

틸팅차량용 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 모우드 II 층간파괴인성 평가

이은동*·윤성호*·신광복**·정종철***

Evaluation of Mode II Interlaminar Fracture Toughness for Carbon Fabric/Epoxy Composite for Tilting Train

Eun Dong Lee, Sung Ho Yoon, Kwang Bok Shin, Jong Cheol Jeong

Abstract

In this study, mode II interlaminar fracture phenomena of carbon fabric/epoxy composite for tilting train were investigated. The end notched flexural specimen containing an artificial crack with the thickness of $12.5\mu\text{m}$ was used. The mode II interlaminar fracture toughness was evaluated through a three point bending test and the fractured surfaces were examined through a scanning electron microscope. The experimental results obtained in this study would be applicable in the design and structural analysis of the composite structures.

Key Words: Mode II interlaminar fracture toughness, End notched flexural specimen, Carbon fabric/epoxy composite, Tilting train

1. 서 론

탄소섬유/에폭시 복합재는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성과 비강도가 높고 충격특성, 피로특성, 내부식성이 우수하여 항공기, 자동차, 쾌속선, 스포츠용품 뿐만 아니라 X-선 투과성과 치수안정성이 우수하여 의료기와 정밀계측기 등에도 응용되고 있다. 최근에는 철도기술연구개발사업의 일환으로 기존선의 속도 향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선, 타 교통시스템과의 경쟁력 확보를 위해 한국형 고속틸팅열차의 개발이 시도되고 있으며 이러한 고속틸팅열차의 차체 제작에 하이브리드 복합재를 적용하려는 연구가 진행되고 있다[1,2]. 복합재 구조재로는 일방향 프리프레그의 적층을 통해 제작된 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재와 직물형 프리프레그의 적층을 통해

제작된 탄소섬유직물/에폭시 복합재가 있으며 특히 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 경우 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재에 비해 섬유의 횡방향 파괴 및 층내파괴를 억제시키는 효과를 갖기 때문에 복합적층구조재의 제작에 널리 적용되고 있다. 그러나 강화섬유보다 낮은 하중지지능력을 갖는 복합적층구조재에서 가장 취약한 부분인 층간면에 대한 손상허용 평가가 필수적이다[3].

본 연구에서는 한국형 고속틸팅열차의 차체 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 손상허용 평가의 일환으로 모우드 II 층간파괴인성을 평가하기 위한 방법 중 ENF(End notched flexural) 시편을 이용하는 경우에 대한 모우드 II 층간파괴인성을 평가하는 식을 도출하였고 실험적인 방법을 통해 모우드 II 층간파괴인성을 정량적으로 평가하였으며 전자현미경을 통해 파단면의 양상과 균열전진거동을 조사하였다.

2. 소재 종류 및 실험방법

2.1 소재 종류

* 금오공과대학교 기계공학부

** 한국철도기술연구원

*** (주) 한국화이버

모우드 II 복합재 시편은 한국형 고속틸팅열차 복합재 차체 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 프리프레그 (CF3327/Epoxy, (주)한국화이바)를 이용하여 제작하였다. Fig. 1에는 모우드 II 복합재 시편의 형상이 나타나 있다. 시편의 길이는 120mm, 폭은 20mm, 두께는 4.2mm이고 층간균열을 형성시키기 위해 테프론 필름(두께: 12.5 μm)를 삽입하였으며 층간균열의 길이는 한쪽 끝단을 기준으로 35mm이다. 이때 적층된 프리프레그를 성형하기 위해 규정된 온도와 압력의 성형 조건을 적용하며 시편은 다이아몬드 휠을 이용하여 규정된 크기로 절단한다. 시편의 절단면은 균열진전의 관찰이 용이하도록 사포로 다듬질하며 미세 눈금을 가진 스케일을 시편의 길이방향을 따라 균열선단 부위에 부착하고 이를 이용하여 균열진전길이를 측정한다.

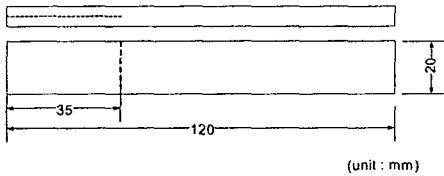


Fig. 1 Specimen configuration for Mode II interlaminar fracture toughness

2.2 시험장치 및 실험 방법

Fig. 2에는 모우드 II 층간파괴인성 평가를 위한 실험장치가 나타나 있다. 여기에서 보면 100mm의 스패를 가진 3점 굽힘시험기구 위에 층간균열을 가진 시편을 장착한 다음 2mm/min의 변위 제어상태로 연속적인 하중을 작용하면서 작용하중에 대한 변위를 구하고 실체 현미경을 통해 그때의 균열길이를 측정한다.

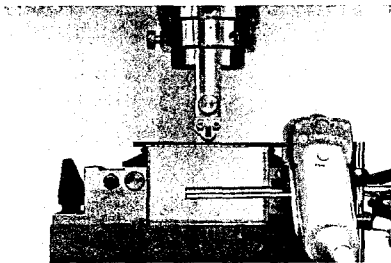


Fig. 2 Test set-up for evaluating Mode II interlaminar fracture toughness

3. 모우드 II 층간파괴인성평가

임계에너지 방출률로 표현되는 모우드 II 층간파괴인성은 파괴에너지에 대해 표현하면 식(1)과 같이 나타난다[4].

$$G_{IIC} = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

여기에서 U 는 변형을 에너지, B 는 시편 폭, a 는 균열길이, P 는 작용하중, C 는 시편의 컴플라이언스이다. 모우드 II 층간파괴인성은 식(2) 또는 식(3)과 같이 나타난다.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P_c^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (2)$$

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P_c \delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (3)$$

여기에서 P_c 는 균열진전이 발생할 때의 임계하중, δ 는 하중작용점, L 은 스패의 반, h 는 시편 두께의 반, a 는 균열길이이다. 층간균열을 가진 복합재 시편이 굽힘 하중으로 인해 균열진전이 발생하는 경우 균열은 불안정하게 급속히 진전하기 때문에 점진적인 균열진전을 얻기가 어려울 뿐 아니라 균열단합현상으로 인해 균열진전길이를 정확하게 측정하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 하중-변위 선도에서 결정되는 컴플라이언스를 이용하여 유효균열길이를 추정하여 모우드 II 층간파괴인성은 식(4)와 같이 표현된다.

$$G_{IIC}^* = \frac{9a_{eff}^2 P_c^* \delta^*}{2B(2L^3 + 3a_{eff}^3)} \quad (4)$$

여기에서 P_c^* 와 δ^* 는 각각 유효균열길이에서의 임계하중과 하중작용점에서의 변위이다.

4. 결과 및 분석

모우드 II 층간파괴인성을 정량적으로 평가하기 위해서는 시편의 내부에서 발생한 균열진전시점을 정확하게 평가하기 위한 방안이 필요하다. 이를 위해 하중-변위 선도에서 비선형성을 나타나

기 시작하는 시점을 통해 시편의 내부에서 발생한 균열진전거동에 대한 정보를 얻고자 하였다. 이때 하중-변위 선도에서 비선형성을 나타나기 시작하는 점을 NL점, 하중-변위 선도의 초기 기울기에 비해 5% 컴플라이언스 증가된 하중-변위 선도의 점을 5% offset점, 최대 하중점을 max점으로 정의하고 이들 각 점에서의 모우드 II 층간 파괴인성을 평가하였다. Fig 3에는 모우드 II 층간파괴인성을 평가하기 위한 복합재 시편에서의 하중-변위 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 작용하중이 증가함에 따라 변위는 NL점까지 선형적으로 증가하지만 NL점을 지나면 서서히 비선형적으로 증가하고 최대하중에 도달하면 하중이 급격히 감소한다. 이때 NL점 부위에서 작용하중에 대한 변위의 비선형성은 ① 시편의 두께가 비교적 얇은 경우 변위가 작용하중에 대해 비선형적으로 증가하는 기하학적 요인 ② 작용하중에 의해 시편에 균열이 발생 또는 진전하여 시편의 컴플라이언스가 증가되는 구조적 요인에 기인한다. 본 연구에서는 ①의 기하학적 요인이 변위의 비선형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 모우드 II 복합재 시편과 동일한 소재로 제작된 길이가 125mm, 폭이 25mm, 두께 3mm의 보 형태 시편을 이용하여 3점 굽힘시험을 수행하였다. Fig. 4에는 3점 굽힘시험을 통해 얻은 하중-변위 선도가 나타나 있다. 이때 굽힘시험에 적용된 스패의 길이는 96mm이며 하중 작용점에서의 변위는 시편의 중앙하단부에 파단이 발생하기 직전까지 작용하중에 대해 거의 선형적으로 나타난다. 이로 미루어 보면 모우드 II 층간파괴인성을 평가하기 위한 복합재 시편은 3점 굽힘시험편 보다 두껍기 때문에 작용하중에 대한 하중작용점에서의 변위는 3점 굽힘시험편에 비해 선형성이 클 것으로 추정된다. 따라서 모우드 II 층간파괴 실험을 통해 얻어진 하중-변위 선도에서의 비선형성은 ①의 기하학적 요인보다는 ②의 시편에 발생한 균열진전에 의한 구조적 요인 때문으로 추정된다.

Fig. 5에는 테프론 필름이 삽입된 모우드 II 층간파괴시편에 대해 평가된 NL점과 5% offset/max 점에서의 모우드 II 층간파괴인성이 나타나 있다. 여기에서 보면 NL점에 대한 모우드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 883J/m²과 61.5J/m²이며 5% offset/max점에 대한 모우드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 1940J/m²과 161.3J/m²이다.

Fig. 6에는 모우드 II 복합재 시편에 대해 층간파괴인성을 평가한 후 시편의 길이를 따른 warp

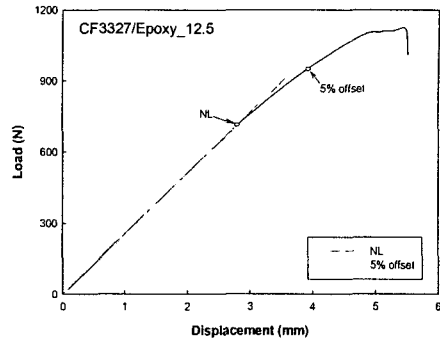


Fig. 3 Typical load-deflection curve for Mode II interlaminar fracture test

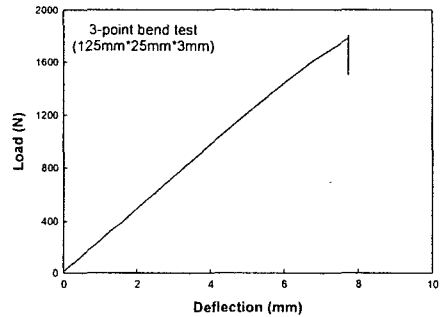


Fig. 4 Load-deflection curve for 3-point bending test

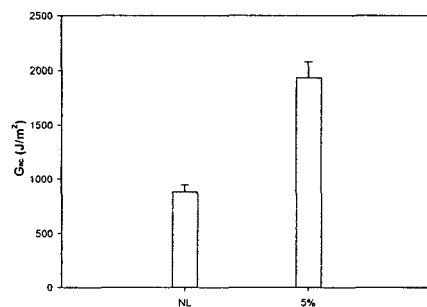


Fig. 5 Results for Mode II interlaminar fracture toughness

방향에서와 시편의 폭을 따른 fill 방향에서의 파 단면을 전자현미경으로 관찰한 사진이 나타나 있다. 이때 (a)-1과 (a)-2 그리고 (a)-3과 (a)-4는 동일한 위치에 대한 상하 대응되는 점에서의 파 단면이다. 여기에서 보면 테프론 필름이 삽입된 모우드 II 복합재 시편의 경우 시편의 길이를 따

라 균열이 진전되는 warp 방향의 파단면인 (a)-1과 (a)-2에서는 전단응력에 의한 전형적인 파단양상인 헤클(heckle), 강화섬유와 수지와의 접촉분리(debonding) 등이 지배적으로 관찰된다. 또한 시편의 폭을 따라 균열이 진전되는 fill 방향의 파단면인 (a)-3과 (a)-4에서는 헤클 및 강화섬유와 수지와의 접촉분리도 관찰되지만 (a)-1과 (a)-2에서와는 달리 수직응력에 의한 수지의 벽개(cleavage)도 관찰된다. 따라서 균열이 warp 방향을 따라 진전되는 경우는 모우드 II 성분에 의해 파단이 지배적임을 알 수 있으며 균열이 fill 방향을 따라 진전되는 경우는 모우드 II 성분과 모우드 I 성분이 혼합된 복합적인 응력상태가 파단을 지배함을 알 수 있다.

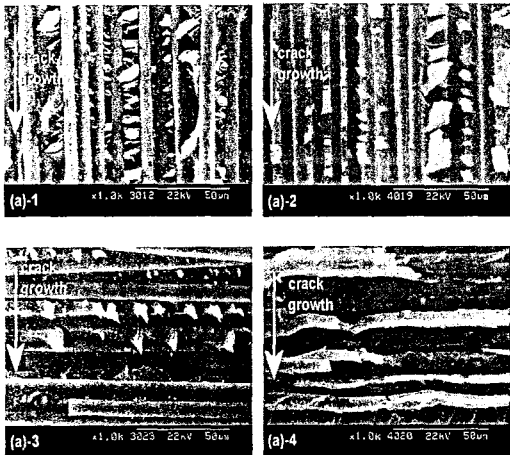


Fig. 6 SEM photographs of fractured surfaces for Mode II interlaminar fracture test

5. 결론

한국형 고속틸팅열차의 차체 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 손상허용 평가 일환으로 모우드 II 층간파괴인성을 평가하기 위한 식을 도출하고 실험적인 방법을 통해 모우드 II 층간파괴인성을 정량적으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 작용하중이 증가하면 변위는 NL점까지는 선형적으로 증가하지만 NL점을 지나면 서서히 비선형적으로 증가하고 최대하중에 도달하면 하중이 급격히 감소한다. 이때 하중-변위 선도에서의 비선형성은 복합재 시편에서의 균열진전 때문으로 추정된다.

2) 테프론 필름이 삽입된 모우드 II 층간파괴시

편에 대해 평가된 NL점에서의 모우드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 883J/m²과 61.5J/m²이며 5% offset/max점에서의 모우드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 1940J/m²과 161.3J/m²이다.

3) 모우드 II 시편의 파단면을 고찰하면 warp 방향으로는 헤클, 강화섬유와 수지와의 접촉분리 등이 지배적으로 관찰되며 fill 방향으로는 수지의 벽개도 관찰된다. 이로 미루어 볼 때 warp 방향으로의 파단은 모우드 II의 성분이 지배적이나, fill 방향으로의 파단은 모우드 II의 성분과 모우드 I의 성분이 혼합된 복합적인 응력성분이 지배적임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 신광복, 유원희, 문형성, "철도차량 시스템에서의 복합재료 응용," 한국복합재료학회지, 제15권, 제5호, pp. 66-71, 2002.
2. 신광복, 구동희, 한성호, "200km/h급의 한국형 고속틸팅열차(TTX) 개발사업 소개," 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, pp. 62-65, 2004.
3. M. Ichikawa and S. Tanaka, "An Analysis of the Energy Release Rate for Non-Coplanar Crack Growth in Fiber Reinforced Composite Materials," International Journal of Fracture, Vol. 22, pp. 125-131, 1983.
4. N. Alif, L.A. Carlsson, and J.W. Gillespie, "Mode I, Mode II, and Mixed Mode Interlaminar Fracture of Woven Fabric Carbon/Epoxy," Composite Materials: Testing and Design, Thirteenth Volume, ASTM STP 1242, S.J. Hooper, Ed., American Society of Testing and Materials, pp. 82-106, 1997.