

틸팅차량용 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 혼합모우드 층간파괴인성 평가

윤성호*·허광수**·오진오**·이상진***·정종철***·김정석****

Evaluation of Mixed-mode Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fabric/Epoxy Composites for Tilting Train Carbody

S.H. Yoon, K.S. Heo, O.J. Oh, S.J. Lee, J.C. Jung, J.S. Kim

Abstract

Mixed-mode interlaminar fracture toughness of carbon fabric/epoxy composites, which are applicable to tilting train carbody, was evaluated through the MMB (Mixed-mode bending) test. Specimens were made of CF3327 plain woven fabric with epoxy and a starter delamination at one end was made by inserting Teflon film with the thickness of 12.5 μ m. Mixed-mode interlaminar fracture test was conducted for 6 types of specimens with the mode II ratio of 20, 35, 50, 65, 80, 90%. Also crack propagating behaviors and fractured surfaces were examined through an optical travelling scope and a scanning electron microscope, respectively.

Key Words: Mixed-mode interlaminar fracture toughness (혼합모우드 층간파괴인성), Carbon fabric/epoxy composite (탄소섬유직물/에폭시 복합재), Tilting train carbody (틸팅열차 차체)

1. 서 론

기존선의 속도 향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선을 위한 철도기술개발사업의 일환으로 탄소섬유직물/에폭시 복합재 차체가 적용된 한국형 틸팅열차의 개발이 진행되고 있다. 탄소섬유직물/에폭시 복합재는 다른 강화섬유를 적용한 복합재에 비해 비강성과 비강도가 높고 충격특성, 피로 특성, 내부식성, X-선 투과성, 치수안정성이 우수하여 경량화가 요구되는 항공기, 자동차, 고속열, 스포츠용품 등에 널리 적용되고 있다. 이와 같은 탄소섬유직물/에폭시 복합재는 단위셀을 경사방향과 위사방향을 따라 주기적으로 배열시킨 직물 형태의 프리프레그를 원하는 적층두께를 갖도록 적층한 다음 규정된 경화조건으로 성형하기 때문에 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재에 비해 층내 파괴에 대한 우수한 저항능력과 층간면에 형성된 균열의 진전이 억제되는 효과를 얻을 수 있다.

일반적으로 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 층간파괴 양상은 열림변형에 의한 모우드 I 층간파괴, 전단변형에 의한 모우드 II 층간파괴, 열림변형과 전단변형이 혼합된 형태의 혼합모우드 층간파괴 등으로 구분된다[1]. 실제 섬유강화 복합적층 구조물은 성형시의 온도, 압력이나 섬유의 배열방향 및 작용된 하중상태 등에 따라 다양한 파손양상이 발생하며 섬유의 파손, 기지의 손상, 섬유와 기지의 접착분리, 층간분리 등이 관찰된다[2]. 따라서 섬유강화 복합적층 구조물에 복합적인 하중이 작용되는 경우의 층간파괴 메커니즘을 이해하기 위해서 혼합모우드 층간파괴인성의 평가가 필수적이다[3-6].

본 연구에서는 한국형 틸팅열차용 차체용 복합재 중의 하나인 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 혼합모우드 층간파괴인성을 MMB 시험을 통해 실험적으로 평가하였으며 실체현미경과 전자현미경을 통해 균열진전 거동 및 파단면 양상을 조사하였다.

* 금오공과대학교 기계공학부 교수

** 금오공과대학교 기계공학부 석사과정

*** (주)한국화이버

**** 한국철도기술연구원

2. 층간파괴인성 평가

에너지방출율 G 는 포텐셜 에너지 변화율 Π , 균열면적 A 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (1)$$

혼합모우드 에너지 방출율은 모우드 I 에너지 방출율과 모우드 II 에너지 방출율의 합으로 나타난다.

$$G = G_I + G_{II} \quad (2)$$

$$G_I = \frac{12P^2(3c-L)^2}{16b^2h^3L^2E_{I_f}}(a+\chi h)^2 \quad (3)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(c+L)^2}{16b^2h^3L^2E_{I_f}}(a+0.42\chi h)^2 \quad (4)$$

이때 P , c 와 a 는 작용하중, 레버 길이 및 균열 길이, L 은 MMB 시편의 half 스팬, b 는 시편의 폭, $2h$ 는 시편의 두께, E_{I_f} 는 굽힘강성으로 식(5)와 같이 나타낸다.

$$E_{I_f} = \frac{8(a_0+\chi h)^3(3c-L)^2 + [6(a_0+0.43\chi h)^3 + 4L^3(c+L)^2]}{16L^2bh^3(\frac{1}{m} - C_{sys})} \quad (5)$$

이때 a_0 는 초기균열길이, C_{sys} 는 하중장치의 컴플라이언스, m 은 보정시편의 하중-변위 선도의 기울기이다. χ 는 균열선단부 회전에 대한 균열길이 보정계수로서 식(6)과 같이 나타낸다.

$$\chi = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}} \left(3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

이때 E_{11} 은 길이방향 인장탄성계수, G_{13} 은 면외방향 전단탄성계수, Γ 는 transverse modulus correction parameter로서 식(7)과 같이 나타낸다.

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}} \quad (7)$$

이때 E_{22} 는 횡방향 인장탄성계수이다.

3. 시편제작

본 시험에 사용된 시편은 탄소섬유직물/프리프레그 (CF3327/Epoxy, (주)한국화이바)를 적층하여 제작하였다. 탄소섬유직물은 3K의 원사를 이용한 평직 형태로서 시편을 제작하기 위해서는 우선 일정 크기로 절단된 프리프레그를 9층 적층하고 균열을 형성하기 위해 12.5 μ m 두께의 테프론 필름을 삽입하고 다시 프리프레그를 9장 적층한 후 오토클레이브에서 규정된 온도와 압력을 가하여 성형하였다. 혼합모우드 시험을 위한 시편은 폭이 25mm, 길이가 160mm, 두께가 4.5mm이며 초기균열길이는 45mm이다.

3. 실험방법

Fig. 1과 같은 MMB 시편의 끝단에 하중을 작용하기 힌지를 초기균열길이 a 가 25mm되도록 부착하고 Fig. 2에 나타난 시험치구에 장착한 다음 모우드 II 비율(G_{II}/G)에 따라 레버길이 c 를 적절히 조절한다. 본 연구에서는 20%, 35%, 50%, 65%, 80%, 90%의 6가지 모우드 II 비율을 고려하였다. 하중은 0.5mm/min의 변위제어 상태로 연속적으로 작용시키고 시편의 측면에 실체현미경을 설치하여 초기균열길이로부터 균열발생 지점까지 작용하중에 대한 균열진전 양상을 관찰하였다. 하중장치에 대한 컴플라이언스 C_{sys} 는 각 모우드 II 비율에 따라 25mm \times 130mm \times 5mm의 Al6061로 제작된 보정시편을 이용하여 측정하였다.

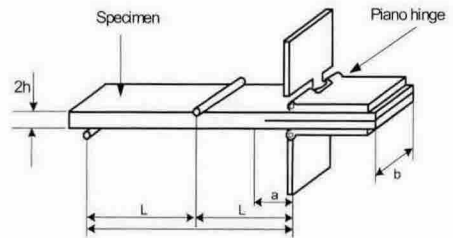


Fig. 1 Configuration of Mixed-mode bending specimen

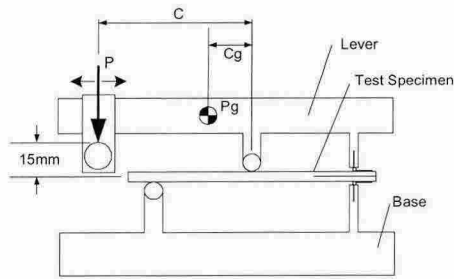


Fig. 2 Scheme of mixed-mode bending apparatus

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에는 MMB 시험장치를 이용하여 측정된 여러 가지 모우드 II 비율에 대한 하중-변위 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 모우드 II 비율이 높아짐에 따라 균열진전이 매우 불안정하고 급격하게 발생하며 모우드 II 비율이 낮을수록 비교적 안정적으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4에는 모우드 II 비율에 따라 평가된 모우드 I 층간파괴인성 G_I 과 모우드 II 층간파괴인성 G_{II} 그리고 혼합모우드 층간파괴인성 G 의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 모우드 II 비율이 50% 이상인 경우 모우드 I 층간파괴인성은 점차 감소하지만 모우드 II 층간파괴인성은 점차 증가하는 양상을 나타낸다. 이로 미루어 보면 모우드 II 비율이 50% 이하인 경우에는 혼합모우드 층간파괴인성은 열림변위에 의한 모우드 I 하중에 지배적인 영향을 받으며 균열선단 주위의 높은 응력집중을 발생시킨다. 그러나 모우드 II 비율이 50% 이상인 경우에는 혼합모우드 층간파괴인성이 모우드 II 하중의 영향으로 인한 파괴가 지배적이다. 이때 모우드 II 하중은 층간면의 전단응력을 유발시키며 이로 인해 균열은 불안정하고 급격하게 진전한다. 이와 같이 모우드 II 하중에 의해 균열이 진전되기 위해서는 높은 에너지 방출율이 요구됨을 알 수 있으며 모우드 II 비율이 증가하면 혼합모우드 층간파괴인성에 대한 모우드 II 에너지 방출율의 비율이 증가하게 된다.

Fig. 5에는 모우드 II 비율이 20%, 50%, 80%인 경우의 MMB 시편에 대한 층간파단면을 전자현미경으로 관찰한 사진이 나타나 있다. 여기에서 보면 모우드 II 비율이 20%인 경우에는 모우드 I 하중이 지배적으로 주로 층내 수직응력의 영향으로 인한 수지의 벽개 파괴가 관찰되며 대체로 평

탄한 기지의 파괴가 주를 이룬다. 모우드 II 비율이 50%의 경우에는 수직응력으로 인한 수지의 벽개파괴와 전단응력에 의한 헤클 등을 관찰할 수 있으며, 모우드 II 비율이 80%인 경우에는 주로 전단응력으로 인한 헤클과 강화섬유와 수지와 접착분리 등이 지배적으로 관찰된다.

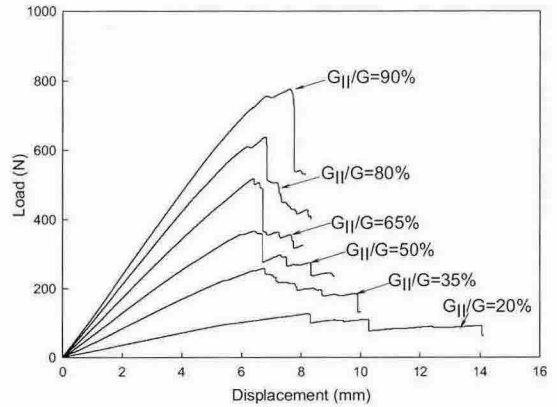


Fig. 3 Typical Load-displacement for various mixed mode condition

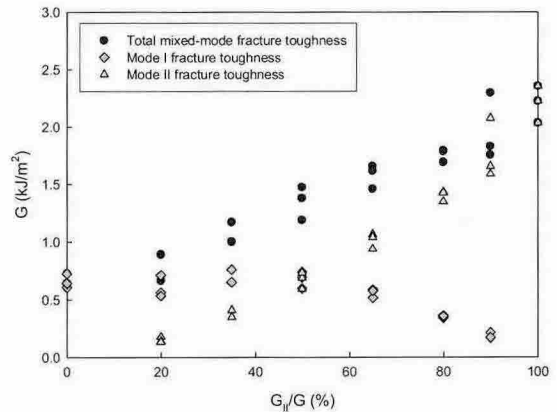
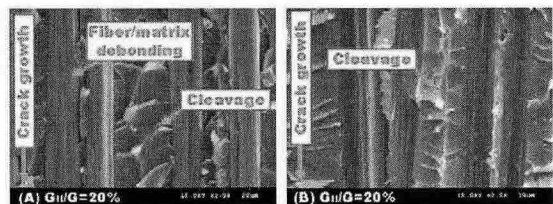
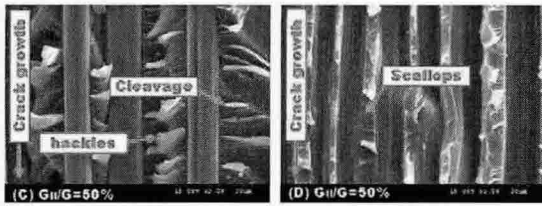


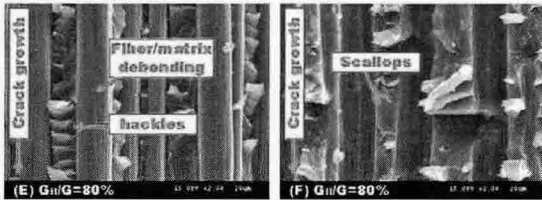
Fig. 4 Fracture toughness of G_I , G_{II} and G for various Mode II fraction



(a) $G_{II}/G=20\%$



(a) $G_{II}/G_I=50\%$



(a) $G_{II}/G_I=80\%$

Fig. 5 Typical fractured surface of CF3327/epoxy composite for various mixed-mode loading

5. 결론

본 연구에서는 MMB 시험을 통해 6가지 모드 II 비율 대한 층간균열을 가진 탄소섬유직물/에폭시 복합체의 혼합모우드 층간파괴인성을 평가하였다. 또한 모우드 II 비율에 따른 모우드 I 과 모우드 II의 층간파괴 메커니즘을 미시적으로 관찰하였으며, 파단면의 분석을 통해 손상 부위에서의 파단 유발응력을 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. S.H. Yoon, Characterization of Interlaminar Fracture in Graphite/Epoxy Composite under Mixed-mode deformations, Ph.D. Dissertation, 1990.
2. B.W. Kim and J.A. Nairn, "Observations of Fiber Fracture and Interfacial Debonding Phenomena using the Fragmentation Test in Single Fiber composites," Journal of Composite

Materials, Vol.36, 2002, pp.1825-1858.

3. A.J. Russell and K.N. Street, "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy," Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, 1985, pp.315-335.
4. B.W. Kim and A.H. Mayer, "Influence of Fiber Direction and Mixed-mode Ratio on Delamination Fracture Toughness of Carbon/Epoxy Laminates," Composites Science and Technology, Vol.63, 2003, pp.695-713.
5. F. Ducept, P. Davies, and D. Gamby, "Mixed Mode Failure Criterion for a Glass/Epoxy Composite and an Adhesively Bonded Composite/Composite Joint," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol.20, 2000, pp.233-244.
6. M.L. Benzeggaga and M. Kenane, "Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composite with Mixed-Mode Bending Apparatus," Composites Science and Technology, Vol.56, 1996, pp.439-449.