

## 造船用 高張力鋼材와 普通強度鋼材間의 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕에 關한 研究

田大熙\* · 金垣寧\* · 金基俊\* · 李義鎬\*\*

A Study on the Corrosion Fatigue and Cathodic Protection of the Welded  
Zone between High Tensile Strength Steel and General Strength  
Steel used for the Shipbuilding

D. H. Jeon · W. N. Kim · K. J. Kim · E. H. Yi

### Abstract

The plane bending corrosion fatigue test was performed on the welded zone between SM58 steel plate and SM41 steel plate jointed with submerged arc welding in the air and in the natural sea water with various conditions

The main results obtained from the test are summarized as follows:

- 1) The welded zone of the steel plates has the lowest impact strength and the highest electrode potential, but the hardness was mediate of SM58 base and SM41 base.
- 2) The cathodic protection of the welded zone was also effective for the plane bending corrosion fatigue, and the optimum protection potential of the welded zone was  $-1,000\text{mV SCE}$ .
- 3) The corrosion fatigue strength under the various stress conditions of the steel plate could be estimated and also the require safety factors on the design could be obtained from the plane bending fatigue limit diagram.

### Nomenclature(記號說明)

$C_{eq}$  : Carbon Equivalent(炭素當量)  
 $P_{CM}$  : Composition of Weld Cracking Sus-  
ceptibility(熔接龜裂感受性組成)  
 $\alpha$  : 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(切欠係數)  
 $\eta$  : Notch Sensitivity(應力集中感度)  
 $S_f$  : Safety Factor(安全率) $=\sigma_{TS}/2\sigma_a$   
 $\sigma_{max}$  : Maximum Stress(最大應力),  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_{min}$  : Minimum Stress(最少應力),  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_m$  : Mean Stress(平均應力),  $\text{kg/mm}^2$   
 $R$  : Ratio of Stress(應力比) $=\sigma_{min}/\sigma_{max}$   
 $\sigma_a$  : Stress Amplitude(應力振幅),  $\text{kg/mm}^2$

\* 正會員, 韓國海洋大學

\*\* 正會員, 海軍士官學校

- $\sigma_0$  : Fatigue Limit(疲勞限度),  $\text{kg/mm}^2$
- $\sigma_{yp}$  : Yield Strength(降伏強度),  $\text{kg/mm}^2$
- $\sigma_{TS}$  : Tensile Strength(引張強度),  $\text{kg/mm}^2$
- $\sigma_s$  : Shearing Stress(剪斷應力),  $\text{kg/mm}^2$
- $\rho$  : Notch Root Radius(노치 루우트 曲率半徑), mm
- $t$  : Notch Length(노치 길이), mm
- BM : Base Metal(母材部)
- HAZ : Heat Affected Zone(熱影響部)
- WM : Weld Metal(熔着部)
- $N_f$  : Number of Cycles to Fracture (破壞될때까지의 cycle數)
- S : Repeated Plane Bending Stress(反復平面 굽힘 應力),  $\text{kg/mm}^2$
- $x$  : Length to the Notch from Fixed Point of Specimen(試片固定部에서 노치까지의 거리), mm
- $l$  : Length to the Stress Point from Fixed Point of Specimen(試片固定部에서 應力附加點까지의 거리), mm
- Z : Modulus of Section(斷面係數)
- E : Young's Modulus(영 率),  $\text{kg/mm}^2$
- $h$  : Thickness of Specimen(試片 두께), mm
- I : Moment of Inertia of Area(斷面 2次 모멘트)

- WWNNA Specimen : Welded Notched Alternative Stress Specimen(in the air)
- WWNNP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress Specimen(in the air)
- WWNNAOP Specimen : Welded Notched Alternative Stress No-Protected Specimen(in the sea water)
- WWNNPOP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress No-Protected Specimen(in the sea water)
- WWNNACP Specimen : Welded Notched Alternative Stress Cathodic Protected Specimen(in the sea water)
- WWNNPCP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress Cathodic Protected Specimen(in the sea water)
- WWNNPP : Welded Notched Partial Pulsative Stress Specimen(in the air)
- WWNNPPPOP Specimen : Welded Notched Partial Pulsative Stress No-Protected Specimen(in the sea water)
- WWNNPPCP Specimen : Welded Notched Partial Pulsative Stress Cathodic Protected Specimen(in the sea water)

## 1. 序 論

從來까지造船用鋼材로는 거의 例外 없이 40  $\text{kg/mm}^2$ 級의 熔接構造用鋼이 使用되어 왔었다. 그러나 近年 부터는 船舶의 大型化 趨勢에 따라 重量의 輕減化 내지 資材와 建造費의 節約化 등의 見地에서 50 $\text{kg/mm}^2$ 級의 高張力鋼材가 造船用鋼材의 主材로 採擇되는 새로운 傾向이 생겨났으며, 그 需要가 점차로 增加되고 있다.<sup>1), 2)</sup>

高張力鋼材는 一般의 熔接性<sup>3)</sup>이 不良하고 腐蝕疲勞, 應力腐蝕龜裂, 水素脆化 및 黃化物龜裂등<sup>4-7)</sup>이 생기기 쉬운 缺陷이 있으며, 특히 海水中과 같은 腐蝕性雰圍氣에서 使用될 경우에는 必然的으로 船體를 陰極防蝕(電氣防蝕)하여야 하므로 이 때 發生되는 水素가스에 의한 障害<sup>8)</sup>도 또한 問題가 된다.

따라서 高張力鋼材를 造船用으로, 특히 外板

用으로 使用할 때에는 腐蝕疲勞破壞의 念慮가 많으므로 그 高強度를 重視하면 疲勞龜裂이 생기기 쉽고, 疲勞龜裂을 重視하면 過度設計되기 쉬운 形便에 놓이게 된다. 또한 船舶은 莫大한 財産을 危險한 大洋에서 運行하므로, 그 安全性이 특히 重要視되나, 이 點에 치우치다 보면 船舶建造費가 過度하게 높아진다. 그러므로 이러한 高張力鋼材를 船舶用으로 使用하러 할 때는 그 各部의 負荷應力의 特性에 따라 適正許容應力을 決定해서 航海의 安全性과 船舶의 建造費의 兩者를 平衡시키는 點에서 設計하여야 한다. 따라서 大型船을 建造할 때는 이러한 見地에서 船腹部와 主甲板과 같이 甚한 反復應力을 받는 部分은 SM50級 高張力鋼材가 主로 使用되고, 기타 部分과 裝備部分 등에는 SM41級의 普通強度鋼材가 많이 使用되고 있다.

大型船을 建造할 때는 上述한 바와 같이 高負荷面에서 高張力鋼材를 많이 使用하고 있으나, 船體의 部分에 따라서는 經濟的 見地에서 高張力鋼材와 普通強度鋼材를 熔接하는 部分도 많이 생긴다. 熔接部分은 元來 熔接缺陷이 생기기 쉽고 熱應力도 殘存하는 곳이며, 특히 異強度材를 서로 熔接한 곳은 應力集中도 일어나기 쉬우므로 이러한 船舶이 運航될 때는 船體의 反復應力과 海水의 腐蝕性的 影響도 겹쳐서 熔接部分이 특히 腐蝕疲勞되기 쉽다.

鋼材間의 熔接部에 대한 各種 試驗資料는 많이 發表되어 있고, 腐蝕疲勞에 關한 基礎的인 研究結果<sup>9~19)</sup>도 많이 發表되어 있다. 그러나 實用條件下에서 調査된 文獻은 적으며, 특히 陰極防蝕을 適用한 研究結果는 不過 數篇<sup>20~25)</sup>밖에 찾아볼 수 없다. 또한 後者의 研究들도 各各의 獨特한 條件에서 調査된 單的인 것일 뿐, 船舶과 그 運航의 條件을 考慮해서 研究된 것들은 없다.

本 研究는 筆者들이 實用狀態에 가까운 條件下에서 高張力鋼材間의 熔接部에 대해서 腐蝕疲勞強度와 이에 대한 電氣防蝕의 效果<sup>25)</sup>를 調査한데 이어서, 금번에는 高張力鋼材와 普通強度鋼材間의 熔接部에 대해서 같은 要領으로 研究하였다. 즉 高張力鋼材와 普通強度鋼材간의 熔接部에 대해서 機械的性質과 電氣化學的 特性을 調査하는 한편, 大氣中 및 海水中에서 특히 海水中的의 여러가지 電氣防蝕條件下의 여러가지 應力條件에서 腐蝕疲勞試驗을 實施해서 S-N<sub>f</sub>線圖에 의해서 그들 條件下의 腐蝕疲勞限度를 求하

고, 이들의 資料에 의해서 腐蝕疲勞限度線圖를 作成해서 造船設計時에 採擇하게 될 各種 應力條件과 防蝕條件에 따라서 採用 可能한 許容應力의 限界를 提示하였다.

## 2. 試驗片과 實驗方法

### 2.1. 供試鋼과 試驗片

이 試驗에 使用된 供試鋼材는 두께 6mm의 50 kg/mm<sup>2</sup>級과 40kg/mm<sup>2</sup>級の 國產 熔接構造用 壓延鋼材이다. 이 材料는 化學的組成과 機械的性質이 Table 1 및 2와 같이 對比되므로 前者는 韓國工業規格(KS) SM58(高張力鋼)鋼이나 韓國船級協會規格(KR) RD46~RE46鋼의 相當品이고, 後者는 KS SM41(普通強度鋼)鋼이나 KR 軟鋼 RD鋼의 相當品임을 알 수 있다(以下前者를 SM58鋼, 後者를 SM41鋼이라 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 SM58鋼片과 SM41鋼片을 서브머지드 아아크熔接(Submerged Arc Welding)으로 맞대기熔接을 兩面에서 하여, 다음의 規格試驗片을 만들었다. 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 確實하게 熔接되기 때문이다.

Table 1. Chemical Compositions of Steel (%)

kinds of Steel	C	S <sub>i</sub>	M <sub>n</sub>	P	S	C <sub>eq</sub> *	P <sub>CM</sub> **	Remarks
SM 58 BM	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 RA46-RE46	<0.18	<0.05	0.9-1.6	<0.04	<0.04	<0.45	<0.261	Killed Steel
SM41 BM	0.20	0.31	0.65	0.04	0.007	0.308	0.242	Specimen
KS SM41	<0.22	<0.35	0.6-1.2	<0.040	<0.040	<0.38	<0.26	
KR RD	<0.21	<0.35	0.6-1.40	<0.050	<0.050	<0.37	<0.261	
Weld Metal	0.16	0.31	1.10	0.015	0.008	0.343	0.228	SM58-SM41

\*C<sub>eq</sub> (%) = C + M<sub>n</sub>/6, \*\*P<sub>CM</sub> = C + S<sub>i</sub>/30 + M<sub>n</sub>/20

Table 2. Mechanical properties of steels (20°C)

Kinds of Steel	Yield Point (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Impact* Strength (kg-m)	Remarks
SM58 BM	55.18	68.55	27.1	4.95	Specimen
KS SM 58	>47	58-73	<19	>4.8	
KR RA46-RE46	>46	60-72	>16	>4.8	
SM 41 BM	29.5	42.7	27.6	4.5	Specimen
KS SM 41	>25	41-52	<19	>4.8	
KR RD(1)	>24	41-50	>22	>4.8	
Weld Metal	48.29	58.65	18	4	SM 58-SM41

\*Charpy Impact Test.

Table 3. Welding Condition (Submerged Arc Welding)

Welding Rod Wire (φ : mm)	Face	Voltage (V)	Ampere (A)	Speed (cm/min)	Heat** Impact (kj/cm)	Remarks
AW S-F-EH-UL 36* (3.2)	Face	30-32	425-450	50	17.28	DAIDEN GI-BS Submerged Arc Welder
	Back Face	32	525	55	18.327	

\*0.15C-1.52Mn-0.52 Si-0.013 P-0.015 S

$$** \text{ Heat Impact} = \frac{60 EI}{V} \text{ (J/cm)}$$

(V : 용접 속도, cm/min.)

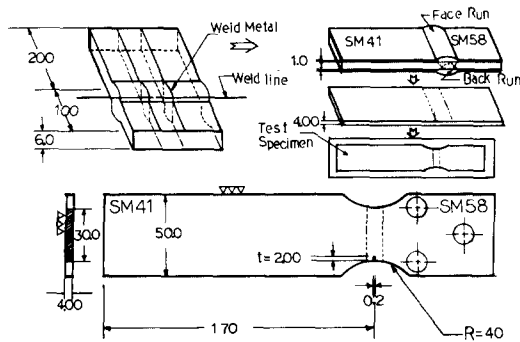


Fig. 1. Dimensions of Test Specimen (Unit:mm)

Table 3은 이 試驗片의 熔接條件이다.

規格試驗片의 型과 寸수는 熔接試驗片의 兩面을 各 1mm씩 平削해서 4.00±0.01mm 두께로 만든 다음에 金屬平板의 平面굽힘疲勞試驗法(JIS-2275-1978)의 1-30號 試驗片으로 加工하였으며, 그 試驗片의 試驗部에는 다시 幅 0.25mm, 길이 2.00mm의 노치(Notch)를 加工했다. 그리고 이

試驗片表面을 샌드 페이퍼(Sand Paper) 1200番까지로 研磨하고, 알콜 및 아세톤으로 脫脂한 다음에 試驗하였다.

Fig. 1은 同 試驗片의 型과 寸수이다.

## 2.2. 熔接部의 機械的 및 組織的인 特性變化

Fig. 2(A)는 試驗片의 熔接部位에 따라 샤르피(Charpy) 衝擊試驗을 한 結果이고, Fig. 2(B)는 同部位에 대해서 硬度分布와 電極電位分布(5% HNO<sub>3</sub>+1% FeCl<sub>3</sub> 混液을 滴下해서 飽和칼로멜 電極으로 測定)를 測定한 結果이다. 또 Photo. 1은 同 試驗片의 各 熔接部位에 대해 5% 나이탈(Nital)로 腐蝕시킨 後의 200倍의 顯微鏡組織寫眞이다.

이들의 結果를 綜合하면 熔着部가 最低의 衝擊強度를 나타내고 硬度는 中間程度이며, SM 58鋼쪽이 SM41鋼쪽 보다 衝擊値와 硬度가 더 높다. 또 電極電位는 熔着部가 가장 貴하고 SM

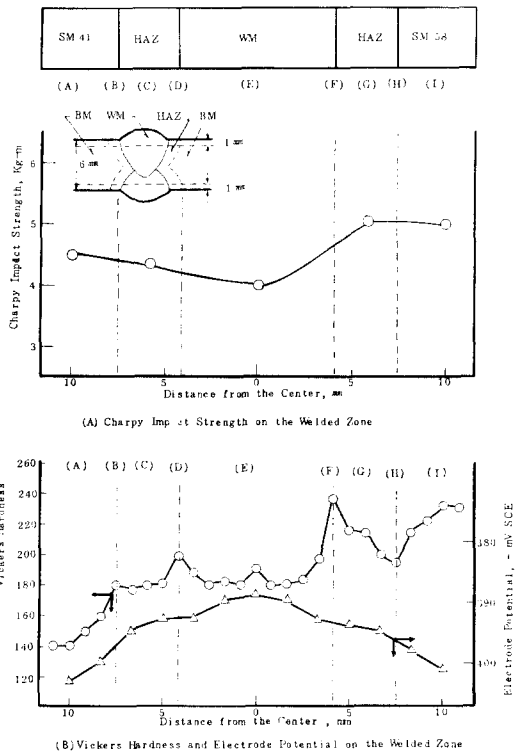


Fig. 2. Mechanical Properties and Electrode Potentials on the Weld Zone of SM58 and SM41 Steel

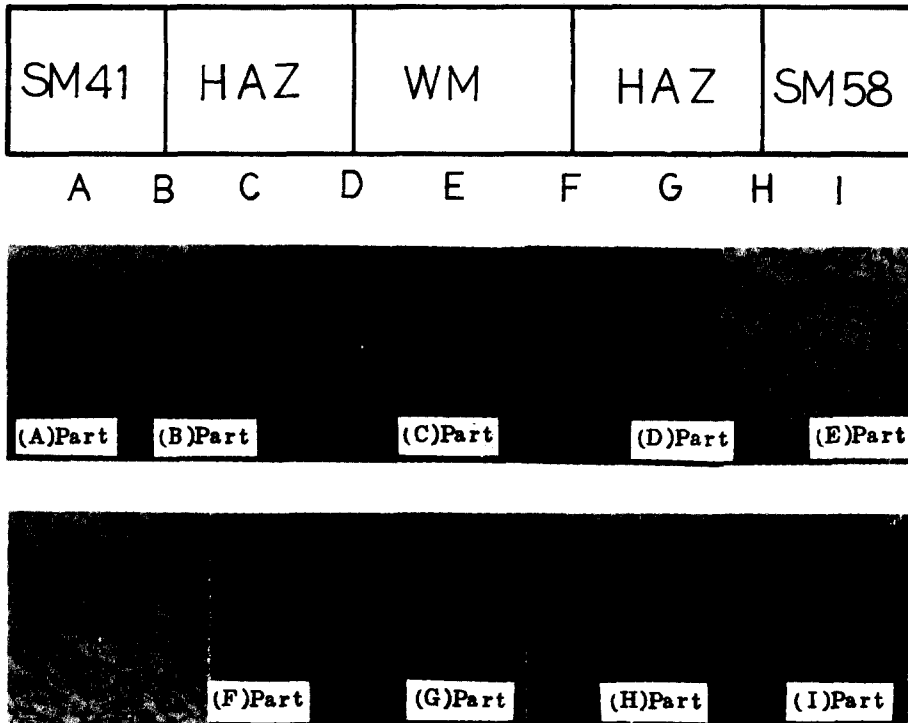


Photo 1. Microstructures of Weld Zone between SM58 and SM41 Steel.

58鋼쪽이 SM41쪽 보다 若干 더 貴하다. 그러나 SM58鋼쪽의 母材와 熱影響部間에는 低硬度部가 存在한다. 熔着部의 電極電位가 가장 높은 것은 熔接棒의 電位가 母材보다 貴한 材料를 使用한 結果로 생각되고, SM58鋼쪽의 低硬度部는 顯微鏡組織으로 보아서 熔接時의 熱影響에 의해서 Ferrite와 Pearlite의 微細한 均質組織이 發達되기 때문이라고 생각된다. 熔接部位의 電位가 貴하다는 것은 防蝕의 面에서 바람직한 것이다.

### 2.3. 疲勞試驗裝置

이 研究에 使用된 疲勞試驗裝置는 平面굽힘式으로서 Fig. 3과 같이 偏心器에 의해 任意의 一定한 平面굽힘應力(Plane Bending Stress)을 反復해서 加할 수 있도록 되어 있을 뿐만 아니라, 變速이 可能하고, 4個의 試驗片에 대해 同時に 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 電氣防蝕을 하면서도 疲勞試驗을 할 수 있도록 되어 있다. 이

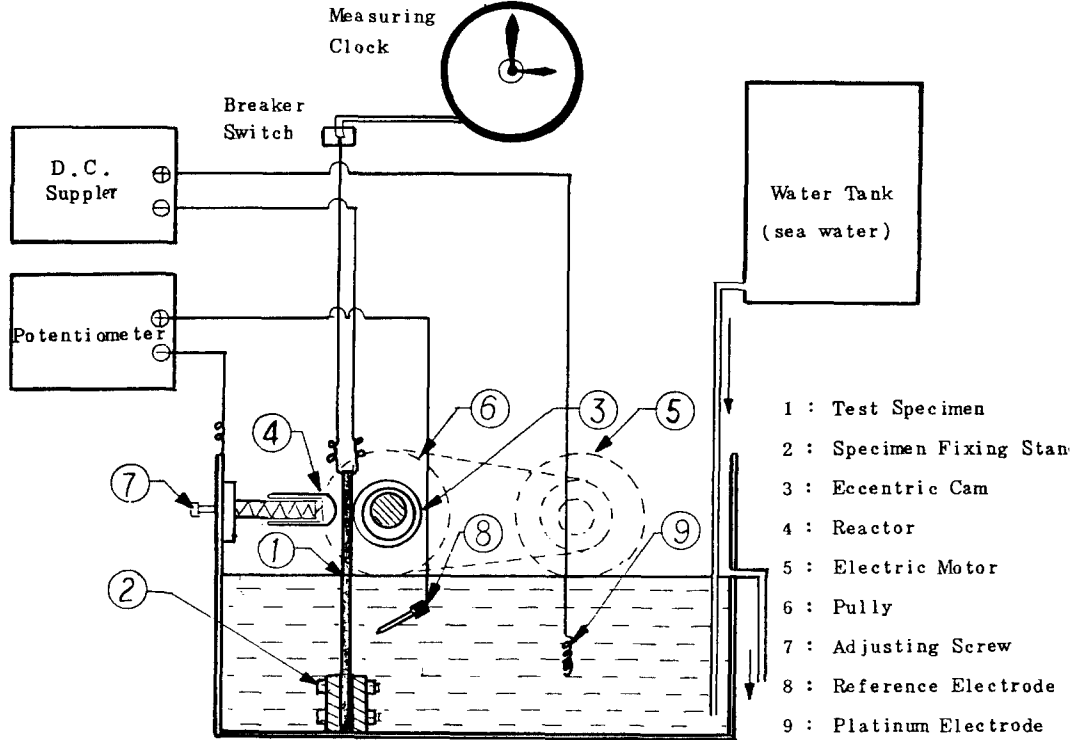


Fig. 3. Schematic Diagram of Plane Bending Fatigue Tester

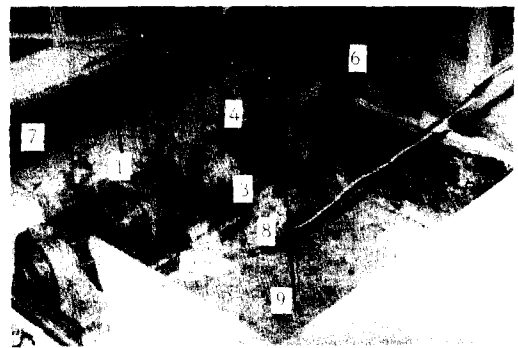
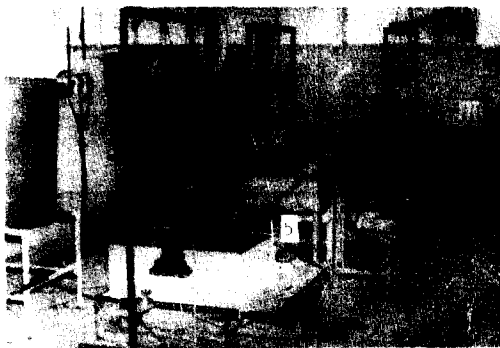


Photo 2. Plane Bending Fatigue Tester.

러한 裝置는 3臺 製作하였으므로 12個의 試驗片을 同時에 試驗할 수 있다.

電氣防蝕에는 50V D.C. 2A의 定電壓裝置와 Pb-Ag系 不溶性陽極을 使用하였으며, 電極電位の 測定에는 飽和칼로멜電極(SCE)과 高抵抗電壓計(內部抵抗:  $10^7 \Omega/V$ )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해서 試片이 破斷되는 순간까지의 時間을 測定해서 計算하였다.

이 試驗機의 試片固定部 및 水槽內部는 亞鉛프라이머(Zinc Primer)를 2回 塗裝한 後, 絶緣性 에폭시타알塗料를 2回 塗裝해서 防蝕電流가 試片에 集中하도록하였다.

Photo 2는 本 試驗裝置의 配置圖이다.

#### 2.4. 疲勞試驗條件

이 研究에서 試驗片의 굽힘應力疲勞試驗條件은 다음과 같다.

(1) 實際 船舶의 船體는 파도 등에 의해서 每

分當 6~12回(0.1~0.2Hz)의 片振反復平面굽힘 應力을 받는 부분이 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 反復굽힘速度는 實驗하기에 너무 느린 속도이므로, 이 研究에서는 850 CPM (14.2Hz)으로 加速해서 疲勞試驗을 實施하였다. 따라서, 이러한 加速實驗에서 얻어진 疲勞限度(疲勞限界強度)는 實際보다 약간 높을 것으로 豫想된다.

(2) 船體鋼板을 熔接할 때는 그 熔着部에 熔接缺陷(微細龜裂 또는 未接合部 등)이 생기기 쉽고, 이 곳에 應力集中이 일어날 것으로 假想하여 試驗片의 試驗部에 幅 0.25mm, 길이 2.00mm의 노치(Notch)를 加工해서 應力集中이 일어나는 條件에서 實驗하였다. 이 경우에 大氣中에서 試驗片의 疲勞強度는 노치가 없는 것과 있는 것에서 各各  $\sigma_0=16.5\text{kg/mm}^2$ ,  $\sigma_0'=16.0\text{kg/mm}^2$ 이었고, 노치루우트(Notch Root)部の 曲率半徑이 0.10mm程度였으므로, 이 試驗片의 노치는 다음과 같은 微細龜裂에 相當한다.

( $t$ : 노치 길이, mm)

• 形狀係數:  $\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_n = 1 + 0.788 \sqrt{t/\rho}^{26)}$   
 $= 1 + 0.788 \sqrt{2/0.1} = 4.524$   
 .....①

• 노치係數:  $\beta = \sigma_0 / \sigma_0' = 16.5 / 16.0 = 1.0313$   
 .....②

• 應力集中感度:  $\eta = (\beta - 1) / (\alpha - 1)$   
 $= 0.0313 / 3.524$   
 $= 0.00888 = 0.888\% \dots\dots ③$

(3) 海水中에서 船體는 電氣防蝕하는 것이 通

例이므로 試驗片은 自然電位(無防蝕) 및  $-800\text{mV}$ ,  $-1,000\text{mV}$ ,  $-1,200\text{mV}$ ,  $-1,400\text{mV}$ (SCE)의 各 電位로 分極시켜서 各 電氣防蝕狀態下에서 疲勞限度를 測定 比較하였고, 大氣中의 疲勞試驗結果와도 比較하였다.

(4) 腐蝕液은 Table 4와 같은 天然海水를 使用하였으며, 試驗中 물의 蒸發 및 鹽素 가스의 發生 등을 考慮하여 一定한 速度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  $10\sim 25^\circ\text{C}$ 의 範圍였다.

(5) 疲勞試驗은 連186時間 以上の 期間을 通해서  $10^7$ 回까지 反復應力을 繼續 加해서 굽힘疲勞 시켜도 破斷되지 않는 上限值의 疲勞強度를 測定해서, 試驗片이 그 負荷에서 破斷되지 않는 所謂 疲勞限度強度로 看做하는 高사이클 疲勞強度를 採擇하였다. 實驗中의 試驗中斷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( $10^7$ 回 時間의 約 1%)을 超過할 때에는 再試驗하였다.

(6) 疲勞試驗에서 굽힘應力  $\sigma_b$ 는 다음과 같이 求하였다. 即 굽힘變形量  $\delta = pl^3/3EI$ 에서 荷重  $p = 3EI\delta/l^3$  이므로

$$\sigma_b = M/Z = p(l-x)/Z = 3EI\delta(l-x)/Zl^3$$

또  $Z = \frac{2I}{h}$ 를 代入하면

$$\sigma_b = 1.5 E\delta h(l-x) / l^3 \dots\dots\dots ④$$

Young's Modulus  $E$ 는 鐵鋼에 대해서 普通  $2.18 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$ 의 값을 使用하나, 이 값은 鋼種에 따라 다를 것이 豫想되므로 試驗機에 試片

Table 4. Qualities of Sea Water for the Experiment

Hardness (ppm CaCO <sub>3</sub> )	M Alkalinity (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Chloride (ppm Cl <sup>-</sup> )	Specific Resistance (Ω-cm)	Specific Weight	Temp. when water Test (°C)
4,500	85	16,800	26.7	1,025	18

을 固定하고 여러가지 負荷下에서 試驗部에 附加되는 應力을 스트레인게이지로 測定하여 本결과 上記 式에서 計算되는 값의 90%程度로 測定되었다. 그러므로 ④式을 다음과 같이 補正하였다.

$$\sigma_b = 1.35 E\delta h(l-x) / l^3 \dots\dots\dots ⑤$$

### 3. 測定結果와 考察

#### 3.1. 疲勞龜裂의 傳播와 破壞舉動

Photo. 3(A)는 試驗片의 노치部(左上端)에서 龜裂이 發生해서 疲勞破壞된 表面을 表示하다.

大氣中の 경우나 海水中에서 電氣防蝕한 경우는 同圖 ①②와 같이 破斷線이 單順한 線狀이나 海水中에서 無防蝕의 경우는 同圖 ③④와 같이 曇니와 같은 날카로운 異線狀이다. 이것은 無防蝕 試驗片의 破斷線 兩側表面에 작은 蝕孔이 많이 생긴 點으로 보아서 ①②의 경우는 純 機械的인 疲勞破壞이나 ③④의 경우는 疲勞와 腐蝕의 兩者가 相乘作用함으로써 생긴 現象으로 보여진

다. 또, 顯微鏡寫眞으로 보면 破斷線이 어느 경우나 粒內인가 粒界인가의 區分은 안되지만 前者는 微細龜裂이 尠히 없는 單純線이나 後者는 微細龜裂이 많은 多岐線이다.

Photo. 3의 (B)는 試驗片의 疲勞破斷面을 보여 주고 있으며, 疲勞破壞部와 剪斷破壞部가 明確히 區分된다. 그러므로 試驗片의 疲勞破斷의 進行機構는 Fig. 4와 같이 表示된다.

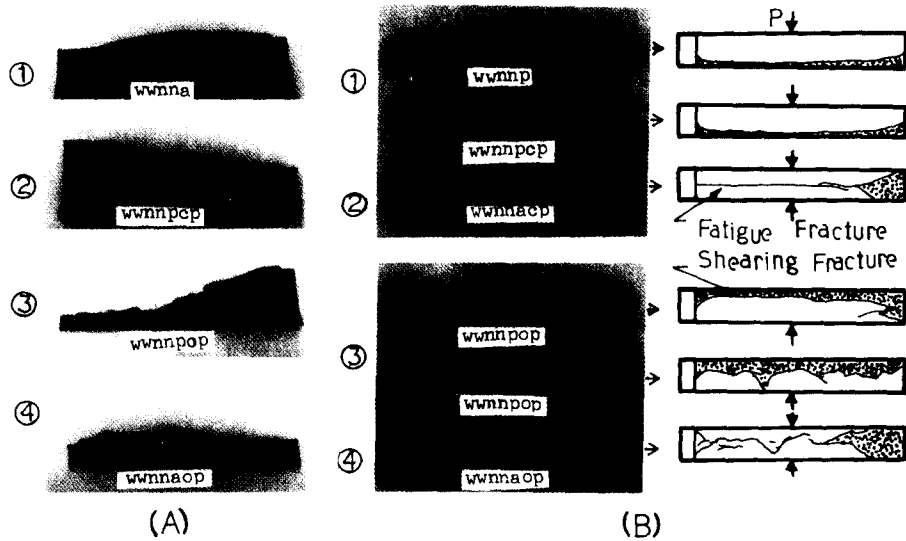


Photo 3. Cross-Sectional Surface of Cracked and Fractured Specimen

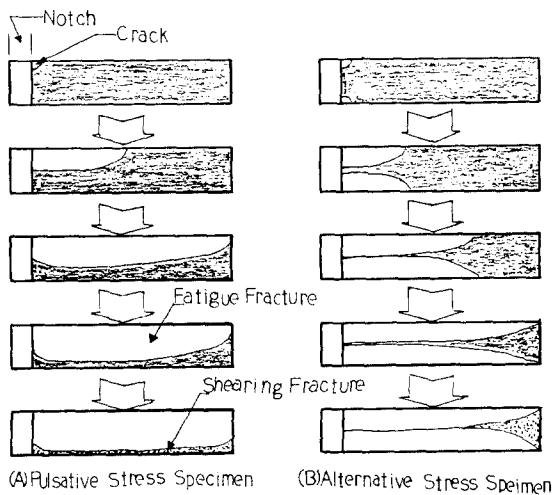


Fig. 4. Macrographs of Crack Development in Side Direction

### 3.2. 疲勞限度強度에 미치는 陰極防蝕의 영향

Fig. 5~7는 SM50鋼과 SM41鋼의 熔接試驗片에 대해서 空氣中 및 海水中의 無防蝕과 陰極防蝕의 여러가지 條件下에서 各各 兩振, 片振 및 部分片振으로 勞疲시켰을 때 實測한 S-N<sub>r</sub>線圖를 表示한다. Fig. 8은 Fig. 5 및 6의 資料에 의해서 腐蝕疲勞限度에 미치는 陰極防蝕의 影響을 表示한 것이며, 參考로 SM58鋼間의 熔接試驗片에서 實測한 前報의 片振疲勞限度強度도 併記해서 對比시켰다.

이들의 實測結果에 의하면 海水中의 試驗片에 대해서 陰極防蝕하면 兩振, 片振 및 部分片振의 어느 경우에도 疲勞限度強度가 많이 增加되나 陰極防蝕電位가 높을수록 S-N<sub>r</sub>直線의 기울기가 작아지므로 高負荷의 應力下에서는 時間強度가



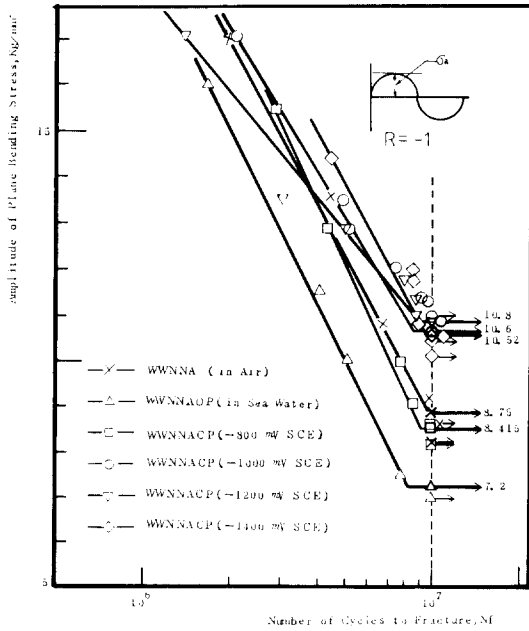


Fig. 5. Comparison of S-Nf Diagram of Alternative Stress Fatigue Test.

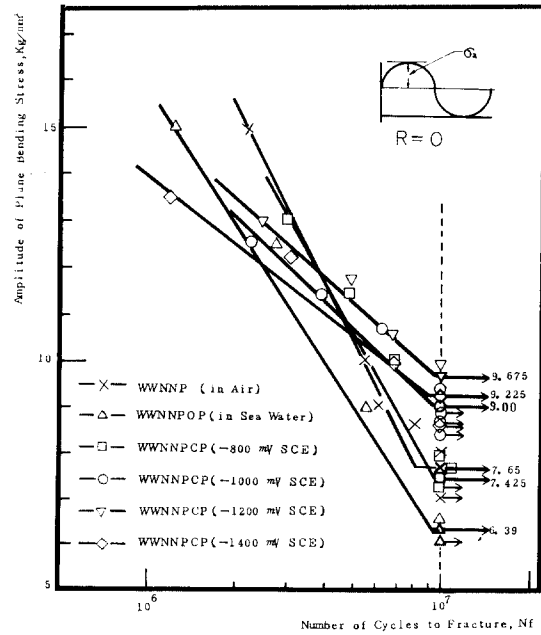


Fig. 6. Comparison of S-Nf Diagram of Pulsative Stress Fatigue Test.

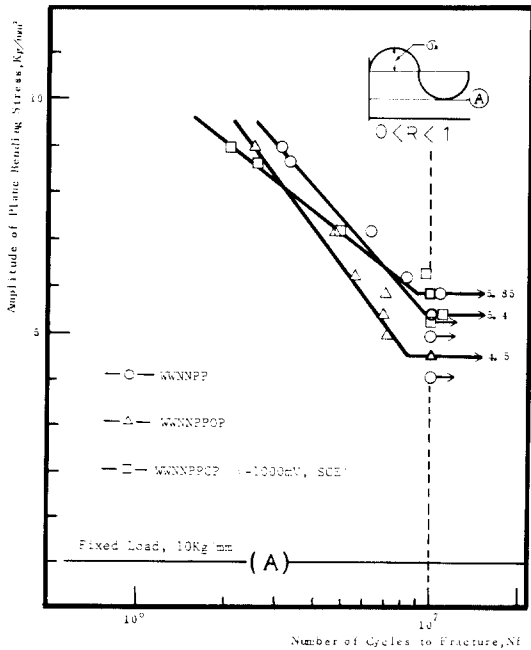


Fig. 7. Comparison of S-Nf Diagram of Partial Pulsative Stress Fatigue Test.

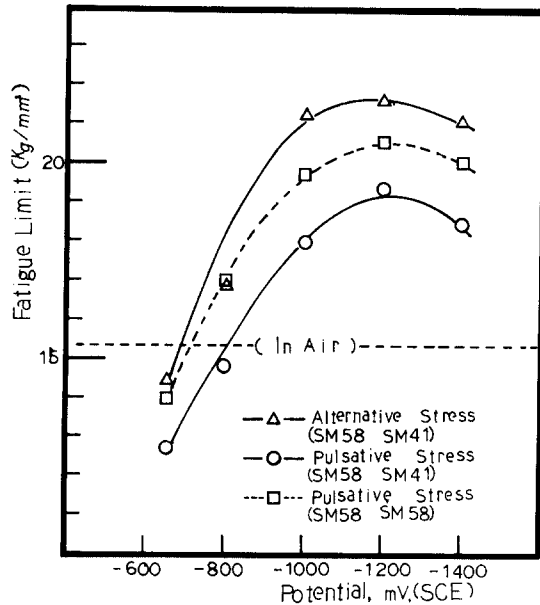


Fig. 8. Comparison of Fatigue Limit Strength in each Cathodic Protection Condition.

比較의 낮아진다. 또 Fig. 8에 의하면 試驗片을 陰極防蝕하던  $-800\text{mV(SCE)}$  程度로 防蝕해도 兩振이나 片振의 어느 경우도 大氣中の 疲勞限度強度와 對等한 程度로 높아지고,  $-1,200\text{mV}$

(SCE)까지 防蝕하면 最高強度에 到達하나  $-1,000\text{mV(SCE)}$ 의 경우와 大差가 없으며,  $-1,400\text{mV(SCE)}$ 로 防蝕하면 疲勞限度가 오히려 低下된다. 왜냐하면, 海水中の 試驗片에 대해서 陰極防蝕하지 않았을 때는 機械的인 疲勞와 電氣

化學的인 腐蝕이 相乘作用해서 加速的으로 腐蝕 疲勞시키나 이것을 電氣防蝕하면 마치 Cavitation을 電氣防蝕하는 것과 같이 腐蝕作用이 없어 지고 機械的인 作用만이 남으므로 腐蝕疲勞가 많이 緩化되는 것으로 생각된다. 또 陰極防蝕하면 被防蝕面에 水素被膜이 形成되고 이것이 鋼材内部로 浸透해서 水素脆性이 일어날 것이 念慮된다. 그러나 實測結果에 의하면  $-1,400\text{mV(SCE)}$  程度로 防蝕할 때는 水素脆性의 影響으로 疲勞 限度強度가 低下되는 것 같으나  $-1,000\text{mV(SCE)}$  程度로 防蝕할 때는 그러한 脆性이 나타나지 않고 腐蝕疲勞限度도 거의 最高值까지 增加되고 있다. 또 海水中の 船體의 實際防蝕基準電位가  $-850 \sim -950\text{mV(SCE)}$ 이므로 船體電位를  $-800\text{mV} \sim -1,000\text{mV(SCE)}$ 로 維持한다는 것은 船體의 腐蝕防止 뿐만 아니라 腐蝕疲勞防止를 爲해서로 適用하여야 할 電位라고 생각된다.

### 3.3. 腐蝕疲勞限度線圖

Fig. 9는 本 熔接試驗片에 대해서 여러가지 條件下에서 實測한 Fig. 5~7의 疲勞限度強度에 의해서 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

Table 5. Safety Factors( $S_f = \sigma_{TS}/2\sigma_a$ ) of SM58-SM41 Welded Parts.

Protection Potential, mV SCE	Alternative Stress (Fatigue Limit, kg/mm <sup>2</sup> )	Pulsative Stress (Fatigue Limit, kg/mm <sup>2</sup> )	Partial Pulsative Stress at Fixed Load 10kg/mm <sup>2</sup> (Fatigue Limit, kg/mm <sup>2</sup> )
-625(No Protection)	4.073(14.4)	4.95(12.78)	6.52 (9.9)
-800(Cathodic Protection)	3.45(16.83)	3.95(14.85)	—
-1,000(Cathodic Protection)	2.77(21.2)	3.29(18.8)	5.01(11.7)

側이 各各 그 腐蝕·防蝕條件下에서 試驗片이 腐蝕疲勞하지 않는 安全區域이다.

이 腐蝕疲勞限度線圖가 表示하는 限界強度로 設計한다면 이 試驗片의 熔着部의 實測引張強度가  $58.65\text{kg/mm}^2$ 이므로 그 安全率은 Table 5와 같이 된다. 實際 鋼船의 外板 設計時 鋼材의 設計強度는 SM41鋼에 대해서  $10\text{kg/mm}^2$ , SM58鋼에 대해서  $15\text{kg/mm}^2$ 을 採用하고 있고, 이때의 安全率은 約 4이다. 이 安全率은 Table 5로 볼 때 이 外板이 設計強度는 無防蝕兩振腐蝕疲勞時의 값이다. 그러나 SM58鋼과 SM41鋼을 連接하는 境遇의 安全率은 Table 5의 값이 加速試驗의

값과 있으며, 作圖要領은 다음과 같다.

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

② 片振은 平均應力과 振幅이 同一하고 應力比가 零인 振動이므로, 各 條件下에서 實測된 片振腐蝕疲勞限度의 應力振幅을 座標原點에서 橫軸에 대해서  $45^\circ$ 되게 그은 線상에 잡는다.

③ 部分片振은 一定한 負荷를 미리 加한 狀態에서 片振시키는 것이다. 그러므로  $10\text{kg/mm}^2$ 의 負荷를 加한 後의 各 條件下에서 實測한 部分片振腐蝕疲勞限度의 應力振幅은, 平均應力이  $10\text{kg/mm}^2$ 이고 應力振幅이 零인 點에서 橫軸에 대해  $45^\circ$ 되게 그은 直線상에 잡는다.

④ 平均應力을 表示하는 橫軸상에 剪斷強度( $\sigma_s$ )를 잡는다. 이 剪斷強度는 最大剪斷에너지理論<sup>27)</sup>에 의거  $\sigma_s = 0.577\sigma_{yp}$ 로 計算하며, 試驗片의 試驗部(熔着部)의 降伏強度  $\sigma_{yp}$ 가  $48.29\text{kg/mm}^2$ 으로 實測되었으므로 剪斷強度는  $27.86\text{kg/mm}^2$ 으로 計算된다.

⑤ 以上の 4단계에서 잡은 各 測定點을 各 腐蝕·防蝕條件別로 連結한다. 이 各 連結線의 下

結果라 하더라도 各 部位의 負荷條件에 따라서  $3.5 \sim 4.0$ 을 擇해도 充分하다는 것을 알 수 있다.

따라서 Fig. 9의 腐蝕疲勞限度線圖는 SM58鋼과 SM41鋼을 熔接해서 海水中の 여러가지 條件下에서 使用하는 경우에 採擇하게 될 設計強度는 얼마로 하고, 그 때 安全率은 얼마이며, 또 適正防蝕電位는 얼마로 할 것인가 등을 決定하는데 實用 指標로 利用할 수 있겠다.

## 4. 結 論

SM58鋼材와 SM41鋼材를 서브머더지드 아아

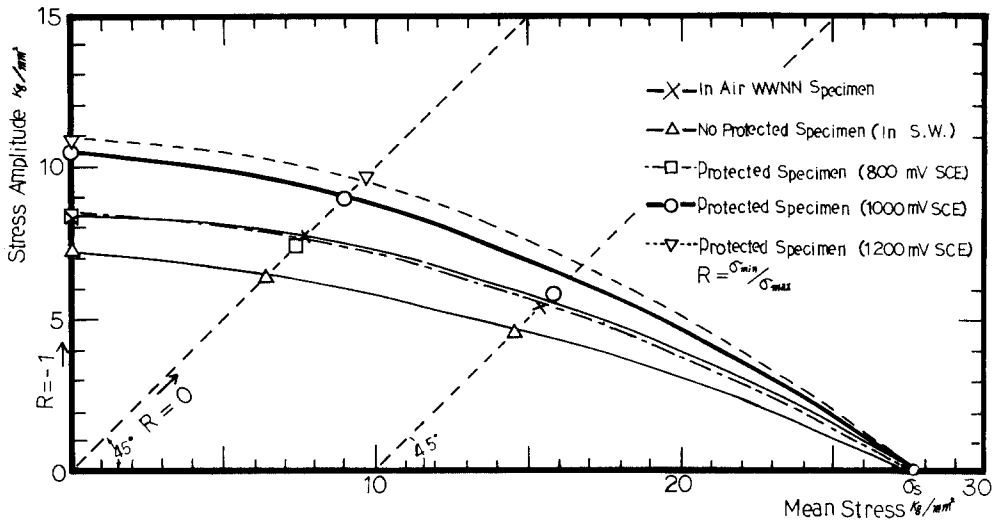


Fig 9. Plane Bending Fatigue Limit Diagram of Welded Zone of SM58 and SN41 Steel Plate.

크 熔接으로 連接한 熔着部에 대해서 熔接缺陷을 考慮하고 空氣中과 天然海水中的의 여러가지 條件을 考慮해서 實施한 平面굽힘疲勞試驗의 結果에서 다음의 結論을 얻었다.

- (1) 이 異鋼材의 熔接部位에서 熔着部가 衝擊強度가 가장 낮으나 電極電位는 가장 貴하고 硬度는 中位이다.
- (2) 天然海水中에서 이 異鋼材의 熔接部位를 陰極防蝕하면 無防蝕時 보다 腐蝕疲勞限度強度가 많이 높아진다. 그 強度는 -800mV SCE로 防蝕할 때 大氣中과 거의 같은 強度까지 上昇하고, -1,200mV SCE로 防蝕하였을 때 最高值를 나타내나 -1,000mV SCE로 防蝕할 때와 別差가 없다.
- (3) 이 腐蝕疲勞限度線圖는 SM58鋼과 SM41鋼을 熔接해서 海水中的의 여러가지 條件下에서 使用할 때 採擇하게 될 設計強度를 決定하는데 實用指標로 利用될 수 있다.

〈謝 禮〉

本 研究에 研究費를 支援하여 주신 韓國科學財團, 材料試驗을 協助하여 주신 韓國重工業 中央試驗所 및 試驗片의 熔接에 勞苦가 많았던 大鮮造船所의 여러분에게 深甚한 謝意를 表한다.

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, p.35, 39~42(1975)
2. 韓國船級協會：船級 및 鋼船規則, 第301條, 船體用壓延鋼材, p.50~55(1981).
3. 關野昌藏：高張力鋼의 熔接性, 金屬, Vol.46, No.1, p.13~18(1976).
4. 村田朋美：普通鋼의 水素誘起割れ, 金屬, Vol.46, No.4, p.9~14(1976).
5. 大西敏三：高張力鋼의 水素脆化, 金屬, Vol.46, No.4, p.15~19(1976).
6. 下田秀夫：熔接構造用高張力鋼의 硫化物腐蝕割れについて, 防蝕技術, Vol.14, No.6, p.241~247(1965).
7. K. S. Treseder & T. M. Swason: Factors in Sulfide Corrosion Cracking of High Strength Steel, Corrosion, Vol.24, No.2, p.31~37(1968).
8. 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, p.139~146(1968)
9. I. Geld. M. A. Acampora: A Factor in Hydrogen Embrittlement of Cathodically Protected Steel in Sea Water, Mater. Prot, Vol.7, No.11, p.31~34(1968).
10. P. E. Hudson, et. al: Absorption of Hydrogen by Cathodically Protected Steel, Corrosion, Vol.24, No.7, p.189~196(1968).

11. 酒井利一ら: 高張力鋼溶接部におけるの應力腐蝕龜裂とその軽減策, 防蝕技術, Vol. 16, No.7, p.303~308(1938).
12. NACE Standard TM-01-77, Testing of Metal for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperature, Metal Performance, Vol.16, No.9(1977).
13. 前掲書(8) p.139~146.
14. 永井欣一ら, 高張力鋼の溶接部, 熱影響部の腐蝕疲労強度に對して, 日本溶接學會誌, Vol.40, No.1, p.68~70(1970).
15. 益本 功ら: 鋼材及び溶接継手の 3% NaCl水溶液腐蝕疲労に對する研究(I), 日本溶接學會誌, Vol.44, No.3, p.60~64(1975).
16. 平川, 北浦: 溶接継手の低速度腐蝕疲労強度, 日本溶接學會 77年講演集 S.756.
17. 中野・青木・金尾: SERTによる高張力鋼の水素脆性感受性の評價, 日本溶接學會 79年講演集 S.918.
18. 角田・九山・内山: 各種高張力鋼の海中での腐蝕疲れき裂傳播學動, 鐵と鋼, 第12號, p.77~85 (1980).
19. 田大熙・金鎮京: 海洋構造物用 HT50 高張力鋼의 溶接部位의 環境에 따른 크랙傳播特性에 關한 研究, 韓國海洋大學 論文集, 第2輯, p.137~153 (1983).
20. 南・高田: 軟鋼の腐蝕疲労と陰極防蝕, 防蝕技術, Vol.7, No.6, p.26~27(1958).
21. Hooper Hartt: The Influence of Cathodic Polarization upon Fatigue of Notched Structural in Sea Water, Corrosion, Vol.34, No.9 p.320~323(1978).
22. 中野・青木・金尾: 電氣防蝕された高張力鋼の破壊の様相, 日本溶接學會 79年講演集 S.919.
23. 遠藤吉郎: 腐蝕疲労, 防蝕技術, Vol.26, No.10 p.583~592(1977).
24. 駒井諱治郎: 腐蝕疲労に關する最近の諸問題 防蝕技術, Vol.26, No.10, p.594~605(1977).
25. D. H. Jeon, W. N. Kim, K. J. 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, p.9~16, June, (1982).
26. A. Mendelson: Plasticity Theory and Application, p.76. N.Y.. (1970).
27. 西田正孝: 應力集中, p.184, 森北書房(1973).