

신형전동차 대차프레임 하중시험결과 분석 연구

A Study on Analysis of Load Test Result of Bogie Frame for New Electrical Multiple Unit

김원경* 윤성철** 전창성***
Kim, Won-kyung Yoon, Sung-Cheol Jun, Chang-Sung

ABSTRACT

This paper describes the results of structure analysis and load test of a bogie frame. The purpose of the test is to evaluate the safety and functionality of the bogie frame under maximum load. The bogie system consist of the bogie frame, suspensions, wheel-sets, a brake system and a transmission system. Of these components, the bogie frame is the major component subjected to the vehicle and passenger loads. The evaluation method used the JIS E 4207 specifications throughout static load test. The test results have shown the bogie frame to be safe under design load conditions.

1. 서론

철도차량용 주행장치인 대차는 차체의 하중을 지지하고, 승객 및 차량의 안전, 주행성능 및 승차감에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조부품이다. 주행장치는 크게 대차프레임, 차륜 및 차축, 1차 2차 현가장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달장치 등으로 구성되며, 대차의 구조물이라 할 수 있는 대차프레임은 형상이 복잡하고 하중을 직접 지지할 뿐만 아니라 하중조건도 정적 및 동적하중이 복합적으로 작용하고 있어, 차체자중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동시 발생하는 준정적하중 및 불규칙한 선로와 차체, 주행장치, 윤축의 운동모드에 의한 동하중을 받고 있다. 본 연구에서는 새로 개발된 주행장치의 주요구성품인 대차프레임에 대한 하중시험결과 분석을 통해 피로 강도를 확인하여 대차의 구조 안전성을 평가하고자 한다.

하중시험에 적용된 하중조건은 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 우선 적용하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중, 구동장치하중, 주전동기하중, 브레이크하중의 시험하중에 대한 하중시험을 수행하였으며, 구조해석 결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위에 스트레인게이지를 부착하여 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다.

2. 대차의 하중시험

대차프레임의 구조해석 결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위와 형상변화 등에 의한 응력집중이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

우하중, 구동장치하중, 주전동기하중, 브레이크하중을 측정하였다. 스트레인 게이지는 대차프레임의 대칭성을 고려하여 1/2 부분에 집중적으로 취부하였으며, 중량은 표 1과 같으며 하중시험장치는 그림 1과 같다.

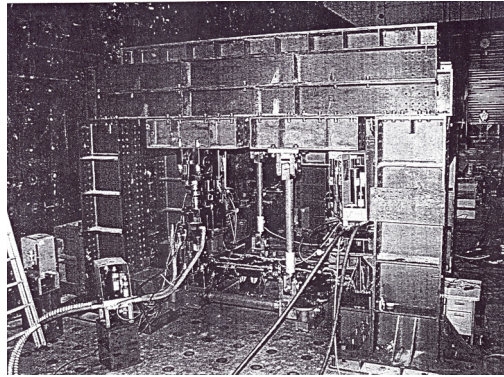


그림 1 시험장비

2.1 하중조건

전동차용 구동대차의 계산중량은 표 1과 같으며 수직하중 등 각 시험하중은 표 1로 부터 계산된다

표 1 구동대차 프레임의 계산 중량

No.	항 목	중 량	비 고
1	공차 중량	39,600	
2	최대 승객하중	30,000	
3	대차 하중	14,200	2 sets
4	스프링하 중량	6,440	2 sets
5	대차당 하중	31,580	[①+ ②-④]/2

표 2 대차 재질의 기계적 성질

(단위 : kgf/mm²)

재 질	항복강도	인장강도	피로강도			비 고
			모재부	G/R부	용접부	
SM490A	33	50	16	11	7	side frame 등 대부분
STKM18B	32	50	14			transom pipe
SS400	25	41	14			stiffener 및 seat 등
SMA490B	33	50	16			anti-roll bar seat

대차프레임에 작용하는 하중은 성능시험의 대차시험에 따라 다음과 같이 계산되며 표 3의 하중조건을 적용하여 하중시험을 수행하였다.

- 1) 수직하중 = 수직정하중 × 1.3g (대차당 수직정하중에 동적효과 0.3g를 고려한 하중)
- 2) 비틀림하중 = 수직정하중 (레일의 불균형에 의해 발생하는 하중)
- 3) 전후하중 = 수직정하중 × 0.3g (주행중 전후진동에 의해 발생하는 하중)
- 4) 좌우하중 = 수직정하중 × 0.3g (주행중 좌우진동에 의해 발생하는 하중)
- 5) 구동장치하중 = 기어반력 (차량의 구동시 휠과 레일 사이의 접촉력에 의해 발생하는 하중)
- 6) 주전동기하중 = 주전동기 중량 + 주전동기 반력 (주전동기의 상하진동에 의해 발생하는 하중)

7) 브레이크하중 = 제동반력 + 제동우력 (제동에 의해 발생하는 하중)

표 3 대차의 하중조건

No.	하중조건	응력기호	하중크기	하중방향	비고
1	수직하중	A	31,580 kg	하방향	정하중(1.0g)
		B	41,054 kg	하방향	동하중(1.3g)
2	비틀림하중	C1	31,580 kg	하방향	2,3위 변위 16.5mm
		C2	31,580 kg	하방향	1,4위 변위 16.5mm
3	전후하중	D1	9,474 kg	전진시	
		D2	9,474 kg	후진시	
4	좌우하중	E1	9,474 kg	좌측방향	
			±2,400	상하방향	Anti-roll bar 반력
		E2	9,474 kg	우측방향	
			±2,400	상하방향	Anti-roll bar 반력
5	구동장치하중	F1	3,974 kg	상하방향(전진시)	
		F2	3,974 kg	상하방향(후진시)	
6	주전동기하중	G1	3,740 kg	하방향(5.0g)	모터반력
		G2	2,440 kg	상방향(3.0g)	490 kg 부가
7	브레이크하중	H1	[5,000+ 1,250] kg	전진시	
		H2	[5,000+ 1,250] kg	후진시	

2.2 판정기준

대차의 강도는 표 2의 대차프레임 각 부위별 재질의 항복응력이하 이어야 하며 조합응력으로 환산하여 피로내구선도상의 위치에 따라 안전성을 평가한다.

3. 대차의 하중시험

대차프레임의 구조해석 결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위와 형상변화 등에 의한 응력집중이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중, 구동장치하중, 주전동기하중, 브레이크하중을 측정하였다. 스트레인 게이지는 대차프레임의 대칭성을 고려하여 1/2 부분에 집중적으로 취부하였으며, 중량은 표 1과 같다.

3.1 대차의 하중시험 결과

3.1.1 수직하중

수직하중 시험결과 측정응력이 13.7 kgf/mm²이상인 측정점들은 표 4와 같다. 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 항복응력이내에 있음을 알 수 있다. 수직하중조건에서의 최대응력은 side frame의 primary spring 부위인(스트레인 게이지 No. 17)에서 발생하였으며, 그 값은 -18.32 kgf/mm²로서 사용재질(SM490A)의 항복응력 33 kgf/mm²이내에 있다.

표 4 수직하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	수직하중 부하 단계(kg)						비고
	0	31580	41054	31580	41054	0	
17	-0.02	-13.95	-18.32	-13.60	-18.26	0.02	
8	0.00	11.02	14.51	11.17	14.51	-0.02	
49	0.02	10.50	13.77	10.65	13.75	-0.06	

3.1.2 비틀림하중

비틀림 하중시험결과 측정응력이 11.0 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 5와 같다. 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 비틀림하중조건에서의 최대응력은 2, 3위 시험시 side frame의 primary spring 부위인(스트레인 게이지 No. 17)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -14.22 kgf/mm² 로서 사용재질(SM490A)의 항복응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

표 5 비틀림하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	비틀림하중 부하 단계(kg+mm)						비고
	0	31580+ 12.4	31580+ 16.5	31580+ 12.4	31580+ 16.5	0	
17	0.00	-14.14	-14.04	-14.22	-14.12	0.06	
8	0.02	11.50	11.60	11.50	11.67	0.00	
49	0.00	11.00	11.17	11.02	11.23	0.00	

3.1.3 전후하중

전후하중 시험결과 측정응력이 5.2 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 6과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 전후하중조건에서의 최대응력은 전진시험시 link bracket(스트레인 게이지 No. 42)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -8.88 kgf/mm² 로서 사용재질(SS400)의 항복응력 25 kgf/mm² 이내에 있다.

표 6 전후하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	전후하중 부하 단계(kg)						비고
	0	7106	9474	7106	9474	0	
42	0.00	-4.87	-8.88	-5.41	-8.86	0.00	
43	0.04	-4.53	-6.43	-4.47	-6.34	0.02	
20	0.00	-3.16	-5.26	-3.43	-5.24	0.02	

3.1.4 좌우하중

좌우하중 시험결과 측정응력이 4.3 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 7과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 좌우하중조건에서의 최대응력은 우측방향시험시 side frame의 하부부위(스트레인 게이지 No. 6)에서 나타나고 있으며, 그 값은 4.45 kgf/mm² 로서 사용재질(SM490A)의 항복응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

표 7 좌우하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	좌우하중 부하 단계(kg)						비고
	0	7106	9474	7106	9474	0	
6	0.00	3.33	4.45	3.37	4.45	0.00	
7	0.00	3.24	4.39	3.35	4.41	0.02	
44	0.00	-3.33	-4.41	-3.33	-4.41	0.00	

좌우하중중 anti-roll bar 반력 시험결과 측정응력이 1.3 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 8과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 좌우하중중 anti-roll bar 반력조건에서의 최대응력은 우측방향시험시 transom pipe(스트레인 게이지 No. 10)에서 나타나고 있으며, 그 값은 8.13 kgf/mm² 로서 사용재질(STKM18B)의 항복응력 32 kgf/mm² 이내에 있다.

표 8 좌우하중(anti-roll bar 반력)시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	좌우하중(anti-roll bar 반력) 부하 단계(kg)						비고
	0	1800	2400	1800	2400	0	
10	0.00	6.13	8.13	6.22	8.09	0.19	
67	0.00	-4.91	-6.43	-4.82	-6.43	0.19	
48	0.00	-1.02	-1.35	-1.00	-1.33	0.04	

3.1.5 구동장치하중

구동장치하중 시험결과 측정응력이 2.9 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 9와 같다. 이 결과들을 살펴 보면 측정 응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 구동장치하중조건에서의 최대응력은 전진시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 13)에서 나타나고 있으며, 그 값은 4.35 kgf/mm² 로서 사용재질(SS400)의 항복응력 25 kgf/mm² 이내에 있다.

표 9 구동장치하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	구동장치하중 부하 단계(kg)						비고
	0	2981×2	3974×2	2981×2	3974×2	0	
13	0.02	3.35	4.35	3.31	4.31	0.00	
14	0.00	3.28	4.25	3.28	4.25	0.00	
67	0.00	2.17	2.90	2.17	2.90	0.00	

3.1.6 주전동기하중

주전동기하중시험결과 측정응력이 4.35 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 10과 같다. 이 결과들을 살펴 보면 측정응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 주전동기하중조건에서의 최대응력은 하 방향작용시 traction motor bracket(스트레인 게이지 No. 38)에서 나타나고 있으며, 그 값은 5.20 kgf/mm² 로서 사용재질(SM490A)의 항복응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

표 10 주전동기하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	주전동기하중 부하 단계(kg)						비고
	0	2805×2	3740×2	2805×2	3740×2	0	
38	-0.02	3.87	5.09	3.97	5.20	0.25	
29	-0.02	3.31	4.45	3.49	4.43	0.15	
12	-0.02	3.26	4.37	3.47	4.35	0.21	

3.1.7 브레이크하중

브레이크하중 시험결과 측정응력이 4.3 kgf/mm² 이상인 측정점들은 표 11과 같다. 이 결과들을 살펴 보면 측정 응력들은 모두 항복응력 이내에 있음을 알 수 있다. 브레이크하중조건에서의 최대응력은 후진시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 5)에서 나타나고 있으며, 그 값은 5.14 kgf/mm² 로서 사용재질(SM490A)의 항복응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

표 11 브레이크하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	브레이크하중 부하 단계(kg)						비고
	0	3750+ 938	5000+ 1250	3750+ 938	5000+ 1250	0	
5	0.00	3.89	5.14	3.87	5.14	0.00	
49	0.00	3.74	4.97	3.64	4.99	0.02	
4	0.00	3.33	4.37	3.37	4.37	0.00	

3.1.8 조합응력

시험결과 응력을 조합응력으로 환산하여 피로내구선도를 이용하여 무한수명여부를 판정한다. 조합응력은 평균응력과 응력진폭으로 구분되며 다음과 같이 계산된다. 여기서 응력기호는 표 3에 정의 되어 있다.

○ 주행시

- 평균응력

$$\sigma_m = A + \left[\frac{(C1 - A) + (C2 - A)}{2} \right] + \left[\frac{D1 + D2}{2} \right] + \left[\frac{E1 + E2}{2} \right] + \left[\frac{F1 + F2}{2} \right] + \left[\frac{G1 + G2}{2} \right]$$

- 응력진폭

$$\sigma_a = \sqrt{[B - A]^2 + \left[\frac{(C1 - A) - (C2 - A)}{2} \right]^2 + \left[\frac{D1 - D2}{2} \right]^2 + \left[\frac{E1 - E2}{2} \right]^2 + \left[\frac{F1 - F2}{2} \right]^2 + \left[\frac{G1 - G2}{2} \right]^2}$$

○ 제동시

- 평균응력

$$\sigma_m = A + \left[\frac{(C1 - A) + (C2 - A)}{2} \right] + \left[\frac{D1 + D2}{2} \right] + \left[\frac{E1 + E2}{2} \right] + \left[\frac{G1 + G2}{2} \right] + \left[\frac{H1 + H2}{2} \right]$$

- 응력진폭

$$\sigma_a = \sqrt{[B - A]^2 + \left[\frac{(C1 - A) - (C2 - A)}{2} \right]^2 + \left[\frac{D1 - D2}{2} \right]^2 + \left[\frac{E1 - E2}{2} \right]^2 + \left[\frac{G1 - G2}{2} \right]^2 + \left[\frac{H1 - H2}{2} \right]^2}$$

조합된 평균응력과 응력진폭의 분포를 주행시와 제동시로 구분하여 나타내었다. 용접부, 용접 후 그라인딩부, 모재부에서의 평균응력과 응력진폭이 모두 피로내구선도상의 안전영역에 위치하고 있다.

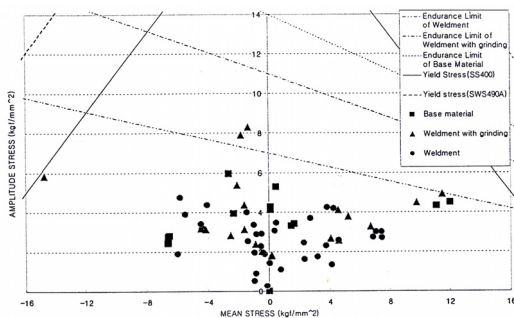


그림 6 주행시의 피로내구선도

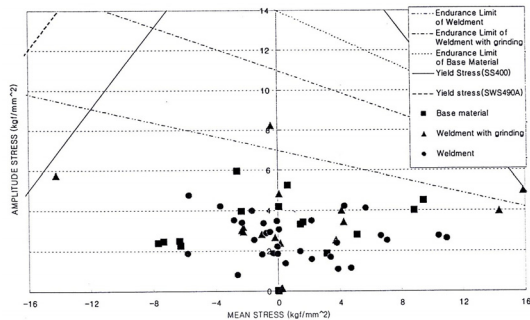


그림 7 제동시의 피로내구선도

3.1.9 스트레인게이지 설치

아래 그림과 같이 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위에 67개의 스트레인게이지를 취부하였다.

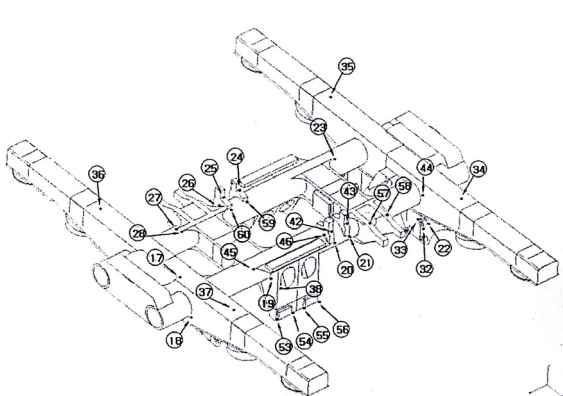


그림 8 스트레인게이지 취부도 (top view)

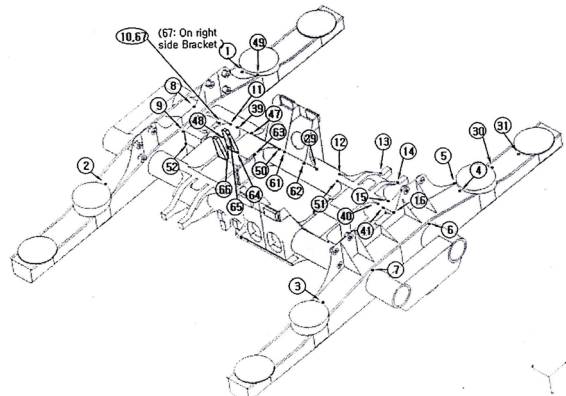


그림 9 스트레인게이지 취부도 (bottom view)

4. 결 론

신형전동차 대차프레임에 대하여 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 최대응력 발생부위는 수직하중시 side frame의 primary spring 에서 -18.32 kgf/mm^2 , 비틀림하중시 side frame의 primary spring 에서 14.22 kgf/mm^2 으로 사용재질의 항복응력의 이내에 포함된다.
- 2) 조합응력에서 용접부, 용접 후 그라인딩부, 모재부에서의 평균응력과 응력진폭이 모두 피로내구선도상의 안전영역에 위치하고 있어 대차프레임은 조합하중에 대한 피로강도를 만족하는 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 신형전동차 대차프레임은 충분한 정적강도와 피로강도를 갖고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 대차 하중시험, 2000
2. 한국표준협회, “철도차량용 대차 스톱 설계 통칙”, R 9210, 1996
3. 건설교통부, “도시철도차량 표준사양”, 1998
4. Japanese Industrial Standards, “Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design”, E 4207, 1992