

능직 CFRP/GFRP 적층하이브리드 복합재의 Mode I 파괴인성 평가

노영우* · 강지웅**†

The Evaluation of Fracture Toughness on Mode I for Twill CFRP/GFRP Laminated Hybrid Composites

Young Woo Roh* · Ji Woong Kang**†

†Corresponding Author

Ji Woong Kang

Tel : +82-53-819-1803

E-mail : kangjw@dhu.ac.kr

Received : May 26, 2020

Revised : September 21, 2020

Accepted : October 5, 2020

Abstract : In order to realize high strength and light weight for various industrial facilities and structural materials, various new materials are applied to product design. Among them, CFRP has excellent specific strength and non-rigidity, and the scope of use is expanding throughout the industry, such as mobility products and building materials. GFRP is cheaper than CFRP, and has excellent specific strength and non-rigidity, and has excellent heat resistance and sound insulation, so it has been adopted as a core material for flooring and interior flooring. CFRP of twill weave structure has better resistance to deformation of fiber than plain weave structure, so the outermost layer is applied as twill weave structure in product design. After fabrication with DCB specimens, Mode I fracture toughness was evaluated according to the crack length. As the crack length increases, the energy release rate and stress intensity factor values tended to decrease overall.

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : CFRP, energy release rate, fracture toughness, GFRP, laminated hybrid composite, mode I, twill

1. 서론

현대사회에서 각종 산업설비와 구조용 재료로 사용되던 기존의 Fe 계열을 대체하기 위해 고강도 및 경량화에 강점을 가지는 하이브리드 복합재의 적용이 다양하게 시도되고 있다¹⁻³⁾. 고분자 물질을 기지로 하는 섬유강화 복합재는 섬유의 적층구조와 직조방식에 따라 강도의 차이를 보이고 성형방법 및 환경이 구조물의 강도와 파괴 메커니즘에 큰 영향을 미치게 된다⁴⁾. 강화재로 사용되는 탄소섬유는 비강도 및 비강성이 우수하여 자동차 부품, 레이저용 선박, 드론 부품 등 강성과 중량이 중요시 되는 모빌리티 분야에 적극적으로 적용되고 있다. 또한, 높은 단열성과 낮은 열팽창계수로 극한의 조건에서 온도를 유지하기 위한 LNG 선박의 저장탱크 소재로도 이용되고 있다⁵⁾.

복합재료 구성요소 중 강화재 또는 보강재로 사용

되는 강화섬유 종류에는 탄소섬유(CFRP), 유리섬유(GFRP), 아라미드(Aramid), 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE) 등이 있다. 이 중 GFRP는 CFRP에 비해 가격이 저렴하면서 비강도 및 비강성이 우수하고 금속에 비해 열전도율이 낮아 자기부상식 철도차량의 하중지지재 부품에 적용되고 있다. 내열성과 흡음력이 뛰어나 층간소음과 열에 의한 변형을 방지하여 장판과 실내 바닥재에 핵심소재로 사용되고 있다.

섬유직조 구조가 평직(plain) 구조로 짜여진 CFRP는 제품 설계 시 가장 많이 사용되고 있으나 불규칙적인 형태나 굴곡이 많은 구조에 적용해야 할 때 과도한 주름이 발생하여 설계에 맞는 형상으로 제작하는데 문제점이 있다. 반면, 능직(twill) 구조로 짜여진 CFRP는 섬유의 변형에 대한 저항이 평직구조에 비해 뛰어나 제품설계 시 가장 바깥층을 능직 구조로 적용하고 있다⁶⁾.

적층분리에 대한 연구는 Bennati 등⁷⁾이 혼합모드에

*대구한의대학교 대학원 보건학과 박사과정 (Department of Public Health, Daegu Hanny University)

**대구한의대학교 보건학부 교수 (Division of Health Science, Daegu Hanny University)

서 확장 보 이론을 통해 적층분리에 대한 평가식을 제시하였고, Soboyejo 등⁸⁾은 이종재료의 계면파괴상태에 대하여 시험을 통해 평가하였다. 권 등⁹⁾은 평직 CFRP를 섬유 적층방향에 따라 0°와 45°, GFRP는 일방향을 채택하여 $a_0/L = 0.375, 0.42$ 의 두 가지 경우에 대하여 Mode I 파괴거동을 평가하였다. 섬유방향이 0°일 때 K_{Ic} 가 높게 나타나 45°의 경우보다 초기 균열길이에 대한 영향이 더 크게 나타났다. 또한 강 등¹⁰⁾은 직교적층 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재 적층판의 Mode I 층간 및 층내 파괴인성을 평가하여 90° 층 내의 Mode I 층내 파괴인성이 0°~90° 층 사이의 Mode I 층간 파괴인성보다 낮은 것으로 평가하였다. 이외에도 여러 연구에서 적층분리 평가 기준으로서 다양한 실험적, 해석적 결과가 나타나고 있으나 능직 CFRP와 능직 GFRP를 혼합하여 적층한 경우 이종재 사이 계면에 존재하는 초기균열 길이변화에 따른 파괴인성치를 평가한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 능직구조로 짜여진 CFRP와 GFRP를 비닐에스테르 수지로 하이브리드 적층판을 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 성형한 후 이종재 계면의 층간 파괴인성을 평가하기 위해 DCB(Double Cantilever Bending) 시험편을 통해 Mode I 시험을 수행하였다. 초기균열길이에 따라 에너지해방율을 적용하여 층간 파괴인성평가를 진행하였다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 시험편 및 시험재료

인장시험과 Mode I 파괴시험에 사용된 재료는 능직 탄소섬유(twill woven carbon fabric) 및 능직 유리섬유(twill woven glass fabric)로 국내 현대화이버(주)에서 직조되어 시판되는 C520-3K와 현대화이버(주)의 능직 GFRP를 이용하였고 재료의 두께는 0.23 mm로 동일하게 하였다. 오토클레이브를 이용하여 인장시험편과 파괴시험편을 성형하였다. 시험편 제작에 사용된 능직

Table 1. Physical properties of twill CFRP and twill GFRP Prepreg

Material (Product)	Density (count/inch ²)	Weight (g/m ²)	Woven type
Glass fiber	Warp/Fill	318 ¹¹⁾	Twill
	20/20		
Carbon fiber C520-3K	Warp/Weft	204 ¹²⁾	Twill
	12.5/13.5		
Vinyl ester Epovia® RF-1001	1.04 (g/cm ³)	31.36	-

CFRP와 능직 GFRP의 각각의 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다.

성형 과정은 몰드(mold) 상부에 능직 CFRP/GFRP를 적층하고 수지 주입부를 연결한 후 성형틀을 설치한다. 성형틀 내부는 진공압 -960 mmHg 수준으로 만든 후 제작하였다. 오토클레이브를 사용해 온도 79°C, 압력 6 kgf/cm²에서 성형하였다.

각 재료의 기계적 물성치를 평가하기 위해 인장시험편 및 Mode I 시험을 위한 DCB 시험편을 능직 CFRP/GFRP 하이브리드 형태로 Fig. 1과 같이 제작하였다. 인장시험편은 250 x 160 mm²로 절단한 강화섬유를 능직 CFRP 4 ply, 능직 GFRP 4 ply로 적층하였으며 능직 CFRP/GFRP 하이브리드 복합재는 재료별 각각 2 ply 씩 총 4 ply로 적층하였다. 또한 DCB 시험편은 능직 CFRP를 10 ply, 능직 GFRP를 10 ply로 적층하여 최종 20 ply가 되도록 제작하였다. 두께 80 μm 테플론 테이프(teflon tape)를 능직 CFRP와 GFRP의 경계층인 10 ply와 11 ply 적층사이에 초기 노치균열 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5만큼 삽입하여 적용하였다. 제작된 능직 CFRP/GFRP 적층하이브리드 복합재 성형판은 ASTM D5528¹³⁾ 규격을 참고하여 120 x 24 mm²로 시험편 제작용 다이아몬드 휠커터를 사용하여 절단가공 하였다.

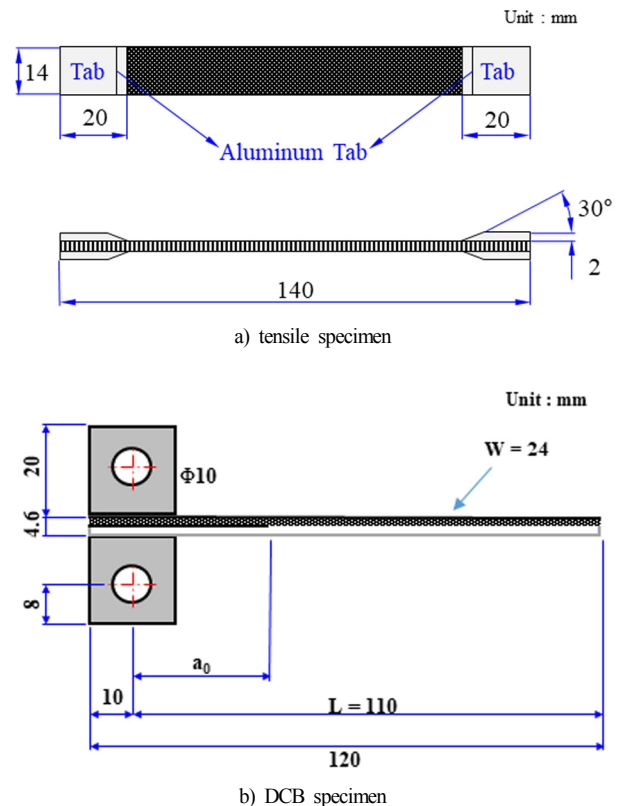


Fig. 1. Geometry of tensile and DCB specimen.

2.2 시험방법

2.2.1 인장시험 방법

인장시험을 통해 능직 CFRP, 능직 GFRP 그리고 능직 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 복합재료에 대한 기계적 물성치를 도출하였다. 중형 2축 스트레인 게이지를 인장시험편 중심부에 부착하여 변형율을 획득하였다. ASTM D3039를 참고하여 중형 인장시험기(tinius olsen, H50KS)를 사용해 0.1 mm/min의 변위제어로 수행하였다.

2.2.2 Mode I 파괴시험 방법

파괴인성치 값이 유효하기 위한 조건은 ASTM E399에 의하여 a_0/L 이 0.45~0.55에 있어야 하지만, 적층박리 해석을 위한 Mode I 파괴시험에서는 아직까지 정해진 조건이 명확하지 않아서 위 조건에 근접한 0.3~0.5 사이의 결과를 평가하였다. DCB 시험편에 초기균열을 생성하기 위해 예피로균열길이를 고려한 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5로 Teflon tape를 삽입 후, 만능 동적시험기(H사, 50 kN)를 사용해 K_I^{max} 가 $0.16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이내의 범위에서 주파수 2Hz로 생성하였다.

파괴시험에 사용된 시험기는 소형 인장시험기(tinius olsen, H5KS)로 ASTM D5528을 참고하여 0.5 mm/min 변위제어로 수행하였다. Fig. 2는 시험장치의 개략도를 나타낸다.



Fig. 2. Photograph of DCB specimen by mode I test.

Mode I 파괴시험 중 균열성장길이는 실체현미경(Kyowa, x20)으로 직접 측정하였다. 디지털 변환기인 IT-005D (Japan, M사)를 통해 현미경으로 측정한 균열 길이를 PC로 바로 저장하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

능직 CFRP, GFRP 및 능직 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 복합재 각각의 시험편 인장시험 수행 후 얻어진 응력-변형률 그래프는 Fig. 3에 나타내었다.

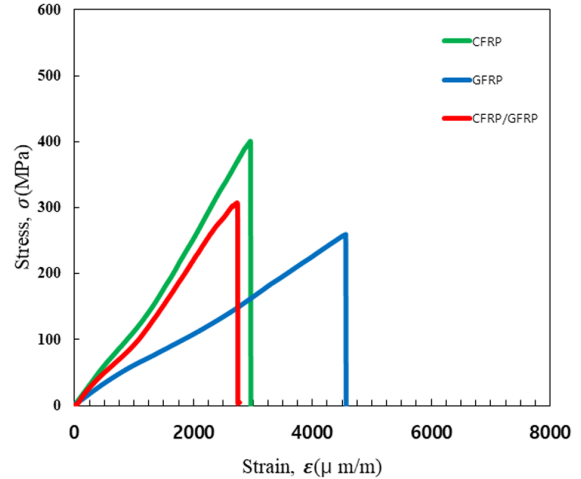


Fig. 3. Relationships of stress-strain acquired from a tensile test.

인장시험 동안 응력-변형률 그래프는 각각의 시험편 모두 안정적으로 선형적인 관계를 나타내고 있다. 인장강도는 CFRP가 400 MPa, GFRP 259 MPa 및 CFRP/GFRP에서 307 MPa로 얻어졌다. 탄성계수는 초기 선형구간의 기울기를 나타낸 것으로 CFRP, GFRP 그리고 CFRP/GFRP 적층하이브리드 시험편 순으로 각각 135, 45 및 108 GPa로 계산되었다. 포아송비는 가로방향 변형도와 세로방향 변형도의 비율을 나타낸 것이며, 2축 Strain Gauge를 통하여 각각 0.11, 0.1 및 0.12로 얻어졌다. 얻어진 기계적 재료 특성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mechanical properties of twill CFRP and twill GFRP laminated composites

Type	Properties	Ultimate strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio (-)
CFRP		400	135	0.11
GFRP		259	45	0.1
CFRP/GFRP		307	108	0.12

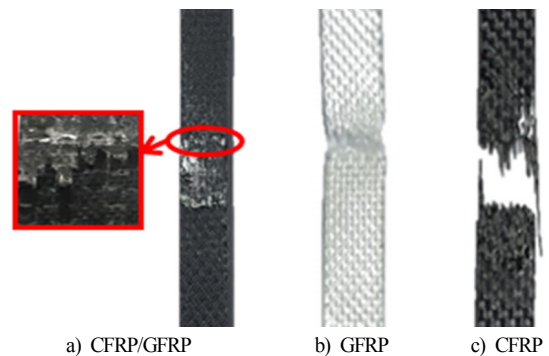


Fig. 4. Photograph of fracture specimen by tensile test.

인장시험을 통해 파단 된 시험편은 Fig. 4에 나타내었다. 파괴의 방향이 하중방향으로부터 거의 수직방향으로 발생하였음을 알 수 있다.

3.2 Mode I 시험특성

$a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 에 대한 하중의 변화에 따른 하중선 변위와 균열성장길이의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 하중-하중선 변위 곡선은 세 가지 경우 모두 초기 균열이 개시되는 시점까지는 거의 선형적으로 변화하고 있는 경향을 보이거나 균열성장이 개시되면서 하중이 감소하는 모습을 나타낸다. 이후 균열이 성장하면서 하중은 증가와 감소를 반복하며 전체적으로 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 변위가 15 mm 이상이 되어 도 최대하중의 60~85%까지 하중을 나타내는 형태를 보여주고 있다.

Fig. 5에서 나타내는 것처럼 균열개시는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 의 경우 변위가 약 4 mm, 5 mm 및 약 8 mm에서 균열진전이 시작하고 있다. 균열성장 길이는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 의 경우 최대 약 34 mm, 20 mm 및 8 mm까지 균열길이 성장하는 것을 나타내고 있다. 변위 변화량에 따른 균열 길이 증가 변화율을 나타내는 균열성장속도(da/du)는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 의 경우 각각 3.07 mm/mm, 3.23 mm/mm 및 1.76 mm/mm로 하중변위에 대한 전체 평균균열 성장속도를 나타내고 있다. 평균균열 성장속도는 $a_0/L = 0.3$ 와 $a_0/L = 0.4$ 의 경우는 유사한 속도를 나타내고 있으나, $a_0/L = 0.5$ 의 경우에 균열성장속도가 낮은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 CFRP 적층부와 GFRP 적층부의 계면사이에서 균열이 진전하면서 발생하는 내부균열의 형태를 나타낸다. 위사섬유와 경사섬유 방향이 교차하는 부분에

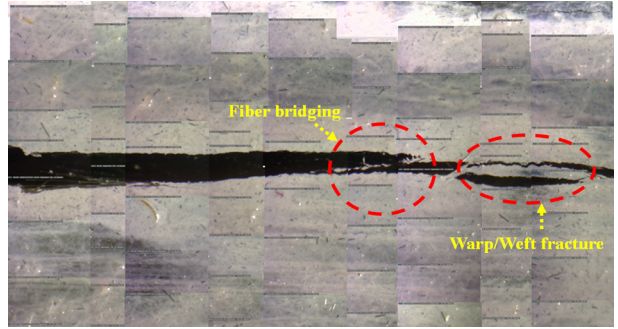


Fig. 6. The microphotograph of the crack propagation with interlaminar delamination (Mode I).

서 파괴가 발생하고 있으며 섬유 가교현상이 나타나고 있다.

3.3 DCB 시험편에 의한 파괴시험평가

DCB 시험편을 이용한 Mode I 시험에서 얻어지는 파괴인성치는 응력확대계수 K 와 에너지해방율 G 를 계산하여 두 가지 경우로 평가하였다. 응력확대계수 K_I 의 계산식은 Kanninen¹⁴⁾에 의한 시험식에 의해 구하였으며, 균열진전에 따른 Mode I 층간파괴저항치 K_{Ic} 의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 균열이 최초로 발생하는 시점에서의 K_{Ic} 는 $a_0/L = 0.3$ 에서 $3.95 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 얻어졌고, $a_0/L = 0.4$ 의 경우 $3.69 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 그리고 $a_0/L = 0.5$ 의 경우, $3.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 얻어졌다. 초기 균열 길이 값이 커질수록 균열성장 개시시점에 K_{Ic} 의 값이 점차 작아지는 것을 나타낸다. 균열이 진전함에 따라 세 가지 경우에 있어 적층 섬유소의 간섭에 따른 영향을 받고 있다.

에너지해방율 G_I 은 파괴하중에 도달 했을 때 임계

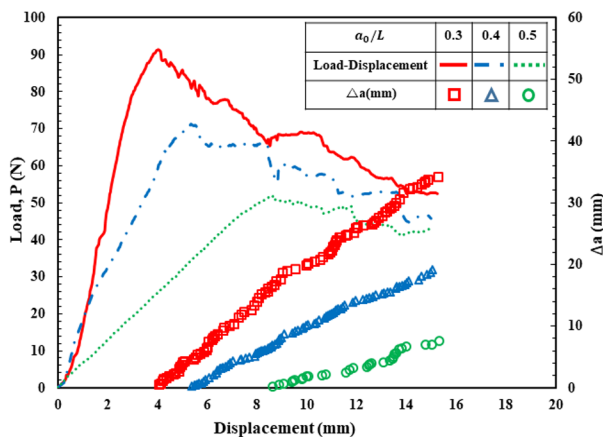


Fig. 5. The relationships of the load–displacement and crack extension length variation of DCB specimen under Mode I fracture test.

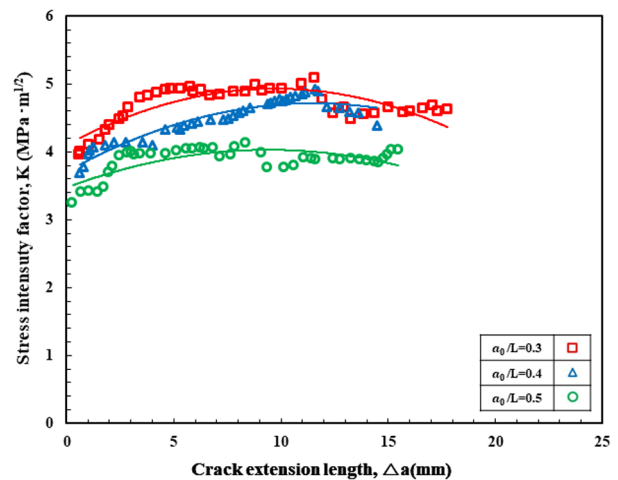


Fig. 7. The variation of Mode I stress intensity factor to the initial cracks according to the crack extension.

값 G_{IC} 인 Mode I 파괴인성치를 나타낸다. 적용식은 Mollon¹⁵⁾ 등이 제시한 수정식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$G_I = \frac{3P^2(a+\Delta)^2}{2W(EI)_{eq}} \quad (1)$$

여기서 Δ 와 EI_{eq} 는 수정계수이고, 식 (2)로 주어지며, C는 컴플라이언스이다.

$$EI_{eq} = \frac{a^3}{C} \quad (2)$$

Fig. 5의 하중-하중선 변위곡선을 이용하여 C를 구한다. 균열성장 길이를 측정된 a와의 관계를 통하여 EI_{eq} 를 얻을 수 있으며, 이 값이 기울기이다. 그리고 Δ 는 기울기가 균열길이 축을 지날 때 절편 값을 구하여 얻을 수 있다. 여기서 구해진 절편의 값은 Mode I 시험에 사용되는 시험편의 적층박리 되는 균열부가 완전히 고정된 상태가 아니므로 균열성장 길이의 차이를 보완하기 위해 필요하다.

Fig. 8은 능직 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 시험편의 초기 균열길이에 따른 Δ 와 EI_{eq} 를 계산한 결과를 나타낸다. 최소제곱법으로 직선을 구하였고 Fig. 8 범례의 n은 직선의 기울기이며 식 (2)를 나타낸다. 수정계수 Δ 는 $a_0/L = 0.3$ 의 경우 0.69 mm, $a_0/L = 0.4$ 의 경우 9.14 mm 그리고 $a_0/L = 0.5$ 의 경우 14.39 mm로 얻어졌다. 이러한 값으로 능직 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 시험편을 이용한 적층분리에 따른 Mode I 에너지해방율을 얻을 수 있다.

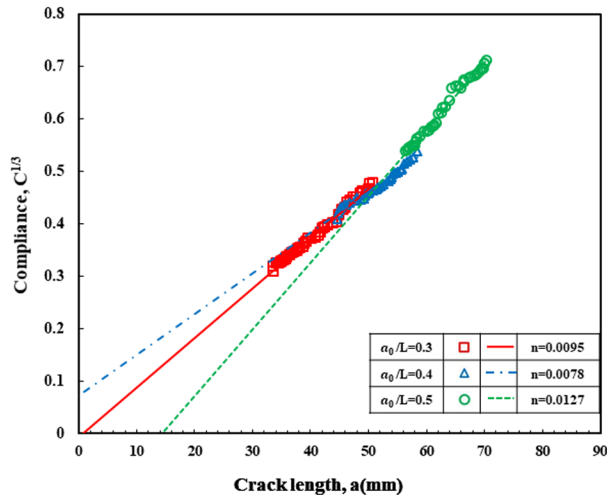


Fig. 8. Compliance calibration for the crack length.

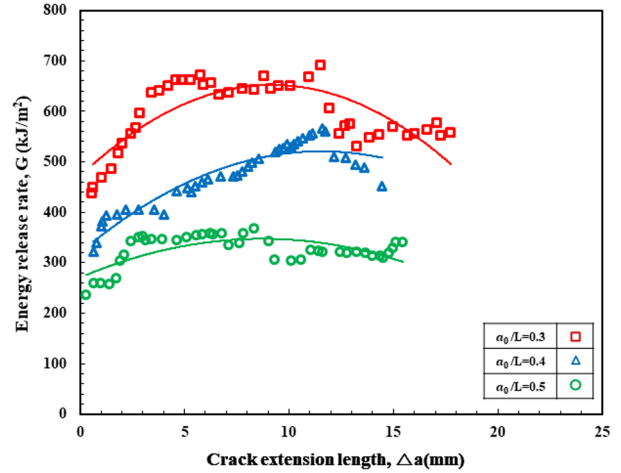


Fig. 9. The variation of Mode I energy release rate to the initial cracks according to the crack extension.

Fig. 9는 균열길이와 에너지해방율 G_I 의 관계를 나타내고 있다. 파괴인성치 G_{IC} 는 초기균열길이 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 인 경우 각각 $435.47 \text{ kJ/m}^2, 322.30 \text{ kJ/m}^2$ 및 233.76 kJ/m^2 로 얻어졌다. 초기균열길이가 길어질수록 에너지해방율은 낮게 나타났다. 이것은 응력확대계수인 K_I 의 결과와도 비슷한 형태로 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 산업분야에서 적용이 점차 확대되고 있는 능직 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 복합재의 현장 성형방식에 따라 제조된 제품에 대해 구조물 및 제품 적용 시 사전 안전성평가의 기초자료 제공을 목적으로 파괴시험을 수행하였다. 기계적 물성치와 층간파괴인성평가 및 파괴거동에 대한 특성을 평가하기 위하여 인장시험, Mode I 파괴시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험을 통해 얻어진 능직 CFRP, GFRP 그리고 CFRP/GFRP 적층 하이브리드 복합재의 인장강도는 400 MPa, 259 MPa 및 307 MPa로 얻어졌으며, 탄성계수는 각각 135 GPa, 45 GPa 및 108 GPa로 얻어졌다. 포아송비는 각각 0.11, 0.1 및 0.12로 얻어졌다.

(2) 하중변위에 대한 균열성장속도(da/du)는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 의 경우 각각 $3.07 \text{ mm/mm}, 3.23 \text{ mm/mm}$ 및 1.76 mm/mm 로 하중변위에 대한 전체 평균 균열성장속도를 나타내고 있다. 평균 균열성장속도는 $a_0/L = 0.3$ 과 $a_0/L = 0.4$ 의 경우는 유사한 속도를 나타내고 있으나, $a_0/L = 0.5$ 의 경우에 균열성장속도가 낮은 경향을 나타내고 있다.

(3) DCB 시험편을 이용한 Mode I 파괴시험의 임계 응력확대계수 K_{IC} 는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 에서 각각 $3.95 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $3.69 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 및 $3.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 얻어졌다. 초기 균열길이가 짧아질수록 K_{IC} 값은 커지는 경향을 보였다.

(4) 에너지해방율 G 는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 에서 각각 435.47 kJ/m^2 , 322.30 kJ/m^2 및 233.76 kJ/m^2 로 얻어졌다. a_0/L 가 작을수록 G 값은 커지는 것을 나타낸다.

References

- 1) W. C. Hwang, Y. M. Choi, K. H. Im, C. S. Cha, Y. J. Yang and I. Y. Yang, "A Study on Impact Collapse Modes of Composite Structural Members using Carbon Fiber Reinforced Plastics for Car Body Lightweight", J. Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 5, pp. 7-14, 2014.
- 2) J. H. Yoo, "The Influence of Volume Fraction and Fiber Orientation of CFRP Layer on Flexural Properties of Al 7075/CFRP Multi-Layered Hybrid Laminate Material", J. Korean Soc. Saf., Vol. 19, No. 4, pp. 31-35, 2004.
- 3) S. S. Kim, J. W. Kang and O. H. Kwon, "The FSI Analysis Evaluation of Strength for the Wind Turbine Rotor Blade Improved by the Aramid Fiber", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 17-23, 2015.
- 4) C. S. Hong, "Interlayer Fracture Test Method of Composite Mmaterials", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 172-179, 1990.
- 5) H. J. Moon, "Carbon Fiber Composite Material Market Trend", S&T Market Report, Vol. 38, pp. 2-18, 2016.
- 6) H. K. Yoon, Y. K. Kim, J. S. Park and K. B. Lee, "A Study on Fatigue Life of Al 7075/CFRP Multilayered Hybrid Composite Materials", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 92-102, 1996.
- 7) S. Bennati, M. Colleluori, D. Corigliano and P. S. Valvo, "An Enhanced Beam Theory Model of the Assymmetric Double Cantilever Beam Test for Composite Laminates", Composite Science and Technology, Vol. 69, pp. 1735-1745, 2009.
- 8) W. O. Soboyejo, G. Y. Lu, S. Chengalva, J. Zhang and V. Kenner, "A Modified Mixed-mode Bending Specimen for the Interfacial Fracture Testing of Dissimilar Materials", Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, Vol. 22, pp. 799-810, 1999.
- 9) O. H. Kwon, W. D. Kwon and J. W. Kang, "The Effects of the Initial Crack Length and Fiber Orientation on the Interlaminar Delamination of the CFRP/GFRP Hybrid Laminate", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 1, pp. 12-17, 2013.
- 10) M. S. Kang, M. H. Jeon, I. K. Kim and K. S. Woo, "The Study on the Characteristics of Mode I Crack for Cross-ply Carbon/Epoxy Composite Laminates Based on Stress Fields", Composites Research, Vol. 32, No. 6, pp. 327-334, 2019.
- 11) <http://www.hdfiber.co.kr/sub03/01>
- 12) <http://www.hdfiber.co.kr/sub03/02>
- 13) 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.
- 14) M. F. Kanninen, "A New Techniques for Determining Fracture Toughness K_{IC} and its Confidence with Single DCB Specimen", International Journal of Fracture, Vol. 9, pp. 83-92, 1997.
- 15) V. Mollon, J. Bonhomme, J. Vina and A. Arguells, "Mixed Mode Fracture Toughness: An Empirical Formulation for G_I/G_{II} Determination in Asymmetric DCB Specimens", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 3699-3703, 2010.