

## 造船用鋼材의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕에 관한 研究

田大熙\* · 金垣寧\* · 金基俊\* · 李義鎬\*\*

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

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

**Abstract**

The plane bending corrosion fatigue test for the welded metal parts was performed in the air and in the natural sea water with and without applying cathodic protection. The specimens tested were the weld of SM41 steel plates, SM58 steel plates and of SM41 to SM58, which were all prepared by submerged arc welding.

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

- (1) In case with SM41 and SM58 steel plates, lower value of impact strength, higher value of hardness and more noble electrode potential were observed in the welded metal part than in the HAZ and base metal. Also the lowest hardness zone in the HAZ was observed with SM58 which was not found with SM41. In case with weld specimen of SM41 to SM58, the impact strength and the electrode potential of the welded metal part showed again the lowest and most noble value but the hardness value was located between those of SM41 and SM58 base metal.
- (2) In the fatigue test, the specimens tested in the air and under the cathodic protection were both cracked in a purely mechanical mode, but the specimens tested without cathodic protection were cracked by the combination of mechanical fracture and electro-chemical corrosion.
- (3) The corrosion fatigue limit of the welded metal parts of the specimen was increased by the cathodic protection. As the protection potential was varied down to  $-800\text{mV}$  vs. SCE the fatigue limit was increased to the value tested in the air, and the maximum fatigue limit appeared at the  $-1,000\sim -1,200\text{mV}$  vs. SCE. However, as the protection potential was further decreased below  $-1,200\text{mV}$  vs. SCE, the fatigue limit of weld of SM58 and of SM41-SM58 joining was decreased but the limit was almost constant in the case of weld of SM41.
- (4) It is suggested that when designing steel ship the corrosion fatigue limit of welded

\* 正會員, 韓國海洋大學

\*\* 正會員, 海軍士官學校

metal parts should be stressed as a designing strength of the structure of steel ship in addition to the conventional basis considering simply tensile strength of steel and safety factor.

**Nomenclature(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)
- $l$  : 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 루우트 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)

**1. 序 論**

船舶은 鋼材의 大型 熔接構造物이다. 이에 使用되는 鋼材는 從來까지  $40kg/mm^2$ 級 普通強度

의 熔接構造用 壓延鋼材가 大部分이었으나, 近年부터는 船舶의 大型化 趨勢에 따라 船體重量의 輕減化와 積荷量의 增大 및 經濟的 造船과 資源活用の 見地에서 50kg/mm<sup>2</sup>級의 高張力鋼材를 採用하는 新傾向<sup>1,2)</sup>이 생기고 있다. 따라서 今後의 造船用鋼材로서 小型船에는 主로 普通強度鋼材가 使用될 것이나 超大型船에는 高張力鋼材 그리고 中型船에는 이 두 鋼材가 混用될 展望이다.

普通強度鋼材는 熔接性이 좋으나 強度面에서 不利하고 高張力鋼材는 強度面에서 優秀하나 熔接性이 不良하고 水素脆化나 應力腐蝕龜裂 등이 생기기 쉬운 缺點등이 있다.<sup>4-8)</sup> 또한 이들 鋼材는 海水中에서 使用될 경우, 波浪 등에 의한 反復應力을 받을 뿐만 아니라 腐蝕作用도 甚하게 받게 된다. 따라서 船體는 必然的으로 電氣防蝕(陰極防蝕) 하여야 하나 電氣防蝕을 하게 되면 이 때 發生되는 水素가스에 의한 障害<sup>9,10)</sup>가 念慮된다. 그러므로 이들 鋼材를 造船用으로 使用할 때에는 適正히 防蝕한다고 하더라도 腐蝕疲勞龜裂될 念慮가 많으므로 強度를 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하여야 하므로 그 安全性이 대단히 重要하다. 그러나 이 安全性은 船舶建造費와 서로 相反關係에 있기 때문에 船體 各部의 負荷應力의 特性에 따라 適正許容應力을 決定하여서 航海의 安全性과 建造費의 兩者를 平衡시키는 線에서 設計하여야 한다. 따라서 大型船舶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에는 高張力鋼材가 主로 使用되고 기타 部分과 裝備設置部分에는 普通強度鋼材가 使用되고 있다.

造船用鋼材의 熔接部에 대한 各種 試驗資料는 많이 發表되어 있고, 腐蝕疲勞에 관한 一般的인 基礎研究結果<sup>11-21)</sup>도 상당히 많이 있다. 그러나 實用狀態에 가까운 條件下에서 調查된 文獻은 적으며, 특히 電氣防蝕을 適用한 研究結果는 不過 數篇<sup>22-32)</sup>밖에 찾아볼 수 없다. 또한 後者의 研究들도 各各의 獨特한 條件下에서 調查한 單的인 것 뿐이며, 船舶과 그 運航條件을 考慮하

여 研究하고 그것을 곧 活用할 수 있는 段階까지 發展시킨 研究結果는 찾아볼 수 없다. 即, 南 등<sup>33)</sup>은 3.5% 食鹽水 中에서, Hooper<sup>34)</sup>는 天然海水 中에서의 軟鋼의 腐蝕疲勞에 미치는 陰極防蝕의 影響만을 非熔接母材試驗片에 대하여 調查하였고, 中野 등<sup>35)</sup>은 3.5% 食鹽水 中에서 電氣防蝕한 造船用鋼材의 非熔接試片의 破壞樣相을 研究하였으며, 田·金 등<sup>36)</sup>은 海洋構造用 HT50高張力鋼材의 熔接部位의 環境에 따르는 크랙傳播特性을 研究하였을 뿐이다.

現在 船體의 設計는 主로 鋼材의 引張強度와 設計安全率에 依存하고 있다. 그러나 보다 經濟的이고 보다 高安全度의 造船을 위해서는 船舶의 實際 運航條件과 防蝕條件을 考慮한 腐蝕疲勞限度를 基準으로 하여 造船設計됨이 바람직하다고 생각된다.

本 研究는 現在 實用되고 있는 代表的인 造船用鋼材인 SM41鋼材와 SM58鋼材에 대하여 實際의 熔接條件과 腐蝕疲勞條件下에서 疲勞試驗을 實施하여 各 條件에서의 疲勞限度를 求하고, 이것으로부터 腐蝕疲勞限度線圖를 作成함으로써 造船設計時 採擇하게 될 各種 應力條件에 따른 許容應力의 限界를 提示하였으며, 이것에 의하여 造船設計時的 安全率도 檢討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한 供試鋼材는 두께 6mm의 40kg/mm<sup>2</sup>級과 50kg/mm<sup>2</sup>級의 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 2 와 같이 對比되므로 前者는 韓國工業規格(KS D3515) SM41鋼(普通強度鋼)이나 韓國船級協會規格(KR 301조) KR軟鋼 RD鋼의 相當品이며, 後者는 KS SM58鋼(高張力鋼)이나 KR RD 46~RE46鋼의 相當品이다 (以下 前者를 SM41鋼材, 後者를 SM58鋼材라 함).

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

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

Kinds of steel		C	Si	Mn	P	S	$C_{eq}^*$	$P_{cm}^{**}$	Remarks
40kg/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	—
50kg/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~RE46		<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 (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
40kg/mm <sup>2</sup> class steel plate		29.5	42.7	27.6	4.5	Specimen
KS SM41		>25	41-52	<19	>4.8	—
KR RD		>24	41-50	>22	>4.8	—
50kg/mm <sup>2</sup> class steel plate		55.18	68.55	27.1	4.95	Specimen
KS SM58		>47	58-73	<19	>4.8	—
KR RD46-RE46		>46	60-72	>16	>4.8	—
WM	SM41-SM41	39.78	50.54	—	3.258	—
	SM58-SM58	55.18	72.1	—	4.5	—
	SM41-SM58	48.29	58.65	—	4	—

\* Charpy impact test

에서 하여 3種의 規格試驗片을 만들었다.

- ① SM41鋼材-SM41鋼材 熔接試驗片
- ② SM58鋼材-SM58鋼材 熔接試驗片
- ③ SM41鋼材-SM58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 많

이 쓰이고 있고, 또한 가장 확실하게 熔接되기 때문이다.

Table 3은 이들 試驗片의 熔接條件이다.

規格試驗片의 型과 치수는 Fig. 1과 같이 熔接 試驗片의 兩面을 各 1mm씩 平削하여 4.00±0.01 mm 두께로 만든 다음 金屬平板의 平面압힘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

Table 3. Welding condition(Submerged arc welding).

Kinds of specimen	Welding rod wire (φ : mm)	Face	Voltage (V)	Ampere (A)	Speed (cm/min)	Heat** impact (KJ/cm)	Remarks
SM41-SM41	AWS-F71-EH*-14 UL-36(3.2)	Face	30	400	50	14.4	DAIDEN GI-BS Submerged arc welder
		Back face	34	420	55	15.58	
SM58-SM58	"	Face	30	450	66	12.27	"
		Back face	32	525	72	14.0	
SM41-SM58	"	Face	30	450	50	17.28	"
		Back face	32	525	55	18.327	

\* 0.16C - 0.35Si - 1.65Mn - 0.014P - 0.015S

\*\* Heat impact = 60 EI/V (J/cm), (V : 용접 속도, cm/min)

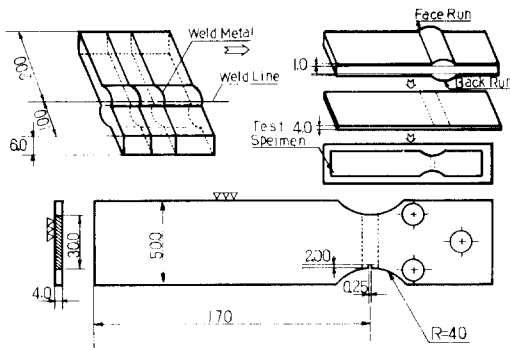


Fig. 1. Dimension of test specimen(unit = mm).

0.25mm, 길이 2.00mm의 노치(Notch)를 가공했다. 그리고 이 시험편 표면을 샌드페이퍼(Sand paper) 1,200番까지로研磨하고, 알콜 및 아세톤으로脫脂한 다음에 시험하였다(SM41-SM58鋼材熔接試驗片에서 SM58鋼材는 固定部側).

### 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. 50V, 2A의 定電壓裝置와 Pb-Ag 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<sup>7</sup> Ω/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 亞鉛 프라이머(Zinc primer)를 2回 塗裝한 다음 絶緣性 에폭시타알塗料를 2回 塗裝하고, 그 위에 FRP로 라이닝(Lining)을 2mm 두께로 施行함으로써 防蝕電流가 試驗片에 많이 集中되도록 하였다.

### 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. 그러

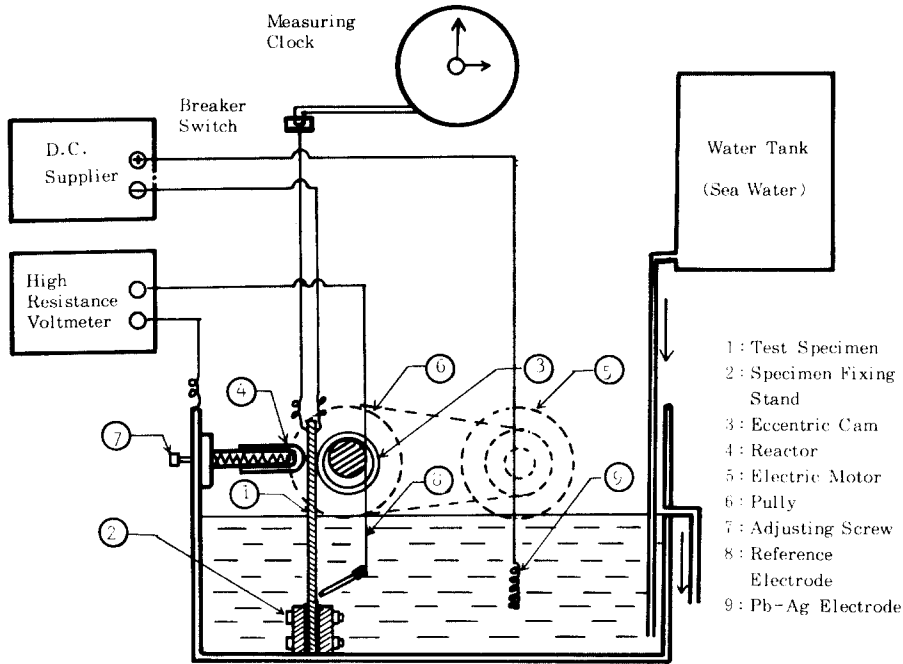


Fig. 2. Schematic diagram of plane bending fatigue tester.

나 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, 이곳에 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 노치의 應力集中感度を 求하기 위해서 SM58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 0.125mm였으므로 이들 試驗片의 노치는 다음과 같은 微細龜裂에 相當한다.

· 形狀係數:  $\alpha = \sigma_{max} / \sigma_{min} = 1 + 0.788 \sqrt{t/\rho}^{3/2}$   
 $= 1 + 0.788 \sqrt{2/0.125} = 4.152 \dots$   
 ..... ①

· 노치係數:  $\beta = \sigma_0 / \sigma_0' = 16.5 / 16.0 = 1.0313$

..... ②  
 · 應力集中感度:  $\gamma = (\beta - 1) / (\alpha - 1)$   
 $= 0.0313 / 3.152 = 0.00993$   
 $= 0.993\% \dots \dots \dots$  ③  
 (t: 노치 길이, ρ: 曲率半徑, mm)

(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(E<sub>cor</sub>), -800mV, -1,000 mV, -1,200 mV 및 -1,400mV SCE의 各 電位로 分極시켜서 各 條件下에서 疲勞限度를 測定 比較하였고, 大氣中の 疲勞限度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등을 考慮하여 一定한 速度(約 2l/h)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 連 186時間 以上の 期間에 걸쳐서 10<sup>7</sup>회까지 反復應力을 계속 加하여 굽힘疲勞 시켜도 破斷되지 않는 上限值의 所謂 高사이

Table 4. Qualities of sea water used in this study.

Hardness (ppm CaCO <sub>3</sub> )	M. Alkalinity (ppm CaCO <sub>3</sub> )	Chloride (ppm Cl <sup>-</sup> )	Specific resistance (Ω-cm)	Specific gravity (-)	Temp. (°C)
4,500	85	16,800	26.7	1.025	18

클 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>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

$$\sigma_b = M/Z = P(l-x)/Z = 3EI\delta (l-x)/Zl^3 \\ = 1.5 E\delta t (l-x)/l^3 \dots\dots\dots(4)$$

Young's modulus,  $E$ 는 SM41鋼材 熔接試驗片에서  $2.10 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ , 그리고 SM58鋼材 熔接試驗片과 SM41-SM58鋼材 熔接試驗片에 대해서는  $2.18 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 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 SM41鋼材 熔接試驗片과 SM58鋼材 熔接試驗片에서는 (4) 式의 計算値와 잘 一致하였으나 SM41-SM58鋼材 熔接試驗片에서는 計算値의 約 90%程度의 應力만이 測定 되었으므로 이 異鋼材 熔接試驗片의 應力計算에서는 (4) 式에서 이 誤差를 考慮한 다음 式을 使用하였다.

$$\sigma_b' = 1.35 E\delta t (l-x)/l^3 \dots\dots\dots(5)$$

### 3. 測定結果와 考察

#### 3.1. SM41鋼材 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕의 影響

##### 3.1.1. 熔接部の 機械的 및 電氣化學的 特性變化

Fig.3(A)는 同熔接部位에 따라 샤르피衝擊試驗(各 要部에 노치를 낸 試驗片에 대하여 衝擊強度를 測定)을 한 結果이다. 그리고 同圖(B)는

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하면서 飽和칼로멜電極으로 測定)를 調査한 結果이다.

이들의 結果를 보면 衝擊強度는 熔着部가 가장 낮고 母材部가 가장 높으며, 熱影響部는 그 中間이다. 이에 反해서 硬度分布와 電位分布에서는 熔着部가 最高値, 母材部가 最低値를 나타내며, 熱影響部는 그 中間値이나 그 差는 그리 크지 않다.

이와 같이 熔着部가 가장 高硬度이고 가장 高脆性인 것은 熔接熱에 의해서 그 部分에 “마르텐사이트”(Martensite)組織이 發達되었기 때문이라고 생각된다. 또한 熔着部의 電位가 가장 貴한 것은 熔接棒의 電位가 母材보다 더 貴하였기 때문이라 생각되고 이와 같은 電位關係는 防蝕面에서 바람직한 것이다.

##### 3.1.2. 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

SM41鋼材 熔接試驗片에 대하여 空氣中 및 海水中的 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 疲勞試驗을 實施하였다. Fig.4는 이 試驗에서 求한 疲勞限度가 防蝕電位에 따라 어떻게 變하는가를 比較한 것이다.

이들의 實測資料에 의하면 海水中的 無防蝕時의 疲勞限度는 空氣中에서의 疲勞限度보다 상당히 낮으나, 陰極防蝕하면 兩振, 片振 및 部分片振의 어느 경우에도 疲勞限度가 無防蝕時의 疲勞限度 以上으로 增加된다. 即, -800mV SCE程度로 防蝕하면 大氣中에서의 疲勞限度까지 上昇되고, -1,000mV SCE까지 防蝕하면 거의 最高値까지 上昇되나 그 以下の 電位로 防蝕하여도 疲勞限度는 -1,000 mV SCE로 防蝕하였을 때보다 若干 더 增加될 뿐이다. 이와 같은 現象은 海水中的 試驗片에 대하여 陰極防蝕을 하지 않

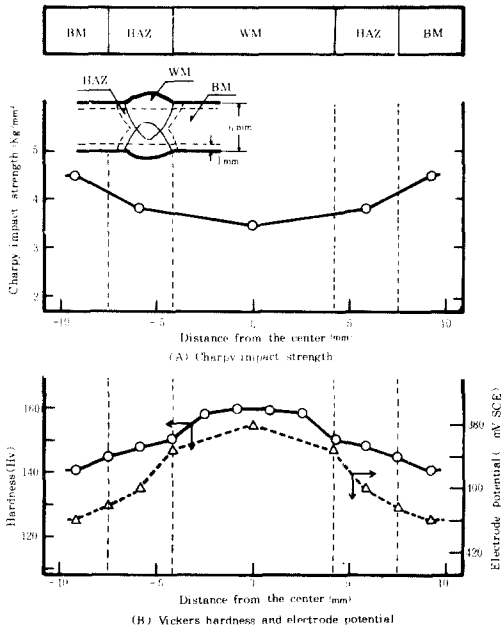


Fig. 3. Variation of mechanical properties and electrode potential with distance from the center of the welded zone of SM41 steel.

있을 때에는 機械的인 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 緩和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 鋼材内部로 浸透하여 水素脆性을 일으킬 것으로 念慮되었으나 實測結果에 의하면 -1,400mV SCE까지 陰分極시켜도 疲勞限度가 거의 減少하지 않는 點으로 보아서 이 鋼材는

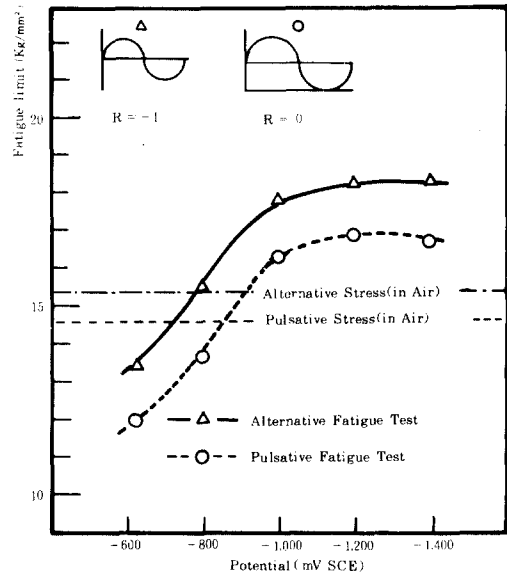


Fig. 4. Comparison of fatigue limit strength for the welded zone of SM41 steel in each cathodic protection condition.

水素脆性에 대하여 상당히 鈍한 材料라고 생각된다.

### 3.1.3. 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率

Fig.5는 SM41鋼材 熔接試驗片에 대하여 여러 가지 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은 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 平均應力이 零이고 應力比(R)가 -1인 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°되게 그은 直線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 10kg/mm<sup>2</sup>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



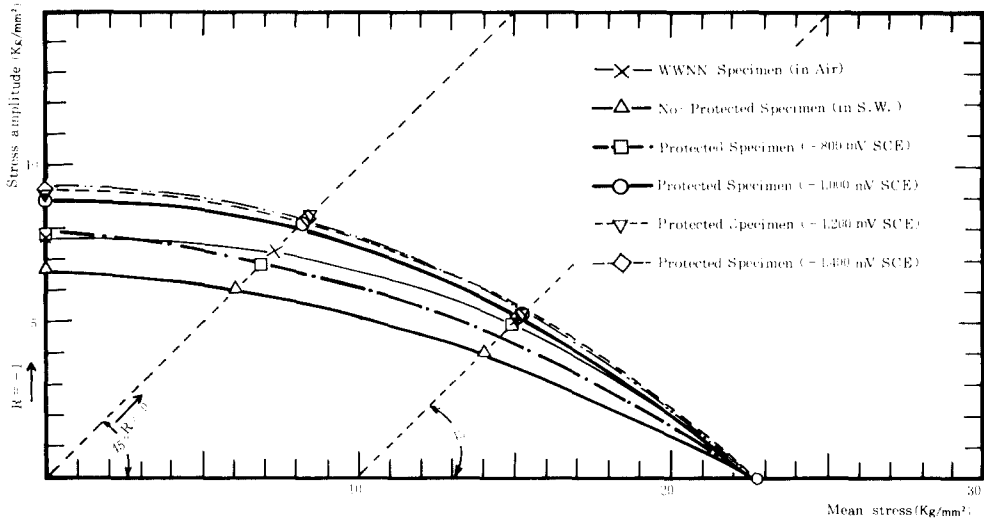


Fig. 5. Plane bending fatigue limit diagram of the welded zone of SM41 steel.

Table 5. Safety factors of welded zone.

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(Ecor)	3.423(13.44)	3.83(12.0)	5.707(8.06)
800	2.950(15.59)	3.352(13.723)	4.607(9.984)
1,000	2.536(18.14)	2.819(16.32)	4.356(10.56)

均應力이 10kg/mm<sup>2</sup>이고 應力振幅이 零인 點에서 橫軸에 대하여 45°되게 그은 直線에 잡는다.

(4) 平均應力을 나타내는 橫軸上에 剪斷應力(σ<sub>s</sub>)을 잡는다. 이 剪斷強度는 最大剪斷에너지理論<sup>40)</sup>으로부터 σ<sub>s</sub>=0.577σ<sub>yp</sub>로 計算되며, 本試驗片의 試驗部에서의 降伏強度 σ<sub>yp</sub>가 39.78kg/mm<sup>2</sup>으로 實測되었으므로 剪斷強度는 22.95kg/mm<sup>2</sup>으로 計算된다.

(5) 以上の 4단계에서 잡은 各 實測點을 各 腐蝕·防蝕條件 別로 連結한다. 이 各 連結線의 下側이 各 腐蝕·防蝕條件下에서 試驗片이 腐蝕疲勞하지 않는 安全區域이 된다.

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 實測引張強度가 46.0 kg/mm<sup>2</sup> 이므로 그 安全率 (S<sub>f</sub>=σ<sub>ts</sub>/2σ<sub>s</sub>)<sup>41)</sup> 은 Table 5와 같이 된다.

實際 鋼船을 設計할 때 安全率을 約 4로 잡아

10kg/mm<sup>2</sup>으로 設計하므로 이 값은 Table 5와 대조하여 보면 大略 無防蝕 片振腐蝕疲勞限度에 該當한다. 그러므로 防蝕效果와 防蝕費用을 考慮하여 -800~-1,000mV SCE程度로 防蝕한다면 SM41鋼材를 使用할 경우에 設計安全率을 3.0~3.5로 잡아도 充分히 安全하다는 것을 알 수 있다.

### 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

Fig.6는 이 鋼材의 熔接部位에 대하여 샤르피 衝擊試驗結果와 硬度分布 및 電極電位分布를 調査한 結果이다. 이들 結果를 보면 SM 41鋼材에서와 같이 熔着金屬部가 가장 高硬度인 반면 衝擊強度는 相對的으로 가장 낮으며, 電極電位는

가장 貴한 값을 나타낸다. 그러나 이 鋼材에서는 熱影響部에 低硬度部가 存在한다. 이와 같은 低硬度部는 熔接熱에 의하여 熱影響部の 組織이 變함으로써 생긴 것으로 생각되며, 熔着部の 電位가 가장 貴한 것은 前述한 바와 같이 母材보다 貴한 材料의 熔接棒을 使用한 結果라고 생각 된다.

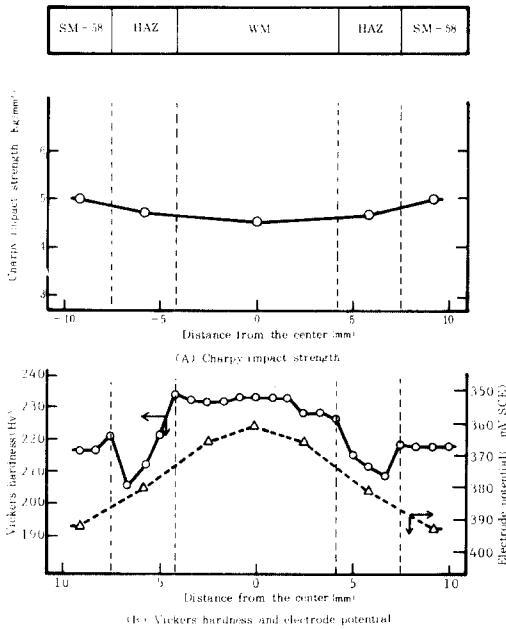
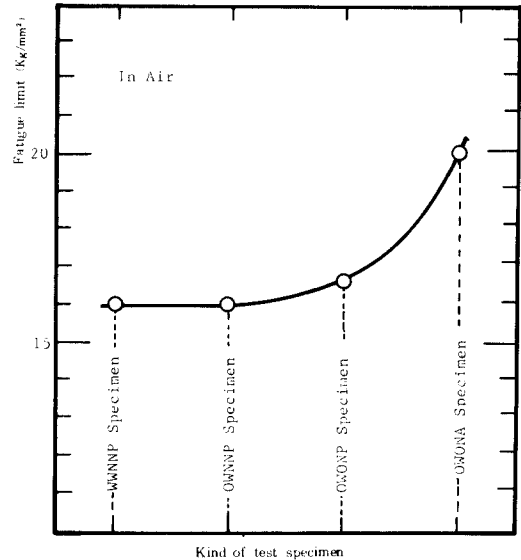


Fig. 6. Mechanical properties and electrode potential on the welded zone of SM 58 steel

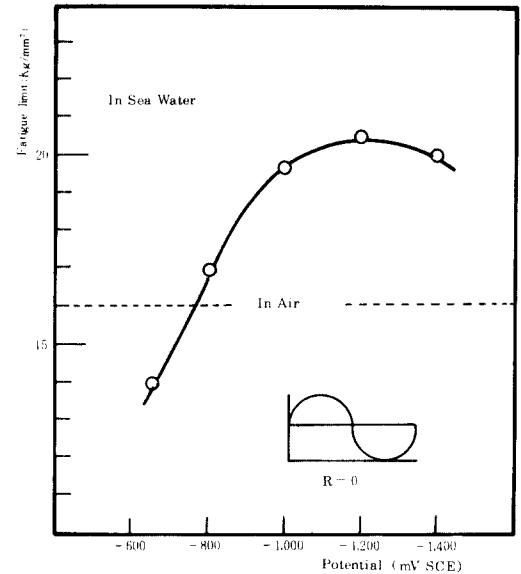
3.2.2. 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

SM58鋼材 熔接試驗片에 대하여 大氣中에서 熔接·無熔接, 노치 有無, 片·兩振 등의 各 疲勞條件下에서 疲勞限度를 實測하였고, 또 天然海水中에서 이 試驗片의 無防蝕 및 陰極防蝕 (-800 mV, -1,000mV, -1,200mV, -1,400mV SCE) 條件下에서 片振疲勞試驗으로 疲勞限度를 測定하였다. Fig. 7은 이들의 疲勞限度를 試驗片의 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 때의 熔接試驗片의 疲勞限度는 無熔接



(A) For the kinds of test specimen



(B) For the cathodic protection potential

Fig. 7. Comparison of fatigue limit strength for the kinds of test specimen and of the cathodic protection potential.

試驗片의 경우와 거의 差가 없다.

海水中에서 無防蝕하였을 때는 大氣中에서의 疲勞限度보다 상당히 더 낮고, 無熔接試驗片은 熔接試驗片보다 더 낮다. 또 海水中에서 電氣防蝕한 경우는 無防蝕한 경우보다 疲勞限度가 현저하게

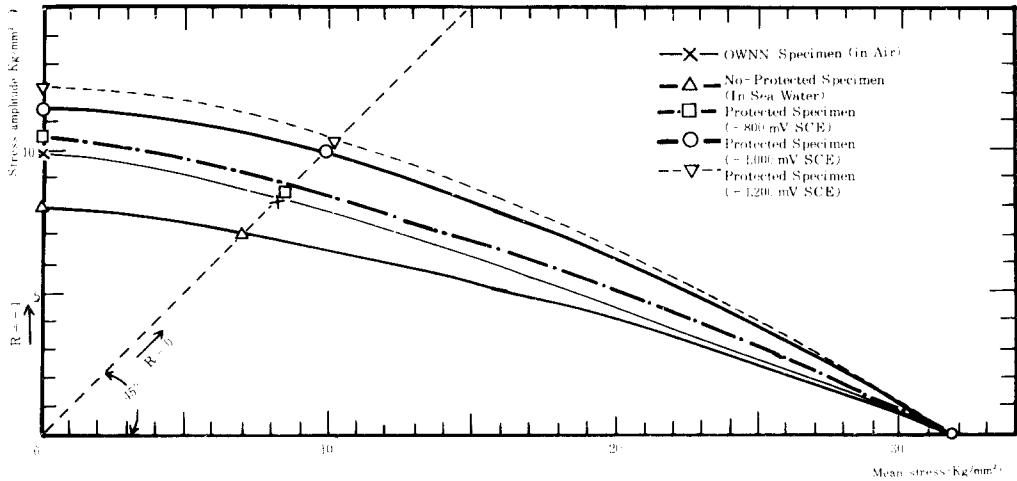


Fig. 8. Plane bending fatigue limit diagram of the welded zone of SM58 steel.

높아지며,  $-800\text{mV SCE}$  程度로 防蝕해도 大氣中의 疲勞限度 以上으로 上昇되고  $-1,000\text{mV SCE}$  까지 防蝕하면 거의 最高値에 도달한다. 그리고  $-1,200\text{mV SCE}$  로 防蝕하면 疲勞限度가 若干 더 높아지나,  $-1,400\text{mV SCE}$ 로 防蝕하였을 때는 오히려 낮아진다.  $-1,400\text{mV SCE}$ 로 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, SM41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.8은 SM58鋼材 熔接試驗片에 대하여 여러 가지 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 SM41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 腐蝕·防蝕條件下에서의 安全區域이다.

이 腐蝕疲勞限度線圖로부터 SM58鋼材의 熔接部의 防蝕條件에 따라 設計安全率을 計算하면 Table 6과 같이 된다. 實際 造船時에 設計安全率을 4로 잡으므로 Table 6과 對照하면 이것은  $-800\text{mV SCE}$ 로 防蝕한 片振腐蝕疲勞時에 該當한다. 또 船體는  $-850\sim-950\text{mV SCE}$  程度로 防蝕하는 것이 通例<sup>42)</sup>이지만 特히 이 鋼材는 水素脆性에 銳敏하므로 그 防蝕電位를  $-1,000\text{mV}$  以下로 낮추지 않는 것이 바람직하다고 생각된다.

Table 6. Safety factors of welded zone.

Protection potential (-mV SCE)	Pulsative stress (Fatigue limit, kg/mm <sup>2</sup> )
625(Ecor)	4.89(14.0)
800	4.05(17.0)
1,000	3.5 (19.7)

따라서 SM58鋼材에 對해서는 電氣防蝕을 考慮한 경우라도 強力한 片振應力을 받는 外板部分에 對해서는 設計安全率을 4程度로 잡는 것이 必要하다고 생각된다.

3.3 SM41-SM58鋼材의 熔接部位의 腐蝕疲勞와 電氣防蝕의 影響

3.3.1. 熔接部の 機械的 및 電氣化學的 特性變化

Fig. 9는 이 試片의 熔接部에 對한 機械的性質과 電極電位分布를 調査한 結果이다. 이들 結果를 分析해 보면 硬度는 SM41鋼의 母材쪽이 가장 낮고 SM58鋼의 母材쪽이 가장 높으며, 熔着部는 그 中間値를 나타낸다. 그리고 衝擊強度는 熔着部가 가장 낮은 값을 나타내나 그 差는 아주 작다. 또한 電極電位分布에서는 SM41鋼材와 SM58鋼材에서와 마찬가지로 熔着部가 그 周圍보다 약 10mV程度 貴한 電位를 나타내고 있다.

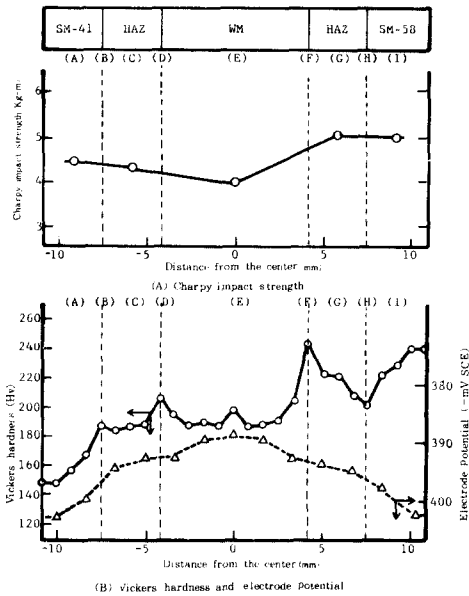


Fig. 9. Mechanical properties and electrode potential on the welded zone of SM41-SM58 steel.

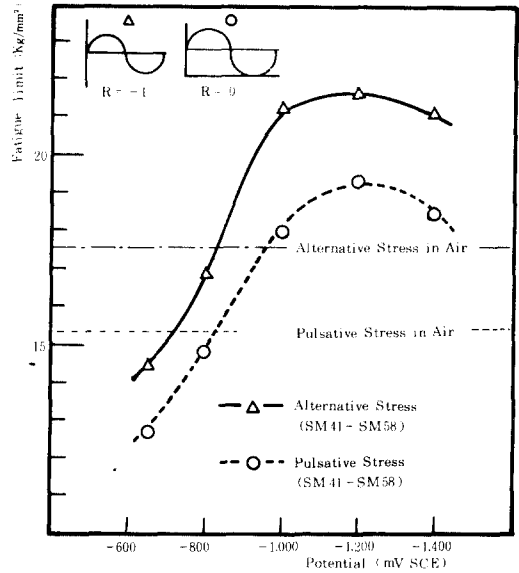


Fig. 10. Comparison of fatigue limit strength on the welded zone of SM41-SM58 steel in each cathodic protection condition.

3.3.2. 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

Fig. 10은 SM 41-SM58鋼材의 熔接試驗片에 대하여 空氣中 및 海水中的 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을 實施하고, 이들에서 求한

兩振 및 片振의 疲勞限度가 防蝕電位에 따라서 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 空氣中的 疲勞限度보다 상당히 낮아지나 陰極防蝕을 하여 試驗片의 電位를 -800mV SCE 程度만 유지하면 空氣中과 거의 對

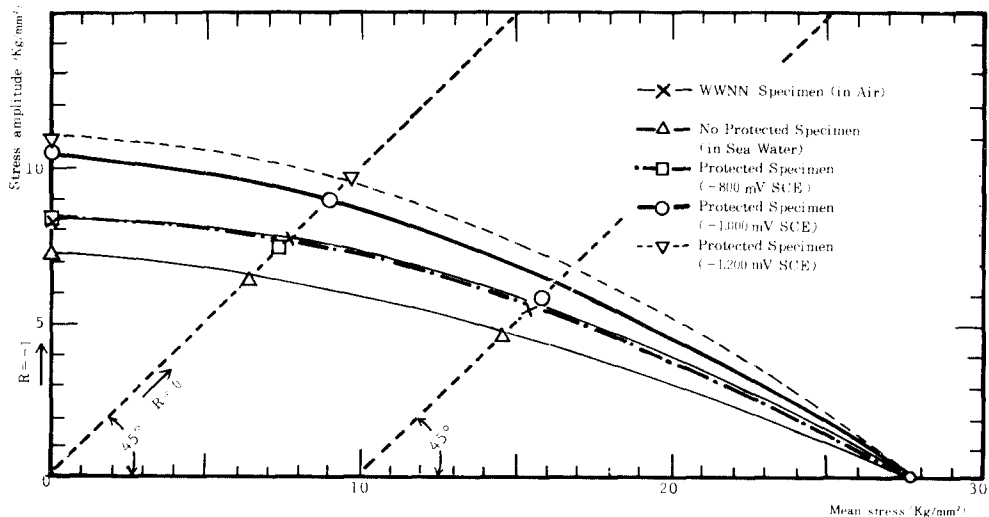


Fig. 11. Plane bending fatigue limit diagram of welded zone of SM41 steel-SM58 steel.

Table 7. Safety factors of welded zone.

Protection potential (-mV SCE)	Alternative stress (fatigue limit, kg/mm <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(Ecor)	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)

等한 強度로 上昇한다. 또 -1,200mV SCE 까지 防蝕하면 最高強度에 도달하나 -1,000mV SCE 로 防蝕하였을 때와 大差가 없으며, -1,400mV 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. 11는 SM41鋼材와 SM58鋼材와의 熔接試驗片에 대하여서 여러가지 腐蝕防蝕條件別로 實測한 疲勞限度로부터 作成된 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 4로 잡고 있으므로 Table 7과 對照하면 그것은 無防蝕兩振의 경우나, -800mV SCE로 陰極防蝕하였을 때의 片振疲勞限度와 對等하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 SM41鋼材와 SM58鋼材를 連接한 경우에도 設計安全率은 SM58鋼材의 경우와 같이 各部位의 負荷條件에 따라 3.5~4.0을 擇해도 充分하다는 것을 알 수 있다.

3.4. 總括

3.4.1. 腐蝕疲勞限度에 미치는 電氣防蝕의 影響

Fig. 12는 SM41鋼材 熔接試驗片과 SM41鋼-SM 58鋼材 熔接試驗片의 兩振腐蝕疲勞限度가 電氣防蝕條件에 따라 어떻게 變하는 가를 比較한 것이고, Fig. 13은 SM41鋼材 熔接試驗片, SM58鋼材

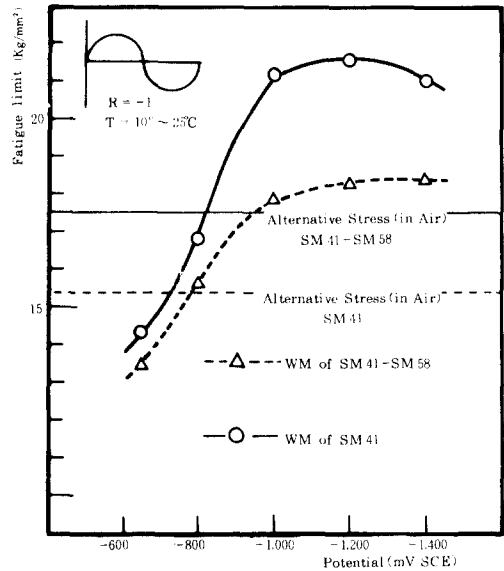


Fig. 12. Comparison of alternative fatigue limit in each cathodic protection potential for the welded zone of SM41 steel and SM41-SM58 steel.

熔接試驗片 및 SM41鋼-SM58鋼材 熔接試驗片의 片振腐蝕疲勞限度가 역시 電氣防蝕條件에 따라 어떻게 變하는 가를 서로 比較한 것이다. 또 이 들에는 各 試驗片의 大氣中에서의 疲勞限度를 同時에 나타내어 서로 比較하였다.

이들에 의하면 同一條件에서의 疲勞限度는 SM 58鋼材 熔接試驗片에서 가장 높고 SM41鋼材 熔接試驗片에서 가장 낮으며, SM41鋼-SM58鋼材 熔接試驗片의 疲勞限度는 그 中間程度의 값을 나타내고 있다. 또 이들 3種의 試片 모두 海水中 無防蝕條件에서 腐蝕疲勞限度가 가장 낮으나, 電氣防蝕을 하여 그 電位를 -800mV SCE 程度로 維持하면 大氣中에서의 各己의 疲勞限度까지 上昇되고, -1,000~-1,200mV SCE에서 最高值를

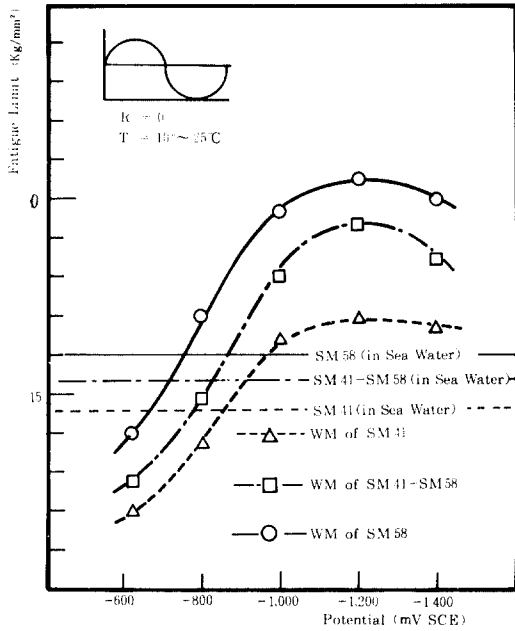


Fig. 13. Comparison of pulsative fatigue limit in each cathodic protection potential for the welded zone of SM41 steel, SM58 steel and SM41-SM58 steel.

나타낸다. 그리고 SM53鋼材熔接試驗片과 SM41鋼-SM53鋼材熔接試驗片에서는 電位를  $-1,400$  mV SCE까지 낮출때 疲勞限度가 오히려 低下하

나 SM41鋼材熔接試驗片에서는 別差가 없다. 이는 鋼材의 水素脆性이 SM41鋼에서 鈍感하나 SM58鋼材에서는 敏感하기 때문이라고 생각한다.

防蝕電位에 따른 腐蝕疲勞限度의 上昇幅은 自然電位에서  $-1,000$ mV SCE까지로 分極할 때 높은 率로 增加하나 그 以上에서는 아주 완만하고 SM58鋼材의 경우는  $-1,200$ mV SCE以下에서 오히려 低下된다. 따라서 SM58鋼材가 使用될 때는 특히 水素脆性이 일어날 念慮도 있으므로 船體는 腐蝕防止의 見地 뿐만 아니라 腐蝕疲勞防止의 見地에서도 그 防蝕電位를  $-800 \sim -1,000$ mV SCE程度로 維持하는 것이 바람직하다. 이것은 海水中에서 實際 船舶의 防蝕基準電位를  $-850 \sim -950$ mV SCE程度로 維持한다는 點과도 잘 一致한다.

3.4.2. 腐蝕疲勞限度線圖와 安全率

Fig. 14는 SM41鋼材熔接試驗片, SM58鋼材熔接試驗片 및 SM41鋼-SM58鋼材熔接試驗片에 대하여 海水中 無防蝕 및 電氣防蝕의 條件( $-800$  mV 및  $-1,000$ mV SCE)에서의 腐蝕疲勞限度를 서로 比較할 수 있도록 圖示한 것이다. 여기서 防蝕電位로  $-800$ mV와  $-1,000$ mV SCE만을 比較한 것은 實際 適用 可能한 防蝕電位에서 比較하기 위함이다.

이들에 의하면 腐蝕疲勞龜裂에 대한 安全區域

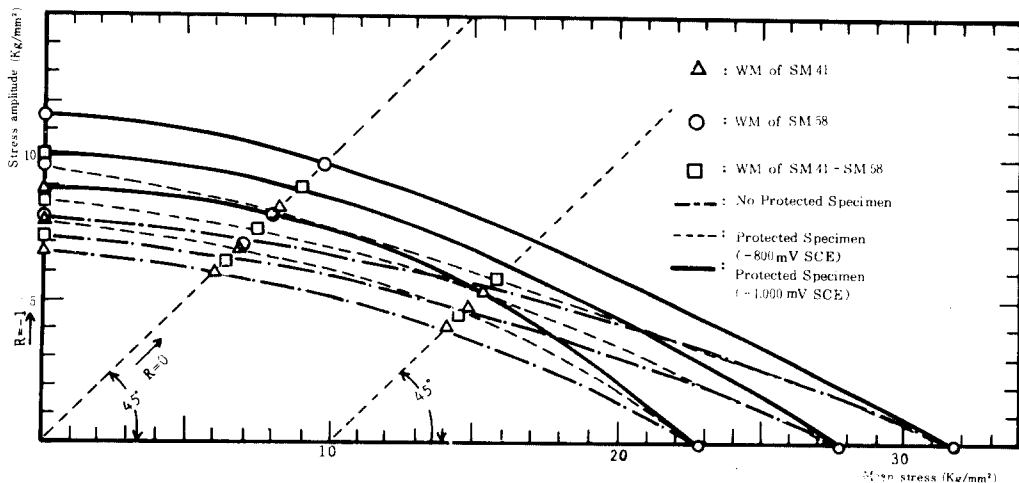


Fig. 14. Comparison of plane bending fatigue limit diagram for the welded zone of SM41 steel, SM58 steel and SM41-SM58 steel.

Table 8. Safety factors of welded zone.

Protection potential (-mV SCE)	Kinds of specimen	(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 (Ecor)	SM41WM	3.423(13.44)	3.83(12.0)	5.707(8.06)
	SM58WM	—	4.85(14.0)	—
	SM41-SM58WM	4.073(14.4)	4.95(12.78)	6.52(9.0)
800	SM41WM	2.950(15.59)	3.352(13.723)	4.607(9.984)
	SM58WM	—	4.05(17.0)	—
	SM41-SM58WM	3.45 (16.83)	3.95(14.85)	—
1,000	SM41WM	2.536(18.14)	2.819(16.32)	4.356(10.56)
	SM58WM	—	3.5 (19.7)	—
	SM41-SM58WM	2.77 (21.2)	3.29 (18.8)	5.01(11.7)

은 正常的인 陰極防蝕의 範圍內에서 그 鋼材의 引張強度에 거의 比例하여 넓어진다는 것을 알 수 있다.

Table 8은 Fig. 14의 腐蝕疲勞限度線圖가 表示하는 腐蝕疲勞限度와 그 各各의 實測引張強度로 計算되는 各 試驗片의 安全率을 表示한 것이다. 實際 鋼船의 船體外板은 -850~-950mV SCE程度로 陰極防蝕하는 것이 通例이므로 電氣防蝕을 考慮한 이 表의 數値와 實際의 外板設計安全率을 對照하여 보면 全般的으로 過度設計되고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 過度設計는 船舶이 海域을 航行한다는 點을 考慮하면 安全性의 見地에서 必要하다고 하겠으나 經濟的 面에서는 莫大한 負擔이 되므로 再考하여 볼 問題라고 생각된다.

實際 船體는 兩振疲勞를 받는 部分이 많으나 이보다 惡條件인 片振疲勞를 받는다고 假定하고 電氣防蝕을 -800 mV SCE程度로 陰分極 시킨다고 한다면 設計安全率은 SM41鋼에 대하여 約 3.4, SM58鋼에 대하여 約 4, SM41鋼-SM58鋼材 熔接部에 대하여 約 4를 擇할 수 있고 設計強度는 前者에 約 13.0kg/mm<sup>2</sup>, 中者에 約 17kg/mm<sup>2</sup>, 그리고 後者에서 約 15kg/mm<sup>2</sup>까지 잡을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그러므로 船體外板設計時는 一率의으로 鋼材의 公稱強度와 安全率을 適用할 것이 아니라 各

部分의 應力條件과 防蝕條件을 考慮한 疲勞限度를 基準으로 함이 安全性面이나 經濟性面에서 바람직하다고 생각되고, SM58鋼과 같이 水素脆性에 敏感한 高張力鋼材를 使用할 경우에는 -1,200mV SCE 以下로 過防蝕하지 않는 것이 바람직하다고 생각된다.

#### 4. 結 論

造船用 鋼材인 SM41鋼, SM58鋼 및 이 두 異種鋼材를 各各 서브머지드 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 여러가지 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) SM41鋼과 SM58鋼의 各 熔接部位에서는 다 같이 熔着部가 그 周圍에 비하여 衝擊強度가 낮으나 硬度는 높고 電極電位는 가장 貴하다. 또한 SM58鋼에서는 熱影響部에 低硬度部가 存在한다. 그리고 SM41鋼과 SM58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 일어나 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함

으로써 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 하던 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 SM58鋼材熔接試驗片과 SM41-SM58鋼材熔接試驗片에서는 腐蝕疲勞限度가 오히려 低下하나 SM41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.

## 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 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를 指向する 厚板, 金屬, **45**, 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, **46**, 1, p. 13~18(1976)
4. 村田朋美: 普通鋼의 水素誘起割れ, 金屬, **46**, 4, p. 6~14(1976)
5. 大西敬三: 高張力鋼의 水素脆化, 金屬, **46**, 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, **14**, 6, p. 241~247(1965)
7. K. S. Treseder & T. M. Swason: Factors in Sulfide Corrosion Cracking of High Strength Steel, Corrosion, **24**, 2, p. 31~37(1968)
8. 百合岡, 失竹: 鋼材의 熔接割れと 水素, 日本熔接學會誌, **45**, 7, p. 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, **18**, 4, p. 139~146(1968)
10. I. Geld, M. A. Acampora: A Factor in Hydrogen Embrittlement of Cathodically Protected Steel in Sea Water, Mater. Prot., **7**, 11, p. 31~34(1968)
11. 大谷男海男: 應力と腐蝕, 鐵と鋼, **5**, p. 556~566(1979)
12. P. E. Hudson, *et al*: Absorption of Hydrogen by Cathodically Protected Steel, Corrosion, **24**, 7, p. 189~196(1968)
13. 酒井利一ら: 高張力鋼熔接部において의 應力腐蝕龜裂とその輕減策, 防蝕技術, **16**, 7, p. 303~308(1958)
14. NACE Standard TM-01-77: Testing of Metal for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperature, Metal Performance, **16**, 9(1977)
15. 前掲書(9) p. 139~146.
16. 永井欣一ら: 高張力鋼의 熔接部, 熱影響部의 腐蝕疲勞強度, 日本熔接學會誌, **40**, 1, p. 68~70(1970)
17. 益本功ら: 鋼材及び熔接繼手의 3%NaCl 水溶液腐蝕疲勞に對する研究(1), 日本熔接學會誌, **44**, 3, p. 60~64(1975)
18. 平川, 北浦: 熔接繼手의 低速度 腐蝕疲勞強度, 日本熔接學會 77年 講演集, S 756.
19. 中野, 青木, 金尾: SERTによる高張力鋼의 水素脆性 感受性의 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의 海水中での 腐蝕疲れき裂傳播學動, 鐵と鋼, 第20號, p. 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, p. 137~153(1983)
22. 南, 高田: 軟鋼의 腐蝕疲勞와 陰極防蝕, 防蝕技術, **7**, 6, p. 26~27(1958)
23. L. M. Dvoracek: Influence of Cathodic Over Protection on Fatigue of Carbon Steel in Sea Water, Materials Performance, **16**, 9, p. 21~



- 24(1977)
24. Hooper Hartt: The Influence of Cathodic Polarization Upon Fatigue of Notched Structural in Sea Water, *Corrosion*, **34**, 9, p. 320~323(1978)
  25. 中野, 青木, 金尾: 電気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. 916.
  26. 遠藤吉郎: 腐蝕疲労, 防蝕技術, **26**, 10, p. 583~592(1977)
  27. 駒井謙治郎: 腐蝕疲労に関する最近の諸問題, 防蝕技術, **26**, 10, p. 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*, **11**, 2, p. 9~16(1982)
  29. 田大熙・金垣寧・金基準・李義範: 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 電気防蝕에 관한 研究, 韓國船用機關學會誌, **8**, 2, p. 39~50(1984)
  30. K. Endo, K. Komai, K. Kimura: Cathodic Protection against Propagation of Corrosion Fatigue Cracks of Mild Steel, *Bulletin of JSME*, **21**, 161, p. 1565~1570(1978)
  31. E. Bardal, J. M. Sondenfor: 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*, **2**, p. 902~914 (1980)
  32. E. Maahn: The Influence of Cathodic Protection on Crack Growth Rate in Fatigue of Steel in Sea Water, *Intern. Conf. Steel in Marine Structures Paris*, Vol. ST 5•3, p. 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*, N. Y., p. 76(1970)
  38. 遠藤吉郎: 腐蝕疲労, 防蝕技術, **26**, 10, p. 588~589(1977)
  39. 河本實: 材料試験法, 朝倉書店, p. 128(1979)
  40. 西田正孝: 應力集中, p. 184, 森北前房(1973)
  41. 前掲書(34) p. 65
  42. 田大熙: 腐蝕와 防蝕의 管理, p. 365, 大和出版社(1979)
  43. 川原正言, 栗原正好: 表面き製の疲労による傳播成長過程に関する豫備的 考察, 日本造船學會論文集, **137**, p. 9. 297~306(1975)