

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.717

## 평직 CFRP 복합재료의 섬유 배열각도별 피로 균열 성장 평가

금진화\* · 최정훈\* · 박홍선\* · 구재민\* · 석창성\*†

\* 성균관대학교 기계공학과

### Evaluation of Fatigue Crack Propagation Depending on Fiber Array Direction in Woven CFRP Composites

Jin-Hwa Geum\*, Jung-Hun Choi\*, Hong-Sun Park\*, Jae-Mean Koo\*  
and Chang-Sung Seok\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received December 11, 2009 ; Revised March 20, 2010 ; Accepted April 1, 2010)

**Key Words:** Plane Weave CFRP(평직 탄소섬유강화플라스틱), Fatigue Crack Propagation(피로 균열 성장), Crack Length(균열 길이), Fiber Array Direction(섬유 배열 각도), Energy Release Rate(에너지 해방률)

**초록:** 많은 연구자들이 평직 탄소섬유강화플라스틱에 대해서 연구해왔지만 피로 균열 진전에 관한 연구는 아직도 미지한 상태이다. 그리고 하중과 섬유 배열 각도에 따라 균열 진전 양상이 다를 수 있다. 본 연구에서는 서로 다른 두 개의 섬유 배열각도(0°, 45°)에서 평직 탄소섬유강화플라스틱의 피로 균열 진전에 대해 연구하였다. 평직 탄소섬유강화플라스틱의 피로 균열 진전 테스트를 하중비 0.1에 10Hz로 수행하였다. 그 시험 결과로써, 피로 균열 진전 속도(da/dN)와 에너지해방률( $\Delta G$ )과의 그래프를 도출하였고, 섬유 배열 각도에 따른 균열 진전 양상을 0°의 경우에는 Mode I를 적용하였고, 45°의 경우에는 Mixed Mode를 적용하였다.

**Abstract:** Many researchers have studied woven fabric carbon-fiber-reinforced composite (CFRP) materials but the study of fatigue crack propagation in composites has been insufficient. It has known that the crack propagation behavior differs depending on the load and the fiber direction. In this study, the fatigue crack propagation along two different fiber array directions (0°, 45°) in plain woven CFRP composite was investigated. Fatigue crack propagation tests were conducted on the woven CFRP composite under a sinusoidal waveform load with stress ratios of 0.1 at a frequency of 10 Hz. Once the results of the tests were obtained, fatigue crack propagation rates (da/dN) were plotted against the energy release rate amplitude ( $\Delta G$ ), and it was observed that either mode I crack propagation or mixed mode crack propagation occurs depending on the fiber array direction.

### 1. 서 론

복합재의 경우 섬유의 파단, 모재의 파손, 섬유와 모재간의 분리 등에 의한 피로 손상과 섬유 배열 방향에 따른 이방성을 평가할 수 있는 메커니즘이 확립되어 있지 않은 실정이다. 특히 항공 구조재료는 직물구조 CFRP 복합재료의 균열에 대한 저항 특성을 파악해 두는 것은 항공 구조물의 건전성 평가를 위하여 대단히 필요하다. 예를 들어 항공기 날개를 제작하는데 있어서 날개의

강성은 섬유배열방향과 작용하는 하중 방향과의 각도에 따라 달라지고 이 각도에 따라 균열의 저항 특성도 달라지므로 본 연구에서 섬유배열방향에 따른 영향을 평가하였다.

Mode I 하중 하의 금속재의 피로 균열 진전 거동은 Paris<sup>(1)</sup>의 Power law가 잘 적용되고 있으나, 평직 CFRP 복합재의 경우에는 섬유 배열 각도에 의한 이방성 효과 때문에 균열 진전이 Mode I과 Mode II가 결합된 Mixed Mode의 형태가 된다.

그러나, 평직 복합재의 피로균열성장에 관한 연구는 몇몇 연구에 불과하다. 그 중에서 Yokozeki 등<sup>(2)</sup>은 섬유배열방향이 0°, 90°와 45° 등의 ply을 적층한

† Corresponding Author, seok@skku.edu

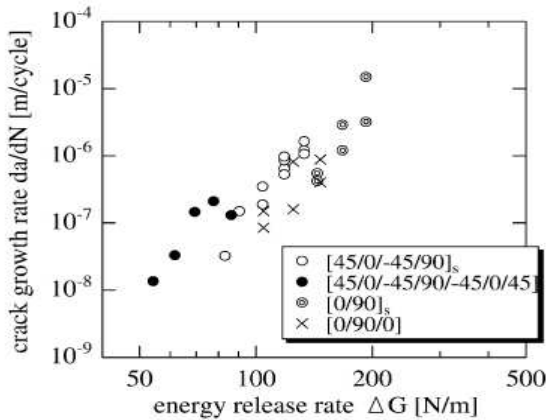


Fig. 1 Fatigue crack growth rate as a function of associated energy release rate by Yokozeki, et al.<sup>(2)</sup>

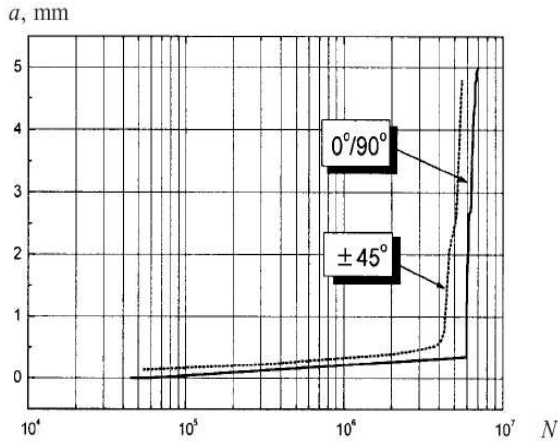


Fig. 2 Fatigue crack growth versus the number of cycle<sup>(3)</sup>

CFRP의  $\Delta G$ 에 관한 피로시험 결과로부터, 45° 적층을 포함하는 경우의 균열진전 속도가 포함하지 않은 경우에 비하여 빠르다고 보고하였다(Fig. 1).<sup>(2)</sup>

또한 Putic 등<sup>(3)</sup>도 CFRP에 대한 피로시험을 수행하여, Fig. 2에서와 보는 바와 같이 균열길이와 cycle의 관계가 적층형태에 따라 다를 것을 보였으며, 특히 균열진전속도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이  $\pm 45^\circ$ 인 경우(DA-2-1)가  $0^\circ/90^\circ$ 인 경우(DA-1-1)에 비해서 균열진전속도가 빠르다고 하였다. 그러나 그들의 연구도  $\pm 45^\circ$ 인 경우 실제균열이 혼합모드로 진전하는데도 불구하고 실제균열진전양상과는 달리 Mode I으로 해석한 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 평직 CFRP 복합재료의 일정 진폭 하중하의 섬유 배열 각도별 피로 균열진전 시험을 수행하고 이의 결과와 해석을 통한 에너지해방률(Energy release rate)로부터 Mixed Mode에 대한 피로 균열 진전 거동을 평가하였다.

Table 1 Physical properties of WSN3K

Wet Resin Content	32±2 (Wt. %)
Resin Areal Weight	148±5 g/m <sup>2</sup>
Fiber Areal Weight	197±8 g/m <sup>2</sup>
Total Areal Weight	353±10 g/m <sup>2</sup>

Table 2 Mechanical properties of WSN3K

$E_{xx}$ (GPa)	$E_{yy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$G_{xy}$ (GPa)
55	55	0.13	4.75

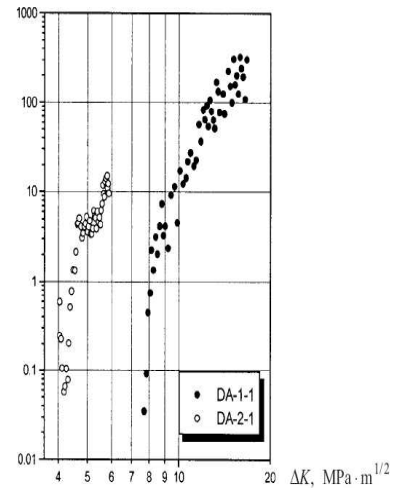


Fig. 3 Measured constant-amplitude fatigue crack growth curves<sup>(3)</sup>

## 2. 피로균열진전시험

### 2.1 시험재료

본 연구에서는 시험재료로 Table 1과 2와 같은 물성치를 갖는 직물구조 탄소 섬유 프리프레그인 WSN3K( $t=0.22\text{mm}$ )를 사용하였으며, 16ply를 적층하여 최종 두께가 3.52mm 되게 하였다. 이것을 Auto clave에서 140°C의 온도와 60kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 60분간 성형 제작하였다.

피로 균열 성장 실험의 CT 시험편은 ASTM E647-00를 참조하여 Fig. 4와 같이 가공하였으며, 초기 균열은  $a_0/W=0.45$ 가 되게 하였다. 평직 CFRP 복합재료 시험편의 섬유배열각도를 하중 방향에 대하여  $0^\circ/90^\circ$ ,  $45^\circ/-45^\circ$ 의 두 방향으로 시험편을 채취하여 섬유배열각도에 따른 균열 성장 변화를 고찰하였다.

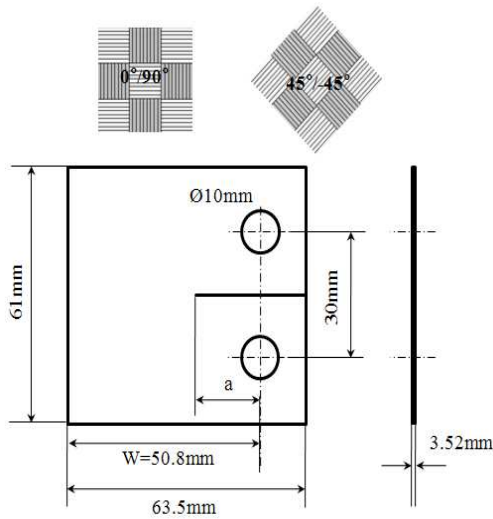


Fig. 4 Specimen configurations

2.2 시험방법

Inston사의 25ton 유압 시험기를 사용하여 상온에서 하중비가 0.1인 반복 하중을 주어 수행하였다. 0°/90°인 경우는 최대하중을 3001N으로 하였으며, 45°/-45°인 경우는 2737N을 작용시켰다. Table 3은 시험조건을 나타내고 있다. 균열 길이의 측정을 위해 시험 중 성장하는 균열 선단에 잉크를 투입하는 Dye Injection Penetrant 법을 사용하였으며 시험편 표면에 가시화된 균열의 형상과 길이를 Travelling Microscope와 100배율 광학 CCD카메라를 사용하여 시험편의 균열을 측정하였다. 0°/90°인 CT 시험편의 경우는 균열이 하중 방향에 수직하게 진전하였으나, 45°/-45°인 CT 시험편의 경우는 하중 방향에 대하여 45°방향으로 균열이 진전하기 때문에 실제로 균열이 진전하는 방향으로 균열길이를 추가하여 측정하였는데 이를 본 연구에서는 Mixed mode 45°/-45°로 표시하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 시험장치의 구성이다.

2.3. 시험 결과

Fig. 6은 0°/90°인 CFRP 시험편의 균열 선단의 사진을 나타낸 것으로 균열 선단에서 초기에는 방사 형태로 미세 균열이 진전한 후 주변 섬유의 파단이 발생하면서 하중 방향에 수직하게 균열이 zig-zag 형태로 진전하였다. Fig. 7의 45°/-45°인 CFRP 시험편은 선단에서 방사 형태로 미세 균열이 진전하다가 섬유 배열 각도인 45°방향으로 균

Table 3 Test condition and control mode

Temperature	25°C
Wave form	Sine wave
Frequency	10Hz
Load ratio	R=0.1
Control mode	Load control

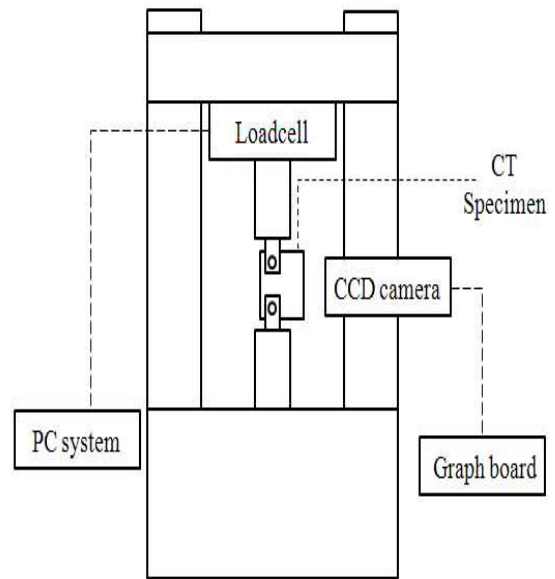


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

열이 zig-zag 형태로 진전하는 것을 관찰할 수 있었다. 측정된 균열 길이와 그 균열 길이에 해당하는 싸이클을 Fig. 8에 나타내었는데, 이 결과는 Putic 등<sup>(3)</sup>의 경우와 비슷하게 균열진전이 급격히 증가하는 모습을 보이고 있다.

3. 유한요소해석에 의한 에너지해방률 산출

3.1 유한 요소 해석 모델 및 해석 방법

유한요소 해석 모델은 16ply를 모델링 한 후, x와 y방향 탄성계수 E1, E2와 포아송의 비 U1, 전단탄성계수 G12의 4가지의 물성을 부여하였다. 0°/90°의 경우 Fig. 9과 같이 약 1,770개의 요소(element)와 약 5,600개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소를 사용하였으며, 45°/-45°의 경우 1,200개의 요소(element)와 약 4,000개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소를 사용하였으며, 실제 균열이



Fig. 6 Fatigue crack growth behavior at the surface of 0°/90° CFRP specimen



Fig. 7 Fatigue crack growth behavior at the surface of 45°/-45° CFRP specimen

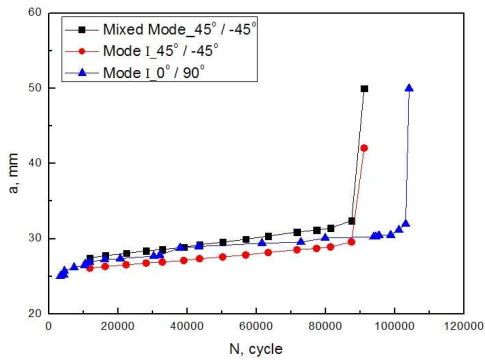


Fig. 8 Fatigue line of crack length and cycle number

하중 방향에 대해 45° 방향으로 진전되는 것을 묘사하기 위해서 균열을 Fig. 10과 같이 삽입하였다. 균열 선단 부위는 Quad Mapped Mesh를 사용하였다. 모델링과 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

본 연구에서는 Rybicki와 Kanninen<sup>(4)</sup>에 의한 가상균열단힘법을 사용하여 에너지해방률을 구하였다. Fig. 11과 같은 균열 선단의 절점에 대한 유한 요소해석 결과 값과 에너지해방률에 대한 식 (1)을 이용하여 측정된 균열길이에 대한 에너지해방률을 계산하였다. 계산한 결과를 그래프로 Fig. 12에 나타내었다.

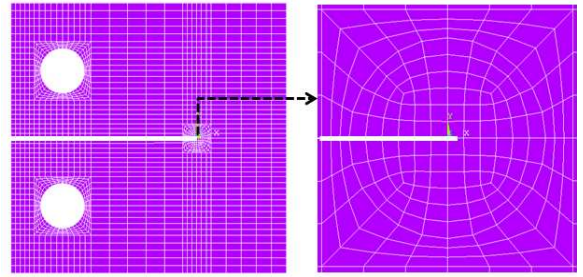


Fig. 9 Finite element modeling at Mode I

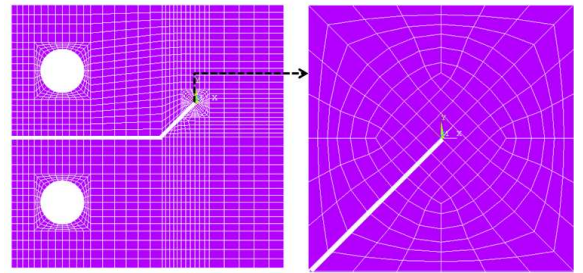


Fig. 10 Finite element modeling at 45°/-45°

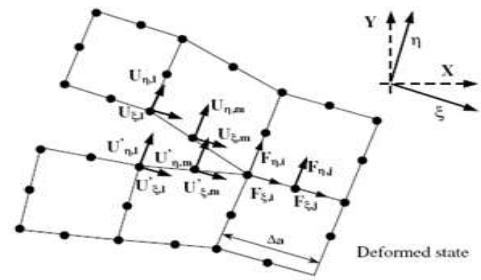


Fig. 11 Collapsed quarter-point singular elements around the crack tip

Fig 12는 0°/90°인 경우와 45°/-45°인 CFRP 시험편에서 하중에 수직으로 진전한 Mode I과 실제 균열이 진전한 Mixed Mode의 유한요소해석 결과를 비교한 값이다. 해석에 적용된 하중은 동일하며 Fig. 12에 표시된 Mixed Mode의 균열 길이 (a/W)는 Mode I으로 구한 결과와 비교하기 위해서 실제 균열 길이에 투영된 길이에 해당한다. Mixed Mode의 a/W는 0.45에서 시험을 수행하였기 때문에 0.45~0.8까지 적용하였다. 0°/90°인 경우에 G값이 가장 크게 나타났으며, 45°/-45°의 Mixed Mode인 경우가 가장 작게 나타났다.

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\eta,i}(U_{\eta,l} - U'_{\eta,l}) + F_{\eta,j}(U_{\eta,m} - U'_{\eta,m})]$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\xi,i}(U_{\xi,l} - U'_{\xi,l}) + F_{\xi,j}(U_{\xi,m} - U'_{\xi,m})]$$

$$G = G_I + G_{II} \tag{1}$$

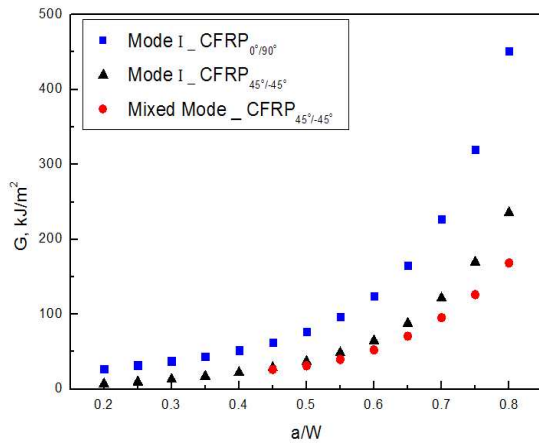


Fig. 12 Comparison between Mode I and Mixed Mode

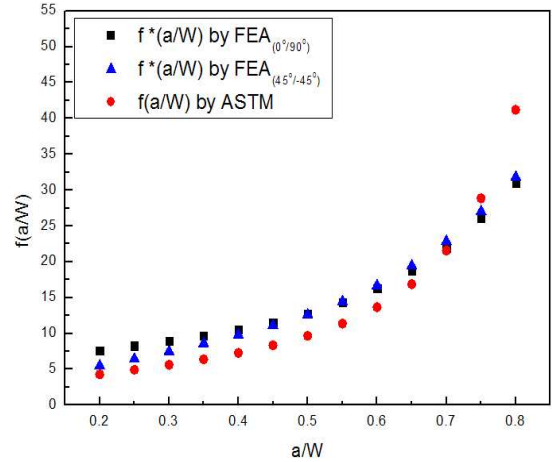


Fig. 13 Comparison of  $f(a/W)$  between FEM and ASTM at CFRP specimen

### 3.2 Mode I 균열에 대한 CFRP 복합재료의 형상계수 산출

유한요소 해석을 통해 구한 에너지 해방률( $G$ )로부터 응력확대계수와와의 관계식 (2)을 토대로 하여 응력확대계수( $K$ )를 구할 수 있다.

이렇게 구한 응력확대 계수( $K$ )와 ASTM E647-00의 식 (3)에 의해 구한 형상 계수( $f(a/W)$ )를 ASTM에 의한 결과와 비교한 결과는 Fig. 13과 같다. 유한요소해석에 의한 결과가  $a/W=0.2\sim 0.7$ 인 구간에서 ASTM에서 제시한 형상 계수보다 크게 평가되었다.  $0^\circ/90^\circ$ 인 경우에 곡선 적합한 결과는 식 (4)과 같으며,  $45^\circ/45^\circ$ 인 경우는 식 (5)와 같다.

$$G = \frac{K^2}{\sqrt{2E_{xx}E_{yy}}} \sqrt{\sqrt{\frac{E_{xx}}{E_{yy}} + \frac{E_{xx}}{2G_{xy}} - \nu_{xy}}} \quad (2)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\Delta K \cdot B\sqrt{W}}{\Delta P} \quad (3)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 5.527 + 7.01\frac{a}{W} + 30.08\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 82.94\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 105.2\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 0.72 + 27.02\frac{a}{W} - 17.38\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 9.145\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 61.89\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (5)$$

## 4. 평직 CFRP의 피로균열진전거동

### 4.1 하중에 수직인 방향의 피로 균열 성장 거동

시험을 통해 측정된 균열 길이를 하중에 수직인 방향으로 투영한 균열길이에 의한 균열진전속도와 Mode I의 에너지해방률 범위에 의한 피로 균열 성장 거동은 Fig. 14와 같이 나타난다. CFRP 복합재료는 금속재료와 다르게 균열 성장 거동 양상이 균열진전속도가 감소하는 V자의 형태를 띠고 있다. 이러한 경향은 A2024-T3와  $0^\circ/90^\circ$ glass/epoxy를 적층한 GLARE 3-5/4에서 나타난 현상으로 알루미늄 판에서는 균열이 진전하나 끊어지지 않은 섬유가 균열 진전을 방해하는 fiber-bridging효과라고 밝힌 Takamatsu 등<sup>(11)</sup>의 연구와 유사한 결과이다. 본 연구의 경우는 초기균열이 미세한 방사형 균열을 형태를 띠고 있는데, 이 균열들은 기지에서 발생한 것으로, 아직 끊어지지 않은 섬유가 균열 진전을 방해하는 fiber-bridging효과 때문이라고 판단된다. 균열 성장 거동을 보면  $45^\circ/45^\circ$ 인 CFRP 시험편이  $0^\circ/90^\circ$ 인 CFRP 시험편보다 동일한 에너지 해방률에서 균열이 더 빠르게 진전함을 알 수 있다. 이는 Yokozeki 등<sup>(2)</sup>과 Putic 등<sup>(3)</sup>에 의한 결과와 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다.

### 4.2 실 균열에 의한 피로균열 성장 거동

2장에서 수행한  $45^\circ/45^\circ$ 인 CFRP 시험편의 시험에서 실제로 측정된 균열 길이, 그 균열에 해당하는 사이클을 이용하여  $da/dN$ 값을 구하였다.

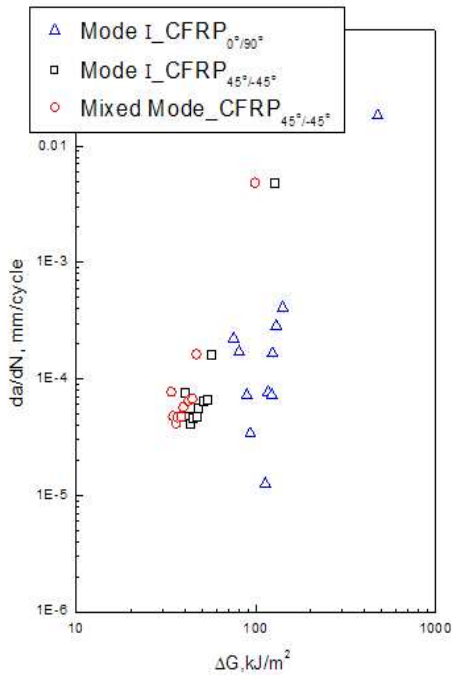


Fig. 14 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta G$  at CFRP specimen

Fig. 12의 유한요소해석 결과값을 곡선 적합하여 시험 중 측정된 균열 길이에 해당하는 에너지 해방률을 구하였다. 이렇게 구한 에너지 해방률과  $da/dN$ 의 관계를 Fig.14에 나타내었다.

Fig 14에서 보는 것과 같이 동일한 에너지 해방률에 대해 Mixed Mode로 해석한 경우가 Mode I으로 해석한 경우보다 균열 진전 속도가 빠른 것으로 나왔다.

## 5. 결론

평직 CFRP 복합재료에 대하여 하중방향에 대한 섬유배열 각도의 변화가 균열 진전 양상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2가지 직물 방향에 대하여 유한요소 해석 및 피로 균열 시험을 수행하였다. 45°/-45°인 CFRP 시험편은 하중 방향에 45°방향으로 균열이 진전하기 때문에 유한요소 해석을 Mode I과 Mixed Mode에 대해서 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 균열진전 양상이 V자의 형태를 가지고 있다. 이러한 경향은 초기 균열이 미세한 방사형 균열을 형태를 띠고 있는데, 이 균열들은 기지에서 발생한 것으로, 아직 끊어지지 않은 섬유가

균열진전을 방해하는 fiber-bridging효과 때문이라고 판단된다.

(2) 섬유 배열 각도에 따라 균열 진전 양상이 다르게 나왔다. 이는 하중에 수직하게 진전하는 0°/90°인 CFRP 시험편은 전단 응력은 거의 받지 않지만 45°/-45°인 CFRP 시험편은 전단력과 인장력을 동시에 받으므로 동일한 에너지해방률에 대하여 균열이 더 빠르게 진전되는 것으로 판단되어진다. 그러므로 항공기 제작시 섬유배열방향을 작용하는 하중방향에 수직하게 한다면 강성이 커져 균열 진전 속도가 느려진다.

(3) CFRP 복합재료는 금속재료와 다르게 이방성을 띠고 있으므로 섬유 배열 각도에 따라 Mode I 혹은 Mixed Mode를 적용하여 파괴인성 시험을 수행해야 한다.

## 후 기

본 논문의 2단계 두뇌한국 21(BK21) 사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2007-0055842).

## 참고문헌

- (1) Pris and P.C. Sih, 1969, "Stress Analysis of Cracks," *American Society for Testing and Materials*, pp.30~83.
- (2) Tomohiro Yokozeki, 2002, "Fatigue Growth of Matrix Cracks in the Transverse Direction of CFRP Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol.62, pp.1223~1229.
- (3) Putic, S., 2003, "Analysis of Fatigue and Crack Growth in Carbon-Fiber Epoxy Matrix Composite Laminates," *Strength of Material*, Vol.35, No.5, pp.500~507.
- (4) Rybicki E.F. and Kanninen M.F., 1977, "A Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral," *Eng Fract Mech*, Vol.9, pp.931~937.
- (5) Mandell. J. F., 1975, "Fatigue Crack Propagation Rates in Woven and Nonwoven Fiber Glass Laminates," *ASTM Special Technical Publication*, pp.515~527.
- (6) Kim, J. K., 1990, " Fatigue Crack Propagation of GFRD Composites According to Fiber Array Direction," Conference of The Korea Society of

- Mechanical Engineers, Vol.2, pp.44~47.
- (7) Blanco, N., 2004, "Mixed Mode Delamination Growth in Carbon-Fibre Composite Laminates Under Cyclic Loading," *International journal of solids and structures*, Vol. 41, pp. 4219~4235.
- (8) Choi, J. H., 2008, "Evaluation of Failure Strengths and Fracture Toughness of Plain Weave Composites," Conference of The Korea Society of Mechanical Engineers, pp. 561~566.
- (9) ASTM, 2000, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," E647.
- (10) Biner, S. B., 2001, "Mixed-Mode Fracture Characteristics of a Laminated Metal Matrix Composite," *Journal of Materials Science*, Vol.36, pp.2505~2510.
- (11) Tohru Takamatsu, 1999, "Fatigue Crack Growth Properties of a GLARE3-5/4 Fiber/Metal Laminate," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.63, pp.253~272.
- (12) Lee, C. S., 1994, "Fatigue Analysis of Composites," *Journal of The Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol.34, pp.372~383.