

혼합모드 하중을 받는 균열시편의 피로균열진전거동 평가

한정우* · 우은택** · 한승호**†

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부, ** 동아대학교 기계공학과

Estimation of Fatigue Crack Growth Behavior of Cracked Specimen Under Mixed-mode Loads

Jeong Woo Han^{*}, Eun Taek Woo^{**} and Seung Ho Han^{**†}

^{*} Mechanical Systems Safety Research Division, KIMM

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received February 23, 2015 ; Revised April 13, 2015 ; Accepted April 15, 2015)

Key Words: Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Crack Path(균열경로), Mixed Mode(혼합모드), Compact Tensile Shear Specimen(CTS 시편), Single Edge Notched Bend Specimen(SENБ 시편), Eccentric 3 Point- Bending (편측 3 점 굽힘)

초록: 혼합모드 피로하중을 받는 균열을 갖은 CTS 시편에 대하여 균열경로 예측이론과 Tanaka 의 등가 응력확대계수식을 적용하여 피로균열진전거동을 평가하였다. 새롭게 생성되는 균열선단의 응력확대계수 산정은 ANSYS 를 이용한 유한요소법을 통해 이루어졌고, 균열경로와 균열증분은 마이크로소프트 엑셀 에 프로그래밍한 균열경로예측식과 Paris 식으로 계산되었다. 균열증분으로 새롭게 생성된 균열선단의 기하학적인 정보는 엑셀의 기능을 이용해 ANSYS 의 KSCON 명령어가 인식할 수 있게 변화시켜 균열모델링을 용이하게 하였다. 반복적인 균열해석을 위해 유한요소법과 엑셀을 결합한 FECTUM(Finite Element Crack Tip Updating Method)을 개발하였다. 개발된 FECTUM 을 편측 3 점 굽힘을 통해 혼합모드의 구현이 가능한 SENB 시편(Single Edge Notched Bend Specimen)에 적용해본 결과, 균열경로는 물론 파단될 때까지의 피로하중 반복수의 차이가 3% 미만으로 잘 일치하는 모습을 보여, 개발된 기법의 타당성을 검증하였다.

Abstract: To estimate the fatigue crack propagation behavior of compact tension shear (CTS) specimen under mixed-mode loads, crack path prediction theories and Tanaka's equation were applied. The stress intensity factor at a newly created crack tip was calculated using a finite element method via ANSYS, and the crack path and crack increment were then obtained from the crack path prediction theories, Tanaka's equation, and the Paris' equation, which were preprogrammed in Microsoft Excel. A new method called the finite element crack tip updating method (FECTUM) was developed. In this method, the finite element method and Microsoft Excel are used to calculate the stress intensity factors and the crack path, respectively, at the crack tip per each crack increment. The developed FECTUM was applied to simulate the fatigue crack propagation of a single-edge notched bending (SENB) specimen under eccentric three-point bending loads. The results showed that the number of cycles to failure of the specimen obtained experimentally and numerically were in good agreement within an error range of less than 3%.

1. 서론

일반적으로 기계 또는 구조물은 응력집중에 의해 노치선단에 발생하는 균열 및 제작과정에서 발

생한 균열이 다양한 형태의 피로하중에 의해 전파되어 제품의 안정성과 수명을 감소시키며 최종적으로 구조물 전체의 파괴를 야기한다. 제품에 발생하는 파괴의 대부분은 항복강도 이하의 반복하중으로 발생하며, 이러한 현상을 규명하기 위하여 반복적인 피로하중을 받는 환경에서 균열진전거동

† Corresponding Author, shhan@dau.ac.kr

에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.^(1~10)

실제 제품에서 균열은 인장(mode I), 면내전단(mode II), 면외전단(mode III) 등이 동시에 작용하는 혼합모드(mixed mode)에서 발생하고 성장한다. 이러한 혼합모드 하에서 균열의 발생과 진전은 복잡한 양상을 띠며, 균열진전방향은 혼합모드의 정도에 따라 크게 변한다고 알려져 있다. 지금까지 혼합모드 피로하중에서 균열진전거동에 대한 다양한 연구가 진행되어왔지만 실험과 해석의 기법이 서로 달라 일관적인 평가를 하는데 많은 어려움이 있었다. Paris 와 Erdogan⁽⁸⁾에 의해 최초로 제안된 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수폭 ΔK 의 관계는 mode I 피로균열진전거동을 잘 묘사하지만, 혼합모드 피로하중을 받는 균열의 경우 혼합모드의 정도에 따라 균열진전방향이 변하기 때문에 기존의 식으로 균열진전거동의 모사가 불가능하다. 따라서 균열이 진전할 때마다 새롭게 생성되는 균열선단의 혼합모드 응력확대계수와 균열진전방향을 적절히 평가하는 것이 대단히 중요하다. 많은 연구자들이 혼합모드에서 응력확대계수 평가를 위한 다양한 기준^(11~15)을 제안하였으나, 그 중 Tanaka 등⁽¹⁵⁾이 제안한 등가응력확대계수 K_{eq} 가 가장 일반적으로 받아 들여지는 기준으로 알려져 있다. Kim 등⁽¹⁾은 혼합모드 하중에서 균열길이 평가를 전균열길이법(extended crack length method)과 피로예균열과 평행한 축을 기준으로 하는 투영법(projected crack length method)를 비교·검토한바 있다. 그 결과, 전균열길이법이 등가응력확대계수 K_{eq} 와 균열진전속도 da/dN 의 관계를 표현하는데 적합하다는 사실을 확인하였다. 한편 혼합모드에서 균열진전방향을 예측하는 기법에는 MTS(Maximum Tangential Stress Criterion)⁽¹⁶⁾ 및 MERR(Maximum Energy Release Rate Criterion)⁽¹⁷⁾ 및 MSED(Minimum Strain Energy Density Criterion)⁽¹⁸⁾ 등이 있으며, 각 기법은 초기 균열선단에서 혼합모드 응력확대계수를 고려하여 균열진전방향을 예측한다. 그러나, 균열길이가 길어질수록 그리고 균열진전각이 커질수록 균열진전방향을 제대로 예측하지 못하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 매번 새롭게 생성되는 균열선단에서 혼합모드의 정도를 고려한 응력확대계수 산정과 균열진전방향을 예측하는 기법이 필요하다.

본 논문에서는 혼합모드 피로하중을 받는 CTS 시편(Compact Tensile Shear Specimen)의 균열진전거동을 평가하기 위하여 등가응력확대계수를 계산할 수 있는 Tanaka 식, 피로균열진전 특성을 평가할 수 있는

Paris 식 그리고 균열진전경로 예측을 위한 MTS 기법을 도입하였다. 새롭게 생성되는 균열선단의 혼합모드 응력확대계수 산정은 전균열길이법을 기초로 ANSYS 를 이용한 유한요소법이 적용되었으며, 마이크로소프트 엑셀에 Paris 식과 MTS 기법을 프로그래밍하여 ANSYS 와 연동한 FECTUM 기법(Finite Element Crack-Tip Updating Method)을 개발하였다. 아울러 SENB 시편(Single Edge Notch Bend)에 의한 편측 3점 굽힘(Eccentric 3 Point-Bending) 문제에 개발된 FECTUM 기법이 적용되어, 이의 실용적인 적용성을 실험적으로 검증하였다.

2. 균열경로, 균열진전 및 수치연산법

2.1 균열경로

혼합모드 피로하중을 받는 균열의 진전방향은 다양한 공학적 파라미터에 영향을 받는다. 그 중 응력확대계수에 의한 영향이 가장 많이 연구되었으며, 균열경로 추정에서 만족할 만한 결과를 보인다고 알려져 있다. 응력확대계수에 의한 균열경로를 예측하기 위한 대표적인 기법은 다음과 같다.

- MTS(Maximum Tangential Stress Criterion) : 최대접선 응력기법이라 불리는 MTS 기법은 Erdogan 등⁽¹⁶⁾이 제안한 방법으로 균열은 재료의 기계적 특성과 관계없이 균열선단의 최대접선응력방향으로 진전한다고 가정하였다. 수식이 간단하고 균열진전방향을 비교적 잘 묘사하기 때문에 널리 사용되고 있다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 2) \right] = 0$$

- MERR(Maximum Energy Release Rate Criterion) : 최대 에너지해방률기법은 Griffith-Irwin 의 에너지해방률을 기준으로 Hussain 등⁽¹⁷⁾에 의해 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 균열은 에너지해방률 G 가 최대값이 되는 방향으로 진전한다고 가정하였다.

$$G(\theta) = h_{12} K_I^2 + 3h_{21} K_I K_{II} + h_{22} K_{II}^2, \quad \frac{G(\theta)}{d\theta} = 0$$

$$h_{11} = \frac{\kappa+1}{2\mu} \left(\frac{\pi-\theta}{\pi+\theta} \right)^{\frac{\theta}{\pi}} \frac{3 \cos^2 \theta + 1}{(3 + \cos^2 \theta)^2} \quad (2)$$

$$h_{12} = \frac{\kappa+1}{\mu} \left(\frac{\pi-\theta}{\pi+\theta} \right)^{\frac{\theta}{\pi}} \frac{\sin 2\theta}{(3 + \cos^2 \theta)^2}$$

$$h_{22} = \frac{\kappa+1}{2\mu} \left(\frac{\pi-\theta}{\pi+\theta} \right)^{\frac{\theta}{\pi}} \frac{4 + 5 \sin^2 \theta}{(3 + \cos^2 \theta)^2}$$

여기서, μ 는 전단계수 ($\mu=E/2(1+\nu)$) 이고, κ 는 체적 탄성률로, 평면응력 및 평면변형을 상태일 때, 각각 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 와 $(3-4\nu)$ 이다.

- MSSED(Minimum Strain Energy Density Criterion) : Sih⁽¹⁸⁾가 제안한 최소변형에너지밀도기법은 변형에너지밀도계수 S 를 기초로 하며, 균열은 S 가 최소값을 갖는 방향으로 진전한다고 가정하였다.

$$S(\theta) = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2, \quad \frac{S(\theta)}{d\theta} = 0$$

$$a_{11} = \frac{1}{16\pi\mu}(1 + \cos\theta)(\kappa - \cos\theta) \quad (3)$$

$$a_{12} = \frac{1}{16\pi\mu}\sin\theta(2\cos\theta - \kappa + 1)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\pi\mu}[(\kappa + 1)(1 - \cos\theta) + (1 + \cos\theta)(3\cos\theta - 1)]$$

2.2 균열진전

균열진전거동은 식 (4)와 같이 구조물의 형상, 균열의 크기 및 위치 그리고 작용하중의 크기와 분포로 표현되는 응력확대계수로 나타낼 수 있다.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot F(a/W) \quad (4)$$

혼합모드 피로하중을 받는 균열진전거동을 모사하는 경우, 각각의 모드의 응력확대계수가 균열진전에 어떤 영향을 미치는가에 대하여 고려해야 한다. 그러나, 계산과정이 복잡하고 요구되는 물성치가 많아, 등가응력확대계수를 고려하여 균열진전거동을 평가하는 방법이 많이 적용되고 있다. Tanaka⁽¹⁵⁾는 혼합모드 하중상태에 놓인 균열전단의 등가응력확대계수 K_{eq} 를 다음과 같이 제안하였다.

$$K_{eq} = \sqrt[4]{K_I^4 + 8K_{II}^4} \quad (5)$$

균열진전거동은 응력확대계수와 균열진전속도의 관계로 나타낼 수 있으며, 혼합모드 하중의 특성을 고려하여 식 (6)과 같이 Paris 식으로 표현할 수 있다.

$$da / dN = C(\Delta K_{eq})^m \quad (6)$$

여기서, C 와 m 은 실험에 의해 구해지는 상수값으로 재료의 특성에 따라 결정되는 재료물성치이다. 본 연구에서는 하중각의 변화로 혼합모드 하중을 모사할 수 있는 CTS 시편(Compact Tensile Shear Specimen)을 이용하여 실험상수를 구하였다.

2.3 수치연산법

대부분의 균열경로 추정법은 균열길이와 균열진

전각이 커질수록 균열경로를 제대로 추정하지 못하는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 새롭게 생성되는 균열전단의 특성을 고려하여 혼합모드 하중의 정도를 고려한 응력확대계수의 산정과 균열경로를 연산하는 과정을 반복적으로 수행하는 수치연산이 필요하다.

본 논문에서는 혼합모드 하중을 받는 CTS 시편에 대하여 응력확대계수 평가, 피로균열진전 특성

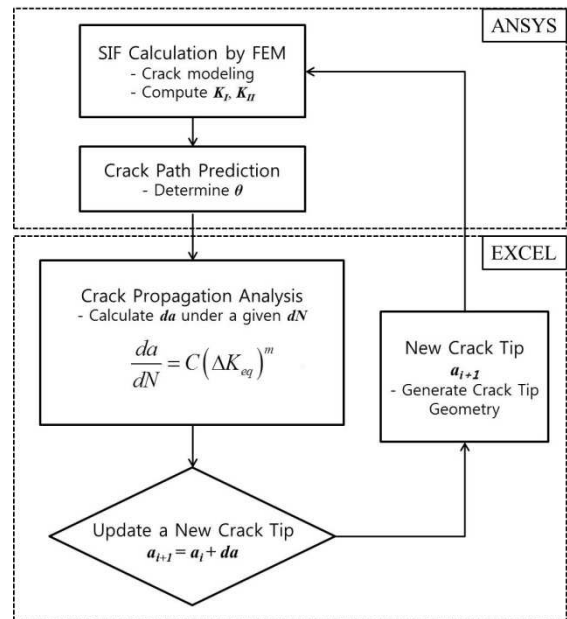


Fig. 1 Procedure for finite element crack tip updating method

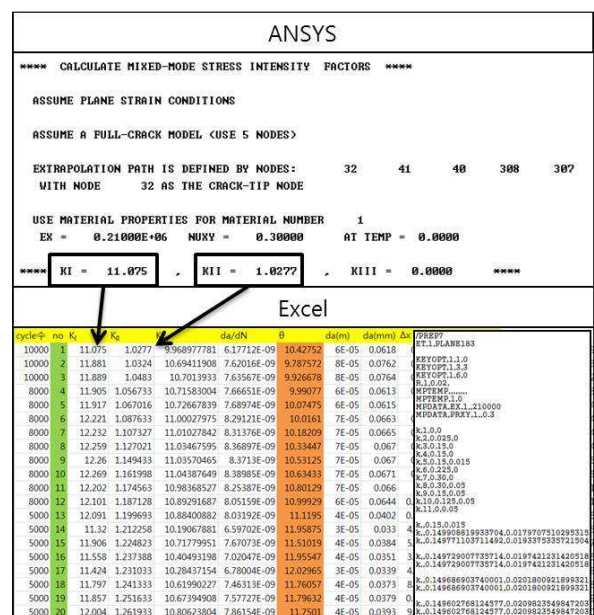


Fig. 2 Example of evaluating crack path and crack increment using Microsoft ExcelTM

을 평가할 수 있는 Paris 식 그리고 균열경로 예측식을 적용하였다. 새롭게 생성되는 균열선단의 응력확대계수는 상용 유한요소코드인 ANSYS 를 활용하여 산정하였고, 균열진전경로 예측식과 Paris 식을 마이크로소프트 엑셀에 입력하여 이를 연동한 FECTUM 기법(Finite Element Crack Tip Updating Method)을 Fig. 1 과 같이 개발하였다. 이 기법에서 ANSYS 유한요소해석을 통해 계산한 응력확대계수는 엑셀에 입력되고 균열진전방향과 반복하중수에 따른 균열증분 길이가 계산된다. 그리고 새롭게 생성되는 균열선단의 기하학적 정보를 ANSYS 의 균열모델링 정보로 변환시키는 기능을 가지고 있다. Fig. 2 는 엑셀에서 균열진전방향과 반복하중수에 따른 균열증분이 계산된 사례이다.

3. 혼합모드 하중을 받는 CTS 시편의 균열진전거동

3.1 CTS 시편 및 소재

CTS 시편은 Fig. 3(a)와 같이 크기는 $100(W) \times$

Table 1 Chemical composition of SS41

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.046	0.022	0.21	0.004	0.004	Bal

Table 2 Mechanical properties of SS41

Yield strength(MPa)	225
Tensile strength(MPa)	475
Elastic modulus(GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
Elongation(%)	23

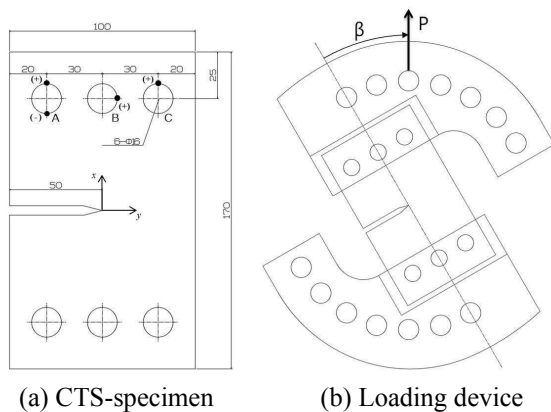


Fig. 3 Configuration of CTS-specimen and loading device

$170(B) \times 10(t)$ mm 이며, 초기균열길이는 $a/W = 0.5(\beta=0^\circ)$ 조건에서 도입한 피로 예균열 포함)로 하였다. Table 1 과 2 는 사용된 소재의 화학적 성분과 물성치이다.

3.2 응력확대계수의 산정

균열선단의 응력확대계수를 구하기 위해 ANSYS 를 활용한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4 는 균열부를 모델링한 요소형상으로 균열선단은 quarter-point 8-node quadrilateral elements (PLANE183)를 사용하여 격자를 생성하였다. 이때 균열선단에서 응력집중에 의해 발생하는 응력특이성(stress singularity)를 고려하기 위해 ANSYS 내의 KSCON 명령어를 사용하여 요소 가운데 열의 노드를 요소 길이의 1/4 만큼 이동시켰다. 응력확대계수 K_I 및 K_{II} 는 ANSYS 내의 KCALC 명령어를 이용하여 얻어지며, 유한요소해석에서 얻어진 균열선단 부근의 열림변위와 미끄럼변위를 기반으로 계산된다.

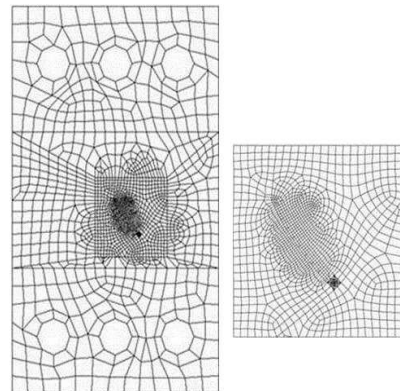


Fig. 4 Finite element model to calculate stress intensity factor at crack tip

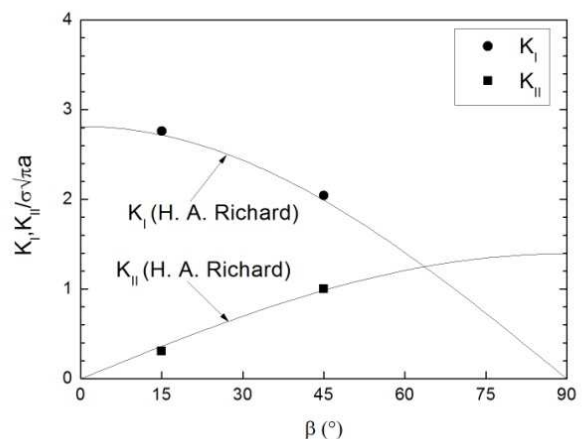


Fig. 5 Stress intensity factors with respect to loading angles for CTS

Table 3 Loading and boundary condition for FE analysis

$$\sum F_x = -F_B + P \sin \beta = 0$$

$$\sum F_y = -F_A - F_C + P \cos \beta = 0$$

$$\sum M_B = 30F_A - 30F_C + 60P \sin \beta = 0$$

β (°)	A	B	C
	F_y	F_x	F_y
0	0.50P	-	0.50P
15	0.22P	0.26P	0.74P
45	-0.35P	0.71P	1.06P

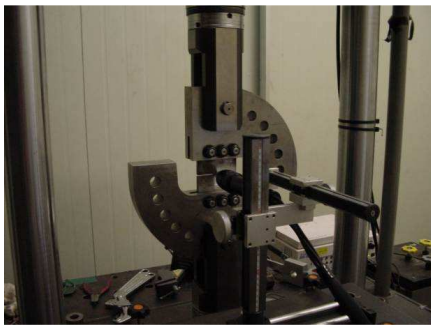


Fig. 6 Experimental set-up for mixed mode fatigue test with crack length measurement system

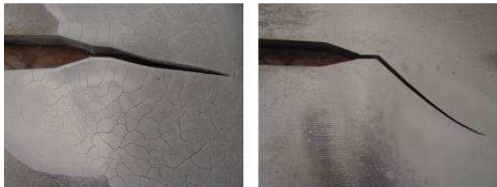


Fig. 7 Macroscopic view of crack growth path at $\beta=15^\circ$ and 45°

혼합모드를 구현하기 위하여 CTS 시편에 Fig. 3(b)와 같이 Richard 등⁽¹⁹⁾이 제안한 하중치구가 장착되었다. 이를 이용하여 하중각도 β 를 0° , 15° 및 45° 로 바꾸며 혼합모드의 정도를 변화시켰다. 각각에 해당하는 하중경계조건은 β 에 따라 Fig. 3의 CTS 시편 하중 핀홀 주위에 Table 3과 같은 평형방정식을 이용하여 계산된 결과를 부과한다.

응력확대계수 K_I 및 K_{II} 계산결과와의 신뢰성을 확인하기 위하여, Richard가 제안한 함수식⁽⁷⁾과 비교하였다. Fig. 5는 이의 결과로서, $\beta=15^\circ$ 와 45° 에서 계산된 K_I 및 K_{II} 는 Richard의 함수식과 잘 일치하는 것을 확인하였다.

3.3 피로균열진전시험

피로균열진전시험은 Fig. 6과 같이 혼합모드 구현이 가능한 하중치구를 CTS 시편에 장착한 실험장치를 구성하여 실시하였다. $\beta=0^\circ$, 15° 및 45° 에서 응력비 0.1과 하중주파수 5Hz의 조건으로 피로시험을 실시하였다. 균열진전길이의 측정은 Moritex사의 현미경 MS-6500Pro와 BMI사의 plus SE 프로그램을 통해 이루어졌다.

Fig. 7은 $\beta=15^\circ$ 와 45° 인 경우 거시적인 균열진전경로를 촬영한 사진이다. 혼합모드 피로하중을 받는 경우 균열길이가 증가하면서 균열진전경로가 크게 변하는 모습을 보인다. Fig. 8는 $\beta=0^\circ$, 15° 및 45° 에 대한 피로균열진전시험 결과를 식 (5)와 (6)

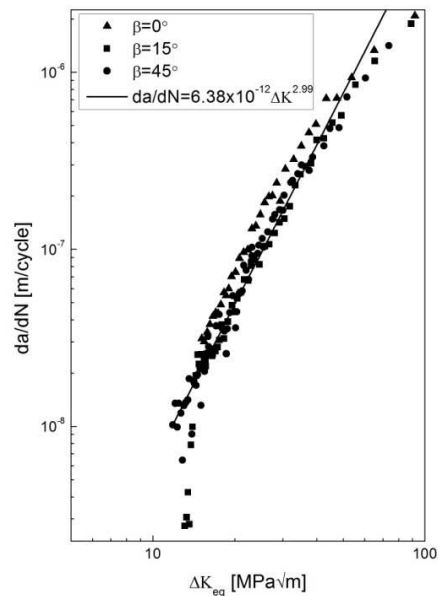


Fig. 8 Fatigue crack growth rate related with equivalent stress intensity factor range for $\beta=0^\circ$, 15° and 45°

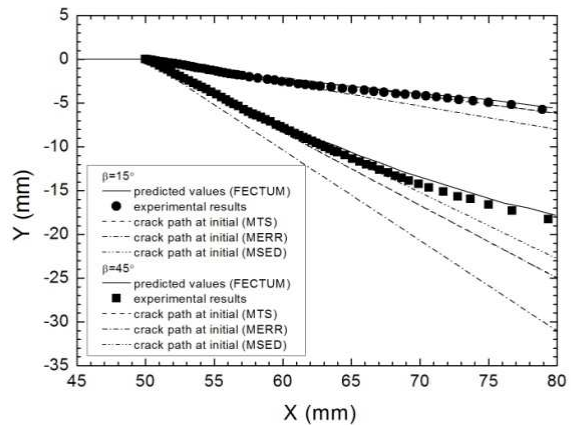


Fig. 9 Fatigue crack growth paths of CTS specimen obtained by experiment and numerical analysis respect to loading angles of $\beta=15^\circ$ and 45°

의 ΔK_{eq} 와 균열진전속도 da/dN 의 관계로 나타낸 그래프이다. 하중각도 β 와 관계없이 상수 C 와 m 은 각각 6.38×10^{-12} 와 2.99 로 얻어진다.

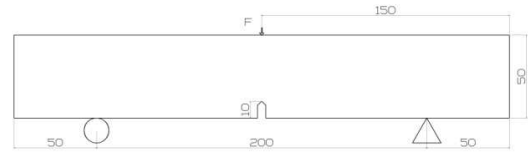
3.4 균열진전경로 추정

피로균열진전시험을 통해 얻어진 균열진전경로를 초기균열을 기준으로 진전경로를 예측하는 식 (1)~(3)을 이용하여 얻어진 결과와 비교하여 보았다. Fig. 9 는 이의 결과로서, 하중각도가 작은 $\beta=15^\circ$ 의 경우 모든 균열진전경로 예측식이 비교적 실험결과와 일치하였으나, $\beta=45^\circ$ 인 경우 균열길이가 커짐에 따라 균열진전경로 예측식이 실험결과를 제대로 모사하지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 β 가 큰 경우 피로균열진전 방향이 β 에 수직한 방향으로 접근함에 따라 K_I 이 점진적으로 증가하는 반면 K_{II} 가 급격히 감소하여, 균열진전 경로가 비선형적으로 변하면서 초기균열을 기준으로 계산된 균열경로와 큰 차이를 보이기 때문이다. 한편, Fig. 1 과 같은 FECTUM 기법으로 피로균열진전경로를 추정 한 결과는 피로균열진전의 초기구간뿐 아니라 균열이 크게 성장한 이후의 구간에서도 실험결과를 정확하게 모사하는 것을 알 수 있다.

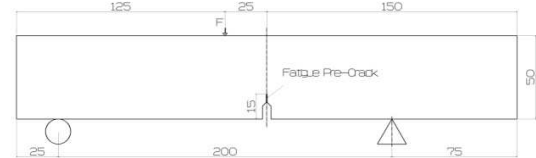
4. SENB 시편의 편측 3 점 굽힘시험을 통한 FECTUM 기법의 검증

4.1 SENB 시편 및 편측 3 점 굽힘시험

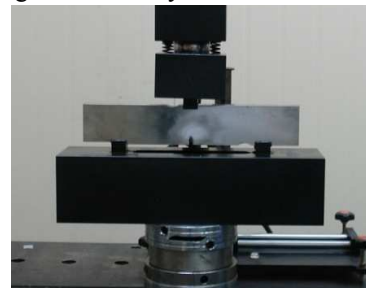
본 연구에서 제안한 FECTUM 기법을 검증하기 위하여 편측 3 점 굽힘(eccentric 3 point-bending)을 통해 혼합모드의 구현이 가능한 SENB 시편(Single Edge Notch Bend Specimen)을 이용한 피로균열진전 시험을 실시하였다. 피로균열진전시험은 CTS 시편의 경우와 마찬가지로 MTS 사의 50 톤 용량의 만능재료시험기를 사용하였으며, 응력비 $R=0.1$, 하중주파수는 10Hz 로 하였다. Fig. 10 은 SENB 시편의 형상과 시험장치 셋업의 모습이다. SENB 시편의 크기는 $50(W) \times 300(L) \times 20(t)$ mm 이고, 노치크기는 10 mm 이며, 사용된 소재는 CTS 시편과 같다. 노치선단에 피로 예균열(Fatigue Pre-Crack)을 도입하기 위하여 Fig. 10(a)의 mode I 하중·경계조건을 만족하는 피로하중을 초기 피로균열길이가 $a/W=0.3$ (피로 예균열길이=5mm 포함)에 도달할 때까지 가하였다. 이후 SENB 시편을 Fig. 10(b)와 같이 25mm 오른쪽 방향으로 편측 이동시켜 균열선단에 혼합모드 피로하중이 가해질 수 있는 하중·경계조건을 부여하였다. Fig. 11 은 피로균열진전시험이 종료된 후 균열진전경로를 거시적으로 촬영한



(a) Loading and boundary conditions for mode I



(b) Loading and boundary conditions for mixed mode



(c) Experimental test set-up

Fig. 10 Configuration of SENB specimen and test set-up for 3 point bending fatigue test

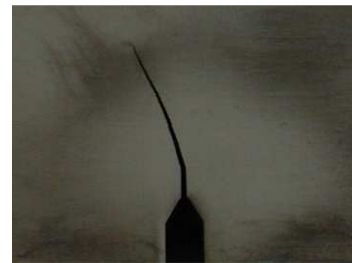


Fig. 11 Macroscopic view of fatigue crack growth path of SENB specimen

사진이다. Mode I 하중·경계조건으로 도입된 피로 예균열과 혼합모드 피로하중에 의해 전파된 피로 균열의 모습을 확인할 수 있다.

4.2 FECTUM 기법의 검증

SENB 시편의 편측 3 점 굽힘시험 결과를 FECTUM 기법으로 분석하였다. 편측 3 점 굽힘시험으로 유발되는 혼합모드 하중이 가해진 초기균열길이가 $a/W=0.3$ 이후부터 Fig. 12(a)와 같이 균열을 모델링하고 유한요소해석을 실시하여 균열선단의 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 를 계산하였다. 계산된 K_I 과 K_{II} 는 마이크로소프트 엑셀로 보내어 입력한 균열경로 예측식과 Paris 식으로부터 균열경로와 증분량을 계산하고 새롭게 생성된 균열길이에 대한 유한요소해석을 반복 계산

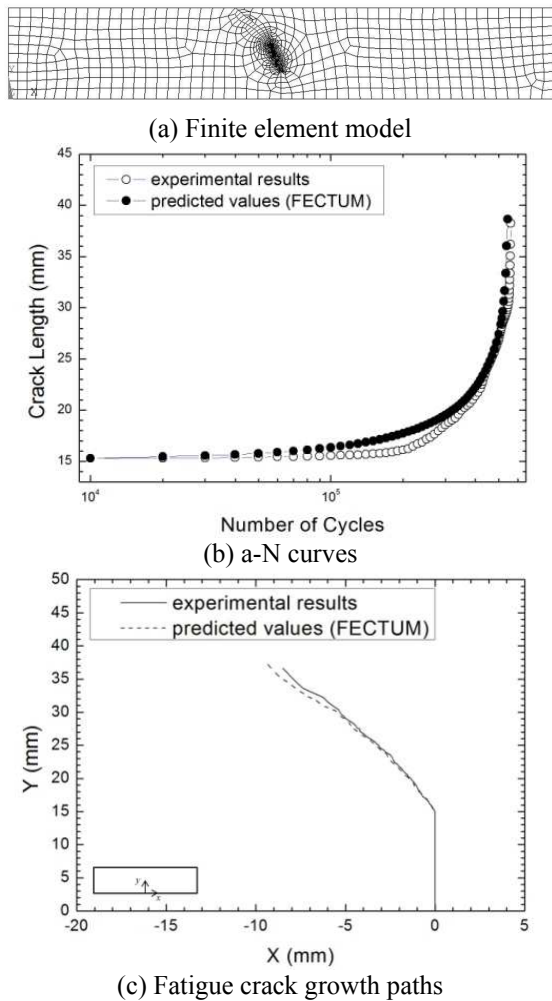


Fig. 12 Verification of FECTUM for experimental results of SENB specimen

하여 균열길이 a 와 하중반복수 N 의 관계인 $a-N$ 선도를 계산하였다. Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 해석 결과가 실험을 통해 얻어진 파단될 때까지의 하중반복수와와의 차이가 3% 미만으로, 서로 잘 일치함을 확인하였다. Fig. 12(c)는 FECTUM 기법으로 균열경로 전길이(full-length of crack growth path)를 추정된 결과와 피로시험결과를 비교한 그래프이다. 식(1)~(3)에서 균열경로를 결정하는 균열진전각은 균열선단의 K_I 과 K_{II} 로부터 계산되는데, 편축 3 점 굽힘시험으로 인한 혼합모드 피로하중이 가해지는 피로 예균열이 균열선단의 K_I 과 K_{II} 로부터 진전각이 결정되어 급격한 방향전환을 거쳐 새로운 균열경로를 형성하게 되면, 이후 균열경로 각도는 점차 감소하여 이전의 진전방향을 유지하는 경향을 보인다. SENB 시편에 대한 시험결과는 혼합모드의 균열거동을 본 연구에서 제안한 FECTUM 기법으로 추정된 해석결과와 잘 일치하였다. 편축 3 점 굽힘시험과 같이 균열진전각이

큰 혼합모드 균열거동을 예측하는 경우 FECTUM 기법 적용이 가능하리라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 FECTUM(Finite Element Crack Tip Updating Method)기법을 제안하여 CTS 시편을 대상으로 혼합모드 피로균열진전거동의 특성 평가를 하였고, SENB 시편의 편축 3 점 굽힘 피로시험에 적용하여 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 혼합모드 하중을 받는 CTS 시편에서 새롭게 생성되는 균열선단의 응력확대계수를 ANSYS 를 활용한 유한요소법으로 산정하고, 균열진전경로 예측식과 Paris 식을 마이크로소프트 엑셀에 입력하여 이를 연동한 FECTUM 기법을 개발하였다.
- (2) FECTUM 기법으로 CTS 시편의 피로균열진전경로를 추정된 결과, 피로균열진전의 초기 구간 뿐 아니라 균열이 크게 성장한 이후의 구간에서도 실험결과를 정확하게 모사함을 보였다.
- (3) 개발된 FECTUM 을 편축 3 점 굽힘을 통해 혼합모드의 구현이 가능한 SENB 시편에 적용해 본 결과, 균열경로는 물론 파단 될 때까지의 피로하중 반복수의 차이가 3% 미만으로 잘 일치하는 모습을 보여, 개발된 기법의 타당성을 검증할 수 있었다.

후 기

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, T. Y. and Kim, H. K., 2013, "Mixed-mode Fatigue Crack Growth Behavior of Fully Lower Bainite Steel," *Mat. Sci. & Eng. A*, Vol. 580, pp. 322~329.
- (2) Boljanovic, S. and Maksimovic, S., 2011, "Analysis of the Crack Growth Propagation Process Under Mixed-Mode Loading," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 78, pp. 1565~1576.
- (3) Rozumek., D. and Macha., E., 2009, "A Survey of Failure Criteria and Parameters in Mixed-mode Fatigue Crack Growth," *Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 190~210.
- (4) Richard, H. A., Fulland, M. and Sander, M., 2004, "Theoretical Crack Path Prediction," *Fatigue & Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 28, pp. 3~12.

- (5) Richard, H. A., Sander, M. and Fulland, M., 2003, "Fatigue Crack Paths Under Complex Loading," In: Fatigue Crack Path (Edited by Carpinteri, A. and Pook, L.), Int. Conference on Fatigue Crack Paths, Parma.
- (6) Biner, S. B., 2001, "Fatigue Crack Growth Studies Under Mixed-mode Loading," *Int. J. Fatigue*, Vol. 23, Supplement, pp. S259~S263.
- (7) Richard, H. A., 1985, "Bruchvorhersagen bei überlagerter normal- und Schubbeanspruchung von Rissen," VDI-Verlag, Düsseldorf, pp. 1~60.
- (8) Paris, P. C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *J. Basic. Eng., Trans. ASME*, 85, pp. 528~534.
- (9) Paris, P. C., 1962, "The Growth of Fatigue Cracks due to Variations in Load," Ph. D. Thesis, Lehigh University.
- (10) Koo, J. M., 2002, "A Study on the Fatigue Test in A5052 Alloy Sheet Under Mixed Mode Loading," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 5, pp. 828~834.
- (11) Miran, A. C. O., Meggiolaro, M. A., Castro, J. T. P., Martha, L. F., and Biteencourt, T. N., 2003, "Fatigue Life and Crack Path Predictions in Generic 2D Structural Components," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 1259~1279.
- (12) Forth, S. C., Favrow, L. H., Keat, W. D. and Newman, J. A., 2003, "Three-dimensional Mixed-Mode Fatigue Crack Growth in a Functionally Graded Titanium Alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 2175~2185.
- (13) Yan, X., Zhang, Z. and S. Du, 1992, "Mixed Mode Fracture Criteria for the Materials with Different Yield Strengths in Tension and Compression." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 42, pp. 109~116.
- (14) Rhee, H. C. and M. M. Salama, 1987, "Mixed-mode Stress Intensity Factor Solutions of a Warped Surface Flaw by Three-dimensional Finite Element Analysis." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 28, pp. 203~209.
- (15) Tanaka, K., 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 493~507.
- (16) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear," *J. of Basic Eng.*, Vol. 85, Iss. 4, pp. 519~525.
- (17) Hussain, M. A., Pu, S. L. and Underwood, J. H., 1993, "Strain Energy Release Rate for a Crack Under Combined Mode I and Mode II," In : P. C. Paris and G. R. Irwin (Eds.), *Fracture Analysis*, ASTM STP 560, American Society for Testing and Materials, pp. 2~28.
- (18) Sih, G. C., 1974, "Stain Energy Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems," *International Journal of Fracture*, Vol. 20, pp. 305~321.
- (19) Richard, H. A. and Benitz, K., 1983, "A Loading Device for the Creation of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *International Journal of Fracture*, Vol. 22, pp. 55~58.