

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 In this study, DCB(double cantilever beam) specimens of woven fabric carbon/epoxy and glass/epoxy were manufactured and mode I fracture toughness of specimen was measured according to ASTM 5528-01. And FE analysis was conducted in the same condition and evaluated the behavior of delamination analytically. Mode I fracture toughness measured by test was 845.7 J/m² in the case carbon/epoxy and that of glass/epoxy was 1,042 J/m². FE analysis was conducted using cohesive elements for adhesive layer and applied measured fracture toughness. To verify the result of analysis, the reaction force measured at the end of specimen and that calculated by Timoshenko beam theory were compared. The numerical results show good agreements with the measured one.

Keywords : composite, delamination, mode I, DCB(double cantilever beam) test, cohesive element

요 지 본 연구에서는 직물 탄소/에폭시와 유리/에폭시의 DCB(double cantilever beam)시편을 제작하여 ASTM 5528-01에 준하여 모우드 I 층간파괴인성을 측정하고, 이와 동일한 조건의 유한요소해석을 수행하여 층간파괴거동을 해석적으로 평가하였다. 시험에 의하여 측정된 층간파괴인성은 탄소/에폭시는 평균 845.7J/m², 유리/에폭시는 1,042 J/m²였다. 유한요소 모델은 접착요소를 이용하여 층간파괴를 구현하였고, 측정된 층간파괴인성을 부여하였다. 해석 결과의 검증에 위하여 시험을 통하여 측정된 시편 끝단의 반력과 Timoshenko 빔 이론을 통하여 계산된 결과를 비교하였다. 측정된 결과와 해석결과는 유사하였다.

주 요 어 : 복합재, 층간파괴, 모우드 I, DCB test, 접착요소

1. 서 론

속도향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선, 연료저감, 유지보수 개선등의 목적에 따라 철도산업에 복합재의 적용이 활발하다. 한국형 킬링열차에 이미 적용되어있는 복합재는 경량전철, 모노레일, 저상버스 등의 차체에도 일반화 되었으며, 대차등의 대형 구조물, 충돌흡수장치등의 특수구조

물에 대한 적용 연구도 활발히 진행되고 있다[1]. 그러나 활발한 적용 연구와는 달리 복합재에서 흔히 일어날 수 있는 층간파괴에 대한 규명 및 예측 기법 연구는 아직 미흡한 실정이다. 경사와 위사를 교차시킨 섬유직물복합재(woven fabric composites)는 비강성, 피로 특성, 내부식성, 치수안정성이 우수한 기존복합재의 일반적인 장점을 지니면서도 횡방향층내파괴에 대하여 높은 저항성을 지니는 장점이 있다[2]. 복합재의 층과 층사이인층간면은 수지가 지배적인 영역으로 강화섬유보다 훨씬 낮은 하중 지지능력으로 인하여 균열이 형성될 우려가 높은 부위이다. 섬유직물 복합재는 단방향섬유 복합재(unidirectional composites)에 비해 층간파괴(delamination)진전 억제 능력이 높은편이나, 일반적

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원
E-mail : sckim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5679 FAX : (031)460-5289

* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

인 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 인자들에 의해 좌우된다[3]. N. Alif. 등 [4]은 단방향섬유복합재의 층간파괴인성 측정 기준인 ASTM D5528-01와 같은 방법으로 직조된 탄소/에폭시 복합재의 모드 I, II의 층간파괴인성을 측정하였다. N. Alif.의 측정 방법은 섬유직물 복합재의 층간파괴인성 측정의 기준으로 참고 되고 있다. Constantinescu 등[5]은 섬유직물 복합재의 층간파괴인성을 여러번의 시험을 거쳐 결정하는 round-robin 방식을 이용하여 제시하였다. Suppakul 등[6]은 섬유직물복합재의 위사의 패턴을 변화하며 모드 I 층간 파괴인성을 측정하여 비교하였다. Yoon 등[2]은 한국형 킬팅차량에 적용된 탄소섬유직물/에폭시 복합재의 초기균열 생성을 위하여 삽입된 테프론 필름의 두께에 따른 모드 I 층간파괴인성을 비교하였다. 또한 NL(Nonlinear)점의 생성 원인 등을 밝혀내었다. Szenkrenes 등[3]은 파괴인성 측정에 관련된 시험법을 정리하고 영향을 끼치는 섬유 배열, 측정방법, 온도, 변위속도등의 인자를 조사하였다. Gill 등[7]은 FVF에 따른 모드 I, II, Mixed 값을 비교하고 X-선 관찰을 통하여 균열을 관찰하였다. Greenhalgh 등[8]은 층간파괴면의 표면현미경 관찰을 통하여 다양한 층간파괴 메커니즘을 관찰하였다.

한편으로 층간파괴거동을 다양한 요소들을 사용하여 해석적으로 예측하려는 시도가 있어왔다. Yap과 scott 등 [9,10]은 보강재를 갖는 보강 패널의 초기 층간 분리 균열을 모사하여 좌굴 후 거동을 해석하고 분리파손의 성장여부를 예측하였다. Krueger 등[11]은 보강재의 분리강도 특성을 조사하기 위해 스킨-플랜지 시편을 제안하고 인장, 굽힘, 혼합 하중 시험을 수행하고 분리 파손 특성을 연구하였다. 또한 2차원 평면 변형률 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 철도차량에 주로 쓰이고 있는 탄소/에폭시와 유리/에폭시 섬유직물복합재를 선정하여 층간균열이 형성된 DCB(Double Cantilever Beam)시편을 제작하고, ASTM 5528-01[13]에 준하여 모드 I 층간파괴인성을 측정하였다. 또한 이와 동일한 조건의 유한요소해석을 실시하여 시험치와 Timoshenko 빔 이론을 통하여 계산된 층간 파괴거동을 비교하였다.

2. 모드 I 층간파괴인성 측정

2.1 모드 I 층간파괴인성

본시험은 단방향섬유복합재 적층판을 대상으로 하는 ASTM D5528-01을 기준으로 측정하였다. Fig. 1는 모드 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.

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

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

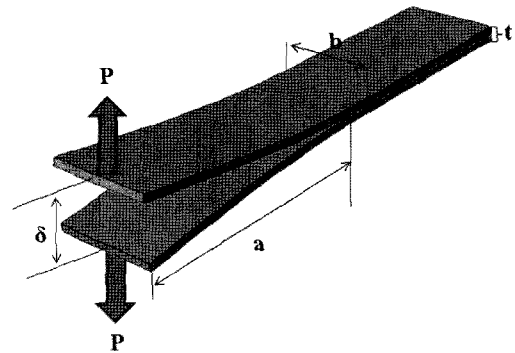


Fig. 1. Illustration of DCB test

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

시편과 시험장비와의 연결을 위하여 지그를 사용하였다. 지그는 12.85mm × 12.85mm × 25mm의 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 지그의 회전효과가 고려되어야 한다. 본 시험에서는 ASTM 5528-01에서 제공되는 지그에 따른 보정식을 이용하였다.

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

$$G_{IC} = 3P \frac{\delta}{2ba_{eff}} \left[1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a_{eff}} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta t}{a_{eff}^2} \right) \right] \quad (2)$$

GIC : 모우드 I 층간파괴인성

P : 시편 끝단의 하중

δ : 열림변위

a_{eff} : 측정된 균열의 길이

b : 시편의 폭

t : 지그 회전축의 중심부터 DCB의 외팔보의 중심까지의 거리(1/2지그두께 + 1/4 시편 두께; Fig. 2에 표시)

2.2 시편

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

Table 1. Mechanical properties of materials

properties		carbon/epoxy	glass/epoxy	resin (RS1222)
tensile modulus (GPa)	warp	68.83	26.14	3.4
	fill	69.25	25.5	
shear modulus (GPa)	warp	6.85	7.83	2.1
	fill	8.41	7.09	
tensile strength (MPa)	warp	1061.4	538.09	37.5
	fill	908.8	339	
shear strength (MPa)	warp	96.08	77.29	36.1
	fill	94.07	76.77	

본 연구에 적용된 시편의 형태는 길이 180mm, 폭 25mm의 DCB(Double Cantilever Beam)로, 프리프레그를 20층을 적층하여 성형하였고 성형시 시편의 중앙층에 테프론 필름(두께 20 μ m, Dupont, USA)을 삽입하여 65mm의 초기 균열을 생성하였다. 시편의 두께(h)는 탄소/에폭시는 4mm, 유리/에폭시는 4.49mm이며 인장시험기와 연결을 위한 지그 부착 시 Fig. 2과 같은 형태를 나타낸다.

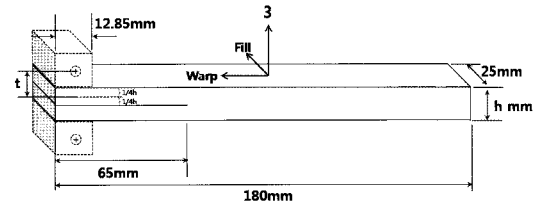


Fig. 2. Schematic diagram of DCB specimen

2.3 시험절차

시험은 아래와 같은 절차로 진행되었다.

- ① DCB 분리부 끝단에 지그를 부착
- ② 인장시험기와 지그를 연결
- ③ DCB 끝단에 인장하중 부여
- ④ 균열이 성장되었을 때 DCB의 양쪽 끝단의 변위, 하중, 균열의 길이 기록

시험은 탄소/에폭시와 유리/에폭시에 대하여 1차례 실시되었다. 시편의 끝단과 지그는 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 1/10mm 단위까지 측정하였다. 시험이 진행되는 동안 실체현미경을 통하여 시편의 측면에서 균열의 침단의 변화영상을 기록하여 균열 길이 측정에 정확을 기하였다. Fig. 3은 모우드 I DCB 시험을 위하여 설치된 장비들이다.

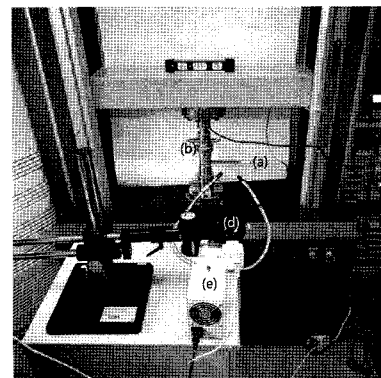


Fig. 3. Experimental setup for DCB test. (a) DCB specimen, (b) arms of tensile machine, (c) load cell, (d) optical scope, (e) illuminator.

2.4 측정결과

측정된 하중과 변위, 균열의 길이로부터 재료별 모우드 I 층간파괴인성을 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 탄소/에폭시와 유리/에폭시 모두 균열길이의 상관없이 비교적 균일한 값을 나타냈다. 유리/에폭시의 층간파괴인성이 평균

1,042J/m²으로, 탄소/에폭시의 경우 845.7J/m²으로 나타났다. 유리/에폭시는 탄소/에폭시보다 낮은 하중에서 균열이 진전하지만 크랙의 진전길이가 짧은 안정한 양상을 보여 파괴인성의 값은 더 높은 것으로 사료된다.

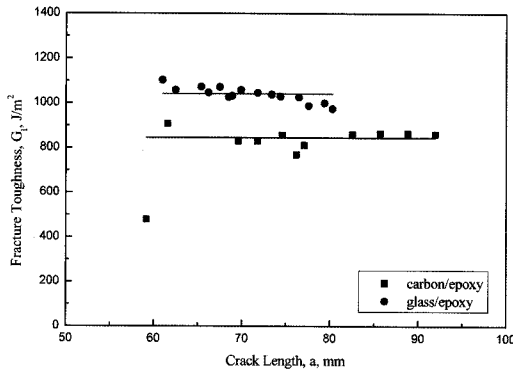


Fig. 4. Mode I fracture toughness

3. 유한요소해석과 Timoshenko 빔 이론

3.1 접착요소

접착요소는 접착제를 이용하여 접착된 부위, 복합재 적층판의 층간파괴, 개스킷등 두께가 없거나 매우 얇은 층의 유한 요소 해석을 하기 위하여 개발되었다. 한 개의 층으로 이루어진 접합요소는 층간파괴가 일어날 위치에 미리 배치된다. 변형이 일어나면 접착요소는 층간파괴강도이하의 응력에서는 탄성거동, 층간파괴강도이상의 응력에서는 물성저하를 일으키며 층간파괴거동을 모사한다.

Fig. 5은 선형물성저하를 가정하였을 시, 접착요소와 물성의 관계이다. 열림 변형이 주어졌을 시 접착요소의 각 위치별 물성과의 관계를 간략하게 설명하였다.

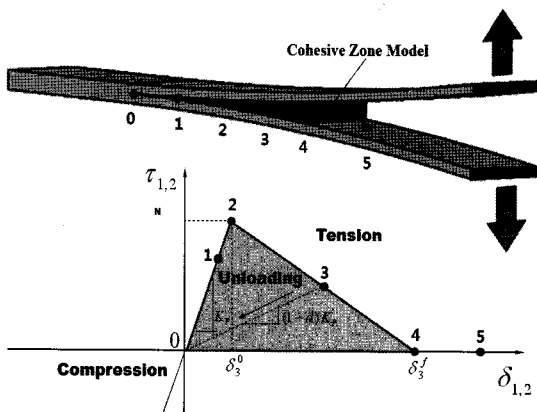


Fig. 5. Comparison of relation of cohesive element and linear softening

2-4의 구간을 흔히 CZ(cohesive zone)이라하며 신뢰할 만한 층간파괴 해석 결과를 얻기 위해선 이 구간에 접착요

소가 최소 3개 이상 배치되어야 하는 것으로 알려져 있다 [14].

3.2 Timoshenko 빔 이론

Timoshenko 빔 이론은 보의 두께를 고려한 식으로 일반적인 Euler 빔이론보다 정확한 것으로 알려져 있다.

0 point : 응력이 가해지기 전의 상태

1 point : 층간파괴강도 이하의 응력이 가해진 상태. 접착 요소는 0-2 라인을 따라 탄성거동을 보인다.

2 point : 물성저하가 일어나기 시작 이 위치에서의 응력은 층간파괴강도이다.

3 point : 물성저하가 진행되면서 변형하는 구간. 만일 이 위치에서 응력을 제거하였다가 다시 가하면 접착요소는 0-3라인을 따라 탄성거동을 보인다.

4 point : 물성이 0이 되는 위치. 분리되기 직전의 상태이다.

5 point : 완전히 분리된 상태.

Timoshenko 보 이론에 의하여 계산된 반력은 아래 식 (3)과 같다[14].

$$P^{Timo} = \frac{bh}{2a} \sqrt{\frac{G_c E h}{3(1 + \frac{(1+\nu)}{5})(\frac{h}{a})^2}} \quad (3)$$

P^{Timo} 는 반력 b 는 시편의 폭 h 는 높이 a 는 크랙의 길이이다.

3.3 유한요소해석모델

섬유직물 복합재의 층간파괴거동의 특성을 파악하기 위하여 DCB 시험에 대한 FE 해석을 수행하였다. FE 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.7-1을 이용하였다. 상하부에 분리된 한쌍의 빔은 1,170개의 4절점 쉘요소(S4R)로 구현하였으며 파괴가 전파될 영역은 754개의 두께가 없는 3D형태의 접착요소(COH3D8)를 이용하여 구속조건(tie constraint)로 연결하였다. 시편 끝단의 로딩블럭이 접합부에 해당하는 영역에 상하 방향으로 각각 15mm의 변위를 가하였다. 구현한 모델의 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

빔 부위에는 Table 1에 있는 탄소/에폭시와 유리/에폭시의 물성을 10층 적층된 단면으로 부여하였다. 적층각은 실제와 같게 모두 0°로 하였다. 접착요소부에는 시험을 통하여 얻어진 파괴인성을 부여하였으며, 접착요소의 강성은 106N/mm³, 접착요소의 강도는 4.54MPa를 부여

하였다. 손상의 전파로 인한 물성저하를 결정하기 위하여 BK(Benzeggagh Kenane) 모드 거동을 이용하였다[15]. Table 2은 입력된 변수이다.

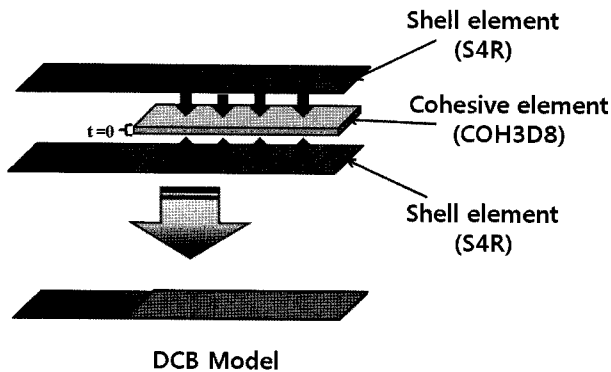


Fig. 6. Assembling of DCB model using cohesive elements

Table 2. Parameters for FE analysis

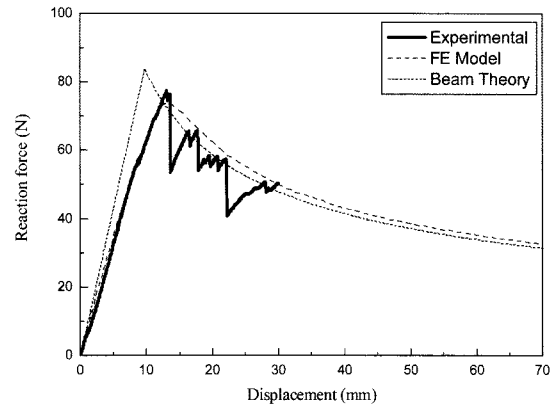
	Fracture Toughness for Mode I	Cohesive strength	Cohesive stiffness
	$G_{IC}(J/m^2)$	$\sigma_{IC}(MPa)$	$KI(N/mm^3)$
carbon/epoxy	845.7	4.54	106
glass/epoxy	1,042	4.54	106

3.4 결과

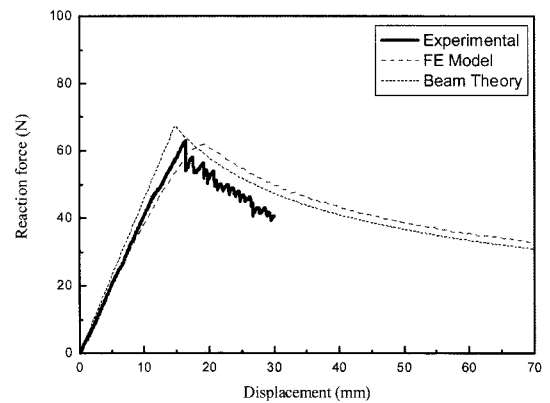
FE 해석 결과의 검증을 위하여 Fig. 7과 같이 유한요소 해석을 통하여 얻어진 시험편 끝단의 반력을 시험치 및 Timoshenko 빔 이론을 이용하여 계산된 값과 비교하였다.

빔이론을 통해서 얻어진 이론치의 경우 시험결과 대비 선형영역에서의 강성과 최대 하중값이 과대평가되는 경향을 보였다. 본 연구에서 수행된 해석 결과의 경우 선형영역의 강성과 최대하중값이 시험치와 거의 일치하였다. 그러나 최대하중 이후, 즉 균열진전이 진행되는 동안 하중변위 선도를 보면 탄소/에폭시의 경우 균열이 불안정하게 전파하여 Fig. 7(a)와 같이 큰 톱니(saw tooth) 형상의 거동을 보였다. 또한, Fig. 7(b)의 유리/에폭시의 경우에도 탄소/에폭시에 비해 균열이 안정적으로 진전했기 때문에 작은 톱니 형상의 거동을 보였다.

그러나, 유한요소해석에서는 이러한 불안정한 균열진전 거동을 모사하지 못하기 때문에 Fig. 7과 같이 부드러운 곡선형태의 거동을 보였다. Fig. 8은 탄소/에폭시 DCB에 대한 모우드 I 중간분리 균열진전거동 시험시 시험편의 변형양상을 유요소해석 결과를 비교한 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 DCB시험편의 변형형상이 시험치와 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) carbon/epoxy



(b) glass/epoxy

Fig. 7. Comparison of reaction force-displacement curves for carbon/epoxy and glass/epoxy

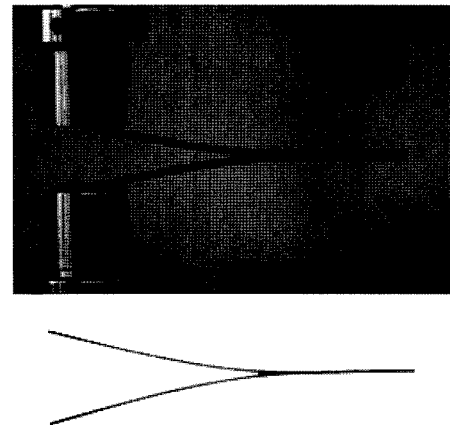


Fig. 8. Comparison of the deformed shape of DCB specimen and FE model

Fig. 9는 유한요소해석을 통해 얻어진 접합면의 균열 전파 형상이다. DCB시험편의 양 끝단의 열림변위가 증가함에 따라 층간균열은 시험편의 중앙부에서 먼저 진전하고 이후에 측면으로 전파되면서 진전하였다. 이것은 시험에서 관찰된 현상과 잘 일치하였다.

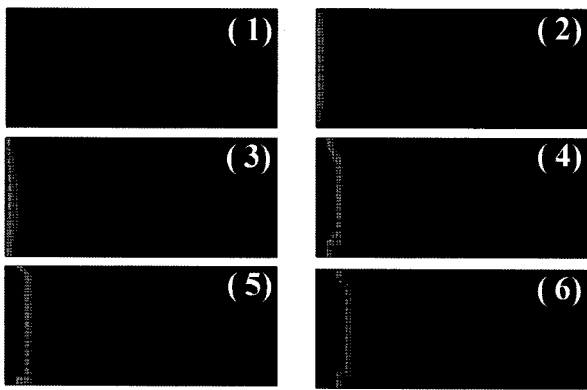


Fig. 9. Crack propagation process of adhesive layer (Red is perfectly separated)

4. 결론

1. 탄소/에폭시와 유리/에폭시의 DCB 시험을 실시하였다. 탄소/에폭시의 층간파괴가 진전되는 최대하중은 76.8N, 유리/에폭시는 65.9N이었다. 층간파괴인성은 탄소/에폭시가 평균 845.7J/m², 유리/에폭시는 1,042J/m²를 나타내었다.
2. 두 시편 모두 불안정한 층간파괴진전양상을 보였다. 특히 탄소/에폭시의 경우 유리/에폭시에 비하여 매우 불규칙한 진전양상을 보였다. 이는 섬유의 강성과 연관이 있는 것으로 판단된다.
3. 측정된 층간파괴인성을 이용하여 FE해석을 수행하였다. 그 결과 열림변위에 따른 시편 끝단의 반력 및 모우드 I층간균열 진전 거동을 유사하게 예측할 수 있었다. 그러나 실제 시험에서는 균열은 일방향 복합재와 달리 불규칙하게 전파되는데 비하여, 유한요소 해석에서는 이를 정확히 묘사하는데는 한계가 있었다. 향후, 이러한 불규칙한 균열진전거동을 정확히 예측하기 위해서는 유한요소해석에서 직조패턴의 효과를 고려할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

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 구조체에 대한 모우드 변형 하의 손상허용 평가 기법 연구,” 한국철도학회논문집, 제8권, 제6호, 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, in press.
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, in press.
9. J. W. H. Yap, M. L. Scott, R.S. Thomson and D. Hachenberg (2002), “The analysis of skin-to-stiffener debonding in composite 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 postbuckling 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., Vol. 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.
14. Ted Diehl(2007), “On using a penalty-based cohesive-zone finite element approach, Part I : Elastic solution benchmarks,” J Adhes, Vol 28, pp. 237-255
15. P.P Camanho, C. G. Davila and M. F. De Moura(2002), “Numerical Simulation of Mixed-mode Progressive Delamination in Composite Materials,” Journal of composite Materials, Vol. 37, No. 16/2003, pp. 1415-1424.

접수일(2009년 6월 19일), 수정일(2009년 7월 13일), 게재확정일(2009년 8월 26일)