

# 造船用鋼材의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕에 관한 研究

李 義 鎬

The Study on the Corrosion Fatigue and Cathodic  
Protection of the Steel Plates used for the  
Shipbuilding

*Eui-ho Yi*

## 目 次

Abstract	3.2.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響
記號 說明	3.2.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率
第1章 序 論	3.3 SM41-SM58 鋼材의 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕의 影響
第2章 試驗片의 實驗方法	3.3.1 熔接部의 機械的 및 電氣化學的 特性變化
2.1 供試鋼材 試驗片	3.3.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響
2.2 疲勞試驗裝置	3.3.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率
2.3 疲勞試驗條件	3.4 總 括
第3章 測定結果와 考察	3.4.1 鋼材의 疲勞龜裂의 傳播의 破壞의 特性
3.1 SM41 鋼材 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕의 影響	3.4.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響
3.1.1 熔接部의 機械的 및 電氣化學的 特性變化	3.4.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率
3.1.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響	第4章 結 論
3.1.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率	參考文獻
3.2 SM58 鋼材 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕의 影響	
3.2.1 熔接部의 機械的 및 電氣化學的 特性變化	

## 記號 說明

- BM : Base metal (母材部)
- $C_{eq}$  : Carbon equivalent (炭素當量)
- $E$  : Young's modulus ("영" 率),  $kg/mm^2$
- HAZ: Heat affected zone (熱影響部)
- $I$  : Moment of inertia of area (斷面 2 次 모멘트)
- $\ell$  : Length from fixing point of specimen to the stress point (試片固定部에서 應力附加點까지의 거리),  $mm$
- $N_f$  : Number of cycles to fracture (破壞될 때까지의 cycle 數)
- $P_{cm}$  : Composition of weld cracking susceptibility (熔接龜裂感受性組成)
- $R$  : Ratio of stress (應力比) =  $\sigma_{min} / \sigma_{max}$
- $S$  : Repeated plane bending stress (反復平面굽힘應力),  $kg/mm^2$
- $S_f$  : Safety factor (安全率) =  $\sigma_{ts} / 2 \sigma_a$
- $t$  : Notch length (노치 길이),  $mm$
- WM : Weld metal (熔着部)
- $x$  : Length from fixing point of specimen to the notch (試片 固定部에서 노치까지의 거리),  $mm$
- $Z$  : Modulus of section (斷面係數)
- $\alpha$  : Factor of stress concentration (應力集中率, 形狀係數)
- $\beta$  : Factor of rupture (破斷係數) or Fatigue notch factor (切缺係數)
- $\eta$  : Notch sensitivity (應力集中感度)
- $\rho$  : Notch root radius (노치 루우터 曲率半徑),  $mm$
- $\sigma_a$  : Stress amplitude (應力振幅),  $kg/mm^2$
- $\sigma_m$  : Mean stress (平均應力),  $kg/mm^2$
- $\sigma_{max}$  : Maximum stress (最大應力),  $kg/mm^2$
- $\sigma_{min}$  : Minimum stress (最少應力),  $kg/mm^2$
- $\sigma_s$  : Shearing stress (剪斷應力),  $kg/mm^2$
- $\sigma_{ts}$  : Tensile strength (引張強度),  $kg/mm^2$
- $\sigma_{yp}$  : Yield strength (降伏強度),  $kg/mm^2$

- OWONP specimen : No-Welded No-Notched pulsative stress specimen
- OWNNP specimen : No-Welded Notched pulsative stress specimen
- OWONA specimen : No-Welded No-Notched alternative stress specimen
- WWNNA specimen : Welded notched alternative stress specimen (in air)
- WWNNP specimen : Welded notched pulsative stress specimen (in air)
- WWNNAOP specimen : Welded notched alternative stress No-protected specimen (in sea water)
- WWNNPOP specimen : Welded notched pulsative stress no-protected specimen (in sea water)
- WWNNACP specimen : Welded notched alternative stress cathodic protected specimen (in sea water)
- WWNNPCP specimen : Welded notched pulsative stress cathodic protected specimen (in sea water)
- WWNNPP specimen : Welded notched partial pulsative stress specimen (in air)
- WWNNPPPOP specimen : Welded notched partial pulsative no-protected specimen (in sea water)
- WWNNPPCP specimen : Welded notched partial pulsative cathodic protected specimen (in sea water)

## 第2章 試驗片과 實驗方法

### 2.1 供試鋼과 試驗片

이 試驗에 使用한 供試鋼材는 두께 6 mm의 40 kg/mm<sup>2</sup> 級과 50 kg/mm<sup>2</sup> 級の 國產 熔接構造用 壓延鋼材이다. 이 鋼材들의 化學的 組成과 機械的인 特性은 Table 1 및 2와 같이 對比되므로 前者는 韓國工業規格(KS D3515) SM 41 鋼(普通強度鋼)이나 韓國船級協會規格(KR 301 조) KR 軟鋼 RD 鋼의 相當品이며, 後者는 KS SM 58 鋼(高張力鋼)이나 KR RD 46 ~ RE 46 鋼의 相當品이다.(以下 前者를 SM 41 鋼材, 後者를 SM 58 鋼材라 한다.)

疲勞試驗片은 그 길이 方向이 鋼材의 壓延方向과 同一하도록 供試鋼板에서 切取한 後 다음과 같이 組合하여 서브머지드 아아크熔接(Submerged arc welding)으로 맞대기熔接을 兩面에서 하여 3種의 規格試驗片을 만들었다.

- ① SM 41 鋼材 - SM 41 鋼材 熔接試驗片
- ② SM 58 鋼材 - SM 58 鋼材 熔接試驗片
- ③ SM 41 鋼材 - SM 58 鋼材 熔接試驗片

여기에서 서브머지드 아아크熔接法을 採擇한 理由는 지금 各造船所에서 應力을 많이 받는 船體의 甲板 및 外板의 熔接時 高張力鋼材間이나 普通強度鋼材間의 熔接에서 이 方法이 가장 많이 쓰이고 있고, 또한 가장 확실하게 熔接되기 때문이다.

Table 1. Chemical composition of the steels.(%)

Kinds of steel	C	Si	Mn	P	S	$C_{eq}$ *	$P_{cm}$ **	Remarks	
40 kg/mm <sup>2</sup> class steel plate	0.20	0.31	0.65	0.04	0.007	0.308	0.242	Specimen	
KS SM 41	<0.22	<0.35	0.6-1.2	<0.04	<0.04	<0.38	<0.26	—	
KR RD	<0.21	<0.35	0.6-1.4	<0.05	<0.05	<0.37	<0.261	—	
50 kg/mm <sup>2</sup> class steel plate	0.17	0.28	1.22	0.011	0.008	0.373	0.240	Specimen	
KS SM 58	<0.18	<0.55	1.50	<0.04	<0.04	<0.44	<0.273	—	
KR RD 46 ~ RE 46	<0.18	<0.05	0.9-1.6	<0.04	<0.04	<0.45	<0.261	Killed steel	
WM	SM41-SM41	0.185	0.32	0.67	0.008	0.01	0.296	0.217	—
	SM58-SM58	0.14	0.33	1.67	0.013	0.005	0.418	0.235	—
	SM41-SM58	0.16	0.31	1.10	0.015	0.008	0.343	0.228	—

\*  $C_{eq} \% = C + Mn/6$

\*\*  $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20$

Table 2. Mechanical properties of the steels (25°C)

Kinds of steel	Yield point ( $kg/mm^2$ )	Tensile strength ( $kg/mm^2$ )	Elongation (%)	Impact* strength ( $kg-m$ )	Remarks
40 $kg/mm^2$ class Steel plate	29.5	42.7	27.8	4.5	Specimen
KS SM41	26	41-52	19	4.8	---
KR RD	24	41-50	22	4.6	---
50 $kg/mm^2$ class steel Plate	34.5	50.2	27.1	4.0	Specimen
Kr SM50	47	58-71	19	3.1	---
KR RD50-RE4	37	51-72	18	3	---
SM41-SM41	28.78	50.33	27	4.756	---
W.M. SM50-SM58	30.18	51	25	4.5	---
SM41-SM58	38.27	54	21	4.1	---

\* Charpy impact test

Table 3. Welding condition (Submerged arc welding)

Kinds of specimen	Flux rod wire	Face	Velocity ( $cm/min$ )	Travel Speed ( $cm/min$ )	Heat** input ( $KJ/cm$ )	Remarks	
SM41-SM41	AWS-E71- RH*-14	Face	30	100	50	144	DAIDEN G1-BS
		Back face	4	100	75	15.58	Submerged arc welder
SM50-SM58		Face	30	100	56	12.27	
		Back face	32	525	72	14.0	
SM41-SM58		Face	30	100	50	17.38	
		Back face	32	525	55	18.327	

\* 0.16 C - 0.35 Si - 1.55 Mn - 0.011 P - 0.015 S

\*\* Heat input = 60 EI/V ( $J/cm$ )(V: 용접속도,  $cm/min$ )

Table 3은 이들 試驗片의 熔接條件이다.

規格試驗片의 型과 寸수는 Fig. 1과 같이 熔接試驗片의 兩面을 各 1 mm씩 平削하여  $4.00 \pm 0.01$  mm 두께로 만든 다음 金屬平板의 平面굽힘疲勞試驗法(JIS-2275-1978)의 1-30號의 試驗片으로 加工하였으며, 그 試驗片의 試驗部에는 다시 幅 0.25 mm, 길이 2.00 mm의 노치(Notch)를 加工했다. 그리고 이 試驗片 表面을 샌드페이퍼(Sand paper) 1.200番까지로 研磨하고, 알콜 및 아세톤으로 脫脂한 다음에 試驗하였다(SM 41-SM 58 鋼材熔接試驗片에서 SM 58 鋼材는 固定部側).

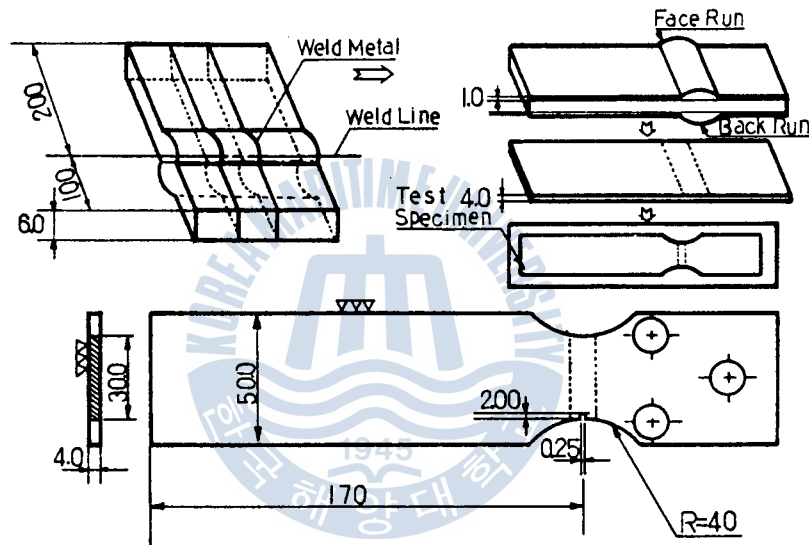


Fig. 1. Dimension of test specimen (unit = mm).

## 2.2 疲勞試驗裝置

이 研究에 使用된 疲勞試驗裝置는 平面굽힘式으로 Fig. 2와 같이 偏心器로 任意의 一定한 平面굽힘應力(Plane bending stress)을 反復하여 加할 수 있도록 되어 있을 뿐만 아니라 變速이 可能하고 4個의 試驗片에 대하여 同時에 兩振片振 및 部分片·兩振의 疲勞試驗도 할 수 있도록 自作한 것이다. 또한 이 試驗機는 大氣中에서나 水中에서 疲勞試驗을 할 수 있고, 또 水中試驗의 경우는 各種 電位로 陰極防蝕을 하면서 疲勞試驗도 할 수 있도록 되어 있다. 이러한 裝置를 3臺 製作하였으므로 12個의 試驗片을 同時에 試驗할 수 있었다.

電氣防蝕에는 D.C. 50 V, 2 A의 定電壓裝置와 Pb-Ag 不溶性陽極을 使用하

였으며, 電極電位の 測定에는 飽和 칼로멜 電極(SCE)과 高抵抗電壓計(内部抵抗:  $10^7 \Omega/V$ )를 使用하였다.

試片의 疲勞破斷까지의 反復應力回數는 電氣時計에 브레이크 스위치(Break switch)를 附着하여 試片이 破斷되는 순간까지의 時間을 測定함으로써 計算하였다.

이 試驗機의 試片固定部 및 水槽內部는 亜鉛프라이머(Zinc Primer)를 2회 塗布한 다음 絶緣性 에폭시타알塗料를 2회 塗裝하고, 그 위에 FRP로 라이닝(Lining)을 2層 厚세로 施行함으로써 防蝕電流가 試驗片에 많이 集約되도록 하였다.

Photo. 1은 本 試驗裝置의 配置圖이다.

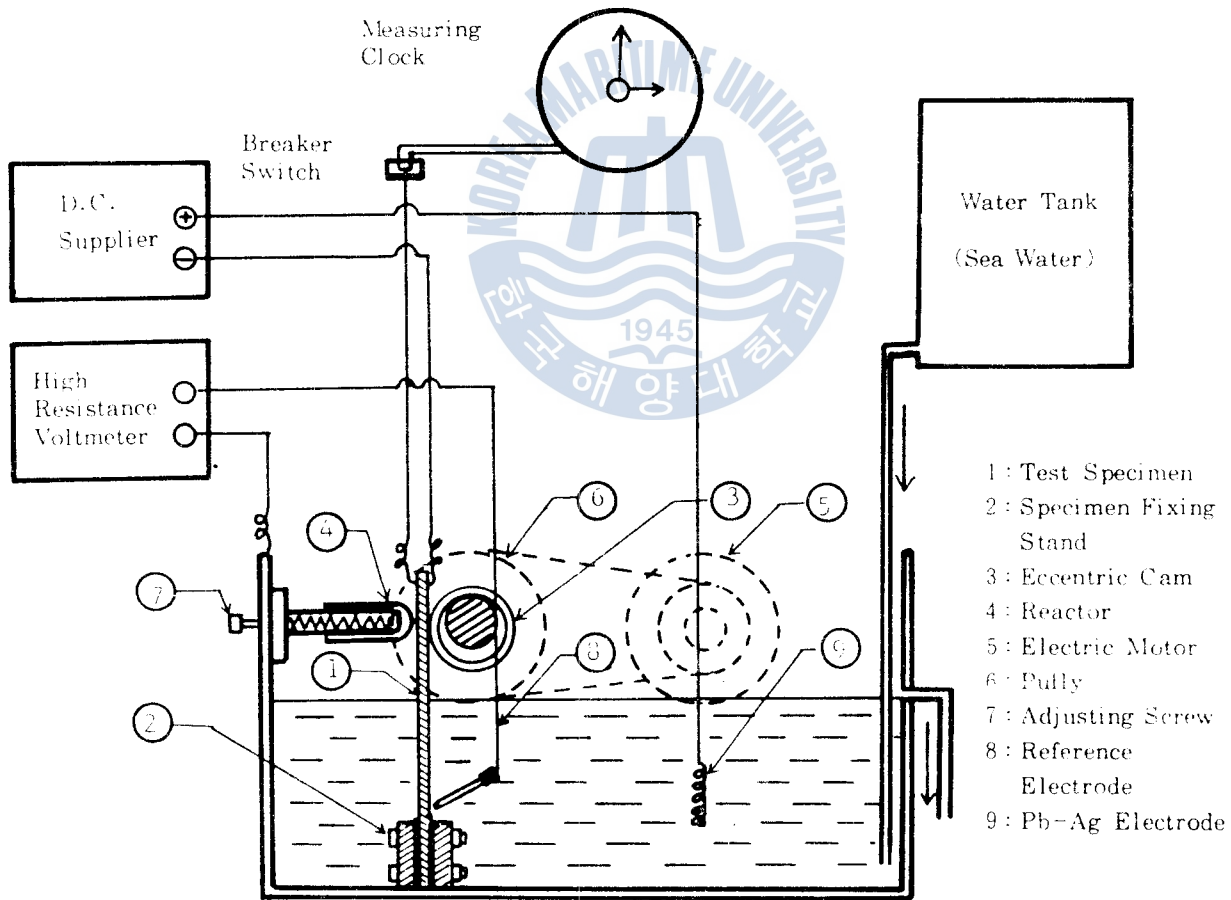


Fig. 2. Schematic diagram of plane bending fatigue tester.

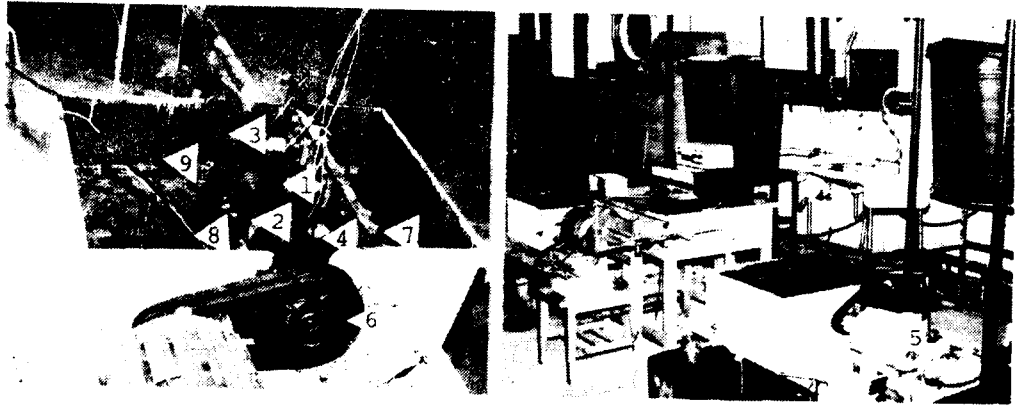


Photo. 1. Plane bending fatigue tester.

### 2.3 疲勞試驗條件

이 研究에서 試驗片의 平面굽힘疲勞試驗條件은 다음과 같다.

(1) 實際 船舶의 船體는 파도 등에 의해서 每分當 6~12回(0.1~0.2 Hz)의 片振反復굽힘應力을 받는 部分이 많으나 部分에 따라서는 兩振이나 部分片振 및 部分兩振의 應力을 받는 곳도 있다. 그러나 이 速度는 實驗하기에 너무 느린 速度이므로 이 研究에서는 850 cpm (14.2 Hz)으로 加速해서 腐蝕疲勞試驗을 實施하였다. 그러나 이러한 加速實驗에서 얻어지는 陰極防蝕下의 腐蝕疲勞限度에는 大氣中の 疲勞限度와 같이 疲勞速度의 高低의 影響이 거의 없을 것으로 豫想된다. 이에 관해서는 後述(3.1.2 參照)한다.

(2) 船體鋼板을 熔接할 때는 그 熔接部에 熔接缺陷(微細龜裂 또는 未接合部等)이 생기기 쉽고, 이 곳에 應力集中이 일어날 것으로 假想하여 試驗片의 試驗部에 幅 0.25 mm, 길이 2.00 mm의 노치(Notch)를 加工해서 應力集中이 일어나는 條件에서 實驗하였다. 이 경우에 노치의 應力集中感度를 求하기 위해서 SM 58 鋼材의 母材試驗片에서 노치를 加工하지 않은 試驗片과 加工한 試驗片에서 疲勞限度가 各各  $\sigma_0 = 16.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma'_0 = 16.0 \text{ kg/mm}^2$ 으로 實測되었고, 노치 루우트(Notch root)部の 曲率半徑이 0.125 mm였으므로 이들 試驗片의 노치는 다음과 같은 微細龜裂에 相當한다.



$$\therefore \text{應力變形} = \frac{1}{3} \times 2.1 \times 10^4 \times (1 + 0.78) \times 10^{-3}$$

$$= 2.97 \times 10^{-2}$$

$$\therefore \text{應力變形} = 2.97 \times 10^{-2} \times 10^3 = 29.7 \text{ mm}$$

$$\therefore \text{應力變形} = 29.7 \times 10^{-3} = 0.0297 \text{ mm}$$

$$= 0.0297 \times 10^3 = 29.7 \text{ mm}$$

따라서 이 경우의 應力變形은 29.7 mm

(3) 海水電氣動力學的 腐蝕에 對한 功應力學的 腐蝕에 對한 實驗結果를 比較하여, 100% 應力變形 = 1000 μV, 50% 應力變形 = 1000 μV, 20% 應力變形 = 1000 μV S.C.E. 電極를 用해서의 各 應力變形에 對한 疲勞限度를 測定 比較하였고, 大氣中의 疲勞限度와도 比較하였다.

(4) 腐蝕液은 Table 4 와 같은 天然海水를 使用하였으며, 試驗中 물의 蒸發 등을 考慮하여 一定한 速度(約 30 ml)로 海水를 계속 供給하는 한편 同量의 海水를 排出시키는 方法을 使用하였다. 그리고 試驗中 水溫은 10°~25°C의 範圍였다.

(5) 疲勞試驗은 總 180 時間 以上の 期間에 걸쳐서 10<sup>7</sup> 회까지 反復應力을 계속 加하여 급히 疲勞 시키고 破斷되지 않는 上限值의 所謂 高사이클 疲勞限度를 疲勞限度로 測定하였다.

實驗中 實驗中斷은 停電 등의 不得已한 事由가 있을 때에 限하고, 그 連中斷 時間이 2 時間(10<sup>7</sup> 회 時間의 約 1%)을 超過할 때에는 再試驗하였다.

(6) 疲勞試驗에서 급히應力  $\sigma_b$  는 다음과 같이 求하였다.

即 급히變形量  $\delta = P\ell^3/3EI$  에서 荷重  $P = 3EI\delta/\ell^3$  이므로

$$\begin{aligned} \sigma_b &= M/Z = P(\ell-x)/Z = 3EI\delta(\ell-x)/Z\ell^3 \\ &= 1.5 E\delta(\ell-x)/\ell^3 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

Young's modulus  $E$  는 SM 41 鋼材熔接試驗片에서  $2.10 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ , 그리고 SM 58 鋼材熔接試驗片과 SM 41 - SM 58 鋼材熔接試驗片에 對해서는  $2.18 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 의 값을 使用하였다. 그러나 試驗裝置의 固有誤差나 各 材料의 實際 "영" 率을 考慮하여 試驗機에 試驗片을 固定시키고 여러가지 負荷下에서 試驗部에 附加 되는 應力을 "스트레인 게이지"로 實測하여 본 결과 SM 41 鋼材熔接試驗片과 SM 58 鋼材熔接試驗片에서는 ④式의 計算値와 잘 一致하였으나 SM 41-SM 58 鋼材熔接試驗片에서는 計算値의 約 90% 程度의 應力만이 測定 되었으므로 이 異鋼

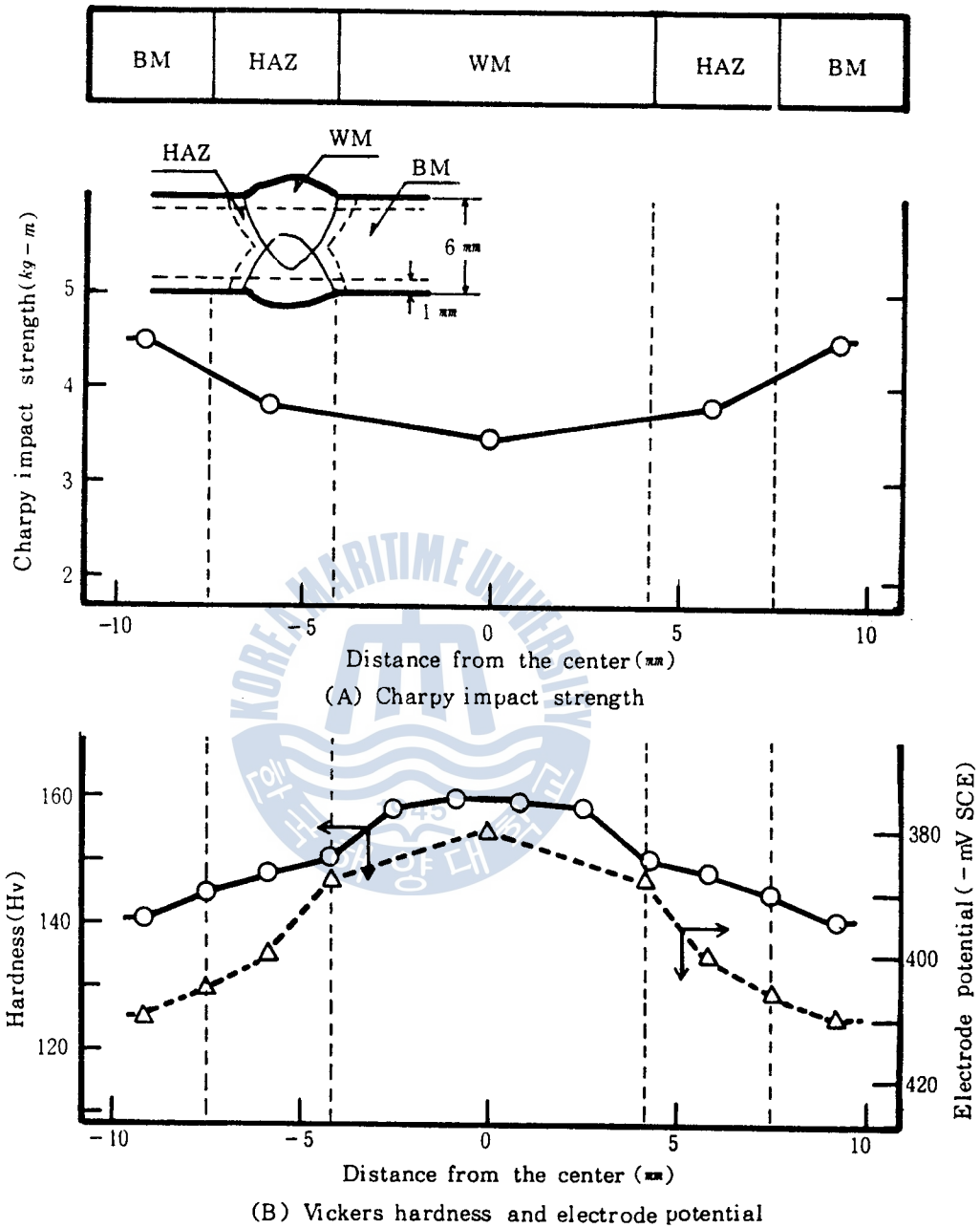


Fig. 3. Variation of mechanical properties and electrode potential with distance from the center of the welded zone of SM41 steel.

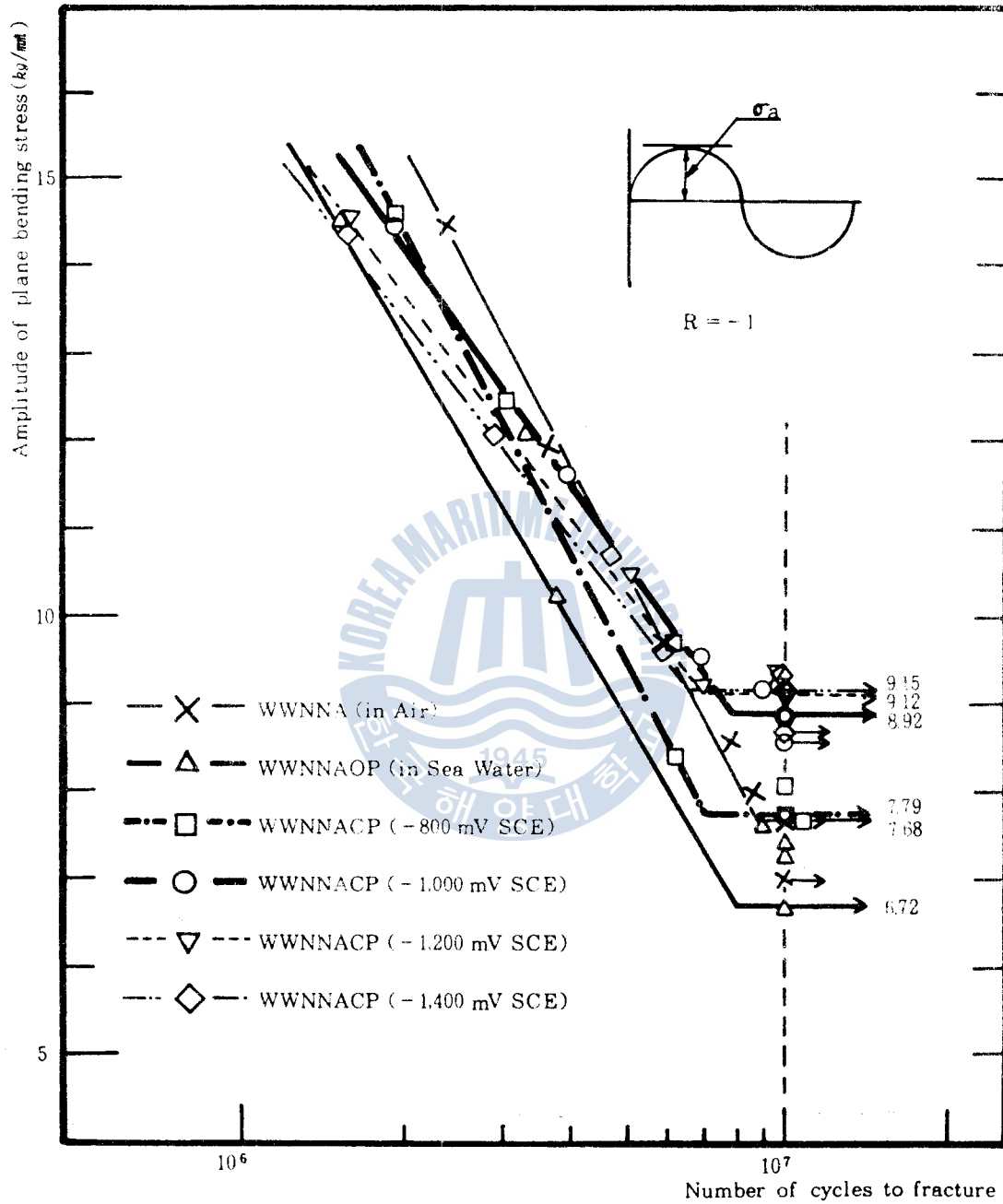


Fig. 4.  $S-N_f$  diagram of alternative stress fatigue test for the welded zone of SM41 steel with various experimental conditions.

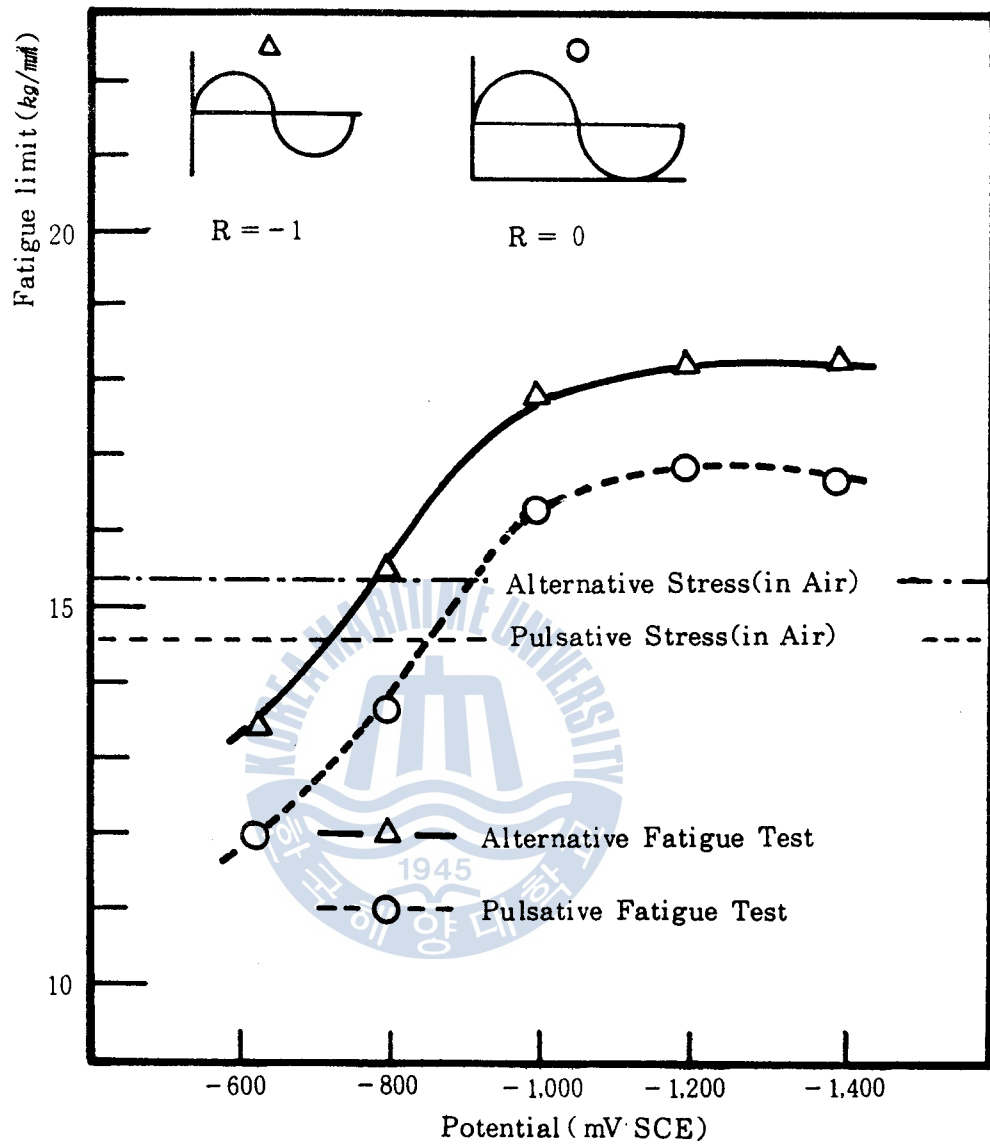


Fig. 7. Comparison of fatigue limit strength for the welded zone of SM41 steel in each cathodic protection condition.

疲勞와 電氣化學的인 腐蝕이 서로 相乘作用을 하는 所謂 腐蝕疲勞가 發生하나 이것을 陰極防蝕하면 마치 Cavitation을 陰極防蝕한 것과 같이 腐蝕作用이 없어지고 機械的인 疲勞作用만이 남기 때문에 腐蝕疲勞가 많이 緩化되는 것으로 생각된다. 또 海水中の 鐵鋼의 腐蝕疲勞限度는 疲勞速度의 減少에 따라서 상당히 減少할 것<sup>38)</sup>으로 豫想되나 大氣中の 그 疲勞限度는 疲勞速度에 거의 無關<sup>39)</sup>하다. 따라서 陰極防蝕條件下에서는 前述한 바와 같이 腐蝕作用이 除去되고 機械的인 疲勞作用만이 남으므로 그 腐蝕疲勞限度가 大氣中の 疲勞限度나 그 以上으로 增加되기 때문에 陰極防蝕下에서 測定한 腐蝕疲勞限度에는 加速試驗의 影響이 거의 나타나지 않을 것으로 생각된다.

또 陰極防蝕하면 被防蝕面에 水素被膜이 形成되고 이것이 鋼材內部로 浸透하여 水素脆性を 일으킬 것으로 念慮되었으나 實測結果에 의하면  $-1,400$  mV SCE 까지 陰分極시켜도 疲勞限度가 거의 減少하지 않는 點으로 보아서 이 鋼材는 水素脆성에 대하여 상당히 강한 材料라고 생각된다.

### 3.1.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率

Fig. 8은 SM 41 鋼材熔接試驗片에 대하여 여러가지 條件下에서 實測한 疲勞限度로부터 作成한 腐蝕疲勞限度線圖이다. 이 線圖는 縱軸에 應力振幅( $\sigma_a$ )을 橫軸에 平均應力( $\sigma_m$ )을 잡고 있으며, 作圖要領은 다음과 같다.

(1) 兩振은 平均應력이 零이고 應力比( $R$ )가  $-1$ 인 振動이므로 各 條件下에서 實測한 兩振腐蝕疲勞限度의 應力振幅을 縱軸(平均應력이 零)上에 잡는다.

(2) 片振은 平均應력과 振幅이 同一하고 應力비가 零인 振動이므로 各 條件下에서 實測한 片振腐蝕疲勞限度의 應力振幅을 座標 原點에서 橫軸에 對하여  $45^\circ$  되게 그은 直線上에 잡는다.

(3) 部分片振은 一定한 負荷를 받고 있는 狀態에서 片振시키는 것이다. 本 試驗에서는 固定負荷로  $10 \text{ kg/mm}^2$  을 加하였으므로 이 條件에서 實測한 部分片振腐蝕疲勞限度의 應力振幅은 平均應력이  $10 \text{ kg/mm}^2$  이고 應力振幅이 零인 點에서 橫軸에 대하여  $45^\circ$  되게 그은 直線上에 잡는다.

(4) 平均應력을 나타내는 橫軸上에 剪斷應力( $\sigma_s$ )을 잡는다. 이 剪斷強度는 最大剪斷에 너지理論<sup>40)</sup>으로부터  $\sigma_s = 0.577 \sigma_{yp}$  로 計算되며, 本 試驗片의 試驗

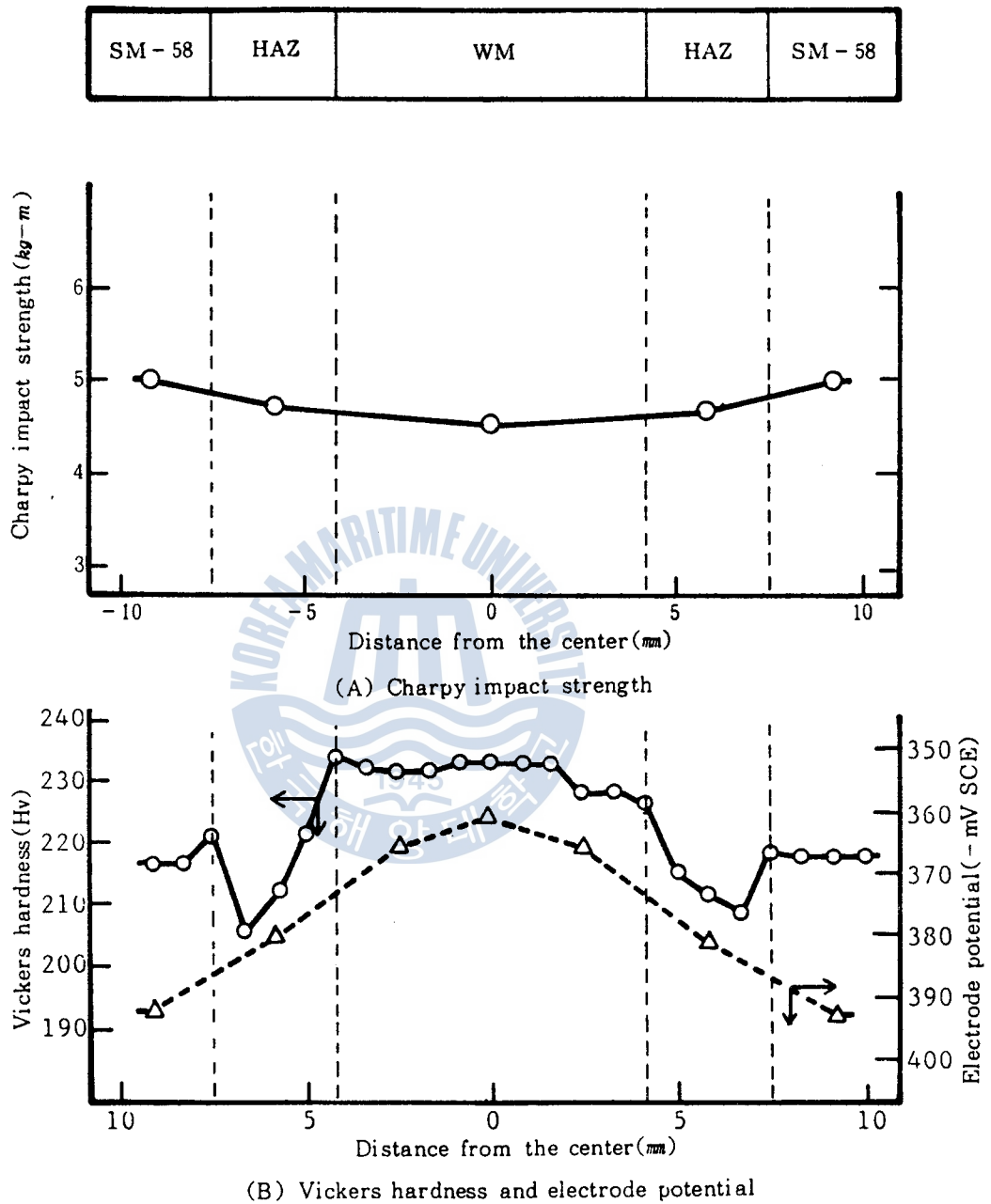


Fig. 9. Mechanical properties and electrode potential on the welded zone of SM58 steel.

한다.

이와 같은 低硬度部는 熔接熱에 의하여 熱影響部의 組織이 微細化됨으로써 생긴 것으로 생각되며, 熔着部の 電位가 가장 貴한 것은 母材보다 貴한 材料의 熔接棒을 사용한 結果라고 생각된다.

### 3.2.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

Fig. 10은 大氣中에서 熔接·無熔接, 노치 有無, 片·兩振 등의 各 疲勞條件下에서 測定한 SM 58 鋼材熔接試驗片의  $S-N_f$  線圖이다. 그리고 Fig. 11은 天然海水中에서 이 試驗片의 無防蝕 및 陰極防蝕(-800 mV, -1,000 mV, -1,200 mV -1,400 mV SCE)條件下에서 片振疲勞試驗으로 測定한  $S-N_f$  線圖이며, Fig. 12는 이들의  $S-N_f$  線圖에서 求한 疲勞限度를 試驗片 種類와 防蝕電位條件 別로 比較한 것이다.

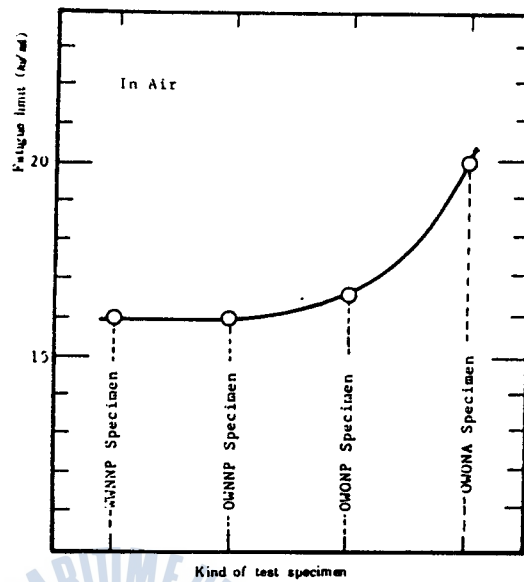
이들의 結果를 보면 空氣中에서 兩振疲勞限度는 豫想대로 片振疲勞限度보다 높다. 또 熔接缺陷이 없을 때는 熔接試驗片이 無熔接試驗片보다 時間強度는 높으나 疲勞限度에는 거의 差가 없다.

海水中에서 無防蝕하였을 때는 大氣中에서의 疲勞限度보다 상당히 낮아지고, 無熔接試驗片은 熔接試驗片보다 더 낮아진다. 後者の 現象은 熔接棒材와 母材의 電極電位關係라고 생각된다. 또 海水中에서 電氣防蝕한 경우는 無防蝕한 경우보다 疲勞限度가 현저하게 높아지며, -800 mV SCE 程度로 防蝕해도 大氣中の 疲勞限度 以上으로 上昇되고 -1,000 mV SCE까지 防蝕하면 거의 最高值에 도달한다.

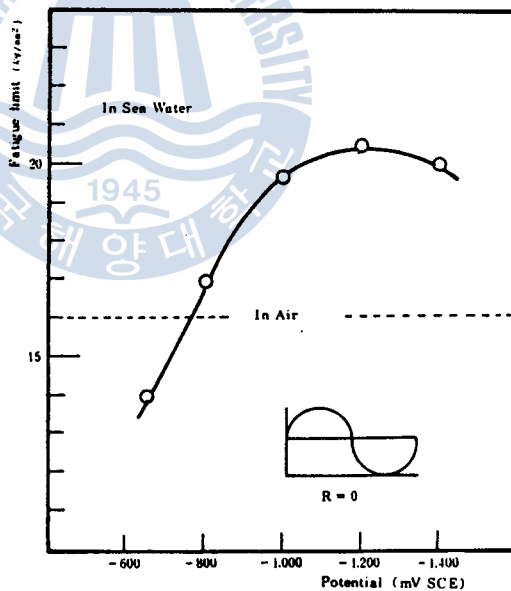
그리고 -1,200 mV SCE로 防蝕하면 疲勞限度가 若干 더 높아지나, -1,400 mV SCE로 防蝕하였을 때는 오히려 낮아진다. -1,400 mV SCE로 防蝕하였을 때 疲勞限度가 오히려 낮아지는 것은 陰極防蝕으로 發生되는 水素에 의하여 所謂 水素脆化되기 때문이라고 생각되며, SM 41 鋼材에 比해서 이 鋼材가 水素脆性에 더 銳敏하다고 생각된다.

### 3.2.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率

Fig. 13은 SM 58 鋼材熔接試驗片에 대한 여러가지 條件下에서 實測한 疲勞限度로부터 作圖한 腐蝕疲勞限度線圖이다. 그 作圖要領은 SM 41 鋼材에서와 同一하고, 이들의 腐蝕疲勞限度線 以下の 領域이 各各 그 疲勞條件과 腐防蝕條件下에서의 安全區域이다.



(A) For the kinds of test specimen



(B) For the cathodic protection potential

Fig. 12. Comparison of fatigue limit strength for the kinds of test specimen and for the cathodic protection potential.



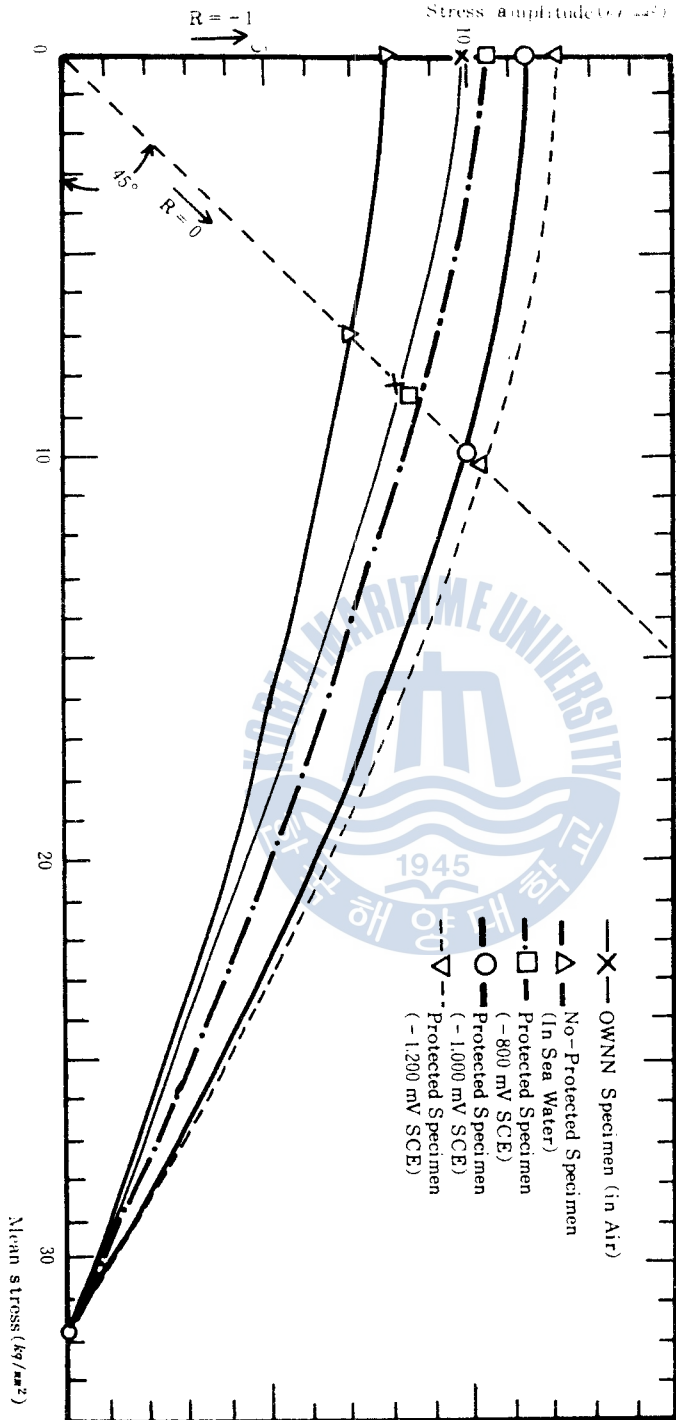


Fig. 13. Plane bending fatigue limit diagram of the welded zone of SM58 steel.

### 3.3.2 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

Fig. 15~17 은 SM 41-SM 58 鋼材의 熔接試驗片에 대하여 空氣中 및 海水中의 無防蝕과 電氣防蝕의 여러가지 條件下에서 各各 兩振, 片振 및 部分片振으로 疲勞試驗하여 實測한  $S-N_f$  線圖를 나타낸다. 그리고 Fig. 18 은 兩振 및 片振 疲勞限度가 防蝕電位를 變化시킴에 따라 어떻게 變하는가를 比較한 것이다.

이들 實測資料에 의하면 海水中 無防蝕條件에서의 疲勞限度는 空氣中の 疲勞限度보다 상당히 낮아지나 陰極防蝕을 하여 試驗片의 電位를  $-800$  mV SCE程度만 유지하면 空氣中과 거의 對等한 強度로 上昇한다. 또  $-1,200$  mV SCE 까지 防蝕하면 最高強度에 도달하나  $-1,000$  mV SCE로 防蝕하였을 때와 大差가 없으며,  $-1,400$  mV SCE로 防蝕하면 疲勞限度는 SM 58 鋼材熔接試驗片에서와 같이 오히려 低下된다. 低電位로 防蝕하였을 때 疲勞限度가 오히려 떨어지는 것은 陰極防蝕時에 發生하는 多量의 水素로 因하여 SM 58 鋼材部가 脆化되기 때문이라고 생각된다.

### 3.3.3 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率

Fig. 19 는 SM 41 鋼材와 SM 58 鋼材와의 熔接試驗片에 대하여서 여러가지 腐蝕條件別로 實測한 疲勞限度로부터 作成한 腐蝕疲勞限度線圖이다. 作圖要領은 前述한 바와 같고 이 線圖에 의하여 設計安全率을 計算하면 이 試驗片의 疲勞條件과 防蝕條件에 따라 Table 7과 같이 된다.

實際 造船에서 設計安全率을 約 4 로 잡고 있으므로 Table 7 과 對照하면 그것은 無防蝕兩振의 경우나,  $-800$  mV SCE로 陰極防蝕하였을 때의 片振疲勞限度와 對等하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 SM 41 鋼材와 SM 58 鋼材를 連接한 경우에도 設計安全率은 SM 58 鋼材의 경우와 같이 各 部位의 負荷條件에 따라 3.5~4.0 을 擇해도 充分하다는 것을 알 수 있다.

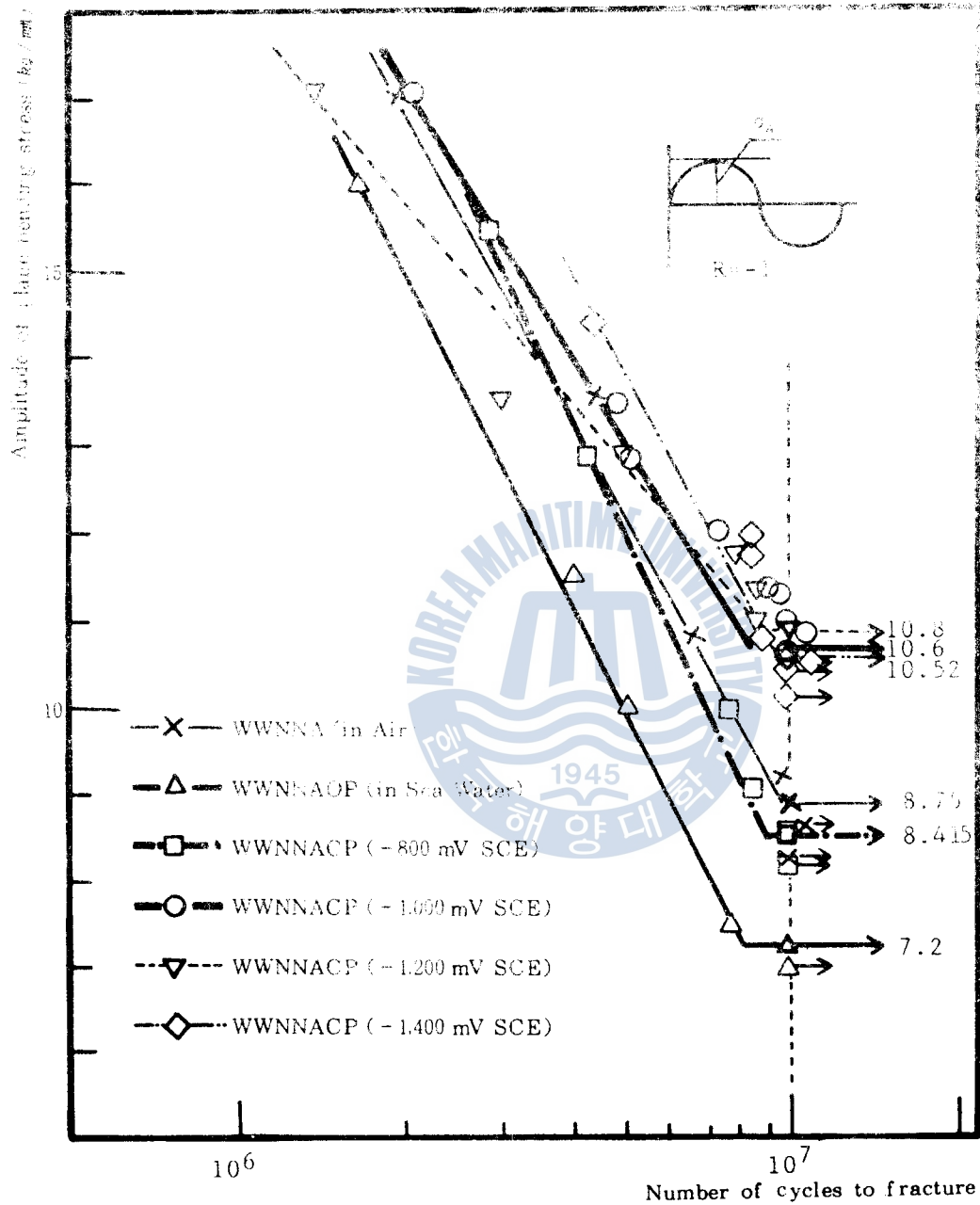


Fig. 15. Comparison of  $S-N_f$  diagram of alternative stress fatigue test on the welded zone of SM41-SM58 steel in air and sea water.

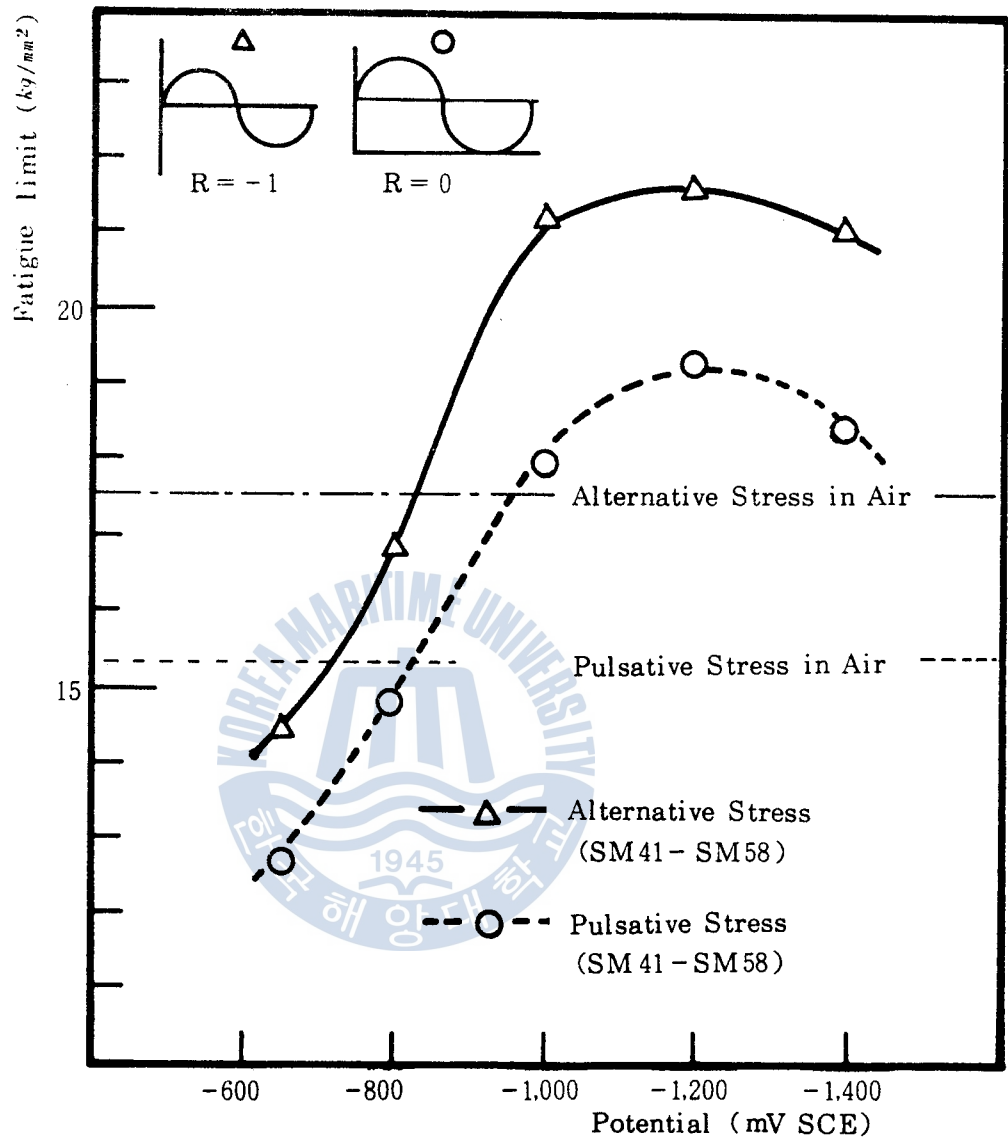


Fig. 18. Comparison of fatigue limit strength on the welded zone of SM41-SM58 steel in each cathodic protection condition.

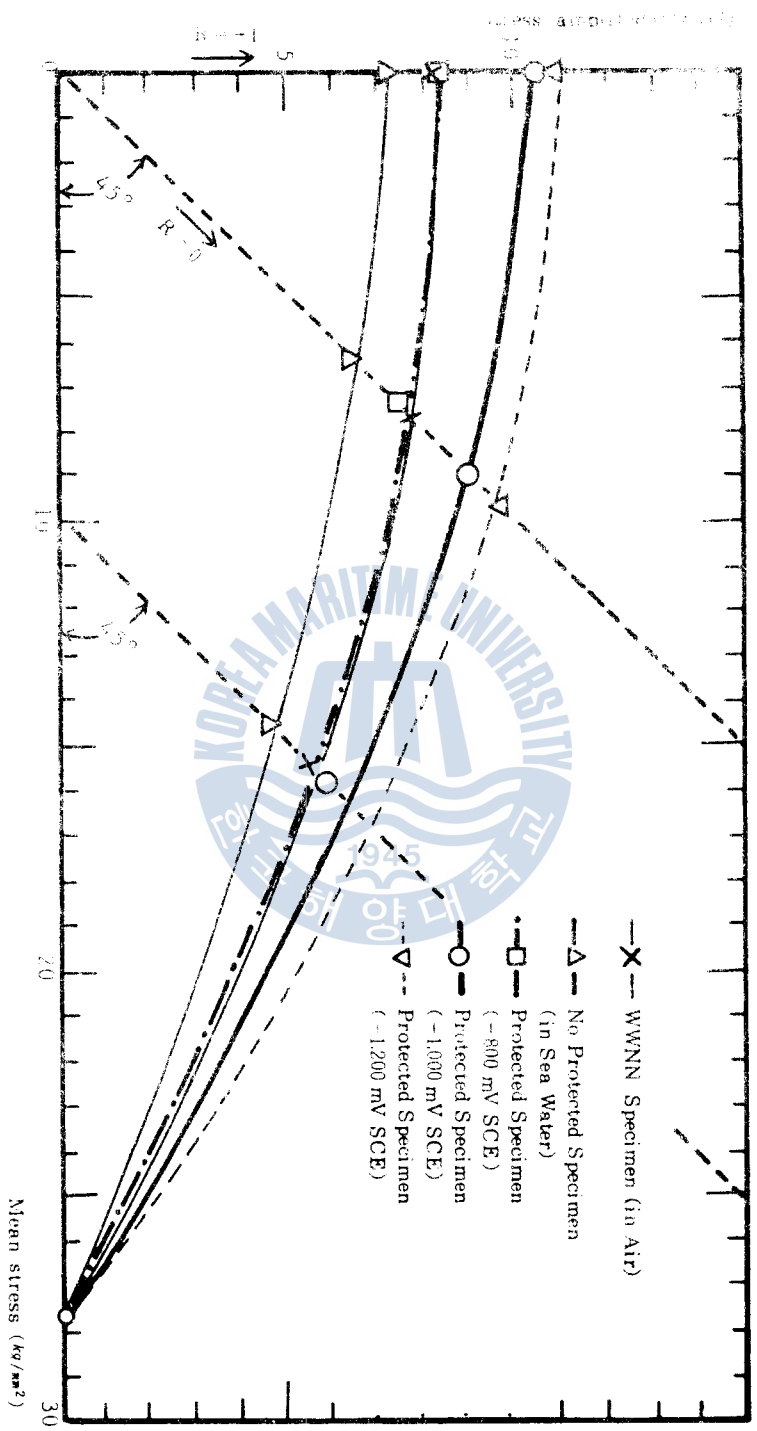


Fig. 19. Plane bending fatigue limit diagram of welded zone of SM41 steel-SM58 steel.

Table 7. Safety factors of welded zone.

Protection Potential (-mV SCE)	Alternative stress (fatigue limit, $kg/mm^2$ )	Pulsative stress (Fatigue limit, $kg/mm^2$ )	Partial pulsative stress at fixed load $10 kg/mm^2$ (Fatigue limit, $kg/mm^2$ )
625 ( $E_{corr}$ )	4.073(14.4)	4.95(12.78)	6.52(9.0)
800	3.45(16.83)	3.95(14.85)	-
1.000	2.77(21.2)	3.29(18.8)	5.01(11.7)

### 3.4 總 括

#### 3.4.1 鋼材의 疲勞龜裂의 傳播와 破壞의 特性

Photo. 2는 疲勞龜裂의 進展을 관찰한 현미경 사진(A)과 龜裂周邊에 形成되는 塑性領域을 光干涉法(Optical Interference Method)에 의하여 撮影(B)한 것이며, Fig. 20은 前述한 3種의 疲勞試驗片에 대하여 同一한 負荷條件( $\sigma_b=40 kg/mm^2$ )으로 平面굽힘疲勞를 시켜가며, 龜裂의 進展길이나 應力사이클數와의 關係를 實測한 結果이다. 그리고 Fig. 21은 이들 資料를 龜裂進展速度( $da/dn$ )와 應力強度係數範圍間的 關係를 兩對數座標上에 나타낸 것이다. 여기서 應力強度係數範圍  $\Delta K$ 는 Kawahara 등<sup>43)</sup>이 提示한 다음 式을 引用하였다.

$$\Delta K = 1/2 \Delta S_b \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

$$\Delta S_b = \text{應力範圍, } kg/mm^2$$

$$a = \text{龜裂길이, mm}$$

이들의 結果에 의하면 龜裂이 노치部에서 發生되어 進展됨에 따라 塑性領域이 크게 增加하고, 龜裂의 길이가 커짐에 따라 龜裂端에서 應力集中效果가 점차 더 커져서 그 進展速度가 더욱 빨라지고 있음을 알 수 있다.

Photo. 3은 試驗部의 노치에서 龜裂이 發生되어 疲勞破斷된 試驗片의 側面과 斷面을 나타낸 것이다.

Photo. 3(A)의 破斷部 側面을 보면 大氣中の 경우나 海水中の 電氣防蝕한 경우는 試片①, ② 및 ③과 같이 破斷線의 周圍에 蝕孔이나 微細龜裂 등이 없는 單順한 線狀이나, 海水中の 無防蝕의 경우에는 試片④, ⑤ 및 ⑥에서 보는 바와



Fig. 10. Plastic zone behaviour near the propagating

Photo. 10. Crack development and plastic zone behaviour near the propagating crack on the welded zone of SM41-BM steel.

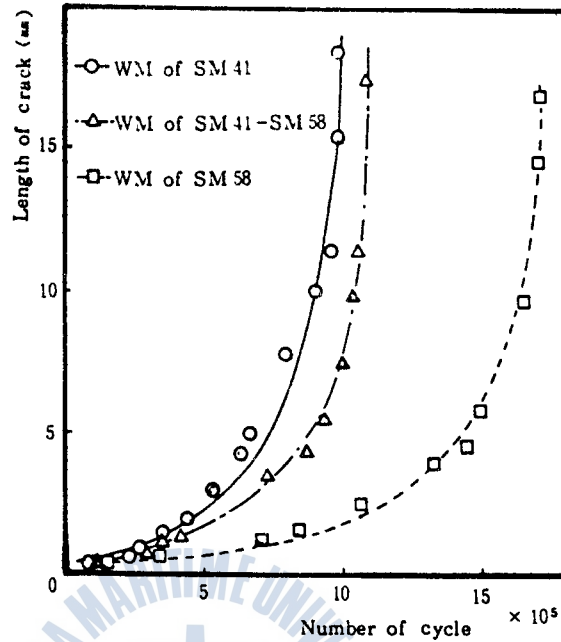


Fig. 20. Relation between crack length and the number of cycles on the welded zone of SM41 steel, SM58 steel and SM41-SM58 steel.

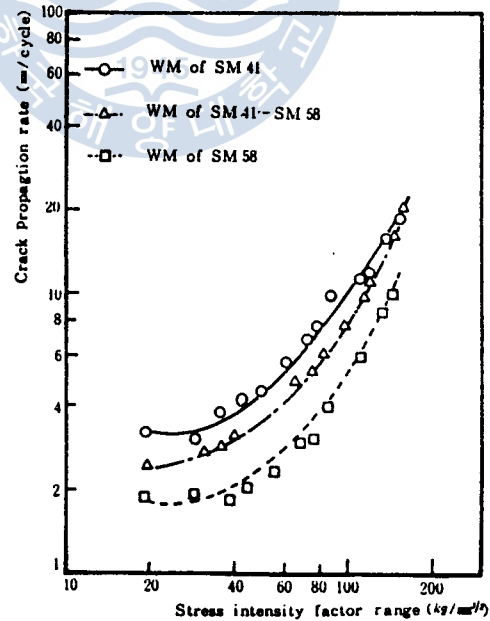


Fig. 21. Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate on the welded zone of SM41 steel, SM58 steel and SM41-SM58 steel.



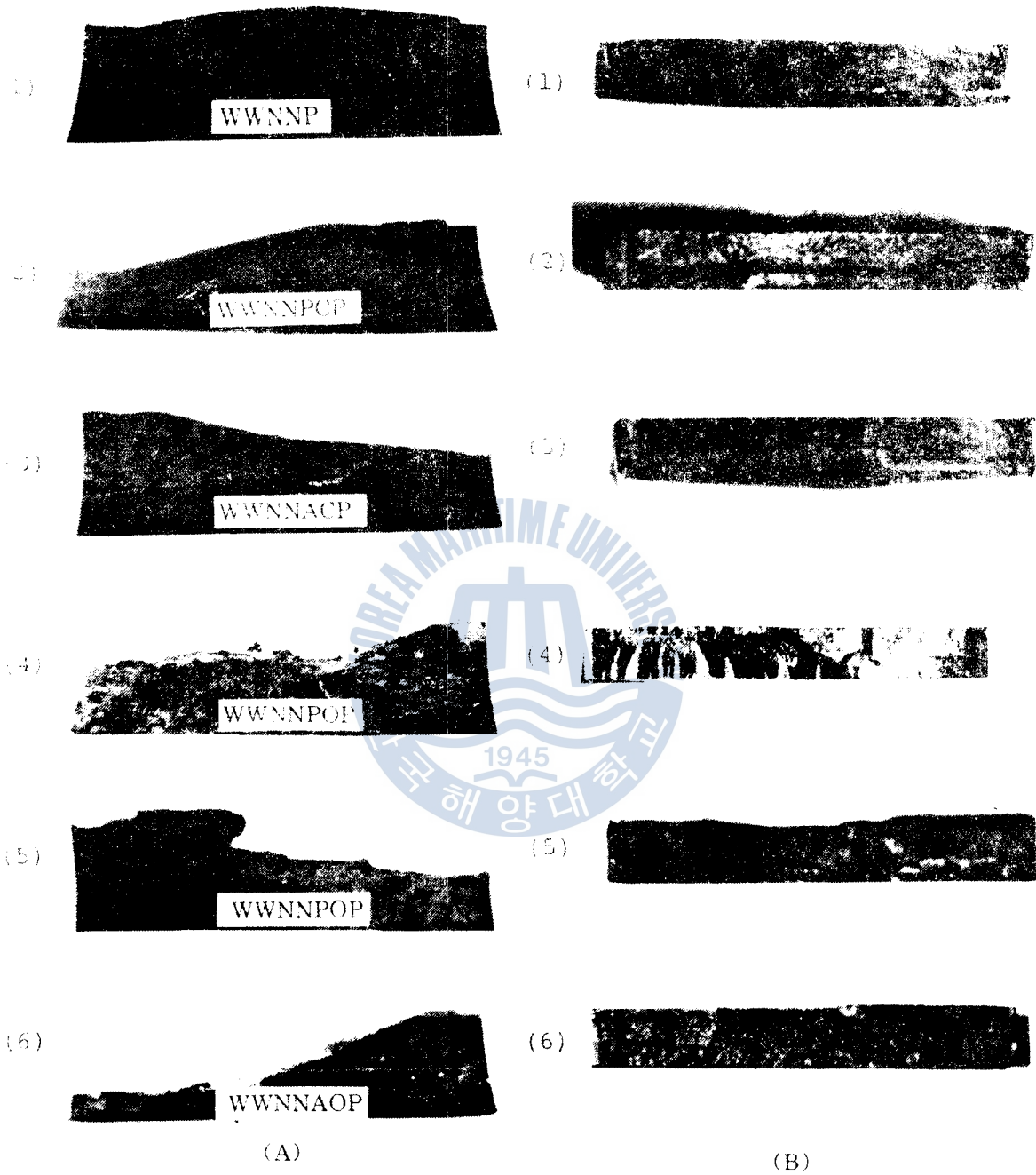


Photo. 3. Surface and cross-sectional surface of cracked and fractured specimen.

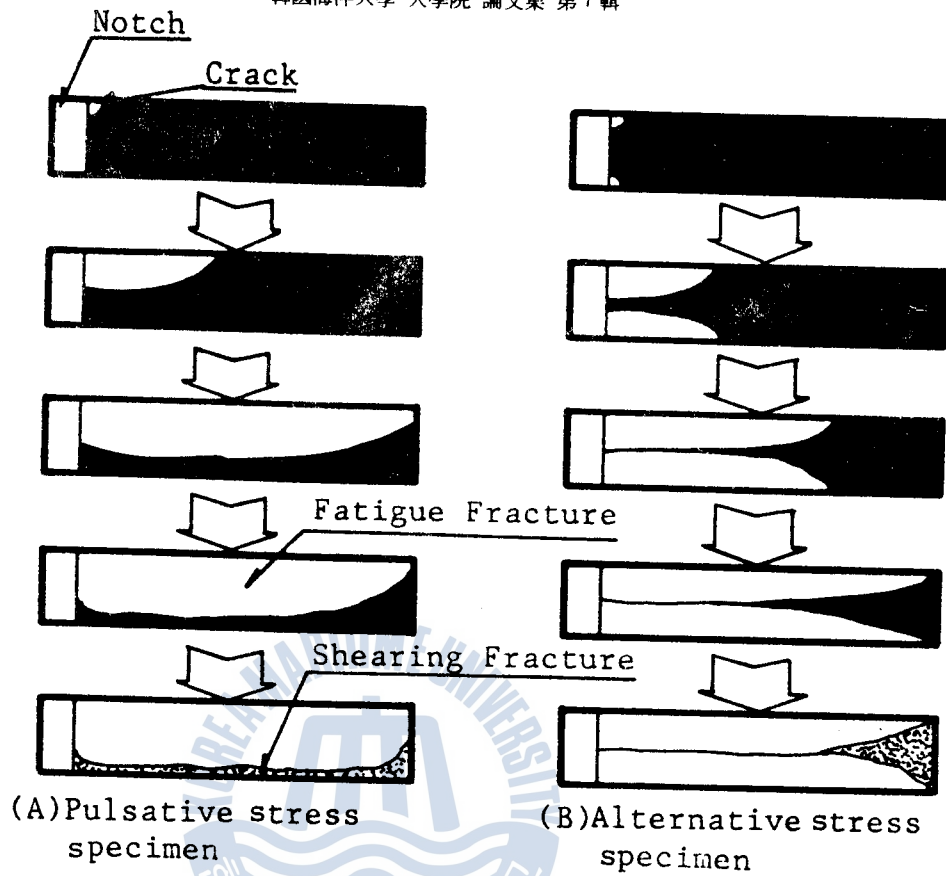
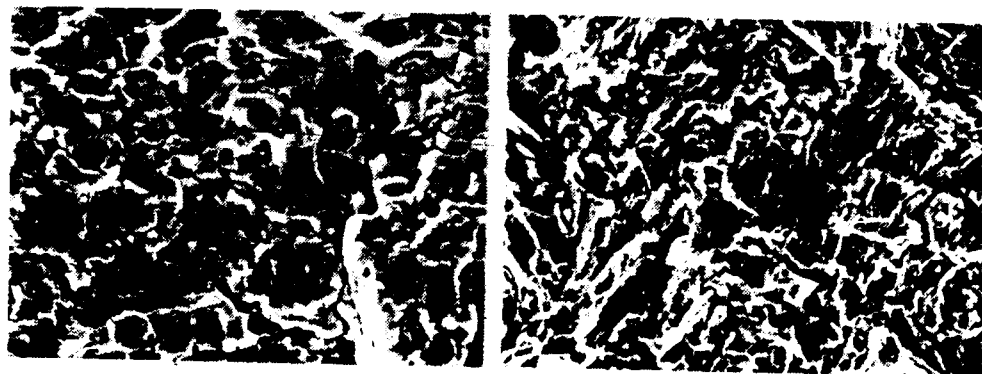


Fig. 22. Schematic drawings of crack development in side direction.



Fatigue fracture

Shearing fracture

Photo. 4. Fractographs of fractured specimen (WM of SM41 steel).



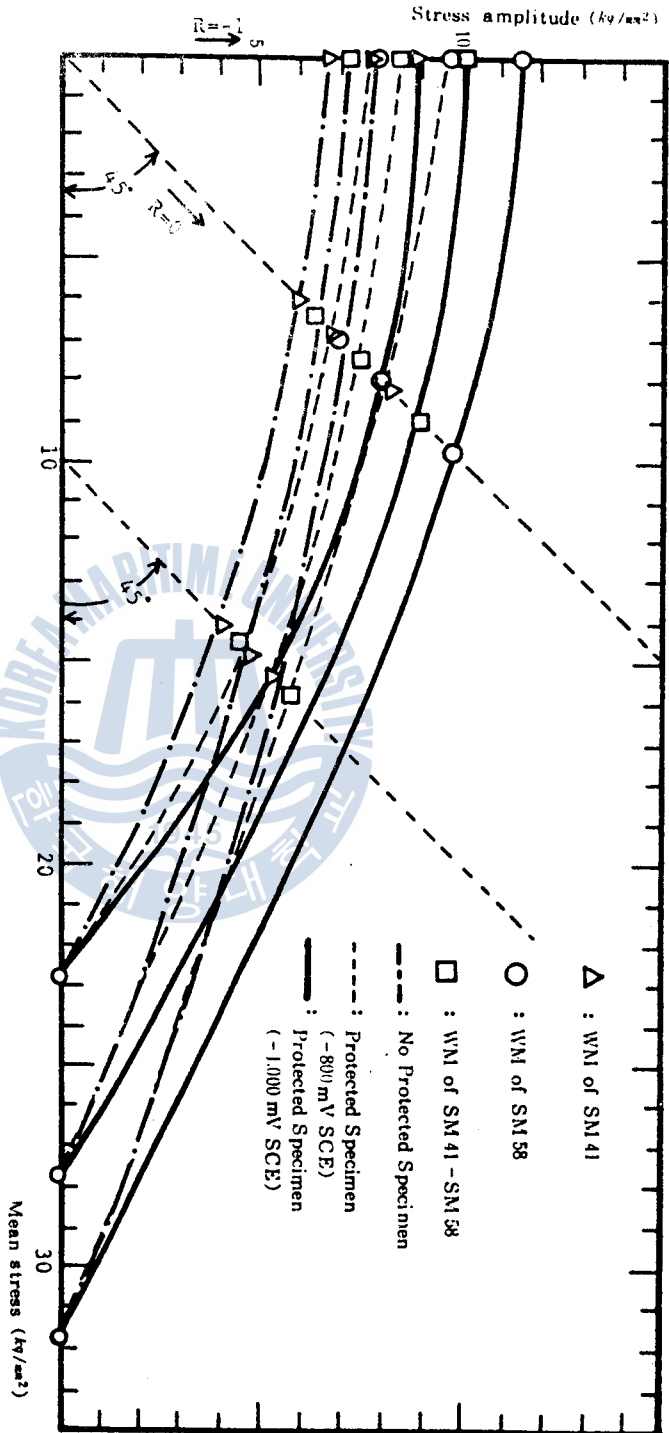


Fig. 25. Comparison of plane bending fatigue limit diagram for the welded zone of SM41 steel, SM58 steel and SM41-SM58 steel.



## 第4章 結 論

造船用 鋼材인 SM 41 鋼, SM 58 鋼 및 이 두 異種鋼材를 各各 서브머이지드 아아크熔接法으로 서로 連接한 熔接部에 대하여 熔接缺陷 및 天然海水中的의 여러 가지 防蝕條件을 考慮하여 實施한 平面굽힘疲勞試驗에서 다음의 結論을 얻었다.

- (1) SM 41 鋼과 SM 58 鋼의 各 熔接部位에서는 다 같이 熔着部가 그 周圍에 비하여 衝擊強度는 낮으나 硬度는 높고 電極電位는 가장 貴하다. 또한 SM 58 鋼에서는 熱影響部에 低硬度部가 存在한다. 그리고 SM 41 鋼과 SM 58 鋼을 서로 連接한 경우는 熔着部에서 衝擊強度가 가장 낮고, 硬度는 中位이며, 電極電位는 가장 貴하다.
- (2) 空氣中 및 海水中的의 電氣防蝕條件下에서 試驗片은 單純한 機械的인 疲勞破壞가 일어나나 海水中 無防蝕下에서는 機械的인 破壞와 化學的인 腐蝕이 서로 相乘作用함으로써 腐蝕疲勞破壞가 일어난다.
- (3) 天然海水中에서 이들 熔接部位를 陰極防蝕 하면 無防蝕時 보다 腐蝕疲勞限度가 增加하며, 그 程度는  $-800\text{ mV SCE}$ 로 防蝕할 때 大氣中에서의 疲勞限度와 거의 같은 程度로 增加하고,  $-1,000\sim-1,200\text{ mV SCE}$ 로 防蝕할 때 最高值에 達한다. 그리고 防蝕電位를  $-1,200\text{ mV SCE}$  以下로 낮추면 SM 58 鋼材熔接試驗片과 SM 41 - SM 58 鋼材熔接試驗片에서는 腐蝕疲勞限度가 오히려 低下하나 SM 41 鋼材熔接試驗片에서는 別 變化가 없다.
- (4) 鋼船의 外板을 設計할 때 鋼材의 引張強度와 安全率만을 基準하는 것 보다는 가장 損傷되기 쉬운 連接部位의 疲勞條件과 防蝕條件을 考慮한 疲勞限度를 基準으로 하여 設計함이 바람직하다.

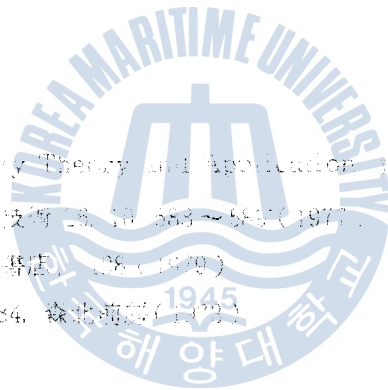
## 參考文獻

1. 木山稔：高張力化，耐環境化を指向する厚板，金屬，Vol. 45, No. 1, pp. 35, 39～42 (1975)
2. 韓國船級協會：船級 規 則 鋼船規則，第 301 條，船體用壓延鋼材，pp. 50～55 (1981)
3. 關野昌敏：高張力鋼の熔接性，金屬，Vol. 46, No. 1, pp. 13～18 (1976)
4. 村田朋美：普通鋼の水素誘起割れ，金屬，Vol. 46, No. 4, pp. 9～14 (1976)
5. 大西敬三：高張力鋼の水素脆化，金屬，Vol. 46, No. 4, pp. 15～19 (1976)
6. 下田秀夫：熔接構造用 高張力鋼の硫化物腐蝕割れについて，防蝕技術，Vol. 14, No. 6, pp. 241～247 (1965)
7. K. S. Treseder & T. M. Swason: Factors in Sulfide Corrosion Cracking of High Strength Steel, Corrosion, Vol. 24, No. 2, pp. 31～37 (1968)
8. 百合岡，失竹：鋼材の熔接割れと水素，熔接學會誌，Vol. 45, No. 7, pp. 7～13 (1976)
9. 松島岩：硫化物 應力腐蝕割れの電氣化學，防蝕技術，Vol. 18, No. 4, pp. 139～146 (1968)
10. I. Geld, M. A. Acampora: A Factor in Hydrogen Embrittlement of Cathodically Protected Steel in Sea Water, Mater. Prot, Vol. 7, No. 11, pp. 31～34 (1968)
11. 大谷男海男：應力と腐蝕，鐵と鋼，Vol. 5, pp. 556～566 (1979)
12. P. E. Hudson, et. al.: Absorption of Hydrogen by Cathodically Protected Steel, Corrosion, Vol. 24, No. 7, pp. 189～196 (1968)
13. 酒井利一ら：高張力鋼熔接部における應力腐蝕亀裂とその軽減策，防蝕技術，Vol. 16, No. 7, pp. 303～308 (1958)
14. NACE Standard TM- 01 -77, Testing of Metal for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperature, Metal Performance, Vol. 16, No. 9 (1977)
15. 前掲書(9) pp. 139～146.
16. 永井欣一ら：高張力鋼の熔接部，熱影響部の腐蝕疲労強度，日本 熔接學會誌，Vol. 40, No. 1, pp. 68～70 (1970)

17. 益本功ら：鋼材 及び熔接継手 の 3%NaCl 水溶液 腐蝕疲労に對する研究 (1), 日本 熔接學會誌, Vol. 44, No. 3, pp. 60~64 (1975)
18. 平川. 北浦：熔接継手の低速度 腐蝕疲労強度, 日本 熔接學會 77年 講演集 S 756.
19. 中野. 青本. 金尾：SERT による高張力鋼の水素脆性 感受性の評價, 日本 熔接學會 79年 講演集 S 918.
20. 角田. 丸山, 内山：各種 高張力鋼の海水中での腐蝕疲れき裂傳播舉動, 鐵と鋼, 第 20 號, pp. 77~86 (1980)
21. 田大熙, 金鎮京：海洋構造用 HT50 高張力鋼의 環境에 따른 크랙 傳播特性에 관한 研究, 韓國 海洋大學 論文集, 第 2 輯, pp.137~153 (1983)
22. 南・高田：軟鋼の腐蝕疲労と陰極防蝕, 防蝕技術, Vol. 7, No. 6. pp. 26~27 (1958)
23. L. M. Dvoracek : Influence of Cathodic Over Protection on Fatigue of Carbon Steel in Sea Water, Materials Performance, Vol. 16. No. 9, pp. 21~24 (1977)
24. Hooper Hartt : The Influence of Cathodic Polarization Upon Fatigue of Notched Structural in Sea Water, Corrosion, Vol. 34. No. 9, p pp. 320~323 (1978)
25. 中野. 青本. 金尾：電氣防蝕された高張力鋼の破壊の様相, 日本 熔接學會 79年 講演集, S. 916.
26. 遠藤吉郎：腐蝕疲労, 防蝕技術, Vol. 26. No. 10, pp. 583~592 (1977)
27. 駒井謂治郎：腐蝕疲労に關する最近の諸問題, 防蝕技術, Vol. 26. No. 10, pp. 594~605 (1977)
28. D.H. Jeon, W. N. Kim, E. H. Yi : A Study on the Corrosion Fatigue and Cathodic Protection of the High Tensile Strength Steel used for the Shipbuilding, Journal of the Corrosion Science society of Korea, Vol. 11, No. 2, pp. 9~16 June(1982)
29. 田大熙・金垣寧・金基準・李義鎬：造船用 高張力鋼材와 普通強度鋼材間의 熔接部位의 腐蝕疲労와 電氣防蝕에 관한 研究, 韓國 船用機關學會誌, 第 8 卷, 第 2 號, pp. 39~50 (1984)



30. K. Endo, K. Komai, K. Mimura : Cathodic Protection against Propagation of Corrosion Fatigue Cracks of Mild Steel, Bulletin of ISMIR, Vol. 21, No. 141, pp. 1565 ~ 1570 (1978)
31. E. Bardal, J. M. Songerfor : The Effect of Corrosion and Cathodic Protection on Fatigue Crack Growth in Structural Steel at Low Steel Intensity Ranges and Low Loading Frequency in artificial Sea Water, Proc. 7th Int. Congr. Met. Corrosion, Vol. 2, pp. 901 ~ 914 (1980)
32. R. Maahn : The Influence of Cathodic Protection on Crack Growth Rate in Fatigue of Steel in Sea Water, Intern. Cont. Steel in Marine Structures, Paris, Vol. ST 5-3, pp. 1 ~ 8 (1981)
33. 前掲書(22) p. 26
34. 前掲書(24) p. 320
35. 前掲書(25) S. 919
36. 前掲書(21) p. 138
37. A. Mendelson : Plasticity Theory and Application, p. 76, N.Y. (1970)
38. 遠藤右郎 : 腐蝕防食, 防蝕技術, 28, 10, 583 ~ 585 (1977)
39. 河本實 : 材料試験法, 朝倉書店, 128 (1970)
40. 西田正孝 : 応力集中, p. 184, 森北出版(1975)
41. 前掲書(24) p. 65
42. 田代隆 : 腐蝕と 腐蝕の管理, p. 265, 太田出版社(1979)
43. 川原正言、梶原正好 : 表面き裂の成長による疲労成長過程の關する論議的考察(日本造船學會論文集, Vol. 137, p. 9, 297 ~ 305 (1975))



# 오오스테나이트系 스테인레스鋼의 應力 腐蝕龜裂 進展特性과 그 抑制에 관한 研究

林 祐 助

## The Study on the Characteristics of the Stress Corrosion Cracking Propagation and its Protection for the Austenitic Stainless Steel

Un-joh Lim

### 目 次

Abstract	3.2 熔接部の 應力腐蝕龜裂 進展特性
記號 說明	3.2.1 熔接部の 應力腐蝕龜裂 發生 特性
第1章 序 論	3.2.2 熔接部の 應力腐蝕龜裂 進展 樣相
第2章 試驗片과 實驗方法	3.2.3 熔接部の 組織的, 機械的 및 電氣化學的 特性變化
2.1 試驗材料 및 試驗片	3.2.4 濃度 및 溫度가 應力腐蝕龜 裂에 미치는 影響
2.2 實驗裝置 및 實驗方法	3.3 應力腐蝕龜裂 抑制方法
2.2.1 應力腐蝕龜裂 進展機構를 위 한 實驗方法	3.3.1 應力腐蝕龜裂 抑制를 위한 陰極防蝕과 陽極防蝕 特性
2.2.2 熔接部の 應力腐蝕龜裂 進展 特性을 위한 實驗方法	3.3.2 母材에 있어서의 防蝕電流密度에 따른 應力腐蝕龜裂 抑制特性
2.2.3 應力腐蝕龜裂 抑制를 위한 實驗方法	3.3.3 熔接部에 있어서의 防蝕電流密 度에 따른 應力腐蝕龜裂 抑 制特性
第3章 實驗結果 및 考察	第4章 結 論
3.1 應力腐蝕龜裂 進展機構	參考文獻
3.1.1 應力腐蝕龜裂 發生 및 進展에 따른 電氣化學的 特性變化	
3.1.2 電氣化學的 特性變化를 기초 로 한 應力腐蝕龜裂 進展機 構의 圖式化	