

한국형 고속틸팅열차(TTX)의 복합재 차체 및 접합부의 구조 해석

Analysis of the Composite Structure of Tilting Train eXpress(TTX)

김수현* 강상국* 이상의* 김진곤** 신광복***
Kim, Soo-Hyun Kang, Sang-Guk Lee, Sang-Eui Kim, Chun-Gon, Shin, Kwang-Bok

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 such as high specific strength and stiffness.

In this paper, finite element analysis was conducted to analyze and design the composite structure of Tilting Train eXpress(TTX). According to JIS E 7105, various load tests were performed using finite element analysis and the structural safety of the composite carbody structure was inspected to determine the thickness of the composite sandwich structure. In addition, structural analysis was conducted to suggest a design of the joint part of composite carbody and metal underframe.

1. 서 론

한국철도기술연구원(KRRI)에서 개발중인 한국형 고속틸팅열차(TTX)는 기존선로를 일부 개량하여 적용할 수 있는 틸팅(tilting)시스템을 갖춘 차량으로 최고운행속도 180 km/h급의 고속열차이다. 틸팅시스템은 열차가 곡선 구간을 운행할 때 차량 물체를 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 복합재료를 적용할 경우, 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도 및 비강성을 가지는 복합재료 자체의 우수한 특성으로 획기적인 중량감소를 실현할 수 있다.

본 연구에서 틸팅차량 차체의 상세한 3차원 모델링을 기반으로 유한요소해석을 수행하여 복합재료 차체 구조를 설계 제안하고 구조안정성을 검증하였다. 몇 가지 무게 경우에 대하여 JIS E 7105 규격에 따라 정하중시의 틸팅차량 차체 구조의 해석을 수행하였다. 해석 결과 차체 전반에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu index를 나타내었다. 수직하중시의 언더프레임의 최대 처짐 역시 제한 조건을 만족하였다. 또한 틸팅 차량 복합재 차체와 금속으로 이루어진 언더프레임(underframe)과의 접합부 제시안에 대해 응력해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 가장 적합한 접합부 설계안을 제시하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학 전공, 박사과정

** 한국과학기술원 항공우주공학 전공, 교수

*** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 선임연구원

2. 틸팅차량 차체 구조 해석

2.1 해석

복합재 구조만의 응력 평가를 통해 무게를 결정하기 위해, 보강용 금속 프레임은 제외한 복합재 샌드위치 구조만으로 차체를 모델링하여 해석을 수행하였다[1]. 해석에 적용한 복합재료와 금속재료의 물성 값을 도표 1에 나타내었다. 복합재 차체는 샌드위치 구조로 구성되며, 불스티와 크로스 프레임, 센터 실, 사이드 실, 프레임 등의 언더프레임은 금속재료로 구성된다. 복합재 레브릭의 물성은 실험을 통해 얻은 값을 사용하였다[2]. 그러나 심재의 제조사에서 제공한 물성표에는 일부 강성값만이 주어졌으므로, 심재의 물성치를 예측하기 위해 알루미늄 하나킴의 물성을 이론적으로 예측한 연구[3]를 참고하여, 하나킴의 형상과 재료물성을 바탕으로 알루미늄 하나킴의 물성값을 계산하였다.

도표 1. 복합재 및 금속재료 물성치[2-5]

Gr/Ep Fabric(#3327-Ep)		Core(Al Honeycomb)		Under-frame(SUS, Steel)				
E_1 (GPa)	55.5	E_1 (MPa)	0.17	SMA490B	SUS 301L-LT	SS400	SPA-H	
E_2 (GPa)	48.3	E_2 (MPa)	0.17					
G_{12} (GPa)	3.81	E_3 (MPa)	1480	Modulus, E(GPa)	210	183	200	200
S_1 (MPa)	542.2	G_{13} (MPa)	150	Strength, S(MPa)	370	220	250	250
S_2 (MPa)	548.9	G_{13} (MPa)	250	Poisson's ratio, ν	0.3	0.3	0.3	0.3
S_{12} (MPa)	123.4	G_{23} (MPa)	170	Density, ρ (kg/m ³)	7900	7900	7900	7900
ν_{12}	0.099	ν_{12}	0.096					
ρ (kg/m ³)	1600	ρ (kg/m ³)	35					

JIS E 7105 규격에 준하여 차체에 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중을 부과하여 해석하였다. 해석 프로그램으로는 ABAQUS, pre&post processor로 MSC/PATRAN을 사용하였으며 해석 모델의 총 결점 수는 16,919개, 요소 수는 16,402개이다. 그림 1에 자세한 하중 및 경계조건을 보였다[6]. 복합재 구조의 최적 무게를 구하기 위해 면재의 두께를 2~4 mm로, 심재의 두께를 20~40 mm로 변화 시키며 해석을 수행하였다. 해석 결과 복합재 구조의 두께가 복합재 스킴이 2 mm, 코어가 30 mm인 경우, 모든 하중 상황에서 차체 전반에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu index를 나타내었다. 언더프레임에서의 최대 치질량 역시 제한 조건인 15.9 mm보다 작은 결과를 보였다. 각 하중시의 두께별 해석 결과를 정리하여 도표 2에 나타내었다.

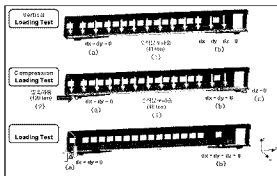


그림 1. JIS E 7105 규격에 의한 하중 및 경계 조건

도표 2. 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	-

2.2 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. 그림 2에 모델의 형상과 삽입된 차체 보강 프레임의 위치를 나타내었다. 차체 보강 프레임은 앞서의 해석 결과를 고려하여 창문 및 출입구 부위에 위치하였으며, 차체가 결합되는 부분, 지붕의 판트 및 에이컨 결합 부위, 차체 내부차체 결합부위 등 필요요건에 따라 그 위치가 결정되었다. 해석 모델의 총 절점 수는 29,851개, 요소 수는 32,589개이다. 복합체 차체에는 2D 쉘 요소(S4R)를 사용하였으며, 차체 각 부분의 프레임은 1D 빔 요소(B31)를 사용하여 모델을 구성하였다. 빔 요소의 물성은 보강 프레임 설계 도면의 단면 형상으로 부터 각 방향의 관성 모멘트와 단면적을 계산하여 입력하였다.

2장에서 수행한 것과 같은 각 하중 상황 및 경계 조건에 대해 차체의 응력 분포를 구하여 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 압축하중시 복합체 구조내의 최대 응력은 언더프레임과의 결합부에서 발생하였으며, 언더프레임에서의 응력 집중이 발생한 볼스터와의 연결부분이다. 그러나 복합체 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 치질 역시 14.8 mm로 15.9 mm보다 작아야하는 제한 조건을 만족하였다.

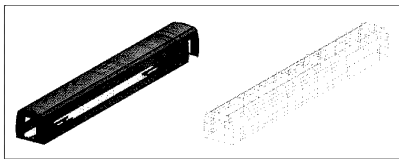
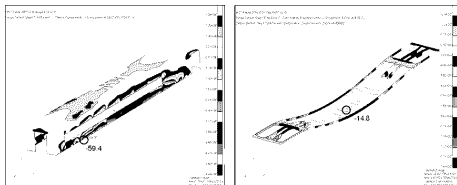


그림 2. 필딩차량 차체 및 보강 프레임 형상



(a) 압축하중시 복합체 섬유방향응력(MPa), (b) 수직하중시 언더프레임에서의 최대치질

그림 3. 보강 프레임을 삽입한 차체 구조 해석 결과

3. 결합부 상세 구조 해석

틸팅 차량의 복합재 차체와 금속으로 이루어진 언더프레임이 연결되는 결합부는 구조적으로 매우 중요한 부분이다. 이러한 복합재료와 금속의 서로 다른 두 재료를 결합하는 방법으로는 크게 기계적 결합과 접착제를 사용한 결합의 두 가지가 있으며, 틸팅 차량에는 두 가지 결합 방법이 모두 적용될 계획이다. 기계적 결합을 위해 가공한 홈 주위에는 심한 응력집중으로 인해 결합부위의 파손으로도 이어질 수 있으므로 결합부의 구조 및 형상 설계에 대한 적절한 선택이 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 (주)한국화이바에서 제공된 복합재 차체와 금속 언더프레임과의 결합부 초기 제시안들에 대한 상세구조해석을 수행하여 구조적 안전성을 비교 분석하였다.

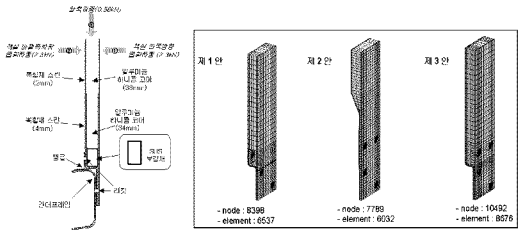


그림 4. 결합부의 구성 및 초기 결합부 설계안 모델

3.1 초기 결합부 설계안에 대한 구조 해석

우선 결합부는 그림 4와 같이 복합재 차체, 금속 언더프레임, 앵글, 보강재 등으로 구성되어 있으며 리벳으로 연결된다. 초기 결합부 설계안은 (주)한국화이바로부터 총 3가지 안이 제공되었다. 모든 안에 대해서 차체 두께는 38mm로 복합재 스킨의 두께가 2mm, 하니콤 코어의 두께가 34mm이다. 특히 결합부가 시작되는 이진 부분부터는 굽힘에 의한 응력이 증가할 것을 고려하여 주 하중을 담당하는 복합재 스킨의 두께를 4mm로 하였으며 하니콤 코어의 두께를 30mm로 설계되었다. 해석 상세모델에 사용된 요소는 8절점 고체요소(solid element)이며 사용한 요소와 노드의 수는 그림 4에 나타나 있다. 복합재 스킨과 하니콤 코어, 보강재는 모두 완전접착(perfect bonding)된 것으로 가정하였다. 구조 해석에서 사용한 하중조건은 객실 압축 방향 굽힘하중(2.3 kN)과 객실 바깥쪽 방향 굽힘하중(2.3 kN) 그리고 압축하중(0.58 kN)을 각 설계안들에 대해 각각 부가하였다. 하중의 크기는 차체 단면의 자유체도(free body diagram)로부터 차체, 에어콘, 파워그라프 등에 의한 자중과 원심력 등을 바탕으로 계산되었다. 해석 수행 시에는 극단적인 경우를 고려하기 위해 기계적 결합만 가정하였다. 따라서 경계조건으로 리벳에 의한 구속만을 고려하였다. 리벳 헤드부분에 맞닿는 부분의 변위를 고정하고 굽힘하중의 경우에는 홈의 안쪽 아랫면을, 압축하중의 경우에는 홈의 안쪽 윗면을 고정하였다.

이와 같은 조건으로 3가지 결합부 설계안에 대해 3가지 하중 상황에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 도표 3에 나타내었다. 해석결과에서 응력분포를 살펴보면 차체에 걸리는 응력은 복합재 스킨의 섬유방향 파손강도인 640MPa에 비해 수십 MPa 단위로 전체적으로 낮은 값을 보였으나 대부분의 경우에서 최대응력은 모두 리벳 홈 주위에서 발생하였다. 또한 금속 보강재의 홈 주위에서도 응력집중이 심해서 항복응력인 250MPa를 초과하는 결과를 보였다.

도표 3. 초기 집합부 제시안의 유한요소해석결과

하중종류	응력 및 변형량	제1안	제2안	제3안
객실안쪽 방향굽힘	복합체 내 (MPa)	410	1430	303
	금속보강재 내 (MPa)	702	758	302
	최대변형량 (mm)	3.5	44	3.26
객실바깥쪽 방향굽힘	복합체 내 (MPa)	406	1430	302
	금속보강재 내 (MPa)	707	753	361
	최대변형량 (mm)	3.5	44	3.26
압축	복합체 내 (MPa)	3.45	9.8	1.6
	금속보강재 내 (MPa)	10.5	10.6	5.65
	최대변형량 (mm)	0.028	0.71	0.029

도표 3에서 제3안이 모든 경우에 대해서 가장 우수한 설계안임을 확인할 수 있다. 제2안의 경우는 최대응력과 최대변형량이 나머지 안들에 비해 매우 크게 나타났으며 따라서 상당히 불안정한 설계안임을 알 수 있다. 또한 제1안의 결과와 제3안의 결과를 비교해 볼 때, 내부가 비어 있는 금속 보강재보다 하니콤 코어로 가득 차 있는 구조가 집합부에 작용하는 하중에 대해 더 효과적인임을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 새로운 집합부 수정안을 제시하였으며 이에 대해 동일한 과정에 따라 해석을 수행하였다.

3.2 집합부 수정안에 대한 구조 해석

초기 집합부 설계안의 해석 결과를 바탕으로 제3안과 제1안을 보완한 형태로 새로운 집합부 수정안인 제4안과 제5안이 설계되었다(그림 5(a)). 각 수정안에 대해 앞서와 동일한 해석을 수행하였다. 다만 압축하중의 경우는 최대응력의 크기가 매우 낮아 이 경우에는 제외하였다. 해석수행결과를 나타낸 그림 5(b)로부터 금속 보강재 혼 주위에 최대응력이 발생하나 그 크기가 재료의 항복응력 이하임을 알 수 있다. 이는 지금까지 수행한 다른 안의 해석 결과와 비교할 때 매우 안정된 결과로 집합부 수정안 설계로 인하여 체결부 혼 부근의 응력집중이 매우 완화되었음을 알 수 있다. 따라서 복합재 차재와 금속 보강재 모두에서 최대 응력이 낮고 최대변형이 작은 제4안의 방향으로 집합부가 설계되어야 한다.

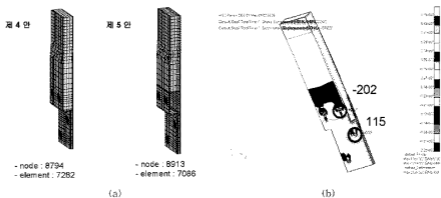


그림 5. (a)집합부 수정안 형상 및 (b)객실 안쪽방향 굽힘하중에 대한 섬유방향 응력분포(MPa, 제4안)

도표 4. 접합부 수정안의 유한요소해석결과

하중종류	응력 및 변형량	제 4 안	제 5 안
객실안쪽 방향굽힘	복합재 내 (MPa)	202	279
	금속보강재 내 (MPa)	216	461
	최대변형량 (mm)	2.20	2.39
객실바깥쪽 방향굽힘	복합재 내 (MPa)	201	273
	금속보강재 내 (MPa)	216	448
	최대변형량 (mm)	2.20	2.36

4. 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 전방에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu index를 나타내었다. 또한 언더트레이에서의 최대 처짐량 역시 제한 조건보다 작음을 알 수 있었다.

복합재 차체와 금속 언더트레이 접합부의 설계 및 제작을 위해 유한요소해석을 이용하여 구조적 안전성을 평가하였다. 초기 접합부 제시안에 대해 굽힘하중과 압축하중의 경우에 대한 구조해석을 수행하여 응력분포 및 최대 변형량을 비교하였다. 해석 결과를 바탕으로 접합부 수정안을 제안하였으며, 이에 대한 동일한 구조해석을 수행하여 수정안의 안정성을 검증할 수 있었다.

후기

본 연구는 철도청의 철도기술개발연구사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김수현, 강상국, 이상의, 김천근, 이상진(2004), "복합재 틸팅열차 차체 구조물의 해석 및 설계," 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 포항공과대학교, pp. 47-50.
- 이은동, 윤성호, 신광복, 정종철(2004), "틸팅차량용 복합재 차체소재의 기계적 특성 평가 기술," 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 포항공과대학교, pp. 51-54.
- Hyoung-Gu Kim, Nak-Sam Choi(2004), "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, pp. 29-37.
- Y.C.Zhang and J. Harding(1990), "A numerical micro mechanics analysis of the mechanical properties of a plain weave composite," Computers & Structures, Vol. 36, No. 5, pp. 839-844.
- 김정현, 김성중, 박근수, 박형순(2003), "해석 및 시험평가를 통한 유리형 전동차 차체 개발," 한국철도학회 춘계학술대회.
- JIS E 7105(1994), Test method for static load of body structures of railway rolling stock.