

틸팅차량용 Hybrid차체 접합체결부의 피로 특성 평가

정달우*·김덕재**·최낙삼***·조세현****·서승일*****

Fatigue Assessment of Hybrid Composite Joint for the Tilting Car Body

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

Abstract

Fatigue fracture behavior of a hybrid joint between side-panel and under-frame by riveting and adhesive bonding has been evaluated. Two kinds of joint specimens based on real geometry were fabricated for shearing test as well as bending test. Static and cyclic loadings were used for fatigue assessment. Fatigue fracture results obtained by such experiments were reflected in modifications of design parameters of the hybrid joint.

Key Words: Tilting Car body, Fatigue Test, S-N Curve, Hybrid Composite Joint, Riveting and Adhesion

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 활용도가 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)로의 적용도 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. 이 부위에 대한 유한요소해석과 함께 리벳체결(rivet joint)이 적용된 경우에 대한 정적인 시험 및 파괴거동은 전년도에 연구된 바 있다[3].

본 연구에서는 복합재적층판과 금속판을 리벳-접착체결(rivet and adhesive joint)한 전단 하이브리드 시편(hybrid composite joint specimen for shear test)을 제작하고, 피로시험을 수행하여 리벳-접착체결부에 대한 기계적 내구특성을 연구한다. 또한 틸팅차량용 hybrid 접합체결부(hybrid joint part)를 실제 설계상태로 만든 후 전용시험용 고정구를 설계제작하여 정적 및 피로 굽힘시험을 수행하고, 이를 통해 접합체결부에 대한 피로수명예측과 개선점을 제시한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

2.1.1 리벳체결부 전단시편 제작

Fig. 1과 같이 틸팅차량 벽부위와 언더프레임사이의 전단형 하이브리드시편을 설계하여 제작

* 한양대학교, 기계설계학과

** 한양대학교, 기계설계학과

*** 한양대학교, 기계정보경영공학부, 교신저자
(nschoi@hanyang.ac.kr)

**** (주)한국화이바

***** 한국철도기술연구원

하였다. 벽부위 재료는 탄소섬유(CF1263) 강화 에폭시 복합적층판으로 만들었으며 언더프레임재료는 SUS304 스테인리스(stainless)로 만들어 내식성을 높였다.

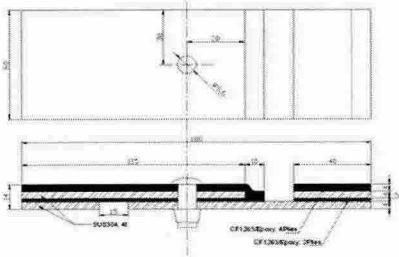


Fig. 1 Configuration of hybrid composite joint specimen with riveting and adhesion for shear test

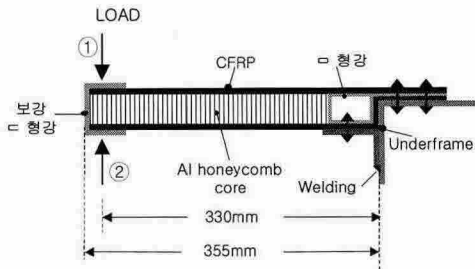


Fig. 2 Configuration of hybrid joint part for bending test; Load direction and location

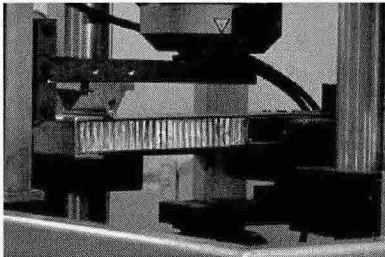


Fig. 3 Bending test rig for hybrid composite joint

2.1.2 hybrid 접합체결부 시험편 및 고정구 제작

차체 측벽부의 탄소섬유강화플라스틱/알루미늄하니컴 샌드위치(honeycomb sandwich) 복합적층판과 스테인리스 강판 언더프레임 사이의 hybrid 접합체결부 굽힘시험편의 개략도와 접합방법을 Fig. 2에 나타낸다. 본 접합체결부 굽힘시험편은 텀링객차의 실사이즈 설계에 맞도록 제작하였다. Fig. 3은 전용고정구에 hybrid 접합체결부 굽힘시험편을 장착하여 피로시험기인 Instron 8516 (±10Ton)에 설치한 사진으로 정적시험과 피로시

험을 겸해서 수행할 수 있다.

2.2 정적 및 피로시험

Instron 8516 시험기를 통해 정적시험과 피로시험을 하였다. 우선, Fig.1의 리벳-접착 체결부 전단시험편에 대해서 1mm/min의 변위속도로 인장형 하중을 가하여 정적 시험을 하였다. 정적시험에서 최대하중을 구한 다음에 피로시험시에는 10Hz의 정현파(sinusoidal wave) 동하중을 가하였으며, 응력비 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 은 0을 유지하고, 반복 최대하중을 정적시험에서 구한 최대인장하중의 70%, 50%, 40%, 30%, 20%로 낮추어가면서 피로시험하였다.

hybrid 접합체결부 굽힘시험편에 대해서는 Fig.3과 같이 전용 고정구를 이용하여 굽힘하중을 주어 정적시험 및 피로시험을 수행하였다. 정적시험은 Fig. 2와 같이 언더프레임의 상면으로부터 330mm 떨어진 지점에서 수직방향으로 가하였고, 부하는 ①방향 혹은 ②방향으로 가하여 각각의 방향에 따른 최대 굽힘하중을 구하였다. 피로시험은 1~2 Hz의 정현파로 정적시험과 동일한 위치에 수직방향으로 굽힘반복하중을 가하였고, 부하방향은 정적시험과 동일하게 ①방향 혹은 ②방향으로 수행하였다. 반복 최저하중은 최대굽힘하중의 5%로 일정하게 유지하고, 반복 최대하중은 리벳-접착 전단시험편의 경우와 동일한 방법으로 최대굽힘하중을 일정비율로 저하시켜 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 리벳체결 전단시험편의 피로특성

리벳체결 전단시험편을 인장실험한 결과 평균 42kN의 최대인장하중을 구했다. 이 최대인장하중값을 기준으로 약70% 수준인 35kN을 반복 최대하중으로 정하고 피로시험을 시작하여 점차 반복 최대하중을 2.2절에서 제시한 비율로 낮추어 피로시험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 얻은 S-N곡선은 Fig. 4와 같다.

본 전단시험편의 피로한도를 수명이 10^7 사이클에서의 파괴하중으로 정의할 경우, 피로한도는 약 7.5kN임을 알았다. 탄소섬유복합재 적층판과 스테인리스 금속판을 리벳 체결한 전단시험편의 피로파괴 위치는 하중 수준과는 관계 없이

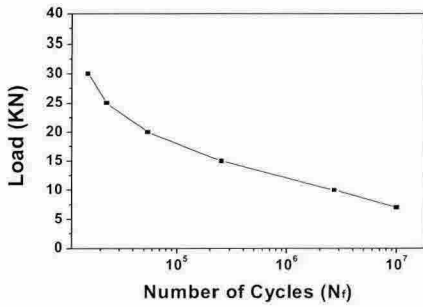


Fig.4 S-N curve of rivet-joint shear specimen

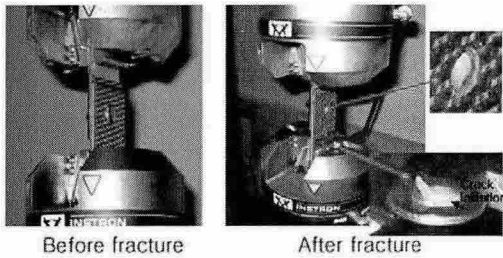


Fig.5 Fracture mode under fatigue shear test

Table 1. Results of static bending test

	Stiffness (kN/mm)	최대 파괴하중 (kN)
부하방향①	0.158±0.01	3.10±0.12
부하방향②	0.106±0.01	2.56±0.14

리벳의 머리부나 몸통의 90° 각진 곳(Fig. 6의 화살표부분)의 근저부나 리벳몸통 나사부의 나사산 근저부에서 응력집중으로 인해 파괴가 발생하였다. 정적하중에 의한 파손모드(fracture mode)는 상판과 하판 사이의 전단 접합면 방향으로 발생한 반면, 피로하중에 의한 파손모드는 반복하중의 크기와는 관계없이 인장응력의 집중이 발생하는 각진부위의 근저부에서 발생하였다. 따라서 내피로성을 개선하기 위해서는 리벳의 재질을 강도는 작아도 연신율이 큰 재료로 하거나, 나사산이나 나사 머리부의 각진 곳의 응력 집중을 피하는 형상으로 설계해야 할 것이다.

3.2 hybrid 접합체결 굽힘시험편의 피로특성

hybrid 접합체결부의 정적굽힘시험을 수행한 결과 부하방향에 따른 파괴모드가 Fig. 6과 같이

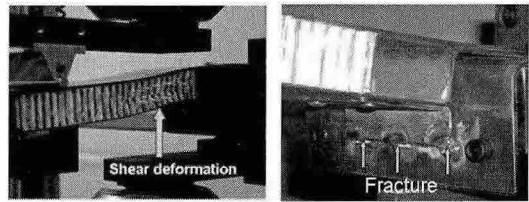


Fig.6 Fracture modes of hybrid composite joint under static bending loads ① and ②

상이하하게 다름을 알 수 있었다. ①방향으로 하중을 가한 경우 Fig. 6①과 같이 체결부에 가까운 하니컴코어의 중앙부에서 굽힘에 의한 전단력 발생에 의해 전단파괴가 일어났다. 하지만 ②방향으로 하중을 가한 경우는 Fig.6②와 같이 T자 보 강받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 파괴가 일어났다. 이는 Fig.6②와 같이 용접부가 3군데로 나뉘어져 부분용접되어 있었기 때문에 굽힘 하중시 굽힘시험편의 고정부에 작용하는 하중을 용접부위가 집중적으로 받아 파괴된 것이다.

hybrid 접합체결부의 정적굽힘시험 결과인 Table 1을 보면 ②부하방향의 굽힘강도(최대파괴하중)가 ①방향의 굽힘강도의 82% 수준으로 약했기 때문에, ②부하방향의 피로시험을 먼저하여 그 내구성능과 파괴특성을 평가하였다. ②부하방향의 피로시험조건에 대해 우선, 정적 최대하중(2.56kN)의 60%수준을 반복 최대하중, 5%수준을 반복 최소하중으로 하여 1Hz주파수로 시험한 결과, 불과 400~2000사이클에서 T자 받침대와 언더프레임사이의 용접부에서 피로파괴가 발생하였다. 정적인 파괴도 최종적으로는 이 용접부위에서 인장형 파괴모드로 발생하였는데, 피로하중에 의해서도 동일한 곳에서 인장형 피로파괴가 발생한 것이다. 또한, 정적인 굽힘 하중에서는 시험편의 T자 받침대 체결부가 상당히 연성적(ductile)으로 변형하여 용접부 파괴가 80mm이상의 큰 변위에서 일어났지만, 피로시험에서는 불과 5mm이하의 작은 변위에서 파괴가 발생하였다. 현재의 용접부위는 정적하중뿐만 아니라 피로하중에도 매우 취약함을 보이므로 개선해야 할 부분이다.

Fig.7은 부하방향 ②의 S-N곡선을 나타낸다. 부하방향②의 굽힘강도는 부하방향①의 굽힘강도보다 20% 정도 작았기 때문에 피로강도가 부하방향①보다 더 취약했다. 이 경우 피로한도는 아주 낮아 약 0.27kN이었다.

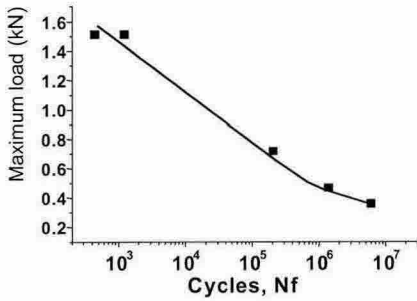


Fig. 7 S-N curve of hybrid composite joint under fatigue bending load ②

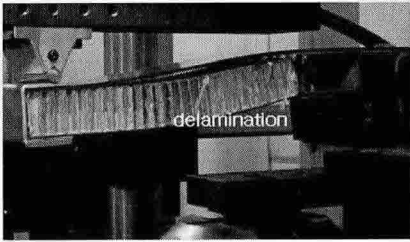


Fig.8 Fracture mode under fatigue bending load ①

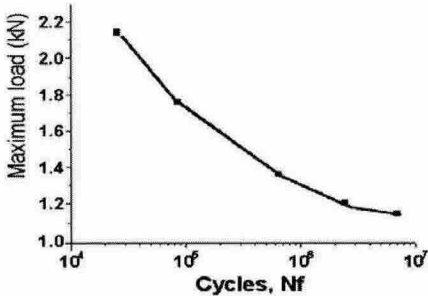


Fig.9 S-N curve of hybrid composite joint under fatigue bending load ①

Fig.8은 부하방향①일 때의 피로파괴모습을 나타낸다. 부하방향①의 피로시험에서 표피 상판과 하니컴코어층 사이의 층간박리가 유발된 것은 CFRP상판의 두께(3mm)가 CFRP하판의 두께보다 1.5배 크므로, 상판쪽의 국부적 강성이 커서 상판과 하니컴코어층 사이의 층간 전단응력이 하판쪽보다 약 1.5배 컸기 때문에 상판과 코어층 사이에서 층간박리가 발생한 것으로 생각된다. 이와 같은 상판쪽 층간박리를 방지하기 위해서는 상판과 하니컴코어층 사이에 접착필름(adhesive film)의 두께를 기존보다 두껍게 삽입하여 성형하는 것이 바람직할 것이다. Fig.9는 부하방향①의 S-N곡선을 나타낸다. 피로한도는 약 1.12kN으로

평가 되었다.

4. 결론

틸팅차량에서 가장 취약부위에 해당하는 차체 측벽부와 언더프레임 사이의 hybrid접합체결부의 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 해석 및 평가를 하였다. 시험결과는 다음과 같다.

(1) 리벳체결 전단시험편의 경우, 정적시험에서는 체결부의 접합면을 따라 파괴가 일어났고, 피로시험의 경우에는 리벳의 나사산 근처부나 머리부의 각진 근처부에서 파괴가 발생했다. 리벳의 선정시에 이러한 응력집중부가 적은 것을 선택하여 사용한다면 피로수명을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

(2) hybrid 접합체결부 굽힘시험편의 경우 ②방향의 하중에서 가장 취약했으며, 정하중과 피로 하중 모두에서 기차 보강받침대와 언더프레임 사이의 용접부에서 파손이 일어났다. 따라서 용접부의 설계를 현격히 보강할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 (주)한국화이버에서 시행한 철도연구개발사업 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참고문헌

- (1) 신광복, 이상진, "The case and technique on lightweight of railway vehicle system using composite materials," 한국복합재료학회, Vol. 17, No. 4, 2004, pp. 82-86
- (2) 신광복, 이상진, "오토클레이브 성형기법을 이용한 복합재 철도차량 차체 제작," Vol. 18, No. 2, 2005, pp. 52-58.
- (3) 한국과학기술원 항공공학과, "복합재 틸팅차체 구조물의 경량화 최적 구조해석 및 설계," 2003년 철도기술연구개발사업 보고서
- (4) 금오공대 기계공학부, "틸팅차량용 복합소재 및 접합체결부 기계적 특성평가," 2003년 철도기술연구개발사업 보고서