신형 경전철차량 대차프레임 하중시험 방법 및 결과 고찰 A Study on The Load Test Method and Result For Bogie Frame of New LRT

김원경* 원시태** 전창성*** Kim Weon-Kyong Won Si-Tae Yoon Sung-Chol

ABSTRACT

Recently, the bogie frame weight of Light Rail Transit system has been reduced in order to save energy and materials. However, this light weighted vehicle structure is very important to verify the fatigue strength at the development stage. Bogie system consists of bogie frame, suspensions, wheel-sets, braking system and transmission system. Among these components, the bogie frame is most significant component subjected to the whole vehicle and passenger loads. In this study, the bogie frame for the New LRT power car is evaluated to the static and fatigue strength. And the evaluation method is used the LRT Performance Test Standards Specification throughout the FEM analysis and static load test. The static and fatigue test results for the LRT bogie frame of power car has been appeared very safety and stable for the design load conditions.

1. 서론

최근에 국내 도시철도차량은 에너지 절감과 정시성, 환경친화성, 수송효율 등을 고려하여 대도시는 물론 중소도시와 대도시간 연결수송을 위해 중량전철 보다는 경량전철 차량의 보급이 증대되고 있는 추세이다. 경량전철 차량은 중량전철 차량에 비해 차량크기 및 중량을 경량화 하기 위해 차체 및 대 차 등 구조물을 경량화 하고 차량의 각종장치를 단순화 하는 것이 관건이며, 특히 대차를 경량화, 최 적화 하는 것이 필요하다. 경량전철 차량용 대차는 차체의 하중을 지지하고 열차의 안전, 주행성능 및 승차감에 지대한 영향을 미치는 핵심장치이다. 대차는 차체에 작용하는 하중지지 및 견인력과 제 동력을 전달함과 동시에 차량의 주행 시 최고속도를 만족하고 , 이와 관련하여 안전성유지, 최소곡선 통과 및 최대구배에서 주행할 수 있는 성능을 확보하고 있어야 한다.

대차는 대차프레임, 차륜 및 차축, 현수장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달장치 등으로 구성되며, 대차프레임은 형상이 복잡하고 하중조건도 정적 및 동적하중이 복합적으로 작용하고 있다. 본 연구 에서는 신형 경전철 차량의 대차프레임의 안전성과 성능을 확보하기 위해 대차프레임의 구조해석을 통한 주요하중별 응력을 분석하고, 정하중 시험을 수행하여 대차프레임의 피로강도를 평가한 결과 각종 하중조건에서 안전한 것을 확인하였다.

 ^{*} 김원경 : 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원 E-mail :Wkkim@krri.re.kr
 TEL : (031)460-5511 FAX : (031)460-5509
 ** 원시태: 정회원, 서울산업대학교, 금형설계학과, 교수
 *** 전창성: 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

2. 시험의 종류

대차프레임 정하중시험은 대차 조립체 구성품이 장착되는 BRACKET이 취부된 상태에서 주행 하중 작용시 대차틀의 강도가 유지됨을 확인하는 시험으로 선회프레임과 안내프레임으로 나누어 실시 하고 시험의 종류는 다음과 같다.

3. 시험 하중 및 시험방법

3.1 시험하중

경량전철 차량의 중량은 표 2와 같다. 대차프레임에 작용하는 하중은 표 2를 기준으로 계산 하였으며, 구조해석의 하중조건과 동일하게 적용한다. 표 3은 계산된 하중조건을 나타낸다.

	五 五	(단위 : kg)	
구 분	항 목	중 량	비고
1	공차 중량	11,500	
2	최대 승객하중	6,500	
3	스프링 하중량	3,000	동/종 대차 합계
4	대차당 하중	7,500	[1+2-3]/2

표 3. 대차프레임의 하중조건

구 분	하	중 종	류	하 중 조 건	비	고
	상 하 방 향 전 후 하 중 (1)		• होः	공기스프링 취부면의 편측에 상방향으로 48kN 부하		
서히			÷ (1)	상부 링크홀에 12kN을 대차 전방으로 부하 하부 링크홀에 22kN을 대차 후방으로 부하		
프레임	전 후 하 중 (2)		÷ (2)	상부 링크홀에 12kN을 대차 후방으로 부하 하부 링크홀에 22kN을 대차 전방으로 부하		
	좌우 Stopper 하중		r 하중	좌측 횡스토퍼 맞닿는 면에 27kN을 부하	좌우	양측
	Anti-Rolling 하중		g 하중	좌우 비틀림 스프링 취부부에 편측당 12.7kN 을 역위상으로 부하		
	안내륜 분기륜	좌우 하중	안내륜 분기륜	안내륜 외측에서 내측으로 +13.5kN을 부하 분기륜 외측에서 내측으로 +10kN, -13.5kN 을 부하		
아내	하 중	하 중 상하하	하하중	안내륜 끝단에서 ±5kN을 부하		
고메이		전후하중		안내륜 중심에서 ±2kN을 부하		
프레임	Anti-Rolling 하중		g 하중	Anti-Rolling 결합부에 ±15kN을 좌우 역 위상으로 부하		
	상 하	댐 ፲	퍼 력	± 4 kN		
	좌우댐퍼력		터 력	± 4 kN		

3.2 재질의 기계적 성질

대차프레임에 사용한 주요 재질은 SM400과 SS400이며, 각 파이프는 STKR400 및 안내륜/분 기륜 취부부는 ScMn3A으로 제작되었으며 각 재질의 기계적 성질은 표 4와 같다. 표 4의 피 로강도는 JIS E 4207에서 제시한 값을 사용하였으며, STKR400 모재의 피로강도는 재료의 물 성데이터가 동일한 SM400과 SS400의 값을 적용하였다. ScMn3A의 항복강도와 인장강도는 실제 데이터 보다 용접부 및 용접 마무리 부는 SM400과 동일하게 했다.

표 4 재질의 기계적 성질

(단위 : kg/mm²)

배충	키 지	하보가ㄷ	<u>ሰ</u> አትፖትር	피로강도			ਸੀ ਤ
힌오	세결	8701	1777	모재부	사상부	용접부	112
1	SM400						
2	SS400	24	41	14	11	7	
3	STKR400						
4	ScMn3A	37.5	50	18	11	7	

3.3 시험방법

시험방법은 도시철도차량성능시험기준의 정하중시험 방법에 따라 시험한다.

- ① 시험 준비
 - 대차프레임에서 고응력이 예상되는 부위에는 약 154개의 스트레인 게이지를 취부한다.
 스트레인 게이지의 부착위치는 구조해석 결과로부터 선정하며, 현장에서 판단에 따라
 추가할 수 있다. 부위별 스트레인 게이지 취부 갯수는 표5와 같다.
 - 시험 장치를 조립한다.
 - 시험 A~F에 대해서는 순서를 바꾸어 가면서 시험을 실시한다.
 - 시험 G 종료후, 시험장치 조립을 수정한다.
 - 시험 H, I, J, K, L, M에 대해서는 가장 효율이 좋은 순번으로 시험을 한다.
 - 시험은 각각 2회씩 실시한다.

시 처 차 모	적용프레임		치 미 차 즈	
시 법 정 국	선회프레임	안내프레임	역 내 아 중	
상하하중	А	0		46kN (48kN)
전후하중 (상부링크)	B_1	0		± 12 kN
전후하중 (하부링크)	B_2	0		± 22 kN
좌우 Stopper 하중	C_1, C_2	0		+27kN
Anti-Dolling 최근	ם ם		\bigcirc	(선회프레임)±12.7kN(
Anti-Koning of 3	D_1, D_2			안내프레임)±15kN
상하 댐퍼 하중	Е	0	0	± 4 kN
좌우 동댐퍼 하중 (1)	F	0		± 4 kN
좌우 동댐퍼 하중 (2)	G		0	± 4 kN
안내륜 횡하중	Н		0	+13.5kN
분기륜 횡하중	Ι		0	+10kN -13.5kN
안내륜 상하하중	J		0	± 5 kN
분기륜 상하하중	К		0	± 5 kN
안내륜 전후하중	L		0	± 2 kN
분기륜 전후하중	М		0	± 2 kN

표 6 시험항목 및 최대하중

주 1 : 시험 B는 상부 링크 부하를 시험"B1", 하부 링크 부하를 시험 "B2"로 하는 두 종류의 시 험으로 나누어 실시한다.

주 2 : 시험 C는 1위측 부하를 시험 "Cı", 2위측 부하를 "C2"로 하는 두 종류의 시험으로 나누어 실시한다.

주 3 : 안내프레임의 시험 H~M은 1~3위측에 GAUGE를 집중시켰기 때문에 부하점도 1, 3 위측 으로 하고 "H₁~H₂, M₁~M₂"와 같이 각각 두 종류의 시험으로 나누어 실시한다.

② 상하하중 (시험 A)

2개의 작키를 이용하여 미는 부하만 가한다. 기재한 값은 한 작키당. (또한 하중은 2개의 작키간에 가능한 한 균일하게 부하한다.)

 $0 \rightarrow 10.5 \rightarrow 21 \rightarrow 37 \rightarrow 48 \text{kN} \rightarrow 37 \rightarrow 21 \rightarrow 10.5 \rightarrow 0$



그림 1 상하 하중 시험

③ 전후하중 (시험 B)

- 상부 링크 부하 (시험 B1)

2개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 함께 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다) 기재한 값은 한 작키당. (또한 하중은 2개의 작키간에 가능한 한 균일하게 부하한다) 0 → 3.5 → 7 → 12kN → 7 → 3.5 → 0 → -3.5→ -7 → -12kN → -7 → -3.5 → 0

- 하부 링크 부하 (시험 B2)

2개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 함께 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다) 기재한 값은 한 작키당. (또한 하중은 2개의 작키간에 가능한 한 균일하게 부하한다) 0 → 6 → 12 → 22kN → 12 → 6 → 0 → -6 → -12 → -22kN → -12 → -6 → 0



그림 2 전후 하중시험

③ 좌우 Stopper 하중시험 (시험 C)
 1개의 작키를 사용하여 밀기만 부하한다.
 0 → 9 → 15 → 27kN → 15 → 9 → 0



그림 3 좌우 stopper 하중 시험

④ Anti-Rolling 하중시험 (시험 D)

2개의 작키를 사용하여 한방향은 밀기, 반대반향은 당기기를 동시에 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다) 기재한 값은 한 작키당의 하중이다.

시험하중의 부하방법은 선회프레임에서는 양단 Bush중심위치(725mm)에서 부하하지만, 안내프 레임에서는 Arm중심위치(613mm)에서 부하하기 때문에 각각의 최대하중 값을 다르게 부하해 야 한다. 또한 하중은 2개의 작키간에 가능한 한 균일하게 부하한다.

치즈그기	적용프레임			
아중는기	안내프레임	선회프레임		
하중 부하위치	Arm중심(613mm)	양단 Bush중심(725mm)		
공차 횡 가속도 0.3G	4kN	3.4kN		
정원 횡 가속도 0.1G	8kN	6.8kN		
만차 횡 가속도 0.1G	12kN	10.1kN		
편측 펑크, 편측 이상 상승 방지 당	15kN	12.7kN		

- 선회프레임 부하하중

양단 Bush중심위치의 하중 환산 : P

P = R(Arm위치의 하중) x 613/725 = 0.846R

- $0 \rightarrow 3.4 \rightarrow 6.8 \rightarrow 10.1 \rightarrow 12.7 \text{kN} \rightarrow 10.1 \rightarrow 6.8 \rightarrow 3.4 \rightarrow 0$
- \rightarrow -3.4 \rightarrow -6.8 \rightarrow -10.1 \rightarrow -12.7kN \rightarrow -10.1 \rightarrow -6.8 \rightarrow -3.4 \rightarrow 0



- 안내프레임 부하하중

 $0 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 15 \text{kN} \rightarrow 12 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 0 \rightarrow -4 \rightarrow -8 \rightarrow -12$ $\rightarrow -15 \text{kN} \rightarrow -12 \rightarrow -8 \rightarrow -4 \rightarrow 0$



그림 4 Anti-rolling 하중시험

⑤ 상하 댐퍼 하중시험 (시험 E)
 1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 함께 부하한다.(미는 하중을 정으로 한다)
 0 → 1 → 2 → 4kN → 2 → 1 → 0 → -1 → -2 → -4kN → -2 → -1 → 0



⑥ 좌우 동댐퍼 하중시험 (시험 F, G)
1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 함께 부하한다.
(미는 하중을 정으로 한다)
0 → 2 → 3 → 4kN → 3 → 2 → 0 → -2 → -3 → -4kN → -3 → -2 → 0



그림 6 좌우 동댐퍼 하중 시험

⑦ 안내륜 횡 하중시험 (시험 H1, H2)
 1개의 작키를 사용하여 밀기만을 부하한다.
 0 → 5 → 10 → 13.5kN → 15kN → 13.5 → 10 → 5 → 0



그림 7 안내륜 / 분기륜 상하, 전후, 좌우 시험 하중

- ⑧ 분기륜 횡 하중시험 (시험 II, I2)
 1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다)
 0 → 2.5 → 5 → 10 → 5 → 2.5 → 0 → -5 → -10 → -13.5kN → -10 → -5 → 0
 ⑨ 안내륜 상하 하중시험 (시험 J1, J2)
- (1) 전에 이상사람 (사람 J1, J2) 1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다) 0 → 3 → 4 → 5kN → 4 → 3 → 0 → -3 → -4 → -5kN → -4 → -3 → 0
- ⑩ 분기륜 상하 하중시험 (시험 K1, K2)
 1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다)
 0 → 3 → 4 → 5kN → 4 → 3 → 0 → -3 → -4 → -5kN → -4 → -3 → 0
- ① 안내륜 전후 하중시험 (시험 L1, L2)
 1개의 작키를 사용하여 밀고 당기기를 함께 부하한다. (미는 하중을 정으로 한다)
 0 → 1 → 1.35 → 2kN → 1.35 → 1 → 0 → -1 → -1.35 → -2kN → -1.35 → -1 → 0
- 4. 결과 분석 방법

조합응력은 평균응력과 응력진폭으로 구분되며, 다음과 같이 계산된다.

- (1) 하중의 조합
 - (주) 응력을 문자로 표기하는 방법은 하기와 같다.

 σ_{A37} : 시험 A의 하중 37kN에 대한 응력

*σ*_{2*B*12} : 시험 B2의 하중 12kN에 대한 응력

(2) 통상 상태 (피로한도선도를 이용하여 평가한 것)

5. 평가기준

측정된 응력은 조합응력으로 환산하여 피로내구선도를 이용하여 무한수명 여부를 판단한다. 피로내구선도는 그림 8.에서 보여주고 있다. 여기서 x축은 평균응력, y축은 응력 진폭이며 조 합된 결과는 피로내구선도 상의 위치에 따라 안전성을 판정할 수 있다.



6. 강도 해석 결과 및 분석6.1 강도해석 결과

하중 종류	설 명	계산응력	비고
상하 하중	최대주응력, 측면프레임 내부보강, Top	8.64kgf/mm²	모재부
저호 치즈	상동 확대도, Top	9.3kgf/mm²	형상변경
신부 야궁 (1)	상동 확대도, Top	11.9kgf/mm²	형상변경
(1)	최대주응력, 하면View, Bottom	9.82kgf/mm²	형상변경
전후 하중 (2)	상동 확대도, Top	11.9kgf/mm²	형상변경
좌우 스토퍼 하중	최대주응력, 상면View, Bottom	4.61kgf/mm²	
Anti-rolling 하중	최대주응력, 하면View확대도, Top	8.92kgf/mm²	용접부 G사상 추가

표 8 선회프레임의 구조해석 결과

표 9 안내프레임 구조해석 결과

No.	설 명	응력값(kgf/mm²)	비고
32	안내 프레임 모델		
33	구속 조건		
34	1위측, Arm내부 하측	17.8	
35	1위측, 프레임 결합부 하측	27.9	
36	1위측, Arm내부 하측	20.3	
37	3위측, Arm내부 하측	22.3	
38	3위측, 프레임 결합부 하측	20.3	
39	3위측, Arm내부 하측	26.2	
40	3위측, Arm내부 하측	21.2	좌우만 단축에서 하중 부하
41	상기 5-③a를 단축하중	4.80	상하만 단축에서 하중부하
42	으로 분해하여 계산	1.35	전후만 단축에서 하중부하

6.3 시험결과

시험결과는 신형 고무차륜 경량전철의 대차프레임 (선회 및 안내프레임 2대로 구성)에 대하여 건 설교통부의 도시철도차량 성능시험 기준 등에 의거 작성된 대차시험 방법에 따라 선회프레임에서 는 상하하중, 전후하중 (상하부 링크), 좌우 Stopper 하중, Anti-rolling 하중, 상하 댐퍼하중, 좌우 동댐퍼 하중에 대한 시험을 수행하였으며, 안내프레임에서는 Anti-rolling 하중, 상하 댐퍼 하중, 좌우 동댐퍼 하중, 안내륜 및 분기륜에 대한 횡하중, 상하하중 및 전후하중에 대한 시험을 수행한 것이다. 본 시험에서 계측된 결과를 요약하면 표 8과 같다. 각 시험항목에 대한 최대 응력 발생 위 치 (게이지 번호)와 환산된 최대응력이 제시되어 있다.

시험체 및 시험항목			최대응력(kg/mm ²)	게이지 번호	비고
선	상하	하중	3.045	38	
회	전후	하중	9.009	36	
7	좌우 Stop	pper 하중	-2.583	62	압축시
-	Anti-Roll	ling 하중	7.77	1	
레	상하 댐	퍼 하중	0.861	38	
임	좌우 동댐퍼 하중		-2.982	50	
	Anti-Rolling 하중		-5.397	66	인장시
	상하 댐퍼 하중		±0.672	61	압축, 인장
안	안 좌우 동댐퍼 하중		4.179	50	인장시
내		횡하중	-5.647	2	압축만 수행
Σ	안내륜 부	상하하중	-6.846	27	상방향시
 레		전후하중	-2.709	72	압축시
임	분기륜 부	횡하중	7.161	15	
		상하하중	5.586	27	하방향시
		전후하중	-2.247	27	압축시

표 10 선회프레임 및 안내프레임에 대한 정하중 시험 결과

7. 결론

신형경전철 대차의 피로강도평가를 위해 선회프레임과 안내프레임에 대해 강도해석을 수행하여 설 계된 대차의 응력해석을 수행하여 응력을 평가하고 성능시험을 위한 시험방법을 정립하였으며, 정 하중시험을 통하여 피로강도를 평가한 결과 대차프레임은 주행 중 각종 하중에 대해 피로내구선도 의 모재부 및 용접부에서 충분히 안전한 응력범위에 있어 균열이 발생하지 않을 것으로 예상되며, 피로강도적으로 안전성을 가질 것으로 예상된다.

8. 참고 자료

1. Fatigue design and assessment of steel structures. BS7608 : 1993

- 2. 건설교통부, "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준", 대차 하중시험, 2000
- 3. 한국표준협회, "철도차량용 대차 스톡 설계 통칙", R 9210, 1996

4. 고무차륜 경량전철 대차프레임 하중시험, KIMM