

짧은 균열의 피로성장거동에측

Prediction of Fatigue Growth Behavior of Short Cracks

최 용 식* · 우 흥 식** · 한 지 원***

Y. S. Choy · H. S. Yoo · J. W. Han

ABSTRACT

The growth of short cracks can be well described in terms of the effective stress intensity factor range, which is calculated on the base of crack closure. The relation between the crack opening SIF and crack length is determined from the experimental results. The crack opening SIF of short cracks, K_{op} , can be predicted from the crack opening SIF at threshold of long crack, $K_{op,L}$. The growth rate 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 II.

1. 서 론

저자등이 이미 발표한 논문에서¹⁾, 노치뿌리에서 발생하는 짧은 균열의 피로성장거동은 응력확대계수폭의 증가에도 불구하고 균열성장속도는 서서히 감소한 후 다시 증가하는 경향이 나타남을 보였다. 이러한 짧은 균열의 특이한 거동도 균열단합현상을 고려한다면, 긴균열의 성장법칙을 이용하여 예측가능함을 보였다. 그러나 짧은 균열의 균열단합점 측정은 기존의 긴균열의 측정방법(크립 게이지의 사용)으로는 거의 불가능하기 때문에 어려움이 뒤따

른다²⁾. 그러므로 짧은 균열의 균열단합(열림)점을 예측할 수 있다면, 실험의 어려움을 피하고, 쉽게 짧은 균열의 피로성장속도를 예측할 수 있다고 하겠다.

이에 본 연구에서는 측정이 쉽고, 이미 많은 Data의 축적이 이루어진 긴균열의 균열단합현상을 이용하여 짧은 균열의 균열열림점 응력확대계수 K_{op} 예측에 관한 실험식을 도출하고, 이 실험식을 이용한 짧은 균열의 성장속도 예측결과와 실험결과를 비교·검토하고자 한다.

2. 실 험

* 성균관대학교 기계공학과

** 동국대학교 산업안전공학과

*** 호서대학교 산업안전공학과

2.1 시험편

시험편 재료로는 Al-Alloy 5052-H38을 사용하였으며 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Chemical Compositions(Wt. %)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.02	0.11	0.32	0.15	2.40	0.02	0.32	0.017	Bal

Table 2 Mechanical Properties

Yield Strength(kg/mm ²)	20.70
Tensile Strength(kg/mm ²)	33.16
Young's Modulus(kg/mm ²)	6.85 × 10 ³

짧은 균열용 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 SEN(Single Edge Notch)을 가진 면내굽힘의팔보(In-Plane Bending Cantilever Beam)형이며, 노치는 지름 0.2mm인 철선으로 깊이 1mm로 전 두께로 걸쳐 방전가공하였다. 또한 긴균열용은 짧은 균열용과 비슷하나 Fig. 2와 같이 노치는 기계가공

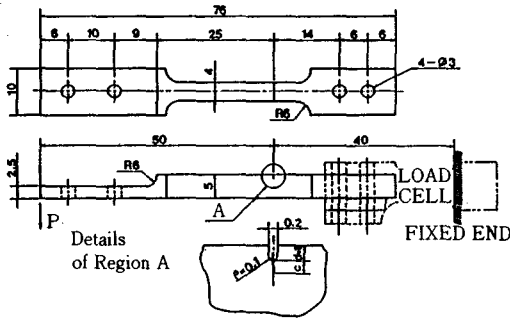


Fig. 1 Dimensions of the Specimen for Short Crack

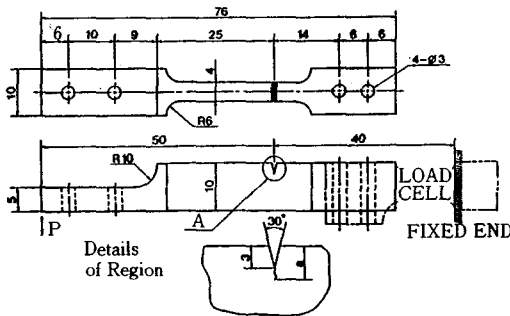


Fig. 2 Dimensions of the Specimen for Long Crack

하였다.

2.2 실험장치

시험기는 음향스피커를 이용하여 자체 제작한 10Kgf용량의 소형피로시험기를 사용하였다³⁾. 실험 및 측정시스템의 구성도는 Fig. 3과 같다. 하중은 보(Beam)형식의 로드 셀로 측정하고, 변위는 시험편의 배면에 부착한 스트레인 게이지(Back Face Strain Gauge)로 측정하였다. 이렇게 측정한 하중 신호와 자체 조립한 감산회로 장치를 거친 변위 신호 즉, 감산변위(Reduced Displacement)신호를 컴퓨터에 저장하였다.

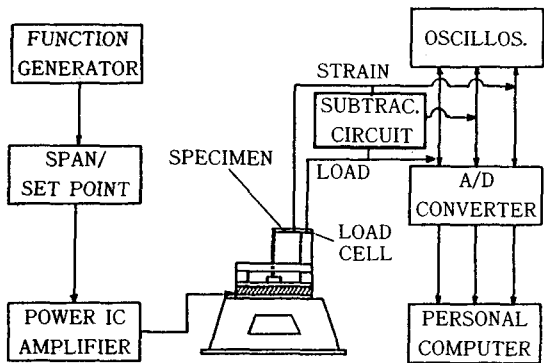


Fig. 3 Schematic Diagram of Fatigue Testing System

2.3 실험방법

실험은 일정하중폭 제어방식으로 하중비 $R (= P_{min}/P_{max})$ 을 -1, -0.5, 0으로 변화시켰으며, 주파수 25Hz의 Sine파형으로 실온에서 실시하였다.

균열길이와 균열단합점측정은 실험 도중에 연속적으로 측정할 수 있는 제하 탄성 컴플라이언스법(4)으로 측정하였다.

3. 균열단합점 응력확대계수 K_{op} 의 예측

짧은 균열의 균열열림점 응력확대계수 K_{op} 를 예측하기 위한 긴균열에 대한 피로성장거동과 하한계 응력확대계수폭(Threshold Stress Intensity Factor Range) ΔK_{th} 는 시험기의 제한된 용량으로 인한 작은 시험편의 사용때문에 2개의 시험편을 사용하여 ΔP 일정시험법과 ASTM E24.04⁴⁾에 준한 Δ

K감소시험법에 의하여 실험을 수행하여 구하였다. 긴균열에 대한 da/dN-ΔK관계는 Fig. 4와 같다. 그림에서 각 하중비 R에 대한 ΔK_{th}는 다음과 같이 얻어졌다.

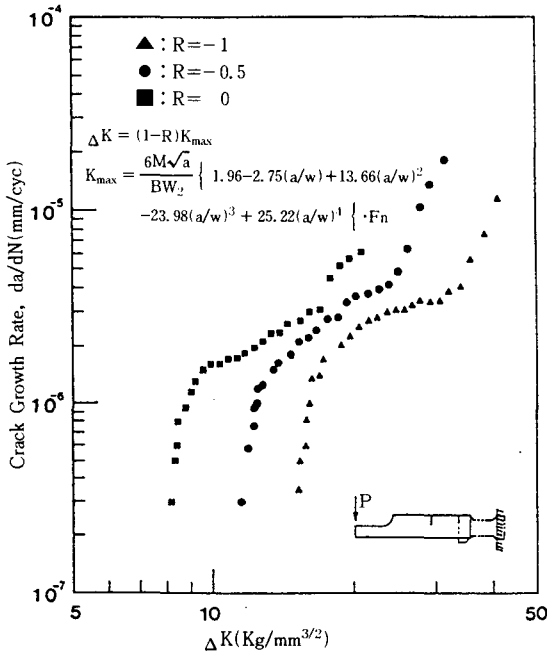


Fig. 4 Crack Growth Rate vs. Stress Intensity Factor Range

Table 3 Threshold Stress Intensity Factor Range for Various Load Ratios

R	-1	-0.5	0
ΔK _{th} (Kg/mm ^{3/2})	15.0	11.5	8.0

또한 균열단합현상을 고려한 긴균열의 da/dN-ΔK_{eff}관계는 Fig. 5에 나타냈다. ΔK_{eff}를 파라메타로 하면, 긴균열의 성장속도는 Region II에서 하중비에 관계없이 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$da/dN = 1.8 \times 10^{-7} (\Delta K_{eff})^{1.75} \dots\dots\dots (1)$$

각 하중비 R에 대하여 하한계 부근에서 긴균열의 균열단합(열립)점 K_{op L}은 다음과 같다.

$$K_{op L} = \frac{\Delta K_{th}}{1-R} - \Delta K_{eff,th} \dots\dots\dots (2)$$

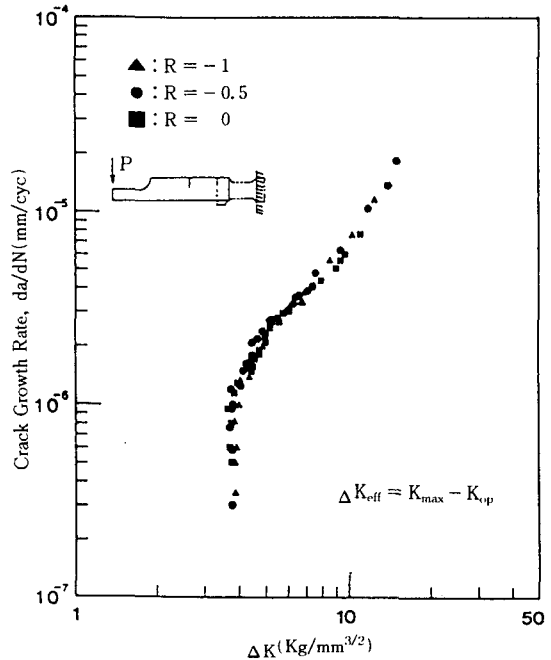


Fig. 5 Crack Growth Rate vs. Effective Stress Intensity Factor Range

Table 4 Crack Opening SIF at Threshold of Long Crack

R	-1	-0.5	0
ΔK _{th} (Kg/mm ^{3/2})	3.8	4	4.3

여기에서 하한계 유효응력확대계수폭(Effective Threshold Stress Intensity Factor Range) ΔK_{eff,th}는 약 3.7Kg/mm^{3/2}이다.

각 하중비에 대하여 짧은 균열길이 c에 따른 K_{op} 변화를 Fig. 6~Fig. 8에 나타냈다. 하중비 R = 0인 경우, 균열발생 직후부터 양의 값을 나타내나, 하중비 R = -1, -0.5의 경우, 균열발생 초기에는 음의 값을 나타냈다.

짧은 균열의 K_{op}에 대한 해석모델은 긴균열의 K_{op L}과 짧은 균열의 균열길이에 따른 K_{op}의 실험적 결과로부터 도출하였다.

$$\left. \begin{aligned} &\text{하중비 } R = -1\text{인 경우} \\ &K_{op} = 3.8 \left\{ 1 - e^{-2.5(c-0.2)} \right\} \dots\dots\dots (3) \\ &\text{하중비 } R = -0.5\text{인 경우} \end{aligned} \right\}$$

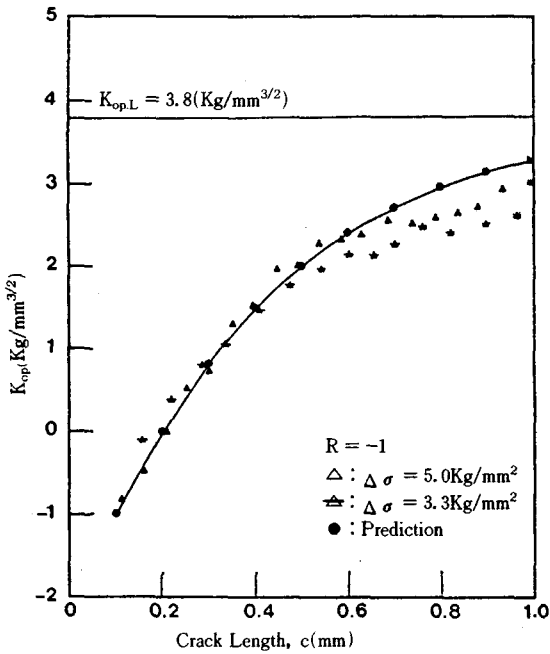


Fig. 6 K_{op} Level as a Function of Crack Length ($R=-1$)

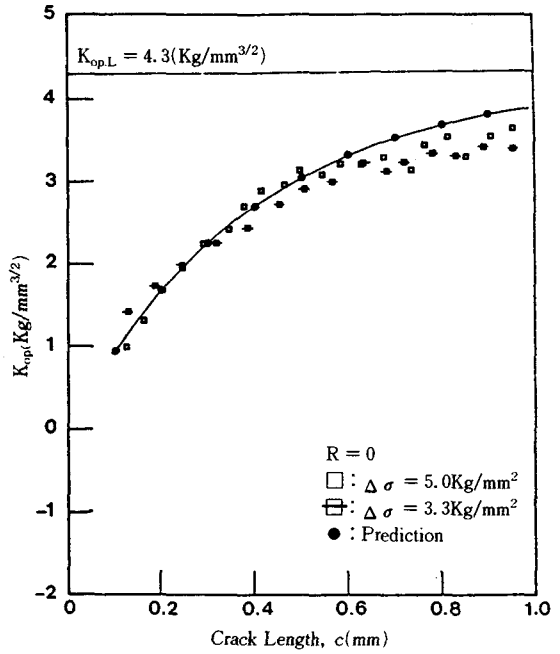


Fig. 8 K_{op} Level as a Function of Crack Length ($R=0$)

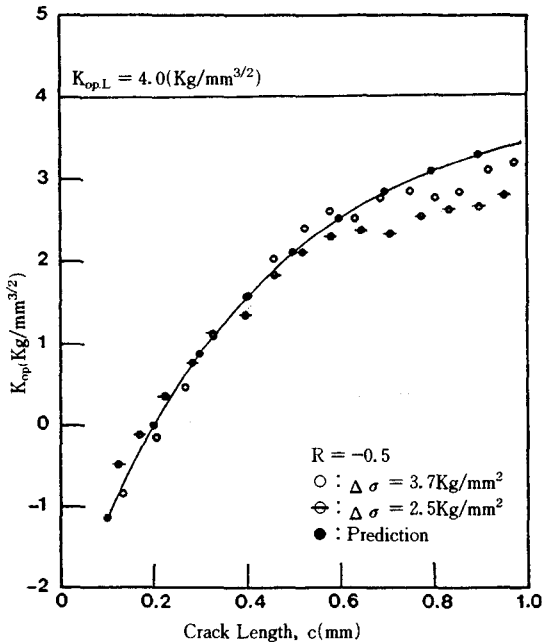


Fig. 7 K_{op} Level as a Function of Crack Length ($R=-0.5$)

$$K_{op} = 4 \{ 1 - e^{-2.5(c-0.2)} \} \dots\dots\dots (4)$$

하중비 $R = 0$ 인 경우

$$K_{op} = 4.3 \{ 1 - e^{-2.5c} \} \dots\dots\dots (5)$$

단, c 의 단위는 mm이다.

위의 식(3)-(5)들은 다음과 같이 표시할 수 있겠다.

하중비 $R = -1, -0.5$ 인 경우

$$K_{op} = K_{op,L} \{ 1 - e^{-\alpha(c-0.2)} \} \dots\dots\dots (6)$$

하중비 $R = 0$ 인 경우

$$K_{op} = K_{op,L} \{ 1 - e^{-\alpha c} \} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 α 는 재료상수로서 2.5이다. 따라서 식(6)과 식(7)에서 긴균열의 $K_{op,L}$ 만을 알 수 있으면, 짧은 균열의 균열길이에 따른 K_{op} 를 예측할 수 있겠다.

4. 균열성장거동 예측결과 및 검토

짧은 균열의 성장속도는 균열담합현상을 고려하면, 긴균열의 성장속도식을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dc/dN = 1.8 \times 10^{-7} (\Delta K_{eff})^{1.75} \dots\dots\dots (8)$$

여기에서 $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 이며, K_{op} 에 식(6)과 식(7)을 대입하면, 짧은 균열의 성장속도 해석 모델은 다음과 같다.

하중비 $R = -1, -0.5$ 인 경우

$$dc/dN = 1.8 = 10^{-7} [K_{max} - K_{op} L \{ 1 - e^{-2.5(c-0.2)} \}]^{1.75} \dots\dots\dots (9)$$

하중비 $R = 0$ 인 경우

$$dc/dN = 1.8 = 10^{-7} [K_{max} - K_{op} L \{ 1 - e^{-2.5c} \}]^{1.75} \dots\dots\dots (10)$$

여기에 각 하중비에서의 K_{op} 값을 대입하면, 균열길이에 따른 짧은 균열의 성장속도를 구할 수 있고, Fig. 9~Fig. 11에 균열성장속도의 예측결과와 실험결과를 도시하였다. $R = -1$ 인 경우, 균열 발생초기에는 균열성장속도의 예측값은 실험결과보다 높게 평가되고 있으나, 균열이 성장함에 따라 예측값이 실험결과보다 다소 낮게 평가되고 있다. $R = 0.5$ 인 경우, $R = -1$ 때와는 달리 예측값이 실험결과보다 시종 높게 평가되고 있다. 한편 $R = 0$ 인 경우에는 $R = -1, -0.5$ 때와는 달리, 예측값이 실험결과보다 낮게 평가되고 있다.

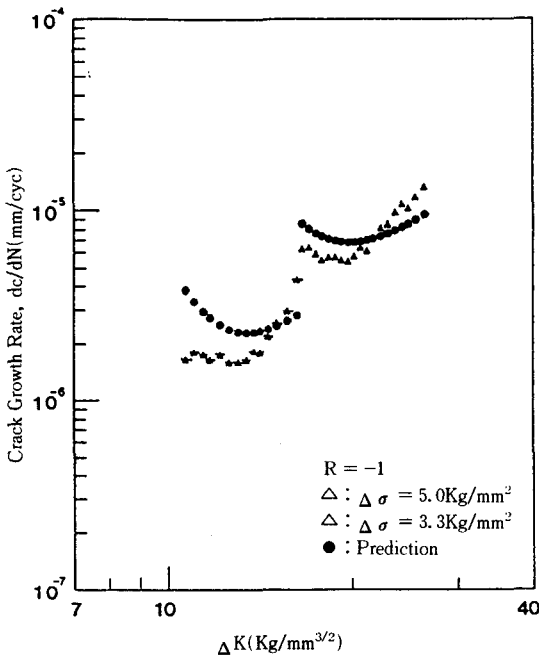


Fig. 9 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth($R=-1$)

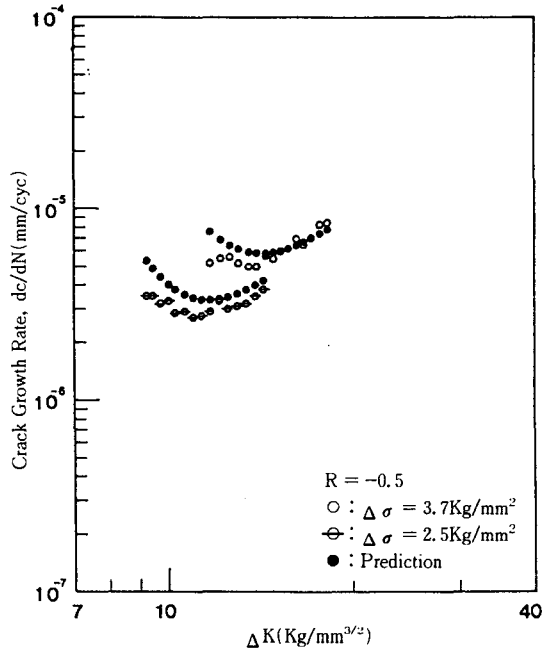


Fig. 10 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth($R=-0.5$)

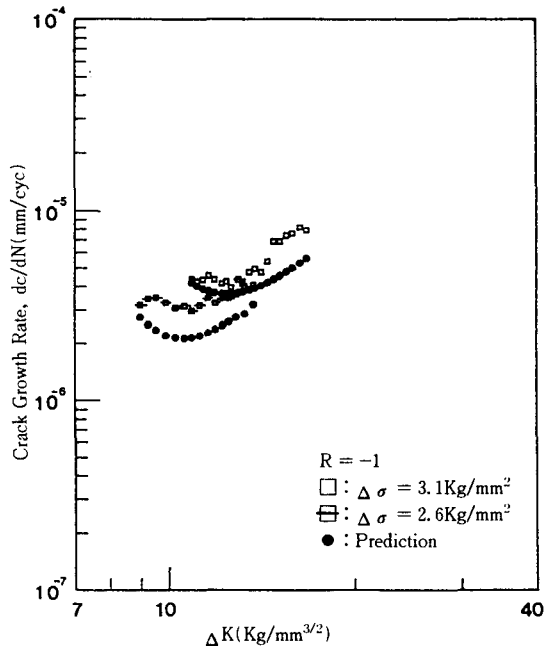


Fig. 11 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth($R=0$)

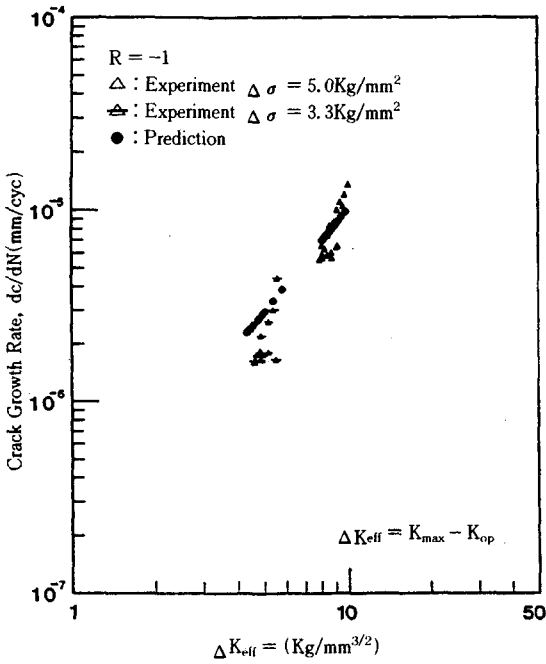


Fig. 12 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth(R=-1)

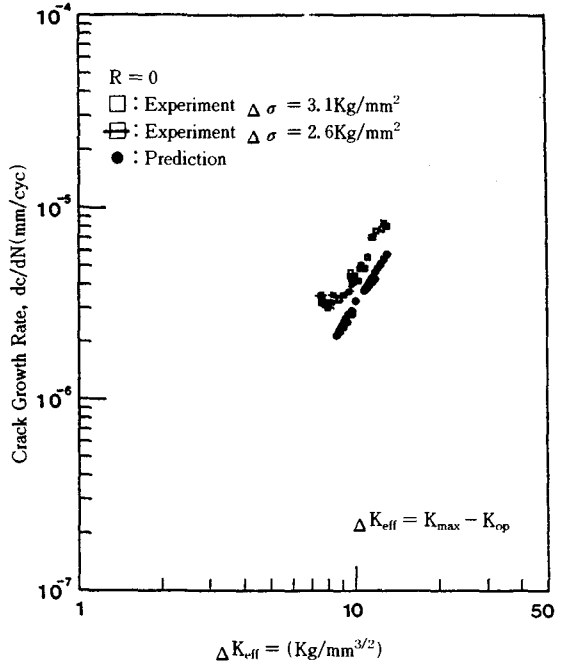


Fig. 14 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth(R=0)

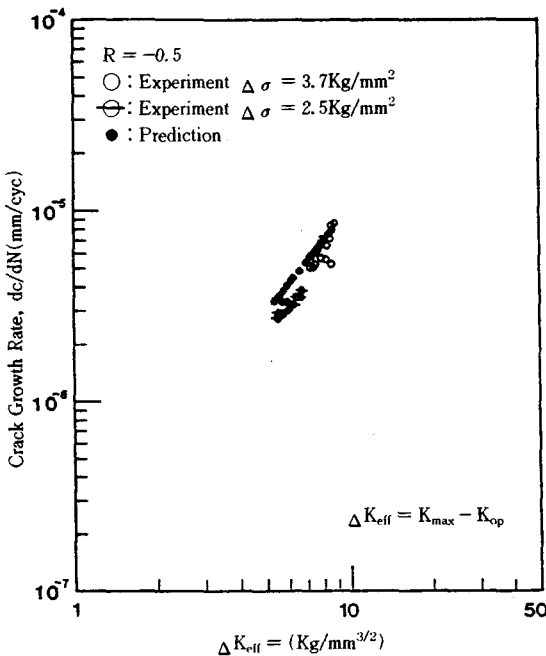


Fig. 13 Comparison of Predicted and Experimental Fatigue Crack Growth(R=-0.5)

Fig. 12~Fig. 14는 식(9)와 식 (10)에서 예측한 균열성장속도 dc/dN 과 K_{op} 의 예측식을 이용한 $\Delta K_{eff}(=K_{max}-K_{op})$ 와의 관계를 도시한 것이다. $R=-1$ 인 경우, 응력폭이 작은 경우에는 균열성장속도의 예측결과가 실험결과보다 크게 평가되고 있으나 응력폭이 큰 경우에는 잘 일치한다. $R=0.5$ 인 경우는 $R=-1$ 의 경우와 비슷한 경향을 나타내나, $R=0$ 인 경우에는 $R=-1$, $R=-0.5$ 일때와는 달리 예측결과는 실험결과보다 낮게 평가되고 있다. 이와 같은 오차의 원인은 실험상의 오차, 균열단점의 불분명한 결정뿐만 아니라 유효응력 확대계수폭을 파라메타로 하더라도 긴균열과 짧은 균열의 성장거동에 약간의 차이 등을 들 수 있다. 하중비 R 에 따라 예측값과 실험결과의 오차가 다소 다르게 나타나나, 전반적으로는 짧은 균열의 성장속도 예측은 실험결과의 오차가 다소 다르게 나타나나, 전반적으로는 짧은 균열의 성장속도 예측은 균열단점 응력확대계수 K_{op} 의 실험식과 긴균열의 성장법칙으로 가능함을 보여 준다고 하겠다.

5. 결 론

노치 뿌리에서 발생하는 짧은 균열의 성장거동예측 가능성에 대하여 요약하면 다음과 같다.

- 1) 짧은 균열의 균열단합(열림)점 응력확대계수 K_{op} 는 하한계 부근에서 긴균열의 균열열림점 응력확대계수 $K_{op L}$ 을 이용하여 예측할 수 있다.
- 2) 긴균열의 성장법칙과 균열열림점 응력확대계수 K_{op} 의 해석모델을 이용한 균열성장속도 예측모델은 노치 뿌리에서 발생하는 짧은 균열의 성장속도를 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 최용식, 홍성호, 우홍식, 한지원, “짧은 균열의 피로성장거동”, 한국산업안전학회지, 제8권, 제1호, pp. 54~58, 1993.
- 2) S. Banerjee, A Review of Crack Closure, AFWAL-TR-84-4031, University of Dayton Research Institute, pp.1~51, 1984.
- 3) J.H. Song, Y.S. Shin and Y.S. Im, Construction of Small-Sized, Electro-Dynamic Type Bending Fatigue Testing Machine, KSME, Vol.13, No.1, pp.199~203, 1989.
- 4) 菊川, 城野, 田中, 高谷, 除荷弾性 ユンブライアンス法による低進展速度領域における疲労き裂進速度とき裂開閉口舉動の測定, 材料, Vol.25, pp.899~903, 1976.
- 5) ASTM E24. 04, Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Ratio, ASTM STP 738, Appendix III, pp.340~356, 1981.