



초고분자량 폴리에틸렌/탄소섬유강화 하이브리드 복합재의 Mode II 층간 파괴인성 평가 Evaluation of Interlaminar Fracture Toughness on the Mode II of a Ultra High Molecular Weight Polyethylene and CFRP Hybrid Composites

송상민* · 권오현**† · 강지웅*** ·곽정훈*
 Sang-Min Song*, Oh-Heon Kwon**†, Ji-Woong Kang***
 and Jung-Hoon Kwak*

(Received 15 May 2019, Revision received 22 July 2019, Accepted 08 August 2019)

Abstract: It is essential for the most general means to utilize composite material in order to improve both of the strength characteristics and weight reduction of structures. Especially fiber reinforced composites are used in a wide range of area from the appearance of cars, ships, and aircraft to the structural parts by changing the fiber's weaving, stacking, and shaping according to their intended uses. However various defects can occur due to the occurrence of bubbles in the fibers and matrix, depending on the pressure and temperature conditions in the autoclave. Typically, the delamination may bring out due to interlaminar fracture in the laminated composites. Many studies on the interlaminar fracture of CFRP composite material have been carried out so far. However, there is little research on hybrid composites with UHMWPE that can compensate for the low toughness of CFRP. Therefore, in this study, the interlaminar toughness behavior of mode II fracture was evaluated for the laminated UHMWPE/CFRP hybrid composite by using 4ENF test. From the results, G_{IIc} , which represents the interlaminar fracture toughness as a critical energy release rate, was obtained as 1.56 kJ/m^2 , 1.52 kJ/m^2 and 1.40 kJ/m^2 for $a_0/L=0.3, 0.4$ and 0.5 , respectively. It shows that the energy release rate decreases as the initial crack length increases.

Key Words : UHMWPE, CFRP, Energy release rate, Fracture toughness, Hybrid composite

**† 권오현(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4026-293X>) : **† Oh-Heon Kwon(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4026-293X>)
 교수, 부경대학교 안전공학과 : Professor, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.
 E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469 E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469

*송상민(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8898-0140>) : *Sang-Min Song(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8898-0140>)
 대학원생, 부경대학교 안전공학과 : Graduate student, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.

*곽정훈(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5679-436X>) : *Jung-Hoon Kwak(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5679-436X>)
 대학원생, 부경대학교 안전공학과 : Graduate student, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.

***강지웅(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7692-4301>) : ***Ji-Woong Kang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7692-4301>)
 교수, 대구한의대학교 보건학부 : Professor, Faculty of Health Science, Daegu Haany University.

1. 서 론

복합재료는 산업현장에서 구조물 및 설비의 고강도와 경량화 구현의 수단 중 널리 사용되는 대표적인 재료이며 적용용도에 따라 섬유, 직조, 적층 및 성형방식을 달리하여 원하는 제품의 최적 성능을 발휘하게 할 수 있는 장점을 가진다. 이러한 장점으로 자동차, 선박, 항공기 등의 외형에서부터 구조 부품에까지 적용범위는 다양하다. 복합재료는 섬유와 기지재로 구성되는데 전체적인 강도는 섬유의 특성이 좌우하지만 성형조건에 따라 구현되는 강도의 폭은 달라진다.¹⁾ 소규모 부품 적용 시에는 목적에 맞게 다양한 성형방식의 적용이 가능하나 대형 부품의 경우는 주로 진공성형을 통해 조립하는 방식이 채택되어지며 오토클레이브에서 온도와 압력 조건에 따라 섬유와 기지에 기포발생 등으로 인한 다양한 결함이 발생될 수 있다. 따라서 기대되는 섬유의 강도가 구현되지 못하고 오히려 강도의 저하가 발생될 수 있다.²⁾ 따라서 제품 적용 시 오토클레이브를 이용하여 산업에서 주로 제작되고 있는 환경에 따라 성형된 재료에 대하여 선행적인 파괴거동 평가는 필수적이라 할 수 있다. 층간파괴(Interlaminar fracture)는 적층복합재에 대하여 가장 보편적으로 나타나는 파괴형태중 하나이다. 층간파괴 현상인 적층분리(delamination)에 대한 저항성을 평가하기 위한 가장 적절한 방법은 DCB(Double cantilever bending)와 ENF(End notched flexure) 시험법 등이 있다. 특히 mode II 에 대한 일반적 층간파괴시험법인 ENF 시험법은 불안정 파괴를 나타내기 때문에 ENF 시험법 이외에도 여러 가지가 제안되어 있으나 치구의 복잡함이나 시험법의 복잡성 때문에 본 연구에서는 4ENF 시험법³⁾을 사용하였다. 4ENF 시험법은 안정파괴를 하면서도 치구는 ENF 시험법처럼 간단하다. 한편, 내부 구조재로 다양하게 적용되고 있는 초고분자량 폴리에틸렌(Ultra high molecular weight polyethylene; 이하 UHMWPE)은 차세대 고분자에 속하는 가장 전망 있는 고분자 구조물 재료 중의 하나이다. UHMWPE는 물리기계적 특성이 독특하고 마찰계

수가 낮아 극한조건에서 마모저항성과 부식저항이 강할 뿐만 아니라 경제성에 있어서도 저렴하다.⁵⁾ Porras 등⁶⁾은 UHMWPE의 제작과정에 따른 적층분리현상을 파악하기 위하여 ENF시험법으로 mode II 층간분리 파괴인성을 평가하였으며, 성형압력이 높을수록 에너지 해방율이 증가함을 나타내었다. 또한 중앙면 상하 섬유가 적층분리현상에 가교역할을 일부 담당함을 보여주었다. Bogetti 등⁷⁾은 비선형 층간 전단 응력-변형을 반응을 특성화할 수 있는 방안을 제시하여 전단계면에서의 변형율은 변위의 비선형에 영향을 받음을 나타내었다. 또한 곡면 제품 적용성이 우수하고 고강도와 비강성의 대표 재료인 CFRP 복합재료의 층간파괴에 대한 연구는 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔다.⁸⁻¹¹⁾ 그러나 CFRP의 낮은 충격흡수율을 보완할 수 있는 UHMWPE와의 하이브리드 적층복합재료에 대한 연구는 거의 없다.¹²⁾ 따라서 본 연구에서는 평직 CFRP와 UHMWPE를 진공성형법을 이용하여 적층 하이브리드 복합재료로 성형한 후 mode II 층간 파괴인성을 평가하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구의 mode II 시험에 사용된 재료는 평직 탄소섬유(plain woven carbon fabric)와 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE) 섬유이며, C120-3K(한국카본(주), t:0.23 mm)와 UHMWPE(현대카본(주), t:0.23 mm)를 사용하였다. 재료 성형은 성형 Matrix로 Epovia[®] RF-1001 비닐에스테르(CCP Composites Korea(주))를 사용하여 4ENF용 파괴시험편을 오토클레이브에서 제작되었다. Table 1은 제작에 사용된 재료 각각의 물리적·기계적 특성을 나타낸다.

시험편 성형은 오토클레이브에서 성형 온도 79°C, 압력 6 kgf/cm²에서 UHMWPE/CFRP 적층이 몰드상부에 설치된 진공압 -960 mmHg인 진공 성형틀 내에서 이루어지도록 하였다. 완전 경화된 UHMWPE/CFRP 하이브리드 복합재 성형판은 다이아몬드 정밀 휠커터를 사용하여 Fig. 1과 같이

Table 1 Physical and mechanical properties of materials

Material (Product)	Density	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Woven type
UHMWPE fiber	0.93 (g/cm ³)	30 ⁽¹²⁾	1.1 ⁽¹²⁾	Plain
Carbon fiber C120-3K	Warp/Fill (count/inch ²)	[Laminate]		Plain
	12.5/13.5	569	68	
Vinylester Epovia [®] RF-1001	1.04 (g/cm ³)	31.36 ⁽²⁾	2.65 ⁽²⁾	N/A
UHMWPE/CFRP	-	283 ⁽¹²⁾	28 ⁽¹²⁾	Hybrid

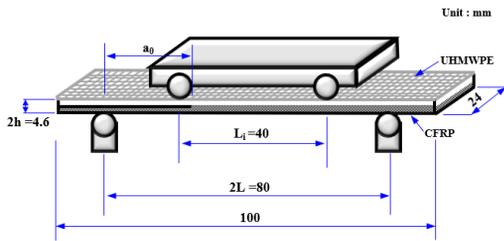


Fig. 1 Geometry of 4ENF specimen

정밀 절단 제작하였다. mode II 시험을 위한 4ENF 파괴시험편은 CFRP, UHMWPE를 각각 10 ply씩 적층하여 총 20 ply로 제작되었으며, 파괴시험을 위한 초기 노치균열은 CFRP와 UHMWPE 적층 사이에 Teflon tape를 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 만큼 삽입하여 생성하였다(a_0 : 초기균열길이, L :시험편길이). 이때 예피로균열(pre-fatigue crack)을 형성하기 위하여 $2\sim 3$ mm 정도 감소된 길이만큼 삽입하였다. 또한 절단된 시험편에 하중점 체결용 알루미늄 블록을 아랄다이트 속건성 에폭시 수지로 부착한 후, 상온에서 12시간 이상 경화작업을 수행하여 시험도중 알루미늄 블록이 탈락되는 것을 방지하였다.

2.2 Mode II 파괴시험 방법

예피로균열은 초기균열길이 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및



Fig. 2 The photograph of an experimental apparatus

0.5 에 대응하여 4ENF시험편의 Teflon tape 앞에 $2\sim 3$ mm 정도로 만능 동적시험기(H사, 50 kN)를 이용하여 삽입하였다. 주파수 2 Hz, K_{fmax} 가 0.16 MPa · m^{1/2} 범위에서 생성하였고, 소형 인장시험기 (Tinus Olsen, H5KS)에서 변위속도 0.5 mm/min로 mode II 파괴실험을 수행하였다. 균열성장길이는 이동식 현미경(Japan, N.O.W사)에 조립된 실체현미경(Kyowa, ×20)을 사용하여 육안측정하여 디지털 변환기(IT-005D, M사)로 PC 저장하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 층간파괴에 따른 하중 및 균열성장거동

a_0/L 를 0.3, 0.4 및 0.5로 변환시킨 UHMWPE/CFRP 하이브리드 4ENF시험편에 대하여 4점 굽힘시험을 수행하였다. Fig. 3은 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타내었다. 이때 하중에 대한 균열성장길이는 이동식현미경에 의해 측정된 값이다.

a_0/L 비가 0.3일 때, 하중이 가해지기 시작하여 변위 3.58 mm 지점에서 하중 1.40 kN 지점에서 초기균열 성장이 0.62 mm로 개시하였으며, 최대 하중 1.52 kN 지점까지 증가한 후 하중의 급격한 감소와 함께 균열은 성장과 정지를 반복하였다. 하중이 1.04 kN까지 감소하는 변위 4.33 mm 지점에서 균열성장 길이는 15.51 mm로 관찰되었다.

변위 4.33 mm 지점 이후부터 하중은 완만히 감소하며 하중 0.83 kN인 변위 5.44 mm 지점에서 마지막 균열성장이 관찰되었으며, 이때 관찰된 균열성장 길이는 24.57 mm이다. a_0/L 비가 0.4인 경우, 하중 1.24 kN, 변위 3.08 mm 지점에서 초기균열성장이 0.48 mm로 확인되었고, 이후 균열은 성장과 정지를 반복하여 하중 0.94 kN까지 감소하는 변위 4.31 mm 지점에서 균열성장 길이는 15.04 mm로 관찰되었다. 변위 4.31 mm 지점 이후부터 하중의 큰 변화없이 유지되다가 0.87 kN인 변위 5.40 mm 지점에서 균열성장 길이 22.72 mm가 측정되었다. a_0/L 비가 0.5인 경우에도 유사하게 나타났다. 하중 1.10 kN, 변위 2.88 mm 지점에서 초기 균열성장이 0.37 mm로 관찰되었고, 성장과 정지를 반복한 균열은 하중 0.61 kN 및 변위 5.33 mm 지점에서 20.55 mm의 최종 균열성장하였다. 얻어진 결과는 a_0/L 비가 낮을수록 초기균열 성장 시기는 늦은 반면에 균열길이는 더 크게 나타났다. 또한 a_0/L 비가 낮을수록 층간분리가 발생되기 위해서는 더 큰 하중이 필요하다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 CFRP적층부와 UHMWPE적층부의 균열진전형태를 나타낸다. CFRP적층부와 UHMWPE

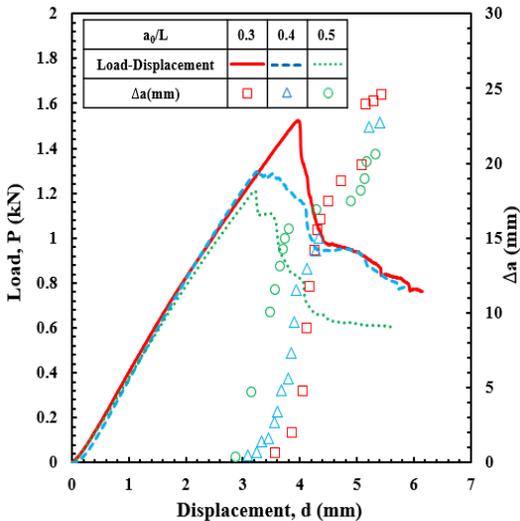


Fig. 3 The relationships of the load-displacement and crack extension length variation of 4ENF specimen under mode II

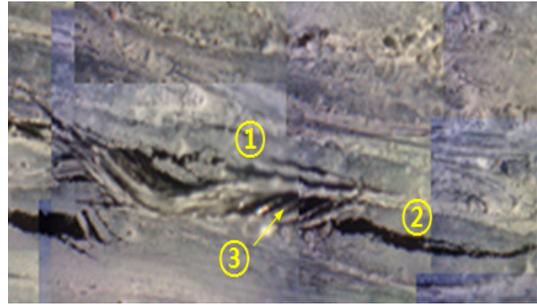


Fig. 4 The micrograph pattern of the crack extension with an interlaminar delamination (①→②→③)

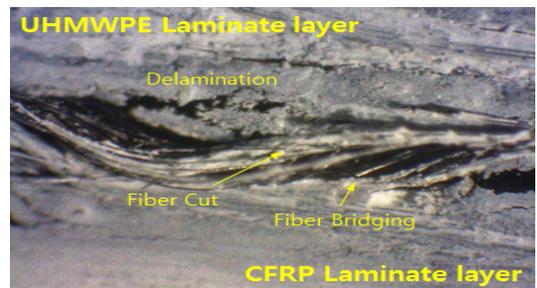


Fig. 5 The fracture surface of the interface during the crack extension

적층부의 계면을 따라 균열이 진전하다가 정지한 후 다시 CFRP 층에서 균열이 개시되어 계면 쪽으로 진전 성장하는 형태를 나타내었다.

Fig. 5는 CFRP적층과 UHMWPE적층계면 사이에서 균열이 진전하면서 CFRP 적층부와 UHMWPE 적층부에서 섬유소 가닥이 빠져나오면서 CFRP와 UHMWPE사이에 bridging 현상을 일으키고 일부는 파단되는 형태를 나타내고 있다. UHMWPE 적층부의 계면을 지나 내부로 진전 성장된 균열로 인한 계면분리로 일부 UHMWPE 층이 파손되는 것이 나타났다. UHMWPE bridging 현상은 하중의 증가 감소현상을 나타내는 것으로 설명할 수 있다.

3.2 층간파괴저항평가

UHMWPE/CFRP 하이브리드 4ENF시험편에 대하여 4점 굽힘시험에서 얻어지는 mode II에 대한 컴플라이언스는 다음 식 (1)에 의해 구해진다.¹³⁾

$$C = \frac{(2L - L_i)^2(5L_i - 4L + 9a)}{32E_1bh^3} + \frac{3(2L - L_i)}{10\mu_{13}bh} \quad (1)$$

여기서 L 은 하부지지점 간격의 1/2, L_i 는 상부 지지점간격, a 는 균열길이, E_1 은 탄성계수, W 는 시험편 폭, h 는 시험편 높이의 1/2, μ_{13} 은 전단 탄성계수를 나타낸다. 4ENF 시험편의 컴플라이언스 식 (1)을 이용하여 굽힘 컴플라이언스(flexural compliance)를 정의하면 식 (2)와 같다.

$$C_f = \frac{(2L - L_i)^2(5L_i - 4L + 9a)}{32E_1bh^3} \quad (2)$$

식 (2)에서 초기값을 이용하여 굽힘 탄성계수 (flexural modulus)를 계산하면

$$E_1 = \frac{(2L - L_i)^2(5L_i - 4L + 9a)}{32bh^3C_{f0}} \quad (3)$$

결과적으로 mode II 임계 에너지해방률은 식 (4)로 얻어진다.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(2L - L_i)^2}{64b^2E_1h^3} \quad (4)$$

Fig. 6은 균열길이가 성장하는 지점에서 이동식 현미경을 통해 측정된 균열성장길이에 대한 G_{II} 의 파괴저항곡선 변화를 나타낸다. G_{IIc} 는 임계 층간 에너지해방률을 나타내며 $a_0/L = 0.3$ 에서 2.17 kJ/m^2 , $a_0/L = 0.4$ 에서는 1.71 kJ/m^2 , $a_0/L = 0.5$ 에서 1.37 kJ/m^2 로 각각 얻어졌다. 초기균열길이가 성장함에 따라 임계 에너지해방률은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 모든 경우에 있어서 균열이 진전함에 따라 에너지해방률에 의한 파괴저항치는 전체적으로 급속히 감소하는 경향을 나타냈다. 얻어진 임계 해방률 값은 Kwak¹⁴⁾의 결과에 의한 평직 CFRP mode II 에너지해방률값 $0.96\sim 1.49 \text{ kJ/m}^2$ 보다 상승된 결과를 나타내어 UHMWPE/CFRP 하이브리드 복합재의 파괴인성치가 증가하였음을 추

정할 수 있다.

Fig. 7은 균열길이 성장에 따른 굽힘탄성계수의 변화에 대한 상관관계를 나타낸다. E_{1f} 는 식 (3)을 이용하여 얻을 수 있으며, $a_0/L = 0.3$ 에서 261 GPa , $a_0/L = 0.4$ 에서는 257 GPa , $a_0/L = 0.5$ 에서 255 GPa 로 각각 얻어졌으며, 선형적으로 증가하는 형태로 나타났다.

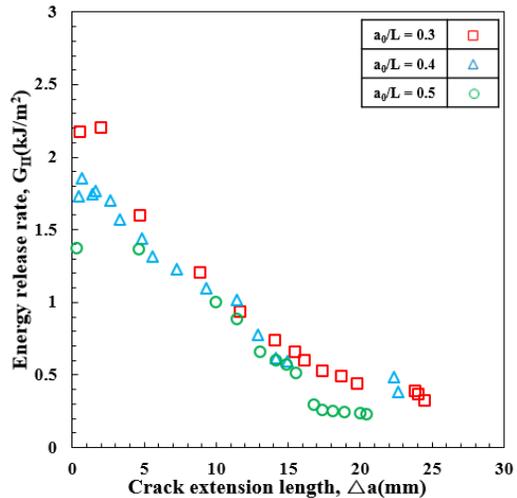


Fig. 6 The fracture resistance curve of the mode II energy release rate to the crack extension length

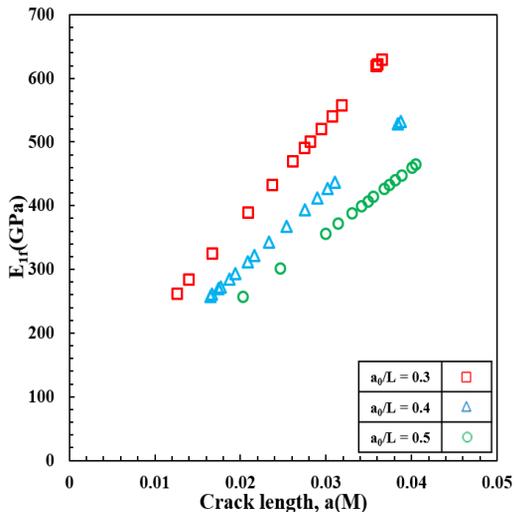


Fig. 7 The relationships of flexural modulus and the crack length under mode II

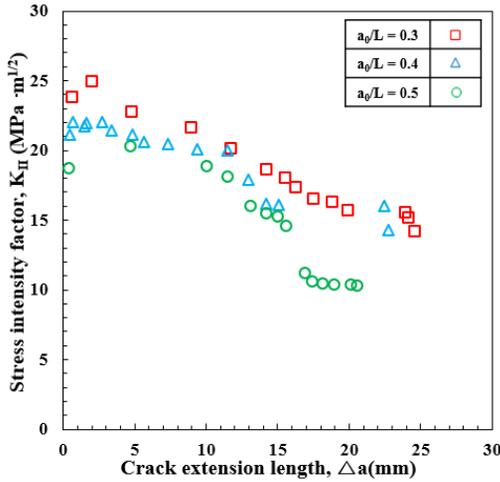


Fig. 8 The interlaminar fracture toughness resistance curves of KII with a variation in crack extension length

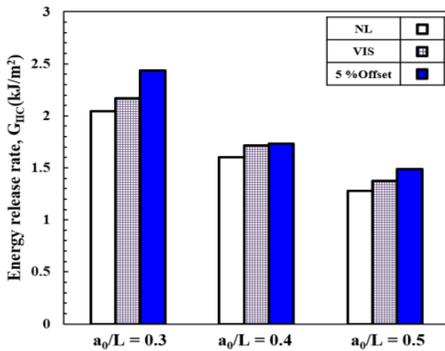


Fig. 9 The fracture resistance difference of the mode II energy release rate to the starter crack extension length measure

Fig. 8은 응력확대계수에 대한 mode II 파괴저항곡선을 나타낸다. 사용된 응력확대계수 K는 응력확대계수와 에너지해방률의 관계인 다음 간편식 (5)를 이용하였다.

$$K_{II} = \sqrt{G E'} \quad (5)$$

식 (5)에서 K는 파괴인성치, $E' = E/(1-\nu^2)$ 로써 E, ν 는 각각 탄성계수와 포와송비이다. CFRP/UHMWPE 하이브리드의 경우 굽힘탄성계수를 이

용하여 식 (3)의 값을 이용하여 기 논문에서 구한 $E = 28 \text{ GPa}$ 및 $\nu = 0.1$ 을 적용하였다.

이때 얻어진 층간파괴인성치 K_{IIc} 는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 에서 각각 $23.83 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}, 21.13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 및 $18.76 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 이다.

지해방률의 관계인 다음 간편식 (5)를 이용하였다.

$$K_{II} = \sqrt{G E'} \quad (5)$$

식 (5)에서 K는 파괴인성치, $E' = E/(1-\nu^2)$ 로서 E, ν 는 각각 탄성계수와 포와송비이다. CFRP/UHMWPE 하이브리드의 경우 굽힘탄성계수를 이용하여 식 (3)의 값을 이용하여 기 논문에서 구한 $E = 28 \text{ GPa}$ 및 $\nu = 0.1$ 을 적용하였다. 이때 얻어진 층간파괴인성치 K_{IIc} 는 $a_0/L = 0.3, 0.4$ 및 0.5 에서 각각 $23.83 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}, 21.13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 및 $18.76 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 이다.

Fig. 9는 균열측정방법에 따른 파괴인성치의 변화에 대한 상관관계를 나타낸다. $a_0/L = 0.3, 0.4, 0.5$ 변화에 따른 측정방법으로 NL, VIS, 5% offset을 이용한 각각의 결과값 측정 결과를 나타내고 있다. 균열길이에 상관없이 NL로 측정된 방법보다 VIS가 조금 더 큰 경향을 나타내고 있으며, 5% offset의 경우에도 조금 더 큰 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 UHMWPE/CFRP 하이브리드 복합재의 mode II 층간 파괴인성을 얻기 위하여 4ENF 시험편을 이용한 4점 굽힘 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 변위-하중 그래프에서 a/L비가 클수록 기울기가 낮게 나타나 a/L비에 따라 강도의 차이가 발생함을 알 수 있다.

2) $a_0/L = 0.3$ 일 때, 하중 1.40 kN 지점까지 증가한 후 0.62 mm의 초기 균열이 성장을 개시하였으며, a_0/L 비가 낮을수록 초기균열 성장 시기는 늦고, 성장 길이는 크게 나타났다. 또한 층간분리가 발생되기 위해서는 a_0/L 비가 낮을수록 더 큰 하중이 필요하였다.

3) Mode II 층간 파괴인성치로서의 임계 에너지 해방률 G_{IIc} 는 $a_0/L=0.3$ 에서 1.56 kJ/m^2 , $a_0/L=0.4$ 에서는 1.52 kJ/m^2 , $a_0/L=0.5$ 에서 1.40 kJ/m^2 로 각각 얻어졌다. 균열의 성장길이가 증가하면 에너지 해방율은 점차 감소하는 것으로 나타났다.

4) CFRP적층부와 UHMWPE 적층부의 계면을 따라 균열이 진전하다가 정지한 후 다시 CFRP 층에서 균열이 개시되어 계면 쪽으로 진전 성장하였으며, CFRP 적층부와 UHMWPE 적층부에서 섬유소 가닥이 빠져나오면서 bridging 현상을 일으키고 있음을 관찰하였다.

Author contributions

O. H. Kwon; Conceptualization, Project administration, Writing-review & editing. S. M. Song; Investigation, Data curation, Writing-original draft. J. W. Kang; Writing-review & editing. J. H. Kwak; Investigation.

References

1. K. K. Chawla, 1998, Composite materials, Springer, New York.
2. O. H. Kwon, Y. Y. Yun and Y. R. Ryu, 2014, "Mechanical Behaviors of CFRP Laminate Composites Reinforced with Aluminum Oxide Powder", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 166-173. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.6.166)
3. Standard Test Method for, "Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites", 2000, ASTM D 5528-01, Annual Book of Standards.
4. R. H. Martin and B. D. Davidson, 1999, "Mode II fracture toughness evaluation using a four point bend end notched flexure test", Plastics, Rubber composite, Vol. 28, No. 8, pp. 401-406.
5. G. E. Selyutin, Y. Y. Gavrillov, E. N. Voskresenskaya, V. A. Zakharov, V. E. Nikitin and V. A. Poluboyarov, 2010, "Composite materials based on ultra high molecular polyethylene: properties, application prospects", Chemistry for Sustainable Development, Vol. 18, pp. 201-314.
6. A. Porras, J. Tellez and J. P. Casas-Rodriguez, 2012, "Delamination toughness of ultra high molecular weight polyethylene composites", EPJ Web of Conference, Vol. 26, pp. 02016. (DOI:10.1051/epjconf/20122602016)
7. T. A. Bogetti, M. Walter, J. Staniszewski and J. Cline, 2017, "Interlaminar shear characterization of ultra high molecular weight polyethylene composite laminates", Composites: Part A, Vol. 98, pp. 105-115. (DOI:10.1016/j.compositesa.2017.03.018)
8. Y. Tomita and K. Morioka, 1997, "Effect of Lay-up Sequence on Mechanical Properties and Fracture Behavior of Advanced CFRP Laminate Composite", Material Science and Engineering, A 234-236, pp. 778-781. (DOI:10.1016/S0921-5093(97)00411-5)
9. J. H. Kwak, J. W. Kang and O. H. Kwon, 2013, "The experimental evaluation of the mixed mode delamination in woven CFRP/GFRP laminates under MMB test", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 4, pp. 14-18. (DOI:10.14346/JKOSOS.2013.28.4.014)
10. S. H. Kim, Y. S. Yun, J. W. Kang and O. H. Kwon, 2017, "The influence of CNTs and lamination structure on the intralaminar fracture of CFRP/GFRP composites", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 6, pp. 9-15. (DOI:10.14346/JKOSOS.2017.32.6.9)
11. M. J. Mathews and S. R. Swanson, 2007, "Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon epoxy composite", Composites Structure and

- Technology, Vol. 67, pp.1489-1498.
12. S. M. Song, O. H. Kwon and J. W. Kang, 2019, "Initial crack length effect for the interlaminar mode I energy release rate on a laminated UHMWPE/CFRP hybrid composite", Submitted to KOSOS.
 13. A. B. de Morais and A. B. Pereira, 2007, "Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates", Composites: Part A, Vol. 38, pp. 785-794. (DOI:10.1016/j.compositesa.2006.09.001)
 14. J. H. Kwak, 2017, "A Study on the mode II interlaminar fracture and AE characteristics of plain woven CFRP composites", Master thesis, Pukyong National University.