

# 알루미늄 경전철 차체의 해석 및 시험 평가

## The Structural Analysis and Experimental Verification for Aluminum Light Railway Vehicle

박경창\*      정지호\*\*      이장욱\*\*\*      박근수\*\*\*\*      우관제\*\*\*\*  
Park, Kyoung-Chang    Jeong, Ji-Ho    Lee, Jahng-Wook    Park, Geun-Soo    Woo, Kwan-Je

---

### ABSTRACT

Hyundai-Rotem Company has designed and manufactured Light Railway Vehicle (LRV) according to the Urban Rail Transit Code, which applies to urban railway vehicles in Korea. The Urban Rail Transit Code specifies the loads, for which 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. Therefore Hyundai-Rotem Company has carried out Finite Element Analysis (FEA) and has performed load tests on the vehicle body according to the Urban Rail Transit Code. This research contains the results obtained by the analysis and the load tests. The analysis was carried out using I-DEAS Master Series 12 and load test were carried out using specially designed test jigs and equipment are used for the load tests.

---

### 1. 서 론

철도차량은 정시성, 안정성, 대량 수송성, 에너지 절감성, 저공해성, 고속성과 아울러 쾌적한 대중교통수단으로서 새로운 관심을 끌고 있으며, 낮은 인력 의존도, 소규모 통행량의 필요성에 의하여, 무인 경전철의 개발 및 보급이 확대 되고 있다.

이에 따라서, 본 연구에서는 알루미늄 경전철 차체의 설계 시 고려해야 하는 차체 강도기준을 만족하기 위하여 도시철도차량 표준사양(이하 표준사양), 도시철도차량 안전 기준에 관한 규칙안(이하 안전기준) 및 도시철도차량 성능 시험에 관한 기준(이하 성능시험)을 적용하여 알루미늄 경전철 차체에 대한 구조해석과 하중시험을 수행하였다.

---

\* 책임저자 : 정회원, 현대로템(주), 응용기술연구팀, 연구원  
E-mail : kcpark@hyundai-rottem.co.kr  
TEL : (031)460-1308 FAX : (031)460-1780

\*\* 비회원, 현대로템(주), 응용기술연구팀, 연구원  
\*\*\* 정회원, 현대로템(주), 응용기술연구팀, 선임연구원  
\*\*\*\* 정회원, 현대로템(주), 응용기술연구팀, 수석연구원

## 2. 구조해석

### 2.1 유한요소해석 모델

알루미늄 경전철 차체의 제원은 표 1, 2와 같으며 하중조건과 경계조건이 차체의 폭방향과 대칭이라고 가정하고 차체의 1/2만 유한요소 모델링을 하였다. 구조해석을 위한 차체 모델링에는 쉘요소를 사용하였으며, 국부적으로 커플러 패드 모델링에 솔리드요소, 하중의 부과를 위해 강제요소를 사용하였다. 완성된 모델은 총 123,500개의 절점과 147,613개의 요소로 이루어져 있으며, 요소의 크기는 평균 30×30mm 크기로 모델링하였다. 좌표축은 차체 폭방향을 x축, 길이방향을 y축, 높이방향을 z축으로 설정하였다. 그림 1은 구조해석을 위한 유한요소해석 모델을 보여주고 있다.

표 1. 알루미늄 경전철 차체의 크기

| No. | 항목        | 제원(mm) | 비고     |
|-----|-----------|--------|--------|
| 1   | 차체 길이     | 27,000 | 편성기준   |
| 2   | 차체 폭      | 2,650  |        |
| 3   | 차체 높이     | 3,400  | 레일상면에서 |
| 4   | 대차 중심간 거리 | 10,850 |        |

표 2. 알루미늄 경전철 차체의 중량

| No. | 항목              | 중량      | 비고             |       |
|-----|-----------------|---------|----------------|-------|
| 1   | 만차 중량           | 76.5 톤  | 편성 기준<br>설계 중량 |       |
| 2   | 공차 중량           | 46.5 톤  |                |       |
| 3   | Bareframe<br>중량 | Mca-car |                | 4.3 톤 |
|     |                 | Mcb-car |                | 4.3 톤 |
| 4   | 대차중량            | M/Bogie |                | 6.9 톤 |
|     |                 | T/bogie |                | 5.0 톤 |
| 5   | 강도기준하중          | 30 톤    |                |       |
| 6   | 동하중계수           | 0.2 g   |                |       |

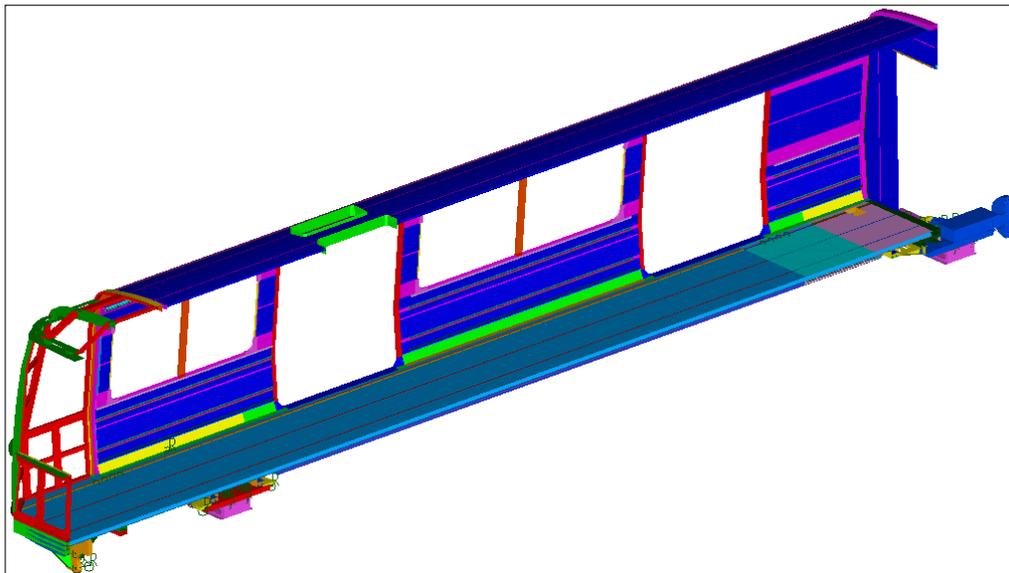


그림1. 알루미늄 경전철의 유한요소 1/2모델

### 2.2 경계조건 및 하중조건

구조해석과 하중시험 시 차체는 “성능시험 3. 마 구조체의 지지 방법 및 시험하중의 부하

방법”에 따라 경계조건 및 하중조건을 설정한다. 해석 시 차체에 작용하는 하중은 “성능시험의 구조체 하중시험 3. 라”의 시험하중에 따라 계산되며 하중조건 및 하중크기는 표 3에 정리하였다.

표 3. 하중조건 및 하중크기

| No. | 하중조건     | 하중크기                   | 비고 |
|-----|----------|------------------------|----|
| 1   | 수직하중     | 30.3 톤                 |    |
| 2   | 수평압축하중   | 수직하중(9.6톤)+압축하중(51.4톤) |    |
| 3   | 3점 지지 하중 | 수직하중 9.6톤              |    |
| 4   | 비틀림 하중   | 4톤 m                   |    |
| 5   | 굽힘 고유진동수 | Bareframe 상태           |    |

### 3. 하중시험

#### 3.1 하중시험준비

차체를 시험 지그에 안착 후, 구조해석 결과에 의해 고응력이 예상되는 부위에 차체의 대칭성을 고려한 66개의 위치를 선정하여 스트레인게이지를 부착하였다.

#### 3.2 하중시험방법

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



그림2. 하중시험용 차체 설치

### 4. 재질의 기계적 성질 및 판정기준

본 연구에서는 차체의 안정성 판정기준을 부재의 용접부(열 영향부)와 비용접부(모재)로

나누어 각각 항복 강도에 대하여 허용응력을 선정하였고 “구조해석과 하중시험 시 발생하는 최대응력이 해당 재질의 허용응력 이하일 것”으로 정하였다.

차체의 주요 부재의 제작에 사용된 재질의 기계적 성질과 허용응력을 표 4에 정리하였다.

표 4. 재질의 기계적 성질 (단위:kgf/mm<sup>2</sup>)

| 재질         |     | 항복강도  | 인장강도 | 비고 |
|------------|-----|-------|------|----|
| 6005A-T6   | 모재부 | 21.92 | 26.5 |    |
|            | 용접부 | 11.72 |      |    |
| A6061-T651 | 모재부 | 24.5  | 26.5 |    |
|            | 용접부 | 14.8  |      |    |
| SMA490B    | 모재부 | 37.5  | 49.9 |    |
|            | 용접부 | 33.7  |      |    |

### 5. 구조해석, 하중시험 결과

각 하중조건별로 구조해석, 하중시험에서 최대응력이 발생하는 부위와 그 응력값을 표 5에 정리하였다. 하중조건에 따른 응력분포와 시험장면을 그림 4~19에 나타내었다.

표 5. 하중조건별 최대응력 발생부위와 응력값 (단위:kgf/mm<sup>2</sup>)

| No. | 하중조건     | 발생부위                      | 최대 응력 |       | 재질                | 허용응력 |
|-----|----------|---------------------------|-------|-------|-------------------|------|
|     |          |                           | 해석    | 시험    |                   |      |
| 1   | 수직하중     | Articulation              | 17.1  | 13.92 | SMA490B<br>(용접부)  | 33.7 |
| 2   | 수평압축하중   | Articulation              | 23.7  | 25.95 | SMA490B<br>(용접부)  | 33.7 |
| 3   | 3점 지지 하중 | 리프팅 패드 (해석)<br>창문 코너 (시험) | 12.4  | 9.91  | 6005A-T6<br>(용접부) | 11.7 |
| 4   | 비틀림 하중   | Articulation              | 9.97  | 7.65  | SMA490B<br>(용접부)  | 33.7 |

#### 5.1 수직하중

그림 3과 4는 각각 수직하중 조건에서 응력분포와 시험장면을 보여준다. 구조해석과 하중 시험에서 최대응력은 Articulation에서 발생하였다. 하중시험에서 측정된 Articulation의 최대응력은 13.92kgf/mm<sup>2</sup>이며, 구조해석에 의한 최대응력은 17.1kgf/mm<sup>2</sup>이다.

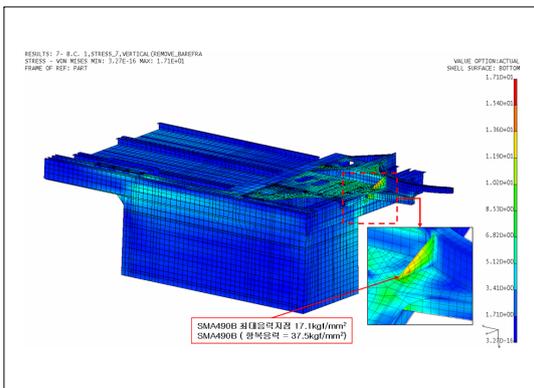


그림3. 수직하중 응력분포



그림4. 수직하중 시험장면

#### 5.2 수평압축하중

그림 5와 6은 각각 수평압축하중 조건에서 응력분포와 시험장면을 보여준다. 구조해석과

하중시험에서 최대응력은 Articulation에서 발생하였다.

하중시험에서 측정된 Articulation의 최대응력은  $25.95\text{kg}_f/\text{mm}^2$ 이며, 구조해석에 의한 최대응력은  $23.7\text{kg}_f/\text{mm}^2$ 이다.

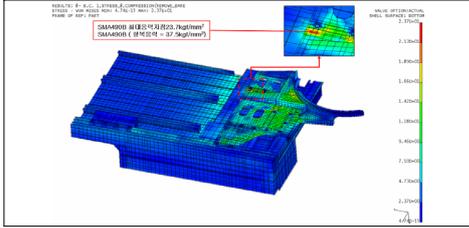


그림5. 수평압축하중 응력분포



그림6. 수평압축하중 시험장면

### 5.3 3점 지지 하중

그림 7과 8은 각각 3점 지지 하중 조건에서 응력분포와 시험장면을 보여준다. 구조해석에서 최대응력은 리프팅 패드에서 발생하였으며, 하중시험에서 최대응력은 창문 코너에서 발생하였다.

하중시험에서 측정된 창문 코너의 최대응력은  $9.91\text{kg}_f/\text{mm}^2$ , 리프팅 패드의 응력은  $6.64\text{kg}_f/\text{mm}^2$  이었으며, 구조해석에 의한 창문 코너의 응력은  $3.94\text{kg}_f/\text{mm}^2$ , 리프팅 패드의 최대응력은  $13.92\text{kg}_f/\text{mm}^2$  이다.

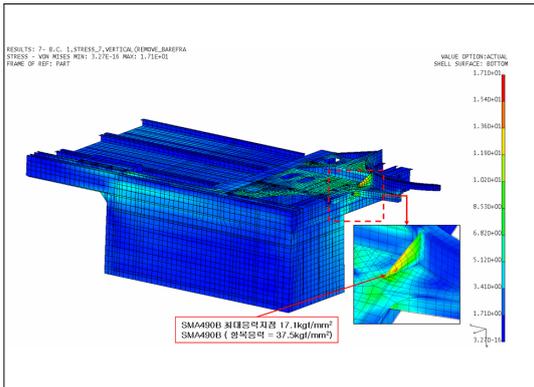


그림7. 3점 지지 하중 응력분포



그림8. 3점 지지 하중 시험장면

### 5.4 비틀림 하중

그림 9와 10은 각각 비틀림 하중 조건에서 응력분포와 시험장면을 보여준다. 구조해석과 하중시험에서 최대응력은 Articulation에서 발생하였다.

하중시험에서 측정된 Articulation의 최대응력은  $7.65\text{kg}_f/\text{mm}^2$ 이며, 구조해석에 의한 최대응력은  $9.97\text{kg}_f/\text{mm}^2$ 이다.

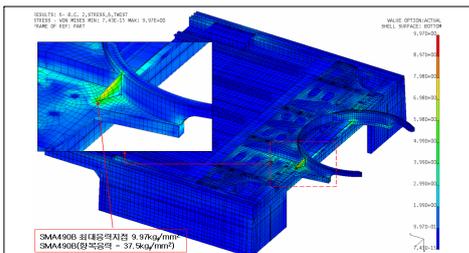


그림9. 비틀림 하중 응력분포



그림10. 비틀림 하중 시험장면

### 5.5 처짐량 및 고유진동수 측정결과

수직하중조건에서 사이드실의 최대처짐량과 굽힘 고유진동수의 해석 및 시험 결과를 표 6에 정리하여 비교하였다. 이때 굽힘 고유진동수 시험 시 차체 내부의 하중시험을 위해 설치한 구조물은 제거하여 해석조건과 동일하게 시험하였다. 그림 11에 굽힘 고유진동수 해석 결과를 나타내었다.

표 6. 처짐량 및 굽힘 고유진동수 결과 비교

| 하중조건        | 해석결과    | 시험결과   | 판정기준       | 비고 |
|-------------|---------|--------|------------|----|
| 사이드실의 최대처짐량 | 9.6mm   | 10.3mm | 10.85mm 이하 |    |
| 굽힘 고유진동수    | 16.85Hz | 16Hz   | 10Hz 이상    |    |

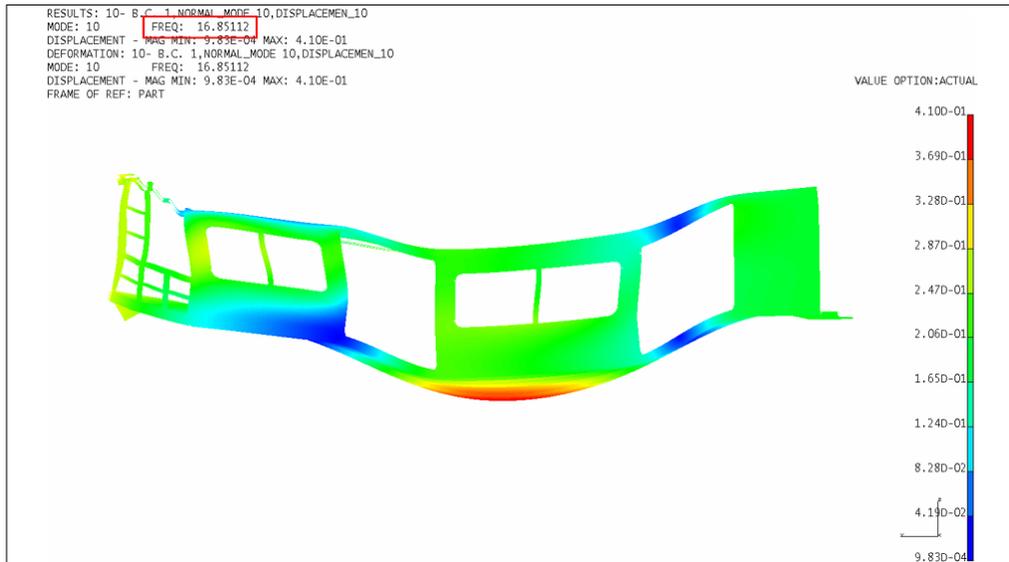


그림11. 굽힘 고유진동수 및 모드 형상

## 6. 결 론

본 연구에서는 도시철도법 규격에서 규정하고 있는 하중조건에 따라 알루미늄 경전철 차체의 구조해석 및 정하중 시험을 실시하여 차체의 안정성을 평가하였다. 차체설계와 구조해석 과정에서 각각의 하중조건에 대해 얻어진 응력레벨에 따라 고응력부는 사용부재의 두께변경 또는 구조변경, 추가보강 등을 통하여 허용응력 이내로 응력 레벨을 낮추었으며, 저응력부는 차체의 경량화를 위해 재질의 두께변경 또는 구조변경을 통하여 중량을 줄였다. 또한 제작된 차체에 대해서는 하중시험을 실시하여 차체의 안정성을 검증하였다. 구조해석과 하중 시험을 통해 얻어진 결과와 검증된 내용은 향후 도시철도법 규격이 적용되는 알루미늄 경전철 차량의 차체설계에 일정한 기준을 제공할 것이다.

### 참고문헌

1. “도시철도차량 표준사양”, 1998, 건설교통부.
2. “도시철도차량 안전 기준에 관한 규칙안”, 2000, 건설교통부.
3. “도시철도차량 성능 시험에 관한 기준”, 2000, 건설교통부.
4. “한국산업규격, KSD 6701”, 2000, 한국표준협회.
5. “Aluminum and aluminum alloy extruded shape, JIS H 4100”, 1999, Japanese Standards Association.