

## 단일과대하중하의 부식피로균열진전거동에 관한 연구

### A Study on Corrosion Fatigue Crack Propagation Behaviors due to a Single Overload

강동명, 이하성(유한 전문대), 이장규(인천대 대학원), 우창기(인천대 공대)

D.M. Kang, H.S. Lee(YUHAN J. College), J.K. Lee, C.K. Woo (University of INCHON)

#### ABSTRACT

6063-T5 alloys are tested in laboratory air, water and 3% NaCl solution to investigate the effects of corrosive environment on the retardation behavior through single overload fatigue test. Also, the fatigue crack propagation and the crack closure behavior are studied.

The results obtained in this experimental study are summarized as follows :

1) Behaviors of fatigue crack growth retardation are observed in water and 3% NaCl solution as they do in air. The number of delay cycles and the size of affected region by single overload decrease greatly in water and 3% NaCl compared with those in air.

2) In fractographic results, the overload marking by single overload appear remarkably in air, but indistinctly in water and 3% NaCl solution.

3) The effect of crack closure on crack propagation is most remarkable in the beginning of crack propagation. With crack propagation, the crack closure level and its effect decrease greatly.

**Key Words** : corrosion fatigue (부식피로), fatigue crack growth rate (피로균열성장율), crack closure effect (균열닫힘효과), single overload (단일과대하중), crack opening ratio (균열열림율), current density (전류밀도), retardation behavior(지연거동)

#### 1. 서론

각종 환경하에서 사용되는 기계, 구조물의 안전 설계, 제작 및 수명예측을 위해서는 재료의 부식피로강도 평가가 반드시 필요하다. 부식피로는 재료, 환경 및 응력의 세가지 인자가 복잡하게 얽혀진 시간의존성 현상이며, 부식피로거동에 영향을 주는 인자는 부식액의 pH, 용존산소량, 온도, 전류밀도 및 유속 등 매우 다양하여 장시간의 부식피로수명추정방법 및 정확한 피로파괴 방지책은 아직 체계적으로 확립되어 있지 않다<sup>1,2)</sup>. 부식성환경 아래서 반복응력을 받을 때 피로균열진전거동은 공기중의 피로거동과는 달리 부식이 피로에 의해 가속되고 동시에 피로가 부식에 의해 가속되는 현상이 나타나 재료의 피로수명은 현저하게 단축된다.

본 연구에서는 부식환경인 물과 3% NaCl 수용액에서 단일과대하중하의 피로균열진전의 지연거동을 대기중의 시험과 비교하고 파면사진(SEM)으로 단일과대하중 후의 파단면을 조사하였으며, 제하탄성 컴프라이언스법을 이용하여 부식피로균열진전거동을 균열닫힘거동과 비교 조사하였다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용된 재료는 Al-Mg-Si계 합금 중 압출성형성이 좋고 환경조건하에서 내식성이 우수한 A6063-T5 합금으로 직경 70mm의 봉재이며 화학적조성과 재료의 기계적성질은 Table 1과 같다. 피로시험편의 규격은 Fig. 1의 CT시험편이며, 봉재에서 시험편의 채취 방법은 C-L방향으로 채취하고 시험편의 가공은 와이어컷 방전가공기(wire cut E. D. M)로 가공하였다.

Fig. 2는 본 연구의 부식환경하의 피로균열시험장치의 개요도이다. 부식액은 두 종류로 물(증류수)과 증류수에 NaCl을 첨가한 3% 농도의 소금물로 하였다. 공기펌프를 이용하여 산소를 포화시킨 후에 용존산소량 측정기(DO METER, MODEL 850, Orion)를 이용하여 용존산소량을 측정하고 그 값을 7.5 - 8.0 ppm으로 유지하였으며, 부식액의 온도는  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 제어 시켰다. 부식액은 50ℓ 용량의 저수조에 저장하고 순환펌프와 유량조절밸브를 사용하여 유속을 1 m/s로 일정하게 공급하였다. pH는 수질측정기(pH METER, MODEL 720A, Orion)를 이용하여  $7.0 \pm 0.2$ 의 상태를 유지하도록

하였다. 부식은 전기화학적반응이며 부식속도는 전류밀도의 영향을 크게 받으므로 양극전류밀도(anodic current density)를 0.5 mA/cm<sup>2</sup> 이 되도록 유지시켰다<sup>3,4)</sup>. 이상의 부식피로시험 조건들을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

피로시험은 서보유압피로시험기(Shimadzu Co.; 10 ton)를 사용 하였고 파형은 정현파이며, 주파수는 10Hz로 하였다. 기본피로시험으로 대기중 및 부식환경(water, 3% NaCl) 하에서 응력비를 R = 0.2 로 일정하게 유지한 일정응력진폭피로시험을 행하였고, 이 때 피로시험의 하중조건은 Table 3에 나타내었다. 단일과대하중시험은 대기중 및 부식환경(water, 3% NaCl) 하에서 과대하중비(OLR)를 1.5로 하고 단일과대하중은  $\Delta K = 8.8 \text{ Mpa m}^{1/2}$  로 하여 시험을 행하였다. 과대하중비는  $OLR = P_o / P_{max}$  이며, 여기서 P<sub>o</sub>는 과대하중으로 Fig. 3에 도식적으로 설명하였다.

또한, 균열길이 측정은 배먼스트레인(BFS)법을 이용하여 측정하였으며, 균열단합거동은 Kikukawa의 제하탄성컴프라이언스법을 이용하여 자동측정하였다<sup>5)</sup>.

Table 1. Chemical compositions & mechanical properties(A6063-T5)

Chemical Compositions	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti
	0.41	0.15	0.001	0.53	0.025	0.001	0.016
Mechanical Properties	E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	(%)		$\nu$	
	80.12	165	205	19.6		0.33	

Table 2. Test conditions in corrosion fatigue.

DOD(ppm)	temp. (°C)	fluid velocity (m/s)	pH	anodic current density (A/cm <sup>2</sup> )
7.5 - 8.0	20	1	7.0±0.2	0.5

Table 3. Load conditions in fatigue test. (air, water & 3%NaCl)

% overload (%)	max. peak load (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	P <sub>min</sub> (kN)	R
50	5.52	3.68	0.74	0.2

### 3. 실험결과 및 고찰

대기중 및 부식피로 환경속에서 일정응력진폭피로시험의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 피로균열전파속도는 소금물(3% NaCl)에서 가장 빠르게 진전하고 대기중에서 가장 느리게 진전하지만 피로균열 불안정 영역에서의 피로균열전파속도는 그 차이가 점차 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 5, Fig.6 및 Fig.7에는 대기, 물 및 소금물 속의 환경조건 순으로 단일과대하중 피로시험 결

과를 각각 나타내었다.

단일과대하중후의 피로균열지연거동은 대기중 시험에서 지연현상이 가장 크고 물 및 소금물 속의 시험의 순으로 나타났다. 단일과대하중에 의하여 영향을 받는 영역의 크기를 조사해 보면 대기중 시험에서 5.18 mm, 물 속의 시험 4.22 mm 및 소금물 속의 시험에서는 3.87 mm로 나타났는데 이는 부식에 의한 피로균열진전 가속의 영향인 것으로 사료된다. 대기중의 단일과대하중에 의하여 영향을 받는 영역의 크기와 소성영역의 크기는 일치한다는 보고<sup>6,7)</sup>와 이에 상반되는 보고<sup>8,9)</sup>가 있으며 이들 관계는 명확치 않다.

부식피로거동을 균열단합과 관련시켜 규명하기 위하여 제하탄성컴프라이언스법으로 구한 균열열림(U)을 K<sub>max</sub>의 관계로 나타내었으며, Fig. 8에는 일정응력진폭피로시험에 대한 것인데, 시험초기에 균열열림이 부식피로시험의 경우가 대기중의 시험보다 약간 낮게 나타나다가 점차로 K<sub>max</sub>가 증가함에 따라 균열열림은 증가하는데 부식피로시험의 경우가 균열열림의 증가속도가 더 큼을 알 수 있다. 단일과대하중하의 피로시험의 결과는 Fig. 9에 나타내었는데, 과대하중후의 균열열림은 대기중 및 부식피로시험 모두 감소하였다가 균열의 진전에 따라 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 이러한 양상을 고찰하기 위하여 Fig. 10에 피로균열성장속도(da/dN)를  $\Delta K_{eff}(=U \cdot \Delta K)$ 로 나타내었는데 대기중 및 부식조건하에서의 일정응력진폭시험과 단일과대하중시험은 각각 서로 다른 하나의 선으로 정리되나 시험의 초기에 부식피로시험의 경우가 대기중의 피로시험보다 크게 나타난다. 이는 부식피로거동이 초기에는 부식생성물에 의하여 균열단합현상이 크게 나타나며, 균열의 진전에 따라 pitting 현상에 의하여 균열전파는 가속되고 균열단합효과는 감소되는 것으로 사료된다. 그러나 균열단합현상은 부식피로에 영향을 주는 다양한 인자들 즉, 전류밀도, 용존산소량, pH농도, 온도 및 유속 등에 의한 부식생성물의 영향을 크게 받는 것으로 사료되며 이들 인자를 고려한 체계적 연구가 필요하다고 본다.

대기, 물 및 소금물의 환경에서 행한 단일과대하중하의 피로균열지연거동을 비교 조사하기 위하여 시험편 과단면을 Photo. 1에 나타내었다. 이들 사진에서 보면 과대하중후에 과대하중자국(overload marking)이 나타나는데 대기중의 피로시험의 경우는 그 경계가 잘 나타나지만, 부식피로시험의 경우에는 그 경계가 확실치 않은데, 이는 피로시험편에 부식액의 침투에 의하여 제거되어 균열지연효과가 감소되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 부식환경하에서 알루미늄 6063-T5 재에 단일과대하중을 가한 후 균열진전의 지연거동을 대기중의 시험과 비교하고, 부식피로균열진전거동을 균열단힘거동과 비교 검토하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1) 단일과대하중의 피로균열지연거동은 부식환경하에서도 나타나는데 지연거동을 대기중의 피로거동과 비교하여볼 때 현저히 감소하였으며, 과대하중에 의하여 지연거동의 영향을 받는 영역 또한 부식환경 하에서는 감소하였다.

2) 과대하중후에 나타나는 과대하중자국 (overload marking)은 대기중의 피로시험의 경우 그 경계가 잘 나타나지만, 부식피로시험의 경우에는 그 경계가 확실하게 나타나지 않는다.

3) 부식피로시험의 균열단힘효과는 시험초기에 크게 나타나고 균열진전에 따라 균열단힘효과는 크게 감소된다. 부식피로시험거동의 균열단힘거동은 대기중의 균열단힘거동과 다르게 나타나며 그 관계를 명확하게 규명하기 위해서는 부식피로거동에 영향을 주는 다양한 인자들을 고려한 체계적 연구가 필요하다.

#### 참고 문헌

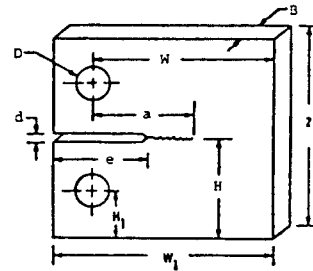
- 1) Ryuichiro, E., "Current Status Future Problems on Corrosion Fatigue Research of Structural Materials", JSME Vol.59, No.557, pp.1-11, 1993.
- 2) Yoshikazu, N., Katsuhiko, K. and Kiyotsugu, O., "Short Surface Crack Growth of High-Strength Aluminum Alloy in Corrosion Fatigue", JSME Vol. 58, NO.547, pp.19-26, 1992.
- 3) Kenji, A., Shigeru, A. and Kikuo, K., "Optimum Location of Electrode in Cathodic Protection System", JSME Vol. 57, NO. 538, pp.153-157, 1991.
- 4) Xing, Z., Song, Y. and Tu, M., "Crack Closure induced by Corrosion products and its effect in corrosion fatigue", Int J Fatigue 13, No.1, pp.69-72, 1991.
- 5) Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K., Kondo, Y. and Murata, Y., "Use of Mini-Computer for Accurate Automatic Measurement in Fatigue Test", J. Soc. Mater. Sci. Japan 29, pp.1240-1246, 1980.
- 6) Mills, W.J., Hertzberg, R.W. and Roberts, R., "Fatigue Crack Growth and Life Predictions in

Man-Ten Steel Subject to Single and Intermittent Tensile Overloads", ASTM STP 637, pp.192-208, 1977.

7) Bathias, C. and Vancon, M., "Mechanics of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminium Alloys", Eng. Frac. Mech., Vol.10, pp.409-204, 1978.

8) Lee, E.W., Chakraborty, S.B. and Starke, E.A. Jr., "The Effect of Overload on The Fatigue Crack Propagation in Metastable Beta Ti-V Alloys", Metal. Trans., Vol.15A, pp.511-517, 1984

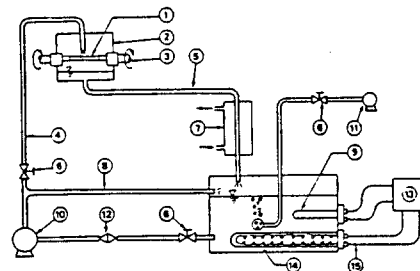
9) Bernard, P.J., Lindley, T.C. and Richard, C.E. "Mechanism of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 595, pp.78-97, 1976.



dimensions (mm)

W=50 H=30  
D=12.5 e=22.5  
W1=62.5 H1=16.25  
d=3 B=8

Fig. 1 Fatigue test specimen.



- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 1. Specimen          | 2. Chamber         |
| 3. Chuck             | 4. Inlet pipe      |
| 5. Outlet pipe       | 6. Control valve   |
| 7. Cooler            | 8. Return pipe     |
| 9. Thermocouple      | 10. Circulate pump |
| 11. Air pump         | 12. Filter         |
| 13. Heat control box | 14. Heater         |
| 15. Lead wire        |                    |

Fig. 2 Schematic diagram for corrosion fatigue apparatus.

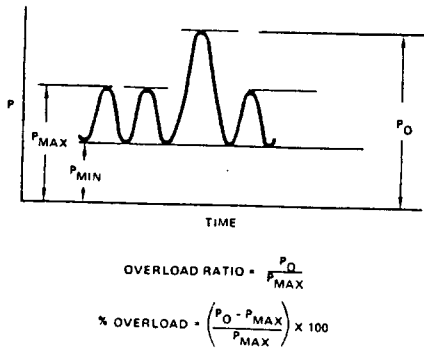


Fig. 3 Schematic representation of the test spectrum.

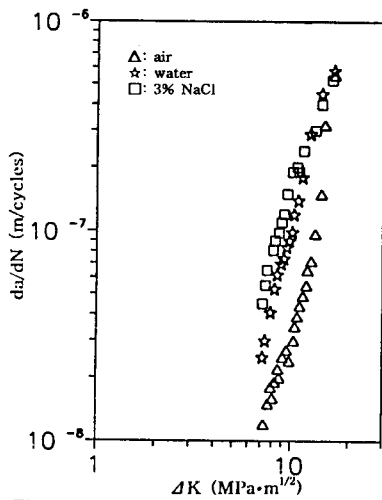


Fig. 4 Fatigue crack growth rate vs. SIF range. (constant stress amplitude test)

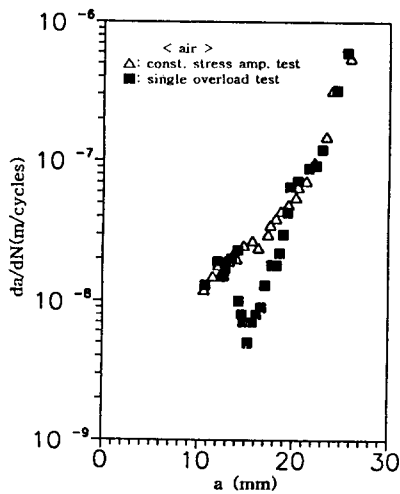


Fig. 5 Fatigue crack growth rate vs. crack length.

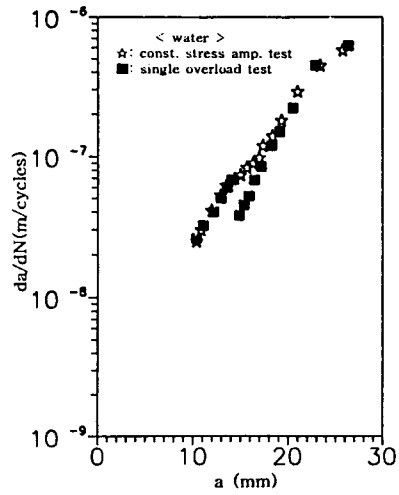


Fig. 6 Fatigue crack growth rate vs. crack length.

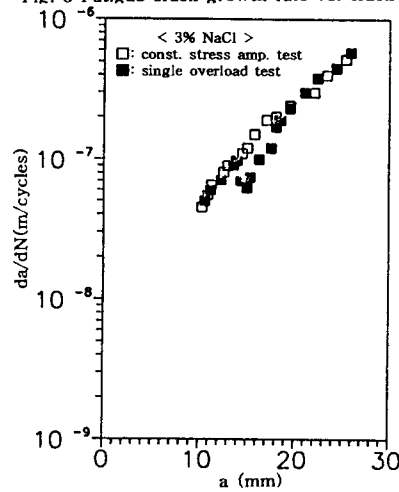


Fig. 7 Fatigue crack growth rate vs. crack length.

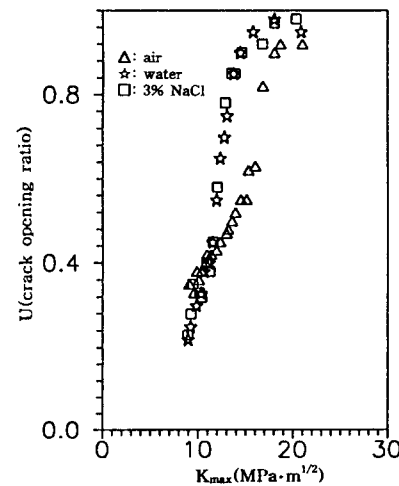


Fig. 8 crack opening ratio vs.  $K_{max}$ . (constant stress amplitude test)

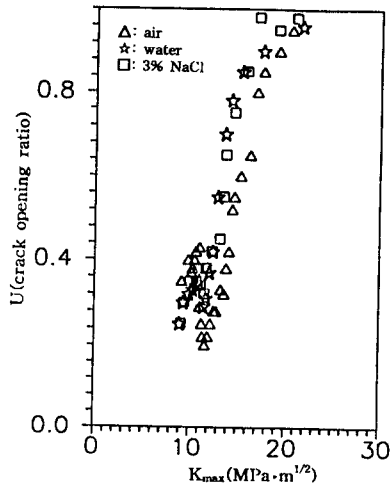


Fig. 9 crack opening ratio vs.  $K_{max}$  (single overload test)

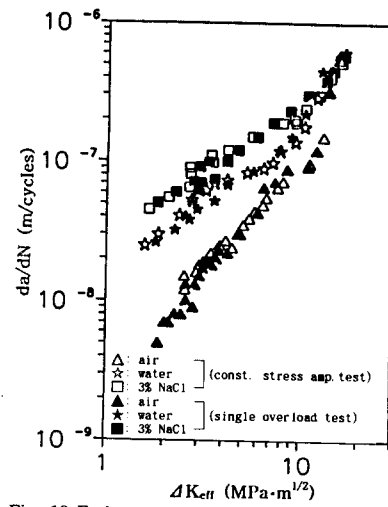


Fig. 10 Fatigue crack growth rate vs. effective SIF range.

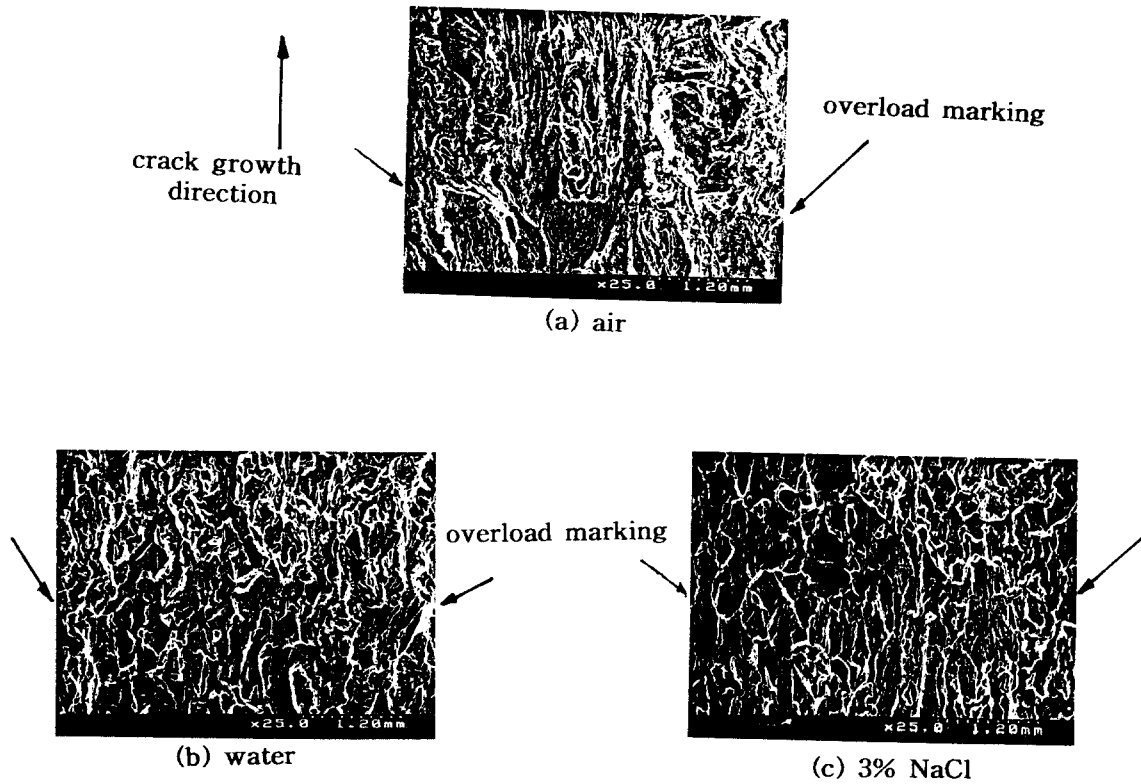


Photo. 1 Fractography on overload marking after single overload in (a) air, (b) water and (c) 3% NaCl.