

< 논문 >

틸팅차량용 차체의 Hybrid 복합재 접합체결부의 정적 및 피로 파괴 평가

정달우* · 최낙삼† · 김정석** · 서승일** · 조세현***
(2006년 7월 12일 접수, 2006년 12월 12일 심사완료)

Static and Fatigue Fracture Assessment of Hybrid Composite Joint for the Tilting Car Body

Dal-Woo Jung, Nak-Sam Choi, Jung-Seok Kim, Sueng-Il Seo and Se-Hyun Jo

Key Words : Hybrid Composite (하이브리드 복합재), Bolted Joint(볼트체결), Tilting Car Body(틸팅 차량), Fatigue (피로), S-N Curve(응력-수명 곡선),.

Abstract

Fatigue fracture behavior of a hybrid bolted joint was evaluated in comparison to the case of static fracture. Two kinds of specimens were fabricated for the mechanical tests; a hybrid bolted joint specimen for the shear test and a hybrid joint part specimen applied in the real tilting car body for the bending test. Characteristic fracture behaviors of those specimens under cyclic loads were obviously different from the case under static loads. For the hybrid bolted joint specimen, static shear loading caused the fracture of the bolt body itself in a pure shear mode, whereas cyclic shear loading brought about the fracture at the site of local tensile stress concentration. For the hybrid joint part specimen, static bend loading caused the shear deformation and fracture in the honeycomb core region, while cyclic bend loading did the delamination along the interface between composite skin and honeycomb core layers as well as the fracture of welded joint part. Experimental results obtained by static and fatigue tests were reflected in modifications of design parameters of the hybrid joint structure in the real tilting car body.

1. 서론

철도차량의 설계 기술은 속도의 증가, 승차감 향상, 에너지 소비량 감소, 안전도 증가의 면에서 꾸준히 개선되고 있다. 이런 추세에 맞추어 철도차량의 경량화를 제고하기 위해서 높은 비강성 및 비강도(specific stiffness & strength) 특성을 가지는 신소재 복합재료(advanced composite materials)의 적

용도가 높아지는 추세이다.⁽¹⁾ 복합재료는 과거 철도차량에서 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나, 복합재의 성형기술의 발전에 따라 1990년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(car-body structure)와 같이 하중을 직접 지탱하는 1차 부재(primary structure)까지 그 적용도가 확대되고 있다.⁽²⁾

최근에는 기존의 일반 레일(rail) 위에서도 고속 운행이 가능한 하이브리드 틸팅차량의 실용화가 중요 과제로 부각되었다. 하이브리드 틸팅차체(hybrid tilting car body)의 경우 차체 측벽부(side-panel)와 언더프레임(under-frame) 사이는 볼트체결(bolted joint)에 의한 기계적 접합연결이 우선적으로 채택되었다. 차체측벽부는 스테인리스(stainless) 금속과 탄소섬유강화복합재(carbon fiber reinforced

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부
E-mail : nschoi@hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5283 FAX : (031)406-7063

* 한양대학교 기계공학과

** 한국철도기술연구원

*** ㈜ 한국화이버

plastics, CFRP)의 하이브리드 층구조를 채택하였다. 복합재 구조물의 볼트체결과 관련한 연구로는 원공 주변부에서의 파괴모드(net tension, shear out, bearing 등)와 진전과정의 해석에 관한 것이었다.⁽³⁻⁶⁾ 스테인리스/CFRP 하이브리드 복합재의 경우 강도가 뛰어나, 원공주변부의 파괴보다는 오히려 볼트자체의 파손이 일어날 수 있어 기존의 연구들로는 철도차량용 하이브리드 복합재의 파괴거동을 예측하기 어렵다. 또한 실제 철도차량 부품의 파괴특성과 피로특성을 재현할 수 있는 시험도 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 우선 복합재 적층판과 금속판을 볼트체결(bolted joint)한 전단 시험용 하이브리드 시편(hybrid bolted joint specimen for shear test)을 제작하여 정적 및 피로시험을 수행함으로써 전단하중에 따른 볼트체결부의 내구특성을 연구한다. 또한 틸팅차량용 하이브리드 접합체결부(hybrid joint part)시험편을 실제 설계상태로 만든 후 이 시험편의 전용시험용 고정구를 설계제작하여 시험기에 장착하고 정적 및 피로 굽힘시험을 수행한다. 이를 통한 정적 및 피로시험 결과를 분석 평가하여 하이브리드 접합체결부에 대한 피로 수명을 개선하기 위한 대책을 제시한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

2.1.1 볼트체결 전단시험편 제작

틸팅차량 측벽부위와 언더프레임 사이의 체결에 사용되어지는 볼트체결부의 파괴거동을 알아보기 위해 Fig. 1(a)와 같이 전단시험용 하이브리드 시험편을 설계하여 제작하였다. 벽부위 재료는 탄소섬유(CF1263) 강화 에폭시 복합적층판과 SUS304 스테인리스판으로 층구조화하여 만들었으며 언더프레임재료 또한 SUS304 스테인리스(stainless)로 만들어 내식성을 높였다. 체결에 사용된 볼트는 스테인리스 소재의 BS3111(avdelok 사 제조)로서 인장강도 520MPa, 몸체부 직경 9.6mm 이며 Fig. 1(b)와 같은 형상으로 체결되었다. 또한 시험편의 폭(width)에 따른 파괴거동의 차이를 알아보기 위하여 다양한 폭의 시험편을 제작하였다.

2.1.2 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편 및 전용 고정구 제작

차체 측벽부의 CFRP/알루미늄 하니컴(aluminum

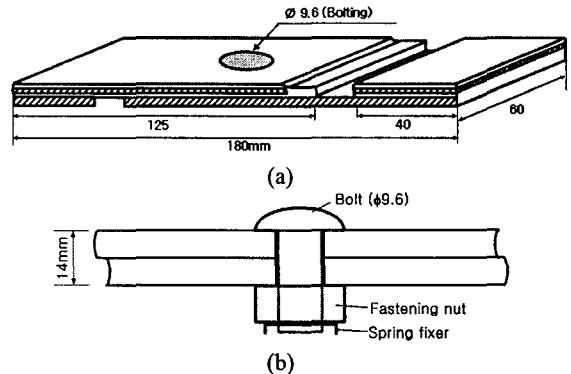


Fig. 1 Configuration of hybrid bolted joint specimen for shear test : (a) specimen geometry, (b) bolting schema

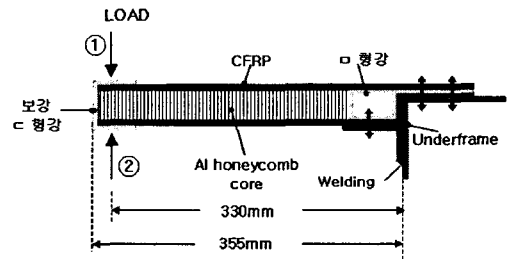
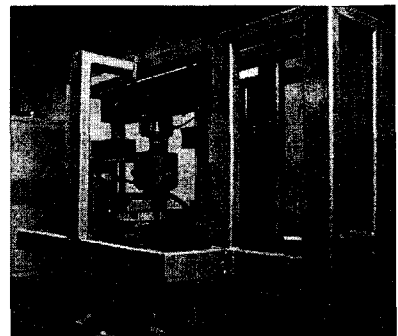
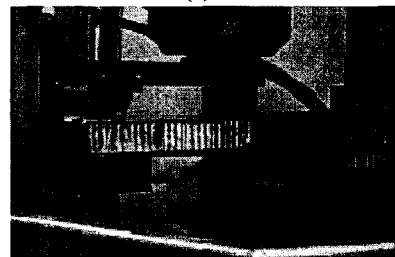


Fig. 2 Configuration of hybrid joint part for bending test; Load direction and location ①, ②



(a)



(b)

Fig. 3 Test rig for the bending fatigue loading of hybrid joint part : (a) Instron 8516 system attached with an additional rigid frame, (b) fixture rig

honeycomb) 샌드위치 복합적층판과 스테인리스 강판 언더프레임 사이의 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 개략도와 접합방법을 Fig. 2 에 나타낸다. 본 접합체결부 굽힘시험편은 텀덱객차의 실제 설계와 동일하게 제작하였다. Fig. 3 과 같이 Instron 8516($\pm 10\text{ton}$) 시험기를 굽힘시험에 견딜수 있도록 강화프레임을 추가 설계하여 장착하고[Fig. 3(a)], 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편 전용고정구[Fig. 3(b)]를 설계 제작하여 정적굽힘시험과 피로 굽힘시험이 모두 가능하도록 하였다.

2.2 정적 및 피로시험

본 연구에서는 Instron 8516 시험기와 장착된 고정구를 이용하여 정적 및 피로시험을 수행하였다. 우선, Fig. 1 의 볼트체결부 전단시험에 대해서 정적시험의 경우 1mm/min 의 변위속도로 전단 하중을 가하여 정적 시험을 하였고 이를 통해 최대하중을 구하였다. 피로시험의 경우 10Hz 의 정현파(sinusoidal wave) 동하중을 가하였으며, 응력비 $R(=P_{\min}/P_{\max})$ 은 0 을 유지하고, 최대반복하중을 정적시험에서 구한 최대하중의 70%, 50%, 40%, 30%, 20%로 낮추어가면서 수행하였다. S-N 곡선은 각 하중레벨당 2 개의 시험편을 사용하여 평균값을 취해 나타내었다. 또한 위의 시험이 끝난후 주사형 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 통하여 체결용 볼트의 파단면을 관찰함으로써 정적 및 반복하중에 따른 파괴 메커니즘의 차이를 비교하였다.

하이브리드 접합체결부 굽힘시험편에 대해서는 Fig. 3 과 같이 전용 고정구를 이용하여 굽힘하중을 가하여 정적시험 및 피로시험을 수행하였다. 정적하중은 Fig. 2 와 같이 언더프레임의 상면으로부터 330mm 떨어진 지점에서 수직방향으로 가하였고, 하중방향은 ①방향 혹은 ②방향으로 가하여 각각의 방향에 따른 최대 굽힘하중을 구하였다. 피로시험은 1~2Hz 의 정현파로 정적시험과 동일한 위치에 수직방향으로 굽힘 반복하중을 가하였고, 부하방향은 정적시험과 동일하게 ①방향 혹은 ②방향으로 수행하였다. 최저반복하중은 최대정적굽힘하중의 5%로 일정하게 유지하고, 반복 최대하중은 볼트체결 전단시험의 경우와 동일한 방법으로 최대반복하중을 일정비율로 저하시켜 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 볼트체결 전단시험편의 파괴거동

3.1.1 정적파괴특성

시험편의 폭과 볼트구멍 직경의 비(ratio)에 따른 파괴거동 차이를 알아보기위해 시험편 폭을 60mm 부터 19.3mm 까지 다양하게하여 인장실험을 수행하였다. Fig. 4 는 폭이 60~19.3mm 인 시험편의 하중-변위곡선을 나타낸다. 시험편폭이 60mm 부터 27mm 까지의 경우는 최대하중이 약 42kN 으로 일정하게 나타났다. 시험편의 폭이 27~60mm 인 경우는 시험편의 최종파단이 볼트판자체의 파괴에 의해 일어났기 때문에 일정한 최대하중을 보인것이다. 하지만 시험편폭이 19.3mm 인 경우에는 최대하중이 24kN 으로 급격히 저하되었다. 이는 시험편폭 19.3mm 에서 파괴모드의 급격한 변화가 있었음을 나타낸다. 이 경우에는 볼트에서 파단이 일어난게 아니라 시험편내의 볼트체결용 원공의 주변부인 리가멘트부의 폭이 작아서 이 부분에서 파손이 일어났기 때문에 급격한 하중저하를 보인것이다. Fig. 5 는 Fig. 4 의 하중-변위곡선들에 각각 대응하는 전단시험편의 파괴 사진을 나타낸다. 시험편 폭이 작아질수록 볼트체결용 원공주변의 리가멘트부가 큰 인장 변형을 일으켜 원공이 길쭉해졌음을 알 수 있다. 또한 시험편 폭 19.3mm 에서는 체결볼트의 파괴가 일어나지 않고 리가멘트부가 큰 변형을 일으켜 파단했던 것이다.

Fig. 6 은 정적하중에 의한 볼트 파단면을 주사형전자현미경을 통해 찍은 사진인데, 파단은 볼트 몸통부의 전단면(shearing plane)을 따라 상부에서 하부방향(A 방향)으로 수직하게 진행되었다. 또한 볼트몸통의 표피부에서는 단조가공에 의해 형성된 표피 변질층과 몸통내부 사이의 측간박리(B 부위)가 파괴초기에 심하게 발생하였음을 알 수 있다.

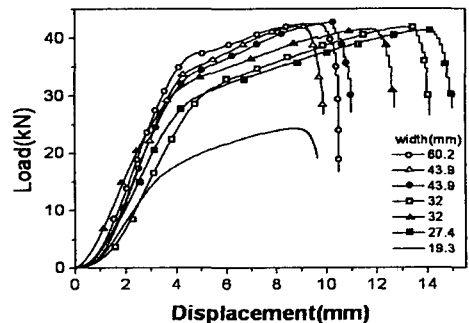


Fig. 4 Load-displacement curves of hybrid bolted joint specimens according to various widths

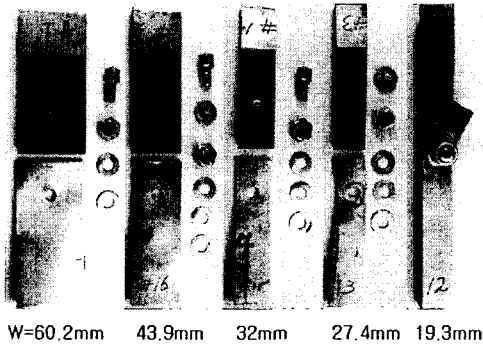


Fig. 5 Photographs of the fracture of hybrid bolted joint specimens with various widths under static loading

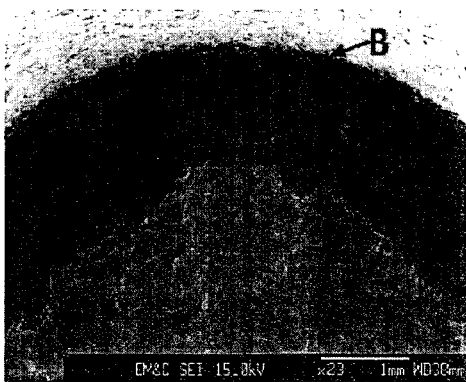


Fig. 6 SEM micrograph of the fracture surface of the bolt body under static shear load

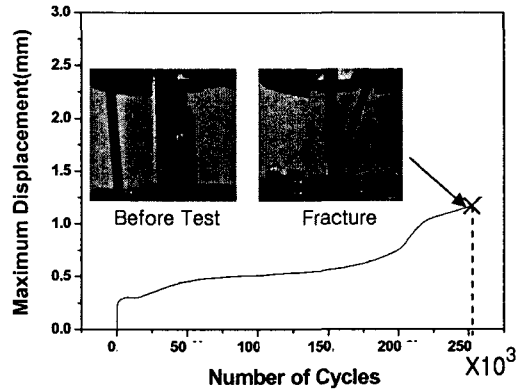


Fig. 8 Maximum displacement versus number of cycles under the maximum cyclic load of 15kN

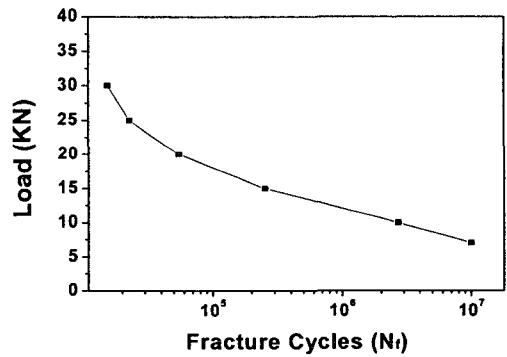


Fig. 9 Maximum load(S) versus number of cycles(N) until the failure of bolted joint hybrid composite specimens

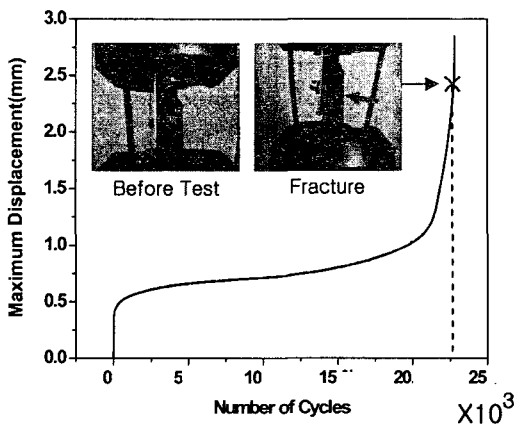


Fig. 7 Maximum displacement versus number of cycles under the maximum cyclic load of 20kN

3.1.2 피로파괴특성

Fig. 7 과 Fig. 8 은 하중의 크기에 따른 전단시험편의 피로파괴거동을 변위-사이클수 곡선을 통해 나타낸다. 최대반복하중 P_{max} 가 20kN 이상의 고하중 피로인 경우, 반복하중에 따른 변위의 증가는 Fig. 7 과 같이 초기엔 안정된 상태를 유지하다가 이후 급격한 변위의 증가로 인해 최종 파단에 이르는 형태를 보인다. 최대반복하중 P_{max} 가 15kN 이하의 저하중 상태인 경우, 반복하중에 따른 변위의 증가는 Fig. 8 과 같이 초기 이후의 증가율이 다소 변동적인 거동을 보이며 최종 파단에 이르는 형태를 보인다. 볼트의 파괴위치는 최대 반복하중의 크기와 상관없이 볼트의 머리부 각진 곳이나 볼트의 나사산 근처부에서 반복적인 인장응력집중으로 인해 피로파괴가 발생하였다(Fig. 7 과 8 의 사진에서 화살표). Fig. 9 는 볼트체결 전단시험편의 하중-수명(S-N) 곡선을 나타낸다.

이 S-N 곡선을 통해 볼트체결 전단시험편의 내구한도는 10^7 사이클에서 7.5kN 임을 알 수 있다.

Fig. 10 은 피로하중에 의한 볼트의 파괴면을 주사형 전자현미경을 통하여 관찰한 사진이다. Fig. 10(a)는 반복하중에 의한 볼트의 파단사진이며, Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 피로파괴 시작부 C 부분을 확대한 사진이다. Fig. 10(b)에서 관찰할 수 있듯이 나사산 표피부의 단조가공 변질층인 선 D의 바로 밑에서 피로에 의한 초기 크랙(crack)이 발생하였음을 보인다. 또한 E 부분은 피로파괴의 전형적인 모습인 스트라이에이션(striation)을 나타냈다. 이를 Fig. 6 과 같이 정적하중 하에서 볼트의 몸통부를 체결부의 접합면을 따라 전단형으로 파괴된 파면과 비교해보면 확연한 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 볼트체결 전단시험편의 내피로성을 개선하고 내구성을 보증하기 위해서는 내피로성이 뛰어난 볼트를 선택하고 또한 나사산이나 나사 머리부에서 응력집중의 분산이 충분한 단면 형상의 설계를 채택해야 할 것이다.

3.2 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 파괴 거동

3.2.1 정적파괴특성

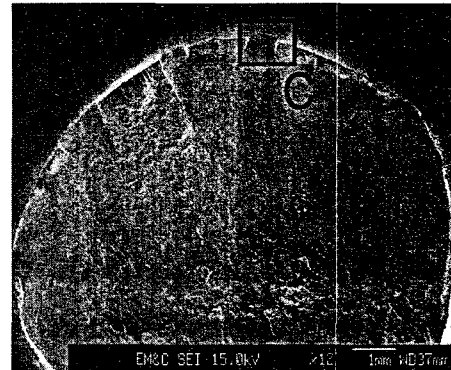
Fig. 11 은 Fig. 2 에서 부하방향 ①의 굽힘시험으로부터 구한 굽힘하중-처짐의 그래프이다. 처짐(변위)속도를 1mm/min 로 하여 실험을 수행한 결과 굽힘하중은 최대 약 3.2kN 까지 상승하였으며, 이후 급속한 하중저하가 나타났다. 하중저하가 발생할 때 두 가지 형태의 하중저하거동을 보였는데, 하중이 서서히 저하하는 a 방향 하중저하 거동과 급속히 저하하는 b 방향 하중저하 거동을 보였다.

a 방향 하중저하 거동은, 파괴모드가 Fig. 12(a)에서와 같이 알루미늄 하니컴 코어의 중립축 근처에서 발생하여 코어의 전단형 변형이 진행되면서 나타나는 것으로, 변형발생 이후에도 어느정도 하중을 계속하여 지지할 수 있으므로 하중의 저하속도가 느리다. 이 경우는 변형 및 파손시의 에너지흡수능력이 b 방향의 경우보다 뛰어나므로 구조물의 안전성 측면에서 볼 때 바람직한 현상이라 할 수 있다.

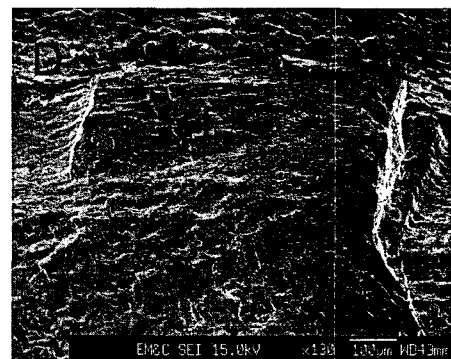
한편 b 방향 하중저하 거동의 경우 Fig. 12(b)와 같이 기저 보강판 끝단부와 접촉하는 CFRP 하판이 심한 압축하중을 받음과 동시에 국부적인 굽힘하중을 추가적으로 받게 되어 절곡(억입형 파괴)이 발생한다. 이 파괴가 발생하면 CFRP 하판의 파단부가 하니컴 코어부를 파고들어가 파괴가 가속되어 Fig. 11 의 b와 같이 급격한 하중저하가 일어나게 된다. 본 시험편의 경우 하판의 굽힘강도가 하니컴 코어의 전단강도보다 다소 낮아서 b 방향 하중저하 거동의 발생 확률이

65% 정도로 높게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 하판의 두께를 더욱 두껍게 하여 b 방향으로의 파괴를 방지해야 한다.

Fig. 13 은 Fig. 2 에서 부하방향 ②의 굽힘시험으로부터 구한 굽힘하중-처짐 그래프이다. 부하방향 ②에 대한 정적파괴거동은 Fig. 14 와 같이 시험편의 고정부에 해당하는 기저 받침대의 용접부가 크게 소성변형되어 늘어나 있고 기저 모양의 직각보강판이 시험편의 윗방향 변형에 따라 120° 이상 펼쳐져 언더프레임 판으로부터 들떠 있다. 즉, 부하방향 ②의 굽힘시험결과는 시험편과 언더프레임이 기저 받침대를 통해 접합되어 있는 볼트체결부와 용접부의 강도에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최종파괴는 처짐량이 80mm 이상일 때 용접부에서 발생하였으므로 용접부가 볼트체결부 보다 더 약함을 알 수 있었다. 따라서 부하방향 ②에 대한 굽힘강도를 부하방향 ①의 경우와 동일 수준으로 올리기 위해서는 현재의 용접부를 훨씬 강화하고 또한 기저 받침대의 강도를 높일 필요가 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 SEM images of the fatigue fracture behavior of the bolt body: (a) fracture surface near the bolt screw thread and (b) an enlarged photo of area C, indicating an initial fracture zone

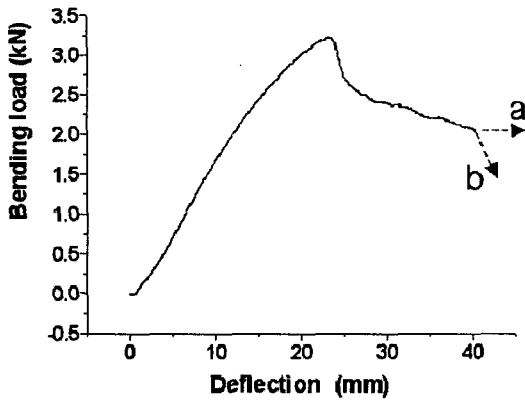


Fig. 11 Bending load-deflection curve of the hybrid joint part specimen under the load direction ① in Fig. 2

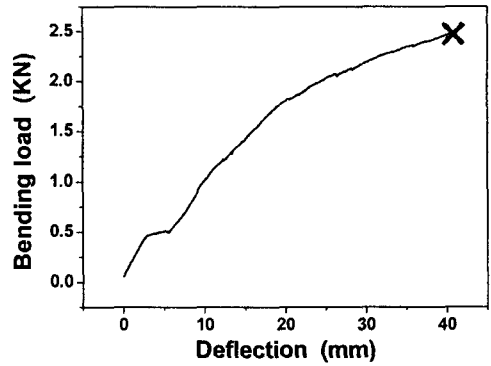
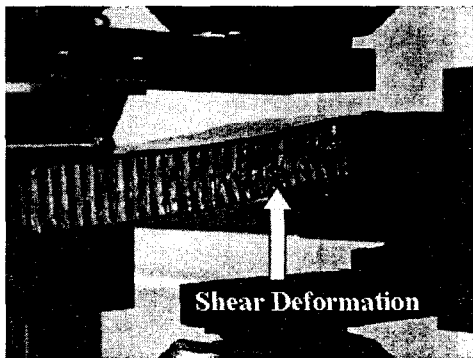
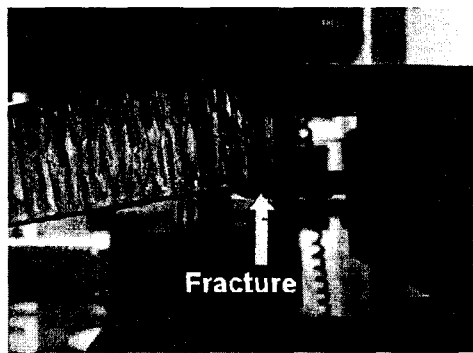


Fig. 13 Bending load-deflection curve of the hybrid joint part specimen under the load direction ② in Fig. 2



(a)



(b)

Fig. 12 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

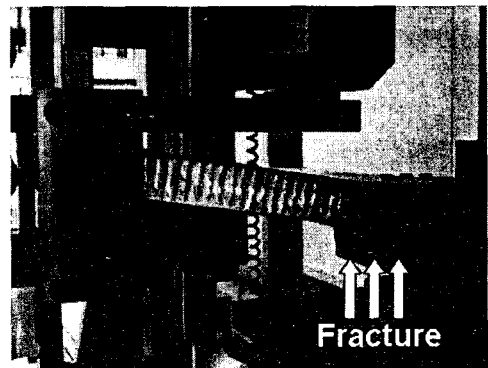


Fig. 14 Fracture occurrence at the welding site of the hybrid joint part specimen under the static bending load ②

3.2.2 피로파괴특성

하이브리드 접합체결부의 정적굽힘 시험결과 부하방향 ② 경우의 최대굽힘강도가 ①방향의 굽힘강도의 82% 수준으로 취약했기 때문에 ② 부하방향의 피로시험을 먼저 수행하였다. 시험은 2.2 절에 기입한 방법대로 최대 정적굽힘하중(2.56kN)의 5% 수준을 최저반복하중으로 하고, 최대반복하중은 최대정적굽힘하중의 60%, 50%, 40%로 점점 낮추어 가면서 내구한도를 평가하였다. 최대 반복하중이 1.5kN 인 경우 7자 받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 피로응력의 집중이 극심하게 발생하여 불과 400~2000 사이클에서 피로파괴가 발생하였다.

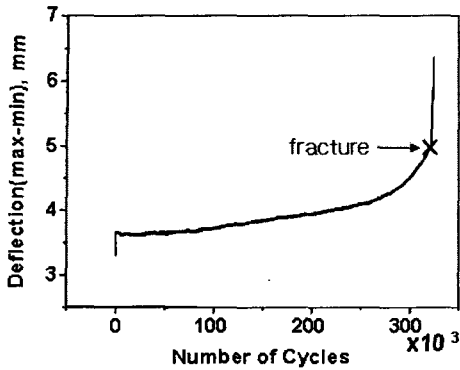


Fig. 15 Deflection versus number of cycles of the hybrid joint part specimen under the fatigue bending load ②

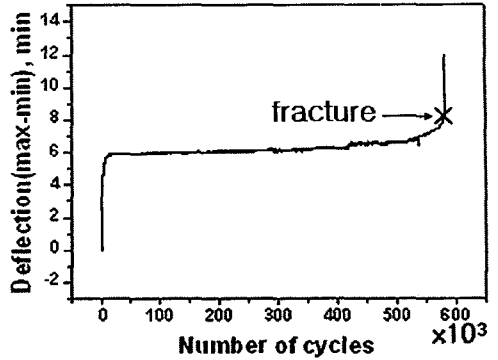


Fig. 18 Deflection versus number of cycles of the hybrid joint part specimen under the fatigue bending load ①

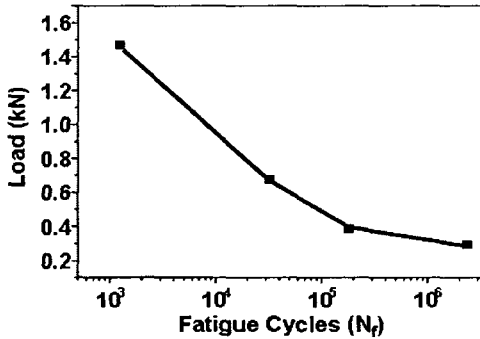


Fig. 16 S-N curve of hybrid joint part specimen under the fatigue bending load ②

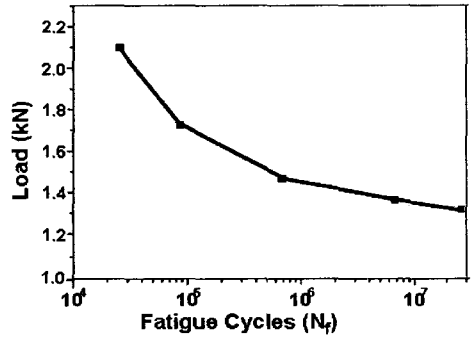


Fig. 19 S-N curve of hybrid joint part specimen under the fatigue bending load ①

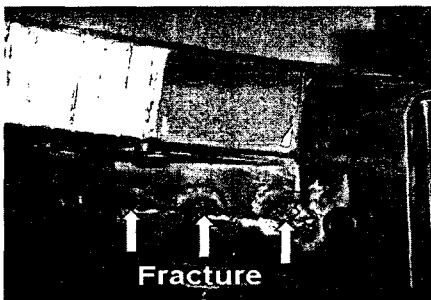


Fig. 17 Photograph of the fracture state at the welding site under the cyclic bending loads ②



Fig. 20 Photograph of the fracture mode of hybrid joint part specimen under the fatigue bending load ①

Fig. 15 는 부하방향이 ②이고, 최대반복하중이 0.8kN 일 때의 변위-수명곡선을 나타낸다. 굽힘하중에 의한 변위는 초기 이후 약한 증가를 보이다가 27 만 사이클부터 가속적으로 증가하여 33.2 만 사이클에서 기저 받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 피로파괴가 발생하였다.

Fig. 16 은 ②방향의 반복굽힘하중조건하에서 구한 하이브리드 접합체결부의 S-N 곡선을 나타낸다. 피로하중에 취약함을 보이는 용접부의 경우 불과 최대반복하중이 0.4kN 이하일 때도 피로파괴가 발생하였음을 유념해야 한다. Fig. 17 은 피로시험에 의한 용접부 파괴 모습을 촬영한 사진이다. 언더프레임과 기저 받

침대를 3 군데로 용접한 용접부에 반복하중이 집중응력으로 가해져 파괴를 유발했던 것이다. 또한, 정적인 굽힘시험의 경우에는 시험편의 7자 받침대 체결부가 상당히 연성적(ductile)으로 변형되어 80mm 이상의 처짐이 일어나야 용접부의 파괴가 일어났지만, 피로시험에서는 불과 5mm 이하의 처짐에 의해서 파괴가 발생하고 있음을 보인다. 즉, 현재의 점용접방법이 기계적 피로하중에 매우 약하기 때문에 이 부분을 전수용접으로 개선해야 함을 알 수 있었다.

Fig. 18 은 부하방향이 ①이고, 최대반복하중이 1.5kN 일 때의 변위-수명곡선을 나타낸다. 굽힘하중에 의한 변위는 초기 이후 일정함을 보이다가 표피 CFRP 상판과 하니컴코어층 사이에서 층간분리가 발생하는 50 만 사이클부터 가속적으로 증가함을 보였다. 결국 59.2 만 사이클에서 층간분리가 상판 양끝단까지 완전히 진전하여 피로파괴가 발생하였다.

Fig. 19 는 부하방향 ①의 S-N 곡선을 나타낸다. 파괴수명(N_f)이 커짐에 따라 피로강도의 저하가 비교적 큰 편이었으며, 부하방향 ①의 피로한도는 10^7 cycles 기준으로 약 1.32kN 으로 평가 되었다.

Fig. 20 은 부하방향 ①일 때의 피로파괴 모습을 나타낸다. 부하방향 ②의 피로파괴 경우에 용접부에서 파괴가 일어난 것과는 달리, 부하방향 ①의 피로시험의 경우는 시험편의 CFRP 표피 상판과 하니컴코어층 사이에서 층간박리 파괴가 일어남을 보였다. 이렇게 층간박리가 상판 바로 밑에서 유발 된 이유는 CFRP 상판의 두께(3mm)가 CFRP 하판의 두께보다 약 1.5 배 정도 더 크므로, 상판쪽의 국부적 강성이 하판의 경우보다 더 커서 상판과 하니컴 코어층 사이의 층간전단응력이 하판의 경우보다 컸기 때문에 상판과 코어층 사이에서 층간박리가 발생한 것으로 사료된다. 이와 같이 상판쪽 층간박리를 방지하기 위해서는 상판과 하니컴 코어층 사이에 접착필름(adhesive film)의 두께를 기존보다 두껍게 삽입하여 성형함으로써 층간전단응력의 집중을 완화시키는것이 바람직할 것이다.

4. 결 론

틸팅차량에서 가장 취약부위에 해당하는 차체 측벽부와 언더프레임 사이의 하이브리드 접합체결부의 안전성과 내구신뢰성을 시험 평가하였다. 이를 위해 단품 수준의 시험편을 실제의 차체구조 치수로 설계 제작하고, 먼저 정적인 전단강도와 피로전단강도를 구하고 정적인 굽힘강도와 동적인 피로 굽힘강도를 시험 해석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 볼트체결 전단시험편의 경우, 정적시험에서는 체결부위 접합면을 따라 파괴가 볼트 몸통부에

서 일어났고, 피로시험의 경우에는 볼트의 나사산 근처부나 머리부의 각진 근처부에서 인장형 파괴가 발생했다. 볼트의 선정시에 이러한 응력집중부위가 적거나 응력집중도의 영향을 적게 받는 연성적 강재로 만들어진 볼트를 선택하여 사용한다면 피로수명을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 경우, ②방향의 하중에서 가장 취약했으며 정하중과 피로하중 모두에서 7자 보강받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 파손이 일어났다. 따라서 용접부의 설계를 현격히 보강할 필요가 있다.

후 기

본 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 ①, ② 방향 피로하중에 대한 시험데이터를 바탕으로, 그 취약점을 개선하기 위하여 철도기술연구원과 한국화이바는 부분용접으로 체결된 7자 보강받침대 부분을 전수용접하였다. 이렇게 개선된 하이브리드 접합체결부를 사용하여 제작한 1 량의 실물 차체에 대해 피로시험을 수행한 결과 200 만 사이클에서도 피로균열이 발생하지 않았음을 확인하였으며, 이는 객실측판과 언더프레임사이의 조인트부분이 요구수명보다 약 5 배정도 높은 우수한 내피로성을 가진 것으로 최종 개발되었음을 밝힌다.

참고문헌

- (1) Shin Kwang-Bok and Lee Sang-Jin, 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.
- (2) Shin Kwang-Bok and Lee Sang-Jin, 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.
- (3) Lim Tae Seong, Kim Byung Chul and Lee Dai Gil, 2006, "Fatigue Characteristics of the Bolted Joints for Unidirectional Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 58~68.
- (4) Gordon Kelly, 2006, "Quasi-Static Strength and Fatigue Life of Hybrid(Bonded/Bolted) Composite Single-Lap Joints," *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 119~129
- (5) Yi Xiao, Takashi Ishikawa, 2005, "Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints. Part I: Experimental Investigation," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1022~1031.
- (6) 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.