

\*본 연구는 '86년 문교부 자유공모과제에 의하여 수행한 것임.

고강도 알루미늄에서의 균열닫힘이 미소  
피로균열의 전파거동에 미치는 영향

이 현우\*

Crack Closure Effects on Small Fatigue Crack Growth  
Behavior in High Strength Aluminum

Hyun-Woo, Lee \*

Abstract

The fatigue crack growth behavior of physically-short cracks ( $0.2 < a < 2\text{mm}$ ) and long cracks ( $2 < a < 25\text{mm}$ ) under constant amplitude loading was investigated with SEN type specimens using aluminum 7075-T6 material with stress ratio,  $R$ , of 0.05, -1 and 0.5 at room temperature. The crack closure effect on fatigue crack growth was also investigated. It was found that the physically-short cracks grew much faster than long cracks based on applied  $\Delta K$  with  $da/dN < 1 \times 10^{-7} \text{m/cycle}$ . The transition crack lengths where similitude with  $\Delta K$  existed was between 1 and 2mm. The effective stress intensity factor range based on COD measurements gave better correlation between the physically-short and long cracks. Thus it can be considered that the crack closure effect is one of the main factors which causes the differences between these two cracks.

\* 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과 부교수 (종신회원)

## 1. 서 론

최근의 피로균열의 전파거동에 대한 연구에 의하면 미소피로균열의 전파속도는 같은 조건하에서 충분히 긴 피로균열의 전파속도에 비하여 거의 예외없이 빠르다는 사실이 보고되고 있다. 이와같은 사실은 구조물 내에 초기결함의 존재를 가정한 defect-tolerant 해석에서 기존의 CT시편에 의한 균열전파자료를 사용하여 수명예측을 하는 경우 안전한 설계를 보장하기 어렵다. 따라서 최근 수년간 이들 미소피로균열의 전파에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미소균열에 대한 연구는 미소균열의 형성과 발달에 영향을 미치는 금속조직학적 특성, 선형파괴역학의 적용범위 및 균열선단에서의 응력분포상태와 기하학적형상이 피로한계 또는 하한계 응력확대계수에 미치는 영향과 이들의 정성적 관계 등 몇가지 분야로 나누어 생각할 수 있으나 미소균열의 정확한 정의 및 그 한계 길이등은 명확히 규정되어 있지 않다. 그러나 Ritchie와 Suresh(1)가 분류한 다음 세가지 범주의 정의가 일반적으로 사용되고 있다.

즉,

- (1) 균열의 길이가 재료의 미시적 조직의 크기와 비교될 수 있는 경우(1-50 $\mu$ )
- (2) 균열선단에서의 국부적 소성역의 크기와 비교될 수 있는 경우(0.01-1mm)
- (3) 균열의 길이가 단순히 물리적 의미에서 짧은 경우

지금까지의 미소피로균열에 대한 연구는 주로 처음의 두 경우에 대하여 진행되어 왔으나 이들 경우에는 선형파괴역학을 적용함에 있어 많은 문제점이 제기되고 있다. 선형파괴역학의 적용이 가능한 범위에서의 단순한 그 길이가 짧은 미소균열의 경우에도 그 전파속도가 충분히 긴 균열의 전파속도에 비하여 빠르다는 사실이 보고되고 있다.<sup>(2-3)</sup> 이와 같은 현상을 설명하기 위한 몇가지 모델이 제시되고 있으나 아직까지는 충분한 연구자료가 축적되어 있지 못한 상태이다.

본 연구에서는 항공기 재료등으로 널리 쓰이고 있는 고강도 알루미늄합금(7075-T6)에 선형파괴역학의 적용이 가능한 범위의 단순히 그 길이가 짧은 미소균열이 존재하는 경우에 대하여 균열단합의 기구학적 고찰

및 실험을 통하여 균열전파거동과 비교함으로써 이들 자료를 defect-tolerant analysis에 활용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 균열전파와 균열단합의 기구학적 고찰

### 2.1 피로균열의 전파거동

일반적으로 피로균열의 성장거동은  $\log(da/dN)$  vs.  $\log(\Delta K)$ 의 관계에서 시그모이달 곡선으로 나타난다. 이 곡선의 상한 값은 재료의 파괴인성(Fracture Toughness)에 접근하고 하한값은 재료의 하한계 응력확대계수 폭(threshold level)에 접근하며 영역 II에서 Paris의 식으로 정의된다. Paris의 식에서 지수  $m$ 은 기구학적 모델에 따라 2~4의 값을 갖는다.  $m=2$ 의 값은 균열선단에서의 미소기구에 기초를 둔 모델들에서 나타나며,  $m=4$ 의 값은 주로 균열선단에서의 소성역에 의한 손상누적개념에 기초를 둔 모델들에서 나타나고 있다. 그러나 많은 실험데이터들은 재료에 따라  $m=2-8$ 의 광범위한 값을 보여주고 있다. 따라서 모든 재료에 대하여 광범위하게 적용될 수 있는 균열전파에 대한 기구학적 모델의 개발은 현 시점에서 불가능한 것으로 평가되고 있다.

미소균열의 성장거동에 대한 연구는 Pearson<sup>(4)</sup>이 알루미늄 합금에서 발생한 초기 균열로부터 전파되는 균열의 성장거동을 발표하며, 본격적으로 시작되었다. Pearson은 이 연구에서 미소균열의 성장은 같은 조건하에서의 긴 균열의 성장보다 빠르다는 사실을 보고하였고 이후 El Haddad<sup>(5-6)</sup> 등에 의하여 강철계통의 합금에 대하여도 똑같은 사실이 보고되었고 이로부터 이들 성장거동의 차이를 설명하기 위한 기구학적 고찰이 진행되어 왔다.

El Haddad등은 이 차이를 고유균열 길이의 개념을 도입하여 설명하였다. 즉

$$l_0 = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ith}}{\Delta \sigma_e} \right) \quad (1)$$

로 정의되는 고유균열길이  $l_0$ 를 도입하여 균열의 성장에 영향을 미치는 유효응력강도계수 폭을 다음과 같이 수정하여 정의하였다.

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{(a+l_0)} F\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2)$$

식(2)에서 유효균열길이  $a+l_0$ 를 사용함으로써 균열의 길이가 짧을수록  $l_0$ 에 의한 영향이 커져 실제의 균열길이에 대한 응력확대계수폭보다 더 큰  $\Delta K$ 의 값을 받아 미소균열의 경우 균열성장속도가 빠르게 된다고 해석하였으나 고유균열길이  $l_0$ 에 대한 물리적인 의미는 정의되어 있지 못하다.

최근 Allen과 Sinclair<sup>(7)</sup>는 미소균열 성장거동을 설명하기 위한 유효응력 확대계수를 정의하기 위한 비교적 간단한 모델을 주장하였다. 즉

$$K_{eff} = K \frac{1}{\sqrt{1 - (\sigma/\sigma_y)}} \quad (3)$$

따라서 주어진  $K$ 에 대하여 미소균열의 경우 더 큰 응력이 나타남에 따라 더 큰 유효응력확대계수의 지배를 받음으로 균열성장속도가 빠르게 된다. 그러나 이와 같은 접근 방법은 최초 균열선단의 응력장에 대한 정의가 단순증가 하중의 경우를 가정한 것이므로 하중의 감소과정이 포함되는 피로균열의 경우에는 reversed plastic zone의 영향이 고려되어야 한다.

### 2.2 선형파괴역학의 적용이 가능한 미소피로균열의 전파 거동

LEFM의 적용이 가능한 물리적 의미에서 단순히 그 길이가 짧은 균열의 경우에는 서로 다른 몇가지의 기구학적 모델이 제시되고 있다. 그들은 균열단합 현상에 의한 기구<sup>(8)</sup>, 균열선단에서의 화학적 변화에 의한 기구<sup>(9)</sup>, 균열선단에서의 균열진전을 어렵게 하는 방해물의 존재에 의한 기구(blockage mechanism)<sup>(10)</sup> 등이다.

균열단합현상은 균열이 진전됨에 따라 발생하는 균열표면에서의 소성변위에 의한 신장량의 지배를 받으므로 그 길이가 제한되는 미소균열의 경우에는 균열단합의 영향이 감소되어 같은 조건하에서의 긴 균열보다 그 전파속도가 빠르게 된다. 또한 균열선단에서의 산화작용이나 다른 화학적 변화에 의한 영향은 미소균열과 긴 균열의 전파거동을 다르게 하는 중요한 인자로 간주되고 있다. 균열선단에서의 응력확대계수가 어느 임계값 이하이면 균열전파는 결정입자의 경계 등과 같

이 균열전파를 방해하는 인자들에 의해 지배를 받으며 이는 응력확대계수보다는 주기적 응력 진폭  $\Delta\sigma$ 의 크기에 의하여 결정된다. 충분히 긴 균열의 경우에는  $\Delta\sigma$ 의 값이 충분히 작아지므로 그 방해물을 극복하여 균열의 진전이 일어나기 어려우므로 하한계 값이 존재하지만 미소균열의 경우에는 주어진 임계 응력확대계수폭에 대하여  $\Delta\sigma$ 가 상대적으로 커지게 되어 균열선단에서의 방해물을 극복하고 균열진전이 일어나게 되며 심지어는 하한계 응력확대계수폭의 값이 존재하지 않는 경우도 발생하게 된다. 따라서 하한계 응력확대계수 근처에서 미소균열의 전파로  $\Delta\sigma$ 는 지배를 받는다고 간주할 수 있다.

### 2.3 균열단합기구의 고찰

Elber<sup>(11)</sup>는 피로균열이 성장함에 따라 균열표면에 영구적인 소성변형의 흔적이 남게되어 이것이 후속적으로 오는 균열의 열림과 단합을 방해하여 균열단합 현상이 일어난다는 것을 처음으로 소개하였다. 이후 이들 현상에 대한 연구가 진행되어 왔으며 이와같은 균열단합 현상은 여러가지 인자들에 의한 복합적인 원인에 의하여 나타난다는 사실이 알려져 있다. 이들 중 중요한 인자로는 균열선단에서의 소성변형이 균열표면에 영구신장으로 남아 이들에 대한 주위의 탄성구속으로 인한 것 특히 모드 II에서의 균열선단 변위가 나타나는 경우 현저한 거친균열단면 사이의 불연속적인 접촉에 의한 것, 또는 균열표면이나 선단에서의 부식이나 산화로 인한 침전물의 발생 등이며 대개의 경우 이와같은 현상이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 균열단합이 피로균열이 성장하는 동안 나타난다는 사실은 의심할 여지가 없으나 아직까지 이의 기구학적 이론은 확실히 정립되어 있지 못하며 시편의 두께와 균열길이, 형태등을 포함하는 기하학적 요소, 가해지는 응력확대계수의 크기, 반복하중의 상호작용과 실험환경등이 복합적으로 영향을 미쳐 아주 복잡한 양상을 보이고 있으므로 표준실험방법이 설정되어 있지 못하다. 최근 Bucci<sup>(12)</sup>에 의한  $\Delta K$ -감소법이 ASTM의 추천실험방법으로 채택되어 사용되고 있다.

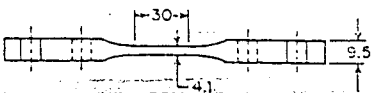
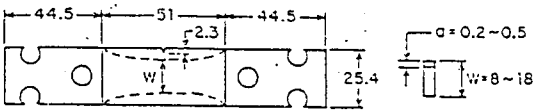
미소균열의 경우에는 균열길이가 짧으므로 균열단합을 야기시키는 균열표면의 영구변형, 거칠기, 부식등

이 제한되어 영향이 긴 균열의 경우보다 작게 된다. Morris<sup>(13)</sup> 등은 티타늄계 합금을 사용하여 COD에 의한 균열단합을 측정한 결과 균열단합은 균열길이의 함수로 표시됨을 보여주었다. 즉 균열단합은  $a < 0.5\text{mm}$ 의 경우 균열길이가 감소함에 따라 균열단합도 감소된다는 사실을 보고하였다. 따라서 균열단합은 긴 균열과 미소균열사이의 전파거동의 차이를 설명할 수 있는 중요한 인자의 하나로 간주될 수 있다.

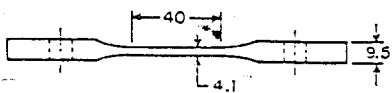
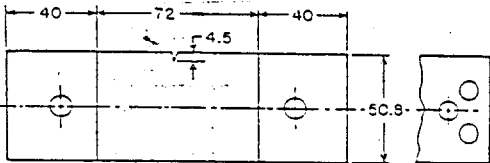
### 3. 실험

#### 3.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 7075-T6 알루미늄합금으로 0.2% 항복강도는 559MPa이고 인장강도는 601MPa이다. 모든 시편은 두께 9.5mm인 판재로부터 절단하여 가공하였으며 시편의 하중방향과 모재의 압연방향이 일치하도록 하여 균열전파는 압연방향과 수직이 되도록 하였다. 실험에 사용된 시편은 SEN(single edge notched) 형으로 가공하였으며 그 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 초기균열발생을 용이하게 하기 위하여 모든 시편에 chevron notch를 기계가공하였으며 시편의 표면은 좀더 나은 균열측정을 위하여 경면으로 연마하였으며 균열전파방향과 수직이 되도록 2mm 간격의 보조선을 사용하였다.



(a) Specimen for short crack growth test



all dimensions in mm

(b) Specimen for long crack growth test

Fig. 1 Test specimens

#### 3.2 실험장치

모든 피로균열의 전파실험은 최대용량 25ton의 폐쇄유압 회로식 INSTRON을 사용하여 10% 하중범위에서 0.2% 이내의 오차로 하중제어방식을 채택하였다.  $R=0.05$  및  $R=0.5$ 인 하중비에서의 긴 균열의 전파실험은 구멍이 하나인 일체로 된 grip을 사용하였고 그 외의 모든 실험에서는 구멍이 세개인 모노볼 grip을 사용하여 압축시 굽힘에 대한 효과를 최소화하도록 하였다. 시험중 편심하중을 제거하기 위하여 로드셀, 시편, 액츄에이터의 정렬을 수시로 조정하였다.

균열의 길이는 2mm 간격의 보조선을 기준으로 하여 이동식 망원현미경( $\times 33$ )을 사용하여 측정하였으며 미소균열의 경우에는 레프리카를 부착하여 균열길이를 확인하였다.

#### 3.3 실험방법

모든 시험편에 대하여  $R=0$ 에서 하중감소법을 사용하여 예비균열을 주었으며 이때 마지막 하중단계에서는 전 단계와의 하중감소비가 8%가 넘지 않도록 하였으며 긴 균열을 위한 시험편의 경우에는 최종단계에서의 균열 성장량은 0.5mm 정도로 하였다.

긴 균열의 전파시험은 균열성장속도  $da/dN$ 이  $10^{-8}$  m/cycle 이상인 구간에서 ASTM647 표준시험방법에 따랐으며 threshold level 근처에서는 ASTM 추천방법인 하중감소법에 따라 하중단계별 상호작용이 없도록 하중감소비를 4-2%로 하였고 단계별 균열 성장량은 0.2-0.4mm로 하였다.

미소균열의 전파실험은 균열이 전파함에 따라 긴 피로균열의 전파거동을 나타냄으로 이를 피하기 위하여 S-N type의 multi-specimen을 사용하여 2mm 이내의 균열에 대하여 데이터를 얻었다. 7075-T6 알루미늄 합금은 그 기계적 성질이나 금속조직의 변화없이 기계가공 또는 균열전파에 따른 균열선단에서의 잔류응력을 열처리에 의하여 이완시키는 것이 불가능하므로 열처리는 행하지 않았다. 따라서 균열 선단에서의 소성역은 매 하중단계에서 0.01mm보다 작도록 하였다. 초기 미소 균열의 길이는 예비균열에서 0.2-0.3mm가 남도록 주의깊게 기계 가공하여 이로부터 하중의 단계별 감소에 의하여 2mm까지 실험한 후 다시 재가공하여 0.2-0.3mm의 균열이 남도록 반복하여 가공하

여 실험하였다. 균열의 증가량은 0.1-0.2mm 범위내에서 측정하였으며 시편의 폭은 8-18mm 사이에서 실험을 행하였다. 균열의 측정은 항상 시편의 양쪽 표면에서 행하였으며 이때 운전멈춤시간은 약 1분정도였다. 각 하중비에서 미소균열의 전파실험에 사용된 시편의 수는 10개 정도이다.

균열 전파 실험중 Threshold level 근처에서 균열 단합을 표적거리 12.7mm인 clip-gage를 사용하여 측정하였다. gage는 스프링과 고무밴드를 사용하여 시편에 부착하였으며 이로부터 하중과 균열열림변위(COD)를 X-Y 레코더에 의하여 기록하였다. 기록은 1Hz의 주파수로하여 안정된 기록을 하도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

긴 균열 및 미소균열에 대한 균열전파속도는 이웃하는 2개의 데이터점 사이에서의 평균 균열전파량에 대한 가해진 반복하중수의 비로 정의하여 da/dN으로 하였다.

미소균열의 경우 균열선단의 곡률 및 편심이 매우 중요한 인자로 작용하므로 각 시편에 대하여 다음과 같은 보정식을 사용하여 전체 하중단계에 대한 균열의 길이를 보정하였다.

$$a = (a_a)_{av} + \sum_{i=1}^5 (\Delta(a_i)_{av} + \Delta(a_i)_{av}) \frac{(a_f)_{cor} - (a_f)_{av} - (a_o)_{cor} + (a_o)_{av}}{(a_o)_{av} - (a_a)_{av}} \quad (4)$$

여기서 (a)<sub>av</sub>는 시편의 양표면에서 측정된 균열 길이의 평균값이고 (a)<sub>cor</sub>는 최종 파단된 시편의 두께방향으로 5개의 등간격점에서 측정한 균열길이의 평균값이다. 균열의 길이가 30% 이상 차이가 나는 경우 데이터는 사용하지 않았으며 따라서 전체의 50% 정도의 데이터는 사용할 수 없었다.

SEN 시편에서의 값은 다음 식<sup>(14)</sup>에 의하여 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW} \sqrt{a} \left[ 1.99 - 0.41 \left( \frac{a}{w} \right) + 18.7 \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right] \quad (5)$$

여기서 ΔP는 양의 하중범위이고 B와 W는 각각 시편의 두께와 폭을 나타낸다.

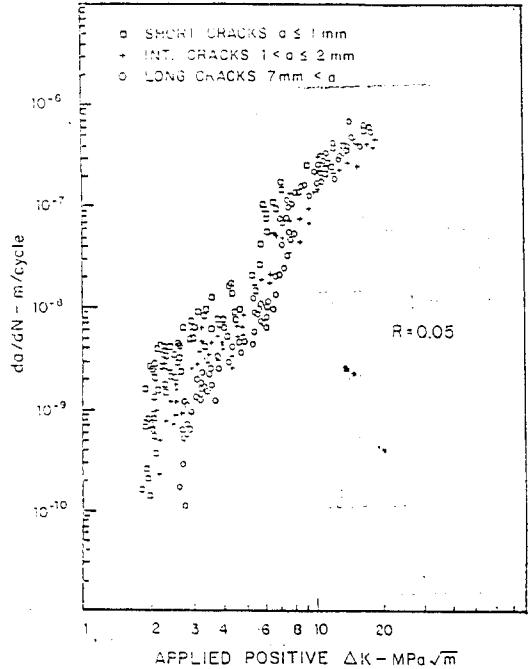


Fig. 2 da/dN versus applied stress intensity factor range for all crack lengths (R=0.05)

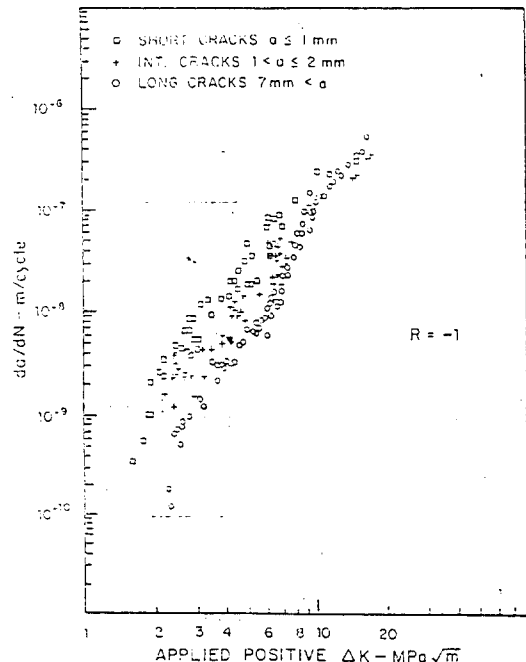


Fig. 3 da/dN versus applied positive stress intensity factor range for all crack lengths(R = -1)

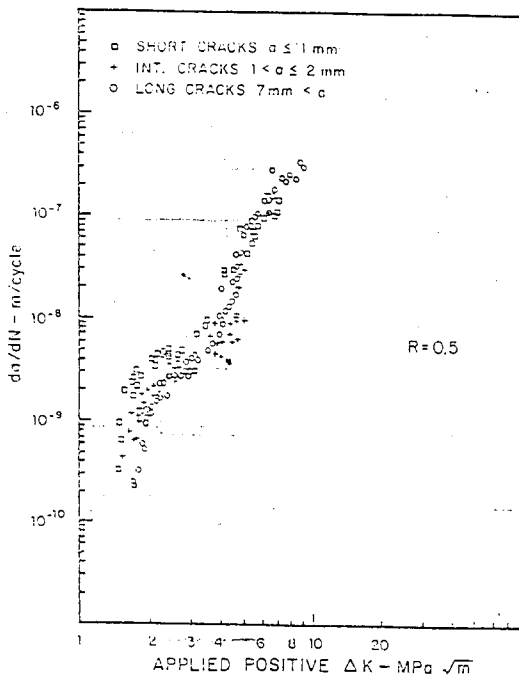


Fig. 4  $da/dN$  versus applied stress intensity factor range for all crack lengths ( $R=0.5$ )

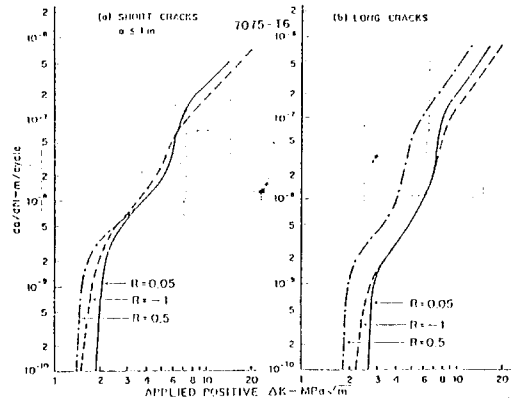


Fig. 5 Median sigmoidal curve for both short and long cracks

Table 1. Comparisons of short and long crack growth behavior

Growth Rate $da/dN$ (m/cycle)	Long Cracks									Short Cracks			$\frac{\Delta K}{\Delta K_{eff}}$		
	$\Delta K$ ( $Pa\sqrt{m}$ )			$\frac{P_{op}}{P_{max}}$			$\Delta K_{eff}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )			$\Delta K$ ( $MPa\sqrt{m}$ )					
	R ratio			R ratio			R ratio			R ratio					
	0.05	-1	0.5	0.05	-1	0.5	0.05	-1	0.5	0.05	-1	0.5	0.05	-1	0.5
$2 \times 10^{-7}$	10.2	10.5	7.5	--	--	--	--	--	--	9.7	10.5	7.1	--	--	--
$6 \times 10^{-8}$	7.4	7.6	5.2	--	--	--	--	--	--	5.9	6.0	5.0	--	--	--
$1 \times 10^{-8}$	6.1	5.6	3.8	.35	.30	--	4.15	3.95	--	4.1	3.8	3.7	0.99	0.96	--
$5 \times 10^{-9}$	4.9	4.5	3.3	.41	.33	--	3.04	3.02	--	2.85	2.9	2.75	0.94	0.96	--
$2 \times 10^{-9}$	3.5	3.3	2.1	.49	.42	.55	1.88	1.92	1.89	2.15	1.9	1.75	1.14	0.99	0.93
$1 \times 10^{-9}$	3.0	2.8	1.95	.54	.45	.55	1.44	1.52	1.75	2.13	1.75	1.71	1.48	1.15	0.98
$5 \times 10^{-9}$	2.9	2.5	1.8	.55	.48	.56	1.33	1.29	1.56	2.02	1.68	1.55	1.52	1.30	0.99
$1 \times 10^{-9}$	2.6	2.3	1.7	.60	.58	.57	1.07	0.97	1.46	1.82	1.61	1.43	1.70	1.66	0.98

Fig. 2, 3, 4는 각 하중비에 대한  $da/dN$ 과  $\Delta K$ 와의 관계를 log-log 좌표에 나타낸 것으로 미소균열, 중간 균열, 긴 균열의 전파속도를 하나의 graph로 나타내어 비교가 용이하도록 하였다. 여기에서 긴 균열은 7-25mm, 미소균열은 0.5-1mm, 중간균열은 1.0-2.0mm 범위의 균열을 나타낸다. 미소균열에서 더 큰 스캐터를 보이는 것은 미소균열의 측정에 대한 문제 및 각 미소균열의 전파 특성에 따른 것이다. Threshold level은  $da/dN=10^{-10}$ m/cycle에서의  $\Delta K$  값으로 정의하였으며 그 값은 Table 1에 수록하였다. Fig. 5는 3개의 하중비에서 미소균열 및 긴균열의 전파 거동을 나타내는 대표적 곡선을 중첩한 것으로 주어진 데이터들의 median을 취한 것이다.

Fig. 6, 7, 8은 5개의 서로 다른 균열전파속도에서의  $\Delta K$ 와 균열길이와의 관계를 나타낸 것이다. 좀 더 쉽게 보기 위하여 scatter band를 선으로 표시하였으며 각 범위에서의  $da/dN$ 값은 그림에 표시하였다.

긴 균열에 대한 하중과 COD관계는 Fig. 9에 나타내었다. 일반적으로 하중과 COD의 관계는 폐곡선을 그리는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 하중을 가하는 과정과 하중이 제거되는 과정에서 일치되는 하나의 곡선으로 나타났으며 따라서 균열 닫힘과 균열 열림 하중의 차이는 발견할 수 없었다. Fig. 9의 하중과 COD의 관계에서 뚜렷한 변곡점이 나타나지 않으므로 서로 다른 두 평균 기울기의 직선이 만나는 점을 균열 열림하중,  $P_{op}$ 로 정의하였으며 그림에서 작은 원으로 표시하였다.  $R=0.5$ 에서는 Threshold level 근처에서만 측정할 수 있었으며 미소균열의 경우에는 하중과 COD의 관계가 거의 직선으로 나타나 COD에 의한 균열닫힘 하중의 측정은 불가능하였다.

Fig. 10은  $P_{op}/P_{max}$ 과  $\Delta k$ 의 관계를 나타낸 그림이다.

#### 4.2 고찰

탄성하에서의 응력강도계수  $K$ 는 균열선단에서의 소성역의 반경  $r_y$ 가 균열길이, 시편의 두께 및 폭에 비하여 충분히 작으면 균열선단에서의 응력-변형을 상태를 충분히 정확하게 서술할 수 있다. 본 실험에서 얻은 모든 데이터는 위의 조건을 만족한다. 즉 미소균열의 경우 가장 큰  $K$ 값은  $15MPa\sqrt{m}$ 이고 이 재료의 항복강도는  $559MPa\sqrt{m}$ 이므로 평면응력하에서의 최대소성역

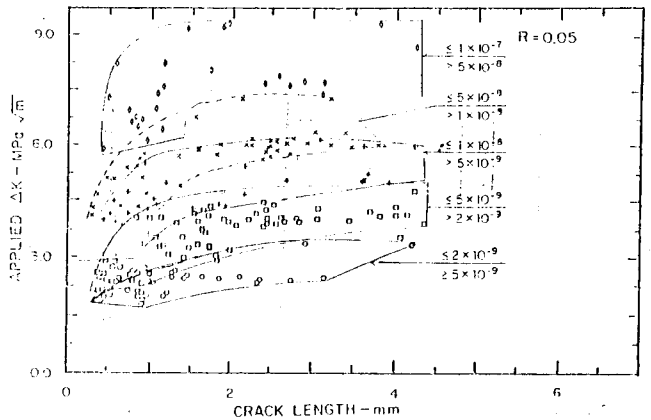


Fig. 6 Applied stress intensity factor range versus crack length for different  $da/dN$  ( $R=0.05$ )

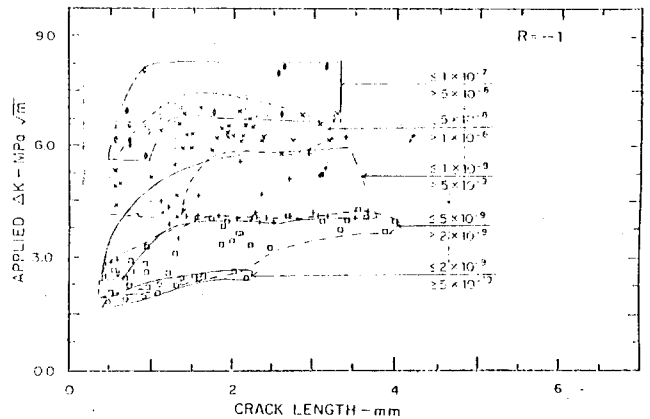


Fig. 7 Applied stress intensity factor range versus crack length for different  $da/dN$  ( $R=-11$ )

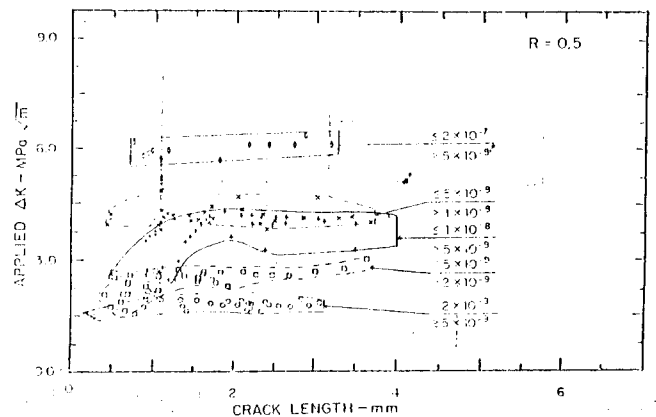


Fig. 8 Applied stress intensity factor range versus crack length for different  $da/dN$  ( $R=0.5$ )

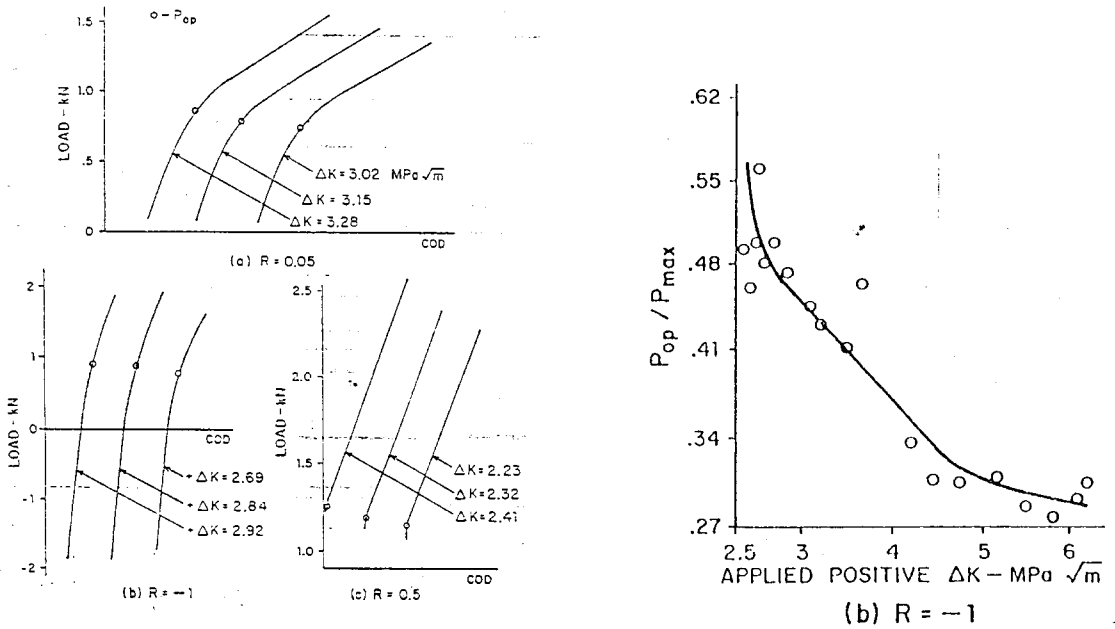


Fig. 9 Load versus COD for crack opening load determination

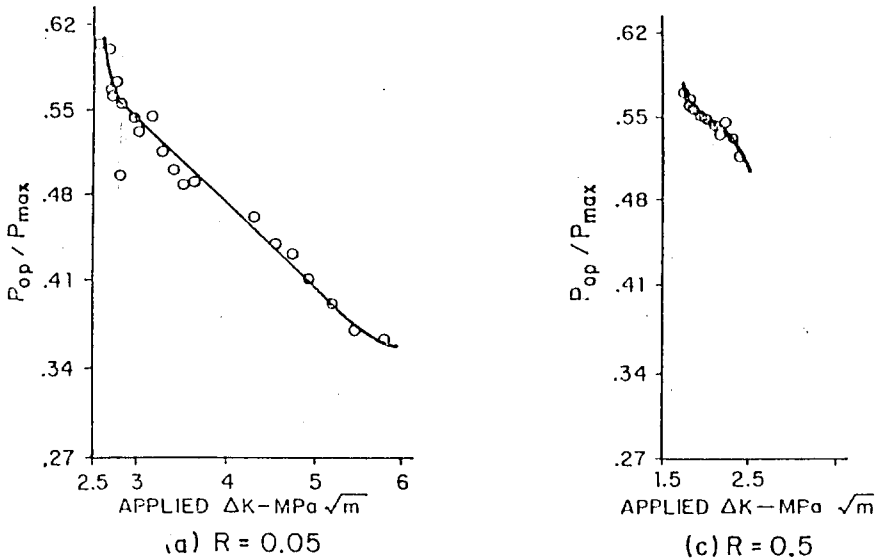


Fig. 10.  $P_{op}/P_{max}$  versus applied stress intensity factory range for long cracks



의 반지름은 0.1mm였다. 따라서 본 연구에서 LEFM의 적용은 타당한 것으로 판단된다.

Table 1은 미소균열과 긴 균열의 전파거동을 비교하기 위하여 Fig. 2, 3, 4 및 10으로부터 얻은 값을 나타낸 것이다. Table 1에서  $K_{crit}$ 는 유효응력강도계수폭을 나타낸 것으로  $K_{max}-K_{op}$ 을 의미한다. Table 1과 Fig. 2, 3, 4로부터 피로균열의 전파는 미소균열에서 보다 빠르게 일어난다는 사실을 알 수 있다. 그러나 높은  $\Delta K$ 의 범위에서 미소균열의 전파거동은 긴 균열의 전파거동에 수렴하는 것을 볼 수 있다. Threshold level은 미소균열에서 긴 균열에서의 값보다 약 30% 정도 작은 값을 보여주고 균열길이가 1-2mm인 중간균열의 경우에도 긴 균열의 전파속도보다 빠른 것을 알 수 있다.

본 연구에서 미소균열과 긴 균열의 전파거동의 차이는 주로 균열 닫힘 현상에 의한 것임을 알 수 있다. Fig. 10에서 볼 수 있는 것과 같이  $P_{op}/P_{max}$ 의 값은 3개의 하중이하에서 모두 낮은  $\Delta K$ 의 값에서 급격히 증가하여 비교적 높은  $\Delta K$ 의 값에서도 무시할 수 없을 정도의  $P_{op}/P_{max}$  값이 존재한다. 그러나 미소균열의 경우는 균열길이의 제한으로 균열 닫힘효과가 아주 작으므로  $\Delta K$ 를  $\Delta K_{eff}$ 로 생각할 수 있으며 Table 1의 마지막 열에서 볼 수 있는 것과 같이  $R=0.05$ 에서 미소균열의  $\Delta K$ 와 긴 균열의  $\Delta K_{eff}$ 의 비는  $da/dN$ 이  $2 \times 10^{-9} m/cycle$ 보다 큰 범위에서  $R=0.05$  및  $R=-1$ 에서 1의 값을 갖고 낮은  $da/dN$ 의 값으로 갈수록 그 값은 증가한다. 따라서 높은 균열성장속도에서 긴 균열의  $K_{crit}$ 는 미소균열에서의  $\Delta K$ 와 같은 의미의 driving force로 생각할 수 있다. 그러나  $R=0.5$ 에서는 긴 균열과 미소균열의 전파거동은 근본적으로 같은 것으로 생각할 수 있다. Threshold 근처에서의 미소균열의  $\Delta K$ 와 긴 균열의  $K_{crit}$ 의 비는  $R=0.05$ 에서 1.68,  $R=0.5$ 에서 1.65의 값을 갖는데 이는 Threshold 근처에서 미소균열의 경우에도 약간의 균열닫힘효과가 있는 것으로 판단되나 일반적인 COD 방법에 의하여는 그 측정이 불가능했다.

평균응력의 영향은 Fig. 5로부터 볼 수 있다.  $R=0.05$ 와  $R=-1$ 에서 그 차이는 작으나 Threshold 근처에서는 현저한 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 그러나  $K_{crit}$ 에 의하면 그 차이는 무시할 만큼 작아진다. 그러

나 미소균열의 경우에는 평균응력에 의한 차이는 긴 균열보다는 작아지는 것을 볼 수 있으며 이로부터 균열닫힘은 평균응력에 의하여 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있는 것과 같이 시그모이달 곡선의 영역 II에서 또 하나의 변곡점이 존재한다. 그 원인은 알루미늄 합금의 경우에는 입자의 크기를 제외한 다른 금속 조직학적 미시치수(예를들면 dispersoid spacing, sub-grainsize) 때문인 것으로 알려져 있다.

Fig. 6, 7, 8은 서로 다른 균열전파속도에서의  $\Delta K$ 와 균열길이와의 관계를 나타낸 것으로 주어진 균열전파속도에 대하여 일정한  $\Delta K$ 의 값을 갖는 균열길이를 개략적으로 보여주는 것이다. 이로부터 긴균열과 미소균열과의 성장거동은 하중비에 따라 1~2mm의 균열 길이에서 수렴하는 것을 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서 미소균열의 임계길이는 2mm 내외로 볼 수 있으며 이는 강철계통의 다른 연구결과<sup>(3)</sup>와도 일치한다.

파단면의 조사에서는 striation은 찾아보기 힘들었으며 cleavage형의 river line pattern이 관찰되었고 2차 균열의 존재도 발견할 수 있었지만 미소균열과 긴균열, 하중비 등에 따른 형태학적 차이는 찾아볼 수 없었다.

## 5. 결 론

7075-T6 알루미늄 합금에서의 미소균열과 균열닫힘의 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 7075-T6 알루미늄 합금의 경우 0.2mm까지의 균열에 대하여는 본 연구에서 LEFM의 적용이 가능하였다.

2. 하중비  $R=0.05$  및  $R=-1$ 에서 미소균열의 전파거동은 균열길이 1-2mm에서 긴 균열의 전파거동에 수렴하며 이때 균열 전파속도는  $10^{-7} m/cycle$  이상에서 나타났고, 하중비  $R=0.5$ 에서 뚜렷한 미소균열의 임계길이가 정의되어지지 않았다.

3. 긴 균열의 Threshold조건( $da/dN=10^{-10} m/cycle$ )에서도 미소균열의 전파는 상당한 속도로 진전되었다. 따라서 미소균열(0.5-1mm)은 긴 균열(2mm 이상)보다 같은  $\Delta K$ 하에서 빠른 속도로 전달되며 그 차이는 영역 I에서 균열전달속도가 작을수록 커진다.

4. 미소균열의 경우 균열닫힘은 현저히 감소하고 긴 균열의 경우  $\Delta K$ 가 감소할수록 즉  $\Delta\sigma$ 가 감소할수록 균열닫힘은 증가하며 긴 균열과 미소균열 사이의 균열 전파거동의 차이는 균열닫힘이 주원인으로 나타났다. <sup>u</sup>
5. 평균응력의 영향은 미소균열에서 보다는 긴 균열에서 현저하게 나타난다.

## Reference

1. Ritchie, R. O. and Suresh, s., "Mechanics and Physics of the Growth of Small Cracks" AGARD Proceedings No. 328, P. 1, 1982.
2. Leis, B. and Forte, T., "Fatigue Growth of Initially Physically Short Cracks in Notched Aluminum and Steel Plates", in Fracture Mechanics, Edited by Roberts, R., ASTM STP 743 pp. 100-124, 1981.
3. Lee, H. W., "Correlation between Short and Long Fatigue Crack Growth Behavior in SAE 0030 Cast Steel and AISI1020 Hot-Rolled Steel" ph.D Dissertation, The Univ. of Iowa, 1985.
4. Pearson, S. "Initiation of Fatigue Cracks in Commercial Aluminium Alloys and Subsequent Propagation at Very Short Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 235-247, 1975.
5. El Haddad, M. H., Smith, K. N., and Topper, T. H., "Fatigue Crack Propagation of Short Cracks", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 101, pp. 42-46, 1979.
6. El Haddad, M. H., Dowling, N. E., and Topper, T. H. "J-Integral Application for Short Fatigue Cracks at Notches", International Journal of Fracture, Vol. 16, pp. 15-19, 1980.
7. Allee, R. J. and Sinclair, J. C. "The Behavior of Short Cracks" Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 5, pp. 343-348, 1982.
8. Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", In Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp. 230-242.
9. Ritchie, R. O. and Suresh, S., "Some Considerations on Fatigue Crack Closure at Near-Threshold Stress Intensities Due to Fracture Surface Morphology", Metallurgical Transactions, Vol. 13A, pp. 937-940, 1982.
10. James, M. R., Morris, W. L., and Zurek, A. K., "On the Transition From Near-Threshold to Intermediate Growth Rates in Fatigue", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 6, pp. 293-305, 1983.
11. Elber, W. "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp. 37-45, 1976.
12. Bucci, R. J., "Development of a Proposed ASTM Standard Method for Near-Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurement", in Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, Edited by Hudak Jr., S. J. and Bucci, R. J., ASTMSTP 738, pp. 5-28, 1981.
13. Morris, W. L. and James, M. R., "Statistical Aspects of Fatigue Failure Due to Alloy Microstructure". in Fatigue Mechanisms: Advances in Quantitative Measurement of Physical Damage. Edited by Lankford, J., Davidson, D. L., Morris, W. L., and Wei, R. P., ASTM STP 811, pp. 179-206, 1983.
14. Tada, H. "The Stress Analysis of Cracks Hand Books", pp. 2.25-2.29, 1973.
15. Yoder, G. R., Cooley, L. A. and Crooker, T. M., (1984), "On the Role of Microstructure in the Growth of Fatigue cracks", in Fatigue 84, Edited by C. J. Beevers, Engineering Materials Adisings, Ltd Uk, Vol. 1, pp. 351-360.