

< 논문 >

## 파면거칠기 유도 균열닫힘에 의한 혼합모드 피로균열의 전파거동 및 파면에 대한 평가

서 기 정\* · 이 정 무†

(2006년 8월 21일 접수, 2007년 3월 12일 심사완료)

### Assessment for Propagation Behavior and Fracture Surface of Mixed-mode Fatigue Crack by Fracture Surface-Roughness Induced Crack Closure

Ki-Jeong Seo and Jeong-Moo Lee

**Key Words :** Mixed-mode I+II Loading(혼합모드 I+II 하중), Mode Mixture Ratio(모드혼합비), Surface-Roughness Induced Crack Closure(파면거칠기 유도 균열닫힘), Crack Opening Ratio(균열열림비), Fracture Surface(파면), Fracture Surface Roughness Parameter(파면거칠기 파라미터), Crack Propagation Type(균열전파양식)

#### Abstract

In this study, we have investigated the closure behavior of fatigue cracks in SAPH440 steel plates under a mixed-mode I+II loading. A crack image capturing system as a direct measuring method was used to measure the closure levels at a crack tip. The crack closure levels in the fluctuation and stable sections were increased with the increase of the mode mixture ratio. The mode mixture ratio independent fatigue crack propagation rates equation was calculated by considering mixed-mode crack closure levels. The equation was examined according to the application method of crack opening ratio. The fracture surface analysis by C-scan method was also performed in order to investigate the closure mechanism and propagation mode of crack under the mixed-mode I+II loading. The crack closure under the mixed mode I+II is confirmed as a surface roughness closure by the quantitative analysis of fracture surface using the proposed surface roughness parameter.

#### 1. 서 론

단축하중이 작용하는 재료, 요소 및 구조물에서 임의의 방향성을 가지는 결함이나 설계요소들은 작용하는 하중축과의 관계에 의하여 혼합모드 하중상태에 놓이게 된다. 혼합모드 응력상태는 기울어진 균열, 다중 균열, 접착 및 결합부위, 복합재료에서 발생하는 균열 등에서 볼 수 있다. 부품 및 구조물에 작용하는 응력상태는 복합적이어서

대부분 발생하는 균열은 혼합모드 하중상태에서 비롯되며, 사용환경과 설계조건이 복잡성이 점진적으로 증가함에 따라 혼합모드 하중상태 하의 피로, 파괴거동에 관한 연구는 필수가 되고 있다.

혼합모드 하중 하에서 피로균열의 거동에 관한 연구는 Iida 와 Kobayashi<sup>(1)</sup>의 연구를 시작으로 혼합모드 실험방법의 수행, 응력확대계수식의 정립, 피로균열의 전파방향 예측과 균열전파속도의 평가 및 이를 위한 유효 파라미터의 개발 등에 관한 연구가 이루어져 왔다.<sup>(2)</sup> 근래에는 탄-소성 파괴, 3차원 균열, 복합재료의 파괴 등에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(3-5)</sup>

혼합모드 I+II 하중을 받는 피로균열의 전파거동에서 모드 II 하중은 균열발생 및 전파 초기단계에 균열진전력의 감소에 영향을 미치며, 전파과

† 책임저자, 회원, LG 화학 테크센터 응용기술팀

E-mail : ejmoo@lgchem.com

TEL : (042)860-8533 FAX : (042)863-0689

\* 회원, 한국기계연구원 마이크로응용역학팀

Table 1 Chemical composition 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 (MPa)	Tensile strength (MPa)	Micro Vickers hardness (Hv)	Elongation (%)
302	440	214	44

정에서는 모드 I 하중이 지배적인 상태로 전환되지만 모드 II 하중에 의한 영향은 남아있게 된다.<sup>(6)</sup> 따라서 혼합모드 피로균열의 전파거동에 대한 고찰은 모드 II 하중의 영향을 검토하는 것이 필요하며, 이에 대하여 균열단힘<sup>(7)</sup>을 고려하는 것이 적합하다.

혼합모드 I+II 의 균열단힘은 모드 II 하중에 의하여 발생하는 균열면 사이의 마찰로 인한 영향이 두드러진 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 또한 혼합모드 균열단힘을 평가하고 검증하기 위해서는 균열면의 형태나 균열면의 거칠기에 관한 연구가 필요하다. 하지만 단일모드 하중조건에 대한 연구에 비해 혼합모드 하중조건에 대한 실험적 연구는 측정 등의 어려움으로 인해 부족한 편이다.

본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로 균열의 단힘거동과 그 기구에 대하여 평가하고자 다음과 같은 내용들을 연구하였다. (i) 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 발생, 전파하는 피로균열의 수명 및 전파속도의 변화에 대한 전파거동을 고찰하였다. (ii) 모드혼합비의 변화에 따른 균열단힘수준을 결정하고, 변화의 특징에 대하여 검토하였다. 혼합모드 균열단힘수준을 고려하여 모드혼합비에 독립적인 단일의 피로균열 전파속도식을 산출하였다. (iii) 혼합모드 균열단힘기구와 균열전파양식을 검증하기 위하여 초음파 탐상의 C-scan 방식을 적용한 파면해석을 시도하였다. 이를 이용하여 혼합모드 피로균열의 전파 및 단힘 거동에 대한 정량적인 파면해석을 시도하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료, 시험편과 하중장치

시험에 사용된 재료는 자동차 구조용 열간 압연 강판(SAPH440, KS D3519)으로 시험재료의 화학적

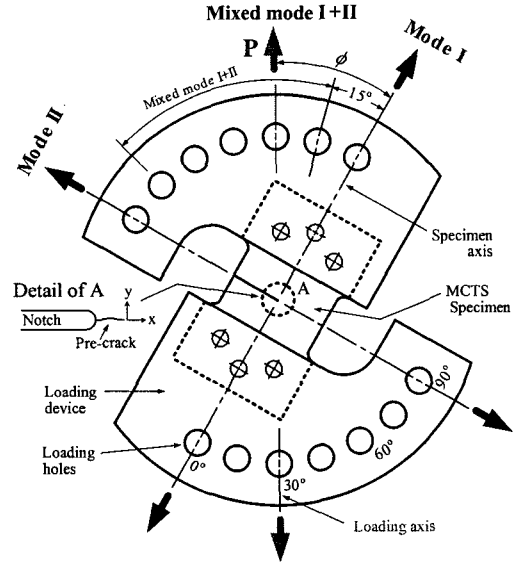


Fig. 1 The shape of the modified compact tension shear specimen fitted to the loading device

성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 와 같다.

본 연구에서는 균열전단에 혼합모드 하중을 부과하기 위하여 Fig. 1 과 같이 두께 2 mm 의 수정 단순인장전단(modified compact tension shear, MCTS)시험편과 하중장치<sup>(9)</sup>를 사용하였다. 하중작용각도(loading application angle,  $\phi$ )를 변화시켜 균열전단에 작용하는 인장 및 전단응력성분의 비율을 조절함으로써 다양한 하중모드가 조성되도록 하였다.  $\phi$  가 0°는 모드 I, 90°는 모드 II 하중상태이며, 그 사이는 혼합모드 I+II 상태이다. 여기서  $\phi$  의 증가는 작용하중의 모드 II 전단성분이 증가하는 것을 의미하며, 모드혼합비(mode mixture ratio)의 증가를 나타낸다.

### 2.2 혼합모드 피로시험

본 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축 피로시험기인 Instron 1331 이며, 일정진폭하중의 피로시험에 대한 조건은 Table 3 과 같다.

MCTS 시험편의 혼합모드 하중에 대한 응력확대계수(stress intensity factor, SIF)  $K_I$  과  $K_{II}$  는 Richard<sup>(10)</sup>가 제안한 식 (1)을 이용하여 계산하였다.  $K_I$  과  $K_{II}$  를 조합한 유효응력확대계수(effective stress intensity factor,  $K_{eff}$ )를 도입하였으며, 유효응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$  는 식 (2)와 같이 Tanaka<sup>(11)</sup>가 제안한 식을 이용하였다.

Table 3 Basic fatigue test condition under Mode I and Mixed-mode I+II

Type of load	Tension-tension
Load magnitude	$P_{max} = 3.6 \text{ kN}$ $P_{min} = 1.8 \text{ kN}$
Stress ratio	$R = 0.5$
Frequency	$f = 10 \text{ Hz}$ Sinusoidal wave
Initial crack	$a_m = 19.0 \text{ mm}$ $a_{pc} = 0.5 \text{ mm}$

$a_m$  : machined notch length,  $a_{pc}$  : pre-crack length

Table 4 Classification of applied modes in each case

Mode	Mode I	Mixed mode I+II	
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 60^\circ$
Specimen code	C0	C3	C6
$\Delta K_{II} / \Delta K_{eff}$	0	0.288	0.567

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos\phi \frac{1}{1-\frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26+2.65\frac{a}{W-a}}{1+0.55\frac{a}{W-a}-0.08\left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin\phi \frac{1}{1-\frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23+1.40\frac{a}{W-a}}{1-0.67\frac{a}{W-a}+2.08\left(\frac{a}{W-a}\right)^2}}$$

$$\Delta K_{eff} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

여기서  $a$  는 초기균열(노치+예비균열)과 피로균열을 합친 길이이며,  $W$  는 시험편의 폭이다.

시험편의 구분은 Table 4 와 같으며, 모드혼합비는  $\phi$  로, 그 크기는  $\Delta K_{II} / \Delta K_{eff}$  으로 나타내었다. 피로균열의 전파길이는 균열이미지 캡처링 시스템을 이용하여 균열증분( $\Delta a$ )이 5 mm 가 될 때까지 0.1 mm 단위로 측정하였다. 피로균열의 전파속도 ( $da/dN$ )는 7 점 증분 다항법으로 계산하였다.

### 2.3 혼합모드 균열닫힘수준의 측정

#### 2.3.1 혼합모드 균열열림하중( $P_{op}$ )의 측정

모드 I 하중과 달리 혼합모드 I+II 하중을 받는 경우 균열선단에서는 열림 변형뿐만 아니라 미끄럼 변형이 발생하므로 이들을 균열열림하중(crack opening load,  $P_{op}$ )의 결정에 반영할 수 있는 측정방

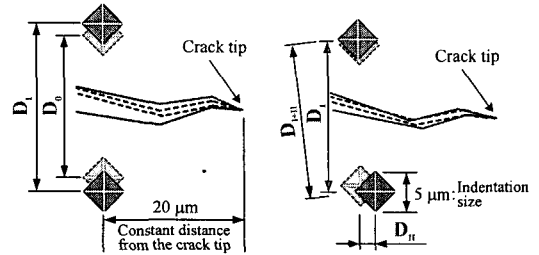


Fig. 2 The definition of fatigue crack tip displacement ( $D_0, D_I, D_{II}, D_{I+II}$ ) with the change of applied load from  $P_{min}$  to  $P_{max}$  (At  $P_{min}$ , crack marked in dotted line, at  $P_{max}$ , crack marked in solid line)

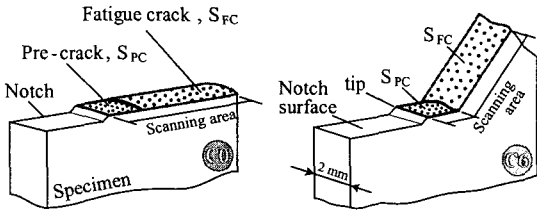
법의 사용이 필요하다. 따라서 하중모드에 관계없이 시험편의 표면부에서 균열선단변위(crack tip displacement, CTD)를 측정할 필요가 있으며, 이를 위하여 균열이미지 캡처링 시스템을 이용한 직접 측정법(direct measuring method)<sup>(12)</sup>을 사용하였다. 최소하중( $P_{min}$ )과 최하중( $P_{max}$ )에서 하중모드의 변화에 따른 CTD의 정의와 거동은 Fig. 2와 같다.

혼합모드 I+II 하중의 경우 두 압흔 사이의 간격  $D_{I+II}$  는 모드 I 하중에 의한 열림 변위(opening displacement)  $D_I$  과 모드 II 하중에 의한 미끄럼 변위(sliding displacement)  $D_{II}$  가 모두 반영된 CTD를 나타낸다(하첨자 I, II 는 모드를 의미).  $P_{op}$  는 측정된 CTD와 하중과의 관계선도로부터 CTD의 변곡점에 해당하는 하중으로 결정하였다.<sup>(13,14)</sup>

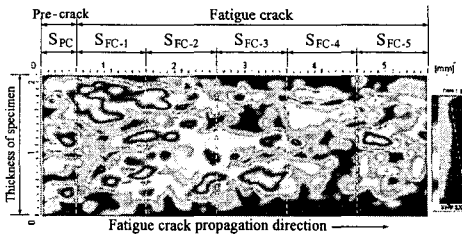
#### 2.3.2 피로균열의 파면거칠기 측정

균열진전력의 대소를 평가하는 중요한 자료가 되는 파괴형태에 대한 분석은 주로 프랙토그래피(fractography) 분석과 파면거칠기를 분석하는 방법이 사용된다.<sup>(15,16)</sup> 본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중에 대한 피로균열 닫힘기구(fatigue crack closure mechanism)를 설명하기 위하여 파면해석을 시도하였으며, 균열면의 특성을 나타내는 파면거칠기를 해석인자로 사용하였다.

파면의 변형이나 양상에 관한 연구는 주로 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)을 이용한 프랙토그래피 분석이 주를 이루고 있으며, 이에 대한 정량화는 원자력 현미경(atomic force microscope, AFM)으로 대표되는 주사형 탐침현미경(scanning probe microscope, SPM)을 이용하여 표면 물리량의 3 차원 측정을 통하여 이루어지고 있다.<sup>(17,18)</sup> 이와 같은 측정방법 및 분석은 파면의



(a) The division of the fracture surface region



(b) 2 dimensional image of the fatigue fracture surface (The case of C0)

Fig. 3 The measurement for roughness of the fatigue fracture surface by using the C-scan method

미세구조를 평가하기에는 유용하나 파면 전체의 거시적인 거칠기 수준과 그의 변화를 평가하기에는 측정범위가 협소하여 시간적인 측면에서 유용하지 못하다.

본 연구에서는 파면거칠기를 측정하는 방법의 선택요건을 실험절차가 간단하고, 파면 전체에 대한 거시적인 관찰이 가능한 측정범위를 가지며, 거칠기의 변화를 상대적으로 비교하고, 이를 정량화 처리하는데 용이한가로 설정하였다. 상기 요건에 부합하는 초음파 탐상의 C-scan 방식을 선택하여 균열면의 파면거칠기를 측정하였다.

C-scan 방식은 초음파계측을 통하여 수평단면을 관찰하는 방법으로 본 계측에서는 Hitachi 사의 초음파 영상장치(mi-scope system)를 사용하였다. 시험조건은 펄스에코방식(pulse-eco mode)으로 중심주파수 25 MHz, 직경 8 mm, 초점거리 17 mm 를 갖는 수침탐촉자를 사용하였으며, 계측영역의 크기는 6 mm x 4 mm, pixel 크기는 0.015 mm 로 하였다.

파면의 거칠기는 Fig. 3(a)처럼 파면영역을 각각 예비균열면( $S_{PC}$ )과 피로균열면( $S_{FC}$ )의 영역으로 나누어 측정하였다. 또한 피로균열면은 파면거칠기의 변화를 비교하기 위하여 1 mm 단위로  $S_{FC-1}$  부터  $S_{FC-5}$  까지 5 개의 구간으로 나누었다. 측정된 2 차원의 파면거칠기에 대한 이미지는 Fig. 3(b)와 같

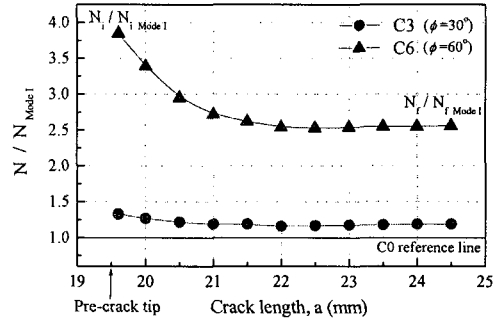


Fig. 4 Variation of normalized fatigue life ratio to Mode I ( $N_f/N_{f, Mode I}$  and  $N_f/N_{f, Mode I}$  : Normalized initiation and total fatigue life ratio to Mode I (C0))

으며, 파면의 표면으로부터 일정한 회귀신호 (mV)<sup>(19)</sup>를 갖는 높이를 동일한 색으로 표시하는 방식으로 파면거칠기를 나타내고 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 혼합모드 피로균열의 전파거동

본 절에서는 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 나타나는 피로수명의 변화 및 균열의 전파거동에 관하여 고찰하고자 한다.

피로균열의 발생수명(initiation life,  $N_i$ )은 예비균열로부터 전파한 피로균열의 길이가 0.1 mm 일 때의 하중반복수로, 전체 피로수명(total fatigue life,  $N_f$ )은 피로균열의 선단에 과도한 소성변형이 발생하기 전인 균열길이가 5 mm 일 때의 하중반복수로 설정하였다. Fig. 4 는 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 균열전파에 따른 수명의 변화를 모드 I 에 대한 수명비( $N/N_{Mode I}$ )로 나타낸 것이다.

모드혼합비가 증가함에 따라 균열의 발생 및 전체 피로수명은 C0 보다 증가하였으며, C6 의 경우는 각각 3.85 배와 2.56 배의 현저한 증가를 보였다. 이는 모드 II 하중의 증가로 초래되는 균열진전력의 감소에 따른 결과이다. 특히 C0 와 C6 사이의 발생수명에서 나타나는 큰 차이는 모드 II 하중에 의해 일어나는 예비균열면에서의 전단변위가 균열면 마찰을 초래하여 발생한 균열달힘의 영향이 C6 에 크게 작용하기 때문이다.

피로균열이 초기균열로부터 분기 전파한 후, C0 에 대한 C3 와 C6 의 각 피로수명비는 일정한 수준에 이르기까지 균열전파 초기단계에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한  $N/N_{Mode I}$  의 감소과정

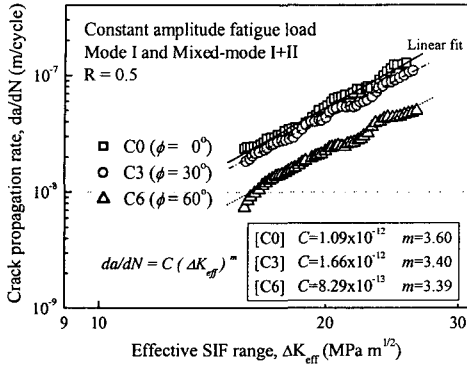


Fig. 5 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K_{eff}$  with  $\phi$

은 균열 발생 및 분기 단계에서 균열면의 마찰과 이로 인해 유도되는 거칠기에 의한 균열단합의 영향이 피로균열의 전파와 함께 변하기 때문이다. 따라서 피로균열의 발생 및 전파 초기단계에 대한 단합거동의 고찰이 혼합모드 I+II 하중 하에서의 피로수명을 평가하는데 중요한 역할을 한다.

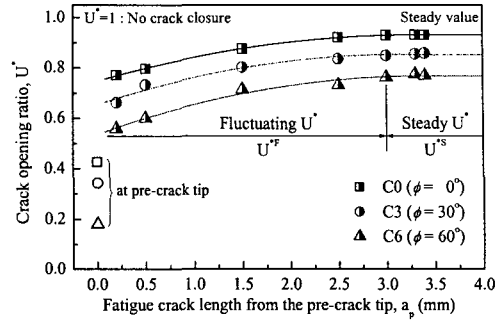
모드혼합비의 변화에 따른  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  선도는 Fig. 5 와 같으며,  $\phi$ 의 변화에 따라 분명하게 구분되어 나타났다. 여기서  $\Delta K_{eff}$ 의 증가에 따른 피로균열 전파속도의 변화율은 각  $\phi$  별로 거의 일정하게 유지되고 있는데, 이는 피로균열의 전파과정에서 균열선단에 작용하는 하중상태가 모드혼합비에 관계없이 유사하게 유지되고 있기 때문이다. 하지만 피로균열의 발생 및 전파 초기단계의 균열단합에 의한 전파속도의 차이가 반영되어  $\phi$ 의 변화에 따라 각기 다른  $da/dN$  과  $\Delta K_{eff}$  사이의 관계식이 구해진다. 따라서 모드혼합비에 독립적인 피로균열 전파속도식을 도출하고, 평가하기 위해서는 혼합모드 I+II 하중에서의 균열 단합거동에 관한 고찰이 필요하다.

3.2 혼합모드 피로균열의 단합거동

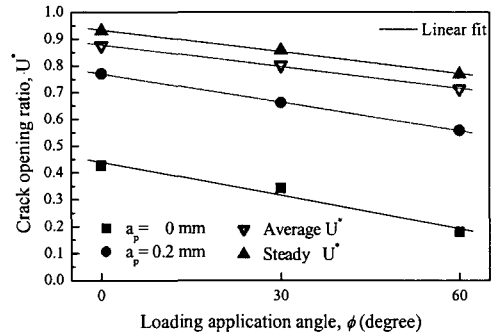
3.2.1 혼합모드 피로균열 단합거동의 특징

본 절에서는 균열열림하중과 균열열림비를 결정함으로써 혼합모드 I+II 하중 하에서 일어나는 피로균열의 단합거동에 대하여 고찰하고자 한다.

피로균열 전파속도식에서 균열단합수준은 모드 I 하중 하에서 균열열림비(crack opening ratio, U)로 표현되며, 이는 전체 응력확대계수범위에 대하여 실제로 균열의 전파에 기여하는 유효응력확대계수범위의 비율이다. 본 연구에서 모드 I 과 모드 II 가 반영된 균열열림비( $U^*$ )는 측정된 균열열림하중



(a) Variation of crack opening ratio  $U^*$  with  $a_p$



(b) Variation of crack opening ratio  $U^*$  with  $\phi$

Fig. 6 The crack closure behavior of fatigue crack under mixed-mode I+II loading

( $P_{op}$ )을 이용하여 다음의 식 (3)으로 계산된다.

$$U^* = \frac{\Delta K_{eff,cl}}{\Delta K_{eff}} = \frac{K_{eff,max} - K_{eff,op}}{K_{eff,max} - K_{eff,min}} \quad (3)$$

여기서  $K_{eff,op}$ 는  $P_{op}$ 에 대하여 모드 I 과 II 가 조합된 유효응력확대계수이며,  $\Delta K_{eff,cl}$ 은 균열단합이 반영된 유효응력확대계수범위이다.

모드혼합비의 변화에 따라  $P_{op}$ 를 측정하여 얻은  $U^*$ 의 변화는 Fig. 6(a)와 같이 모든 조건에서 균열이 전파함에 따라 점차 증가하며, 이는 균열단합 수준의 감소를 의미하고,  $a_p=3$  mm 이상에서는 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다. 전파하는 피로균열선단에서의  $U^*$ 와 비교하여, 예비균열선단 ( $a_p=0$  mm)에서  $U^*$ 는 상당히 작게 나타났으며, C0와 C6 사이의  $U^*$ 의 차이도 균열전파단계와 비교하여 상대적으로 크게 나타났다. 이는  $\phi$ 의 변화에 따른 하중성분의 변화와 이로 인한 균열면의 마찰이 예비균열선단에 작용하는 실질 균열진전력

**Table 5** Variation of  $U^{*S}$  with  $\phi$  and  $U^{*S}$ - $\phi$  relation

	C0	C3	C6
$U^{*S}$	0.931	0.854	0.769
$U^{*S}$ - $\phi$ relation	$U^{*S} = 0.93233 - 0.1547 \left( \frac{\pi \phi}{180} \right)$		

- Experimental condition :  $R=0.5$ ,  $P_{max}=3.6$  kN
- $0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$

**Table 6**  $U^{*F}$ -( $a_i/a_0$ ) relations with  $\phi$

	$U^{*F}$ -( $a_i/a_0$ ) relations with loading mode
C0	$U^{*F} = -7.7405 + 14.8133(a_i/a_0) - 6.3254(a_i/a_0)^2$
C3	$U^{*F} = -9.5313 + 17.8904(a_i/a_0) - 7.7051(a_i/a_0)^2$
C6	$U^{*F} = -10.0372 + 18.4437(a_i/a_0) - 7.8711(a_i/a_0)^2$

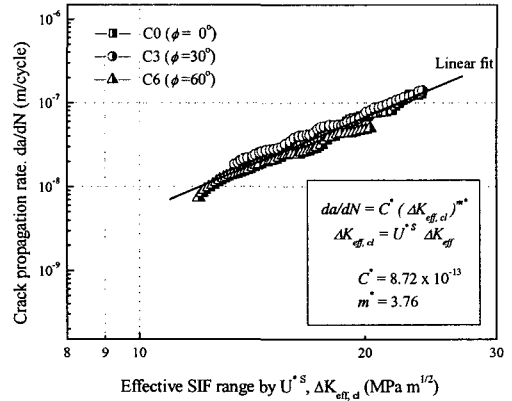
- Applying range :  $1 < (a_i/a_0) \leq 1.15$
- $a_i$  : fatigue crack length at  $i$  th loading cycle
- $a_0$  : initial crack length, notch( $a_m$ ) + pre-crack( $a_{pc}$ )

을 크게 감소시켰기 때문이다. 하지만 균열전파에 따라 모드 II 하중에 의한 균열단합의 영향은 감소하고, 모드 I 이 지배적인 상태 하에서 균열진전력은 회복되어  $U^*$ 가 증가하는 것으로 나타났다.

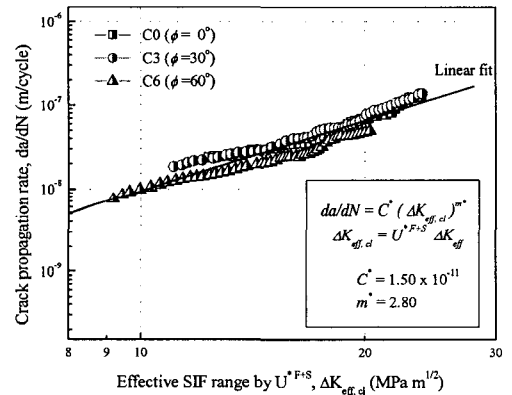
각 전파단계 별로  $\phi$ 와  $U^*$ 의 관계는 Fig. 6(b)와 같이 나타났다. 모드혼합비가 증가함에 따라  $U^*$ 는 선형적으로 감소하여, 균열단합수준이 증가함을 보였다. 또한 균열이 전파할수록 C3와 C6 사이의  $U^*$ 의 차이는 점차 감소하였다.

이상과 같이  $U^*$ 는 균열의 전파와 모드혼합비의 변화에 따른 영향<sup>(20)</sup>을 받고 있으므로  $U^*$ 의 변화에 대한 고찰은 혼합모드 피로균열의 단합거동을 평가하는데 중요하다. 본 연구에서는  $U^*$ 의 변화를  $a_p=3$  mm 를 기준으로 변동구간의  $U^{*F}$  (Fluctuating  $U^*$ )와 안정구간의  $U^{*S}$  (Steady  $U^*$ )로 구분하였다.  $U^{*S}$ 는 모드혼합비가 증가함에 따라 감소하였으며, Table 5와 같이 선형적인 관계를 가지며,  $U^{*F}$ 는 피로균열의 전파에 따라 ( $a_i/a_0$ )에 대하여 Table 6과 같은 관계로 정리할 수 있었다.

혼합모드 피로균열의 단합거동을 균열단합기구의 측면에서 정리하면, 보고되어 온 여러 가지의 메커니즘<sup>(21)</sup> 중에서 파면거칠기와 모드 II 하중의 작용에 의하여 주로 유발되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 균열 발생 및 전파 초기단계에서 모드 II 전단하중성분에 의하여 초래되는 균열면의 마찰에



(a) In the case of applying  $U^{*S}$



(b) In the case of applying  $U^{*F+S}$

**Fig. 7** The calculated equations of fatigue crack propagation rate by considering mixed-mode crack

대한 정량적인 검토가 필요하다.

### 3.2.2 혼합모드 균열단합을 고려한 피로균열 전파속도식의 수정

혼합모드 I+II 균열단합이 고려된 식 (4)의 유효 응력확대계수범위  $\Delta K_{eff,cl}$ 을 이용하여 식 (5)와 같이 피로균열 전파속도식을 수정할 수 있다.

$$\Delta K_{eff,cl} = U^* \cdot \Delta K_{eff} \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = C^* (U^* \cdot \Delta K_{eff})^{m^*} = C^* (\Delta K_{eff,cl})^{m^*} \quad (5)$$

여기서  $C^*$ 와  $m^*$ 는 균열단합을 고려한 피로균열 전파속도식의 재료상수이다.

$U^*$ 는 균열이 전파함에 따라 Fig. 6(a)와 같이 변

하며, 본 연구의 피로수명 범위 내에서  $U^*$ 의 변동 구간( $U^{*F}$  구간)은 전체 균열전파 구간에 대해서 상당한 부분에 해당함을 알 수 있다. 그러므로 균열단힘을 반영하는 경우  $\Delta K_{eff}$ 에 어떠한  $U^*$ 를 적용해야 할 것인가를 고려해야 한다.

본 연구에서는 (i)  $a_p=3$  mm 이후 산출된 평균  $U^*$ 를 전구간에 단일 적용하는 방법과 (ii)  $U^{*F}$ 와  $U^{*S}$ 를 피로균열의 전파구간에 따라 순차적으로 혼합 적용시키는 방법(이후  $U^{*F+S}$  적용으로 표시)을 검토하였다. 균열열림비  $U^{*S}$ 와  $U^{*F+S}$ 를 반영한 피로균열의 전파선도는 Fig. 7과 같으며, 균열열림비의 적용방법에 따라 하중작용각도  $\phi$ 와는 무관하게 선형적으로 예측할 수 있는 각각의 피로균열 전파식을 산출하였다.

혼합모드 균열단힘이 고려된 균열전파선도는 Fig. 7과 같이  $U^*$ 의 적용방법(i, ii)에 따라 균열단힘이 고려되지 않은 선도로부터  $\Delta K_{eff,cl}$ 의 차이만큼 평행 이동한다. 이 중에서  $U^{*F+S}$ 를 적용하는 경우, 균열전파에 따라  $U^{*F}$ 는 낮은  $\Delta K_{eff}$  영역에 적용되기 때문에  $U^{*S}$ 를 적용하는 구간보다 평행 이동량이 크게 나타난다. 또한  $da/dN-\Delta K_{eff,cl}$  선도는  $U^*$ 의 두 적용구간에서 나타나는 평행 이동량의 차이로 인하여 Fig. 7(b)와 같이 약간 굴절되어 표시된다.

혼합모드 균열단힘을 고려함으로써 Fig. 5와는 달리 평행이동된 피로균열 전파선도로부터 하나의 피로균열 전파속도식을 산출할 수 있으며, 이는 모드혼합비의 영향을 배제하여  $\phi$ 별 차이에 관계없이 피로균열의 전파거동을 평가하는 것이 가능하게 한다.  $U^{*S}$ 를 적용하는 일반적인 방법과 달리  $U^{*F+S}$ 를 적용하는 방법은 실제 피로균열의 거동을 표현하는 데는 충실하지만 피로균열 전파선도의 굴절에 의한 수렴성의 감소를 가져온다. 하지만 피로균열의 전파구간이 미소한 조건에 대해서는  $U^{*F+S}$ 의 적용을 고려할 필요가 있다고 생각된다.

### 3.3 파면해석에 의한 혼합모드 균열단힘거동의 고찰

본 절에서는 초음파 탐상의 C-scan 방식으로 촬영한 2 차원의 파면 이미지를 이용하여 균열면의 거칠기 수준을 평가하고자 한다. 파면거칠기 파라미터를 도입하고, 이를 이용하여 혼합모드 I+II 하중 하의 균열단힘기구와 균열전파양식에 대한 검토를 시도하고자 한다.

#### 3.3.1 파면거칠기 파라미터의 도입

본 절에서는 C-scan 방식으로 촬영한 2 차원의

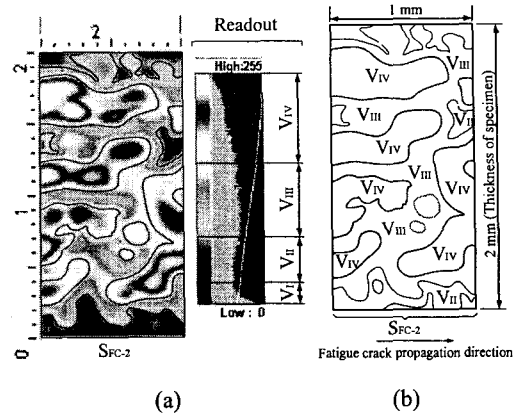


Fig. 8 The Simplification of 2-dimensional image to analyze of fracture surface (a) Fracture surface image (b) Contour plot consisted of 4 steps readout

파면거칠기 이미지를 정량적으로 해석하기 위하여 파면평가를 위한 파면거칠기 파라미터의 도입에 대하여 설명하고자 한다.

촬영된 균열면의 C-scan 파면 이미지는 예비균열 파면( $S_{FC}$  영역)과 피로균열 파면( $S_{FC}$  영역)에서 반사된 초음파 회귀신호(mV)의 세기에 따라 여러 가지의 색상으로 표시된다. 본 연구에서는 용이한 파면해석을 위하여 파면 이미지를 단순화시키고자 Fig. 8(a)의 세로축 회귀신호를  $V_I$ 부터  $V_{IV}$ 까지 4 단계로 구분하였다. 회귀신호의 세기 범위를 100%로 설정하면, 각 단계에서 신호세기의 범위는  $V_I$ 의 경우 10%,  $V_{II}$ 의 경우 20%,  $V_{III}$ 의 경우 30%,  $V_{IV}$ 의 경우 40%에 해당한다. 이를 이용하여 Fig. 8(b)와 같이 파면 이미지를 4 단계의 회귀신호로 단순화시켰으며, 동일 회귀신호 단계에 해당하는 영역의 둘레를 등고선으로 표시하여 파면거칠기로 나타내었다. 여기서 평면상으로 표현된 등고선을 계량적으로 활용하기 위하여 등고선 안쪽의 면적을 파면거칠기를 나타내는 파라미터의 요소로 사용하였다.

이상과 같은 단순화 과정을 통하여 도입한 균열면의 파면거칠기 파라미터는 각 파면영역의 투영 면적에 대하여 각 회귀신호단계가 차지하는 등고선 안쪽 면적의 백분율로 정의된다. 이를 등고선 면적 거칠기 파라미터(contour area roughness parameter,  $R_{CA}$ )로 정하였고, 그 예로 피로균열면  $S_{FC-2}$  영역에 대한 회귀신호  $V_{IV}$ 의  $R_{CA}$ 는 식 (6)처럼 표시된다.

$$R_{CA} - [V_{IV}] (\%) = \frac{\text{Contour area of } V_{IV}}{\text{Projected area of } S_{FC-2}} \times 100 \quad (6)$$

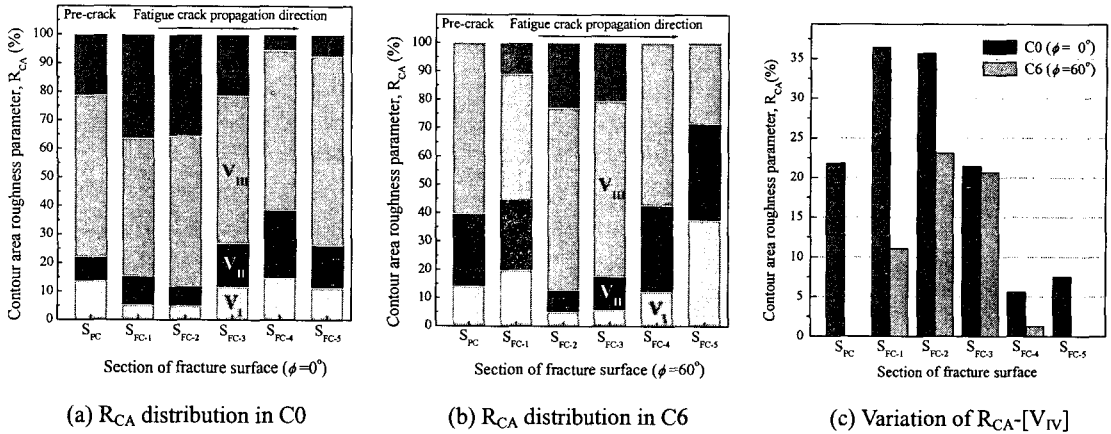


Fig. 9 Analysis of fracture surface by using the contour area roughness parameter, R<sub>CA</sub>

3.3.2 혼합모드 균열단합기구와 전파양식

본 절에서는 R<sub>CA</sub> 를 이용한 파면해석을 통하여 혼합모드 I+II 하중 하의 균열단합기구를 확인하고, 균열전파에 따른 전파양식을 정량적으로 비교하고자 한다.

모드 I 의 C0 (φ=0°)와 혼합모드 I+II 하중의 C6 (φ=60°) 조건에 대하여 각 파면영역에서 등고선 면적 거칠기 파라미터인 R<sub>CA</sub>-[V<sub>I</sub>]에서 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]까지의 분포는 Fig. 9(a), (b)와 같으며, 이는 파면영역별 각 회귀선호단계의 R<sub>CA</sub> 가 차지하는 비율을 나타낸다. 특히 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]의 변화를 고찰함으로써 혼합모드 I+II 하중 하에서 정량적인 파면해석의 수행이 가능하며, 균열거동의 특징을 파악할 수 있었다.

혼합모드 I+II 하중 하에서 균열단합기구에 대한 파악은 예비균열면의 거칠기 상태를 검토함으로써 가능하다. Fig. 9(a), (b)에서 S<sub>PC</sub> 의 파면을 살펴보면, C0 와 비교하여 C6 의 경우 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]는 나타나지 않으며, R<sub>CA</sub>-[V<sub>I</sub>]과 R<sub>CA</sub>-[V<sub>II</sub>]의 비율이 큰 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 파면거칠기의 수준이 낮음을 의미한다. 두 하중모드 사이의 이러한 파면거칠기의 차이는 균열면의 마찰에 의한 마멸로 C6 의 거칠기 수준이 감소했기 때문이다. 이는 혼합모드 I+II 하중의 전단성분에 의한 모드 II 변위의 발생과 이로 인한 상하 균열면의 불일치가 마찰을 일으킨 결과로 혼합모드 균열단합기구에 대한 증거이다. 이처럼 파면거칠기에 의하여 유발되는 균열의 단합거동은 피로균열의 발생 및 전파 초기단계에서 현저하게 나타나고 있다.

피로균열의 파면(S<sub>FC</sub>)에서는 피로균열의 전파에

따라 Fig. 9(c)와 같이 S<sub>FC-1</sub>~S<sub>FC-5</sub> 에서 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]의 변화를 살펴봄으로써 균열전파양식의 변화를 파악할 수 있다. C0 의 경우, 피로균열이 전파함에 따라 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]는 S<sub>FC-3</sub> 부터 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 균열면의 마멸에 의한 거칠기 수준의 감소보다는 피로균열의 전파에 따른 균열진전력의 증가에 의한 것이다. 균열의 전파양식이 낮은 ΔK 영역에서는 입계(intergranular) 파괴형태를 보이며, 높은 ΔK 영역에서는 입내(transgranular) 파괴형태화 되면서 균열 전파에 따라 상대적으로 거칠기가 개선되고 있다. C6 의 경우는 균열면 간의 마멸로 인해 감소했던 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]가 균열 전파에 따라 증가하였다가 S<sub>FC-4</sub> 부터 급격히 감소되고 있다. 이는 균열의 전파가 모드 I 지배 하에서 C0 와 유사하게 벽계 파괴형태에 가깝게 전개되는 것으로 추정된다. 또한 S<sub>FC-4</sub> 부터 나타나는 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]의 급격한 감소는 C0 와 C6 모두에서 균열단합수준이 일정한 값에 이른다는 앞서 검토한 Fig. 6(a)에서 U°의 변화 결과와 일치하는 것이다. 여기서 C6 의 경우 상대적으로 R<sub>CA</sub>-[V<sub>IV</sub>]가 작게 나타나는 것은 균열면 마찰의 영향이 남아 C0 보다 균열단합수준이 높게 나타나기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로균열의 단합거동과 그 기구에 대한 정량적 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 혼합모드 I+II 하중에서 모드혼합비의 증가는 모드 II 하중의 영향에 의한 실질적인 균열진전력의 감소를 유발함으로써 피로수명은 증가하였



으며, 피로균열 전파속도식을 모드혼합비의 수준에 따라 개별적으로 산출할 수 있었다.

(2) 혼합모드 균열담힘수준은 모드혼합비가 증가할수록 크게 나타났으며, 피로균열이 전파함에 따라 점차 감소하여, 전체 균열전과길이의 60% 지점부터는 일정한 수준을 유지하였다. 이러한 균열열림비( $U^*$ )의 변화는 안정화되는 지점을 기준으로 변동구간의  $U^F$ 와 안정구간의  $U^S$ 로 구분하여, 모드혼합비와의 관계를 검토하였다.

(3) 혼합모드 균열담힘을 고려함으로써 모드혼합비에 독립적인 하나의 피로균열 전파속도식을 산출하였다. 평균  $U^S$ 를 전구간에 단일 적용하는 방법과  $U^F$ 와  $U^S$ 를 혼합 적용( $U^{F+S}$  적용)하는 방법으로 산출된 각 피로균열 전파속도식의 특성을 검토하였다.

(4) 파면해석을 위하여 파면 전체에 거시적이고, 신속한 관찰이 가능한 초음파 탐상의 C-scan 방식을 적용하였다. 정량적인 파면거칠기 수준의 평가를 위하여 단순화시킨 2 차원 이미지의 해석에 등고선 면적 거칠기 파라미터를 도입하였다.

(5) 등고선 면적 거칠기 파라미터를 이용한 정량적 파면해석으로 혼합모드의 균열담힘기구는 모드 II 변위의 발생에 기인하는 파면거칠기에 의한 것이며, 피로균열의 전파양식은 피로균열이 전파함에 따라 입계 파괴형태에서 입내 파괴에 가까운 형태로 변화하고 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) Iida, S. and Kobayashi, A. S., 1969, "Crack-Propagation Rate in 7075-T6 Plates under Cyclic Tensile and Transverse Shear Loadings," *Journal of Basic Engineering*, Series D 91, pp. 764~769.
- (2) Qian, J. and Fatemi, A., 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969~990.
- (3) Subramanya, H. Y., Viswanath, S. and Narasimhan, R., 2005, "A Three-dimensional Numerical Study of Mixed Mode (I and II) Crack Tip Fields in Elastic-Plastic Solids," *International Journal of Fracture*, Vol. 136, pp. 167~185.
- (4) Laukkanen, A., 2001, "Analysis of Experimental Factors in Elastic-Plastic Small Specimen Mixed-mode I-II Fracture Mechanical Testing," *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*, Vol. 24, No. 3, pp. 193~206.
- (5) Silva, A., and Moreira De Freitas, M. J., 2003, "Mixed-mode Delamination Growth of Laminar Composites by Using Three-dimensional Finite Element Modeling," *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*, Vol. 26, No. 6, pp. 543~549.
- (6) Song, S. H. and Lee, J. M., 2003, "Fatigue Crack Propagation Behavior in STS304 under Mixed Mode Loading," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 6, pp. 794~804.
- (7) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure in Damage Tolerance in Aircraft Structure," *ASTM STP*, Vol. 486, pp. 230~242.
- (8) Pippan, R., Strobl, G., Kreuzer, H. and Motz, C., 2004, "Asymmetric Crack Wake Plasticity-a Reason for Roughness Induced Crack Closure," *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 4493~4502.
- (9) 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.
- (10) Richard, H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337~3344.
- (11) Tanaka, K., 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 493~507.
- (12) Song, S. H. and Kim, H., 1992, "Analysis of Fatigue Crack Opening Behavior Using Direct Measuring Method," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 16, No. 8, pp. 1493~1502.
- (13) Stoychev, S. and Kujawski, D., 2003, "Methods for Crack Opening Load and Crack Tip Shielding Determination: A Review," *Fatigue Fracture Engineering Materials Structure*, Vol. 26, pp. 1053~1067.
- (14) Song, S. H., Seo, K. J. and Lee, J. M., 2005, "Determination and Application of  $U$  and  $K_{op}$  for Crack Closure Evaluation under Mixed-mode Loading," *Transactions of KSAE*, Vol. 13, No. 3, pp. 32~39.
- (15) Anderson, H. and Person, C., 2004, "In-situ SEM Study of Fatigue Crack Growth Behavior in IN718," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 211~219.
- (16) Shyan, A. and Milligan, W. W., 2004, "Effects of Deformation Behavior on Fatigue Fracture Surface Morphology in a Nickel-Base Superalloy," *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 1503~1513.
- (17) Antunes, F.V., Ramalho, A. and Ferreira, J. M., 2000, "Identification of Fatigue Crack Propagation Modes by Means of Roughness Measurements," *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 781~788.
- (18) Choi, S. J., Kwon, J. D. and Ishii H., 2001, "Nano-Scale Observation of Fatigue Striations for Aluminum Alloy," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 25, No. 7, pp. 1047~1054.
- (19) Y. Onur Kas and Cevdet Kaynak, 2005, "Ultrasonic (C-scan) and Microscope Evaluation of Resin Transfer Molded Epoxy Composite Plates," *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 114~120.
- (20) Wei, L.-W. and James, M. N., 2002, "Fatigue Crack Closure for Inclined and Kinked Cracks," *International Journal of Fracture*, Vol. 116, pp. 25~50.
- (21) Suresh, S., 1991, *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, pp. 222~271.