

복합재 틸팅열차 차체 구조물의 해석 및 설계

김수현*·강상국*·이상의*·김천곤**·이상진***

Analysis and Design of the Composite Carbody of Tilting Train

Soo-Hyun Kim*, Sang-Guk Kang*, Sang-Eui Lee*, Chun-Gon Kim**, Sang-Jin Lee***

Abstract

Weight reduction of the carbody is of great concern in developing high speed tilting train. Currently the composite materials are widely applied to the carbody structure due to their excellent material properties such as high specific strength and stiffness characteristics. In this paper, finite element analysis was conducted to design sandwich structures of composite carbody of the Korean Tilting Train eXpress(TTX). Several load tests on the carbody according to JIS E 7105, such as static vertical, compressive and torsional load tests was performed by finite element analysis, and the structural safety of composite carbody structure was verified.

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

1. 서 론

철도의 고속화를 이루는 방안으로는 크게 철도 노선을 새로 구축하고 차량도 고속 운행이 가능한 고속차량을 제작하여 운행하는 것과, 기존의 노선을 보완하여 최대한 활용하며 고속화가 가능한 차량을 운행시키는 방법이 있다. 그러나 지역 간 균형발전, 기존철도간선과의 연계 및 수송 효율성을 높이기 위해서는 기존의 노선을 활용하여 철도의 고속화를 이루는 방안이 요구된다.

현재 한국철도기술연구원(KRRI)에서 개발중인 한국형고속틸팅열차(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 몸체를 기울임으로서 원심력을 최소화

화해 곡선 구간 속도를 기존보다 30~40% 높일 수 있고 승객들의 승차감도 높일 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나 우리나라는 틸팅시스템과 관련된 해당기술이 미비한 실정이다.

틸팅 시스템은 승객의 승차감을 향상시키기 위하여 차체를 기울여 원심력을 감소시켜야 하므로, 차체의 무게 감소는 틸팅 시스템의 효율적인 작동과 궤도 부담력 감소, 유지·보수 비용의 절감을 위한 중요한 문제로 부각되고 있다[1]. 차체 경량화는 형상최적화를 통해서도 실현할 수 있으나 획기적인 중량감소를 기대하기는 어렵다. 그러나 차체에 복합재료를 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.

이에 본 과제에서 틸팅차량 차체의 상세한 3차원 모델링을 기반으로 유한요소해석을 수행하여 복합재료 차체 구조를 설계 제안하고 JIS 규격에 따른 구조안정성의 검증을 수행하였다.

* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 대학원

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국화이버(주) 철도차량사업부

2. 차체 단위 모델의 해석

2.1 차체 단위 모델

복합재 차체는 샌드위치 구조로 구성되며 카본 패브릭을 면재로, 알루미늄 하니콤을 심재로 사용한다. Table 1에 사용된 복합재료의 물성이 나와있다. 복합재 샌드위치 구조의 두께를 결정하기 위해 차체 단위 모델에 대한 기초 해석을 수행하였다. 해석 모델은 2D 쉘 요소(S4R)를 사용하였으며 절점 수는 2,105개, 요소 수는 1,908개이다(Fig. 1). 해석 프로그램으로는 ABAQUS, pre&post processor로 MSC/PATRAN을 사용하였다.

2.2 해석 결과

차체 두께 설계 제한 조건의 최소치인 면재 2 mm, 심재 20 mm([2/20/2])의 경우로 해석을 수행하였고 응력분포 및 변형 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 창문부분에서 응력집중이 발생하였으나 섬유방향의 최대응력값이 50.2 MPa로 매우 작음을 알 수 있다.

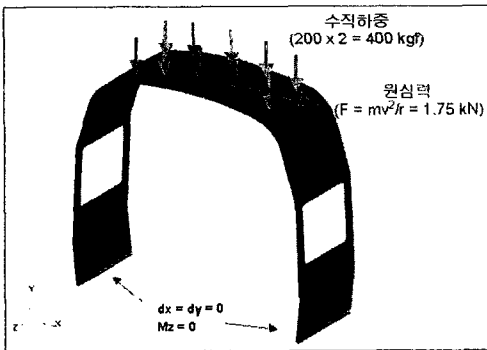


Fig. 1 차체 단위 모델 형상 및 경계조건.

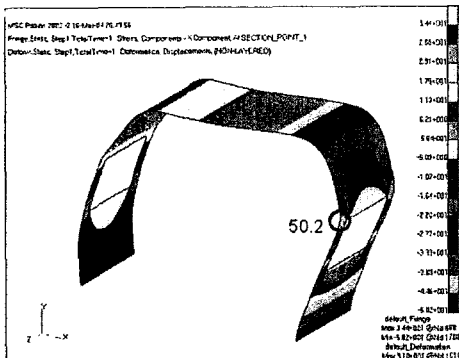


Fig. 2 면재의 응력분포 및 변형형상(x20).

3. 틸팅차량 차체 구조 해석

3.1 틸팅차량 차체 모델링

복합재 구조만의 하중 평가를 위해 복합재 샌드위치 구조만으로 차체를 고려하였다. 복합재 차체의 극한 응력 상태를 위해 길이방향 및 횡방향, 창문부분의 보강을 위해 샌드위치 구조 내부에 삽입되는 금속 프레임을 제외하고 전체 차량을 모델링하였다. 해석 모델의 형상은 Fig. 3과 같다.

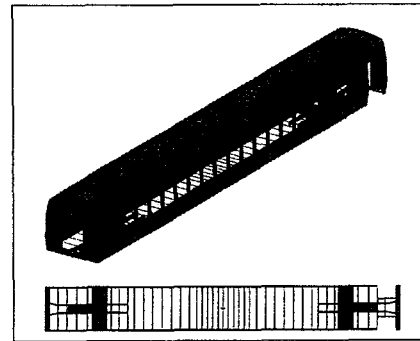


Fig. 3 틸팅차량 차체 및 언더프레임 모델링.

차체에는 2D 쉘 요소(S4R)를 사용하였으며 언더프레임을 가로지르는 크로스 프레임에는 1D 빔 요소(B31)를 사용하였다. 해석 모델의 총 절점 수는 16,919개이고 요소 수는 16,402개이다.

3.2 차체 재료 물성

복합재 차체는 앞서와 같은 샌드위치 구조로 구성되며, 볼스터와 크로스프레임, 센터 실, 사이드 실, 프레임 등의 언더프레임은 Table 1과 같은 금속 재료로 구성된다.

Table 1 해석 모델의 복합재 및 금속재료 물성치

	Composite Fabric (#3327-Ep)	Under-frame(SUS, Steel)			
		SMA490B	SUS 301L-LT	SS400	SPA-H
E_1 (GPa)	55.5	210	183	200	200
E_2 (GPa)	48.3				
G_{12} (GPa)	3.81				
S_1 (MPa)	642.2	370	220	250	250
S_2 (MPa)	548.9				
S_{12} (MPa)	123.4				
ν	0.099	0.3	0.3	0.3	0.3
ρ (kg/m ³)	1600	7900	7900	7900	7900

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 취부부에 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 중심선상의 모서리 부분에 하중 부여	(a) 볼스터 중심선상 1곳 x,y변위 고정 (b) 볼스터 중심선상 2곳 지지	(3) 39 kN·m

(2) : 한국철도기술연구원 협의

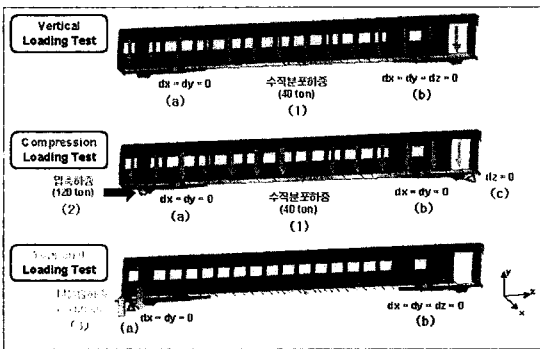
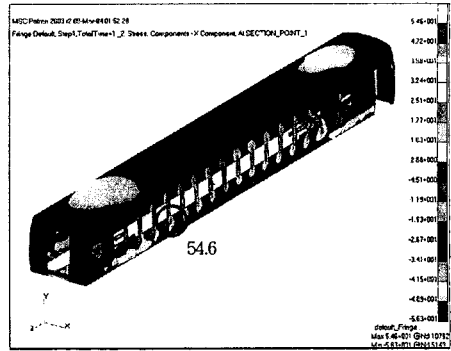
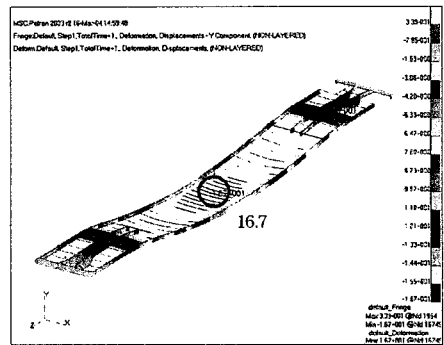


Fig. 4 하중 및 경계 조건.



(a) 면재에서의 응력 분포(MPa)



(b) 언더프레임에서의 최대 처짐(mm, x50)

Fig. 5 수직하중시 해석 결과(case 1).

3.3 하중 및 경계 조건

JIS E 7105 규격에 준하여 차체에 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중을 부과하여 해석하였다. 자세한 하중 및 경계조건은 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다[2].

3.4 틸팅 차체 구조의 설계 제한

복합재 샌드위치 구조의 설계 두께 범위는, 면재는 2~3 mm, 심재는 20~40 mm로 주어졌다. 각 하중상황에서 복합재 면재의 응력평가를 위해 최대 응력 값을 구하고 Tsai-Wu 파손판정식을 사용하였다. 그리고 수직하중시 언더프레임의 처짐이 대차사이의 길이의 1/1000인 15.9 mm보다 작아야 한다는 제한 조건을 적용하였다.

4. 틸팅차량 차체 구조 해석 결과

4.1 수직하중시 해석 결과

먼저 단위 모델에서 해석하였던, 복합재 차체의 두께가 [2/20/2]인 경우(case 1)로 해석을 수행하였다. Fig. 5(a)에서 복합재 차체 구조의 면

Table 3 수직하중시의 해석 결과

		t_{face}	t_{core}	Max. Stress	Max Def.	Comp.	Total
		(mm)	(mm)	(MPa)	(mm)	wt.(ton)	wt.(ton)
수직 하중	1	2	20	54.6	16.7	2.26	4.62
	2	2	30	53.5	15.1	2.35	4.71
	3	2.5	20	45.2	14.4	2.52	4.88

재에서의 섬유방향 응력분포를 보이고 있으며, 최대 응력은 창문 근처에서 54.6 MPa이고 최대 Tsai-Wu index도 0.126로 크지 않은 값을 보여 준다. 그러나 Fig. 5(b)와 같이 언더프레임에서의 최대 처짐이 16.7 mm로 제한조건인 15.9 mm보다 크게 나타났다. 이에 따라 심재의 두께만을 30 mm로 늘린 경우(case 2)와 면재의 두께만을 2.5 mm로 늘린 경우(case 3)에 대하여 같은 해석을 수행하였다. Table 3의 결과에서 볼 수 있듯이 case 2와 3 모두 응력 및 변형의 관점 모두에서 큰 문제가 없음을 알 수 있다.

4.1.2 압축하중시 해석 결과

압축하중을 주어 해석한 결과가 Table 4에 정리되었다. 최대 응력은 차체 뒤 출입문 부분에서

발생하며, case 2의 경우 최대 응력 89.9 MPa, Tsai-Wu index는 0.315로 Fig. 6에 나와 있다.

4.1.3 비틀림하중시 해석 결과

최대 응력은 case 2의 경우 경계 조건 근처에서 26.4 MPa이다. 반면 최대 Tsai-Wu index는 Fig. 7에서와 같이 창문 부분에서 발생한다.

앞서 다른 하중 상황들의 해석 결과에서도 알 수 있듯이 최대 응력과 Tsai-Wu index는 창문 주위와 출입문 주위에서 상대적으로 높게 발생하나, 이 부분은 보강 프레임이 삽입될 예정임을 감안하면 복합재 차체의 큰 구조적 문제는 없을 것으로 사료된다.

5. 결론 및 향후 계획

복합재 샌드위치 구조의 두께를 설계 제안하기 위해, 유한요소해석으로서 구조안정성 검증을 수행하였다. 차체 단위 모델의 기초 해석을 통해 차체 두께의 lower bound를 결정하였고, 몇 가지 두께 경우에서 JIS E 7105 규격에 따른틸팅 차량 차체 구조의 해석을 수행하였다. 해석 결과 두께 case 1~3 모두 차체 전반에 걸쳐 매우 낮은 응력 분포와 Tsai-Wu index를 나타내었다. 사용된 패브릭 재료의 섬유방향 강도가 642.2 MPa임을 고려할 때 모든 하중조건에서 최대 응력이 89.9MPa로 낮게 나타났으며, Tsai-Wu 파손판정식도 최대 0.374의 낮은 값을 보였다. 언더프레임에서의 최대 처짐량은 case 1에서 크게 나타났으나 case 2,3에서는 모두 제한 조건인 15.9 mm보다 작게 계산되었다. 또한 해석 결과 복합재를 적용한 차체의 무게는 4.88 ton 미만으로, 알루미늄 차체에 비해 40% 이상의 무게 절감효과를 보였다.

따라서 이후에 수행할 예정인 모달 해석과 보강 프레임 위치 해석 결과를 바탕으로 복합재 차체 구조의 두께를 제안할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구사업개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사드립니다.

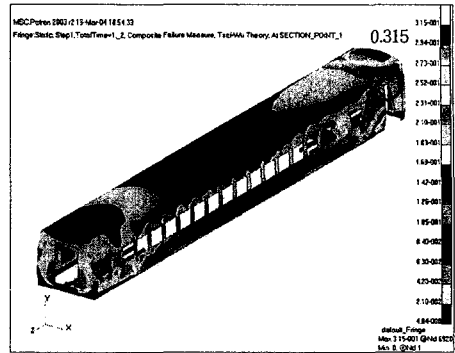


Fig. 6 압축하중시 Tsai-Wu index(case 2).

Table 4 압축하중시의 해석 결과

		t _{face} (mm)	t _{core} (mm)	Max. Stress (MPa)	Comp. wt.(ton)	Total wt.(ton)
압축 하중	1	2	20	101.0	2.26	4.62
	2	2	30	89.9	2.35	4.71
	3	2.5	20	64.7	2.52	4.88

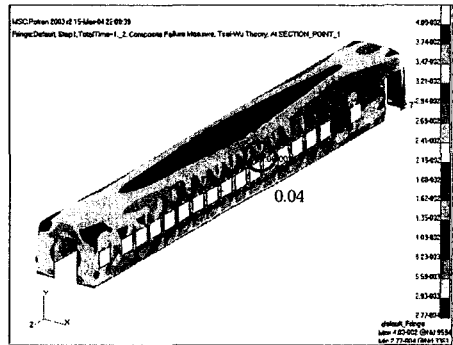


Fig. 7 비틀림하중시 Tsai-Wu index(case 2).

Table 5 비틀림하중시의 해석 결과

		t _{face} (mm)	t _{core} (mm)	Max. Stress (MPa)	Comp. wt.(ton)	Total wt.(ton)
비틀림 하중	1	2	20	25.1	2.26	4.62
	2	2	30	26.4	2.35	4.71
	3	2.5	20	22.8	2.52	4.88

참고문헌

- (1) K.B.Shin, W.H.You, H.S.Moon, "The application of composite materials in railway vehicle system," The Korean society for composite materials, Vol. 15, No. 5, 2002, pp. 66-71.
- (3) JIS E 7105, "Test method for static load of body structures of railway rolling stock," 1994.