

한국부식학회지

Journal of the Corrosion Science Society of Korea
Vol. 11, No. 2, June. 1982,

<研究論文>

造船用高張力鋼材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

韓國海洋大學 防蝕研究室

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

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

Korea Maritime University Corrosion Laboratory

Abstract

The plane bending corrosion fatigue test was performed on the SM58 steel plates jointed with submerged arc welding in the natural sea water.

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

- 1) The weld zone of the steel plate had the highest tensile strength, electrode potential and the brittleness, but the heat affected zone was the lowest hardness.
- 2) The cathodic protection of the SM58 steel was also effective for the plane bending corrosion fatigue, and the optimum potential of it was -1000mV SCE.
- 3) The corrosion fatigue strength under the various stress conditions of the steel plate could be estimated and also the required safety factors on the design could be obtained from the fatigue strength diagram.

Nomenclature (記號說明)

C_{eq} : Carbon Equivalent (相當炭素量)
 P_{CM} : Composition of Weld Cracking Susceptibility (熔接龜裂感受性)
 α : Factor of Stress Concentration (應力集中率, 形狀係數)
 β : Factor of Rupture (破斷係數) or Fatigue Notch Factor (切欠係數)
 η : Notch Sensitivity (應力集中感度)
 S_f : Safety Factor (安全率)
 σ_{max}, σ_n : Maximum Stress (最大應力), Mean Stress (平均應力) kg/mm^2
 σ_a : Stress Amplitude (應力振幅), kg/mm^2
 σ_s, σ_{yp} : Fatigue Limit (疲勞限度), Yield Strength (降

伏強度), Kg/mm^2
 σ_{TS} : Tensile Strength (引張強度), kg/mm^2
 ρ, t : Notch Root Radius (노치루우트曲率半徑), Notch Length (노치길이), mm
 BM : Base Metal (母材部)
 HAZ : Heat Affected zone (熱影響部)
 WM : Welded zone (熔着部)
 N : Number of cycles to Fracture (破壞될 때까지의 사이클數)
 S : Repeated plane Bending Stress (反復平面굽힘應力)
 OWONA Specimen : No-welded No-notched Alternative Stress Specimen.
 WNNP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress Specimen.
 OWONP Specimen : No-welded No-notched Pulsative

Stress Specimen.

OWNNP Specimen : No-welded Notched Pulsative Stress Specimen.

OWONPOP Specimen : No-welded No-notched Pulsative Stress No-protected Specimen.

WWNNPOP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress No-protected Specimen.

WWNNPCP Specimen : Welded Notched Pulsative Stress Cathodic Protected Specimen.

1. 序 論

造船用鋼材로는 從末까지 거의 例外없이 41kg/mm² 級の 構造用鋼이 使用되어 왔었다. 그러나 近年부터는 船舶의 大型化와 重量의 輕減化의 新見地에서 뿐만 아니라 資源과 建造費의 節約化의 見地에서 50kg/mm² 級の 高張力鋼材가 造船鋼材의 主材로 採擇되는 新傾向¹⁾²⁾이 생기고 있다.

高張力鋼材는 一般的으로 熔接性³⁾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^{4)~7)}이 생기기 쉬운 缺陷이 있고, 特히 海水中에서 使用할 境遇에는 必然的으로 船體를 陰極防蝕(電氣防蝕)하여야 하나 이 때에는 發生되는 水素가스에 의한 障害⁸⁾가 念慮된다. 따라서 이 鋼材를 造船用으로 使用할 때에는 特히 腐蝕疲勞龜裂될 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. 또 船

舶은 莫大한 財産을 危險한 大洋에서 運航하여야 하므로 그 安全性이 대단히 重要하나 이 點에 치우치면 船價가 過高하게 된다. 그러므로 高張力鋼材를 船舶에 使用하려 할 때는 그 各部의 負荷應力の 特性에 따라 適正許容應力을 決定해서 安全性과 船價를 平衡시켜서 設計하는 일이 대단히 重要的 問題로 된다.

高張力鋼材의 腐蝕疲勞에 관한 研究에는 基礎的인 것이 상당히 많^{9)~19)} 있으나 實用狀態에 가까운 條件下에서 調査된 論文은 적고 또한 陰極防蝕을 適用한 研究는 不過 數篇^{20)~24)} 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 것이 아니다.

本研究는 大型船의 建造에 많이 使用되기 始作한 50 kg/mm² 級の 高張力鋼의 母材部와 同熔接部에 대해서 化學的性質, 機械的性質, 電氣化學的性質 등의 諸特性을 把握하고, 船舶의 實際 運航條件과 類似한 條件下에서 그 鋼材의 腐蝕疲勞限度를 測定한 後에 이것에 의해서 同高張力鋼材의 海水中的 疲勞限度線圖를 作成해서 造船設計時의 採用可能한 附加應力의 許容限界範圍를 提示코져 한다.

2. 試驗片과 實驗方法

2.1 供試鋼의 特性和 試驗片의 寸數

本試驗에 使用된 供試鋼材는 두께 6mm의 50kg/mm² 級の 國產 熔接構造用 高張力鋼이다. 이 鋼材의 化學

Table 1. Chemical Compositions of Steels (%)

Kinds of Steel	C	Si	Mn	P	S	Ceq*	P _{CM} **	Remark
Base Metal	0.17	0.28	1.22	0.011	0.008	0.373	0.240	
Welded Metal	0.14	0.33	1.67	0.013	0.005	0.418	0.235	
SM 58	<0.18	<0.55	<1.50	<0.04	<0.04	<0.44	<0.273	
RA 46~RE 46	<0.18	<0.55	0.9~1.6	<0.04	<0.04	<0.45	<0.261	Killed Steel

*C_{eq} (%) = C + Mn/6, **P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20

Table 2. Mechanical Properties of Steels(20°C)

Kinds of Steel	Yield point	Tensile strength	Elongation	Impact Strength*	Remark
Base Metal	55.18kg/mm ²	68.55kg/mm ²	27.1 %	4.95kg-m	
SM 58	>47	58~73	>19	>4.8	
RD 46~RE 46	>46	60~72	>16	>4.8	Quenching & Tempering

*Charpy Impact Test

Table 3. Welding Condition (Submerged Arc Welding)

Welding Rod wire (ϕ mm)	Face	Voltage (V)	Amp. (A)	peed (cm/min)	Heat Impact (KJ/cm)	Remark
AWS-F 71-EH-14 UC-36* (3.2)	Face	30~32	425~450	66	—	DAIDEN GI-BS
	Back Face	32	525	72	—	submerged Arc Welder

* 0.15C—1.52M—0.32Si—0.013P—0.015S

的組成과 機械的性質이 Table 1 과 2 와 같으므로 이 鋼은 韓國工業規格(KS)의 SM 58鋼과 韓國造級協會規定(KR) RD 46~RE 46鋼의 相當品이라는 것을 알 수 있다.

疲勞試驗片은 그 길이 方向과 鋼板의 壓延方向이 同一하도록 供試鋼板에서 切取해서 無熔接의 規格試驗片을 만드는 한편 切取鋼片을 서브머지드 아아크熔接에 의해서 맞대기熔接을 兩面에서 하여 熔接한 規格試驗片을 만들었다. 여기에서 서브머지드 아아크熔接法을 採擇한 理由는 只今 現在로 高張力鋼材의 熔接에 는 이 方法이 가장 많이 쓰이고 가장 확실하게 熔接되 기 때문이며, 그 熔接條件은 Table 3과 같다.

規格試驗片의 型과 치수는 鋼板兩面을 平削해서 4.0 mm 두께로 만든 다음에 金屬平板의 平面굽힘疲勞試驗法(JISZ-2275-1978)의 1~30號의 試驗片으로 加工하였

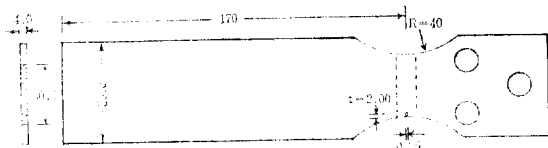
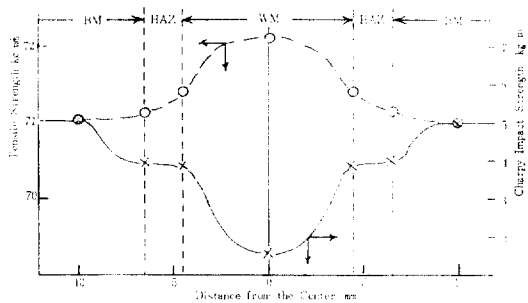
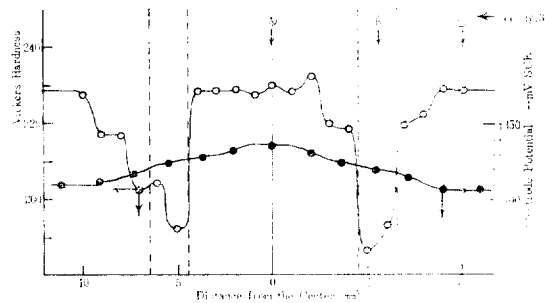


Fig. 1. Dimensions of Test Specimen (Unit : mm)



A) Tensile Strength and Charpy Impact Strength on the Weld Zone

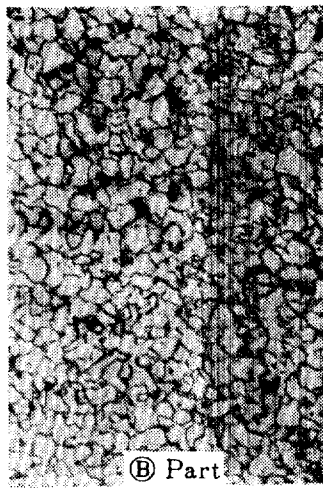


B) Vickers Hardness and Electrode Potential on the Weld Zone

Fig. 2. Mechanical Properties and Electrode Potentials on the Weld Zone of SM 58 Steel



(A) Part
(WM)



(B) Part
(HAZ)



(C) Part
(BM)

Fig. 3. Microstructures on the Weld Zone of SM 58 Steel

으며, 그 試驗片의 要部에는 다시 幅 0.25mm, 길이 2.00 mm의 노치를 加工한 노치試驗片과 노치를 加工하지 않은 無노치試驗片의 2種으로 만들었다. Fig. 1은 同試驗片의 形狀과 치수이다.

2.2 熔接部位의 特性變化

Fig. 2(A)는 平削한 熔接部位를 橫斷해서 그 各部를 要部로 하는 1-30號의 平面굽힘疲勞試驗片을 만들고 그 要部に 각각 노치를 加工해서 引張試驗한 結果와 同熔接部位의 各部에 노치를 낸 여러개의 試驗片을 만들어 chatpy 충격試驗을 한 結果이다. Fig. 2(B)는 그 各各의 平削加工한 熔接部位에 대해서 硬度分布와 電位分布(5% HNO₃+1% FeCl₃ 混液을 滴下해서 測定)를 測定한 結果를 表示한다. 또 Fig. 3은 同熔接部位의 熔着部(Ⓐ part), 熱影響部(Ⓑ part) 및 그 母材部(Ⓒ part)에 대해서 5% Nitral로 腐蝕시킨 後에 400倍의 倍率로 顯微鏡寫眞을 撮影한 結果이다.

이들의 結果를 綜合하면 熔着金屬部가 가장 引張強度가 強하고 電極電位가 가장 貴하고 가장 脆弱하며, 熱影響部는 引張強度, 電極電位 및 衝擊值가 모두 中位이나 硬度가 가장 낮다. 이와 같은 特性은 熔着金屬部의 組織이 Fig. 3과 같이 Dentrite 組織 내지 Widmanstätten 組織으로 發達하였기 때문이고, 熱影響部는 微細한 Ferrite(白)와 Pearlite(黑)의 均質混合織으로 바뀌므로서 靱性이 向上되었기 때문이라고 생각된다.

2.3 實物裝置의 實驗條件

本實驗에 使用된 平面굽힘疲勞試驗機는 偏心器에 의해서 任意의 一定한 平面굽힘應力을 反復해서 加할 수 있도록 自作開發한 裝置이며, 그 外觀이 Fig. 4와 같다. 이 試驗機는 減速기이 故으로 變速可能하고 同時에 4個의 試驗片을 兩振이나 片振의 疲勞試驗을 할 수 있으며 同一한 試驗機를 2臺 만들었으므로 同時에 8個의 試驗片에 대해서 試驗이 可能하다. 또 이 試驗機

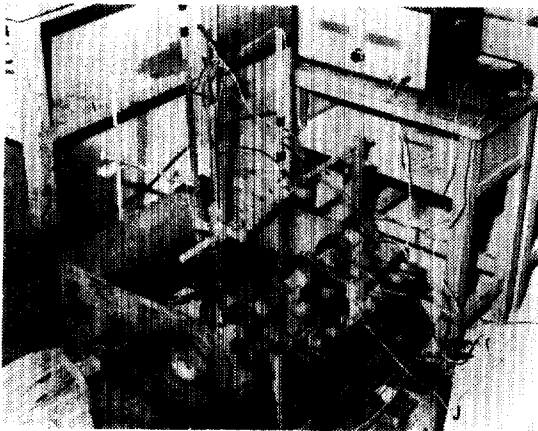


Fig. 4. Plane Bending Fatigue Tester

는 大氣中이나 水中의 平面굽힘疲勞試驗 뿐만 아니라 水中에서 試驗片을 電氣防蝕하면서도 疲勞試驗이 可能하다.

電氣防蝕에는 50V DC 2A의 定電壓裝置와 ϕ10mm ×30mm의 Pb-Ag系 不溶性陽極이 使用되었고, 電極電位의 測定에는 飽和카로멜電極(SCE)와 高抵抗電壓計(內部抵抗: 10⁷Ω/V)가 使用되었다.

本實驗에서 試驗片의 平面굽힘疲勞條件은 다음과 같다.

- (1) 實際 船體鋼板은 波濤에 의해서 每分當 6~12回(1~2Hz)의 片振反復굽힘疲勞를 받고 있는 部分이 많으나 이 速度는 實驗하기에 너무나 徐速이므로 14.2 Hz(852 cpm) 程度의 反復速度로 加速해서 疲勞試驗을 하였다. 따라서 이 加速試驗에서 얻어진 疲勞限度(疲勞限界強度)는 實際보다 若干 클 것으로 豫想되나 이 點에 관해서는 安全率에서 再考하기로 한다.
- (2) 船體鋼板을 熔接할 때는 그 熔着部에 熔接缺陷(微細龜裂)이 생기기 쉽고 이 곳에 應力集中이 일어난 것이므로 試驗片의 要部에는 幅 0.25mm, 길이 2.00 mm의 노치를 加工해서 應力集中이 일어나는 條件에서 實驗하였다. 이 境遇에 試驗片의 大氣中の 疲勞限度가 노치가 없는 것과 있는 것에서 각각 σ₀=16.5kg/mm²과 σ₀'=16.0kg/mm² 이었고 노치루우트部的 曲率半徑 ρ=0.10mm 程度이었으므로 이 試驗片의 노치는 다음과 같은 微細龜裂에 相當한다(t: 노치 길이 mm).

- 形狀係數: $\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = 1 + 0.788 \sqrt{\frac{t}{\rho}}^{26}$
 $= 1 + 0.788 \sqrt{\frac{2}{0.1}} = 4.524$
- 切缺係數: $\beta = \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} = 16.5/16.0 = 1.0313$
- 應力集中感度: $\eta = \frac{(\beta-1)}{\alpha-1} = 0.0313/3.524$
 88.8%

이 境遇의 疲勞限度의 應力에 대한 安全率²⁷⁾ S_f는

· S_f = α/β = 4.524/1.0313 = 4.387

Fig. 2에 의하면 試驗片의 굽힘疲勞應力에 대해서 低硬度部인 熱影響部가 가장 먼저 疲勞破斷될 것으로 생각할 수 있다. 그러나 가장 脆弱部인 熔着部에는 熔接龜裂을 豫想한 上記의 노치가 加工되어 있으므로 Fig. 5(A)로 보아서 熔着部가 제일 먼저 破斷된다.

- (3) 海水中の 船體에 대해서는 電氣防蝕하여야 하므로 試驗片은 自然電位(無防蝕) 및 -800mV, -1000mV, -1200mV, -1400mV(SCE)의 電位로 維持해서 電氣防蝕狀態를 比較하였고, 大氣中の 疲勞試驗結果와도 比較한다.
- (4) 腐蝕液은 다음과 같은 天然海水를 使用하였으며,

Table 4. Qualities of Sea Water for the Experiment

Hardness ppm CaCO ₃	M Alkalinity ppm CaCO ₃	Chloride ppm Cl ⁻	Specific Resistance Ω-cm	Specific weight	Temp. when water test °C
4,500	85	16,800	26.7	1.025	18

시험중의 蒸發量은 蒸溜水를 補充해서 一定 水準을 維持하였고, 한 試驗마다 물을 새로 바꾸었다. 그리고, 試驗중의 水温은 1~23°C의 範圍였다.

(5) 疲勞試驗은 10⁷회以上 繼續反復해서 苛酷疲勞시켜도 破斷되지 않으면 그 負荷條件에서는 試驗片이 破斷되지 않는 것으로 看做하였으며, 이러한 負荷中에서 最高值를 疲勞限度(疲勞強度)라고 하였다. 그리고 實驗중의 試驗中斷은 停電 등의 不得已한 事由가 있을 때에 限해서 하였고, 그 連中斷時間이 2時間(10⁷回時間의 約 1%, 을 超過할 때에는 再試驗하였다.

3. 實驗結果와 考察

Fig. 5(A)는 大氣中에서 熔接·無熔接, 노치有無, 片兩振 別의 各條件下에서 測定한 SM 58鋼의 S-N 線圖이고, 同圖(B)는 天然海水中에서 노치·片振·無防蝕의 條件下의 熔接·無熔接의 試驗片과 -800~-1400

mV(SCE)의 電位로 防蝕한 熔接·노치·片振試驗片의 S-Nf 線圖이다. 但, 熔接試驗片에는 一定 크기의 노치가 熔着金屬部의 中央에 加工되어 있다. 이들의 結果에 의하면 疲勞限度가 큰 境遇일수록 一般의으로 그 以上의 應力下에서도 疲勞破斷時間이 길어지는 傾向이 있으나 반드시 그러하지 않다. 또 S-Nf 關係線의 直線性은 大氣中의 電氣防蝕下에서 대체로 良好하나 海水中的 無防蝕의 條件下에서는 좋지 않으며, 또 海水中에서는 이들 S-Nf 關係線이 서로 거의 平行이나 大氣中에서는 그러하지 않다.

Fig. 6(A)는 Fig.5(A)에서 求한 疲勞限度를 서로 比較한 것이고 同圖(B)는 Fig. 5(B)에서 求한 限界強度를 그 電極電位에 대해서 整理한 것이다. 이 結果에 의하면 海水中的 鋼材는 그 腐蝕疲勞破壞에 대해서도 電氣防蝕의 效果가 대단히 크다. 이 境遇에 電極電位를 自然電位에서 約 100mV를 陰分極시켜서 -750mV(SCE)以下로 維持하면 그 疲勞限度를 大氣中的 疲勞限度가

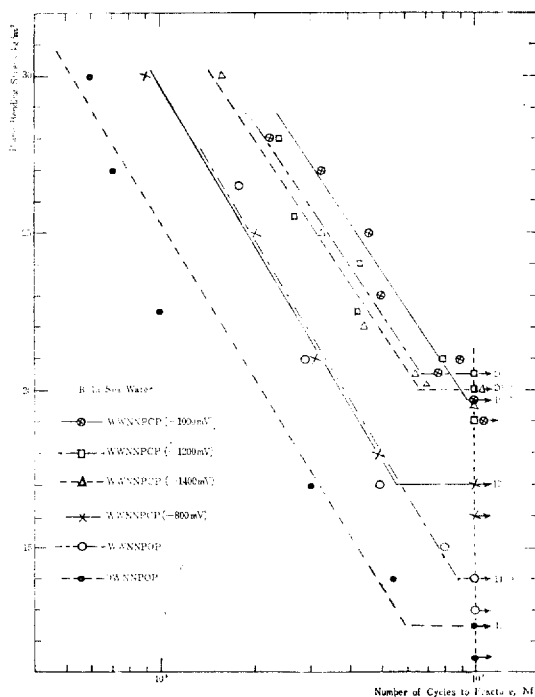
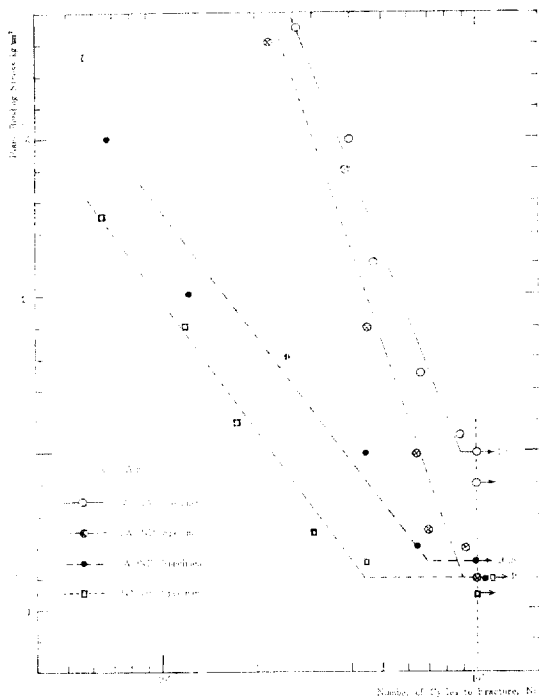


Fig. 5. S-N Diagrams of SM 58 Steel in Air and in Sea Water

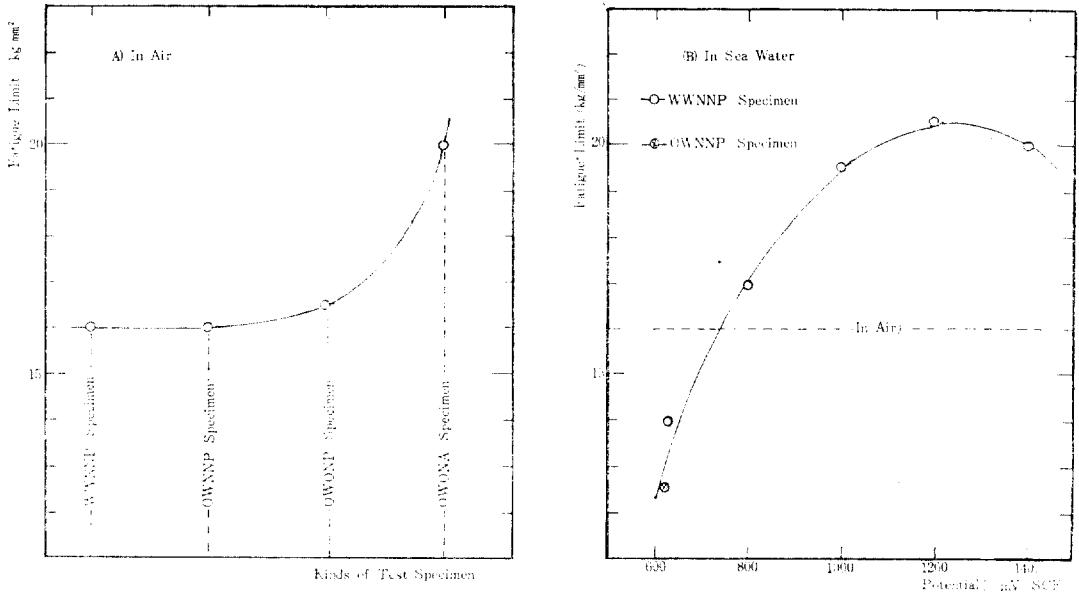


Fig. 6. Plane Bending Fatigue Limits of SM 58 Steel in Air and in Sea Water

지 向上시킬 수 있고, 電極電位를 $-1200\text{mV}(\text{SCE})$ 까지 낮출 때는 계속적으로 疲勞限度가 더 增加되다가 그 以上の 電位부터는 오히려 限界強度가 減少된다. 따라서 海水中の SM 58鋼은 防蝕問題나 腐蝕疲勞 뿐만 아니라 防蝕費用의 面으로 보아서도 그 電位를 $-1000\text{mV}(\text{SCE})$ 内外로 維持하는 것이 바람직하며, 이 電位는 單純한 電氣防蝕의 境遇의 $-850\text{mV}(\text{SCE})$ 内外보다는 約 150mV 가 더 낮은 電位이다.

Fig. 7은 SM 58鋼材의 疲勞限度線圖이다. 이 線圖는 縱軸에 應力振幅(σ_a)을 잡고 橫軸에 平均應力(σ_m)을 잡았으며, 그 作成要領은 다음과 같다. 卽 이 鋼材의 無熔接·無노치試驗片에서 大氣中の 兩振과 片振의 疲勞限度의 振幅(疲勞限度의 $1/2$)이 各各 10kg/mm^2 와 8.25kg/mm^2 이고, 이 鋼材의 降伏強度가 55.18kg/mm^2 이므로 그 單純剪斷強度는 最大剪斷變形에너지理論²⁹⁾에 의해서 $0.577\sigma_{yp}=31.84\text{kg/mm}^2$ 로 된다. 그러므로 平均應力이 0인 縱軸에 兩振時의 疲勞限度의 振幅 10kg/mm^2 點에 A, 片振時의 疲勞限度의 振幅 8.25kg/mm^2 와 그 平均應力이 同一하게 되는 C點을 45° 軸上에 잡고, 振幅이 0인 橫軸에 그 剪斷強度 31.84kg/mm^2 의 點 D를 잡은 後에 A, C, D를 單純曲線으로 連結한다. 그 다음에는 45° 軸上에 熔接·노치·片振試驗片의 大氣中과 海水中에서 電氣防蝕하지 않았을 때와 $-100\text{mV}(\text{SCE})$ 의 電位로 電氣防蝕하였을 때의 疲勞限度의 振幅을 C'(8.0kg/mm²), C''(7.0kg/mm²)와 C'''(9.75kg/mm²)

로 表示하고 D에서 DCA曲線에 準해서 DC'A', DC''A' 및 DC'''A'''曲線을 그린다. 이 線圖에서 縱軸인 OA線上은 兩振, B'C'~B'''C'''의 各線上은 그 各條件下의 片振, 後者의 各線의 右側部가 部分兩振, 그 左側部가 部分片振을 할 때의 疲勞限度振幅을 表示한다. 그러므로 여러가지의 다른 條件下에서도 疲勞限度를 推定할 수 있다. 또 各條件下의 疲勞限度의 安全率은 이 鋼材의 引張強度가 68.55kg/mm^2 이고 $-1000\text{mV}(\text{SCE})$ 의 防蝕條件下에서 片振疲勞되고 있다면 그 疲勞限度가 $19.5(9.75 \times 2)\text{kg/mm}^2$ 이므로 이 境遇의 安全率은 $68.55/19.5=3.51$ 이고 大氣中の 鋼板의 片振疲勞安全率은 $68.55/16=4.28$ 이다. 이 값들은 鋼船外板의 設計時 設計強度를 SS 41鋼材에 10kg/mm^2 , SM 58鋼材에 15kg/mm^2 程度로 잡는 것과 잘 一致하는 結果이다. 그러므로 이 線圖는 여러가지 條件下의 疲勞限度 뿐만 아니라 그 各條件下의 所要安全率을 推定하여 한다.

結 論

서브머저드 아아크熔接을 한 SM 58鋼材의 天然海水中的 平面沖蝕腐蝕疲勞試驗에서 다음의 結論을 얻었다.

- (1) 이 鋼材의 熔接部位는 熔着部가 最高의 引張強度, 電極電位 및 脆性を 나타내고 그 熱影響部는 最低硬도를 갖는다.

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・丸山・内山：各種高張力鋼の海水中的の腐蝕
疲れき裂傳播舉動, 鐵と鋼 1980. 12

19) 田大熙・金鎮京：海洋構造物用 HT 50 高張鋼의 熔
接部位의 環境에 따른 크랙傳播特性에 관한 研究,
未發表

20) 南・高田：軟鋼の腐蝕疲労と陰極防蝕, 防蝕技術,
Vol. 7, No. 6 (1958)

21) Hooper Hartt: The Influence of Cathodic Poariz-
ation upon Fatigue of Notched Structural in sea
Water, Corrosion, Vol. 34, No. 9 NACE(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) 前掲書 (23) P. 586~588

16) 西田正孝：應力集中, P. 184, 森北書房 (1973)

27) 前掲書 (26) P. 65