

짧은균열의 피로성장거동 Fatigue Growth Behavior of Short Cracks

최용식^{*} 홍성호^{**} 우흥식^{***} 한지원^{****}
Yong-Sik Choi Sung-Ho Hong Hung-Sik Yoo Ji-Won Han

ABSTRACT

The fatigue growth behavior of short cracks were studied various load ratios. Computer-aided unloading elastic compliance method was employed to measure the closure and the length of short cracks. In the $dc/dN-\Delta K$ relationships, the decreasing behavior of the growth rate of short cracks is due to the decrease of crack opening ratio with increasing crack length. Irrespective of load ratio, the growth rate of short cracks can be well deccribed in terms of the effective stress intensity factor range ΔK_{eff} , which is calculated on the base of crack closure. $dc/dN-\Delta K_{eff}$ relationships of short cracks are found to coincide well with the corresponding long crack relationships. accordingly, the growth rate of short cracks can be predicted using that of long cracks.

1. 서 론

기계·구조물에서 짧은균열의 성장이 차지하는 시간이 전 피로수명의 70-80%를 차지하므로[1,2] 기기의 안전성 확보를 위하여는 짧은균열의 제 성장거동에 대한 연구가 절실히 요망된다고 하겠다. 그러나 지금까지는 긴균열을 대상으로 한 제인자의 영향에 따른 피로성장거동에 관한 연구가 대부분이었다.

이들 연구보고서를 통하여 특히 피로균열은 저균열성장속도 영역에서 하중비의 영향을 크게 받는다

[3]는 사실은 이미 잘 알려져 있다. 그러나 Notch 뿌리에서 발생하는 짧은균열이 저균열성장속도 영역에서 받을 것으로 예상되는 하중비의 영향에 대하여는 연구가 미진한 실정이다[4]. 따라서 본 연구에서는 하중비의 변화에 따른 짧은균열의 피로성장거동과 균열단합거동을 실험적 연구를 통하여 살펴보고, 긴균열의 제특성과 비교·검토해 보고자 한다.

2. 실험

* 성균관대학교 기계공학과
** 한국가스공사 연구개발원

*** 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 x 10 ³ |

짧은균열용 시험편의 형상은 Fig.1과 같이 SEN (Single Edge Notch)을 가진 면내굽힘외팔보 (In-Plane bending Cantilever Beam)형이며, 노치는 지름 0.2mm인 칩선으로 깊이 1mm로 전 두께에 걸쳐 방전가공하였다. 또한 긴균열용은 짧은균열용과 비슷하나 Fig.2와 같이 노치는 기계가공하였다.

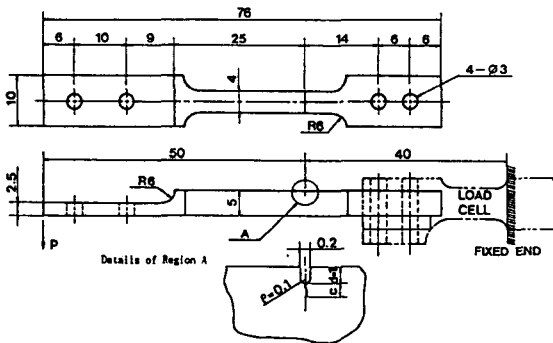


Fig.1 Dimensions of the specimen for short crack

2.2 실험장치

시험기는 음향스피커를 이용하여 자체 제작한 10Kgf용량의 소형피로시험기를 사용하였으며, 실험 및 측정시스템의 구성도는 Fig.3과 같다. 시험기

의 구동은 Function Generator로부터 Sine 파형

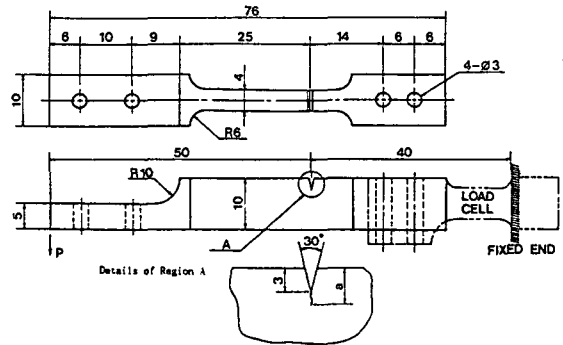


Fig.2 Dimensions of the specimen for long crack

을 Power-IC Amplifier로 증폭시켜 코일에 전달하면, 코일이 진동하는 방식이다. 또한 하중은 보 (Beam)형식의 로드 셀로 측정하고, 변위는 시험편의 배면에 부착한 스트레인 게이지 (Back Face Strain Gauge)로 측정하였다. 이렇게 측정된 하중 신호와 자체 조립한 감산회로 장치를 거친 변위신호 즉, 감산변위 (Reduced Displacement)신호를 컴퓨터에 저장하였다.

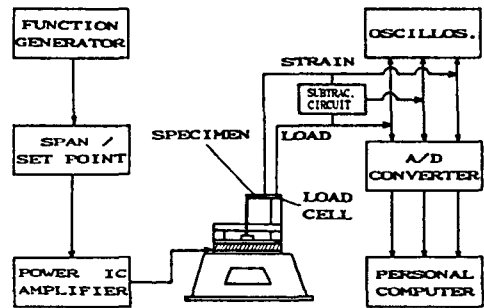


Fig.3 Schematic diagram of fatigue testing system

2.3 실험방법

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

균열길이와 균열단점측정은 실험 도중에 연속적으로 측정할 수 있는 제하 탄성 컴플라이언스법[5]으

로 측정하였다. 하중-감산 변위곡선은 ~ 200등분하여, 각 하중-감산변위를 얻었으며, 피로시험중 데이터의 분산을 고려하여 20 싸이클의 데이터에 대한 평균값으로 Fig.4(예:R=-1, P_{max}=1.4Kg)과 같은 곡선을 얻었다.

균열길이는 하중-감산변위곡선 상에서 직선부분의 기울기 변화량 즉, 컴플라이스의 변화량으로 측정하였으며, 균열닫힘점은 직선에서 곡선으로 변하는 점으로 정의 하였다.

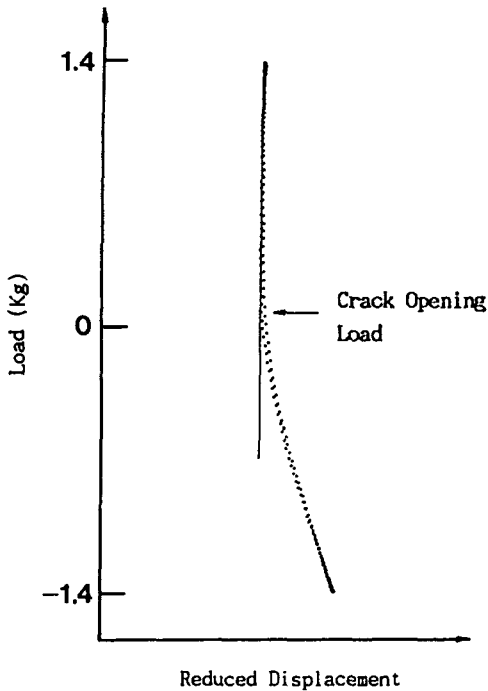


Fig. 4 Location of closure from load vs. reduced displacement curve

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열성장거동

본 연구에서 대상으로 한 균열은 노치 뿌리에서 발생하는 짧은관통균열(0.1mm-1.0mm정도)이므로, 짧은관통균열의 생성여부를 알아보기 위하여 실험중 임의의 균열길이만큼 성장시킨 후 파면상태를 조사해 본 결과, 본 연구에서 대상으로 삼은 균열길이 두께방향으로 균일하게 관통하고 있음을 알 수

있었다.

균열길이 c와 a는 우선 균열길이의 교정곡선(Calibration Curve)으로부터 구하였다.

즉, 균열길이의 성장에 따라 Compliance의 변화량을 감산회로에 부착된 정밀저항기(Helipot: 1000등분)로 환산한 눈금값(기준값 P₀=700일정)과, 이동식 현미경으로 측정된 균열길이와의 관계에서 균열길이를 환산하였다. 짧은균열용과 긴균열용의 시험편의 형상이 다르기 때문에 각각에 대한 교정곡선은 다음과 같은 식들을 얻었다.

$$\text{짧은균열} : [1 - \frac{P}{P_0}] \times 100 = 61(c)^{0.805} \quad (1)$$

$$\text{긴균열} : [1 - \frac{P}{P_0}] \times 100 = 29(a)^{1.056} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에 임의의 주파수일 때의 측정된 P값(균열이 성장함에 따라 P값이 감소됨)을 대입하여 각각의 균열길이 c와 a를 환산하였다.

Fig.5는 각 하중비에 대한 dc/dN, da/dN과 ΔK와의 관계를 나타냈다.

ΔK의 계산에 있어서는 ASTM E647-83E에 의하면, 부하하중이 인장-압축인 경우에는 인장부분만이 작용한다고하여 ΔK=K_{max}(Maximum Stress

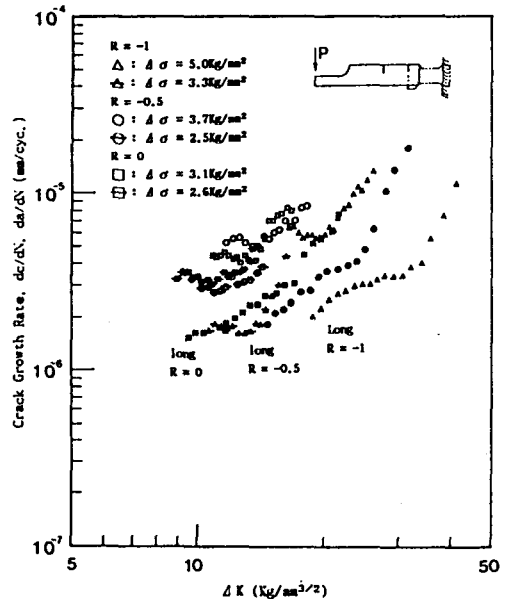


Fig.5 Crack growth rate vs. stress intensity factor ranges(R=-1, -0.5, 0)

Intensity Factor)로 규정하고 있으나, 본 연구에서는 Jono(6), Ogura(7)등의 연구에 따라 $\Delta K = K_{max} - K_{min} = (1-R)K_{max}$ 로 정의 하였다. 각 Fig.에서 dc/dN 은 ΔK 의 증가에도 불구하고 균열발생 초기에는 감소하는 부분이 나타나며, 이는 유사성개념이 성립하지 않는 짧은균열에서만 나타나는 성장거동으로 볼 수 있겠다. 각 하중비에 대하여 -1, -0.5 → 0에 따라 짧은균열의 성장속도가 빨라지나, 긴균열의 성장속도와의 차이는 작아지는 경향을 보인다. 이는 짧은균열의 효과가 하중비가 커지면 현저히 줄어들기 때문이라 생각된다. 또한 긴균열 뿐만 아니라 짧은균열의 경우에도 하중비의 영향은 현저하게 나타난다. 긴균열의 성장속도와 비교하여 보면, 같은 ΔK 에서 짧은균열의 성장속도가 긴균열보다 빠르게 나타난다. 그러므로 이 경우에는 긴균열의 $dc/dN \sim \Delta K$ 관계로부터 기계·구조물의 피로수명을 예측한다는 것에는 문제가 있다고 하겠다.

3.2 균열단합현상

Fig.6은 균열열림비(Crack Opening Ratio) $U(= \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}})$ 와 균열길이 c 의 관계를 나타낸다. 균열이 성장함에 따라 U 는 서서히 감소한 후 일정한 값을 유지 하던가, 다소 증가하는 경향을 보인다. 또한 하중비 $R=-1, -0.5$ 의 경우, 균열발생초기에는 U 값이 각각 0.5, 0.67로 균열열림점 0보다 크게 나타났다. $dc/dN, da/dN$ 과 균열단합현상을 고려한 유효응력확대계수 $\Delta K_{eff}(=U \cdot \Delta K)$ 와의 관계는 Fig.7에 나타났다. 그림에서는 $dc/dN, da/dN$ 과 ΔK 와의 관계에서 나타난 하중비의 영향, 균열성장속도가 감소 후 증가하는 성장거동들은 거의 사라졌다. 또한 짧은균열의 성장거동은 긴균열의 성장거동에 거의 일치함을 보여주고 있다. 이는 균열단합현상을 고려하면, 짧은균열의 성장속도는 긴균열의 성장법칙으로 잘 해석될수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에 사용된 Al-Alloy 5052-H38에 대한 짧은균열과 긴균열의 피로성장거동과 균열단합거동에 관한 실험적 연구결과 다음과 같이 결론을 얻었다.

- (1) 짧은균열의 성장속도 감소현상은 균열길이에

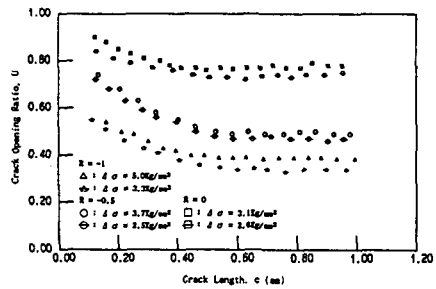


Fig.6 Crack opening ratio vs. crack length

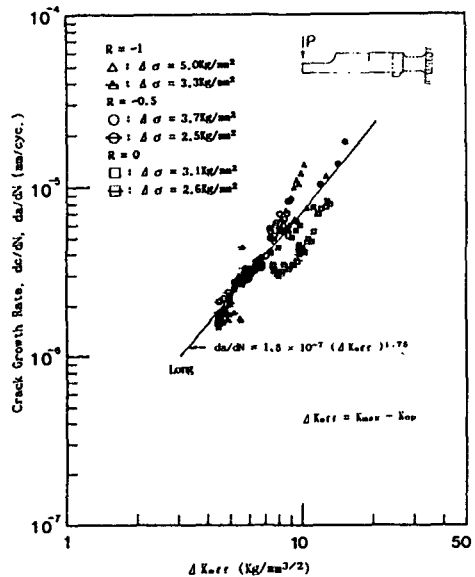


Fig.7 Crack growth rate vs. effective stress intensity factor range($R=-1, -0.5, 0$)

따른 균열열림비의 감소(균열열림점의 상승)에 기인한다고 하겠다.

- (2) 짧은균열의 성장속도는 응력확대계수폭을 파라메타로 하면 하중비의 영향이 현저하게 나타나나, 균열단합현상을 고려한 유효응력확대계수폭으로 정리하면 하중비의 영향들은 거의 나타나지 않고, 잘 정리됨을 알 수 있었다.
- (3) 균열단합현상을 고려한 유효응력확대계수폭으로 정리하면, 긴균열의 성장법칙으로 짧은균열의 성장속도의 예측 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R.O. Ritchie and W. Yu, "Short Crack Effects in Fatigue: A Consequence of Crack Tip Shielding", Small Fatigue Crack (Edited by R. O. Ritchie and J. Lankford), the Metallurgical Society, Inc., pp.27~36, 1986.
- [2] K. Tokaji and T. Ogawa, "The Effects of Stress Ratio on the Growth Behavior of Small Fatigue Cracks", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.13, No.4, pp.411~421, 1990.
- [3] R.A. Venables, M.A. Hicks and J.E. King, "Influence of Stress Ratio on Fatigue Threshold and Structure Sensitive Crack Growth in Ni Base Superalloys", Fatigue Crack Growth Threshold Concept (Edited by D.L. Davidson and S. Suresh), The Metallurgical Society of AIME, pp. 341~357, 1985.
- [4] 西川出, 小西益生, 三好良夫, 小倉敬二, "高負荷應力下における切欠き低小寸法疲労き裂の進展挙動", 材料, 第35號, pp.904~910, 1986.
- [5] 菊川, 城野, 田中, 高谷, "除荷弾性コンプ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展速度とき裂開閉口挙動の測定", 材料, Vol. 25, pp.899~903, 1976.
- [6] M. Jono and J. Song, "Growth and Closure of Short Fatigue Cracks", JSME MRS-1, pp.35~55, 1985.
- [7] K. Ogura, Y. Miyoshi and I. Nishikawa, "Fatigue Crack Growth and Closure of Small Cracks at the Notch Root", Current Research on Fatigue Cracks, JSME MRS1, pp.57~78, 1985.
-