

## 패치 보수된 샌드위치 복합재 적층판의 압축시 강도회복 평가 Compressive Strength Restoration Evaluation of Sandwich Composite Laminates Repaired by Scarf Method

김정석<sup>†</sup> · 윤혁진\* · 김승철\* · 서승일\*\*

Jung-Seok Kim · Hyuk-Jin Yoon · Seung-Cheol Kim · Sung-Il Seo

**Abstract** This study is for the evaluation of compressive strength restoration of sandwich composite laminates with adhesively bonded scarf patches. It was used in this study that the sandwich composite laminate with an aluminum honeycomb core and CF1263 woven fabric carbon/epoxy faces was applied to the car body structure for Korean tiling train. In this study, it was damaged by low velocity impact and repaired using scarf repair method. Then, the compressive strength restoration of assessed by compressive after impact (CAI) test. From the test, it could be known that the compressive strength was restored up to 72% by only scarf repair method and 91% applied by an extra ply over the undamaged one.

**Keywords** : Composite Material, Carbody, Scarf Repair, Compressive Strength, Low-velocity Impact

**요 지** 본 연구에서는 스카프 패치가 접착된 복합소재 샌드위치 적층판의 압축강도 회복특성을 평가하였다. 본 연구에서는 알루미늄 허니콤 심재와 CF1263직조된 탄소/에폭시 면재를 갖는 킬팅열차차체에 적용된 샌드위치 시험편이 이용되었다. 샌드위치 시험편은 저속충격에 의해 손상을 가하고, 스카프 보수기법에 의해 보수되었다. 보수 후 CAI시험을 통해 충격 후 압축강도를 평가하여 강도회복정도를 정량적으로 규명하였다. 본 시험으로부터 단지 스카프 보수를 적용한 경우 약 72%정도의 강도를 회복하였고, 추가보수층 한층을 추가했을 경우 약 91%까지 강도를 회복시킬 수 있음을 확인하였다.

**주 요 어** : 복합소재, 차체, 스카프 보수, 압축강도, 저속충격

### 1. 서 론

복합재료는 기존 금속재에 비해 비강도, 비강성, 내구성 과 내식성이 우수하여 항공분야 뿐만 아니라 철도분야에서도 적용이 확대되고 있다. 이와 같은 복합재료의 철도차량 분야 확대적용을 위해서는 제작된 복합재 구조물에 대한 유지보수가 경제적이면서 안전한 방법으로 수행될 수 있어야 한다. 복합재 구조물은 운용 중 다양한 형태의 외부손상에 노출되는데 과부하(overload) 및 충격(impact)에 의한 기계적 손상, 습기 및 자외선 노출에 의한 물성저하 등을 들 수 있다. 이러한 손상을 갖는 복합재 구조물에 대한 유지보

수기법에 대한 연구는 항공 및 방산분야를 중심으로 정립되어 왔다. 본 연구에서는 탄소/에폭시 면재(skin or face)와 알루미늄 허니콤 심재(core)를 갖는 샌드위치 차체 구조물 로만 킬팅열차의 차체 구조물에 대한 유지보수에 대한 연구를 수행하였다. 복합재 적층판에 대한 유지보수에 관한 연구로 Soutis[1] 등은 충격하중후 손상된 탄소/에폭시 복합적층판을 모의한 시험을 제작하여 외부에 복합재 적층판을 접착하는 기법(external doubler repair)을 적용하여 압축하중하에서 거동을 고찰하였다.

Henry[2] 등은 외부에 복합재 적층판을 접착하는 기법과 스카프 기법을 적용한 복합적층판의 접착면에서의 변형률을 이용하여 유지보수시험편의 구조건전성을 평가하였다. Andrew[3] 등은 스카프 조인트(scarf joint)기법에 대한 다양한 설계변수변화에 따른 접착면(bondline)에서의 응력분포특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 킬팅열차 차체에 대한 유지보수기법 정립

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실  
E-mail : jskim@krti.re.kr

TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5289

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원

을 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 이전에 언급한 바와 같이 텀팅열차의 차체는 직조된 탄소/에폭시 면재와 알루미늄 허니콤 심재를 갖는 샌드위치구조로 제작되었다. 따라서 본 연구에서는 차체와 동일한 적층구조를 갖는 시험편을 제작하여 차체의 외부표면이 충격에 의해 손상되었을 경우를 가정하고, 이렇게 손상이 발생한 시험편에 스킵프 기법을 적용하여 유지보수를 수행하고 압축하중 시험을 통해 강도회복정도를 평가하였다.

## 2. 복합재 샌드위치 구조물의 유지보수기법

본 연구에서는 샌드위치 구조물의 손상 중 저속충격 (low-velocity impact)에 의해 상부 면재와 심재에 손상이 발생한 경우에 대해 고찰하였다. 이러한 손상에 대한 유지보수기법은 아래와 같은 것이 있다.

### 2.1 표면적 보수(cosmetic repair)

이 기법은 구조적인 손상이 아닌 표면에 손상이 발생한 경우 적용되며, 강도회복과는 무관한 유지보수 기법이다.

### 2.2 수지 주입(resin injection)

수지 주입법은 샌드위치 구조물의 면재에 층간분리 (delamination)가 발생할 경우 적용하는 임시적인(temporary) 유지보수 기법으로 층간분의 진전을 지연시킬 수 있다. 이 기법은 적용이 간편하고 저렴하나 강도회복정도는 크지 않다.

### 2.3 패치 보수기법(patch repair)

패치보수기법은 손상부를 보수하여 이 부분을 통한 하중 지지 및 전달이 가능하도록 구조강도를 회복시키는 것이 목적이다. Fig. 1은 패치보수기법의 적용예를 보여주고 있다. 이러한 패치보수기법은 적용이 쉽고 단순한 장점이 있는 반면 보수층과 추가층에 의해 두꺼워지고 무게 증가한다. 또한 보수층의 추가에 의해 굽힘변형을 유발하는 편심 하중경로(eccentric load path)가 형성되며, 보수층 끝단에서 큰 층간수직응력(peel stress)이 발생할 수 있다.

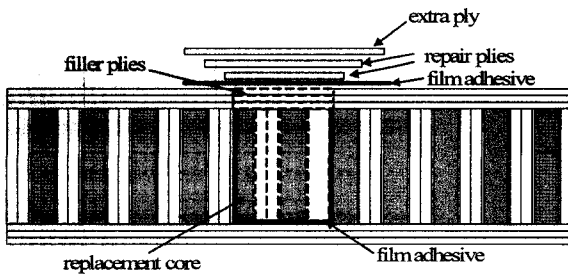


Fig. 1. Patch repair method

### 2.4 계단형(step sanded repair)

이 기법도 패치보수기법의 일종으로 차이점은 Fig. 2와 같이 손상된 면재의 한층단위로 계단이 형성되도록 한다. 이후 보수층을 기존 면재의 두께만큼 적층하거나 외부층을 한층 정도 적층하는 기법이다. 이 기법은 이전의 패치기법의 단점을 보완한 것으로 무게증가가 거의 없고, 편심하중경로 형성이 없으며 보수층 끝단에서 층간수직응력을 최소화 할 수 있다. 그러나 Fig. 2와 같은 한층(one ply)단위로 연마해야 하므로 고도의 숙련이 요구되며, 소요시간이 긴 단점이 있다.

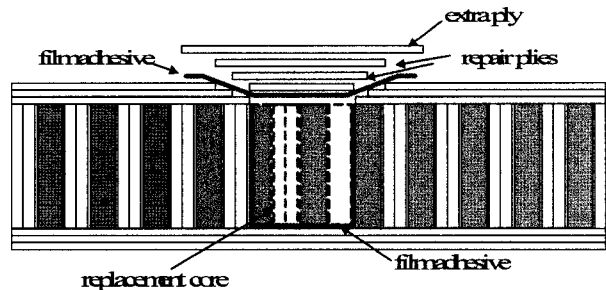


Fig. 2. Step sanded repair method

### 2.5 스킵프 보수(scarf repair or tapered sanded repair)

이 기법 역시 패치 보수법의 일종으로 Fig. 3과 같이 손상된 면재를 경사지게 연마한 후 보수층을 기존 면재의 두께만큼 적층하거나 외부층을 한층 정도 적층하는 기법이다. 이 기법은 계단형에 비해 절차가 단순하다.

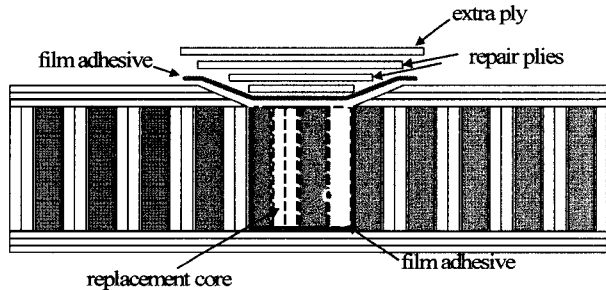


Fig. 3. Scarf repair method

## 3. 샌드위치 적층판의 유지보수 및 압축강도평가

### 3.1 샌드위치 적층판의 충격손상

텀팅열차의 차체는 경량화를 위해 알루미늄 허니콤 심재를 갖고 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재를 갖는 샌드위치 구조로 제작되었다. Table 1과 Table 2은 면재, 심재 및 접착필름에 대한 재질과 특성을 나타낸 것이다. 면재로 사용된 CF1263 탄소/에폭시 프리프레그는

단층 두께가 0.7mm이고, 알루미늄 허니콤의 셀 두께는 70 $\mu$ m이다. 면재와 심재사이의 접착은 (주)한국화이바에서 개발한 BONDEX® 606을 사용했으며 두께는 0.2mm이고 성형온도는 120°C이다.

Table 1. Applied materials of the sandwich composite

Parts	Materials	Remarks
Face	CF1263 carbon fabric/epoxy prepreg	Fiber: T700 series, 12K Curing Temp. of resin: 120°C Thickness: 0.8mm
Core	Aluminium 3104 honeycomb	Cell size: 3/8" Cell wall thickness: 70 $\mu$ m Cell depth: 37mm
Adhesive film	BONDEX® 606	Curing Temp.: 120°C Thickness: 0.2mm

Table 2. Material properties of CF1263 carbon fabric/epoxy and honeycomb

Properties	CF1263 Carbon/Epoxy	Properties	Core Material [Al Honeycomb]
E1(GPa)	55.5	E1(MPa)	0.17
E2(GPa)	48.3	E2(MPa)	0.17
G12(GPa)	3.81	E3(MPa)	1480
S1(MPa)	642.2	G12(MPa)	150
S2(MPa)	548.9	G13(MPa)	250
S12(MPa)	123.4	G23(MPa)	170
$\nu_{12}$	0.099	$\nu_{12}$	0.996
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1600	$\rho(\text{kg/m}^3)$	55

이러한 복합재 샌드위치 구조물은 외부의 저속충격(low velocity impact)을 받을 경우 Fig. 4와 같은 손상이 발생하게 된다. Fig. 4는 질량 1.39kg의 충격체로 90J의 충격에너지로 충격하중을 받았을 경우 샌드위치 복합재 시험편의 파손양상을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 충격하중에 의해 충격부 면재에는 충격체(impactor)에 의한 움푹한 눌림(dent)이 발생하고, 면재에서는 층간분리와 섬유파단이 발생하게 된다. 또한 알루미늄 허니콤 심재의 경우 충격 면재와 인접한 부분에 국부적인 좌굴(localized buckling)이 발생하게 된다. 이러한 손상은 지속적인 반복하중에 의해 전파된다. 따라서 즉시 유지 보수되어야 한다. 특히 이러한 충격하중에 의한 손상은 인장하중에 비해 압축하중에 취약하다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 충격을 받은 면재와 허니콤에 손상이 발생할 경우에 대한 유지보수를 실시하고 압축시험에 의해 강도회복을 평가하였다.

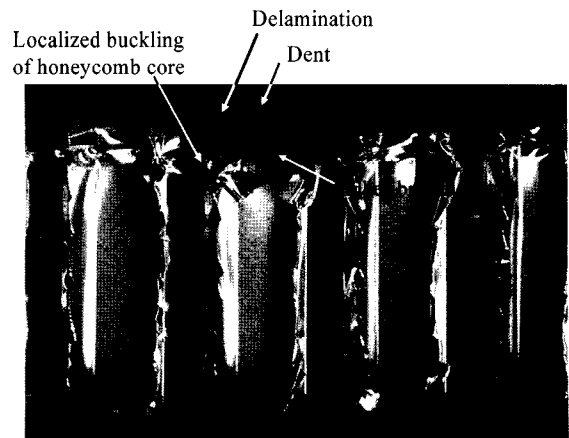


Fig. 4. A sandwich composite laminate damaged by low-velocity impact

### 3.2 샌드위치 적층판의 유지보수

본 연구에서는 충격손상을 갖는 허니콤 샌드위치 복합재 적층판의 유지보수를 위해 이전에 언급한 스카프 보수기법을 적용하였다. 유지보수에 적용된 샌드위치 복합재 시험편은 Fig. 5와 같이 길이 240mm, 폭 120mm이고 두께는 42mm이다. 충격을 받는 부분의 면재의 두께가 반대편 면재에 비해 약 2.3배 두껍다. 실제 차체에서 두꺼운 면재부가 차체의 외곽이고 얇은 부분이 내부이다. 시험편의 크기는 유지보수 후 수행되는 압축시험을 위해 Fig. 5와 같이 결정되었다.

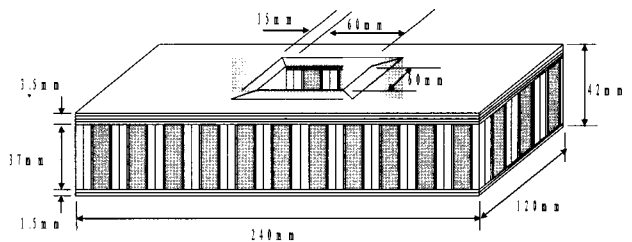


Fig. 5. Schematic drawing of the damaged sandwich composites for repair

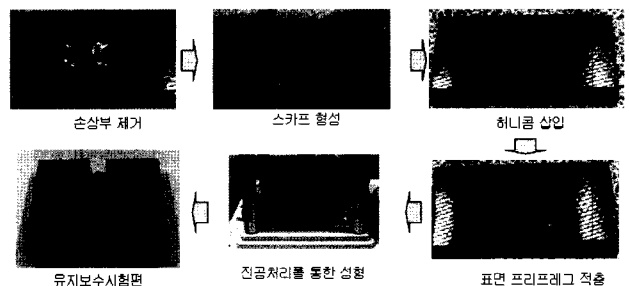


Fig. 6. Repair procedure of the damaged sandwich composites.

Fig. 6은 본 연구에서 수행한 유지보수 절차를 나타낸 것으로 아래와 같다.

- ① 손상부의 면재와 심재 제거
  - 손상부 면재는 60mm×60mm의 사각 형태로 제거
  - 손상된 알루미늄 허니콤 심재 제거
- ② 면재 연마를 통한 스카프(테이퍼) 형성
  - 테이프 길이 15mm
- ③ 새 심재의 접착을 위한 접착필름 설치
- ④ 새 심재 채우기
- ⑤ 보수층(repair ply) 및 추가층(extra ply) 적층
- ⑥ 120°C조건에서 경화
- ⑦ 유지보수 완료

본 연구에서 적용된 스카프 보수의 경우 보수층만 적용된 경우와 추가층이 적용된 경우 두가지 형태로 수행되었다.

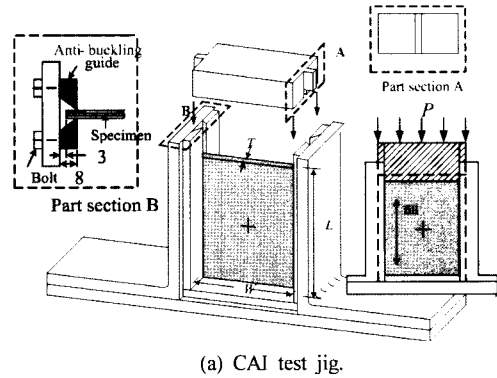
### 3.3 샌드위치 적층판의 압축강도평가

유지보수 후 강도회복정도를 고찰하기 위해 손상이 없는 시험편, 추가층 없이 유지보수된 시험편 및 추가층이 적용된 시험편 3가지에 대해서 압축강도를 평가하였다. 추가층의 경우 100mm×100mm 크기로 최종보수층 위에 적층하였다. Fig. 7은 시험편의 압축강도평가를 위한 시험지그의 형상을 나타낸 것이다. 시험지그는 압축시험시 시험편의 좌굴(buckling)을 방지하기 위하여 Fig. 7의 section B와 같이 시험편 양측면에 좌굴방지용 가이드(anti-buckling guide)를 설치하였다. 또한 시험편상부의 하중 부과부분에는 하중부하 초기에 면재와 심재사이의 분리에 의한 좌굴을 방지하기 위해 Fig. 7(a)의 section A와 같은 사각형 덮개로 보호하도록 하였다.

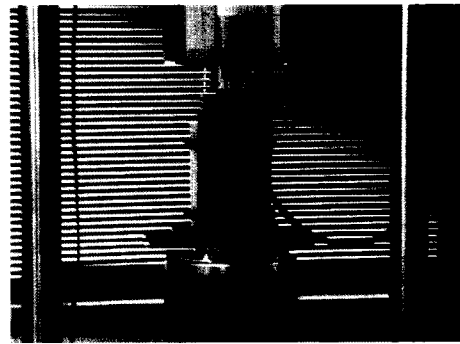
압축시험은 Fig. 7(b)와 같이 ASTM C-364규격에 근거하여 수행하였고 시험은 만능시험기인 INSTRON 8502를 이용하였다. 시험시 액츄에이터 변위는 5mm/min으로 설정하였다. 50톤 용량의 로드셀을 통하여 하중을 기록하였다.

Fig. 8은 압축강도평가 결과이다. 손상이 없는 시험편의 경우 파단하중이 약 11,000kgf였고, 파단시 변위는 약 3.7mm였다. 파손형태는 압축하중에 의해 두께가 상대적으로 얇은 내측부 스킨이 전단파괴되면서 알루미늄 허니콤 코어가 전단 변형에 의해 약 45도방향으로 균열이 진전하여 최종적으로 두꺼운 외측부 스킨에 압축파단이 발생하였다.

순수 스카프 보수된 시험편의 경우 파단강도는 약 7,843kgf였고, 추가층이 한층 적층된 경우에는 10,031kgf였다. 즉, 추가층을 적층하여 유지보수 한 시험편의 경우 정상시험편 압축강도의 약 91%까지 회복하였고, 추가층을 적층하지 않은 시험편의 경우 약 72%까지 회복함을 확인할 수 있었다.



(a) CAI test jig.



(b) CAI test.

Fig. 7. Jig and compressive test.

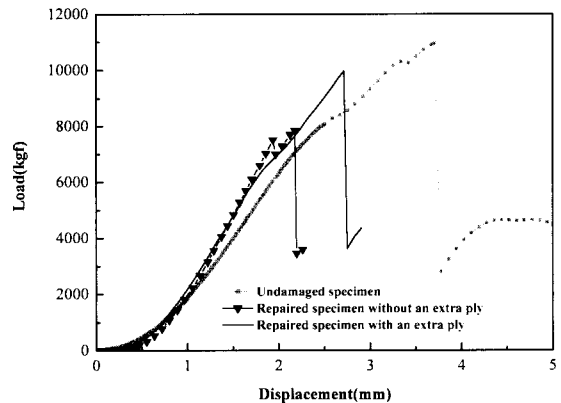


Fig. 8. Compressive test results

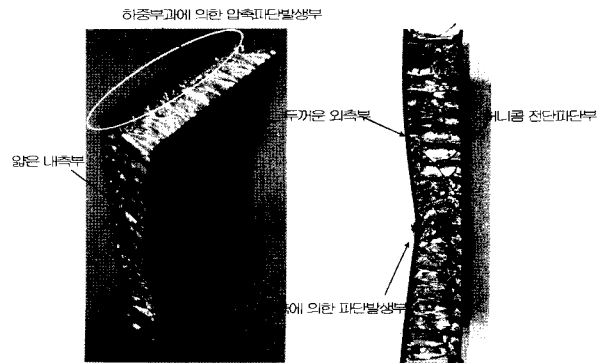


Fig. 9. Compressive failure of the undamaged composite sandwich laminate

보수된 시험편들의 경우 보수층의 끝단에서 균열이 발생하여 최종파단되었다. Fig. 10은 각 시험편의 최종파단후 모습을 나타낸 것이다. 모든 시험편에서 최종파단이 발생한 스킨부 하단의 허니콤은 분리(debonding)는 발생하지 않았고, 전단파단이 발생하였다.

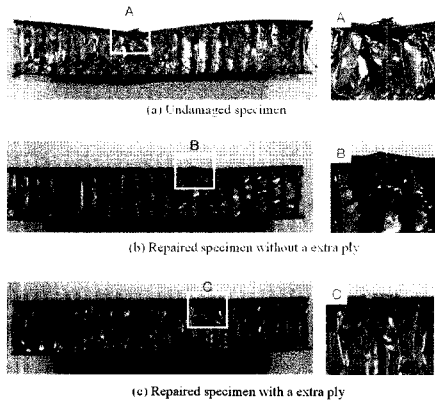


Fig. 10. Sectional view of the sandwich specimens after compressive test.

#### 4. 결론

본 논문에서는 틸팅열차의 차체에 적용된 샌드위치 복합 적층판에 대한 보수 후 강도회복정도를 시험을 통해 평가하였다. 본 연구에서는 저속충격을 받은 시험편에 대해 스카프 보수기법을 적용하여 보수를 하였으며, 보수기법별 압축강도 회복정도를 고찰한 결과 보수시험편은 정상시험

편에 비해 약 72%와 91%까지 강도가 회복되는 것을 확인하였다. 따라서 한국형 틸팅열차의 차체에 적용된 샌드위치 복합적층판에 대한 스카프 보수 기법의 타당성과 그 효과를 입증할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. C. Soutis, D-M. Duan and P. Goutas, 1999, "Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external patches," *Composite Structures*, Vol.45, No.4, pp. 289-301.
2. Henry C.H. Li, Felix Beck, Olivier Dupouy, Israel Herszberg, Paul R. Stoddart, Claire E. Davis and Adrian P. Mouritz, 2006, "Strain-based health assessment of bonded composite repairs," *Composite Structures*, Vol.76, No.3, pp. 234-242.
3. Andrew J. Gunnion and Israel Herszberg, 2006, "Parametric study of scarf joints in composite structures," *Composite Structures*, Vol.75, No.1-4, pp. 364-376.
4. Kim J. S. and Lee S. J. , 2005, "Structural Safety Evaluation of An Autoclave Cured Train Carbody with Length of 23m", *KSME*, Vol. 29, No. 11, pp. 1551-1559.
5. Kim J. S., Lee S. J. and Shin K. B., 2007, "Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Carbody," *Composite Structures*, Vol. 78, pp. 468-476.
6. Kim J. S. and Cheong J. C., 2006, "Natural Frequency Evaluation of a composite Train Carbody with Length of 23m," *Composite Science and Technology*, vol.66 pp. 2272-2283.

접수일(2008년 7월 14일), 수정일(2009년 1월 9일),  
 게재확정일(2009년 2월 3일)