

# 알루미늄 압출 소재 차체의 해석 및 시험 평가

## Structural analysis and Experimental verification for Aluminum extrusion bodyshell

최성규\*                  김성종\*                  박근수\*\*                  박형순\*\*  
Choi, Seong-Kyu      Kim, Sung-Jong      Park, Geun-Soo      Park, Hyung-Soon

---

### Abstract

The weight saving that results from the substitution of aluminum alloy for steel may be used to provide reduced energy consumption and labor cost due to simplified manufacturing process and improved vehicle performance. Because of these advantages, foreign advanced rolling stock manufacturing companies have been using aluminum alloy for bodyshell manufacturing.

In this research, the comparison between FE analysis and actual load test results is performed for aluminum extrusion bodyshell, which is manufactured by Rotem Company. And the results show that the aluminum carbody structure satisfies the strength and stiffness requirements. Commercial FE analysis code and specially designed test equipment are utilized for the structural analysis and the static load test of bodyshell respectively.

---

### 1. 서 론

운송 수단으로 널리 이용되고 있는 철도차량은 mild steel, stainless steel, 알루미늄 합금 등의 소재를 사용하여 제작되어져 왔다. 알루미늄 합금의 철도차량 적용은 1952년 런던 지하철이 최초이며 일본의 경우 1962년 산양선에 적용하였다. 알루미늄 합금 차량의 에너지 및 유지 보수비용 등의 절감에 따른 경제성이 입증된 후, 세계적으로 알루미늄 압출 소재를 사용한 차체를 제작하여 상용화하고 있는 추세이다. 국내에서도 알루미늄 차체를 개발하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어져 왔으나 외국 선진 업체에 비해서는 초기 단계인 점과 운행 목적의 전동차로서는 당사의 알루미늄 차체가 최초인 점을 감안할 때 앞으로도 많은 분야의 연구개발이 이루어져 할 것이다.

본 논문에서는 당사에서 제작한 알루미늄 전동차 차체의 유한요소법을 이용한 구조해석 및 정하중시험을 통하여 대형 알루미늄 압출 소재를 사용하여 제작된 차체가 충분한 강도와 강성을 확보하고 있는지를 평가하고 그 적용성을 검토하였다. 본 논문에 인용된 규격들은 도시철도차량 표준사양(이하 표준사양), 도시철도차량 안전 기준에 관한 규칙안(이하 안전기준) 및 도시철도차량 성능 시험에 관한 기준(이하 성능시험) 등이다.

---

\* ㈜로템, 비회원

\*\* ㈜로템, 정회원

## 2. 구조해석

### 2.1 유한요소해석 모델

알루미늄 압출 소재 차체의 제원은 표1과 같으며 수직하중, 압축하중 및 1차 굽힘 고유진동수 해석의 경우 경계조건이 차체의 폭 방향으로 대칭이라고 가정하여 차체의 1/2을 유한요소로 모델링 하였으며 셸요소와 국부적으로는 솔리드요소를 혼합하여 192,757개의 요소와 160,731개의 절점을 사용하였다. 3점지지 및 비틀림 하중조건에 대해서는 경계조건이 길이 및 폭방향으로 비대칭인 점을 감안하여 319,920개의 절점과 385,514개의 요소를 사용하여 차체 전체를 유한요소로 모델링 하였다.

표 1. 알루미늄 압출 소재 차체의 제원

구분	항 목	제 원(mm)	비 고
1	차체 길이	17,500	
2	차체 폭	2,650	
3	지붕 높이	3,600	
4	볼스타 중심간 거리	12,400	
5	연결기 높이	880±10	레일 상면에서

### 2.2 경계조건 및 하중조건

알루미늄 압출 소재 차체의 계산중량은 표 2와 같으며 구조해석 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 하중시험의 3.라”의 시험하중에 따라 계산되며 하중 조건 및 하중크기는 표 3에 정리하였다.

표 2. 알루미늄 압출 소재 차체의 계산중량

구분	항 목	중 량	비 고
1	공차중량	31.3 톤	
2	Bareframe 중량	6.3 톤	설계 중량
3	대차중량	10.42 톤	
4	최대승객하중	24 톤	표준사양 1.3
5	동하중계수	0.2 g	성능시험(구조체하중시험 3.라)

표 3. 하중조건 및 하중크기

구 분	하 중 조 건	하 중 크 기	비 고
1	수직하중	47.6 톤	
2	압축하중	수직하중(14.6톤) + 압축하중(50톤)	
3	3점 지지	14.6 톤	
4	비틀림 하중	4 톤 · m	
5	굽힘 고유진동수	Bareframe 상태	

### 3. 하중시험

#### 3.1 하중시험준비

하중시험 차체는 시험 전에 캠버와 중량을 측정하고, 구조해석결과를 토대로 현장에서 시험차를 관찰한 후 고 응력이 예상되는 부위에 80개소의 응력 측정점을 결정하여 스트레인 게이지를 취부하였다. Sole bar의 처짐량은 다이알 게이지를 이용하여 측정하며 출입문 포스트 양단을 포함하여 총 22개소의 측정점을 선정하였다.

#### 3.2 하중시험방법

하중시험 차체는 안정화를 위하여 본시험 전에 예비하중시험을 2,3회 실시한다. 본시험에서는 하중시험 절차서에 따라 단계별로 하중을 부가하며 2회 반복한다. 하중시험 차체는 “성능시험 3. 마 구조체의 지지 방법 및 시험하중의 부하 방법”에 따라 지지 및 하중을 부가한다.

### 4. 재질의 기계적 성질 및 판정기준

알루미늄 압출 소재 차체의 주요 부재 제작에 사용되는 재질의 기계적 성질과 사용부위는 표 4에 정리하였다.

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

재 질		항복 강도	사 용 부 위
A6005A-T6	모재부	21.92 이상	주요 골조부
	용접부	11.72 이상	
A6061P-T651	모재부	25.0 이상	출입문 코너부위
	용접부	14.8 이상	

구조해석 및 하중시험 시 차체의 안전성 판정기준은 표 5와 같으며, Sole bar의 처짐량은 대차 중심간 거리의 1/1,000 이하이어야 한다.

표 5. 안전성 판정기준

구 분	판 정 기 준		비 고
강 도	응 력	재질의 항복강도 이하	성능시험의 구조체 하중시험 4. 평가기준
강 성	Sole bar의 최대처짐	12.4 mm 이하	표준사양 3.1.3.1
고유진동수	1차 굽힘 고유진동수	10.0 Hz 이상	성능시험의 구조체 하중시험 4. 평가기준

## 5. 구조해석 및 정하중시험 결과

### 5.1 응력해석 및 측정결과

각 하중조건별 응력 분포와 정하중시험 장면은 그림 1~4와 그림 5에 각각 나타내었으며 해석 및 시험결과의 비교를 위해 하중시험 시 최대응력이 발생하는 부위와 그 해석결과를 표 6에 정리하였다.

#### 5.1.1 수직하중

수직하중에 의한 응력분포는 그림 1에 나타내었으며 창문 하부코너에서 해석과 시험에서 각각  $8.24 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ ,  $6.74 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  의 응력이 발생하였고 그림 1의 좌측상단에 나타내었다. 하중시험 시 최대응력은 차체 내부의 출입문 하부에서  $7.30 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이며 이 부분의 해석에 의한 응력은  $7.27 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  으로 그림 1의 우측상단에 나타내었다.

#### 5.1.2 압축하중

압축하중조건에서의 해석 및 하중시험 시 최대응력은 센터실 곡선부에서 각각  $5.85 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  와  $5.26 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이며 그림 2에 상세응력분포를 나타내었다.

#### 5.1.3 3점 지지

3점 지지에 의한 응력분포는 그림 3에 나타내었다. 해석 시 재킹패드가 위치하는 Sole bar에서  $7.59 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  의 응력이 발생하였으나 시험에서 측정이 불가능한 압출 소재 내부라는 점에서 그 결과를 비교할 수 없었다. 하중시험 시 최대응력은 차체외부 출입문 상부코너에서  $7.17 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이며 이 부분의 해석에 의한 응력은  $5.06 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이다.

#### 5.1.4 비틀림하중

비틀림 하중조건에서의 응력분포는 그림 4에 나타내었으며 하중시험 시 최대응력은 출입문 하부코너에서  $1.83 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이며 이 부분의 해석에 의한 응력은  $1.82 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이다.

표 6. 해석 및 하중시험 조건별 발생응력 비교 (단위 :  $\text{kg}_f/\text{mm}^2$ )

하중조건	발생위치	발생응력		비 고
		해석결과	시험결과	
수직하중	창문 하부코너	8.24	6.74	
	출입문 하부코너	7.27	7.30	
압축하중	커플러 포켓	5.85	5.26	
3점 지지	Sole bar (재킹패드)	7.59	-	
	출입문 상부코너	5.06	7.17	
비틀림 하중	출입문 하부코너	1.82	1.83	

## 5.2 처짐량 및 고유진동수 측정결과

수직하중조건에서 Sole bar의 최대처짐량과 1차 굽힘 고유진동수의 해석 및 시험 결과를 표 7에 정리하여 비교하였다. 이때 1차 굽힘 고유진동수 시험 시 차체 내부에 하중시험을 위해 설치한 구조물의 무게를 환산하여 해석 시에 고려하였으며 결과를 그림 6에 나타내었다.

표 7. 처짐량 및 1차 굽힘 고유진동수 결과 비교

하중조건	해석결과	시험결과	판정기준	비고
Sole bar의 최대처짐량	7.26	7.53	12.4 mm 이하	
1차 굽힘 고유진동수	16.5	15.5	10 Hz 이상	

## 6. 결론

본 연구에서는 알루미늄 압출 소재 차체의 구조해석 및 정하중시험을 통하여 구조체의 강성 및 강도평가를 수행하였다. 그 결과로부터 차체가 충분한 강도와 강성을 확보하고 있으며 구조체의 안전성 판정기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 특히, 표 6과 표 7의 구조해석과 정하중시험의 비교 결과를 보면 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 구조해석결과 일부 응력 집중부를 제외하고는 대부분이 낮은 응력분포를 나타내고 있으며 이러한 부분의 효율적인 설계를 통하여 구조체의 중량을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

향후에는 대형 알루미늄 압출 소재의 신뢰성 확보, 해석기술의 개발 및 제작성 향상을 통한 알루미늄 차체의 경량화 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. “도시철도차량 표준사양”, 1998, 건설교통부
2. “도시철도차량 안전 기준에 관한 규칙안”, 2000, 건설교통부
3. “도시철도차량 성능 시험에 관한 기준”, 2000, 건설교통부
4. “철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발에 관한 연구”, 1996, 통상산업부
5. “한국산업규격, KSD 6701”, 2000, 한국표준협회
6. “German Standard, DIN 5513”, 1989, Beuth Verlag GmbH
7. “British Standard, 8118: Part 1”, 1991, British Standards Publishing Limited (BSPL)

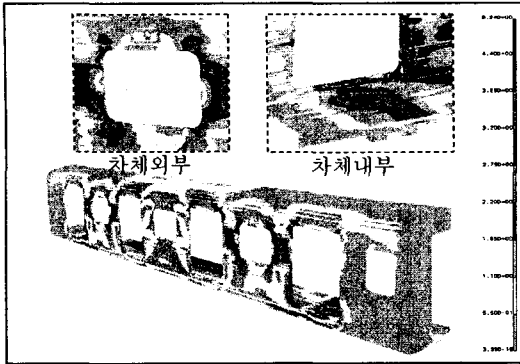


그림 1. 수직하중조건에서의 응력분포

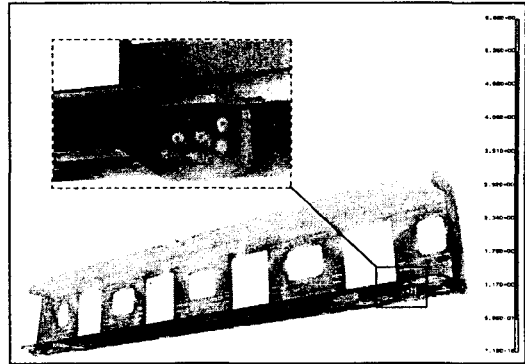


그림 2. 압축하중조건에서의 응력분포

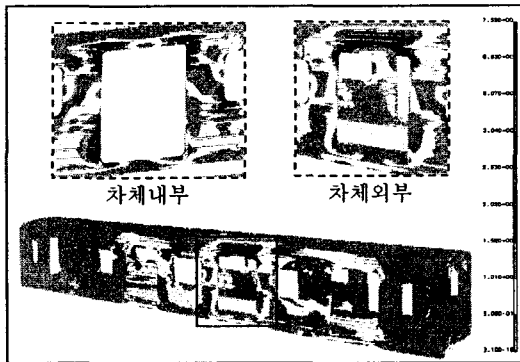


그림 3. 3점 지지조건에서의 응력분포

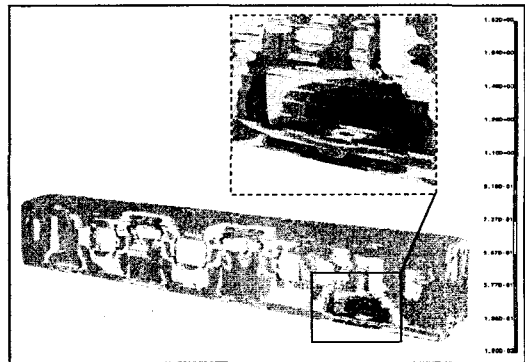


그림 4. 비틀림 하중조건에서의 응력분포



그림 5. 알루미늄 차체의 정하중시험 장면

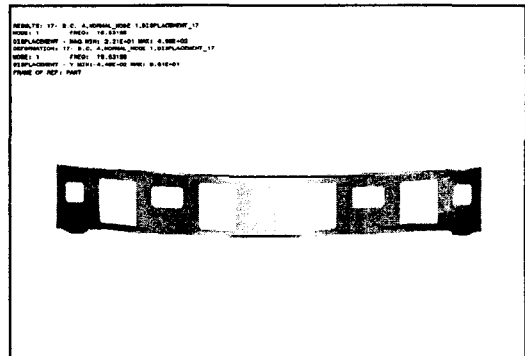


그림 6. 1차 곱힘고속유진동수 및 모드형상