

## 전단하중의 크기가 모드 II 분기균열의 형성과 전파에 미치는 영향

이정무\* (고려대 공학기술연구소), 송삼홍 (고려대 기계공학과)

Effects by the Magnitude of Shear Load  
on the Formation and Propagation of Mode II Branch Cracks

J. M. Lee (Research Institute of Engineering & Technology, KU) and S. H. Song (Mechanical Eng. Dept., KU)

### ABSTRACT

In this paper, we investigated the characteristics of initiation and propagation behavior for fatigue crack observed by changing various shapes of initial crack and magnitudes of loading in modified compact tension shear (CTS) specimen subjected to shear loading. In the low-loading condition, the secondary fatigue crack was created in the notch root due to friction on the pre-crack face grew to a main crack. In the high-loading condition, fatigue crack under shear loading propagated branching from the pre-crack tip. Influenced by the shear 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. The propagation path of fatigue crack under the Mode II loading was 70 degree angle from the initial crack regardless of its shape and load magnitude.

**Key Words :** Shear Load (전단하중), Mode II (모드 II), Tensile Mode Growth (인장모드성장), Shear Mode Growth (전단모드성장), Compact Tension Shear Specimen (단순 인장 전단 시험편), Branch crack (분기균열)

### 1. 서론

재료의 피로 파괴거동에 대한 연구는 모드 I 하중 하의 거동으로 한정되어왔다. 하지만 다양한 재료의 적용과 복잡한 사용환경에 의한 특성 및 요구조건을 충족시켜야 하는 기계요소나 구조물은 여러 가지의 하중 형태와 그의 결합에 의한 다축 또는 혼합모드 하중상태 하에서 운용된다. 복잡한 결합 하중 상태 중에서 인장과 전단하중이 조합된 하중을 받는 재료의 피로 파괴거동에 관한 다양한 연구의 수행은 점차 증가하고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

모드 I 과 모드 II 하중이 결합된 조건 하에서의 피로거동에 관한 연구는 각 단일모드 하중 하의 피로거동에 대한 독립적인 연구가 선행되어야 하지만 이 중 전단하중 하의 재료의 거동에 관한 연구와 이해는 인장하중 조건 비하여 상대적으로 부족한 편이다. 이는 전단하중 하의 피로시험에서 초기균열선단에 순수 전단하중을 작용시키고, 이를 전파

과정 동안 지속적으로 유지시키기 어려운 실험상의 문제와도 관련이 있다. 또한 사용된 시험편의 기하학적 특성에 의한 영향 등으로 여러 하중모드에 대하여 일관적인 실험을 수행하고, 그 결과를 비교하기 어렵기 때문이기도 하다.

본 연구에서는 수정 단순 인장 전단(modified compact tension shear: CTS) 시험편과 하중장치를 이용하여 인장 및 전단하중 하에서 나타나는 피로균열의 발생, 전파거동의 특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 초기균열의 형태와 작용하중의 크기 변화에 따라 관찰되는 문제들을 고찰하였다. 첫째, 전단하중 하에서 실험인자의 변화에 따른 피로균열의 발생 및 전파거동의 전반적인 특징을 검토하였다. 둘째, 피로균열의 발생거동에 대하여 균열발생 형태, 위치 및 수명변화와 전파거동에서 나타나는 전파지연의 특성을 고찰하였다. 셋째, 피로균열의 전파형태, 전파경로 및 그 방향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

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	Micro Vickers Hardness	Elongation
MPa	MPa	Hv	%
302	440	214	44

Table 3 Experimental condition

Specimen Type	$a_p$ (mm)	Loading Type	$P_{max}$ (kN)
Pre-crack (PS)	1.0	Mode I	3.6
		Mode II	3.6, 6.0
Notch (NS)	0	Mode I	3.6, 4.4, 4.8
		Mode II	

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 KS D 3519 에 규정된 자동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이는 주로 자동차의 차체 프레임에 사용되며, 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 에 나타난 것과 같다.

### 2.2 작용모드 변화를 위한 시험편과 하중장치

모드 II 전단하중 하에서 균열의 피로거동에 관한 연구의 수행은 다양한 시험편과 장치들의 특성을 고려해야 하므로 제한적이다. 본 실험에서는 Richard 와 Benitz<sup>(2)</sup>가 제안한 CTS 시험편과 하중장치를 수정한 모델을 이용하여 전단하중 하의 피로 시험을 수행하였다. 작용모드의 변화가 가능하도록 하중장치에 시험편을 장착한 형태는 Fig. 1 과 같다.

모드 I 과 모드 II 하중의 조절은 CTS 시험편의 축과 작용 하중축이 이루는 하중작용각도(loading application angle,  $\theta$ )로 조절하였으며, 모드 I 은  $\theta=0^\circ$ , 모드 II 는  $\theta=90^\circ$ 이다.

### 2.3 실험장치 및 방법

피로시험기는 INSTRON 1331 이며, 시험은 인장-인장상태의 일정진폭 하중 하에서 수행되었다. 응

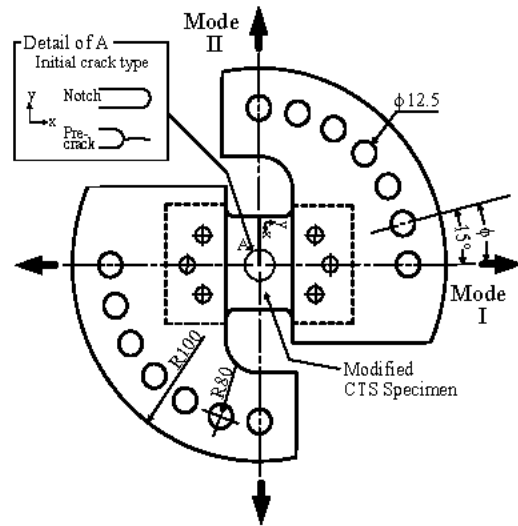


Fig. 1 Modified CTS specimen and Loading device

력비(R)는 0.5 이며, 주파수의 크기와 파형은 10 Hz 와 sine 파형이다. 실험변수 중 최대 작용하중( $P_{max}$ )의 크기는 모드 II 형태의 전단하중 하에서 지속적인 균열의 전파를 유도할 수 있는가의 여부에 중점을 두어 Table 3 과 같이 설정하였다.

혼합모드 피로균열의 측정용 균열이미지 캡처링 시스템을 사용하였으며, 피로균열의 길이와 전파위치의 기준은 Fig. 2 (a)의 좌표계를 기준으로 측정하였다. 피로균열의 전파속도는 7 점 증분 다항법으로 계산하였다. 혼합모드 하중의 응력확대계수  $K_I$  과  $K_{II}$  에 대한 식은 Richard 와 Benitz<sup>(3)</sup>가 제안한 식을 사용하였다. 피로균열 전파속도의 평가에는  $K_I$  과  $K_{II}$  를 조합한 유효응력확대계수,  $K_{eff}$  를 도입하였으며, 이는 Tanaka<sup>(4)</sup>가 제안한 식을 이용하여 산출하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 균열의 피로거동 양상

본 절에서는 전단하중을 받는 피로균열의 거동 형태에 대하여 전반적인 특징을 검토하였다. 초기 균열의 형태(예비균열과 원형노치)와 작용 하중의 크기를 변화시키면서 얻은 피로균열의 거동양상은 Fig. 2 의 (b)~(e)에 나타난 것과 같다.

예비균열 시험편의 경우, 저하중 영역에서 피로 균열은 예비균열선단에서 양방향으로 분기 전파를 하다가 정지한 후 제 2 균열이 원형노치의 선단에서 발생하여 주균열로 성장, 전파하였다. 주균열로 성장한 제 2 균열은 초기균열선에 대하여 편향하여 전파하였다. 고하중 영역에서는 예비균열선단에서 양방향으로 분기 전파한 후 그 중에서 한 균열이 주균열로 성장하면서 지속적으로 전파하는 것으로 나

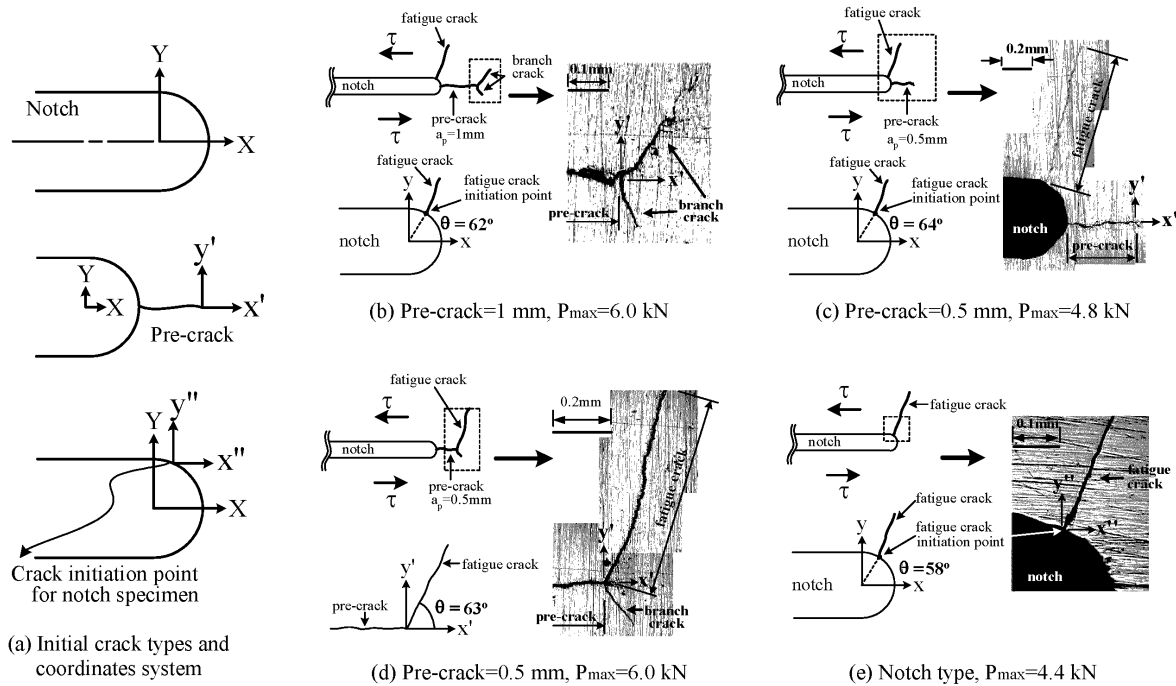


Fig. 2 Aspect of behavior for crack initiation and propagation under shear loading in various experimental condition

타났다. 원형노치 시험편의 경우 피로균열은 작용하중의 크기에 관계없이 원형노치의 한 점에서 발생하여 주균열로 성장, 전파하여 나갔다. 이는 예비균열 시험편의 저하중 영역에서 나타나는 제 2 균열의 발생 및 전파양상과 유사하다.

상기의 거동양상을 초기균열 형태의 관점에서 정리하면, 예비균열과 원형노치 시험편의 경우 모두 피로균열은 초기 균열선과 일치하여 나란하게 전파하는 형태인 전단모드성장(shear mode growth)은 보이지 않았으며, 초기 균열선에 대하여 약 70°의 분기각도를 보이는 방향으로 편향하여 전파하는 인장모드성장(tensile mode growth)의 양상을 보였다.

작용하중 크기의 관점에서 정리하면, 저하중 영역에서 피로균열은 초기균열의 형태에 관계없이 원형노치의 반경선단의 위치에서 발생하여 전파하는 반면, 고하중 영역에서는 예비균열의 선단에서 분기 전파하였다.

전단하중을 받는 시험편에서 피로균열은 작용하중이 예비균열면의 마찰과 예비균열 전방에서의 저항을 극복하기에 충분한 균열진전력을 갖는 경우 예비균열 선단에서 분기하여 지속적인 전파를 하지만 그렇지 못한 경우는 노치의 형상에 따라 응력집중점에서 새로운 균열이 발생하여 주균열로 성장, 전파하는 것으로 나타났다. 또한 전파하는 피로균열의 모드형태는 최대 법선 응력선 상으로 전파하는 인장모드성장만이 관찰되었다.

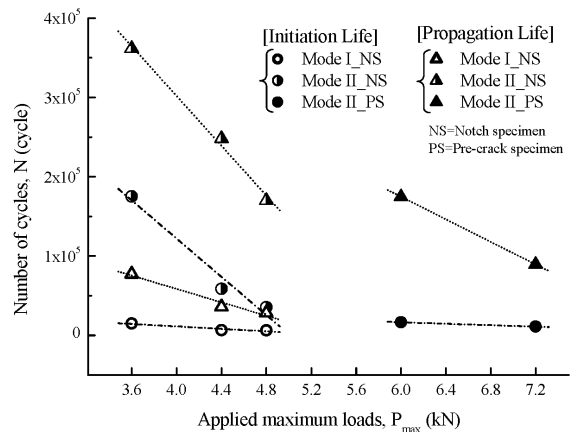


Fig. 3 The variation of fatigue life in each case

### 3.2 피로균열의 발생 및 전파거동의 특징

본 절에서는 제 2 균열이 발생하지 않고 피로균열이 지속적인 전파거동을 보인 실험조건의 균열거동 양상 및 특징에 대하여 고찰하고자 한다.

각 실험조건에 대해서 발생 및 전파수명을 비교함으로써 초기균열의 형태와 작용하중 크기의 영향을 고찰하였다. 발생 및 전파수명은 각각 균열길이가 0.1 mm와 3 mm 전파하였을 때의 하중반복수로 설정하여 Fig. 3에 나타내었다.

저하중 영역에서 발생수명은 모드 II 하중의 크기 변화에 민감한 반면, 전파수명의 경우는 모드 I

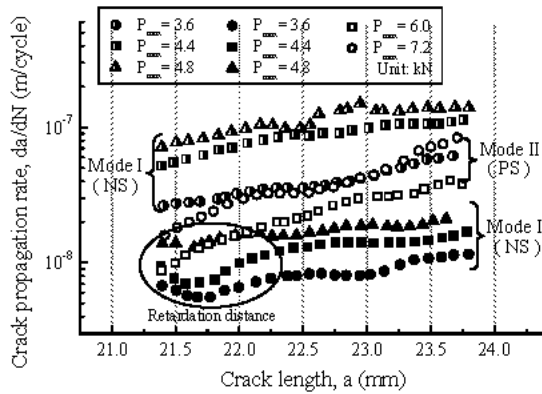


Fig. 4 The crack propagation behavior in each case

하중 하에서 작용하중의 증가가 전파속도의 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

고하중 영역에서 작용하중의 증가에 따른 발생 수명의 감소는 크지 않았으며, 전파수명의 감소는 노치시험편의 경우와 유사하게 나타났다. 이것은 고하중 하에서 분기균열을 전파시킬 만큼 전단하중이 충분한 균열진전력을 갖기 때문으로 생각된다. 결과적으로 저하중의 경우 수명에 미치는 전단하중의 영향이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

전단하중을 받는 피로균열의 전파거동에서 주목할 점은 노치선단의 응력집중부위로부터 발생, 전파하는 균열의 초기 전파속도에 지연구간이 나타나고 있는 점이다. 이러한 지연구간의 출현은 작용하중의 크기가 증가함에 따라 점차 감소하다 사라질 것으로 추정할 수 있다. 이러한 결과는 응력집중에 의하여 노치선단의 한 점에서 균열이 발생하였지만, 전단하중 하의 전파과정에서 전단하중의 작용특성에 따라 초기에 발생한 균열면의 마찰을 피할 수 없으며, 그로 인한 영향이 초기 전파속도의 감소로 나타나고 있음을 알 수 있다.

고하중 하에서 피로균열은 초기균열면 마찰의 영향을 받지만 전파과정에서 모두 소멸되고 있다. 이는 마찰영향이 균열의 발생과 전파의 초기단계에서 이미 작용된 후에 피로균열의 전파가 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 피로균열의 분기 전파 방향

본 절에서는 전단하중 하의 피로균열의 전파형태와 그 경로에 대하여 고찰하였다. 피로균열이 지속적으로 전파한 경우에 대하여 균열의 발생점을 기준으로 하는 전파경로는 Fig. 5 와 같다.

수정 CTS 시험편에서 전단하중 하의 피로균열은 초기균열의 상태와 관계없이 전단모드 형태의 성장을 나타내지 않았으며, 인장모드 형태의 성장만이 관찰되었다. 그러므로 초기 균열선상으로부터

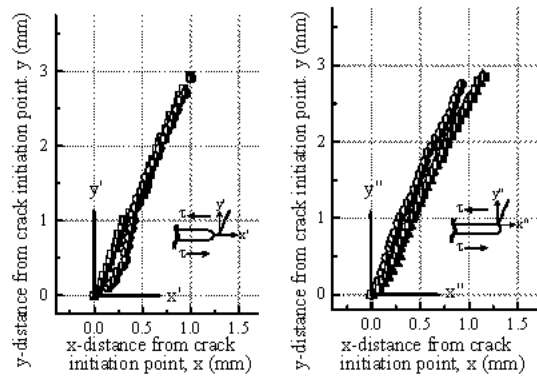


Fig. 5 The crack propagation paths in shear loads

편향된 각도의 방향으로 전파하였으며, 노치와 예비균열선단에서 약 65°~72°의 평균각도를 이루어 전파하였다. 그러나 초기균열 상태의 변화나 작용하중의 증가에 따른 전파경로의 차이는 거의 나타나지 않았다. 본 실험과 같은 인자들은 발생 및 전파 거동에는 영향력을 크게 나타내지만 거시적인 균열 전파경로에 대해서는 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서 전단하중의 크기가 모드 II 분기균열의 형성과 전파에 미치는 영향은 다음과 같다.

(1) 작용하중 크기의 관점에서 정리하면, 저하중 영역에서 피로균열은 초기균열의 형태에 관계없이 원형노치의 반경선단의 위치에서 발생하여 전파하는 반면, 고하중 영역에서는 예비균열의 선단에서의 분기 전파가 가능하였다.

(2) 수명에 미치는 전단하중의 영향은 저하중의 경우에 더 크게 나타나며, 이 때 균열면 마찰에 의한 전파속도의 지연구간이 나타남을 알 수 있었다.

(3) 피로균열은 인장모드형태의 전파를 하였으며, 작용하중의 크기, 초기균열선단의 상태와 관계없이 작용하중의 특성에 대한 영향만을 받았다.

## 참고문헌

1. Qian, J. and Fatemi, A., "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 55, No. 6, pp. 969 - 990, 1996.
2. Richard, H. A. and Benitz, K., "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *Int. J. Fract.*, Vol. 22, pp. R55 - R58, 1983.

이하 참고문헌 생략