

## 터키 이즈미르 트램 차체의 정적하중 시험 평가

## The Structural Experimental Verification for vehicle body of IZMIR Tram

배태성\*<sup>†</sup>, 정지호\*, 이장욱\*\*Tae-Sung Bae\*<sup>†</sup>, Ji-Ho Jeong\*, Jang-Wook Lee\*\*

**Abstract** IZMIR Tram is the first commercial tram ordered from Turkey. Hyundai Rotem has manufactured the tram. The vehicle body of IZMIR Tram has been designed according to European standard EN12663. To verify the strength and stiffness of the vehicle body, Hyundai Rotem performed a finite element analysis (FEA) and a static load test depending on the structural requirements specified in EN12663, category P-V. The finite element analysis (FEA) was performed using Hyerworks 13 of the Altair's software and the test was conducted in Hyundai Rotem Company's Changwon factory. In this paper, we have analyzed the data of the finite element analysis (FEA) and the static load test.

**Keywords** : tram, EN12663, finite element analysis, static load test

**초 록** 이즈미르 트램은 현대로템이 터키로부터 수주 받아 제작하는 첫 번째 트램이며, 유럽규격 EN12663에 따라 차체를 설계하였다. 차체의 강도와 강성을 평가하기 위해, 현대로템은 EN12663, 카테고리 P-V에 명시된 구조 요구사항 따라서, 유한요소해석과 정적하중 시험을 수행하였다. 유한요소해석은 알테어의 프로그램 Hyerworks 13을 이용하여 수행되었고, 정적하중 시험은 현대로템의 창원공장에서 수행되었다. 이 문서에서, 우리는 유한요소해석과 정적하중 시험의 결과를 분석하였다.

**주요어** : 트램, EN12663, 유한요소해석, 정적하중 시험

## 1. 서 론

트램은 19세기 말, 미국에서 교통의 근대화를 위해 실용화 되었던 철도차량이다. 도로 위에 깔린 레일을 달리는 트램은 일반 전동차보다 비교적 차체의 길이와 폭이 짧으며, 아티클 레이션을 이용해 각 차체를 연결하고 있다. 본 연구대상인 이즈미르 트램의 경우, 5량 1편성으로 구성되어 있으며, 현대로템은 국내에서 제작되어 최초 상용화되는 트램의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 유럽규격 EN12663의 카테고리 P-V의 하중조건에 따라 유한요소해석과 정적하중 시험을 수행하였다. 이 연구에서, 유한요소해석 및 정적하중 시험의 데이터를 비교 분석하여 이즈미르 트램 차체의 구조적 안전성을 검토하였다.

† 교신저자: 현대로템 주식회사(bts8354@hyundai-rotem.co.kr)

\* 현대로템 주식회사

\*\* 현대로템 주식회사

## 2. 본 론

### 2.1 차체의 제원 및 하중조건

#### 2.1.1 차체의 제원

시험에 사용된 차체는 창문, 출입문, 전선류, 배관류, 내장판을 제외한 주요 차체 프레임으로만 구성되었다. 트램의 차체는 A, B, C, D, E, 5개의 모듈로 구성되어있고 Fig 1에 나타내었다. 제원과 계산중량은 Table 1~2에 나타난다.

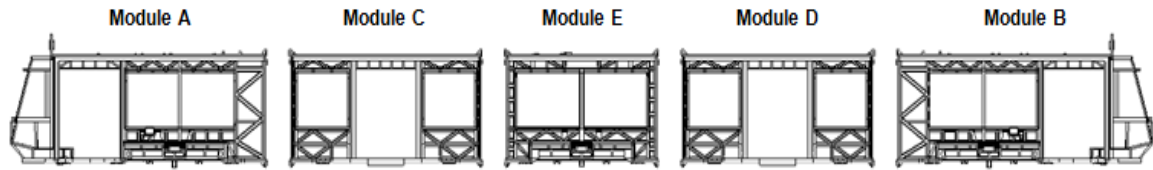


Fig 1. 트램 차체의 구성

Table 1. 차체 제원

N o.	구분	제원 (mm)	비고
1	차체 길이	32,220	안티클라이머 포함
2	차체 폭	2,660	외관 기준
3	차체 높이	3,400	레일상면 기준
4	언더프레임 상면	225	레일상면 기준

Table 2. 계산중량

	A[kg]	C[kg]	E[kg]	D[kg]	B[kg]
AW0	7,393	5,092	4,681	5,092	7,393
AW1	7,953	5,792	5,521	5,792	7,953
AW2	10,289	8,442	6,620	8,442	10,289
AW3	11,458	9,767	7,169	9,767	11,458
AW4	12,626	11,092	7,719	11,092	12,626
Bogie	5,396 (W <sub>B_A</sub> )		3,346 (W <sub>B_E</sub> )		5,396 (W <sub>B_A</sub> )

### 2.1.2 하중조건

구조해석 및 하중시험에 적용되는 시험하중은 EN12663 카테고리 P-V에 따르며, 아래와 같이 계산된다.

(1) 연결기 높이 압축하중 I

$$= \text{수직하중}(1.0 \times AW0 = 1.0 \times 29,665 = 29,665 \text{ kgf}) + \text{압축하중}(20,395 \text{ kgf})$$

(2) 연결기 높이 압축하중 II

$$= \text{수직하중}(1.0 \times AW4 = 1.0 \times 55,180 = 55,180 \text{ kgf}) + \text{압축하중}(20,395 \text{ kgf})$$

(3) 연결기 높이 인장하중 I

$$= \text{수직하중}(1.0 \times AW0 = 1.0 \times 29,665 = 29,665 \text{ kgf}) + \text{인장하중}(15,297 \text{ kgf})$$

(4) 연결기 높이 인장하중 II

$$= \text{수직하중}(1.0 \times AW4 = 1.0 \times 55,180 = 55,180 \text{ kgf}) + \text{인장하중}(15,297 \text{ kgf})$$

(5) 최대 수직하중

$$= \text{수직하중}(1.3 \times AW4 = 1.3 \times 71,731 = 71,731 \text{ kgf})$$

(6) Lifting I (end jacking at cab end)

$$= \text{수직하중}(1.1 \times AW0 = 1.1 \times 29,665 = 32,623 \text{ kgf}) + \text{대차하중}(1.1 \times 5,935 \text{ kgf})$$

(7) Lifting II (end jacking at both end)

$$= \text{수직하중}(1.1 \times AW0 = 1.1 \times 29,665 = 32,623 \text{ kgf}) + \text{대차하중}(1.1 \times 15,562 \text{ kgf})$$

(8) Lifting III (lifting at bolster pad)

$$= \text{수직하중}(1.1 \times AW0 = 1.1 \times 29,665 = 32,623 \text{ kgf}) + \text{대차하중}(1.1 \times 15,562 \text{ kgf})$$

## 2.2 구조 강도 평가

### 2.2.1 유한요소해석

해석에 사용된 모델은 Hypermesh를 이용하여 생성하였고 Fig 2와 같다. 이때, 유한요소 모델은 1,267,896개의 셀 요소와 4,524개의 솔리드 요소 그리고 49개의 리지드 요소로 구성된다.

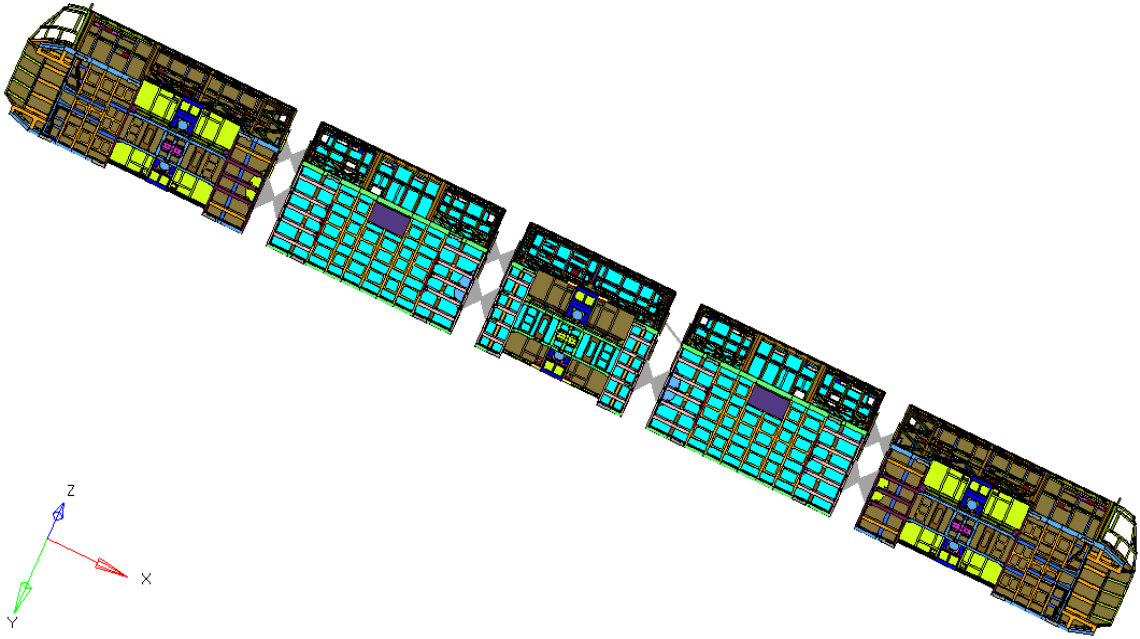


Fig 2. 유한요소모델

유한요소해석은 Radioss를 이용하여 수행하였고, 해석결과는 아래 2.2.4절에서 해석결과를 정리하였다.

### 2.2.2 정적하중 시험

차체의 module A 부터 순차적으로 시험설비에 안착하여 아티클레이션으로 연결하였다. 유한요소해석의 결과에 따라 고응력으로 판단되는 부위, 146개소를 선정하여 단축과 삼축게이지를 설치하였다. 하중은 3~4 단계로 나누어 순차적으로 최대하중까지 부하였다. 본 시험은 2회 실시하여, 결과의 재현성을 확인하였다. Fig 3~8에 각 하중 별 시험사진을 첨부하였다.



Fig 3. 압축하중 시험



Fig 4. 인장하중 시험



Fig 5. 수직하중 시험



Fig 6. Lifting I



Fig 7. Lifting II



Fig 8. Lifting III

### 2.2.3 재질의 기계적 성질 및 판정기준

트램 차체의 제작에 사용된 재질의 기계적 성질은 아래 Table 3에 나타난다.

Table 3. 재질의 기계적 성질

Material and Grade	Yield Strength (YS)	Ultimate Tensile Strength (UTS)	Elastic Modulus (E)	Poisson's Ratio ( $\nu$ )
SPA-C	> 315 MPa	> 450 MPa	206 GPa	0.3
SPA-H	> 355 MPa	> 490 MPa	206 GPa	0.3
SMA490BP	> 365 MPa	> 490 MPa	206 GPa	0.3
SS400	> 235 MPa	> 400 MPa	206 GPa	0.3
SUS301L-DLT	> 350 MPa	> 650 MPa	195 GPa	0.3

판정기준은 EN12663의 Section 5.4.2에 따라 아래 식(1)에 나타난다. Utilisation이 1보다 작거나 같을 경우 충분한 강도와 강성을 가졌다고 판단한다.

$$U = \frac{\sigma_c S_1}{R} \leq 1 \tag{1}$$

U : Utilisation

S<sub>1</sub> : Safety factor for yield or proof strength

(S<sub>1</sub>=1.15 for non-test load cases, S<sub>1</sub>=1.0 for test load cases)

R : Material yield stress

σ<sub>c</sub> : measured stress

### 2.2.4 정적하중 시험 및 유한요소해석 결과

각 하중조건 별, 정적하중 시험 및 유한요소해석의 최대응력과 발생 위치를 Table 4에 정리하였다.

Table 4. 각 하중조건 별 최대응력 및 발생위치 (Unit :MPa)

No.	하중조건	발생위치	최대응력		재질	허용응력	U(utilisation)
			해석	시험			
1	압축하중 I	cross beam	115	-185	SPA-H	355	0.5
2	압축하중 II	cross beam	245	-311	SPA-H	355	0.9
3	인장하중 I	cross beam	133	198	SPA-H	355	0.6
4	인장하중 II	cross beam	263	306	SPA-H	355	0.9
5	수직하중	side frame	267	-311	SPA-H	355	0.9
6	Lifting I	side frame	222	259	SPA-H	355	0.7
7	Lifting II	window frame	245	-279	SPA-H	355	0.8
8	Lifting III	door frame	275	-313	SPA-H	355	0.9

Table 4를 보면, 정적하중 시험 결과에서 최대응력은 Lifting III 하중조건 of door frame에서 발생하였다, 응력값은 -313 MPa 이며, Utilisation은 0.9로 EN12663의 판정기준을 만족시킴을 확인하였다. 유한요소해석 결과는 275 MPa 이고, 해석과 시험의 오차는 12.5 %이다. 최대응력 발생위치의 85번 게이지이고, 아래 Fig 9에 자세한 발생위치를 표시하였다.

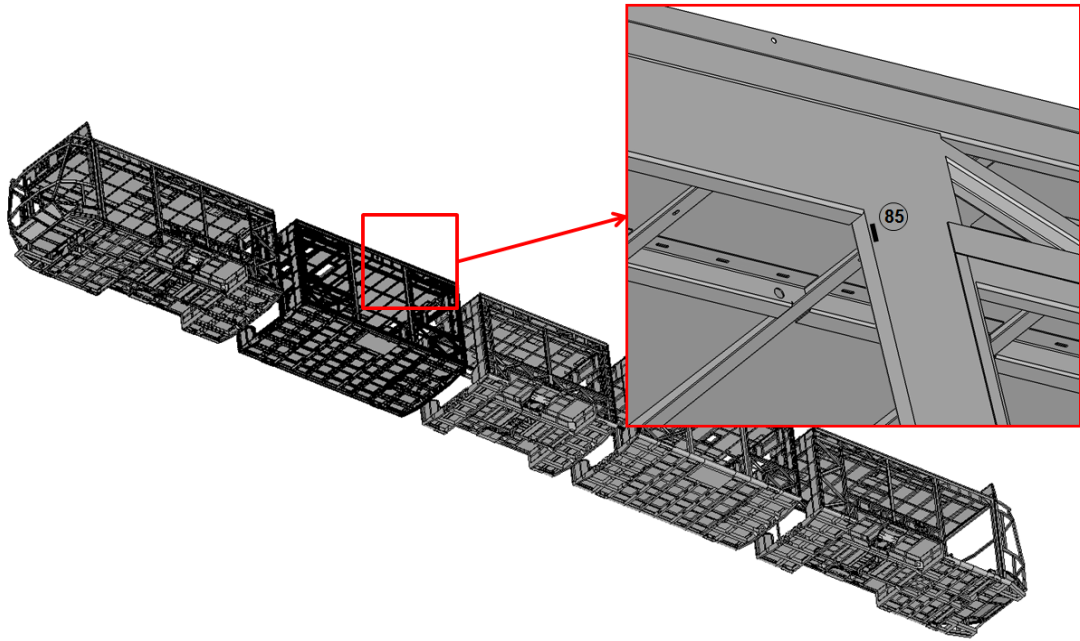


Fig 9. 최대응력 발생위치

### 3. 결론

본 연구는 트램 차체의 구조적 안전성을 평가하기 위하여, EN12663의 기술사양에 따라 유한요소해석 및 정적하중 시험을 수행하였다. 그 결과, 146개소 모든 게이지의 측정응력이 재료의 허용응력 이내에 들어오며, 하중 제거 후에 차체에 영구변형을 발견할 수 없었다. 잔류응력 또한 기준치인 항복강도의 5% 이내(EN12663 Section 8.2.2)를 만족하였다. 이에 트램 차체는 충분한 구조적 강도와 강성을 가지고 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION(CEN). (2010) EN12663 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies
- [2] 하홍기 외 3명. (2010) Strength Evaluation for Subject to European Norm Aluminum Extrusion Bodyshell, 한국철도학회, 제주도, pp. 384-384.
- [3] 최정용 외 3명.(2012) The Structural Analysis and Experimental Verification for carbody shell, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.1087-1092.