

# 혼합모드 하중 하에서의 균열성장 중 피로파단면 마찰과 균열닫힘효과의 상호관계

서기정<sup>†</sup> · 송삼홍\* · 이정무\*\*

## The Correlation between Fatigue Fracture Crack Surface Friction and Crack Closure Effect in Crack Growth under Mixed-mode loading

Kijeong Seo<sup>†</sup>, Samhong Song\* and Jeongmoo Lee\*\*

**Key Words :** Crack Closure Effect(균열닫힘효과), Crack Closure Level(균열닫힘정도), Crack Tip Displacement(균열선단변위), Fatigue Fracture Crack Surface(피로파단균열면), Mode Mixity(모드혼합도), Mixed-mode Loading(혼합모드하중)

### Abstract

Crack tip behavior of single mode loading condition(mode I) depend on tensile loading component but one of mixed mode loading condition(mode I+II) have influenced on shear loading component like the practical structure. Because crack closure is caused by shear loading component under mixed-mode loading a research on the behavior in the stage of crack initiation and propagation require to be evaluate about crack closure effect by fatigue crack surface friction. For that reason we examined the behavior at the crack tip by direct measuring method. Measured behavior at the crack tip was analyzed through vector crack tip displacement. As a result, crack propagation equation was corrected by considering with crack closure effect. In addition we compared fatigue fracture crack surface and crack closure level.

### 기호설명

$\overline{CTD}$ : 벡터균열선단변위, mm  
 $\Delta K_{eff, cl}$ : 균열닫힘을 고려한 유효응력확대계수범위,  $MPa m^{1/2}$   
 $\theta$ : 하중작용각도, degree  
 $U$ : 균열열림비  
 $\sigma$ : 인장하중성분  
 $\tau$ : 전단하중성분

### 1. 서론

복합적인 응력조합양상을 표현하는 혼합모드 형태로서 실제와 가장 유사한 조합형태는 모드 I과 모드 II가 결합된 혼합모드 I+II 하중상태이다. 혼합모드 I+II 하중상태는 인장하중성분(tensile load component)과 전단하중성분(shear load component)이 동시에 작용하는 하중상태이다. 이 두 하중 성분의 조합형태(mixed type)는 모드혼합에 의해 표현될 수 있고, 두 성분의 혼합비(mixed ratio)는 모드혼합도로서 조절될 수 있다. 전단하중 성분은 모드혼합도가 커짐에 따라 증가하게 되는데, 이것은 피로파괴 균열면사이의 마찰을 일으키고 그 결과 마찰에 의한 균열닫힘효과(crack closure effect)를 유발시킨다. 따라서 균열전과거동을 고찰하기 위한 균열전과식에서 균열닫힘효과가 반영되지 않은 유효응력확대계수범위(effective stress intensity factor range:  $\Delta K_{eff}$ )의 엄밀한 적용은 무리가 있다.

<sup>†</sup> 고려대학교 대학원 기계공학과  
 E-mail : 821rokmc@korea.ac.kr  
 TEL : (02)921-3834 FAX : (02)926-9290

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* 고려대학교 공학기술연구소

Table 1 Chemical compositions of SAPH440

Compositions (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

본 연구에서는 혼합모드 하중 하에서 하중성분의 조합 변화에 따른 균열전파 거동을 관찰하고자 하중작용각도(loading application angle)를 다르게 하여 피로시험을 수행하였다. 또한 전단하중성분의 증감으로 인한 균열단침정도를 고찰하기 위하여 균열발생 및 전파과정에서 직접측정법을 통하여 균열선단변위(crack tip displacement)거동을 관찰하였다. 관찰된 균열선단변위는 벡터 균열선단변위(vector crack tip displacement)법<sup>1)</sup>으로 해석하였고 작용하중과 균열선단변위 선도로부터 균열열림하중(crack opening load)을 결정하였다. 이에 대한 자세한 설명은 다음절에 언급되어있다. 균열열림하중을 반영한 균열열림비(crack opening ratio)로 균열단침을 고려한 유효응력확대계수범위를 이용하여 균열전파식을 수정하였다. 균열면 마찰에 의한 균열단침효과정도를 확인하기 위해 균열면을 C-scan 사용하여 정성화하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

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

### 2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 하중모드를 변화시키기 위하여 수정단순인장전단(modified compact tension shear: MCTS)시험편과 하중장치를 사용하였다.<sup>2,3)</sup> 이에 대한 형상과 치수는 Fig. 1 의 (a), (b)와 같다.

하중장치는 핀홀의 각도변화에 따라 피로시험기의 단축 인장하중으로 시험편에 다양한 혼합모드 하중상태를 조성할 수 있도록 제작되었다(Fig. 1 (c)). 하중장치를 이용하여 균열선단에 작용하는 하중의 인장과 전단성분의 작용비율을 조절함으로써 작용하중의 모드를 변화시킬 수 있었다. 작용각도( $\theta$ )가  $0^\circ$ 인 경우는 모드 I,  $90^\circ$ 인 경우는 모드 II 의 하중상태를 나타낸다. 이 두 하중작용각도 사이의 상태는 혼합모드 I+II 의 하중상태를 나타낸다.

### 2.3 실험방법

본 연구에서는 모드 I 과 혼합모드 I+II 하중 하에서 균열선단의 거동을 설명하기 위하여 균열선단변위(CTD)의 측정실험과 일정진폭하중의 피로 시험이 수행되었다.

#### 2.3.1 직접측정법에 의한 CTD 측정

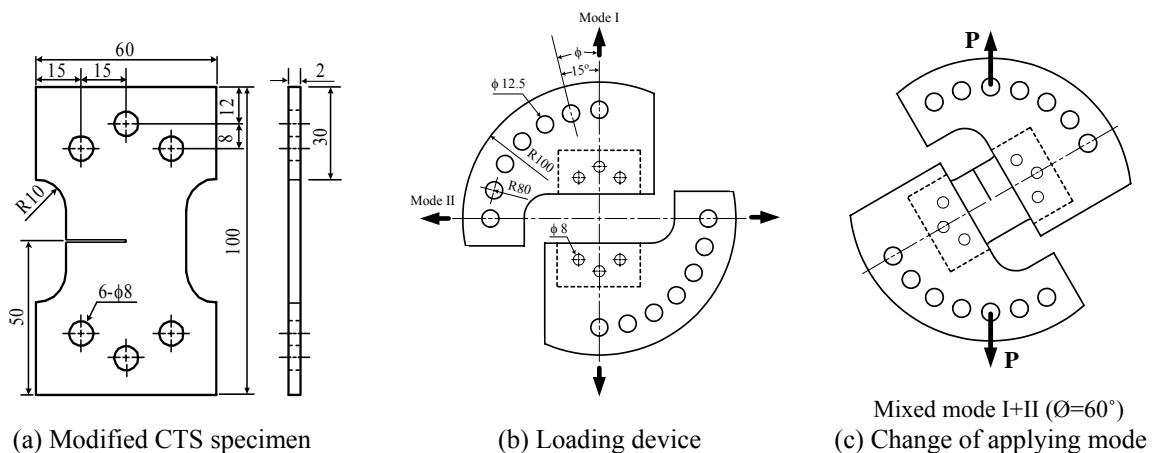


Fig. 1 The specimen and loading device used in this experiment

균열선단의 열림거동을 설명하는 열림하중을 결정하기 위하여 균열선단변위(CTD)를 측정하는 방법으로는 COD 게이지나 스트레인게이지를 사용하여 변화를 측정하는 탄성 컴플라이언스법이 널리 사용되고 있다. 하지만 이 방법은 균열선단에 근접하게 게이지를 부착하는 것이 힘들기 때문에 혼합모드 하중을 받는 균열의 CTD 를 측정하기에는 부적합하다. 따라서 본 실험에서는 하중작용모드에 관계없이 CTD 를 측정하기 위한 방법으로 직접측정법(direct measuring method)을 사용하였다.

단일모드 하중 하에서 균열단힘에 대한 설명은 균열선단 열림변위(crack tip opening displacement: CTOD)에 측정에 의한 열림하중(opening load:  $P_{op}$ )을 통해 가능하다. 그러나 혼합모드 하중 하에서는 전단하중성분에 의한 균열선단의 미끄러짐변위(crack tip sliding displacement: CTSD)를 배제할 수 없기 때문에 균열선단 열림변위와 균열선단 미끄러짐변위가 동시에 측정이 되어야 하고, 이를 통해 열림하중을 결정하여야 한다. Photo 1 은 본 연구에서 열림하중을 결정하기 위해 정의된  $\overline{CTD}$  와 실제 실험에 사용된 미소압자 압입 사진을 나타내고 있다. X축 방향은 전단하중성분에 의한 균열미끄러짐 변위이고 y축 방향은 인장하중성분에 의한 균열열림변위를 나타내며 두 축의 벡터성분조합으로  $\overline{CTD}$  를 정의하였다.

직접측정법의 구체적인 방법은 다음과 같다. 마이크로비커스 경도계를 사용하여 모드 I 피로균열 선단을 중심으로 일정한 거리를 가지는 위치에 미소압자를 압입하였다. 압입위치는 균열면을 기준으로 상, 하와 균열선단을 기준으로 전, 후방에 각각 미소압자 중심 간의 간격이 20  $\mu\text{m}$  가 되도록 설정하였다. 압입조건은 하중 98.07 mN, 유지시간 5 초로 설정하였으며, 압입된 압흔의 크기는 압흔 대각선 거리가 5  $\mu\text{m}$  로 일정하였다(Photo 1). 예비 균열의 선단에 압자를 압입한 시험편을 시험기에 장착시키고, 하중을 피로시험 조건의 최소하중부터 최대하중에 이를 때까지 하중진폭의 1~2%씩 단계적으로 증가시켰다. 각 하중단계에서 압흔이 있는 균열선단 부위를 자체 제작한 400 배율의 현미경과 CCD 카메라를 연결하여 구성된 이미지 캡처링 시스템으로 촬영하였다. 이로부터 얻은 이미지로부터 압자 중심선 간의 간격을 3 회 측정하여 압자사이의 평균간격을 측정하였다. 피로 균열성장 과정 중 열림하중 변화를 관찰하기 위해 예비 균열선단으로부터 피로균열길이(fatigue crack

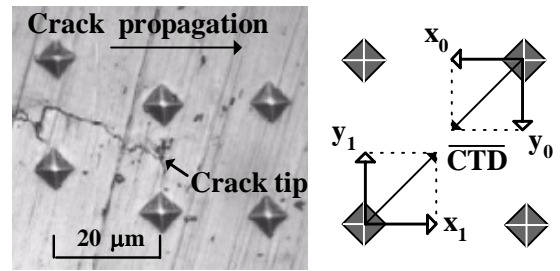


Photo 1. Definition of vector crack tip displacement

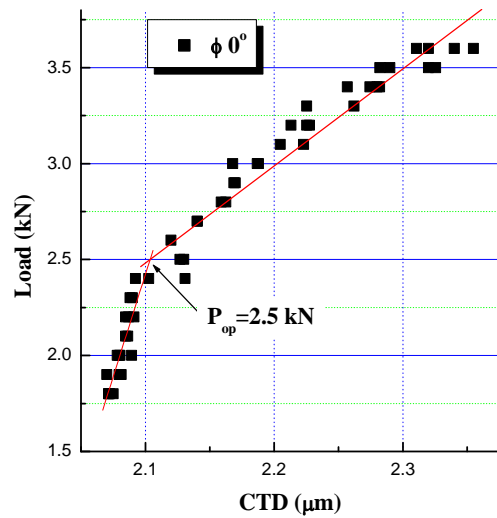


Fig. 2 Definition of  $P_{op}$  from load vs CTD

length: a)가 각각 0, 0.5, 1.5, 3.0 mm 될 때 균열선단 변위를 관찰하였다.

열림하중을 결정하기 위한 방법은 다음과 같다. 임의의 하중에서의 균열선단 압자 중심과 균열 후방 압자 중심간의 위치 변화로부터 얻은 CTD 와 해당 하중과의 선도에서 변곡점을 결정하였다. 이 변곡점으로부터 열림하중을 결정하였고 균열이 발생하기 직전 즉, 피로균열의 길이가 0 mm 인 지점에서의 열림하중 대  $\overline{CTD}$  의 변화를 Figure 2 에 나타내었다. Figure 2 는 하중작용각도가  $0^\circ$  (mode I) 이고 피로균열길이가 0 mm 인 즉, 예비균열 선단에서의 변곡점에 의해 결정된 열림하중이다.

### 2.3.2 피로시험

본 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로 시험기인 Instron 1331 이다. 피로시험은 응력비 0.5 와 10 Hz 의 Sine 파형을 갖는 일정진폭, 최대응력 크기가 45 MPa 의 인장-인장상태의 피로 하중 하에서 수행되었다. 균열선단의 하중상태는 Fig. 1 (c)와 같이 하중작용각도( $\theta$ )를 조절함으로써 모드 I 과 혼합모드 I+II 의 상태가 되도록 조성하

였다. 본 실험에서의 작용모드가 모드 I( $\theta=0^\circ$ )과 혼합모드 I+II( $\theta=30^\circ, 60^\circ$ ) 하중상태에 대하여 피로 시험이 수행되었다.

피로균열의 전파길이와 위치는 예비균열선단에 설정한 기준좌표계를 중심으로 측정하였다. 피로균열의 전파속도는 7 점 증분 다항법(seven point incremental polynomial method)<sup>4)</sup>으로 계산되었다.

수정 CTS 시험편의 혼합모드 하중에 대한 응력 확대계수  $K_I$ 과  $K_{II}$ 는 Richard<sup>5)</sup>가 제안한 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 혼합모드 피로균열에 대한 전파속도의 평가에는  $K_I$ 과  $K_{II}$ 를 조합한 유효응력 확대계수( $K_{eff}$ )를 도입하였으며,  $\Delta K_{eff}$ 는 식 (2)와 같이 Tanaka<sup>6)</sup>가 제안한 식을 이용하여 산출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 혼합모드 피로균열의 전파거동

본 절에서는 혼합모드 일정진폭 하중 하에서 피로균열의 전파거동에 관하여 고찰하였다. 작용하중의 변화에 따른 피로수명의 변화를 비교하기 위하여 모드 I 하중과 혼합모드 I+II 하중 하의 피로수명을 Fig. 3 에서 비교하였다. 여기서 피로수명은 피로균열이 예비균열로부터 전파하여 균열길이가 5 mm 될 때의 하중반복수로 정의하였다. 작용하중의 모드혼합도가 증가함에 따라, 즉 인장성분은 감소하고 전단성분이 증가함에 따라 피로수명은 증가하였다. 혼합모드( $\theta=60^\circ$ ) 하중의 경우 피로수명은 모드 I 에 비하여 약 2.5 배 증가하였다. 이는 동일한 크기의 원거리 응력에 대하여 작용하중의 방향변화에 따른 하중성분의 변화가 균열선단에 작용하는 유효균열진전력의 감소를 유발하였기 때문이다. 따라서 동일한 피로하중이 작용할 경우 하중의 작용방향의 변화에 따른 작용성분의 변화는 피로수명에 영향을 미친다.

모드혼합도의 변화에 따른 피로균열 전파속도의 변화에 대한 비교는 Fig. 4 에 나타내었다. 동일한 예비균열과 원거리 응력에 대하여 하중성분의 변화에 따른 전파속도의 차이는 일정한 차이를 나타내었다. 인장성분의 감소로 인하여 동일  $\Delta K_{eff}$ 에 대한 전파속도는 저하하였다. 이는 예비균열로부터 피로균열의 발생 및 전파초기에 나타나는 균열 단합효과에 의한 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 이는 다음절에 언급된 열림하중에 의한 균열 단합효과를 고려한 Fig. 6 으로부터 확인할 수 있

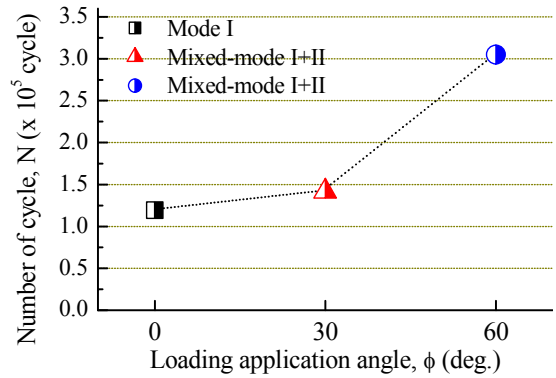


Fig. 3 The comparison of fatigue life

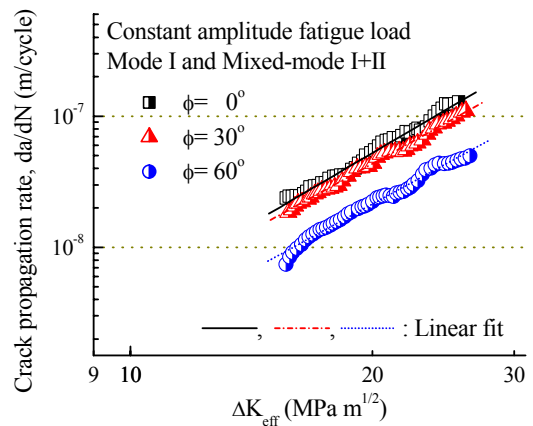


Fig. 4  $da/dN - \Delta K_{eff}$  curves

었다.

#### 3.2 직접측정법에 의한 균열열림 거동

본 절에서는 균열단합을 고려한 피로균열 전파거동을 고찰하였다. 피로균열 전파거동에 있어 실제 균열의 성장과 관련이 있는 균열단합의 영향도는 균열열림비로 평가 될 수 있다. Fig. 5 는 피로균열이 발생 및 전파하면서 모드혼합도에 따른 균열열림비의 변화를 보여준다. 하중작용각도의 크기에 관계없이 균열 발생 직후 균열열림비는 균열이 성장하는 과정보다 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이러한 원인은 균열이 발생할 때는 혼합모드 하중 작용각도의 특성상 전단하중 성분이 크게 작용함을 의미한다. 균열발생 이후 인장하중성분의 작용비가 전단하중성분의 작용비보다 크기 때문이라고 판단된다.

균열발생 후 균열성장 중에는  $a/w$ 비가 0.56 인 지점 다시 말해 피로균열길이가 3.0 mm에 이르면 균열 열림비는 하중 작용각도에 상관없이 일정한 범위로 수렴하며<sup>7)</sup> 이것은 균열진전력(crack driving force)의 증가로 인한 균열단합효과가 감소하는 것이라고 볼 수 있다. 수렴가속도는 하중작용각도가 클수록 더 크다. 수렴가속도가 하중작용각도의 차

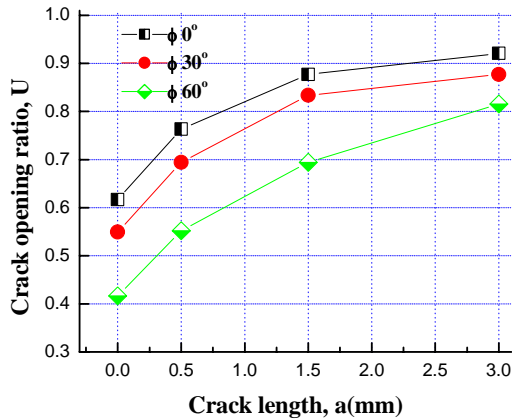


Fig. 5 The variation of U as fatigue crack length

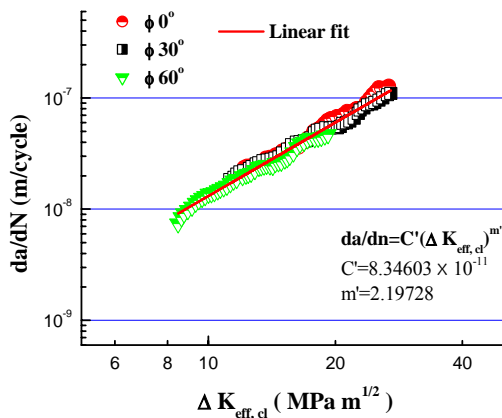


Fig. 6 The behavior of mixed-mode fatigue cracks

이에 따라 다르게 나타나는 경향은 전단하중성분과 인장하중성분 크기의 역전속도 차이에 기인하는 것이다. 본 연구에서 적용된 균열열림비를 산출하기 위한 식은 식 (1)과 같다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff,cl}}{\Delta K_{eff}} = \frac{K_{eff,max} - K_{eff,op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff,cl} = U \cdot \Delta K_{eff} \quad (2)$$

여기서  $\Delta K_{eff,cl}$ 은 균열단힘이 고려된 유효응력확대계수범위이다. 식 (2)를 통해 균열단힘이 고려된 유효응력확대계수범위를 계산할 수 있었고, 이로부터 Paris식을 Fig. 6 에서와 같이 수정할 수 있었다. 수정된 Paris식으로부터 균열전파 중 혼합모드의 전단성분에 따른 영향을 배제할 수 있었다.

### 3.3 균열면 마찰에 의한 균열단힘효과

본 절에서는 모드혼합도의 변화에 따라 다르게 나타나는 균열단힘효과를 피로균열면의 표면거칠 정도를 통해 고찰하고자 하였다. 이를 파악하고자 C-scan 을 이용하여 피로균열의 균열면 형상을 촬

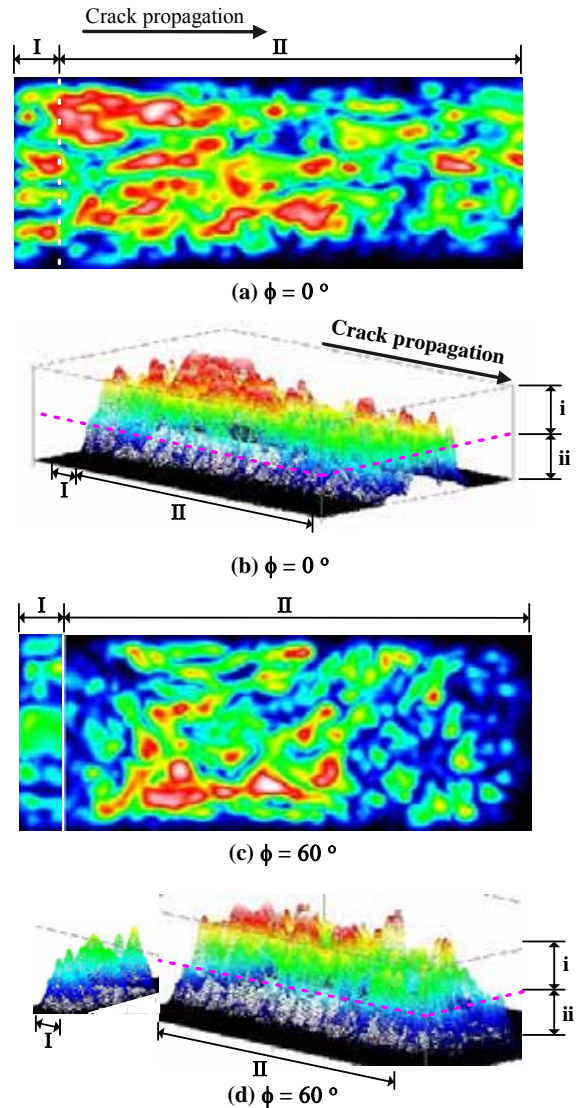


Fig. 7 Crack site shape by C-scan ((a), (c) is 2D image and (b), (d) is 3D image)

영하여 분석하였다.

하중작용각도가 각각 0°, 60°일 때 C-scan 을 이용하여 촬영한 피로균열면의 형상은 Fig. 7 과 같이 2 차원 형상과 3 차원 형상으로 구분하여 나타내었다. 여기서 영역 I 과 II 는 각각 예비균열면 영역과 피로균열면 영역을 구분하여 나타낸 것이고 i 과 ii는 인장하중 성분에 의해 찢김이 발생한 균열면의 최저면 으로부터 최고점까지의 높이를 2 등분한 것이다. (a)와 (c)에서 보이는 컬러 이미지는 (c)와 (d)에서 보이는 컬러 이미지와 일치하는 것으로 일정 높이간격에 따라 상대적으로 다른 색상으로 나누어 형상화 한 것으로 절대 높이는 아니다.

모드혼합도의 차이에 관계없이 균열이 전파함에 따라 균열면의 조도(roughness)는 향상됨을 확인

할 수 있었다.  $K_{II}$  값이 낮은 영역에서는 상대적으로  $K_{II}$  값이 높은 영역에 비해 균열진전력의 크기가 작아 균열성장은 결정(grains) 또는 입자(particles)의 경계를 따라 이루어지는 입계(intergranular) 형태를 보이기 때문이다. 그러나 균열이 전파하면서 즉,  $K_{II}$  값이 커질수록 균열진전력이 증가하여 이 때의 균열성장은 벽계(cleavage) 형태화 된다. 그 결과 균열전파면은 상대적으로 우수한 조도를 보였다.

모드혼합도 차이에 의한 균열면의 형상을 살펴보면  $\theta$  가  $60^\circ$ 인 경우가  $0^\circ$ 인 경우보다 영역 I(pre crack surface)의 표면이 상당히 평평함을 보였다. 영역 II(fatigue crack surface)의 조도를 비교해보면  $60^\circ$ 일 때 5mm 까지 균열이 전파하는 동안이  $0^\circ$ 에서의 그것보다 거칠기 변화도가 더 작게 나타난다. 이는 하중작용각도가 커짐에 따라 유효응력확대계수가 감소하기 때문이다(Fig. 4).

위와 같이 모드혼합도에 의한 피로균열면의 거칠기 차이는 균열발생 당시에 전단하중성분에 의한  $K_{II}$  값이 균열이 전파하면서 급격히 감소하여 균열전파중에는  $K_I$ 가 지배적으로 존재<sup>2)</sup>함으로 설명될 수 있다. 이러한 균열면의 거칠기 변화를 통해 균열면 마찰에 의한 균열단합효과를 확인 할 수 있고 Fig. 5에서의 U값의 변화와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 균열단합효과를 고려하여 혼합모드 하중 하에서의 피로균열 전파특성과 균열면 형상의 변화를 바탕으로 균열단합정도를 고찰하고자 하였다.

1) 혼합모드 하중 하에서 균열단합정도는 균열 발생과 균열전파과정에서의 차이를 보였고 그 결과 모드혼합도에 따라 피로수명의 차이를 보였다.

2) 직접측정법과 벡터 균열선단변위법을 바탕으로 균열전파과정에서 달라지는 균열열림비를 산출할 수 있었고 이를 균열단합을 고려한 유효응력확대계수에 적용시킴으로서 혼합모드 하중 하에서 균열전파식을 수정할 수 있었다.

3) 균열면 마찰에 의한 균열단합정도는 균열면 형상을 통해 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 고려대학교 2004 년도 특별연구에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Chingshen Li, 1989, "Vector CTD Criterion Applied to Mixed mode Fatigue Crack Growth", Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct., Vol. 12, No.1, pp. 59-65.
- 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.
- 3) H. A. Richard and K. Benitz, 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics", Int. J. of Fracture, Vol. 22, pp. R55-R58.
- 4) ASTM E647, 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, pp. 565-601.
- 5) H. A. Richard, 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture", Advances Fracture Research, Vol. 5, pp. 3337-3344.
- 6) K. Tanaka, 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis", Engng.. Fract. Mech., Vol. 6, pp. 493-507.
- 7) J. H. Choi, 1997, "Fatigue Crack Retardation and Closure by Indentations near Crack Tip in High Strength Steel", Doctoral dissertation, Korea University.