CFRP 일정진폭하중하의 섬유 배열각도별 피로 균열 성장 해석

(Analysis of fatigue crack growth of depending on angle of fiber arraying direction CFRP composites under the constant amplitude load)

*금진화[1], 최정훈[1], 박홍선[1], 구재민[1], #석창성[1]
*J.H.Geum[1], J.H.Choi[1], H.S.Park[1], J.M.Koo[1], #C.S.Seok(seok@skku.edu)[1]
[1] 성균관대학교 기계공학과

Key words : Plane Weave CFRP, Fatigue Crack propagation rate, Crack length, Fiber arraying direction, Energy release rate,

1. 서론

피로손상의 경우 섬유의 파단, 모재의 파손, 섬유와 모재간의 분리 등에 의한 피로손상 축적을 파악하는 방법이 아직 미약하고 섬유배열 방향에 따른 이방성효과를 평가할 수 있는 메커니즘이 확립되어 있지 않은 실정이다. Mode I 하중 하의 금속재의 피로 균열 진전 거동은 Paris[(1)]의 power law가 잘 적용되고 있으나, 섬유 배열 방향에 의한 현저한 이방성 효과 때문에 균열진전이 mode I과 II가 결합된 형태로 된다. 본 연구에서에는 평직 탄소섬유 복합재료의 일정진폭하중하의 섬유 배열 각도별 피로 균열 진전 특성을 조사하고 이의 결과와 해석을 통한 에너지 해방율을 통해 mode I 과 mixed mode에 대한 피로 균열진전 거동을 검토하였다.

2. 피로 균열 성장률을 이용한 CFRP의 균열 진전 평가

2.1 시험재료 및 시험편

재료는 직물구조 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K (t=0.22mm)를 이용하여 시험 재료로 사용하였으며 최종두께는 적층이 되어 3.52mm가 되게 하였다. 프리프레그의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다. 적층판에서 하중 방향에 대한 섬유 배열 각도가 0˚/90˚, +45˚/-45˚가 되도록 채취하였다. Fig. 1은 시험편 하중방향에 대한 섬유 배열각도를 나타내었다. 본 시험편은 ASTM E-647-00에 의한 CT시험편 형상으로 행하였으며 노치 균열 선단은 날카로운 slitting metal saw로 가공한 후 1mm 정도의 피로 예비균열을 삽입하여 초기 균열이 a_0/W=0.45가 되게 하였다.

Fabric (Wt. g/m^2)	Resin (Wt. g/m^2)	Resin Content (%)	Total (Wt. g/m^2)
205	148	42±2	353

Table 1 Chemical Compositions of Prepreg(Wt, %)

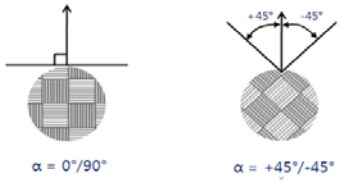

Fig. 1 Configurations of orientation

2.2 시험방법

0˚/90˚, 45˚/-45˚인 섬유배열각도에 대해서 시험을 수행하였다. Table 2에 시험조건을 나타내었다. ΔP constant 시험으로 시험을 수행하였으며 균열길이의 측정을 위해 시험 중 성장되는 균열 선단에 잉크를 투입하는 Dye Injection Penetrant법을 사용하였으며 시험편 표면에 가시화된 균열의 형상과 길이를 Travelling Microscope와 100배율 광학 CCD 카메라를 사용하여 시험편의 균열을 측정하였다. 균열 측정은 하중방향에 수직인 축에 투영한 균열길이를 측정하였으나, +45˚/-45˚의 경우는 하중방향에 대하여 45˚방향으로 균열이 진전하기 때문에 실제로 균열이 진전하는 방향으로 균열길이를 추가하여 측정하였다. 시험기의 로드셀로부터 출력된 하중값과 측정된 균열길이를 사용하여 ASTM E647-00의 응력확대계수범위 산출식(1)에 의해 응력확대계수 범위를 구한 후 응력확대계수와 에너지 해방율 관계식(2)에 의해 에너지 해방율을 계산하였다.

Temperature	23℃
Wave form	Sine wave
Frequence	10Hz
Load ratio	R=0.1
Control mode	Load Control

Table 2 Test condition and control mode

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

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2+\frac{a}{W}}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}}\left[0.886+4.64\frac{a}{W}-13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2+14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3-5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right] \quad (1)$$

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

2.3 시험결과

2.3.1 섬유배열 방향별 피로 균열진전 거동

Fig. 2는 균열선단을 X100배 확대한 사진을 나타낸 것으로 섬유 배열각도가 0˚/90˚의 시험편(a)은 균열진전양상이 섬유다발을 수직으로 파단하면서 진전하는데, 균열이 진전할 때는 균열선단에서 방사 형태로 미세균열이 진전하다가 주변 섬유의 모든 파단이 일어나면 하중방향에 수직한 방향으로 급속히 뻗어나감을 반복하면서 진행된다. +45˚/-45˚의 시험편(b)은 균열진전 양상이 직조된 섬유와 섬유의 사이로 균열이 zig-zag 형태로 진전하기 때문에 균열진전의 표면에 Kinking 현상이 관찰되었다.

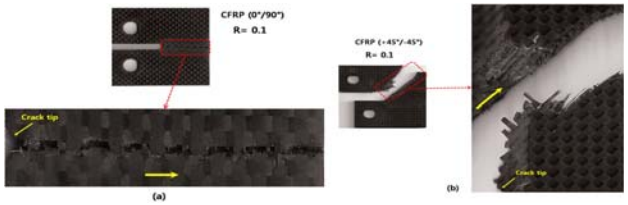

Fig. 2 Fatigue crack growth behavior at the surface of specimen

2.3.2 하중에 수직인 방향의 피로 균열성장 거동

Fig. 3은 ASTM 식에 의한 섬유 배열각도별 에너지 해방율 범위(ΔG)와 da/dN의 관계를 나타내었다. 여기에서 균열길이

a는 하중방향에 수직인 축에 투영한 길이이다. Fig 3(C)의 경우로 보아서는 0˚/90˚와 45˚/-45˚에서의 피로 균열 성장 거동의 기울기가 크게 차이가 나지 않는 것으로 판단된다.

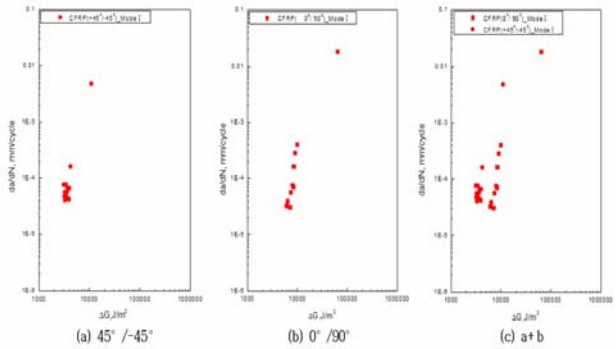

Fig 3. Relation between da/dN and ΔG for ASTM of CFRP with fiber direction

3. 실 균열에 의한 피로균열진전 평가

3.1 실 균열에 대한 에너지 해방율

시험결과와 동일한 양상으로 CT 해석 모델을 구성하였다. Fig 4는 섬유 배열각도에 따른 CT 모델의 형상을 나타낸 것으로 0˚/90˚(a)의 경우는 균열 선단이 하중 방향에 수직하게 해석 모델을 구성하였지만 45˚/-45˚(b)의 경우는 균열 진전이 하중방향에 45˚로 이루어지기 때문에 a/W=0.45의 균열 끝점에서부터 균열 선단을 45˚방향으로 해석 모델을 구성하였다.

본 연구에서는 Raju[(2)]에 의한 가상균열닫힘법을 사용하여 에너지 해방율을 구하였다. Fig 5와 같은 균열 끝단의 4점에 대한 유한요소해석 결과값으로부터 에너지해방율에 대한 관계식(3)을 이용하여 측정된 균열길이에 대한 에너지 해방율을 계산하였다.

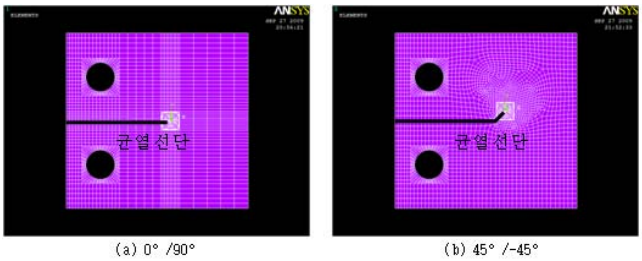

Fig. 4 FEA Model

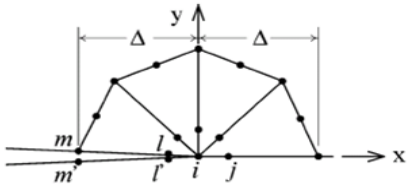

Fig 5. Collapsed quarter-point singular elements around the crack tip

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta}\{F_y^i[t_{11}\cdot a + t_{12}\cdot b] + F_y^j[t_{21}\cdot a + t_{22}\cdot b]\}$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta}\{F_x^i[t_{11}\cdot c + t_{12}\cdot d] + F_x^j[t_{21}\cdot c + t_{22}\cdot d]\}$$

$$t_{11} = 6 - \frac{3\pi}{2} \quad t_{12} = 6\pi - 20 \quad t_{21} = 0.5 \quad t_{22} = 1$$

$$a = v^{m1} - v^{m2} \quad b = v^{l1} - v^{l2} \quad c = u^{m1} - u^{m2} \quad d = u^{l1} - u^{l2} \tag{3}$$

3.2 실 균열에 의한 피로균열진전거동

Fig. 6은 가상균열닫힘법에 의한 섬유배열 각도별 에너지 해방율 범위(ΔG)와 da/dN의 관계를 나타내었다. 여기에서 균열길이는 실제로 진전하는 방향의 균열길이이다. Fig 6(c)의 경우에서 보는 것과 같이 0˚/90˚와 45˚/-45˚에서의 피로 균열 성장 거동이 차이가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 섬유배열 각도에 따른 에너지 해방율범위(ΔG)과 da/dN의 비교를 나타낸 것으로써 실균열에 의한 피로균열진전이 투영한 균열에 대한 균열성장거동과 차이가 있음을 알 수 있다.

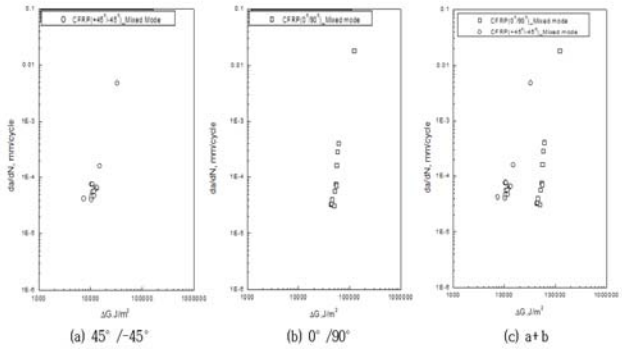

Fig. 6 Relation between da/dN and ΔG for FEA of CFRP with fiber direction

4.결론

평직 CFRP 복합재료에 대하여 섬유 배열각도가 균열 성장 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 0˚/90˚와 +45˚/45˚CT시험편에 대한 피로 균열 성장률 시험을 수행하였다. 또한 이방성을 고려한 에너지 해방율 범위를 평가하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

하중에 수직인 방향의 피로 균열 성장 거동의 기울기가 크게 차이가 나지 않았으나, 실균열에 의한 피로균열진전은 각도별로 차이가 있었으며, 하중에 수직인 방향과 실균열에 의한 피로균열진전거동과 차이가 있음을 알 수 있다.

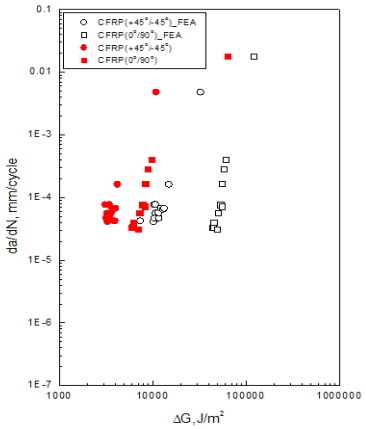

Fig. 7 Relation between da/dN and ΔG for ASTM and FEA of CFRP with fiber direction

후기

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

참고문헌

(1) Pris, P.C. Sih, G.C."Stress Analysis of Cracks," American Society for testing and materials, pp. 30-83, 1969
(2) Raju, I.s. "Calculation of strain-energy rlease rates with higher order and singular finite elements"'Engg. Fract. Mech, 28, pp. 251-274, 1987
(3) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 2000, ASTM E647