

초기 균열길이 및 섬유방향이 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재의 층간 파괴에 미치는 영향

권오현 · 권우덕* · 강지웅**

부경대학교 안전공학과 · *(사)대한산업안전협회 · **대구한의대학교 보건학부
(2012. 8. 14. 접수 / 2013. 1. 8. 채택)

The Effects of the Initial Crack Length and Fiber Orientation on the Interlaminar Delamination of the CFRP/GFRP Hybrid Laminate

Oh-Heon Kwon · Woo-Deok Kwon* · Ji-Woong Kang**

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

*Korea Industrial Safety Association, Branch of Kyungnam West Area · **Faculty of Health Science, Daegu Haany University

(Received August 14, 2012 / Accepted January 8, 2013)

Abstract : Considering the wind power system and the rotor blades which are composed of much technology, the wind power blade would be the most dangerous part because it revolves at high speed and weighs about dozens of tons, if the accident happens. Therefore, the light weight composite materials have been replacing as substitutional materials. The object of this study is to examine the delamination and damage for CFRP/GFRP hybrid composite that is used for strength improvement of a wind power blade. The influence of the initial crack length and fiber orientation for the interlaminar delamination was exposed for the blade safety. Plain woven CFRP instead of GFRP was inserted into the layer of the box spar for improving the strength and blade life. DCB(Double Cantilever Beam) specimen was used for evaluating fracture toughness and damage evaluation of interlaminar delamination. The material used in the experiment is a commercial material known as CF 3327 EPC in plain woven carbon prepreg(Hankuk Carbon Co.) and UD glass fiber prepreg(Hyundai Fiber Co.). From the results, crack growth rate is not so different according to the variation of the initial crack length. Mode I interlaminar fracture toughness of fiber direction 0° is higher than that of 45°. Interlaminar fracture has an effect on fiber direction and K decreased with lower value according to increasing initial crack length. Also energy release rate fracture toughness was evaluated because CFRP/GFRP hybrid composite with a different thickness is under the mixed mode loading condition. The interlaminar fracture was almost governed by mode I fracture even though the mixed mode.

Key Words : DCB, energy release rate, fiber orientation, fracture toughness, hybrid composite, interlaminar delamination, initial crack length, mixed mode, mode mixity

1. 서론

현재 지구온난화 문제 및 화석에너지원료 고갈 문제가 제기됨에 따라 신재생에너지가 각광을 받고 있다. 신재생에너지 중 가장 경쟁력 있는 풍력에너지를 사용하는 풍력발전 설비는 주요한 연구 관심 분야로 등장하였다. 전 세계 풍력시장은 기후변화협약 및 에너지수급문제로 급격한 시장의 확대가 전망된다¹⁾. 이러한 풍력발전 설비는 발전용량이 증가함에 따라 블레이드, 풍력터빈, 타워 등 전체적으로 대형화를 초래하고 있다. 특히 풍력발전기의 가장 중요한 부분인 블레이드의 성능에 의하여 전체 시스템의 작동 상태 및 수명이 결정될 수 있다. 최근의 7MW급 풍력발전기의 블레이드 무게가 약 35톤에 해당할 정도로 대형화됨에 따라 자중 등을 고려한 경량화 문제가 대두되어, 대체재로 복합재를 적용하

기 시작하였다. 그러나 강풍, 난류 등 환경 급변화의 발생에 의하여 블레이드 균열발생 및 이중재적층 손상에 따른 수명단축 등이 우려되어 강도향상 문제가 제기 될 수 있다²⁾. 따라서 본 연구는 외부하중을 주로 부담하는 블레이드 박스 스파(Box spar)부에 CFRP를 적용하는 경우 발생하는 파단 기구를 파악하기 위하여 DCB(Double Cantilever Bending) 시험을 수행하였다. DCB 시험편을 이용한 연구는 이 평직 CFRP복합재의 층간파괴인성치를 AE(Acoustic Emission) 기법을 사용한 AE 누적카운터 관계식을 구하였다³⁾. 일방향 유리/폴리에스터 프리프레그를 0°, 30°, 45°로 적층한 복합재에 대하여 적층분리 파괴인성치의 값을 구하여, 일방향 복합재의 경우가 가장 크며 적층 각도가 커짐에 따라 파괴인성치는 감소함을 나타내었다⁴⁾. 유리섬유강화 에폭시 적층재의 비대칭 DCB시험을 수행하여 층간 파괴 특성치를 평가

*Corresponding Author: Ji-Woong Kang, Tel : +82-53-819-1803, E-mail: kangjw@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University, 1 Haanydaero, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-Do 712-715, Korea

하였다⁵⁾. CFRP에 대하여 모드 I 층간 파괴인성을 평가하였다⁶⁾. 사용된 수법은 MCC(수정 컴플라이언스 계산) 법을 이용하였으며 에너지해방률로 나타내어 초기 파괴인성치의 측정율을 위한 여러가지 평가 결과를 비교하였다. 층간 하이브리드 복합재를 사용하여 적층분리의 영향을 조사하여 단섬유복합재의 경우보다 층간파괴인성치의 값이 더 크다는 것을 밝혔다⁷⁾. 또한 모드 I 에서 균열성장의 영향은 없는 것으로 조사하였다. 본 연구의 목적은 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재료의 층간에 존재하는 균열의 초기 균열길이와 CFRP 섬유방향에 따른 층간 분리 현상을 파악하는 것이다. 얻어진 결과는 CFRP/ GFRP 하이브리드 적층 복합재료로 구성된 블레이드의 Box spar부에 대한 적층분리 거동을 평가하는데 유용한 자료로 활용될 것으로 여겨진다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 시험편 및 재료

모드 I 파괴실험에 사용된 재료는 평직 탄소섬유강화(plain woven carbon prepreg) 및 유리섬유강화 프리프레그(glass fiber reinforced plastics prepreg)로 국내 한국카본(주)에서 생산, 시판되는 CF3327EPC(두께: 0.27 mm)와 현대카본(주)의 UD를 이용하였으며, 프리프레그는 원단이 1 m 폭으로 생산되기 때문에, 250 mm×250 mm로 절단하였다. 절단된 프리프레그는 평직 CFRP와 GFRP를 각각 10 ply씩 적층하여 최종 20 ply로 적층하였다. CFRP의 섬유방향은 $[0]_{10T}$, $[45]_{10T}$ 2가지로 하였으며, GFRP는 $[0]_{10T}$ 일방향 적층하였다. 여기서 대괄호 안의 0과 45는 섬유의 방향을, 아래첨자 10T는 프리프레그의 적층수를 나타낸다. CFRP와 GFRP는 각각 10 ply씩 적층 하였으며 CFRP의 섬유방향은 0° 및 45° 로 적층하였고 GFRP는 일방향을 채택하였다. 초기균열(a_0)은 평직 CFRP $[0]_{10T}$, 및 $[45]_{10T}$ 와 GFRP $[0]_{10T}$ 사이에 각각 Teflon tape를 초기 노치 길이만큼 $a_0/L=0.372, 0.42$ 만큼 삽입하여 형성하였으며, 이후 최종 적층하여 $[0_c/0_g]_{20T}$, $[45_c/0_g]_{20T}$ 로 된 총 4종류의 적층판을 구성하였다. 대괄호 안의 아래첨자 c는 CFRP를 g는 GFRP를 나타낸다. 초기균열 길이는 $a_0/L= 0.375, 0.42$ 의 두 가지 경우에 대하여 평가하였다. 하이브리드 적층판의 두께는 CFRP적층이 2.5mm, GFRP적층이 3 mm로 가압되어 최종 5.5mm로 성형되었다. 적층판은 성형판에 실리콘 오일인 이형재(KS707)를 균일하게 바른 후 열 성형기(Hot Press, 국내 D사, $500\text{kg}/\text{cm}^2$)를 이용하여 성형 온도와 게이지 압력을 각각 130°C , $5.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 60분간 성형하였고 잔류응력 완화, 뒤틀림 및 변형을 방지하기 위하여 열 성형기 내에서 2시간 이상 냉각한 후 자연공냉하였다. Table 1에는 CFRP와 GFRP의 0° 적층판에 대해 각각

Table 1. Mechanical properties of CFRP and GFRP laminated composite.

property laminate	Elastic modulus, E(GPa)	Ultimate strength, σ_u (GPa)	Poisson's ratio, ν
CFRP	54.3	1.52	0.13
GFRP	43.3	1.10	0.3

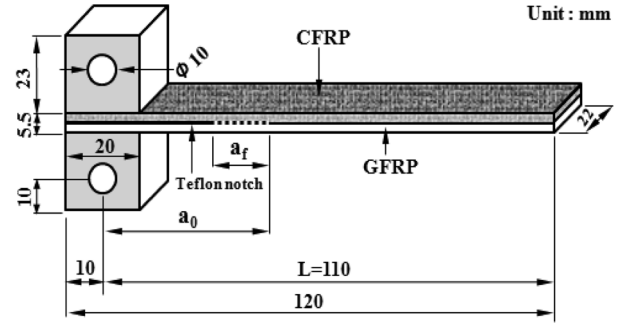


Fig. 1. Geometry of DCB specimen.

의 인장실험을 통해 획득한 기계적 물성치를 나타낸다. 성형된 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재료는 시험편 제작용 다이몬드 정밀 휠커터를 사용하여 120 mm×22 mm로 절단 가공 하였으며, Fig. 1과 같이 자체 제작한 알루미늄 블록을 속건성 에폭시 수지인 아랄다이트(Araldite Rapid)로 부착하였다. 또한 알루미늄 블록이 부착된 DCB 시험편은 전기로에서 100°C 로 30분간 열처리를 수행하여 알루미늄블록의 접합강도를 강화시켜 시험도중 시험편에서 알루미늄 블록의 탈락을 방지하였다.

2.2. 실험방법

제작된 DCB시험편에 $a_0/L=0.375, 0.42$ 에 대응하는 초기 균열을 생성하기 위해서 Teflon tape 초기 노치 앞에 2~3 mm 정도의 피로 예비균열을 삽입하였다. 피로 예비균열은 만능 동적시험기를(H사, 50 kN) 이용하여 K_f^{max} 가 $0.16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 을 넘지 않는 범위에서 주파수 2Hz로 생성하였다. 파괴 시험에 사용된 시험기는 소형 인장시험기(Tinus Olsen, H5KS)를 사용하였으며, ASTM D 3039⁸⁾에서 추천하고 있는 방법인 변위제어 0.2 mm/min로 행하여 졌다. 파괴시험 동안 균열 성장길이 측정은 눈으로 직접 측정된 것으로, 실제 현미경을(Kyowa, ×20) 이동식 현미경(Japan, N.O.W사)에 조

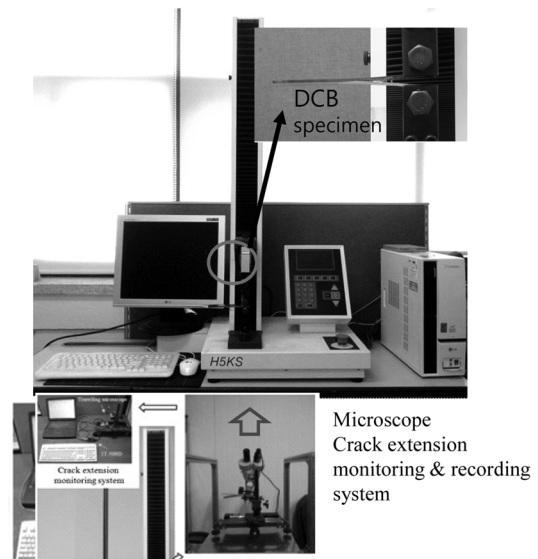


Fig. 2. The overview of experimental apparatus.

립하여 사용하였다. 이동식 실체 현미경에서 측정된 균열 길이는 디지털 변화기인 IT-005D(Japan, M사)를 거쳐 바로 PC로 저장하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. DCB시험편에 의한 Mode I 층간파괴

Fig. 3은 DCB시험편을 이용한 파괴실험에서 얻어진 하중과 변위 및 균열 진전량과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 평직CFRP적층판의 경사(weft)섬유방향이 하중방향과 일치하는 0°의 경우를 나타내며 Fig. 3(b)는 하중방향에 대하여 45°만큼 회전하여 적층된 경우를 나타낸다. 초기균열 길이와 CFRP섬유방향이 다른 4가지 경우 모두에 대하여 하중-변위곡선은 초기균열이 진전 개시되는 지점까지 거의 선형적으로 변화하며 균열진전개시와 더불어 감소하기 시작한다. 이후 균열이 성장함에 따라 하중은 다소 증감을 나타내며 서서히 감소하지만 변위가 10~12 mm가 됨에도 불구하고 최대하중의 약 60~70%까지의 하중을 유지함을 알 수 있다.

Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 균열개시는 섬유방향에 관계없이 $a_0/L=0.375$ 의 경우는 변위가 약 3 mm에서 부

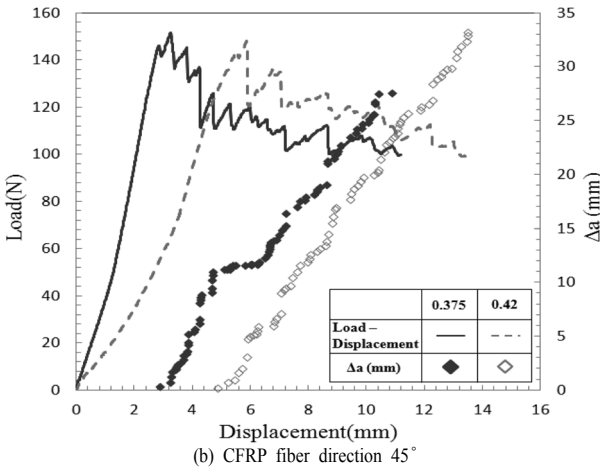
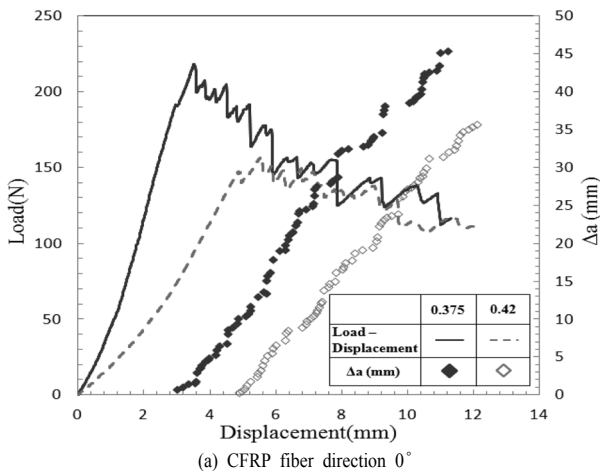
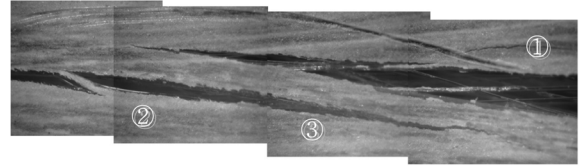


Fig. 3. The relationships of the load-displacement and crack extension length variation of DCB specimen under model.



① → ② → ③ (The direction of the crack)

Fig. 4. The micrograph pattern of the crack extension with an interlaminar delamination.

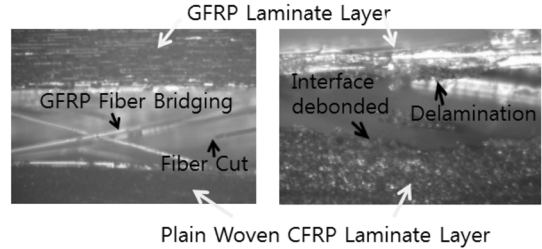


Fig. 5. The fracture surface of the interface during the crack extension.

터, 0.42의 경우는 약 5 mm에서부터 균열이 진전하기 시작하여 실험 종료시까지 거의 선형적으로 성장하였다. 균열진전량은 CFRP섬유방향 0°에서 $a_0/L=0.375$ 경우에 약 45 mm, $a_0/L=0.42$ 경우에 35 mm까지 성장하였으며, CFRP섬유방향 45° 경우에는 각각 28 mm, 33 mm까지 측정되었다. 또한 하중변위에 대한 균열성장속도를 da/du 는 0° 및 45° 경우에 대하여 각각 5 mm/mm 및 3.8 mm/mm로 측정되어 45° 경우가 균열 성장속도가 저하되었다. 초기균열 길이에 따른 균열성장속도율의 차이는 그다지 크게 나타나지 않았다. Fig. 4는 균열 진전형태를 나타낸다. CFRP적층부와 GFRP 적층부의 계면을 따라 진전하다가 정지한 후 다시 GFRP층에서 균열이 개시되어 계면 쪽으로 진전성장하는 형태를 나타내었다.

Fig. 5는 CFRP적층과 GFRP 적층계면사이에서 균열이 진전하면서 GFRP적층부의 섬유소가 CFRP 적층부에서 일부가 분리가 지연됨에 따라 섬유소 가닥이 pull-out되면서 CFRP와 GFRP 적층부를 연결하는 가교(bridging)현상을 나타내고 일부 섬유소는 절단 형태를 나타내는 것을 보여주고 있다. 또한 CFRP적층부의 계면을 지나 내부로 일부 진전 성장된 균열로 인하여 계면분리가 일어나면서 일부 CFRP 적층판이 파손되는 것을 나타낸다. GFRP 섬유소의 가교현상은 하중의 증가 감소현상을 설명해주고 있는 것으로 이해할 수 있다.

3.2. DCB 시험편에 의한 파괴시험

DCB 시험편에 파괴인성치는 응력확대계수 K 및 에너지 해방율 G를 사용하여 계산하였으며 두 가지 경우를 비교하였다. K의 계산식은 Kanninen⁹⁾에 의한 실험식인 다음 식 (1)을 적용하였다.

$$K_I = \frac{2\sqrt{3} a P}{W(B/2)^{3/2}} \left[1 + 0.639 \left(\frac{B/2}{a} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 P는 하중, W는 시험편 폭, B는 두께, α 는 균열길

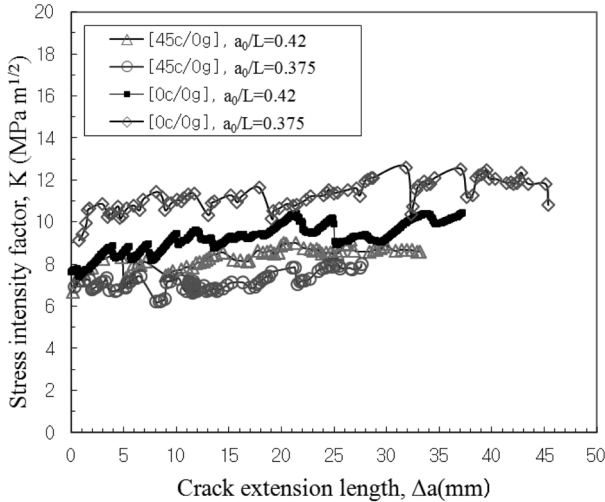


Fig. 6. The interlaminar fracture toughness resistance curves with a variation in crack extension length.

이를 나타낸다.

Fig. 6은 식 (1)을 사용하여 얻어진 DCB시험편에 대한 mode I 층간파괴저항치 K_C 의 변화를 나타낸다. 최초 균열이 성장 개시하는 시점에서의 K_{IC} 는 [0c/0g]_{20T}에서 $a_0/L=0.375$ 및 0.42의 경우, $9.13 MPa\sqrt{m}$, $7.64 MPa\sqrt{m}$ 로 얻어졌으며, [45c/0g]_{20T}에서는 $a_0/L=0.375$ 및 0.42의 경우 각각 $6.911 MPa\sqrt{m}$, $6.69 MPa\sqrt{m}$ 로 얻어졌다. 즉 CFRP 적층부의 섬유방향이 0°가 45°의 경우보다 K_{IC} 가 높게 나타났다. 섬유방향이 균열의 층간파괴에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

또한 초기균열길이 a_0 가 길어질수록 K 의 값도 작아지는 것을 나타낸다. 한편 모든 경우에 있어서 균열이 진전함에 따라 파괴인성치는 전체적으로 약간의 상승경향과 적층 섬유소의 간섭현상에 따른 섭동현상이 발생하고 있으나 대체적으로 약 $\pm 1 MPa\sqrt{m}$ 사이의 범위에서 주어졌다.

DCB mode I 에너지해방율 G 는 ASTM D5528-01⁽¹⁰⁾에 의거하여 MBT(Modified Beam Theory) 식 (2)을 이용한다.

$$G = \frac{3P\delta}{2W(a+|\Delta|)} \quad (2)$$

여기서 P 는 하중, δ 는 하중점 변위, W , a 및 Δ 는 각각 두께, 균열길이 및 수정계수를 나타낸다. G 는 하중이 파괴하중에 도달할 때 임계값 G_C mode I 파괴인성치가 된다. 그러나 식 (2)는 전체 에너지해방율의 값을 나타내며, 현재의 실험에서처럼 CFRP 적층부와 GFRP 적층부의 두께가 상이한 경우는 혼합모드의 상태가 나타나므로 식 (2)를 그대로 적용할 수 없다 따라서 Mollon 등⁽¹¹⁾이 제시한 수정식 (3)을 적용하였다.

$$G = \frac{3P^2(a+\Delta)^2}{2W(EI)_{eq}} \quad (3)$$

여기서 Δ 와 $(EI)_{eq}$ 는 수정계수이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(EI)_{eq} = \frac{a^3}{C} \quad (4)$$

C 는 컴플라이언스(Compliance) 이고

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5)$$

식 (5)로 주어진다. 따라서 하중 및 하중점 변위곡선인 Fig. 3의 결과를 이용하여 C 를 구한 후, 측정된 균열성장길이 a (Fig. 3 참조)와의 관계를 구하면 기울기 $(EI)_{eq}$ 를 얻는다. 또한 Δ 는 ASTM D5528-01⁽¹⁰⁾에 따라 기울기가 균열길이 a 축을 지나가는 절편의 크기를 구하여 얻어진다. 절편의 크기는 DCB 시험편이 적층박리되는 균열단 부분이 완전고정이 아니므로 균열성장길이가 약간 증감되는 것을 보완하는 것이다.

Fig. 7은 CFRP 적층부 섬유소방향이 45°이며 $a_0/L=0.42$ 인 [45c/0g]_{20T} 시험편과 섬유소방향이 0°이며 $a_0/L=0.375$ 인 [0c/0g]_{20T}인 경우에 대하여 $(EI)_{eq}$ 와 Δ 를 계산한 결과를 예를 보여준다. 다른 두 가지 경우에 대하여도 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 7에서 직선은 각 경우에 대하여 최소자승법으로 구하였으며 n 은 직선의 기울기를 나타내어 식 (4)를 의미한다. 또한 수정계수 Δ 는 각각 14.418 mm, 15.613 mm로 얻어졌다. 이러한 결과들을 토대로 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재의 적층분리에 따른 에너지해방율을 계산할 수 있다.

Fig. 8은 에너지해방율 G 와 균열성장길이와의 관계를 나타낸다.

전체 에너지해방율 G 는 [0c/0g]_{20T}에서 $a_0/L=0.375$ 및 0.42의 경우, $0.704 kJ/m^2$, $0.673 kJ/m^2$ 로 얻어졌으며, [45c/0g]_{20T}에서는 $a_0/L=0.375$ 및 0.42의 경우 각각 $0.86 kJ/m^2$, $0.679 kJ/m^2$ 로 얻어졌다. 같은 초기균열길이 시험편에 대하여 CFRP 적층부의 섬유방향이 0°인 경우가 45°의 경우보다

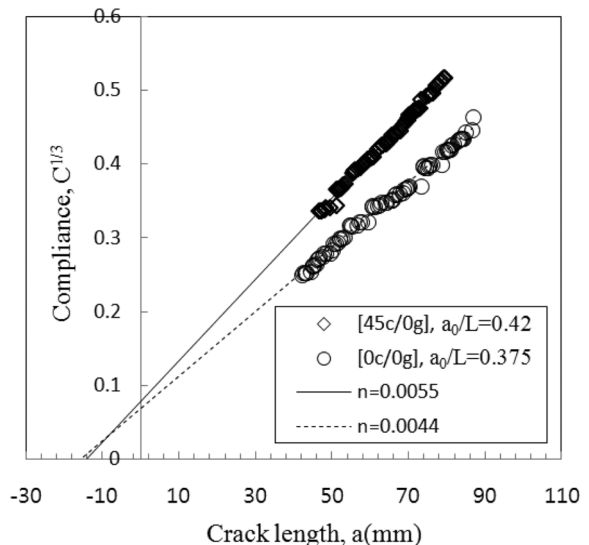


Fig. 7. Compliance calibration for the crack length.

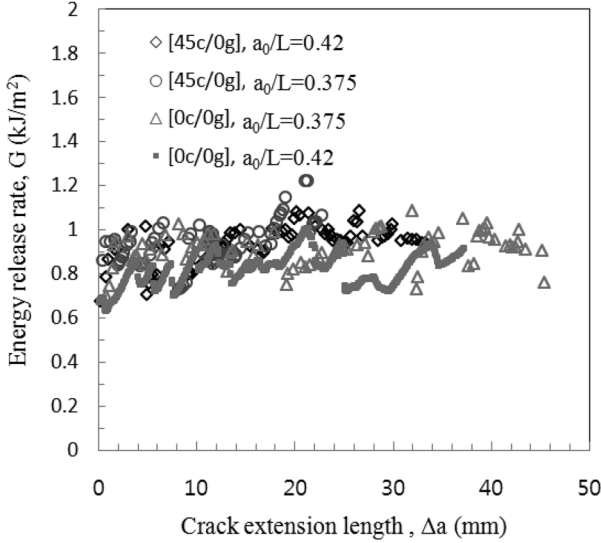


Fig. 8. The variation of the total energy release rate curves to the crack extension length.

약간 낮게 얻어졌으나 같은 방향에 있어서는 초기균열길이 길어짐에 따라 더 낮은 에너지해방율이 얻어졌다. 이것은 K의 경우와도 일치한다. 그러나 모든 경우에 있어서 균열이 진전함에 따라 에너지해방율에 의한 파괴저항치는 전체적으로 거의 일정한 경향을 나타내며 이것은 모든 경우에 유사함을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 있어서 약 ±0.6~1 kJ/m² 사이의 범위에서 주어지며, 본 실험에서 구성된 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재의 파괴인성치는 평균값 0.85 kJ/m²로 얻어졌다.

식 (3)에서 제시하는 G는 혼합모드 전체 에너지해방율 G_T의 의미를 가지며 각각의 두께가 다른 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재의 경우는 mode I의 성분과 mode II의 성분을 분리하여 어느 모드의 지배를 받는지를 파악할 필요성이 있다. 따라서 시험편 두께의 함수로써 G_{II}/G_T를 표현하면 식 (6)과 같이 주어진다¹¹⁾.

$$G_{II}/G_T = f(h_1, h_2) \quad (6)$$

여기서 h_i는 CFRP 적층부의 두께 h₁=2.5 mm, GFRP 두께 h₂=3.0 mm를 나타낸다.

Mollon 등¹¹⁾은 f(h_i)식이 적층부 두께 h₁, h₂의 관계가 0에서 1까지의 범위에서 식 (7), (8)로 주어지는 것을 실험적으로 나타내었다.

$$f(h_1, h_2) = \frac{1 - \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^3}{1 + \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^3} \quad (7)$$

$$F = 0.06f(h_1, h_2) + 0.35 \quad (8)$$

식 (7) 및 (8)을 이용하여 mode II 에너지해방율은 다음

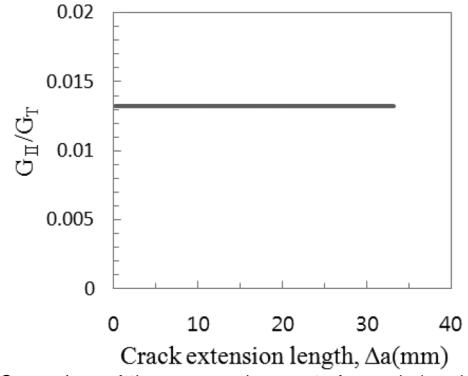


Fig. 9. Comparison of the energy release rate for mode I and mode II.

식 (9)로 주어지며, 따라서 mode I 에너지해방율 기여분은 식 (10)이 된다.

$$\frac{G_{II}}{G_T} = -F(1 - f^2(h_1, h_2))^{1/2} + F \quad (9)$$

$$\frac{G_I}{G_T} = 1 - \frac{G_{II}}{G_T} \quad (10)$$

한편 G_I, G_{II} 사이의 관계는 모드혼합도 각(mode-mixity angle) φ에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} \quad (11)$$

Fig. 9는 전체 에너지해방율 G_T에 대한 mode II 에너지해방율 기여분의 비를 나타낸다. G_{II}/G_T는 0.0133으로 얻어지며 경우 중간 파괴는 대부분 mode I 지배를 받는 것으로 나타났다. 모드혼합도각 (Mode mixity angle)는 φ=6.61로 얻어졌다.

4. 결론

CFRP/GFRP 하이브리드 복합재료의 층간에 존재하는 균열의 초기균열길이와 CFRP섬유방향에 따른 층간분리 현상을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균열진전형태는 CFRP와 GFRP의 계면을 따라 진전하다가 멈추고 다시 GFRP층에서 균열이 개시 되어 계면 쪽으로 진전하였다. GFRP적층부의 섬유소는 CFRP 적층부에서 일부 분리가 지연됨에 따라 섬유소 가닥이 pull-out되면서 CFRP와 GFRP 적층부를 연결하는 가교(bridging)현상을 나타내었고 일부 섬유소는 절단 형태를 나타내었다.

2) CFRP 섬유소 방향에 관계없이 a₀/L 비 0.375는 변위 약 3 mm에서 부터, 0.42의 경우는 약 5 mm에서부터 균열이 진전하기 시작하였다. 하중변위에 대한 균열 성장속도 d/d_u는 0° 및 45° 경우에 대하여 45° 경우가 균열 성장속도가 저하되었다. 초기균열 길이에 따른 균열성장속도율의

차이는 그다지 크게 나타나지 않았다.

3) DCB시험편을 이용한 mode I 층간파괴인성치는 CFRP 적층부의 섬유방향이 0°가 45°의 경우보다 K_{IC} 가 높게 나타나, 섬유방향이 균열의 층간파괴에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 섬유방향이 0° 와 45°인 두 경우에서 초기균열길이 길어질수록 K의 값도 작아졌으며, 0°의 경우가 초기 균열길이에 대한 영향이 더 크게 나타났다.

4) 섬유방향 0°, $a_0/L=0.42$ 의 경우에 대한 전체 에너지해 방률 G_I 는 0.67 kJ/m^2 , mode I 기여분 G_I 는 0.664 kJ/m^2 로 얻어져, 이 경우 층간 파괴는 대부분 mode I 지배를 받는 것으로 나타났다. 다른 경우에도 유사한 결과를 얻었다.

5) 모드 혼합도각 (Mode mixity angle)는 $\phi=6.61$ 로 얻어졌다.

References

- 1) David Craig, "Caithness Wind Farms Information Forum", Wind Turbine Accident Data, 2005.
- 2) Gunjit S. Bir and P. Migliore, "Computerized Method for Preliminary Structural Design of Composite for Two-and Three-Blade Rotors", NREL/TP-500-31486, 2004.
- 3) Y.S. Yun and O.H. Kwon, "The Evaluation of Interlaminar Fracture Toughness and AE Characteristics in a Plain Woven CFRP Composite with DCB Specimen", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 20, No. 1, pp. 49~54, 2005.
- 4) F. Ozdil and L.A. Carlsson, "Beam Analysis of Angle-ply Laminated DCB Specimen", Composites Science and Technology, Vol. 59, No. 2, pp. 305~315, 1999.
- 5) S. Bennati, M. Colleluori, D. Corigliano and P. S. Valvo, "An Enhanced Beam Theory Model of the Asymmetric Double Cantilever Beam Test for Composite Laminates", Composite Science and Technology, Vol. 69, pp. 1735~1745, 2009.
- 6) M. Hojo, K. Kageyama and K. Tanaka, "Prestandardization Study on Mode I Interlaminar Fracture Toughness Test for CFRP in Japan", Composites Science and Technology, Vol. 26, pp. 243~255, 1995.
- 7) S.F. Hwang and B.C. Shen, "Opening Mode Interlaminar Fracture Toughness of Interply Hybrid Composite Materials", Composites Science and Technology, Vol. 59, pp. 1861~1869, 1999.
- 8) Standard Test Method ASTM D 30395.
- 9) M.F. Kanninen, "A New Techniques for Determining Fracture Toughness KIC and its Confidence with Single DCB Specimen", International Journal of Fracture, Vol. 9, pp. 83~92, 1973.
- 10) Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites ASTM D 5528-01, ASTM Annual Book of Standards, 2001.
- 11) V. Mollon, J. Bonhomme, J. Vina and A. Arguells, "Mixed Mode Fracture Toughness: An Empirical Formulation for GI/GII Determination in Asymmetric DCB specimens", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 3699~3703, 2010.