

혼합모드(I+II)하에서 각도와 균열길이 변화를 갖는 피로균열 전파 거동

정의호*, 허방수*, 권윤기**, 오택열***

Behaviour of Fatigue Crack Propagation under Mixed Mode(I+II) with variation of Angle and Crack Length

E.H Jeong*, B.S Hur*, Y.K Kwon**, T.Y Oh***

Abstract

The applications of fracture mechanics have traditionally concentrated on cracks loaded by tensile stresses, and growing under an opening or mode I mechanism. However, many cases of failures occur from growth of cracks subjected to mixed mode loading. Several criteria have been proposed regarding the crack growth direction under mixed mode loadings. This paper is aimed at investigation of fatigue crack growth behaviour under mixed mode(I+II) with variation of angle and pre-crack length in two dimensional branched type precrack. Especially the direction of fatigue crack propagation was predicted and effective stress intensity factor was calculated by finite element analysis(FEA). In this paper, the maximum tangential stress(MTS) criterion was used to predict crack growth direction. Not only experiment but also finite element analysis was carried out and the theoretical predictions were compared with experimental results.

Key Words : Fatigue crack propagation((피로균열 성장), Mixed mode(혼합모드), Crack growth direction(균열성장 방향), Maximum tangential stress criterion(최대 주응력 이론), Branched crack(가지균열), Effective stress intensity factor(유효 응력확대계수)

1. 서 론

전통적인 파괴역학의 연구는 대부분이 모드 I 하중상태에서의 균열성장예 관한 연구에 집중되어 왔다. 하지만 실제의 구조물들은 모드 I 형태의 하중만을 받는 것이 아니고 하중조건이나 부재의 기하학적 형상에 따라 모드 II,

모드 III 형태의 하중이 복합적으로 작용하는 혼합모드 형태의 하중 상태에 놓이게 되는 것이 일반적인 상황이라 할 수 있다. 특히 단축하중을 받고 있는 부재라 할지라도 균열이 전파해 가는 동안에 나타날 수 있는 예기치 못한 상황에 의해 얼마든지 혼합모드 상태에 놓이게 될 수 있는데, 대표적인 예가 균열 선단에서 나타나는 균열의 가지

* 경희대학교 기계공학과 대학원
** 두원공과대학 컴퓨터응용설계학과
*** 경희대학교 기계·산업시스템 공학부

현상(branching)이라 하겠다.

특히 자동차의 차체나 압력용기, 또는 항공기 등에 사용되는 두께가 얇은 판재에서의 피로균열은 전파 과정에서 여러 갈래의 균열가지를 형성하게 되는데 이와 같이 균열 선단에 균열가지가 형성되면 전체적으로 가해지는 하중의 형태가 모드 I의 경우라 할지라도 균열 선단은 모드 I 과 모드 II의 혼합모드 상태에 놓이게 된다. 그러므로 균열의 피로 거동을 고찰하기 위해서는 혼합모드에 대한 평가가 우선적으로 선행되어야 한다. 혼합모드 하에서의 피로균열의 특징은 하중의 작용에 따라 균열의 성장 방향이 변한다는 것인데, 따라서 혼합모드 조건하에서 피로 거동을 고찰하기 위해서는 균열성장 뿐만 아니라, 균열성장 방향도 중요하다고 할 수 있다. 현재까지의 연구를 종합해 볼 때 혼합모드 상태에서 피로거동에 관한 연구는 균열 성장 방향에 대한 연구와 피로균열 성장 거동을 고찰하기 위한 파라메타에 대한 제한 등으로 나눌 수 있다. 그러나 혼합모드 상태의 응력확대계수 산출 등의 어려움 등으로 인해 실제 현장에서 나타나는 다양한 형태의 균열 형상에 대한 고찰은 매우 부족한 실정이다. 본 연구는 실제 두께가 얇은 판재에서 나타나는 균열 형상에 의해 초래되는 혼합모드에 대한 기초 연구로 실험 및 해석적 방법을 통하여 균열의 형상에 따른 혼합모드 효과를 고찰하였다. 따라서 시험편의 재료는 자동차의 차체 제작에 사용되는 얇은 강판을 사용하였으며, 균열 형상은 일반적으로 얇은 판재에서 나타날 수 있는 각도와 균열 길이의 변화를 가지는 가지 균열의 형태로 단순화하였다. 이러한 혼합모드 상태에서 균열 선단에서의 피로거동에 대한 고찰은 피로균열의 성장 방향과 유효 응력확대계수의 변화 등에 초점을 맞추어 수행하였다.

2. 실험 및 유한요소해석

2.1 실험

2.1.1 시험편 제작

본 연구에 사용한 시험편은 자동차 차체 제작에 사용되는 SPEN(KS D 3512) 0.9mm 두께의 냉간압연 강판재이다. 시험편의 화학적 성분과 물성치는 Table 1, 2와 같다.

시험편은 얇은 판재의 가지 균열에 대한 단순화로, 0.9mm의 얇은 평판 위에 각도와 길이의 변화를 갖는 가지모양의 초기균열(pre-crack)을 와이어 커팅(wire cutting, 지름 0.2mm) 방법을 이용하여 제작하였다. α 는 Fig. 1과 같이 45°와 60°를 주었으며, 위 부분의 초기균열(a_1)은

Table 1 Chemical composition of SPEN (Weight percent)

C	Mn	S	P	S
0.016	0.19	0.029	0.019	0.006

Table 2 Mechanical properties of SPEN

Young's modulus(GPa)	200
Yield stress(MPa)	215.7
Tensile Strength(MPa)	339.3
Elongation(%)	39

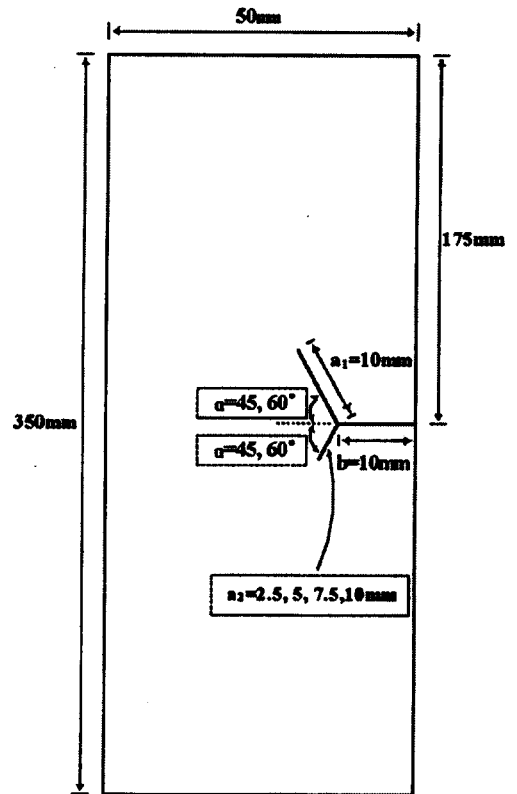


Fig. 1 Dimension of specimens

10mm로 고정하고, 아래 부분의 초기균열(a_2)은 각각 2.5, 5, 7.5, 10mm로 균열의 길이를 변화시켜 가면서 각도와 균열길이의 변화에 따른 피로균열의 전파거동을 관찰하였다.

2.1.2 피로균열 전파 실험

혼합모드 하에서의 피로균열 전파 실험은 상온에서 서보 유압식 피로 시험기(모델 Instron 8501)로 실험하였다. 실험의 조건은 완전 편진 인장하중(응력비 R=0) 형태의 하중(60MPa)을 10Hz로 작용하였다. 피로균열 전파 관측의 정확성과 표면에 존재하는 결함으로 인한 영향 등을 최소화하기 위하여 시험편의 표면을 연마(polishing)하였고, 균열길이의 측정은 광학배율 100x의 이동 현미경과 0.001mm까지 측정 가능한 디지털 마이크로미터를 이용하여 육안 측정하였으며, 전반적인 실험 방법은 ASTM E 647에 의거 수행하였다.

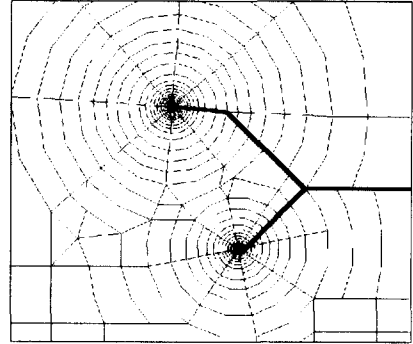


Fig. 2 Finite element model of a specimen

2.2 유한요소 해석(Finite Element Analysis : FEA)

2.2.1 해석

FEA는 범용 프로그램인 EMRC/NISA II와 ENDURE를 사용하였으며, 시험편의 규격과 하중조건 등은 실험과 동일하게 적용하였다.

피로균열의 성장 예측은 유한요소해석으로 균열선단에서의 국부응력과 다른 경계조건을 ENDURE를 이용하여 K_I 및 K_{II} 를 구한 후, MTS 이론을 적용하여 피로균열의 전파 방향을 예측하였다. 예측한 방향으로 균열을 1mm씩 진전하는 것을 반복하여, 각각의 시험편에 대하여 5mm씩 진전시켰다.⁽¹⁻²⁾ Fig. 2는 유한요소해석 모델을 나타낸다. Fig. 3은 유한요소해석의 결과로 α 가 45° , a_2 의 길이가 7.5mm인 시험편에서의 피로균열을 5mm 진전시켰을 때의 균열 선단에서의 응력 분포를 나타낸 것이다.

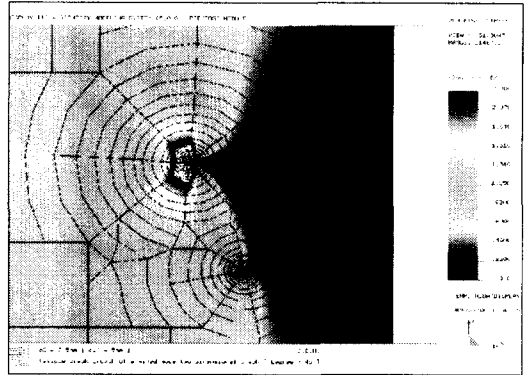


Fig. 3 Fatigue crack extension predicted by FEA($\alpha=45^\circ$, $a_2=7.5mm$)

2.2.2 혼합모드하에서의 균열성장 방향 예측 이론

혼합모드(I+II)에서 피로균열 성장에 대한 연구는 여러 가지 것들이 제안되어 지고 있는데, 그 중 최대 주응력 이론(The maximum tangential stress criterion : MTS criterion)과, 최소 변형에너지 밀도 이론(The minimum strain energy density criterion)이 가장 많이 쓰이고 있다.⁽³⁾ 본 논문에서는 얇은 판재에서 나타나는 가지 균열의 혼합모드 상태를 고찰하기 위하여 장방향의 균열이 가지를 형성하여 주 균열의 선단이 혼합모드 상태에 놓이게 되는 경우에 있어 주 균열의 피로 거동을 고찰하기 위해 응력확대 계수를 이용하여 간편하고도 비교적 정확하게 피로균열 성장 방향을 예측할 수 있는 MTS 이론을 적용하여 피로 균열 성장 방향을 예측하였다.⁽³⁻⁴⁾

MTS 이론은 Erdogan과 Sih에 의해 제안된 이론으로 균

열 성장이 최대 주응력과 직각인 방향으로 일어난다는 것을 나타낸다.⁽⁵⁾ 균열이 혼합모드(I+II) 상태로 부하(load)되어 있으면 모드 I 및 모드 II의 응력을 합성함으로써 균열 선단에서의 응력 σ_θ 및 $\tau_{r,\theta}$ 를 구할 수 있다. 응력 σ_θ 는 $\tau_{r,\theta}=0$ 일 때 주응력이 되므로, 이 때의 각도 $\theta = \theta_m$ 은 $\tau_{r,\theta}$ 를 0으로 놓음으로써 구할 수 있다. 따라서, 식(2)를 이용하여 균열 성장 방향을 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \\ \tau_{r,\theta} &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta \right. \\ &\quad \left. + K_{II} (3 \cos - 1) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left(\tan \frac{\theta_m}{2}\right)_{1,2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 실험 결과의 일례로 α 가 60° , 하부균열 길이 a_2 가 5, 7.5mm일 때의 피로균열 성장을 나타낸 것이다. 초기에는 a_1 과 a_2 의 양쪽 초기균열에서 균열이 발생, 성장하다가 하부균열 a_2 에서는 균열이 정지하고, a_1 부분의 균열만 성장하였다.

실험 결과를 살펴보면, 혼합모드(I+II)에서의 균열성장 방향은 일반적으로 초기 균열에 대하여 어느 정도 경사각을 가지고 일어남을 알 수 있는데, 균열이 성장할수록 균열길이의 초기 증분보다 경사각이 줄어들면서 거의 평행하게 진전함을 볼 수 있다. 이는 시간이 경과함에 따라 모드 II 영향의 감소로 균열의 성장이 주로 모드 I에 의해 지배됨을 보여주는 것이다. 또한 a_2 의 길이가 증가할수록 초기균열 a_1 과 진전하는 피로균열 사이의 각도 β 가 감소하는 경향이 나타났는데⁽⁶⁻⁷⁾, Fig. 5는 이러한 결과를 보여주는 것이다.

이것은 균열을 발생시키는 응력이 a_2 의 길이가 증가할수록 a_1 에 집중되지 않고 양쪽으로 나뉘어져 모드 II 영향의 감소를 지연시키는 결과를 유발한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 유한요소 해석 결과에서도 잘 나타나고 있는데 Fig. 7, 8에서, a_2 가 길어질수록 K_{II} 의 증가량이 K_I 의 감소량보다 더 작아지는 것을 볼 수 있다.

가지 균열의 각도 α 의 변화에 대한 피로균열의 진전 각도는 Fig. 6에서 보여주고 있는데, α 의 값이 감소할수록 β 값도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 피로균열의 성장이 초기 성장단계를 제외한 대부분의 성장 단계에서는 주로 모드 I에 의하여 지배를 받게되어 거의 평행하게 진전하기 때문에 β 값은 α 값의 변화와 비슷한 경향을 나타내며 변화하는 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 7, 8은 유한요소 해석의 결과로 각각의 시험편에 대하여 균열성장 길이에 따른 K_I, K_{II} 값의 변화를 비교한 것이다. K_I 은 균열이 1mm 성장할 때까지 급격하게 증가하다가 균열이 더 성장할수록 완만하게 증가하였다. 반면 K_{II} 은 균열이 1mm 성장할 때까지는 급격한 감소를 보이다가, 2mm이상 성장해서는 거의 0에 수렴함을 보이고 있다. 균열은 모드 I 하중에 대하여 수직 방향으로 성장하기 위

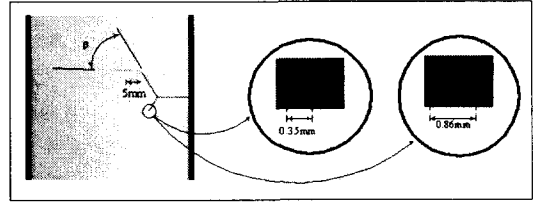


Fig. 4 Experimental results of fatigue crack extension($\alpha=60^\circ, a_2=5, 7.5\text{mm}$)

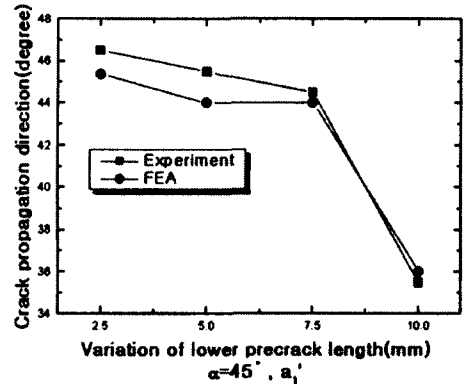


Fig. 5 Comparison between experiment and FEA for the direction of fatigue crack extension (β , at $\alpha=45^\circ$)

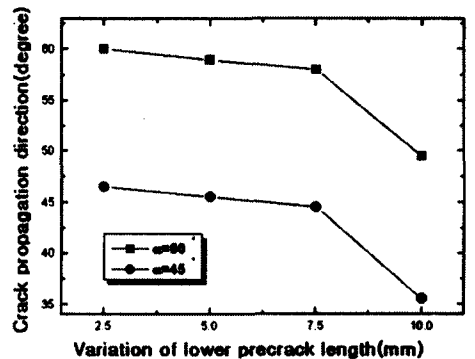


Fig. 6 Comparison of fatigue crack extension angle between $\alpha=45^\circ$ and $\alpha=60^\circ$ in the result of experiment

하여 그 방향을 바꾸며 진행을 계속하였고, 이와 같이 하여 모드 II의 영향이 감소하여 K_{II} 은 거의 0에 가까운 값으로 감소하였다. 이와 같이 초기 균열 성장 증분(약

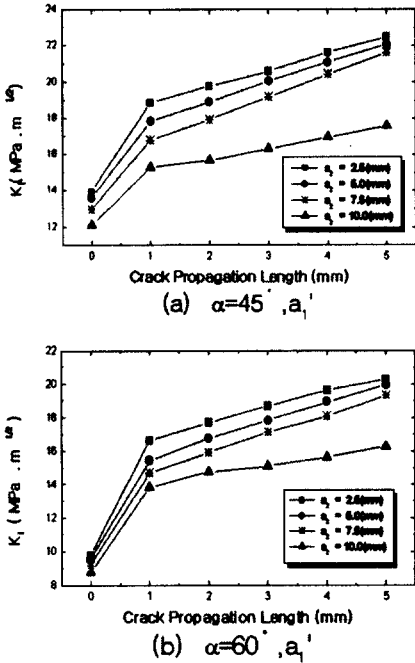


Fig. 7 Comparison of K_I on fatigue crack propagation

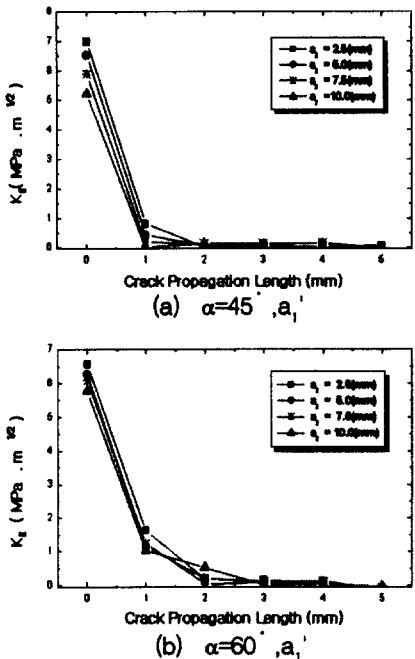


Fig. 8 Comparison of K_{II} on fatigue crack propagation

Table 3 The value of K_I to the crack length ($\alpha=60^\circ\Delta$)

		K_I (MPa · m ^{1/2})			
a_1'	a_2	2.5mm	5mm	7.5mm	10mm
0mm		-6.555	-6.257	-6.102	-5.766
1mm		-1.638	-1.145	-1.237	-1.026
2mm		-0.199	-0.194	0.040	-0.526
3mm		-0.145	-0.117	-0.081	0.015
4mm		-0.098	-0.125	-0.114	0.049
5mm		-0.069	-0.125	-0.244	-0.020

2mm)을 제외하고는 실험은 실제적으로 모드 I의 것임을 알 수 있다. 만일 모드 I 및 모드 II의 부하가 같은 위상에 있으면 피로균열 성장은 모드 II를 소거하려는 경향이 있음은 명백하다. 그러므로 곡선형 균열에 대한 모드 I 문제로 귀결된다. 그러나 혼합 모드의 피로균열 성장이 쉽게 소멸되지는 않는다. 그 이유는 균열이 순수 모드 I의 방향으로 방향을 바꾸려고 하면 K_I 가 양(positive)인 시간 동안에는 한쪽 방향으로 방향을 바꾸려 할 것이고, K_I 가 음(negative)인 때에는 다른 방향으로 방향을 바꿀 것이다. 결과적으로 균열은 직진하게 되며, K_I 는 감소하지만 소멸된다고 보기는 힘들다.⁽⁵⁾ FEA 결과를 보면 K_I 는 소멸되지 않았다. Table 3은 균열성장 길이에 따른 K_I 값의 변화를 나타낸 것인데, 균열 길이가 증가할수록 K_I 값은 0에 수렴하지만 소멸되지는 않고, 균열 성장 방향의 직진에 기여한다는 것을 알 수 있다. 여기서 ±부호는 균열의 진행 방향을 나타낸다.

Fig. 9는 피로균열 진전에 따른 유효 응력확대계수 (effective stress intensity factor)를 나타낸 것이다. 혼합모드 하에서의 유효 응력확대계수는 Tanaka가 제안한 식을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$\Delta K_{eff} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{0.25} \quad (3)$$

균열성장 길이에 따른 유효 응력확대계수(K_{eff})의 증가는 Fig. 7의 K_I 값 변화와 비슷한 경향을 띠고 있으며, K_I 값과의 비교에서도 큰 차이점을 보이지 않고 있다. 이는 a_2 가 증가하면 K_I 가 증가할 것이라는 예측과는 달리, 유효 응력 확대계수에는 거의 영향을 미치지 못함을 나타내는 것이다. 즉, a_2 가 증가하더라도 길이의 증분이 K_I 의 증가에 미치는 영향은 미소하다고 볼 수 있으며, 결과적으로 피로균열 성장은 모드 I에 의해 지배됨을 보여주는 것이

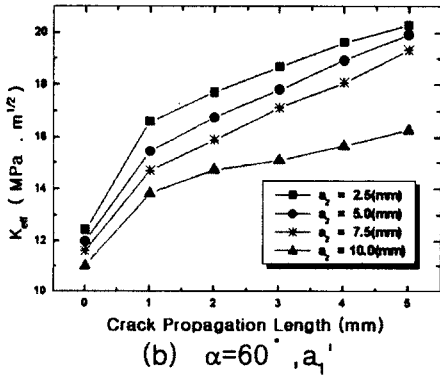
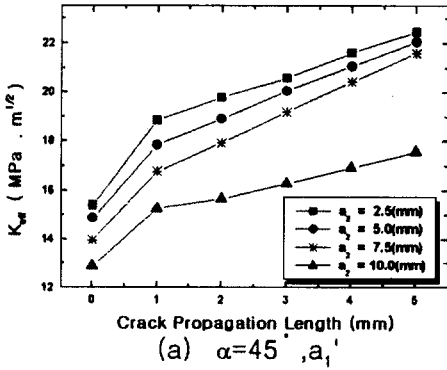


Fig. 9 Comparison of K_{eff} on fatigue crack propagation

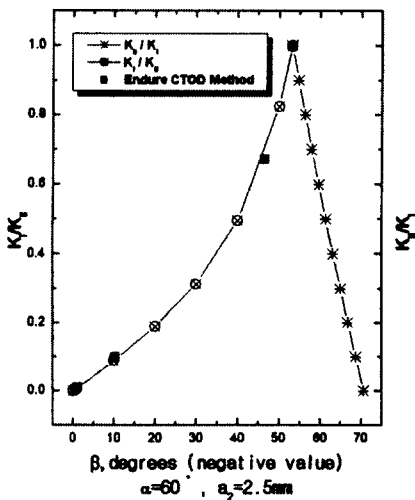


Fig. 10 Crack extension angle as predicted by MTS criterion and FEA ($\alpha=60^\circ, a_2=2.5\text{mm}$)

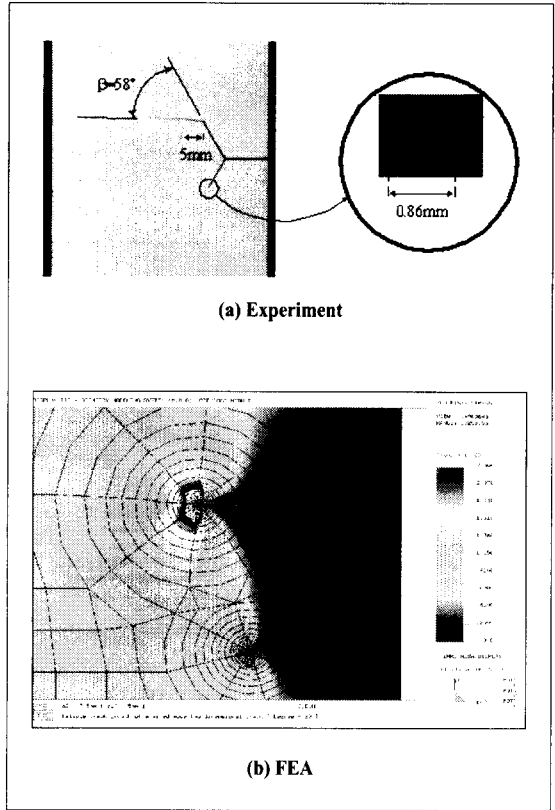


Fig. 11 Comparison of fatigue crack extension angle between experiment and FEA ($\alpha=60^\circ, a_2=7.5\text{mm}$)

다. 이것은 Fig. 7, 8의 K_I, K_{II} 값의 변화와 관련하여 설명할 수 있는데, 유효 응력확대계수를 α 가 $45^\circ, 60^\circ$ 인 시험편에 대해서 비교하면, 각 시험편은 K_{II} 값의 변화에 따라 큰 영향을 받지 않고, 주로 K_I 값의 변화에 의해 응력확대계수 크기가 변화함을 알 수 있다. 즉, K_I 값이 큰 45° 의 시험편에서도 유효 응력확대계수의 값이 크게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 10은 유한요소해석 결과에 대한 고찰로 α 가 60° , a_2 의 길이가 2.5mm인 시험편에 대하여 MTS 이론의 K_I/K_{II} 에 대한 균열진전 각도를 예측한 것이다. FEA의 결과와 비교하면 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 11은 α 가 60° , a_2 가 7.5mm인 시험편에서의 실험 결과와 유한요소 해석으로 균열 전파 경로를 예측한 것으로서, 두 결과를 비교하면 균열 전파 경로에는 큰 차이가 없었다.

4. 결 론

혼합모드하에서 실험 및 유한요소 해석을 통한 각도와 균열길이의 변화를 갖는 피로균열 전파 거동의 연구 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 혼합모드(I+II)하에서의 균열성장 방향은 초기 균열에 대하여 어느 정도 경사각을 가지고 일어났으며, 균열이 성장할수록 초기의 균열 길이 증분보다 경사각이 줄어들면서 거의 평행하게 진전하였다.
- (2) 가지 균열의 각도 α 의 변화에 대한 피로균열의 진전 각도 β 는 α 의 값이 감소할수록 β 값도 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 피로균열이 성장하면서 초기의 균열 성장 증분의 단계를 지나면 모드 II의 영향이 현저하게 감소하여 실제적으로 모드 I이 지배적이어서 K_{I1} 의 값은 0에 수렴하지만, 소멸되지는 않고 균열 성장 방향의 직진에 기여한다.
- (4) a_2 가 증가하더라도 균열길이의 증분 K_{I1} 의 증가에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 결과적으로 K_{eff} 는 주로 K_{I1} 에 의하여 영향을 받으며, 피로균열 진전력(driving force)은 모드 I에 의해 지배된다.

참 고 문 헌

- (1) S. K. Maiti and D. K. Mahanty, 1990, "Experimental and finite element studies on mixed I and mixed (I and II) stable crack growth - II. finite element analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, v.37, n.6, pp. 1251~1275.
- (2) Peter M. Haeefele and James D. Lee, 1995, "Combination of finite element analysis and analytical crack tip solution for mixed mode fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, v.50, n.5/6, pp. 849~868.
- (3) J. Qian and A. Fatemi, 1996, "Mixed mode fatigue crack growth : a literature survey," *Engineering Fracture Mechanics*, v.55, n.6, pp. 969~990.
- (4) P. E. Bold, M. W. Brown and R. J. Allen, 1992, "Review of fatigue crack growth in steels under mixed mode I and II loading," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, v.15, n.10, pp. 965~997.
- (5) David Broek, 1986, "Elementary engineering fracture mechanics," 4th edition, Martinus nijhoff publishers, p. 374~383.
- (6) S. K. Maiti and D. K. Mahanty, 1990, "Experimental and finite element studies on mixed I and mixed (I and II) stable crack growth - I. Experimental," *Engineering Fracture Mechanics*, v.37, n.6, pp. 1237~1250.
- (7) Takayuki Suzuki, Takashi Uno, Taisuke Oyanagi, and Ikuhiko Hayashi, 1987, "Crystallographic orientation dependence of fatigue crack propagation in Fe-3%Si (Characteristics of crack propagation at an early stage under $K_{I1} + K_{II1}$ mixed mode loading)," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A*, v.53, n.486, pp. 230~235
- (8) Tanaka, K., 1974, "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis," *Engineering Fracture Mechanics*, v. 6, pp. 493~507