

# 틸팅차량 차체용 복합재 구조재에 대한 모우드 II 변형 하의 손상허용 평가 기법 연구

## Evaluation of Damage Tolerance under Mode II Deformation of Composite Structure for Tilting Train Carbody

윤성호\* 허광수\*\* 오진오\*\* 이상진\*\*\* 김정석\*\*\*\*

Yoon, Sung Ho Heo, Kwang Su Oh, Jin Oh Lee, Sang Jin Kim Jung Suk

### ABSTRACT

Damage tolerance under Mode II deformation of carbon fabric/epoxy composite, which was applicable to a tilting train carbody, was investigated by a Mode II interlaminar fracture test. The specimens were made of plain woven fabric with epoxy and a delamination at one end was made by inserting Teflon film with the thickness of  $12.5\mu\text{m}$  or  $25.0\mu\text{m}$ . The equation for mode II interlaminar fracture toughness was suggested based on the effective crack length from the compliance of load-displacement curve. Mode II interlaminar fracture behaviors were investigated through an optical travelling scope and a scanning electron microscope.

### 1. 서론

기존의 등방성 재료에 비해 비탄성계수와 비강도가 높고 충격특성, 피로특성, 내부식성이 우수한 탄소섬유/에폭시 복합재는 우주항공 및 국방 관련 분야에 적용되어 시작하였으며 최근에는 철도기술연구개발사업의 일환으로 틸팅열차 복합재 차체의 제작에도 활용되고 있다[1,2].

일방향 탄소섬유/에폭시 복합재는 제작 및 가공시 존재할 수 있는 일차결합 또는 운용시 유발될 수 있는 이차결합 등이 재료 자체가 갖는 취성의 영향과 함께 복합적으로 작용하여 결합이 없는 경우에 비해 훨씬 낮은 하중 하에서 급작스러운 균열진전으로 파괴될 수 있다. 이때 파괴 양상은 강화섬유에 수직인 방향으로 파괴가 발생하는 섬유의 횡방향 파괴, 층내에서 강화섬유에 평행하게 기지를 따라 파괴가 발생하는 층내 파괴, 층과 층 사이의 경계면에서 파괴가 발생하는 층간파괴 등으로 구분된다. 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 경우에는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재에 비해 섬유의 횡방향 파괴 및 층내파괴가 억제되는 효과가 있기 때문에 복합재 구조재의 제작에 널리 적용되고 있지만 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재의 경우와 마찬가지로 강화섬유보다 낮은 하중지지능력을 갖는 층간면은 결합이 있는 경우에는 현저히 낮은 하중지지능력을 갖게 된다. 따라서 탄소섬유직물/에폭시 복합재를 구조재에 효율적으로 적용하기 위해서는 층간면에 대한 모우드 I 층간파괴인성, 모우드 II 층간파괴인성, 혼합모우드 층간파괴인성 등의 손상허용 평가가 필요하다. 특히 모우드 II 층간파괴인성은 모우드 II 변형 하에서의 층간파괴 뿐 아니라 혼합모우드 변형에 의한 층간파괴를 예측하기 위한 정보를 제공해 준다는 점에서 중요하다[3].

\* 금오공과대학교 교수, 정회원

\*\* 금오공과대학교 대학원, 정회원

\*\*\* 한국화이바, 정회원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원, 정회원

본 연구에서는 틸팅열차의 복합재 차체의 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 손상허용 평가를 위해 하중-변위 선도의 컴플라이언스에서 결정된 유효균열길이가 적용된 모드 II 층간파괴인성 평가식을 도출하고 실험적인 방법을 통해 층간균열을 가진 시편에 대한 모드 II 층간파괴인성을 평가하였다. 또한 전자현미경을 통해 파단면 양상과 균열진전거동도 조사하였다.

## 2. 시편제작 및 실험방법

Fig. 1에는 모드 II 층간파괴시편의 형상이 나타나 있다. 시편은 틸팅열차 복합재 차체의 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 프리프레그를 이용하여 제작하였으며 길이는 120mm, 폭은 20mm, 두께는 4.2mm이고 시편의 한쪽 끝단을 기준으로 두께의 중앙부에 35mm의 층간균열이 형성되어 있다. 시편을 제작하기 위해서는 우선 규정된 크기로 절단된 프리프레그 10층을 적층하고 그 위에 테프론 필름 (두께: 12.5 $\mu$ m 또는 25.0  $\mu$ m)을 규정된 위치에 삽입한 다음 다시 프리프레그 10층을 적층한다. 적층된 프리프레그를 성형하기 위해서는 하부 몰드에 이형을 위해 테프론 필름을 깔고 블리드와 필 플라이를 쌓은 다음 적층된 프리프레그를 놓는다. 동일한 방법으로 적층된 프리프레그 위에도 블리드와 필 플라이를 쌓은 다음 테프론 필름을 깔고 상부 몰드를 덮어 준다. 이와 같은 과정이 완료된 후 실리콘 고무의 진공백으로 몰드 전체를 덮은 다음 오토 클레이브 성형장치를 이용하여 규정된 온도와 압력을 작용시켜 성형한다. 이때 프리프레그의 적층시 삽입되는 테프론 필름은 층간균열을 형성시켜 주는 역할을 하며 블리드와 필 플라이는 성형시 발생하는 잉여 수지를 흡수하는 역할을 한다. 성형이 완료된 후에는 다이아몬드 휠을 이용하여 적층판을 원하는 크기로 절단하였으며 절단된 시편의 단면은 사포로 충분히 다듬질하고 균열길이의 측정을 용이하도록 미세눈금을 가진 스케일을 시편의 측면에 균열진전방향으로 부착하였다.

Fig. 2에는 미세눈금을 가진 스케일이 부착된 모드 II 층간파괴시편, 균열진전의 양상을 관찰하고 균열길이를 측정하기 위한 실체현미경, 3점 굽힘시험치구 등으로 구성된 시험장치가 나타나 있다. 모드 II 층간파괴인성을 평가하기 위해서는 100mm 스패의 시편을 3점 굽힘시험치구 위에 놓고 2mm/min의 변위제어상태로 연속적인 하중을 가하였다. 이때 작용하중 및 하중작용점에서의 변위는 각각 시험장치에 장착된 로드셀과 LVDT를 통해 측정하고 균열진전길이는 실체현미경을 통해 측정하였다. 실험결과의 분석에 필요한 자료들은 개인용 컴퓨터, Labview 및 A/D 변환기로 구성된 자료수집장치를 통해 초당 10개씩 수집하였다.

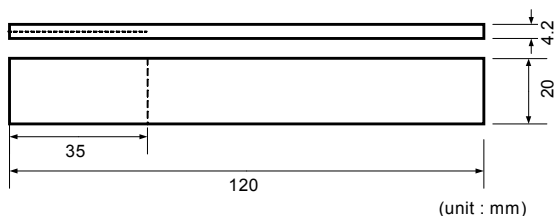


Fig. 1 Configuration of Mode II interlaminar fracture specimen

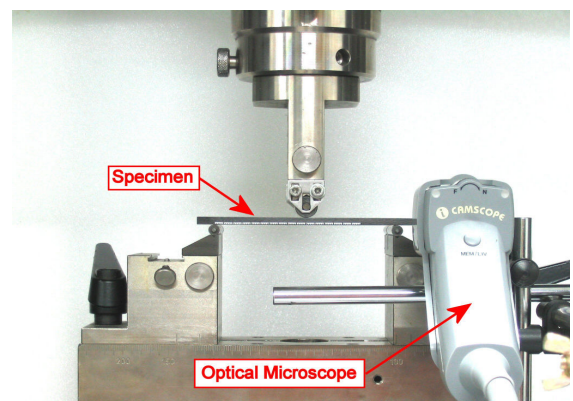


Fig. 2 Test set-up for evaluating Mode II interlaminar fracture toughness

## 3. 모드 II 변형 하의 손상허용 평가

모드 II 층간파괴시편에서 균열선단이 완전히 고정되어 있는 경우 시편의 컴플라이언스는 식 (1)에 의해, 굽힘탄성계수는 식 (2)에 의해, 모드 II 층간파괴인성은 식 (3) 또는 식 (4)에 의해 표현된다[4].

$$C^o = \frac{2L^3 + 3a_o^3}{8E_f B h^3} \quad (1)$$

$$E_f = \frac{2L^3 + 3a_o^3}{8C^o B h^3} \quad (2)$$

$$G_{HC}^o = \frac{9a_o^2 P_c^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (3)$$

$$G_{HC}^o = \frac{9a_o^2 P_c \delta}{2B(2L^3 + 3a_o^3)} \quad (4)$$

여기에서  $L$ 은 스패의 반,  $h$ 는 시편 두께의 반,  $a_o$ 는 초기균열길이,  $P_c$ 는 하중-변위 선도에서의 임계하중,  $\delta$ 는 하중 작용점에서의 변위이다.

모우드 II 층간파괴시편의 경우 균열은 매우 불안정하고 급속하게 진전할 뿐 아니라 균열단합현상으로 인해 균열선단의 구분이 어려워 균열진전시점과 균열진전길이를 정확하게 결정하기가 쉽지 않다. 모우드 II 층간파괴인성을 평가하기 위해 하중-변위 선도에서의 초기 컴플라이언스를 5% 증가시킨 기울기와 하중-변위 선도와 만나는 5% offset점을 균열진전시점으로 취하는 경우 유효균열길이는 식 (5)와 같이 나타난다.

$$a_{eff} = \sqrt[3]{\frac{8}{3} E_f B h^3 C^* - \frac{2}{3} L^3} \quad (5)$$

여기에서  $C^*$ 는 5% offset점에서 하중-변위 선도의 컴플라이언스이다.

식 (5)에 의해 결정된 유효균열길이를 적용하면 모우드 II 층간파괴인성은 식 (6)과 같이 나타난다.

$$G_{HC}^* = \frac{9a_{eff}^2 P_c^* \delta^*}{2B(2L^3 + 3a_{eff}^3)} \quad (6)$$

여기에서  $P_c^*$ 는 5% offset점에서의 임계하중,  $\delta^*$ 는 5% offset점에서의 변위이다.

#### 4. 결과 분석

Fig. 3과 Fig. 4에는 12.5 $\mu$ m 두께의 층간균열을 갖는 모우드 II 층간파괴시편의 전형적인 하중-변위 선도 및 특정 하중점에서의 균열진전 양상이 나타나 있다. 여기에서 보면 Fig. 3-①은 하중-변위 선도에서 비선형성이 나타나기 전의 상태로 Fig. 4-①과 같이 작용하중에 의한 균열진전은 관찰되지 않는다. 작용하중이 Fig. 3-②의 NL점에 도달하면 초기균열은 시편의 폭 중앙부에서 진전하기 시작하고 변위는 작용하중에 대해 비선형적으로 나타나기 시작한다. 그러나 시편의 측면에서 관찰한 Fig. 4-②에서는 균열진전 양상이 관찰되지 않는다. 작용하중이 점차 증가하여 Fig. 3-③에 도달하면 층간균열은 시편의 폭을 따라 진전하기 시작하여 Fig. 4-③에서와 같이 시편의 측면에서도 균열진전이 관찰된다. 그러나 균열진전이 불안정하게 나타나거나 균열면에서의 상대 변형이 작은 경우 시편의 측면의 관찰을 통해서만 정확한 균열진전길이를 측정하기 어렵다. 작용하중이 5% offset점에 도달하는 Fig. 3-④와 ⑤에서는 균열진전이 현저하게 발생하고 Fig. 4-④와 ⑤에서와 같이 균열진전 양상은 시편의 측면을 통해 쉽게 관찰된다. 작용하중이 더욱 증가하여 Fig. 3-⑥과 같이 최대하중에 도달하면 균열은 급격히 진전하고 Fig. 4-⑥에서와 같이 균열은 시편의 길이 방향을 따라 급격하고 불안정하게 진전되는 양상이 관찰된다.

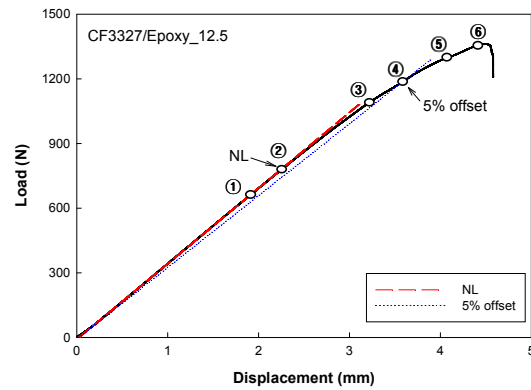


Fig. 3 Several locations for investigating the crack propagating behaviors

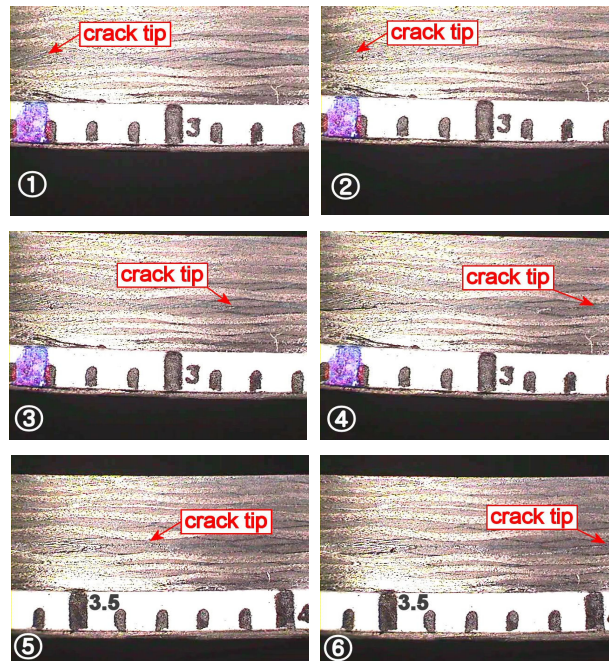


Fig. 4 Microphotographs showing crack propagation on the edge of the specimen

Fig. 5와 Fig. 6에는 각각  $12.5\mu\text{m}$ 와  $25.0\mu\text{m}$  두께의 층간균열을 갖는 모드 II 층간파괴시험의 warp 방향과 fill 방향 파단면을 전자현미경으로 관찰한 사진이 나타나 있다. 이때 (a)-1과 (a)-2 그리고 (a)-3과 (a)-4는 각각 동일한 위치에 대한 상하 대응되는 점에서의 파단면이다. 특히 (a)-1과 (a)-2는  $12.5\mu\text{m}$  두께의 층간균열을 갖는 시편에 대해 길이 방향으로 균열진전이 발생하는 warp 방향의 파단면으로 전단응력에 의한 헤클 (hackle), 강화섬유와 수지와의 접착분리 (debonding)가 관찰된다. (a)-3과 (a)-4는  $12.5\mu\text{m}$  두께의 층간균열을 갖는 시편에 대해 폭 방향으로 균열진전이 발생하는 fill 방향의 파단면으로 (a)-1과 (a)-2에서와 마찬가지로 헤클 및 강화섬유와 수지와의 접착분리 및 수직응력에 의한 수지의 벽개 (cleavage)가 관찰된다. 이로 미루어 볼 때 warp 방향을 따라 균열진전이 발생하는 경우에는 전단응력이 파단에 지배적인 영향을 미치며 fill 방향을 따라 균열진전이 발생하는 경우에는 전단응력과 수직응력의 혼합된 응력상태가 파단에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 (b)-1과 (b)-2는  $25.0\mu\text{m}$  두께의 층간균열을 갖는 시편에 대해 길이 방향으로 균열진전이 발생하는 warp 방향의 파단면으로 전단응력에 의한 헤클, 강화섬유와 수지와의 접착 분리가 관찰된다. 그러나 시편의 폭 방향으로 균열진전이 발생하는 fill 방향의 파단면인 (b)-3과 (b)-4에서는 헤클은 관찰되지 않고 수직응력에 의한 수지의 벽개가 관찰된다.

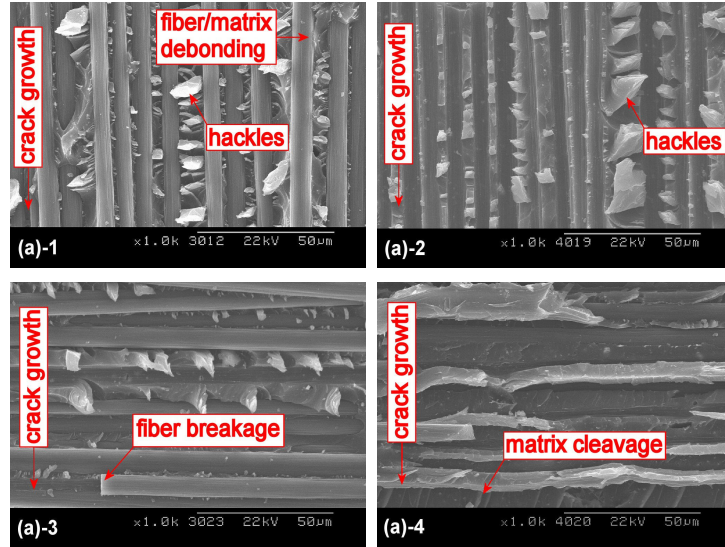


Fig. 5 SEM photographs of fractured surfaces for the specimen with 12.5 $\mu$ m thick inserter

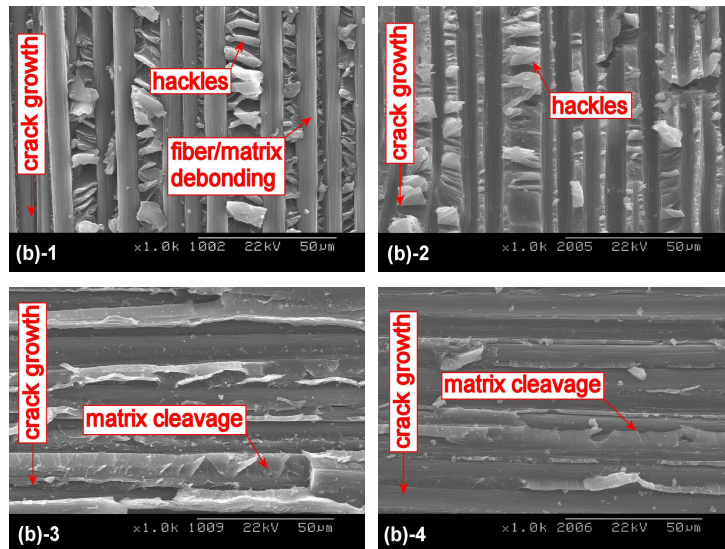


Fig. 6 SEM photographs of fractured surfaces for the specimen with 25.0 $\mu$ m thick inserter

Fig. 7에는 12.5 $\mu$ m와 25.0 $\mu$ m 두께의 층간균열을 가진 경우에 대한 모드 II 층간파괴인성이 나타나 있다. 이 때 시험을 위해서는 각 경우에 대해 6개씩의 시편을 적용하였다. 여기에서 보면 12.5 $\mu$ m 두께의 층간균열을 갖는 경우 NL점에 대한 모드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 718J/m<sup>2</sup>과 32.7J/m<sup>2</sup>이며 5% offset점에 대한 모드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 2214J/m<sup>2</sup>과 65.6J/m<sup>2</sup>이다. 또한 25.0 $\mu$ m 두께의 층간균열을 갖는 경우 NL점에 대한 모드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 607J/m<sup>2</sup>과 53.6J/m<sup>2</sup>이며 5% offset점에 대한 모드 II 층간파괴인성의 평균과 표준편차는 각각 1783J/m<sup>2</sup>과 139.8J/m<sup>2</sup>이다. 이로 미루어 볼 때 층간균열의 두께는 모드 II 층간파괴인성에 영향을 미치며 모드 II 층간파괴인성은 층간균열의 두께가 얇은 경우가 두꺼운 경우에 비해 높게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결론

틸팅차량 차체의 제작에 적용되는 탄소섬유직물/에폭시 복합재에 대한 모드 II 변형 하의 손상허용 평가를 통해 다음의 결론을 얻었다.

(1) 모드 II 변형 하에서는 작용하중이 증가하면 변위는 NL점까지 선형적으로 증가하지만 NL점을 지나면 작용하중으로 인해 복합재 내에 발생한 균열진전으로 인해 변위는 서서히 비선형적으로 증가하는 양상을 나타낸다.



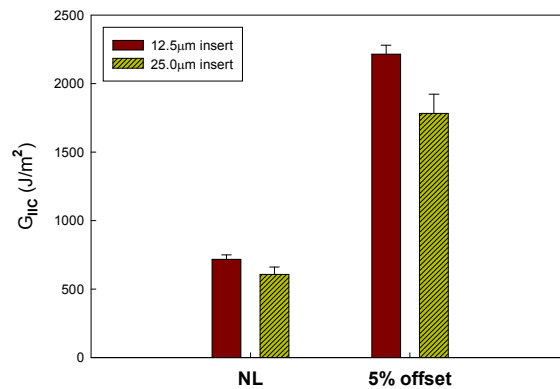


Fig. 7 Comparison of mode II interlaminar fracture toughness by varying with insert thickness

(2) 모드 II 층간파괴인성은 균열진전의 경로와 삽입된 층간균열의 두께에 영향을 받는다. 층간균열 두께가 12.5µm 인 경우는 층간균열 두께가 25.0µm인 경우에 비해 모드 II 층간파괴인성은 NL점에서 18.3% 정도, 5% offset점에서 24.2% 정도 높게 나타난다.

(3) 모드 II 변형 하에서의 탄소섬유직물/에폭시 복합재에 발생한 파단면 양상을 고찰하면 warp 방향을 따라 균열 진전이 발생하는 경우 전단응력의 지배적인 영향으로 인해 헤כל, 강화섬유와 수지와의 접착분리가 관찰되며 fill 방향을 따라 균열진전이 발생하는 경우 전단응력과 수직응력의 혼합된 응력의 영향으로 인해 헤כל, 강화섬유와 수지와의 접착분리 뿐 아니라 수지의 벽개도 관찰된다.

## 후기

본 연구는 철도청의 철도기술개발사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 신광복, 유원희, 문형석, "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. 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.
4. JIS K7086, Testing Methods for Interlaminar Fracture Toughness of carbon Fiber Reinforced Plastics, 1993.