

전단하중 하의 피로균열 전파거동의 특징

이정무[†] · 송삼홍^{*}

The Characteristics of Fatigue Crack Propagation Behavior in Shear Load

Sam-Hong Song and Jeong-Moo Lee

Key Words : Shear Load(전단하중), Mode II(모드 II), Compact Tension Shear specimen(CTS 시험편), Tensile Mode Growth(인장모드 성장), Shear Mode Growth(전단모드 성장)

Abstract

This paper reviewed characteristics of fatigue crack behavior observed by changing various shapes of initial crack and magnitudes of loading in compact tension shear(CTS) specimen subjected to shear loading. In the high-loading condition, fatigue crack under shear loading propagated branching from the pre-crack tip. Meanwhile, the secondary fatigue crack in the low-loading condition which was created in the notch root due to friction on the pre-crack face grew to a main crack. Influenced by the mode II loading condition, fatigue crack propagation retardation appeared in the initial propagation region due to the reduction of crack driving force and friction on crack face. In both cases, however, fatigue cracks grew in tensile mode type. Propagation path of fatigue crack under the shear loading was 70 degree angle from the initial crack regardless of its shape and load magnitude.

1. 서 론

재료의 취성파괴거동에 대한 해석적, 실험적 연구는 모드 I 하중 하의 거동에 전적으로 한정되어 왔다. 그러나 다양한 재료의 적용과 복잡한 사용 환경에 의한 요구를 충족시켜야 하는 기계요소나 구조물에는 여러 가지 하중이 결합된 상태가 나타나며, 이로써 혼합모드 하중상태 하에 있는 재료의 피로거동에 관한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 실제로 빈번하게 관찰되는 혼합모드 하중상태는 모드 I 과 모드 II 가 결합된 상태이며, 이 조건에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

혼합모드 I+II 하중상태는 인장하중과 전단하중이 결합된 상태이기 때문에 이 조건 하에서의 피로거동에 관한 연구를 위하여 각 단일모드 하중하의 피로거동에 대한 독립적인 연구가 선행되어

야 한다. 이 중 전단하중 하의 피로파괴거동에 관한 연구와 이해는 모드 I 에 비하여 상당히 부족한 편이다. 모드 II 하중 하의 피로시험에는 초기 균열전단에 순수한 전단하중을 작용시키고, 이를 전파과정 동안 지속적으로 유지시키는데 제약과 실험상의 어려움이 있다. 또한 이에 대한 연구는 사용된 시험편의 특성 때문에 여러 하중모드에 대하여 일관적인 실험을 수행하고, 그 결과를 비교한 것은 드물다. 그래서 본 연구에서는 다양한 하중모드를 조성할 수 있도록 단순인장전단(compact tension shear: CTS) 시험편과 하중장치를 이용하였으며, 피로거동의 실험결과들을 상호 비교함으로써 전단하중 하의 피로거동의 특성을 실험적으로 고찰하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 문제들을 고찰하였다. 첫째, 전단하중을 받는 CTS 시험편에서 초기균열의 상태와 작용하중의 크기변화에 따라 나타나는 피로균열의 발생 및 전파거동의 전반적인 특징을 검토하였다. 둘째, 전단하중 하의 피로균열의 발생거동에 대하여 균열발생 형태, 위치 및 수명 변화 등으로 고찰하였다. 셋째, 전단하중 하에서

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 공학기술연구소
E-mail : icrav215@korea.ac.kr
TEL : (02)928-3608 FAX : (02)921-8532

^{*} 회원, 고려대학교 기계공학과

Table 1 Chemical compositions of SAPH440

Compositions (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.168	0.020	0.810	0.012	0.008

나타나는 피로균열의 전파거동의 특성을 고찰하였다. 넷째, 피로균열의 전파형태, 전파경로 및 그 방향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 KS D 3519 에 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 사용된다. 또한 프레임을 구성하는 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수한 구조용 열간 압연강판이다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 2 에 나타내었다.

2.2 시험편과 하중장치

시험편의 예비균열이나 노치와 같은 초기 균열에 전단하중을 유발하기 위하여 다양한 형태의 시험편과 장치들이 개발되어 사용되었다.⁽²⁾ 모드 II 피로시험에 사용된 다양한 형태의 시험편중 일부를 Fig. 1 에 나타내었다. Jones 와 Chisholm⁽³⁾ 그리고 Pook 과 greenan⁽⁴⁾은 예비균열을 낸 단순 전단 시험편(Fig. 1(a))을 이용하였다. Otsuka 등⁽⁵⁾은 모드

Table 2 Mechanical properties of SAPH440

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

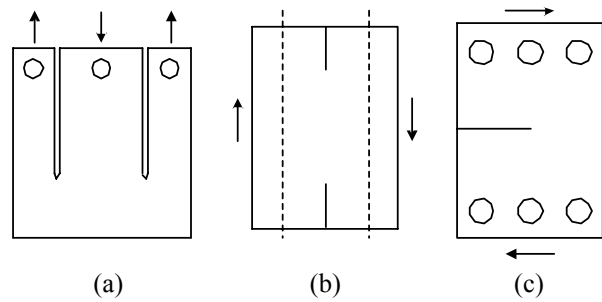


Fig. 1 The specimen used Mode II fatigue tests

II 하중을 받는 양측 노치 시험편(Fig. 1(b))을 사용하였으며, Richard⁽⁶⁾는 단순 전단시험편(Fig. 1(c))과 하중장치를 개발하였다. 다양하게 사용된 시험편과 장치들의 특성으로 인하여, 각각의 시험편을 이용한 전단하중 하의 피로거동에 대한 연구결과는 제한적이다.

본 연구에서는 Richard 와 Benitz⁽⁷⁾의 CTS 시험편과 하중장치를 수정한 모델을 이용하여 피로시험을 수행하였으며, 이로부터 전단하중 하의 피로거동의 특성을 고찰하였다. 시험편과 하중장치의 형상과 치수 그리고 초기 균열의 상태와 각 조건에 따른 좌표계는 Fig. 2 에 나타낸 것과 같다. 수정 CTS 시험편은 전단하중 성분이 현저히 크게 작용하는 실험에서 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 수정되었다.

하중모드 사이의 비교를 위하여 모드 I 과 모드

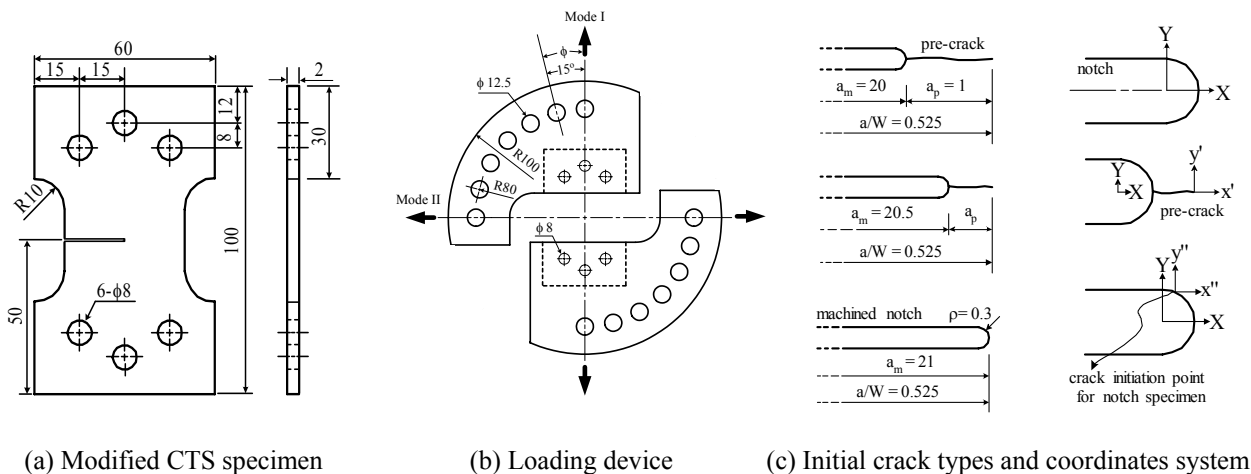


Fig. 2 The specimen, loading device, various initial crack types and coordinates systems

Table 3 Experimental condition

Specimen Type	a_p (mm)	Loading Type	P_{max} (kN)
Pre-crack	1.0	Mode I	3.6
		Mixed mode I+II	
	Mode II	3.6, 6.0	
	0.5	Mode II	4.8, 6.0, 7.2
Notch	0	Mode I	3.6, 4.4, 4.8
		Mode II	

a_p : fatigue pre-crack length

II의 하중상태는 하중장치를 이용하여 조성되었다. 하중장치는 Richard와 Benitz⁽⁷⁾의 모델을 기본으로 제작된 것이다. 하중장치의 하중작용각도(θ)를 변화시킴으로써 여러 하중모드의 조성이 가능하며, 하중작용각도가 0° 인 경우는 모드 I의 하중상태를 나타내고, 90° 인 경우는 모드 II의 하중상태를 나타낸다(Fig. 2(b)).

2.3 실험방법

실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축 피로시험기인 Instron 1331이다. 피로하중의 형태는 일정진폭의 인장-인장상태이고, 응력비는 0.5이며, 주파수의 크기와 파형은 10 Hz와 sine 파형이다. 최대 작용하중(P_{max})의 크기는 모드 II 형태의 전단하중 하에서 안정적이고 지속적인 균열의 전파를 유도할 수 있는가의 여부에 초점을 두어 Table 3과 같이 설정되었다.

피로균열의 측정에는 균열이미지 캡처링 시스템을 사용하였다. 피로균열의 길이와 전파위치는 Fig. 2(c)와 같이 각각의 조건에 따라 좌표계를 설정하여 측정되었다. 피로균열의 전파속도는 7점 증분다항법⁽⁸⁾(seven point incremental polynomial method)을 사용하여 계산되었다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수 K_I 와 K_{II} 는 Richard와 Benitz⁽⁹⁾가 제안한 식을 이용하여 계산하였다. 혼합모드 하중 하에서 피로균열은 초기 균열에 대하여 임의 각도로 편향하여 전파하기 때문에 초기 균열선 상에 위치하지 않는 균열에 대한 평가가 필요하다. 이는 전파균열을 기준좌표평면의 x축에 회전시킨 실제 균열길이와 유효하중작용각도(θ_{eff})를 적용하는 방법을 사용하였다.

균열전파속도의 평가에는 모드 I과 모드 II의 응력확대계수 K_I 와 K_{II} 를 조합한 유효응력확대계수(K_{eff})를 도입하였으며, ΔK_{eff} 는 Tanaka⁽¹⁰⁾가 제안한 식 (1)을 이용하였다.

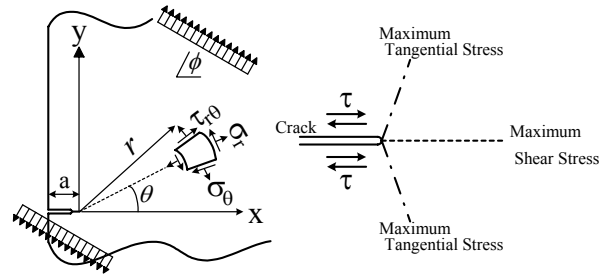


Fig. 3 Stress components near the crack tip and the maximum value of K_σ and K_τ in shear load

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

2.4 균열성장방향의 이론적 예측

혼합모드 하중에 대하여 균열전단의 응력장은 아래와 같이 식 (2)로 표현된다.

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

r 이 0에 접근함에 따라 인장응력과 전단응력은 무한대에 이르고, 이는 θ 방향으로 성장을 시작하는 분기균열에 대하여 일반화된 인장 및 전단응력 확대계수 K_σ 와 K_τ 로 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

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

혼합모드 하중 하에서 균열은 K_σ 또는 K_τ 가 최대값이 되는 θ 방향으로 성장한다고 각각 가정할 때, 특히 순수 전단하중의 경우 Fig. 3과 같이 K_σ 가 최대가 되는 70.5° 방향이나 K_τ 가 최대가 되는 0° 방향으로 균열의 성장이 일어날 것이라고 예측할 수 있다. 이를 각각 인장모드성장(tensile mode growth)과 전단모드성장(shear mode growth)이라고 한다.

3. 실험결과

3.1 전단하중 하의 피로균열 거동형태의 특징

본 절에서는 전단하중을 받는 CTS 시험편에서 관찰된 피로균열의 거동형태에 대한 특징을 검토

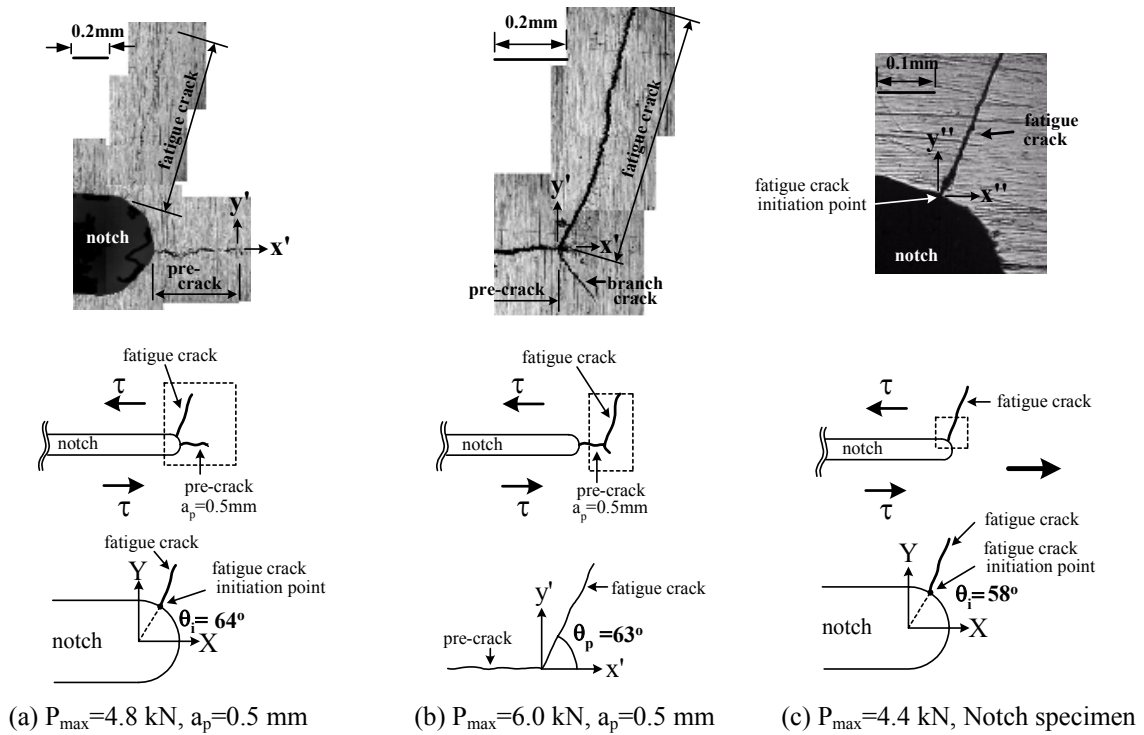


Fig. 4 Aspect of crack propagation under shear loading in various initial crack conditions

하였다. Fig. 2 (c)와 같이 세 종류의 시험편에 대하여 모드 II 전단하중 하의 피로시험이 수행되었다. CTS 시험편을 이용한 전단하중 하에서의 피로시험에서 관찰된 피로균열의 거동은 Fig. 4 와 같이 나타났으며, 이를 초기 균열의 상태와 작용하중의 크기에 따라 다음과 같이 정리할 수 있다.

예비균열 시험편의 경우, 전단하중 하의 피로균열은 저하중에서는 예비균열에서 약간의 균열이 분기 전파하다가 정지된 후 제 2 균열이 노치선단의 한 점에서 발생하여 주균열로 전파하였다(Fig. 4(a)). 반면, 고하중하에서는 예비균열의 선단에서 양방향으로 분기 전파한 후 그 중 한 방향으로 지속적인 성장을 하였다(Fig. 4(b)). 노치시험편의 경우 피로균열은 노치의 반경 중심을 기준으로 일정한 지점에서 최초 발생한 후 지속적으로 전파하였다(Fig. 4(c)).

크게 두 가지 형태의 초기 균열에 대하여 전단하중을 작용시킨 결과 두 경우 모두 피로균열은 인장모드성장(tensile mode growth)을 보였다. 전단모드성장(shear mode growth)은 나타나지 않았다. 또한 예비균열의 선단이 아닌 노치에서 제 2의 균열이 발생하여 인장모드의 성장을 하였다. 이는 Jones 와 Chisholm⁽³⁾의 시험편을 이용한 Pook⁽⁴⁾의 연구결과와도 일치하는 것으로 초기균열의 형태, 작용하중의 크기를 변화시킨 실험조건에 대해서도 전단모드성장의 균열거동은 관찰되지 않았다. 예

비균열 시험편의 경우 예비균열면의 마멸, 예비균열 전방의 저항 및 작용하중의 크기에 따라 균열의 전파양상에 차이를 보였다. 특히 피로예비균열의 가공이 중요하게 나타났으며, 이와 관련한 예비균열면의 마찰과 마멸에 의한 균열 정지에 대해서 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

3.2 전단하중 하의 피로균열의 발생거동

본 절부터 고찰대상은 노치시험편과 예비균열 선단에서 지속적인 주피로균열이 전파하는 경우 즉, 노치선단에서 제 2의 새로운 피로균열이 발생하지 않는 예비균열 시험편으로 제한하여 설정하였다. 각 시험편의 조건에 따라 피로균열의 발생양상 및 발생수명에 대하여 검토하였다.

예비균열 시험편에 대한 저하중 조건과 노치시험편의 경우 전단하중 하에서 주피로균열은 Fig. 2(c)의 X-Y 좌표계에 대하여 $\theta_i \approx 58^\circ \sim 64^\circ$ 의 일정한 영역의 지점에서 발생하였다. 발생수명은 피로균열이 노치선단과 예비균열로부터 각각 0.1 mm 전파하였을 때의 하중반복수로 설정하여 Fig. 5 에 원형심볼로 표시하였다. 전단하중 하의 발생수명은 하중모드의 영향으로 인하여 모드 I 보다 길게 나타났다. 하지만, 노치시험편의 경우, 작용하중의 증가에 따른 발생수명은 전단하중의 경우에 현저하게 감소하는 것으로 나타났으나 고하중하에서의 모드별 발생수명의 차이는 크지 않았다.

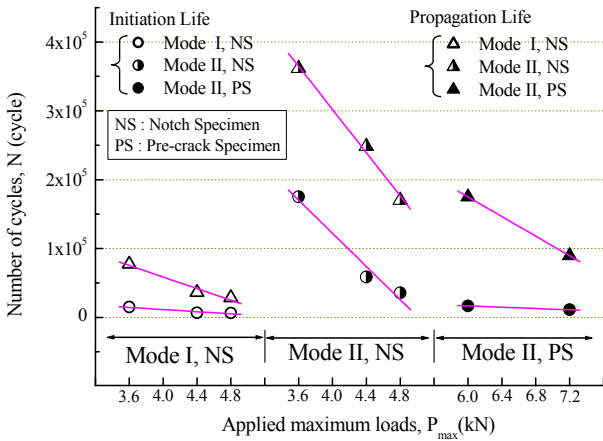


Fig. 5 The fatigue life with various conditions

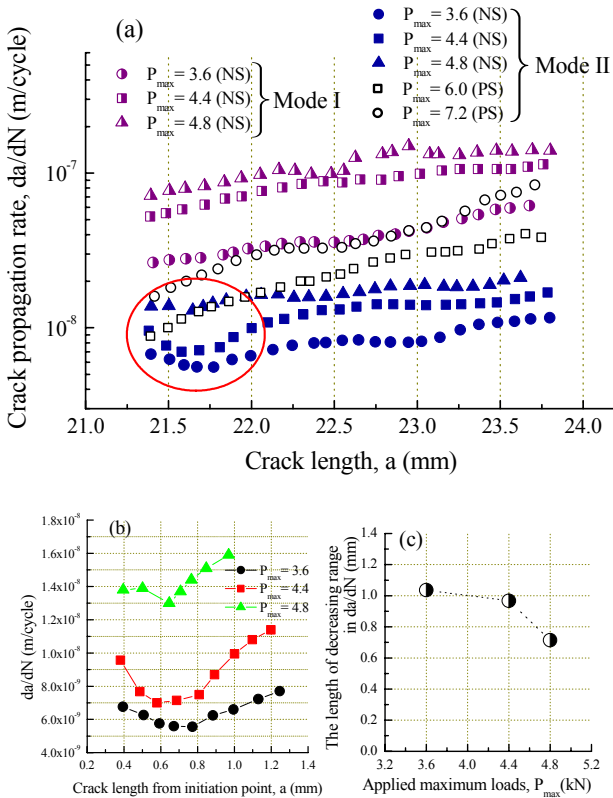


Fig. 6 The da/dN with variation of P_{max}

3.3 전단하중 하의 피로균열의 전파거동

본 절에서는 전단하중 하에서 관찰된 피로균열의 전파거동에 관하여 고찰하고자 한다. 피로균열이 3 mm 까지 전파하였을 때의 하중반복수를 피로균열의 전파수명으로 설정하여 비교하였다. 또한 피로균열의 전파속도와 전파경로의 방향에 대해서도 고찰하였다.

작용하중의 증가에 따른 전파수명의 변화는 발생단계와 비교하여 볼 때 모드 I의 경우 감소가 두드러져 발생수명과의 차이가 크지 않은 것으로

나타났다. 이와 같이 전파단계에서도 인장하중 모드에 의한 영향이 전단하중 모드보다 더 크게 나타났다. 또한 예비균열 시험편의 경우 작용하중의 증가에 따른 전파수명의 감소는 노치시험편의 경우와 유사하게 나타났다. 이것은 발생단계와 비교되는 것으로 예비균열선단에서 분기균열을 전파시킬 만큼 충분한 전단하중이 작용하였지만 여전히 전파과정에는 전단하중에 의한 균열진전력의 감소가 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 균열길이의 증가에 따른 균열의 전파속도를 하중모드와 시험편의 상태에 따라 나타낸 것이다. 피로균열의 전파속도는 작용하중의 모드와 하중의 크기변화에 따라서 일정한 차이를 보이고 있다(Fig. 7(a)). 특히, 노치 시험편에서의 경우, 주목해야 할 점은 노치선단으로부터 전파하는 균열의 초기 전파속도가 감소하는 것이다. Fig. 7(b)는 전파속도의 감소현상이 나타나는 지연구간 내의 전파속도변화를 확대하여 나타낸 것이다. 여기서 지연구간은 균열이 전파함에 따라 감소하였던 전파속도가 다시 최초의 전파속도를 회복하는 구간에 해당하는 균열의 길이를 의미한다. 초기 균열의 전파속도에 영향을 미치는 정도를 비교하기 위하여 작용하중의 크기변화에 따른 지연구간의 크기가 비교되었다(Fig. 7(c)). 초기 전파속도의 지연현상은 작용하중의 증가에 따라 최소 전파속도까지의 감소율에는 일정한 변화를 보이지 않지만, 지연구간은 점차 줄어들었다.

이러한 결과는 초기 균열이 노치인 경우에도 응력집중에 의하여 노치선단의 한 점에서 균열이 발생하였지만, 전단하중 하의 전파과정에서 피로균열이 전단하중의 특성에 따라 초기에 발생한 균열면의 마찰을 피할 수 없으며, 그 영향이 초기 전파속도의 감소로 나타났음을 확인시켜준다.

고하중 하의 예비균열 시험편에서는 전파속도의 지연구간이 나타나지 않고 지속적으로 전파하였다. 하지만 6.0 kN 조건의 초기 전파속도가 노치 시험편의 4.8 kN일 때의 것과 비교하여 작은 것은 예비균열면에 대한 마찰의 영향이 균열의 발생 또는 전파의 초기단계에서 이미 작용된 후에 피로균열의 전파가 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 전단하중 하의 피로균열의 전파형태

본 절에서는 전단하중 하의 피로균열의 전파경로와 전파각도의 변화에 대하여 고찰하였다. Fig. 7은 초기 균열상태에 따라 Fig. 2(c)에 나타낸 것처럼 x'-y'와 x''-y'' 좌표계를 설정하여 이를 기준으로 피로균열의 전파형태를 표시한 것이다.

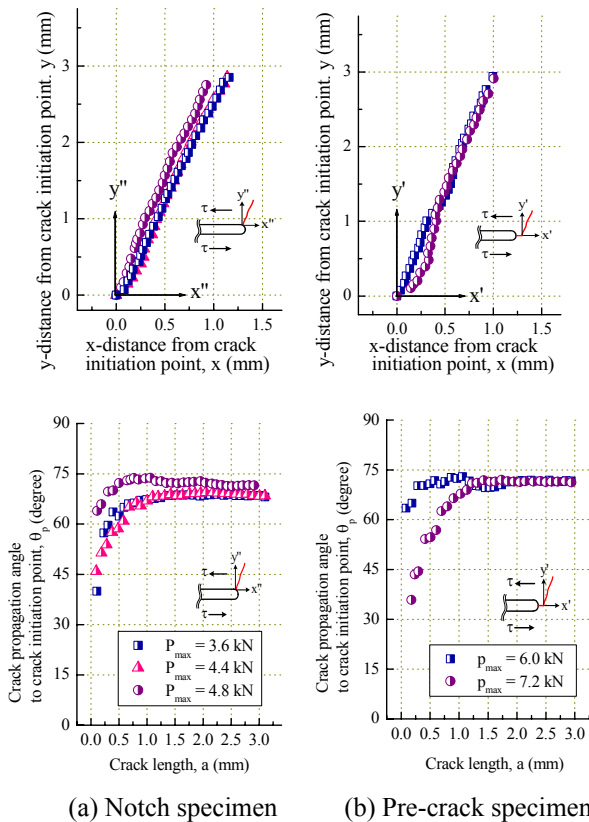


Fig. 7 The variation of crack propagation paths and angles with crack length

CTS 시험편에서 전단하중 하의 피로균열은 초기 균열의 상태와 관계없이 전단모드 형태의 성장을 나타내지 않았으며, 인장모드 형태의 성장만이 관찰되었다. 그러므로 초기 균열선상으로부터 편향된 각도의 방향으로 전파하였으며, 노치와 예비균열선단에서 각각 초기 균열선에 대하여 전파구간별의 차이는 있지만 $\theta_p \approx 65^\circ \sim 72^\circ$ 의 평균각도를 이루어 전파하였다. 그러나 작용하중의 증가나 초기 균열상태에 따른 전파경로의 차이는 거의 나타나지 않았다. 두 시험편 모두에서 균열길이가 1 mm 이내에서는 전파각도의 변화가 컸지만, 그 이상 전파한 후에는 일정한 경로가 유지되었다. 초기분산은 전단하중의 작용특성과 함께 노치나 예비균열선단의 조직 등에 의한 영향도 나타난 것으로 생각된다. 균열길이가 1 mm 이상 전파하여 일정한 경로가 유지되었을 때 각 전파각도의 평균값은 노치 시험편의 경우 약 70° , 예비균열 시험편의 경우 약 71° 였다. 초기 균열상태, 작용하중의 크기와 같은 인자들은 거시적인 균열전파경로에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 이는 응력비의 변화에 의한 작용하중의 크기변화가 균열의 전파경로에 영향을 미치지 않는다는 보고⁽¹²⁾와도 상응하는 결과이다.

4. 결론

본 논문에서는 CTS 시험편을 이용하여 전단하중 하의 피로균열 전파실험을 통하여 피로균열의 거동에 대한 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전단하중 하의 피로균열 전파시험에서 피로균열의 성장은 인장모드형태만이 관찰되었다.
- (2) 예비균열 시험편의 경우, 저하중의 전단하중 하에서 피로균열은 노치선단의 한 점으로부터 제 2 균열이 발생하여 주균열로 전파하였다.
- (3) 전단하중을 받는 노치시험편에서 피로균열의 전파속도는 균열이 전파하는 초기구간에서 감소하였다가 회복하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 하중크기에 따라 마찰표면에서의 마멸 정도의 심각성과 균열진전력의 크기 정도에 따라 차이가 나는 것으로 판단된다.
- (4) 전단하중 하에서 피로균열은 초기 균열에 대하여 약 70° 의 평균각도를 유지하며 전파하였으며, 초기 균열의 상태, 작용하중의 크기변화에 의한 영향을 받지 않는다.

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) Liu, H. W., 1985, "Shear Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*, Vol. 8, pp. 295~313.
- (3) 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.
- (4) Pook, L. P. and Greenan, A. F., 1979, "Fatigue Crack Growth Threshold in Mild Steel Under Combined Loading," *ASTM STP 677*, pp. 23~35.
- (5) 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.
- (6) Richard, H. A., 1981, "A New Compact Shear Specimen," *International Journal of Fracture*, Vol. 17, pp. R105~R107.
- (7) 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.
- (8) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 565~601.

이하 참고문헌 생략