

미국 뉴욕전동차용 대차 프레임 개발 Development of Truck Frame and Bolster For New-York EMU

이창환*, 안계철**, 남학기***, 유완석****
Chang-Hwan Lee, Gye-Chul Ahn, Hak-Ki Nam, Wan-Suk Yoo

ABSTRACT

The truck frame of railway vehicle is important structure supporting the various loadings during running on the railway. The verification of sufficient strength on truck frame is essential in case of EMU carrying many people. To verify the safety of truck frame, the actual loading conditions should be considered at design stage. This paper is describing that the development procedure of truck frame and bolster changed from existing casting frame to new welded frame for New-York EMU, also introducing the design regulations for new welded truck frame. Additionally the dynamic accelerations on the truck were measured to insure the actual loadings on service running condition, and the procedure and results of this test are described in this paper.

1. 서론

철도차량의 주행장치부인 대차는 차체의 하중을 지지하고, 주행 안전성 확보 및 승차감에 중요한 역할을 담당하는 장치이다. 특히, 대차의 구조물에 해당되는 대차 프레임은 주행중 발생하는 각종 하중을 직접적으로 부담할 뿐만 아니라, 하중 조건도 정적인 조건과 더불어 동적인 조건도 고려되어야 안전성을 확보할 수 있다. 특히, 수많은 승객을 수송하는 전동차의 경우, 승객의 안전을 확보하기 위해서 대차 프레임의 강도 확보는 필수적이라 할 수 있다. 지금까지 국내 전동차에 적용된 대차 프레임에 대한 강도 확보를 위한 많은 연구가 진행되어 온 실정이다. 하지만, 국내 환경과는 다른 해외 전동차에 대한 연구는 미미한 수준이며, 이 분야에서 국제적 수준의 기술력을 확보하기 위해서는 보다 엄격한 안전 규정을 적용하고 있는 미국 전동차에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 미국 뉴욕에서 운행되고 있는 전동차에 적용되고 있는 기존 주강형 구조 대차를 용접형 구조 대차로 개량하여 개발함에 있어서, 대차 프레임 및 볼스터에 대한 설계 기준을 제시하며, 실제 운행 조건의 대차에서 발생하는 진동가속도를 측정하였으며, 본 시험 절차 및 시험 결과를 소개하고자 한다.

2. 대차 구조

2.1 개요

미국 뉴욕전동차에 적용되는 기존의 주강형 구조 대차는 대부분은 볼스터 형식의 대차를 채용하고 있으며, 볼스터와 스프링 플랭크를 스윙 링크로 연결하고 있는 구조이다.

* (주)로템 기술연구소 대리, 정희원

** (주)로템 기술연구소 과장, 비희원

*** (주)로템 기술연구소 부장, 비희원

**** 부산대학교 기계공학부 교수, 정희원

1차 현가장치는 액슨박스 상부에 이퀄라이저 바를 설치한 구조이며, 2차 현가장치는 볼스터와 스프링 플랭크 간의 스프링 및 램퍼로 구성되어, 대차의 구조는 그림 1, 2와 같다.

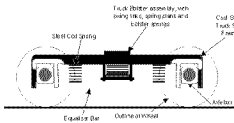


그림 1. 볼스터 대차 (측면)

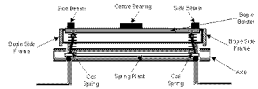


그림 2. 볼스터 대차 (단면)

2.2 하중 전달 경로

스웰 볼스터 대차의 하중 전달 경로는 그림 3과 같다.

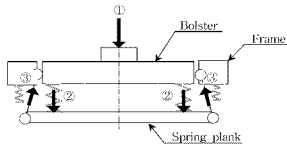


그림 3. 하중 전달 경로

하중 전달 순서는 다음과 같다. 차체의 하중이 볼스터 플레이트를 통하여 볼스터에 작용하게 되며(①), 이 하중은 다시 볼스터 스프링을 통하여 스프링 플랭크에 전달되며(②), 다시 스웰 램퍼를 통하여 대차 프레임에 전달된다(③).

3. 용접형 대차 개발사양

3.1 수명 및 허용응력

대차 프레임 및 볼스터는 40년 이상의 수명을 보장하여야 하며, 궤도중기, 전동기 트럭, 마찰 제동과 이러한 하중의 조합 상태에서도 허용응력을 초과하지 않아야 된다. 실제 허용응력은 재료의 항복강도의 50% 또는 피로한도의 60%를 초과하지 않아야 한다. 또한, 모재 및 용접부의 피로 허용한도는 AWS D1.1 (Structural welding code- steel) 에서 제시하는 피로한도 이내이어야 한다.

3.2 하중 조건

차량의 종류는 공차 조건과 승객의 승차 정원에 따라 도표 1과 같이 분류된다.

도표 1. 차량 중량 조건

기 호	중 량	설 명
AW0	87,400 lbs (= 39,645 kgf)	공차 조건
AW1	98,500 lbs (= 44,680 kgf)	승객 인원 : 72명
AW2	109,600 lbs (= 49,715 kgf)	승객 인원 : 144명
AW3	130,400 lbs (= 59,150 kgf)	승객 인원 : 279명
* 단, 승객 1인당 중량은 154 lbs (= 70kgf) 기준임.		
대차 중량 = 18,200 lbs (=8,255 kgf)		

3.2.1 정하중 조건

대차 프레임 및 볼스터에 작용되는 정적 하중은 다음과 같다.

- 1) 수직 하중은 AW3 중량조건에서 대차중량을 뺀 하중을 적용한다.
- 2) 좌우 하중은 AW3 중량조건에서의 차량 전복에 상당하는 하중을 차량의 무게중심에 적용한다.
- 3) 전후 하중은 AW3 중량조건에서 차륜이 완전 점착되는 최대 가능한 순간제동하중을 차량의 무게 중심에 적용한다.
- 4) 부가 하중은 최대 준정적상태의 하중 즉, 최대 전동기 토크, 제동장치 중량, 최대 제동 반력, 전동기 중량을 적용한다.

3.2.2 피로하중 조건

대차 프레임 및 볼스터에 작용되는 피로 하중은 다음과 같다.

- 1) 600만회 이상의 동하중을 적용한다.
- 2) 수직하중의 평균치는 AW3 의 중량조건에서 대차 중량을 뺀 하중이며, 수직하중의 변동치는 수직하중의 평균치의 $\pm 25\%$ 를 적용한다.
- 3) 좌우하중의 변동치는 수직하중 평균치의 $\pm 15\%$ 를 차량의 무게중심에 적용한다.
- 4) 전후하중의 변동치는 수직하중 평균치의 $\pm 15\%$ 를 차량의 무게중심에 적용한다.
- 5) 부가하중은 운행 동안 발생하는 최대 하중의 $\pm 100\%$ 를 적용한다. 전동기 하중은 최대 토크 조건에서의 하중을 적용하며, 제동장치 하중은 25% 점착조건에서 실린더에 작용되는 최대 압력을 적용한다.

3.3. 용접부 비파괴검사 기준

대차 프레임 및 볼스터의 용접부에 대한 건전성을 평가하고, 피로 안전성을 확보하기 위하여, 다음의 비파괴검사를 실시한다.

- 1) 모든 용접부는 AWS D1.1 에 의거하여 육안검사를 실시하고 평가한다.
- 2) 모든 용접부는 PT 또는 MT 의 비파괴 검사를 실시하고, 평가한다.
- 3) 모든 완전용입부는 AWS D1.1 기준에 의거하여 UT 또는 RT 검사를 실시하고 평가한다.
- 4) 방사선 검사 (Radiographic Test) 는 AWS D1.1 기준에 의거하여, 다음의 주요(Critical) 용접부에 대하여 실시하고, 평가한다.
 - ① 용접부 피로시험의 50 % 를 초과하는 인장 응력이 작용되는 모든 용접부
 - ② 용접불량으로 인해, 대차고장 또는 탈선을 야기시킬 수 있는 하중경로에 있는 모든 용접부
 - ③ 용접불량으로 인해, 제동성능을 저하시킬 수 있는 모든 용접부

3.4. 해석과 시험 비교 기준

구조해석에서 계산된 응력값과 시험에서 측정된 응력값은, 전체의 비교 대상의 75% 에 대하여 두값의 차는 15% 이내이어야 한다.

3.5. 재질 사양 및 특성치

대차 프레임 및 볼스터에 사용되는 재질의 사양 및 기계적 성질은 다음의 표2 와 같다.

도표 2. 재질 사양 및 특성치

재 질	항복강도(Mpa)	인장강도(Mpa)	용 도
ASTM A588	345	485	구조용 강재
AAR M-201 (Grade B)	331	517	구조용 주강

3.6. 강도평가 기준

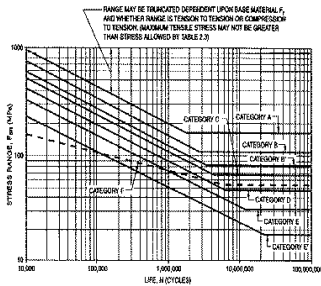
대차 프레임 및 볼스터에 대한 강도 평가 기준은 다음과 같다.

(1) 정하중 조건

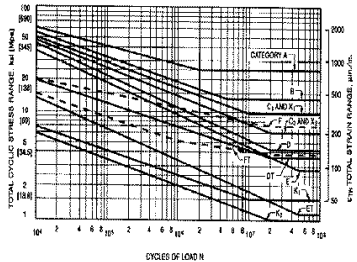
최대 정하중 작용하에서 최대발생 응력은 재질의 항복강도의 50%를 초과하지 않아야 한다.

(2) 피로하중 조건

피로하중 작용하에서 중요부위에서의 응력은 허용 피로응력을 초과해서는 안된다. 또한, 보개와 용접부에서의 피로응력범위는 AWS D1.1에서 제시하는 무한수명(피로한도)을 초과해서는 안되며, 허용 피로응력 기준은 그림 4와 같다.



(a) 비제관용



(b) 제관용

그림4. 허용 피로응력 범위

4. 대차 진동가속도 측정시험

4.1 시험 개요

영업 운행 중에 대차 프레임 및 볼스터에 작용되는 실제 하중을 규명하기 위하여, 기존 주강형 대차에 작용하는 진동 가속도 측정시험을 실시하였으며, 시험 절차 및 결과에 대하여 기술한다.

4.2 측정 위치

진동가속도를 측정하기 위한 측정 지점은 사양에 의거하여 6개소로 정하였으며, 3축 가속도계의 설치 위치는 그림 5 및 도표 3과 같다.

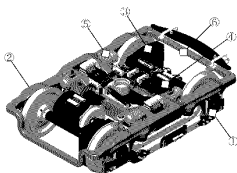


그림 5. 가속도계 외부도

도표 3. 가속도계 측정표

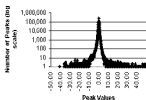
번호	측정위치	측정방향
1	액셀 박스(L2)	X: 전후방향 Y: 좌우방향 Z: 수직방향
2	액셀 박스(R1)	
3	기어 박스	
4	전원전동기	
5	제동유니트	
6	엔드캡	

4.3 시험 결과

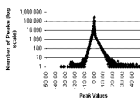
측정된 18 채널의 진동가속도는 200 Hz Low-pass 필터링 처리된 기원 후, peak 분석법을 통하여 채널별로 peak 값을 산출하였다. 각 채널별 필터링 처리된 peak 값에 대한 히스토그램은 그림 6-11 에서와 같으며, 피소/피대값 및 3-sigma 값을 정리하면, 도표 4와 같다.

도표 4. 진동 가속도 분석 결과

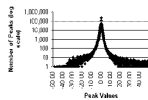
측정 위치	항 목		전후방향(g)		좌우방향(g)		상하방향(g)	
	Min	Max						
액셀박스 (L2)	Min	Max	-40.70	+19.50	-31.70	+49.65	-48.45	+49.95
	3-sigma		1.994		3.825		4.870	
액셀박스 (R1)	Min	Max	-20.70	+19.50	-26.15	+49.90	-43.40	+49.95
	3-sigma		2.522		2.260		4.895	
기어박스	Min	Max	-13.35	+13.15	-18.65	+22.00	-15.70	+22.10
	3-sigma		1.679		2.163		1.795	
전원전동기	Min	Max	-4.40	+5.60	-3.75	+10.55	-12.15	+47.95
	3-sigma		0.900		0.738		1.053	
제동유니트	Min	Max	-4.35	+5.60	-3.20	+10.55	-4.95	+47.95
	3-sigma		0.710		0.535		0.930	
엔드캡	Min	Max	-20.00	+19.55	-9.0	+11.05	-18.0	+32.10
	3-sigma		3.076		1.204		2.159	



(a) Longitudinal

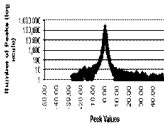


(b) Lateral

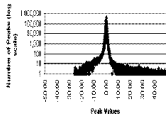


(c) Vertical

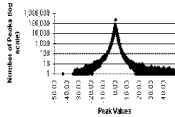
그림 6. 액셀박스 (L2) 가속도 히스토그램



(a) Longitudinal

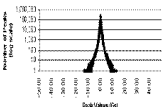


(b) Lateral

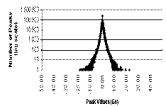


(c) Vertical

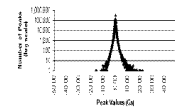
그림 7. 엑스박스 (R1) 가속도 히스토그램



(a) Longitudinal

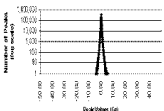


(b) Lateral

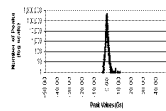


(c) Vertical

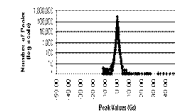
그림 8. 기어박스 가속도 히스토그램



(a) Longitudinal

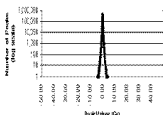


(b) Lateral

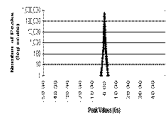


(c) Vertical

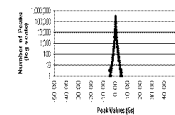
그림 9. 구동전동기 가속도 히스토그램



(a) Longitudinal

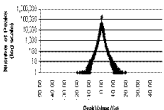


(b) Lateral

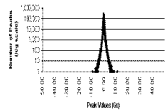


(c) Vertical

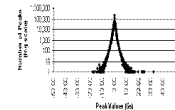
그림 10. 제동유니트 가속도 히스토그램



(a) Longitudinal



(b) Lateral



(c) Vertical

그림 11. 엔드빌 가속도 히스토그램

5. 결 론

본 연구에서는 기존 뉴욕 전동차의 주강형 대차 구조를 용접형 대차 구조로 개발함에 있어서, 대차 프레임 및 볼스터에 적용되는 설계 사양 및 하중 조건들을 기술하였으며, 실제 운행조건에서 대차에 작용되는 하중조건을 규명하기 위하여, 현지의 운행조건에서 기존 주강형 대차를 대상으로 6개소의 주요 지점에 대한 진동가속도 측정시험을 실시하였으며, 측정된 데이터는 peak 분석법을 통하여 히스토그램으로 산출하였다.

향후에는 측정된 가속도 데이터를 기초로 하여 대차프레임에 작용되는 하중의 수준을 결정하고, 상세 설계와 함께 구조 해석을 병행할 계획이며, 특히 용접부에 대해서는 AWS D1.1 에서 제시하는 허용 피로응력선도에 의거한 피로해석을 수행하여 용접부에서의 피로 안전도를 확보할 예정이다.

참고문헌

1. New York City Transit Authority (2004), "Technical Specification-R160"
2. American Welding Society (2004), "AWS D1.1-Structural Welding Code-Steel"