

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.55

틸팅차량용 KTX 차체의 하니컴복합재 측벽판 체결부의 피로파괴평가[§]

정달우* · 김정석** · 최낙삼*†

* 한양대학교 기계공학과, ** 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Fatigue Fracture Assessment of Honeycomb Composite Side-Wall Panel Joint for the KTX Tilting Car Body

Dal-Woo Jung*, Jung-Seok Kim** and Nak-Sam Choi**†

* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

** Railroad Structure Research Department, Korea Railroad Research Institute

(Received July 21, 2009 ; Revised October 7, 2009 ; Accepted October 23, 2009)

Key Words : Honeycomb Composite Side-Wall Panel Joint(하니컴복합재 측벽판 체결부), Tilting KTX Car Body(틸팅 KTX 차체), Fatigue Bending Test(피로굽힘시험), Fatigue Strength(피로강도)

초록: 틸팅형 고속열차의 차체에 적용되는 하니컴 복합재 조인트 구조물의 경우 운행중 외팔보형 굽힘하중을 받게된다. 하이브리드 복합재 조인트 구조물에 대한 굽힘시험평가를 수행하기 위해 실제 틸팅열차 차체 구조물에서 조인트부를 절단 채취하여 시험편으로 제작하였다. 굽힘시험결과 시험편의 파괴거동은 정적하중과 피로하중하에서 확연히 달라짐을 보였다. 정적굽힘하중 하에서는 하니컴 코어 영역에서 전단변형과 파괴가 발생하였으며, 피로굽힘하중 하에서는 복합재 표피층과 하니컴 코어층 사이에서 계면분리가 발생하거나, 또는 금속재 언더프레임과의 용접부에서 파괴가 발생하였다. 이러한 파괴거동은 다른 산업분야에서 사용되는 유사한 구조의 하니컴 복합재 조인트 구조물에서도 발생할 수 있기 때문에, 본 실험 결과를 하니컴 복합재 조인트 구조물의 설계변수를 개선하기 위해 이용될 수 있다.

Abstract: The honeycomb composite joint structure designed for application to a tilting KTX railroad car body is subjected to bending loads of a cantilever type. Honeycomb sandwich composite panel-joint attached in the real tilting car body was fabricated and sectioned as several beam-joint specimens for the bending test. The fracture behaviors of these specimens under static loads were different from those under cyclic loads. Static bending loads caused shear deformation and fracture in the honeycomb core region, while fatigue cyclic bend loading caused delamination along the interface between the composite skin and the honeycomb core, and/or caused a fracture in the welded part jointed with the steel under-frame. These fracture behaviors could occur in other industrial honeycomb composite joints with similar sub-structures, and be used for improving design parameters of a honeycomb composite joint structure.

1. 서론

선박, 항공기, 철도, 자동차와 같은 운송수단은 안전도 향상과 고속화, 에너지소비량 감소기술이 꾸준히 개선되고 있다. 오늘날 세계적으로 유해한 배기가스의 배출을 줄이고 운송비 절감을 위한 친환경,

고효율/고속화 운송수단이 각광을 받으면서 운송수단의 경량화 문제가 그 어느 때보다 대두되고 있다.

철도차량의 경우 고속화 및 경량화를 제고하기 위해서 높은 비강성 및 비강도(specific stiffness & strength)재료가 요구되고 있으며, 신소재 복합재료(advanced composite materials)의 활용도가 높아지는 추세이다. 복합재료는 과거 철도차량에서 내장재, 전두부 등과 같이 2 차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나 1990 년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(carbody structure)와 같이 하중을 직

§ 이 논문은 2009 년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

접 지탱하는 1 차 부재(primary structure)로의 적용도 확대되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 기술의 흐름에 발맞추어 기존의 일반 레일(rail)위에서도 고속운행이 가능한 틸팅열차(tilting train)의 실용화가 중요 과제로 부각되고 있다.

KTX 틸팅열차는 기존선로에서 고속으로 주행하기 때문에 차량의 경량화가 필수적이며 또한 곡선주로에서도 고속주행상태를 유지하기 위해 차체를 곡선 안쪽 방향으로 기울여야 하기 때문에 비강도와 비강성이 뛰어난 재료가 요구된다. 따라서 주행중 높은 굽힘하중을 받는 틸팅차량의 차체 측벽부(side-wall panel)를 하니컴샌드위치 복합재 판으로 만들고, 이를 언더프레임(under-frame)과 연결해주는 접합체결부에 복합재와 금속재가 결합된 하이브리드 체결부(hybrid joints)가 사용되고 있다.

하이브리드 복합재 패널의 파괴특성에 대한 기존 연구를 보면, 정/동하중을 받는 하이브리드 복합 구조물은 재료의 조합, 체결방법, 구조물의 형상에 따라 각기 다른 파괴거동을 보이며,⁽⁴⁻⁹⁾ 금속재 하부구조물과 결합된 하이브리드 복합재의 경우 재료의 조합과 체결부의 형상에 따라 파괴특성이 달랐다.⁽¹⁰⁾ 또한 하이브리드 복합체결부에 대한 해석적 모델링 기법에 관한 연구⁽¹¹⁻¹³⁾와 하이브리드 복합재에 케블라 섬유(Kevlar fiber)와 강화금속등을 삽입하여 성능을 향상시키는 연구^(14,15)가 보고되었다. 하지만 이러한 기존연구들은 단순한 형상을 가지는 기초적인 모델을 대상으로 하였기 때문에 실제 현장에 적용되는 복잡한 형상과 다양한 체결법이 적용되는 하이브리드 복합재에 바로 적용하기는 다소 부족함이 있다. 최근 저자들은 하이브리드 차체 조인트 보에 대한 정적 및 피로시험을 하여 정하중 시와 피로하중 시에 파괴모드가 크게 달라짐을 실험적으로 보였다.⁽¹⁶⁾

따라서 본 연구에서는 실제 현장에서 사용되고있는 틸팅차량용 KTX 차체 측벽부의 하니컴샌드위치 복합재 패널의 하이브리드 접합체결부(hybrid joint part)를 설계/제작하였다. 또한 하니컴샌드위치 복합재 패널에 대한 하이브리드 접합체결부를 조인트보의 구조물로서 절단하고 굽힘피로시험을 위한 전용 고정구를 설계/제작하여 정적 및 피로 굽힘시험을 수행한다. 이를 통해 접합체결부에 대한 피로수명평가와 설계상의 개선점을 제시한다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

한국철도기술연구원에서 개발한 철도차량 객실구조물은 유럽규격인 EN 12663:2000 을 참조하여 설계

되고 있다.⁽¹⁷⁾ 또한 객실차체에 대한 정적 및 피로 시험은 UIC 566OR 규격의 조건에 따라 시험되어지고 있다.⁽¹⁸⁾ 하지만 이 규격들은 열차 차체에 대한 초기설계 조건과 철도차량 객실의 전체구조물에 대한 시험조건만을 제시하고 있어서 철도차체의 일부 분이나 부품단위에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 EN 및 UIC 규격을 본 연구대상이 되는 하니컴 복합재 패널의 체결부에 적용하기 위해 차량객실의 측벽부에서 시험대상 부분을 풀스케일(full scale)로 절단채취하여 시험편을 제작하였다.

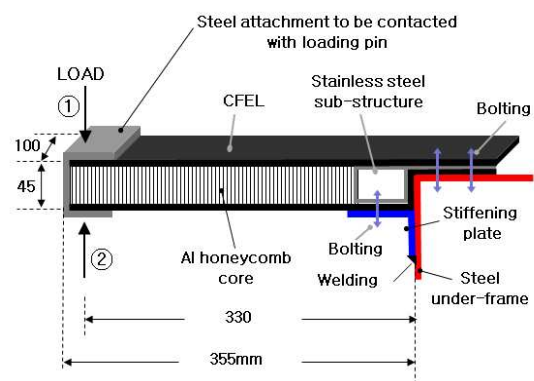
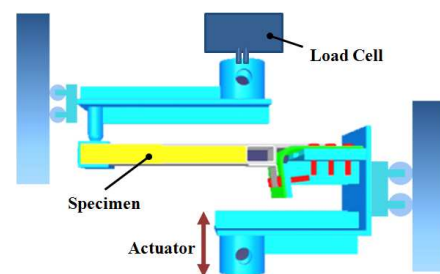


Fig. 1 Configuration of a cantilever typed hybrid beam-joint specimen for bending test: transverse load directions ① and ②. Dimensions in mm



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Photograph of the fixture used for the static and fatigue bending tests of the cantilever-type hybrid beam-joint specimen, and (b) its schematic configuration

위와 같이 제작한 차체 측벽부의 CFEL/알루미늄 하니컴 샌드위치(carbon fiber epoxy laminate/ aluminum honeycomb sandwich) 복합적층판과 스테인리스 강판 언더프레임 사이의 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 개략도와 접합방법을 Fig. 1 에 나타내었다. 외팔보 형태의 본 접합체결부 굽힘시험편은 실제 틸팅 차량의 측벽부를 다이아몬드 휠커터(diamond wheel cutter)를 이용하여 절단채취 한 것이다. Fig. 1 과 같이 본 시험편의 너비와 두께는 각각 100 mm, 45 mm 이며, 상부측 CFEL 표피층(upper CFEL skin layer)과 하니컴코어 그리고 하부측 CFEL 표피층(lower CFEL skin layer)의 두께는 각각 3 mm, 40 mm, 1.5 mm 이다. 이 시험편에 사용된 카본 적층판은 (주)한국화이바의 CF1263 fabric prepreg 를 사용하였고 언더프레임 재료는 STS304 스테인리스강(stainless steel)로 제작하였다. 또한 각 복합재 표피층과 하니컴 코어 그리고 금속판 사이에는 접착필름 (Bondex 750, (주)한국화이바)을 삽입하여 성형하였다.

2.2 정적 및 피로시험

본 연구에서는 Instron 8516 시험기를 이용하여 정적 및 피로시험을 수행하였으며, 시험 조건은 국제철도연맹규격 (UIC code 566OR)⁽¹⁸⁾을 참고하였다. 외팔보형 굽힘시험을 동하중으로 수행하기 위해 Fig. 2 와 같은 고정구를 설계 제작하였다.⁽¹⁶⁾ Instron 8516 시험기에 고정구용 가이드 레일(guide rail)을 설치하여 고정구가 상하로 움직임에 따라 비틀림이나 좌우 회전 등과 같은 이상거동이 발생하는 것을 미연에 방지하였다.

정적시험의 경우 Fig. 1 과 같이 언더프레임의 상면으로부터 330 mm 떨어진 지점에서 수직방향으로 1 mm/min 의 변위속도를 가하였고, 하중방향은 ①방향과 ② 방향으로 각각 시험하여 하중-변위선도 및 각 하중방향에 따른 최대 굽힘하중을 측정하였다. 피로시험은 2 Hz 의 정현파로 정적시험과 동일한 위치에 수직방향으로 굽힘반복하중을 가하였고, 부하방향은 정적시험과 동일하게 ①방향과 ②방향으로 각각 시험하였다. 응력비 $R(P_{min}/P_{max})$ 은 0.05 를 유지하고, 최대반복하중을 정적시험에서 구한 최대하중의 70 %, 50 %, 40 %, 30 %, 20 %로 낮추어가면서 수행하였다. 본 시험에서 사용된 시험편 부품가격이 비싸고 또한 제작시간이 오래 걸리기 때문에 시험편의 수량이 매우 제한되어 있다. 따라서 불가피하게 각 하중 레벨당 3 개의 시험편을 사용하여 평균값을 취해 S-N 곡선을 구하였다.

철도차량이 실제로 주행할 때 철도차량 측벽부를 구성하는 하이브리드 복합 체결부는 ①번 방향과 ②번 방향의 하중을 동시에 받게 된다. 하지만 본 연구에서는 각 하중방향에 따른 최대 취약부를 알아보기 위해 ①번 하중방향과 ②번 하중방향을 분리하여 각각 시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적파괴특성

Fig. 3 은 부하방향 ①의 굽힘시험으로부터 구한 하니컴샌드위치 복합재측벽 패널 체결부의 굽힘하중-처짐의 그래프이다. 처짐(변위)속도를 1 mm/min 로 하여 실험을 수행한 결과 굽힘하중은 최대 약 3 kN 까지 상승하였으며, 이후 급속한 하중 저하가 나타났다. 하중 저하가 발생할 때 Fig. 4 와 같이 두 가지 타입의 하중 저하거동을 보였는데, 하중이 서서히 저하하는 A 타입 하중저하 거동과 급속히 저하하는 B 타입 하중저하 거동을 보였다.

A 타입 하중저하 거동은, 파괴모드가 Fig. 4(a)와 같이 알루미늄 하니컴 코어의 증립층 근처에서 발생하여 코어의 전단형 변형이 진행되면서 나타나는 것으로, 변형발생 이후에도 어느정도 하중을 계속하여 지지할 수 있으므로 하중의 저하속도가 느리다. 이 경우는 변형 및 파손 시의 에너지흡수능력이 B 타입의 경우보다 뛰어나므로 구조물의 안전성 측면에서 볼 때 바람직한 현상이라 할 수 있다. 한편 B 타입 하중저하 거동의 경우 Fig. 4(b)와 같이 7자 보강판 끝단부와 접촉하는 CFEL 하판이 심한 압축하중을 받음과 동시에 국부적인 굽힘하중을 추가적으로 받게 되어 절괴(꺼임형 파괴)가 발생한다. 이 파괴가 발생하면 CFEL 하판의 파단부가 하니컴 코어부를 파괴 들어가 파괴가 가속되어 Fig. 3 의 B 변형거동과 같이 급격한 하중저하가 일어나게 된다. 본 시험편의 경우 하판의 굽힘강도가 하니컴 코어의 전단강도보다 다소 낮아서 B 타입 하중저하 거동의 발생 확률이 실험 결과상 65 % 정도로 높게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 하판의 두께를 현재의 경우보다 두껍게 하여 B 타입의 파괴를 방지해야 할 것이다.

Fig. 5 는 Fig. 1 에서 부하방향 ②의 굽힘시험으로부터 구한 하니컴샌드위치 복합재측벽 패널 체결부의 굽힘하중-처짐 그래프이다. 부하방향 ②에 대한 정적 파괴거동은 시험편의 고정부에 해당하는 7자 받침대의 용접부가 크게 소성변형되어 시험편의 윗방향으로 120° 이상 벌어지는 변형을 하여 언더프레임판으로부터 들뜨는 변형을 보임에 따라 최종적으로 용접부에

파괴가 발생하였다. 즉, 부하방향 ②의 굽힘시험결과는 시험편과 언더프레임이 ㄱ자 받침대를 통해 접합되어 있는 볼트체결부와 용접부의 강도에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최종파괴는 처짐량이 40 mm 이상일 때 용접부에서 발생하였다. 용접부에서 파괴가 발생한 직후 언더프레임에 설치된 체결볼트만이 하중을 지탱하면서 하중이 최대하중의 절반수준으로 떨어졌다. 따라서 부하방향 ②의 정적굽힘에

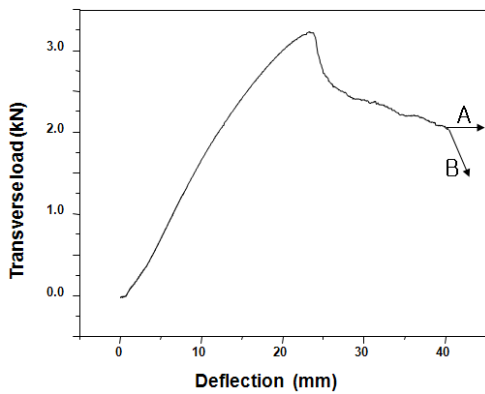
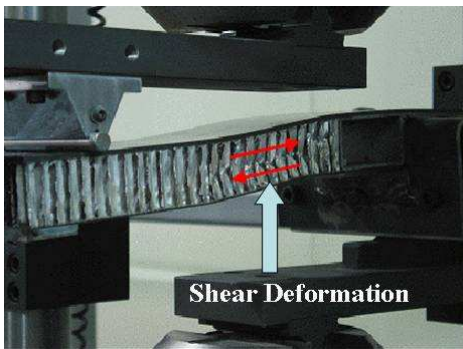
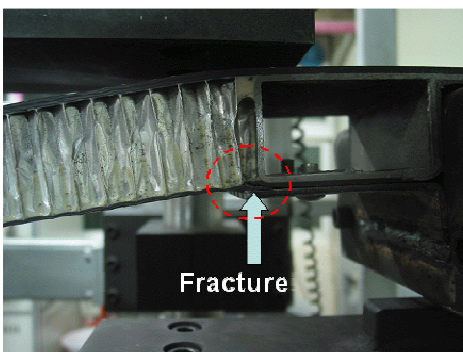


Fig. 3 Transverse load-deflection curves of the hybrid beam-joint specimens in load direction ① in Fig. 1



(a)



(b)

Fig. 4 Two kinds of fracture mode of the hybrid joint part specimen under the static bending load ①: (a) shear deformation of the honeycomb core (b) fracture of the lower CFRP layer

대해서 가장 취약한 부위는 용접체결부임을 알 수 있었으며, 부하방향 ①의 굽힘강도와 동일 수준으로 올리기 위해서는 현재의 용접부를 훨씬 강화하고 또한 항복강도가 높은 ㄱ자 받침대를 사용할 필요가 있다.

3.2 피로파괴특성

하니컴샌드위치 복합재 측벽 패널 접합체결부의 정적굽힘 시험결과, 부하방향 ② 경우의 최대굽힘강도가 ①방향의 굽힘강도의 82 % 수준으로 취약했기 때문에 ② 부하방향의 피로시험을 먼저 수행하였다. 실험은 2.2 절에 기입한 방법대로 최대 정적굽힘하중의 5 % 수준을 최저반복하중으로 하고, 최대반복하중은 최대정적굽힘하중의 60 %, 50 %, 40 %로 점점 낮추어 가면서 내구한도를 평가하였다.

Fig. 6은 부하방향 ①, ②에 따른 최대변위-수명곡선을 나타낸다. 부하방향 ①, ②에 따른 최대 반복하중은 각각 1.5 kN, 0.4 kN이다. 부하방향이 ②이고 최대반복하중이 0.4 kN 일때의 변위-수명곡선을 보면, 굽힘하중에 의한 변위는 초기 이후 약한 증가를 보이다가 270×10^3 사이클부터 가속적으로 증가하여 332×10^3 사이클에서 ㄱ자 받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 집중응력이 발생하여 5 mm의 작은 변위에서 Fig. 7(a)와 같이 피로파괴가 발생하였다.

Fig. 6에서 부하방향이 ①이고 최대반복하중이 1.5 kN 일때의 변위-수명곡선을 보면, 굽힘하중에 의한 변위는 초기 이후 일정함을 보이다가 표피 CFRP 상판과 하니컴코어층 사이에서 층간분리가 발생하는 500×10^3 사이클부터 가속적으로 증가하였다. 결국 592×10^3 사이클에서 층간분리가 상판 양끝단까지 완전히 진전하는 피로파괴거동을 보였다. Fig. 7(b)는 부하방향 ①일 때의 피로파괴 모습을 나타낸다. 부하방향 ②의 피로파괴 경우에 용접부에서 파괴가 일어난 것과는 달리, 부하방향 ①의 피로시험의 경우는

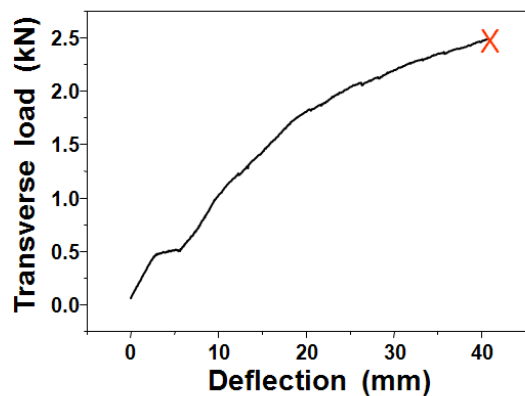


Fig. 5 Transverse load-deflection curve of the hybrid beam-joint specimen in load direction ② in Fig. 1

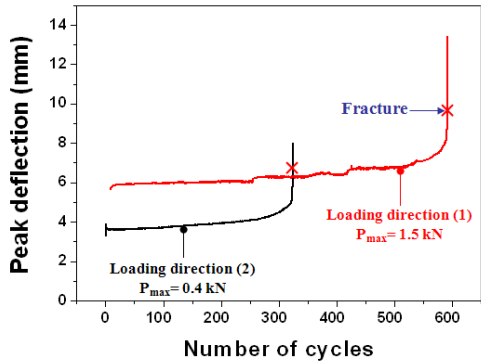
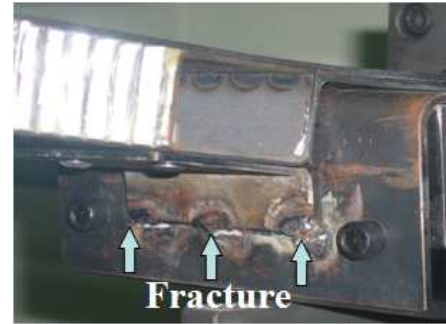


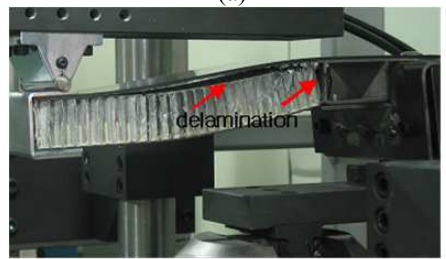
Fig. 6 Peak deflection curves versus the number of cycles of the hybrid beam-joint specimen under a maximum cyclic transverse load of 0.4 kN (loading direction ②) and of 1.5 kN (loading direction ①)

시험편의 CFRP 표피 상판과 하니컴코어층 사이에서 층간박리 파괴가 일어난 것이다. 이렇게 층간박리가 상판 바로 밑에서 유발된 이유는 CFRP 상판의 두께(3 mm)가 CFRP 하판의 두께(1.5 mm)보다 약 2 배 정도 더 크므로, 상판쪽의 국부적 강성이 하판의 경우보다 더 커서 상판과 하니컴 코어층 사이의 층간 전단응력이 하판의 경우보다 컸기 때문에 상판과 코어층 사이에서 층간박리가 발생한 것으로 사료된다. 이와 같은 상판쪽 층간박리를 방지하기 위해서는 상판과 하니컴 코어층 사이에 위치한 접착필름(adhesive film)의 두께를 설계하중의 저하나 파괴모드의 변화가 일어나지 않는 범위에서 기존보다 두껍게 삽입하여 성형함으로써 층간전단응력의 집중을 완화시키는 것이 바람직할 것이다.

Fig. 8 은 부하방향 ①, ②의 반복굽힘 하중조건하에서 구한 하니컴샌드위치 복합재측벽 패널 접합체결부의 S-N 곡선을 나타낸다. 부하방향 ②의 S-N 곡선의 경우, 피로하중에 취약함을 보이는 용접부에서 최대반복하중이 불과 0.4 kN 이하일때 피로파괴가 발생하였음을 주지해야 한다. Fig. 7(a)와 같이 언더프레임과 기차 받침대를 3 군데로 용접한 용접부에 반복하중이 집중응력으로 가해져 피로파괴가 발생하였던 것이다. 또한, 정적인 굽힘시험의 경우에는 시험편의 기차 받침대 체결부가 상당히 연성적(ductile)으로 변형되어 40 mm 이상의 처짐이 일어나서야 용접부의 파괴가 일어났지만, 피로시험에서는 불과 7 mm 이하의 처짐변형값에서 파괴가 발생하고 있다. 즉, 현재의 점용접방법이 기계적 피로하중에 매우 취약하기 때문에 이 부분을 전체폭 용접으로 개선해야 하며, 또한 기차 받침대의 양 끝단을 볼트나 리벳등을 이용해 체결력을 보강하여 기차 받침대의 펼쳐짐을 억제해야 할 필요가 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Photographs of the fracture state at the welding site under the cyclic bending : (a) loading direction ②, (b) loading direction ①

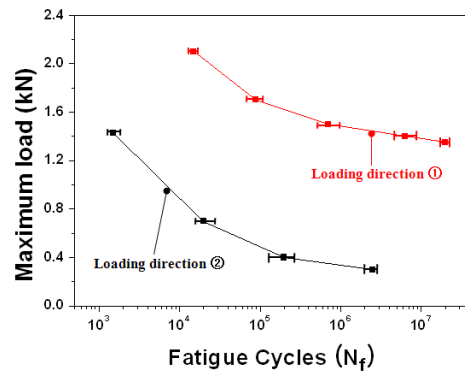


Fig. 8 S-N curves of hybrid beam-joint specimens under the cyclic bending for loading directions ① and ②

Fig. 8 에서 부하방향 ①의 S-N 곡선을 보면, 파괴수명(N_f)이 커짐에 따라 피로강도의 저하정도가 비교적 적은 편이었으며, 부하방향 ①의 피로한도는 10^7 cycles 기준으로 약 1.32 kN 으로 평가 되었다. 이 피로한도는 부하방향 ②의 피로한도의 약 3 배 큰 것이다.

4. 결론

틸팅차량용 KTX 차체 측벽부와 언더프레임 사이의 하니컴샌드위치 복합재 체결부를 피로시험하여 평가하였다. 하니컴샌드위치복합재 측벽패널의 하이브리드 체결부를 다이아몬드 휠커터를 이용하

여 절취하여 본 연구의 조인트 보 시험편을 만들었다. 실험 및 연구결과는 다음과 같다.

①방향으로 피로하중을 가한 경우에는 상판층 CFEL 층과 하니컴 코어층 사이에서 계면분리현상이 발생했다. 이를 방지하기 위해 접착필름의 두께를 기존보다 두껍게 삽입하여 성형함으로써 층간 전단응력의 집중을 완화시켜야 한다. 또한 정적하중에서 더욱 안정적인 파괴거동을 유도하고 또한 피로하중 하에서 하니컴 코어층과 상/하판 CFEL 층 사이의 계면에서 어느 한쪽으로 전단응력이 집중되는 것을 막기 위해서 현재의 하판 CFEL 층의 두께를 상판 CFEL 층과 비슷한 수준의 두께로 설계를 변경해야 할 필요가 있다.

②방향의 하중을 걸었을 때 ①방향의 경우보다 하니컴샌드위치 복합재 측벽패널 체결부가 훨씬 취약했으며, 정하중과 피로하중 모두에서 그자 보강받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 파손이 일어났다. 따라서 설계 시에 용접부를 전체폭에 걸쳐 용접하거나 체결부에 보강패스너를 덧붙여서 내피로성과 강도를 제고할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 수행중인 지역대학우수과학자지원사업(31 200900000000778)의 지원으로 수행하였음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Li, B. and Fatemi, A., 2006, "An Experimental Investigation of Deformation and Fatigue Behavior of Coach Peel Riveted Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 1, pp. 9~18.
- (2) Shin, K. B. and Lee, S. J., 2004, "The Case and Technique on Lightweight of Railway Vehicle System using Composite Materials," *Korea Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 82~86.
- (3) Shin, K. B. and Lee, S. J., 2005, "A Study on Manufacturing Technology of Hybrid Composite Carbody Structures Using Autoclave Molding Process," *Korea Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 52~58.
- (4) Lim, T. S., Kim, B. C. and Lee, D. G., 2006, "Fatigue Characteristics of the Bolted Joints for Unidirectional Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 58~68.
- (5) Kelly, G., 2006, "Quasi-Static Strength and Fatigue Life of Hybrid(Bonded/Bolted) Composite Single-Lap Joints," *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 119~129
- (6) Xiao, Y. and Ishikawa, T., 2005, "Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints. Part I: Experimental Investigation," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1022~1031.
- (7) Counts, W. A. and Johnson, W. S., 2002, "Bolt Bearing Fatigue of Polymer Matrix Composites at Elevated Temperature," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 197~204
- (8) Herrington, P. D. and Sabbaghian, M., 1993, "Fatigue Failure of Composite Bolted Joints," *Journal of composite Material*, Vol. 27, pp. 491~512.
- (9) Thoppul, S. D., Finegan, J. and Gibson, R. F., 2009, "Mechanics of Mechanically Fastened Joints in Polymer-Matrix Composite Structures - A Review," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 3-4, pp. 301~329.
- (10) Caccese, V., Kabche, J. P. and Berube, K. A., 2007, "Analysis of a Hybrid Composite/Metal Bolted Connection Subjected to Flexural Loading," *Composite Structures*, Vol. 81, No. 3, pp. 450~462.
- (11) Mottram, J. T. and Zheng, Y., 1996, "State-of-the-art Review on the Design of Beam-to-Column Connections for Pultruded Frames," *Composite Structures*, Vol. 35, No. 4, pp. 387~401.
- (12) Lemonis, M. E. and Gantes, C. J., 2009, "Mechanical Modeling of the Nonlinear Response of Beam-to-Column Joints," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 4, pp. 879~890.
- (13) Wang, W. D., Han, L. H. and Zhao, X. L., 2009, "Analytical Behavior of Frames with Steel Beams to Concrete-Filled Steel Tubular Column," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 3, pp. 497~508.
- (14) Granata, P. J. and Parvin, A., 2001, "An Experimental Study on Kevlar Strengthening of Beam-Column Connections," *Composite Structures*, Vol. 53, No. 2, pp. 163~171.
- (15) Kim, B. J. and Lee, D. G., 2008, "Characteristics of Joining Inserts for Composite Sandwich Panels," *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1-3, pp. 55~60.
- (16) Jung, D.W., Choi, N.S., Kim, J.S., Seo, S.I., Jo, S.H., 2007, "Static and Fatigue Fracture Assessment of hybrid Composite Joint for the Tilting Car Body," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers Part A*, Vol. 31, No. 2, pp. 166~173.
- (17) The European Standard EN12663, 2000, Railway Applications-Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies, European Committee for Standardization.
- (18) The UIC Code 566OR, 3rd edition of 1.1.90, 2003, Loadings of Coach Bodies and Their Components, International Union of Railways.