

유조화차의 대차 및 구조체 하중시험과 동특성 해석 연구

홍재성*(한국철도기술연구원), 함영삼(한국철도기술연구원), 백영남(경희대학교),
오택열(경희대학교), 김길동(한국철도기술연구원)

Static load test and dynamic characteristics analysis of bogie and body structures of an oil tank

J. S. Hong(KRRI), Y. S. Ham(KRRI), Y. M. Paik(Kyung-Hee Univ.),
T. Y Oh(Kyung-Hee Univ.), G. D, Kim(KRRI)

ABSTRACT

In this study, As The Tae Yang Metal company manufactured oil tank inserts welding structure bogie, it is contributed in stability security of freight car of oil tank through static load test, dynamic characteristics analysis, vibration performance test etc. to verify intensity of bogie frame & body structure

Key Words : static load test(하중시험), dynamic characteristics analysis(동특성해석),

1. 서론

(주)태양금속에서 용접구조형 대차를 채택하여 유조화차를 제작하였는데 이를 대차와 차체의 구조 강도를 검증하기 위한 정하중시험, 주행안전성과 관련된 동특성해석, 진동성능시험 등을 통하여 구조강도를 검증하고 이를 바탕으로 유조화차의 안정성을 확보하는데 이 논문의 목적이 있다.

대차 정하중 시험종류에는 수직 하중시험, 좌우 하중시험, 세동 하중시험을 실시하였고, 응력 및 변위량 그리고 시험하중을 측정하였다.

유조차 구조체 정하중 시험종류에는 수직 하중시험, 수평 압축하중시험, 비틀림 하중시험, 3점지지시험, 굽힘과 유진동수 측정시험, 비틀림과 유진동수 측정시험을 실시하였고, 응력, 변위량, 시험하중 및 진동수를 측정하였다. 유조차 구조체 중량조건, 구성재질의 물성치 등은 각각 Table 1.2와 같다.

유조차량의 동특성 해석을 위해 임계속도, 탈선 계수 및 윤중감소율을 측정하였다.

Table 1 Weight of Oil Car

항 목	중 량	비 고
자 중	22,000 kg	
하 중	50,000 kg	
대차 중량	9,400 kg	2 set

Table 2 Property of Oil Car

재 질	인장강도 (kg/mm ²)	휨복강도 (kg/mm ²)	비 고
SS400	41	25	Side 및 End frame, Cross beam, Body bolster
SWS490YA	50	37	Center 와 Side 및 End sill

2. 시험방법

2.1 대차 정하중시험

대차의 강도평가는 게이지 부착위치 선정, 그라인딩, 게이지 부착 등의 준비작업을 실시하였으며, 대차 프레임은 용접구조로서 현수장치는 코일 스프링을 사용하였으며, 하중시험방법은 JIS E 4208(철도차량용 대차의 하중시험방법)에 의거하면서 하중조건은 최대한 가혹한 조건을 채택하였다.

대차 프레임은 좌우 방향에 대해 대칭을 이루고 전후방향에 대해서도 거의 대칭이므로 1/4 영역에서 응력집중이 예상되는 지점에 28개의 단축 Strain gauge와 6개의 Rosette strain gauge를 취부하여 총 46채널의 1gauge Wheatstone Bridge를 구성하였다. 부착된 Strain gauge는 Side frame 14개, Bolster cross beam 10개, End beam 7개, Bolster stiffener 2개, Side frame gusset 1개이다.

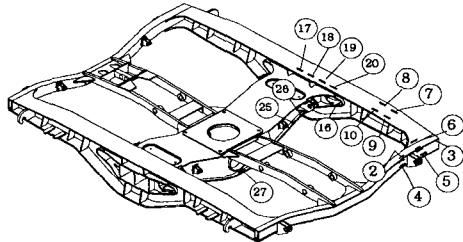


Fig. 1 Strain Gauge Diagram of Bogie Frame

본 하중 시험을 위해 대차 프레임에 Coil spring과 Axle box를 취부하고, 수직·전후 및 좌우 하중을 부가할 수 있도록 Dummy center pivot을 설치하였다. 시험 대차 프레임의 안정화를 위하여 본 하중 시험 전 Center pivot 위치에 수직하중을 수차례 가하였다.

대차 프레임을 Coil spring의 장착된 Axle box의 Axle center 위치에서 지지하고, Dummy center pivot 상에 수직 정하중과 수직 동하중을 부가하였다.

$$\text{수직 정하중} = (\text{공차중량} + \text{최대적재중량} - \text{스프링하중량}) \frac{1}{2} = 34.8 \text{ ton}$$

$$\text{수직 동하중} = \text{수직 정하중} \times 1.5 = 52.2 \text{ ton}$$

제동부품하중시험은 제동장치 부품의 중량에 의해 발생하는 하중을 각 Brake hanger bracket에 상·하 방향으로 구분하여 부가하였다. 수직하중 시험과 동일하게 Dummy center pivot에 수직 동하중을 부가한 상태에서 Hanger bracket에 하중을 부가하였다. 하중은 제동부품하중에 10g의 가속도를 고려하여 5.31ton을 부가하였다.

$$\text{제동부품하중} = 0.531 \text{ ton}$$

$$\text{시험하중} = \text{제동부품하중} \times 10 = 5.31 \text{ ton}$$

좌우하중시험은 차체 좌우방향의 동적효과를 고려하여 수직 정하중의 30%에 해당하는 하중을 대차 프레임의 좌우에 부가하였다.

$$\text{좌우하중} = \text{수직 정하중} \times 0.3 = 10.4 \text{ ton}$$

2.2 구조체 정하중시험

유조차 구조체는 좌우방향으로 대칭이므로 1/2 영역에서 용력집중이 예상되는 지점에 49개의 단축 Strain gage와 1개의 Rosette strain gage를 취부하여 총 52채널의 Bridge회로를 구성하였다. Dial gage는 차체의 양쪽 끝단과 중앙부의 Tank 하부 및 Side sill 하부 등, 5개 지점에 설치하였다. 부착된 gage의 내역은 Tank 17개, Center beam 9개

Side sill 2개, Bolster 부위 12개, Cross beam 8개, Bolster 부위 Tank 지지부 보강판 추가부위 2개
- Rosette(3축) gage 1개, 단축 gage 1개

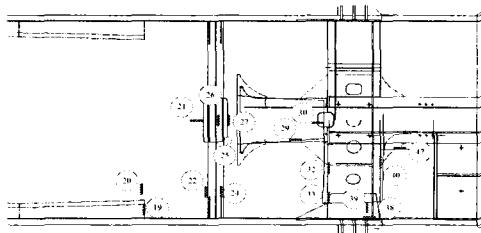


Fig. 2 Strain Gage Diagram of Carbody

본 하중시험 전, 차체 및 지그의 안정화를 위한 예비하중시험으로서 약 30 ton 정도의 압축하중시험을 실시하였다.

수직하중은 최대적재하중에 대해서 구조체가 지지하는 하중으로 유조탱크의 최대적재량인 56 ton을 시험하중으로 하였다. 구조체를 대차에 의해 지지되는 부위(Bolster center pivot)에서 지지하고 탱크가 넘칠 때까지 56ton의 물을 주입하고 차체의 양끝단과 중심위치에 총 5개의 Dial gage를 설치하여 변위를 측정하였다.

수평압축하중시험은 시험용 지그를 이용하여 구조체의 한쪽 끝을 고정시키고 수직방향의 Dummy 하중이 부가된 상태에서 다른 한쪽을 유압작기로 압축하여 응력을 측정하였다.

- 1차 시험 : 수직 Dummy 하중 56 ton + 수평압축 하중 200 ton
- 2차 시험 : 수직 Dummy 하중 20 ton + 수평압축 하중 220 ton

2.3 동특성 해석

신조 유조차의 차량최고속도는 110km/h이다. 1차 현가장치는 한 쌍의 코일스프링으로 구성되어 있으며, 공차시엔 외측의 스프링이 작용하고 영차시엔 내·외측의 스프링이 동시에 작용하는 2중 구조 형식을 취하고 있다. 대차와 차체간 하중지지는 구면형 센터피봇과 접촉식 탄성사이드베어러에 의한다. 탄성사이드베어러는 차체를 지지할 뿐 아니라 롤변위를 제한하며, 차체와 대차프레임 간의 요운동에 의한 길이방향의 마찰감쇠 작용을 한다. 해석 프로그램인 VAMPIRE는 영국 British Rail Research에서 개발한 철도차량 전용 동특성해석 프로그램으로서 전세계적으로 널리 활용되고 있다. 해석범위는 고유진동수 및 안정성 해석(Eigen-value Analysis), 주파수응답 해석(Frequency Response Analysis), 과도응답 해석(Transient Response Analysis), 곡선주행 해석(Quasi-static Curing Analysis) 및 기하학적 정

적해석(Static Analysis) 등이 가능하다. 임계속도와 주행동특성 해석을 위하여 유조차 1량에 대하여 모델링하였으며, 하중조건은 공차와 50ton의 화물이 부과된 영차조건으로 가정하였다. 유조차의 임계속도 예측을 위하여 비선형 과도응답해석을 수행하였다.

임계속도 해석은 일정속도로 주행중인 차량에 횡방향 외란을 부여한 후, 차량모델 각 요소의 횡방향 거동의 시간감쇠를 파악하여 계의 안정성을 분석하는 기법이다. 해석은 속도 30m/s에서 40m/s까지 1m/sTir 일정속도 간격으로 증가시켜가면서 과도응답해석을 수행하여 전위 윤축의 횡변위 거동을 파악하였다.

실제 선로에서의 주행시 탈선안전도 및 동적특성을 검토하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주행동특성 해석을 위한 케도모델로 국내 기존선로에서 일부 구간을 샘플링하여 케도모델로 사용하였다. 차량 최고속도 주행시의 동특성 분석을 위하여 샘플링 한 케도모델(경부선 402~404km) 1000m 구간에 대하여 차량이 120km/h로 주행할 때를 가정하여 해석을 수행하였다. 차량최고속도 주행시의 수치해석 결과 분석을 위하여, 본 연구에서는 국내에서 통상적으로 적용되어 온 탈선안전도 평가기준을 적용하였다. 탈선에 대한 안전도를 평가하는 지수로서는 차륜과 레일의 횡방향 작용력과 수직방향 하중의 비인 탈선계수(Q/P), 감소된 윤중에 대한 정적윤중의 비인 윤중 감소율($\Delta P/P$)을 들 수 있다.

3. 결과

3.1 대차 정하중시험

산출된 합성응력을 응력한계도로 표시하면 그림과 같이 대차 프레임의 모든 부위가 충분한 피로강도를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 합성응력의 최대치는 Bolster 내부 Stiffener(28번)에서 발생하였으며, 이는 재료의 허용응력 범위와 피로내구한도를 만족하고 있다. Table 3은 대차 정하중 시험결과를 나타내고 있다.

Table 3 Static Load Test Result of Bogie Frame
단위 : kg/mm²

항목	시험하중		측정최대값 (기준:33이하)		최대값 발생부위
	종류	부하량 (ton)	인장	압축	
응력	수직	52.2	10.232	-9.316	Bolster cross beam
	좌우	10.4	7.816	-2.971	Bolster stiffener
	제동부품 (상)	5.31	3.091	-1.915	End beam
변위량 (mm)	비틀림	68.9	12		Axle box

3.2 차체 정하중시험

수직하중시험 결과는 모든 부위가 허용응력범위 내에 존재하였다. 1차 수평압축시험시 허용응력을 초과하는 부위가 발생하였으나, 보강후 2차 수평압축시험 결과 모든 부위에서의 응력이 허용응력범위 내에 존재하였다. 또한, 합성응력의 최대값은 Bolster에서 발생하였으며, 이는 재료의 허용응력 범위와 피로내구한도를 만족한다. Table 4는 유조차 차체 정하중 시험 결과를 나타낸다. 응력기준은 25이하이며, 처짐량 기준은 캠버량 이하이다.

Table 4 Static Load Test Result of Carbody

항목	측정최대값		최대값 발생부위
	인장	압축	
응력 (kg/mm ²)	수직 하중	5.49	-1.88 사이드실과 텅크지지판 용접부
	압축 하중	11.01	-15.28 텅크지지판 끝단 보강판에 수평면 반시계방향 36°
처짐량 (mm)	수직 하중	-3.2	사이드실 중앙부r
	압축 하중	-5	센터실 끝단

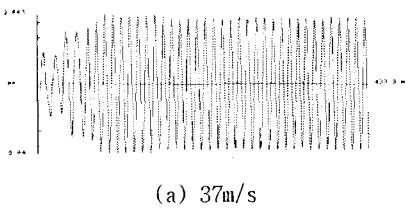
3.3 동특성 해석

3.3.1 임계속도해석

유조차의 임계속도 해석은 벌크차에 사용하였던 케도모델을 이용하여 동일한 방법으로 수행하였다.

Fig. 3는 공차조건의 해석결과인데 주행속도 36m/s(129km/h)까지는 외란에 대한 윤축 횡변위가 시간에 따라 안정적으로 감쇠하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 37m/s (133km/h)에서의 윤축횡변위는 시간에 따른 감쇠특성을 보이지 않는 불안정한 특성을 보이고 있다. 따라서 유조차의 공차시 임계속도는 신조차량의 경우, 약 120km/h 후반 대역으로 예측할 수 있다.

Fig. 4은 영차시의 해석결과로서, 주행속도 35m/s(126km/h)까지의 외란에 대한 윤축 횡변위는 시간에 따라 안정적으로 감쇠하는 경향을 보이고 있는 반면, 36km/h(129km/h)부터는 불안정한 감쇠특성을 보이고 있으므로 영차조건의 임계속도는 신조차량일 때 약 120km/h 중반으로 예측할 수 있다. 제작사양에 의한 차량의 최고속도가 110km/h임을 고려할 때, 본 차량의 임계속도는 운행속도를 여유 있게 감당할 것으로 판단된다.

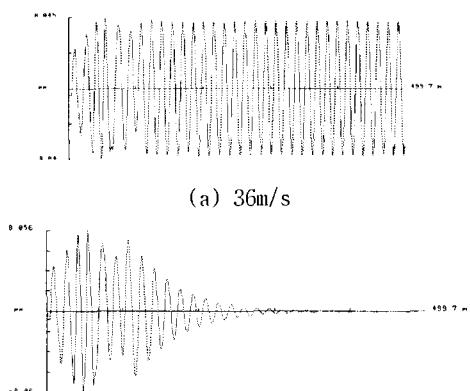


(a) 37m/s

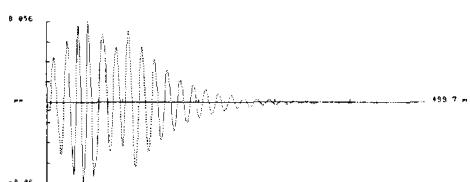


(b) 36m/s

Fig. 3 Analysis Result of Critical Speed(Tare Weight)



(a) 36m/s



(b) 35m/s

Fig. 4 Analysis Result of Critical Speed(Crash Weight)

3.3.2 주행안전성 해석

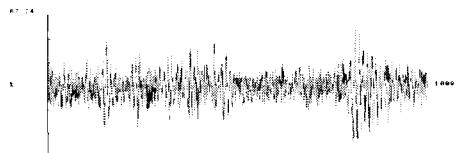
유조차의 주행안전성 해석은 실제 궤도에서 샘플링한 모델을 이용하여 동일한 방법으로 수행하였다. Fig. 5는 공차조건에서 차량 최고속도인 110km/h로 주행했을 때 동적윤중감소율과 탈선계수에 대한 해석결과 선도이다.

Table 5 110km/h Analysis Result of Running Characteristic

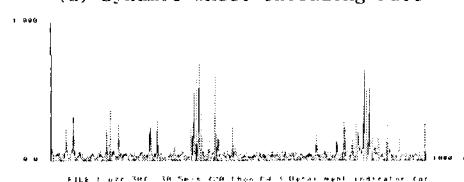
하중 구분	공 차	영 차	비 고
윤중감소율	47.4	35.4	80% 이하
탈선계수	0.75	0.53	1.1 이하

Table 5에서와 같이 공차시 동적 윤중감소율 최대값은 47.4%, 탈선계수 최대값은 0.75로 모두 허용

기준 이내에 있음을 알 수 있다. 영차시에도 동적 윤중감소율 최대값은 35.4%, 탈선계수 최대값은 0.53으로서 모두 허용기준 이내이다.



(a) Dynamic Wheel Unloading rate



(b) derailment coefficient

Fig.5 Dynamic Running characteristic(110km/h, Tare Weight)

4. 결론

지금까지 수행하였던 유조화차의 대차 및 구조체의 하중시험과 동특성 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 태양정밀에서 제작한 대차의 정하중시험 결과, 대차 프레임 전체가 충분한 강도를 보유한 것으로 평가되었다.
- 태양금속에서 제작한 유조차의 구조체 하중시험 결과, 구조체는 재료의 허용응력 범위를 만족하는 것으로 평가되었다.
- 동특성 해석결과, 유조차의 임계속도는 120km/h 대역 중반인 것으로 예측되었다.

참고문헌

- 철도청, 유조차 제작설명서, 특수설명서 제 2001-13호
- 일본규격협회, 철도차량용 대차프레임 설계통칙, JIS E 4207, 1992
- 일본규격협회, 철도차량용 대차의 하중시험방법, JIS E 4208, 1988
- 일본규격협회, 철도차량構体의 하중시험방법, JIS E 7105, 1989
- 철도기술연구소, 철도차량의 진동측정방법, 철도기술연구보 VOL23 NO1, pp.190 ~ 195, 1989
- 함영삼 외, 고속 컨테이너화차 차체의 구조강도 평가, 한국철도학회 2001년도 춘계학술대회논문집