

하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차프레임 구조 안전성 평가 연구

김정석^{**} · 곽도은^{***} · 김창호^{**} · 천대한^{**} · 이창영^{*} · 윤혁진^{*} · 신광복^{**†}

Evaluation of Structural Integrity for Composite Bogie Frame Applied to Hypertube System

Jung-Seok Kim^{**}, Do-Eun Kwak^{***}, Chang-Ho Kim^{**}, Dae-Han Cheon^{**},
Chang-Young Lee^{*}, Hyuk-Jin Yoon^{*}, Kwang-Bok Shin^{**†}

ABSTRACT: Recently, hypertube systems have been actively studied as next-generation transportation systems due to the increasing demand for eco-friendly and ultra-high-speed transportation. The weight of a hypertube vehicle directly affects energy efficiency, which makes lightweight design of its main structures important. In particular, the bogie frame is a key structure that supports the carbody, superconducting magnets, running wheels, and guide wheels. Therefore, lightweight for bogie frame in railway systems is important. In this study a composite bogie frame for a hypertube system was designed using carbon-fiber-based composites instead of conventional metallic materials. A prototype was fabricated based on the proposed design. Structural analysis was then performed under running and levitation conditions based on EN-13749. The results showed that the Tsai-Wu index of the composite parts was less than 1 in all load cases. The Von-Mises stress of the metallic parts was also lower than the yield strength. These results indicate that the proposed composite bogie frame has sufficient structural integrity under both running and levitation conditions.

초 록: 최근 친환경 정책으로 차세대 교통시스템인 하이퍼튜브에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 효율적인 에너지 절감을 위해서는 큰 비중을 차지하는 대차프레임에 대한 경량설계가 필수적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 대차프레임의 경량설계를 위해 대차프레임에 보편적으로 적용되는 강 소재 대신 탄소섬유기반 복합소재로 대체하여 개념설계를 수행하고 복합재 기반 대차프레임을 제작하였다. 설계안의 검증에 위해 철도 안전규격 EN-13749에 의거한 주행상황과 부상상황을 구분하여 구조안전성 평가를 수행하였다. 해석 수행결과, 모든 시나리오에서 복합재 부품의 경우 Tsai-Wu 지수가 1 이내가 도출되었으며, 금속 소재의 경우 Von-Mises 응력이 소재의 항복강도 이내임을 확인하여 설계안을 검증하였다.

Key Words: 하이퍼튜브(Hypertube), 경량설계(Lightweight design), 복합재 대차프레임(Composite bogie frame), 구조안전성평가(Structural integrity), 피로평가(Fatigue evaluation)

1. 서 론

최근 탄소중립과 환경 규제의 강화로 인해 기존 교통수

단보다 에너지 효율이 높고 장거리 이동 및 운송시간을 단축할 수 있는 초고속 교통 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 하이퍼튜브는 아진공 튜브 내부에서 공기저항을 최

Received 16 May 2026, received in revised form 14 June 2026, accepted 25 June 2026

^{*}Korea Railroad Research Institute, Cheoldobangmulgwan-ro 176, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Dongseodaero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Republic of Korea

[†]Corresponding author (E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

[#]These authors contributed equally to this work.

소화하며, 자기부상 및 전자기 추진 기술을 이용해 초고속 주행을 구현하는 차세대 교통 시스템이다.

전세계적으로, 하이퍼튜브 관련 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 원천기술 확보를 위해 개발 중이며 이와 관련하여 미국, 러시아, 체코 등 여러 나라의 정부에서 프로젝트들이 승인 및 연구가 수행되고 있다. 또한, 국내에서도 철도기술연구원에서 하이퍼튜브와 유사한 속도인 시속 1,200 km/h를 목표로 하이퍼튜브 시스템에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다[1].

하지만, 하이퍼튜브의 경우 기존 철도차량과 달리 주행 저항을 줄이는 것뿐만 아니라, 부상 및 추진에 필요한 에너지를 낮추는 것이 매우 중요하므로, 차량 주요 구조물에 대한 경량화 및 경량설계가 필수적으로 요구된다.

그 중에서 철도차량의 전체 중량에서 50% 이상의 중량을 차지하고 있는 대차프레임에 대한 경량설계를 수행하는 것이 효과적이다. 일반적으로, 철도차량의 보편적인 경량화 방법으로는 최적화 설계와 소재 대체를 통한 경량화 방법이 존재하며, 최적화 해석의 경우 기존 구조 형상 내에서 불필요한 중량을 줄이는 데 유리하지만, 구조 강도와 제작 조건을 동시에 만족해야 하므로 경량화 효과에는 한계가 존재한다. 반면, 소재 대체를 통한 경량화는 기존 금속재 대비 비강도 및 비강성이 우수한 재료를 적용함으로써 상대적으로 큰 중량 저감 효과를 기대할 수 있다[2].

대차프레임에 복합재를 적용한 선행연구로 Jeon 등[3]은 유리섬유/에폭시 소재를 적용하여 피로시험을 수행하고, 방향별 S-N 선도와 Goodman 선도를 도출하여 피로강도를 평가하였다. 이후 PVC 폼 코어가 삽입된 사이드 빔과 크로스 빔 구조를 적용하여 복합재 대차프레임의 굽힘 강성을 확보하였으며, 오토클레이브 성형 공정을 통하여 실제 복합재 대차프레임을 제작하였다.

Jang 등[4]은 샌드위치 복합재 알루미늄 압출재를 조합하여 하이브리드 모듈화 차체 구조물을 제안하고, 위상 최적화 및 치수 최적화 기법을 이용해 재료적용 부위와 설계 변수를 확립하였다.

Kim 등[5]은 복합재 대차프레임에 적용되는 체결부의 내구성 향상을 위하여 인서트 형상 및 적용 유무에 따른 구조적 영향을 시험과 해석을 평가하였다.

Lee 등[6]은 복합재 차체프레임에 적용되는 소재를 복합재로 대체하여 이에 따른 적층구조를 비교 및 평가를 수행함으로써 최적의 적층패턴 및 두께를 선정하였다. 이후 차체 프레임을 제작 후 ASTM 규정에 의거하여 압축시험을 수행함으로써 해석과 시험간 검증을 수행하였다.

그러나, 기존 연구들의 경우 주로 일반 고속 철도 차량 또는 도시 철도 차량에만 적용되는 복합재의 차체 및 대차프레임을 대상으로 수행되어왔으며, 하이퍼튜브와 같이 자기부상 추진 시스템과 주행륜 및 가이드륜이 함께 구성되는 대차프레임에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히 하

이퍼튜브 대차프레임은 초전도 전자석의 중량과 부상상황에서 주행상황으로 전환되는 운용 조건을 함께 고려해야 하므로, 기존 철도차량 대차프레임과는 다른 하중 전달 특성을 가진다.

따라서, 본 연구에서는 하이퍼튜브의 운행 조건과 실제 제작성을 함께 고려하여 탄소섬유 복합재가 적용된 대차프레임을 설계 및 제작을 수행하였다. 또한, 제안된 복합재 대차프레임에 대해 EN-13749 기반의 주행상황 하중 조건과 부상상황에서 주행상황으로 전환되는 하중조건을 적용하여 구조 안전성 평가를 수행하여 제작된 하이퍼튜브용 대차프레임의 설계안에 대하여 검증을 수행하였다.

2. 하이퍼튜브 복합재 대차프레임 설계

본 절에서는 하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차프레임의 경량화를 위해 주요 구조부에 탄소섬유 복합재를 적용한 설계안을 제안하였다.

하이퍼튜브 대차프레임은 차체 하중을 지지할 뿐만 아니라 초전도 전자석(Superconducting Magnet, SCM) 주행륜 및 가이드륜과 연결되는 구조물로서, 국부 강성 및 체결 안전성도 필수적으로 고려하여야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 국부 응력이 집중될 것으로 예상되는 체결부 및 지지부에는 일반 강 소재인 SM355A를 적용하였으며, 사이드 프레임을 포함한 주요 하중 지지부에는 복합재를 적용하였다. 또한, 주행륜 및 가이드륜의 경우

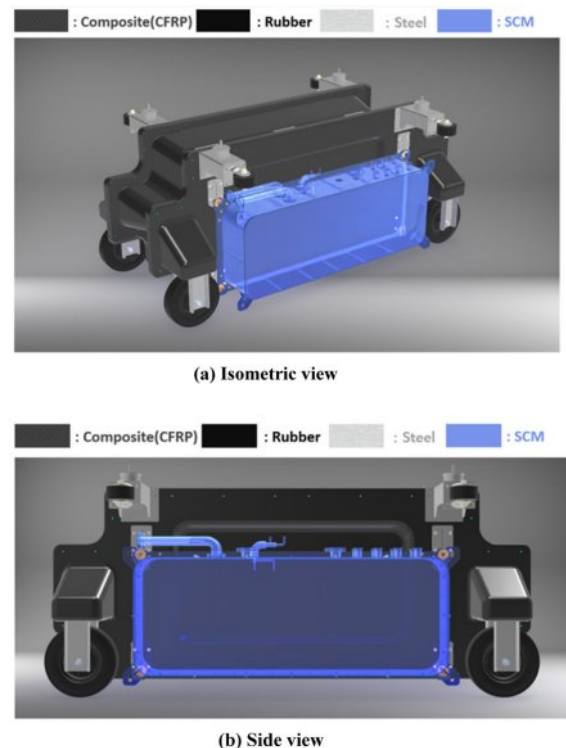


Fig. 1. Design concept of the composite bogie frame

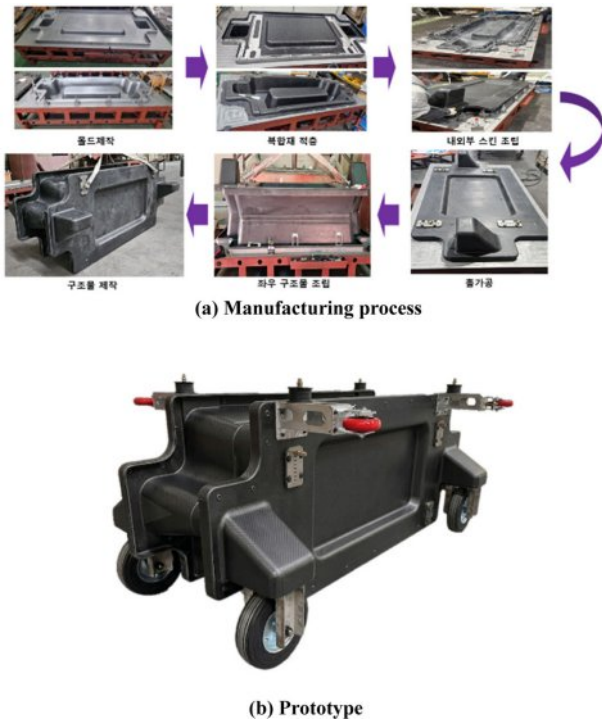


Fig. 2. Manufacturing process and fabricated prototype of the composite bogie frame

일반적으로 사용되는 고무소재를 적용하였다. Fig. 1은 복합재 대차프레임의 개념설계를 보여준다.

복합재 프레임의 주요 하중 지지부는 복합재가 적용되는 곡면 일체형 구조로 구성하였으며, SCM 체결부와 주행륜 및 가이드륜 지지부에는 금속재를 적용하였다. 차체 하중이 전달되는 2차 서스펜션 스프링 부(2nd Suspension Spring) 체결부의 경우 차체와 4점지지 형식으로 구현을 하는 방식으로 구성을 하여 외부 차체에 대한 중량을 포함한 수직 하중 등을 효과적으로 분산되게 제작하였다.

또한, 하이퍼튜브는 일정 속도 이상에서 자기부상 주행을 수행하지만, 저속 구간 및 비상조건에서는 주행륜을 통하여 하중을 지지해야 하므로 주행륜 위에 강재 플레이트를 추가 배치함으로써 추가적인 강성보강을 확보하였다. 이후, 초경량 본 설계된 개념모델에 대하여 복합재 물드를 이용하여 초경량 탄소 복합 소재를 제작하였다. 제작된 프로세스의 경우 일반적인 복합소재 제작 방식과 유사하게 금속 형태의 물드를 제작 후 복합재를 적층하였으며 이후 내외부 스킨을 조립하고 최종적으로 홀 가공을 통하여 금속재와 복합재의 체결부를 구현하였다.

제작된 복합재 대차프레임은 좌우 2분할 구조로 제작한 후, 볼트 체결과 접착 공정을 이용하여 최종 조립하였다. Fig. 2는 초경량 탄소 복합 소재 대차의 제작 과정 및 제작 결과를 보여준다.

3. 복합재 대차프레임 설계 검증

3.1 유한요소모델 구성 및 물성 정보

복합재 대차프레임의 설계 검증안을 위해 유한요소해석 기법을 통하여 복합재 대차프레임의 구조 안전성 평가를 수행하였다. 유한요소 형상의 경우 제작된 모델과 동일한 형태로 제작하였으며, 복합재 대차프레임에 적용된 주요 기계적 체결부는 볼트 체결에 의한 하중 전달 거동을 고려하기 위해 1D 강체요소로 이상화하였으며, 이를 통해 체결부 주변의 복합재 및 금속재 구조물이 일체 거동하도록 모델링하였다. 복합재 부의 경우 4절점 기반 2D Quad 요소를 적용하였으며, 금속재 부의 경우 8노드 기반 Hexa 요소를 이용하여 유한요소 모델을 생성하였다.

복합재의 경우 이방성의 성질을 지니기 때문에 요소 별 좌표계를 정립하였다. 여기서 생성된 밀도의 경우 요소 수렴도 해석을 통하여 최적의 밀도의 경우 5mm 기반으로 요소를 생성하였다. 복합재가 적용된 모든 부위에 0°/90° 방향을 가지는 직조 복합재를 적용하였다. 각 층당 0.15mm의 두께를 지닌 H2550 Woven/Epoxy 복합재를 일정한 각도로 20층을 반영하여 물성을 부여하였다. Fig. 3은 복합재 대차프레임의 유한요소모델 형상을 보여주며, Table 1은 생성된 복합재 대차프레임의 요소 및 노드 개수를 보여준다. 또한, Table 2는 복합재 대차프레임의 물성표를 보여준다. 복합재 물성의 경우, 실제 복합재 대차프레임에 적용되는 소재를 이용하여 시편을 제작하고, 이를 통해 물성을 도출하였다. 변형률 데이터는 2축 게이지를 이용하여 취득하였다. 수행된 시험은 인장, 압축 및 전단시험이며, 각각 ASTM D3039, ASTM D6641, ASTM D5379에 제시된 시험 속도 및 시험 환경을 준수하여 수행하였다. 각 시험에는 총 7개의 시험편을 사용하였으며, 측정된 데이터의 평균값을 통하여 도출하였다.

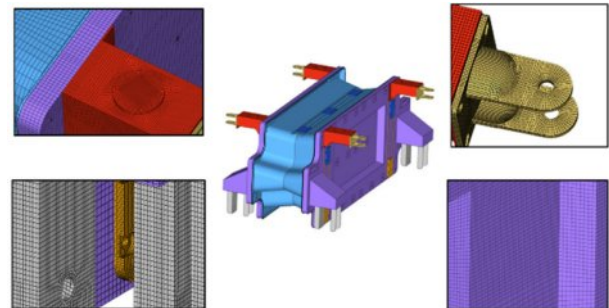


Fig. 3. Finite element model for the composite bogie frame

Table 1. No. of nodes and elements for composite bogie frame

Category	Finite elements model
Nodes	815,860
Elements	586,028

3.2 구조안전성 평가를 위한 경계조건 및 파손 기준 수립

현재 하이퍼튜브용 대차프레임에 특화된 설계 및 구조 안전성 평가 기준은 충분히 정립되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 하이퍼튜브용 복합재 대차프레임이 기존 철도차량과 운용 환경은 다르지만, 저속 구간과 부상상황에서 주행상황으로 전환되는 조건에서는 주행륜을 통해 하중을 지지한다는 점을 고려하였다.

따라서 대차프레임의 수직하중, 횡방향 하중 및 종방향 하중에 대한 기본 구조 안전성 평가를 위해 철도차량 대차프레임의 설계 및 검증에 적용되는 EN-13749를 기반으로 주행상황 하중조건을 산출하였다. 또한, 하이퍼튜브의 부상상황 및 전환 조건을 고려하기 위해 별도의 부상상황 하중조건과 경계조건을 추가로 구성하였다.

Eq. (1)은 운행상황에서의 수직하중에 대한 식을 보여준다. Eq. (2)는 운행상황에서의 횡방향 하중에 대한 식을 보여준다. Eq. (3)은 운행상황에서의 종방향 하중에 대한 식을 보여준다.

여기서, M_v 의 경우 주행중 차체의 중량을 나타내며, P_2 의 경우 운행 중 적재하중을 나타낸다. m_{MB}^+ 의 경우 대차의 모터하중을 나타낸다.

$$F_z = \frac{(M_v + 1.2 \times P_2 - 2m_{MB}^+)g}{4} \quad (1)$$

$$F_{y1} = \frac{(F_z + m_{MB}^+ \times g)}{8} \quad (2)$$

$$F_x = \frac{0.2(M_v + P_2)g}{8} \quad (3)$$

Fig. 4는 운행상황에서의 경계조건 형상을 보여주며, Table 4는 주행상황을 고려한 복합재 대차프레임의 적용된 하중값을 보여준다.

부상상황에서의 복합재 대차프레임의 경계조건은 부상이 발생하다 지면과 닿을 때 주행상황으로 바뀌는 현상을 고려하여 하단부 완전구속을 적용하였다. Fig. 5는 부상상황에서의 경계조건 형상을 보여준다.

이때, 실제 중량을 모사하기 위해서 차체와 닿는 부위의

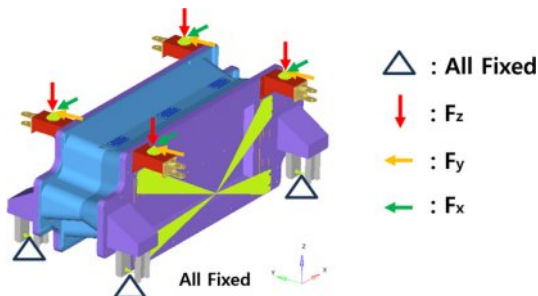


Fig. 4. Boundary conditions for the composite bogie frame under running condition

Table 2. Mechanical properties of H2550 woven

Property	Unit	Symbol	Value
Density	kg m ⁻³	ρ	1,420
Elastic Modulus	GPa	E_{11}	60
		E_{22}	62
Shear Modulus	GPa	G_{12}	3.73
Tensile Strength	MPa	X_t	828
		Y_t	578
Compressive Strength	MPa	X_c	828
		Y_c	578
Shear Strength	MPa	S	72.8
Poisson's Ratio	-	ν_{12}	0.05

Table 3. Mechanical properties of steel

Property	Unit	Symbol	Value
Density	kg m ⁻³	ρ	7,850
Elastic Modulus	GPa	E	210
Yield Strength	MPa	σ_y	360
Tensile Strength	MPa	σ_{UTS}	490
Poisson's Ratio	-	ν	0.3

Table 4. Load conditions based on EN-13749

Case	F_{z1} (kN)	F_{z2} (kN)	F_y (kN)	F_x (kN)
Case 1	0.43	0.43	1.58	0.63
Case 2	0.39	0.30	-1.58	0.63
Case 3	0.56	0.47	0	0.63
Case 4	0.47	0.56	1.58	0.63
Case 5	0.56	0.47	-1.58	-0.63
Case 6	0.26	0.30	0	-0.63
Case 7	0.26	0.30	1.58	-0.63
Case 8	0.40	0.48	0	-0.63
Case 9	0.40	0.48	-1.58	0.63

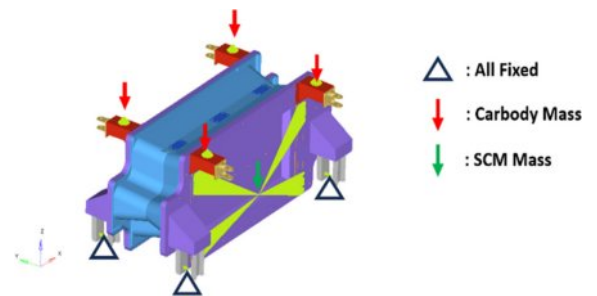


Fig. 5. Boundary conditions for the composite bogie frame under levitation condition

경우 차체의 중량을 하중으로 환산 후 적용하였다. Eq. (4)는 부상 상황에서의 하중 환산 식을 보여준다.

여기서, Mc 의 경우 차량 만차 질량이며, Mb 의 경우 대차 자체 질량, 그리고 g 는 중력가속도인 9.8 m/s^2 , N 은 스프링 작용점 개수를 나타내며, K 의 경우 동적계수로써 본 연구에서는 1.4의 동적 계수를 적용하였다.

$$K \times \frac{(Mc + Mb)g}{N} \quad (4)$$

복합재 구조물의 경우 다양한 파손기준이 적용될 수 있으나, 재료의 이방성 특성과 방향별 강도 차이를 고려할 수 있는 평가 기준이 필요하다. 이에 본 연구에서는 복합재 부위의 구조 안전성을 평가하기 위해 Tsai-Wu 파손기준을 적용하였다.

Tsai-Wu 파손기준은 섬유 방향 및 섬유 수직 방향의 인장·압축강도와 전단강도를 함께 고려할 수 있는 파손기준으로, 본 연구에서는 Tsai-Wu 파손지수가 1보다 작을 경우 복합재 부위가 구조적으로 안전한 것으로 판단하였으며, 1 이상일 경우 파손이 발생한 것으로 평가하였다. Eq. (5)는 Tsai-Wu 파손이론식을 나타낸다. 여기서, σ_1 및 σ_2 는 각각 1방향 및 2방향 수직응력을 의미하며, τ_{12} 는 1-2면 내 전단응력을 나타낸다. X_t 및 X_c 는 각각 1방향 인장강도와 압축강도를 의미하고, Y_t 및 Y_c 는 각각 2방향 인장강도와 압축강도를 의미한다. 또한, S 는 1-2면 내 전단강도를 나타내며, F_{12} 는 σ_1 과 σ_2 사이의 상호작용 효과를 고려하기 위한 Tsai-Wu 상호작용 계수이다.

$$\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \left(\frac{1}{X_t} \cdot \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1^2 + \left(\frac{1}{Y_t} \cdot \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2^2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (5)$$

금속재의 경우 연성재료의 항복 평가에 일반적으로 적용되는 Von-Mises 파손기준을 이용하여 구조 안전성을 평가하였다. Von-Mises 파손기준은 다축 응력 상태에서 발생하는 등가응력을 재료의 항복강도와 비교하여 항복 여부를 판단하는 방법이다.

본 연구에서는 금속재 부위에서 발생한 최대 Von-Mises 응력이 소재의 항복강도보다 낮을 경우 구조적으로 안전한 것으로 판단하였으며, 항복강도 이상일 경우 항복이 발생한 것으로 평가하였다. 이에 따라 금속재의 구조 안전성 평가기준은 Eq. (6)과 같다. σ_{vm} 은 Von-Mises 응력, σ_x , σ_y , σ_z 는 방향별 수직응력, τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} 는 방향별 전단응력, σ_1 , σ_2 , σ_3 은 주응력을 나타낸다.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (6)$$

피로평가의 경우 구조해석을 수행하여 도출된 방향별 주

응력을 사용하여 Goodman 피로 평가법으로 평가하였다. 소재의 인장강도, 항복강도 그리고 피로 강도를 기반으로 선도를 작성하고 방향별 주응력으로 계산된 평균응력과 응력 진폭을 Goodman 선도와 비교하여 확인하는 방법이다. Eq. (7)은 평균응력 도출식을 나타낸다. Eq. (8)은 응력 진폭 도출 식을 나타낸다. 여기서 σ_m 은 평균응력, $\Delta\sigma$ 은 응력 진폭, σ_{max} , σ_{min} 은 각각 방향별 주응력의 최대값, 최소값을 나타낸다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (8)$$

여기서, 복합재를 포함한 Goodman 피로강도 평가의 경우 Jeon 등이 수행한 피로강도 평가 절차 법과 동일하게 수행하였다[3]. 또한, 피로 한도의 경우 10^7 의 수명한도를 적용하여 피로강도 평가를 수행하였다.

3.3 구조안전성 평가

EN-13749 기반 9개 운행하중 시나리오에 대한 구조해석을 수행한 결과, 모든 하중시나리오에서 복합재 부위의 Tsai-Wu 지수는 1 미만으로 나타났다. 또한 금속재 부위의 최대 Von-Mises 응력은 항복강도 이하로 도출되어 전체 구조가 안전한 것으로 평가되었다. 대표적으로 Case 5에서는 SCM 브라켓 부근 금속재에서 최대 Von-Mises 응력 300.6 MPa이 발생하였다. 이는 금속재 기준 항복강도보다 낮은 값으로, 금속재 부위가 항복하지 않는 것으로 판단된다.

동일 Case에서 복합재 부위의 Tsai-Wu 지수는 0.28로 도출되었으며, 최대 변위는 가이드를 부근에서 10.8 mm로 나타났다. 이때 z 방향 처짐은 약 8.0 mm로 확인되었다. 전체 하중 시나리오 중 최대 변위는 Case 9에서 11.0 mm로 나타났으며, 최대 Tsai-Wu 지수 또한 Case 9에서 0.44로 도출되었다. 최대 Von-Mises 응력은 Case 5에서 300.6 MPa로 나타났다. 따라서 주행상황에서 대차프레임의 최대 응력과 파손지수는 모두 허용 기준 이내이며, 제안한 복합재 대차프

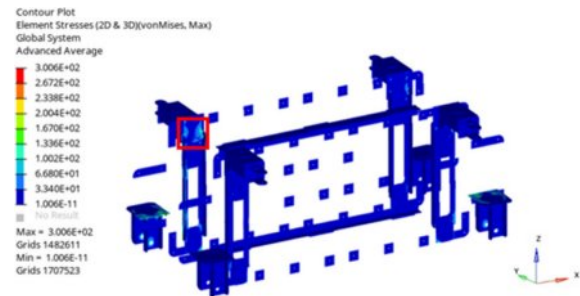


Fig. 6. The results of Von-Mises stress contours for running conditions. (Max. Von-Mises Stress: 300.6 MPa Location: SCM Bracket)

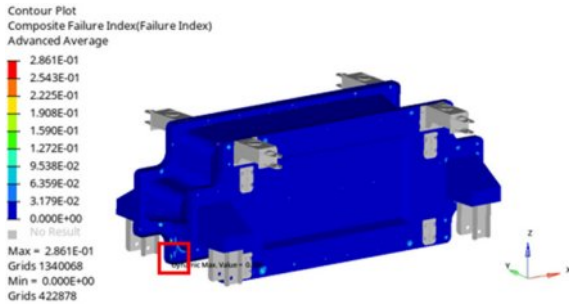


Fig. 7. The results of Tsai-Wu index contours for running conditions. (Max. Tsai-Wu Index: 0.29, Location: Wheel Bracket)

Table 5. Structural analysis results under running conditions

Case	Von-Mises Stress (MPa)	Tsai-Wu Index
Case 1	99.5	0.20
Case 2	96.5	0.20
Case 3	234.4	0.31
Case 4	102.5	0.19
Case 5	300.6	0.29
Case 6	124.3	0.33
Case 7	256.8	0.40
Case 8	129.8	0.19
Case 9	217.7	0.44

레임은 EN-13749 기반 운용하중 조건에서 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

또한, 체결부 주변 금속재의 Von-Mises 응력과 복합재의 Tsai-Wu 지수가 허용 기준 이내로 나타나 체결부 주변 구조물까지 구조적으로 건전함을 확인하였다.

Fig. 6와 Fig. 7은 Case 5의 해석 수행 결과에 따른 Von-Mises 응력 분포 및 Tsai-Wu 지수 분포도를 보여준다. Table 5는 전체하중시나리오에서 발생된 Von-Mises 응력 및 Tsai-Wu 지수를 보여준다.

하이퍼튜브는 일정 속도 이상에서 자기부상 주행을 수행하지만, 저속 구간 또는 전환 조건에서는 주행륜을 통해 하중을 지지할 수 있다. 이에 본 연구에서는 부상상황에서 주행상황으로 전환되는 조건을 고려하여 추가 구조해석을 수행하였다. 부상상황에서의 해석 수행 결과, 최대 변위는 가이드롤 부근에서 6.831 mm로 나타났다.

복합재 부위의 최대 Tsai-Wu 지수는 0.12로 도출되어 파손 기준인 1보다 충분히 낮음을 확인하였다. 금속재 부위의 최대 Von-Mises 응력은 SCM 브라켓 부근에서 236.4 MPa로 발생하였으며, 이는 금속재 항복강도보다 낮아 구조적으로 안전함을 확인하였다.

대차프레임은 운행 중 반복적인 수직, 횡 및 종방향 하중을 받는 구조물이므로 정적 구조 안전성뿐만 아니라 피로

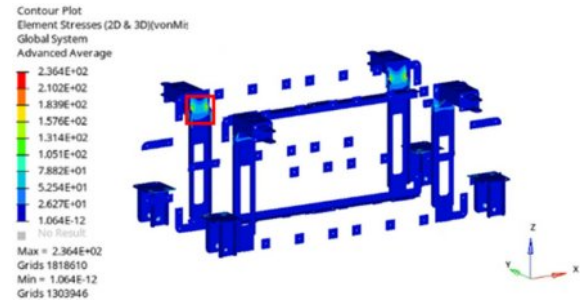


Fig. 8. The results of Von-Mises stress for composite bogie frame under levitation condition. (Max. Von-Mises Stress: 236.4 MPa Location: SCM Bracket)

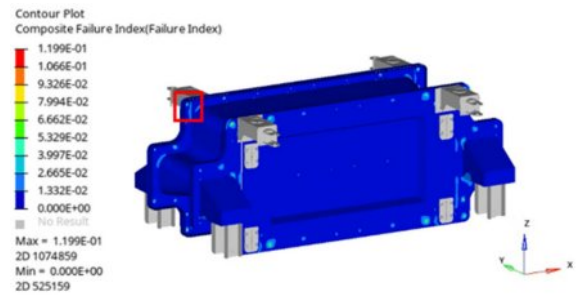


Fig. 9. The results of Tsai-Wu index contours for levitation condition. (Max. Tsai-Wu Index: 0.12 Location: SCM Bracket)

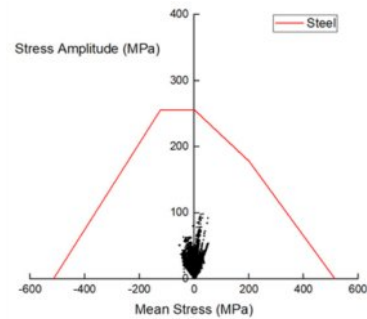


Fig. 10. The results of fatigue evaluation for the steel part

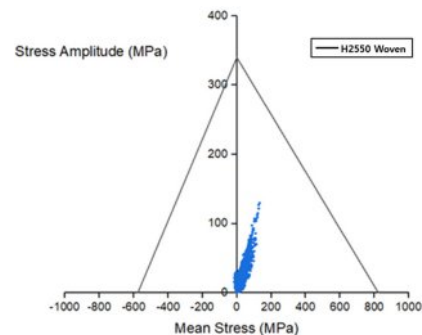


Fig. 11. The results of fatigue evaluation for H2550 woven composite

안전성 검토가 필요하다. 이에 본 해석 시나리오에서 발생된 주응력을 기반으로 각 주요 위치의 평균응력과 응력집도를 산출하고 Goodman 선도에 표시하였다.

피로평가 결과, 금속재 및 복합재에서 도출된 모든 해석 결과점은 Goodman 선도의 허용 영역 내부에 위치하였다. 이는 주행상황의 반복하중 조건에서 금속재와 복합재 모두 피로파손이 발생하지 않음을 의미한다. 따라서 제안된 복합재 대차프레임은 EN-13749 기반 운용하중 조건에서 정적 구조 안전성과 피로 안전성을 동시에 확보하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 부상상황 환경에서 발생된 Von-Mises 응력과 Tsai-Wu 지수 결과를 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차프레임에 대하여 설계안을 제안하고, 이에 대한 제작 및 구조 안전성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 복합재의 제작 가능성을 고려하여 하이퍼튜브 대차프레임의 주요 구조부에는 CFRP를 적용하고, 초전도 전자석 체결부 및 주행륜 및 가이드륜 지지부와 같이 국부 하중이 집중되는 부위에는 금속재를 적용한 설계안을 제안하였다. 이를 통해 복합재의 경량화 효과와 금속재의 체결 안전성을 동시에 고려한 대차프레임 형상을 구성하였다.

(2) 제안된 설계안을 기반으로 탄소섬유 복합재 대차프레임의 시제품을 제작하였으며, 제작 공정은 몰드 제작, 복합재 적층, 내/외부 스킨 조립, 체결부 홀 가공 및 좌우 구조물 조립순서로 수행하였다. 최종 제작된 구조물의 경우 350 kg을 달성하였으며, 이는 기존 대차프레임에 적용되는 일반 강재 대비 약 44.18% 경량화 효과가 달성됨을 확인하였다.

(3) 주행상황의 경우 EN-13749규격 기반의 하중조건 및 구속조건을 적용하여 구조해석을 수행한 결과, 최대 Von-Mises 응력의 경우 300.6 MPa, 최대 Tsai-Wu 지수는 0.44가 도출되었다. 이는 각각 금속 소재 항복강도와 복합재 파손 기준인 Tsai-Wu 지수 1 이내의 값을 도출되어, 제안된 대차프레임 주행상황에서 구조적 안전함을 확인하였다.

(4) 부상상황 환경을 모사하여 경계조건 및 하중조건을 부여한 결과, 최대 변위 6.8 mm, 최대 Tsai-Wu 지수는 0.119, 최대 Von-Mises 응력은 236.4 MPa이 발생됨을 확인하였다.

(5) 본 연구를 통하여 하이퍼튜브 복합재 대차프레임의

설계 및 구조 안전성 평가를 위한 해석 프로세스를 정립하였다. 정립된 해석 프로세스는 복합재 대차프레임 뿐만 아니라 향후 복합재가 적용되는 차체 구조물의 초기 설계 및 구조 안전성 검토에도 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 복합재 대차프레임의 설계 검증을 위해 유한요소해석 기반의 사전해석을 수행하여 설계안을 우선적으로 검증하였다. 추후 제작된 실 모델을 기반으로 수직하중 조건 및 낙하상황을 모사한 시험을 수행하여 해석결과와 비교 검증할 예정이다.

후 기

This research was supported by the project entitled “Development of Core Technologies for the Realization of the Next Generation Railway System Hypertube” (MT253112).

REFERENCES

1. Eom, J.K., Lee, K.S., Seong, M.E., and Lee, K.S., “Analysis of Domestic Freight Transportation Benefit by Introducing HTX (Hyper Tube express),” *Journal of Korean Society for Urban Railway*, Vol. 7, No. 3, 2019, pp. 435-443.
2. Im, J.M., Jung, M.H., Kim, J.Y., and Shin, K.B., “A Study on the Lightweight Design of Hybrid Carbody Structures for Double Deck High-Speed Train Using Material Substitution and Size Optimization Method,” *Composites Research*, Vol. 32, No. 1, 2019, pp. 29-36.
3. Jeon, K.-W., Shin, K.B., and Kim, J.-S., “An Evaluation of Fatigue Life and Strength of Lightweight Bogie Frame Made of Laminate Composites,” *Transactions of the KSME, A*, Vol. 35, No. 8, 2011, pp. 913-920.
4. Jang, H.J., Shin, K.B., and Han, S.H., “A Study on the Lightweight Design of Hybrid Modular Carbody Structures Made of Sandwich Composites and Aluminum Extrusions Using Optimum Analysis Method,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 36, No. 11, 2012, pp. 1335-1343.
5. Kim, J.H., Shin, K.B., and Kim, J.S., “Effect of the Insert Shape on the Improvement of Durability of Bolted Joints Applied to Composite Bogie Frames,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 38, No. 7, 2014, pp. 765-770.
6. Lee, S.H., Im, J.M., Shin, K.B., Kim, S.T., and Jeong, W.H., “Study on Laminate Composite Frame for Lightweight Rolling Stock,” *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 22, No. 6, 2019, pp. 456-466.