

## 모드 II 하중을 받는 CTS 시험편의 피로균열 전파거동에 관한 실험적 연구

송삼홍<sup>†</sup> · 이정무<sup>\*</sup>

(2003년 2월 26일 접수, 2003년 5월 6일 심사완료)

### An Experimental Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior in CTS Specimen under Mode II Loading

Sam-Hong Song and Jeong-Moo Lee

**Key Words:** Mode II(모드 II), Compact Tension Shear Specimen(CTS 시험편), Shear Load(전단 하중), Crack Propagation Angle(분기전파각도), Crack Propagation Path(균열전파경로), Maximum Tangential Stress Criterion(최대 원주응력 조건)

#### Abstract

The purpose of this paper is to investigate fatigue crack behavior under shear(Mode II) loading. Various specimens and devices have been used in order to produce Mode II loading in fatigue experiments for shear crack propagation. But, there is not sufficient comparisons of experimental results between Mode II and others loading modes, because of characteristics of applied loads and specimens. So, compact tension shear(CTS) specimens were used in this paper to investigate the propagation behavior of Mode II by comparing the experimental results between loading modes. We firstly observed the characteristics which was showed in Mode II experiment using CTS specimens. The experimental results under Mode II loading were compared with fatigue crack behavior under Mode I and Mixed-mode I+II loading. The characteristics for initiation and propagation behavior under Mode II loading was investigated by such comparisons.

#### 1. 서론

재료의 취성 파괴거동에 대한 해석적, 실험적 연구는 인장응력상태인 Mode I 하중 하의 거동에 거의 전적으로 한정되어왔다. 그러나 복잡한 하중상태의 결합, 비등방성 비균질성 복합재료의 적용확대 및 복잡한 기하학적 형상을 요구하는 설계조건으로 인하여, 기계요소나 구조물에는 혼합모드 하중상태를 나타내는 경우가 증가하고 있

다. 그래서 혼합모드 하중상태에 있는 재료의 파괴거동에 대한 연구의 필요성이 점차 증대되고 있는 실정이다. 혼합모드 하중상태는 Mode I, Mode II 및 Mode III가 각각 혼합된 상태를 의미한다. 여러 결합하중의 상태 중 실제 기계요소에서 빈번하게 관찰되는 혼합모드 하중상태는 Mode (I+II)의 상태이며, 이러한 하중조건 하에서 균열의 피로거동에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 혼합모드 하중 하의 균열의 피로거동에 대한 연구는 시험편과 실험방법의 개발,<sup>(2)</sup> 응력확대계수식의 결정,<sup>(3~5)</sup> 균열전파방향의 예측<sup>(6,7)</sup> 및 유효응력확대계수를 도입한 혼합모드 피로균열의 전파속도 평가<sup>(8,9)</sup> 등에 대하여 주목하여왔다. 여기서 Mode (I+II)의 혼합모드 하중상태는 Mode I의 인장하중과 Mode II의 전단하중을 결합한 상태이기 때문에 Mode (I+II) 하중 하의 피로거동에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

<sup>\*</sup> 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

대한 연구를 위하여 각 단일모드 하중 하의 피로 거동에 대한 독립적인 연구가 선행되어야 한다고 생각된다. 이들 단일모드 중 Mode I 하중 하의 피로거동에 대한 연구가 집중적으로 이루어져 왔으므로 Mode II 하중 하의 피로파괴거동에 대한 연구와 이해는 상대적으로 부족하다. Mode II 하중 하의 피로거동에 대한 연구는 실험절차와 시험편의 개발<sup>(10)</sup> 및 파괴인성의 특성<sup>(11)</sup>에 대하여 이루어져 왔다. 그러나 Mode II 하중 하의 피로 시험에는 균열선단에 순수한 Mode II 하중을 작용시키고, 이를 전파과정동안 지속적으로 유지시키는 데 제약과 실험상의 어려움이 있다. 또한 이에 대한 연구는 사용된 시험편의 특성때문에 여러 하중모드에 대하여 일관적인 실험을 수행하고, 그 결과를 비교한 것이 드물다. 그래서 본 연구에서는 다양한 하중모드를 조성할 수 있도록 단순 인장전단(Compact Tension Shear : CTS) 시험편과 하중장치를 이용하였으며, 피로거동의 실험결과들을 상호 비교함으로써 Mode II 하중 하의 피로거동의 특성을 실험적으로 고찰하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 문제들을 고찰하였다. 첫째, Mode II 하중을 받는 CTS 시험편에서 초기 균열의 상태와 작용하중의 크기변화에 따라 나타나는 피로균열의 발생 및 전파와 관련한 피로시험의 특징을 검토하였다. 둘째, Mode I, 혼합 Mode (I+II) 및 Mode II 하중 하에서 나타나는 피로균열의 수명 및 전파거동의 특성을 비교, 고찰하였다. 셋째, 피로균열의 전파형태, 전파경로 및 방향을 고찰하였으며, 전파방향 예측조건을 적용하여 Mode II 하중 하의 균열전파방향에 대한 예측의 정도를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 KS D 3519에 규정된 자동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이 재료는 주로 차체 하부구조의 강도를 유지, 보완하는 자동차의 프레임 및 차체와 차륜의 상하방향 지지와 강성을 유지하는 현가장치의 상, 하 암에 사용되며, 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 2에 나타낸 것과 같다.

Table 1 Chemical composition of SAPH440

Composition (Wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.168	0.020	0.810	0.012	0.008

Table 2 Mechanical properties of SAPH440

Yield strength	Tensile strength	Hardness	Elongation
MPa	MPa	Hv	%
302	440	214	44

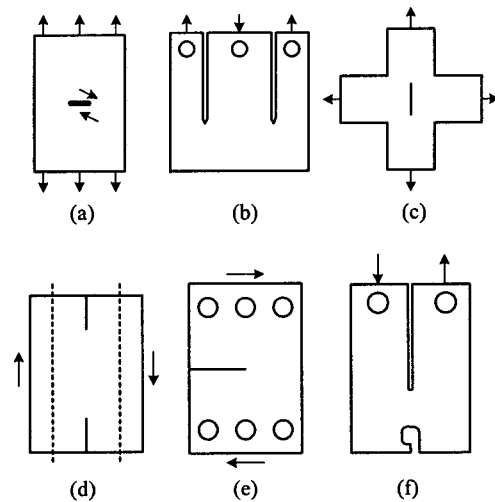


Fig. 1 Specimens used tests for propagation of fatigue cracks under mode II loading

### 2.2 시험편과 하중장치

Mode II 하중 하의 피로균열 전파실험에는 전단하중을 유발하기 위하여 다양한 형태의 시험편과 장치들이 사용되었다. 사용된 다양한 시험편들은 Fig. 1과 같다. Roberts와 Kibler<sup>(12)</sup>는 중앙균열이 있는 인장시험편(Fig. 1(a))을 이용하여 정적 인장하중과 전후 반복하중을 작용시켜 Mode II 하중 하의 피로균열 전파실험을 하였다. Jones와 Chisholm<sup>(13)</sup> 그리고 Pook과 Greenam<sup>(14)</sup>은 각각 예비균열을 낸 단순 전단시험편(Fig. 1(b))을 이용하였다. Liu 등<sup>(15)</sup>은 십자형태의 시험편(Fig. 1(c))과 이축하중의 작용크기를 조절하여 실험하였다. Otsuka 등<sup>(16)</sup>은 Mode II 하중을 받는 양측 노치시험편(Fig. 1(d))을 이용하였으며, Richard<sup>(17)</sup>는 단순 전단시험편(Fig. 1(e))과 하중장치를 개발하였다.

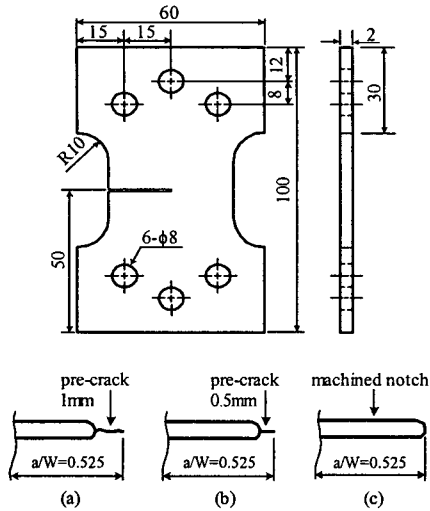


Fig. 2 Configuration of modified CTS specimen  
(a), (b) pre-crack tip (c) machined notch tip

또한 Buzzard 등<sup>(18)</sup>은 Mode II 하중을 작용시키기 위한 장치와 시험편(Fig. 1(f))을 개발하였다. 다양하게 사용된 시험편과 장치들의 특성으로 인하여, 각각의 시험편을 이용한 Mode II 하중 하의 피로거동에 대한 연구결과의 비교는 제한적이다.

본 연구에서는 수정 CTS 시험편과 하중장치를 이용하여 여러 하중모드 하에서 피로시험을 수행하였으며, 이로부터 Mode II 하중 하의 피로거동의 특징을 고찰하였다. 시험편과 하중장치의 형상과 치수는 Fig. 2, 3과 같다. 수정 CTS 시험편은 전단하중성분이 현저히 크게 작용하는 실험에서 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 하중장치와의 결합부위와 노치가 가공되는 평형부위가 수정되었다. 초기 균열상태는 무차원화된 균열길이( $a/W$ )가 동일하도록 만든 예비균열상태(Fig. 2(a), (b))와 기계가공 노치상태(Fig. 2(c))로 준비되었다. 사용된 하중장치는 Richard와 Benitz<sup>(2)</sup>의 모델을 기본으로 하여 제작되었으며, 인장하중과 전단하중의 작용비율은 이를 이용하여 균열선단에 대한 작용하중의 방향을 변화시킴으로써 조절되었다. 피로균열의 전파실험은 하중장치의 하중작용각도( $\varnothing$ )를 변화시켜 Mode I, 혼합 Mode (I+II) 및 Mode II의 하중 하에서 수행되었다.  $\varnothing$ 가  $0^\circ$ 인 경우는 인장하중이 작용하는 Mode I의 상태,  $90^\circ$ 인 경우는 전단하중이 작용하는 Mode II의 하중상태를 나타내며, 이

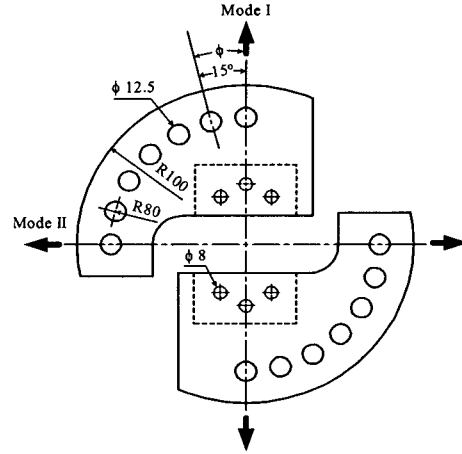


Fig. 3 Configuration of loading device

Table 3 Applied loads  $P_{max}$ (kN) with test condition

specimen	$P_{max}$ $a_p$ mm	Mode I	Mixed mode I+II	Mode II
		$\varnothing = 0^\circ$	$\varnothing = 30^\circ$	$\varnothing = 60^\circ$ $\varnothing = 90^\circ$
Pre-crack	1.0	3.6	3.6	3.6, 6.0
	0.5	-	-	4.8, 6.0, 7.2
Notch	0	3.6, 4.4, 4.8	-	3.6, 4.4, 4.8

$a_p$ : pre-crack length  
 $\varnothing$ : Loading application angle

두 각도 사이의 경우는 인장과 전단하중이 함께 작용하는 혼합 Mode (I+II)의 하중상태를 나타낸다.

### 2.3 실험장치 및 방법

본 실험에서는 CTS 시험편의 피로균열거동을 Mode I, 혼합 Mode (I+II) 및 Mode II 하중 하에서 관찰하였다. 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로시험기인 Instron 1331이다. 피로하중의 형태는 일정진폭의 인장-인장하중상태이고, 응력비는 0.5이며, 주파수의 크기와 파형은 10Hz와 sine 파형이다. 최대 작용하중( $P_{max}$ )의 크기는 Mode II 하중상태 하에서 안정적이고 지속적인 균열의 전파가 이루어지는가의 여부에 초점을 두어 Table 3에 나타낸 것과 같이 설정되었다.

피로균열의 측정에는 균열이미지 캡처링 시스템을 사용하였다. 피로균열의 길이는 예비균열선

단과 기계가공한 노치선단의 균열발생점을 원점으로 하는 좌표계(x'-y'와 x''-y'')를 설정하여 측정되었다. 피로균열의 전파속도계산에는 7점 증분다항법<sup>(9)</sup>(Seven Point Incremental Polynomial Method)을 사용하였다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수  $K_I$ 과  $K_{II}$ 는 Richard와 Benitz<sup>(9)</sup>가 제안한 식 (1)을 이용하여 계산되었다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \phi f_I \left( \frac{a}{W} \right)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \phi f_{II} \left( \frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

$$f_I \left( \frac{a}{W} \right) = \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \frac{a}{W-a}}{1 + 0.55 \frac{a}{W-a} - 0.08 \left( \frac{a}{W-a} \right)^2}}$$

$$f_{II} \left( \frac{a}{W} \right) = \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40 \frac{a}{W-a}}{1 - 0.67 \frac{a}{W-a} + 2.08 \left( \frac{a}{W-a} \right)^2}}$$

여기서  $a$ 는 노치와 피로균열을 합친 길이이며,  $\phi$ 는 하중작용각도를 나타낸다.

초기 균열평면상의 임의 지점에 위치하는 균열의 평가방법에는 전파균열을 기준좌표평면의 x축에 회전시킨 실제 균열길이와 유효하중작용각도( $\phi_{eff}$ )를 적용하는 방법을 사용하였다. 균열전파속도의 평가에는  $K_I$ 과  $K_{II}$ 를 조합한 유효응력확대계수( $K_{eff}$ )를 도입하였으며,  $\Delta K_{eff}$ 는 Tanaka<sup>(8)</sup>가 제안한 식을 이용하여 산출하였다.

$$\Delta K_{eff} = [ \Delta K_I^4 + 8 \Delta K_{II}^4 ]^{1/4} \quad (2)$$

### 3. 실험결과

#### 3.1 CTS 시험편을 이용한 Mode II 하중 하의 피로시험의 특징

본 절에서는 Mode II 하중을 받는 CTS 시험편에서 관찰된 피로균열거동의 특징을 검토하였다. 피로시험은 Fig. 2와 Table 3에 나타난 것처럼 작용하중의 크기를 변화시키면서 예비균열시험편과 노치시험편에 대하여 수행되었으며, 피로균열의 전파양상은 Fig. 4와 5에 나타난 것과 같다.

Fig. 4(a)는 예비균열길이( $a_p$ )가 1mm인 시험편에  $P_{max}$ 가 6.0kN 작용할 때, 관찰된 피로균열의 거동을 나타낸 것이다. 관찰 초기에 피로균열은 예비

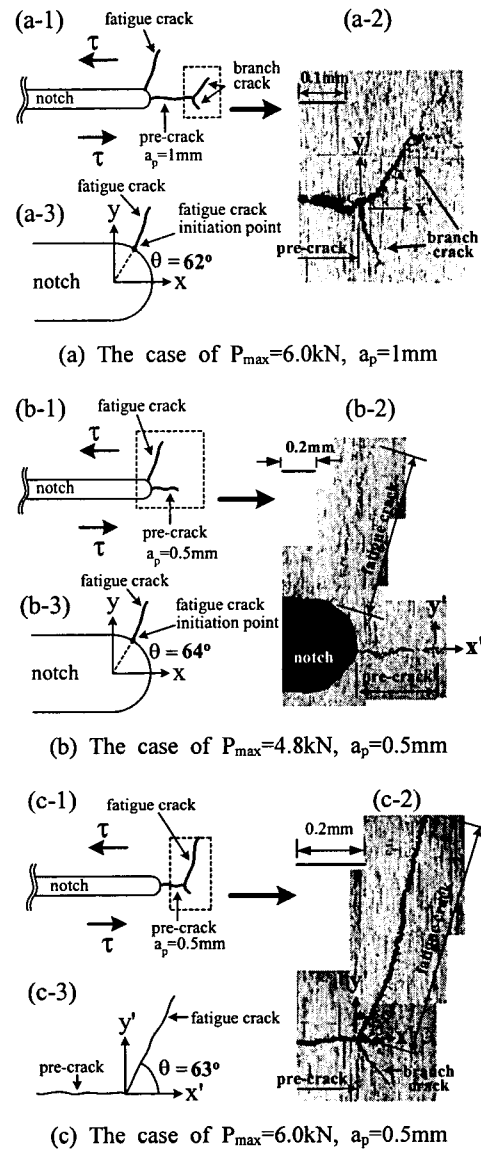


Fig. 4 Aspect of crack propagation under mode II loading in pre-crack specimen

균열선단에서 양방향으로 전파하다 정지하였다 (Fig. 4(a-2)). 이후 노치뿌리에 대하여 62°의 노치선단 위치에서 새로운 피로균열이 발생하여 지속적으로 전파하였다(Fig. 4(a-3)). Fig. 4(b)는 예비균열의 길이가 0.5mm인 시험편에  $P_{max}$ 가 4.8kN 작용할 때, 관찰된 피로균열의 거동을 나타낸 것이다. 피로균열은 예비균열선단에서 한 방향으로 약 0.04mm 분기전파하다 정지한 후 노치뿌리에

대하여 64°의 노치선단 위치에서 새로이 발생하여 지속적으로 전파하였다(Fig. 4(b-2), (b-3)). Fig. 4(a), (b)와 같은 거동은 예비균열의 길이와 작용하중의 크기 차이에 따라 예비균열면의 마찰과 예비균열선단에서 균열진전력의 감소로 인하여 새로운 피로균열이 노치선단에서 발생, 전파한 것으로 생각된다. Fig. 4(c)는 예비균열길이가 0.5mm인 시험편에  $P_{max}$ 가 6.0kN 작용할 때, 관찰된 피로균열의 거동을 나타낸 것이다. 피로균열은 전파단계 초기에 예비균열선단으로부터 양방향으로 분기전파를 하다가 그 중 한 방향으로 지속적으로 전파하였다. 이와 같은 거동은 Fig. 4(a), (b)와 달리 작용하중이 예비균열면의 마찰과 예비균열선단에서의 균열진전력 감소를 극복할 만큼 크기 때문에 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 노치시험편에  $P_{max}$ 가 4.4kN 작용할 때, 관찰된 피로균열의 거동을 나타낸 것이다. 예비균열면의 마찰에 의한 영향을 배제하기 위하여 노치상태에 대한 실험이 수행되었다. Fig. 5(a)는 노치, 피로균열 및 작용하중의 상태를 도식적으로 나타낸 것이며, (b)는 노치선단에서 발생, 전파한 피로균열의 사진이다. 작용하중의 크기를 변화시킨 노치시험편에 대한 실험에서 피로균열은 노치뿌리를 원점으로 하는 x-y 좌표계의 중심으로부터 약 58°~64°에서 발생하여 전파하였다. 발생한 피로균열은 Mode II 하중 하에서 발생점으로부터 약 65°~72°의 각도를 이루어 직선적인 전파거동을 나타내었다(Fig. 5(c)). 이와 같이 상대적으로 저하중(4.8kN 이하)의 Mode II 상태 하에서 피로균열은 노치선단의 일정한 영역에서 발생하였으며, 이는 Fig. 4(a), (b)의 경우처럼 노치선단에서 발생한 균열과 유사한 조건과 형태를 나타내었다.

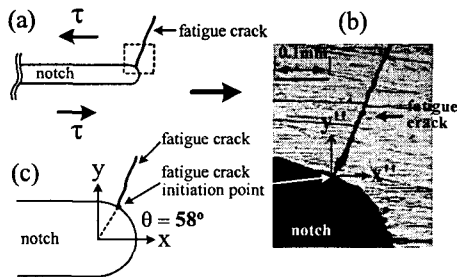


Fig. 5 Aspect of crack propagation under mode II loading in notch specimen

CTS 시험편을 이용한 Mode II 하중 하의 피로균열 전파실험에서 관찰된 피로균열의 거동은 초기균열의 상태와 작용하중의 크기에 따라 다음과 같이 정리할 수 있다. 예비균열 시험편 중에서  $a_p=1mm$ 인 경우와  $a_p=0.5mm$ ,  $P_{max}$ 가 4.8kN 이하의 경우, 피로균열은 예비균열선단에서 약간의 분기전파를 보인 후 정지하고, 노치선단에서 새로운 피로균열이 발생하여 지속적으로 전파하였다(Fig. 4(a), (b)).  $a_p=0.5mm$ , 고하중의 경우(6.0kN 이상), 피로균열은 예비균열선단에서 양방향으로 분기전파를 보이다 그 중 한 방향으로 지속적으로 전파하였다(Fig. 4(c)). 이들의 경우 피로균열은 노치와 예비균열선에 나란하게 전파하지 않고, 피로균열 발생점에 대하여 약 65°~72°의 방향으로 전파하였다. 예비균열면의 마멸, 예비균열 전방에서의 저항 및 작용하중 크기 등의 관계에 따라 피로균열의 전파거동은 발생위치 및 전파양상에 차이를 보였다.

노치시험편의 경우, 피로균열의 전파거동은 원형 노치의 약 58°~64°에 위치하는 선단영역에서 약 66°~71°의 방향으로 전파하는 양상을 나타내었다(Fig 5). Mode II 하중 하에서 예비균열면의 마찰정도, 가공 노치선단의 변화에 의하여 나타나는 차이 및 노치선단의 일정영역에서의 균열발생 등에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 생각된다.

### 3.2 Mode II 하중 하의 피로균열 전파거동

본 절에서는 Mode II 하중 하의 피로균열의 수명과 전파속도를 Mode I 및 혼합 Mode (I+II) 하중 하의 피로거동과 비교하여 고찰하였다. 고찰 대상은 노치시험편( $P_{max}=3.6, 4.4, 4.8kN$ )과 예비균열선단에서 지속적으로 피로균열이 전파하는 경우(노치선단에서 새로운 피로균열이 발생하지 않은 경우:  $P_{max}=6.0, 7.0kN$ )의 예비균열시험편으로 제한하여 설정되었다.

Fig. 6은 작용하중의 크기와 초기 균열의 상태 변화에 따라 나타나는 Mode I과 Mode II 하중 하의 피로수명을 나타내고 있다. Fig. 6(a)의 (a-1)과 (a-2)는 노치시험편의 경우이고, (a-3)는 예비균열 시험편의 경우에 대한 수명변화이다. 여기서 발생수명은 피로균열이 0.1mm 전파하였을 때, 전파수명은 피로균열이 3mm까지 전파하였을 때의 하중반복수로 설정되었다.

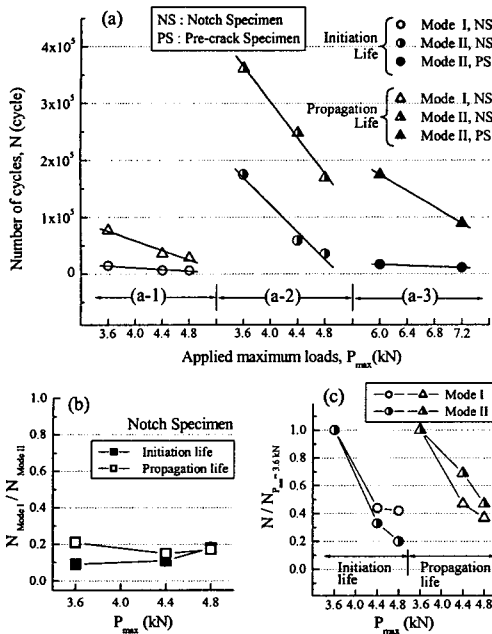


Fig. 6 The fatigue life with the variation of  $P_{max}$ , loading mode and initial crack state

노치시험편의 경우, 작용하중이 증가함에 따라 Mode II 하의 피로수명에 대한 Mode I 하의 피로수명비( $N_{Mode I} / N_{Mode II}$ )의 변화는 Fig. 6(b)와 같다. 발생수명의 경우는 약 0.09(3.6kN)에서 0.18(4.8kN)로 변화하였으며, 전파수명의 경우는 0.21(3.6kN)에서 0.17(4.8kN)로 약간 변화하였다. 이것은 작용하중의 크기증가에 따라 발생단계에서는 Mode I에 비하여 Mode II의 피로수명이 더욱 감소하고, 전파단계에서는 발생단계와 비교하면 Mode I 하중의 증가에 의한 영향이 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그렇지만 두 경우에서 Mode I 하의 피로수명은 Mode II 하의 피로수명의 약 20% 이내로 하중모드의 특성에 따른 차이를 크게 나타내고 있다. 작용하중의 증가에 따른 피로수명비의 변화는 Fig. 6(c)와 같다. 여기서 피로수명비는 해당 작용하중의 수명을  $P_{max}$ 가 3.6 kN일 때의 수명으로 나눈 값이다. 즉,  $P_{max}$ 가 3.6kN일 때의 피로수명비를 1로 하여 작용하중의 증가에 따른 피로수명의 변화를 고찰하였다. Mode I 하의 경우,  $P_{max}=4.8kN$ 일 때 발생수명비는 0.42가 되었으며, 전파수명비는 0.37이 되었다. Mode II 하의 경우, 발생수명비는 0.2가 되었으며, 전파수명비는 0.47이 되었다. 발생수명의 경

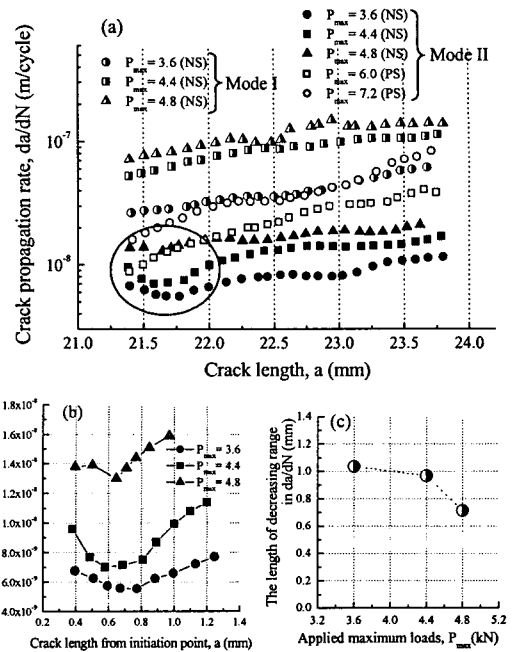


Fig. 7 The crack propagation rate with variation of  $P_{max}$ , loading mode and initial crack state

우 Mode II 하중 하의 수명변화율이 크게 나타난 반면 전파수명의 경우는 Mode I 하의 수명변화율이 더 크게 변화하였다. 이는 노치로부터 균열이 발생할 때, Mode II 하중의 크기 변화에 의해 발생수명 변화가 더 민감하게 나타나는 반면 전파수명의 경우는 Mode I 하중 하에서 작용하중의 증가가 전파속도의 증가에 더 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

예비균열시험편의 경우, 작용하중이 6.0kN에서 7.0kN으로 증가함에 따라  $P_{max}$ 가 6.0kN일 때의 기준수명에 대하여 발생수명비는 0.66으로, 전파수명비는 0.51로 변화하였다. 예비균열상태와 고하중영역에서 작용하중의 증가에 따른 발생수명의 감소는 크지 않았으며, 전파수명의 감소는 노치시험편과 유사하게 나타났다. 이것은 예비균열선단에서 분기균열을 전파시킬 만큼 충분한 Mode II 하중이 작용하였기 때문에 노치시험편에서의 변화율보다 작게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 균열길이 증가에 따른 균열의 전파속도를 하중모드와 시험편의 상태에 따라 나타낸 것이다. 피로균열의 전파속도는 작용하중의 모드와 하중의 크기변화에 따라서 일정한 차이를 보이고 있다(Fig. 7(a)). 노치시험편에서의 경우,

Mode II 하중 하의 전파거동에서 주목할 점은 노치선단으로부터 전파하는 균열의 초기 전파속도가 감소하는 것이다(Fig. 7(a)의 타원형표시). Fig. 7(b)는 전파속도 감소현상을 나타내는 지연 구간 내의 전파속도변화를 확대하여 나타낸 것이다. 여기서 지연구간은 균열이 전파함에 따라 감소하였던 전파속도가 다시 최초 전파속도를 회복하는 구간에 해당하는 균열의 길이를 말한다. 초기 균열의 전파속도에 영향을 미치는 정도를 비교하기 위하여 작용하중의 크기 변화에 따른 지연구간의 크기를 비교하였다. 초기 전파속도 지연현상은 작용하중의 증가에 따라 최소 전파속도까지의 감소율에는 일정한 변화를 보이지 않지만, 지연구간은 점차 줄어들었다.  $P_{max}$ 가 3.6kN일 때 지연구간은 약 1mm에서 4.8kN 일 때 약 0.7mm로 30% 감소하였다(Fig. 7(c)).

이러한 결과는 초기 균열이 노치인 경우에도 Mode II 하중 하에서 전파하는 피로균열이 전단하중의 특성에 따라 초기에 발생한 균열면의 마찰을 피할 수 없으며, 그 영향이 초기 전파속도의 감소로 나타났음을 확인시켜준다.

예비균열 시험편에 대한 고하중실험 결과, 예비균열선단으로부터 전파한 균열은 노치시험편과 같은 전파속도의 지연구간이 나타나지 않고 지속적으로 전파하였다. 하지만, 6.0kN일 때의 초기 전파속도가 노치시험편의 4.8kN일 때의 것과 비교하여 작은 것은 예비균열면에서의 마찰영향이 상대적으로 크게 작용하였기 때문에 나타나는 것이라고 생각된다.

Fig. 8에서는 Mode I( $\phi=0^\circ$ ), Mode II( $\phi=90^\circ$ )와 함께 혼합 Mode I+II 하중( $\phi=30^\circ, 60^\circ$ ) 하의 전

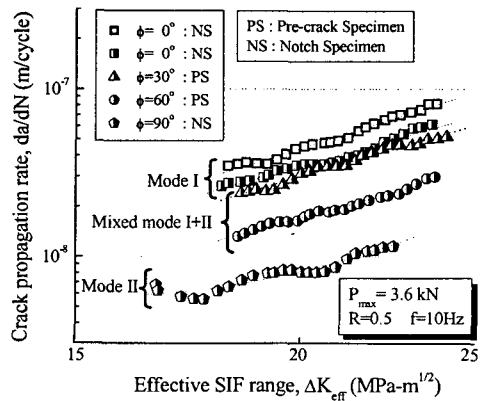


Fig. 8 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K_{eff}$

파속도를 비교하였다. 피로균열 전파속도는 두 시험편에 대하여 하중이 3.6kN으로 작용하는 조건의 경우에 비교되었다. 혼합 Mode I+II 하중 상태( $\phi=30^\circ, 60^\circ$ )의 경우 Mode I의 인장하중 성분의 감소와 Mode II의 전단하중 성분의 작용으로 균열전파속도는 Mode I 하의 경우보다 감소하였으나, Mode II에서와 같은 전파과정 중 일시적인 전파속도의 감소현상은 나타나지 않았다. 혼합 Mode I+II 하중 하의 균열전파속도는 혼합비의 차이에 따라 Mode I과 Mode II 하중에 의한 속도의 사이에서 나타나고 있으며, 이에 대한 고찰은 Mode II 하중이 균열의 전파속도에 미치는 영향을 고려하여 이루어져야 한다고 생각된다.

3.3 Mode II 하중 하의 피로균열의 전파형태

본 절에서는 Mode II 하중의 영향으로 나타나는 균열의 전파형태, 전파경로 및 전파각도의 예측에 대하여 고찰하였다.

Fig. 9는 노치시험편의 Mode I과 Mode II 상태 하에서 나타나는 전파형태에 대한 도식적 표현과 균열사진에 대하여 나타낸 것이다. Photo ㉔와 ㉕는 각각 작용하중의 최대값이 3.6kN일 때, Mode I과 Mode II의 상태 하에서 피로시험을 수행한 후 시험편으로부터 촬영한 것이다. 사진은 노치의 균열발생점으로부터 균열이 0.7mm 전파한 위치에서 동일하게 일부 구간(약 1mm)을 채취한 표면 피로균열의 모습이다. 본 연구에서는 두 하중모드 사이의 전파형태에 대한 차이를 비교하기 위하여 채취구간에서 균열면 사이의 변위를 측정하였다. 균열사이의 변위는 균열이미지 처리시스템을 이용하여 채취구간 내에서 약 0.02mm 간격

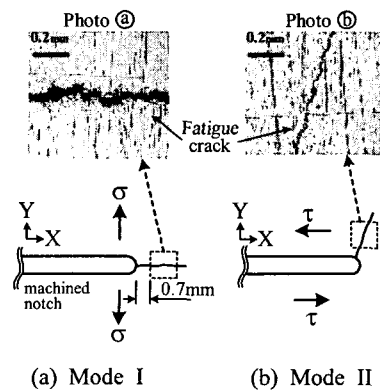
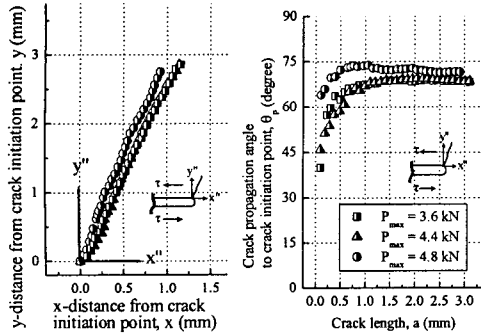
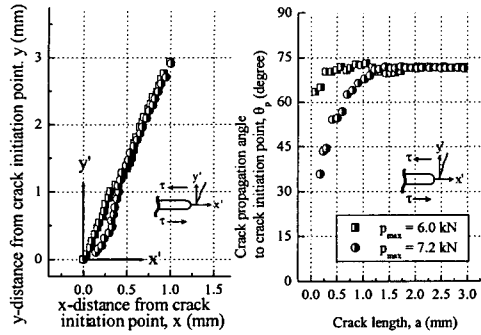


Fig. 9 Comparison of crack propagation patterns



(a) The case of notch specimen



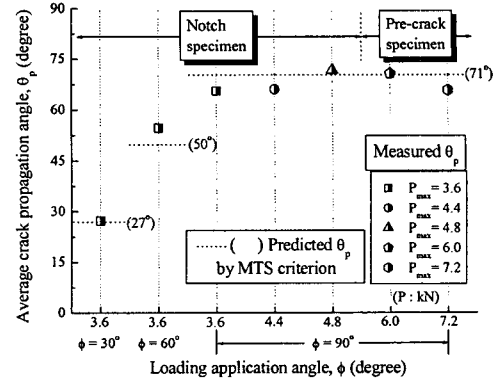
(b) The case of pre-crack specimen

Fig. 10 The Variation of crack propagation paths and angles with crack length

으로 50회를 측정하였으며, 채취구간에 대한 상호비교를 위하여 평균값이 사용되었다.

Mode I 하중 하에서 전파한 균열(Photo ㉔)의 채취구간에 대한 평균 균열면 사이의 변위는 약 19  $\mu\text{m}$ 인 반면 Mode II 하중 하의 균열(Photo ㉕)의 평균 변위는 약 9  $\mu\text{m}$ 였다. 작용하중의 크기와 채취구간의 위치에 따른 차이는 있지만 Photo ㉔와 ㉕에서 관찰된 두 균열면 사이의 변위는 약 2 배의 차이를 보였으며, 거시적인 관찰로도 두 하중모드의 특성에 의한 전파형태의 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 전단하중성분에 의해 상대적으로 작은 균열면 사이의 변위를 보이는 전파형태는 균열진전력의 감소와 균열면의 마멸과 관계 있으며, 피로균열의 전파속도에도 큰 영향을 미친다. 추후 균열전파과정에서 균열선단변위의 변화와 균열면의 마멸에 의한 균열전파속도의 변화에 대하여 추가적인 고찰을 할 것이다.

Mode II 하중 하의 피로균열 전파경로와 전파각도의 변화는 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 노치



MTS criterion: Maximum Tangential Stress criterion

Fig. 11 Comparison between the predicted angle by MTS criterion and measured crack propagation angle( $\theta_p$ )

시험편에서, (b)는 예비균열시험편에서 나타난 피로균열의 전파경로와 전파각도의 변화이며, 각각 노치에서의 균열발생점과 예비균열선단에 설정된 좌표계를 기준으로 그 변화를 나타낸 것이다.

Mode II 하중 하의 피로균열은 초기 균열선상에 나란한 방향으로 전파하지 않았으며, 노치와 예비균열선단에서 각각 초기 균열선에 대하여 전파구간별 차이는 있지만, 약 65° ~ 72°의 평균각도를 이루어 편향된 방향으로 전파하였다. 그러나 작용하중의 증가나 초기 균열상태에 따른 전파경로의 차이는 거의 나타나지 않았다. 두 시험편 모두에서 균열길이가 1mm 이내에서는 전파각도의 분산이 컸으나, 1mm 이상 전파한 후에는 일정한 경로가 유지되었다. 초기 분산은 전단하중의 작용특성과 함께 노치나 예비균열선단의 조직 등에 의한 영향도 나타난 것으로 생각된다. 1mm 이상 전파하여 일정한 경로가 유지되었을 때 각 작용하중에 대하여 전파각도의 평균값은 노치시험편의 경우는 약 70°이며, 예비균열시험편의 경우는 71°였다. 초기균열상태, 작용하중의 크기와 같은 인자들은 균열의 전파경로에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 이것은 혼합 Mode (I+II) 하중 하에서 응력비의 변화, 즉 작용하중의 크기변화가 균열의 전파방향에 영향을 미치지 않는다는 보고<sup>(20)</sup>와도 상응하는 결과이다.

Mode II 하중 하의 피로균열에 대해서도 혼합 모드 하중 하의 피로균열과 마찬가지로 전파방향에 대한 예측이 필요하며, 이를 위하여 최대 원



주응력(Maximum Tangential Stress: MTS) 조건<sup>(6)</sup>이 이용되었다. 최대 원주응력 조건을 이용한 균열의 전파각도는 다음 식으로 산출되었다.

$$\left(\tan \frac{\theta_p}{2}\right)_{1,2} = \frac{K_I}{4K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \quad (3)$$

여기서  $\theta_p$ 는 균열의 분기전파각도이다.

최대 원주응력 조건을 이용하여 예측한 균열전파각도와 실험에서 측정된 평균전파각도의 비교는 Fig. 11에 나타낸 것과 같다. Fig. 11에 표시된 ----( )는 각 해당조건에 대하여 예측조건으로 예측된 전파각도이며, 측정값과의 차이를 비교하는 기준이다. 작용하중이 혼합모드인  $\phi=30^\circ$ 의 경우 예측값과 측정값과의 오차는 1% 이내였으며,  $\phi=60^\circ$ 의 경우 오차는 약 10% 였다. Mode II 하중 하의 전파각도는 Fig. 10에서 보듯이 초기 전파량 1mm까지를 기준으로 그 분산 정도가 크게 차이가 나므로 여기서는 전체 경로에 미치는 초기 불안정한 경로에 의한 영향을 줄이기 위하여 측정된 균열전파각도의 평균값을 적용하였다. 피로균열이 1mm까지 전파했을 때의 예측값과 측정값 사이의 오차는 10% 정도였으며, 1mm부터 3mm까지 전파했을 때의 오차는 0.3%로 나타났다. 전체 경로에 대하여 평균전파각도를 적용한 경우, 그 오차는 3.6%를 나타내었다. 최대 원주응력 조건을 이용하여 예측한 전파각도는 하중모드, 작용하중의 크기, 초기 균열선단의 상태와 관계없이 전반적으로 실험측정치와 양호한 일치를 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CTS 시험편을 이용하여 초기 균열선단의 상태(예비균열과 노치의 상태)와 작용하중의 크기를 변화시키면서 Mode II 하중 하의 피로균열 전파실험을 수행하였다. 그리고 이 결과를 Mode I 또는 혼합 Mode (I+II) 하중 하에서 나타난 피로거동과 비교함으로써 Mode II 하중 하의 피로거동에 대한 실험적 고찰의 결론을 아래와 같이 얻을 수 있었다.

(1) CTS 시험편을 이용한 Mode II 하중 하의 피로균열은 초기 균열의 상태와 작용하중의 크기

에 따라 구분되는 전파거동을 나타내었다. 예비균열상태의 경우 예비균열면의 마찰로 인하여 저하중에서는 노치선단에 새로운 피로균열이 발생하였으며, 고하중범위에서는 예비균열선단으로부터 분기전파하였다. 노치상태의 경우 피로균열은 노치선단의 일정한 영역에서 발생, 전파하였으며, 두 경우 모두 피로균열은 초기 균열선에 나란하지 않은 방향으로 전파하였다.

(2) Mode II 하중 하의 피로수명은 작용하중의 크기증가에 따라 노치시험편, Mode II 하중, 그리고 저하중 범위의 조건에서 민감한 변화를 보였다. 노치선단으로부터 발생한 피로균열의 전파속도는 균열전파의 초기구간에서 감소하였다가 회복하는 경향을 나타내었다. 또한 작용하중의 크기증가에 따라 균열전파속도의 지연구간은 줄어드는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 작용하중의 크기에 따라 마찰표면에서 마멸정도의 심각성과 균열진전력의 크기 정도에 따라 차이가 나는 것으로 판단된다.

(3) 거시적으로 관찰된 균열면 사이의 변위로부터 Mode II 하중 하에서 피로균열의 전파형태가 균열진전력의 감소, 균열면의 마멸과 관계있음을 확인할 수 있었다. 피로균열은 초기 균열선에 대하여 약  $65^\circ \sim 72^\circ$ 의 방향으로 전파하였다. 피로균열의 전파경로는 작용하중의 크기, 초기균열선단의 상태와 관계없이 차이를 보이지 않았으며, 균열이 전파함에 따라 일정한 방향과 전파각도를 유지하였다. Mode II 하중 하에서 피로균열의 전파방향에 대한 예측은 최대 원주응력 조건을 이용하여 다른 하중모드에 대한 결과와 마찬가지로 양호하였다.

#### 참고문헌

- (1) Qian, J. and Fatemi, A., 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969~990.
- (2) Richard, H. A. and Benitz, K., 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *International Journal of Fracture*, Vol. 22, pp. R55~R58.
- (3) Hallbäck, N. and Nilson, F., 1994, "Mixed Mode I/II Fracture Behavior of an Aluminum

- Alloy," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 42, pp. 1345~1374.
- (4) Hong, K. J. and Kang, K. J., 1996, "Method to Measure  $K_I$ ,  $K_{II}$  and J-Integral for CTS Specimen under Mixed Mode Loading," *Transaction of the KSME*, Vol. 20, No. 1, pp. 3498~3506.
- (5) Song Sam-Hong and Lee Jeong-Moo, 2001, "Fatigue Crack Propagation Behavior in STS304 under Mixed Mode Loading," *Transaction of the KSPE*, Vol. 18, No. 9, pp. 131~139.
- (6) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 519~525.
- (7) Sih, G. C., 1974, "Strain Energy Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems," *International Journal of Fracture*, Vol. 10, pp. 305~321.
- (8) Keisuke Tanaka, 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 493~507.
- (9) Richard, H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337~3344.
- (10) Liu, H. W., 1985, "Shear Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*, Vol. 8, pp. 295~313.
- (11) Oh Dong-Joon, 2001, "Ductile Fracture Behavior of SPS Specimen Under Pure Mode II Loading," *Transaction of the KSME*, Vol. 25, No. 2, pp. 289~295.
- 2(12) Roberts, R. and Kibler, J. J., 1971, "Mode II Fatigue Crack Propagation," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 93, pp. 671~680.
- (13) Jones, D. L. and Chisholm, D. B., 1975, "An Investigation of the Edge-sliding Mode in Fracture Mechanics," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 261~276.
- (14) Pook, L. P. and Greenan, A. F., 1979, "Fatigue Crack Growth Threshold in Mild Steel Under Combined Loading," *ASTM STP 677*, pp. 23~35.
- (15) Liu, A. F. and Allison, J. E., 1979, "Effects of Biaxial Stresses on Crack Growth," *ASTM STP 677*, pp. 5~12.
- (16) Otsuka, A., Mori, K., Ohshima, T. and Tsuyama, S., 1981, "Mode II Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloys and Mild Steel," *Fracture 81 (Advances in Fracture Research)*, pp. 1851~1858.
- (17) Richard, H. A., 1981, "A New Compact Shear Specimen," *International Journal of Fracture*, Vol. 17, pp. R105~R107.
- (18) Buzzard, R. J., Gross, B. and Srawley, J. E., 1986, "Mode II Fatigue Crack Growth Specimen Development," *ASTM STP 905*, pp. 329~346.
- (19) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 565~601.
- (20) Song Sam-Hong, Choi Ji-Hoon and Lee Jeong-Moo, 2002, "The Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Behavior with the Variation of Stress Ratio," *Transaction of the KSME*, Vol. 26, No. 11, pp. 2287~2296.