

다단계 하중방향 변화에 의한 피로균열 전파거동에서의 모드 II 영향

홍석표*(고려대 대학원 기계공학과), 송삼홍(고려대 기계공학과)

Effect of Mode II in The Fatigue Crack Propagation Behavior by Variation of Multilevel Loading Direction

S. P. Hong(Mecha. Eng. Dept. Graduate School Korea Univ.), S. H. Song(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.)

ABSTRACT

In this study, the effect of mode II by variation of multilevel loading direction was experimentally investigated in the fatigue crack propagation behavior. To generate mixed-mode I+II loading state, the compact tension shear(CTS) specimen and loading device were used in this tests. The experimental method divided into three steps and three cases that were step I(0°), step II(30°, 60°, 90°), step III(0°) and case I(0° ⇒ 30° ⇒ 0°), case II(0° ⇒ 60° ⇒ 0°), case III(0° ⇒ 90° ⇒ 0°). The result of test, the step II affected to the step III in the all case. Specially, The fatigue crack propagation rate was faster and the fatigue life was smaller than of mixed mode I+II(30°, 60°) due to the effect of mode II in the step III of the case III

Key Words : Mixed-mode Loading(혼합모드 하중), Multilevel Loading(다단계 하중), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열 전진율), Fatigue Life(피로 수명)

1. 서론

실제 사용중인 기계나 기계구조물은 다양한 환경 및 복잡한 설계조건으로 인하여 다양한 조건의 여러 하중상태가 결합된 상태이며, 지속적으로 변동하므로 변동하중 하에서의 피로수명에 대한 연구가 중요하게 다루어져 왔다. 그리고 변동하중과 다축에서 작용하는 혼합모드 하중 상태등 여러 가지 복잡한 원인에 의해 발생하는 하중작용과 다양한 기하학적 형상을 요구하는 설계조건에 의하여 혼합모드 하중하의 피로거동에 대한 관심은 더욱 증가하고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 그러므로 실제 운전 중인 구조물내의 요소는 다양한 기하학적 형상과 그것의 배치 상태를 요구 받고 있으며, 혼합모드 및 변동하중의 피로 환경에 의해 복합적으로 놓이게 되므로 이의 실험적 모델에 대한 새로운 설정과 연구가 필요하다고 생각된다. 하지만, 하중모드의 측면에서 순수 모드 I 하중상태 하에서의 연구는 활발히 이루어졌으나, 실제 구조물에서 대부분 발생하는 혼합모드 하중상태 하에서의 연구는 아직

부족한 실정이다. 또한 기계구조물내의 많은 성분 요소에 존재하는 균열은 작용 하중 방향에 수직적이지 않게 되며, 초기 균열의 균열선상에서 성장하지 않는다. 그러므로 혼합모드 조건 하에서의 피로 거동에 관한 연구가 매우 중요하다.

혼합모드 하중 하에서 균열이 발생, 전파하면 균열전파단계(Stage II)에서는 모드 II 성분이 작용하지만 모드 I 성분의 영향이 지배적인 상태에서 전파하게 된다.⁽²⁾ 또한 일반적인 실험에 의해 모드 II 하중의 영향에 대한 고찰은 어려운 편이다. 따라서, 본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중 하에서 모드 II 하중의 영향과 모드 II 하중 이후의 모드 I 상태의 피로균열 전파거동을 통해 모드 II 의 영향을 파악할 수 있도록 하중작용 방향을 순차적으로 변화시킴으로써 다단계 하중(Multilevel Loading) 상태의 실험조건을 통해서 순수 모드 I 상태에서의 피로 균열 전파 거동과 다단계 하중에 의한 혼합모드 I+II 와 모드 II 상태에서의 피로 균열 전파 거동을 비교함으로써 모드 II가 피로 균열 전파 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 KS D 3519 에 규정된 자동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이는 주로 차체 하부구조의 강도를 유지하는 자동차의 프레임 및 차체와 차륜의 상하방향 지지와 강성을 유지하는 현가장치의 상하 암에 사용되며, 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 와 같다.

2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 모드 I 과 혼합모드 I+II 하중상태 하에서의 피로 하한계에 대한 고찰을 위하여 필요한 하중모드의 변화가 용이하도록 수정 단순인장전단(Modified Compact Tension Shear : CTS) 시험편과 하중장치를 사용하였다. 이와 같은 CTS 시험편과 하중장치의 치수와 형상은 Fig. 1, 2 와 같다. 시험편은 Richard 와 Benitz⁽³⁾의 모델을 기본으로 하여 제작된 것으로 높은 혼합비의 실험시 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 하중장치와의 체결부와 노치가 가공되는 평행부가 수정되었다. 하중장치를 이용하여 균열선단에 작용하는 하중의 방향을 변화시킴으로써 인장하중과 전단하중의 작용비율을 조절하여 작용모드를 변화시켰다. 하중작용각도(θ)가 0° 인 경우는 모드 I 인 상태를, 90° 인 경우는 모드 II 인 상태를 나타낸다. 이 두 하중작용각도 사이의 경우는 인장하중과 전단하중이 함께 작용하는 혼합모드 I+II 의 하중상태를 나타낸다.

2.3 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로 시험기인 Instron 1331 이다. 피로하중의 형태는 일정 진폭의 인장-인장하중상태이고, 응력비는 0.5 이며, 주파수의 크기는 10 Hz 이고, 주파수의 파형은 sine 파형이다. 피로 균열의 측정은 균열 이미징 캡처링 시스템을 사용하였다. 하중작용모드는 하중장치의 하중작용각도(θ)를 조절하여 변화시켰다 (모드 I : 0° , 혼합모드 I+II : $30^\circ, 60^\circ$, 모드 II : 90°). 실험조건은 응력비 R 값을 0.5 로 고정하고 하중작용각도를 (i) $0^\circ \Rightarrow 30^\circ \Rightarrow 0^\circ$, (ii) $0^\circ \Rightarrow 60^\circ \Rightarrow 0^\circ$, (iii) $0^\circ \Rightarrow 90^\circ \Rightarrow 0^\circ$ 와 같이 순수 모드 I 상태인 (0°)에서 혼합모드 I+II 상태인 ($30^\circ, 60^\circ$)와 모드 II 상태인 (90°)로 각각 4×10^4 cycle 동안 변화시키고 다시 모드 I 상태로 실험을 수행하였다. 이와 같은 다단계 하중 방향 변화는 Table 3 과 Fig. 3 에 나타내었다.

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

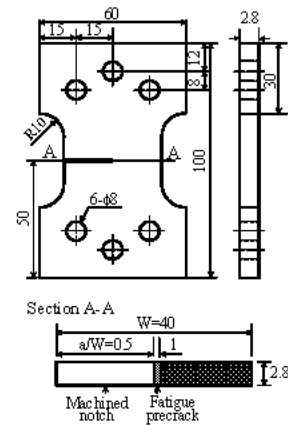


Fig. 1 Configuration of modified CTS specimen

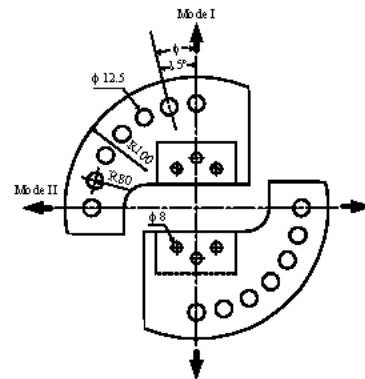


Fig. 2 Configuration of modified loading device

Table 3 Variation of Multilevel loading direction

	Step I	Step II	Step III
Case I	0°	30°	0°
Case II	0°	60°	0°
Case III	0°	90°	0°

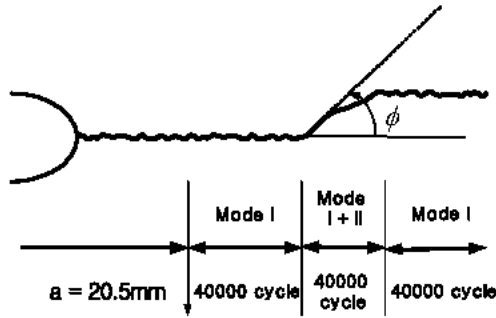


Fig. 3 Variation of Multilevel loading direction

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다단계 하중 작용 방향의 변화에 의한 Step III에서의 피로균열 전파거동

본 절에서는 각각의 Case 에 대한 Step 를 비교 함으로써 혼합모드 I+II 와 모드 II 하중상태 이후에 작용하는 모드 I 의 피로균열 전파속도를 통하여 피로균열 전파거동에서의 모드 II 의 영향을 검토하였다. Fig.4 는 StepII 가 혼합모드 I+II 상태인 30°, 60° 와 모드 II 상태인 90°를 나타내는 각각의 Case 를 보여준다.

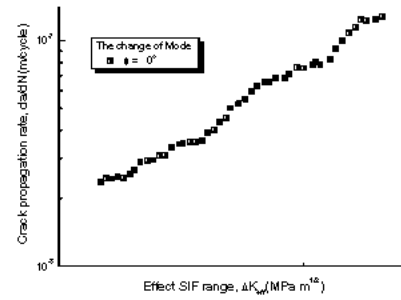
Paris 는 피로균열 진전율(da/dN)과 피로균열 확대계수 범위(ΔK)와의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

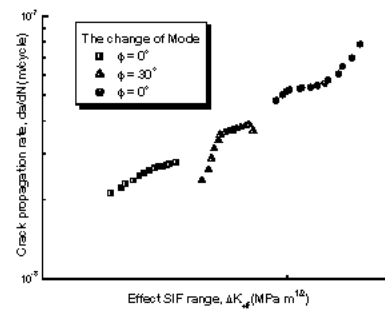
다단계 하중방향 변화에 의한 피로균열 전파거동 양상은 모드 I 하중 상태인 Step I 이후의 혼합모드 하중상태와 모드 II 상태인 Step II 에 의해 모든 Case 의 Step III 에서 피로균열 진전율에 차이를 보였다. Paris 식(1)을 바탕으로 하여 $da/dN - \Delta K$ 선도에서의 m 을 비교해본 결과 혼합모드 I+II 상태 이후에 Step III 에서의 피로균열 진전율 보다 모드 II 이후의 피로균열 진전율이 증가하는 것으로 확인되었다. 이에 대한 실험 결과는 Table 4 와 Fig. 4 에 나타내었다.

Table 4 Comparison gradient of step II and step III

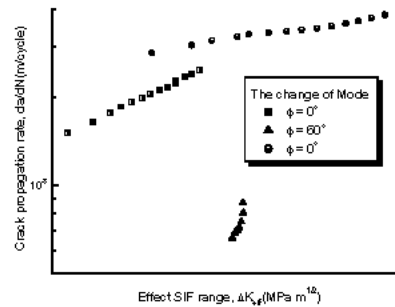
		ΔN (cycles)	
		After Mode I(0°) 4000 cycles	40000 (N=120000)
Gradient m	0°⇒0°⇒0°	3.598	
	0°⇒30°⇒0°	0.939	2.232
	0°⇒60°⇒0°	-	1.471
	0°⇒90°⇒0°	-	3.21



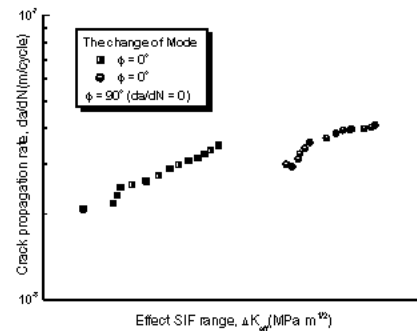
(a) mode I



(b) Case I(0° ⇒ 30° ⇒ 0°)



(c) Case II(0° ⇒ 60° ⇒ 0°)



(d) Case III(0° ⇒ 90° ⇒ 0°)

Fig.4 The fatigue crack propagation behavior by variation of multilevel loading direction and mode I

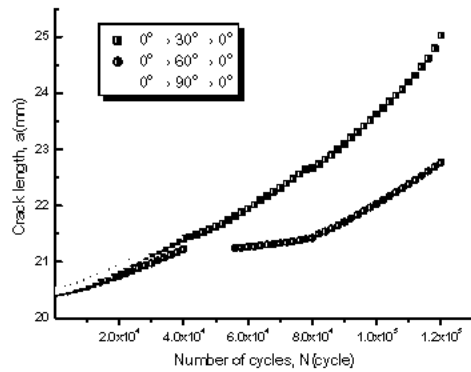


Fig. 5 The fatigue crack propagation behavior of Case I/II/II

Table 5 Comparison Δa for ΔN in the all case

		ΔN (cycles)		
		40000	40000 (N=80000)	40000 (N=120000)
Δa (mm)	$0^\circ \Rightarrow 0^\circ \Rightarrow 0^\circ$	0.97	1.28	2.87
	$0^\circ \Rightarrow 30^\circ \Rightarrow 0^\circ$	0.97	1.24	2.36
	$0^\circ \Rightarrow 60^\circ \Rightarrow 0^\circ$	0.79	0.19	1.34
	$0^\circ \Rightarrow 90^\circ \Rightarrow 0^\circ$	1.08	0	3.21

3.2 모드 II 영향에 의한 피로균열 전파거동 양상

본 절에서는 fig.4 와 fig.5 그리고 Table 5 를 통하여 각각의 Case 를 비교함으로써 피로 균열 전파 거동에 미치는 모드 II 의 영향을 검토하였다. Fig.4(b),(c)의 Step II 에서의 피로균열 전파율은 급격히 감소하였다가 회복하는 현상을 보였다. 이것은 하중작용방향이 혼합모드 하중 I+II 상태로 작용함으로써 그때의 균열선단에서의 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 는 하중작용각도(θ)의 영향에 의해 급격히 감소하였다가 증가하는 것으로 생각 되어진다. 또한 혼합모드 하중 이후에 작용하는 모드 I 하중에서의 피로균열 전파율은 이전에 작용된 하중의 하중작용각도(θ)가 커짐에 따라 모드 II 의 영향으로 인하여 감소하는 것으로 확인할 수 있었다. 그리고, 이전에 발표된 연구에 의하면 모드 II 하중 이후의 모드 I 의 피로균열 전파율은 모드 II 하중에 의한 균열 닫힘 현상으로 감소한다고 보고되었다.⁽⁴⁾ 하지만, 본 실험에 의하면 Fig.4(d)에서 Step II 의 피로균열전파는 전혀 증가하지 않았지만, 모드 II 하중작용에 의한 전단력에 의해 균열선단의 입자간의 마찰 및 비벼짐에 의한 입자들의 부서짐이 균열선단을 날카롭게 함으로써 Step III 에서의 피로균열 전파율과 그 단계에서의 균열진전 길이가 가장 크게 나타남 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 피로균열 전파거동에서의 모드 II 하중의 영향을 파악할 수 있도록 하중작용 방향을 순차적으로 변화시키는 다단계 하중(Multilevel Loading) 상태의 실험조건을 통해 순수 모드 I 상태에서의 피로 균열 전파 거동과 다단계 하중 방향 변화에 의한 혼합모드 I+II 와 모드 II 상태 이후의 피로 균열 전파 거동을 비교함으로써 모드 II 가 피로 균열 전파 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

- (1). 다단계 하중방향 변화에 의한 피로균열 전파거동 양상은 혼합모드 I+II 하중상태와 모드 II 상태인 Step II 에 의해 모든 Case 의 Step III 에서 피로균열 진전율이 차이를 보였으며, 모드 II 이후의 피로균열 진전율이 혼합모드 I+II 이후의 피로균열 진전율 보다 크게 나타나었다
- (2). 모드 II 하중 이후의 작용모드에서는 모드 II 하중작용에 의한 전단력에 의해 균열선단의 입자간의 마찰 및 비벼짐에 의한 입자들의 부서짐이 균열선단을 날카롭게 함으로써 순수 모드 I 상태와 혼합모드 I+II 이후의 상태에서 보다 피로균열 전파율과 균열진전 길이가 크게 나타남을 확인할 수 있었으며 이에 따라 피로수명도 감소함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Qian, J. and Fatemi, A., "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969-990, 1996.
2. 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, 2001.
3. 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
4. Dahlin, P. Olsson, M. "Reduction of mode I fatigue crack growth rate due to occasional mode II loading," *International Journal of Fatigue*, Vol 26, pp. 1083-1093, 2004.