

고강도 알루미늄 합금의 부식피로균열 성장거동에 관한 연구(I)

A Study on Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior in High Strength Aluminum Alloys(I)

김봉철* 강봉수*한지원** 우홍식***

(한국대 안전공학계 대학원) (한국대 기계공학계) (한국대 안전공학계)

I. 서론

구조물이나 기계요소내의 결함이 성장하여 파손(Failure)에 이르는 현상은 공학분야에서 중요하게 평가되어 오고 있다. 반복적으로 변하는 응력에 의하여 결함이 초기 성장을 거쳐 재료의 파손에 이르게 되는 과정인 피로파괴는 파괴역학의 한 중요한 분야이다.

이에, 본 연구에서는 열처리의 특성상 부식환경에 매우 민감한 Al-Zn-Mg-Cu Alloy 7075에 대하여 Peak Aged T651 Tempering을 실시한 Al-Alloy 7075-T651에 대하여 각기 환경(대기, 물, 해수)의 변화가 부식피로균열성장률에 미치는 영향과 부식환경에서의 긴 균열(Long Crack)과 짧은 균열(Short Crack)의 부식피로균열성장특성을 비교, 고찰하여 초기균열의 잠재시간과 안정성장 시간을 예측하여 구조물의 수명에 축 및 안전성 평가에 기여할 수 있는데 목적이 있다.

II. 실험 방법

1. 시험편

본 실험에 사용된 재료는 항공기용재, 구조재, 고속회전축 등에 사용되는 Al-Alloy 7075-T651로써 시험편은 두께 3mm의 압연판재에서 균열성장방향이 압연방향과 일치하게 하였으며 ASTM E 647-93에 준하여 CT형상으로 제작하였다.

Fig. 1은 시험편의 형상 및 치수를 나타내며 Notch가공 선단에 직경 1mm의 구멍을 만들었다.

2. 시험기 및 측정장치

본 실험에 사용된 시험기는 자체 설계 제작한 1.5ton용량의 공압식 lever형이며 유효 하중반복속도는 0.01 ~ 1Hz이다. 부식조는 Stainless Steel로 제작하였고 용량은 1.5ℓ이며 부식조의 전, 후면에 유리를 부착하여 균열길이의 측정을 가능하게 하였으며 순환기를 설치하여 부식액의 순환은 200ml/min으로 하였다.

한편, Cycle의 진행에 따른 부식피로균열의 측정은 배율이 $\times 50$, 1/100mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경과 D.C.P.D.(Direct Current Potential Drop)방법¹⁾을 동시에 병행하여 사용하였다. D.C.P.D.법을 사용할 때에는 5A의 입력전류를 시험편에 일정하게 흐르게 하였으며 Fig. 1은 시험편에서의 Lead선의 부착위치를 Fig. 2는 D.C.P.D.장치의 개략도를 나타낸다.

3. 피로실험

피로실험은 하중비($R=P_{min}/P_{max}$)를 0.3 하중반복속도는 0.2Hz, 주기파형은 사다리꼴로하여 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 647-95¹⁾에 제안된 Secant Method를 사용하였으며, 또한 ΔK 값은 ASTM E 647-95에 제시된 Srawley의 CT시험편에 대한 계산식을 이용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

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 Picard²¹가 제안한 실제 실험에서 얻은 V/V_{ref} 와 a/W 의 Calibration Curve를 이용하여 균열길이를 추정하는 방법을 이용하여 이를 비교, 고찰 하였다.

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

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

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

$$A_0=0.5766, \quad A_1=1.9169, \quad A_2=-1.0712, \quad A_3=1.6898$$

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 Picard²¹가 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 Calibration곡선식을 얻었다.

1) $a/W=0.217$ 일때의 V 값을 V_{ref} 로 결정한다. (여기서, $W=34mm$)

2) Cycle 진행에 따라 균열이 0.3mm진전하였을 때 즉, a/W 가 0.0088증가할 때의 V 를 측정한다. 이를 이용하여 아래와 같은 식을 얻었다.

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

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

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 647법에 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 사용하면 오차가 많이 발생하여 자체적으로 구한 Calibration곡선식으로 a값을 추정하는 것이 타당하다.

2. 짧은 균열(Short Crack)의 성장거동

각 환경에서의 짧은 균열의 피로성장거동은 Fig. 5에 나타내었다. 균열선단의 곡률반경 $\rho=0.5\text{mm}$ 인 구멍으로부터 균열이 발생, 성장하며 Fatigue Crack의 길이가 2mm진전할때 까지의 균열을 짧은 균열이라 하였으며, 이는 McClung³⁾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 나타나듯이 각 환경에서의 짧은 균열의 성장거동은 긴 균열(Long Crack)의 Near Threshold Region의 데이터와 비교하면 동일한 ΔK 상에서 da/dN 은 처음에는 크게 나타났으며, 점차 감소하다가 ΔK 가 증가함에 따라 긴 균열의 피로균열성장거동에 일치하여 갔다. 이 이유로서는 균열선단의 국부응력이 전형적인 Small-Scale Yielding조건하에서 발생하는 응력보다 현저히 크며, 특히 Threshold ΔK 부근에서는 더 이러한 경향이 일어난다는 Sehitoglu⁴⁾ 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 초기결함의 크기가 크거나 피로균열이 긴 시간을 갖고 성장하는 구조물 등에는 크게 중요하지 않게 여기고 있다. 그리고 긴 균열의 성장거동 해석을 기초로 한 손상허용설계개념의 기제, 우주공학의 설계 및 해석응용에는 짧은 균열의 거동이 중요치 않으나, 본 연구의 실험결과에서 보듯이 Near Threshold ΔK Region에서도 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.

3. 긴 균열의 각 환경에서의 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-Alloy 7075-T651은 물환경보다도 해수환경에 매우 민감함을 알 수 있다. 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. 7은 각 환경에서의 $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타낸 것이다. 대기 및 해수환경에서의 II영역특성은 통상의 부식에 의한 피로균열의 가속효과를 보이나 S.C.C(Stress Corrosion Cracking)에 의한 현저한 가속은 보이지 않는다. 따라서 이 때의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 만으로 정리가 가능하다. 또한 동일한 ΔK 를 기준으로 할 때 피로균열성장속도는 해수, 물, 대기환경 속도로 빠르게 나타났다.

Fig. 8은 전자식주사현미경에 의한 각 환경에서의 피로파면의 형상을 나타낸 것으로서 대기환경에서의 저 ΔK 영역에서는 연성파면의 형상(Fig. 8(a))를 보여주나 균열의 안정성장영역인 고 ΔK 영역에서는 전형적인 줄무늬(Striation)형상을 관찰할 수 있으며 (Fig. 8(b)) 이때도 연성파면의 모습을 보여 준다. Fig. 8에서 보듯이 물, 해수 환경에서의 파면의 형상은 대기환경에서의 파면의 형상과는 크게 다르게 나타난다. 물환경에서의 저 ΔK 영역에서는 부식 Pit의 형상이 발견되고 연성파면의 모습을 보여주고 있으며 고 ΔK 영역에서는 산화피막이 형성되어 있으나 대기환경에서와 같이 줄무늬 형상과 함께 미세균열 발생과 함께 입내파면의 형상을 관찰할 수 있으며 줄무늬의 간격은 대기환경보다 넓으므로서 균열의 성장속도가 대기환경보다는 빠름을 알 수 있다.

또한, 해수환경에서의 저 ΔK 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 부식환경에서의 수소원자가 금속의 침입형 격자자리에 침입하여 수소취성을 일으킨 것으로 추정된다. 그러나, (Fig. 8(f)) 에서와 같이 균열의 안정성장영역에서는 심한 산

화피막의 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 Crack Closure현상이 발생하고 있음을 예측할 수 있다.

각 환경에서의 $da/dN-\Delta K$ 관계를 고려하면 저 ΔK 영역인 $\Delta K \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 에서 해수환경은 대기환경보다 피로균열성장속도가 약 3배 빠르게 나타났으나 ΔK 가 증가함에 따라 $\Delta K \approx 30 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 에서는 약 2배 정도 빠르게 나타났다. 이는 점차 ΔK 가 증가함에 따라서 부식이 점진적으로 증가하여 균열면에 발생한 부식생성물(Fig. 8(f))에 의한 Crack Closure현상에 기인한 것으로 고찰된다.

한편, 물환경에서는 $\Delta K \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 일때의 피로균열성장속도는 대기환경보다 2배정도 빠르게 나타났으며 진 ΔK 구간에서도 2배 정도의 빠르기가 유지되었다. 따라서 물환경은 해수환경보다도 ΔK 가 증가함에 따라 부식이 더디게 진행되어 부식생성물에 의한 균열면의 Crack Closure현상이 크게 일어나지 않음을 추정할 수 있다. Table 1은 각 환경에서의 C,와 m값을 나타낸 것으로 m값은 거의 비슷하게 나타나나 C의 값에만 차이가 나타나고 있으므로 보아 m값은 환경의 영향을 받지 않는다고 고찰된다.

IV. 결 론

이상과 같은 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

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

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

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

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

2. 짧은 균열의 피로균열성장거동은 초기단계에서는 긴 균열의 피로균열성장속도보다 빠르게 나타났으나 이때의 속도는 매우 불규칙하였으나 마지막 단계에서는 긴 균열의 피로균열성장거동에 일치하여 갔다.
3. 긴 균열의 피로균열성장거동은 S.C.C.의 영향을 받지 않고 단지 부식에 의한 피로균열의 가속효과만을 보이며 Al-Alloy 7075-T651은 해수환경에 피로균열의 성장이 입내과피에 의하여 매우 빠르게 진전되나 각 환경에서의 m값은 비슷하게 나타났다.

<참고문헌>

- 1] "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM E 647-95, pp.578-614, 95
- 2] 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
- 3] "R. C. McClung, "Behavior of Small Fatigue Cracks", in ASM Handbook, Vol.19, pp.153-158, 1996
- 4] R. C. McClung and H. Sehitoglu, ASME J. Eng. Mater. Technol., Vol 114, pp.1-7, 1992

Table 1 The Values of C and m in Various Environments

Cyclicloadwave form	Environment	C	m
trapezoid	air	$3.62e \times 10^{11}$	3.5
trapezoid	water	$3.41e \times 10^{11}$	3.7
trapezoid	sea water	$8.50e \times 10^{11}$	3.5

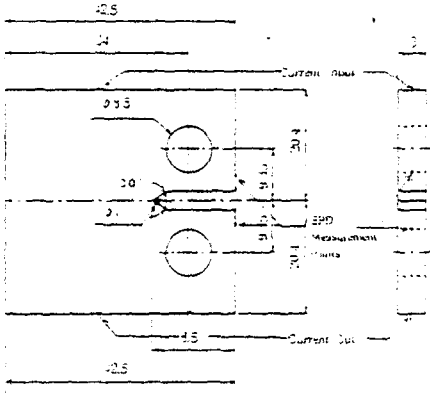


Fig. 1 CT Geometry and Potential Wire Placement Location (unit : mm)

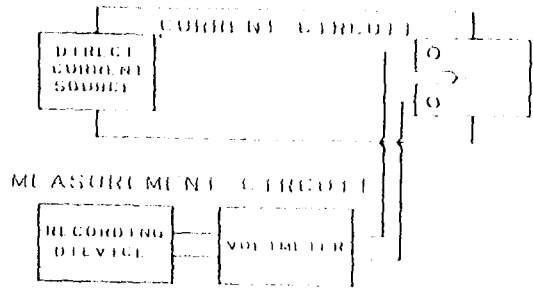


Fig. 2 Schematic Diagram of the Potential Drop System

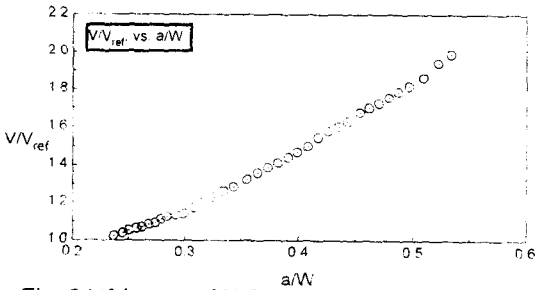


Fig. 3 V/V_{ref} vs. a/W Curves in Al-Alloy 7075-T651

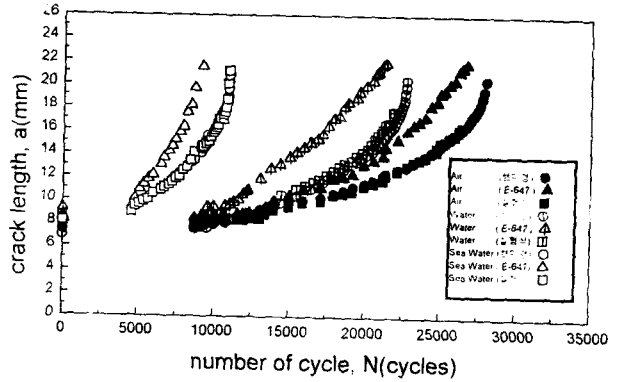


Fig. 4 a vs. N Curves for Different Measurement Method

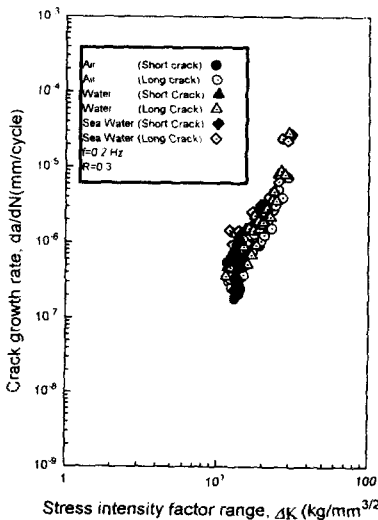


Fig. 5 Comparison of Short and Long Fatigue Crack Growth Rates in.

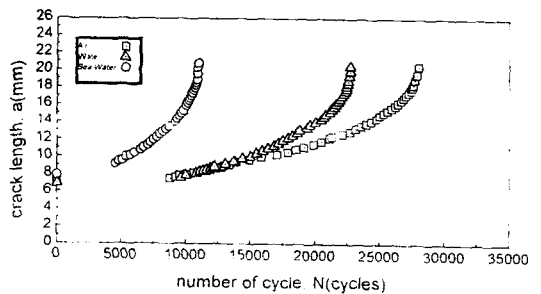


Fig. 6 a vs. N Curves in Air, Water and Sea Water Environment

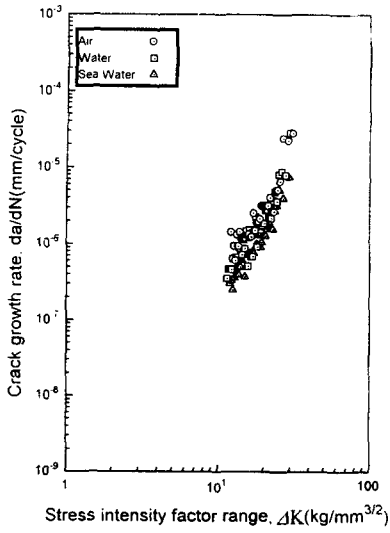


Fig. 7 da/dN vs. ΔK Relations in Air, Water and Sea Water



(a) $\Delta K \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Air



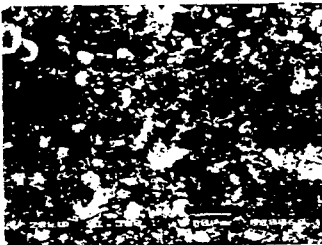
(b) $\Delta K \approx 25 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Air



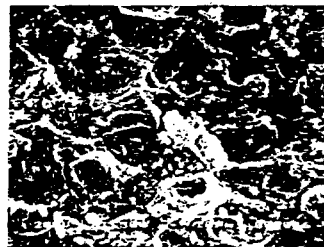
(c) $\Delta K \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Water



(d) $\Delta K \approx 25 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Water



(e) $\Delta K \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Sea Water



(f) $\Delta K \approx 25 \text{ kg/mm}^{3/2}$, Sea Water

Fig. 8 Fracture Surface of Al-Alloy 7075 T651 in Air, Water, and Sea Water (SEM)