

하이브리드 능직 탄소-아라미드 섬유 복합재의 모드 I 파괴인성에 대한 실험적 연구

권우덕* · 권오현**†

Experimental Investigations of Mode I Fracture Toughness of a Hybrid Twill Woven Carbon and Aramid Fabric Composite

Woo Deok Kwon* · Oh Heon Kwon**†

†Corresponding Author

Oh Heon Kwon
Tel : +82-51-629-6469
E-mail : kwon@pknu.ac.kr

Received : August 12, 2019
Revised : September 16, 2019
Accepted : October 11, 2019

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Carbon fiber has excellent specific strength, corrosion resistance and heat resistance. And p-Aramid fiber has high toughness and heat resistance and high elasticity, and is used in various fields such as industrial protective materials, bulletproof helmets and vests, as well as industrial fields. However, carbon fiber is relatively expensive, and is susceptible to brittle fracture behavior due to its low fracture strain. On the other hand, the aramid fiber tends to decrease in elastic modulus and strength when applied to the epoxy matrix, but it is inexpensive and has higher elongation and fracture toughness than carbon fiber. Thus the twill hybrid carbon-aramid fiber reinforced composite laminate composite was investigated for a delamination fracture toughness under Mode I loading by 2 kinds of MBT and MCC deduction. The specimen was fabricated with 20 hybrid fabric plies. The initial crack was made by inserting the teflon tape in the center plane with $a_0/W=0.5$ length. The results show that SERR(Strain Energy Release Rate) as the critical and stable delamination fracture toughness were 0.09 kJ/m^2 , 0.386 kJ/m^2 by MBT deduction, and 0.192 kJ/m^2 , 0.67 kJ/m^2 by MCC deduction, respectively.

Key Words : Carbon-aramid, fracture toughness, hybrid composite, mode I, MBT, MCC

1. 서론

지난 수 십년간 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등의 2종류 이상의 섬유를 사용하여 제작되는 하이브리드 복합재료가 광범위한 산업분야의 구조물 설비에 적용되고 있다. 탄소섬유는 비강도, 비강성, 내식성, 내열성 등이 우수하여 풍력발전기의 블레이드, 우주왕복선의 날개, 항공기의 브레이크, 저온저장탱크 등에 핵심전략부품으로 적용되고 있으며, 그 중에서 능직구조는 씨실과 날실이 두 개 혹은 그 이상의 섬유를 교차하여 직조되기 때문에 수지의 함침성이 평직에 비하여 우수하여 강화재 섬유 변형이 작고 표면이 원활할 뿐만 아니라 기계적 가공 또한 용이하지만 구조적으로 안정성은 떨어진다¹⁾. 탄소섬유는 비교적 고가이며, 충

격에 약하고 낮은 파손 변형을 때문에 취성 파괴거동을 한다²⁾. 파라아라미드(p-Aramid)섬유는 강인성 및 내열성, 고탄성율을 가지고 산업용 보호소재, 방탄헬멧 및 조끼 등 산업현장 뿐만 아니라 군사용 등 여러 분야에서 사용되고 있다³⁻⁶⁾. 이러한 아라미드섬유는 기지재로 수지 적용시 탄성을 및 강도가 저하하는 경향이 있으나 탄소섬유에 비하여 저가이고 신장율과 파괴인성이 더 높아서 각 섬유의 단점을 보완하기 위하여 하이브리드 탄소-아라미드섬유강화복합 적층재료로 제작하여 많이 사용하고 있다⁷⁾. 섬유 강화 적층재료는 적층시 적층방법, 순서, 플라이 방향에 따라, 재료의 손상, 외부충격, 결함 등에 문제점이 발생하면 적층층 사이의 적층분리와 같은 파손이 재료의 급작 파괴를 발생시켜 구조물 및 기계설비에 심각한 안전성을 초래하게

*부경대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

**부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

된다⁹⁾. 적층분리 현상에 관한 평가는 지금까지 많은 연구가 진행되어져 오고 있으나 직접 하이브리드 직조된 탄소-아라미드 섬유복합재료의 적층분리에 의한 파괴인성평가에 대한 연구는 매우 미비하다⁹⁻¹¹⁾. 적층분리 파괴인성평가는 균열선단에서 균열이 받을 수 있는 하중의 형태에 따라서 개구형의 Mode I과 전단형의 Mode II 및 혼합모드에서 수행된다¹²⁾. 평가파라미터는 변형을 에너지 해방율(Strain Energy Release Rate: SERR)을 사용한다. 본 연구에 적용된 Mode I 하중을 받는 경우에는 DCB(Double-Cantilever Beam; DCB) 시험편을 이용하며, ASTM D 5528-1¹³⁾에서 제시한 시험편 제작 및 실험방법 등을 적용하였다. ASTM D 5528에서 제시한 SERR 평가방법은 수정 보 이론 (Modified Beam Theory; MBT), 컴플라이언스법 (Compliance Calibration Method; CC), 수정 컴플라이언스법 (Modified Compliance Calibration Method; MCC)방법 등이 있다. O'Brien 등¹⁴⁾은 MBT법을 이용하여 Mode I 적층분리에 대한 파괴인성치 평가를 다양한 실험에 의하여 그 유효성을 제시하였다. 또한 Moaris¹⁵⁾는 MCC법을 이용하여 Mode I 파괴인성치를 평가하였다. 이외에도 많은 연구자가 각각의 평가식을 이용하여 결과를 도출함에 따라 평가식의 선정이 복합재료의 적층분리 파괴인성치에 영향을 미치고 있는 실정이다. Kim 등¹⁶⁾은 평직의 탄소섬유와 케블라섬유에 의한 하이브리드복합재료에 대하여 MBT식을 이용하여 약 696 J/m²의 Mode I 에너지해방율을 구하였다.

본 연구에서는 능직형태의 탄소섬유-아라미드 하이브리드 직물(이후 CF/Aramid)을 이용하여 적층 복합재료로 제작한 후 DCB시험편을 사용하여 Mode I 시험을 수행하고 MBT, MCC 평가식을 적용하여 변형을 에너지해방율(SERR) 파괴인성치를 비교 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험재료 및 시험편

사용된 재료는 탄소섬유(CF)와 아라미드섬유를 2×2 능직으로 직조한 섬유 원단(Fabric)과 기지재료로 비닐 에스테르 수지(Vinylester epoxy)를 사용하였다. CF/Aramid 원단의 두께는 0.22±0.05 mm이고, 경사방향(Warp) CF, 위사방향(Weft) Para-Aramid이며 각각 Toray 및 Kolon에서 생산되었다. 비닐에스테 수지는 CCP Composites Korea(주)에서 생산되는 Epovia[®] RF-1001 제품을 사용하였다. Table 1은 제작에 사용된 각각의 재료에 대한 물리적 특성이다. 능직 하이브리드 섬유원단은 아라미드 섬유전용 절단가위를 사용하여 160 mm×250 mm

Table 1. Physical properties of materials

Material (Product)	Thread (count/mm)	Weight (g/m ²)	Tensile strength (GPa)	Woven type
P-Aramid (HF300-1420)	Weft 55	200	3.6	2×2 Twill
Carbon fiber (T300B-3K)	Warp 55		3.53	
Vinyl ester Epovia [®] RF-1001	N/A	1.04 (g/cm ³)	0.031 ¹³⁾	N/A

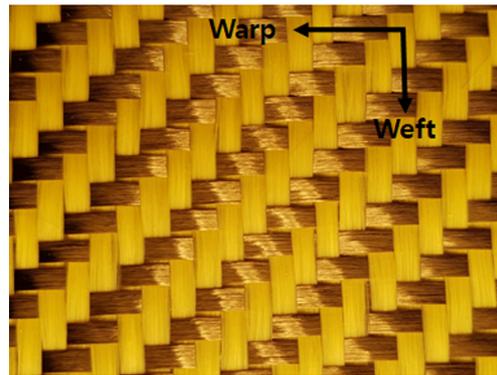


Fig. 1. Image of CF/Aramid fabric indicating the yarn position in 2x2 twill woven sheet.

크기로 절단하여 인장시험편용은 4 ply, DCB시험편용은 20 ply를 적층하였다. 성형방법은 몰드(mold)에 적층된 하이브리드 CF/Aramid 섬유원단을 정렬하고 비닐에스테르 수지를 주입하여 온도 약 79°C, 압력 약 0.588 MPa의 조건에서 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. Fig. 1에 CF/Aramid fabric의 조직을 나타낸다.

완전 경화된 CF/Aramid 하이브리드 복합재 적층판은 기계적 물성치를 평가하기 위하여 ASTM D 3039M-08¹⁷⁾ 규격을 참고하여 인장시험편으로 제작하였다. 인장시험편은 총 4 ply 적층하였으며(두께 0.9 mm), 고속정밀 절단기를 사용하여 140 mm×14 mm 크기로 절단하였다. 인장시험편의 양쪽 끝부분에 에폭시 수지인 아랄다이트 접착제(Araldite rapid)를 사용하여 자체 제작된 슬립방지용 홈을 가진 알루미늄 탭을 부착하였다. 인장시험편의 규격은 Fig. 2(a)에 나타내었다. Mode I 시험을 위한 DCB시험편은 Fig. 2(b)와 같이 CF/Aramid 하이브리드를 총 20 ply로 적층하였다. Mode I 시험에서의 초기 노치균열(a₀)은 시험편 성형전에 10 ply와 11 ply 사이에 teflon tape를 삽입하여 형성하였으며, a₀/L=0.5(L: 시험편 길이)가 되게 제작하였다. 시험편의 최종 성형두께는 4.73 mm이며, 성형된 CF/Aramid 하이브리드 복합재료는 고속 정밀절단기로 120 mm×24 mm의 크기로 절단하였다. 균열 진전 길이를 측정하기 위하여 절단된 시험편 측면 부위를 사포를 사용하여

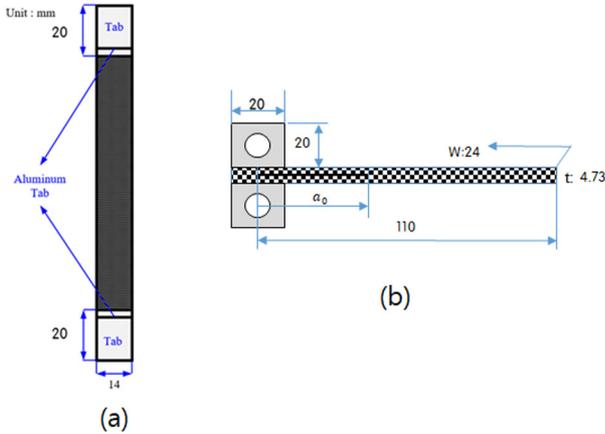


Fig. 2. Geometry of the (a)tensile, (b)DCB specimen.

가공하여 화이트 보드마카로 도색하였다. 또한 Mode I 시험용 하중 전달 알루미늄 블록을 아랄다이트 수지접착제를 사용하여 시험편에 부착하였으며 블록의 탈락을 방지하기 위하여 바이스에 고정시킨 후 상온에서 12시간 이상 경화작업을 수행하였다.

2.2 인장 및 파괴시험법

제작된 CF/Aramid 하이브리드 복합재료의 극한강도, 탄성계수 및 포아송비를 측정하기 위하여 인장시험편 중심부에 2축 전기저항 스트레인게이지를 부착하였다. 이때 얻어진 신호는 변형률 해석프로그램(Strain Smart)을 통하여 측정하였다. 인장시험 및 Mode I 파괴시험은 동일한 탁상용 중형 UTM(Tinus Olsen, H50KS)을 이용하였으며 변위제어 방식으로 인장시험은 0.1 mm/min로 Mode I 파괴시험은 0.5 mm/min로 수행하였다. 파괴 시험동안 적층분리 균열성장 길이는 실체 현미경 렌즈(x20)와 이동식 현미경의 x-y 테이블을 조립한 시스템을 이용하여 측정하였다. 육안으로 관측과 동시에 균열 성장을 동영상으로 촬영하였으며 실험 중

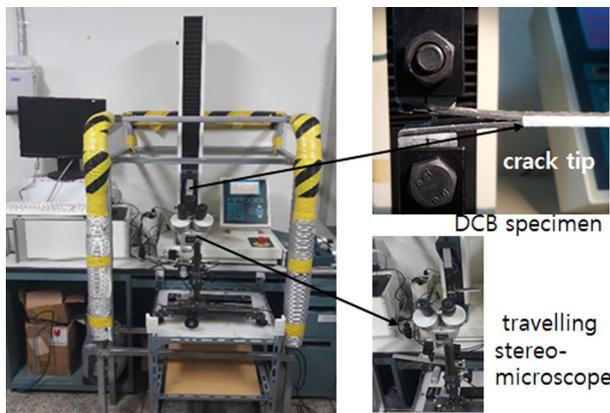


Fig. 3. A photo of experimental apparatus under Mode I.

료 후 촬영된 영상을 확인하여 육안 측정과의 오차를 보정하였다. 또한 측정 현미경을 이용한 균열 관측 시 진동을 최소화하기 위하여 현미경 받침대 아래에 진동 흡수 패드를 설치하고, 충격 등에 노출되지 않도록 하기 위해 실험장비 주변에 보호대를 설치하였다. 이동식 실체 현미경에서 육안으로 측정된 균열길이는 디지털 변환기(IT-005D, Japan)를 이용하여 엑셀데이터로 저장되었다. Fig. 3은 시험장치의 사진을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험

인장시험은 Fig. 2에 나타낸 CF/Aramid 하이브리드 복합재 인장시험편을 사용하여 수행하였다. Fig. 4에는 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타낸다.

Table 2에는 Fig. 4에서 얻어진 기계적 물성치를 나타낸다. 인장강도의 경우에는 시험편이 파단되는 지점에서의 응력값 549 MPa로 주어졌으나 파단 시점 이전에 시험편에 부착한 2축 스트레인 게이지의 종방향 변형률은 0.016이후부터는 더 이상 측정이 불가능하였다. 횡방향 변형률은 파단시점까지 측정이 이루어졌으며, 포아송비는 0.032로 계산되었다. 또한 탄성계수는 선형 변화하는 응력-변형률 곡선의 기울기를 이용하여 구하였으며 23.4 GPa를 얻었다. 인장강도값의 경우는 기대치에 비하여 비교적 낮은 값을 얻었으나 Hossain 등¹⁸⁾의 결과에서도 유사한 낮은 인장강도값이 얻어져, 본 실험에서의 결과는 타당하다고 여겨진다.

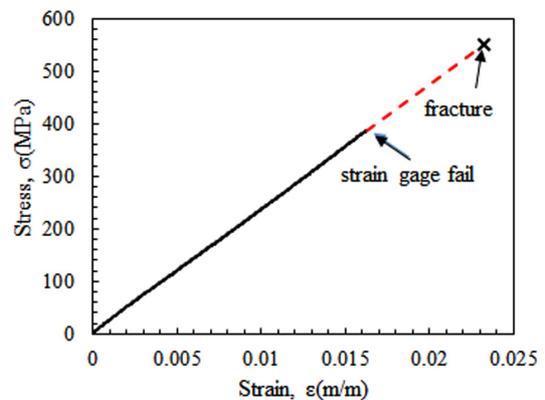


Fig. 4. The stress and strain curve for CF/Aramid hybrid composite by a tensile test.

Table 2. Mechanical properties of CF/Aramid hybrid composite

Material	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio (ν)
CF/Aramid	549	23.4	0.032

3.2 Mode I 층간파괴 시험

Fig. 5는 DCB시험편을 이용한 Mode I 파괴시험에서 얻어진 하중-변위와 균열진전량을 나타내었다. 시험은 총 3회(A, B, C) 수행하였으며, 최대하중에 도달하기 전까지는 거의 유사한 거동을 나타내다가 최대하중 이후에 하중 감소속도가 약간 차이가 발생되었고, 적층 분리 균열성장 길이(현미경 관찰에 의한 값으로 VIS로 표현)도 약간의 편차는 보이지만 전반적으로 거의 동일한 성장을 하였다. 균열의 초기 성장 개시길이는 A, B, C 시험편이 각각 최대하중에 도달하기 전인 23.5 N, 28.65 N, 25.186 N에서 0.11 mm, 0.85 mm 및 0.62 mm가 측정되었다. Fig. 5에서 a_i^A, a_i^B, a_i^C 는 각각의 균열 발생개시 지점이다. 하중은 실험 종료 시까지 감소 후 일정변위 또는 약간의 하중증가를 나타내면서 전반적으로 하강 반복하였다. 균열은 진전개시 후 최대하중 근방까지 거의 선형적으로 증가하다가 최대하중 이후에는 성장속도가 증가하였다.

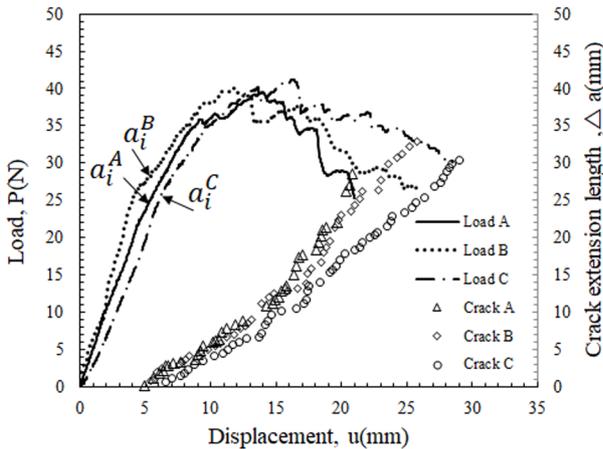


Fig. 5. The relationships of the load and displacement with the crack extension length under mode I loading.

3.3 Mode I 파괴인성평가

DCB의 Mode I 변형을 에너지 해방율 G 는 ASTM D5528-94a¹²⁾에서 제시한 Modified Beam theory(MBT)와 Modified Compliance Calibration(MCC)로 평가하였다. 각각의 평가식은 다음과 같다. 식(1)은 MBT 평가식이며 식(3)은 MCC평가식이다. 식(1)과 식(3)에서 얻어진 결과는 Fig. 5에서 얻어진 시험편 A, B, C의 결과에 의한 평균값을 수행한 평가치이다.

$$G_I = \frac{3Pu}{2b(a+\Delta)} F \quad (1)$$

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{u}{a}\right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{uc}{a^2}\right) \quad (2)$$

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2mbh} \quad (3)$$

여기서 P, u, b, a 및 h 는 각각 하중, 변위, 시험편폭, 균열길이 및 시험편 두께이고, F, Δ 는 수정계수이다. c 는 시험편 두께 1/4에서 블록 중심까지의 거리이다. Δ 는 MBT에서 컴플라이언스 C 의 1/3승과 균열길이 a 와의 관계에 대하여 최소자승법으로 얻어진 기울기가 균열길이 a 축을 지나가는 절편의 크기를 구하여 얻어진다. 절편의 크기는 시험편의 보 이론에 따른 완전 내장 상태가 아니고 적층 박리되는 균열단 부분이 시험동안에 회전하기 때문에 균열성장 길이를 증가시켜 보정하는 것이다. 컴플라이언스 C 는 하중점에서의 변위와 하중의 비 u/P 이다. Fig. 6에는 MBT평가식을 위하여 시험편 A, B, C의 평균에 의한 $\Delta=46.98$ mm 수정계수의 값을 나타내었다.

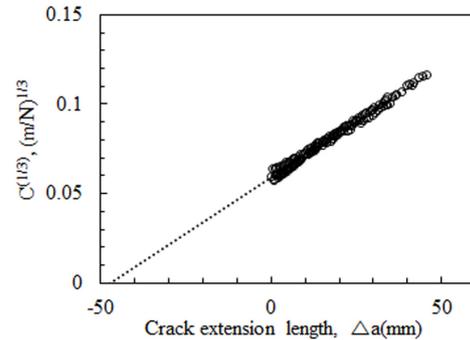


Fig. 6. Compliance calibration for the crack length of MBT.

또한 MCC법에서 m 은 시험편 두께로 균열길이를 정규화시켜 얻어진 값을 C 의 1/3승과 최소자승법으로 얻어진 기울기를 의미하며 Fig. 7에서와 같이 다음 식(4)에 의해 주어진다.

$$a/h = m C^{1/3} + \alpha \quad (4)$$

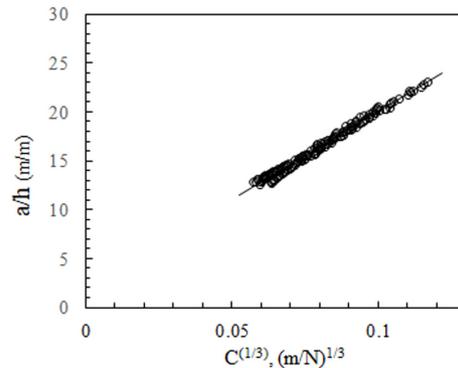


Fig. 7. Compliance calibration for the crack length of MCC.

Fig. 7에서 $m=180.34$, $\alpha=1.989$ 를 얻어 식(2)에 적용한다. 주어진 식(1), (3) 및 Fig. 6~7의 결과를 이용하여 다음과 같은 변형률 에너지 해방율을 얻었다. Fig. 8은 MBT 평가식과 MCC 평가식에 의한 결과를 비교한 것이다. 전체적으로 균열성장길이에 따른 변화는 큰 차이를 나타내지 않지만 약 4~12% 정도의 차이로 MCC 평가법이 더 크게 얻어졌다. VIS에 의한 파괴인성치 G_{IC} 는 MBT 및 MCC에서 각각 0.1849 kJ/m^2 , 0.1916 kJ/m^2 의 값을 얻어 MCC 평가법이 MBT 평가법보다 3.6% 높게 평가되었다.

초기균열 개시이후부터 균열성장 길이가 약 10 mm 구간까지는 변형률 에너지 해방율 G 값은 비교적 선형적으로 증가를 하면서 MBT법과 MCC법 평가 사이에 큰 차이를 나타내지 않지만 이후부터는 균열 성장에 따라 점진적으로 감소하다가 다시 약간 상승, 감소하는 비교적 안정적인 파괴저항치 G_R 가 MBT의 경우에 0.55 kJ/m^2 , MCC경우에 0.65 kJ/m^2 로 얻어졌다. 이 차이는 MCC평가법에서 Mode I 시험편의 대 변위가 발생하는 것을 반영하지 못한 결과로 여겨지며 변위의 영향을 고려한 수정계수를 포함하는 MCC평가는 향후의 연구에 반영할 계획이다. 또한 파괴인성치를 평가하기 위하여서는 Fig. 8에서 사용한 것과 같이 현미경 관찰에 의하여 측정된 균열개시점에 대하여 평가한 결과(VIS: Visual)와 함께 하중-변위곡선에서 비선형 거동을 시작하는 시점(NL)과 초기 선형구간의 기울기의 5% 시킨트를 이용한 평가(5%Max)법을 ASTM D5528에서 제시하고 있다.

따라서 3가지 적층분리 개시 균열에 대한 임계 에너

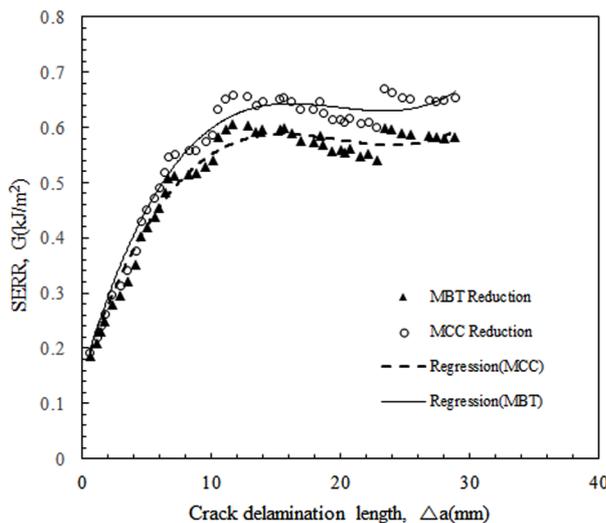


Fig. 8. The variation of Mode I strain energy release rate curves comparing with MCC and MBT reduction.

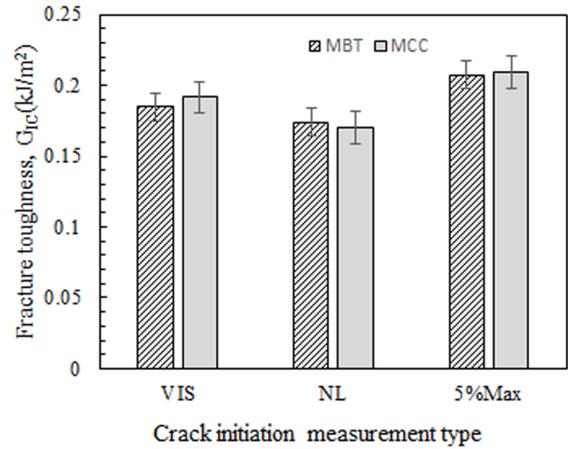


Fig. 9. The comparison of the fracture toughness according to the crack initiation measurement with MCC and MBT reduction.

지해방율에 의거하여 초기 파괴인성치를 비교 평가하여 Fig. 9에 나타내었다. VIS 측정에 의한 결과는 NL에 의한 결과보다 크지만 5%Max 측정방법에 의한 결과 보다는 낮게 평가되었다. 이러한 경향은 MBT와 MCC에 의한 평가법에서 동일하게 나타났다. 현재 도출된 능직 CF/Aramid 하이브리드 복합재료의 임계파괴인성치평가에 대하여 MBT 평가법에 의한 결과를 적용하는 것이 안전측 설계면에서 유리할 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 연구에서는 능직 CF/Aramid 하이브리드 복합재의 적층분리저항곡선을 얻기 위하여 인장시험 및 Mode I 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험에서 탄성계수는 23.4 GPa , 인장강도는 539 MPa 를 얻었다.

(2) 균열의 초기 성장 개시는 최대하중에 도달하기 전에 측정되었으며, 각 시험편에서 0.11 mm ~ 0.85 mm 가 관찰되었다.

(3) MBT의 수정계수는 46.98 mm , MCC의 수정계수는 180.34 로 얻어졌다.

(4) MBT 및 MCC 평가식에 의한 결과는 균열성장길이에 따른 2가지 평가치 변화가 약 4~12% 정도의 차이로 MCC평가법이 더 크게 얻어졌으며, 파괴인성치 G_{IC} 는 MBT 및 MCC에서 각각 0.1849 kJ/m^2 , 0.1916 kJ/m^2 의 값을 얻어 MCC 평가법이 MBT 평가법보다 높게 평가되었다. 얻어진 결과는 CF/Aramid 하이브리드 복합재료로 구성된 기계설비에 대한 안전측 설계에 유용하게 활용될 것으로 여겨진다.

References

- 1) Y. R. Ryu, Y. S. Yun and O. H. Kwon, "AE Application for Fracture Behavior of SiC Reinforced CFRP Composites", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 3, pp. 16-21, 2016.
- 2) H. Rahmani, S. H. Mahmoudi and A. Ashori, "Mechanical Performance of Epoxy/Carbon Fiber Laminated Composites", *Journal of Reinforced Plastic Composites*, Vol. 33, pp. 733-740, 2014.
- 3) J. W. S. Hearle, "High-Performance Fibers", Woodhead Pub. Ltd., New York, pp. 23-58, 2001.
- 4) L. Nicolais, M. Meo and E. Milella, "Composite Materials, A Vision for the Future", Springer, London, 2011.
- 5) F. Larsson and L. Svensson, "Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fiber Composite for Structural Lightweight Armour", *Composite Part A*, Vol. 33, No.2, pp. 221-231, 2002.
- 6) J. H. Kwak, Y. S. Yun and O. H. Kwon, "The Experimental Analysis of the PVC Foam Cored CFRP Sandwich Composite for the Mixed Mode Delamination Characteristics", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 33, No. 2, pp. 8-13, 2018.
- 7) A. K. Bandaru, L. Vetiyatil and S. Ahmad, "The Effect of Hybridization on the Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composite Armors", *Composites Part B*, Vol. 76, pp. 300-319, 2015.
- 8) B. Nageswara Rao and A. R. Acharya, "Evaluation of fracture Energy, G_{Ic} using a Double Cantilever Beam Fiber Composite Specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 2, pp. 317-322, 1995.
- 9) J. W. Gillespie, L. A. Carlsson and A. J. Smiley, "Rate Dependent Mode I Interlaminar Crack Growth Mechanism in Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK", *Composite Science and Technology*, Vol. 28, pp. 1-15, 1987.
- 10) G. V. Marannano and A. Pasta, "An Analysis of Interface Delamination Mechanisms in Orthotropic and Hybrid Fiber-Metal Composite laminates", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 612-626, 2007.
- 11) Y. Zhao, M. Cao, W. P. Lum, V. B. C. tan and T. E. Tay, "Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Woven Carbon-Dyneema", *Composites Part A*, Vol. 114, pp. 377-387, 2018.
- 12) T. L. Anderson, "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", CRC Press, London, pp. 52-55, 1995.
- 13) ASTM D5528-94a, "Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites", *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.
- 14) T. K. O'Brien and R. H. Martin, "Results of ASTM Round Robin Testing for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composite Materials", *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 269-281, 1993.
- 15) A. B. de Moraes, "Double Cantilever Beam Testing of Multidirectional Laminates", *Composite Part A; Applied Science*, Vol. 34, No. 12, pp. 1135-1142, 2003.
- 16) S. C. Kim, J. S. Kim and H. J. Yoon, "Experimental and Numerical Investigation of Mode I Delamination Behaviors of Woven Fabric Composites with Carbon, Kevlar and Their Hybrid Fibers", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 321-329, 2011.
- 17) ASTM D3039M-08, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", *Annual Book of ASTM Standards*, 2008.
- 18) M. Hossain, M. A. Khan, R. A. Khan, A. B. Siddiquee and T. Islam, "Carbon/Kevlar Reinforced Hybrid Composite: Impact of Matrix Variation", *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 2015.