

航空用 알루미늄합금의 強度에 미치는 應力腐蝕의 影響

최 필 승, 임 우 조, 이 증 락
 부산수산대학교

The Effect of Stress Corrosion on the Strength of Al-Alloy used for Aircraft

P. S. CHOE, U. J. LIM, J. R. LEE
 National Fisheries University of Pusan

In this study, the Al-7075 alloy was tested by stress corrosion tester which is constant displacement in seawater ($\rho = 25\Omega\text{cm}$) and investigated corrosion current density and stress corrosion index under impressed voltage.

The main results obtained are as the following:

- 1) Corrosion current density in the load stress become higher compared with no load. Fine stress corrosion cracking and pit occurred in the load stress, but in the no load pit only.
- 2) Corrosion current density decreases and also stress corrosion cracking is delayed with increase of bared surface area of anode.
- 3) Stress corrosion index ($1-\alpha$) for specimens by stress corrosion cracking growth become smaller with increase of stress and decrease of bared surface area of anode.

1. 序 論

最近 工業의 發展과 더불어 機械構造物 等은 더욱 輕量化, 高強度化 및 高速化되고 있으며 이들 機械構造物들이 사용되는 環境 또한 급속히 多樣化, 苛酷化하고 있는 趨勢에 있다.¹⁾

금속材料의 環境強度를 좌우하는 破損은 넓은 의미에서는 순수한 電氣化學的 作用에 의해서만 진행되는 腐蝕 및 電氣化學的 作用과 機械的 作用이 서로 相昇作用하는 應力腐蝕의 2종으로 나눌수 있다.²⁾

그러나 실제 機械나 金屬構造物에는 항시 殘留應力을 비롯한 여러가지 형태의 應力이 作用하고 있으므로 후자, 즉 특정한 腐蝕環境中에 있는 金屬은

항복점 이하의 비교적 낮은 靜的 應力을 받고 있어도 龜裂이 일어날 수 있는 應力腐蝕龜裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)에 의해 그 破損이 진행되는 경우가 많다.³⁾

한편 알루미늄 合金材는 輕量性, 耐蝕性 및 加工性이 우수하며 또한 低溫에서도 機械的 性質의 低下가 일어나지 않는다.^{4, 5)} 이러한 特性으로 인하여 車輛, 特殊船舶 및 航空機 等に 널리 이용되고, 특히 이 合金은 輕量性 때문에 航空機 部材로 많이 사용되고 있다.^{6, 7)}

그러나 바다에서 離, 着陸하는 水上航空機, 運航하는 路線이 高溫多濕한 地域, 大洋을 飛行하는 航空機 및 空港이 海岸에 인접해 있는 경우의 航空機는 大氣中の 水分 및 鹽海로 인해 應力腐蝕을 받을

수 있으며, 東南아시아, 오스트레일리아 및 미아에미 등의 海岸地域에 路線을 가진 航空會社에서 腐蝕問題의 報告가 많이 되고 있다.^{8, 9)}

이와 같은 應力腐蝕龜裂에 대해서는 지금까지 각종 材料와 여러가지 環境中에서 많은 研究가 이루어져 왔으나,^{10, 12)} 알루미늄 合金材에 대해 陽極電流通電에 의한 應力腐蝕龜裂에 미치는 應力의 크기 및 陽極露出面積에 대해서는 충분히 규명된 연구보고는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 本 研究에서는 航空用 高力알루미늄 合金材(Al 7075)의 材料強度에 미치는 應力腐蝕의 影響에 대해 研究를 하기 위한 目的으로서 天然海水中에서 印加電壓에 의한 陽極電流通電下에 應力腐蝕實驗을 하였다. 이 實驗의 結果를 토대로 하여 應力腐蝕龜裂에 미치는 負荷應力의 크기 및 試驗片 노치 先端의 露出面積(陽極面積)의 변화에 따른 腐蝕電流密度에 미치는 影響을 考察하고, 이들 條件에서 應力腐蝕으로 인한 材料強度低下를 나타내는 應力腐蝕指數를 구하였다.

2. 試驗片 및 試驗方法

2-1. 試驗片

本 實驗에 사용된 試驗片 材料는 두께 4.5mm인 航空用 7075 알루미늄 合金材로서 그 化學的 成分과 機械的 特性을 Table 1에 보인다.

이와 같은 판재로 부터 절취하여 製作한 試驗片 및 노치(notch)의 形狀은 Fig. 1과 같다. 이러한 試

Table 1. Chemical composition & mechanical properties of used material (Al 7075-T7351)

Chemical composition (wt%)	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
	5.6	2.5	1.6	0.23	0.5	0.4	0.3	0.2	Res
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm ²)		Yield strength (kgf/mm ²)			Elongation (%)			
	51		44			14.5			

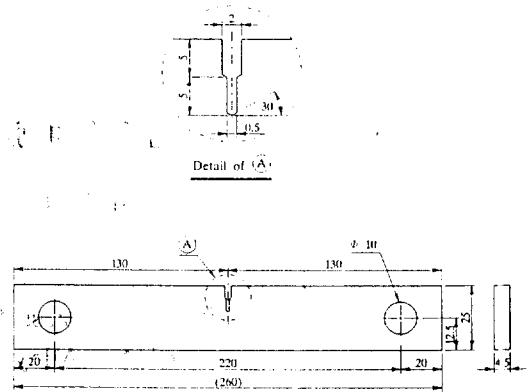


Fig. 1 Dimension of test specimen (unit : mm)

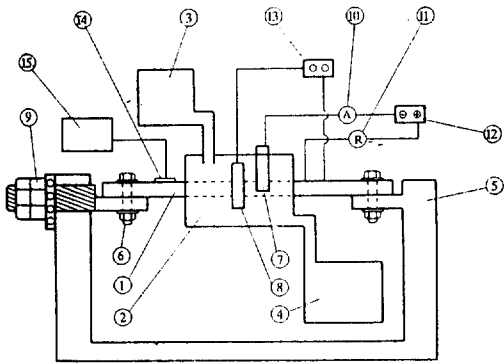
驗片은 그 길이 方向이 압연方向과 동일하도록 製作하였다.

한편 試驗片의 表面은 사포 600~2000번까지 연마한 후 아세톤으로 탈지하고, 試驗片 表面의 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 노치先端의 제외한 試驗片 全 表面을 투명한 실리콘 수지로 피복하여 절연시켰다.

2-2. 試驗裝置

本 試驗에 사용한 應力腐蝕龜裂에 實驗裝置의 全體系統圖는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 引張試驗機는 變位 一定形式의 것으로서 자작하였고, 試驗片은 동시에 2개를 裝置할 수 있도록 製作하였다. 그리고 각 試驗片간의 電氣化學的인 간섭현상을 방지하기 위하여 실리콘 수지 및 고무판으로 試驗片을 서로 절연하였다.

試驗片에 負荷한 應力은 變形測定器(digital strain indicator)에 의해 測定하였으며, 應力腐蝕試驗은 외부에서 直流電源을 印加하여 試驗片에 陽極電流通電에 의한 應力腐蝕龜裂 측진법을 적용하였다. 試驗片은 腐蝕溶液中에 침적하여 露出面積을 陽極으로 하고, 船舶用 5086 알루미늄 合金材를 對電極 즉, 陰極으로 해서 定電壓裝置로 印加電壓을 부가할 수 있도록 Fig. 2와 같이 配線하였다.



- 1. Specimen
- 2. Corrosion cell
- 3. Feed water tank
- 4. Drain water tank
- 5. Bed
- 6. Adjust bolt
- 7. Counter electrode
- 8. Reference electrode
- 9. Loading bolt
- 10. Ampere meter
- 11. Rheostats
- 12. Electric power source
- 13. Potentiometer
- 14. Strain gauge
- 15. Digital strain indicator

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

本 實驗에 對電極으로 사용된 두께 4.5mm인 5086 알루미늄 合金材의 그 化學的 成分과 機械的 特性을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Chemical composition & mechanical properties of used material (Al 5086)

Chemical composition (wt %)	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Al
	0.047	4.07	0.48	0.375	0.19	0.07	0.11	Res
Mechanical Properties	Tensile strength (kgf/mm ²)		Yield strength (kgf/mm ²)			Elongation (%)		
	32.5		24			13.5		

2-3. 實驗方法

腐蝕環境槽는 플라스틱으로 製作하였고, 腐蝕霧圍氣는 그 比抵抗값이 25Ω·cm인 天然海水를 사용하였으며, 實驗중의 腐蝕溶液은 실내 溫度를 유지하였다.

또한 腐蝕環境槽 內的 腐蝕溶液은 Cl이온의 濃度

및 電解液의 傳導度의 變化를 방지하기 위하여 時間當 4리터의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 絶緣성 필터를 사용하였다.

應力腐蝕實驗은 天然海水 (比抵抗, ρ=25 Ω·cm) 中에서 航空用 7075 알루미늄 合金材의 試驗片을 陽極으로 하고, 對極인 5086 알루미늄 合金材를 陰極으로 配線한 後에 負荷되는 應力 및 試驗片의 露出面積(陽極面積)에 따른 實驗을 다음과 같이 行하였다.

1) 無負荷와 應力을 σ=20 kgf/mm²으로 負荷했을 때에 腐蝕試驗은 試驗片의 露出面積(陽極面積) Sa=7mm², 5086 알루미늄 合金材의 露出面積(陰極面積) Sc=15,000mm², 陽極과 陰極의 距離를 l=10mm, 印加電壓 Ev=12V로 일정하게 行하였다.

2) 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 7, 100 및 2800 mm²으로 變化시키기에 따른 應力腐蝕實驗은 5086 알루미늄 合金材의 露出面積(陰極面積) Sc=15,000mm², 印加電壓 Ec=12V로 하고 陽極과 陰極間의 距離 l=10mm, 負荷되는 應力값을 σ=20kgf/mm²으로 일정하게 行하였다.

3) 외부적용 印加電壓의 變化에 따른 應力腐蝕實驗은 試驗片의 露出面積(陽極面積) Sa=7mm², 5086 알루미늄 合金材의 露出面積(陰極面積) Sc=15,000 mm², 陽極과 陰極間의 距離 l=10mm, 初期應力을 σ=20kgf/mm²으로 일정히 負荷한 後 自然電位 그리고 印加電壓을 각각 7 및 12V로 變化시키면서 行하였다.

4) 電流密度의 測定

陽極인 試驗片 (Al-7075)에서 陰極인 Al 5086으로 排流되는 腐蝕電流密度는 DC mili ampere meter로 測定하였다.

5) 應力腐蝕試驗에 의한 材料의 環境強度 評價

應力腐蝕에 의한 材料強度低下를 나타내는 應力腐蝕指數(stress corrosion index), (I-α)는 Jones等¹³⁾이 제안한 다음식에 의해 구하였다.

$$(1-\alpha) = (UTS_2 - 0.75PS) / (UTS_1 - 0.75PS) \dots\dots(1)$$

(단, 應力腐蝕試驗 前의 應力腐蝕指數 $(1-\alpha) = 1.0$)

여기서,

$$\alpha = (UTS_1 - UTS_2) / (UTS_1 - 0.75PS) \dots\dots(2)$$

UTS₁: 試驗 전의 最大引張強度

UTS₂: 腐蝕試驗 후의 試驗片 最大引張強度

PS : 耐力(本 試驗片 [A7075]의 耐力은

$$\sigma = 26.6 \text{ kgf/mm}^2$$

그리고 應力腐蝕龜裂 發生樣相은 應力腐蝕試驗 後 顯微鏡에 의해 觀察, 調查하였다.

3. 結果 및 考察

3-1. 腐蝕電流密度에 미치는 負荷應力の 影響

Fig. 3은 比抵抗값 e 가 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 天然海水中에서 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 $S_a = 7\text{mm}^2$, 外部 適用 印加電壓을 $E_v = 12\text{V}$ 로 일정하게 陽極電流通電 후에 無負荷와 應力을 20kgf/mm^2 로 負荷했을 경우에 있어서 試驗時間 t 에 대한 基準電極에 의한 7075 알루미늄 合金材의 腐蝕電流密度(陽極電流密度) i 와 의 關係를 정리하여 보인 것이다.

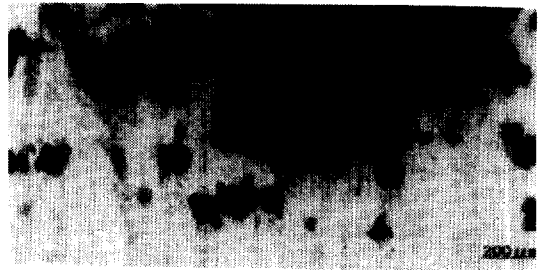
이에 의하면 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷했을 場合의 腐蝕電流密度가 無負荷에서 보다 全 試驗時間에 걸쳐 높게 排流되는 傾向을 보이고, 荷重을 負荷 했을 初期에 腐蝕電流密度差가 크게 나타나지만 時間이 經過함에 따라서 그 差는 점차 작아지고 있음을 보이고 있다. 無負荷에서 보다 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷했을 場合, 腐蝕電流密度가 높게 排流되는 이유는 試驗片의 노치先端에 應力集中으로 인해 不動態 皮膜이 더 쉽게 破壞됨과 동시에 不動態 皮膜의 형성이 어렵게 됨으로써 陽極電流密度가 더 높게 排流되는 것으로 思料된다.¹⁴⁾

3-2. 負荷應力에 다른 應力腐蝕龜裂 發生舉動

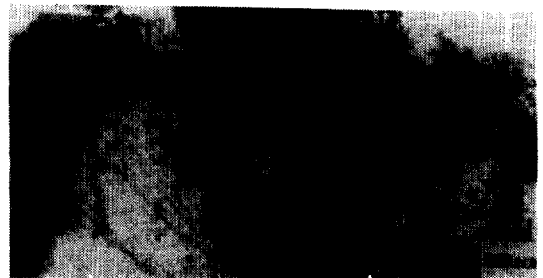
Photo. 1의 (a) 및 (b)는 適用時間, 試驗片의 露出

面積 및 腐蝕環境을 Fig. 3과 같은 條件으로 유지하고, 無負荷에서와 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷했을 場合に 있어서 7075 알루미늄 合金材의 應力腐蝕龜裂 發生舉動을 比較, 考察하고자 한다. 여기서 Photo. 1. (a)는 應力을 負荷하지 않고, Photo. 1(b)는 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷한 후에 本 試驗時間 동안 陽極電流通電下의 應力腐蝕試驗을 행한 노치先端의 巨視的인 樣相을 보인 것이다.

이 結果에 의하면 Photo. 1(a)에서 應力을 負荷하지 않았을 때의 노치先端 주위에는 腐蝕에 의한 孔蝕(pit)現狀을 보이고, 노치先端의 좌측에 노치와 接觸하여 孔蝕이 심하게 生成되어 있음을 나타내고 있다. 그리고 Photo. 1(b)에서 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷했을 場合의 노치先端 주위는 腐蝕에 의한 孔蝕現狀이 나타나 있고, 應力腐蝕龜裂은 주로 slip面을 따라서 龜裂이 發生하여 成長되어 있으며¹⁵⁾노치 先端이 應力을 負荷하지 않았을 때 보다 더 많이 腐蝕되어 있음을 알 수 있다.



(a) No load, $E_v = 12\text{V}$, $S_a = 7\text{mm}^2$,



(b) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$, $E_v = 12\text{V}$, $S_a = 7\text{mm}^2$

Photo. 1 Macro-graph of SCC in seawater

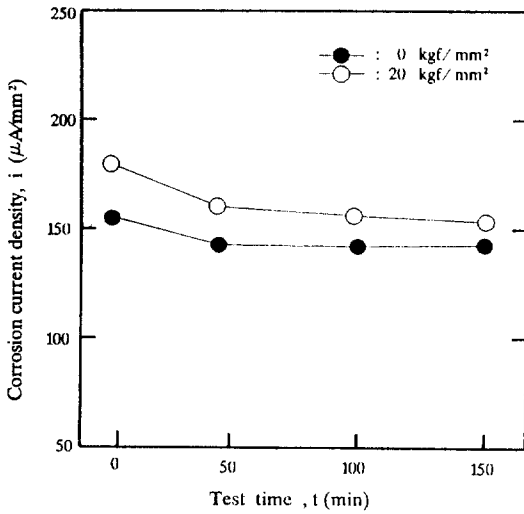


Fig. 3 Relation between corrosion current density and. test time under various stress ($\rho=25\Omega\text{cm}$, $E_v=12\text{V}$, $S_a=7\text{mm}^2$)

따라서 Photo. 1(a)와 같이 應力을 負荷하지 않았을 때는 龜裂이 發生하지 않았지만, Photo. 1(b)에서 應力을 20kgf/mm^2 으로 負荷했을 때는 無負荷에서 보다 노치 先端의 腐蝕이 더 심하고 龜裂이 成長되어 있다는 것은 應力이 應力腐蝕龜裂의 發生 및 成長 舉動에 미치는 相昇效果가 크다는 것을 알 수 있다.

3-3. 負荷應力에 따르는 材料의 環境強度特性

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 試驗條件下에서 無負荷와 應力을 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 로 負荷했을 경우 腐蝕으로 인한 材料의 열화에 미치는 應力腐蝕指數 ($1-\alpha$)를 式 (2)에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

이 結果에 의하면 試驗片에 引張荷重을 負荷하지 아니한 순수한 電氣化學的 腐蝕의 陽極溶解에 의한 材料의 環境強度低下인 應力腐蝕指數 ($1-\alpha$)는 약 0.82로서 材料의 環境強度는 크게 低下되지 않고 있으나 試驗片에 引張荷重을 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ 로 負荷했을 때의 應力腐蝕에 의한 材料의 應力腐蝕指數($1-\alpha$)는 약 0.43으로서 材料의 環境強度는 크게 낮아지고 있음을 알 수 있다. 따라서 腐蝕環境中에서 材料의

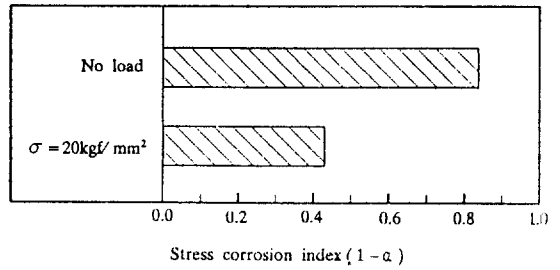


Fig. 4 Stress corrosion index($1-\alpha$) of the specimens under No load and $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ ($\rho=25\Omega\text{cm}$, $E_v=12\text{V}$, $S_a=7\text{mm}^2$)

環境強度低下에 미치는 負荷應力의 影響은 電氣化學的인 腐蝕에 相昇作用을 하는 것으로 생각된다.

3-4. 陽極面積의 變化에 따른 腐蝕電流密度的 樣相

Fig. 5는 比抵抗이 $25\Omega\cdot\text{cm}$ 인 天然海水中에서 外部適用 印加電壓을 $E_v=12\text{V}$ 로 陽極電流通電下에 應力을 20kgf/mm^2 로 일정하게 負荷 했을 경우, 對極인 陰極面積을 일정히 하고 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 變化시키에 따른 試驗時間 t에 대한 7075 알루미늄 合金材의 腐蝕電流密度(陽極電流密度) i와의 關係를 보인 것이다.

이에 의하면 試驗片의 露出面積(陽極面積)이 감소함에 따라 腐蝕電流密度 i는 全 試驗時間에 걸쳐 높게 排流되는 樣相을 나타내고 있으며 試驗時間이 경과함에 따라 腐蝕電流密度는 점차 낮아지는 傾向을 보이고 있다. 그리고 一定한 陰極面積에 대하여 試驗片의 面積(陽極面積)을 감소시키에 따라 腐蝕

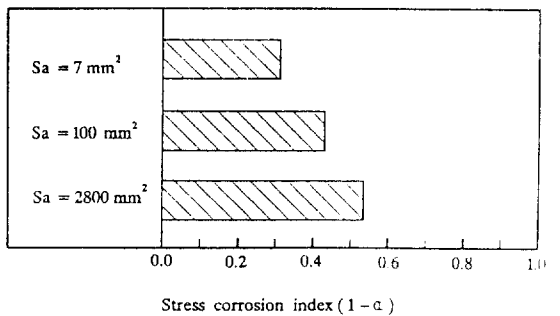
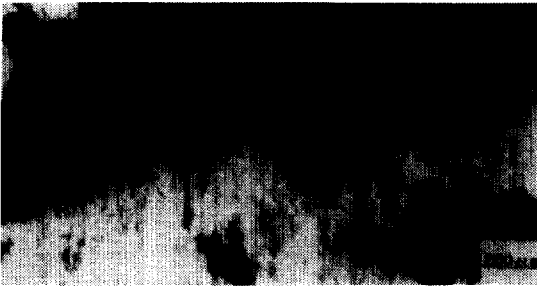


Fig. 5 Relation of corrosion current density vs. test time under various area of anode for Al 7075 ($\rho=25\Omega\text{cm}$, $E_v=12\text{V}$, $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$)

電流密度가 i 가 높게 排流되는 이유는 일정한 外部適用 印加電壓과 일정한 陰極面積에 대해 陽極의 露出面積에서 일정한 腐蝕電流密度가 排流되어야 하므로 陽極面積(試驗片의 露出面積)이 감소함에 따라 腐蝕電流密度는 더 높게 排流되어 지는 것으로 생각된다. 이와 같이 試驗片의 露出面積(陽極面積)이 감소함에 따라서 노치先端의 腐蝕電流密度가 높게 排流됨으로써 應力腐蝕龜裂의 發生 및 龜裂의 成長은 빨라질 것으로 생각된다.

3-5. 陽極面積의 變化에 따른 應力腐蝕龜裂 發生 舉動

Photo. 1의 (b)와 Photo. 2의 (a) 및 (b)는 外部適用 印加電壓을 $E_v = 12V$ 로 일정하게 通流하고, 負荷 應力 20 kgf/mm^2 및 腐蝕環境을 Fig. 5와 같은 試驗



(a) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$, $E_v = 12V$, $S_a = 100 \text{ mm}^2$,



(b) $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$, $E_v = 12V$, $S_a = 2800 \text{ mm}^2$,

Fig. 6 Stress corrosion index $(1-\alpha)$ of the specimens under various area of anode ($\rho = 25.0 \text{ cm}$, $E_v = 12V$, $\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2$)

條件으로 유지한 경우, 陽極面積(試驗片의 露出面積)의 크기를 變化시키는 데에 따른 7075 알루미늄 合金材의 應力腐蝕龜裂 發生舉動을 비교·고찰하고자 한다. 여기서 Photo. 1 (b)는 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 7 mm^2 , Photo. 2 (a)는 試驗片의 露出面積을 100 mm^2 , Photo. 2 (b)는 試驗片의 露出面積을 2800 mm^2 으로 한 후, 本 試驗時間동안 陽極電流通電下의 應力腐蝕試驗을 행한 노치先端의 巨視的인 樣相을 보인 것이다.

이들 結果에 의하면 Photo. 1(b)는 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 7 mm^2 으로 했을 때의 노치先端에 심한 腐蝕핏트가 生成되어 있음은 물론이고, 3~4개의 微細龜裂이 發生되어 成長이 活性化된 樣相을 보이고 있다. 또 Photo. 2 (a)는 試驗片의 露出面積을 100 mm^2 으로 했을 때의 노치先端은 本 연구의 Photo 사진에는 분명치 않으나 실제 試驗片의 表面에는 1~2개의 微細龜裂과 심한 腐蝕으로 노치幅이 넓어지고, 腐蝕핏트도 生成되어 있었다. 그리고 Photo. 2(b)는 試驗片의 露出面積(陽極面積)을 2800 mm^2 으로 했을 때의 노치先端과 주위에 심한 腐蝕핏트 現狀을 보이고 있으나 실제 試驗片 表面에는 龜裂의 發生은 관찰되지 않았다.

이와 같이 陽極面積이 감소할 수록 노치先端에 더 심한 腐蝕과 微細龜裂이 發生하는 이유는 일정한 陰極面積에 대해서 많은 腐蝕電流密度를 排流해야 하기 때문이라 思料되고, 應力腐蝕龜裂의 發生 및 成長舉動에 미치는 影響은 負荷되는 應力뿐만 아니라 陽極面積의 크기에도 影響이 있음을 알 수 있다.

3-6. 陽極面積變化에 따른 材料의 腐蝕環境強度 特性

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 試驗條件下에서 試驗片의 노치先端의 露出面積(陽極面積)의 變化에 대한 應力腐蝕指數, $(1-\alpha)$ 를 정리하여 나타낸 것이다.

이 結果에 의하면 陽極面積(試驗片 노치先端의

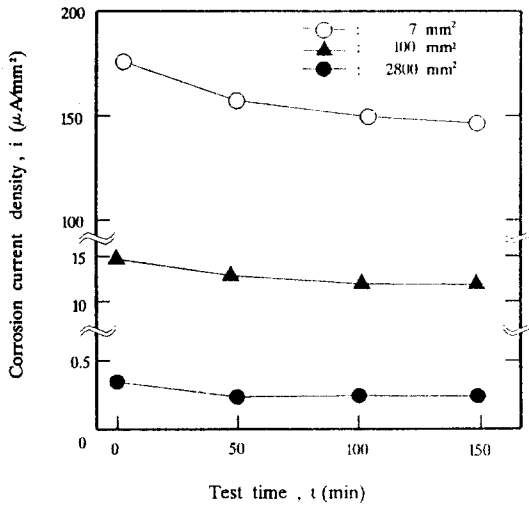


Photo. 2 Macro-graph of SCC in seawater

露出面積) Sa가 감소할 수록 應力腐蝕에 의한 材料의 應力腐蝕指數, $(1-\alpha)$ 는 낮아지는 傾向을 보여 주고 있다. 여기서 試驗片 노치 先端의 陽極面積이 감소함으로써 露出面積이 작은 部分으로 부터 腐蝕電流가 排流될 때 材料의 應力腐蝕指數는 급격히 低下되어 機械構造物이 破壞될 것으로 생각된다.

4. 結 論

天然海水中에서 航空用 7075 알루미늄 합금材에 대한 印加電壓에 의한 陽極電流通電下의 應力腐蝕 龜裂試驗을 行하여, 應力腐蝕龜裂 發生舉動에 미치는 負荷應力 및 陽極面積의 變化에 따라 電氣化學的인 側面과 材料의 環境強度特性에 關한 研究를 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 無負荷에서 보다 應力을 負荷했을 때의 腐蝕電流密度는 더 높게 되면서 孔蝕과 微細龜裂이 發生되었으나, 無負荷에서는 孔蝕만 發生되었다.
- 2) 試驗片의 露出面積(陽極面積)이 增加할수록 腐蝕電流密度는 減少하면서 應力腐蝕龜裂의 發生은 遲延되었다.

3) 應力腐蝕에 의한 材料의 應力腐蝕指數 $(1-\alpha)$ 는 應力の 負荷 및 陽極面積의 減少함에 따라 작아진다.

參 考 文 獻

- 1) 向井喜彦, 村田雅人, 스텐레스鋼의 應力腐蝕割れ에對する 破壞力學 について, 日本銲接學會誌, Vol. 48, No. 11, p. 5 (1979)
- 2) 林祐助, 金屬構造物의 應力과 腐蝕, 韓國船舶機關學會誌, Vol. 10, No. 1, p. 33 (1986)
- 3) 大谷南海男, き裂先端における 應力と 腐蝕의 相互作用, 第23回 材料強度と破壞 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)
- 4) 水野政夫口章, 合金 溶接, 産業出版株式會社, 東京, p.99
- 5) Kent. R. Van Horn, Aluminium, ASTM, Metals Park, Ohio, p. 303-312 (1972)
- 6) 山本洋一, さびを防ぐ材料機器事典, 産調出版, 東京, p.11-12 (1978)
- 7) 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, p.1519-1521 (1985)
- 8) 山本洋一, 腐蝕と破壞, 日本機械學會編, 日本工業出版, p. 201 (1985)
- 9) 平野陽三, さびの發生原因と對策, 産調出版, p.17, 18 (1985)
- 10) R.W Staehle, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, NACE, p.165-218(1973)
- 11) F. F. Booth and H. P. Godard, An Anodic Stress-Corrosion test for Aluminium-Magnesium Alloys, NACE, p. 703-711 (1962)
- 12) H.L. Craig, Stress Corrosion New Approaches, STP 610, p.32-37(1976)
- 13) 前掲書(11) p.125

- 14) 林祐助, 金永植, 스테인레스 鋼板의 應力腐蝕龜裂 現象에 關한 研究, 韓國船舶機關學會誌, Vol. 9, No. 2, p. 156 (1984)
- 15) Z. A. Forouli, Environment - Sensitive Fracture of Engineering Metals, the Metallurgical Society of AIME, New York, p. 33 (1983)