

## 짧은균열의 정류거동 예측에 관한 연구

### A Study on the Prediction of Non-Propagating Behavior of Short Cracks

한 지원\*  
Ji-Won Han

#### ABSTRACT

Computer aided unloading elastic compliance method was employed to measure the closure and the length of short cracks. The most significant factor that influences the fatigue growth behavior of short cracks is the crack closure phenomenon.  $dc/dN-\Delta K_{eff}$  relationships of short cracks are found to coincide well with the corresponding long crack relationships. Non-propagating behavior of short cracks at notch root can be predicted from the crack opening SIF of short cracks,  $K_{op}$ , and the growth equation of long cracks in Region I and II.

#### 1. 서 론

짧은균열의 피로성장거동은 i) 균열성장속도가 서서히 감소후 증가하는 성장거동과 ii) 계속적으로 감소하는 정류거동(Non-Propagating Behavior)을 들 수 있겠다<sup>1)~4)</sup>. i)의 경우에 대한 성장속도는 전 연구<sup>5)~6)</sup>에서 발표한 것처럼 균열단합현상을 고려한  $\Delta K_{eff}(=K_{max}-K_{op})$ 가 알맞은 균열구동력(Crack Driving Force)이며, Region II에서 긴균열의 성장법칙으로 예측 가능함을 보였다. 이와 마찬가지로 정류거동에 대한 예측도 역시 긴균열의 성장법칙과 균열단합현상을 고려한다면 가능하겠지만, 정류거동은 긴균열의 하한계 응력확대계

수폭 근방의 저성장속도영역에서 나타나므로 성장거동의 예측에 이용한 Region II만을 고려한 긴균열의 성장법칙으로는 불가능하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 전 논문<sup>6)</sup>에서 이용한 균열단합점 응력확대계수  $K_{op}$  예측식과 긴균열의 성장거동에서 Region I과 Region II를 고려한 성장법칙으로 짧은균열길이에 따른 정류거동을 예측하고, 실험결과와 예측결과를 비교·검토하고자 한다.

#### 2. 정류거동의 예측

짧은균열의 정류거동을 알아보기 위하여 전 논문<sup>6)</sup>의 실험에서 채택한 부하하중 보다 낮은하중에서 일정하중폭 제어방식으로 피로실험을 하였으며,

\* 호서대학교 산업안전공학과

시험편의 재료, 형상 및 실험방법등도 동일하다. Fig. 1은 각 하중비에 대하여 짧은균열의 정류거동과 Region I에서의 긴균열 거동을 비교하였다. 그림에서 균열의 성장이 일어나지 않는다는 긴균열의 하한계 응력확대계수폭  $\Delta K_{th}$  이하에서도 짧은균열은 성장을 나타내며,  $dc/dN$ 과  $\Delta K$ 와의 관계에서는 하중비의 영향이 현저하게 나타나고 있다.

짧은균열의 성장거동은 전 논문<sup>6)</sup>에서 균열단합현상을 고려한  $\Delta K_{eff}$ 로써 긴균열의 성장법칙으로 예측 가능함을 보였다. 그러나 정류거동의 경우는 Region II뿐만 아니라 Region I까지 고려하여야 하므로 성장거동 예측모델로는 곤란하다고 하겠다. 따라서 정류거동의 해석적인 모델은 Modified Static Fracture Model을 근거로 하여 Zheng등<sup>7)</sup>에 의하여 제안된 식 (1)을 수정하여 이용하였다.

$$da/dN = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기에서,

$$B : \frac{15.9}{E^2}, \text{ Material Constant}$$

E : Young's Modulus

$\Delta K_{th}$  : Threshold Stress Intensity Factor Range of Long Crack

윗 식은 균열성장 하한계 근방(Region I)에서의 균열성장거동과 안정성장영역(Region II)에서의 균열성장거동을 일의적으로 설명할 수 있어서<sup>8)</sup>, 피로균열정류거동의 해석적인 검토에 적합한 균열성장식이라고 할 수 있다.

식 (2)에서 균열단합현상을 고려하면 짧은균열의 성장속도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dc/dN = B(\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,th})^2 \dots\dots\dots (2)$$

여기에서,

$\Delta K_{eff} : K_{max} - K_{op}$

$\Delta K_{eff,th} : \text{Effective Threshold Stress Intensity Factor Range of Long Crack}$

$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 에서  $K_{op}$ 는 실험적 예측식으로 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>5)</sup>.

하중비  $R = -1, -0.5$ 인 경우

$$K_{op} = K_{op,L} \{1 - e^{-2.5(c-0.2)}\} \dots\dots\dots (3)$$

하중비  $R = 0$ 인 경우

$$K_{op} = K_{op,L} \{1 - e^{-2.5c}\} \dots\dots\dots (4)$$

식 (3), 식 (4)를 식 (2)의  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 에 대입하면 짧은균열의 정류거동 해석모델은 다음과 같이 표시할 수 있다.

하중비  $R = -1, -0.5$ 인 경우

$$dc/dN = B[K_{max} - K_{op,L} \{1 - e^{-2.5(c-0.2)}\} - \Delta K_{eff,th}]^2 \dots\dots\dots (5)$$

하중비  $R = 0$ 인 경우

$$dc/dN = B[K_{max} - K_{op,L} \{1 - e^{-2.5c}\} - \Delta K_{eff,th}]^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기에서, Al-Alloy 5052-H38에 대한 B는  $3.4 \times 10^{-7}$ 이며,  $\Delta K_{eff,th}$ 는  $3.7 \text{ kg/mm}^{3/2}$ , c의 단위는 mm이다.

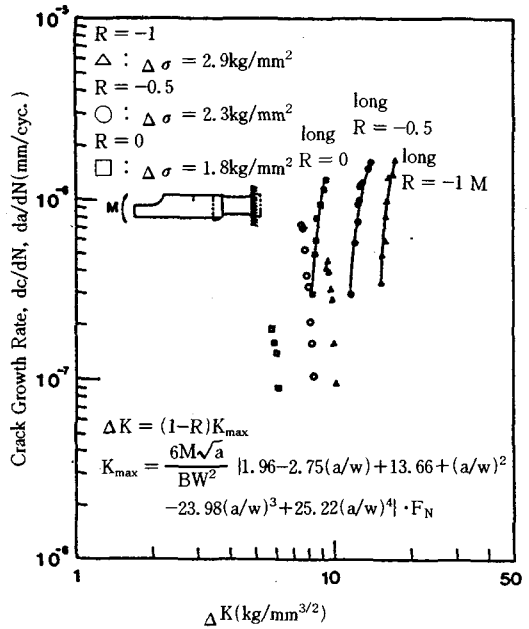


Fig. 1 Crack growth rate vs, stress intensity factor range ( $R = -1, 0.5, 0$ )

### 3. 정류거동의 예측결과 및 검토

정류거동은 균열성장속도가 서서히 감소하여 종국에는  $dc/dN \rightarrow 10^{-7} \text{ mm/cyc}$ 이 되는 거동으로 정의하였다. Fig.2~Fig.4는 균열길이에 따른 균열성장속도를 식 (5)와 (6)에 의한 예측결과와 실험결과를 도시한 그림이다. 각 그림에서 균열발생초기에는 예측결과와 실험결과의 차이가 다소 크게 나타나나 균열이 성장함에 따라 예측결과는 실험결과에 근접함을 보인다. 이와같은 결과는 낮은 응력

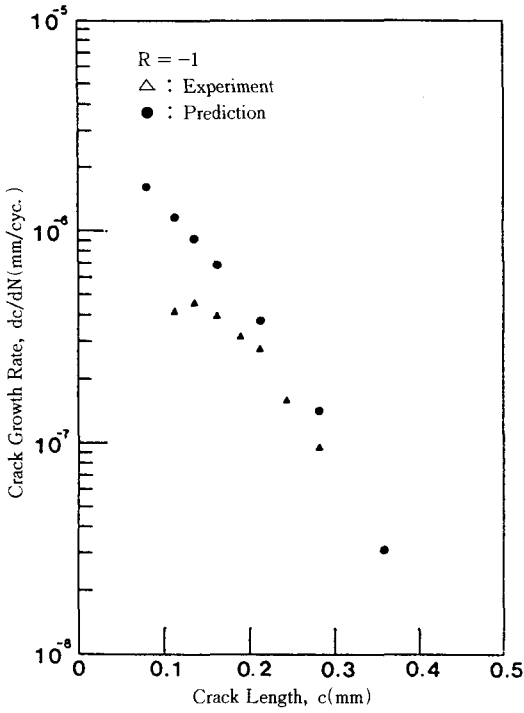


Fig. 2 Comparison of predicted and experimental non-propagating crack behaviour( $R = -1$ )

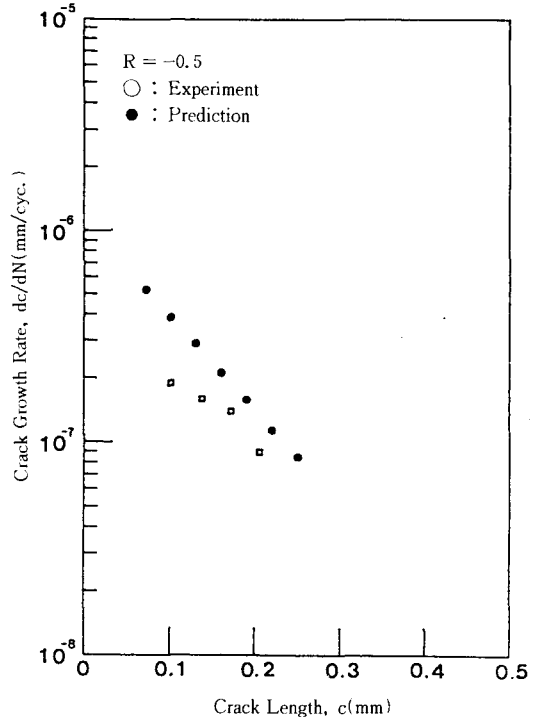


Fig. 4 Comparison of predicted and experimental non-propagating crack behaviour( $R = 0$ )

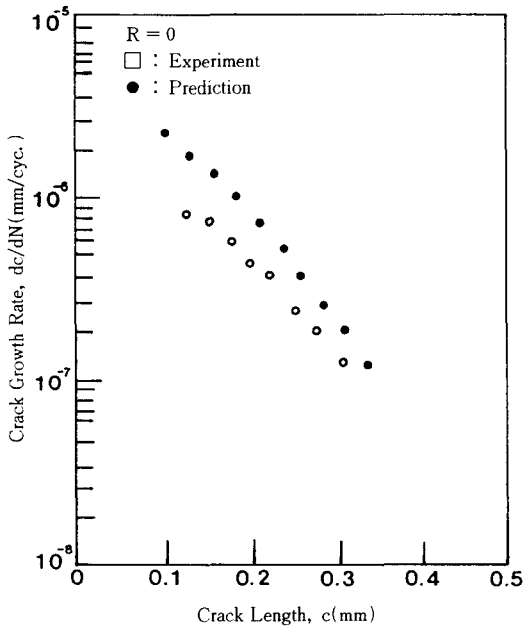


Fig. 3 Comparison of predicted and experimental non-propagating crack behaviour( $R = -0.5$ )

폭(Stress Range)에 의한 정류 거동에서 균열단형 거동추정의 어려움을 배제하고 쉽게 정류거동 및 정류균열길이에 예측할 수 있겠다.

#### 4. 결 론

짧은균열의 정류거동에 대한 해석모델에 의한 예측 가능성에 대하여 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 정류거동은 Region I, II를 고려한 긴균열의 성장법칙으로 예측가능하다고 하겠다.
- 2) 균열성장속도가 낮아질수록 예측결과와 실험결과의 차이가 근소해지므로 정류거동예측식으로 부터 정류균열길이를 예측할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) R. Bu and R. I. Stephens, Comparison of Short and Long Fatigue Crack Growth in 7075-T6 Aluminum, Fatigue and Fracture of Engineering

- Materials and Structures, Vol. 9, No. 1, pp. 35~48, 1986.
- 2) S. Kumai, J. E. King and J. F. Knott, Short and Long Fatigue Crack Growth in a Sic Reinforced Aluminum Alloy, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 13, No. 5, pp. 511~524, 1990.
  - 3) R. Bu and R. I. Stephens, Comparison of Short and Long Fatigue Crack Growth in 7075-T5 Aluminum, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 9, No. 1, pp. 35~48, 1986.
  - 4) R. K. Bolingbroke and J. E. King, A Comparison of Long and Short Fatigue Crack Growth in a High Strength Aluminum Alloy, The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1 (Edited by K. J. Miller and E. R. delos Rios) Mechanical Engineering Publication, London, pp. 101~114, 1986.
  - 5) 최용식, 홍성호, 우홍식, 한지원, 짧은균열의 피로성장거동예측, 한국산업안전학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 54~58, 1993.
  - 6) 최용식, 우홍식, 한지원, 짧은균열의 피로성장 거동예측, 한국산업안전학회지, Vol. 8, No. 4, pp. 47~53, 1993.
  - 7) X. Zheng and M. A. Hirt, Fatigue Crack Propagation in Steels, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 965~973, 1983.
  - 8) Z. Xiulin, A Simple Formula for Fatigue Crack Propagation and a New Method for the Determination of  $K_{th}$ , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 27, No. 4, pp. 465~475, 1987.
-