

# 해석 및 시험 평가를 통한 유럽형 전동차 차체 개발

## The development of European railway vehicle body through analysis and test

김정현\*                      김성종\*                      박근수\*\*                      박형순\*\*  
Kim, Jeong-Hyun          Kim, Sung-Jong          Park, Geun-Soo          Park, Hyung-Soon

---

### Abstract

Rotem Company has designed and manufactured a railway vehicle body according to the European standard EN 12663, which applies to all railway vehicles within the EU(European Union) and EFTA(European Free Trade Association) territories.

EN 12663 specifies the loads vehicle bodies shall be capable of withstanding, identifies how material data shall be used and presents the principles to be used for design verification by analysis and test.

The structural design of railway vehicle bodies depends on the loads they are subjected to and the characteristics of the materials they are manufactured from. However, the structural requirements of EN 12663 are very different from those of existing Korean and Japanese regulations and standards. Therefore, in order to fulfill the structural requirements, Rotem Company has carried out Finite Element Analysis (FEA) and has performed load tests on the vehicle body according to EN 12663. This research contains the results obtained by the analysis and the load tests.

The analysis is carried out using I-DEAS Master Series 8 and specially designed test jigs and equipment are used for the load tests.

---

### 1. 서론

최근 철도차량 제작업체는 수주량 확대를 위해 유럽, 북미, 동남아 등 해외 철도차량시장 개척에 적극적으로 나서고 있다. 이러한 관점에서 볼 때 가장 큰 철도차량시장을 형성하고 있는 유럽시장에 진출하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다.

유럽시장 진출과 관련하여 EU(European Union, 유럽연합)와 EFTA(European Free Trade Association, 유럽 자유무역연합)에 속하는 국가에서는 자국에서 운영하는 철도차량의 차체가 EN 12663 규격이 규정하고 있는 차체강도기준을 만족할 것을 요구하고 있다. 이 때문에 철도차량 제작업체는 반드시 EN 12663 규격에 따라 차체를 설계하고 검증해야 한다.

철도차량의 차체설계는 차체가 만족해야 하는 하중조건과 사용재질에 의해 크게 좌우된다. EN 12663 규격은 철도차량 차체가 만족해야 하는 하중조건을 철도차량의 종류에 따라 나누어 정의하고 있다. 하지만 EN 12663 규격에서 규정하고 있는 하중조건들은 한국과 일본의 법령, 규격에서 정의하고 있는 하중조건과는 매우 다르다. 따라서 (주)로템은 유럽형 전동차 차체설계시 고려해야 하는 차체강도기준을 만족시키기 위해 EN 12663 규격에 따라 전동차차체에 대한 구조해석과 하중시험을 수행하였다.

### 2. 구조해석

#### 2-1. 유한요소해석 모델

전동차차체의 제원은 표1, 2와 같으며 하중조건과 경계조건이 차체의 폭방향으로 대칭이라고 가정하고 차체의 1/2을 유한요소로 모델링하였다. 구조해석을 위한 차체모델링에는 쉘요소를

---

\* (주)로템, 비회원

\*\* (주)로템, 정회원

사용하였으며, 국부적으로 coupler 플레이트 모델링에 솔리드요소, 착석승객하중, 대차하중의 부하를 위해 리지드바요소를 사용하였다. 완성된 모델은 총 91,560개의 요소와 87,772개의 절점으로 이루어져 있으며, 좌표축은 차체 길이방향을 x축, 높이방향을 y축, 폭방향을 z축으로 설정하였다. 그림1은 구조해석을 위한 유한요소해석 모델을 보여주고 있다.

표1. 유럽형 전동차차체의 크기

No.	항목	제원 (mm)	비고
1	차체 길이	17,000	
2	차체 폭	2,800	
3	볼스터 중심간 거리	11,500	
4	지붕 높이	3,690	레일상면에서
5	coupler 높이	880	레일상면에서

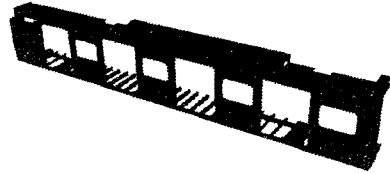


그림1. 유한요소해석 모델

표2. 유럽형 전동차차체의 중량

No.	정의	항목	중량 (ton)	비고
1	M1	공차중량	23.3	대차중량 제외
2	M2	M1 + 착석승객	26.0	대차중량 제외
3	M3	M2 + 입석승객 (5명/m <sup>2</sup> )	35.6	대차중량 제외
4	M4	M2 + 입석승객 (8명/m <sup>2</sup> )	41.6	대차중량 제외
5	W <sub>shell</sub>	구체중량	7.1	
6	W <sub>bogies</sub>	대차중량	9.9	

※ EN 12663 규격에 따라 승객 1인당 중량은 70kg으로 한다.

## 2-2. 하중조건

구조해석과 하중시험시 EN 12663 규격에 따라 하중조건을 설정하고 하중크기를 계산하였다. 각각의 하중조건과 하중크기는 표3에 정리하였다.

현재 국내 철도차량의 제작기준이 되는 "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준"에는 차체엔드부 압축의 경우 coupler 압축 490kN만이 규정되어 있다. 이와 달리 EN 12663 규격은 coupler 압축/인장, headstock 압축, waistrail 압축, cantrail 압축 등 높이를 변화시키면서 차체엔드부에 압축/인장하중을 부과하도록 규정하고 있다. 또한 차체의 end jacking, lifting 하중조건인 경우 대차하중을 포함하도록 규정하고 있다.

표3. 하중조건 및 하중크기

No.	하중조건	하중크기	비고
1	수직하중	수직하중 = M4 × 1.3 = 54.1ton	하중계수 1.3
2	800kN coupler 압축하중	압축하중 800kN + M2 수직하중 26.0ton	
3	600kN coupler 인장하중	인장하중 600kN + M4 수직하중 41.6ton	
4	800kN headstock 압축하중	압축하중 800kN + M4 수직하중 41.6ton	
5	300kN waistrail 압축하중	압축하중 300kN + M2 수직하중 26.0ton	
6	150kN cantrail 압축하중	압축하중 150kN + M4 수직하중 41.6ton	
7	End jacking	수직하중 = M1 × 1.1 = 25.7ton 대차하중 = W <sub>bogies</sub> / 2 × 1.1 = 5.4ton	하중계수 1.1
8	Lifting	수직하중 = M1 × 1.1 = 25.7ton 대차하중 = W <sub>bogies</sub> × 1.1 = 10.9ton	하중계수 1.1

※ EN 12663 규격에 따라 수직하중조건은 하중계수 1.3, end jacking, lifting 하중조건은 하중계수 1.1을 적용하였다.

- (1) coupler 압축/인장, headstock 압축, waistrail 압축, cantrail 압축하중과 수직하중의 조합 구조해석시 각 압축/인장 하중조건인 경우 4가지 차체중량조건인 M1, M2, M3, M4와 조합하여 부하한 후 가장 가혹한 결과를 발생하는 조합하중조건을 하중시험의 대상으로 삼았다. (예를 들어 800kN coupler 압축하중의 경우 M2 중량조건과의 조합에서 가장 가혹한 결과를 보였다.)
- (2) End jacking: 차량의 한쪽 엔드들, 대차하중을 부하한 상태에서, headstock에서 지지하고 반대쪽 엔드는 차체의 볼스터에서 지지한다.
- (3) Lifting: 차량을, 대차하중을 부하한 상태에서, 사이드실 하면의 리프팅패드에서 지지한다.

3. 하중시험

3-1. 하중시험준비

차체를 테스트지그에 안착한 후, 구조해석 결과에 의해 고응력이 예상되는 부위 123개소를 선정하여 Rosette 스트레인게이지 24개, 단축 스트레인게이지 99개를 부착하였다.

3-2. 하중시험방법

본시험을 실시하기 전에 차체와 지그의 안정화를 위하여 예비하중시험을 2, 3회 실시하였으며 본시험에서는 시험절차서에 따라 하중을 3~4 단계로 나누어 최대하중까지 부하하였다.

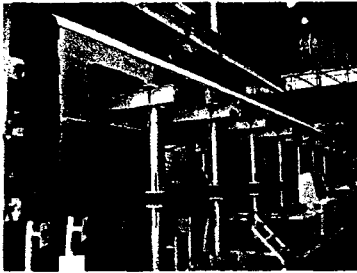


그림2. 테스트용 차체 설치

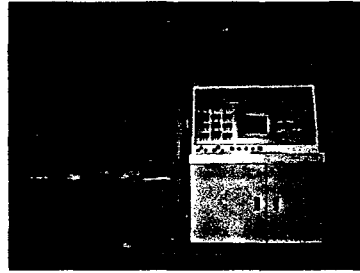


그림3. 측정장비 및 유압실린더 컨트롤러

4. 재질의 기계적 성질 및 판정기준

전동차차체의 주요 부재의 제작에 사용된 재질의 기계적 성질과 사용부위를 표4에 정리하였다.

표4. 재질의 기계적 성질

재질	항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	사용부위
SUS301L-H (HT)	≥ 70	≥ 95	18,300	0.3	사이드실
SUS301L-1/2H (ST)	≥ 42	≥ 77	18,300	0.3	사이드프레임, 루프판넬, cantrail, 엔드, keystone plate
SUS301L-1/4H (DLT)	≥ 35	≥ 70	18,300	0.3	사이드판넬
SUS301L (LT)	≥ 22	≥ 56	18,300	0.3	크로스빔
SMA490BP	≥ 37	≥ 50	21,000	0.3	볼스터, 센터실

본 연구에서는 차체의 안정성 판정기준을 "구조해석과 하중시험시 발생하는 최대응력이 해당 재질의 항복강도 이하일 것"으로 정하였다.

5. 구조해석, 하중시험 결과

각 하중조건별로 구조해석, 하중시험에서 최대응력이 발생하는 부위와 그 응력값을 표5에 정리하였다. 하중조건에 따른 응력분포와 시험장면을 그림4~19에 나타내었다.

표5. 하중조건별 최대응력 발생부위와 응력값 (단위: kgf/mm<sup>2</sup>)

No.	하중조건	발생부위	최대응력		재질	항복강도
			구조해석	하중시험		
1	수직하중	출입문코너	33.2	33.4	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42
		창문코너	25.8	30.6	SUS301L- $\frac{1}{4}$ H	35
2	800kN coupler 압축하중	센터실 굴곡부	32.6	32.2	SMA490BP	37
3	600kN coupler 인장하중	센터실 굴곡부	17.7	19.9	SMA490BP	37
4	800kN headstock 압축하중	anti-climber support와 크로스빔 연결부	27.7	23.7	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42
5	300kN waistrail 압축하중	엔드 코너포스트	37.3	-	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42
6	150kN cantrail 압축하중	출입문코너	22.9	22.2	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42
		창문코너	20.1	21.8	SUS301L- $\frac{1}{4}$ H	35
7	End jacking	출입문코너	25.7	21.4	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42
		창문코너	20.1	20.9	SUS301L- $\frac{1}{4}$ H	35
8	Lifting	출입문코너	26.1	26.5	SUS301L- $\frac{1}{2}$ H	42

5-1. 수직하중

그림4는 수직하중조건에서 응력분포를 보여준다. 구조해석과 하중시험에서 최대응력은 출입문코너와 창문코너에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 출입문코너의 최대응력은 33.4kgf/mm<sup>2</sup>이며 구조해석에 의한 최대응력은 33.2kgf/mm<sup>2</sup>이다. 하중시험에서 측정된 창문코너의 최대응력은 30.6kgf/mm<sup>2</sup>이며 구조해석에 의한 최대응력은 25.8kgf/mm<sup>2</sup>이다.

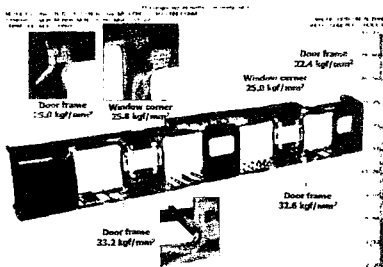


그림4. 수직하중 응력분포



그림5. 수직하중 시험장면

5-2. 800kN coupler 압축하중 / 600kN coupler 인장하중

그림6, 7은 각각 coupler 압축/인장하중조건에서 언더프레임의 응력분포를 보여준다. coupler 압축/인장 모두 구조해석과 하중시험에서 최대응력이 센터실 굴곡부에서 발생하였다.

압축하중시험에서 측정된 센터실 굴곡부의 최대응력은 32.2kgf/mm<sup>2</sup>이며 구조해석에 의한 최대응력은 32.6kgf/mm<sup>2</sup>이다. 인장하중시험에서 측정된 센터실 굴곡부의 최대응력은 19.9kgf/mm<sup>2</sup>이며 구조해석에 의한 최대응력은 17.7kgf/mm<sup>2</sup>이다.

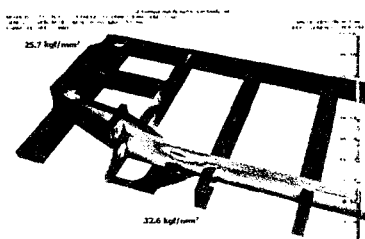


그림6. coupler 압축하중 응력분포

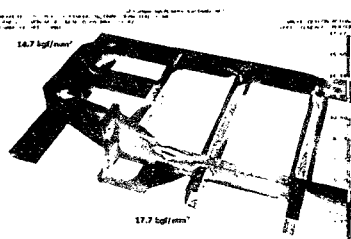


그림7. coupler 인장하중 응력분포

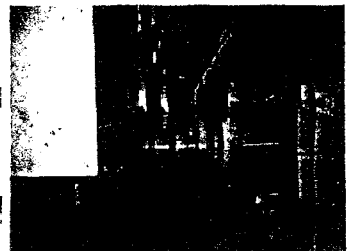


그림8. coupler 압축/인장 시험장면

**5-3. 800kN headstock 압축하중**

그림9는 800kN headstock 압축하중조건에서 언더프레임의 응력분포를 보여준다. 구조해석과 하중시험 모두 최대응력이 anti-climber support와 크로스빔의 연결부에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 연결부의 최대응력은  $23.7\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $27.7\text{kgf/mm}^2$ 이다.

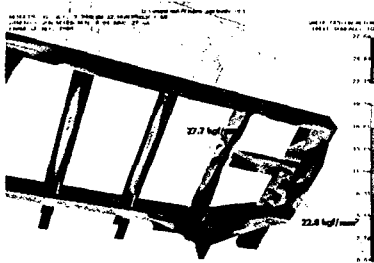


그림9. headstock 압축하중 응력분포



그림10. headstock 압축하중 시험장면

**5-4. 300kN waistrail 압축하중**

그림11은 300kN waistrail 압축하중조건에서 응력분포를 보여준다. 구조해석에서 최대응력은 waistrail 높이의 엔드 코너포스트에서 발생하였으며 크기는  $37.3\text{kgf/mm}^2$ 이다. 그러나 하중시험에서는 300kN의 압축하중을 부하하기 위한 지그 설치(그림12 참조)로 인해 최대응력 예상부위에 스트레인지이지의 부착이 불가능하였다. 따라서 인접한 부위의 사이드판넬에 스트레인지이지 부착후 응력을 측정하였다. 하중시험에서 측정된 최대응력은 엔드 코너포스트에 인접한 사이드판넬에서  $16.6\text{kgf/mm}^2$ 이다.

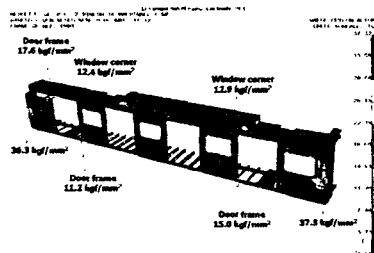


그림11. waistrail 압축하중 응력분포

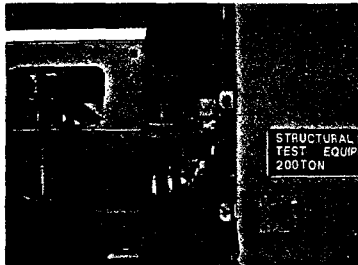


그림12. waistrail 압축하중 시험장면

**5-5. 150kN cantrail 압축하중**

그림13은 150kN cantrail 압축하중조건에서 응력분포를 보여준다. 구조해석과 하중시험에서 최대응력은 출입문코너와 창문코너에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 출입문코너의 최대응력은  $22.2\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $22.9\text{kgf/mm}^2$ 이다. 하중시험에서 측정된 창문코너의 최대응력은  $21.8\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $20.1\text{kgf/mm}^2$ 이다.

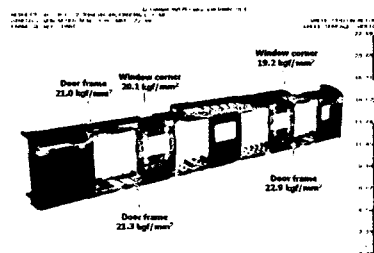


그림13. cantrail 압축하중 응력분포

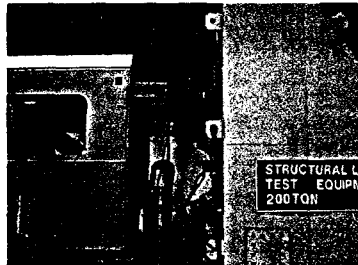


그림14. cantrail 압축하중 시험장면

### 5-6. End jacking 하중

그림15는 End jacking 하중조건에서 응력분포를 보여준다. 구조해석과 하중시험에서 최대응력은 출입문코너와 창문코너에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 출입문코너의 최대응력은  $21.4\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $25.7\text{kgf/mm}^2$ 이다. 하중시험에서 측정된 창문코너의 최대응력은  $20.9\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $20.1\text{kgf/mm}^2$ 이다.

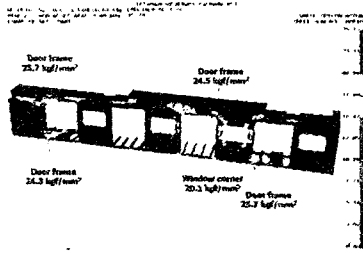


그림15. End jacking 하중 응력분포



그림16. End jacking시 차체지지

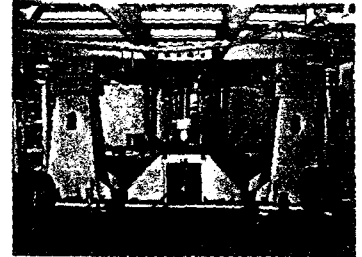


그림17. End jacking시 대차하중

### 5-7. Lifting 하중

그림18은 Lifting 하중조건에서 응력분포를 보여준다. 구조해석과 하중시험에서 최대응력은 출입문코너에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 출입문코너의 최대응력은  $26.5\text{kgf/mm}^2$ 이며 구조해석에 의한 최대응력은  $26.1\text{kgf/mm}^2$ 이다.

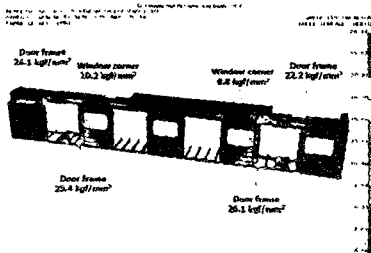


그림18. Lifting 하중 응력분포



그림19. Lifting시 차체지지 및 대차하중 부하

## 6. 결론

본 연구에서는 새로이 개정된 EN 12663 규격에서 규정하고 있는 하중조건에 따라 전동차차체의 구조해석, 하중시험을 실시하여 차체의 안전성을 평가하였다. 차체설계와 구조해석 과정에서 각각의 하중조건에 대해 얻어진 응력레벨에 따라 고응력부는 사용부재의 재질변경, 두께변경 또는 구조변경, 추가보강 등을 통하여 허용응력 이내로 응력레벨을 낮추었으며 저응력부는 차체의 경량화를 위해 재질의 두께변경 또는 구조변경을 통하여 중량을 줄였다. 또한 제작된 차체에 대해서는 하중시험을 실시하여 차체의 안전성을 검증하였다. 구조해석과 하중시험을 통해 얻어진 결과와 검증된 내용은 향후 EN 12663 규격이 적용되는 철도차량의 차체설계에 일정한 기준을 제공할 것이다.

### 참고문헌

1. "EN 12663", 2000, Railway applications - Structural requirements of railway vehicle body
2. Finite Element Analysis of Carbody Structure (OGS2RS060F001B) issued by Rotem
3. Load Test Report of Carbody Structure (OGS2RS060G021A) issued by Rotem