

항공용 알루미늄 합금材의 腐蝕疲労亀裂 傳播舉動에 미치는 応力比의 영향

임우조 · 김인철 · 김백운

부산수산대학

The Effect of Stress Ratio on the Propagation Behavior of Corrosion
 Fatigue Crack in Al-Alloy used Air Craft

U. J. LIM I. C. KIM B. U. KIM

National Fisheries University of Pusan

Recently with the rapid development in aircraft and aerospace industries such as airliner, righter and rocket, there occurs a great interest in the study of corrosion fatigue crack propagation closed up an important role in mechanical design.

In this study the corrosion fatigue behavior of the A2024-T3 alloy was investigated by using the bending corrosion fatigue tester of eccentric can type under the environments of specific resistances = $25\Omega \cdot \text{cm}$ and in air.

The corrosion sensitivity of corrosion fatigue crack was quantitatively inspected for A2024-T3 alloy in the various stress ratio.

In addition, the effect of stress ratio of the propagation behavior of the corrosion fatigue crack was studied.

Main results obtained are as follows:

1. Number of stress cycle to corrosion fatigue crack initiation and corrosion fatigue life increases with decreasing the stress ratio.
2. The corrosion sensitivity of corrosion fatigue crack initiation in the stress ratio of $R=0.1 \sim 0.7$ is about $5.9 \sim 2.8$ and the corrosion sensitivity decrease with increasing the stress ratio.
3. The corrosion fatigue crack propagation of A2024-T3 alloy accompanies the pitting.
4. The corrosion sensitivity of corrosion fatigue life in the stress ratio of $R=0.1 \sim 0.7$ is about $1.2 \sim 2.2$ and the corrosion sensitivity is increasing with increasing the stress ratio.
5. The corrosion sensitivity of the corrosion fatigue life is more susceptible by the corrosion fatigue and stress corrosion with increasing the stress ratio.

1. 序 論

最近 工業의 發達에 따라 각종 차량, 船舶, 航空
 機 및 로켓트 등의 運轉手段은 더욱 輕量化, 大型

化 및 高速化되고 있는 추세에 있다.

이들이 접하는 環境은 海低에서부터 宇宙에 이르
 기까지 廣範圍하며 溫度와 壓力등의 급격한 變化
 등으로 因하여 使用條件도 가혹해 지고 있다!¹⁻³⁾

이러한 경향에 대해서 각종 運轉手段이 어떤 環境下에서 長時間에 걸쳐서 使用되거나 혹은 環境이 變化하는 境遇에 충분히 安全性을 確保하기 위해서는 다양한 環境이 材料強度에 미치는 影響과 環境強度 設計基準의 確立이 必要하다.^{4,5)}

한편 알루미늄 合金은 輕量性, 耐蝕性 및 加工性이 優秀하며 또한 低溫에서도 機械的 性質의 低下가 일어나지 않는다.^{6,7)} 이러한 特性으로 因하여 차량, 特殊鉛船 및 航空機 등에 널리 이용되고, 특히 이 合金은 輕量性 때문에 航空機 部材로 많이 사용되고 있다.^{8,9)}

그러나 바다에서 離. 着水하는 水上航空機, 運航하는 路線이 高溫多濕地域과 大洋을 飛行하는 航空機 및 空港이 海岸에 인접해 있는 경우의 航空機 등은 腐蝕疲労作用을 받는다. 이와 같은 腐蝕疲労作用은 航空機 部材의 損傷 및 破壞의 중요한 因子가 되고 있다. 특히 航空機 部材의 缺陷들이 腐蝕環境中에서 龜裂이 進展될 것인지 또는 얼마나 빠른 速度로 進展할 것인지에 대한 鮮明이 요구된다.¹⁰⁻¹³⁾

이러한 요구에 대하여 腐蝕疲労龜裂의 發生 및 傳播에 관한 研究가 오래전부터 行하여 왔으며, 이들의 研究는 주로 鐵鋼材料를 중심으로 하여 通常의 引張, 壓縮荷重에 의한 貫通疲労龜裂의 發生 및 傳播에 局限되어져 있다.

따라서 본 研究에서는 航空機의 製作에 많이 사용되는 2024-T3알루미늄 合金材料를 腐蝕環境中과 空氣中에서 여러가지 応力比에 따른 平面 굽힘 腐蝕疲労試驗을 行하여 表面龜裂發生 및 龜裂傳播舉動을 調査하였다.

이 實驗을 통하여 腐蝕環境中과 空氣中에서 応力比의 變化에 따른 初期腐蝕疲労龜裂 發生 및 腐蝕疲労壽命의 腐蝕感受性を 定量的으로 구하고, 腐蝕疲労龜裂 傳播舉動을 究明함으로써 航空用 2024-T3 알루미늄 合金材料의 腐蝕疲労破壞에 대한 基礎設計 資料 및 整備指針 資料로서 기여하고자 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2-1 試驗片

본 實驗에 사용된 試驗材料는 두께 10.0mm인 20

24-T3알루미늄 合金材料로, 그 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1에 보인다. 이와 같은 板材로부터 절취하여 製作한 試驗片 및 노치의 形狀은 Fig. 1에 보인다. 이러한 試驗片은 그 길이 方向이 引延 方向과 동일하도록 製作하였으며, 試驗片의 노치(notch)先端에 있어서 應力擴大 係數範圍(stress intensity factor range) ΔK 값은 Kawahara등이 제시한 式을 적용하였다.¹⁴⁾

한편 試驗片 表面은 사포 2000번까지 研磨한 후 아세톤으로 탈지하고, 試驗片 表面의 電氣 化學的인 影響을 제거하기 위하여 노치 先端을 제외한 試驗片 全表面을 투명한 에폭시 樹脂로 被覆 絶緣시켰다.

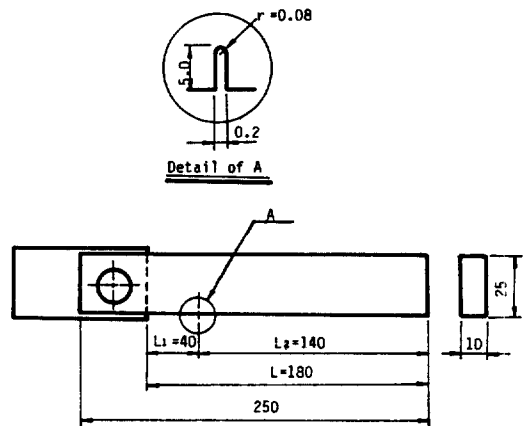


Fig. 1 Dimension of test specimen (mm)

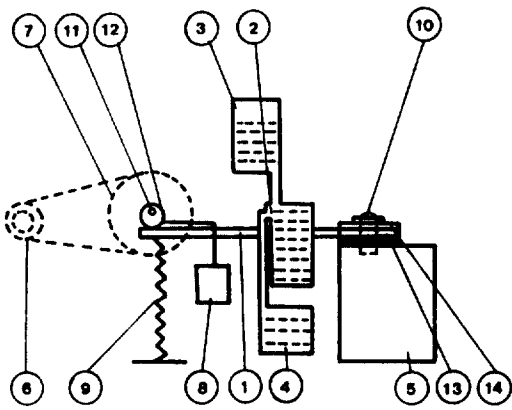
Table 1. Chemical composition and mechanical properties of used material (A 2024-T3)

Chemical composition (wt%)	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Al
	4.5	1.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	Res.
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm)			Yield strength (kgf/mm)			Elongation (%)	
	46			35			18	

2-2 實驗裝置

本 實驗에 使用한 偏心輪式 定變位 平面 굽힘 腐蝕疲労 試驗機의 전체 계통도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 腐蝕疲労 試驗機는 自作한 것으로 板狀 試驗片의 一端은 덮개로 덮어 볼트로 고정하고 自



- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. Specimen | 8. Counter meter |
| 2. Corrosion cell | 9. Spring |
| 3. Feed water tank | 10. Adjusting nut |
| 4. Drain water tank | 11. Shaft |
| 5. Bed | 12. Eccentric cam |
| 6. Motor | 13. Liner |
| 7. Pulley | 14. Cover plate |

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

由端은 偏心輪의 回轉에 의하여 平面압힘 反復應力을 받게하였다.

平面 압힘 應力은 motor에 의해 구동되는 偏心輪에 의해 받으며, 應力反復回數는 pulley측에 연결되어 있는 counter meter로써 測定하였다.

그리고 Fig. 2에 나타낸 偏心輪의 偏心量, 固定端과 荷重點과의 길이(L) 및 固定端과 노치와의 길이(L_i)를 變化시킴으로서 應力을 미세하게 調節할 수 있도록 하였으며, 이때 反復荷重의 速度는 모두 360 rpm (f=6 Hz)로 하였다.

Fig. 3은 反復應力波形을 나타내고, 應力比 R는 0.1, 0.33, 0.5 및 R=0.7로 變化시켜 가면서 實驗하였다.

2-3 實驗方法

腐蝕環境曹는 플라스틱으로 製作하였으며, 腐蝕環境의 比抵抗은 25Ω.cm가 되게 고정하고, 實驗中의 水溫은 室內溫度로 하였다. 또한 腐蝕曹內의 溶液은 Cl⁻ 이온의 濃度 및 傳導度의 變化를 방지하기 위하여 시간당 4ℓ의 量으로 계속하여 순환시켰으며, 腐蝕生成物에 의한 電氣化學的인 影響을 제거하기 위하여 絶緣性 필터를 사용하여 腐蝕疲労亀裂 進展長이는 20배의 현미경으로 初期腐蝕疲労龜

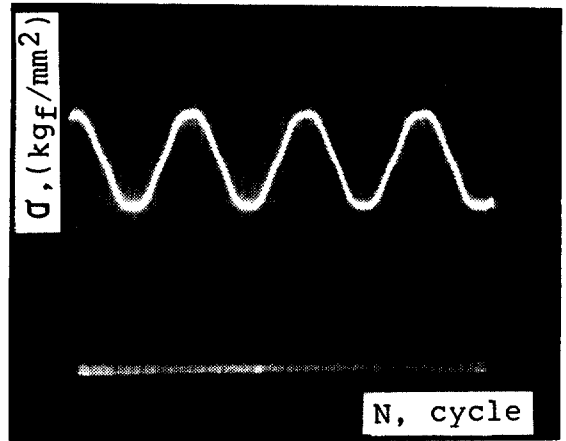


Fig. 3 Typical stress wave forms (R=0-0.7)

裂 發生 (a=0.4mm)부터 破斷까지 연속적으로 測定하였다.

3. 結果 및 考察

3-1 初期 腐蝕感受性에 미치는 應力比의 影響

Fig. 4는 初期應力擴大係數範圍 ΔK값을 10.4 kgf. mm^{-3/2}으로 일정하게 하고, 여러가지 應力比 R에 대한 初期腐蝕疲労亀裂 發生까지의 應力反復回數 N와의 關係를 보인다.

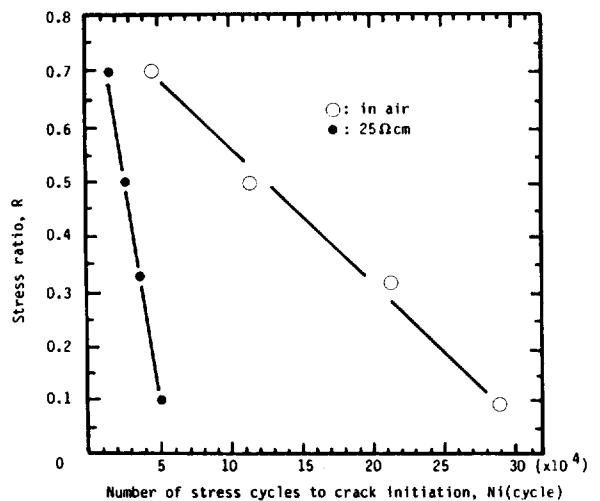


Fig. 4 Stress ratio versus number of stress cycles to crack initiation at K_{li}=10.4 kgf. mm^{-3/2} = 10.4 kgf. mm^{-3/2} (Initial crack length=0.4 mm)

이에 의하면 比抵抗값 25Ω·cm에서 初期腐蝕疲労亀裂 發生(a=0.4mm)까지의 応力反復回数 N 는 応力比 R=0.7일 때 약 1.86×10⁴ 회로 가장 빨랐고, 空氣中에서 初期疲労亀裂 發生까지의 応力反復回数 N는 応力比 R=0.1일 때 가장 遲延되었으며, 応力比 R가 낮아질수록 初期腐蝕疲労亀裂 發生까지의 応力反復回数 N가 遲延되고 있음을 알 수 있다. 그리고 같은 応力比 R에 있어서 初期亀裂 發生까지의 応力反復回数 N는 比抵抗값 25Ω·cm 중에서 보다 空氣中에서 더 遲延되고, 応力比 R가 낮아질수록 遲延되는 차이는 더욱 커지는 樣相을 보이고 있다.

Fig.5는 이상과 같은 경향을 좀더 定量的으로 검토하기 위하여, 空氣中에서 初期疲労亀裂 發生까지의 応力反復回数 N와 腐蝕環境中에 初期腐蝕疲労亀裂 發生까지의 応力反復回数 N에 대한 比를 계산하여 비교함으로써, 여러가지 応力比 R에 따른 初期腐蝕疲労亀裂 發生의 腐蝕感受性を 평가하여 보인 것이다.

이에 의하면 応力比 R=0.1 일 때 初期腐蝕疲労亀裂 發生의 腐蝕感受性は 약 5.82로 가장 민감하고, 応力比 R가 증가할수록 初期腐蝕疲労亀裂 發生의 腐蝕感受性は 점차 낮아지며 応力比 R=0.7 일 때는 약 2.6으로 가장 낮아진다.

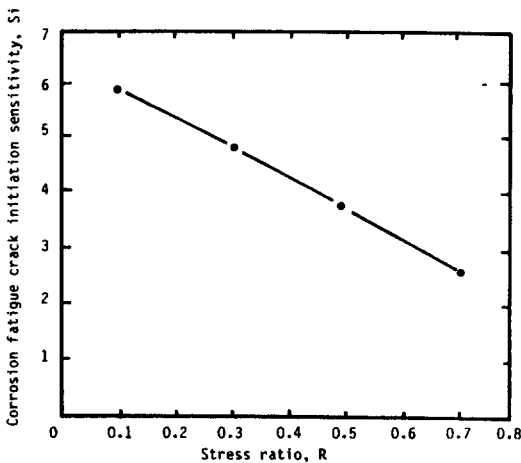


Fig. 5 Stress ratio versus corrosion fatigue crack initiation sensitivity in air

이와 같이 応力比 R가 증가할수록 初期腐蝕疲労亀裂 發生의 腐蝕感受성이 낮아지는 이유는 応力比 R가 낮을 때는 応力보다는 腐蝕에 의한 영향이 크게 作用하고, 応力比 R가 증가할수록 腐蝕에 의한 영향보다는 応力에 의한 영향이 크게 作用하기 때문인 것으로 思料된다.

3-2 腐蝕疲労亀裂 傳播樣相에 미치는 応力比의 影響

Fig.6~7은 空氣中 및 比抵抗값 25Ω·cm인 腐蝕

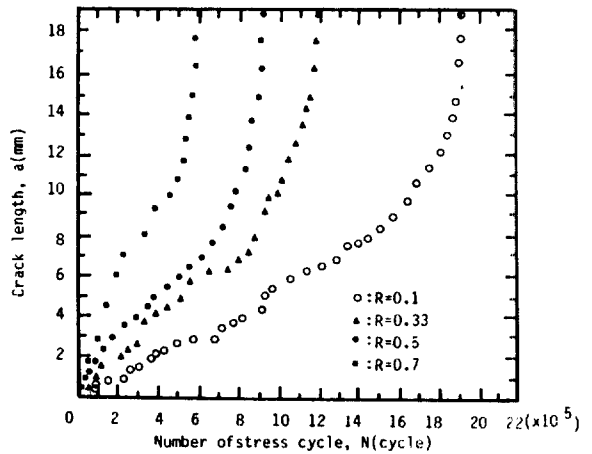


Fig. 6 Crack length versus number of stress cycle for various stress ratio in air

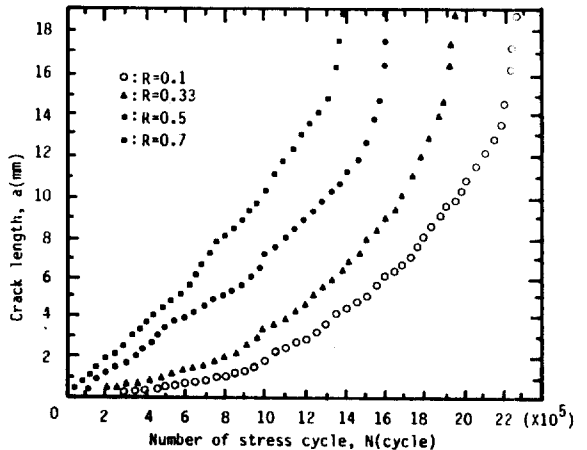


Fig. 7 Crack length versus number of stress cycle for various stress ratio in 25Ω·cm

環境中에서 2024-T3 알루미늄 합금材의 腐蝕疲労亀裂 發生에 미치는 応力比 R의 影響을 調査하기 위하여, 応力比 R값을 0.1, 0.33, 0.5 및 0.7로 變化 시킴에 따른 腐蝕疲労亀裂 進展길이 a와 応力反復回數 N와의 關係를 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 応力比 R=0.7 일때 比抵抗값 25Ω.cm 中에서 腐蝕疲労亀裂이 가장 빠르게 成長하고, 応力比 R가 減少함에 따라 腐蝕疲労亀裂 進展이 遲延되는 樣相을 보이고 있으며, 空氣中에서 応力比 R=0.1 일 때 腐蝕疲労亀裂 進展이 가장 遲延되었다. 또한 亀裂길이 약 13~14mm 이후 부터는 亀裂成長舉動이 급격히 빨라지는 傾向을 보이고 있다.

Photo. 1은 腐蝕環境中에서 2024-T3 알루미늄 합금材의 腐蝕疲労亀裂 發生 및 傳播의 巨視的 樣相을 나타낸 것이다.

이에 의하면 腐蝕疲労亀裂 주위에 乳蝕이 發生되면서 亀裂이 傳播되고 있음을 알 수 있다. 특히 이러한 乳蝕이 亀裂先端에 發生할 때 腐蝕疲労亀裂은 亀裂先端의 乳蝕을 따라 亀裂이 進展될 것으로 생각된다.

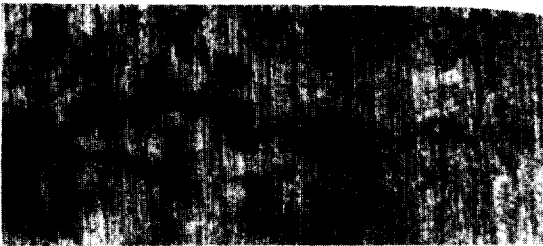


Photo 1. Macro-graph of corrosion fatigue crack propagation for A2024-T3 alloy under $\rho = 25\Omega.cm$

3-3 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受性에 미치는 応力比의 影響

Fig. 8은 空氣中과 比抵抗값 25Ω.cm 中에서 여러 가지 応力比 R의 變化에 따른 腐蝕疲労寿命까지의 応力反復回數 N를 정리하여 보인것이다.

이에 의하면 比抵抗값 25Ω.cm 中에서 腐蝕疲労寿命까지의 応力反復回數 N는 応力比 R=0.1 일 때 1.9×10^6 회로 가장 遲延되고, 応力比 R=0.7 일 때 5.97×10^6 회로 가장 짧다. 또한 応力比 R의 變

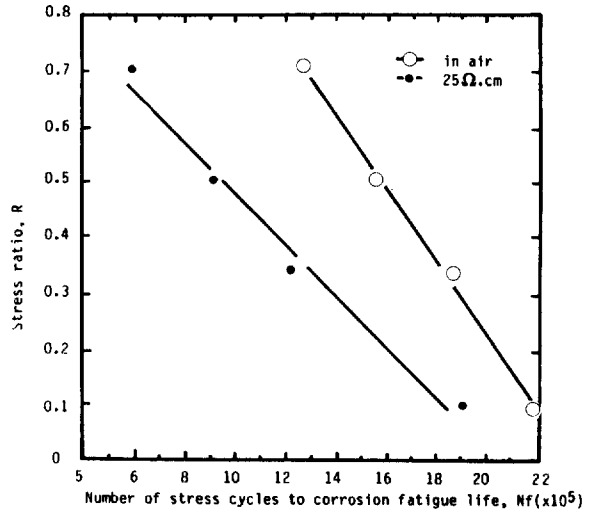


Fig. 8 Stress ratio versus number of stress cycles to corrosion fatigue life

化에 따른 空氣中에서 疲労寿命까지의 応力反復回數 N는 比抵抗값 25Ω.cm와 유사한 樣相을 보이고 있으며, 応力比 R가 增加할수록 腐蝕疲労寿命까지의 応力反復回數 N는 빨라짐을 알 수 있다.

그리고 같은 応力比 R에서 腐蝕環境인 比抵抗값 25Ω.cm 中에서 보다 空氣中에서 腐蝕疲労寿命까지의 応力反復回數 N는 遲延되나, Fig. 4와 같이 応力比 R가 낮을수록 比抵抗값 25Ω.cm 中에서 보다

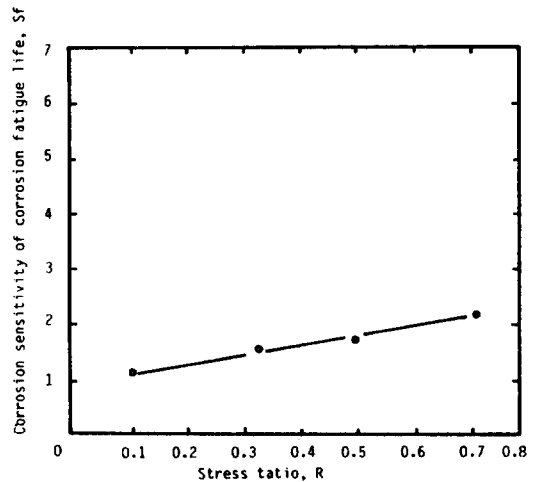


Fig. 9 Corrosion sensitivity of corrosion fatigue versus stress ratio

空氣中에서 初期龜裂 發生까지의 応力反復回数 N 가 크게 지연되는 것과는 달리 応力比 R 가 낮을수록 腐蝕疲労寿命까지의 그 遲延되는 応力反復回数 N 의 차이는 더욱 작아지는 様相을 보이고 있다.

Fig.9는 여러가지 応力比 R 에 따른 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受性を 계산에 의해 정리하여 보인 것이다.

이에 의하면 応力比 R 값이 0.1 일 때 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성은 약 1.2로 가장 낮아지고, 応力比 R 가 증가함에 따라 腐蝕感受성은 점차로 敏感해지며, 応力比 R 값이 0.7 일 때 약 2.2로 가장 敏感하다.

이와 같이 応力比 R 가 증가할수록 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성이 높아지는 이유는 腐蝕環境中에서 応力比 R 가 크게되면 応力反復回数 N 가 증가함에 따라 腐蝕疲労와 応力腐蝕에 의한 상승작용 때문인 것으로 思料된다.

Fig.10은 여러가지 応力比 R 에 대한 初期腐蝕疲労龜裂 發生의 腐蝕感受성과 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성을 비교하여 보인 것이다.

이에 의하면 初期腐蝕疲労龜裂 發生의 腐蝕感受성은 応力比 R 가 증가함에 따라 낮아지고, 腐蝕疲労寿命時의 腐蝕感受성은 応力比 R 가 증가함에 따라 敏感해져 가는 様相을 보이고 있다. 그리고 모든 応力比 R 에 있어서 初期腐蝕疲労龜裂 發生의 腐蝕感受성은 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성 보다 더 敏

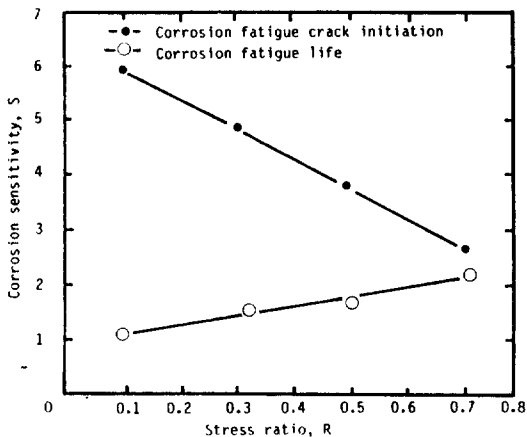


Fig. 10 Corrosion sensitivity versus stress ratio

感함을 나타내고 있다.

이와 같은 이유는 初期腐蝕疲労龜裂 發生時의 応力擴大係數範圍 ΔK 값이 낮을 때는 初期龜裂 發生 ($a=0.4\text{ mm}$) 까지 均裂先端의 노출되는 시간이 길어짐으로써 応力보다는 腐蝕에 의해 均裂이 進展되고, 均裂이 成長됨에 따라 腐蝕疲労寿命까지의 応力擴大係數範圍 ΔK 값은 점차적으로 크지면서 均裂成長은 빨라져서 均裂先端이 腐蝕環境中에 노출되는 시간이 짧아짐으로써 腐蝕 보다는 応力에 의한 均裂이 進展되기 때문에 初期腐蝕疲労均裂 發生의 腐蝕感受성이 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성 보다 더 敏感해지는 것으로 推定된다.

4. 結 論

平面 굽힘 腐蝕疲労 試驗機를 사용하여 応力比 R 의 변화에 따른 航空用 2024-T3 알루미늄 合金材의 腐蝕疲労龜裂 傳播學動에 관한 研究를 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 応力比가 減少함에 따라 初期腐蝕疲労龜裂 發生과 腐蝕疲労寿命까지의 応力反復回수는 遲延된다.
2. 応力比 R 가 0.1에서 0.7로 增加함에 따라서 初期腐蝕疲労龜裂 發生의 腐蝕感受성은 약 5.8에서 약 2.6로 낮아진다.
3. 2024-T3 알루미늄 合金材의 腐蝕疲労龜裂 傳播는 孔蝕을 수반하면서 成長된다.
4. 応力比가 0.1에서 0.7로 增加함에 따라서 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성은 약 1.2에서 약 2.2로 敏感해진다.
5. 腐蝕疲労寿命의 腐蝕感受성은 応力比가 增加할수록 腐蝕疲労와 応力腐蝕에 의해 더욱 敏感해진다.

參考交獻

1. 向井青彦, 村田雅人, “ステンレス鋼の応力腐蝕割れに対する破壊力學の適用について,” 日本溶接學會誌, Vol. 48, No. 11, p. 5 (1979)
2. 田大熙, “우리나라 腐蝕界의 어제와 오늘,” 韓國腐蝕學會誌, Vol. 14, No. 1, p. 33 (1985)

3. 金相哲：破壊力學，民音社，서울，p. 11～19 (1985)
4. 駆井謙治郎，“腐蝕疲労研究の現状と展望”日本鉄と鋼，Vol. 61, No. 7, p. 8 (1983)
5. 駆井謙治郎，“応力腐蝕割れ及び腐蝕疲労への破壊力學の応用”日本溶接學會誌，Vol. 52, NO. 3, p. 23 (1983)
6. 水野政夫口章，“アルミニウムとその合金の溶接”産業出版株式會社，東京，p. 99 (1972)
7. Kent. R, Van Horn：Aluminium, ASM, Metals Park, Ohio, p. 303～312 (1967)
8. 山本羊一：さびを防ぐ材料機器事典，産調出版，東京，p. 11～12 (1978)
9. 山田歴雄：アルミニウム 技術便覧，輕金風出版株式會社，東京，p. 1519～1521 (1985)
10. C. S. Booth and I. G. Wylde, “Fatigue consideration in Offshore Steel Structure in the North Sea,” The welding institute Research bulletin, Vol. 19, No. 3, p. 69～72 (1978) (1978)
11. 長島幸一：さびの發生原因と対策，産調出版，東京，p. 17～18 (1980)
12. Scott. P. M：Effect of Environment in Crck Propagation, Development in Fracture Mechanics-1, Applied Science Publisher LTD., London, p. 222～253 (1979)
13. Kent. R, Van Horn：Aluminium ASM, Metals Park, Ohio, p. 55～58 (1967)
14. 川原正言，栗原正好，“表面き裂の疲労による傳播成長過程に關 預備的考察”日本造船學會論文集集，Vol. 137, p. 297～306 (1975)