

틸팅차량용 차체의 하이브리드 복합재 접합체결부의 내구성 평가

Fatigue Assessment of Hybrid Composite Joint for the Tilting Car Body

정달우¹⁾, 최낙삼^{2)†}, 김정석³⁾, 서승일³⁾, 조세현⁴⁾

Dal-Woo Jung¹⁾, Nak-Sam Choi²⁾, Jung-Seok Kim³⁾, Sueng-Il Seo³⁾ and Se-Hyun Jo⁴⁾

1) Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University,
Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

2)† Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1271 Sa-1 dong, Sangrok-gu,
Ansan, Kyunggi-do, 426-791, Korea, nschoi@hanyang.ac.kr

3) Korea Railroad Research Institute, 374-1, Woulam-dong, Uiwang-City Gyeonggi-do,
Korea 437-050

4) HANKUK FIBER CO.,LTD, 181-1 YongJi-ri, KyungSangNam-do, Korea

Abstract

Fatigue fracture behavior of a hybrid joint part with bolting was evaluated in comparison to the case of static fracture. Hybrid joint part specimens for bending test were made with layers of CFRP and aluminum honeycomb. Characteristic fracture behaviors of those specimens were obviously different under static and cyclic loads. Static bending load showed the shear deformation at the honeycomb core, whereas cyclic bending load caused the delamination between CFRP skin layers and honeycomb core. Experimental results obtained by static and fatigue tests were considered in modifications of design parameters of the hybrid joint

1. 서론

철도차량은 기술의 진보에 따라 속도의 증가, 승차감 개선, 에너지 소비량 감소, 안전도 증가의 면에서 꾸준히 개선되고 있다. 철도차량의 경량화를 제고하기 위해서 높은 비강성 및 비강도(specific stiffness & strength)재료가 요구되고 있으며, 신소재 복합재료(advanced composite materials)의 활용

도가 높아지는 추세이다[1]. 복합재료는 과거 철도차량에서 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나 1990년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(carbody structure)와 같이 하중을 직접 지탱하는 1차 부재(primary structure)까지 그 적용도가 확대되고 있다 [2]. 이러한 기술의 흐름에 발맞추어 기존의 일반 레일(rail)위에서도 고속운행이 가능한 틸팅차량의 실용화가 중요 과제로 부각되고 있다.

hybrid 틸팅차체(hybrid tilting car body)의 경우 차체 측벽부(side-panel)와 언더프레임(under-frame) 사이를 연결해주는 접합체결부가 다른 부위보다 큰 굽힘모멘트와 전단력을 받으므로 취약한 부위로 알려져 있다[3, 4]. 따라서 본 연구에서는 틸팅차량용 hybrid 접합체결부(hybrid joint part)를 실제 설계상태로 만든 후 전용시험용 고정구를 설계제작하여 정적 및 피로 굽힘시험을 수행하고, 이를 통해 접합체결부에 대한 피로 수명예측과 개선점을 제시한다.

2. 실험방법

2.1 하이브리드 접합체결부 굽힘 시편 및 전용고정구 제작

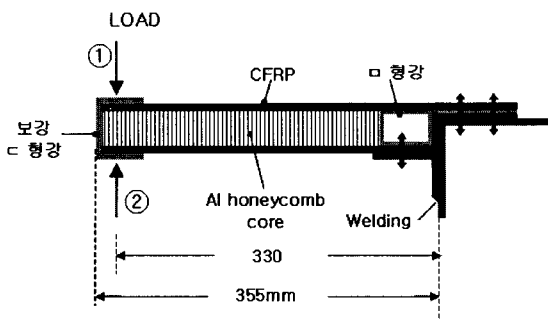


Fig. 1 Configuration of hybrid joint part for bending test; Load direction and location

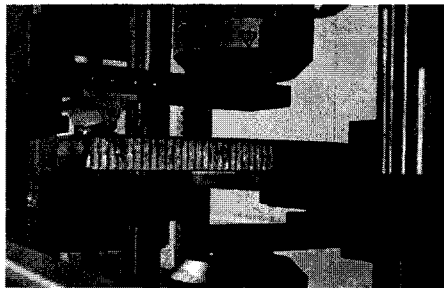


Fig. 2 Bending test jig for hybrid composite joint

차체 측벽부의 CFRP/알루미늄 하니컴 (aluminum honeycomb) 샌드위치 복합적층 판과 스테인리스 강판 언더프레임 사이의 하이브리드 접합체결부 굽힘시험편의 개략도와 접합방법을 Fig. 1에 나타낸다. 본 접합체결부 굽힘시험편은 틸팅객차의 실제 설계와 동일하게 제작하였다. Fig. 2는 제작된 전용 고정구에 하이브리드 접합체결부 굽힘 시험편을 장착하여 정적굽힘시험과 피로굽힘시험이 모두 가능하도록 Instron 8516($\pm 10\text{ton}$) 시험기에 설치한 사진이다.

2.2 정적 및 피로시험

본 연구에서는 Instron 8516 시험기와 장착된 고정구를 이용하여 정적 및 피로시험을 수행하였다. Fig. 2와 같이 전용 고정구를 이용하여 굽힘하중을 가하여 정적시험 및 피로시험을 수행하였다. 정적하중은 Fig. 1과 같이 언더프레임의 상면으로부터 330mm 떨어진 지점에서 수직방향으로 가하였고, 하중방향은 ①방향 혹은 ②방향으로 가하여 각각의 방향에 따른 최대 굽힘하중을 구하였다. 피로시험은

1~2Hz의 정현파로 정적시험과 동일한 위치에서 수직방향으로 굽힘반복하중을 가하였고, 부하방향은 정적시험과 동일하게 ①방향과 ②방향으로 각각 수행하였다. 반복 최저하중은 최대 굽힘하중의 5%로 일정하게 유지하고, 최대반복하중을 정적시험에서 구한 최대하중의 70%, 50%, 40%, 30%, 20%로 낮추어가면서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적파괴특성

Fig. 3은 Fig. 1에서 부하방향 ①의 굽힘시험으로부터 구한 굽힘하중-처짐의 그래프이다. 처짐(변위)속도를 1mm/min로 하여 실험을 수행한 결과 굽힘하중은 최대 약3.2kN까지 상승하였으며, 이후 급속한 하중 저하가 나타났다. 하중저하가 발생할 때 두 가지 형태의 하중저하거동을 보였는데, 하중이 서서히 저하하는 a 방향 하중저하 거동과 급속히 저하하는 b 방향 하중저하 거동을 보였다.

a방향 하중저하 거동은, 파괴모드가 Fig. 4(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 b방향의 경우보다 뛰어나므로 구조물의 안전성 측면에서 볼 때 바람직한 현상이라 할 수 있다. 한편 b방향 하중저하 거동의 경우 Fig. 4(b)와 같이 7자 보강판 끝단부와 접촉하는 CFRP하판이 심한 압축하중을 받음과 동시에 국부적인 굽힘하중을 추가적으로 받게 되어 절괴(격임형 파괴)가 발생한다. 이 파괴가 발생하면 CFRP하판의 파단부가 하니컴 코어부를 파고들어가 파괴가 가속되어 Fig. 3의 b와 같이 급격한 파괴가 일어나게 된다. 본 시험편의 경우 b방향 하중저하 거동의 발생 확률이 65%정도

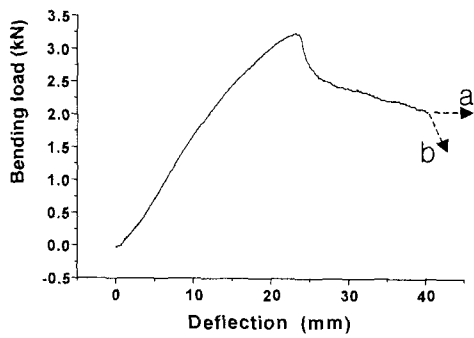
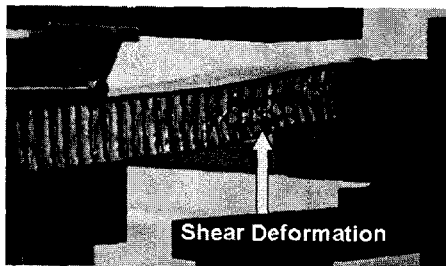
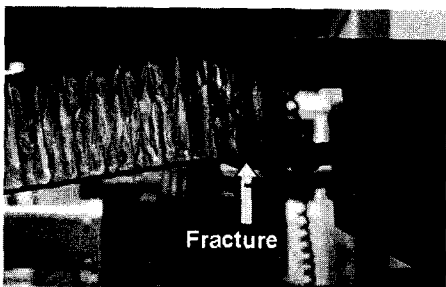


Fig. 3 Bending load-deflection curve of hybrid joint part under the load direction ①



(a)



(b)

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

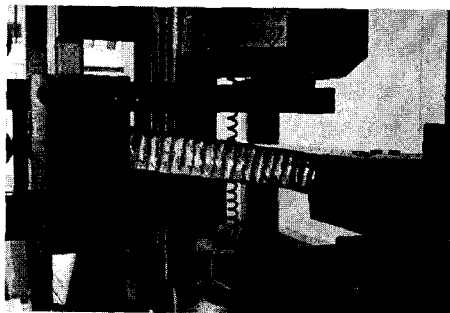


Fig. 5 The fracture in the welding part under the static bending load ②

로 높게 나타나므로 하판의 두께를 두껍게 하여 b방향으로의 파괴를 방지해야 한다.

Fig. 5는 부하방향 ②에 의한 정적굽힘파괴를 나타낸다. 시험편의 고정부에 해당하는 ㄱ자 받침대의 용접부가 크게 소성변형되어 늘어나 있고 ㄱ자 모양의 직각보강판이 시험편의 윗방향 변형에 따라 120°이상 펼쳐져 언더프레임판으로부터 들떠 있다. 즉, 부하방향 ②의 굽힘시험결과는 시험편과 언더프레임에 ㄱ자 받침대를 통해 각각 접합되어 있는 볼트체결부와 용접부의 강도에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최종파괴는 처짐량이 80mm 이상일 때 용접부에서 발생하였으므로 용접부가 볼트체결부보다 더 약함을 알 수 있었다. 따라서 부하방향 ②에 대한 굽힘강도를 부하방향 ①의 경우와 동일 수준으로 올리기 위해서는 현재의 용접부를 훨씬 강화하고 또한 ㄱ자 받침대의 강도를 높일 필요가 있다.

3.2 피로파괴특성

하이브리드 접합 체결부의 정적굽힘시험 결과 부하방향 ② 경우의 최대굽힘강도가 ① 방향의 굽힘강도의 82% 수준으로 취약했기 때문에 ② 부하방향의 피로시험을 먼저 수행하였다. 실험은 2.2절에 기입한 방법대로 최대 정적굽힘하중(2.56kN)의 5% 수준을 최저반복하중으로 하고, 최대반복하중은 최대정적굽힘하중의 60%, 50%, 40%로 점점 낮추어 가면서 내구한도를 평가하였다. 최대 반복하중이 1.5kN인 경우 불과 400~2000사이클에서 ㄱ자 받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 피로파괴가 발생하였다.

Fig. 6은 부하방향이 ②이고, 최대반복하중이 0.8kN일 때의 변위-수명곡성을 나타낸다. 굽힘하중에 의한 변위는 초기 이후 약한 증가를 보이다가 27만 사이클부터 가속적으로 증가하여 33.2만 사이클에서 ㄱ자 받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 피로파괴가 발생하였다.

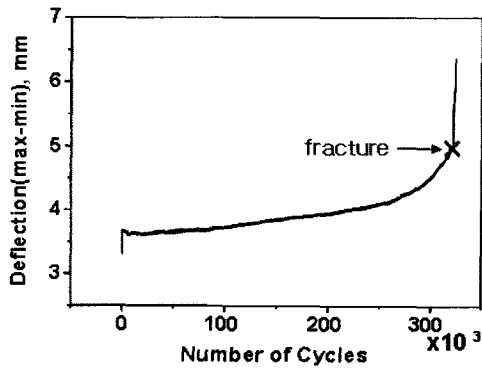


Fig. 6 Deflection versus number of cycles of hybrid composite joint under the fatigue bending load ②

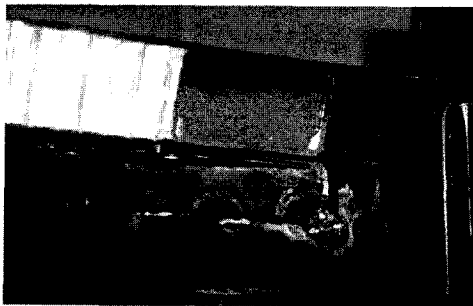


Fig. 7 Photograph of the fracture state at the welding part under cyclic load

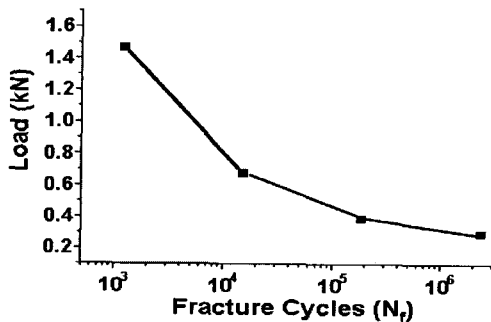


Fig. 8 S-N curve of hybrid composite joint under the fatigue bending load ②

Fig. 7은 피로시험에 의한 용접부 파괴 모습을 촬영한 사진이다. 언더프레임과 T자 형각을 3군데로 용접한 용접부가 반복하중에 의해 응력이 집중적으로 가해져 파괴가 유발되었다. 또한, 정적인 굽힘시험의 경우에는 시험편의 T자 받침대 체결부가 상당히 연성적으로 변형되어 80mm이상의 처짐이 발생하면서 용접부의 파괴가 일어났지만, 피로시험에서는

불과 5mm이하의 처짐에 의해서 파괴가 발생하고 있음을 보인다. Fig. 8은 ②방향의 반복하중조건하에서 구한 하이브리드 접합체결부의 S-N 곡선을 나타낸다. 용접부의 취약한 피로파괴는 최대반복하중을 0.4kN 이하로 하여도 피로 강도의 저하가 나타났음을 유념해야 한다. 이결과 현재의 용접상태가 내피로성에 매우 취약하며, 또한 설계개선이 반드시 이루어져야 할 부분임을 알 수 있다.

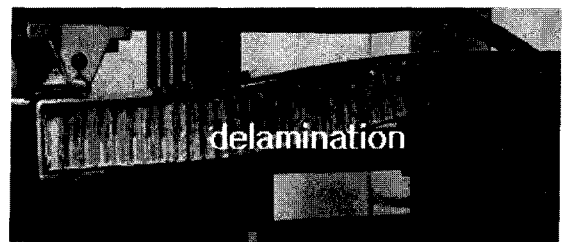


Fig. 9 Fracture mode of hybrid composite joint under the fatigue bending load ①

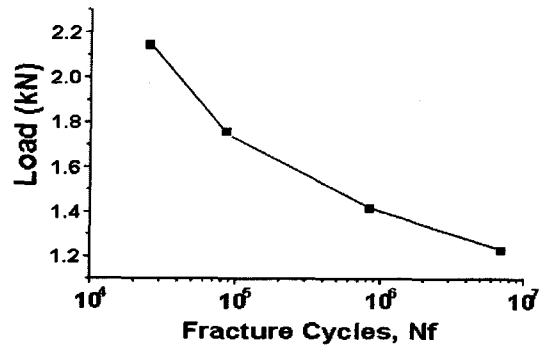


Fig. 10 S-N curve of hybrid composite joint under the fatigue bending load ①

Fig. 9는 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 유발된 이유는 CFRP상판의 두께(3mm)가 CFRP하판의 두께보다 약 1.5배 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 같이 상판쪽 층간박리를 방지하기 위해서는 상판과 하니컴 코어층 사이에 접착필름(adhesive film)의 두께를 기존보다 두껍게 삽입하여 성형함으로써 층간전단응력의 집중을 완화시키는것이 바람직할 것이다.

Fig. 10은 부하방향 ①의 S-N곡선을 나타낸다. 파괴수명(N_f)이 커짐에 따라 피로강도의 저하가 비교적 큰편이었으며, 부하방향 ①의 피로한도는 10^7 cycles 기준으로 약 1.12kN 으로 평가 되었다.

4. 결론

틸팅차량에서 가장 취약부위에 해당하는 차체 측벽부와 언더프레임 사이의 하이브리드 접합체결부의 안전성과 내구신뢰성을 시험 평가하였다. 이를 위해 단품 수준의 시험편을 실제의 차체구조 치수로 설계 제작하여 정적인 굽힘강도와 동적인 피로 굽힘강도를 시험 및 평가 하였다. 시험결과 하이브리드 접합체결부는 ②방향 하중에 대해 매우 취약함을 보였으며, 정하중과 피로하중 모두에서 Γ 자 보강받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 파손이 일어났다. 따라서 용접부의 설계를 현격히 보강할 필요가 있다.

후기

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

참고문헌

- [1] 신광복, 이상진(2004), 복합재료를 이용한 철도차량 경량화 사례 및 기술, 한국복합재료학회, Vol. 17, No. 4, pp. 82-86
- [2] 신광복, 이상진(2005), 오토클레이브 성형기법을 이용한 복합재 철도차량 차체 제작, 한국복합재료학회, Vol. 18, No. 2, pp. 52-58.
- [3] Reinhart T. J., et al.(1987), Composites-engineered materials handbook, ASM International, Vol. 1, pp. 665-728.
- [4] Vinson J. R., Sierakowski R. L.(1989), The behavior of structure composed of composite materials, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 239-283.