

# 차체 구조용 섬유직물 복합재의 평면 전단(mode II) 층간분리 거동에 대한 시험적 연구

## A Study on Sliding Shear(Mode II) Delamination of Woven Fabric composites for Carbody Structure

김승철†                      김정석\*                      윤혁진\*\*                      서승일\*\*\*  
Seung-chul Kim    Jung Seok Kim    Hyuk Jin Yoon    Sung-Il Seo

### ABSTRACT

Mode II interlaminar fracture toughness was measured and fractured surfaces were observed of carbon/epoxy and glass/epoxy woven fabric composites for carbody structure. Woven fabric carbon/epoxy and glass/epoxy composites that made with prepreg and epoxy resin(RS1222) are used in carbody structure of Korean tilting train(TTX) and low floor bus. ENF(End Notched Flexure) specimens having 120mm x 20m x 5mm shape and 35mm initial crack were made with each composites and three point bending tests according to ASTM D790 were conducted for these specimens. Crack lengths in tests were recorded using optical microscope and digital camcorder. NL(Non Linear), 5% offset and Max. load points in load -displacement curves were checked and mode II interlaminar fracture toughness of these points were calculated and compared. Fractured surfaces of specimens were observed using optical microscope and mode II delamination behavior of each composites was discussed.

### 1. 서 론

속도향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선, 연료저감, 유지보수 개선등의 목적에 따라 철도산업에 복합재의 적용이 활발하다. 특히 탈딩열차, 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 강화 섬유보다 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 같은 방법으로 직조된 Carbon/Epoxy 복합재의 모드 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 제

† 김승철 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원  
E-mail : sckim@krti.re.kr  
TEL : (031)460-5679 FAX : (031)460-5289

\* 김정석 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

\*\* 윤혁진 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

\*\*\* 서승일 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 수석연구원

시하였다. 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 생성 원인 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.

한편으로 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 분리 파손의 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 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 탄소섬유직물 에폭시 적층 시편을 이용한 ENF(End Notched Flexure) 시험의 유한요소해석을 수행하였다. 적층빔은 shell 요소를 이용하고, 접합층은 cohesive 요소를 이용하여 ENF 시편을 구현하였으며 이와 동일한 조건에서 실험한 Yoon의 mode II 층간파괴인성 측정결과를 부여하였다. Yoon의 실험결과에 따른 하중-변위 선도를 이용하여 모델을 검증하고 층간파괴 거동을 비교하였다.

## 2. 시편 및 시험

### 2.1 ENF specimen

carbon/epoxy 시편은 토레이공업(Toray Industries, Inc. (Japan))에서 제작된 플레인 위브(plain weave)로 짜여진 T700 시리즈 3K 탄소섬유가 사용되었고, glass/epoxy 시편은 역시 플레인 위브로 짜여진 K126#이 사용되었다. 에폭시는 한국화이바에서 철도차량용으로 개발한 RS1222가 모든 시편에 사용되었다. ENF 시편의 크기는 25mm x 120mm x 5mm 로 35mm의 초기 크랙을 중앙부 시편 끝단에 갖고 있으며, 이 초기 크랙은 테프론 필름 (thickness - 20 $\mu$ m , DuPont, USA)을 적층시 중앙층에 삽입하여 만들었다. 시편은 오토클레이브를 이용하여 성형하였고 성형 사이클은 20C/min 승온속도로 1350C까지 상승시킨 후 약 한시간 반 동안 유지시켰다. 그 후 1.70C/min의 냉각속도로 상온까지 냉각시켰다. 성형동안 챔버의 압력은 3bar를 유지하였다.

### 2.2 mode II interlaminar fracture toughness

모우드 II 층간파괴인성을 측정하기 위한 ENF 시험의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 모우드 II 층간 파괴시편에서 균열선단이 완전히 고정되어 있는 경우 시편의 컴플라이언스는 식 (1)에 의해, 굽힘 탄성계수는 식 (2)에 의해, 모우드 II 층간파괴인성은 식 (3) 또는 식 (4)에 의해 표현된다.

$$C^0 = \frac{2L^3 + 3a_0^3}{8E_f Bh^3} \quad (1)$$

$$E_f = \frac{2L^3 + 3a_0^3}{8C^0 Bh^3} \quad (2)$$

$$G_{IC}^0 = \frac{9a_0^2 P_C^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (3)$$

$$G_{IC}^0 = \frac{9a_0^2 P_C \delta}{2B(2L^3 + 3a_0^3)} \quad (4)$$

여기서  $L$ 은 양 지지점의 1/2,  $h$ 는 시편 두께의 반,  $a_0$ 는 초기균열길이,  $P_C$ 는 하중-변위 선도에서의 임계하중,  $\delta$ 는 하중 작용점에서의 변위이다.

모우드 II 층간파괴의 불안정한 크랙 진전 및 크랙의 닫힘 현상으로 크랙의 진전을 확인하고 길이를 정의하는 것은 매우 어렵다. 크랙의 진전을 정의하는 방법에는 잘 알려진 두가지 방법이 있다. 첫 번째는 하중-변위 선도에서 비선형이 시작되는 점(NL point)을 크랙의 진전으로 정의하는 것이고 두 번째는 시편의 컴플라이언스를 5% 상승시킨 직선과 하중-변위 곡선의 교차점(5% offset point)이나 최대 하중점(Max.Load point)을 크랙의 진전으로 정의하는 법이다. 그림 2에 모우드 II 시험에서 일반적으로 볼 수 있는 하중-변위 선도과 이들 점을 개략적으로 표현하였다. 비선형점으로부터 계산된 모우드 II 층간파괴인성은 다른 점에서 계산된 값들에 비해 상대적으로 낮은 저평가된 값을 나타낸다. 반면 5% offset 점으로부터 계산된 값은 일반적이며 합리적인 값으로 받아들여진다. 본 실험에서는 NL, 5% offset, Max. load 점으로부터 모우드 II 층간파괴인성을 계산하고 서로 비교하였다.

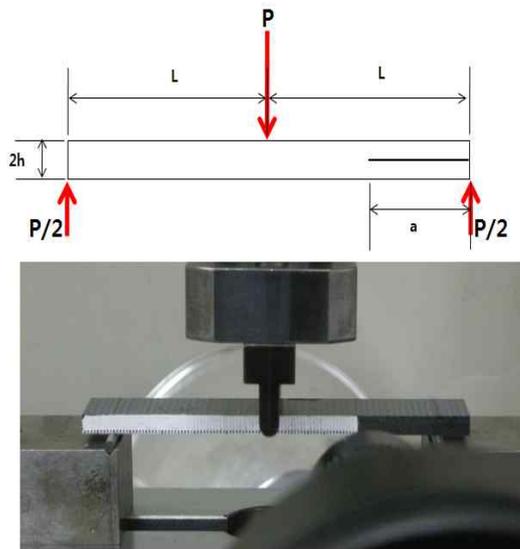


그림 1. ENF 시험의 개략도 및 사진

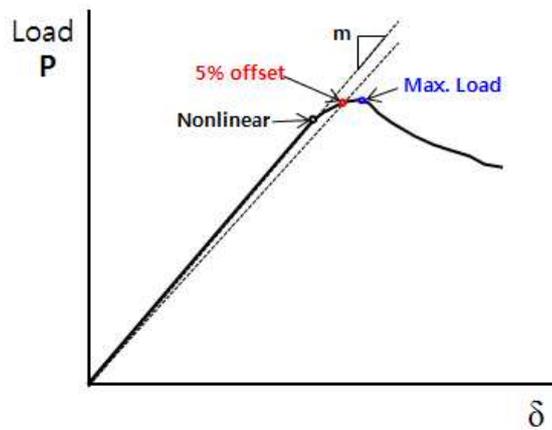
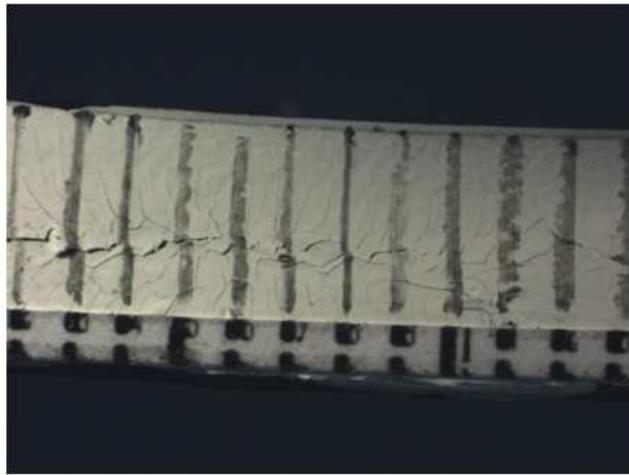


그림 2. ENF 시험에서 일반적인 하중-변위 곡선과 NL, 5%offset, Max. Load 점

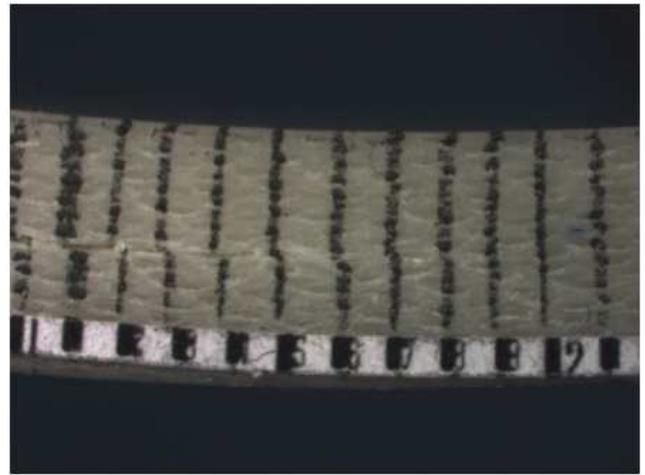
### 2.3 ENF 시험

ENF 시험은 carbon/epoxy와 glass/epoxy 시편 각 1개씩 실시되었으며, ASTM D 790-03에 따라 제작된 3점 굽힘 지그를 이용하였다[14]. 지그의 스펠은 100mm로 시편의 끝으로부터 10mm 떨어진 점을 2mm의 지름을 갖는 롤러로 지지하였다. loading nose를 이용하여 시편의 중앙에 0.5mm/min의 속도로 변위를 부여하였다. 시험 중 하중과 변위는 50kg 용량의 로드셀과 LVDT를 통하여 10 Hz 속도로 수집되었다. 그림 3.에 모우드 2 층간파괴의 균열진전 형상의 사진을 나타내었다. ENF 시험에서 균열닫힘 현상으로 인하여 크랙 끝단의 파악이 매우 어렵다. 특히 carbon/epoxy의 경우 시편의 색상이 검은 색을 띠기 때문에 크랙 끝단의 파악이 더더욱 힘들었다. 본 시험에서는 시편의 측면을 백색으로 도포한 후 1mm간격으로 눈금을 그렸으며, 시험 중 실체현미경을 이용하여 시편의 측면을 확대 녹화하였고, 시

험 후 영상분석을 통하여 굴곡이 생긴 눈금까지 크랙이 진전된 것으로 파악하였다. 시험 후에 시편의 분리된 면을 광학현미경을 이용하여 관찰하고 크랙의 진전 거동을 고찰하였다.



a) carbon/epoxy



b) glass/epoxy

그림 3. 시편 측면에서 관찰한 ENF시험 중 균열의 진전 형상

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 하중 변위 곡선 및 모드 II 층간파괴인성

그림 4는 carbon/epoxy와 glass/epoxy의 ENF 시험중 하중-변위 곡선이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 ENF 시험에서의 하중 변위 곡선은 아래 4가지 단계를 갖는다.

- 크랙의 전파없이 하중이 선형으로 증가되는 탄성영역
- 크랙의 전파가 조금씩 진행되며, 하중-변위 곡선이 최대하중점까지 비선형을 그리는 영역
- 대규모의 크랙의 전파가 하중점 부근까지 진행되어 하중-변위 곡선이 매우 급격히 떨어지는 영역
- 대규모의 크랙의 전파가 진행된 후 크랙의 전파 없이 시편의 굽힘 파괴까지 탄성변형만 진행되는 영역

본 시험에서 하중-변위 곡선은 일반적인 ENF 시험에서의 하중-변위곡선의 형태를 나타내었으며, carbon/epoxy와 glass/epoxy의 NL점에서의 하중은 901.62N과 749.92N, 5% offset 점에서의 하중은 1381.45N과 1135.08N, 최대하중은 각각 1453N과 1193.43N이었다. glass/epoxy의 하중-변위 곡선의 경우 NL점을 지난 후 최대하중까지 불안정한 미세한 크랙진전으로 인하여 하중-변위곡선이 부드럽지 못한 곡선을 보이는 영역이 존재하는데 이 영역이 시작되는 점이 실제 균열이 시작되는 점으로 여겨진다. 이 현상에 대해서는 추가적인 연구가 요구된다.

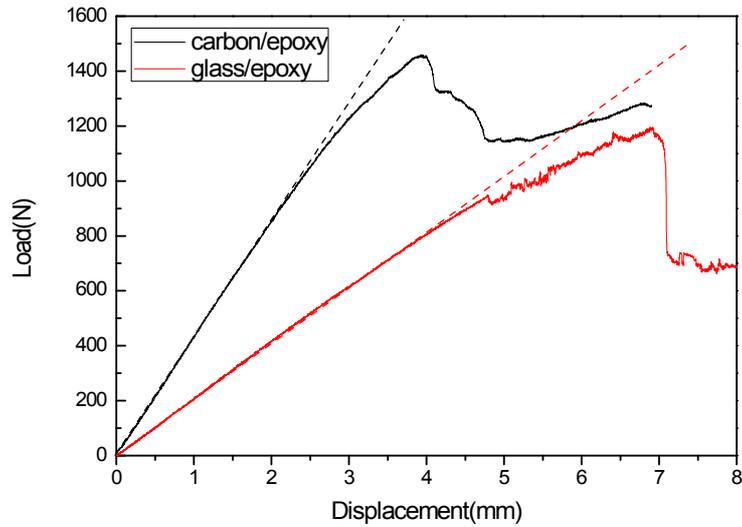


그림 4. 하중-변위 곡선

그림 5는 NL점, 5% offset점, 최대하중점으로부터 계산된 carbon/epoxy와 glass/epoxy의 모드 II 층간파괴인성이다. carbon/epoxy와 glass/epoxy의 모드 II 층간파괴인성은 NL점에서  $951.3 \text{ J/m}^2$ ,  $1317.88 \text{ J/m}^2$ 이었고, 5% offset 점에서는  $2643.97 \text{ J/m}^2$ 과  $3632.22 \text{ J/m}^2$ , 최대하중에서는  $3182.36 \text{ J/m}^2$ 과  $4428.11 \text{ J/m}^2$ 이었다. carbon/epoxy의 각 특이점들의 하중이 glass/epoxy보다 높음에도 glass/epoxy의 변위가 더 컸기 때문에 결과적으로 모드 II 층간파괴인성은 glass/epoxy가 더 높았으며 이는 모드 I 시험결과의 경향과도 일치한다[15]. 각 특이점에서의 파괴인성값은 모드 I 시험결과와 달리 편차가 매우 컸으며 NL/5%offset 비율은 carbon/epoxy가 약 35.98%, glass/epoxy가 36.28%로 비슷한 비율로 나타났다.

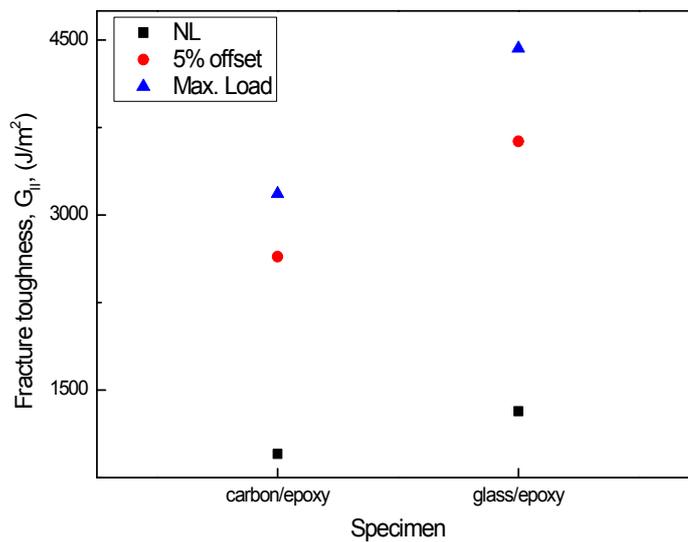


그림 5. mode II 층간파괴인성

### 3.2 분리면 관찰

시험후, 분리면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 그림 6.은 carbon/epoxy와 glass/epoxy의 분리면의 광학현미경 사진이다. (a)와 (b)는 carbon/epoxy의 분리면으로 상면의 섬유층이 노출되고 하면은 레진층이 덮여있다. 이로 미루어 볼 때, carbon/epoxy의 모드 I 층간분리는 레진층 내에서 발생하는 것과 대조적으로 모드 II 층간분리는 섬유와 레진층의 경계면에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 상면 섬유층의 fill 패턴의 끝단이 손상된 것을 확인할 수 있었고, 하면의 레진층에 끊어진 섬유가닥들을 발견할 수 있었다. 이는 모드 II 층간 분리가 진행되며 크랙이 진행된 후 상면과 하면의 마찰에 의한 것으로 사료되며, 상면과 하면의 마찰이 ENF 시험결과에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. (c)와 (d)는 glass/epoxy의 분리면의 광학현미경 사진으로 상면에 섬유층이 노출되고, 하면은 레진층이 있어 carbon/epoxy와 같이 섬유와 레진층의 경계면에서 크랙이 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 carbon/epoxy에서 발생한 것과 같은 마찰에 의한 분리면의 손상은 발견할 수 없었는데, 이는 단위패턴의 크기가 carbon/epoxy에 비하여 상대적으로 작아 마찰저항이 작았기 때문으로 사료된다.

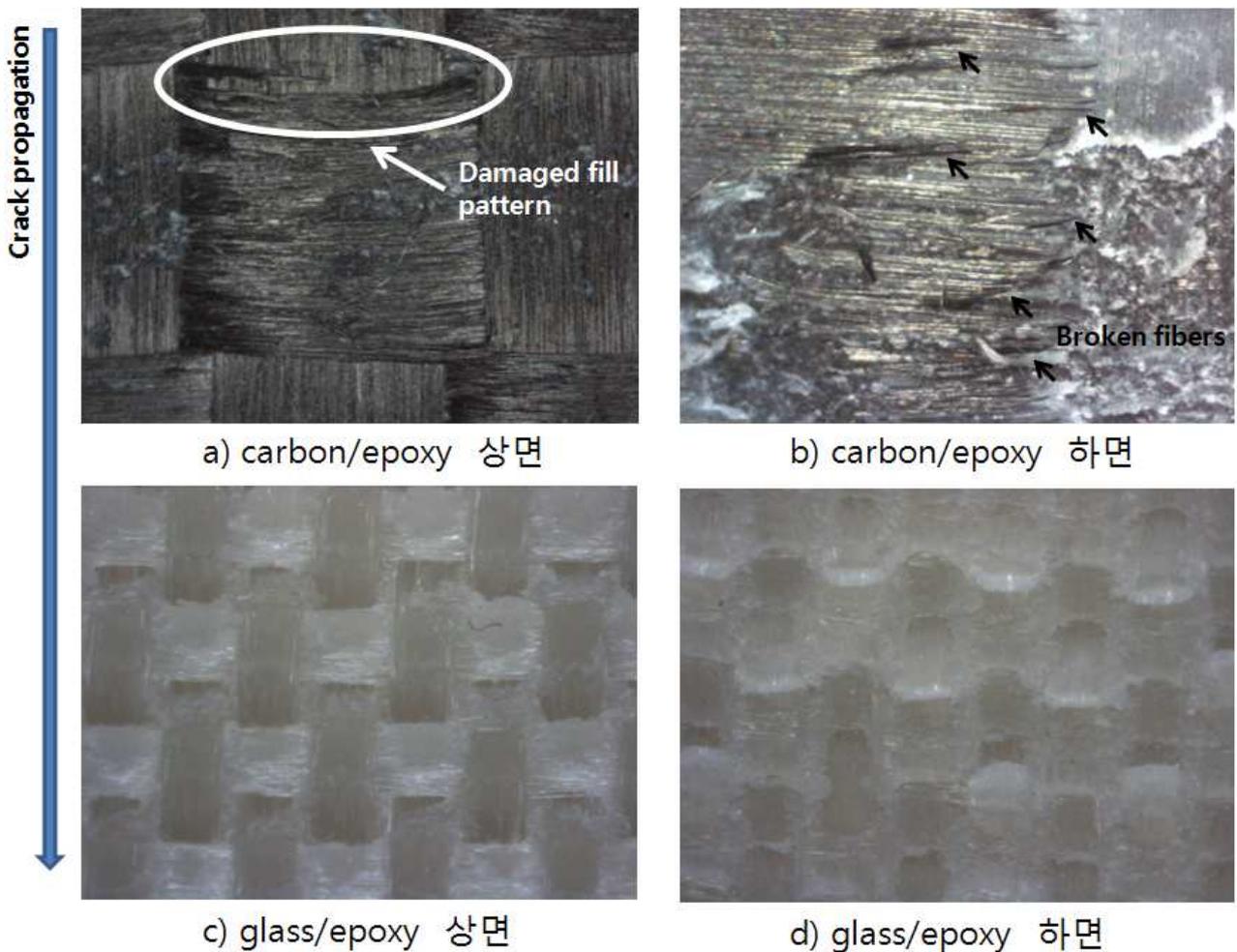


그림 6 분리면의 광학현미경 사진

### 4. 결론

1. carbon/epoxy와 glass/epoxy의 모드 II 층간파괴인성을 측정하였다. carbon/epoxy와 glass/epoxy의 모드 II 층간파괴인성은 NL점에서  $951.3 \text{ J/m}^2$ ,  $1317.88 \text{ J/m}^2$ 이었고, 5% offset 점에서는  $2643.97 \text{ J/m}^2$ 과  $3632.22 \text{ J/m}^2$ , 최대하중에서는  $3182.36 \text{ J/m}^2$ 과  $4428.11 \text{ J/m}^2$ 이었다.

2. carbon/epoxy시편의 경우 ENF 시험후 파단면의 마찰이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 마찰은 시험결과에 영향을 끼쳤을 것으로 사료되며 이에대한 추가 연구가 필요하다.

## 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 변형하의 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 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., 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,
14. ASTM D 790-03 (2003), "Standard test method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials," American Society for Testing Materials,
15. 김승철, 김정석, 윤혁진, 서승일 (2009), “CZM(Cohesive Zone Model)을 이용한 철도차량용 직물 복합재의 모우드 I 층간파괴의 해석적 연구,” 한국철도학회지, 제 12권, 제 5호, pp. 719 - 724.