

工學碩士 學位論文

알루미늄 합금材 鎔接部の 負荷應力에
따른 腐蝕舉動에 관한 研究

指導教授 金 榮 大

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함



2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

洪 奉 杓

이 論文을 洪奉杓의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2001年 12月

主
委
委

審
員
員

노
박
김

태
경
영

영
동
대



目 次

List of tables	ii
List of figures	iii
Symbols	iv
Abstract	1
1. 序 論	3
2. 實驗裝置 및 方法	6
2-1. 試驗片	6
2-2. 試驗片에 負荷된 應力	9
2-3. 實驗裝置 및 實驗條件	13
2-4. 實驗方法	16
3. 實驗結果 및 考察	18
3-1. 鎔接部の 硬度分布와 金屬組織의 特性	18
3-2. 負荷應力에 따른 鎔接試驗片의 腐蝕舉動	20
3-3. 負荷應力에 따른 一般 試驗片의 腐蝕舉動	25
3-4. 負荷應力 및 鎔接 有無에 따른 應力腐蝕의 結果	30
4. 結 論	32
參考 文獻	33

List of Tables

Table 1 Chemical compositions of A5083-H112 (weight, %)	6
Table 2 Mechanical properties of A5083-H112 (20°C)	6
Table 3 Welding condition of test specimens	6
Table 4 Stress and torque of specimens	11
Table 5 Qualities of natural sea water used for the experiments	14
Table 6 The classification of corrosion pattern	17
Table 7 The stress corrosion test result of welded specimens	20
Table 8 The stress corrosion test result of general specimens	25

List of Figures

Fig. 1 Dimension of test specimen	7
Fig. 2 Detail of corrosion test fixture	12
Fig. 3 Experimental apparatus of constant-current corrosion test	13
Fig. 4 Schematic diagram of constant-current stress corrosion test	15
Fig 5 Distribution of hardness at welded zone for specimens with microvickers hardness tester (weight=1000gf)	19
Fig. 6 The microstructures in welded zone of specimens($\times 100$)	19
Fig. 7 Relation of stress and weight corrosion for welded specimens	20
Fig. 8 Relation of corrosion current and time for welded specimens	23
Fig. 9 Relation of electrode potential and time for welded specimens	23
Fig. 10 The detail corrosion pattern of welded specimens($\times 2$)	24
Fig. 11 Relation of stress and weight corrosion for general specimens	25
Fig. 12 Relation of corrosion current and time for general specimens	28
Fig. 13 Relation of electrode potential and time for general specimens	28
Fig. 14 The detail corrosion pattern of general specimens($\times 2$)	29

Symbols

T : Torque of the triangular thread surface (kgf-m)

Q : Normal load (kgf)

σ : Tensile stress (kgf/mm²)

ρ_d : Angle of thread friction (°)

λ : Lead angle of triangular thread (°)

μ : Coefficient of friction

α : Flank angle of triangular thread (°)

p : Pitch of triangular thread (mm)

d_2 : Pitch diameter of triangular thread (mm)

A Study on the Corrosion Behaviors Related to the Load Stress in Welded Zone of Al Alloy(A5083-H112)

Bong-Pyo Hong

Department of Mechanical Design

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

This research is on the study of the corrosion behaviors related to the load stress and the effects of heat treatment in a welded specimen compared to a general one of Aluminium alloy(A5052-H112) in natural sea water. The results from the constant-current stress corrosion test are as follows.

1. In the case of a welded specimen, in 9kgf/mm^2 of the load stress, the highest average electrode potential and the least corrosion weight are shown. Generally the more load stress is applied, the less corrosion weight is shown. And the average electrode potential and the average corrosion current becomes higher.

2. In the case of a general specimen, in 6kgf/mm^2 of the load stress, the average electrode potential is the highest and the corrosion weight is the least. As the load stress increases, the corrosion weight becomes less, while the average electrode potential and the average corrosion current becomes higher.
3. As to the corrosion pattern of the welded zone of a specimen, the base metal rather than the welded-metal zone shows uneven local corrosion and pits. The more load stress is applied, the less the corrosion degree becomes.
4. As to the corrosion pattern of a general specimen, uneven local corrosion and pits are shown, and the more the load stress, the less the corrosion degree. At the side of the specimen severe corrosion is shown in the area of residual stress in the rolling direction.

1. 序 論

金屬이 電氣化學的 또는 化學的 反應으로 인해 環境의 成分과 化合物로 變함에 따라 消耗되어 金屬製品의 性能이 低下되는 現象을 腐蝕(corrosion)이라 한다.¹⁾²⁾ 金屬材料의 強度에 影響을 미치는 이러한 腐蝕에는 순수한 電氣化學的 作用에 의해서만 진행되는 腐蝕과 電氣化學的 作用과 機械的 作用이 서로 上乘作用하는 應力 腐蝕으로 크게 나눌 수 있다.³⁾

金屬은 대부분의 霧圍氣에서 에너지적으로 不安定하기 때문에 金屬으로 存在하는 것보다 酸化 또는 腐蝕되어 安정한 酸化物 상태로 存在하려 한다. 특히 海水 분위기는 자연적으로 존재하는 분위기 중에서 腐蝕에 가장 有利한 環境이다. 腐蝕에 의해 破壞된 裝置나 構造物 등의 交換, 耐蝕性 增加를 위한 合金費用 등 直接 損失과 操業中止, 資源의 損失, 公害發生, 器機의 能力低下, 腐蝕 生成物로 인한 製品의 汚染, 過重한 設計 등 間接的 損失로 인한 막대한 經濟的인 損失 및 예기치 못한 災難을 예방하고, 作動器機의 安全性 向上과 매장량이 한정되어 있는 金屬資源의 保存性 측면에서 腐蝕 研究의 重要性이 있다.⁴⁾

機械나 金屬構造物에는 恒時 殘留應力을 비롯한 여러 가지 형태의 應力이 作用한다. 이러한 應力이 어떤 原因에 의해서 발생되었을지라도 金屬結晶格子를 변형시켜 原子가 갖는 自由에너지를 增加시키므로 應力을 받고 있는 金屬의 電位는 應力을 받고 있지 않는 金屬보다 낮아진다. 특히 冷間加工된 金屬은 加工에 의해서 金屬組織이 변하고 큰 應力이 남게 되므로 腐蝕速度가 상당히 增加하며, 降伏點 以下の 작은 應力을 받고 있는 金屬은 自由에너지의 增加가 아주 적으므로 全面腐蝕

을 거의 加速하지 못한다. 그러나 特定한 腐蝕環境 中에 있는 金屬은 降伏點 以下의 比較的 낮은 靜的應力을 받고 있어도 龜裂이 일어날 수 있다. 이것을 應力腐蝕龜裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC)이라 하고, 알칼리性 보일러 물 속의 鋼, 高溫鹽化物 溶液 中의 스테인레스鋼, 海水 中의 Al合金 등에서 應力腐蝕龜裂을 일으킨다. 應力腐蝕龜裂은 주로 合金에서 일어나고 純金屬에서는 일어나지 않으며, 純金屬이라도 미량의 不純物을 함유하는 것이 보통이므로 이 不純物로 인하여 龜裂感受性이 생긴다. 合金이 龜裂感受性을 갖는 것은 合金成分의 마이크로 偏析 때문이다. 또한 應力腐蝕龜裂은 壓縮應力에서는 일어나지 않고 引張應力에서만 일어나며, 引張應力의 발생 原因으로는 使用應力, 熱應力 그리고 내부에 존재하는 殘留應力 등이 있다.⁵⁾⁶⁾

알루미늄合金材는 耐蝕性 및 加工性이 우수하고, 低溫에서도 機械的 性質이 低下되지 않는다.⁷⁾ 이러한 特性으로 인하여 車輛, 特殊船舶 및 航空機 등에 널리 이용되고 있으며, 특히 特殊船舶에 있어서는 高强度 알루미늄合金材의 使用이 점차적으로 增大되고 있다.⁸⁾ 海水에 알루미늄 合金이 使用하기 시작한 것은 1890년경이며, 그 以後 船舶建造에 있어서 알루미늄 合金의 使用量은 점점 늘어나고 있다. 高速을 要하는 小型艦艇에서는 構造 全體가 알루미늄 合金으로 만들어지기도 한다. 또한 金屬構造物의 製作에 있어서 鎔接은 불가결한 방법이며, 이음의 形狀, 施工法, 鎔接金屬의 種類, 熱影響, 殘留應力 등이 腐蝕에 큰 影響을 미치는 것으로 알려져 있어 이와 관련된 腐蝕研究가 많이 進行되고 있다.⁹⁾

Al-Mg系 合金(A 5000系)은 海洋船舶의 여러 構造에 가장 널리 사용되고 있는 耐蝕 알루미늄 合金이다. Mg을 3.5~5% 함유하고 있는 A5083, A5086 등의 Al-Mg系 合金은 耐蝕性 및 耐海水性이 우수할 뿐만 아니라 鎔接性도 우수하고,

強度/重量의 比率이 높다.¹⁰⁾ 알루미늄 合金의 應力腐蝕龜裂의 原因은 Cl^- 이고, 그 龜裂은 恒時 粒界에서 발생하며, Mg, Zn, Cu 등을 함유하는 高力合金에 한하여 일어난다.¹¹⁾ 大氣中の 水分이나 鹽害로 인하여 應力腐蝕을 일으킬 수 있으므로 應力腐蝕龜裂에 대해 많은 研究가 이루어져 왔다. 그렇지만 Al-Mg系 알루미늄 合金에 있어서 應力の 크기가 應力腐蝕龜裂에 미치는 影響에 대해서 충분히 糾明된 研究報告는 그리 많지 않은 실정이다.

本 研究에서는 自然海水 中에서 應力을 받는 A5083-H112 알루미늄合金材의 腐蝕學動을 把握하기 위하여 鎔接部와 母材의 負荷應力에 대하여 定電流 應力腐蝕 實驗을 실시하여 相對電極電位 및 相對電流의 變化와 腐蝕樣式등을 比較 考察하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

2-1. 試驗片

本 研究에 使用된 試料는 두께 10.0mm인 船舶用 A5083-H112 알루미늄합금材이다. Table 1과 Table 2는 A5083-H112의 化學的 成分 및 機械的 特性을 나타낸 것이고, Table 3은 試驗片 製作時의 鎔接條件을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical compositions of A5083-H112 (weight, %)

Division	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	Cu	Al	Remarks
A5083	4.50	0.70	0.40	0.40	0.25	0.15	0.15	0.10	Res	
Weld metal	4.9	0.12	.	.	.	.	0.10	.	Res	

Table 2. Mechanical properties of A5083-H112 (20℃)

Division	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Remarks
A5083	31	19	16	
Weld metal	22	12	30	

Table 3. Welding condition of test specimens

Division	Welding wire (mm)	Face	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/min)	Remarks
A5083	* E 5356 (ϕ 2.4)	F	26	220	340	MIG welding*

* KEMPPI MX SYNERGIC (FINLAND)

船舶用 A5083-H112 알루미늄합금材 試料는 그 길이 方向이 壓延方向과 동일하

도록 供試板材에서 切取한 다음 불활성가스 금속 아아크鎔接(inert gas-shielded metal arc welding, MIG welding)으로 兩面에 맞대기鎔接을 하였다. 아르곤가스를 사용한 MIG鎔接을 채택한 이유는 鎔接物 表面의 酸化物을 除去하는 淸淨作用(cleaning action)이 뛰어나고, 熔込은 다소 폭이 넓고 깊은 편으로 이음매의 信賴度가 높기 때문이다.¹²⁾ 또한 試料의 鎔接은 實際環境에 가깝도록 現場의 鎔接條件에 맞추어 鎔接하였다.

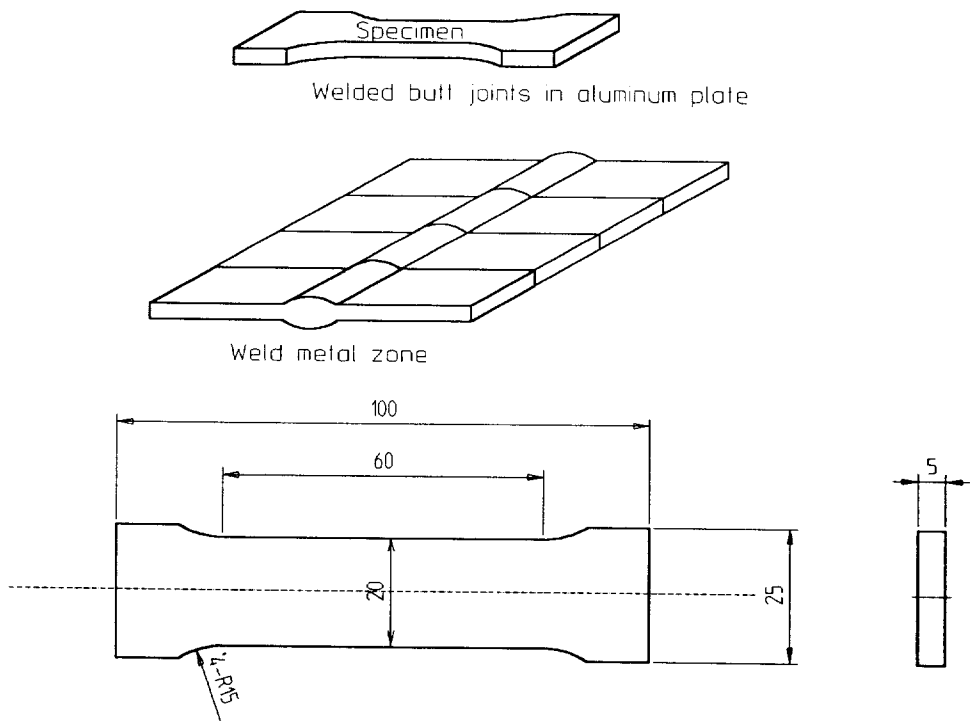


Fig. 1. Dimension of test specimen

原材料(A5083-H112)에서 試驗片을 切取한 후 머시닝센터(Machining Center)에서 銲接試驗片(WS : Welded specimens)과 非銲接試驗片(NWS : Non-Welded specimens)의 上下 表面을 加工하고, 銲接試驗片은 맞대기銲接 이음의 引張試驗片 KS B 0833-1995-1A (ISO 4136-1989) 規格에 맞추어 製作하였다.

銲接 후 다시 머시닝센터에서 Fig. 1의 試驗片 형상으로 가공하고 各 試驗片은 表面條件을 일정하게 하기 위하여 #400, #800, #1200, #2000의 砂布(sand paper)로 研磨하였다. Fig. 1은 試驗片의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 銲接試驗片을 製作한 다음 銲接接合部の 金屬組織의 特性을 파악하기 위하여 沈漬腐蝕實驗前에 한쪽 면을 鏡面鍊磨하고, 염화제2철용액으로 腐蝕시켜 에틸 알콜로 洗滌한 다음 金屬顯微鏡(MCB-1, metallurgical microscope)을 使用하여, 倍率 100倍로 組織檢査를 하였다. 銲接接合部の 位置別 硬度를 Tukon Digital microhardness tester (weight=1000gf)를 使用하여 測定하였다.

2-2. 試驗片에 負荷된 應力

A5083-H112 알루미늄合金材 試驗片은 試料의 降伏應力은 19kgf/mm^2 이고, 鎔接材料인 鎔接棒(E 5356)의 降伏應力이 12kgf/mm^2 이므로 鎔接材料의 降伏應力の 0%, 25%, 50%, 75%에 해당하는 0kgf/mm^2 , 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 , 9kgf/mm^2 의 降伏點 以內의 引張應力을 負荷하기 위하여 두께 30mm의 鋼板을 使用하여 6개의 固定具를 제작하였다. 그리고 固定具의 下端部에 아크릴(acrylic)로 制作한 받침대(block)를 설치하고 試驗片을 올려놓은 다음, 試驗片 鎔接部の 中央에 均一分布荷重을 負荷하기 위하여 '∩'字 形態의 아크릴로 制作한 압입자를 試驗片과 鋼鐵 壓入子 사이에 넣어 굽힘응력을 負荷하였다. 引張應力을 負荷하지 않고 굽힘應力을 負荷한 이유는 試料의 引張強度가 커서 토크렌치(torque wrench)를 活用하는 方法으로는 실험에 필요한 垂直荷重을 負荷할 수 없기 때문이다. 굽힘荷重을 받는 背面에는 引張荷重을 받고 正面은 壓縮荷重을 받기 때문에 中央部の 引張應力을 活用하기 위하여 이 方法을 採擇하였다.

Fig. 2는 定電流 應力腐蝕 實驗裝置에 使用된 試驗片 固定具(fixture)의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

試驗片의 引張應力(σ)에 대한 토크렌치의 토크(T)의 計算式은 다음과 같다.¹³⁾

삼각 나사의 나사면에 있어서 토크를 T , 垂直荷重을 Q 라고 하면,

$$T = Q \frac{d_2}{2} \tan(\rho_d + \lambda) \quad \text{----- (1)}$$

이다. 여기서 ρ_d , λ 는 각각 나사의 마찰각과 리드각이다.

ρ_d 와 λ 는 각각

$$\rho_d = \tan^{-1} \frac{\mu}{\cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{p}{\pi d_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

이다.

나사의 마찰계수 $\mu = 0.15$ 이고, 플랭크각 $\alpha = 30^\circ$, 피치 $p = 1.75\text{mm}$, 유효지름 $d_2 = 10.863\text{mm}$ 이므로(KS B 0201), 이것을 式 (2)와 式 (3)에 代入하면 나사의 마찰각 $\rho_d = 9.826^\circ$, 리드각 $\lambda = 2.935^\circ$ 가 된다.

따라서

$$T = 1.230 Q \quad \dots\dots\dots (4)$$

이다.

垂直荷重을 받는 보(beam)에서 굽힘모멘트(bending moment)와 斷面係數 및 굽힘應力の 關係式은 다음과 같다.

$$M = \frac{Ql}{6} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z = \frac{b h^2}{6} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (5)와 式 (6)을 式 (7)에 代入하면

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{Ql}{b h^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

가 된다.

式 (8)에서 試驗片에 작용하는 垂直荷重은

$$Q = \frac{\sigma b h^2}{l} \quad \dots\dots\dots (9)$$

이므로 式(9)를 式(4)에 代入하면

$$T = 1.23 \frac{\sigma b h^2}{l} \quad \dots\dots\dots (10)$$

이 된다.

鎔接試驗片(WS)과 非鎔接試驗片(NWS)에서 $b = 20mm$, $h = 5mm$,
 $l = 60mm$ 이므로, 負荷應力에 따른 토크를 式 (10)으로부터 求하였다.

Table 4는 鎔接試驗片과 非鎔接試驗片의 應力에 따른 토크를 나타낸 것이다.

Table 4. Stress and torque of specimens

Specimen No.	1	2	3	4	Remarks
Stress (kgf/mm ²)	0	3	6	9	
Torque (kgf-mm)	0	30.75	61.5	92.75	

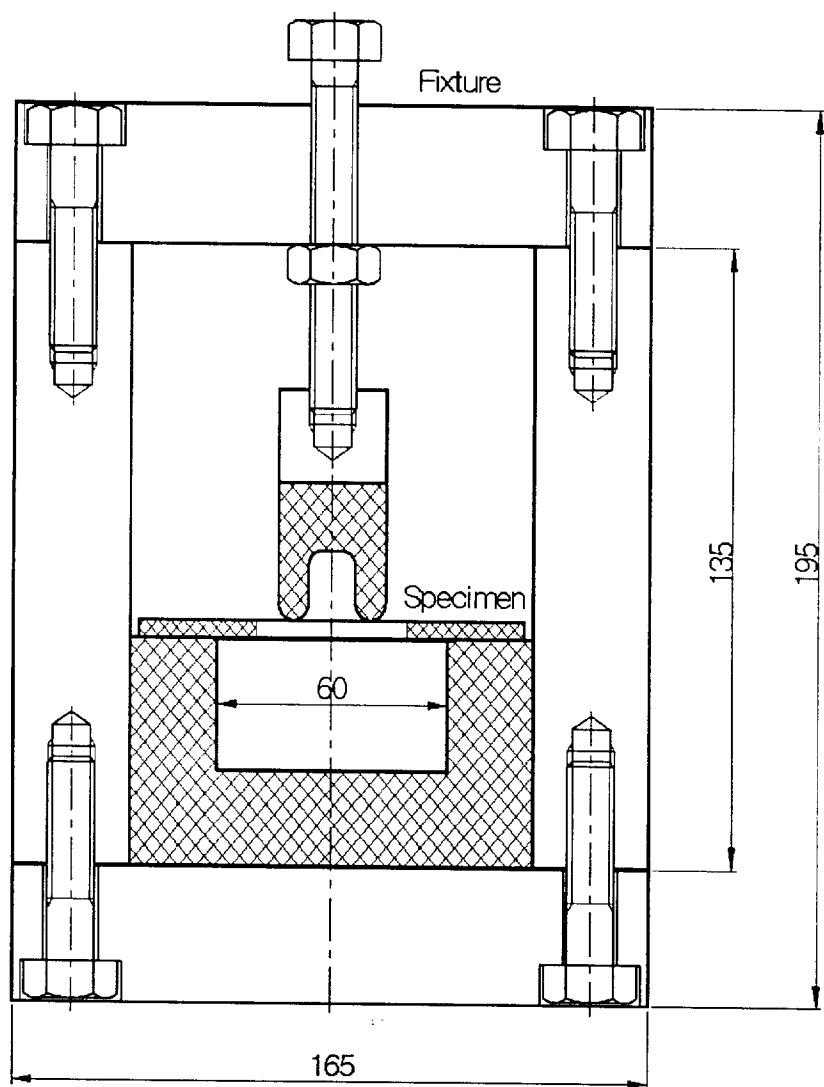
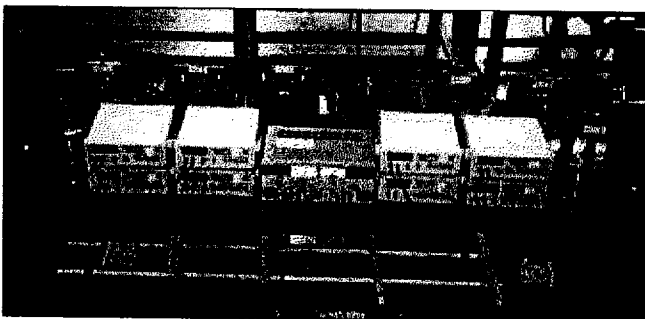


Fig. 2. Detail of corrosion test fixture

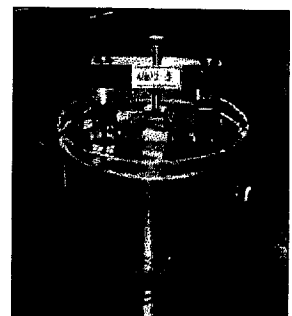
2-3. 實驗裝置 및 實驗條件

Fig. 3은 定電流 應力腐蝕 實驗裝置를 나타낸 것이다. Fig. 1와 같은 試驗片의 中央部를 기준으로 하여 表面積을 $1,400\text{mm}^2$ 만큼 남기고 左右部를 絶緣 테이프로 完全 絶緣하였다. 그리고 固定具의 下端에 아크릴 받침대를 설치하고, 試驗片이 받침대의 中央에 位置하도록 올려놓은 다음, 토크렌치를 사용하여 上部의 高張力 볼트를 죄어 試驗片의 負荷應力이 各各 0kgf/mm^2 , 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 , 9kgf/mm^2 가 되도록 하였다.

脫酸銅으로 製作한 補助電極도 表面積이 試驗片의 表面積과 같게 $1,400\text{mm}^2$ 가 되도록 나머지 部分을 絶緣 테이프로 完全 絶緣시켜 試驗片의 아래 25mm 떨어진 아크릴 받침대 위에 固定 設置하였다. 그리고 應力이 負荷된 試驗片과 補助電極을 알코올로 脫脂한 후 4ℓ 용량의 實驗槽 中央에 Fig. 3의 (b)와 같이 設置하였고 腐蝕環境으로 自然海水를 채웠다.



(a)



(b)

Fig. 3. Experimental apparatus of constant-current corrosion test

Table 5는 實驗에 使用된 自然海水의 性質을 나타낸 것이다.

Table 5. Qualities of natural sea water used for the experiments

Water temp. (℃)	Specific gravity	Specific resistance (Ω -cm)	pH	Total hardness (ppm, CaCO ₃)	Chloride ppm(Cl ⁻)	Remarks
20	1.0231	21.5	7.2	3.555	115	

Fig. 4는 定電流 應力腐蝕 實驗裝置의 概略圖를 나타낸 것이다. 試驗片을 陽極(anode)으로, 補助電極은 陰極(cathode)으로 하여 直流安定化 電源裝置, 直流電流計, 可變抵抗器를 直列로 연결하여 동시에 定電流 應力腐蝕 實驗이 가능하게 하였다.¹⁴⁾¹⁵⁾

그리고 各 試驗片과 補助電極 사이에 電位差計를 並列로 연결하여 相對電極電位 및 相對電流의 變化를 測定하였다

다음은 定電流 應力腐蝕實驗에 使用된 計測器의 제원을 나타낸 것이다.

直流安定化 電源裝置 : DC Regulated power supply, Range 0~3A, 0~30V,
Model ED-330T (ED),

直流電位差計 : Digital DC Voltmeter, Range 200mV~1000V, Model DV-101A
(ED),

直流電流計 : Digital DC Ammeter, Range 200 μ A~20A, Model DA-101B (ED),

可變抵抗器 : Slide Rheostat, 187.5 Ω , 0.8A, Model N-2791 (NEWTRONIX),

重量減量測定器 : Electronic Digital Balance, Range 310g $\times$ 0.1mg,

Model AP310-0,

pH Meter : Desktop Dual pH/ISE/mV Meter, Model 750P (Istek, Inc.),

Digital Strain Meter : Strain range $\times 10^{-6}$, Model MS-1120,

Torque Wrench : Range 1.0~20.7kgf-m, Model OP-150 (Onion ins. America)

등을 사용하였다.

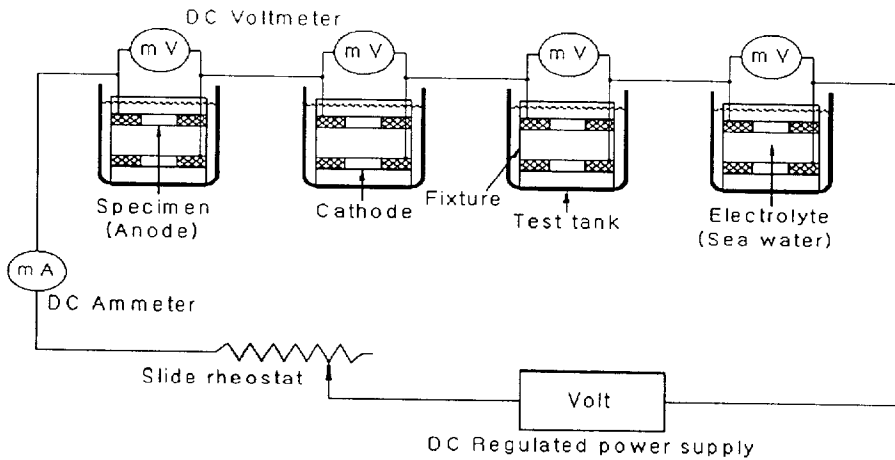


Fig. 4. Schematic diagram of constant-current stress corrosion test

2-4. 實驗方法

Fig. 3의 實驗裝置에서 一般 試驗片과 鎔接試驗片을 固定具에 설치하여 負荷應力을 各各 0kgf/mm^2 , 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 , 9kgf/mm^2 되도록 토크렌치로 轉 다음, 8개의 實驗槽에 浸漬시켜 直列로 배열하였다. 그리고 陽極(試驗片)과 陰極(補助電極)사이의 전체 電壓을 8V, 陽極의 電流密度를 0.67mA/cm^2 가 되도록 直流電源安定化裝置와 可變抵抗器를 使用하여 조절하면서 240시간 동안 定電流 應力腐蝕實驗을 실시하였다. 그리고 實驗途中에 매 12시간 단위로 試驗片(陽極)과 補助電極(陰極)과의 相對電極電位 및 相對電流의 變化를 測定하였다.

以上の 實驗이 끝난 후에 試驗片과 補助電極을 實驗裝置에서 分離하여 水洗한 다음, 室溫에서 飽和된 70% 窒酸溶液에 3분간 浸漬시켜 試驗片 表面에 부착된 酸化물을 除去하였다. 그리고 各 試驗片에 부착시켰던 絶緣 테이프를 除去한 다음 알코올로 洗滌하여 건조한 후 腐蝕量을 計測하였다.

腐蝕樣式은 British Aluminum의 腐蝕樣式の 分類를 따라 Table 6과 같이 分類하였다.¹⁶⁾¹⁷⁾

Table 6. The classification of corrosion pattern

Division	No.	Corrosion pattern	Remarks
全面 腐蝕	1	Ge	한결같이 全面腐蝕
	2	Gu	凹凸이 있는 全面腐蝕
	3	Le	局部腐蝕 안이 平坦
	4	Lu	局部腐蝕 안이 凹凸
孔蝕	5	W	넓은 孔蝕(지름÷깊이 ≤ 6)
	6	M	中位の 孔蝕(지름÷깊이 ≤ 1)
	7	N	좁은 孔蝕(지름÷깊이 ≤ 0.25)
其他	8	K	腐蝕터짐
	9	Y	粒界腐蝕
	10	Ex	剝落
	11	P	穿孔
	12	B	부풀음
	13	S	漏泄
	14	T	터짐매
	15	La	層狀剝離

3. 實驗結果 및 考察

船舶用 A5083-H112 알루미늄합금材 鎔接試驗片(WS, welded specimens)과 非鎔接試驗片(NWS, non-welded specimens)에 負荷應力의 크기를 변화시켜 各各 240 時間(10日間) 동안 應力腐蝕實驗을 실시하여 試驗片과 補助電極과의 相對電極電位 및 相對電流의 變化 그리고 試驗片 表面의 腐蝕樣式을 比較 考察 하였다.

3-1. 鎔接部の 硬度分布와 金屬組織의 特性

Fig. 5는 鎔接接合部の 位置別 硬度分布를 나타낸 것이다. 알루미늄합금材 鎔接部の 硬度分布는 鎔接金屬部가 母材部보다 약간 높은 硬度를 나타내고, 熱影響部에서도 다소 높은 硬度를 維持하는 硬脆性을 보이고 있다. 이는 아르곤가스를 사용한 수동 MIG鎔接을 2~3회에 걸쳐 실시하여 작업을 완료하기 때문에 鎔接金屬 中央부와 熱影響部에서 硬化層이 형성되어 硬度가 다소 높게 나타나는 것으로 思料된다. 熱影響部는 鎔接金屬部보다 急冷되어 硬化層을 형성하기 때문에 硬度가 높게 나타나며, 이 부근에서 鎔接龜裂이 쉽게 발생하거나 延性이 저하된다.¹⁸⁾¹⁹⁾

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 鎔接試驗片 鎔接部の 微細組織을 나타낸 것이다. 基地의 結晶은 Al의 α 相이며, 粒內에 不純物인 Fe에 의한 엇치피트(etch pit)가 微細하면서도 치밀하게 분포되어 있다.²⁰⁾

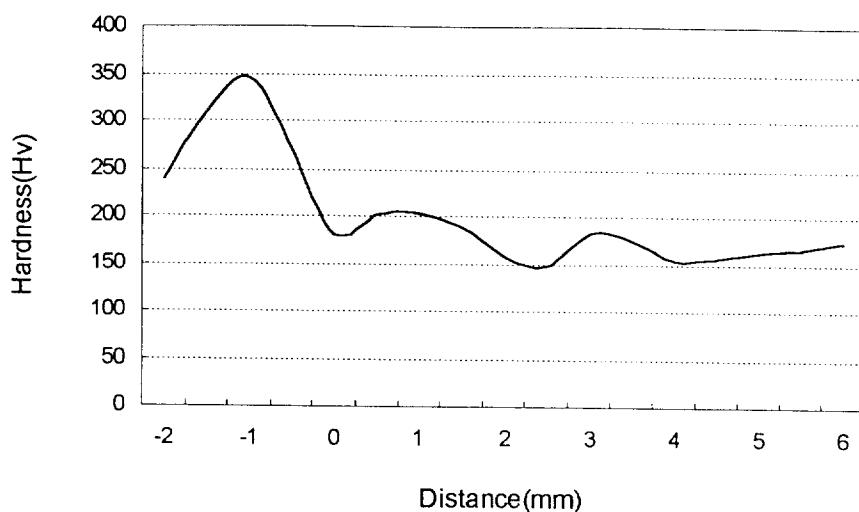


Fig 5 Distribution of hardness at welded zone for specimens with microvickers hardness tester (weight=1000gf)

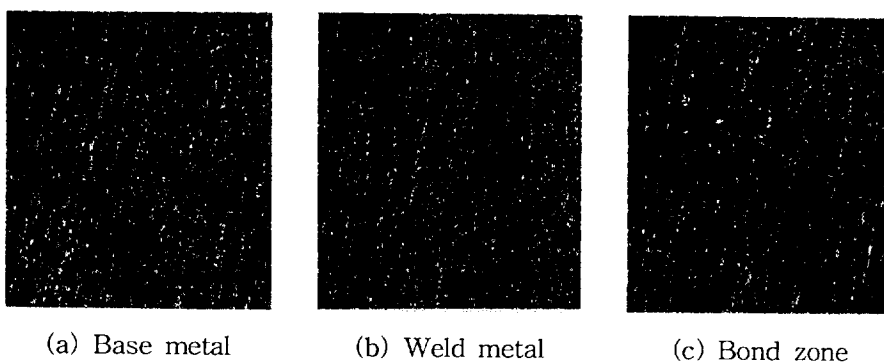


Fig. 6. The microstructures in welded zone of specimens($\times 100$)

3-2. 負荷應力에 따른 鎔接試驗片의 腐蝕舉動

Table 7은 鎔接試驗片 鎔接部의 定電流 應力腐蝕實驗에서 試驗片과 補助電極과의 負荷應力の 크기에 따른 腐蝕量, 平均相對電流, 平均相對電極電位, 表面腐蝕樣式을 나타낸 것이다.

Table 7. The stress corrosion test result of welded specimens

Specimen No.	Stress (kgf/mm ²)	Weight corrosion (gf)	Corrosion current (mA)	Electrode potential (V)	Corrosion pattern	Remarks
WS-1	0	0.9183	0.031	0.225	Lu, W	
WS-2	3	0.9157	0.033	0.239	Lu, M, W	
WS-3	6	0.9189	0.044	0.234	Lu, M	
WS-4	9	0.9134	0.037	0.262	Lu, W	

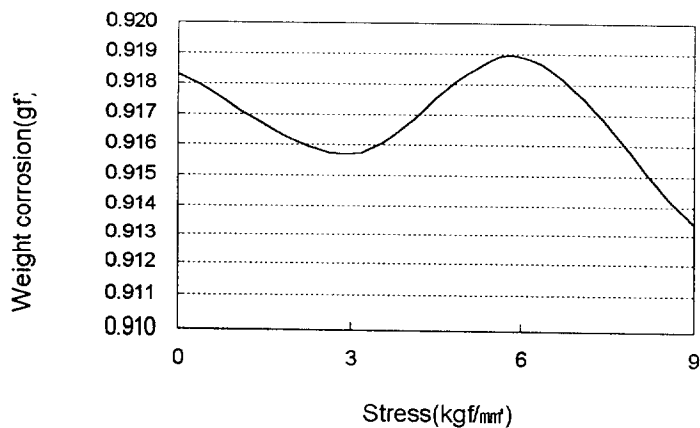


Fig 7 Relation of stress and weight corrosion for welded specimens

Fig. 7은 負荷應力の 크기에 따른 銲接試驗片의 腐蝕量을 나타낸 것이다. 9kgf/mm²의 應力을 負荷한 WS-4 試驗片의 腐蝕量은 0.9134gf으로 應力을 負荷하지 않은 WS-1 試驗片의 腐蝕量보다 적은 값을 나타내고 있고, 6kgf/mm²의 應力을 負荷한 WS-3 試驗片에서 가장 많은 腐蝕量을 나타내고 있다.

Fig. 8은 時間의 경과에 따른 相對電流의 變化를 나타낸 것이다. 相對電流는 모든 負荷應力 下에서 96時間까지는 급격히 減少하는 傾向을 보이다가, 그 以後부터는 緩慢하게 減少하여 144時間 後부터는 거의 變化가 없음을 보여준다. 그러나 腐蝕量이 가장 큰 6kgf/mm²의 應力을 負荷한 WS-3 試驗片에서는 平均相對電流가 0.044mA로 다른 試驗片에 비해 0.007~0.013mA 程度 높게 나타나고 일반적으로 負荷應力을 加한 試驗片이 應力을 負荷하지 않은 試驗片보다 다소 높게 나타나는 傾向이 있다.

Fig. 9는 時間의 경과에 따른 相對電極電位의 變化를 나타낸 것이다. 相對電極電位는 모든 負荷應力 下에서 96시간까지는 급격히 減少하다가, 144시간 이후부터는 대체로 일정하다. 9kgf/mm²의 應力을 負荷한 WS-4 試驗片에서는 平均相對電極電位가 0.262V로 가장 높게 나타났으며, 모든 負荷應力 下의 銲接試驗片에서는 負荷應力을 加하지 않은 試驗片보다 약간 높은 傾向을 보인다. 6kgf/mm²의 應力을 負荷한 WS-3 試驗片의 경우에는 3kgf/mm², 9kgf/mm²의 應力을 負荷한 試驗片보다 相對電極電位가 낮다. 一般的으로 應力腐蝕은 負荷應力이 클 수록 相對電極電位가 낮아지는 것으로 알려져 있으나 本 實驗의 腐蝕環境에서는 應力이 增加할수록 相對電極電位가 增加하다가 一定한 負荷應力에서는 다소 減少한 후 다시 上昇하는 傾向을 보인다.

Fig. 10은 銲接試驗片 銲接部の 腐蝕樣式을 比較하여 나타낸 것이다. Fig. 10

(a)는 應力을 負荷하지 않은 試驗片으로, 母材部の 全面에 局部腐蝕(Lu) 및 다소 넓은 孔蝕(W)현상을 보이며, 熱影響部에서는 다수의 侵蝕현상을 볼 수 있다. Fig. 10 (b), (c)는 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 母材部の 腐蝕이 현저히 進行되어 侵蝕層을 形成하고, Fig. 10 (d)는 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 全面에 요철이 있는 局部腐蝕과 좁은 孔蝕(N)이 나타나며 母材部の 侵蝕현상이 심하게 나타난다. 銲接 試驗片의 腐蝕樣式은 일반적으로 負荷應力이 增加 할 수록 좁은 孔蝕에서 넓은 孔蝕 및 全面 局部腐蝕으로 進行됨을 알 수 있고, 熱影響部에서는 물결모양의 境界腐蝕이 뚜렷하게 나타난다. 이는 좁은 孔蝕(N)으로부터 局部腐蝕 및 全面腐蝕으로 進行되는 것이라 思料된다.

試驗片 側面의 腐蝕樣式은 全面보다 腐蝕의 進行이 빠르게 進行되며, 材料의 壓延方向 및 負荷應力이 작용하는 方向으로 요철이 있는 局部腐蝕(Lu) 및 넓은 孔蝕이 나타나고, 銲接金屬部보다 母材部の 腐蝕程度가 심하다.

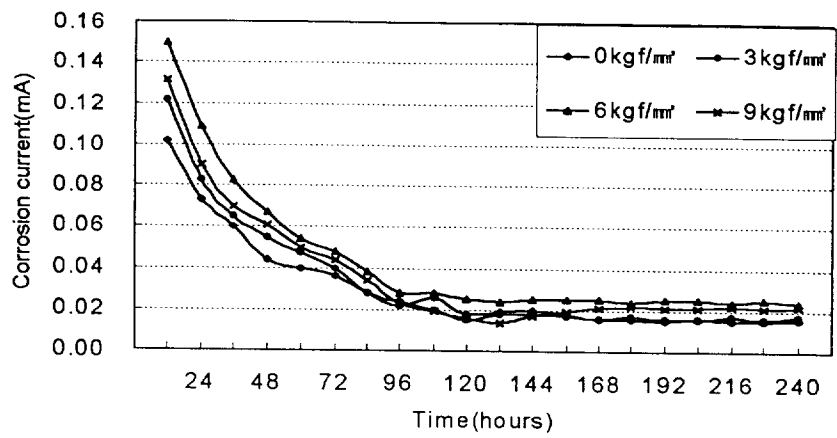


Fig. 8 Relation of corrosion current and time for welded specimens

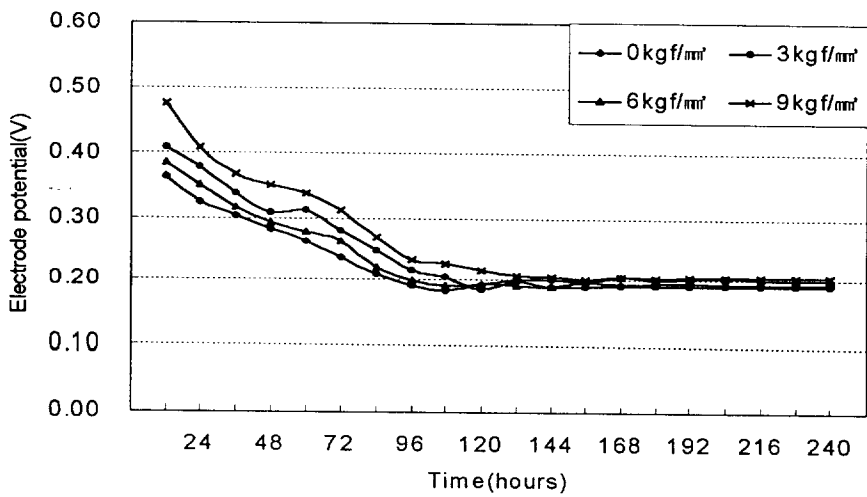
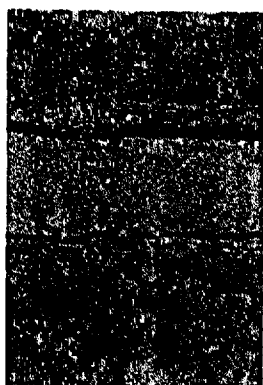
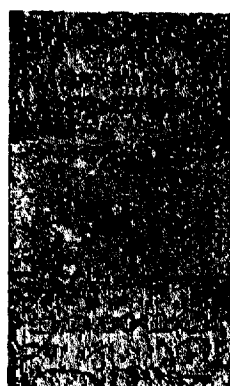


Fig 9 Relation of electrode potential and time for welded specimens



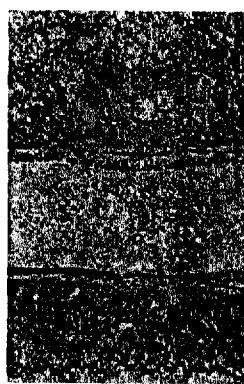
(a) 0 kgf/mm²



(b) 3 kgf/mm²



(c) 6 kgf/mm²



(d) 9 kgf/mm²

Fig. 10 The detail corrosion pattern of welded specimens($\times 2$)

3-3. 負荷應力에 따른 一般 試驗片의 腐蝕舉動

Table 8은 定電流 應力腐蝕 實驗期間 중 負荷應力の 크기에 따른 一般 試驗片의 腐蝕量, 平均相對電流, 平均相對電極電位, 腐蝕樣式을 나타낸 것이다.

Table 8. The stress corrosion test result of general specimens

Specimen No.	Stress (kgf/mm ²)	Weight corrosion (gf)	Corrosion current (mA)	Electrode potential (V)	Corrosion pattern	Remarks
NWS-1	0	0.9344	0.030	0.177	Lu, W	
NWS-2	3	0.9344	0.048	0.214	Lu, W	
NWS-3	6	0.9336	0.037	0.278	Lu, W	
NWS-4	9	0.9186	0.041	0.245	Lu, M	

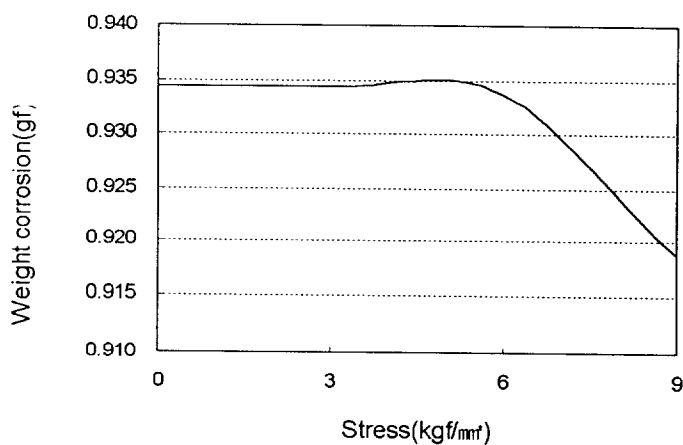


Fig 11 Relation of stress and weight corrosion for general specimens

Fig. 11은 負荷應力の 크기에 따른 一般 試驗片의 腐蝕量を 나타낸 것이다. 一般 試驗片은 모든 應力 下에서 應力の 增加와 더불어 腐蝕量이 減少하여, 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 NWS-4 試驗片이 가장 적고, 3kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 NWS-2 試驗片의 腐蝕量은 0.9344gf 로 가장 많고 應力을 負荷하지 않은 NWS-1 試驗片과 거의 같다.

Fig. 12는 時間의 經過에 따른 相對電流의 變化를 나타낸 것이다. 相對電流는 負荷應力の 크기에 관계없이 96時間까지는 급격히 減少하나, 그 以後에는 대체로 一定한 傾向을 보인다. 이것은 初期에는 表面 附着物 및 不動態皮膜의 形成이 급속히 進行되면서 相對電流가 낮아지지만, 96時間 이후부터는 不動態皮膜이 安定化되면서 일정해진 것으로 思料된다. 應力을 負荷하지 않은 NWS-1 試驗片에서는 平均相對電流가 0.030mA 로 가장 낮은 값을 나타내나, 3kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 NWS-2 試驗片에서는 0.048mA 로 가장 높다. 따라서 一般 試驗片의 相對電流는 應力을 負荷하지 않았을 때보다 負荷應力을 加했을 때 높게 나타나고 3kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 NWS-2 試驗片에서 다소 높게 나타난다.

Fig. 13은 時間의 經過에 따른 相對電極電位의 變化를 나타낸 것이다. 相對電極電位는 負荷應力の 크기에 관계없이 144時間까지는 서서히 減少하나, 168時間 以後에는 대체로 一定한 傾向을 보인다. 그리고 平均相對電極電位는 負荷應力이 增加할 수록 增加하는 傾向을 보이나 腐蝕量이 가장 적은 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 NWS-4 試驗片에서는 平均相對電極電位가 0.245V 로 오히려 減少하는 傾向을 보인다.

Fig. 14는 一般 試驗片의 腐蝕樣式을 比較하여 나타낸 것이다. Fig. 14 (a)는 應力을 負荷하지 않은 試驗片으로 全面에 局部腐蝕(Lu) 및 孔蝕(M)이 보인다. Fig.

14 (b), (c)는 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 腐蝕이 급속히 진행되어 孔蝕(M)을 형성하고, 絶緣 境界部에서는 깊은 境界腐蝕이 나타남을 알 수 있다. 이는 좁은 孔蝕(N)으로부터 局部腐蝕 및 넓은 孔蝕(W)으로 진행되는 것이라 사료된다. Fig. 14 (d)는 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 全面에 요철이 적은 局部腐蝕과 좁은 孔蝕(N)과 함께 絶緣 境界部の 침식현상이 나타난다.

一般 試驗片의 腐蝕樣式은 대체적으로 應力이 增加 할수록 넓은 孔蝕에서 좁은 孔蝕 및 全面 局部腐蝕으로 진행됨을 관찰 할 수 있다.

試驗片 側面の 腐蝕樣式은 材料의 壓延方向의 腐蝕이 뚜렷하게 나타나고 負荷 應力이 作用하는 方向으로 요철이 있는 全面腐蝕(Lu) 및 넓은 孔蝕(W)이 나타난다. 또한 鎔接 試驗片의 側面과는 달리 腐蝕程度가 적음을 알 수 있는데 이는 鎔接 試驗片과는 달리 熱變形이 없기 때문에 思料된다.

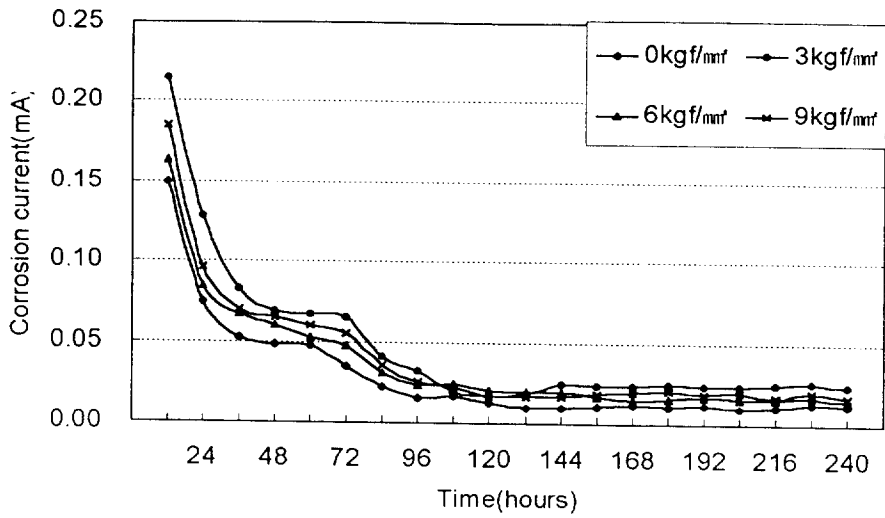


Fig 12 Relation of corrosion current and time for general specimens

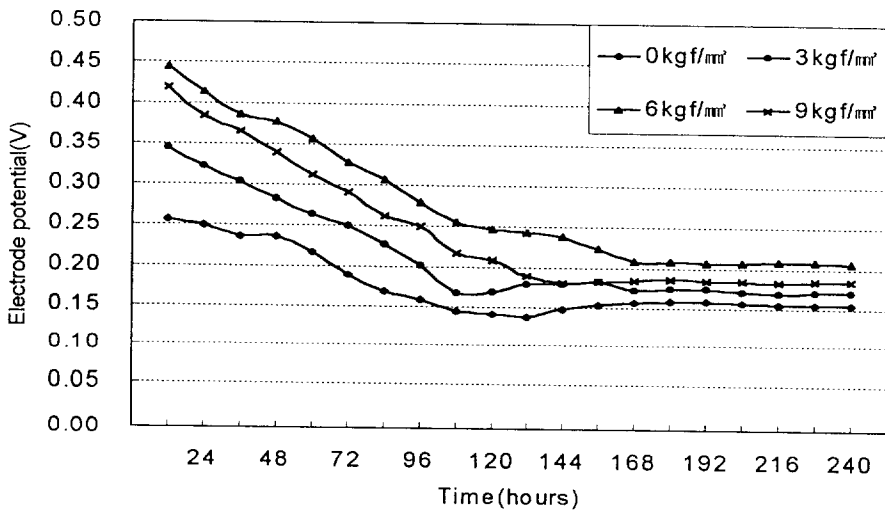
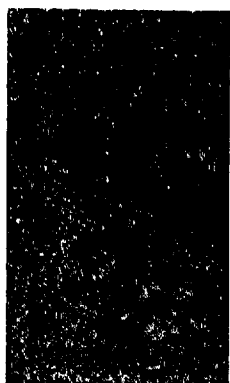
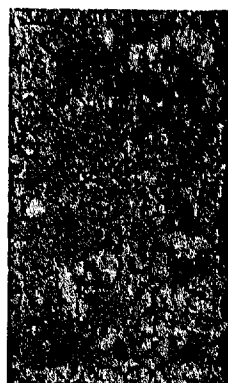


Fig. 13 Relation of electrode potential and time for general specimens



(a) 0kgf/mm^2



(b) 3kgf/mm^2



(c) 6kgf/mm^2



(d) 9kgf/mm^2

Fig. 14 The detail corrosion pattern of general specimens($\times 2$)

3-4. 負荷應力 및 銲接 有無에 따른 應力腐蝕의 結果

銲接 試驗片에서 腐蝕量은 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서 가장 적고, 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서 腐蝕量이 가장 많지만 負荷應力の 增加에 따라 腐蝕量은 減少하는 傾向을 보인다.

그러나 一般 試驗片의 경우는 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서 가장 적고, 負荷應力の 增加에 따라 腐蝕量은 減少함을 알 수 있다.

銲接 試驗片에서의 電極電流는 모든 負荷應力 下에서 96時間까지는 減少하나 144시간 이후에는 거의 一定한 傾向을 보인다. 腐蝕量이 가장 큰 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서 平均相對電流가 높게 나타나고 일반적으로 負荷應力을 가한 試驗片이 應力을 負荷하지 않은 試驗片보다 다소 높게 나타나는 傾向이 있다.

一般 試驗片에서는 相對電流는 모든 負荷應力の 크기에 관계없이 96시간까지는 급격히 減少하나 그 以後에는 대체로 一定한 傾向을 보인다. 3kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서 平均相對電流가 가장 높게 나타나고, 應力을 負荷한 試驗片에서 대체로 平均相對電流는 크게 나타나는 傾向을 보인다.

銲接 試驗片에서의 相對電極電位는 모든 負荷應力 下에서 96시간까지는 급격히 減少하나, 144時間 以後부터는 대체로 一定한 傾向을 보인다. 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서는 平均相對電極電位가 가장 높게 나타나며, 다른 負荷應力 下에서의 試驗片에서 應力을 加하지 않은 試驗片보다 약간 높은 傾向을 보인다.

一般 試驗片에서 相對電極電位는 負荷應力の 크기에 관계없이 144시간까지는 서서히 減少하나, 168시간 이후에는 거의 一定한 傾向을 보이고, 負荷應力이 增加할 수록 增加하는 傾向을 보이나 腐蝕量이 가장 적은 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서는 平均相對電極電位가 오히려 減少하는 傾向을 보인다.

銲接 試驗片의 腐蝕樣式은 應力을 負荷하지 않은 試驗片에서는 母材部의 全面에 局部腐蝕(Lu) 및 다소 넓은 孔蝕(W)현상을 보이며, 熱影響部에서는 다수의 侵蝕현상을 볼 수 있다. 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 母材部의 腐蝕이 현저히 進行되어 侵蝕層을 형성하고 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片으로 全面에 요철이 있는 局部腐蝕과 좁은 孔蝕(N)이 나타나며 母材部의 侵蝕현상이 심하게 나타난다. 銲接 試驗片의 腐蝕樣式은 일반적으로 負荷應力이 增加 할수록 좁은 孔蝕에서 넓은 孔蝕 및 全面 局部腐蝕으로 進行됨을 알 수 있고, 熱影響部에서는 물결모양의 境界腐蝕이 뚜렷하게 나타난다.

試驗片 側面의 腐蝕樣式은 全面보다 腐蝕의 進行이 빠르게 進行되며, 材料의 壓延方向 및 負荷應力이 작용하는 방향으로 요철이 있는 局部腐蝕(Lu) 및 넓은 孔蝕이 나타나고, 銲接金屬部보다 母材部의 腐蝕程度가 심하다.

一般 試驗片의 腐蝕樣式은 應力을 負荷하지 않은 試驗片에서는 全面에 局部腐蝕(Lu) 및 孔蝕(M)이 보인다. 3kgf/mm^2 , 6kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서는 腐蝕이 급속히 進行되어 孔蝕(M)을 형성하고, 絶緣 境界部에서는 깊은 境界腐蝕이 나타남을 알 수 있다. 9kgf/mm^2 의 應力을 負荷한 試驗片에서는 全面에 요철이 적은 局部腐蝕과 좁은 孔蝕(N)과 함께 絶緣 境界部の 침식현상이 나타난다.

一般 試驗片의 腐蝕樣式은 대체적으로 應力이 增加 할수록 넓은 孔蝕에서 좁은 孔蝕 및 全面 局部腐蝕으로 進行됨을 관찰 할 수 있다.

試驗片 側面의 腐蝕樣式은 材料의 壓延方向의 腐蝕이 뚜렷하게 나타나고 負荷應力이 作用하는 方向으로 요철이 있는 全面腐蝕(Lu) 및 넓은 孔蝕(W)이 나타난다. 또한 銲接 試驗片의 側面과는 달리 腐蝕程度가 적음을 알 수 있는데 이는 銲接 試驗片과는 달리 熱變形이 없기 때문에 思料된다.

4. 結 論

自然海水 中에서 알루미늄合金材(A5083-H112) 鎔接 試驗片과 一般 試驗片에서 負荷應力과 熱影響에 따른 定電流 應力腐蝕實驗을 實施한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 鎔接 試驗片의 경우 負荷應力이 9kgf/mm^2 에서 平均相對電極電位가 가장 높았고 腐蝕量이 가장 적었으며, 一般的으로 負荷應力을 加하면 腐蝕量은 減少하며 平均相對電極電位와 平均相對電流는 높게 나타났다.
2. 一般 試驗片의 경우 負荷應力이 6kgf/mm^2 에서 平均相對電極電位는 가장 높고, 腐蝕量이 가장 작았다. 一般的으로 負荷應力이 增加함에 따라 腐蝕量은 적어지며 負荷應力을 加했을 때 平均相對電極電位와 平均相對電流는 높게 나타났다.
3. 鎔接 試驗片 鎔接部의 腐蝕樣式은 鎔接金屬部보다 母材部에서 요철이 있는 局部腐蝕과 孔蝕이 나타났고, 負荷應力이 增加할수록 腐蝕 程度가 減少되었다.
4. 一般 試驗片의 腐蝕樣式은 요철이 있는 局部腐蝕과 孔蝕이 나타났고, 負荷應力이 增加할수록 腐蝕 程度가 減少하였으며 側面部에는 壓延 方向으로의 殘留應力이 있는 곳에서 腐蝕이 심하게 나타났다.

參考 文獻

- 1) 李學烈：金屬腐蝕工學，淵鏡文化社，pp.3~5, (1995).
- 2) 田大熙：腐蝕과 防蝕의 管理，一中社，p.7, (1985).
- 3) 林祐助：金屬構造物の 應力과 腐蝕，韓國船用學機關學會誌，Vol. 10, No. 1, p.33, (1986).
- 4) 李學烈：금속부식 공학，연경문화사，pp. i ,4~6, (1955)
- 5) 大谷南海男：き裂先端における應力と腐蝕の相互作用，第23回 材料強度と破壊 國內シンポジウム論文集，日本材料強度學會，東京，pp.17~24, (1983).
- 6) 田大熙：腐蝕과 防蝕의 管理，一中社，pp.111~118, (1985).
- 7) 水野政夫口章：合金 銲接，産業出版株式會社，東京，p.99, (1972).
- 8) 山田盛雄：“アルミニウム技術便覽”，輕金屬出版株式會社，東京，pp.1519~1521, (1985).
- 9) 林祐助 外3：腐蝕과 防蝕，원창출판사，pp.330~336, (1996).
- 10) 金永植：最新機械材料學，螢雪出版社，pp.285, (1993).
- 11) 田大熙：腐蝕과 防蝕의 管理，一中社，pp.111~123, (1985).
- 12) 金東垣：機械工作法，淸文閣，p.159, (1980).
- 13) 鄭善謀，韓東哲：標準 機械設計學，pp.99~96, (1985).
- 14) 林祐助 外3：腐蝕과 防蝕，원창출판사，pp.397~425, (1996).
- 15) Champion, F. A.：J. Inst. Met., 69, 47, (1943).
- 16) Champion, F. A.：J. Inst. Met., 69, 47, (1943).

- 17) 林祐助 外3 : 腐蝕과 防蝕, 원창출판사, pp.423~424, (1996).
- 18) 金永植 : 最新機械材料學, 螢雪出版社, pp.182~184, (1993).
- 19) 嚴東錫 : 最新鎔接工學, 文運堂, pp.106~109, (1982).
- 20) 韓相旭 : 金屬熱處理組織解說, 금삼技術社, pp.316~322, (1988).

감사의 글

2년의 시간이 바쁘고 보람된 날들이었기에 순식간에 지났나 봅니다.

이 논문이 완성되기까지 무한한 관심과 사랑으로 지도해 주시고 과정을 마칠 때까지 삶의 지표를 공고하게 다져 주신 김영대 지도교수님께 진심으로 감사 드립니다. 아울러 바쁘신 중에도 논문심사에 수고해 주신 노태영 교수님과 박정동 교수님, 그리고 기계설계학과 여러 교수님들께 감사 드립니다.

실험을 하는 동안 휴가도 마다하고 와서 도움을 주신 부산공고 조상근 선생님 그리고 김형연 선생님께 감사를 드립니다. 또한 부산기계공업고등학교 전자기제과 선생님들과 교무실에 계신 여러 선생님, 특히 교감 선생님, 교무기획부 김규상 부장선생님, 김정식 선생님, 정현숙 선생님께도 고마운 마음을 전합니다.

끝으로 어려운 여건 속에서도 사랑과 용기를 주신 부모님, 장모님, 가까이에서 힘든 가정 생활에 내색하지 않고 격려해준 사랑하는 아내와 딸 성은이, 성아, 막내 성재 이들 모두에게 고마움을 표하며 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

2002년 2월

홍 봉 표