

복합재 틸팅열차 차체 구조물의 응력 및 모드 해석

김수현*·강상국*·이상의*·김천곤**·한성호**·조현주***

Structural and Modal Analysis of the Composite Carbody of Tilting Train

Soo-Hyun Kim*, Sang-Guk Kang*, Sang-Eui Lee*, Chun-Gon Kim**,
Sung-Ho Han**, Hyun-Joo Jo***

Abstract

The weight reduction of carbody structures is of great concern in developing high speed tilting train for the normal operation of tilting system. The use of composite materials for the carbody structures has many advantages due to their excellent material properties. In this paper, finite element analysis was conducted to analysis and design the composite structure of Tilting Train eXpress(TTX). According to JIS E 7105, static load tests were performed and the structural safety of the composite carbody structure was verified by conducting finite element analysis of the model to which reinforcing frame are added in the composite carbody structure. In addition, modal analysis was conducted to estimate the natural frequency of a train.

Key Words : composite carbody, finite element analysis, modal analysis, tilting train, TTX

1. 서 론

현재 한국철도기술연구원(KRRI)에서 개발중인 한국형고속틸팅열차(TTX)는 기존선로를 일부 개량하여 적용할 수 있는 틸팅(tilting)시스템을 갖춘 차량으로 최고운행속도 180 km/h급의 고속열차이다. 틸팅 시스템은 열차가 곡선 구간을 운행할 때 차량 몸체를 기울임으로써 원심력을 최소화해 곡선 구간 속도를 기존보다 30~40% 높일 수 있고 승객들의 승차감도 높일 수 있는 장점을 지니고 있다. 틸팅 차량에서 차체의 무게 감소는 틸팅 시스템의 효율적인 작동과 궤도 부담력 감소, 유지·보수 비용의 절감을 위한 중요한 문제로 부각되고 있다. 이러한 틸팅 차량 차체에 복합재

료를 적용할 경우, 재료자체의 우수한 특성으로 획기적인 중량감소를 실현할 수 있다. 복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도 및 비강성을 가지므로 차체 경량화에 적합할 뿐 아니라 진동감쇠특성 및 피로특성, 내열성, 내마모성 등이 우수한 장점을 지니고 있다.

TTX의 복합재 차체는 Gr/Ep 복합재료 스킨과 알루미늄 하니콤 코어로 이루어진 샌드위치 구조로 구성되어 있으며, 이러한 구조를 설계하기 위하여 스킨과 코어의 두께를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 틸팅 차량 복합재료 차체 구조를 설계 제안하고 JIS 규격에 따른 정하중 시험을 통한 구조안정성 검증을 수행하기 위해, 전체 차량 모델에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 복합재 구조 안에 보강 프레임이 삽입된 차체 모델에 대한 구조 응력 해석을 수행하였으며, 차량의 고유 진동수를 예측하기 위한 모달 해석을 수행하였다.

* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 대학원

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

한국화이바(주) 철도차량사업부

2. 틸팅차량 차체 구조 해석

복합재 구조만의 응력 평가를 통해 두께를 결정하기 위해, 보강용 금속 프레임을 제외한 복합재 샌드위치 구조만으로 차체를 모델링하여 해석을 수행하였다[1]. 해석에 적용한 복합재료와 금속재료의 물성 값을 Table 1에 나타내었다. 복합재 차체는 샌드위치 구조로 구성되며, 볼스터와 크로스프레임, 센터 실, 사이드 실, 프레임 등의 언더프레임은 금속재료로 구성된다.

복합재 패브릭의 물성은 실험을 통해 얻은 값을 사용하였다[2]. 그러나 심재의 제조사에서 제공한 물성표에는 일부 강성값만이 주어졌으므로, 심재의 물성치를 예측하기 위해 알루미늄 하니콤의 물성을 이론적으로 예측한 연구[3]를 참고하여, 하니콤의 형상과 재료물성을 바탕으로 알루미늄 하니콤의 물성값을 계산하였다.

JIS E 7105 규격에 준하여 차체에 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중을 부과하여 해석하였다. Table 2와 Fig. 1에 자세한 하중 및 경계조건을 보였다[6]. 해석 결과 복합재 구조의 두께가 복합재 스킨이 2 mm, 코어가 30 mm인 경우, 모든 하중 상황에서 차체 전반에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu index를 나타내었다. 언더프레임에서의 최대 처짐량 역시 제한 조건인 15.9 mm보다 작은 결과를 보였다.

Table 1 복합재 및 금속재료 물성치[2-5]

Gr/Ep Fabric (#3327-EP)		Core (Al Honeycomb)	
E_1 (GPa)	55.5	E_1 (MPa)	0.17
E_2 (GPa)	48.3	E_2 (MPa)	0.17
G_{12} (GPa)	3.81	E_3 (MPa)	1480
S_1 (MPa)	642.2	G_{12} (MPa)	150
S_2 (MPa)	548.9	G_{13} (MPa)	250
S_{12} (MPa)	123.4	G_{23} (MPa)	170
ν_{12}	0.099	ν_{12}	0.996
ρ (kg/m ³)	1600	ρ (kg/m ³)	55

Under-frame(SUS, Steel)				
	SMA490B	SUS 301L-LT	SS400	SPA-H
Modulus, E(GPa)	210	183	200	200
Strength, S(MPa)	370	220	250	250
Poisson's ratio, ν	0.3	0.3	0.3	0.3
Density, ρ (kg/m ³)	7900	7900	7900	7900

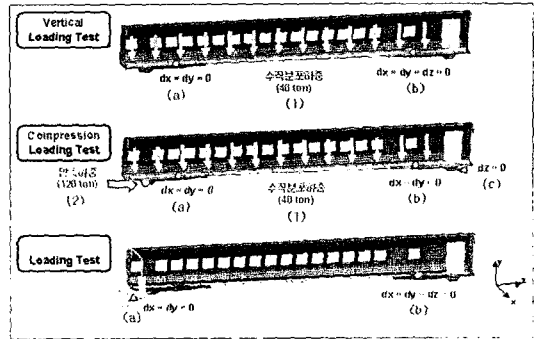


Fig. 1 하중 및 경계 조건.

Table 2 JIS E 7105 규격에 의한 하중 및 경계 조건

	하중 조건	경계 조건	하중 크기
수직 하중	(1) 언더프레임 상면의 분포하중	(a),(b) 공기스프링 위치 4곳 지지	(1) 40 ton
압축 하중	(1) 언더프레임 상면의 분포하중 (2) 연결기 휘부부에 하중 부여	(a),(b) 공기스프링 위치 4곳 지지 (c) 압축 하중이 가해지는 맞은편의 z변위 고정	(1) 40 ton (2)' 120 ton
비틀림 하중	(3) 볼스터 중심선 상의 모서리 부분에 하중 부여	(a) 볼스터 중심선상 1곳 x,y변위 고정 (b) 볼스터 중심선상 2곳 지지	(3) 39 kN·m

(2)' : 한국철도기술연구원 협의

Table 3 해석 결과 정리

		t_{face} (mm)	t_{core} (mm)	Max. Stress (MPa)	Max Def. (mm)
수직 하중	case 1	2	20	54.6	16.7
	case 2	2	30	53.5	15.1
	case 3	2.5	20	45.2	14.4
압축 하중	case 1	2	20	101.0	-
	case 2	2	30	89.9	-
	case 3	2.5	20	64.7	-
비틀림 하중	case 1	2	20	25.1	-
	case 2	2	30	26.4	-
	case 3	2.5	20	22.8	-

3. 보강 프레임을 삽입한 차체 구조 해석

이상의 해석 결과를 바탕으로 창문 및 언더프레임 등 차체 형상의 설계 변경이 수행되었다. 변경된 설계를 적용하고, 앞서 고려하지 않았던 차체 보강용으로 샌드위치 구조 내부에 삽입된 금속 프레임을 추가한 해석 모델을 만들었다. Fig. 3에 모델의 형상과 삽입된 차체 보강 프레임의 위치를 나타내었다.

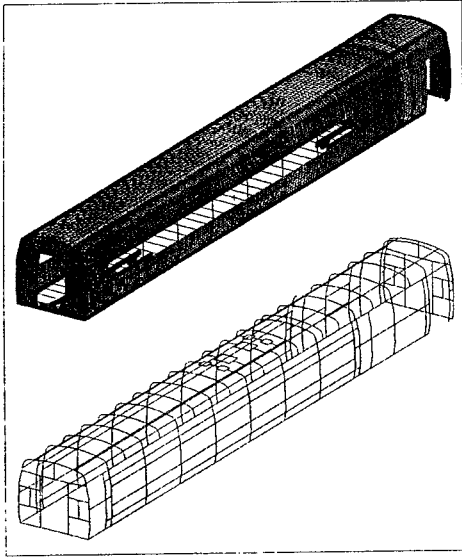


Fig. 3 틸팅차량 차체 및 보강 프레임 형상.

차체 보강 프레임은 앞서의 해석 결과를 고려하여 창문 및 출입구 부위에 위치하였으며, 차체가 결합되는 부분, 지붕의 판토 및 에어컨 결합부위, 차체 내부자재 결합부위 등 필요요건에 따라 그 위치가 결정되었다. 해석 모델의 총 절점수는 29,851개, 요소 수는 32,589개이다. 해석 프로그램으로는 ABAQUS, pre&post processor로 MSC/PATRAN을 사용하였다. 복합재 차체에는 2D 셸 요소(S4R)를 사용하였으며, 차체 각 부분의 프레임은 1D 빔 요소(B31)를 사용하여 모델을 구성하였다. 빔 요소의 물성은 보강 프레임 설계 도면의 단면 형상으로부터 각 방향의 관성 모멘트와 단면적을 계산하여 입력하였다.

2장에서 수행한 것과 같은 각 하중 상황 및 경계 조건에 대해 차체의 응력 분포를 구하여 그 결과를 Fig. 4, 5에 나타내었다. 압축하중시 복합재 구조내의 최대 응력은 언더프레임에서의 응력 집중이 발생하는 볼스터와의 연결부분에서 발생하였다. 그러나 복합재 섬유방향 강도인 642.2 MPa에 비해 매우 낮은 59.4 MPa의 값을 보이며, 차체 전반적으로 낮은 응력분포를 보임을 알 수 있다. 한편 수직하중시의 언더프레임의 최대 처짐 역시 14.8 mm로 15.9 mm보다 작아야하는 제한 조건을 만족하였다.

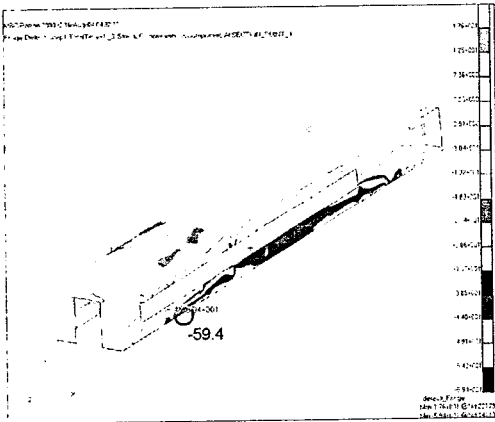


Fig. 4 압축하중시 복합재 섬유방향응력(MPa).

4. 차체 모드 해석

응력 해석에 사용한 보강 프레임이 삽입된 모델을 사용하여 고유 진동수를 측정하기 위한 모드 해석을 수행하였다. 또한 하중 부담이 적어 응력 해석 모델링에서는 고려하지 않았던 언더프레임 위 바닥면의 키스톤 플레이트(keystone plate)를 모델링하여, 바닥면에서 좀 더 정확한 진동 특성을 보이도록 해석 모델에 추가하였다. 단면 형상이 복잡한 키스톤 플레이트 형상을 평판으로 모델링한 후, 같은 굽힘 강성과 무게를 갖도록 유효물성 계산하여 평판에 적용하였다. 경계 조건은 수직하중시와 같이, 공기 스프링 위치를 구속하였다. 해석을 통하여 고유 진동수를 5차까지 계산하여 Table 4에 정리하였으며, 1, 2차 모드 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

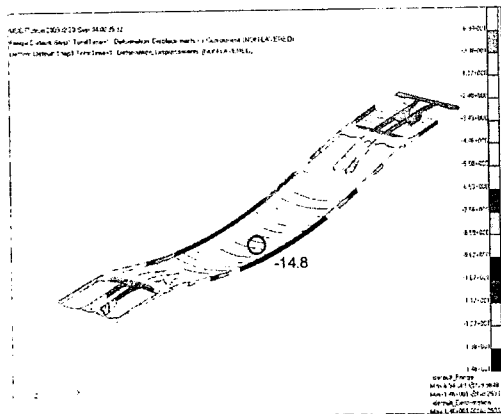


Fig. 5 수직하중시 언더프레임에서의 최대 처짐(mm).

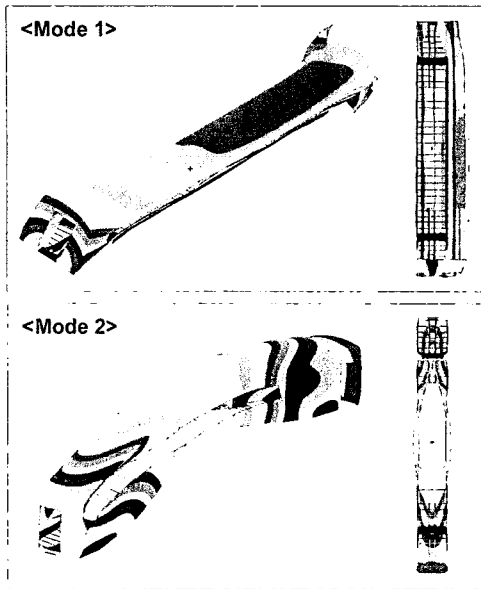


Fig. 6 1. 2차 모드 형상.

Table 4 모드 해석 결과 정리

mode	1	2	3	4	5
freq. (Hz)	5.77	10.23	12.15	13.77	13.90

해석 결과 1차 모드의 고유진동수는 5.772 Hz, 2차 모드 이후는 10 Hz를 넘는 값을 보였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯 1차 모드에서는 복합재 차체 부분이 옆으로 기우는 형상을 보이고 있다. 이는 복합재 차체 강성 및 무게가 언더프레임과 비교했을 때 상대적으로 낮으며, 실내 격벽 등의 차체 내부구조물이 생략되어 있는 해석 모델의 영향 때문으로 생각되어진다. 2차 모드 이후로는 이러한 형상이 보이지 않으며, 고유진동수 또한 10 Hz 이상의 높은 값을 보인다.

5. 결론

틸팅차량 복합재 구조의 두께를 설계 제안하고, 차체의 구조안정성을 검증하기 위한 유한요소해석이 수행되었다. 우선 복합재 구조만의 모델의 응력 해석을 통하여 복합재 구조의 두께를 결정하였고, 보강 금속 프레임을 추가하여 구조안정성을 검증 하였다. 응력 해석 결과, 차체 전반에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu

index를 나타내었다. 또한 언더프레임에서의 최대 처짐량은 제한 조건인 15.9 mm보다 작음을 알 수 있었다. 또한 고유진동수를 예측하기 위한 모드 해석을 수행하였다. 1차 모드의 값이 10 Hz보다 낮은 값을 보이므로 차체 형상 및 해석 모델에 대한 재검토가 필요하다. 전체 차량의 무게는 7.61 톤으로 계산되었다. 이중 차체의 복합재 부분(차체,지붕,골벽)의 무게는 1.5 톤 이내로 매우 가벼우며, 상대적으로 언더프레임 및 보강프레임의 무게가 전체 무게에 많은 비중을 차지함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술개발연구사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김수현, 강상국, 이상의, 김천근, 이상진, "복합재 틸팅열차 차체 구조물의 해석 및 설계," 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 포항공과대학교, 2004, pp. 47-50.
- (2) 이은동, 윤성호, 신광복, 정종철, "틸팅차량용 복합재 차체소재의 기계적 특성 평가 기술," 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 포항공과대학교, 2004, pp. 51-54.
- (3) Hyoung-Gu Kim, Nak-Sam Choi, "Prediction of mechanical properties of honeycomb core materials and analysis of interlaminar stress of honeycomb sandwich composite plate," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 1, 2004, pp. 29-37.
- (4) Y.C.Zhang and J. Harding, "A numerical micro mechanics analysis of the mechanical properties of a plain weave composite," *Computers & Structures*, Vol. 36, No. 5, 1990, pp. 839-844.
- (5) 김정현, 김성중, 박근수, 박형순, "해석 및 시험 평가를 통한 유럽형 전동차 차체 개발," 한국철도학회 춘계학술대회, 2003.
- (6) JIS E 7105, Test method for static load of body structures of railway rolling stock, 1994.