벌크시멘트화차의 대차 하중시험과 진동성능시험 및 동특성 해석 연구

Static load test of the bogie and vibration performance test, dynamic characteristics analysis of the bulk cement car

홍재성[1], 함영삼[2], 백영남[3]
Jai-Sung Hong, Young-Sam Ham, Young-Nam Paik

Keywords : *static load test(하중시험), vibration performance test(진동성능시험) dynamic characteristics analysis(동특성해석),*

Abstract

The object of this study is to ensure the stability of bulk cement cars conducting vibration performance test, dynamic characteristic analysis and static load test of bogie frame. In case of static load test, bogie static load test facility was used. In case of dynamic characteristic analysis, Vampire Software was used. In case of vibration performance test, real bulk cement cars were used in kyeung-bu line. In the results of static load test of bogie frame for bulk cement car, all structures satisfied allowable stress criteria of materials. The vibration performance test and dynamic characteristic analysis results satisfied allowable standards.

1. 서 론

(주)태양금속에서 용접구조형 대차를 채택하여 벌크시멘트화차를 제작하였는데 대차의 구조강도를 검증하기 위한 정하중시험 및 주행안전성과 관련된 진동성능시험을 통하여 대차프레임의 강도 검증과 벌크시멘트화차1)의 안정성 여부를 판단하기 위한 시험을 시행하였다.

대차 정하중 시험종류에는 수직 하중시험, 제동부품하중시험, 좌우 하중시험, 전후 하중시험, 비틀림 하중시험을 실시하였고, 응력 및 변위량을 측정하였다. 주응력의 방향이 명확하지 않을 경우에 3축 게이지를 사용하였고, 연속되는 응력의 변화를 측정할 필요가 있을 경우에는 응력집중 게이지를 사용하였다.

응력 측정점의 선택방법으로는 구조해석 결과가 높은 부분2)과 형상 및 단면의 급변화 부분, 용접비드의 끝단부 등 응력집중 예측부분 및 제작시 용접, 가공 등 주의를 요하는 부분을 선택하였다. 변위량 측정점은 부하하중의 작용점, 지지점 및 사이점을 선택하였다.

벌크시멘트 화차의 중량조건은 Table 1과 같다

Table 1. Weight conditions of the bulk cement car

기호	구분	중량(kg)	비고
L1	공차중량	23,000	
L2	최대적재중량	52,000	
L3	스프링 하 중량	5,400	
L4	대차당 수직 정하중	34,800	(L1+L2-L3)÷2

120㎞/h급 고속화차용 대차를 적용한 신조 벌크화차의 주행 동특성을 검토하기 위하여 철도차량용 동특성 해석 전용프로그램을 이용하여 차량의 탈선안전도와 운동특성 해석을 수행하였다.

또한 벌크시멘트차의 차체 진동가속도(상하 및 좌

*1 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
*2 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원
*3 비회원, 경희대학교, 기계공학과 교수

우방향), 대차의 진동가속도(상하 및 좌우방향)를 10량(공차) 편성 상태에서 경부선 일부구간에서 측정하여 주행안전성을 확인하였다.

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 4207(철도차량용 대차프레임 설계통칙)[3] 및 JIS E 4208(철도차량용 대차의 하중시험방법)[4]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 1 gauge Wheatstone Bridge를 구성하였다. 부착된 Strain gauge는 다음과 같다.

① Side frame 14개
② Bolster cross beam 10개(3)
③ End beam 7개(3)
④ Bolster stiffener 2개
⑤ Side frame gusset 1개

strain gauge 취부상태를 Fig 1~2까지 표시하였다.

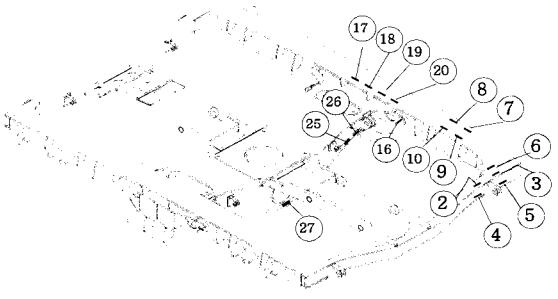


Fig. 1 Mounting of the strain gauge for the bogie frame

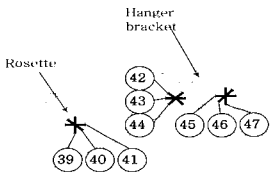


Fig. 2 Mounting of the rosette strain gauge for the bolster

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

Fig 3은 대차 정하중시험기를 나타내었다.

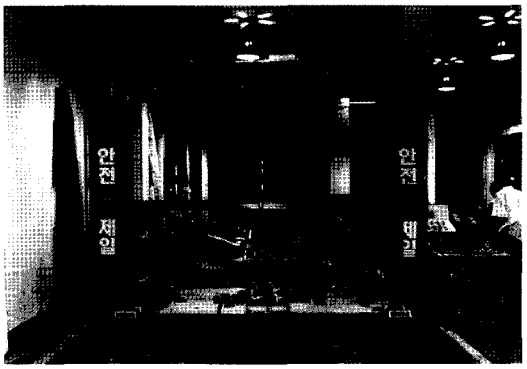


Fig. 3 Static load test facility for the bogie frame

2.1.1 수직정하중 시험

수직하중은 차체자중 및 적재하중에 대해서 대차 프레임이 지지하는 하중으로 수직 정하중은 최대적재시 동적효과를 고려하지 않은 하중이며, 수직 동하중은 가장 열악한 상태로 가정하여 차체의 상하방향으로 0.5g의 가속도를 고려한 것으로 수직 정하중의 1.5배가 된다. 대차 프레임을 Coil spring이 장착된 Axle box의 Axle center 위치에서 지지하고, Dummy center pivot 상에 수직 정하중과 수직 동하중을 부가하였다.

수직 정하중 = (공차중량+최대적재중량-스프링하 중량)÷2 = 34.8 ton
수직 동하중 = 수직 정하중 × 1.5 = 52.2 ton

2.1.2 제동부품하중시험

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 부가하였고, Fig 4와 같이 Hanger bracket 1&8, 2&7, 3&6, 4&5의 순서로 시험을 실시하였다. 하중은 제동부품하중에 10g의 가속도를 고려하여 5.31톤을 부가하였다.

제동부품하중 = 0.531 ton
시험하중 = 제동부품하중 × 10 = 5.31 ton

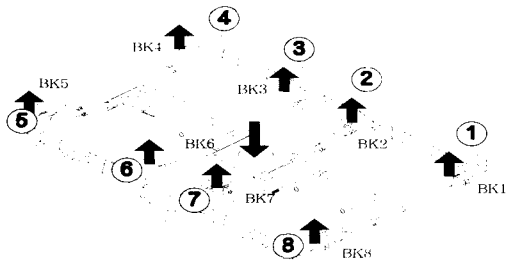


Fig. 4 Test method for the brake equipment load

2.1.3 좌우하중시험

좌우하중시험은 차체 좌우방향의 동적효과를 고려하여 수직 정하중의 30%에 해당하는 하중을 대차 프레임의 좌우에 부가하였다. 대차프레임을 Axle box위치에서 지지하고 Dummy center pivot과 좌우하중 지그를 설치한 다음 Axle box의 좌우방향 변위를 구속한 후, 수직 동하중을 부가한 상태에서 좌우방향으로 하중을 부가하였다.

좌우하중 = 수직 정하중 × 0.3 = 10.4 ton

2.1.4 전후하중시험

전후하중시험은 차체 전후방향의 동적효과를 고려하여 수직 정하중의 40%에 해당하는 하중을 대차 프레임의 전후방향에 부가하였다. 대차 프레임을 Axle box 위치에서 지지하고 Dummy center pivot과 전후하중 지그를 설치한 다음 Axle box의 전후방향 변위를 구속한 후, 최대 수직하중을 부가한 상태에서 Fig 5와 같이 전후하중을 부가하였다.

전후하중 = 수직 정하중 × 0.4 = 13.9 ton

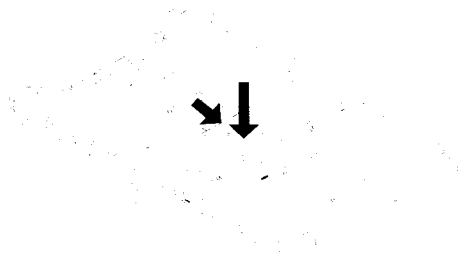


Fig. 5 Test method for the front and rear load

2.1.5 비틀림하중시험

대차 프레임의 비틀림은 휠과 레일사이의 불균일과 곡선주행시 편차로 인해 발생하는 현상이다. 첫 번째 비틀림 시험은 대차 프레임 대각선 위치의 Coil spring 지지부에 Liner를 삽입하여 15mm의 강제변위를 부여하고 63ton의 수직하중을 가하였으며, 두 번째 시험은 좀 더 열악한 조건으로 수행하기 위해 Axle box 상단에 Liner를 삽입하여 15mm의 강제변위를 부여한 후 68.9ton의 수직하중을 가하였다.

2.2 동특성 해석

2.2.1 벌크화차의 개요

신조 벌크화차의 차량최고속도는 120km/h이다. 대차의 1차 현가장치는 코일스프링을 적용한 페데스탈 방식을 적용하고 있으며 제동시스템은 양압식 답면제동형식을 적용하고 있다. 공차시엔 외측의 스프링이 작용하고 영차시엔 내·외측의 스프링이 동시에 작용하는 2중 구조 형식을 취하고 있다. 대차와 차체간 하중지지는 구면형 센터피봇과 접촉식 탄성 사이드베어링에 의한다. 탄성사이드베어링은 차체를 지지한 뿐 아니라 롤변위를 제한하며, 차체와 대차프레임간의 요운동에 의한 길이방향의 마찰감쇠작용을 한다.

2.2.2 동특성해석을 위한 모델링

해석 프로그램인 VAMPIRE는 영국 British Rail Research에서 개발한 철도차량 전용 동특성 해석 프로그램으로서 전 세계적으로 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 정적해석

(Static Analysis) 등이 가능하다.

임계속도와 주행 동특성 해석을 위하여 벌크화차 1량에 대하여 모델링 하였으며, 하중조건은 화차의 주행특성상 불안정한 주행특성을 나타내는 공차조건으로 가정하였다.

Table 2는 수치해석을 위한 차량모델링에서 사용된 벌크화차의 주요제원을 나타내었다.

Table 2 Main dimension for the bulk cement car modeling

항 목	제 원	비 고
차체 중량	13.12 ton	공차시, 차체,연결기,표기, 제동 포함
대차 중량	4.651 ton	1set당
차체 길이	12.25 m	엔드실
차체 무게중심	2.1 m	레일상면 기준
대차 무게중심	0.48 m	〃
대차 중심간 거리	9.06 m	
고정 축거	1.8 m	
차륜 경	0.86 m	
차륜 답면	1/20	
축상스프링 상수	외측: 42.35 kg/mm 내측: 67.38 kg/mm	
사이드베어러		KRS 2240-2482

Fig 6은 수치해석용 차량모델 형상으로서, 차량모델은 질량요소, 스프링요소, 감쇠요소, 마찰요소 및 변위제한 요소등과 차륜과 레일간의 접촉요소로 구성된다.

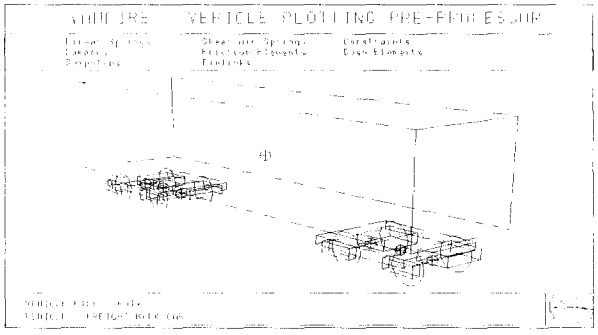


Fig. 6 Carbody modeling for the bulk cement car

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/s씩 일정속도 간격으로 증가시켜 가면서 과도응답해석을 수행하여 전위 윤축의 횡변위 거동을 파악하였다.

차량 최고속도 주행시의 동특성 분석을 위하여 샘플링한 궤도모델(경부선 402~404km) 1000m 구간에 대하여 차량이 120km/h로 주행할 때를 가정하여 해석을 수행하였다. 차량최고속도 주행시의 수치해석 결과분석을 위하여, 본 연구에서는 국내에서 통상적으로 적용되어 온 탈선안전도 평가기준5)을 적용하였다. Table 3은 국내에서 적용하고 있는 탈선안전도 평가항목과 기준을 보여주고 있다.

Table 3 evaluation standard of the running safety

평가 항목	허용한도	적용 국가	적용 대상	비 고
탈선 계수	빈도누적확률에 따라 0.8~1.1까지 허용	한국 일본	철도 차량 전반	· 30Hz Filtering · 빈도누적확률 0.1%일 때 1.1까지 허용
동적 윤중감소	빈도누적확률에 따라 50~80%까지 허용	한국 일본	〃	· 30Hz Filtering · 빈도누적확률 0.1%일 때 80%까지 허용

탈선에 대한 안전도를 평가하는 지수로서는 차륜과 레일의 횡방향 작용력과 수직방향 하중의 비인 탈선계수(Q/P), 감소된 윤중에 대한 정적윤중의 비인 윤중감소율($\Delta P/P$)을 들 수 있다.

탈선계수는 빈도누적확률 0.1%인 경우 최대 1.1까지 허용하며, 100%일때는 0.8을, 동적 윤중감소율은 80%에서 50%까지 적용하고 있다.

2.3 진동성능시험

측정구간은 경부선 천안-대전간으로 하고, 차체진동에서 고주파 진동을 제거하기 위한 필터는 10hz로 하였으며, 측정데이터는 측정구간을 100m 단위로 나누고 이 구간 내에서 최대치의 전진폭(Peak to Peak)을 취하여 그 때의 속도를 읽고, 이를 5km/h 단위의 같은 속도별로 모아서 평균하였다.

2.3.1 열차편성 및 운영

(1) 열차편성

DL+평판차 공차5+시험차(99991)+벌크차 영차1+벌크차 공차 10량

DL (특대형)	평판 공차 4량	평판 공차 (71200)	시험차 (99991)	벌크 영차 (490534)	벌크 공차 (490590)	벌크 공차 9량

(2) 운영 : 홍성 → 천안 → 대전

2.2.2. 진동가속도 평가기준

상하 및 좌우방향의 차체진동가속도를 측정하고 평가하는 원칙은 다음과 같다.

(1) 측정구간은 본선 시운전 구간으로 한다.

(2) 차체진동에서 고주파 진동을 제거하기 위한 필터는 10hz로 한다.

(3) 측정데이터는 측정구간을 100m 단위로 나누어 이 구간 내에서 최대치의 전진폭(Peak to Peak)을 취하여 그 때의 속도를 읽고, 이를 5km/h 단위의 같은 속도별로 모아서 평균한다.

(4) 속도별 진동가속도의 기준6)은 Table 4 및 Fig. 7과 같다.

Table 4 Vibration acceleration standard for the velocity

단위 : 2a(g)

속도(km/h) 방향	40 미만	80	120	160
상하방향	0.35	0.5	0.55	0.6
좌우방향	0.25	0.35	0.4	0.45

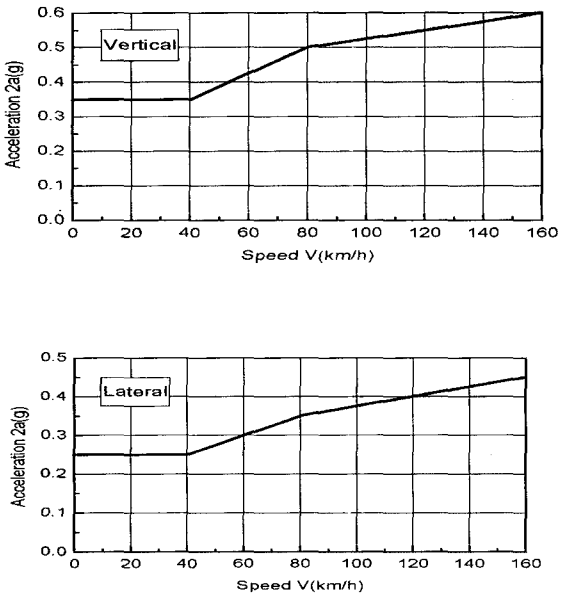


Fig. 8 Permitted limit of the vibration acceleration

3. 결과

3.1 대차 정하중시험

산출된 합성응력을 응력한계도로 표시하면 Fig 8과 같이 대차 프레임의 모든 부위가 충분한 피로강도를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 대차프레임에 사용된 재질에 대한 기계적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5 Properties of the bogie frame

재 질	항복강도 (kg/㎟)	인장강도 (kg/㎟)	피로한도(kg/㎟)		
			모재부	사상부	용접부
SWS490A	33	50	16	11	7

또한 합성응력의 최대치는 Bolster 내부 Stiffener (28번)에서 발생하였으며, 이는 재료의 허용응력 범위와 피로내구한도를 만족하고 있다. Fig. 8는 대차에 작용하는 합성응력을 나타내고 있으며 Table 6은 대차 정하중 시험결과를 나타내고 있다

Table 6 Result of the bogie static load test

단위 : kg/㎟

항목	시험하중		측정최대값 (기준:33이하)		최대값 발생부위
	종류	부하량 (ton)	인장	압축	
응력	수직	52.2	10.232	-9.316	Bolster cross beam
	전후	13.9	1.345	-2.599	Side frame
	좌우	10.4	7.816	-2.971	Bolster stiffener
	비틀림	68.9	6.71	-13.77	
	제동부품 (상)	5.31	3.091	-1.915	End beam
	제동부품 (하)	5.31	1.547	-2.525	
	합성	평균 응력	-18.835		Bolster stiffener
		응력 진폭	11.404		
변위량 (㎜)	비틀림	68.9	12		Axle box

3.2 동특성해석 결과(주행안전성 해석)

해석결과 주행속도 37m/s(133km/h)까지의 외란에 의한 윤축 횡변위는 시간에 따라 안정적으로 감쇠하는 경향을 보이고 있지만, 38m/s(136km/h)에서의 윤

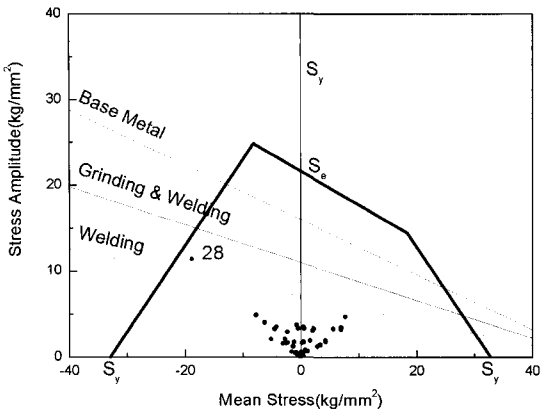
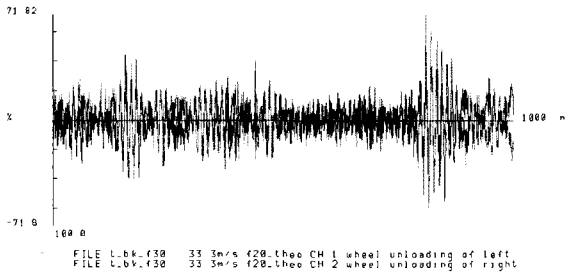


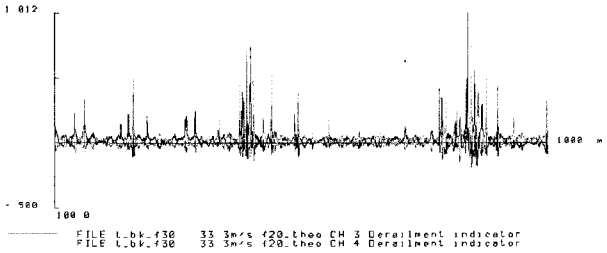
Fig. 8 Result of the composition stress for bogie

축 횡변위는 시간에 따른 감쇠특성을 보이지 않는 불안정한 특성을 보이고 있다. 따라서, 용접대차를 적용한 신조 벌크화차의 임계속도는 신조차량의 경우, 약 133km/h 대역으로 예측할 수 있다. 이는 차량의 설계최고속도가 120km/h임을 고려할 때, 본 차량의 임계속도는 약 10%정도 여유가 있으므로 제작사양에 부합하는 것으로 판단된다.

Fig. 9의 선도에서 볼 수 있듯이, 동적 윤중감소율의 최대값은 62.6%로 허용기준 80% 내에 있으며, 탈선계수 최대값은 0.79로 허용기준인 빈도누적확률 0.1%인 경우의 1.1 내에 있다. 또한, Fig. 10, Fig. 11은 각각 동적 윤중감소율 및 탈선계수에 대한 빈도분포선도이다. 이 선도에서도 두 인자 모두 허용영역 내에 있음을 알 수 있다. 따라서, 차량 최고속도 주행시의 주행안전도는 허용기준치를 만족할 것으로 판단된다.



(a) 동적 윤중감소율



(b) 탈선계수

Fig. 9 Dynamic characteristic of the bulk cement car at 120km/h speed

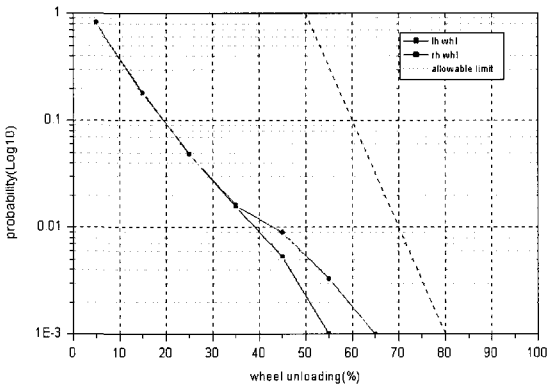


Fig. 10 Frequency distribution of the unsprung mass reduction rate at 120km/h speed

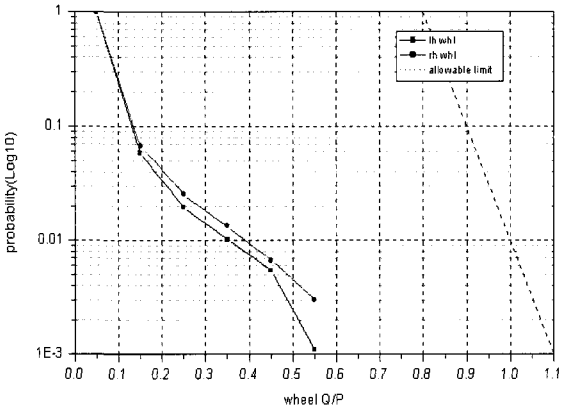


Fig. 11 Frequency distribution of the running derailment coefficient at 120km/h speed

3.3 벌크시멘트 화차의 진동성능시험결과

Fig. 12~16과 같이 경부선과 장항선 모두 철도청 제작설명서의 기준을 만족하고 있다. 또한 영·공차가 큰 차이 없이 상하방향 및 좌우방향 모두 기준을 만족하였다.

Fig. 12~15는 속도별 진동가속도를 나타낸 것이고, Fig. 16은 거리를 기준으로 한 진동, Fig. 17~18은 시험열차와 센서의 사진이다.

공차조건을 영차상태와 비교해 볼 때 상하방향에서 최대값은 크지만 평균값은 오히려 작은 것을 볼 수 있었으며, 주행안정성 측면에서 상하방향보다 중요한 좌우방향 진동은 영·공차가 큰 차이 없이 기준을 만족하였고, 평균값으로만 보면 영차보다 공차가 양호하였다.

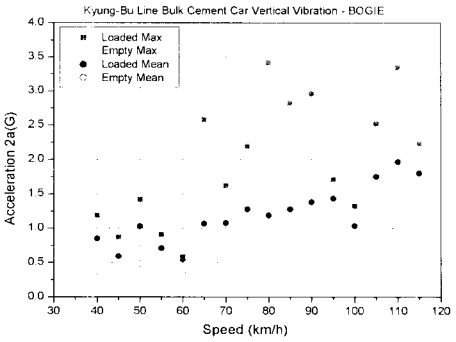


Fig. 14 Fig. 12 Bogie up-down vibration acceleration of the kyeung-bu line

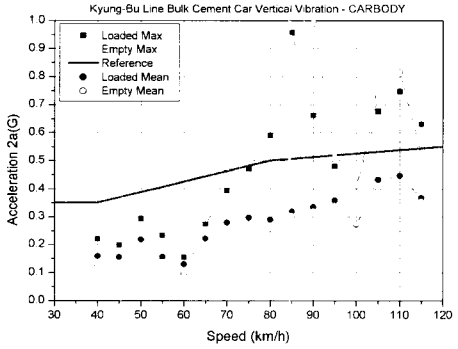


Fig. 12 Carbody up-down vibration acceleration of the kyeung-bu line

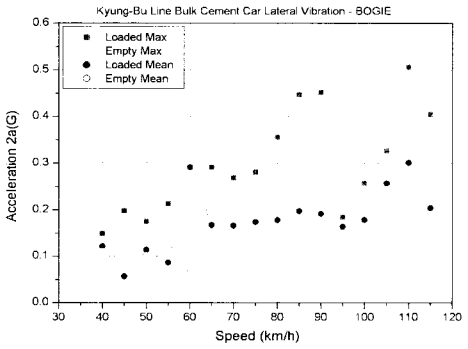


Fig. 15 Fig. 12 Bogie left-right vibration acceleration of the kyeung-bu line

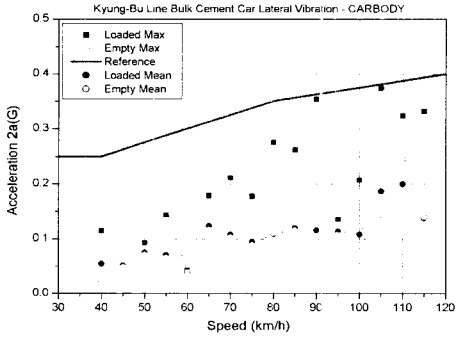


Fig. 13 Fig. 12 Carbody left-light vibration acceleration of the kyeung-bu line

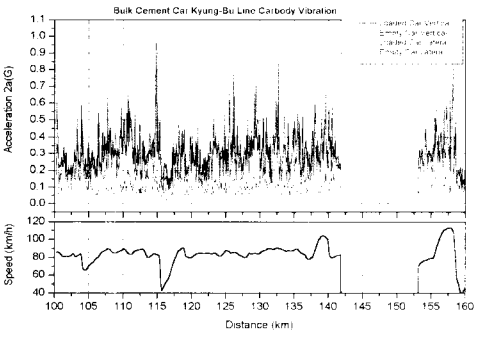


Fig. 16 Fig. 12 Carbody up-down vibration acceleration of the kyeng-bu line(by location)

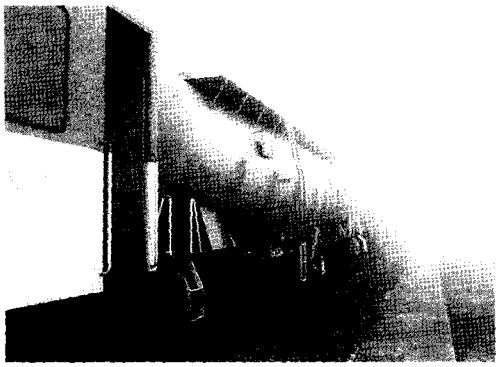


Fig. 17 Bulk cement car for test

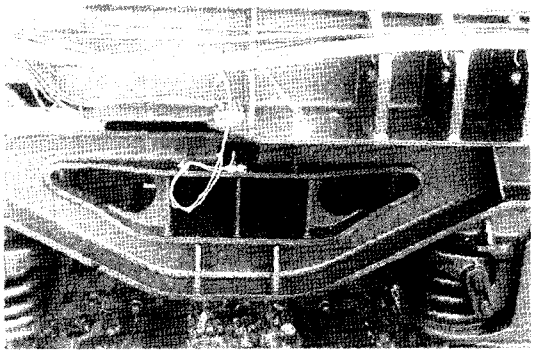


Fig. 18 Vibration acceleration censor and cable

4. 결 론

1) 대차의 정하중 시험결과, 대차프레임 전체가 충분한 강도를 보유한 것으로 평가되었다.
2) 신조 벌크화차의 임계속도는 133~136km/h 대역으로 추정되며, 따라서 차량의 최고속도 120km/h 조건을 충족한다.
3) 실제선로에서 샘플링 한 구간을 대상으로 한 차량최고속도 주행시의 동적 특성은 모두 허용기준치 내에 있다.
4) 벌크시멘트 화차의 진동성능은 허용기준을 만족하였다.

참 고 문 헌

(1) 철도청, 벌크시멘트차 제작설명서, 특수설명서 제 2001-12호
(2) 함영삼 외, 고속화차용 용접대차 프레임 개선모델의 강도평가, 한국철도학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp.235~239, 2001.10
(3) 일본규격협회, 철도차량용 대차프레임 설계통칙, JIS E 4207, 1992
(4) 일본규격협회, 철도차량용 대차의 하중시험방법, JIS E 4208, 1988
(5) 철도기술연구소, 철도차량의 주행안전성 평가방법, 철도기술연구보 VOL23 NO1, pp.198~204, 1989
(6) 철도기술연구소, 철도차량의 진동측정방법, 철도기술연구보 VOL23 NO1, pp.190~195, 1989