

전동차 구동대차의 구조해석 및 하중시험 비교 고찰

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

A Comparison on Structure Analysis and Load Test of Driving Bogie for Electrical Multiple Unit

W. K. Kim(KRRI), S. C. Yoon(KRRI), S. T. Kwon(KRRI), O. J. Park(KRRI)

ABSTRACT

This paper describes the result of structure analysis and load test for bogie frame. The purpose of the analysis and test is to evaluate an safety which body structure shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load. Bogie system consists of bogie frame, suspensions, wheel-sets, braking system and 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 specification throughout the FEM analysis and static load test. The analysis and test results have been very safety and stable for design load conditions.

Key Words : Driving bogie frame (구동대차틀), Finite Element Method (유한요소법), Stress analysis (응력해석), 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, 대차틀은 형상이 복잡하고 하중을 직접 지지할 뿐만 아니라 하중조건도 정적 및 동적하중이 복합적으로 작용하고 있어 차체 자중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동시 발생하는 하중 및 불규칙한 선로와 차체, 주행장치, 윤축의 운동모드에 의한 동하중을 받고 있다. 본 연구에서는 주행장치의 주요 구성품인 대차틀에 대하여 먼저 구조해석을 실시한 후 이를 바탕으로 하중시험을 통해 강도를 확인하여 대차의 구조 안정성을 평가하고자 한다. 구조해석에 적용된 하중조건은 도시철도차량의 안전기준에 관한 규칙 및 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 우선 적용하여 구조해석을 수행하였으며, 하중시험은 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다.

2. 대차의 구조해석

2.1 해석 모델

본 해석은 볼스타리스형 용접구조이며 1차 현가장치인 Roll rubber spring과 2차 현가장치인 Air spring으로 구성된 구동대차 프레임에 대하여 유한요소법을 이용하여 대차프레임 강도평가를 시행하였다. 해석은 쉘요소와 솔리드 요소를 사용하였고 Roll rubber spring은 스프링요소를 사용하였다. 해석모델은 Fig. 1과 같다.

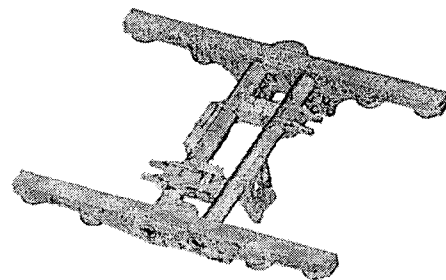


Fig. 1 Analysis model of driving bogie frame

2.2 하중조건

전동차용 구동대차의 계산 중량은 Table 1과 같으며 수직하중 등 각 시험하중은 Table 1로 부터 계산된다

Table 1 Weight of driving bogie frame

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

대차프레임에 작용하는 하중은 성능시험의 대차 시험에 따라 다음과 같이 계산되며 Table 2의 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 점착력에 의해 발생하는 하중)
- 6) 주전동기하중 = 주전동기 중량 + 주전동기 반력 (주전동기의 상하진동에 의해 발생하는 하중)
- 7) 브레이크하중 = 제동반력 + 제동우력 (제동에 의해 발생하는 하중)

Table 2 Load condition of driving bogie frame

No	하중조건	하중크기	하중방향	비고
1	수직하중	25,088 kg	하방향	정하중(1.0g)
		32,614 kg	하방향	동하중(1.3g)
2	비틀림하중	25,088 kg	하방향	2,3위 변위 16.5mm
		25,088 kg	하방향	1,4위 변위 16.5mm
3	전후하중	7,527 kg	전진시	
		7,527 kg	후진시	
4	좌우하중	7,527 kg	좌측방향	
		7,527 kg	우측방향	
5	구동장치하중	2,318 kg	상하방향 (전진시)	
		2,318 kg	상하방향 (후진시)	

6	주전동기하중	3,650 kg	하방향 (5.0g)	
		2,350 kg	상방향 (3.0g)	
7	브레이크하중	5,097+ 1,274 kg	전진시 후진시	1. 2위
		5,097+ 1,274 kg	전진시 후진시	3. 4위

Table 3 Mechanical property of driving bogie frame

NO	재 질	허용응력	비 고
1	SWS490A	33kgf/mm ²	side frame T/M bracket
2	STKM18B	32kgf/mm ²	transom pipe
3	SS400	24kgf/mm ²	bracket

2.3 판정기준

대차의 강도는 Table 3의 대차 각 부위별 재질의 허용응력이하 이어야 하며 조합응력으로 환산하여 피로내구선도상의 위치에 따라 안전성을 평가한다.

2.4 대차의 구조해석 결과

2.4.1 하중조건별 최대응력

각 하중조건별 응력분포는 Table 4와 같으며 Fig. 2~8에서 보여주고 있다. Table 4에서 보는 바와 같이 수직하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 13.8 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 2에 나타내었고, 비틀림하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 10.95 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 3에 나타내었고, 전후하중시 최대응력은 Mono link bracket에서 10.90 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig.4에 나타내었고, 좌우하중시 최대응력은 transom support bracket에서 6.0 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 5에 나타내었고, 구동장치하중시 최대응력은 Gear hanger bracket에서 3.23 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SS400(24.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig.6에 나타내었고, 주전동기하중시 최대응력은 Transom에서 9.0 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 STKM18B(24.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig.7에 나타내었고, 브레이크하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 5.92 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SS400(24.0 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig.8에 나타내었다.

Table 4 Maximum stress of load condition

(단위 : kgf/mm²)

NO	하중조건	최대응력	허용력	재질	비고
1	수직하중	13.80	33.0	SWS490A	Brake hanger brk
2	비틀림 하중	10.95	33.0	SWS490A	Brake hanger brk
3	전후하중	10.90	33.0	SWS490A	Mono link brk
4	좌우하중	6.00	33.0	SWS490A	Transom support brk
5	구동장치 하중	3.23	24.0	SS400	Gear hanger brk
6	주전동기 하중	9.00	24.0	STKM188	Transom
7	브레이크 하중	5.92	24.0	SS400	Brake hanger brk

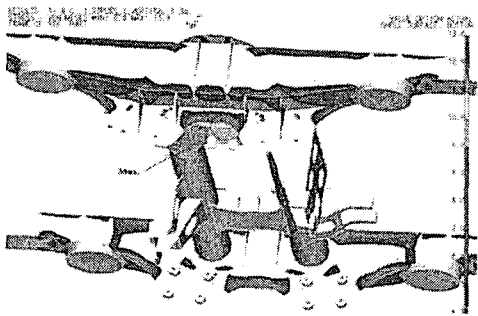


Fig. 2 Stress diagram of vertical load

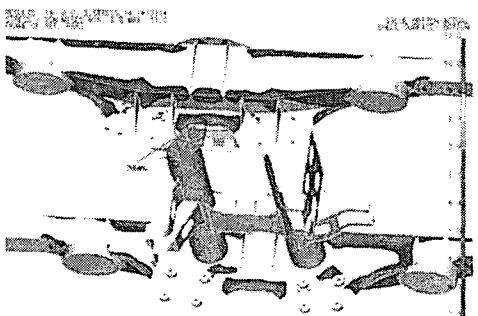


Fig. 3 Stress diagram of twist load

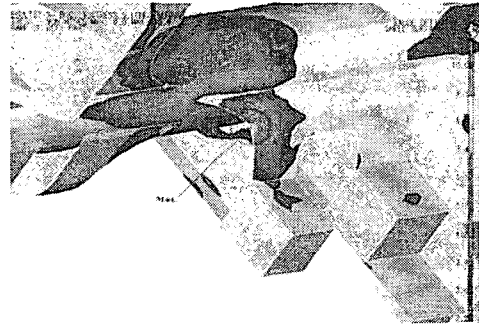


Fig. 4 Stress diagram of longitudinal load

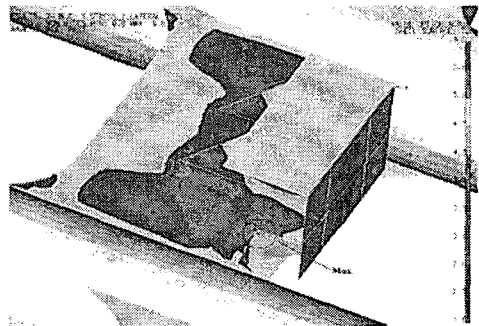


Fig. 5 Stress diagram of lateral load

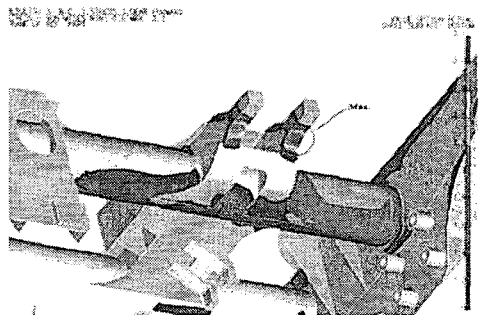


Fig. 6 Stress diagram of driving gear load

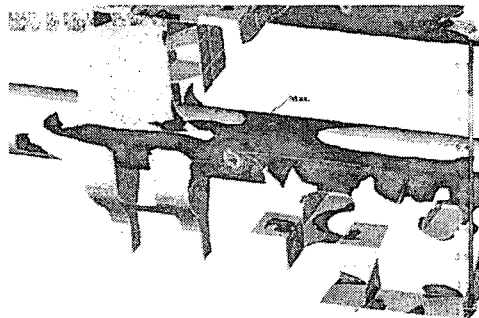


Fig. 7 Stress diagram of traction motor load

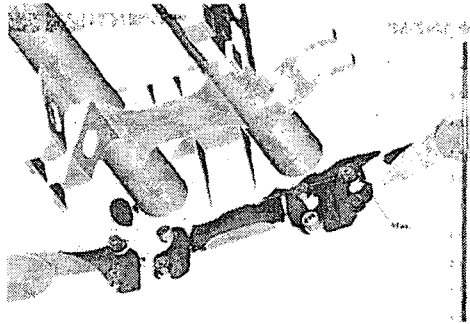


Fig. 8 Stress diagram of brake load

3. 대차의 하중시험

대차프레임의 구조해석 결과를 참고하여 각 하중 조건에서 높은응력이 예상되는 부위와 형상변화 등에 의한 응력집중이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중 등을 측정하였다. 스트레인 게이지는 대차프레임의 대칭성을 고려하여 1/2 부분에 집중적으로 취부하였으며, 중량은 Table 1과 같으며 시험장비 설치도는 Fig. 9와 같다.

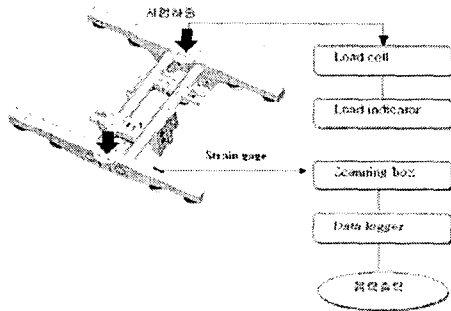


Fig. 9 Arrangement diagram of test equipment

3.1 대차의 하중시험 결과

3.1.1 수직하중시험

수직하중 시험결과 측정응력이 11.2 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 5와 같다. 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 7)에서 발생하였으며, 그 값은 14.07 kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 5 Stress measure of vertical load

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	수직하중 부하 단계(kg)								
	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

3.1.2 비틀림하중시험

비틀림 하중시험결과 측정응력이 8.5 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 6과 같다. 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 1.4위시험 시 side frame의 primary spring 하부부위인(스트레인게이지 No. 5)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -11.43 kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 6 Stress measure of twist load

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	비틀림하중 부하 단계(kg)						
	0	8125	16250	25088	16250	8125	0
5	-0.01	-3.8	-7.39	-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

3.1.3 전후하중

전후하중 시험결과 측정응력이 6.9 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 7과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 최대응력은 전진시험시 Mono link bracket(스트레인 게이지 No. 24)에서 나타나고 있으며, 그 값은 9.77 kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 7 Stress measure of longitudinal load

(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	전후하중 부하 단계(kg)						
	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

3.1.4 좌우하중

좌우하중 시험결과 측정응력이 3.2 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 8과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 최대응력은 좌하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 39)에서 나타나고 있

으며, 그 값은 5.79 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 8 Stress measure of lateral load
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	좌우하중 부하 단계(kg)						
	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

3.1.5 구동장치하중

구동장치하중 시험결과 측정응력이 2.9 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 9와 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 최대응력은 후진하중시험시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 33)에서 나타나고 있으며, 그 값은 7.12 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 9 Stress measure of driving gear load
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	구동장치하중 부하 단계(kg)							
	0	772	1544	2318	3245	1544	772	0
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

3.1.6 주전동기하중

주전동기하중시험결과 측정응력이 5.4 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 10과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 최대응력은 상하중시험시 transom(스트레인 게이지 No. 30)에서 나타나고 있으며, 그 값은 7.55 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 10 Stress measure of traction motor load
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	주전동기하중 부하 단계(kg)						
	0	780	1560	2350	1560	780	0
30	0.02	2.54	5.03	7.55	4.99	2.52	0.06
35	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

3.1.7 브레이크하중

브레이크하중 시험결과 측정응력이 2.7 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 11과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을

알 수 있다. 최대응력은 전진시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 11)에서 나타나고 있으며, 그 값은 5.03 kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 11 Stress measure of brake load
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	브레이크하중 부하 단계(kg)						
	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

3.1.8 조합응력

시험결과를 사용하여 조합응력 및 피로내구선도를 구하였다. 조합응력 계산결과 평균응력이 8.5 kgf/mm² 이상인 측정점들과 응력진폭이 7.1 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 12, 13과 같으며 Fig. 10, 11에 피로내구선도를 나타내었다. 이 결과들을 살펴보면 조합응력에서 평균응력이 높게 나타나고 있는 부위는 주행시 air spring seat(스트레인게이지 No. 5, 그라인딩)에서 -11.52 kgf/mm², brake hanger bracket(스트레인게이지 No. 7, 모재)에서 10.68 kgf/mm²이며 응력진폭이 높게 나타나고 있는 부위는 주행시 link bracket(스트레인게이지 No. 24, 모재)에서 9.87 kgf/mm²이며 Fig. 10, 11과 같이 모두 각 부위별 안전역에 위치하고 있다.

Table 12 Combined stress result (mean stress)
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	조합응력(구동)		조합응력(제동)		비고
	평균 응력	응력 진폭	평균 응력	응력 진폭	
5	-11.52	4.56	-11.48	4.55	그라인딩
7	10.68	3.75	6.98	3.62	모재
6	8.52	3.03	5.74	2.97	모재
9	8.50	4.05	9.42	3.78	모재

Table 13 Combined stress result (stress amplitude)
(단위 : kgf/mm²)

S/G No.	조합응력(구동)		조합응력(제동)		비고
	평균 응력	응력 진폭	평균 응력	응력 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

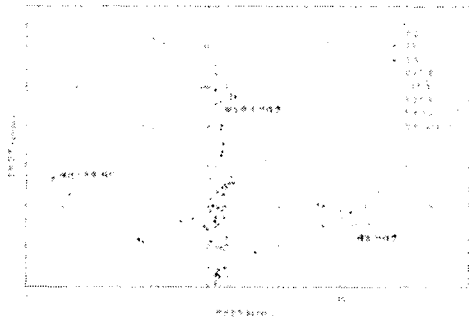


Fig. 10 Fatigue endurance diagram for driving mode

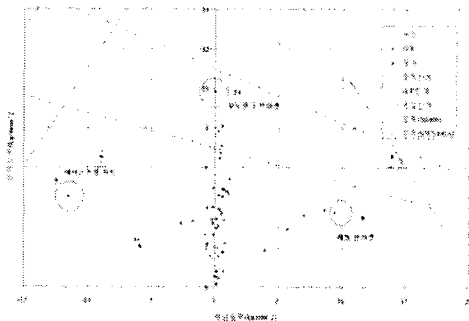


Fig. 11 Fatigue endurance diagram for braking mode

4. 결론

도시철도차량의 대차에 대하여 구조해석과 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 구조해석과 하중시험의 하중조건별 최대응력을 비교한 결과는 아래와 같다.

Table 14 Test and analysis result

(단위 : kgf/mm²)

구분	시험	해석	시험/해석	위치
수직하중	14.07	13.80	1.01	Brake hanger brk
비틀림 하중	10.47	10.95	0.95	Brake hanger brk
전후하중	9.77	10.90	0.89	Mono link brk
좌우하중	5.79	6.00	0.96	Transom support brk
구동장치 하중	7.12	3.23	2.20	Gear hanger brk
주전동기 하중	7.55	9.00	0.83	Transom
브레이크 하중	5.03	5.92	0.84	Brake hanger brk

해석과 시험결과는 거의 일치함을 알 수 있었다. 구동장치하중 해석의 경우 모델링의 재검토가 필요하다.

하다고 판단되며 보다 정확한 해석을 위해서는 해석 메쉬를 작게 하여야 하고 하중시험시 스트레인게이지를 정확하게 장착하기 위해서는 특수케인트를 도입하여 하중을 가한후 클랙방향을 고려하여 스트레인게이지를 장착하여야 한다

2) 최대응력 발생부위는 brake hanger bracket (스트레인 게이지 No. 7)에서 발생하였으며, 그 값은 14.07 kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm²이내에 있다

3) 조합응력으로 구한 피로내구선도에 나타나는 모든 응력은 안전영역에 있어 피로강도를 만족하는 것으로 나타났다.

참고문헌

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