

# 복합재 틸팅열차 차체 구조물의 구조강도 평가

정중철\*·이상진\*·조세현\*·김정석\*\*·김천곤\*\*\*

## Evaluation of structural strength for the Composite Carbody of Tilting Train

Jong-Cheol Jeong\*, Sang-Jin Lee\*, Sea-Hyun Cho\*, Jung-Seok Kim\*\*, Chun-Gon Kim\*\*\*

### Abstract

This study has performed the static loading tests for the composite train body of Korean tilting train. The structural tests based on the JIS E7105 standard were carried out in the test facility designed for the train carbody. The vertical, compressive and torsional loads were imposed on the underframe and the end structure of the carbody. the structural behavior of the carbody under the 3-point supporting and the natural frequency were evaluated as well. In addition, the test results were compared with the numerical one. From the tests, the structural strength of the hybrid composite carbody was assessed.

**Key Words** : composite carbody, structural test, tilting train, TTX

### 1. 서론

최근 운송물량의 확대와 운송시간 단축을 위하여 철도차량 운용속도의 고속화가 요구되고 있으며 이에 따라 기존선 속도향상을 위한 기술개발 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 철도기술연구원 주관으로 속도향상을 위한 고속선로의 신설 대신 기존선에서의 속도향상 특히 곡선부에서 속도를 줄이지 않고 운행할 수 있는 차량 시스템인 틸팅열차를 개발중에 있다. 틸팅시스템은 곡선부 주행시 차체를 기울여 속도를 줄이지 않고도 탈선을 방지할수 있다. 보다 효율적인 틸팅시스템 운용을 위해서는 차체의 경량화가 필수적이며 저중심 설계가 되어야 한다. 차체의 경량화를 위한 여러 연구들 가운데 하나로 차체를 구성하는 재질을 복합소재로 대체하여 적용하는 연구가 진행되고 있다. 현재 복합소재를 이용한 대형 구조물의 제작 기술은 23m 길이의 차체 1량을 일체형으

로 제작하는 단계에 있다. 복합재 틸팅열차 차체 구조물은 유한요소 해석을 통해 요구되는 하중 조건을 만족하는 강도와 강성을 갖도록 설계 하였다. 차체는 샌드위치 구조를 기본단면으로 하며 오토클레이브 성형법으로 제작된다. 본 논문에서는 하중시험을 통해 23m 일체형으로 제작된 복합소재 철도차량 차체의 구조적 강도/강성을 평가 하였다. 하중시험은 JIS E7105(이후 JIS 규격이라 함)에서 규정하고 시험방법에 따라 수행하였다. 시험항목으로는 수직분포하중, 압축하중, 비틀림 하중, 3점지지 시험 및 고유진동수 측정시험이다.[1] 처짐량, 변형량, 적용 하중등을 측정하고 이를 유한요소 해석 결과와 비교하여 차체설계/제작 공정에 대한 검증을 하였다.

### 2. 복합재 차체

복합재 차체는 경량이면서 강성이 우수한 특성을 갖는 샌드위치 구조를 기본구조로 하였다. 심재로는 3/8"의 셸크기를 갖는 알루미늄 하니콤을

\* (주)한국화이바 철도차량사업부

\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\* KAIST 기계공학부 항공우주공학전공

사용하였고 면재로는 유리섬유직물(8매주자)/열경화성수지를 사용하였다. 또한 충돌에 대한 안전성 확보와 각종 내장 부품 및 설비의 취부를 위한 보강프레임이 중간중간 삽입된다. 복합소재 차체와 언더프레임은 기본적으로 리벳 체결된다. 그림 1은 하중시험용 복합소재 차량의 제작 완료된 모습이다.

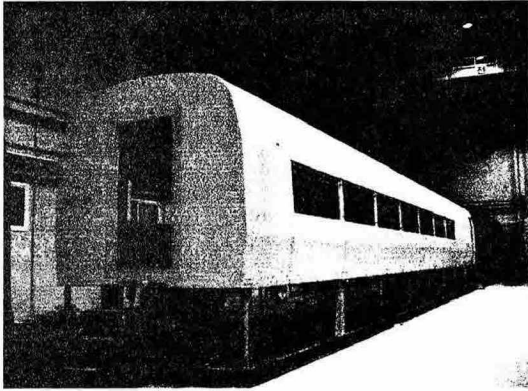


그림 1 하중시험용 복합소재 차체

### 3. 차체정적하중시험

#### 3.1. 시험하중

시험에 적용하는 하중은 차량에 취부되는 각종 설비 및 의장부품의 무게, 최대 승객 탑승시 추가되는 무게등을 고려하여 계산된다. 시험하중 계산에 적용한 차량중량 자료와 이를 통해 계산된 각종 시험에 대한 하중을 표1에 나타내었다.

표 1 차량제원 및 시험하중

차량제원 (중량)	공차중량	52ton
	Bareframe 중량	8.85ton
	대차중량	18.2ton
	최대승객하중	6.5ton
	동하중계수	0.2
시험하중	수직하중	39.3ton
	압축하중	24.7ton
		120ton
	3점지지시 하중	24.7ton
	비틀림 하중	4ton-m

#### 3.2. 측정점 선정

시험을 진행하면서 측정해야 하는 값으로는 적용하중, 변형률 그리고 처짐량이다. 일반적으로 응력집중이 예상되는 부분이나 형상/단면의 변화가 심한 부분을 측정점으로 삼는다. 기존 금속재료의 차체 구조하중시험에서 나타나는 응력집중 부위는 창문/출입구 모서리 부분, 센터실의 연결기 연결부분 등으로 알려져 있다. 복합소재 차체 역시 해석을 통해 이와 유사한 부분에서 응력이 집중됨을 예측 할 수 있었다. 해석에 사용된 유한요소모델링은 그림 2와 같이 기본적으로 2D 셀 요소를 사용하였으며 보강프레임, 언더프레임을 가로지르는 크로스 빔에는 1D 빔요소(B31)를 사용하였다. 모델링에는 MSC/PATRAN을 이용하였으며 사용된 질점 수는 32953개, 요소 수는 38403개이다. 그림 3에 수직하중, 압축하중 작용 시 차체에 걸리는 응력의 분포를 나타내었다.

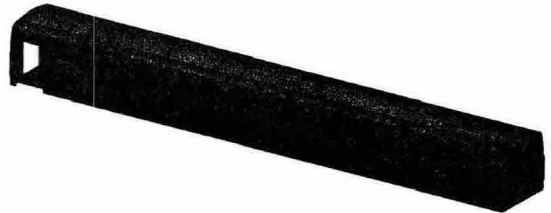


그림 2 차체의 유한요소 모델링 형상



그림 3 응력분포 : 수직하중(상), 압축하중(하)

해석결과를 통해 총 120개의 측정점을 선정하였다. 측정점의 자세한 위치를 그림 4에 나타내었으며 그림 5는 스트레인게이지 부착 모습을 나타내었다. 변형률 측정에 사용된 스트레인 게이지는 3축 게이지로 KYOWA, KFG-5-120-D17-11이며 변형율 측정장비는 CAS, AI1600A 이다. 시험중 발생할 수 있는 온도변화 등 여러 가지 측정

값의 오차 발생을 줄이기 위하여 스트레인 게이지로부터 측정 장비까지 실드된 3코어 케이블을 사용하였다.

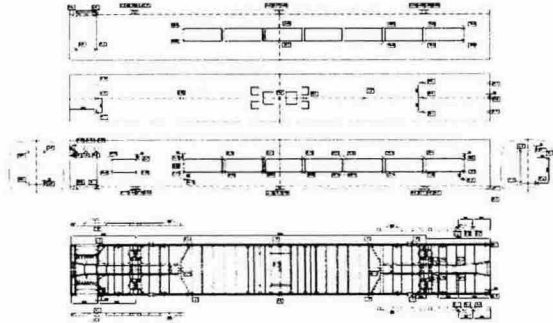


그림 4 스트레인 게이지 부착 위치

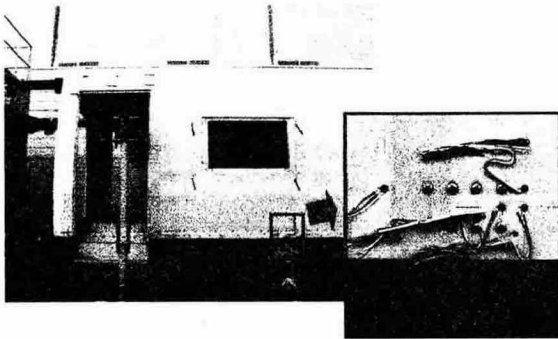


그림 5 스트레인 게이지 부착 모습

처짐량은 다이알 게이지를 이용하여 하중이 적용되는 각각의 단계별로 측정하였으며 주요 측정 지점은 차체의 중앙부, 끝단부, 볼스타 지지부이다.

### 3.3. 하중시험설비

차체 정적하중시험 설비는 크게 차체 지지부, 하중적용부, 시험값 측정부로 나눌수 있다. 차체는 대차와 연결되는 곳에서 그림 6과 같이 차체 지지대로 4점 지지되며, 120tonf의 압축하중이 적용하였을 때 차체가 밀리지 않도록 충분한 크기의 반력벽으로 고정된다. 압축하중 및 수직하중은 유압 실린더를 이용하여 적용한다. 수직하중의 경우 그림 7과 같이 18개의 실린더를 통해 언더프레임 상면에 골고루 분포시킨다. 압축하중용 실린더는 ENERPAC사의 제품으로 200tonf의 용량

을 갖는다. 그림 8은 압축하중의 적용을 위한 실린더의 모습이다. 실린더의 작동은 판넬로부터 자동으로 제어하며 로드셀을 통해 적용 하중값을 확인할 수 있다.

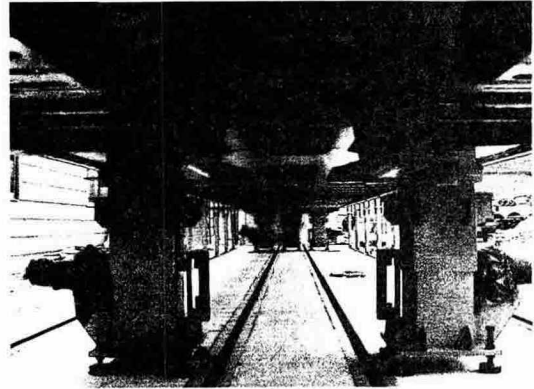


그림 6 차체 지지대

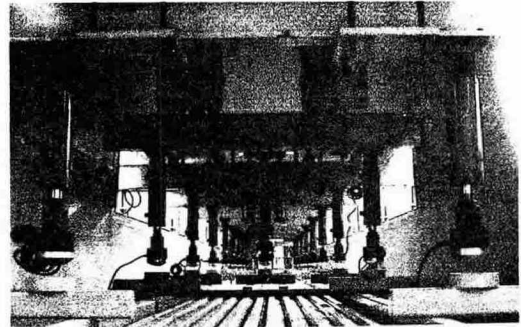


그림 7 수직분포하중용 실린더

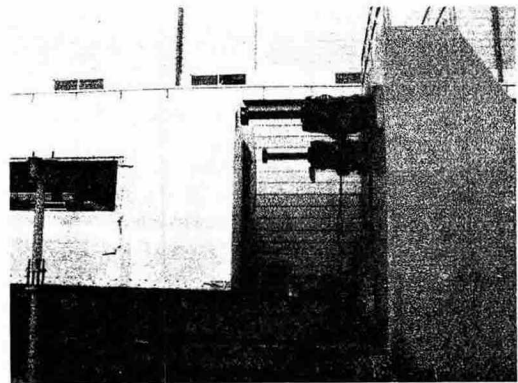


그림 8 압축하중용 실린더

#### 4. 정적하중 시험

차체의 안정화를 위해 본격적인 하중시험에 앞서 예비하중 시험을 수행하였다. 예비시험하중으로는 최대 수직하중인 39.3tonf을 적용한 상태에서 한 시간 유지 후 본 시험을 수행하였다. 시험하중의 크기가 상대적으로 낮은 것부터 시험을 수행하였다. 하중은 단계적으로 증가시켰으며 각 단계에서의 하중이 안정화(±5% 이내) 된 후에 다음 단계의 하중으로 증가시켰다. 시험결과가 어느 정도의 재연성을 갖는지와 시험 중 발생할 수 있는 오차등을 고려하여 모든 시험은 3회~4회 반복 수행하였다. 그림 9는 압축하중시험시 적용한 하중에 따른 차체 주요부분에서의 변형량을 나타낸 것이다. 압축하중이 적용되는 부분인 드래프트 스톱퍼(Draft Stopper)가 부착되는 위치에서 가장 심한 변형률이 발생하나 항복응력 이하로 안전함을 확인하였다. 이 경우 차체의 처짐량은 그림 10과 같이 초기 수직분포하중 적용시 발생하는 처짐량(12mm)에서 압축하중이 작용함에 따라 5mm 정도 복원하는 양상을 보였으며 이는 해석결과와 유사한 결과임을 확인하였다.

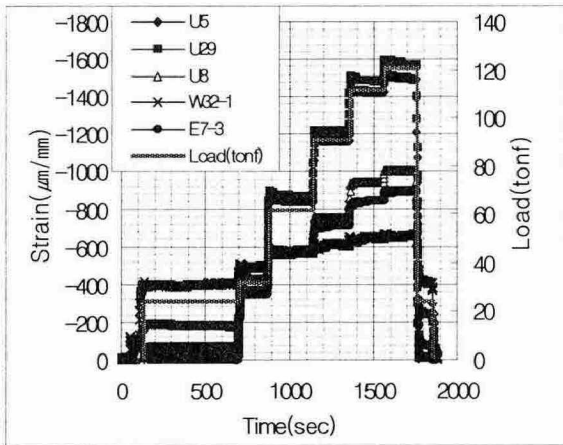


그림 9 압축하중시험에서의 변형량 측정 결과

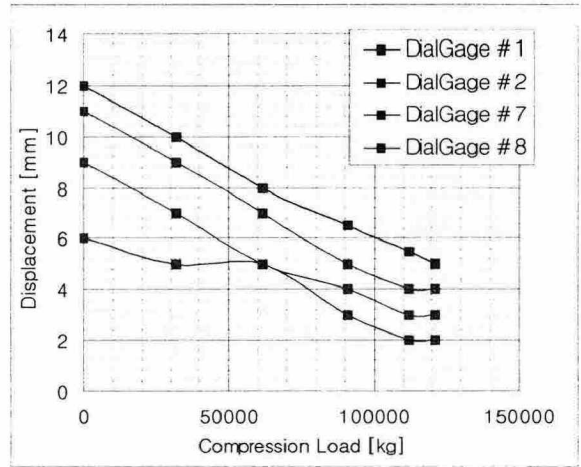


그림 10 압축하중시험에서의 처짐량 측정 결과

#### 5. 결 론

본 연구에서는 23m 일체형 복합소재 차체 개발과 관련하여 차체의 제작과정과 구조하중시험에 대하여 기술하였다. 복합소재 차체는 경량화 하면서 구조적인 안전성을 확보하기 위해 오토클레이브 성형 방법을 통해 23m 일체형으로 제작되었다. 차체의 구조하중시험은 JIS 규격에 준하여 수행하였으며 각각의 시험을 위해 적절한 시험장비를 구축 하였다. 구조하중 시험 조건에 따른 해석결과와 시험 결과는 대체적으로 잘 일치하였으며 이를 통하여 차체설계시 적용한 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하였고 철도차량 차체의 구조하중 시험 절차를 확립하였다.

#### 후기

본 연구는 건설교통부 철도기술연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] JIS E 7105, "Test method for static load of body structures of railway rolling stock," 1994.