

## Al-Alloy 7075-T651의 부식피로균열 성장거동에 관한 연구(I)

### A Study on Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior in Al-Alloy 7075-T651(I)

김 봉 철\* · 한 지 원\*\* · 우 흥 식\*

B.C. Kim · J.W. Han · H.S. Woo

(1998년 9월 7일 접수, 1998년 12월 10일 채택)

#### ABSTRACT

Fatigue crack growth rates(i.e. crack initiation and crack growth of short and long crack) are investigated using commercial plates of high strength Al alloy 7075-T651 for the transverse-longitudinal(T-L) direction in air, water and sea water. Also, the evaluation direct current potential drop(D.C.P.D) method and the fractographical analysis by SEM are carried out.

Near threshold region, short crack growth rates were much faster than those of comparable long cracks, and these short crack growth rates actually decrease with increasing crack growth and eventually merge with long crack data. Fatigue crack propagation rates in aggressive media(i.e. sea water) increase noticeably over three times those in air. One of the most significant characters in this phenomenon as a corrosion-fatigue causes an acceleration in crack growth rates.

Sea water environment, particularly  $Cl^-$  solution brings the most detrimental effects to aluminum alloy. The result of fractographical morphology in air, water and sea water by SEM shows obvious dimpled rupture and typical striation in air, but transgranular fracture surface in water and sea water.

#### 1. 서 론

가혹한 환경에서 재료가 반복하중을 받게 되

면 재료의 기계적 성질의 저하와 함께 재료의 수명이 감소한다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 또한, 피로균열성장속도도 환경의 영향에 매우

\* 동국대학교 안전공학과

\*\* 호서대학교 기계공학과

민감하며 가혹한 환경을 수반하는 피로성장은 화학적, 기계적 그리고 금속학적 인자들간의 복잡한 상호작용에 크게 좌우된다.

부식피로에 의한 재료의 손상은 피로 및 부식에 의한 각각의 손상을 단순 중첩시킨 것보다 훨씬 크고 빠르기 때문에, 산업현장이나 엔지니어링 분야에서 예기치 못했던 파손을 초래할 수 있다. 부식 분위기에서 정적 하중을 받고 있는 재료의 파괴기구, 즉 응력부식균열(stress corrosion cracking 이하 SCC)이라 한다. 일반적으로 고장력강이나 스텐레스강, Al-합금 및 Cu-합금 등 응력부식에 민감한 재료들에만 관계되지만, 부식피로의 경우에는 거의 모든 금속재료가 부식환경의 영향을 받을 수 있다<sup>1)</sup>.

그리고, 대부분의 구조재들은 부식환경하에 있으므로 부식피로에 관련된 여러인자들의 영향을 학문적으로 밝히고 제반정보를 얻음으로써 부식피로에 대한 정확한 지식을 얻고, 나아가 부식피로 파괴예방에 이러한 지식을 응용하는 것은 매우 중요하다.

Al-합금 7000계열은 중량에 비하여 고강도이며 성형성이 좋아서 고속회전체, 항공기용재 등으로 많이 사용되고 있으며 Cl<sup>-</sup>을 함유한 수용액환경에서는 피로에 대한 저항성이 현저히 감소하지만 다른 화학용액에서는 균열이 거의 발생하지 않는다고 알려져 있다<sup>2)</sup>.

Al-합금에 대한 SCC와 부식피로(corrosion fatigue)에 관한 연구는 매우 활발히 연구되고 있으나<sup>3,4)</sup> 실험 및 해석의 어려움 때문에 그 원인을 정확히 규명하지 못하고 있으며 대부분의 연구에서는 균열길이의 측정을 이동현미경을 이용한 육안으로 측정하는 방법을 이용하나 시편의 표면에 생성되는 산화피막의 형성에 의해 정확한 균열길이를 측정하는 데는 많은 어려움이 따르고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Al-합금 7075를 peak aged T651 tempering을 실시한 Al-합금 7075-T651에 대하여 균열성장길이의 측정방법으로써 D.C.P.D.(direct current potential drop)법을 이용하여 이에 대한 균열길이 측정방법의 타당성을 평가하였다. 그리고 각기 환경(대기, 물, 해수)이 부식피로균열성장거동에 미치는 영향과,

각 환경에서의 긴균열(long crack)과 짧은균열(short crack)의 부식피로균열성장특성을 비교, 고찰하였다. 또한, 각 환경에 노출된 파단표면의 형상을 분석, 검토하기 위하여 전자식 주사현미경으로 파단표면을 해석함으로써 초기균열의 잠재시간과 안정성장 시간을 예측하여 구조물의 수명예측 및 안전성 평가에 기여할 수 있는 자료를 얻고져 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 항공기용재, 구조재, 고속회전체 등에 사용되는 Al-합금 7075-T651로써 시험편은 두께 3mm의 압연판재에서 균열성장방향이 압연방향과 일치하게 하였으며(T-L 방향), ASTM E 647-95에 준하여 CT형상으로 제작하였으며 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 시험편의 형상 및 치수를 나타내며 노치(notch)가공 선단에는 짧은 균열의 성장거동을 측정하기 위하여 직경 1mm의 구멍을 만들었다.

Table 1 Chemical compositions of Al-alloy 7075-T651

composition	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-alloy 7075-T651

tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	yielding strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	elongation (%)	young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )
58	51	11	7600

### 2.2 시험기 및 측정장치

본 실험에 사용된 시험기는 자체 설계 제작한 1.5ton용량의 공압식 lever형이며, 유효 하중 반복속도는 0.01~1Hz이다. 부식조는 stainless steel로 제작하였고 용량은 1.5l이며 부식조의 전, 후면에 유리를 부착하여 균열길이의 측정을 육안으로 가능하게 하였으며 순환기를 설치하여

부식액의 순환은 200ml/min.으로 하였다.

한편, cycle의 진행에 따른 부식피로균열의 측정에는 배율 50, 1/100mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경과 D.C.P.D.(direct current potential drop)방법<sup>5)</sup>을 동시에 병행하여 사용하였다. D.C.P.D.법을 사용할 때에는 5A의 입력전류를 시험편에 일정하게 흐르게 한 후 전압계(voltmeter)를 거쳐 기록장치에서 그 값을 읽었다. Fig. 1은 시험편의 형상 및 lead선의 부착위치를 Fig. 2는 D.C.P.D.장치의 개략도를 나타낸다.

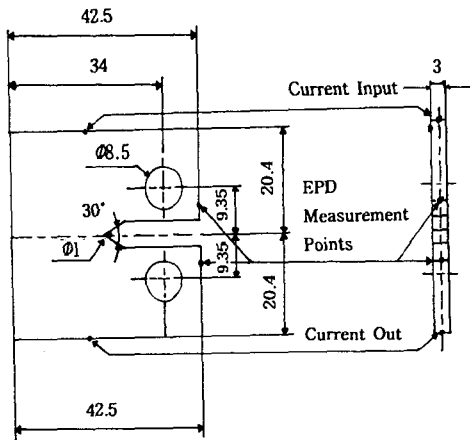


Fig. 1 CT geometry and of potential wire placement location (unit: mm)

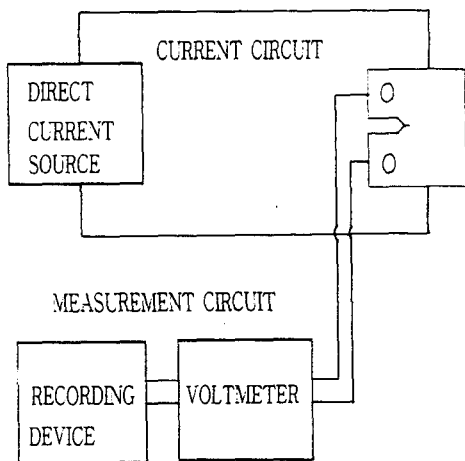


Fig. 2 Schematic diagram of the drop system

### 2.3 피로실험

피로실험은 하중비( $R=P_{min}/P_{max}$ )를 0.3, 하중 반복속도는 0.2Hz, 주기파형은 사다리꼴로 하여 짧은 균열(short crack)과 긴 균열(long crack)에 대하여 진행하였다. 그리고, 균열선단의 구멍으로부터 균열이 2mm 성장할 때까지의 데이터는 짧은 균열의 피로균열성장거동, 균열이 그 이후로 증가하여 파단될 때까지의 데이터는 긴 균열의 피로균열성장거동을 해석하는 데 사용하였다.

본 연구에서  $da/dN$ 의 계산은 ASTM E 647-95에 제안된 secant method를 사용하였으며, 또한  $\Delta K$ 값은 ASTM E 647-95에 제시된 Srawley의 CT시편에 대한 계산식을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 D.C.P.D.법의 타당성에 대한 고찰

균열길이는 이동현미경과 D.C.P.D.법을 동시에 이용하여 측정하였으며, D.C.P.D.법은 ASTM E 647-95에 제시된 관계식과 Hicks와 Picard<sup>6)</sup>가 제안한 실제 실험에서 얻은  $V/V_{ref}$ 와  $a/W$ 의 보정(calibration)곡선을 이용하여 균열길이를 추정하는 방법을 이용하여 이를 비교, 고찰하였다.

ASTM E 647-95에 제시된  $V/V_{ref}$ 와  $a/W$ 의 관계는 아래와 같다.

$$V/V_{ref} = A_0 + A_1(a/W) + A_2(a/W)^2 + A_3(a/W)^3 \quad (1)$$

for  $0.24 \leq a/W \leq 0.7$

Where :  $V$  = the measured D.C.P.D. voltage  
 $V_{ref}$  = the reference crack voltage corresponding to  $a/W=0.241$

$a$  = the crack size(as defined in ASTM E 647)

$W$  = the specimen width

$A_0=0.5766, A_1=1.9169, A_2=-1.0712,$

$A_3=1.6898$

or in reverse notation

$$a/W = B_0 + B_1(V/V_{ref}) + B_2(V/V_{ref})^2 + B_3(V/V_{ref})^3$$

for  $0.24 \leq a/W \leq 0.7$

Where;  $B_0 = -0.5051$ ,  $B_1 = 0.8857$ ,  $B_2 = -0.1398$ ,  $B_3 = 0.0002398$

Hicks와 Picard가 제안한 방식으로 대기, 물, 해수환경에서의 실험을 통하여 측정된  $V/V_{ref}$ 와  $a/W$ 의 관계를 구하여 Fig. 3에 나타내었고, 이를 수치해석프로그램인 Excel을 사용하여, 다음과 같은 과정을 거쳐 보정곡선식을 얻었다.

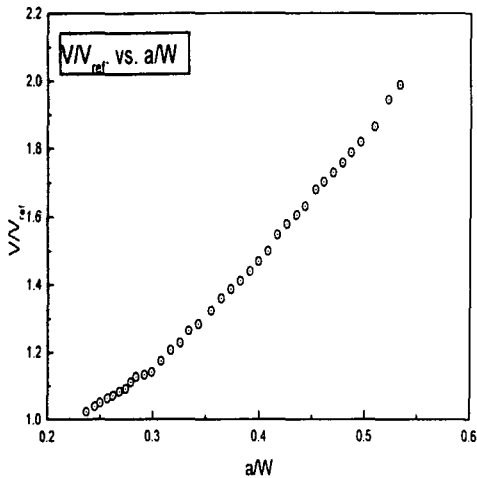


Fig. 3  $V/V_{ref}$  vs.  $a/W$  curves in Al-alloy number of 7075-T651

- 1)  $a/W=0.217$ 일때의  $V$ 값을  $V_{ref}$ 로 결정한다. (여기서,  $W=34mm$ )
- 2) 사이클(cycle) 진행에 따라 균열이 0.3mm진전하였을 때 즉,  $a/W$ 가 0.0088증가할 때의  $V$ 를 측정한다. 이를 이용하여 아래와 같은 식을 얻었다.

$$V/V_{ref} = -10.316(a/W)^3 + 15.414(a/W)^2 - 3.8408(a/W) + 1.204 \dots\dots\dots (2)$$

$$a/W = 0.1343(V/V_{ref})^3 - 0.6956(V/V_{ref})^2 + 1.4575(V/V_{ref}) - 0.6658$$

Where;  $V$  = the measured D.C.P.D. voltage  
 $V_{ref}$  = the reference crack voltage corresponding to  $a/W=0.217$   
 $a$  = the crack size(as defined in ASTM E 647-93)  
 $W$  = the specimen width

이상과 같은 과정을 통하여 이동현미경으로 측정된 a-N관계와 D.C.P.D.법과 ASTM E 647

법에 의해 구한 a-N관계를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 실험식(2)로 구한 a-N관계는 이동현미경으로 측정된 a-N관계와 오차가 거의 없이 일치하였으나 E647-95에 제시된 식(1)을 사용하는 것은 오차가 많이 발생하여 자체적으로 구한 보정곡선식으로 a값을 추정하는 것이 타당하다.

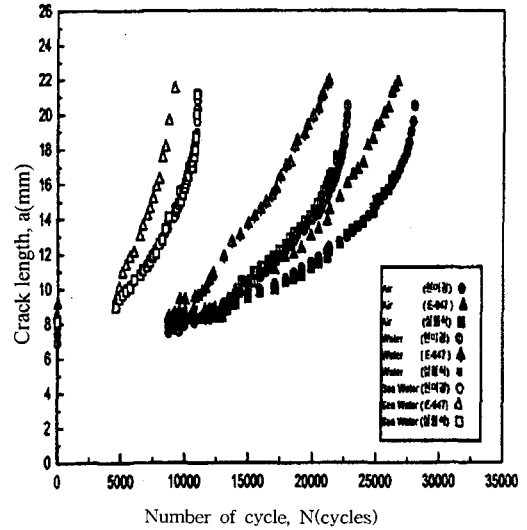


Fig. 4 Relation between crack length and cycle measurement method

### 3.2 짧은 균열(short crack)의 성장거동

각 환경에서의 짧은 균열의 피로성장거동은 Fig. 5에 나타내었다. 균열선단의 곡률반경  $\rho = 0.5mm$ 인 구멍으로부터 균열이 발생, 성장하며 피로균열의 길이가 2mm진전할 때까지의 균열을 짧은 균열이라 하였으며, 이는 McClung<sup>7)</sup>등의 짧은 균열크기의 정의인  $a/\gamma_p < 4 \sim 20$ 에 의한 것이다. 실험결과 짧은 균열의 발생, 성장에 걸리는 시간은 전체 피로 수명의 70%를 차지하고 있다.

Fig. 5에서 보듯이 각 환경에서의 짧은 균열의 성장거동은 긴균열(long crack)의 하한계 임계영역(near threshold region)의 데이터와 비교하면 동일한  $\Delta K$ 상에서  $da/dN$ 은 처음에는 크게 나타났으며, 점차 감소하다가  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 긴 균열의 피로균열성장거동에 일치하여

갔다. 이 이유로서는 균열선단의 국부응력이 전형적인 소규모 항복(small-scale yielding)조건하에서 발생하는 응력보다 현저히 크며, 특히 threshold  $\Delta K$ 부근에서는 더 이러한 경향이 일어난다는 Sehitoglu<sup>8)</sup> 등의 연구결과와 일치하고 있다.

현재까지는 짧은 균열의 데이터와 이에 대한 여러 가지 방법의 해석이 이루어지고 있으나 일치된 견해를 얻지 못하고 있다. 또한 짧은 균열의 거동은 초기결합의 크기가 크거나 피로균열이 긴 시간을 갖고 성장하는 구조물 등에는 크게 중요하지 않게 여기고 있다. 그리고 긴 균열의 성장거동 해석을 기초로 한 손상허용설계개념의 기계, 우주공학의 설계 및 해석응용에는 짧은 균열의 거동이 중요치 않으나, 본 연구의 실험결과에서 보듯이 하한계 임계 응력확대계수 범위 영역(near threshold  $\Delta K$  region)에서도 짧은 균열의  $da/dN$ 은 크게 나타나므로 짧은 균열이 임계값을 갖는다면 이를 긴 균열에 대한 threshold 값과 관련지을 수 있고 짧은 균열의 피로균열성장거동을 정확히 해석할 수 있다면 구조물의 건전성 평가에 많은 기여를 할 수 있다.

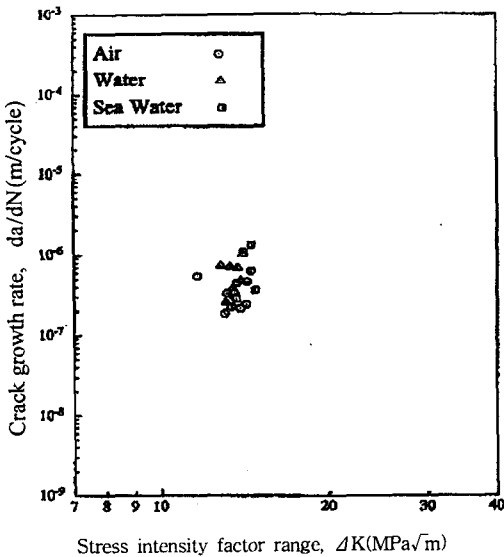


Fig. 5 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range in air, water and sea water(short crack)

### 3.3 각 환경하에서 긴 균열의 피로균열성장거동

Fig. 6은 각 환경에서의 a-N곡선을 나타낸 것이다. 피로수명은 해수환경이 가장 짧았으며 대기환경의 40%, 물환경의 피로수명은 역시 대기환경의 80%정도로 나타나고 있다. 따라서, Al-합금 7075-T651은 물환경보다도 해수환경에 매우 민감함을 알 수 있다. 더우기 해수환경은 Al-합금에 가장 해로운 영향을 주는데, 이의 원인으로서는 해수속의 활성화 이온인  $Cl^-$ 가 부동태 피막을 파괴시킴으로서 부식이 빠르게 진행되기 때문에 기계적 성질의 저하와 재료의 피로수명이 감소되었으며 해수환경에서는 실험시작 수 시간이 경과한 후, 시험편의 표면에 기포가 발생하면서 pit의 발생, 성장 등을 관찰할 수 있었으며 실험의 중반부 부터는 표면부식으로 인하여 이동현미경으로 균열의 성장을 측정하기가 어려웠으나 물환경에서는 육안으로 측정이 가능하였다.

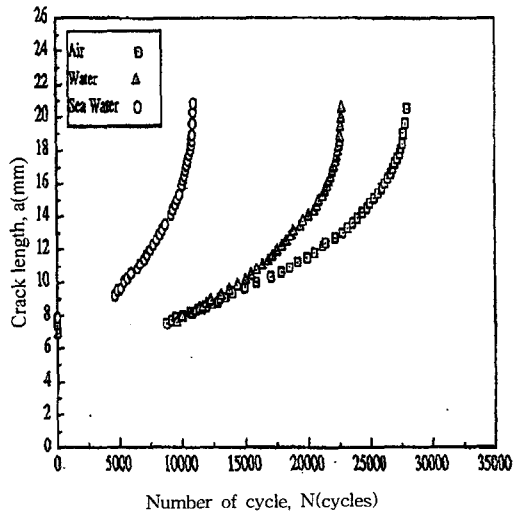


Fig. 6 Crack length vs. N curves in air, water and sea water environment

Fig. 7은 각 환경에서의  $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. 대기 및 해수환경에서의 II영역특성은 통상의 부식에 의한 피로균열의 가속효과를 보이나 SCC에 의한 현저한 가속은 보이지 않는다. 따라서, 이 때의  $da/dN - \Delta K$ 관계는  $da/dN$

$dN=C(\Delta K)^m$ 만으로도 정리가 가능하다. 또한 동일한  $\Delta K$ 를 기준으로 할 때 피로균열성장속도는 해수, 물, 대기환경 속도로 빠르게 나타났다.

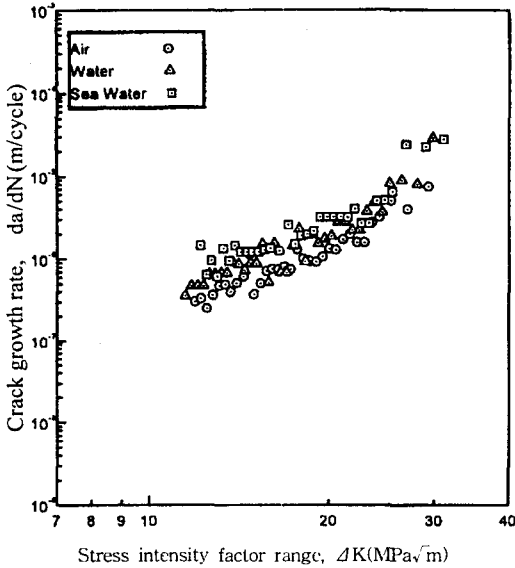


Fig. 7 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  in air, water and sea water(long crack)

Fig. 8은 전자식주사현미경에 의한 각 환경에서의 피로파면의 형상을 나타낸 것으로서 대기 환경에서의 저  $\Delta K$ 영역에서는 균열성장 방향으로 늘어난 전형적인 연성파괴의 모습인 신장딴플(Fig. 8(a))을 나타내고 균열의 안정성장영역인 고  $\Delta K$ 영역에서는 균열성장방향에 수직인 전형적인 줄무늬(striation)형상을 관찰할 수 있으며(Fig. 8(b)) 이때도 역시 불룩하게 만곡되어 있는 연성파괴의 모습을 보여 준다. Fig. 8에서 보듯이 물, 해수 환경에서의 파면의 형상은 대기 환경에서의 파면의 형상과는 크게 다르게 나타난다. 물 환경에서의 저  $\Delta K$ 영역에서는 부식 pit의 형상이 발견되고 연성파괴의 모습을 보여주고 있으며(Fig. 8(c)), 고  $\Delta K$ 영역에서는(Fig. 8(d)) 산화피막이 형성되어 있고 딩플과 둥근입자로 구성된 밝은 영역은 하중이 걸리지 않은 상태하에서의 부식-피로 과정의 파단표면의 부식으로부터 생성된 것이라고 생각되어지며, 입내파면의 형상을 관찰할 수 있으며 줄무늬의 간격은 대기

환경보다 넓으므로써 균열의 성장속도가 대기환경정보다는 빠름을 알 수 있다.

또한, 해수환경에서의 저  $\Delta K$ 영역에서는 (Fig. 8(e))와 같이 수많은 미세균열이 결정립의 계면을 따라 발생함과 동시에 부식 pit의 형상 및 파면상에서는 재결정된 소금결정체가 관찰되었으며, 파면은 입내균열진전의 형상을 보여주고 있다.

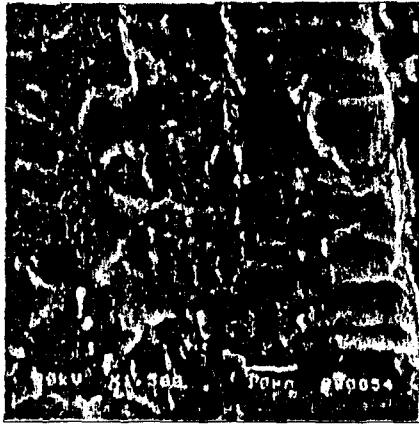
한편, 미세균열의 생성과 입내파괴는 부식 환경에서의 수소원자가 금속의 침입형 격자자리에 침입하여 수소취성을 일으킨 것으로 추정된다. 그러나, (Fig. 8(f))에서와 같이 균열의 안정성장 영역에서는 심한 산화피막의 형성에 의해 파면의 모습을 관찰할 수가 없었다. 따라서, 해수에서는 부식환경에 의한 재료의 취화에 의하여 다른 환경(대기, 물)에서 보다 피로균열성장속도가 빠르게 나타나나, 균열이 진전함에 따라 산화물의 형성에 의해 균열단합(crack closure)현상이 발생하고 있음을 예측할 수 있다.

각 환경에서의  $da/dN-\Delta K$  관계를 고려하면서 저  $\Delta K$ 영역인  $\Delta K=15MPa\sqrt{m}$ 에서 해수환경은 대기환경보다 피로균열성장속도가 약 3배 빠르게 나타났으나  $\Delta K$ 가 증가함에 따라  $\Delta K=25MPa\sqrt{m}$ 에서는 약 2배 정도 빠르게 나타났다. 이는 점차  $\Delta K$ 가 증가함에 따라서 부식이 점진적으로 증가하여 균열면에 발생한 부식생성물(Fig. 8(f))에 의한 균열단합 현상에 기인한 것으로 고찰된다.

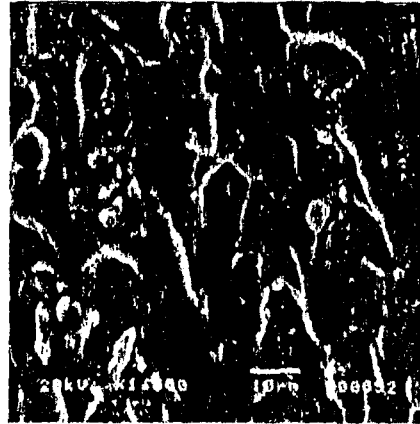
한편, 물환경에서는  $\Delta K=15MPa\sqrt{m}$ 일때의 피로균열성장속도는 대기환경보다 2배정도 빠르게 나타났으며, 전  $\Delta K$ 구간에서도 2배 정도의 빠르기가 유지되었다. 따라서, 물환경은 해수환경보다도  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 부식이 더디게 진행되어 부식생성물에 의한 균열면의 균열단합(crack closure)현상이 크게 일어나지 않음을 추정할 수 있다. Table 3은 각 환경에서의 C와 m

Table 3 The value of C and m in various environment

cyclic load wave-form	environment	C	m
trapezoid	air	$3.62 \times 10^{-11}$	3.5
trapezoid	water	$3.41 \times 10^{-11}$	3.7
trapezoid	sea water	$8.50 \times 10^{-11}$	3.5



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



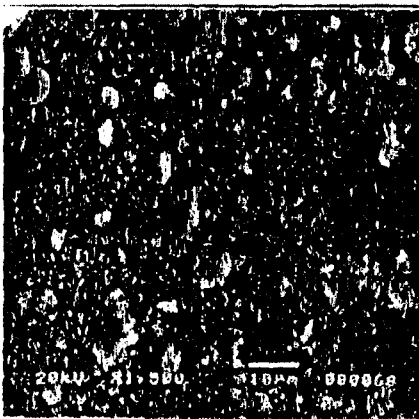
(b)  $\Delta K \approx 25 \text{MPa}\sqrt{m}$ , air



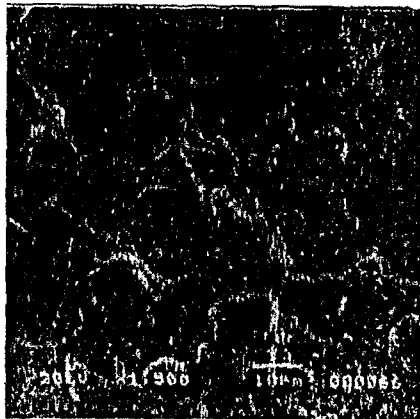
(c)  $\Delta K \approx 15 \text{MPa}\sqrt{m}$ , water



(d)  $\Delta K \approx 25 \text{MPa}\sqrt{m}$ , water



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



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

Fig. 8 Fractographical morphology in air, water and sea water

값을 나타낸 것으로 m값은 거의 비슷하게 나타나나 C의 값에만 차이가 나타나고 있음으로 보아 m값은 환경의 영향을 받지 않는다고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 Al-합금 7075-T651에 대한 부식피로 및 부식환경에서 D.C.P.D.법의 타당성에 관한 연구로써 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부식환경에서의 균열 측정법에 대한 D.C.P.D. 법은 ASTM E 647-95에 제시된 식을 사용하는 것보다는 자체의 보정곡선식을 만들어 계산하는 것이 타당하며 Al-합금 7075-T651의 관계식( $V/V_{ref}-a/W$ )은 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$V/V_{ref} = -10.316(a/W)^3 + 15.414(a/W)^2 - 3.8408(a/W) + 1.204$$

$$a/W = 0.1343(V/V_{ref})^3 - 0.6956(V/V_{ref})^2 + 1.4575(V/V_{ref}) - 0.6658$$

- 2) 짧은 균열의 피로균열성장거동은 초기단계에서는 긴 균열의 피로균열성장속도보다 빠르게 나타났으며 이때의 속도는 매우 불규칙하였으나 마지막 단계에서는 긴 균열의 피로균열성장거동에 일치하여 갔다.
- 3) 긴 균열의 피로균열성장거동은 SCC의 영향을 받지않고 단지 부식에 의한 피로균열의 가속효과만을 보이며 Al-합금 7075-T651은 해수환경에 피로균열의 성장이 입내파괴에 의하여 매우 빠르게 진전되나 각 환경에서의 m 값은 비슷하게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- 1) C.E. Jaske et al, "Corrosion fatigue of metals in marine environments", Chapter3, Corrosion Fatigue Data for Carbon Alloy Steels, Battelle, 1981.
- 2) 권영각, "환경파괴를 고려한 강도설계", 강도설계 기술강습회, pp. 193~248, 1992.
- 3) H.K. Gerhardus, "Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement", in ASM Handbook, Vol. 19, pp. 483~506, 1996.
- 4) K. Kenjiro, "Corrosion fatigue crack growth retardation and enhancement in structural steels", Material Research, Vol. 1 Current Research on Fatigue Cracks, JSME, pp. 235~253, 1985.
- 5) "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates", ASTM E 647-95, pp. 578~614, 1995.
- 6) M.A. Hicks and A.C. Picard, "A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination", Int. J. of Fracture, Vol. 20, pp. 91~101, 1982.
- 7) R.C. McClung, "Behavior of small fatigue cracks", in ASM Handbook, Vol. 19, pp. 153~158, 1996.
- 8) R.C. McClung and H. Sehitoglu, ASME J. Eng. Mater. Technol., Vol. 114, pp. 1~7, 1992.