

고속용 전동차 대차의 하중시험에 관한 연구

김원경*(한국철도기술연구원), 윤성철(한국철도기술연구원),
전창성(한국철도기술연구원), 권성태(한국철도기술연구원)

A Study on Load Test of Bogie for High Speed Electrical Multiple Unit

W. K. Kim(KRRI) , S. C. Yoon(KRRI) , C. S. Jun(KRRI) , S. T. Kwon(KRRI)

ABSTRACT

This paper describes the result of load test of a bogie frame. The purpose of test is to evaluate the safety which bogie frame shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load. Bogie system consist of the bogie frame, suspensions, wheel-sets, a brake system and a transmission system. Among these component, the bogie frame is most significant component subjected to the vehicle and passenger loads. The evaluation method is used the JIS E 4207 specifications throughout the static load test. The test results have shown the bogie frame to be safe and stable under design load conditions.

Key Words : Bogie frame (대차틀), Load test (하중시험)

1. 서론

철도차량용 주행장치인 대차는 차체의 하중을 지지하고, 승객 및 차량의 안전, 주행성능 및 승차감에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조부품이다. 주행장치는 크게 대차틀, 차륜 및 차축, 1차 2차 현가장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달장치 등으로 구성되며, 대차의 구조물이라 할 수 있는 대차틀은 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 주행장치의 주요구성품인 대차틀에 대하여 하중시험을 통해 강도를 확인하여 대차의 구조 안정성을 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 스트레인 게이지를 부착하여 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다.

2. 대차의 하중시험

대차틀의 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 대차틀의 대칭성을 고려하여 1/2 부분에 집중적으로 취부하였으며, 중량은 table 1과 같으며 하중시험장치는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1 Load test installation

2.1 하중조건

전동차용 구동대차의 계산중량은 table 1과 같으며 수직하중 등 각 시험하중은 table 1로부터 계산된다

Table 1 Weight of bogie frame

No	항 목	중 량	비 고
1	공차 중량	32,800	
2	최대 승객하중	24,000	
3	대차 하중	13,614	2 sets
4	스프링하 중량	6,852	2 sets
5	대차당 하중	24,974	[① ② ④ ②

Table 2 Mechanical property of bogie frame

(단위 : kgf/mm²)

재 질	항복 강도	인장 강도	피로강도		비 고	
			모재부	G/R 용접부		
SWS 490A	33	50	16	11	7	side frame, transom support bracket, T/M bracket, stiffener
STKM 18B	32	50	14			transom pipe
SS400	25	41	14			stiffener, seat

대차들에 작용하는 하중은 성능시험의 대차시험에 따라 다음과 같이 계산되며 table 3의 하중조건을 적용하여 구조해석을 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)

Table 3 Load condition of bogie frame

No	하중조건	하중크기	하중방향	비 고
1	수직하중	24,974 kg	하방향	정하중(1.0g)
		32,466 kg	하방향	동하중(1.3g)
2	비틀림하중	24,974 kg	하방향	2,3 변위
		24,974 kg	하방향	1,4 변위
3	전후하중	7,492 kg	전진시	
		7,492 kg	후진시	
4	좌우하중	7,492 kg	좌측방향	
		7,492 kg	우측방향	
5	구동장치 하중	3,837 kg	상하방향 ()	
		3,837 kg	상하방향 ()	
6	주전동기 하중	3,673 kg	하방향 (5.0g)	
		2,373 kg	상방향 (3.0g)	
7	브레이크 하중	3,405+ 936 kg	전진시	
		3,405+ 936 kg	후진시	

2.2 판정기준

대차들의 강도는 table 2의 대차 각 부위별 재질의 허용응력이하 이어야 하며 조합응력으로 환산하여 피로내구선도상의 위치에 따라 안전성을 평가한다.

3. 하중시험 결과

3.1 수직하중

수직하중 시험결과 측정응력이 3.0 kgf/mm²이상인 측정점들은 table 4와 같다. 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 수직하중조건에서의 최대응력은 brake hanger bracket (스트레인 게이지 No. 52)에서 발생하였으며, 그 값은 13.52 kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm²이내에 있다.

Table 4 Stress measure of vertical load

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	수직하중 부하 단계(kg)				비고
	0	24,974	32,466	0	
52	0.20	10.93	13.52	0.30	
55	0.12	7.98	9.82	0.30	
56	0.16	7.56	9.60	0.34	
53	0.18	7.83	9.42	0.26	
59	0.14	2.90	3.06	0.36	

3.2 비틀림하중

비틀림 하중시험결과 측정응력이 4.2 kgf/mm² 이상인 측정점들은 table 5와 같다. 이 결과들을 살펴보면

전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 비틀림하중조건에서의 최대응력은 2,3위 시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 52)에서 나타나고 있으며, 그 값은 11.66 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 5 Stress measure of twist load

(단위 : kgf/mm²)

S/G	비틀림하중 부하 단계(kg)				비고
No.	0	18,731	24,974	0	
52	0.04	8.55	11.66	-0.34	
55	0.08	7.12	9.48	-0.10	
53	0.06	6.54	8.82	-0.28	
56	0.12	6.51	8.69	-0.12	
30	-0.34	3.63	4.23	0.48	

3.3 전후하중

전후하중 시험결과 측정응력이 4.9 kgf/mm² 이상인 측정점들은 table 6과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

전후하중조건에서의 최대응력은 전진시험 시 Mono Link bracket(스트레인 게이지 No. 47)에서 나타나고 있으며, 그 값은 9.71 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 6 Stress measure of longitudinal load

(단위 : kgf/mm²)

S/G	전후하중 부하 단계(kg)				비고
No.	0	5,619	7,492	0	
47	0.11	7.32	9.71	0.30	
30	0.62	6.72	8.45	0.50	
43	0.55	5.55	7.01	0.49	
46	0.57	4.00	5.06	0.53	
42	0.59	4.00	4.91	0.49	

3.4 좌우하중

좌우하중 시험결과 측정응력이 -6.5 kgf/mm² 이상인 측정점들은 table 7과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

좌우하중조건에서의 최대응력은 좌하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 11)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -6.45 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 7 Stress measure of lateral load

(단위 : kgf/mm²)

S/G	좌우하중 부하 단계(kg)				비고
No.	0	5,619	7,492	0	
37	-0.02	-1.09	-1.75	0.02	
44	-0.12	-1.05	-1.78	0.06	
5	-0.16	-1.85	-2.96	0.08	
6	-0.24	-1.69	-3.04	0.66	
11	-0.18	-4.48	-6.45	-0.02	

3.5 구동장치하중

구동장치하중 시험결과 측정응력이 2.5 kgf/mm² 이상인 측정점들은 table 8과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

구동장치하중조건에서의 최대응력은 전진하중시험시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 50)에서 나타나고 있으며, 그 값은 6.93 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 8 Stress measure of driving gear load

(단위 : kgf/mm²)

S/G	구동장치하중 부하 단계(kg)				비고
No.	0	2,878	3,837	0	
50	0.10	5.15	6.93	0.10	
49	0.10	3.99	5.27	0.56	
35	-0.02	2.89	3.51	0.56	
26	-0.02	2.64	3.02	0.70	
8	-0.08	2.30	2.52	0.86	

3.6 주전동기하중

주전동기하중시험결과 측정응력이 -8.1 kgf/mm² 이상인 측정점들은 table 9과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

주전동기하중조건에서의 최대응력은 하방향 하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 39)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -8.06 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 9 Stress measure of traction motor load

(단위 : kgf/mm²)

S/G	주전동기하중 부하 단계(kg)				비고
No.	0	2,755	3,673	0	
48	0.32	-3.88	4.58	-0.20	
33	0.20	-3.51	4.39	-0.34	
13	0.04	3.71	-5.11	-0.56	
23	-0.16	3.93	-5.37	-0.54	
39	0.08	5.35	-8.06	-0.52	

3.7 브레이크하중

브레이크하중 시험결과 측정응력이 -4.9 kgf/mm^2 이상인 측정점들은 table 10과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

브레이크하중조건에서의 최대응력은 후진시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 57)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -4.81 kgf/mm^2 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm^2 이내에 있다.

Table 10 Stress measure of brake load

(단위 : kgf/mm^2)

S/G No.	브레이크하중 부하 단계(kg)				비고
	0	2,554+	3,405+	0	
58	0.63	-1.08	-1.90	-0.42	
53	0.57	-0.93	-2.03	-0.40	
52	0.57	-1.41	-2.76	-0.40	
59	0.64	-1.35	-3.05	-0.40	
57	0.64	-3.11	-4.81	-0.57	

3.8 조합응력

시험결과 중에서 응력이 보다 큰 값을 나타내는 결과를 사용하여 조합응력 및 피로내구선도를 구하였다. 조합응력 계산식에서 응력기호는 table 3에 표시되어 있고 계산결과 조합응력의 평균응력이 6.6 kgf/mm^2 이상인 측정점들과 응력진폭이 6.2 kgf/mm^2 이상인 측정점들은 table 11, 12와 같으며 Fig. 2, 3에 피로내구선도를 나타내었다. 이 결과들을 살펴보면 조합응력에서 평균응력이 높게 나타나고 있는 부위는 제동시 air spring seat (스트레인게이지 No. 5, 그라인딩)에서 -12.22 kgf/mm^2 이며 응력진폭이 높게 나타나고 있는 부위는 주행시 mono link bracket(스트레인게이지 No. 47, 모재)에서 9.68 kgf/mm^2 이며 Fig. 10, 11과 같이 모두 각 부위별 안전역에 위치하고 있다

Table 11 Combined stress result (mean stress)

(단위 : kgf/mm^2)

S/G No.	조합응력()		조합응력()		비고
	평균 응력	응력 진폭	평균 응력	응력 진폭	
5	-11.89	4.28	-12.22	4.27	그라인딩
6	-11.57	4.92	-11.99	4.53	그라인딩
53	10.40	2.15	7.68	2.03	모재
52	13.81	3.03	10.24	3.02	모재
55	10.47	3.20	10.48	3.01	모재

Table 12 Combined stress result (stress amplitude)

(단위 : kgf/mm^2)

S/G No.	조합응력()		조합응력()		비고
	평균 응력	응력 진폭	평균 응력	응력 진폭	
47	0.75	9.68	0.89	9.50	모재
30	1.74	8.79	1.50	8.78	모재
43	0.09	8.51	-0.25	8.45	모재
12	1.61	7.68	1.18	7.65	모재
21	1.70	7.58	1.19	7.59	모재

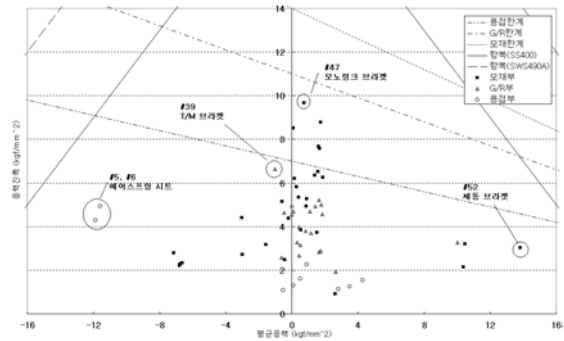


Fig. 2 Fatigue endurance diagram for driving mode

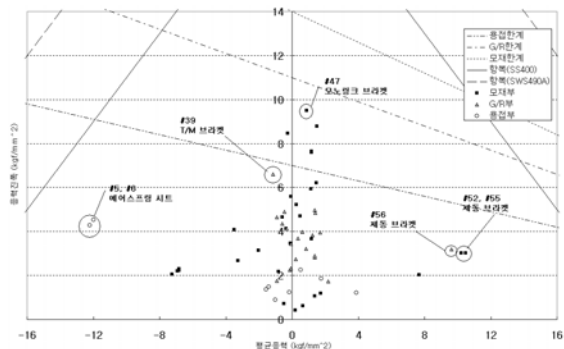


Fig. 3 Fatigue endurance diagram for braking mode

4. 결론

도시철도차량의 대차에 대하여 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 최대응력 발생부위는 수직하중시 Brake hanger brk의 하단 곡률부에서 13.52 kgf/mm^2 , 비틀림하중시 Brake hanger brk의 하단 곡률부에서 11.66 kgf/mm^2 으로 사용재질의 허용응력의 이내에 포함된다.

2) 조합응력계산결과 최대 평균응력은 제동시 airspring seat(그라인딩)에서 발생된 12.22 kgf/mm^2 이며,

최대 응력진폭은 주행시 link bracket(모재)의 연결부에서 발생된 9.68 kgf/mm^2 이다.

3) 시험결과 모든 조합응력은 피로내구선도상의 안전역에 위치하고 있다.

이상의 결과로부터 대구시 전동차 대차들은 충분한 정적강도와 피로강도를 갖고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 구조체 하중시험, 2000
2. Japanese Industrial Standards, “Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design”, E 4207, 1992
3. Japanese Industrial Standards, “Test Methods of Static Load for Truck Frames and Truck Bolsters of Railway Rolling Stock”, E 4208, 1988
4. 한국표준협회, “철도차량용 대차 스톱 설계 통칙”, R 9210, 1996