

# 경량전철차량 알루미늄 구조체 하중시험방법 연구 및 결과고찰

## A Study on The Load Test Method and Result For AL Car Body of LRT

김원경\*  
Kim, Won-kyung

원시태\*\*  
Won, Si-Tae

전창성\*\*\*  
Jeon, Chang-Sung

### ABSTRACT

This study introduces the testing results of the AL car body which is applied to LRT. The LRT car body is made of aluminum structure materials like a sandwich panel. The static load test was performed to evaluate the structural characteristic and stability of the AL car body. Considering the vertical, compressive, twisting load and 3-point supporting, Bend natural frequency Measurement, Twist natural frequency Measurement type as a testing terms, the structural stability of a car body was evaluated.

**Key Words** : LRT(경량전철), Aluminium Car body (알루미늄 구조체), Static Load Test (정하중시험)

### 1. 서론

최근 석유에너지 가격이 폭등하고 있고 전반적으로 에너지 비용이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 환경에서 대량수송 수단인 철도차량의 경우에도 운전에너지 절감과 유지보수비 저감 등을 위해 구조체의 경량화에 대한 연구가 더욱 가속화 되고 있는 추세이다. 철도차량의 차체 재료로는 일반 압연강재에서 스테인리스, 스테인리스에서 알루미늄 합금과 같은 가벼운 재질로 변화하고 있는 추세에 있다. 최근에 철도차량 특히 EMU의 차체재질로 각광을 받고 있는 알루미늄 재료는 차체무게의 절감효과가 크며 내구성, 내식성이 우수할 뿐만 아니라 최근에는 금형을 이용하여 이중구조의 판재를 인발성형으로 대량제작이 가능하게 되었고, 넓은 판재로 제작이 가능하여 용접을 자동화 할 수 있어 제조공정의 단축을 통한 생산비 절감은 물론 미려한 외관의 차량제작이 용이하고 또한 재활용이 가능하여 환경친화적인 재료로 장점을 가지고 있어서 현재 국내외에서 철도차량에 많이 적용되고 있다.

본 논문은 국내에 적용된 경량전철차량의 알루미늄 구조체의 안전성을 확인하기 위한 목적으로 수행하였다. 구조체의 하중시험 방법을 조사하고 실제 운행할 차량에 적용하여 시험을 수행하였으며, 주요 내용은 시험 시 적용하는 하중조건에 대해 검토하고 차량의 운행조건에 따라 최대하중 조건을 적용하여 시험하였으며, 또한 실제운행 시 발생할 수 있는 여러 방향의 하중조건을 고려하여 정하중 시험을 수행하고 시험한 결과를 재료의 항복점 기준에 따라 평가하여 안전성을 확인하였다.

### 2. 차체의 하중시험

차체 하중시험의 시험차량으로는 하중조건이 제일 가혹한 차량인 동력차(MC, M3)를 시험차량으로 선정하였고 응력집중이 예상되는 부위, 형상 및 단면의 변화가 심한부위에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정하였으며 시험항목으로는 수직하중, 수평압축하중, 비틀림하중, 3점지지, 굽힘고유진동수, 비틀림고유진동수를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

\* 책임저자 : 한국철도기술연구원 책임연구원,  
서울산업대학교 차량시스템공학과 박사과정, 정희원

\*\* 서울산업대학교 금형설계학과 교수, 정희원

\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

## 2.1 하중조건

차량의 중량으로는 공차중량 11.5 ton, Bareframe(차체) 중량 2.08 ton, 구동대차중량 1.82 ton, 부수대차 중량 1.68 ton, 최대승객하중 10.0 ton이며 동하중 계수는 0.2 g를 적용하였다. 차량의 하중은 수직하중, 수평 압축하중, 비틀림하중, 3점지지, 굽힘고유진동수, 비틀림고유진동수의 경우를 검토하였다.

차체에 작용하는 하중은 도시철도차량에 적용하는 기준 성능시험의 차체 하중시험"과 "안전기준 제26조"에 따라 계산하였으며 계산결과는 표 1과 같다.

구분	하중조건	하중크기	하중작용방법	비고
1	수직하중	19.52 톤	언더프레임 상면에 부하	
2	수평압축하중	수직하중(5.75톤) + 압축하중(35톤)	압축하중 커플러 포켓에 부하	
3	3점 지지	5.75 톤	언더프레임 상면에 부하	
4	비틀림하중	4 톤·m	지지점 부근에 부하	
5	굽힘 고유진동수	Bareframe		
6	비틀림 고유진동수	Bareframe		

표 1 하중조건 및 하중크기

## 2.2 차체 재질의 기계적 성질

차체의 재질은 알루미늄으로 제작되었으며 재료의 기계적 성질은 다음 표2와 같다.

재 질		항복강도		비고
		모재부	용접부	
A6005A-T6	6t 이하	22.9	11.7	
	6t 이상	21.9	10.7	
A5083-O	0.5t 이상 40t 이하	22.0	12.7	

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

## 3. 시험방법

### 3.1 시험준비

시험차체는 시험 전에 캠버량과 중량을 측정하고, 고응력이 예상되는 부위에 스트레인게이지를 부착한다. 차체는 전후 및 좌우대칭을 이룬다고 볼 수 있으므로 1/4영역에 집중적으로 스트레인게이지를 부착하며, 언더프레임에는 1/2부위에 스트레인게이지를 부착하여 하중의 대칭성을 확인한다. 스트레인게이지는 1축 및 3축 게이지를 사용하며 약 60개의 스트레인게이지를 유한요소해석결과를 토대로 선정하며, 나머지 위치는 시험차를 관찰한 다음 현장에서 결정한다. 이때 사용자의 요구에 의해서 부착 위치 및 수량을 조정할 수 있다. Solebar의 처짐량은 LVDT를 이용하여 측정하며, 처짐량 측정점은 차체의 중심, 지지대 및 엔드부, 출입구의 개구부를 포함하여 약 14개소이다. 고유진동수측정을 위한 가속도계 취부위치는 중앙과 엔드쪽 4개소이며, 가속도계 및 처짐량 측정위치는 그림1과 같다.

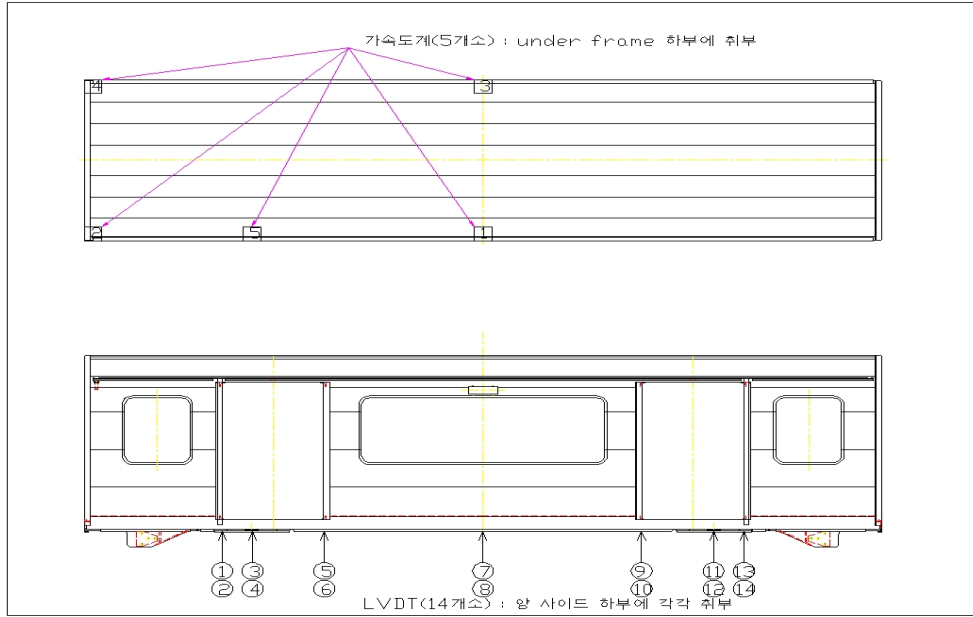


그림 1. LVDT 및 가속도계 취부도

### 3.2 예비 하중시험

시험차체는 하중이력이 없는 상태이므로 차체의 안정화를 위하여 예비하중시험을 실시한다. 먼저 최대 수직하중을 가하고 10분간 유지한 다음 하중을 제거한다. 수평압축하중에 대해서도 커플러 포켓에 압축하중 35 톤을 가한 후 제거하는 과정을 2-3회 반복한다.

### 3.3 수직 하중시험

수직하중 = 19.35 톤

여기서 차체 중량은 실측중량을 이용하여 수정한 후 수직하중을 최종 결정한다. 시험 차체의 지지 및 하중 부하방법은 성능시험 3. 마구구조체의 지지방법 및 시험하중의 부하방법에 따라 차체의 에어스프링 위치에 수직지지대로 지지되며 하중은 Weight(주물블록(11.35톤)과 물탱크(8톤))에 의해 차체 언더프레임 상면에 등분포 하중으로 부하한다.

시험방법은 다음과 같다.

- ① 응력의 기준값을 잡기 위하여 응력 측정기에서 응력값을 영으로 초기화한다.
- ② LVDT의 초기 값을 기록한다.
- ③ Weight(주물블록(11.35톤)과 물탱크(8톤))로 언더프레임 상면에 수직하중 19.35톤을 등분포 하중으로 부가한다. 단 하중 부하방법은 5.75톤, 11.35톤, 최대 수직하중 단계로 부하한다.
- ④ 응력측정기로 응력을 측정한다.
- ⑤ LVDT로 변위를 측정한다. 처짐량은 이 값과 초기값의 차이가 된다.
- ⑥ 수직하중 시험이 완료되면 모든 하중을 제거한다.

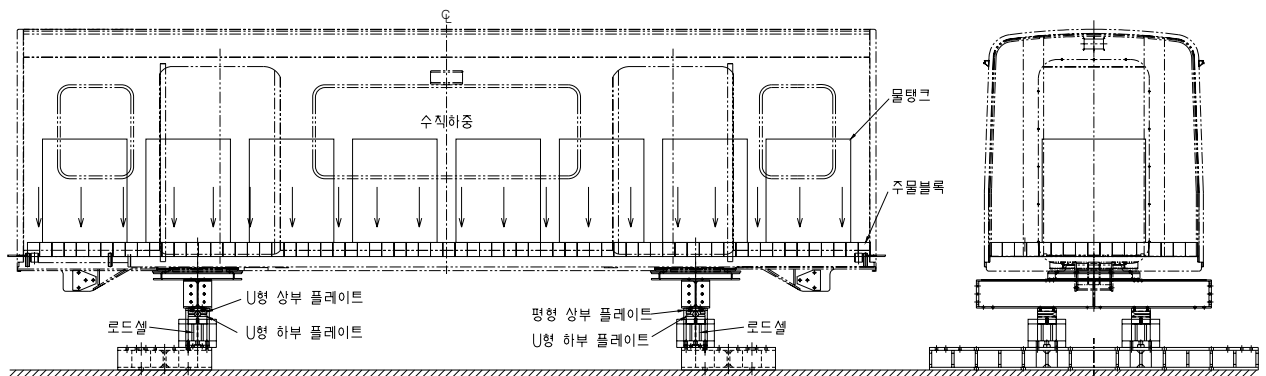


그림 2. 수직하중 시험장치

### 3.4 수평압축 하중시험

차체 언더프레임상면에 Weight(주물블록)로서 등분포로 수직하중 5.75톤을 가한 후, 차체 한쪽 커플러 중심위치를 압축봉으로 고정한 상태에서 반대쪽 커플러 중심위치에서 유압장비를 이용하여 압축하중을 가한다.

- ◎ 하중단계 : 5.75톤(수직하중)  
0톤 → 20톤 → 35톤(압축하중)

시험방법은 다음과 같다.

- ① 응력의 기준 값을 잡기 위하여 응력측정기에서 응력값을 영으로 초기화한다.
- ② LVDT의 값을 0으로 초기화한다.
- ③ Weight(주물블록)로 언더프레임상면에 수직하중 5.75톤을 등분포하중으로 부가한다.
- ④ 응력측정기로 응력을 측정한다.
- ⑤ LVDT로 변위를 측정한다. 처짐량은 이 값과 초기값과의 차이가 된다.
- ⑥ 수직하중 5.75톤을 유지한 채로 압축 하중 20톤 및 35톤을 부가한다.
- ⑦ 응력 및 변위를 측정한다.
- ⑧ 압축하중 시험이 완료되면 모든 압축, 수직하중을 제거한다.

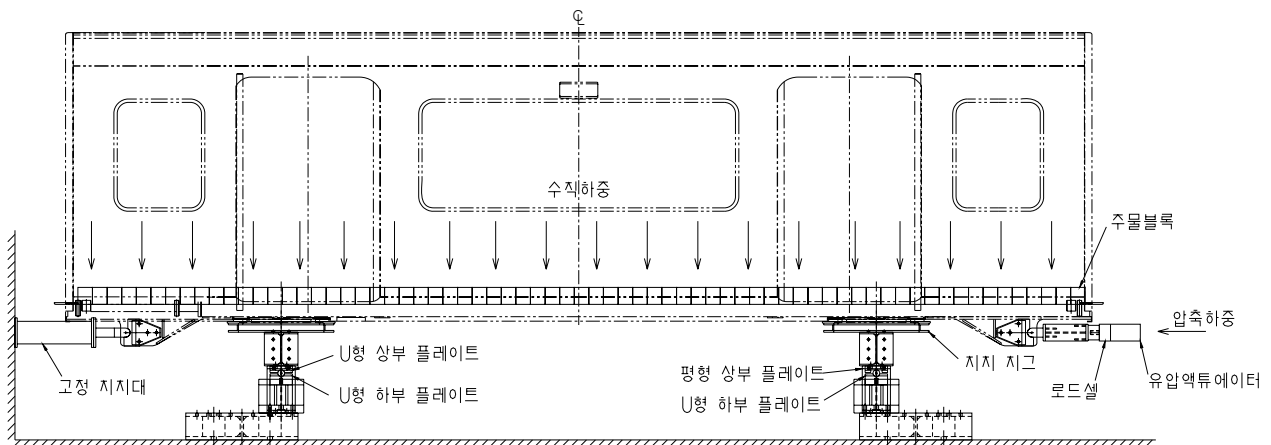


그림 3. 수평압축하중 시험장치

### 3.5 3점 지지 하중시험

수직하중시험과 동일방법으로 지지되며 좌키 받침부 4개소 지지 위치 중 1개소는 유압실린더 또는 상하 이동식지그에 의해 지지된 후 Weight(주물블록)로 언더프레임 상면에 수직하중 5.75톤을 가한 후 1개소의 수직 지지대를 약간 상승 시킨 후 하강시켜 3점지지 상태를 유지한다.

시험방법은 다음과 같다.

- ① 응력의 기준 값을 잡기 위하여 응력측정기에서 응력 값을 영으로 초기화한다.
- ② LVDT의 값을 0으로 초기화한다.
- ③ Weight(주물블록)로 언더프레임상면에 수직하중 5.75톤을 등분포하중으로 부가한 후 1개소의 수직 지지대를 강하시켜 3점지지 상태를 만든다.
- ④ 응력측정기로 응력을 측정한다.
- ⑤ LVDT의 변위를 측정한다.
- ⑥ 3점지지시험이 완료되면 제거한 받침대를 다시 지지하고 모든 하중을 제거한다.

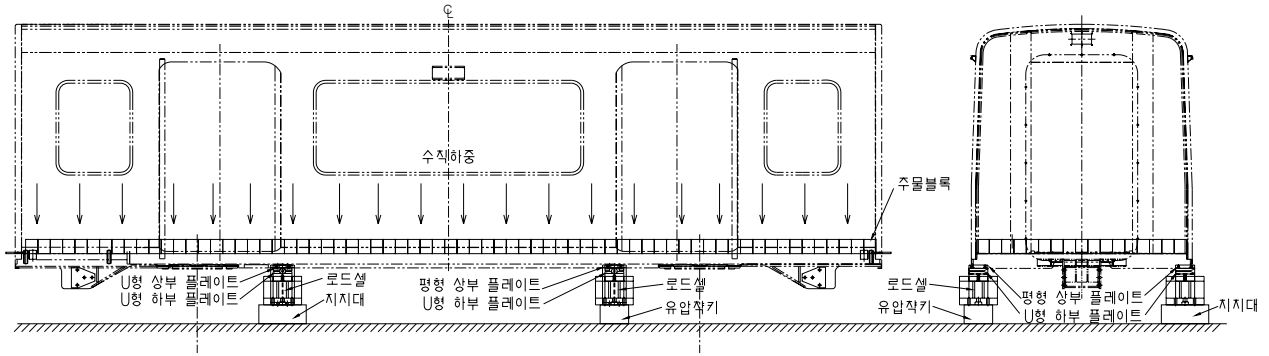


그림 4. 3점지지 시험장치

### 3.6 비틀림 하중시험

차체의 한쪽 볼스타는 수직지지대에 의해 지지되며, 반대쪽에는 차체의 rolling이 가능하도록 볼스타 중앙에 비틀림 프레임을 넣어 지지 한 후 지지점 부근에 하중을 가한다.

○ 하중단계 : 0톤·m → 4톤·m(양측 각각의 작용점 힘 12.1kN x 2(짜힘))

시험방법은 다음과 같다.

- ① 응력의 기준값을 잡기위하여 응력측정기에서 응력값을 영으로 초기화한다.
- ② LVDT의 값을 0으로 초기화한다.
- ③ 유압실린더를 사용하여 비틀림 프레임에 4 톤·m(양측 각각의 작용점 힘 12.1kN x 2(짜힘))의 하중을 부가한다.
- ④ 응력측정기로 응력을 측정한다.
- ⑤ LVDT로 변위를 측정한다.
- ⑥ 비틀림 하중시험이 완료되면 모든 하중을 제거한다.

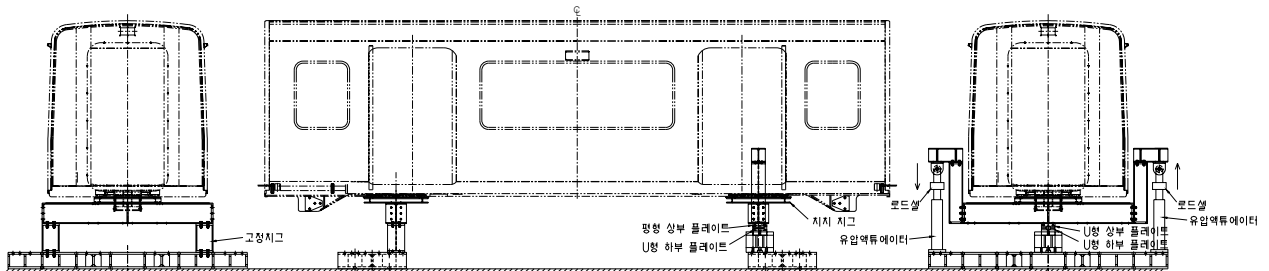


그림 5. 비틀림 하중 시험장치

### 3.7 굽힘 고유진동수 시험

굽힘고유진동수 시험시 차체는 수직하중시험 상태와 동일하게 지지되며 언더프레임 하부 중앙에 부하를 가하고 순간적으로 부하를 제거하여 구조체에 자유진동을 발생시키는 방법으로 한다.

시험방법은 다음과 같다.

- ① 차체의 solebar에 가속도계를 부착하고 시험장비를 그림1과 같이 연결한다.
- ② 언더프레임 하부 중앙에 부하를 사용하여 하중을 가한 후 순간적으로 제거하여 차체의 진동을 발생시킨다.
- ③ 진동수 측정장비로 진동 이력을 기록한다.
- ④ 측정된 진동이력을 분석하여 고유 진동수를 결정한다.

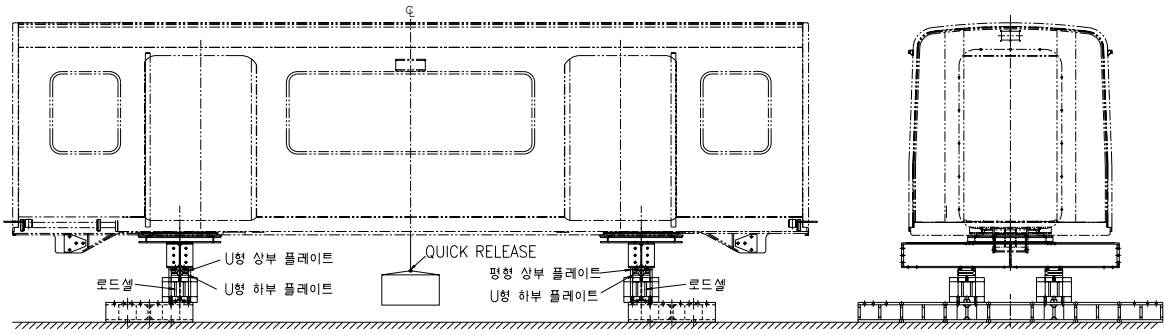


그림 6. 굽힘고유 진동수 시험장치

### 3.8 비틀림 고유진동수 시험

비틀림 고유진동수 시험시 차체는 비틀림 하중시험상태와 동일하게 지지되며 비틀림 프레임 하부에 부하를 사용하여 하중을 가한 후 순간적으로 하중을 제거한다.

시험방법은 다음과 같다.

- ① 차체의 Solebar에 가속도계를 부착하고 시험 장비를 그림1과 같이 연결한다.
- ② 비틀림 프레임 하면에 시험 하중을 가한 후 순간적으로 제거하여 차체의 진동을 발생시킨다.
- ③ 진동수 계측장비로 진동 이력을 기록한다.
- ④ 측정된 진동이력을 분석하여 고유 진동수를 결정한다.

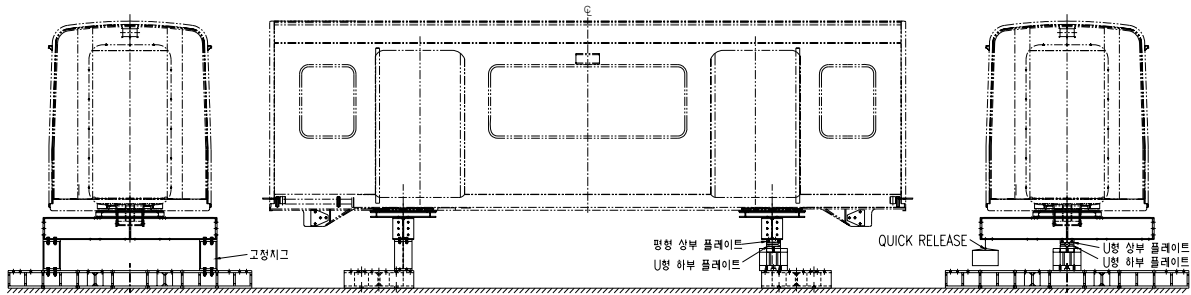


그림 7. 비틀림 고유진동수 시험장치

## 4. 시험결과 분석방법

### 4.1 응력 측정 결과

각 시험 결과는 표2의 항복강도(허용응력)이내에 있어야 하며 허용응력 초과 시에는 원인규명과 함께 구조해석으로 입증하여야 한다.

### 4.2 처짐량 측정 결과

수직하중에서 측정된 처짐량은 표3 판정기준과 같이 5.3mm이내에 있어야 한다.

### 4.3 고유진동수 측정 결과

차체의 1차 굽힘 고유진동수는 판정 기준에 따라 10Hz 이상이어야 한다.

구 분	판 정 기 준		비 고
강 도	하중 조건	허용 응력  재질의 항복강도 이하	성능시험 구조체 하중시험 4.
	수직하중		
	수평압축하중		
	비틀림하중		
강 성	3점 지지	5.3 mm 이하	
고유진동수	Solebar의 최대 처짐	10.0 Hz 이상	성능시험 구조체 하중시험 4.
	1차 굽힘 고유진동수		

표 3 안전성 판정기준

## 5. 시험수행 및 결과

구동운전실차량(MC)에 대한 정하중시험은 구동(M3) 차량과 동일하게 다음 순서로 수행하였다.

- ① 굽힘 고유진동수 측정시험, ② 수직하중시험, ③ 수평압축 하중시험,
- ④ 3점 지지시험, ⑤ 비틀림 고유진동수 측정시험, ⑥ 비틀림 하중시험

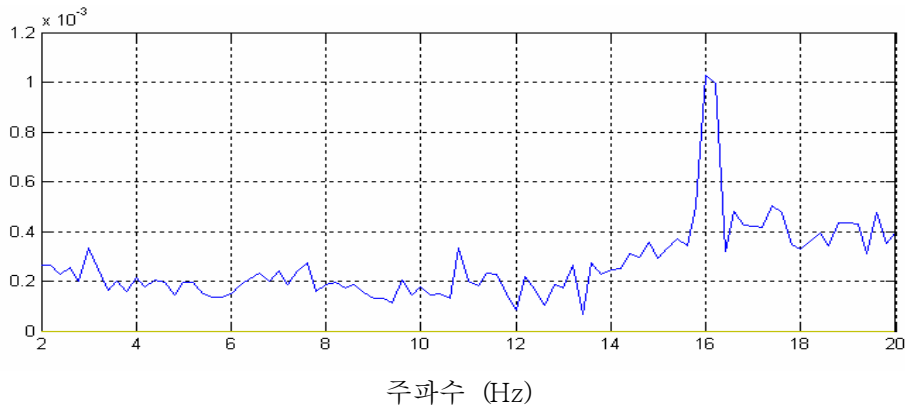
본 시험에 앞서 수직하중 및 수평압축하중에 대한 예비시험을 수행하였다.

### 5.1 예비하중시험

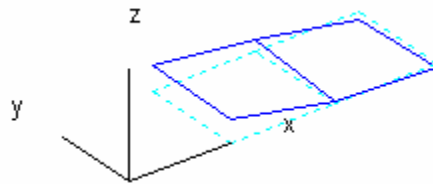
시험 설치된 차량의 안정화를 위하여 예비하중시험을 수행하였으며, 웨이트와 물탱크를 이용하여 최대수직하중인 19.52톤을 가한 후 약 10분간 유지한 다음 하중을 제거하였다. 그리고 수평압축하중에 대해서도 35톤의 압축하중을 3회 반복하여 부가하였다.

### 5.2 굽힘 고유진동수 측정시험

본 시험에서는 6개의 가속도계를 이용하였고, 가진 직전부터 5초 동안의 가속도를 측정하였다. 그림 8은 1, 2회 시험에서 측정된 가속도 값에 대한 FFT 분석 결과 및 1차 굽힘 모드를 보여주고 있으며, 그 결과 굽힘 고유진동수는 16.0Hz 및 16.2Hz로 분석되었다.

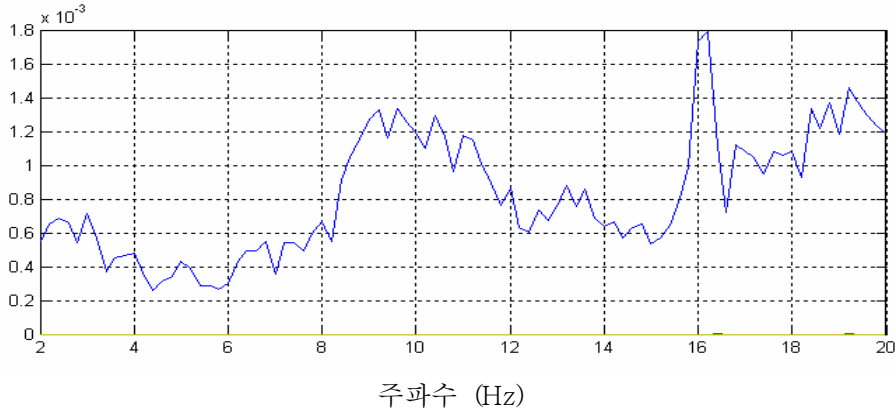


(a) 1회 시험에 대한 FFT 분석 결과

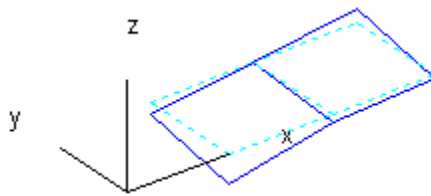


(b) 1회 시험에서의 1차 굽힘 모드 (16.0Hz)

그림 8 MC 차량에 대한 굽힘 고유진동수 측정 결과 (계속)



(c) 2회 시험에 대한 FFT 분석 결과



(d) 2회 시험에서의 2차 굽힘 모드 (16.2Hz)  
그림 8 MC 차량에 대한 굽힘 고유진동수 측정 결과

### 5.3 수직하중시험

본 시험의 최대 하중은 19.52톤이며, M3 차량과 동일한 방법으로 2회에 걸쳐 수행하였다.

최대 응력은 전두부 하부 지지점 부근에 부착된 38번 게이지에서 발생하였으며, 1회 시험시에는  $-6.15 \text{ kg/mm}^2$ , 2회 시험시에는  $-6.17 \text{ kg/mm}^2$  였다. 또한, 차량의 길이방향 중앙부인 7번 변위계에서 최대 변위 값이 측정되었는데, 1회 시험에서는 3.73mm였고, 2회 시험에서는 3.64mm로 기록되었다. 이러한 변위 값에서 지지점 상방에서 측정된 변위의 최소값을 뺀 처짐량으로 환산한 결과 1회 시험에서는 1.97mm, 2회 시험에서는 1.87mm의 처짐이 발생한 것으로 계산되었다.

### 5.4 수평압축 하중시험

본 시험에서 수평압축 하중의 크기는 35톤으로 M3 차량과 동일하지만, 수직하중은 bareframe 실측 중량을 적용하여 5.92톤을 추가하였다. 웨이트에 의한 수직하중 부하 및 유압자키를 이용한 수평압축하중 부하는 M3 차량과 동일한 방법으로 이루어졌다.

시험 결과, 고정단인 전두부 커플러 전방 부근에 부착된 31번 스트레인 게이지에서 최대 응력을 나타내었으며, 1회 시험에서는  $-9.03 \text{ kg/mm}^2$ , 2회 시험에서는  $-9.15 \text{ kg/mm}^2$  였다. 또한, 1번 변위계에서 최대 변위 값을 기록하였는데, 1회 시험에서는 3.56mm, 2회 시험에서는 3.51mm로 측정되었다.

### 5.5 3점 지지시험

본 시험은 4점지지 상태에서 웨이트 적재에 의해 정해진 수직하중을 부가한 다음 지지점 하나를 제거하면서 수행하였다. 이때, 수직하중의 크기는 5.92톤이며, M3 차량에 대한 3점 지지시험과 동일한 방법으로 수행하였다.

시험 결과, 지지점을 제거한 쪽의 문 상부 모서리에 부착된 14번 스트레인 게이지에서 최대 응력이 측정되었으며, 1회 시험에서는  $7.60 \text{ kg/mm}^2$ , 2회 시험에서는  $7.24 \text{ kg/mm}^2$ 로 나타났다. 또한, 최대 변위는 지지점을 제거한 쪽의 도어 단부 아래 설치된 14번 변위계에서 측정되었으며, 1회 시험에서는 8.52mm, 2회 시험에서는 8.49mm 이었다.



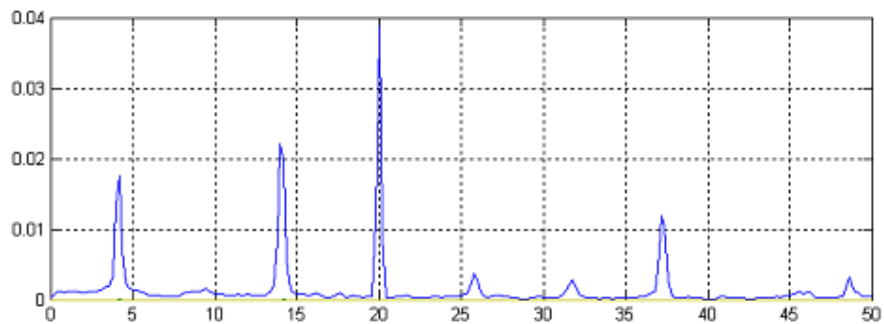
## 5.6 비틀림 하중시험

본 시험에서는 시험 절차서에 의거 그림 45에 보이는 바와 같이 전두부 양측면 지지점에 짝힘을 부하할 수 있도록 하중지그를 설치하였으며, 두 가력기에 12.1kN의 압축력과 인장력을 부가하였다.

시험 결과, 전두부 정면 우측 도어 하단 후방 모서리 부근에 부착된 14번 스트레인 게이지에서 최대 응력이 계측되었으며, 1회 시험에서는  $-7.65 \text{ kg/mm}^2$ , 2회 시험에서는  $-7.67 \text{ kg/mm}^2$ 로 나타났다. 또한, 최대 변위는 비틀림 하중을 부하한 쪽의 도어 하부에 설치된 14번 변위계에서 기록되었으며, 1회 시험에서는  $-8.41\text{mm}$ , 2회 시험에서는  $-8.40\text{mm}$ 였다.

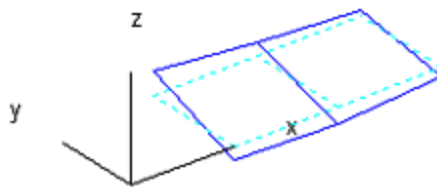
## 5.7 비틀림 고유진동수 측정시험

본 시험은 M3 차량의 비틀림 고유진동수 측정시험과 마찬가지로 방법으로 수행하였으며 시험에서 계측된 진동수를 분석한 결과는 그림 9에 보이는 바와 같다. 그림에서는 2회 시험에 대한 FFT 분석 결과와 1차 비틀림 모드를 보여주고 있는데, 비틀림 고유진동수는 4.2Hz로 분석되었다.

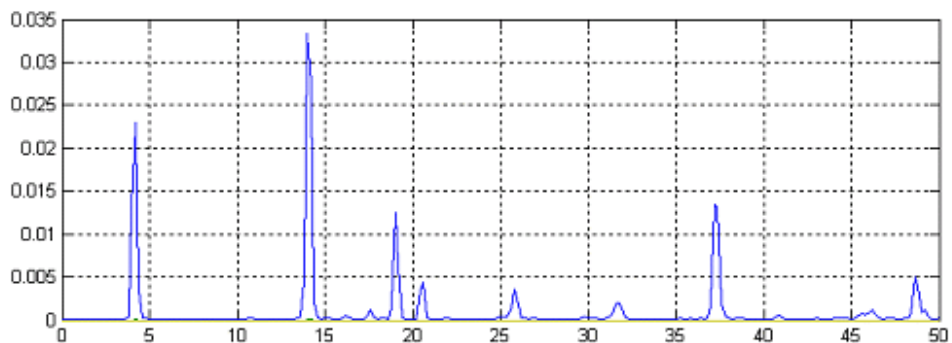


주파수 (Hz)

(a) 1회 시험에 대한 FFT 분석 결과

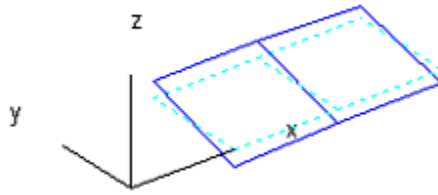


(b) 1회 시험에서의 1차 굽힘 모드 (4.2Hz)



주파수 (Hz)

(c) 2회 시험에 대한 FFT 분석 결과



(d) 2회 시험에서의 2차 굽힘 모드 (4.2Hz)  
그림 9 비틀림 고유진동수 측정 결과

## 6. 결 론

본 시험은 국내에 적용되는 경량전철 구조체 2량 (M3 및 MC 차량)에 대하여 국토해양부의 도시철도차량 성능시험 기준 등에 의거 작성된 구조체 하중시험 절차서'에 따라 수직하중시험, 3점 지지 시험, 수평압축 하중시험, 비틀림 하중시험, 굽힘 고유진동수 측정시험 및 비틀림 고유진동수 측정시험 등 6개 항목의 구조체 시험을 수행한 것이다. 본 시험에서 측정된 결과를 요약하면 표 3과 같다. 표에는 각 시험항목에 대한 최대 응력, 최대 처짐 또는 변위, 진동수 측정시험 결과가 제시되어 있다. 모두 허용응력 범위 이내에 있어 도시철도차량의 성능시험기준 및 안전기준에 따라 안전한 것으로 판단된다.

표 3 M3 및 MC 차량에 대한 구조체 하중시험 결과 요약

시험항목	M3 구조체		MC 구조체		비고
	최대응력 (kg/mm <sup>2</sup> )	최대변위 (mm)	최대응력 (kg/mm <sup>2</sup> )	최대변위 (mm)	
수직하중시험	-7.33	1.80*	-6.17	1.97*	*환산된 처짐량
수평압축 하중시험	-9.16	3.46	-9.15	3.56	
3점 지지시험	5.16	10.88	7.60	8.52	
비틀림 하중시험	2.96	-5.73	-7.67	-8.41	
굽힘 고유진동수 측정시험	15.4 (Hz)		16.0 (Hz)		
비틀림 고유진동수 측정시험	5.0 (Hz)		4.2 (Hz)		

## 참고문헌

1. 고무차륜형 AGT 경량전철 차량용 알루미늄 차체의 개발, 김연수 외 3인 대한기계학회춘계학술대회논문집, 2003
2. 구조해석 및 시험에 의한 경량화 차체 구조강도 평가, 윤성철 외 3인, 한국철도학회추계학술대회논문집, 2005
3. Japanese Industrial Standards, "Test methods for static load of body structure of railway rolling stock", E 7105, 1989
4. 건설교통부, "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준", 구조체 하중시험, 2000