



Al 7075-T651의 부식피로균열 성장 거동에 관한 연구(Ⅱ)

A Study on Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior in Al 7075-T651(Ⅱ)

한 지 원* · 우 흥 식**

Ji-Won Han · Heung-Sik Woo

(1998년 10월 22일 접수, 1999년 6월 5일 채택)

ABSTRACT

Fatigue crack growth rates in commercial plate of high strength Al 7075-T651 were investigated for the T-L direction in air, water and sea water.

In this paper the effect of cyclic load wave-form(trapezoid and triangle) on fatigue crack growth rates in air, water and sea water environments were investigated using standard LFM testing procedures. It was founded that the fatigue crack growth behaviors were not affected by cyclic load wave-forms. In region II(stable crack growth region), the fatigue crack growth behaviors were insensitive to cyclic load wave-forms and were sensitive to environment i.e. fatigue crack growth behaviors were higher in sea water than in air for all cyclic load wave-form.

The result of fractographical morphology in air, water and sea water by SEM showed obvious dimple rupture and typical striation in air, but transgranular fracture surface in water and sea water.

The values m are not affected by corrosion environments but C are different values.

1. 서 론

고강도 알루미늄 합금은 기술의 진보에 따라

서 이용도가 높은 매우 중요한 재료로서, 잘 알려진 적용분야로서는 항공우주산업, 고속회전체, 항공기용재 등으로 많이 사용되고 있다. 고강도

* 호서대학교 기계공학과

** 동국대학교 안전공학과

알루미늄 합금은 Al-Cu-Mg(2000 series)를 기초로 둔것과 Al-Zn-Mg-Cu(7000 series)를 기초로 둔 것등이 있다.

이러한 합금들은 SCC와 박리, 그리고 pitting의 영향을 받기가 쉬우므로, 이에 대한 보완책으로 일반적인 부식에 대한 환경적인 저항이 요구되는데, 응력부식과 부식피로 그리고 종종 파괴적인 참사를 초래하는 환경하에서 균열성장속도를 향상시키는 환경적인 영향을 억제하여야 한다¹⁾.

한편, 정하중과 저주기 피로조건하에서의 균열성장속도에 대한 환경의 영향은 오랫동안 중요한 문제로 인식되어 왔다²⁾. Al합금 7075-T6는 Cl 을 함유한 수용액환경에서는 피로에 대한 저항성이 현저히 감소하며 부식환경에서의 피로거동은 대기환경에서의 피로거동과는 현저히 차이가 있음이 보고되고 있다³⁾.

지금까지의 부식피로에 관한 연구로서는 거시적으로 환경의 종류⁴⁾, 하중반복속도⁵⁾, 하중비의 영향⁶⁾등이 연구되어 오고 있으나 주기하중과 형태의 변화가 피로균열성장 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에, 본 연구에서는 열처리의 특성상 부식환경에 매우 민감한 Al-Zn-Mg-Cu 합금 7075에 대하여 peak aged T651 tempering을 실시 한 Al 7075-T651에 대하여 주기하중과 형태의 변화가 대기, 물, 해수에서의 부식피로균열성장거동에 미치는 영향을 비교, 고찰하여, 구조물의 수명예측 및 안전성 평가에 기여할 수 있는 자료로 제공하고 자 한다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 항공기용재, 구조재, 고속회전체 등에 사용되는 Al 7075-T651로서 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

시험편은 L-T 방향보다 T-L 방향이 부식환경에 민감하기 때문에 두께 3mm의 압연판재에서 압연방향으로 균열이 성장하도록 균열이 T-L방향에 위치하도록 하여 ASTM E 647-95⁷⁾에

준하여 두께 3mm의 CT형상으로 제작하였으며, Fig. 1은 시험편의 형상 및 치수를 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T651

component	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
weight %	0.50	1.60	0.30	2.50	0.30	5.60	Rem

Table 2 Mechanical properties of Al 7075-T651

tensile strength (kgf/mm ²)	yielding strength (kgf/mm ²)	elongation (%)	Young's modulus (kgf/mm ²)
58	51	11	7600

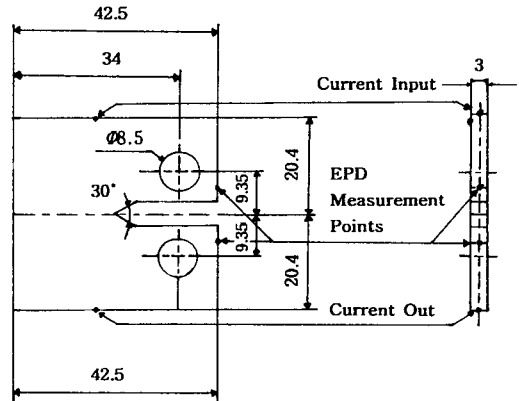


Fig. 1 CT geometry and potential wire placement locations (unit : mm)

2.2 시험기 및 측정장치

시험기는 자체 설계, (주)신원테크에서 설계를 보완, 제작한 1.5 ton용량의 공압식 lever형의 피로시험기로서 피로시험의 제어는 load control로 하였으며 부식조는 stainless steel로 제작하였고, 부식조의 양옆에는 균열의 가시측정을 위하여 Fig. 2와 같이 유리를 부착하였다. 부식조의 용량은 1.5l 이고 circulator를 장치하여 부식액의 순환을 200 ml/min로 하였다. 피로 시험은 부식조속에서 시험편이 완전히 잠긴 상태에서 실시하였다.

균열길이의 측정은 배율 50, 1/100 mm의 정밀도를 갖는 이동현미경과 김⁸⁾의 이전의 연구에 의한 DCPD(direct current potential drop)방법

을 병행하여 사용하였다.

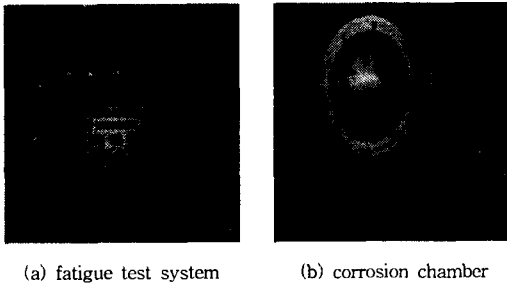


Fig. 2 Corrosion fatigue test system

2.3 피로시험

피로시험은 하중비($R = P_{min}/P_{max}$)는 0.3, 하중 반복속도는 0.2Hz로 대기, 물, 실제 해수 환경에서 각각 동일한 조건으로 주기하중반복파형(cyclic load wave-form)을 Fig. 3과 같이 사다리꼴과 삼각파형으로 하여 실시하였다. 피로균열은 기계가공 노치로부터 2mm를 넣었으며 또한, 균열이 성장함에 따라 ΔK 가 증가하도록 ΔP -일정 피로시험을 실시하였다.

그리고, da/dN 관계는 secant법으로, ΔK 값은 ASTM E 647-95에 제시된 J.E. Srawley의 CT 시편에 대한 계산식을 이용하였다.

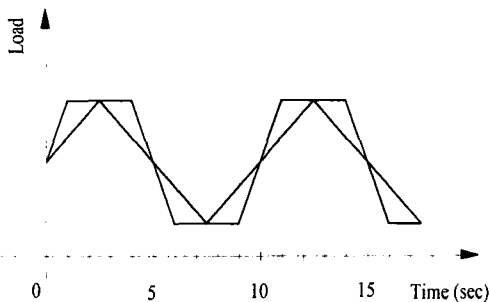




Fig. 3 Cyclic load wave-form of triangle and trapezoid

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주기하중파형의 변화가 피로균열성장거동에 미치는 영향

대기, 아르곤, 분위기 등의 불활성 환경에서의 주기하중파형의 변화는 피로균열성장거동에 영향을 거의 주지 않으나, 부식환경에서의 피로균열성장거동은 주기하중파형에 상당히 큰 영향을 받는다고 알려지고 있다⁹⁾.

Figs. 4, 5, 6은 대기, 물, 해수 환경에서의 주기하중파형 사다리꼴과 삼각파형의 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보듯이 대기 중에서의 파형의 변화는 각각의 피로균열성장거동에 영향을 거의 미치지 않았으나, Figs. 5, 6에서 보듯이 물과 해수환경에서는 사다리꼴파형이 삼각파형보다 부식피로균열성장 속도가 빠르게 나타났다. 한편, ΔK 가 $20MPa \cdot \sqrt{m}$ 부근에서 물 환경에서는 약 2.2배, 해수 환경에서는 1.5배 정도로 사다리꼴파형이 삼각파형보다 빠르게 나타났으나, 물환경에서는 균열의 안정성장구간인 Paris의 II 영역에서는 이러한 속도의 차이가 일정하게 유지되었다.

Barsom¹⁰⁾은 12Ni-5Cr-3Mo강에 대하여 대기 환경에서는 파형의 변화가 피로균열성장거동에 영향을 주지 않는다고 하였으며, 이는 본 연구 결과와도 일치한다. Barsom은 부식환경에서는 정현파형, 삼각파형, 양의 톱니파형()은 대기에서의 데이터와 비교하여 3배정도 부식피로균열성장 속도가 빠르게 나타났으나, 사각파형 및 음의 톱니파형()은 대기중의 피로균열성장거동과 비슷하게 나타났으며, 이의 주된 원인으로서는 하중상승시간의 영향이라 하였다.

그러나, 鯉淵¹¹⁾등은 0.3% 탄소강의 평활재에 대한 S-N 실험에서 동일한 응력의 진폭을 가하였을 때 삼각파, 정현파, 사각파형의 순서로 파단시간이 길게 나타난다고 하였다.

그러나, 본 연구에서의 사다리꼴 파형과 삼각파형을 비교하면, 사다리꼴 파형의 하중상승시간은 삼각파형에 비교하여 하중 상승시간이 1/5 정도 짧으나, 최대하중지연시간이 복잡되어서 사다리꼴 파형이 삼각파형보다 피로균열성장 속도가 빠르게 나타난 것으로 추정된다.

또한, 주기하중파형의 변화가 부식피로성장거동에 미치는 영향이 물환경보다 해수환경이 적다. 그 이유는 해수환경이 부식이 잘 진행되므로

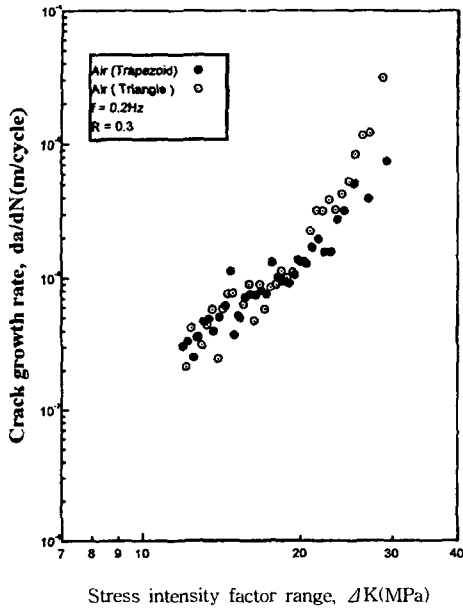


Fig. 4 Effect of cyclic load waveform on the fatigue crack growth rates of Al 7075-T651 in air environment

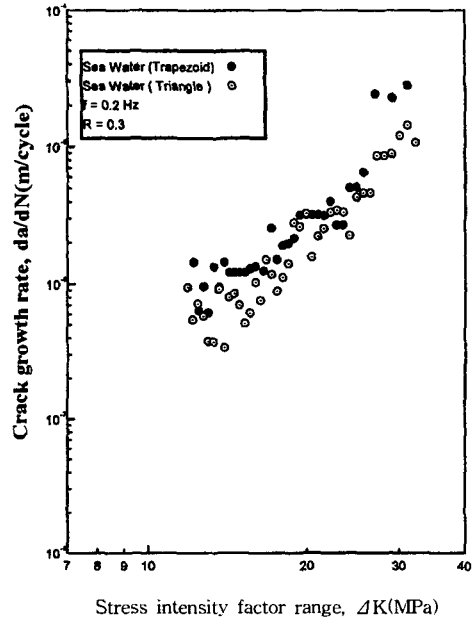


Fig. 6 Effect of cyclic load waveform on the fatigue crack growth rates of Al 7075-T651 in sea water

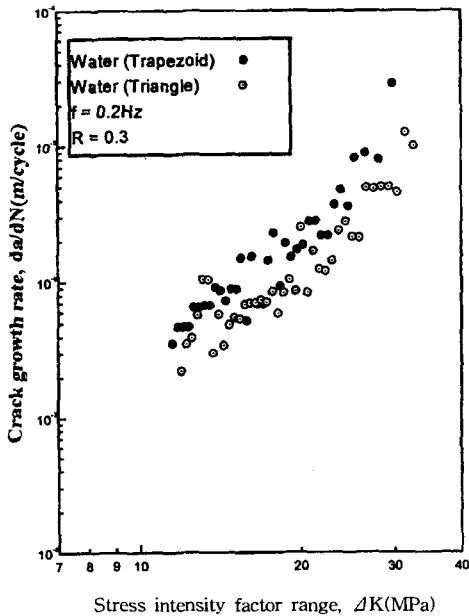


Fig. 5 Effect of cyclic load wave on the fatigue crack growth rates of Al 7075-T651 in water environment

균열면에 생성된 부식생성물에 의해 crack closure 현상이 상대적으로 큰 것으로 고찰되며, 이는 Fig. 9의 금속파면의 형상으로 알 수 있다. 한편, 해수환경에서는 ΔK 의 값이 $20 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 이상에서는 사다리꼴파형과 삼각파형이 부식피로균열성장거동에 미치는 영향은 차이가 없었다.

3.2 각 환경에서의 II영역 특성의 연구

Fig. 7은 사다리꼴파형에 대한 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 균열의 안정성장구간인 II영역에서는 $da/dN = C \Delta K^m$ 관계가 잘 나타내고 있다. 이때 물, 해수환경의 m 값은 각각 3.7, 3.5 그리고, 대기환경에서는 3.5로 비슷하게 계산되었다. 그러나, II영역의 전구간에 걸쳐서 해수, 물, 대기 순으로 피로균열 성장속도가 일정하게 빠르게 나타났으며, 안정성장구간의 중간부분인 $\Delta K = 25 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 부근에서 해수, 물 환경에서의 피로균열성장속도는 대기환경에 비교하여 약 2.7, 1.7배로 나타났다.

Fig. 8은 삼각파형에 대한 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. ΔK 가 $25 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 이하에서는

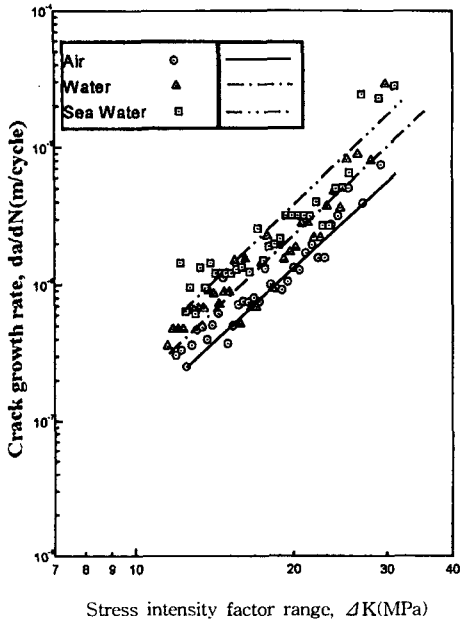


Fig. 7 da/dN-ΔK relations in trapezoid wave-form

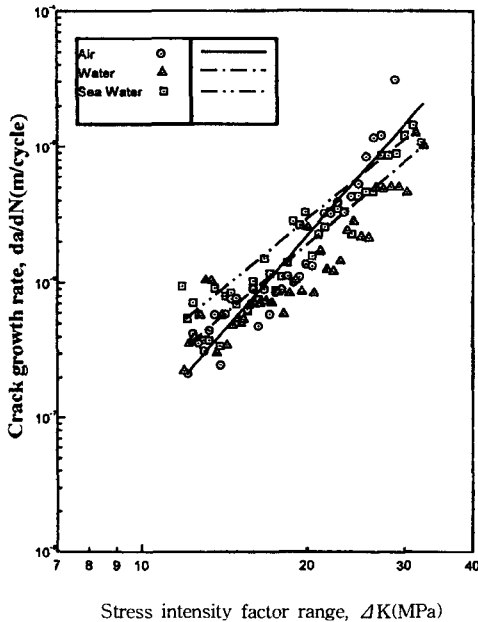


Fig. 8 da/dN-ΔK relations in triangular wave-form

사다리꼴파형과 같이 해수, 물, 대기 순으로 피

로균열성장속도가 일정하게 빠르게 나타나는 양상을 보여주나, 국부적으로 ΔK가 30 MPa·√m 이상에서는 대기환경에서의 피로균열성장속도가 급격한 증가상태를 나타내고 있다. 이는, 균열의 초기진전단계에서는 부식환경의 영향에 의해 물, 해수환경의 피로균열성장속도가 빠르게 나타나는 것으로 생각되나, 고ΔK영역에서는 균열의 성장속도가 빠르게 나타남으로서 이러한 현상이 부식환경의 영향인지 혹은 주기하중파형의 영향인지는 추후에 연구를 더 진행하여야 할 필요성이 있다.

Table 3은 각 환경에서의 실험결과를 Paris식 (da/dN=CΔK^m)으로 정리할 경우의 C와 m값을 나타낸 것으로 모든 부재의 m값은 3.3~4.0로 비슷하나 C의 값의 차이가 크게 나타나고 있다.

따라서, Al 7075-T651은 부식환경의 변화가 있어도 m의 값은 비슷하게 나타나므로, 기계구조물의 사용 중에 비파괴 검사를 통하여 균열을 검출시에는 대기환경에서의 m값으로서 수명에 측이 가능하다. 그러나 피로수명의 대부분은 균열의 개시점에 까지 소요되는 시간이므로 각 환경에서의 짧은균열(short crack)의 피로균열성장 거동에 관한 연구가 필요하며 또한 이에 대비한 C값의 관계를 밝혀낸다면 대기환경 및 부식환경에서의 안전수명 및 안전성을 평가하는데 크게 도움이 되리라고 생각된다.

Table 3 The values of C and m in Paris' law for various test conditions

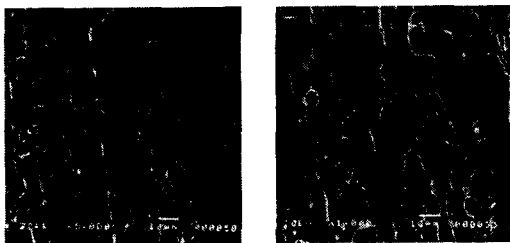
cyclic load wave-form	environment	C	m
trapezoid	air	3.62 × 10 ⁻¹¹	3.5
trapezoid	water	3.41 × 10 ⁻¹¹	3.7
trapezoid	sea water	8.50 × 10 ⁻¹¹	3.5
triangle	air	3.04 × 10 ⁻¹²	4.0
triangle	water	7.05 × 10 ⁻¹¹	3.2
triangle	sea water	7.27 × 10 ⁻¹¹	3.4

3.3 파면형상의 해석

SEM 사진에 의한 파면형상의 분석은 기계재료의 파괴, 파손시의 원인분석에 필요한 자료를 제공하며 또한, 부식피로의 과정에서 부식파면과 부식환경이 결합하는 동안 환경의 영향이

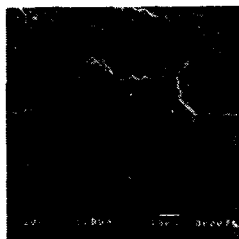
표면특성에 미치는 영향을 규명해 준다.

고강도 Al 7075-T651은 사다리꼴파형과 삼각파형의 각 환경에서의 파괴는 상이한 파단표면 특징을 나타낸다.

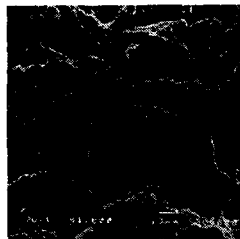


(a) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
air(Trapezoid)

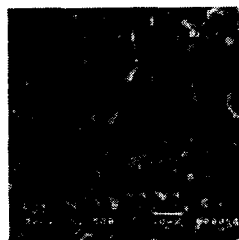
(b) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
air(Trapezoid)



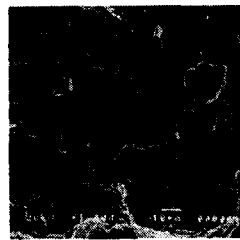
(c) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
air(Triangle)



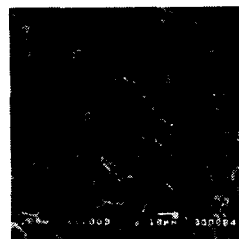
(d) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
air(Triangle)



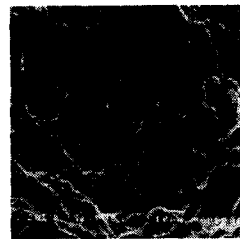
(e) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
water(Trapezoid)



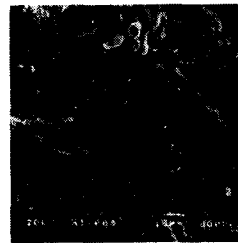
(f) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
water(Trapezoid)



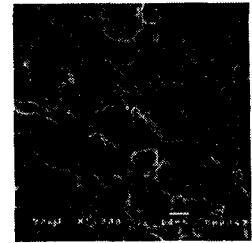
(g) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
water(Triangle)



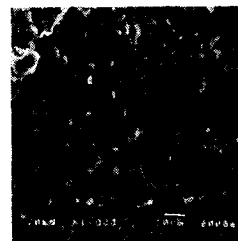
(h) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
water(Triangle)



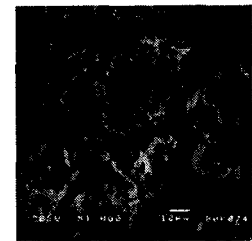
(i) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
sea water(Trapezoid)



(j) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
sea water(Trapezoid)



(k) $\Delta K \approx 15\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$,
sea water(Triangle)



(l) $\Delta K \approx 25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$
sea water(Triangle)

Fig. 9 Fractographical morphology in air, water and sea water

Fig. 9는 전자식 주사현미경에 의한 사다리꼴파형과 삼각파형의 각 환경에서의 파괴파면의 형상을 나타낸 것이다.

대기환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 균열성장방향으로 늘어난 포물선 형상의 신장딴뿔을 나타내며(Fig. 9(a)), 균열의 안정성장영역인 고 ΔK 영역에서는 파단표면이 변하고 있다. 가장 뚜렷한 특징으로서 균열성장방향에 수직인 전형적인 줄무늬 형상을 관찰할 수 있으며 dimple이 부분적으로 덮혀있고 dimple의 평균지름은 대략 $5\mu\text{m}$ 이며, 줄무늬의 간격은 한 cycle당 대략 $0.5\mu\text{m}$ 로 나타났다(Fig. 9(b)).

대기환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)은 가로와 세로의 길이가 거의 같은 등축dimple의 형상을 나타내고 있으며(Fig. 9(c)), 고 ΔK 영역에서도 줄무늬 형상을 관찰할 수 있으며, dimple의 평균지름은 대략 $5\mu\text{m}$ 이며 줄무늬의 간격은 한 cycle당 대략 $0.8\mu\text{m}$ 이다(Fig. 9(d)). 이는 Fig. 4에서 보듯이 균열의 안정성장영역인 $\Delta K=25\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ 인 지점에서의 파괴균열성장속도는 파

형의 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다.

물환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 깊이가 얇은 dimple이 발생한 것을 볼 수 있으며 이때 dimple의 지름은 $4\mu\text{m}$ 이하이고, dimple 안쪽에 미소입자가 발견되었다(Fig. 9(e)). 한편, 고 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 균열진전 방향으로 대부분의 줄무늬가 과단표면에 퍼져 있으며, 줄무늬의 간격은 대략 $1.4\mu\text{m}$ 이며, 파면상에는 산화피막이 형성되어 있으며, dimple과 등근입자로 구성된 밝은 부분은 하중이 걸리지 않은 상태하에서의 부식-피로 과정의 과단표면의 부식으로 부터 생성된 것이라고 생각되어지며, 입내파면의 형상을 관찰할 수 있다(Fig. 9(f)).

물환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)에서도 dimple이 발생하였음을 관찰할 수 있었으며 역시 파면상에는 산화피막이 형성되어 있다(Fig. 9(g)). 한편, 물환경에서의 고 ΔK 영역(삼각파형)은 주로 입계파괴의 형상을 보여주지만 입내파괴의 형상도 관찰할 수가 있었으며 균열의 안전성장영역에서의 줄무늬의 간격은 대략 $1\mu\text{m}$ 로 나타났다(Fig. 9(h)).

이로써 물환경에서의 삼각파형과 사다리꼴파형의 파면을 비교해보면 균열의 안정성장영역에서의 한 cycle당 줄무늬 간격이 사다리꼴 파형이 더 넓음으로서 부식피로균열성장속도도 빠르게 나타남을 알 수 있다.

해수환경에서의 저 ΔK 영역(사다리꼴파형)은 벽개파괴 즉, 결정학적인 면을 따라 일어나는 입내파괴 형상을 보여주고 있으며, 리버패턴(river pattern)과 유사한 물결모양의 fun shaped pattern을 보여주는데, 이 모양의 형성은 리버패턴과는 다르며 특정 결정면을 따라 부식용해가 행해졌을 때 형성되는 파면으로 알려지고 있다¹²⁾. 그리고 파면상에는 재결정된 소금결정체가 관찰되었으며(Fig. 9(i)), 고 ΔK 영역(사다리꼴파형)인 안정성장영역에서는 심한 산화피막의 형성에 의해 파면의 모습을 관찰할 수가 없었다(Fig. 9(j)).

해수환경에서의 저 ΔK 영역(삼각파형)은 입내파괴와 유사한 양상을 보여주나 이것은 입내균열과 더불어 파면상에 만들어진 mud-crack-pattern이라하는 산화피막이 부서진 것으로 추정된다. 그리고, 사다리꼴파형의 파면에서와 같

이 파면상에는 재결정된 소금결정체가 관찰되었다(Fig. 9(k)). 고 ΔK 영역(삼각파형)에서는 입내파괴의 형상과 재결정된 소금결정체가 관찰되었다(Fig. 9(l)).

4. 결 론

본 연구에서는 부식환경하에서의 주기하중파형의 변화가 피로균열성장거동에 미치는 영향에 관한 연구로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주기하중의 형태가 사다리꼴과 삼각파형일 경우에는 거시적으로 대기 및 해수환경에서는 피로균열성장거동에 미치는 하중파형의 영향은 없으나, 물환경에서는 하중파형의 영향을 받는다.
- 2) 각 환경에서의 부식피로균열성장거동은 주기하중파형에 상관없이 해수, 물 그리고 대기환경 순으로 피로균열성장속도가 빠르게 나타났다. 이 때의 m값은 3.3~4.0으로 비슷하게 나타났으며, C의 값이 크게 차이가 났다.
- 3) 각 환경에서의 주기하중파형의 변화에 따른 피로파면의 형상은 대기환경에서는 dimple과 전형적인 줄무늬 형상이 관찰되었고, 물환경에서는 산화피막의 형성과 입계파괴의 형상을 보여주지만 입내파괴의 형상도 관찰할 수가 있었으며 해수환경에서는 벽개파괴의 형상을 보여주었다.

참 고 문 헌

- 1) J.T. Staley, in Aluminum Alloys Contemporary Research and Applications, ed. A.K. Vasudevan and R.D. Doherty, Academic Press, London, p. 3, 1989.
- 2) K. Rajan, W. Wallace, and J.C. Beddoes, J. Mater. Sci., Vol. 17, p. 2817, 1982.
- 3) 권영각, "환경파괴를 고려한 강도설계", 강도설계 기술강습회, pp. 193~248, 1992.
- 4) W.H. Bamford, "Fatigue Crack Growth of Stainless Steel Piping in Pressurized Water Reactor Environment", J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, pp. 73~79,

- 1979.
- 5) J. Lerim, "Significance of Fracture Mechanics on Design of Offshore Structures", Fracture Prevention in Energy and Transport Systems, Vol. 1, pp. 135~148, 1983.
 - 6) A.D.B. Gingell and J.E. King, "The Effect of Frequency and Microstructure on Corrosion Fatigue Crack Propagation in High Strength Aluminum Alloys", Acta. mater., Vol. 45, No. 9, pp. 3855~3870, 1997.
 - 7) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM E 647-95, pp. 578~614, 1995.
 - 8) 김봉철, 우홍식, "고강도 알루미늄 합금의 부식피로균열 성장 거동에 관한 연구(I)", 동국논집, 제16집, 제2호, pp. 175~187, 1997.
 - 9) P.S. Pao, "Mechanisms of Corrosion Fatigue", ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and Fracture, pp. 185~192, 1996.
 - 10) J. M. Barsom and S.T. Rolfe "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall, pp. 317~342, 1977.
 - 11) 鯉淵興二, 山根雅己, "非正弦波 による波れ強 ちとそのシオロツの解析", 日本機械學會論文集, 第34卷, 第258号, p. 261, 1961.
 - 12) 우홍식, 이갑래, 한지원, "재료파괴공학", 보성문화사 p. 271, 1993.
-