

# 평직 CFRP 복합재료의 피로균열성장 거동 평가

## Fatigue Crack Propagation Behavior in Woven CFRP Composite Material

\*최정훈<sup>1</sup>, #석창성<sup>2</sup>, 구재민<sup>3</sup>, 강민성<sup>4</sup>, 박홍선<sup>5</sup>, 조성근<sup>6</sup>

\*J. H. Choi<sup>1</sup>, #C. S. Seok(seok@skku.edu)<sup>2</sup>, J. M. Koo<sup>3</sup>, M. S. Kang<sup>4</sup>, H. S. Park<sup>5</sup>, S. K. Cho<sup>6</sup>  
<sup>1,4,5,6</sup> 성균관대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2,3</sup>성균관대학교 기계공학부

Key words : Fatigue crack propagation rate, Crack length, fiber arraying direction, woven fabric carbon fiber reinforced composite material

### 1. 서 론

피로손상의 경우 섬유와 매트릭스, 매트릭스와 매트릭스간의 분리 등에 의한 피로손상 축적을 파악하는 방법이 아직 미약하고 또한 피로 부하시 섬유배열 방향에 따른 이방성효과를 평가할 수 있는 메커니즘이 확립되어 있지 않은 실정이다.<sup>1,2</sup> 현재 피로균열 전진속도를 Paris 법칙과 같이 파괴역학 파라메타인  $K$ 에 의해서 섬유, 매트릭스, 섬유와 매트릭스간의 특성 및 환경적인 요소에 의한 함수인 관계지수로 표현할 수 있다고 발표하고 있으나 강화섬유 배열방향에 의한 현저한 이방성 효과 때문에 이의 적용이 모든 복합재료에 대해서 타당하다고 볼 수 없다.<sup>3</sup> 본 연구에서는 하중방향에 대한 섬유배열각도가 다른 평직 탄소섬유복합재료의 일정진폭하중하의 피로균열전진 특성을 조사하고 이의 결과와 이방성을 고려한 형상계수에 의한 응력확대계수의 관계로부터 피로균열전진 거동을 검토하였다.

### 2. 일정진폭하중하의 CFRP 복합재료의 피로균열성장 해석

#### 2.1 사용재료 및 시험편

직물구조(Plain) 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K(두께 0.22mm)를 이용하여 최종두께가 3.50 mm로 성형한 판재에서 하중방향에 대한 섬유배열방향이 0°/90°, +45°/-45°가 되도록 채취하였다. Fig. 4.1에 시험편 하중방향에 대한 섬유배열방향을 나타내었다. 본 시험은 ASTM E-647-02에 의한 CT 시험편 형상으로 행하였으며 노치균열의 선단은 매우 날카로운 slitting metal saw로 주의 깊게 균열선단을 가공한 후, 1mm 정도의 피로예비균열을 삽입하여 초기균열이  $a_0/W=0.45$ 가 되게 하였다.

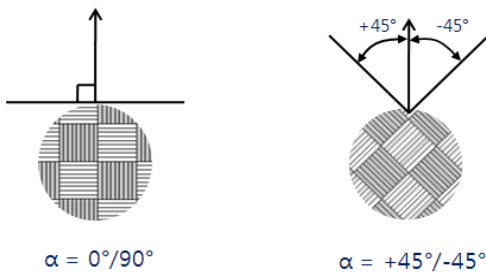


Fig. 1 Configurations of fiber orientation

#### 2.2 시험방법

하중방향에 대한 섬유의 배열각도의 영향을 평가할 목적으로 섬유배열각도 0°/90°, +45°/-45°의 두 가지 섬유배열각도에서 시험을 수행하였다.  $\Delta P$  constant 시험으로 시험을 수행하였으며 균열길이의 측정을 위해 시험 중 성장하는 시험편 균열선단에 잉크를 투입하는 Dye Injection Penetrant 법을 사용하였으며, 시험편 표면에 가시화된 균열의 형상과 길이를 Travelling Microscope와 100배율 광학 CCD 카메라를 사용하여 시험편의 앞, 뒷면 균열을 측정하였다. 또한 균열의 전진양상을 파악하고 피로부하에 의한 재료 내부의 피로손상정도를 파단면을 통해 관찰하였다. 시험기의 로드셀(Load cell)로부터 출력된 하중값과 Travelling Microscope 및 CCD 카메라로부터 측정된 균열길이를 사용하여 ASTM E647-02에 의한 응력확대계수범위  $\Delta K$  산출식 (1)에 의해 응력확대계수 범위를 계산하였다.<sup>4</sup>

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (MPa\sqrt{m}) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ (0.866 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4) \right]$$

$\Delta P$  = load amplitude (kN)  
 B = thickness of specimen (m)  
 a<sub>0</sub> = crack length (m)  
 W = width of specimen (m)

### 3. 피로균열성장에 대한 재료의 거동

#### 3.1 피로균열전과 거동

Fig. 2(a)는 하중방향에 대한 섬유배열의 각도  $\theta$ 를 갖는 시험편 임의의 단면에서 작용하는 응력을 나타낸 모식도이다. 하중방향에 대하여  $\theta$ 가 0°인 경우를 살펴보면 하중은 이 단면에서  $\sigma_0 \cos^2\theta$ 의 값이 가장 크게 작용하기 때문에, 균열은 작용하는  $\sigma_0 \cos^2\theta$ 의 하중방향에 대하여 직각방향으로 전진하게 될 것이다. 한편 하중방향에 대한 섬유배열이 +45°/-45°인 경우, 이 단면에서의 응력값은 모두 같아지게 되어 균열의 전진은 zig-zag 형태로 될 것이라고 예상된다. Fig. 3은 섬유배열이 각각 0°/90° 및 +45°/-45° 시험편 표면부의 피로균열전진 양상의 예를 응력비 R=0.3에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 0°/90° 시험편의 경우, 균열전진면이 균열이 성장함에 따라  $\theta=0^\circ$ 의 섬유방향으로 굴곡정도가 단위섬유(Unit cell) 1~2개 정도를 zig-zag로 지나가는 정도로 전체적으로 하중방향에 대해 수직으로 전진하고 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(b)의 +45°/-45° 시험편에서는 Fig. 2(a)의 모식도에서 예상한 바와 같이 0°/90°의 경우와는 다른 양상을 나타낸다. 즉, 균열선단에서부터 각각의 섬유다발을 수직으로 파단하며 zig-zag 형태로 전진하면서 불안정 파괴 개시점의 근처에 도달하게 되면 하중방향에 대하여 45° 방향으로 빠르게 전진한다. Fig. 2(b)의 균열선단을  $\times 100$ 배 확대한 사진을 살펴보면,

- (a) 균열전진양상이 서로 수직한 섬유다발을 수직으로 파단하면서 전진하여, 균열이 지나간 흔적이 거친 것을 확인할 수 있다. 또한 균열이 전진할 때는 균열선단에서 방사형태로 미세균열이 전진하다가 주변 섬유의 모든 파단이 일어나면 하중방향에 대해 수직한 방향으로 급속히 뺏어나감을 반복하면서 진행된다.
- (b) 균열의 전진양상이 직조된 섬유와 섬유의 사이로 균열이 zig-zag 형태로 전진하기 때문에 0°/90° 시험편의 경우에 비해 균열전진의 표면에 Kinking 현상이 두드러지게 관찰되었다.

이상과 같은 섬유배열방향에 대한  $da/dN$ 과  $\Delta K$ 와의 관계를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 균열전진의 초기단계에서 균열의 굴곡현상은 0°/90° 시험편에 비하여 +45°/-45°의 것이 현저한 양상을 나타내었다. 한편, 0°/90°와 +45°/-45°에서의 피로균열성장 거동은 Fig. 4(a)의 경우로 보아서는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 향후 보다 많은 실험을 통해 섬유배열각도가 균열전진거동 특성에 영향을 미치는지 여부를 확인할 필요가 있다.

#### 3.2 면내 이방성을 고려한 피로균열성장 곡선

면내 이방성을 고려한 형상계수를 적용하여 섬유배열방향에 대한  $da/dN$ 과  $\Delta K$ 와의 관계를 Fig. 4(b)(c)에 나타내었다.

구조의 손상허용성 평가에 사용되는 금속재의 형상계수와 면내 이방성이 고려된 형상계수를 적용한 것과는 다소 차이가 있는 것을 확인하였다. 이는 강화섬유 복합재료의 특성상 균열이 진전함에 있어 균열의 굴곡현상으로 인해 균열진전의 특성이 다소 둔화되는 경향을 나타내는 것으로 판단된다. Suresh<sup>5</sup> 등은 DP강의 피로균열진전거동에 있어서 균열의 굴곡현상이 현저할수록  $da/dN$  은 저하하며 이는 균열진전에 대한 martensite 조직의 저지 역할이 주요한 요인임을 보고한 바 있다. 이러한 관점에서 섬유의 균열진전에 대한 저지의 결과인 균열의 굴곡현상은 균열성장수명을 향상시킬 수 있는 방법이라고 판단된다.

3.3 미시파면 현상

섬유강화 복합재료에서는 서로 다른 구성 요소간에 응력 특이 현상으로 균열선단에서 여러 가지 형태의 파손양상이 혼합되어 나타난다. 그 형태를 보면 섬유파단, 섬유의 인발, 모재파손, 탈적층, 축간 갈라짐, 모재와 섬유간의 분리 등이다. Fig 5(1)은 하중방향에 대한 섬유배열이 0°/90°인 피로파면의 대표적인 예로 전체적으로 섬유의 파단, 섬유의 인발 및 섬유와 모재간의 분리현상이 관찰되었다. Fig 5(1)-(b)(c)와 같이 안정 균열성장구간에서 불안정 균열성장구간으로 갈수록 섬유다발의 파단 및 인발로 형성된 심한 요철을 관찰할 수 있다. Fig 5(2)는 +45°/45° 시험편의 파면사진이다. 마찬가지로 불안정 균열성장구간으로 갈수록 파단면의 심한 요철현상을 볼 수 있다. Fig 5(3)은 안정균열 성장을 하는 부분의 균열면 사진으로, 시험편 내부의 파면도 각각의 섬유다발이 매우 거칠게 파손되어 섬유의 인발 및 파손과 함께 zig-zag의 형태의 균열진전양상을 예측할 수 있다. 그러나 균열이 어느 정도 성장하여 불안정 파괴 개시점에 이르게 되면 Fig 5(3)-(d)(e)(f)(g)와 같이 섬유다발을 수직으로 파단 시키면서 빠르게 성장하는 것을 관찰 할 수 있다.

4. 결 론

- (1) 균열이 진전할 때는 균열선단에서 방사형태로 미세균열이 진전하다가 주변 섬유의 모든 파단이 일어나면 하중방향에 대해 수직인 방향으로 급속히 뻗어나감을 반복하면서 진행됨을 확인하였다.
- (2) 균열진전의 초기단계에서 균열의 굴곡현상은 섬유배열방향이 0°/90°에 비하여 +45°/-45°가 현저한 양상을 나타내었다.
- (3) 섬유배열방향이 0°/90°의 경우는 균열진전면이 하중방향에 대해 수직으로 진전하고, +45°/-45°에서는 섬유다발을 수직으로 파단하며 zig-zag 형태로 진전하다가 불안정 파괴 개시점의 근처에 도달하게 되면 하중방향에 대하여 45° 방향으로 빠르게 진전하였다.
- (4) 금속재의 형상계수와 면내이방성이 고려된 형상계수를 적용한 것과는 차이가 있음을 확인하였다. 이는 강화섬유 복합재료의 특성상 균열이 진전할 때 균열의 굴곡현상으로 인해 균열진전이 다소 둔화되는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

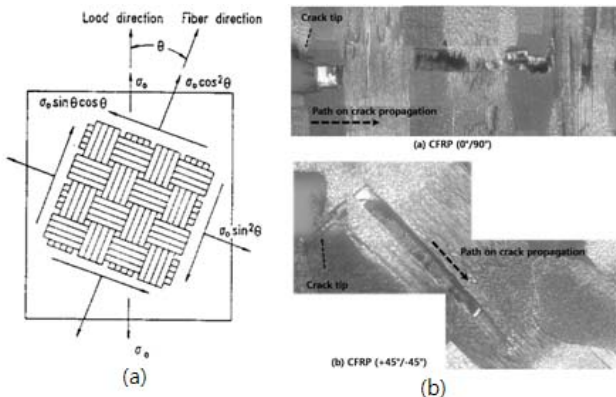


Fig. 2 Schematic diagram of stress distribution in arbitrary surface (a) & Crack growth behavior at the micro surface of specimen (b)

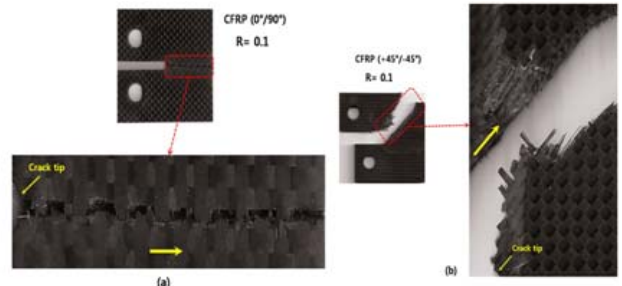


Fig. 3 Crack growth behavior at the surface (0°/90°, +45°/-45°)

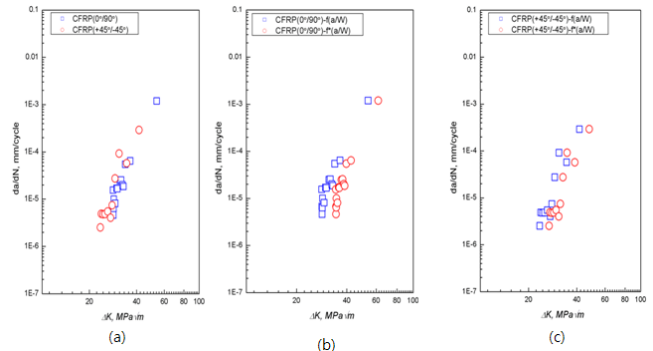


Fig. 4 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  for CFRP with fiber direction

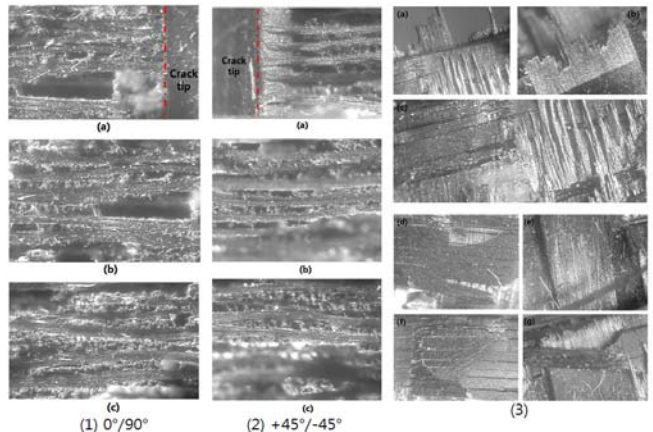


Fig. 5 Appearance of fatigue fracture surface ( 0°/90°, +45°/-45° )

후기

본 연구는 두뇌한국 21(BK 21)사업과 한국과학재단의 국가지정연구실(NRL) 사업(R0A-2007-000-10049-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. F.M. Xu, Effect of stress ratio on fatigue crack propagation in a functionally graded metal matrix composite, Composites Science and Technology 64(2004), 1795-1803
2. J. Petermann, The effects of creep and fatigue stress ratio on the long-term behaviour of angle-ply CFRP, Composite Structures 57(2005), 205-210
3. Masaki Hojo, Effect of Stress Ratio on Near-threshold Propagation of Delamination Fatigue Cracks in Unidirectional CFRP, Composites Science and Technology 29(1987), 273-292
4. ASTM E647-02, Standard Test for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 2002
5. S.Suresh, Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overload, Eng. Fracture Mechanics(1993), Vol. 18, No. 3, pp 577-593