CZM(Cohesive Zone Model)을 이용한 철도차량용 직물 복합재의 모우드 I 층간파괴의 해석적 연구

Finite Element Analysis and Validation for Mode I Interlaminar Fracture behavior of Woven Fabric Composite For a Train Carbody Using CZM(Cohesive Zone Model)

김승철† 김정석* 윤혁진** 서승일***
Seung-Chul Kim†, Jung Seok Kim*, Hyuk-Jin Yoon**, Seung-Il Seo***

ABSTRACT

The Mode I interlaminar fracture toughness of woven fabric carbon/epoxy and glass/epoxy composites for a train carbody was measured and FEM analysis was conducted. The woven fabric epoxy composite manufactured by hand lay-up, has high stiffness and strength, good resistance for impact, fatigue, corrosion and in-plane failure. The DCB(Double Cantilever Beam) specimen made of woven fabric epoxy composite had the size of 180mm × 25mm × 5mm and the insert of 65mm. The Mode I interlaminar toughness of specimen was measured according to ASTM 5528-01. The crack propagation behavior of the DCB specimen was simulated using FEA with cohesive elements that model the adhesive layer between woven fabric plies.

1. 서 론

속도향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선, 연료저감, 유지보수 개선등의 목적에 따라 철도산업에 복합재의 적용이 활발하다. 특히 틸팅열차, 경량전철, 모노레일, 저상버스등의 차체는 복합재 적용이 일반화 되었으며, 대차등의 대형 구조물, 충돌흡수장치등의 특수구조물에 대한 적용 연구도 활발히 진행되고 있다[1]. 경사와 위사를 교차시킨 섬유직물복합재(Woven Fabric Composites)는 비강성 , 피로 특성, 내부식성, 치수안정성이 우수한 기존복합재의 일반적인 장점을 지니면서도 횡방향 층내파괴에 대하여 높은 저항성을 지니는 장점이 있다[2]. 복합재의 층과 층사이인 층간면은 수지가 지배적인 영역으로 강화섬유보다 훨씬 낮은 하중 지지능력으로 인하여 균열이 형성될 우려가 높은 취약한 부위이다. 섬유직물 복합재는 단방향섬유 복합재(UD, Unidirectional composites)에 비해 층간분리(Delamination)진전 억제 능력이 높은편이나, 일반적인 층간균열진전양상은 매우 불안정하여 정확한 층간파괴인성의 측정 및 균열의 예측이 어렵다. 또한 섬유직물복합재의 층간파괴인성은 섬유와 수지의 종류, FVF (Fiber Volume Fraction)등 일반적인 요소 외에도 섬유의 직조 패턴 등의 여러가지 인자들이 영향을 끼치며 복잡한 메커니즘을 갖는다[3]. Alif. N등[4]은 단방향섬유복합재의 층간파괴인성 측정 기준인 ASTM D5528-10와

† 김승철 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원
E-mail : sckim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5679 FAX : (031)460-5289
* 김정석 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원
** 윤혁진 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
*** 서승일 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

같은 방법으로 직조된 Carbon/Epoxy 복합재의 모우드 I, II 의 층간파괴인성을 측정하였다. Alif. N의 측정 방법은 섬유직물 복합재의 층간파괴인성 측정의 기준으로 참고되고 있다. Constantinescu등[5]은 섬유직물복합재의 층간파괴인성을 여러번의 시험을 거쳐 결정하는 round-robin 방식을 이용하여 제시하였다. Suppakul등[6]은 섬유직복합재의 위사의 패턴을 변화하며 모우드 I 층간 파괴인성을 측정하여 비교하였다. Yoon등[1]은 한국형틸팅차량에 적용된 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 초기균열 생성을 위하여 삽입된 테프론 필름의 두께에 따른 모우드 I 층간파괴인성을 비교하였다. 또한 NL(Nonlinear)점의 생성원인 등을 밝혀내었다. Szenkrenes등[2]은 파괴인성측정에 관련된 시험법을 정리하고 영향을 끼치는 섬유 배열, 측정방법, 온도, 변위속도등의 인자를 조사하였다. Gill등[6]은 FVF에 따른 모우드 I, II, Mixed 값을 비교하고 X-선 관찰을 통하여 균열을 관찰하였다. Greenhalgh등[7]은 층간파괴면의 표면현미경 관찰을 통하여 다양한 층간파괴 메커니즘을 관찰하였다.

한편으론 층간파괴거동을 다양한 요소들을 사용하여 해석적으로 예측하려는 시도가 있어왔다. Yap과 scott[9,10]보강재를 갖는 보강 패널의 초기 층간 분리 균열을 모사하여 좌굴 후 거동을 해석하고 분리파손의 성장여부를 예측하였다. Krueger등[11]은 보강재의 분리강도 특성을 조사하기 위해 스킨-플랜지 시편을 제안하고 인장, 굽힘, 혼합 하중 시험을 수행하고 분리 파손 특성을 연구하였다. 또한 2차원 평면변형률 고체 요소를 사용하여 비선형 유한요소해석도 같이 수행하고 VCCT 기법을 이용해 변형률 에너지 방출률을 계산하였다. Camaho 등[12]은 복합재료에서 분리 파손의 거동을 모사하기 위해 접착제와 접착층 사이의 층간 요소를 제안하였다. 이는 두께가 없는 고체 요소의 개념으로써 ABAQUS의 사용자 지정요소로서 개발하였다.

본 연구에서는 유리섬유직물 에폭시 적층빔의 한쪽 끝단을 기준으로 65mm의 층간균열이 형성된 DCB(Double Cantilever Beam)시편을 제작하고, ASTM 5528-01[13]에 준하여 Mode I 층간파괴인성을 측정하였다. 또한 이와 동일한 조건의 유한요소해석을 수행하여 층간파괴거동을 해석적으로 평가하였다. 접합층은 Cohesive 요소를 이용하여 모사하였으며 실험을 통하여 측정된 파괴인성값을 부여하였다. 실험과 해석의 시편 끝단의 반력을 비교하여 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편

층간파괴인성 측정시험은 탄소, 유리섬유 직물을 에폭시(RS1222)를 이용하여 경화시킨 적층판을 대상으로 실시하였다. 탄소섬유직물 복합재는 현재 한국형 틸팅차량 차체 외벽에 적용된 재료이며, 유리섬유직물 복합재는 가볍고, 값이 싸며 기계적 성질이 우수하여 구조재로 적용이 활발히 연구되고 있는 재료이다. 위 재료들의 기계적 물성을 도표 1.에, 구조와 패턴을 도표 2.에 나타내었다.

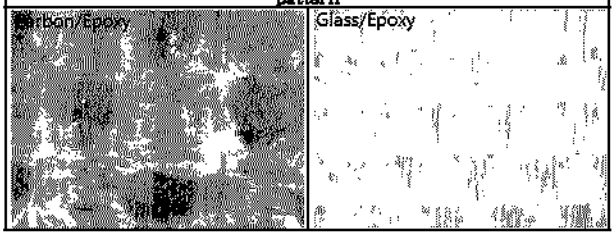
도표 1. 시편의 기계적 물성

mechanical properties \ composites		Carbon/ Epoxy	Glass/ Epoxy
tensile modules (GPa)	warp	68.83	26.14
	fill	69.25	25.5
shear modules (GPa)	warp	6.85	7.83
	fill	8.41	70.9
interlaminar-shear strength (GPa)	warp	66.73	65.34
	fill	66.1	56.6
FVF (%)	warp	64.1	46.66
	fill	63.04	46.74

도표 2. 시편의 구조 및 패턴

material	pattern/resin	단중(g/m)		본수
		fill	warp	
Carbon/ Epoxy	Plain Weave HPW193#/RS1222	106	107	530
Glass/ Epoxy	Plain Weave K126#/RS1222	166	122	1215

pattern



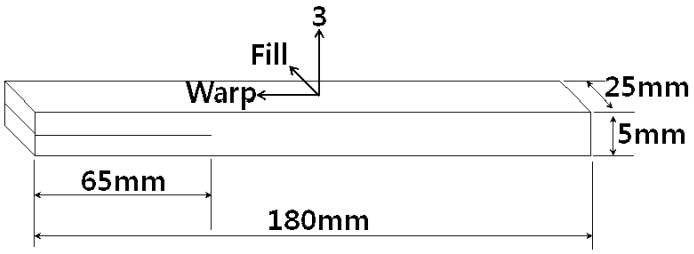


그림1. DCB specimen

본 연구에 적용된 시편의 형태는 길이 180mm, 폭 25mm의 DCB(Double Cantilever Beam)로, 제작시 층의 중간에 테프론 필름(두께 20㎛, Dupont, USA)을 삽입하여 65cm의 초기 균열을 생성하였다. 그림 1.에 시편의 형태를 나타내었다.

2.2 모우드 I 층간파괴인성 평가법

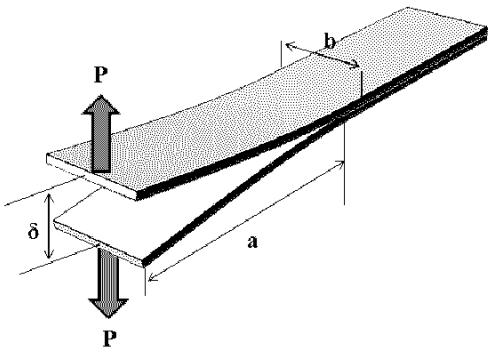


그림 2. DCB test의 개략도

본시험은 단방향섬유복합재 적층판을 대상으로 하는 ASTM D5528-01[9]을 기준으로 측정하였다. 그림 2.는 모우드 I 층간파괴인성 측정 시험의 개략도이다. DCB는 직사각형의 균일한 두께의 빔으로 한쪽 끝단의 두께방향 중심에는 균열의 시작점으로 작용되는 분리부가 존재한다. 분리부가 존재하는 시편의 양쪽 끝단은 하중(P)이 가해지면 열림변위(δ)가 증가하게 되고, 초기 균열의 끝단으로 부터 시편의 중간면을 따라 층간파괴가 진행된다. 이때 균열이 성장함으로써 방출된 에너지는 식 (1)과 같다.

$$G_I = -\frac{1}{b}\frac{dU}{da} \qquad (1)$$

여기서 U는 변형률 에너지, b는 시편의 폭, a는 균열의 길이이다.

모우드 I 층간파괴인성은 수정된 보 이론을 이용한 방법(MB), 컴플라이언스 보정법(CC), 수정된 컴플라이언스 보정법(MCC)등에 의해 평가할 수 있다. 본 시험에서는 다른 보정법에 비하여 보수적인 결과를 제공하는 컴플라이언스 보정법을 이용하였다.

시편과 시험장비와의 연결을 위하여 로딩블록 지그를 사용하였다. 지그는 12.6mm × 12.6mm × 25mm 의 직육면체 형태로 측면의 중심에는 원형 구멍이 뚫려 있다. 이 구멍을 통하여 인장시험기와 시편이 핀으로 연결된다. 작용하중이 증가하면 열림변위가 점차 커지고 이로 인해 블록은 회전하여 하중작용점과 층간균열의 끝단으로 정의되는 균열길이를 정확하게 결정하기 어렵다. 특히 작용하중에 의해 열림변위가 커지는 경우에는 블록의 회전효과가 고려되어야 한다. 본 시험에서는 ASTM D5528-01 제공되는 로딩블록에 따른 보정식을 이용하였다.

본 시험에 모우드 I 층간파괴인성 평가를 위하여 사용된 식을 식(2)에 나타내었다.

$$G_{IC} = \frac{3P_C\delta}{2ba_{eff}}[1 - \frac{3}{10}(\frac{\delta}{a_{eff}})^2 - \frac{3}{2}(\frac{\delta t}{a^2_{eff}})]$$

(2)

2.3 DCB test

시험은 아래와 같은 절차로 진행되었다.

① DCB 분리부 끝단에 로딩블록을 부착

② 인장시험기와 로딩블록을 연결

③ DCB 끝단에 인장하중 부여

④ 균열이 성장되었을 때 DCB의 양쪽 끝단의 변위, 하중, 균열의 길이 기록

시험은 4가지 종류에 대하여 각각 4차례 실시되었다. 시편의 끝단과 Loading block은 록타이드 401 접착제를 이용하여 부착하였으며 하중은 1mm/min 변위제어를 통하여 부과하였다. 50kN의 로드셀을 이용하여 0.5Hz로 하중과 변위를 기록하였으며 시편의 측면에는 1mm scale이 표시된 스케일 바를 부착하여 균열의 길이를 1/10mm까지 측정하였다. 시험이 진행되는 동안 실체현미경을 통하여 시편의 측면에서 균열의 첨단의 변화영상을 기록하여 균열길이 측정에 정확을 기하였다. 그림 3.은 DCB test를 위하여 설치된 장비들이다.

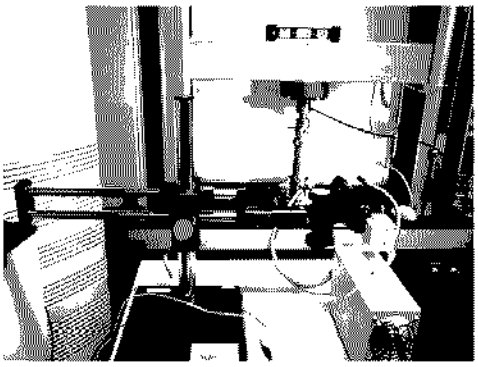


그림 3. setting equipments for DCB test.

2.3 FE Model

섬유직물 복합재의 층간파괴거동의 특성을 파악하기 위하여 DCB test의 FE 해석을 수행하였다. FE 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.8-1을 이용하였다. 상하부에 분리된 한쌍의 빔은 1,170개의 4절점 평면요소(S4R)로 구현하였으며 파괴가 전파될 영역은 754개의 두께가 없는 3D형태의 접착요소(COH3D8)을 이용하여 Tie constraint 로 연결하였다. 시편 끝단의 로딩블럭이 접합부에 해당하는 영역에 상하 방향으로 각각 15mm의 변위를 가하였다. 구현한 모델의 형태를 그림 4.에 나타내었다.

빔 부위에는 도표 1.에 있는 carbon/epoxy와 glass/epoxy의 물성을 10층 적층된 ply 단면으로 부여하였다. 적층각은 실제와 같게 모두 0°로 하였다. 접착요소부에는 시험을 통하여 얻어진 파괴인성을 부여하였으며, 접착요소의 강성은 106N/mm3을 부여하였다. 접착요소의 강도는 parameter study를 통하여 구하였다. solver는 ABAQUS standard을 이용하였으며, 비선형 해석을 적용하였고, Time period는 50을 부여하였다. 도표 3.에 입력된 물성을 정리하였다.

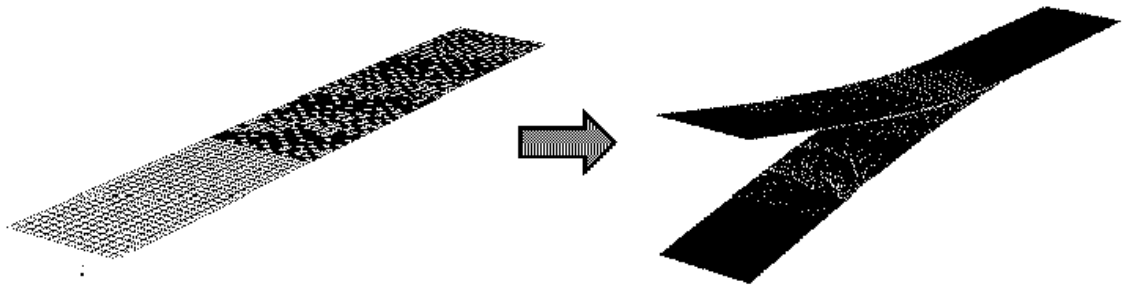


그림 4. FE Model

도표 3. FE 모델에 입력된 물성

	Fracture Toughness for Mode I (measured value)	Cohesive strength (parameter study)	Cohesive stiffness
	G_{Ic}(N/mm)	σ_{Ic}(MPa)	K_I(N/mm^3)
carbon/epoxy	0.846	45.36~0.4636	10^6
glass/epoxy	1.034	45.36~0.4636	10^6

3. 시험 결과

3.1 DCB test

그림 4.는 실체현미경을 통하여 관측된 시편 측면에서 관찰한 균열의 사진이다. 균열의 첨단이 명확히 보이며 아래 부착된 스케일바를 이용하여 균열의 길이를 측정할 수 있다. 그림 5.는 각각의 시험에 대한 하중-변위 선도이다. 모든 시험은 전형적인 섬유직물복합재의 특성인 불안정한 균열의 전파를 보이고 있다. 도표 4.에 균열이 진행되는 최대 하중을 나타내었다. 균열이 일어나는 하중의 최대값은 carbon/epoxy가 87.7N, glass/epoxy는 66.5N로 나타났다. carbon/ epoxy는 불안정한 균열이 전파되었으며, glass/epoxy는 비교적 안정적인 균열전파 양상을 보인다. 이는 재료의 강성에 기인한 것으로 보인다. 점진적인 균열 전파 거동을 확인하기 위하여 균열이 일어난 위치의 선형 추세선을 그려보았다. carbon/epoxy는 열림변위가 증가할수록 균열이 발생하는 하중의 크기가 급격히 낮아졌으며, glass/epoxy의 경우는 상대적으로 완만하게 낮아지는 경향을 보였다.

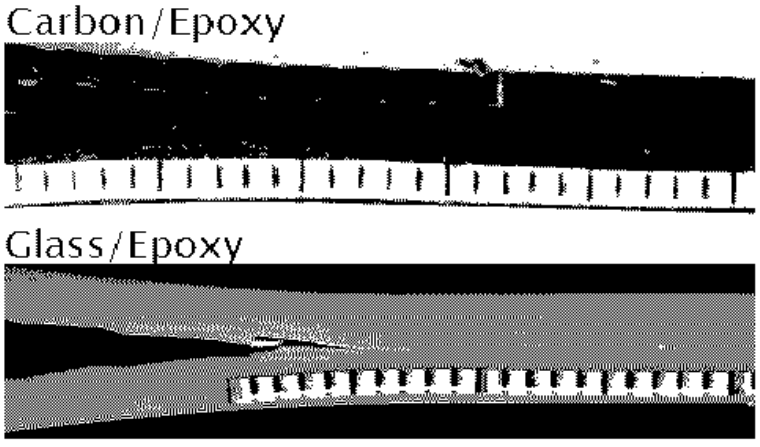


그림 4. 시편 측면에서 관찰한 크랙의 진전 형상

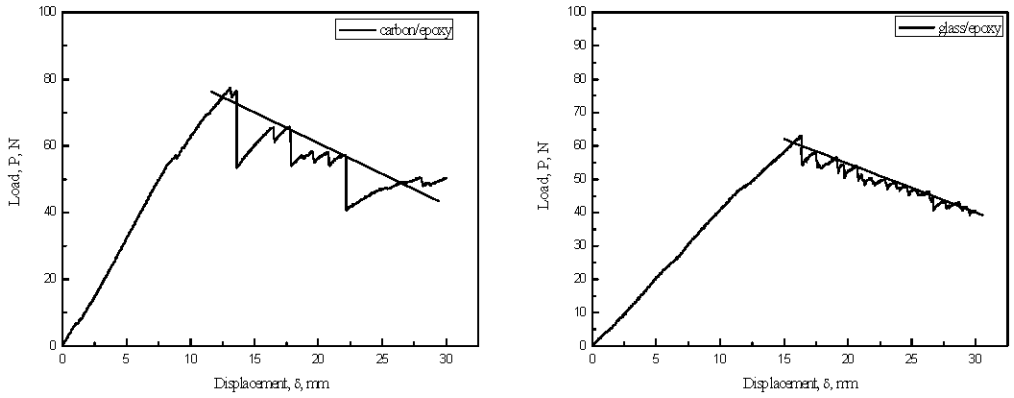


그림 6. 하중-변위 선도

도표 4. 균열이 진전하는
최대 하중

Material	Carbon/ Epoxy	Glass/ Epoxy
Max. Load	76.8N	62.9N

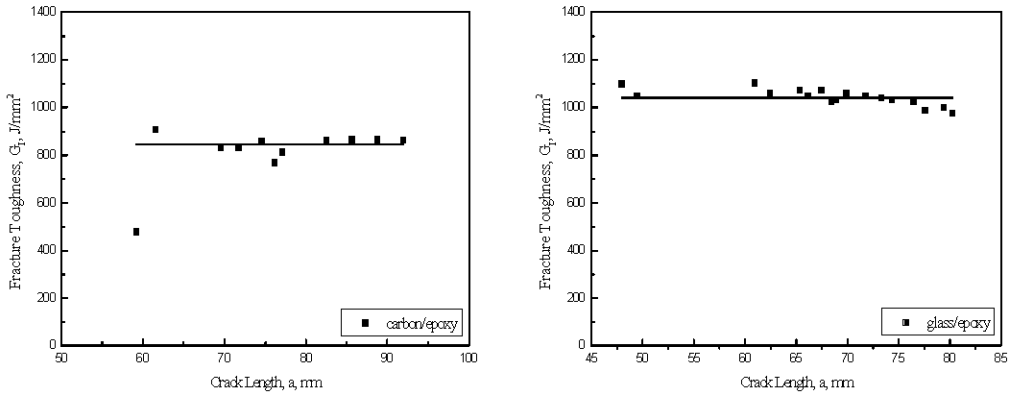


그림 7. 모우드 I 층간파괴인성

측정된 하중과 변위, 균열의 길이로부터 재료별 모우드 I 층간파괴인성을 구하여 그림 7.에 나타내었다. carbon/epoxy, glass/epoxy, 균열길이와 상관없이 비교적 균일한 값을 나타냈다. glass/epoxy의 층간파괴인성이 평균 1,042J/mm2 으로 높게 나타났고, carbon/epoxy의 경우 845.7J/mm2 으로 비교적 낮았다.

3.2 FE 해석 결과

FE 해석 결과의 검증을 위하여 측정된 하중-변위 선도와 비교하였다. 층간파괴강도를 결정하기 위하여 parameter study를 하였다. 사용된 수지(RS1222)의 파괴강도의 100%, 10%, 1%를 입력하여 FE 해석결과의 하중변위 선도를 비교하였다. 그림 8.에 결과를 내타내었다. 두 경우 모두 수지의 파괴강도의 10%를 입력하였을 때, 실험결과와 가장 일치했다.

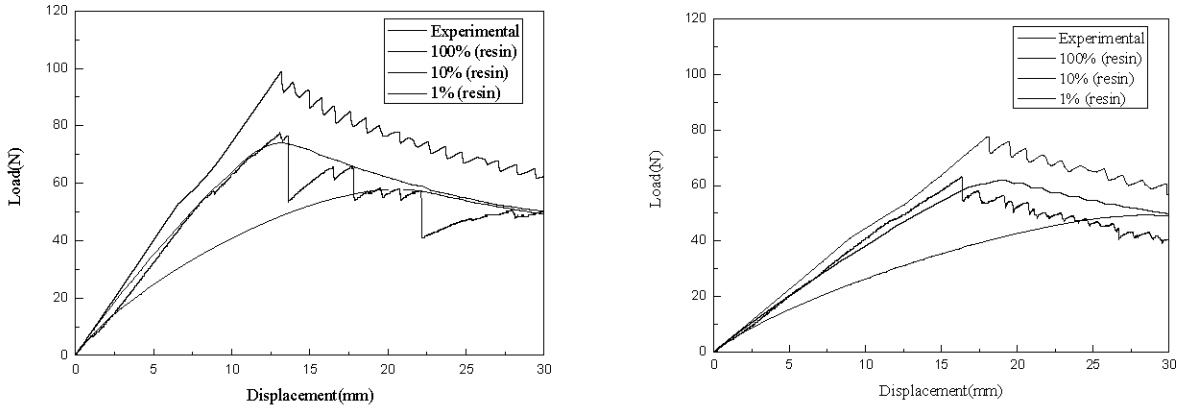


그림 8. 실험결과와 FE해석과의 층간파괴거동 비교

4. 결 론

carbon/epoxy와 glass/epoxy의 DCB test를 실시하였다. carbon/epoxy의 층간파괴가 진전되는 최대하중은 76.8N, glass/epoxy는 65.9N이였다. 층간파괴인성은 carbon/epoxy가 평균 0.846 N/mm, glass/epoxy는 1.034N/mm를 나타내었다.

두 시편 모두 불안정한 층간파괴진전양상을 보였다. 특히 carbon/epoxy의 경우 glass/epoxy에 비하여 매우 불안정한 진전양상을 보였다. 이는 재료의 강성과 연관이 있는 것으로 보인다.

측정된 층간파괴인성을 이용하여 FE해석을 실시하였다. 두 경우 모두 수지의 파괴강도의 10%를 층간파괴강도로 입력하였을 때 실험결과와 가장 비슷한 거동을 보였다.

접착요소를 이용하여 섬유직물복합재의 층간파괴거동의 예측이 가능하였다.

참고문헌

1) 김정석, 정종철, 이상진 (2005), “하이브리드 복합재 철도차량 차체에 대한 시험적 연구,” 한국복합재료학회지, 제 18권, 제 6호, pp. 19 – 25.
2) 윤성호, 허광수, 정종철, 김정석, 한성호 (2005), “틸팅차량 차체용 복합재 구조재에 대한 모우드I 변형 하의 손상허용 평가 기법 연구,” 한국철도학회논문집, 제 8권, 제 6호, pp.573-580.
3) Andras SZEKRENYES, "Overview on the experimental investigations of the fracture toughness in composite materials," HEJ.
4) Nidal Alif, Leif A. Carlsson., John W. Gillespie, Jr. (1997), "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 for Testing Materials, pp. 82-106..
5) Dan Mihai Constantinescu, Nicolae Constantin, Thomas Goss, "Experimental evaluation of Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of textile composites,".
6) Panuwat Suppakul, Sri Bandyopadhyay (2002), "The effect of weave pattern on the mode-I

interlaminar fracture energy of E-glass/vinyl ester composites," Composites Science and Technology, vol 62, pp. 709-717.

7) Adrians F Gill, Paul Robinson, Silvetre Pinho (2009), "Effect of variation on fibre volume fraction on Mode I & II delamination behaviour of 5HS woven composites manufactured by RTM," Composites Science and Technology,

8) Emile S. Greenhalgh, Charlotte Rogers, Paul Robinson (2009), "Fractographic observations on delamination growth and the subsequent migration through the laminate," Composites Science and Technology

9) J. W. H. Yap, M. L. Scott, R.S. Thomson and D. Hachenberg (2002), "The analysis of skin-to-stiffener debonding in composiye aerospace structures." Composite Structures, Vol. 57, No. 1, pp 425-435.

10) J. W. H. Yap, M. L. Scott, R.S. Thomson and D. Hachenberg (2004), "Influence of postbucking behaviour of composite stiffened pannels on the damage criticality," Composite Structures, Vol.66, pp 197-206

11) R. Krueger, M. K. Cvikovich, T. K. O'Brien and P. J. Minguet (2000), " Testing and Analysis of composite Skin/Stringer Debonding Under Multi-Axial Loading," Journal of composite Materials, Vol.34 No. 15, pp. 1263-1300.

12) P.P Camanho, C. G. Davila and S. T. Pinho (2004), "Fracture analysis of composite cocuredstructural joint using decohesive element," Fatigue Fract. Mater. Struct., 27, pp. 745-757.

13) ASTM D5528-01 (2001), "Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-Reinforced polymer matrix Composites," American Society for Testing Materials, Vol. 15.03.