

CFRP 복합재료의 섬유 배열 방향별 파괴인성 평가 (The Evaluation of Fracture toughness on fiber array direction of CFRP composites)

*금진화¹, 최정훈³, 구재민³, #석창성²

*J.H.Geum¹, J.H.Choi³, J.M.Koo³, #C.S.Seok(seok@skku.edu)²

¹ 성균관대학교 기계공학과, ² 성균관대학교 기계공학과, ³ 성균관대학교 기계공학과

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

1. 서론

복합재료는 섬유배열 방향에 따른 이방성 효과를 평가할 수 있는 메커니즘이 확립되어 있지 않은 실정이다. 섬유배열 방향이 하중에 수직인 경우에는 금속과 동일하게 Mode I으로 균열이 발생하지만 섬유 배열 방향이 하중에 수직하지 않을 경우에는 Mode I과 II가 결합된 Mixed Mode로 균열이 발생한다. 본 연구에서는 평직 탄소섬유 복합재료의 파괴인성을 평가하고 해석을 통한 에너지 해방율을 토대로 Mode I과 Mixed Mode에 대한 파괴 인성을 검토하였다.

2. CFRP 복합재료의 파괴 인성 시험

2.1 시험재료 및 시험편

재료는 직물구조 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K (t=0.22mm)인 시험 재료로 사용하였으며 16층을 적층하여 최종두께가 3.52mm 되게 하였다. 프리프레그의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다. 하중 방향에 대해 섬유 배열 방향이 0°/90°, +45°/-45°가 되도록 채취하였다. 본 시험편은 ASTM E-647-00에 의한 CT시험편 형상으로 하였으며 초기 균열은 a₀/W=0.45로 하였다.

2.2 시험방법

Instron사의 25ton 유압시험기를 사용하여 상온에서 0.2mm/min의 속도로 변위 제어에 의하여 수행하였으며, COD 게이지를 사용하여 CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)를 측정하였다. 시험 중 모든 데이터는 사용 DAQ 프로그램을 이용하여 PC에 저장하였다.

2.3 시험 결과

로드셀과 COD 게이지로부터 측정된 하중-변위곡선을 구하여 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 구한 하중-변위 곡선과 ASTM E399에 의해 P_Q를 구하고 이 값을 식(1)에 대입하여 파괴인성 K_{app}를 구하였다. 섬유배열방향별 K_{app}는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical Compositions of Prepreg(Wt, %)

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

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

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

(1)

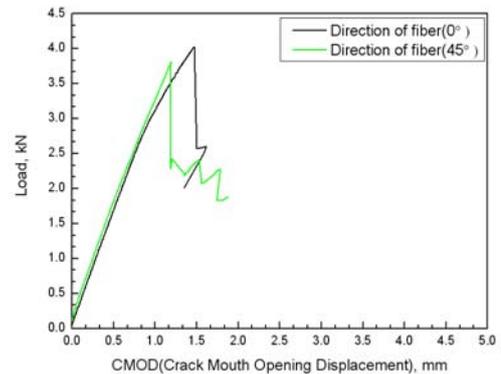


Fig. 1 line of Load and CMOD

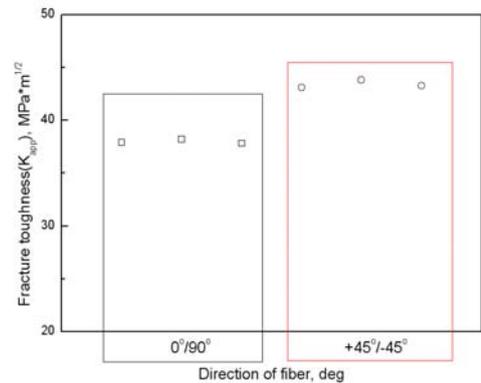


Fig. 2 Results of fracture toughness according to direction of fiber at ASTM

3. 유한요소해석에 의한 에너지해방율(G) 산출

3.1 유한 요소 해석 모델 및 해석 방법

유한요소 해석 모델은 16ply를 모델링 한 후, x와 y방향 탄성계수 E₁, E₂와 포아송의 비 ν, 전단탄성계수 G₁₂의 4가지의 물성을 부여하였다. 0°/90°의 경우 Fig. 3과 같이 약 1,770개의 요소(element)와 약 5,600개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소를 사용하였고, 45°/45°의 경우는 약 1,200개의 요소(element)와 약 4,000개의 절점(node)으로 구성된 쉘요소를 사용하였다. Fig. 4와 같이 실제 균열이 묘사하기 위해서 45° 방향으로 균열을 삽입하였다. 균열 선단 부위는 Quad Mapped Mesh를 사용하였다. 모델링과 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

본 연구에서는 Rybicki와 Kanninen[1]에 의한 가상균열 닫힘법을 사용하여 에너지해방율(G)을 구하였다. Fig.5와 같이 균열 선단의 6개 절점의 응력값과 변위값을 식(2)에 대입하여 균열길이에 해당하는 에너지해방율을 구하였다.

3.2 유한 요소 해석 결과

유한 요소 해석을 통해 균열 길이에 대한 에너지해방율(G)을 Fig.6에 나타내었다. Mode I에서는 a/W의 구간을 0.4에서 0.6까지 해석하였지만, 실제 45°/-45°의 균열은 초기 균열인 a₀/W=0.45부터 하중 방향에 45°로 균열이 진전하였기 때문에 a/W=0.45 이전 구간에 대한 해석을 구할 수 없었다. 그리고 45°/-45°의 실제 균열 길이를 하중에 수직인 방향으로 투영한 길이로 a/W에 적용하였다.

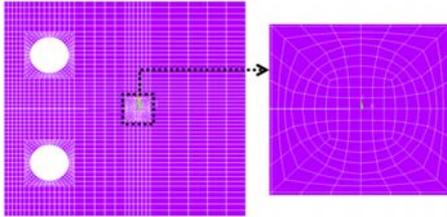


Fig. 3 Finite element modeling at Mode I

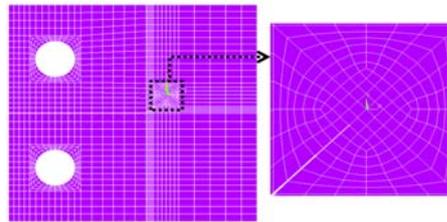


Fig. 4 Finite element modeling at +45°/-45°

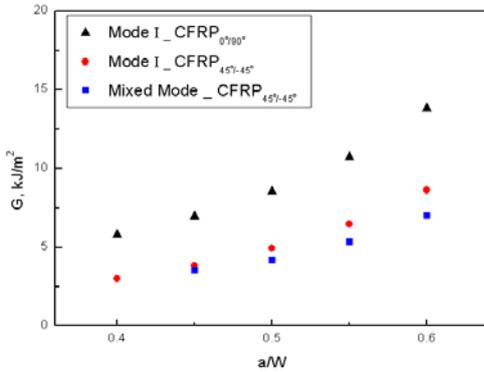


Fig. 5 Comparison between Mode I and Mixed Mode

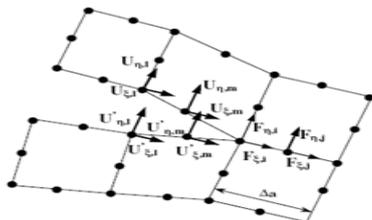


Fig. 6 Collapsed Quarter point singular elements around the crack tip

$$\begin{aligned}
 G_I &= -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\eta,i}(U_{\eta,i} - U'_{\eta,i}) + F_{\eta,j}(U_{\eta,m} - U'_{\eta,m})] \\
 G_{II} &= -\frac{1}{2\Delta a} [F_{\zeta,i}(U_{\zeta,i} - U'_{\zeta,i}) + F_{\zeta,j}(U_{\zeta,m} - U'_{\zeta,m})] \\
 G &= G_I + G_{II}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

4. CFRP 복합재료의 파괴인성 평가

시험을 통해 측정된 P_Q를 토대로 CFRP 복합재료의 에너지해방율(G)을 해석을 통해서 구하였고, ASTM E399에 의해 구한 파괴인성인 K값을 식(3)를 통해 에너지해방율(G)로 환산하였다. Fig. 7은 ASTM으로 구한 에너지해방율(G)과 해석을 통해 구한 에너지해방율(G)을 비교하여 나타내었다.

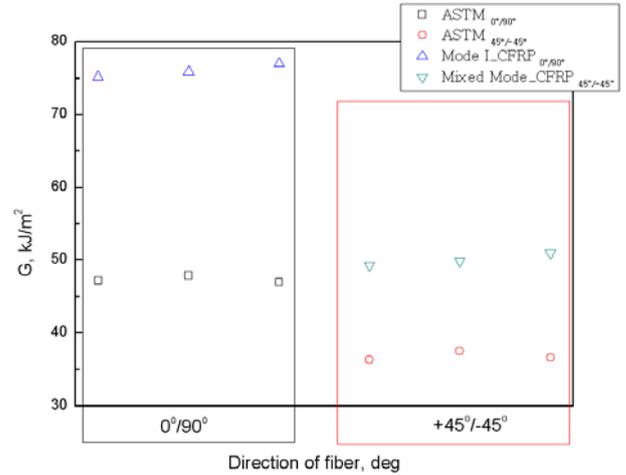


Fig. 7 Results of fracture toughness according to direction of fiber

$$G = \frac{K^2}{\sqrt{2E_{xx}E_{yy}}} \sqrt{\frac{E_{xx}}{E_{yy}} + \frac{E_{xx}}{2G_{xy}} - \nu_{xy}}
 \tag{3}$$

5. 결론

평직 CFRP 복합재료에 대하여 섬유 배열각도가 파괴인성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 0°/90°와 +45°/45° CT 시험편에 대한 파괴 인성 시험을 수행하였다. 또한 이방성을 고려한 에너지해방율 범위를 평가하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구의 결과로부터, 복합재료를 이방성을 고려할 경우에, 균질재에 비해 에너지해방율(G)이 높게 평가되었으며, 각도별의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

후기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업과 2007년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10049-0).

참고문헌

[1] Rybicki EF and Kanninen MF, "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral", Eng Fract Mech, Vol.9, pp.931-937, 1977
 [2] 최정훈, "평직CFRP 복합재료의 파손장도 및 파괴 저항성 특성 평가", 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 강연 및 논문집, pp. 561-566, 2008
 [3] "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic materials", ASTM E399, 1997