

하중시험에 의한 대차의 강도 평가

Strength Evaluation of Bogie by Loading Test

유성철* 권성태* 김명룡* 이강원**

Yoon, Sung-Cheol Kwon, Sung-Tae Kim, Myung-Rong Lee, kang-won

ABSTRACT

This paper describes the result of load test of bogie frame. The purpose of test is to evaluate an safety which bogie frame shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load. Bogie system consist of bogie frame, suspensions, wheel-sets, brake system and transmission system. Among these component, the bogie frame is the most significant component subjected to the vehicle and passenger loads. The evaluation method is used the JIS E 4207 specification throughout the static load test. The test results have been very safety and stable for 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 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, 차체사중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동시 발생하는 준정적하중 및 불규칙한 선로와 차체, 주행장치, 윤추의 운동모드에 의한 동하중을 받고 있다. 본 연구에서는 주행장치의 주요구성품인 대차틀에 대하여 구조해석을 실시한 결과를 바탕으로 하중시험을 통해 강도를 확인하여 대차의 구조 안정성을 평가하고자 한다. 먼저 유한요소법을 사용하여 각 하중조건인 하중을 작용시킨 후 그 해석결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위에 스트레인게이지를 부착하여 대차틀의 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중, 구동경차하중, 주전동기하중, 브레이크하중 등의 하중시험을 수행하였으며 시험결과 중에서 응력이 보다 큰 값을 나타내는 결과를 사용하여 조합응력 및 피로내구선도를 구하였다.

2. 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 부분이 집중적으로 취부하였으며, 중량은 표 1과 같으며 하중시험장치는 그림 1과 같다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

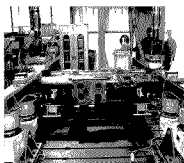


그림 1 하중시험장치

2.1 하중조건

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

표 1 구동대차 프레임의 계산 중량

항 목	중 량	비 고
공차 중량	32,500	
최대 승객하중	24,000	
대차 하중	13,358	2 sets
스프링하 중량	6,325	2 sets
대차당 하중	25,090	[①+②-④]/2

표 2 대차 재질의 기계적 성질

재 질	허용응력	비 고
SWS490A	33kgf/mm ²	side frame, transom support bracket, T/M bracket, stiffener
STKM18B	32kgf/mm ²	transom pipe
SS400	24kgf/mm ²	bracket

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 회로 레일 사이의 점착력에 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	25,088 kg	하방향	정하중(1.0g)
		B	32,614 kg	하방향	동하중(1.3g)
2	비틀림하중	C1	25,088 kg	하방향	2.3위 변위
		C2	25,088 kg	하방향	1.4위 변위
3	전후하중	D1	7,527 kg	전진시	
		D2	7,527 kg	후진시	
4	좌우하중	E1	7,527 kg	좌측방향	
		E2	7,527 kg	우측방향	
5	구동장치하중	F1	2,318 kg	상하방향(전진시)	
		F2	2,318 kg	상하방향(후진시)	
6	추진동기하중	G1	3,650 kg	하방향(5.0g)	
		G2	2,330 kg	상방향(3.0g)	
7	브레이크하중	H1	5,097+1,274 kg	전진시	1, 2위
		H2	5,097+1,274 kg	후진시	1, 2위
		H3	5,097+1,274 kg	전진시	3, 4위
		H4	5,097+1,274 kg	후진시	3, 4위

2.2 평가기준

대차의 강도는 표 2의 대차 각 부위별 재질의 허용응력이하 이어야 하며 조합응력으로 판산하여 페르노구선도를 이용하여 평가한다.

3. 대차의 하중시험 결과

3.1 수직하중시험

수직하중 시험결과 측정응력이 11.2 kg/mm²이상인 측정점들은 표 4와 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력이내에 있음을 알 수 있으며 수직하중조건에서의 최대응력은 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 7)에서 발생하였으며, 그 값은 14.07 kg/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm²이내에 있다.

표 4 수직하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm²)

S/G	수직하중 부하 단계(kg)									비고
No.	0	8125	16250	25088	32614	25088	16250	8125	0	
7	0	3.52	6.95	10.79	14.07	10.79	6.95	3.52	0	
5	0.07	-3.46	-7.02	-10.77	-13.84	-10.77	-7	-3.44	0.13	
6	0.02	2.8	5.52	8.59	11.29	8.61	5.5	2.78	0	

3.2 비틀림하중시험

비틀림 하중시험결과 측정응력이 8.5 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 5와 같다. 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 비틀림하중조건에서의 최대응력은 1.4위 시험시 side frame의 primary spring 하부부위인(스트레인게이지 No. 5)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -11.43 kg/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm² 이내에 있다.

표 5 비틀림하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm²)

S/G	비틀림하중 부하 단계(kg)							비고
No.	0	8125	16250	25088	16250	8125	0	
5	-0.01	-3.8	-7.30	-11.43	-7.37	-3.72	0.13	
7	0.02	3.5	6.89	10.47	6.91	3.5	0.15	
6	0	2.78	5.54	8.5	5.58	2.8	0.1	

3.3 전후하중

전후하중 시험결과 측정응력이 6.9 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 6과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

전후하중조건에서의 최대응력은 전전시험 시 Mono link bracket(스트레인 게이지 No. 24)에서 나타나고 있으며, 그 값은 9.77 kg/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm² 이내에 있다.

표 6 전후하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm²)

S/G No.	전후하중 부하 단계(kg)							비고
	0	2509	5018	7527	5018	2509	0	
24	-0.03	3.28	6.66	9.77	6.3	3.07	-0.19	
48	-0.04	2.34	4.84	7.03	4.51	2.26	-0.12	
44	-0.04	2.19	4.59	6.9	4.48	2.19	-0.1	

3.4 좌우하중

좌우하중 시험결과 측정응력이 3.22 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 7과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

좌우하중조건에서의 최대응력은 좌하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 39)에서 나타나고 있으며, 그 값은 5.79 kg/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm² 이내에 있다.

표 7 좌우하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm²)

S/G No.	좌우하중 부하 단계(kg)							비고
	0	2509	5018	7527	5018	2509	0	
39	-0.06	-2.04	-4.05	-5.79	-3.79	-1.8	-0.18	
36	-0.08	-1.7	-2.82	-4.08	-2.78	-1.56	-0.2	
5	-0.06	-0.67	-1.68	-3.22	-2.37	-1.52	-0.17	

3.5 구동장치하중

구동장치하중 시험결과 측정응력이 3.6 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 8과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

구동장치하중조건에서의 최대응력은 후전하중시험시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 33)에서 나타나고 있으며, 그 값은 7.12 kg/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm² 이내에 있다.

표 8 구동장치하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm²)

S/G No.	구동장치하중 부하 단계(kg)							비고
	0	772	1544	2318	3245	1544	772	
33	-0.02	1.59	3.26	4.99	7.12	3.2	1.61	0.09
29	-0.04	-1.48	-2.88	-4.42	-6.27	-2.7	-1.34	0.06
27	-0.04	0.69	1.54	2.5	3.63	1.48	0.75	0.08

3.6 주전동기하중

주전동기하중시험결과 측정응력이 5.4 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 9와 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

주전동기하중조건에서의 최대응력은 상하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 35)에서 나타나고 있으며, 그 값은 7.55 kg/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm² 이내에 있다.

표 9 주전동기하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm)

S/G No.	주전동기하중 부하 단계(kg)							비고
	0	780	1560	2350	1560	780	0	
35	0.02	2.54	5.03	7.55	4.99	2.52	0.06	
30	0.02	1.98	3.94	5.93	3.98	2.04	0.05	
59	0	1.79	3.61	5.48	3.65	1.89	0.08	

3.7 브레이크하중

브레이크하중 시험결과 측정응력이 2.7 kg/mm 이상인 측정점들은 표 10과 같다. 이 결과들을 살펴 보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

브레이크하중조건에서의 최대응력은 전진시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 11)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -5.03 kg/mm 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kg/mm 이내이다.

표 10 브레이크하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kg/mm)

S/G No.	브레이크하중 부하 단계(kg)							비고
	0	1700+420	3400+840	5097+1274	3400+840	1700+420	0	
11	0	-1.79	-3.43	-5.03	-4.04	-2.34	0.03	
7	0.04	-1.22	-2.48	-3.7	-2.34	-1.08	0.16	
6	0.02	-0.93	-1.89	-2.78	-1.74	-0.79	0.12	

3.8 조합응력

시험결과 중에서 응력이 보다 큰 값을 나타내는 결과들 사용하여 조합응력 및 피로내구선도를 구하였다. 아래의 조합응력 계산식에서 응력기호는 표 3에 표시되어 있고 계산결과 조합응력의 평균응력이 3.1 kg/mm 이상인 측정점들과 응력진폭이 4.7 kg/mm 이상인 측정점들은 표 11, 12와 같으며 그림 2, 3에 피로내구선도를 나타내었다. 이 결과들을 살펴보면 조합응력에서 평균응력이 높게 나타나고 있는 부위는 주행시 air spring seat(스트레인게이지 No. 5, 트라인딩)에서 -11.52 kg/mm, brake hanger bracket(스트레인게이지 No. 7, 모재)에서 10.68 kg/mm이며 응력진폭이 높게 나타나고 있는 부위는 주행시 link bracket(스트레인게이지 No. 24, 모재)에서 9.87 kg/mm이며 그림 2, 3과 같이 모두 각 부위 별 안전역에 위치하고 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

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

○ 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

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

표 11 조합응력 결과(평균응력)

S/G No.	조합응력(구동)		조합응력(제동)		비고
	평균 응력	유역 진폭	평균 응력	유역 진폭	
5	-11.52	4.56	-11.48	4.55	그라인팅
7	10.68	3.75	6.98	3.62	모재
6	8.52	3.03	5.74	2.07	모재
9	8.50	4.05	9.42	3.78	모재
10	8.07	4.09	8.65	3.85	그라인팅

표 12 조합응력 결과(응력진폭)

S/G No.	조합응력(구동)		조합응력(제동)		비고
	평균 응력	유역 진폭	평균 응력	유역 진폭	
24	-0.09	9.87	0.04	9.84	모재
35	0.41	8.10	0.59	8.10	모재
48	0.35	7.88	0.29	7.85	모재
44	0.60	7.13	0.58	7.13	모재
45	0.52	6.76	0.52	6.76	모재



그림 2 주행시의 피로내구성선도

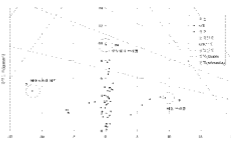


그림 3 제동시의 피로내구성선도

4. 결론

도시철도차량의 대차에 대하여 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 하중시험결과 최대응력은 수직하중시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 7)에서 14.07 kg/mm², 비틀림하중시 side frame의 primary spring 하부부위(스트레인 게이지 No. 5)에서 -11.43 kg/mm², 전후하중시 Mono link bracket(스트레인 게이지 No. 24)에서 9.77 kg/mm², 좌우하중시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 39)에서 -5.79 kg/mm², 구동장치하중시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 33)에서 7.12 kg/mm², 추진동기하중시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 35)에서 7.55 kg/mm², 브레이크하중시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 11)에서 -5.03 kg/mm² 이 발생하였다.

2) 조합응력에서 최대평균응력은 주행시 air spring seat(스트레인게이지 No. 5, 그라인팅)에서 -11.52 kg/mm², brake hanger bracket(스트레인게이지 No. 7, 모재)에서 10.68 kg/mm²이며 최대응력진폭은 주행시 link bracket(스트레인게이지 No. 24, 모재)에서 9.87 kg/mm²이며 모두 각 부위별 안전역에 위치하고 있으므로 대차프레임은 조합하중에 의한 피로상도를 만족하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준", 대차 하중시험, 2000
2. 건설교통부, "도시철도차량 안전기준에 관한 규칙", 주행상지의 안전기준, 2000
3. 한국표준협회, "철도차량용 대차 스프링 설계 통칙", R 9210, 1986
4. Japanese Industrial Standards, "Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design", F 4207, 1932