

응력비 변화에 따른 혼합모드 피로균열 전파거동

송삼홍* · 최지훈* · 이정무*

(2002년 1월 12일 접수, 2002년 9월 16일 심사완료)

The Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Behavior with the Variation of Stress Ratio

Sam-Hong Song, Ji-Hoon Choi and Jeong-Moo Lee

Key Words: Mixed Mode(혼합모드), Stress Ratio(R: 응력비), Fatigue Life(피로수명), Stress Intensity Factor Range(ΔK : 응력확대계수범위), Loading Application Angle(ϕ : 하중 작용각도), Compact Tension Shear Specimen(CTS시험편), Fatigue Crack Propagation Rate(da/dN : 피로균열전파율)

Abstract

Most cracks in the structure occur under mixed mode loading and those fatigue crack propagation behavior heavily depends on the stress ratio. So, it is necessary to study the fatigue behavior under mixed mode loading as the stress ratio changes. In this paper, the fatigue crack propagation behavior was respectively investigated at stress ratio 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and we changed the loading application angle into 0° , 30° , 60° to apply various loading mode. The mode I and II stress intensity factor of CTS specimen used in this study was calculated by the displacement extrapolation method using FEM (ABAQUS). Using both the experiment and FEM analysis, we have concluded the relationship between crack propagation rate and stress intensity factor range at each loading mode due to the variation of stress ratio. Also, when the crack propagated under given stress ratio and loading mode condition, we have concluded the dominant factors of the crack propagation rate at each case.

1. 서론

반복하중에 의한 피로 파괴현상의 연구는 균열의 전파에 지배적인 영향을 미치는 모드 I 하중 상태에 대한 연구가 주로 진행되어 왔다. 하지만 실제 기계요소나 구조물에 작용하는 하중은 다축 방향으로 작용하므로 내재하는 균열은 모드 I, II,

III의 변형형태가 복합적으로 발생하게 되어 혼합모드를 유발하게 된다.⁽¹⁾ 따라서 혼합모드 하중에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있으며, 혼합모드의 균열발생 및 전파 메카니즘을 밝히기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

혼합모드 피로균열의 전파거동에 대한 연구는 시험편과 실험방법의 개발,⁽²⁾ 파괴인성치의 결정,^(3,4) 균열의 전파방향 예측^(5,6)과 균열의 전파율 평가^(7~10)에 대하여 주목하여 왔다. 그러나 혼합모드 하중을 고려한 피로균열의 거동에 대한 평가는 시험편, 실험방법의 다양성과 이로 인한 연구결과들의 차이 때문에 통일적인 비교가 어려운 실정이다. 이에 저자는 일차적으로 혼합모드 하중에서 STS304강을 사용하여 CTS시험편의 0.3<

* 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@mail.korea.ac.kr

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

* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

$a/W \leq 0.5$ 구간에서의 혼합모드 피로균열 전파실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.⁽¹¹⁾ $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 구간의 혼합모드 하중에 대한 응력확대계수식을 산출하였으며, 균열의 전파방향은 응력확대계수비(K_I/K_{II})의 조건에 따라 편향된 발생전파각도를 가지게 됨을 알았다. 또한 전파하는 피로균열의 응력확대계수의 변화를 고찰함으로써 K_{II} 는 소멸하지 않고, 지속적으로 피로균열의 전파과정에 영향을 미친다는 것을 알았다. 그러나 이전의 연구에서는 응력비의 영향을 고려하지 않았기 때문에 응력비의 변화가 피로균열의 전파거동에 미치는 영향을 고려해야 한다고 생각된다.^(12,13) 따라서 응력비를 다양하게 변화시켰을 때, 혼합모드 하에서의 피로균열 전파거동에 대하여는 아직도 그 실험적인 자료의 축적이 부족하다고 생각된다. 그러므로 혼합모드 하중 하에서 어떠한 형태의 피로균열이 어떤 조건 하에서 발생하는가, 또는 모드 II 성분이 증가함에 따라서 피로균열은 어떠한 전파거동을 나타내는가, 그것들은 응력비의 대소와는 어떤 관계를 갖는가를 고찰할 필요가 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 모드 I 과 혼합모드 I/II로 작용하는 하중을 가할 경우 응력비의 변화에 따른 피로균열의 전파거동을 고찰하려고 한다. 구체적인 내용으로는 응력비의 변화에 따른 혼합모드 피로균열 전파거동은 어떠한가, 응력비와 피로수명과의 관계는 어떠한가, 응력비의 변화에 따른 혼합모드 피로균열의 전파형태의 특성은 어떠한가 및 응력비 변화에 따른 혼합모드 하의 응력확대계수의 거동 등을 고찰하였다.

2. 실험 및 유한요소모델링

2.1 시험 재료

본 연구에 사용된 재료는 KS D 3698에 규정된 냉간 압연 스테인리스 강(STS304)이다. 이 재료는 내열 내식성이 우수하고, 저온강도 및 기계적 성질이 우수한 합금이다. 또한 이 재료의 용도는 주로 자동차·선박용 부품, 건축자재, 각종 의료기구에서 발전소나 화학 플랜트와 같은 대형 구조물의 배관, 연결 가스켓 및 구조물의 지지용으로 널리 적용된다.

시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of STS304

Composition (Wt.%)				
C	Cr	Ni	Mn	Si
0.08	18.10	7.98	1.42	0.23

Table 2 Mechanical properties of STS304

Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Hardness (Hv)
286	618	198

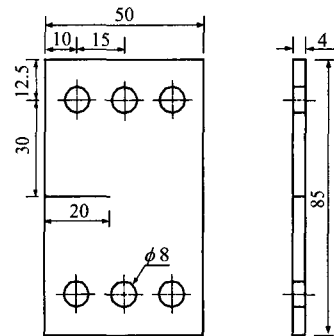


Fig. 1 Configuration of specimen (unit: mm)

2.2 시험편과 하중 장치

혼합모드 피로균열 전파에 대한 연구에는 다양한 실험조건과 여러 형태의 시험편이 제안되어 사용되어 왔다. 본 연구에서는 작은 크기, 단순한 형상과 용이한 가공성을 가지며, 하중 장치를 이용하여 모드의 혼합도를 모드 I에서 모드 II까지 광범위하게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있는 CTS(Compact Tension Shear) 시험편을 사용하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다.

하중장치는 Richard와 Benitz⁽²⁾가 고안한 장치를 기본으로 하여 강⁽⁴⁾이 수정한 모델을 응용하였다. 이 하중장치는 핀 홀의 각도변화에 따라 피로시험기의 단축 인장하중으로 시험편에 다양한 혼합모드 하중상태를 조성할 수 있도록 제작되었다. 실험조건은 하중장치를 이용하여 하중작용각도가 0°인 모드 I으로부터 90°인 모드 II까지 다양하게 변화시킬 수 있다. 하중장치의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

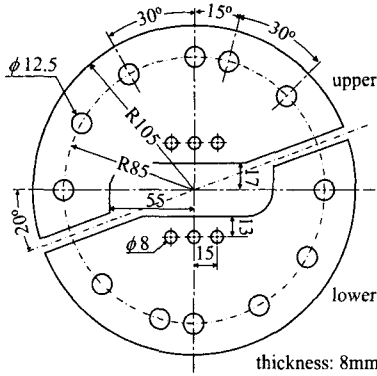


Fig. 2 Configuration of loading device

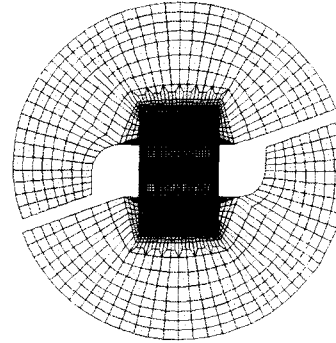


Fig. 3 Finite element analysis model

Table 3 The stress ratio

	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7
P_{max} (N)	14,700	14,700	14,700	14,700
P_{min} (N)	1,470	4,410	7,350	10,290

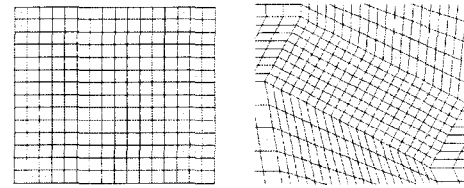
2.3 실험 방법

본 실험에서 사용한 시험기는 전기유압식 인장 압축 피로시험기인 INSTRON 1331이다. 피로시험은 인장-인장상태의 일정진폭 하중 하에서 수행하였다. 피로시험의 작용하중은 주파수 10Hz인 Sine파 형태이며 피로하중의 주파수에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였다. 피로시험에 사용한 응력비는 최대하중을 고정시키고 최소하중을 변화시켰으며, 이는 Table 3에 나타내었다.

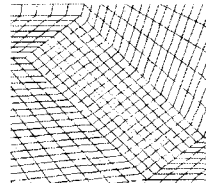
본 연구에서 수행한 실험조건은 각각의 응력비 R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7에 대하여 하중작용각도를 $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 로 조절하여 균열선단에서 모드 I과 혼합모드 I/II를 유발하도록 설정하였다.

균열전파에 대한 관찰구간은 $0.4 \leq a/W \leq 0.6$ (a: 균열길이, W:시험편 폭)이며, 이 구간에서 노치의 영향을 배제하기 위하여 3mm 길이의 예비균열이 발생되도록 하였다.

피로균열의 측정은 100배율의 이동현미경을 이용하였다. 균열선단으로부터 전파하는 피로균열의 길이는 예비균열선단에 설정한 기준 좌표계에 대하여 균열선단의 수평 및 수직 거리를 측정함으로써 나타내었다. 피로균열의 전파속도계산에



(a) (b)



(a) $\phi = 0^\circ$: Mode I
 (b) $\phi = 30^\circ$
 (c) $\phi = 60^\circ$
 : Mixed Mode I/II

(c) ϕ : Loading application angle

Fig. 4 FEM modeling of crack propagation path

는 7점 증분 다항법⁽¹⁴⁾ (Seven Point Incremental Polynomial Method)을 사용하였다.

2.4 유한 요소 모델링

균열의 전파거동을 고찰하기 위한 응력확대계수는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 2차원 탄성 유한요소해석의 수행으로 결정하였다. 해석에 사용한 시험편과 하중장치의 응력상태는 평면응력상태로 가정하였으며, 2차원 8절점 등매개요소인 CPS8⁽¹⁵⁾(요소형태 ABAQUS Library)이 사용되었다.

유한요소해석에서 균열선단의 응력특이성을 나

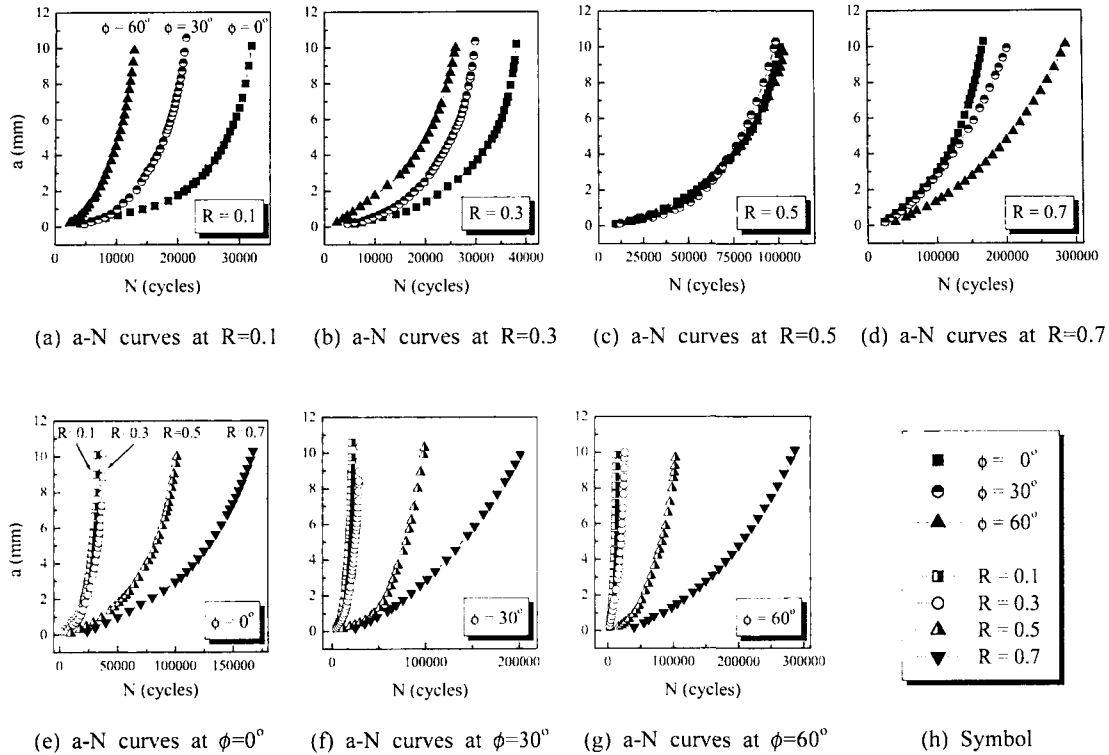


Fig. 5 Relationship between a and N at various condition

타내기 위해 균열선단 요소로는 균열선단 주위 요소들의 중간절점들을 균열선단으로부터 변길이의 1/4 위치로 이동시켜 균열선단에서 응력의 특이성이 나타나도록 하는 특이요소를 사용하였다.

유한요소해석을 위한 시험편의 물성치는 인장 실험 결과를 사용하였으며, 하중장치는 가스침탄 처리를 통한 강성의 확보로 변형이 일어나지 않는 것으로 가정하여 시험편에 미치는 영향은 배제하였다. 해석에 사용한 모델은 전모델(Full Model)로 구성하였으며, 해석에 사용된 하중장치와 시험편의 모델링은 Fig. 3에 나타내었다. 또한 실험에서 구한 하중작용각도의 변화에 따른 균열의 전파형태를 유한요소해석에 반영한 모델링은 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과 하중작용각도가 동일한 경우 균열전파형태는 응력비에 무관한 것을 알 수 있어 각 응력비(R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7)에 대해서도 Fig. 4의 모델링이 해석에 사용되었다.

본 해석에서 사용한 시험편과 하중장치의 모델링에 대한 적합성 및 응력확대계수의 산출결과에

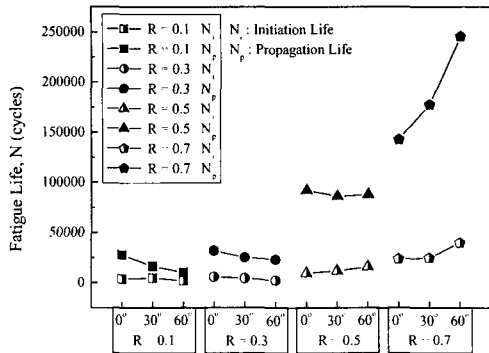
대한 정확도는 피로시험에서 사용한 최대하중으로 모드 I 응력확대계수를 구한 다음 편축노치 인장시험편의 이론해⁽¹⁶⁾와 비교함으로써 검토되었으며, 그 결과는 $\pm 1.8\%$ 내의 양호한 오차범위를 보였다.

3. 실험 결과

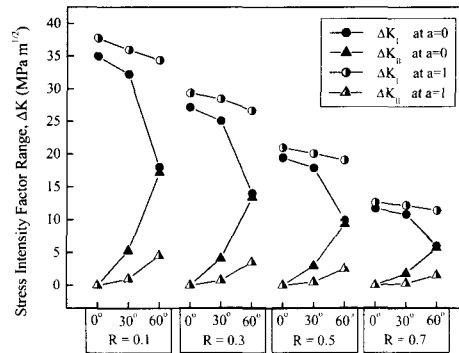
3.1 응력비의 변화에 따른 피로균열 전파거동

피로시험은 각각의 응력비(R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7)를 일정하게 유지시킨 후 각 응력비 하에서 하중작용각도를 0° , 30° , 60° 로 변화시키면서 모드 I($\phi=0^\circ$)과 혼합모드 I/II($\phi=30^\circ$, 60°) 하중상태에 대하여 수행하였다. 각 응력비 R=0.1, 0.3, 0.5와 0.7에 대한 실험결과는 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서의 피로수명은 균열의 관찰용이성 여부와 시험편의 변형정도를 고려하여 균열전파길이가 10mm까지 전파되었을 때의 하중반복수로 정의하였다.

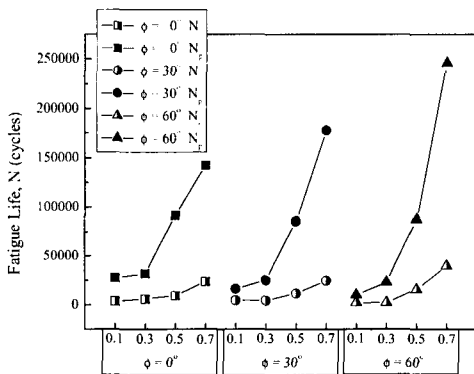
Fig. 5(a)는 R=0.1에 대한 균열길이-하중반복수



(a) Relationship between ϕ and N at each R

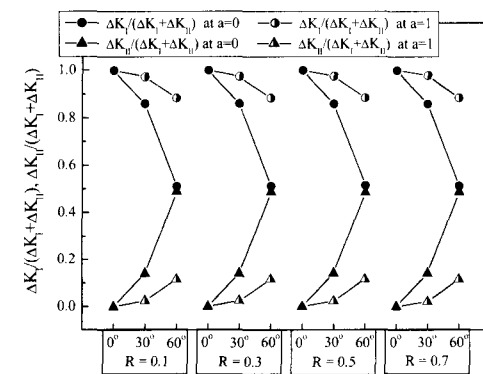


(a) Relationship between R and ΔK



(b) Relationship between R and N at each ϕ

Fig. 6 Relationship between R , ϕ and N



(b) Relationship between R and ΔK ratio

Fig. 7 Relationship between R , ϕ and ΔK

곡선이다. 하중작용각도의 증가에 따른 모드 II성분의 증가로 인하여 피로수명은 감소하였다. $\phi=0^\circ$ (모드 I)의 피로수명에 비하여 $\phi=30^\circ$ 의 피로수명은 33%의 감소를 보였고, $\phi=60^\circ$ 의 피로수명은 60%의 감소를 보였다.

Fig. 5(b)는 $R=0.3$ 에 대한 균열길이-하중반복수 곡선이다. $\phi=0^\circ$ (모드 I)의 피로수명에 비하여 $\phi=30^\circ$ 의 피로수명은 21%의 감소를 보였고, $\phi=60^\circ$ 의 피로수명은 32%의 감소를 보였다.

Fig. 5(c)는 $R=0.5$ 에 대한 균열길이-하중반복수 곡선이다. 이 경우 하중작용각도의 변화에 따른 각 피로수명 간의 차이는 거의 없어졌다. $\phi=0^\circ$ (모드 I)의 피로수명에 비하여 $\phi=30^\circ$ 의 피로수명은 2%의 감소를 보였고, $\phi=60^\circ$ 의 피로수명은 2%의 증가를 보였다.

Fig. 5(d)는 $R=0.7$ 에 대한 균열길이-하중반복수

곡선이다. 이 때 하중작용각도의 증가에 따라 피로수명은 증가하는 것으로 나타났다. $\phi=0^\circ$ (모드 I)의 피로수명에 비하여 $\phi=30^\circ$ 의 피로수명은 20%의 증가를 보였고, $\phi=60^\circ$ 의 피로수명은 70%의 증가를 보였다.

Fig. 5의 (e)~(g)는 각 하중작용각도에서 응력비 변화에 대한 균열길이-하중반복수 곡선이다. 모든 하중작용각도에서 응력비가 증가할수록 피로수명은 증가하였으며, $R=0.7$ 의 경우는 $R=0.1$ 에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 실험결과로부터 응력비와 하중작용각도의 변화에 따른 피로균열의 전파거동을 고찰하기 위하여 각각의 응력비와 하중작용각도의 조건에 대한 피로수명 및 ΔK 의 비교는 Fig. 6, 7과 같이 나타내었다.

Fig. 6(a)는 각 응력비에서 하중작용각도의 변

화에 의한 피로균열의 발생수명(N_i) 및 전파수명(N_p)의 변화를 나타낸 것이고, (b)는 각 하중작용각도에서 응력비의 변화에 의한 피로수명의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)와 (b)에 나타난 실험결과로부터 응력비의 증가에 따라 동일한 하중작용각도의 조건에서 피로수명은 증가하였다. $R=0.1$ 과 0.3 의 경우 모두 하중작용각도가 증가함에 따라 피로수명은 감소하였으며, $R=0.3$ 의 경우는 상대적으로 피로수명의 감소가 작게 나타났다. $R=0.5$ 에서는 하중작용각도의 증가에 따른 영향이 나타나지 않았다. $R=0.7$ 인 고응력비의 경우 $R=0.1$ 과 0.3 의 결과와 반대로 하중작용각도가 증가함에 따라 피로수명도 증가하는 것으로 나타났다. 균열전파의 가속을 유발하는 하중작용각도 증가의 영향은 고응력비로 갈수록 작아지고 응력비 증가로 인한 영향을 지배적으로 받는 것으로 나타났다.

위에서 종합된 실험결과를 고찰하기 위하여 Fig. 7(a)와 (b)에는 응력비와 하중작용각도의 변화에 따른 ΔK_I 와 ΔK_{II} 비율의 변화를 나타내었다. 각각의 조건에서 ΔK_I 와 ΔK_{II} 비율의 변화는 초기 예비균열선단($a=0$)과 균열이 1mm 전파하였을 때 ($a=1$)에 대하여 나타내었다.

Fig. 7에서 ΔK_I 과 ΔK_{II} 는 최대하중이 일정한 응력비 조건이므로 응력비가 증가할수록 감소하였다. 이러한 ΔK_I 의 크기 감소는 동일 하중작용각도에서 응력비 증가에 따른 피로수명의 증가에 대한 설명을 제공한다. 또한 피로균열선단에서의 ΔK_I 과 ΔK_{II} 의 차지비율은 응력비의 변화와 관계 없이 일정하며 하중작용각도 변화에 대한 차이만을 보인다.

동일 응력비 조건에서 하중작용각도가 증가할수록 ΔK_I 는 감소하고, ΔK_{II} 는 증가하였다. $R=0.1$ 과 0.3 의 경우 하중작용각도 증가에 따른 피로수명은 감소하였으며, 이는 ΔK_{II} 증가가 피로균열의 가속을 유발하는 것으로 생각된다. 그러나 $R=0.5$ 와 0.7 의 경우에는 ΔK_{II} 증가에 의한 전파속도의 가속은 관찰되지 않으며, 특히 $R=0.7$ 의 경우에는 하중작용각도의 증가에도 전파속도는 감소하는 현상까지 나타났다. 이와 같이 고응력비에서 $\phi=30^\circ$ 보다 $\phi=60^\circ$ 에서 균열전파속도가 감소하는 것은 균열열림변위의 감소로 인해 고응력비의 낮은 ΔK_{II} 의 균열전파 가속이 발생 및 전파과정에서 저지되기 때문인 것으로 생각된다. 또

한 균열 발생 후 급격히 모드 I이 지배적인 상태가 되는데 이 때 고응력비에서는 ΔK_I 의 크기 감소로 인해 균열전파속도가 상대적으로 저하되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 응력비 증가에 따른 거동의 고찰에는 균열열림거동에 대한 고찰이 추가적으로 필요하다고 생각된다.

위의 결과 및 고찰로부터 결론은 다음과 같이 내릴 수 있다. 최대 하중이 일정한 조건에서 응력비의 증가는 피로수명의 증가를 가져온다. 하중작용각도의 증가에 의한 모드 II 성분의 증가는 균열전파속도를 증가시켜 피로수명의 감소를 가져온다. 그러나 $R=0.7$ 과 같은 고응력비에서 하중작용각도의 변화에 의한 혼합모드 피로균열의 전파거동은 모드 II 성분에 의한 가속의 영향보다는 응력비에 의한 감속의 영향을 더 지배적으로 받는다고 생각된다.

3.2 응력비의 변화에 따른 피로균열 전파형태

응력비를 고려하지 않은 혼합모드 하중상태에서 하중작용각도의 변화에 따라 피로균열은 초기 균열선단에 대하여 하중작용각도와 동일하지 않은 임의 각도의 방향으로 전파하였다.^(9~11)

본 절에서는 다양한 응력비($R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$)의 변화에 따른 혼합모드 피로균열의 발생전파방향과 전파과정의 형태를 알아보려고 한다.

본 실험에서 균열 전파각도는 균열길이가 약 0.5mm내로 전파하였을 때 예비균열과 이루는 각으로 정의하였다. 하중작용각도를 $\phi=30^\circ$ 와 60° 로 고정하고 각각 응력비를 변화시켰을 때, 피로예비균열선단에서 측정된 균열 전파각도는 다음과 같다. $\phi=30^\circ$ 의 경우 응력비를 변화시켰을 때, 균열 전파각도는 각각 $30^\circ \sim 32^\circ$ 로 나타났으며, 이는 하중작용각도에 대하여 6% 이내의 차이를 보이는 것이다. $\phi=60^\circ$ 의 경우 균열 전파각도는 각각 $50^\circ \sim 53^\circ$ 로 측정되었으며, 이는 하중작용각도와 비교하여 12~17%의 차이를 보이는 것이다. 이로부터 하중작용각도가 증가함에 따라 예비균열선단에서의 균열 전파각도는 하중작용각도와 차이가 크게 나타났으며, 동일한 하중작용각도에 대해서는 응력비의 변화가 균열 전파각도에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다.

응력비의 변화가 균열전파과정에서 균열전파형태에 미치는 영향을 살피기 위하여 $\phi=30^\circ$ 와 $\phi=60^\circ$ 일 때 각 응력비에 대한 균열의 전파위치는

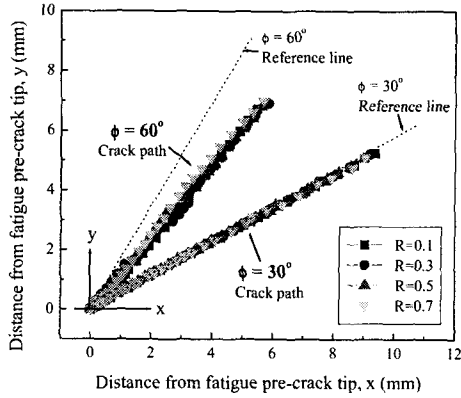


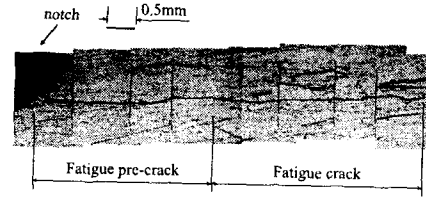
Fig. 8 Crack propagation path

Fig. 8에 나타내었다. 균열의 전파위치는 예비균열선단을 기준 좌표계로 설정하여 전파균열선단의 위치를 측정 한 것이다.

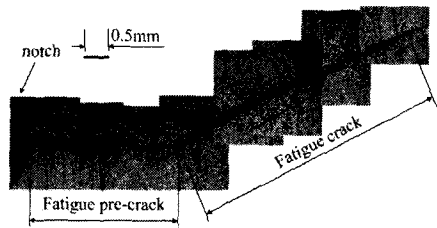
Fig. 8에서 하중작용각도 $\phi = 30^\circ$ 와 60° 의 경우 예비균열선단으로부터 측정한 전파균열의 위치는 모두 응력비($R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$)와 무관하게 일정한 양상으로 나타났으며, 이는 균열전파과정에서 균열전파형태에 미치는 응력비의 영향이 없다는 것을 의미한다. 또한 균열전파형태도 균열 발생 단계에서의 전파각도를 유지하여 $\phi = 60^\circ$ 의 균열전파형태는 하중작용각도를 표시하는 참고선과 차이를 보이고 있다.

피로균열의 발생 및 전파형태는 응력비 변화에 따른 영향을 받지 않고, 하중작용각도에 따라 일정하게 나타났다. 그러므로, Fig. 9에는 피로균열 전파형태의 한 예로 응력비 0.1의 경우에 대하여 하중작용각도를 $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켜 현미경으로 관찰한 균열전파형태를 보여주는 사진을 제시하였다.

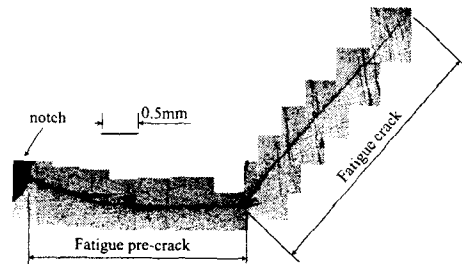
Fig. 9(a)는 하중작용각도가 0° 인 모드 I 균열의 전파형태를 나타내며, 예비균열에 대하여 피로균열은 편향이 없이 전파하였다. Fig. 9(b)는 하중작용각도가 30° 인 혼합모드 피로균열의 전파형태를 보여준다. 피로균열은 예비균열선단으로부터 균열 전파각도 31.5° 의 방향으로 전파하였다. $\phi = 30^\circ$ 의 균열 전파각도는 하중작용각도와 거의 차이를 보이지 않았다. Fig. 9(c)는 하중작용각도가 60° 인 혼합모드 피로균열의 전파형태를 보여주며, 이



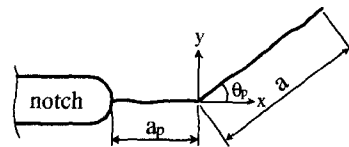
(a) Mode I crack path at $R=0.1, \phi = 0^\circ$



(b) Mixed mode crack path at $R=0.1, \phi = 30^\circ$



(c) Mixed mode crack path at $R=0.1, \phi = 60^\circ$



a_p : fatigue pre-crack length
 a : fatigue crack length
 θ_p : fatigue crack propagation angle

(d) Schematic illustration of fatigue crack propagation path

Fig. 9 Crack propagation path

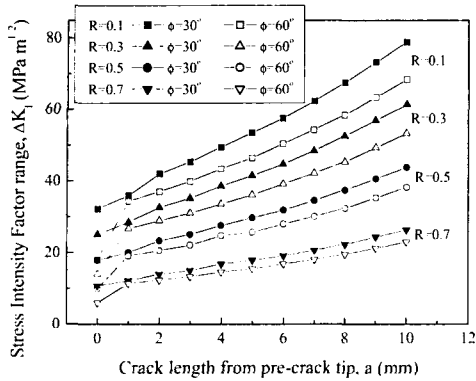


Fig. 10 The variation of ΔK_I

때의 균열전파각도는 52.7°로 하중작용각도 60°와는 차이를 나타내고 있다.

Fig. 9(d)는 (a)부터 (c)에 나타낸 피로균열의 전파형태에 대한 설명을 도식적으로 나타낸 것으로 피로예비균열(a_p)로부터 전파하는 혼합모드 피로균열에 대한 길이와 전파각도는 각각 a 와 θ_p 로 표시하였다.

이상의 결과와 관찰사진으로부터 혼합모드 하중상태의 피로균열은 균열의 전파방향 및 전파형태에 대해서 하중작용각도의 영향을 지배적으로 받으며, 응력비의 영향은 없음을 알 수 있었다. 혼합모드 피로균열은 모드 II 성분이 증가할수록, $\phi = 60^\circ$ 의 경우가 $\phi = 30^\circ$ 의 경우보다 하중작용각도와는 큰 편차의 균열 전파각도를 가지고 전파하였으며, 이는 균열전단의 상태, 실험시 하중전달의 편차, 모드 II 성분의 증가에 의한 균열발생 기구의 복잡성 등에 기인하는 것으로 생각된다.

3.3 응력비의 변화에 따른 ΔK 의 변화

본 절에서는 응력비 변화에 따른 전파균열의 특성을 고찰하기 위하여 유한요소 해석으로 구한 균열전단에서의 모드 I, 모드 II 응력확대계수를 사용하였다. 균열의 전파에 따라 응력확대계수를 구하기 위한 유한요소해석의 모델링은 각 응력비 ($R=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$)와 하중작용각도($\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)에 대하여 실험으로부터 얻은 전파단계에서의 균열위치를 반영하였다.

해석모델은 전파하는 균열의 길이를 1mm 단위 마다 직선으로 가정하여 구성하였고, 전파 균열 전단에서의 응력확대계수는 $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 에 대하

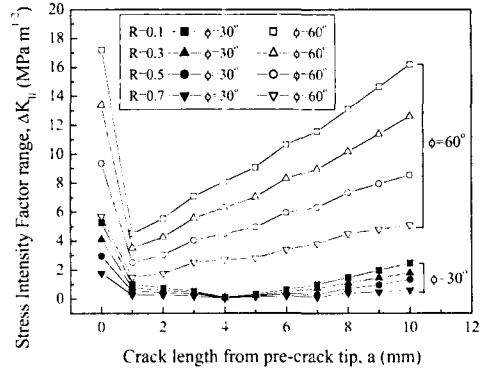


Fig. 11 The variation of ΔK_{II}

여 균열길이를 1mm씩 총 10mm까지 전파시키면서 구하였다.

각 응력비 $R=0.1, 0.3, 0.5$ 와 0.7 에 대하여 하중작용각도를 $\phi = 30^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켜 구한 ΔK_I 의 변화는 Fig. 10에, ΔK_{II} 의 변화는 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10에서 균열의 발생단계는 ΔK_I 이 지배적인 조건으로 일어남을 보여주고 있다. 그리고 균열 전파단계에서 ΔK_I 의 변화는 아래와 같다. 균열의 전파와 함께 ΔK_I 은 일정한 비율로 증가하였다. 응력비가 증가함에 따라 $R=0.7$ 에서의 ΔK_I 은 $\phi = 30^\circ$ 와 60° 에서 모두 $R=0.1$ 의 33~34% 수준으로 작게 나타났다. 또한 각 응력비에서 $\phi = 60^\circ$ 의 ΔK_I 이 $\phi = 30^\circ$ 의 87~88% 수준으로 작게 나왔다. 응력비의 증가와 하중작용각도의 증가에 따라 ΔK_I 은 작은 값을 갖게 되며, 이것이 모드 I이 지배적인 전파과정에서 피로균열의 전파수명이 증가하는 것에 대한 설명을 제공한다고 생각된다.

Fig. 11에서 균열의 발생단계는 ΔK_{II} 가 급격히 감소하는 조건으로 일어남을 알 수 있다. 그리고 균열전파단계에서 ΔK_{II} 의 변화는 아래와 같다. 급격히 감소하였던 ΔK_{II} 는 소멸되는 것이 아니라 균열의 전파와 함께 $\phi = 30^\circ$ 와 60° 에서 각각 일정한 비율로 회복하였다. 응력비가 증가함에 따라 $R=0.7$ 에서의 ΔK_{II} 는 $R=0.1$ 의 ΔK_{II} 와 비교하여 $\phi = 30^\circ$ 의 경우 23~34% 수준이고, $\phi = 60^\circ$ 의 경우는 31~36% 수준의 작은 값으로 나타났다. 응력비의 증가에 따라 $\phi = 30^\circ$ 와 60° 모두에서 ΔK_{II} 는 작은 값을 갖으며, $\phi = 60^\circ$ 의 ΔK_{II} 는 $\phi = 30^\circ$ 의 ΔK_{II} 보다 모든 응력비에 대해서 크게 나타났다.

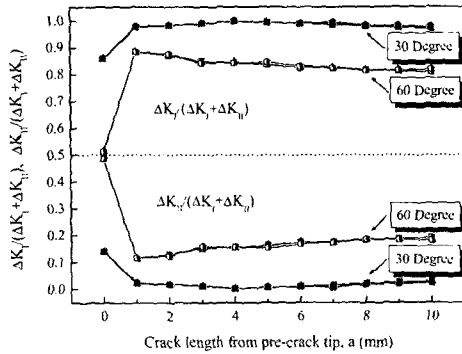


Fig. 12 The variation of ΔK ratio

Fig. 12는 균열전파에 따른 각 조건에서의 응력 확대계수비의 변화를 나타낸 것이다. 이는 Fig. 7(b)에서 나타난 것처럼 응력비의 변화에 관계없이 하중작용각도의 변화에 의한 차이만을 보이고 있다. 전파단계에서 균열의 거동은 일정한 비율의 ΔK_I 에 의한 영향을 지배적으로 받으며, ΔK_{II} 의 영향도 지속적으로 받고 있음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 혼합모드 하중 하의 피로균열은 응력비의 변화와 관계없이 ΔK_I 은 증가하고, ΔK_{II} 는 감소하는 조건으로 발생전파하였으며, 이후의 전파단계에서는 ΔK_I 과 ΔK_{II} 가 모두 일정한 비율로 균열전파에 관계하는 것을 알 수 있었다.

하중작용각도의 증가에 따라 ΔK_{II} 는 증가함을 알 수 있었으며, 응력비의 증가에 따라서는 ΔK_I , ΔK_{II} 가 모두 작은 값을 갖게 되는 것을 알 수 있었다. 응력비의 증가에 따라 나타나는 낮은 ΔK 의 거동이 혼합모드 피로균열의 전파거동에 큰 영향을 미치는 것으로 생각되며, 이로 인한 피로수명의 변화는 3.1절에서 확인하였다. 이러한 하중작용각도의 변화에 의한 혼합모드 피로균열의 전파거동은 응력비의 변화에 의한 ΔK_I 과 ΔK_{II} 의 변화를 고려하여 고찰하여야 한다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 CTS(Compact Tension Shear) 시험편과 하중장치를 이용하여 혼합모드하중에서 응력비를 변화시키면서 피로시험을 수행하였다. 또한 유한요소해석을 수행하여 피로균열전단에서의 ΔK_I 과 ΔK_{II} 를 결정하여 시험결과와 고찰을

수행하였으며, 이로부터 얻은 결론들은 다음과 같다.

(1) 최대 하중이 일정한 조건에서 응력비의 증가는 피로수명의 증가를 가져오고, 하중작용각도의 증가에 의한 모드 II 성분의 증가는 피로수명의 감소를 가져온다.

응력비가 증가할수록 모드 II 성분의 증가에 의한 균열전파속도의 가속은 감소하며, $R=0.7$ 과 같은 고응력비에서 피로균열의 전파속도는 응력비에 의한 감속의 영향을 지배적으로 받는다.

(2) 혼합모드 하중 하의 피로균열은 균열의 전파방향 및 전파형태에 대해서 하중작용각도의 영향을 지배적으로 받으며, 응력비의 영향은 없음을 알 수 있었다.

혼합모드 피로균열은 모드 II 성분이 증가할수록 하중작용각도와 큰 편차의 균열 전파각도를 가지고 전파하였으며, 이는 균열전단의 상태, 실험시 하중전달의 편차, 모드 II 성분의 증가에 의한 균열발생기구의 복잡성 등에 기인하는 것으로 생각된다.

(3) 전파균열전단에서의 응력확대계수의 변화를 통해 혼합모드 피로균열의 전파거동에 ΔK_I 과 ΔK_{II} 가 모두 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

하중작용각도의 증가에 따라 ΔK_{II} 가 피로균열의 전파에 미치는 영향은 증가함을 알 수 있었으며, 응력비의 증가에 따라서는 ΔK_I , ΔK_{II} 가 모두 작은 값을 갖게 되는 것을 알 수 있었다. 응력비의 증가에 따라 나타나는 낮은 ΔK 의 거동이 혼합모드 피로균열의 전파거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Qian, J. and Fatemi, A., 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 55, No. 6, pp. 969~990.
- (2) Richard, H. A., 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *Int. J. Fracture*, Vol. 22, pp. R55~R58.
- (3) Hallbäck, N. and Nilson, F., 1994, "Mixed Mode I/II Fracture Behavior of an Aluminum Alloy," *J. Mech. Solids*, Vol. 42, No. 9, 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 A*, Vol. 20, No. 11, pp. 3498~3506.
- (5) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates Under Plane loading and Transverse Shear," *J. of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 519~525.
- (6) Sih, G. C., 1974, "Strain Energy Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems," *Int. J. Fracture*, Vol. 10, pp. 305~321.
- (7) Keisuke Tanaka, 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 6, pp. 493~507.
- (8) Richard, H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337~3344.
- (9) Qian, J. and Fatemi, A., 1996, "Fatigue Crack Growth under Mixed Mode I and II Fatigue Loading," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 19, No. 10, pp. 1277~1284.
- (10) Ong Jang-Woo, Jin Keun-Chan, Lee Sung-Geun and Kim Jong-Bae, 1989, "Mixed-Mode Fatigue Crack Growth Behaviors in 5083-H115 Aluminum Alloy," *Transaction of the KSME A*, Vol. 13, No. 3, pp. 461~471.
- (11) 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.
- (12) Lal, D. N., 1996, "A Detailed Physical Analysis of the R-Effect on LEFM Fatigue Crack Growth," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 55, No. 1, pp. 115~132.
- (13) Raghuvir Kumar and Kamlesh Singh, 1995, "Influence of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in Mild Steel," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 50, No. 3, pp. 377~384.
- (14) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 565~601.
- (15) ABAQUS User's Manual, 1998, Version 5.8, Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (16) Murakami, Y., 1987, Single edge cracked plate tension specimen(SECT), *Stress Intensity Factors Hand Book*, Pergamon Books, pp. 9~10.