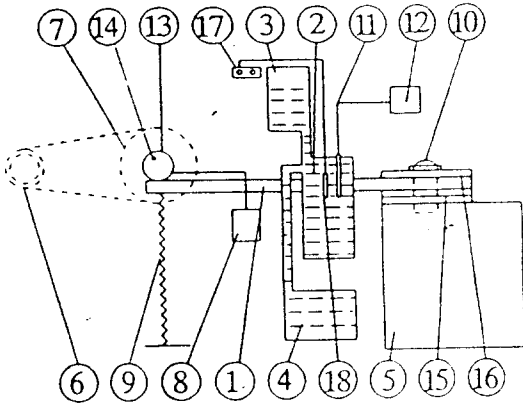


Fig. 1 Dimension of test specimen(mm)

한편 試驗片 表面은 사포 600-2000번까지 研磨한 後 아세톤으로 脫脂하고, 試驗片 表面의 電氣化學的인 影響을 除去하기 爲해 노치先端을 除外한 試驗片 全表面을 透明한 실리콘수지로 被覆, 絶緣시켰다.

2.2 實驗裝置

本 實驗에 使用한 偏心輪式 定變位 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗機의 全體系統圖는 Fig. 2와 같다.



- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 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

Fig. 2의 腐蝕疲勞試驗機에 板狀試驗片의 一端은 釘개로 釘어 볼트로 고정하고 自由端은 偏心輪의 回轉에 依하여 平面 굽힘 反復應力을 받게 하였으며, 이 偏心輪의 外周에는 볼베어링을 끼워서 試驗片과의 摩擦을 避할 수 있도록 하였다.

또한 平面굽힘 應力은 모터에 依해 驅動되는 偏心輪에 依해 받으며, 應力反復回數는 폴리軸에 連結되어 있는 積算回轉計로 測定하였다. 그리고 應力은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 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 微細하게 調節할 수 있도록 하였다. 이때 反復荷重의 速度는 모두 600rpm(f=10Hz)로 維持하였고, 정변위의 크기는 12mm이며, 應力比는 R=0.0으로 一定하게 하였다.

2.3 實驗方法

腐蝕環境水槽는 플라스틱으로 製作하였으며, 腐蝕溶液으로는 比抵抗값이 25Ω.cm인 天然海水를 사용하고, 實驗中の 水溫은 室內溫度로 維持하였다. 實驗中の 腐蝕溶液은 Cl⁻이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 爲하여 4l/h의 量으로 계속하여 순환시키고, 腐蝕生成物에 依한 電氣化學的인 影響을 除去하기 爲하여 순환회로 配管에 絶緣性 필터를 使用하였다.

龜裂成長길이(crack growth length)는 一定하게 反復荷重을 부가한 後 20배의 移動式 顯微鏡으로 疲勞 및 腐蝕疲勞 龜裂初期段階(a₀=0.5mm를 龜裂初期段階로 假定하고, 이하 龜裂初期段階라 함)로 부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 모서리龜裂의 破面成長舉動

Photo. 1은 일정하게 反復荷重을 附加하였을 때, 海水中에서 두께 t=7mm인 平滑平板材의 片側貫通 노치로 부터 平面굽힘 反復荷重에 依해 腐蝕疲勞龜裂發生부터 破壞까지의 破面에 대한 母材의 비치마크를 보인 것이다. 여기서 비치마크는 人工적으로 插入한 것이며, 부식환경중에서의 비치마크는 부식생성물에 依한 타니싱(tarnishing)때문에

관찰이 어려워 알콜로 洗滌하여 나타내었다.



Photo. 1 Beach marks of fracture surface(x2)

이에 의하면 鋼板材의 平面굽힘 反復荷重에 의한 腐蝕疲勞龜裂成長舉動은 片側貫通노치로부터 龜裂이 成長된 Fig. 3과 같은 四分橢圓形의 모서리 龜裂進展特性을 보이고 있다. 모서리 龜裂初期段階에는 板材의 表面에 나타난 비치마크 간격의 크기는 두께방향에 나타난 비치마크 간격의 크기에 비해 더 작게 成長되지만, 龜裂이 점차 成長함에 따라 表面에 나타난 비치마크 간격의 크기가 龜裂 깊이에 나타난 비치마크 간격의 크기에 비해 현저하게 커지고 있는 傾向이다.

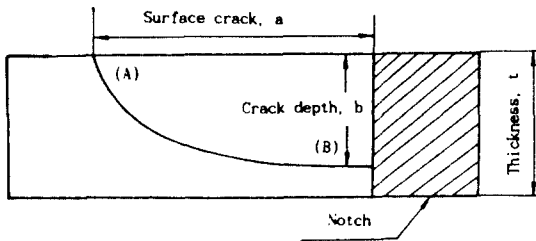


Fig. 3 Corner crack growth of quarter elliptical

이들 비치마크 간격의 크기에 의하면 각각의 環境條件 變化 그리고 母材부와 熔接熱影響部에 따라 表面龜裂길이와 龜裂깊이의 龜裂成長舉動이 각각 다르게 나타날 것으로 생각된다.

Fig. 4는 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 모서리 龜裂 成長에 있어서 母材와 熔接熱影響部の 一定한 表面龜裂길이 a에 대한 龜裂깊이 b의 成長舉動을 나타낸 것이다.

이에 의하면 母材나 熔接熱影響部の 어느 것이나 일정한 表面龜裂길이 a의 成長에 대한 龜裂깊이 b의 成長은 比抵抗 $\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水中에서 보다 空氣中에서 더 깊게 成長되었다. 그리고 空氣中에서 熔接熱影響部の 龜裂깊이가 가장

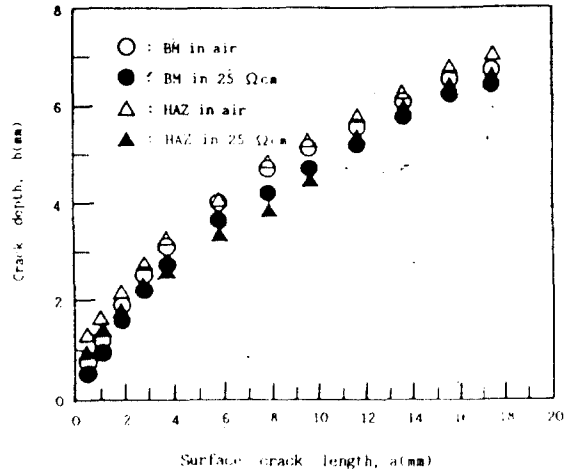


Fig. 4 Relation between surface crack length and crack depth in air and $\rho = 25 \Omega \text{cm}$

깊게 成長되었으며, 海水中에서 母材와 熔接熱影響部の 表面龜裂길이의 成長에 대한 龜裂깊이의 成長이 교차되면서 空氣中에서 보다 遲延되는 양상을 보이고 있다.

3. 2 모서리 龜裂의 形狀比에 미치는 腐蝕의 影響

Fig. 5는 四分橢圓形의 모서리 龜裂 成長에 있어서 形狀變化에 미치는 腐蝕의 影響을 具體的으로 考察하기 위해, 表面龜裂길이 a와 龜裂깊이 b와의 比인 形狀比 b/a의 값에 대한 龜裂깊이 b와 試驗片 두께 t와의 比 b/t 값과의 關係를 나타낸 것이다.

이에 의하면 각 環境條件中에서 母材나 熔接熱影響部の 形狀比 b/a와 b/t와의 關係는 대체로 다음과 같은 關係가 있다.^{16, 17)}

$$b/a = \kappa - \gamma(b/t) \dots \dots \dots (2)$$

단, κ, γ : 實驗常數

여기서 天然海水中에서 熔接熱影響部가 불규칙하게 되는 것은 熔接熱싸이클에 의한 組織의 불연속성, 缺陷部位에서 腐蝕이 미치는 影響이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

式(2)와 Fig. 5에 의하면 天然海水中에서 母材나 熔接熱影響部の 기울기는 空氣中에서 보다 더 작아지는 傾向이고, 특히 母材보다 熔接熱影響部에

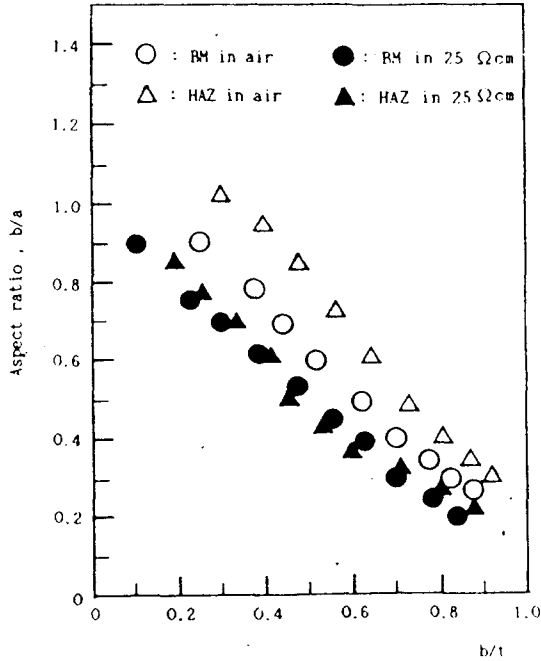


Fig. 5 Shape change of corner crack in air and $\rho = 25 \Omega\text{cm}$

서 이러한 경향은 더욱 현저하다. 그리고 모서리龜裂의 成長初期에 있어서 空氣中에서의 形狀比 b/a 는 天然海水中에서의 b/a 보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 腐蝕疲勞에 의한 모서리龜裂의 成長初期 즉 b/t 의 값이 작은 범위에 있어서 形狀比에 미치는 腐蝕의 影響이 크게 支配하고 있음을 알 수 있다.

母材와 熔接熱影響部에 미치는 腐蝕의 影響을 좀더 具體的으로 考察하기 위하여, Fig. 6에 空氣中과 海水中에서 母材와 熔接熱影響部の 形狀比를 領域으로 나타내었다.

이에 의하면 b/t 의 값이 작을수록 母材나 熔接熱影響部에서 領域의 폭이 크게 나타남으로써 腐蝕에 의한 影響이 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 母材의 領域보다 熔接熱影響部の 領域이 약 1.7배 이상 더 크게 되는 양상이다. 母材에 비해 熔接熱影響部の 領域이 크게 나타난 理由は 熔接熱影響部の 龜裂進展에 미치는 腐蝕感受性이 母材보다 敏感하기 때문인 것으로 생각된다.

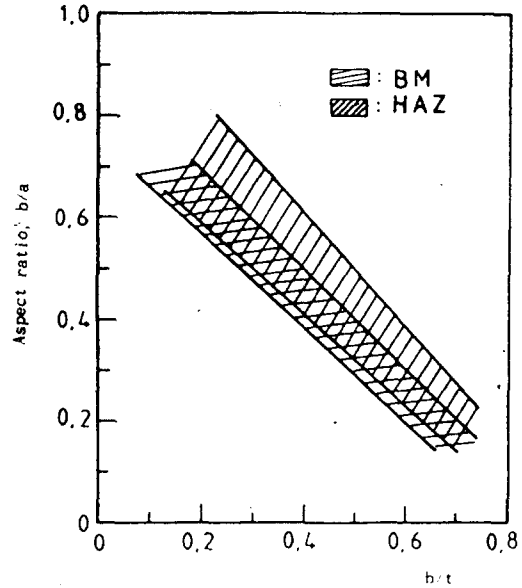


Fig. 6 Effect of corrosion on shape change of base metal(BM) and heat affected zone(HAZ)

3. 3 表面龜裂展開速度 da/dN 와 應力擴大係數範圍 ΔK 의 關係

Fig. 7은 空氣中과 海水中에서 母材와 熔接熱影響部の 表面龜裂進展速度 da/dN 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 정리하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 海水中에서 腐蝕疲勞에 의한 母材의 表面龜裂展開速度가 가장 빠르고, 空氣中에서 疲勞에 의한 熔接熱影響部の 表面龜裂進展速度가 가장 크게 遲延되었다.

그리고 龜裂初期段階의 應力擴大係數範圍 ΔK 값에 있어서 擬下限界應力擴大係數範圍(Quasi-threshold stress intensity factor range) ΔK_{th} 와 같은 樣相은 本 實驗의 試驗片에 疲勞노치로부터 反復荷重을 附加하여 實驗한 것이 아니고, V노치를 加工하여 實驗함으로써 노치先端에 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 龜裂이 發生하기 까지의 潛伏期間때문이라 思料된다.

應力擴大係數範圍 ΔK 값이 급격히 커지는 領域 III에서는 腐蝕環境條件과 熔接部位에 관계없이 表

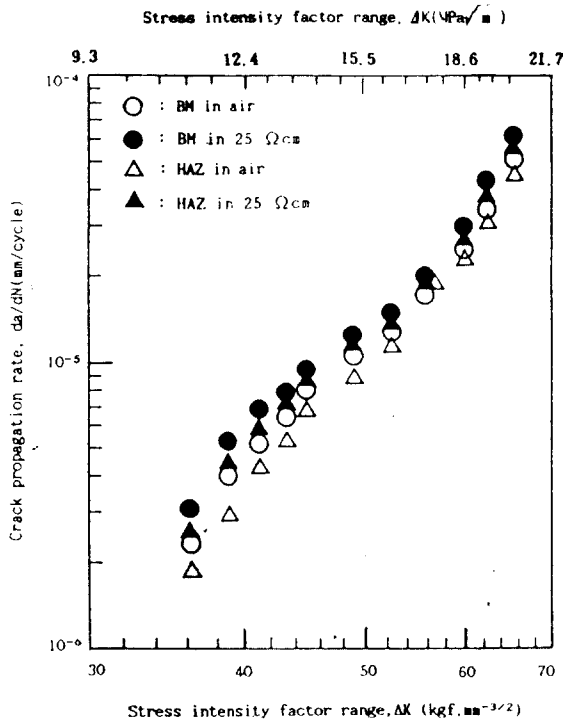


Fig. 7 Relation between crack propagation rate and stress intensity factor in air and $\rho = 25 \Omega \text{cm}$

面龜裂進展速度는 큰 차이가 나타나지 않지만 급격히 빨라지고 있다. 그러나 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 領域 III에서 보다 작은 領域 II에 있어서 空氣中에 비해 天然海水中에서 表面龜裂進展速度 da/dN 에 미치는 腐蝕因子의 影響은 현저히 나타나고 있으며, 또한 da/dN 는 ΔK 값이 커짐에 따라서 직선적으로 빨라지고 있는 傾向을 나타내고 있으므로 다음과 같은 Paris rule을 적용할 수 있다.^{18, 19)}

$$da/dN = C(\Delta K)^m \dots\dots\dots (3)$$

Table 2는 Fig. 7의 領域 II의 實驗值를 Paris-rule에 의해 電算化한 實驗常數 C와 m값을 정리하여 보인 것이다. 여기서 a)는 母材, b)는 熔接熱影響部의 實驗상수이다.

이 結果에 의하면 空氣中에서 보다 海水中에서 實驗常數 C값은 커지고 있는데 비해 기울기를 나

타내는 實驗常數 m값은 작아지고 있는 樣相이다. 이러한 양상은 母材보다 熔接熱影響部에서 더 현저한 차가 나타남을 알 수 있다.

Table 2. The experimental constants C and m of Paris rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$]

(a) Base metal

Experimental constant Environment	C	m
25 (Ωcm)	3.87×10^{-12}	3.82
in air	2.52×10^{-12}	3.89

(b) Heat affected zone.

Experimental constant Environment	C	m
25 (Ωcm)	3.49×10^{-12}	3.84
in air	3.73×10^{-13}	4.31

3.4 表面龜裂展開速度의 加速係數에 미치는 腐蝕의 影響

Fig. 8은 母材와 熔接熱影響部의 加速係數 α 에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 값과의 關係를 나타낸 것이다.

여기서 加速係數 α 는 Fig. 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(4)와 같다.

$$\alpha = [(da/dN)_{cor}] / [(da/dN)_{air}] \dots\dots\dots (4)$$

(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 表面龜裂進展速度의 加速係數는 약 1.1에서 1.9로 나타나고, 母材보다 熔接熱影響部의 加速係數는 더 높게 나타나는 傾向이다. 그리고 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域에서의 加速係數 α 값이 母材보다 熔接熱影響部에서 더욱 높게 나타나지만 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 큰 領域에서의 加速係數 α 값은 작아지고, 이러한 樣相은 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域에서의

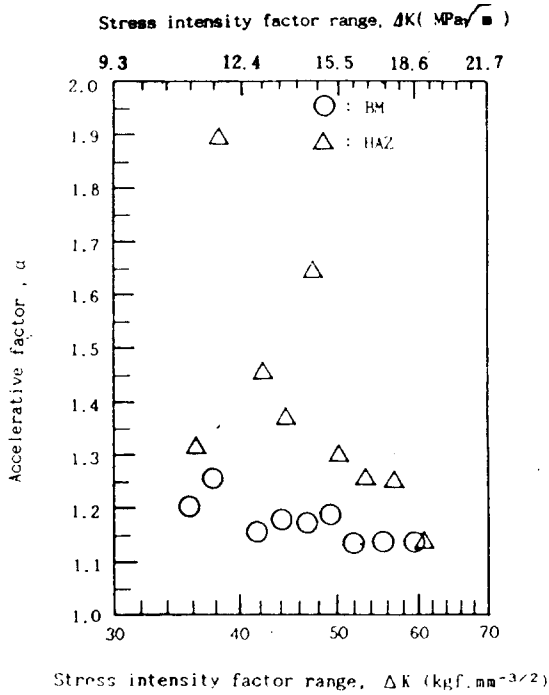


Fig. 8 Relation between accelerative factor and stress intensity factor range in $\rho = 25 \Omega\text{cm}$

加速係數 α 값은 機械的인 影響因子보다 腐蝕의 影響因子가 더 支配的인 것을 알 수 있다.

3.5 熔接部の 組織的 및 電氣化學的 特性

지금까지 SAPH45의 母材와 熔接熱影響部の 腐

蝕疲勞破壞에 관한 考察에 의하면, Fig. 6과 Fig. 7에서 母材의 疲勞 및 腐蝕疲勞에 의한 表面龜裂進展速度보다 熔接熱影響部の 表面龜裂進展速度가 더 遲延되었으나 形狀比의 領域에서나 加速係數 값은 母材보다 熔接熱影響部の 腐蝕感受性이 더 敏感한 것으로 나타났다.

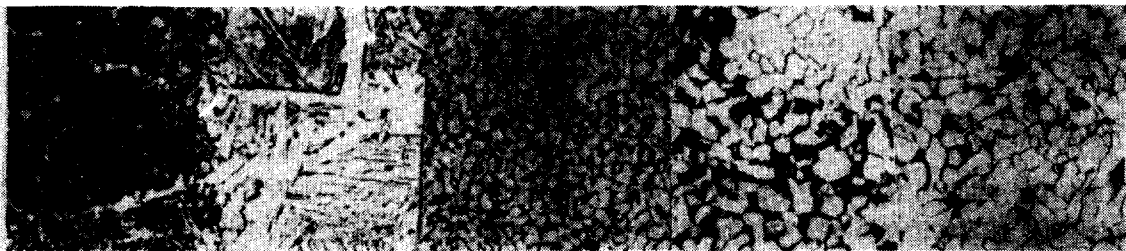
이와 같은 傾向의 原因을 분석하기 위해 母材와 熔接熱影響部の 組織的 特性 및 電氣化學的 特性을 조사하여 그 結果를 Photo. 2 및 Fig. 9에 보인다.

Photo. 2는 母材 및 熔接熱影響部の 連續的인 微細組織을 나타낸 것이다.

이에 의하면 熔接熱影響部の 微細組織은 熔接熱 사이클에 의해 金屬組織이 再結晶되어 母材의 微細組織에 비해 多樣的인 變化를 나타내고 있다. 이러한 熔接熱影響部에서 組織의 不連續성 그리고 缺陷 등의 影響으로 龜裂成長經路가 복잡하기 때문에 母材의 表面龜裂進展速度 da/dN 보다 熔接熱影響部の da/dN 가 더 遲延되는 原因으로 思料된다.

Fig. 9는 母材部와 熔接熱影響部の 試驗片을 比抵抗 $\rho = 25\Omega \cdot \text{cm}$ 중에서 포화카로멜 전극으로 측정된 電極電位를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 母材의 電極電位(potential of electrode) E_c 보다 熔接熱影響部の E_c 가 더 卑電位化(less noble potential)되는 樣相이며, 모재보다 熔接熱影響部の E_c 가 卑電位化로 되는 이유는 熔接熱사이클에 의한 組織의 不連續, 缺陷 및 殘留



Weld metal Heat affected zone Base metal

Photo. 2 Change of microstructures at each distance from weld zone

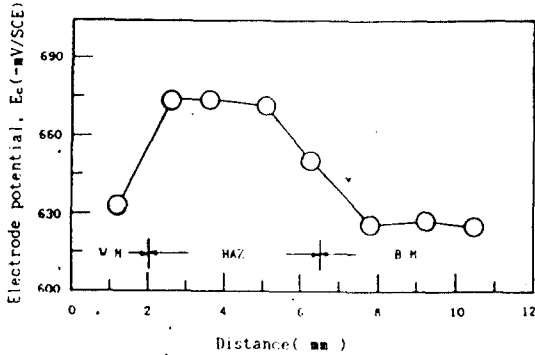


Fig. 9 Electrode potential on the weld zone ($\rho = 25 \Omega\text{cm}$)

應力에 의한 원인으로 思料되고, 溶着金屬部는 원래 卑電位인 金屬으로 보인다. 이와 같이 母材의 電極電位 E_c 보다 熔接熱影響部の E_c 가 더 卑電位化됨으로써 腐蝕疲勞에 의한 熔接熱影響部の 龜裂先端은 母材의 龜裂先端보다 더 陽極活性化에 의한 腐蝕이 촉진됨으로서 熔接熱影響部가 母材보다 腐蝕에 더 敏感하게 나타나는 것으로 생각된다.

4. 結 論

本 研究에서는 車輛 프레임用 SAPH45의 熔接部位를 대상으로 海洋環境中에서 平面굽힘 腐蝕疲勞試驗을 행하여, 腐蝕疲勞龜裂舉動에 관한 研究를 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 모서리龜裂의 形狀比 b/t 가 減少할 수록 形狀比 b/a 는 腐蝕에 의한 影響을 크게 받는다.
- 2) 海水中에서 熔接部에 대한 應力擴大係數範圍 ΔK 와 表面龜裂進展速度 da/dN 의 관계는 Paris rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$]에 따르고, 기울기인 指數 m 값은 3.82-3.84이다.
- 3) 母材와 熔接熱影響部の 加速係數 α 는 약 1.1에서 1.9이고, 應力擴大係數範圍 ΔK 값이 작은 領域下에서 熔接熱影響部の α 값이 더 增加된다.
- 4) 母材의 電極電位 E_c 보다 熔接熱影響部の E_c 가 더 卑電位化됨으로써 熔接熱影響部가 母材보다 腐蝕에 더 敏感하다.

參考文獻

- 1) 榮幸雄, “海洋霧圍氣での腐蝕要因の分析”, 金屬材料, Vol. 10, NO. 9, pp. 13-16, 1970
- 2) Jaske, C. E., Broek, D., Stater, J. E., and Anderson, W. E., “Corrosion Fatigue of Structural Steel in Seawater and for Offshore Application”, ASTM STP 642, pp. 19-47, 1978
- 3) 鈴木, 揚之助, “海水中における軟鋼の疲勞き裂傳播”, 防食技術, Vol. 32, No. 6, pp. 318-323, 1983
- 4) 益本 功, 赤石 徹, “鋼材および溶接継手の 3% NaCl 水溶液腐食疲勞に関する研究(第1報)”, 日本溶接學會誌, Vol. 44, No. 3, pp. 60-65, 1975
- 5) Howard Rogers, T., “Marine Corrosion”, Great Britain, pp. 4-10, 1968
- 6) 임우조, 이종락, 이진열, “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 影響”, 韓國腐蝕學會誌, Vol. 17, No. 4, pp. 195-202, 1988
- 7) 임우조, 이종락, 이진열, “船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 進展特性에 관한 研究”, 韓國漁業技術學會誌, Vol. 24, No. 2, 3, pp. 94-100, 1988
- 8) 임우조, 김인철, 김백운, “航空用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 傳播舉動에 미치는 應力比의 影響”, 韓國腐蝕學會誌, Vol. 18, No. 1, pp. 49-55, 1989
- 9) 林祐助, 金秀柄, 李鎮烈, “船舶用 알루미늄 合金材의 腐蝕疲勞龜裂 進展特性과 그 抑制에 관한 研究”, 韓國漁業技術學會誌, Vol. 25, No. 2, pp. 87-104, 1989
- 10) 金恒寧, 林鍾汶, 林祐助, “SS41鋼 腐蝕疲勞龜裂 成長舉動에 미치는 海洋環境因子的 影響 (I)”, 韓國腐蝕學會誌, Vol. 19, No. 3, pp. 145-153, 1990.
- 11) 金恒寧, 林鍾汶, 林祐助, “SS41鋼 腐蝕疲勞龜裂 成長舉動에 미치는 海洋環境因子的 影響

- (II)", 韓國腐蝕學會誌, Vol. 19, No. 4, pp. 185-193, 1990
- 12) Harwell, UK, "The effect of seawater on corrosion fatigue in structural steels", Corrosion fatigue, pp. 89-100, 1980
- 13) David W, Hoepfner, "Corrosion fatigue considerations in materials selections and Engineering Design", Corrosion fatigue, pp. 3-11, 1972.
- 14) 金永植, 金英種, "平面 굽힘 疲勞荷重에 의한 알루미늄 合金材의 모서리龜裂進展 傳播舉動에 관한 研究", 韓國舶用機關學會誌, Vol. 8, No. 1, pp. 49-63, 1984
- 15) 川原正言, 栗原正好, "表面き裂の疲勞による 傳播成長課程に關する豫備的 考察", 日本造船學會 論文集, 137, pp. 297-306, 1975
- 16) 前掲書(14), pp. 57
- 17) 前掲書(15), pp. 301-303
- 18) Gallagher, J. P., and Wei, R. P., "Corrosion fatigue crack propagation behavior in steels", Corrosion fatigue NACE-2, pp. 409-410, 1971
- 19) Gerberish, W. W., Van stone, R. H., and Gunderson, A. W., "Fatigue Properties of carbon alloy steel, application of fracture mechanics for selection of Metallic structural materials", ASM, Metals park, Ohio, pp. 65-67, 1982