

서브모델링기법을 이용한 복합재 차체 구조물의 상세해석

김수현*·김천곤**·김정석**·정종철***·조세현***

Analysis of the Composite Carbody Structures Using Submodeling Approach

Soo-Hyun Kim*, Chun-Gon Kim*, Jung-Seok Kim*, Jong-Cheol Jeong*, Sea-Hyun Cho*

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 verify the safety of the composite structures of Tilting Train eXpress(TTX). A train prototype with carbon/epoxy composite carbody was manufactured to perform static loading tests according to JIS E 7105. The loading tests were simulated by FE analysis to compare with the test results. To obtain more accurate and detailed result of stress distribution in local region of carbody, the submodeling approach was used. The submodeling analysis results showed the high levels of stress concentration occurred on window frame part of TTX as the loading test results did.

Key Words : composite carbody, finite element analysis, submodeling, TTX

1. 서론

현재 한국철도기술연구원(KRRI)에서 개발 중인 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 시스템의 보다 효율적인 작동과 궤도 부담력 감소, 유지·보수 비용의 절감을 위해서는 차체 경량화가 필수적이다. 이를 위해 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도 및 비강성을 지니는 복합재료를 적용한 차량 차체가 제작

되었다. TTX의 복합재 차체는 carbon/epoxy 복합재료 스킨과 알루미늄 하니콤 코어로 이루어진 샌드위치 구조로 구성되었다.

본 연구에서는 틸팅 차량 복합재료 차체 구조의 구조안정성을 검증하기 위해 3차원 유한요소 모델을 구성하여 구조해석을 수행하였다. 복합재 차량 프로토타입의 정하중시험 결과와 비교하였을 때, 차체 전체모델의 해석결과가 전반적으로 일치하나 국부에서의 응력집중을 보이지는 못하였다. 보다 상세한 해석을 위해 전체 차체 모델과 상세 모델을 연계한 서브모델링기법을 적용하여, 창문틀부위에 대한 상세응력해석을 수행하였다.

2. 프로토타입 구조하중 시험

철도차량 차체의 안전성을 검증하고 구조강도를 평가하기 위해 차체 구조하중시험이 수행되어야 하며, 이를 위해 복합재 차량 프로토타입이 제작되었다. 시험결과를 예측하기 위해 동일한

* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 대학원

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

* 한국화이바(주) 철도차량사업부

하중상황과 유한요소모델에 대한 차체 구조 해석을 수행하였으며[1], 하중시험 후 해석결과와 시험결과를 비교 및 검토하였다.

2.1 해석모델 및 시험하중

차체 구조 해석을 위해 3D 유한요소모델을 구성하였으며, 그 형상은 그림 1과 같다. 해석 모델의 총 절점 수는 32,955개, 요소 수는 37,249개이다. 해석 solver로는 ABAQUS, pre&post processor로 MSC/PATRAN을 사용하였다. 복합재 차체에는 2D 쉘 요소(S4R), 차체 각 부분의 프레임은 1D 빔 요소(B31)를 사용하였다. 빔 요소의 물성은 보강 프레임의 단면 형상으로부터 각 방향의 관성 모멘트와 단면적을 계산하여 입력하였다. 복합재 차량의 차체는 carbon fabric (CF1267)/epoxy, carbon UD/epoxy, glass fabric(HG1581)/epoxy 복합재와 Al honeycomb의 샌드위치 구조로 구성되어 있다. 정하중시험과 동일한 하중 및 경계조건이 되도록, JIS E 7105 규격에 준하여 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중, 3점지지하중 조건을 해석모델에 부과하였다. 표 1에 각 하중조건에 적용된 하중의 크기를 보였다[2].

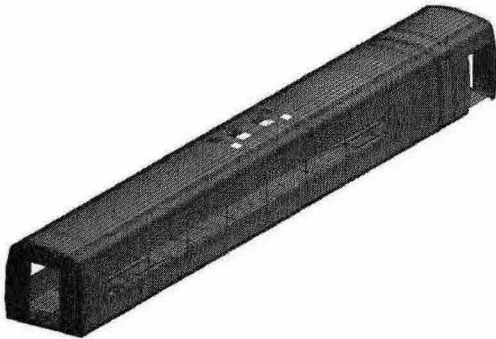


Fig. 1 차체 해석모델 형상.

Table 1 하중조건 종류 및 크기

Vertical Loading Test		36.3 ton
Compressive Loading Test	Vertical Load	17.4 ton
	Comp. Load	120 ton
3 Point Supporting Loading Test		17.4 ton
Torsional Loading Test		0.04MN·m

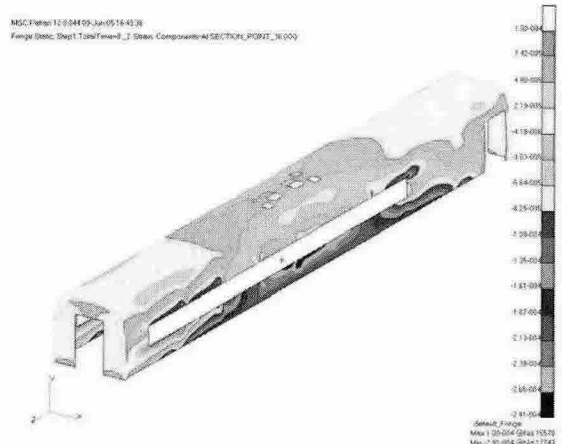


Fig. 2 압축하중시 복합재 섬유방향응력(MPa).

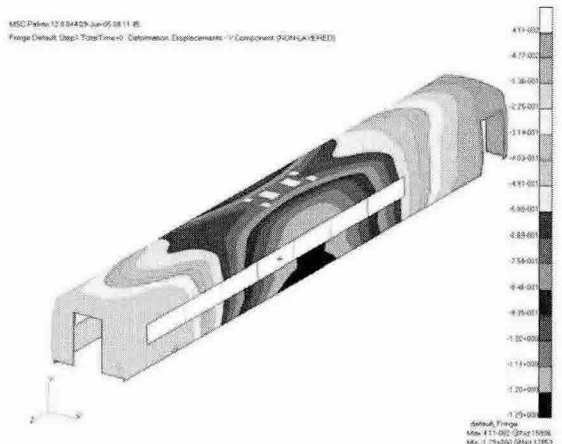


Fig. 3 수직하중시 언더프레임에서의 최대 처짐(mm).

2.2 차체 구조 해석 결과

각 하중 상황에서의 구조 해석을 수행하였으며 그림 2,3에 압축 및 수직하중시 결과를 보였다. 전체적으로 복합재 부분에서는 변형률 값이 크지 않음을 확인 할 수 있다. 또한 처짐량 역시, 수직하중시 차체 옆면에서 최대 12.9 mm의 값을 보임으로서, 기준치를 만족하는 결과를 보였다.

2.3 시험 결과와의 비교

하중시험에서의 결과와 해석 결과를 비교·검토하였다. 전반적으로, 차체 전체적인 변형 및 응력 분포는 비슷한 양상을 보이나, 시험시 최대 변형률을 보이는 창문 모서리에서 측정된 값과 최대 응력 방향에서 현격한 차이를 보였다. 복합재 차체에서 최대 변형률 발생 지점인 1,2번째 창문

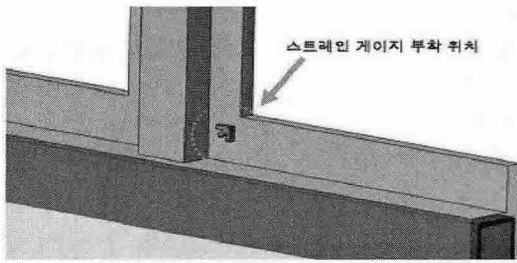


Fig. 4 하중 시험 시 창문틀에서 SG 부착 위치.

아래에서 해석은 $505 \mu\epsilon$, 시험결과는 $442 \mu\epsilon$ 의 변형률을 보이며, 차체중앙 4,5번째 창문 아래에서는 해석은 $-310 \mu\epsilon$, 시험결과는 $-382 \mu\epsilon$ 의 값을 보인다. 압축하중시에서도 수직하중시와 유사하게 창문틀 부위에서 변형률 값의 차이가 발생한다. 최대 변형률 측정지점인 차체중앙 4,5번째 창문 아래에서 해석은 $-293 \mu\epsilon$, 시험은 $-351 \mu\epsilon$ 의 결과를 보이며, 1,2번째 창문 아래에서 해석은 $-95 \mu\epsilon$, 시험은 $-279 \mu\epsilon$ 의 값을 보인다.

이와 같은 차이는 시험시의 스트레인 게이지의 부착위치에 원인이 있다. 정하중 시험 시에는 그림 4와 같이 복합재 스킨만 있는 창문틀의 제일 얇은 부분 위치에 스트레인 게이지가 부착되어 있다. 이러한 창문틀 모서리의 구조는 거시적 거동을 예측하기 위해 구성된 차체 해석모델에는 모델링 되어있지 않으므로, 엄밀히는 해석과 시험결과가 서로 다른 지점의 변형률 값을 의미하게 된다. 또한 전체 해석 모델의 큰 크기에 의해 창문부위는 상대적으로 정근 메쉬를 가지게 되며, 이로 인해 변형률 값의 큰 차이가 나타난다.

3. 차체와 창문부 상세 연계해석

3.1 서브모델링을 이용한 연계해석

앞서부터, 차체 해석모델이 국부적인 창문틀 모서리 부분을 포함하지 않음으로 인해, 시험결과와 해석결과가 큰 차이를 보이게 됨을 밝혔다. 창문 모서리 구조만을 모델링하여 해석하기엔 정확한 하중 및 경계조건을 대입하기가 불가능하며, 전체 차체 모델에 세부 구조를 삽입하는 것은 그 정확도가 떨어질 뿐만 아니라, 불필요한 해석시간의 증가를 가져오므로 비효율적이다.

따라서 열차 차체와 같은 복잡한 대형 구조물에서 국부 구조의 효율적인 상세해석을 위해서는 전체 모델의 해석 결과와 세부 모델의 해석을 연

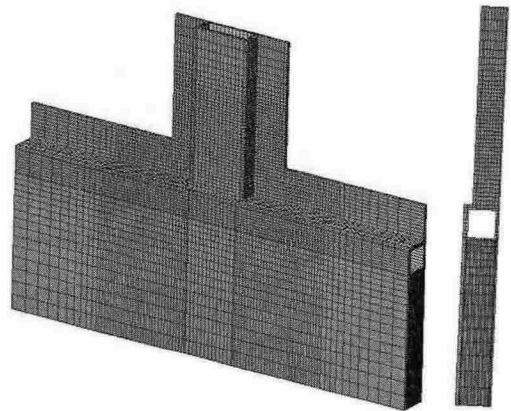


Fig. 5 창문틀 상세모델 형상.

계하는 서브모델링(submodeling) 방법이 적합하다. 서브모델링 방법은 전체 모델 중 요구되는 부분만 따로 상세히 모델링하고 이미 해석한 전체 모델의 해석 결과를 경계조건으로 대입함으로써 상세한 해석 결과를 얻을 수 있으며, 이를 통해 상대적으로 높은 효율로 정확한 결과를 보이는 장점이 있다[3].

3.2 창문틀 상세해석

차체 창문틀 모서리 부분의 상세해석을 수행하기 위하여, ABAQUS의 서브모델링 해석 기법을 사용하였다. 서브모델링 해석의 전체(global) 모델로는 기존의 복합재 차량 해석모델을 사용하였으며, 국부(local) 모델을 위해 그림 5와 같이 창문틀 모서리 부분을 상세모델링 하였다. 3D 고체 요소(C3D8)를 사용하여 모델링 하였으며, 모델의 총 노드 수는 39088개, 총 요소 수는 30248개 이다. 이를 기반으로, 구조하중시험 상황에서의 창문틀 모서리 부분의 상세해석을 수행하였다. 앞서의 차체 구조해석 결과에서 가장 높은 변형률을 보인 1,2번째 창문과 4,5번째 창문 부분에 대하여 서브모델링기법을 적용하였다. 각 하중 상황에 대해 해석을 수행하였으며, 수직하중시의 해석 결과를 그림 6, 표 2에 정리하였다. 해석결과와 시험결과를 비교하기 위해 그림 7에서와 같은 세 지점에서의 변형률을 취득하여, 각 하중상황에서 SG로부터 얻은 변형률값과 비교하였다. 해석결과로부터 전체 차체 해석 결과에서는 볼 수 없었던 창문틀 모서리 부분에서의 매우 큰 응력집중 현상을 확인할 수 있다. 높은 응력

집중이 발생함과 동시에 변형률 선도가 매우 급격히 변하므로, 해석 결과 값을 취득하는 지점의 작은 차이로도 값의 큰 차이를 보인다.

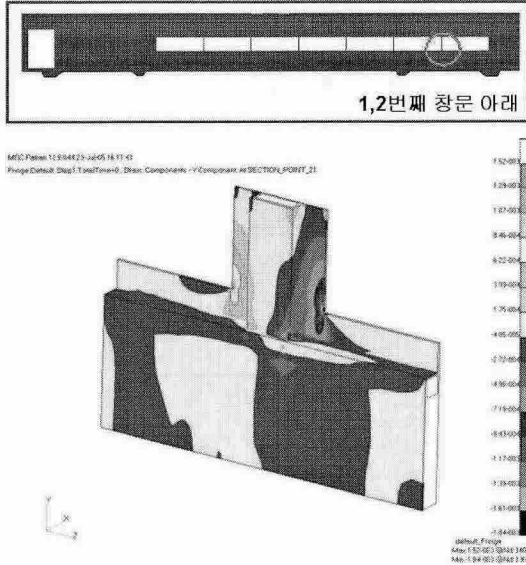


Fig. 6 수직하중시 변형률 분포(복합재 바깥 면, 수직방향)

Table 2 수직하중시 결과비교(변형률)

SG #.	Test result (μ)	Analysis result (μ)
0°		① -984
		② -272
		③ -107
3(W3-2) : 90°	-890	① -1350
		② -923
		③ -677
4(W3-3) : 45°	-1201	① -3352
		② -1060
		③ -736

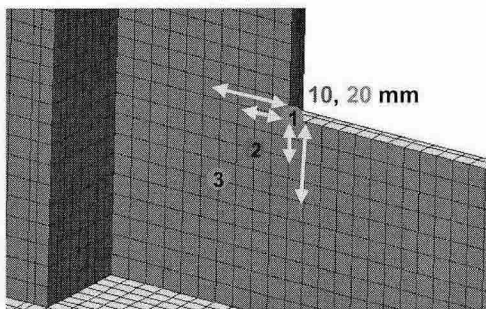


Fig. 7 창문틀 상세모델의 변형률 취득위치

따라서 변형률 취득 위치가 정확히 일치하지 않고 국부적인 형상 차이로 인해 시험결과와 해석결과가 정확히 일치하지는 않으나, 전체 모델의 해석에서 확인할 수 없었던 국부적인 응력 집중 경향을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 틸팅 차량 복합재료 차체의 구조안정성을 검증하기 위해 복합재 차량 프로토타입을 제작하고 구조하중시험을 수행하였다. 같은 하중상황에서의 차체 구조해석을 수행하여 정하중시험 결과와 비교하였다. 전반적인 변형 및 응력 분포는 유사하나, 국부적인 응력집중을 보이지 못해 해석 결과에 많은 차이를 보였다. 최대 변형률이 발생한 창문틀 모서리 부분의 상세응력 해석을 수행하기 위해, 전체 차체 모델과 상세 모델을 연계한 서브모델링기법을 적용하였다. 해석 결과 창문틀 모서리 부분에서의 큰 응력집중 현상을 볼 수 있었으며, 서브모델링 기법을 적용하여 전반적인 응력분포와 국부적인 응력분포를 동시에 효율적으로 파악할 수 있음 확인하였다.

후 기

본 연구는 건설교통부 철도기술개발연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 정중철, 이상진, 조세현, 김정석, 김천근, “복합재 틸팅열차 차체 구조물의 구조강도 평가,” 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 서울대학교, 2005, pp. 199-202.
- (2) JIS E 7105, Test method for static load of body structures of railway rolling stock, 1994.
- (3) ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.3, 2002.