

# 철도차량 알루미늄 차체 용접방법에 따른 하중시험결과 비교 고찰

## A Study on Comparison Of The Load Test Results Of AL Car Body Welding Method For Rolling Stock

김원경\*  
Kim, Weon-kyong

원시태\*\*  
Won, Si-Tae

전창성\*\*\*  
Jeon, Chang-Sung

### ABSTRACT

This study introduces comparison the testing results of the AL car body which is applied to FSW and GMAW welding method . The 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** : rolling stock (철도차량), Aluminium Car body (알루미늄 구조체), Static Load Test (정하중시험)

### 1. 서 론

최근 세계적으로 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 환경 친화적인 재료로 장점을 가지고 있어서 현재 국내외에서 철도차량에 많이 적용되고 있다.

본 논문은 국내에 적용된 철도차량의 알루미늄 구조체의 안전성을 확인하기 위한 목적으로 구조체의 하중시험방법을 이용하여 최근국내에 적용된 FSW 용접 알루미늄 차체와 기존의 GMAW 용접적용 차체에 대해 비교 조사하고 구조체의 하중시험 방법을 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 항복점기준에 따라 비교 평가하여 안전성을 확인하였다.

\* 책임저자 : 한국철도기술연구원 책임연구원,  
서울산업대학교 차량시스템공학과 박사과정, 정회원  
\*\* 서울산업대학교 금형설계학과 교수, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

## 2. 구조체 하중시험

차체 하중시험의 대상차량으로는 하중조건이 제일 가혹한 차량을 시험차량으로 선정하였고 구조해석 결과를 참고하여 응력집중이 예상되는 부위, 형상 및 단면의 변화가 심한 위치에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정하였으며 시험항목으로는 수직하중, 수평압축하중, 비틀림하중, 3점지지, 굽힘 고유진동수, 비틀림 고유진동수를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

### 2.1 시험 차량 제원

시험대상 차체의 제원은 차량하중 조건을 고려하여 선정하였으며 A형은 M-CAR(동력차)를 선정하고 B형은 T-CAR(부수차)를 선정하여 비교대상으로 하였으며 제원은 표2과 같다.

구분	항 목	제 원(mm)		비 고
		A 형	B 형	
1	차체 길이	19,500	23,000	도면
2	차체 폭	3,120	3,180	
3	지붕 높이	3,600	3,750	
4	볼스타 중심간 거리	13,800	15,900	
5	연결기 높이	880± 10	880± 10	레일 상면에서

표 2 하중조건 및 하중크기

### 2.2 하중조건

차체에 작용하는 하중은 A형은 도시철도차량에 적용하는 기준 "성능시험의 구조체 하중시험"을 적용하고 B형은 "철도차량안전기준에 관한지침" 에 따라 계산하였으며 계산결과는 표 3와 같다.

구 분	하 중 조 건	하 중 크 기		하중작용방법	비 고
		A형(GMAW)	B형(FSW)		
1	수직하중	40.46 톤	43.737톤	언더프레임 상면에 부하	
2	수평압축하중	수직하중(17.6톤) +압축하중(50톤)	수직하중(21.576톤) +압축하중(204톤)	압축하중 커플러 포켓에 부하	
3	인장하중	-	153톤	상동	차종별 선택적용
4	3점 지지	17.6 톤	-	언더프레임 상면에 부하	
5	비틀림하중	4 톤· m	-	지지점 부근에 부하	
6	굽힘 고유진동수	Bareframe	Bareframe		
7	비틀림 고유진동수	Bareframe	-		

표 3 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 3-1 A형 차량 재질의 기계적 성질 (단위 : kgf/mm<sup>2</sup>)

구분	재질	허용응력		비고
		모재부	용접부	
수직하중 압축하중 인장하중 조합하중	A6N01S-T5(t≤6mm)	20.9	13.3	안전계수는 항복강도에 모재부 1.0 용접부 1.1을 적용.
	A6N01S-T5(6<t≤12mm)	17.8	11.3	
	A7N01P-T4	19.9	16.2	
	A7N01S-T5	25.0	20.4	
	A5083P-O	12.7	11.5	
운용하중	A6N01S-T5(t≤6mm)	3.47	1.58	안전계수는 피로한도에 모재부 1.5 용접부 1.65를 적용.
	A6N01S-T5(6<t≤12mm)	3.47	1.58	
	A7N01P-T4	3.47	1.58	
	A7N01S-T5	3.47	1.58	
	A5083P-O	3.47	1.58	

표 3-2 B형 차량 재질의 기계적 성질 (단위 : kgf/mm<sup>2</sup>)

### 3. 시험방법

#### 3.1 측정 Gauge 취부

##### (1) Strain Gauge

구조체는 전·후 및 좌·우 방향으로 거의 대칭을 이루고 있으므로 Strain Gauge는 1/4 부분에 집중적으로 취부하며, 측정점의 선택방법은 구조해석의 결과, 높은 응력이 예측되는 부분, 형상 및 단면의 급변화 부분 등 구조상 응력 집중이 예상되는 부분 등을 선정하며, Strain Gauge 취부 방향에 대해서는 주응력의 방향이 명확하게 나타나는 부위에 대해서는 그 방향으로, 그렇지 않은 부분에 있어서는 구조해석 결과의 주응력 방향을 참조하여 1축 또는 3축 Strain Gauge를 취부 한다.

##### (2) Dial Gauge

Dial Gauge의 설치위치는 Sole bar의 길이방향으로 끝단, 지지점인 Bolster, Side Door Post 및 구조체의 중앙 등 구조체의 변형모드가 변곡점이 되는 부분에 설치한다. 개수는 총 14개를 설치한다.

##### (3) Accelerometer

Accelerometer는 Sole bar 인접부에 설치하며, 차량 전체의 진동모드를 확인하기 위해 볼스터와 중앙부 위치에 총 6개를 설치한다.

#### 3.2 예비시험

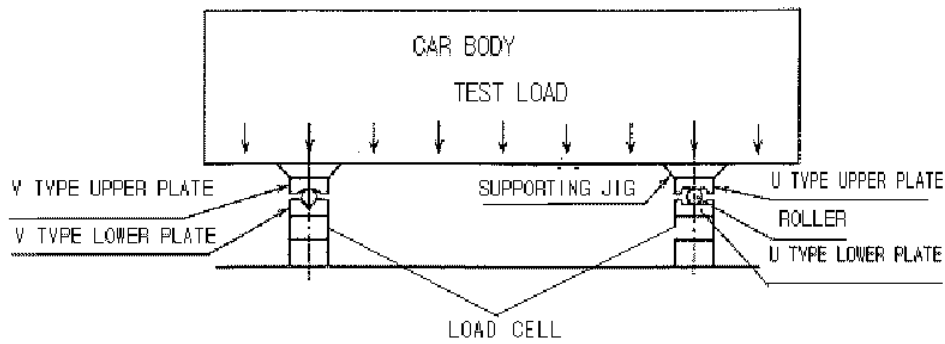
시험구조체는 제작이 완료된 후 하중을 전혀 받지 않은 상태이나 용접변형 및 제작방법에 기인하여 초기응력을 받고 있는 불안정한 상태이다. 따라서 구조체 및 지그의 안정화를 위하여 예비하중시험을 실시한다. 예비하중은 두 가지 단계로 나누어 부가한다. 먼저, 최대수직하중까지 가하여 3시간 이상 유지한 후 제거하고, 다음에 압축하중 204톤을 가한 후 10분 이상 유지한 후 제거한다.

#### 3.3 본시험

##### (1) 수직하중시험

###### o 구조체지지방법

구조체의 수직방향 지지는 전후 대차의 Air Spring Seat 위치의 4개소에 지지되고 한쪽은 U-type Roller로, 다른 쪽은 V-type Roller로 지지한다. 이의 시험 장치도는 다음과 같다.



○ 하중부하방법

Weight 10kg 및 20kg을 이용하여 Floor에 등분포로 부하한다. Weight 적재에 의한 Floor 바닥의 손상을 방지하기 위하여 목재 합판을 깐다.

○ 하중계

부하하중은 Weight 개수의 파악 및 시험하중을 가한 후 5분 이상 경과한 뒤에 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

○ 측정 Data

시험하중을 가한 후 5분 이상 경과 후 UCAM-20PC 장비로 응력을 출력하고, 설치된 Dial Gauge로부터 변위량을 읽는다. 이 Data를 평가기준에 따라 평가한다.

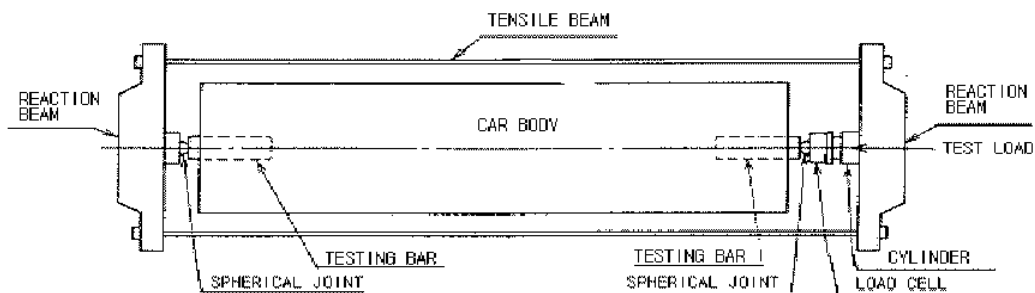
(2) 압축하중시험

○ 구조체지지방법

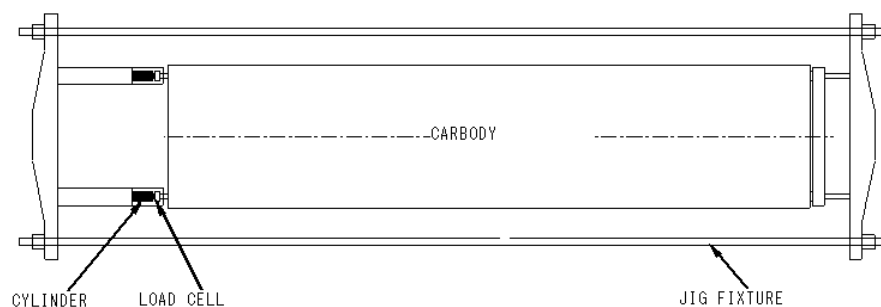
구조체의 수직방향 지지는 수직하중시험의 구조체지지 방법과 동일하다.

○ 하중부하방법

2,000kN 압축하중 부하방법은 양 차단의 연결기 취부부에 시험용 차단봉을 취부 하여, 그 한쪽에 Load Cell을 설치하여 유압 실린더로 부하한다. 이의 시험 장치도는 다음과 같다.



윈도우가드 레일 및 캔트레일 압축하중 부하방법은 단부에서 하중을 가하며, 적절한 지그 및 Load Cell을 설치하여 유압실린더로 부하한다. 이들의 시험 장치도는 다음과 같다.



o 하중계

압축하중 측정은 압축하중 측정용 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

o 측정 Data

시험하중을 가한 후 5분 이상 경과 후 UCAM-20PC 장비로 응력을 출력하고, 설치된 Dial Gauge로부터 변위량을 읽는다. 이 Data를 평가기준에 따라 평가한다.

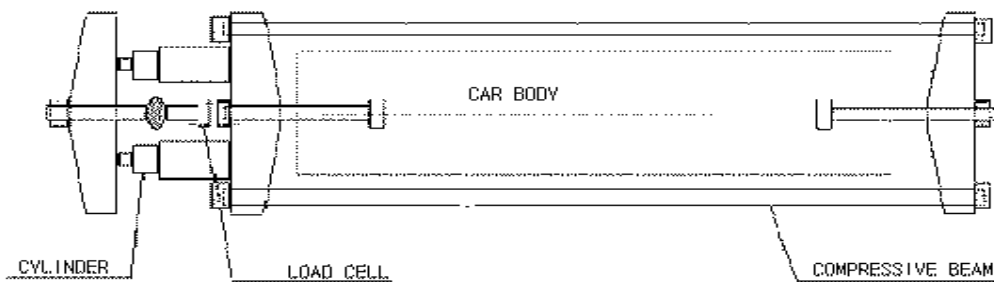
(3) 인장하중시험

o 구조체지지방법

구조체의 수직방향 지지는 수직하중시험의 구조체지지 방법과 동일하다.

o 하중부하방법

부하방법은 양 차단의 연결기 취부부에 시험용 인장봉을 취부 하여, 그 한쪽에 Load Cell을 설치하여 유압 실린더로 부하한다. 이의 시험 장치도는 다음과 같다.



o 하중계

인장하중 측정은 측정용 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

o 측정 Data

시험하중을 가한 후 5분 이상 경과 후 UCAM-20PC 장비로 응력을 출력하고, 설치된 Dial Gauge로부터 변위량을 읽는다. 이 Data를 평가기준에 따라 평가한다.

(4) 조합하중시험(1.3g 수직+2,000kN 압축)

o 구조체지지방법

수직방향으로는 수직하중시험 지지방법과 수평방향으로는 압축하중시험의 지지방법과 동일

o 하중부하방법

연결기 높이에서 가해진 순수 압축하중 시험 시 구조체의 중앙부에 아래쪽 처짐이 발생하는 경우에, 최대수직하중과 2,000kN 압축하중을 동시에 가한다.

o 하중계

수직하중은 Weight 개수의 파악 및 시험하중을 가한 후 5분 이상 경과한 뒤에 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

압축하중 측정은 압축하중 측정용 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

o 측정 Data

시험하중을 가한 후 5분 이상 경과 후 UCAM-20PC 장비로 응력을 출력하고, 설치된 Dial Gauge로부터 변위량을 읽는다. 이Data를 평가기준에 따라 평가한다.

(5) 조합하중시험(1.3g 수직+1,500kN 인장)

o 구조체지지방법

수직방향으로는 수직하중시험 지지방법과 수평방향으로는 인장하중시험의 지지방법과 동일

o 하중부하방법

연결기 높이에서 가해진 순수 압축하중 시험 시 구조체의 중앙부에 아래쪽 처짐이 발생하지 않는 경

우에, 최대수직하중과 1,500kN 인장하중을 동시에 가한다.

o 하중계

수직하중은 Weight 개수의 파악 및 시험하중을 가한 후 5분 이상 경과한 뒤에 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

인장하중 측정은 인장하중 측정용 Load Cell과 연결된 UCAM-20PC 장비로 하중을 출력하여 확인한다.

o 측정 Data

시험하중을 가한 후 5분 이상 경과 후 UCAM-20PC 장비로 응력을 출력하고, 설치된 Dial Gauge로부터 변위량을 읽는다. 이 Data를 평가기준에 따라 평가한다.

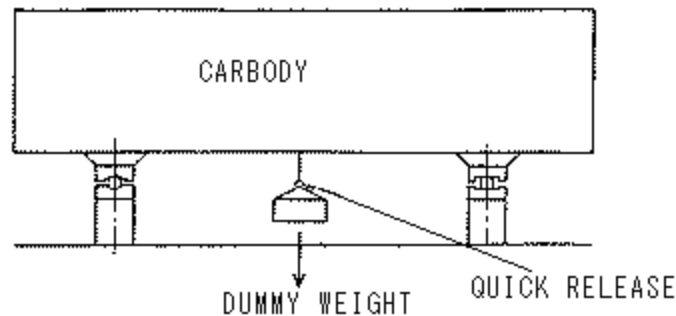
(6) 진동시험(급힘 고유진동수)

o 구조체 지지방법

수직하중시험 지지방법과 동일

o 하중부하방법

시험하중의 부하는 Under frame 하부에 시험구조체의 가진을 위하여 Dummy 하중 1톤을 가한 상태에서 순간적으로 부하를 제거하여 구조체에 자유진동을 발생시킨다. 이의 시험 장치도는 다음과 같다.



o 측정 Data

획득한 Data를 주파수 분석 장비로부터 급힘 1차 고유진동수를 찾는다. 이 Data를 평가기준에 따라 평가한다.

**4. 평가기준**

(1) 응력

수직하중의 경우에 있어서는 구조체 자중에 의한 응력을 보상하기 위하여 측정된 응력 값에 계수들을 곱한 값으로 평가한다.

$$S = \left( 1 + \frac{\text{구체중량}}{\text{부하하중}} \right) \times S_{AGV}$$

여기서,  $S$ : 구조체 자중을 고려한 평가응력

$S_{AGV}$ : 수직하중 시 부하하중에 의한 측정응력

나머지 하중조건에서의 응력은 측정응력 값으로 평가한다.

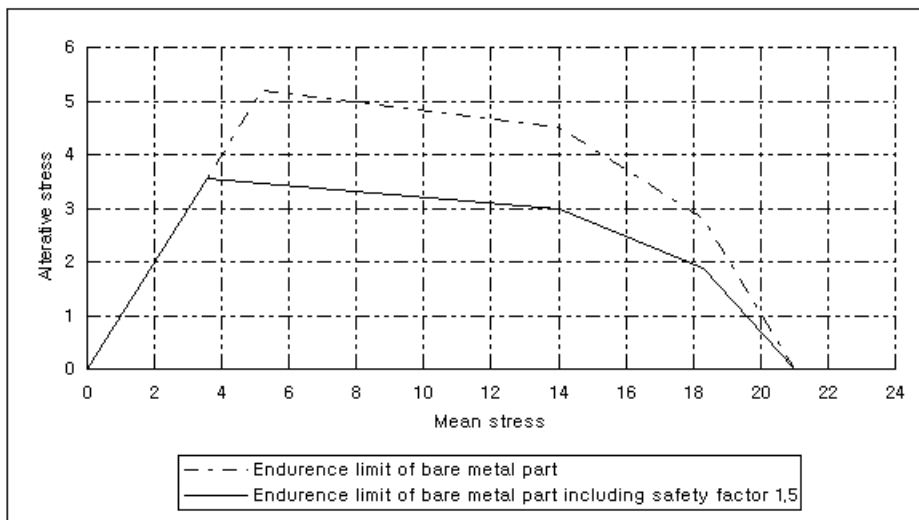
그리고, 2,000kN 압축하중(연결기 높이) 시 Sole-bar의 중앙부 처짐이 아래쪽 처짐이 발생하지 않을 경우에는 조합하중(1.3g 수직+2,000kN 압축)의 응력 값을 평가한다.

이상의 결과로부터 얻은 모든 하중조건에서의 응력 값의 판정기준은 다음의 표 5에 주어진 허용응력을 초과하지 않아야 하며, 운용조건 하중에서의 판정기준은 모재부 및 용접부로 구분하여 다음의 내구선도 이내이어야 한다.

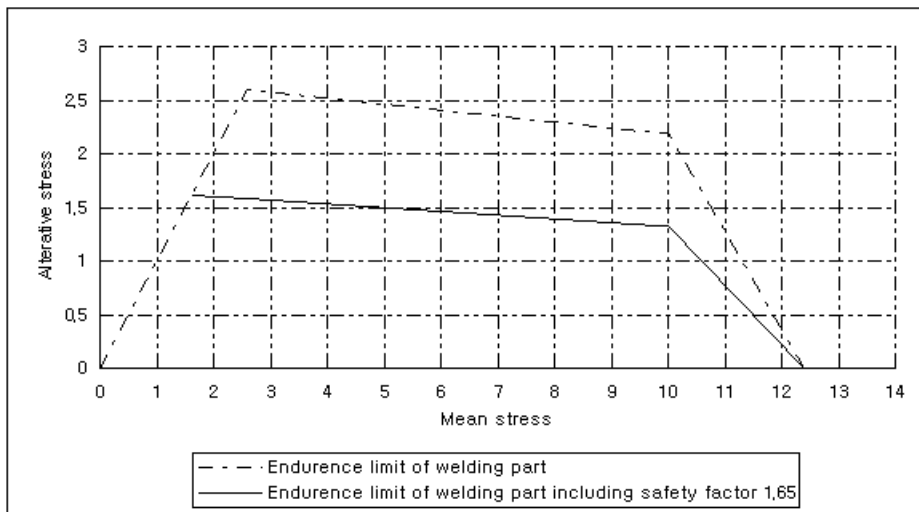
표 4 응력 판정기준

단위: kgf/mm<sup>2</sup>

구분	재질	허용응력		비고
		모재부	용접부	
수직하중 압축하중 인장하중 조합하중	A6N01S-T5(t≤6mm)	20.9	13.3	안전계수는 항복강도에 모재부 1.0 용접부 1.1을 적용.
	A6N01S-T5(6<t≤12mm)	17.8	11.3	
	A7N01P-T4	19.9	16.2	
	A7N01S-T5	25.0	20.4	
	A5083P-O	12.7	11.5	
운용하중	A6N01S-T5(t≤6mm)	3.47	1.58	안전계수는 피로한도에 모재부 1.5 용접부 1.65를 적용.
	A6N01S-T5(6<t≤12mm)	3.47	1.58	
	A7N01P-T4	3.47	1.58	
	A7N01S-T5	3.47	1.58	
	A5083P-O	3.47	1.58	



모재부의 내구선도



용접부의 내구선도

(2) 처짐량

수직하중시험의 경우 Sole-bar에서 측정된 변위로부터 A/1000 mm 이하(A: Bolster 간 거리) 인지 확인한다.

(3) 고유진동수

진동시험(굽힘 고유진동수) 결과 1차 굽힘 고유진동수가 10Hz 이상인지 확인한다.

## 5. 결 론

### 5-1. 응력 측정결과(A형)

A형 전동차 구조체에 대한 강도 및 강성을 확인하여 구조체의 안전성을 입증하기 위한 하중시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

①최대 응력은 3점지지 조건에서 창문 코너 하부에서 발생하였으며, 그 값은 9.98kgf/mm<sup>2</sup>로서 사용재질(A6005A-T6)의 모재부 허용응력 21.9kgf/mm<sup>2</sup> 이내에 있으므로 본 전동차 구조체는 안전한 강도를 가진 것으로 판단된다. 각 하중조건에 대한 최대 응력을 표 9에 정리 하였다.

표 5 각 하중조건별 최대응력 [단위:kgf/mm<sup>2</sup>]

시험항목	Strain Gage No.	발생응력	허용응력	사용재질	발생부위
수직하중	40	9.08	21.9	A6005A-T6	Window Corner
수평압축하중	57	-5.42	11.7	A6005A-T6	Center Sill
3점지지	44	9.98	21.9	A6005A-T6	Window Corner
비틀림 하중	61	2.35	11.7	A6005A-T6	Door Corner

②수직하중시험에서의 사이드실 최대 처짐은 수직하중40.16톤 부하 시 7.87mm로서 판정기준인 13.8mm 이내에 있다. 또 이에 따른 상당 굽힘강성  $EI_{eq} = 0.983 \times 10^{14} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$  으로 나타났다. 이는 판정기준인  $0.6 \times 10^{14} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$  이상이므로 본 구조체는 강도가 충분히 확보된 것으로 판단된다.

③구조체의 굽힘 고유진동수는 약 14.5 Hz이므로 판정기준인 10.0Hz이상을 만족시키고 있다.

이상의 결과로부터 A형 전동차 구조체는 "전동차 구조체 하중시험 방법"에서 규정한 강도 및 강성을 확보한 것으로 판단된다.

### 5-2. 응력 측정결과(B형)

B형 전동차 구조체에 대한 강도 및 강성을 확인하여 구조체의 안전성을 입증하기 위한 하중시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

순번	시험항목	시험기준	시험결과		비교
			1차	2차	
1	압축하중시험(연결기 높이)	표 1 참조	-16.901 (kgf/mm <sup>2</sup> )	-16.879 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:204.45ton, 2차:204.61ton (at Gauge No.5)
2	고유진동수 측정 시험	-	14.5Hz	14.5Hz	-
3	인장하중시험	표 1 참조	12.713 (kgf/mm <sup>2</sup> )	12.763 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:153.16ton, 2차:153.06ton (at Gauge No.5)
4	운행조건하중시험	그림 1 참조	9.050, 1.810 (kgf/mm <sup>2</sup> )	9.676, 1.935 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:34.01ton, 2차:34.06ton 모재부:Gauge No.83 용접부:Gauge No.85
			6.274, 1.255 (kgf/mm <sup>2</sup> )	6.936, 1.387 (kgf/mm <sup>2</sup> )	
5	수직하중시험	표 1 참조	13.359 (kgf/mm <sup>2</sup> )	14.206 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:44.07ton, 2차:44.00ton



					(at Gauge No.83)
6	조합하중시험		15.154 (kgf/mm <sup>2</sup> )	15.161 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:153.11ton, 2차:153.41ton (at Gauge No.83)
7	압축하중시험(캔트레일높이)		-7.394 (kgf/mm <sup>2</sup> )	-7.726 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:31.32ton, 2차:31.82ton (at Gauge No.82)
8	압축하중시험(윈도우가드레일 높이)		-7.190 (kgf/mm <sup>2</sup> )	-6.635 (kgf/mm <sup>2</sup> )	1차:31.01ton, 2차:31.01ton (at Gauge No.36)

※ 운행조건하중의 응력은 평균응력, 변동응력을 나타냄.

※ 운행,수직 및 조합하중의 수직성분 응력은 자중(8.74톤)을 고려한 값임.

②수직하중시험에서의 사이드실 최대 처짐은 수직하중43.737톤 부하 시 6.75mm로서 판정기준인 15.9mm 이내에 있다. 또 이에 따른 상당 굽힘강성  $EI_{eq} = 2.32 \times 10^{14} \text{ kgf}\cdot\text{mm}^2$  으로 나타났다. 이는 판정기준인  $0.6 \times 10^{14} \text{ kgf}\cdot\text{mm}^2$  이상이므로 본 구조체는 강도가 충분히 확보된 것으로 판단된다.

③구조체의 굽힘 고유진동수는 약 14.5 Hz이므로 판정기준인 10.0Hz이상을 만족시키고 있다.

이상의 결과로부터 B형 전동차 구조체는 "전동차 구조체 하중시험 방법"에서 규정한 강도 및 강성을 확보한 것으로 판단된다.

### 5-3. 비교결과

상기와 같이 철도차량 구조체의 용접방법에 따라 응력 및 강성을 비교한 결과 FSW 용접방법을 적용한 B형 전동차의 구조체의 강성이 기존 GMAW 용접방법을 적용한 A형 전동차의 구조체 보다 약2배 정도 높은 것으로 나타났으나 차량의 제원이나 하중조건 등이 동일하지 않아 정확하게 비교하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

### 참고 문헌

1. 고무차륜형 AGT 경량전철 차량용 알루미늄 차체의 개발, 김연수 외 3인 대한기계학회춘계학술대회 논문집, 2003
2. 구조해석 및 시험에 의한 경량화 차체 구조강도 평가, 윤성철 외 3인, 한국철도학회추계학술대회는 문집, 2005
3. Japanese Industrial Standards, "Test methods for static load of body structure of railway rolling stock ", E 7105, 1989
4. 국토해양부, "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준", 구조체 하중시험, 2008
5. 철도차량안전기준에 관한 규칙