

신형고속열차용 동력차 구조체 하중시험에 관한 연구

A Study on the Load Test of Power Car Body for New High Speed Train

김원경*†

Weon-Kyong Kim*†

Abstract In this study, the load test of Power car body for New High speed train. Car Body for rolling stock in safety operation of the vehicle as an essential core unit before applying to the vehicle safety and reliability should be tested sufficiently. Especially, Centralized Power-type Car Body for High speed train on the weight of the various electrical devices of the engine room heavy and various types of devices, the stress generated in the complex, it is disposed structural analysis results the heavy weight structure is generated very high. In the addition, because it runs as a vehicle driving speed to 300km/h high speed over safety verification it can be called essential. Structural safety by implementing a method to structure static load test in the accordance with the performance test regulations of the railway safety codes for verification was evaluated for each load by stress and to evaluate the safety, depending on the test conditions and the criteria of safety standards, the base metal part and each load results confirmed the stress of the welded portion was found to safe.

Keywords : : Load test, High Speed Train, Power car, Safety, Standard, Performance Testing.

초 록 본 논문은 국내 동력집중 식 신형고속열차용 동력차 구조체 하중시험에 관하여 연구한 내용이다. 철도차량용 구조체는 안전운행에 기본이 되는 핵심장치로서 완성차량에 적용하기 전에 구조체의 안전성 및 신뢰성이 충분히 검증되어야 한다. 특히 동력집중 식 고속열차용 동력차 구조체의 경우 기관실내의 각종 전기장치의 중량이 무겁고 다양한 형태의 장치가 복잡하게 배치되어 있어 구조해석 결과 중량 물에 의한 구조체에 발생하는 응력이 매우 높게 발생되고 있으며 또한, 차량운행속도가 300km/h 이상 고속으로 운행하기 때문에 안전성 검증이 필수적이라 할 수 있다. 구조체 안전성 검증을 위한 방법으로 철도안전법의 성능시험관련 규정에 따라 구조체 정하중 시험을 실시하여 각 하중별 응력을 평가하고 안전기준의 시험조건 및 판정기준에 따라 안전성을 평가하였으며, 각 하중별 모재부 및 용접부의 응력을 확인한 결과 안전한 것으로 확인되었다.

주요어 : 하중시험, 고속열차, 동력차, 안전, 표준, 성능시험

1. 서 론

철도차량의 차체는 안전운행을 위한 핵심장치로서 설계 및 제작 단계부터 차량에 적용하기 전에 충분한 안전성과 신뢰성이 확보되어야 한다. 본 논문은 국내에서 300km/h 이상으로 운행될 동력집중식 고속열차의 동력차의 구조체 하중시험에 관한 내용이다. 구조체의 안전성을 검증하기 위해 철도안전법의 성능시험 규정에 따라 정하중 시험을 실시하고 판정기준에 따라 안전성을 평가하였다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 광역도시철도시스템연구실(wkkim@krri.re.kr)

2. 본 론

2.1 시험 개요

2.1.1 시험항목

시험차량은 신형 고속열차의 동력차 차체(PC)이며, 철도안전법의 구조체 하중시험 관련규정에 따라 시험항목은 압축하중시험(연결기, 켄트레일, 윈도우 가드레일), 인장하중시험, 조합하중시험, 수직하중시험, 운행하중시험, 진동시험, 3점지지 하중시험, 비틀림 하중시험, 비틀림 고유진동수시험을 실시하였다.

2.1.2 시험차량 제원

시험차량은 일반강재 및 고장력 강재를 용접하여 제작했으며, 시험차량의 JIG 설치 셋팅은 전후대차의 Center Pivot 위치에 Roller 또는 나이프 에지 등 설치하여 구체를 수직으로 지지하도록 설치하였으며, 각 시험하중 조건에 따라 반력과 하중 인가를 위한 반력 지그를 구체 앞 뒤 위치 설치하고 수직하중은 빔을 설치하고 Load cell 을 고정하여 차체에 하중을 인가하였으며, 인장 및 압축 하중은 30톤, 100톤 및 300톤 Load Cell 을 전후 고정벽에 설치하여 Fig. 1 과 같이 시험 하중을 인가하였다.



Fig. 1 JIG Setting for Power Car Body Load testing

동력차에 사용된 재질의 항복강도 및 피로강도는 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical Characteristic of Car body Material (단위 : MPa.)

재 질	항복강도	피로강도	인장강도	비 고
SM490YB	≥ 355	≥ 160	≥ 460	KS D 3515
S355J0	≥ 355	≥ 160	≥ 470	EN 10025
HSLA500	≥ 500	≥ 130	≥ 570	EN 10149-2
SM400B	≥ 245	≥ 135	≥ 400	KS D 3515
S500MC	≥ 500	≥ 130	≥ 550	EN 10149-2
SS400	≥ 245	≥ 135	≥ 400	JIS G 3101

동력차의 중량계산은 Table 2 와 같다.

Table 2 Weight of Car body

No.	구분	중량	비고
1	공차중량(W_e)	68.6ton	차량중량 + 대차중량(최대설계중량)
2	대차중량(W_b)	13.8ton	6.9ton x 2set
3	차량중량(M_1)	54.8ton	공차중량 - 대차중량(최대설계중량) 운행상태의 차량자중
4	구조체 중량	13.09ton	차체 설계 중량
5	수직하중 할증 계수	30%	철도안전법(수직하중)
6	동하중계수	0.2g	철도안전법(운행하중)

2.2 시험방법

2.2.1 계측장비

차체의 하중시험에 사용될 시험장비 설치도는 Fig. 2 와 같다.

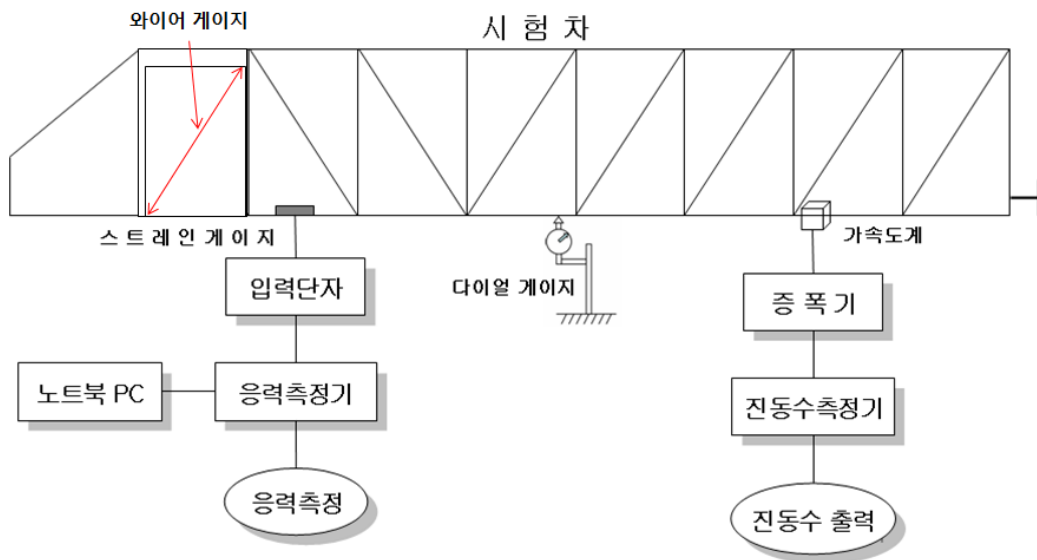


Fig. 2 Test Equipment Setting for Load testing

2.2.2 측정점 선정방법

(1) 응력의 측정점

- (가) 강도계산의 결과 높은 응력 발생이 예측되는 부분
- (나) 출입문과 창문의 개구부 코너 등을 비롯한 과다 변형예상 부분

- (다) 형상 및 단면의 급변화부분, 용접비드의 끝단부 등 응력집중이 예측되는 부분
- (라) 구조체 제작시 용접, 가공 등 주의를 요하는 부분

(2) 변위량의 측정점

(가) 차량의 길이방향으로 지정 위치에서 수직방향의 변위량

- ① 구조체의 지지점
- ② 변형상태가 관측 가능한 위치로 대략 등 간격이 되는 점

(나) 차량 단면 내의 변위량

형상 및 단면의 급변화 부분 등, 구조체의 성능에 영향을 미치는 점으로 한다.

(3) 진동수의 측정점

진동수의 측정점은 고유모드가 가장 명확하게 나타나는 점으로 한다.

2.2.3 하중조건

차체 하중시험 중 시험항목별 하중조건은 차량의 중량을 기준으로 철도안전법에 따라 계산 하였으며 시험항목별 하중은 다음 Table 3 과 같다

Table 3 Weight Condition of Car body Load Test

번호	하중 조건		하중 크기	비 고
1	압축 하중	연결기 높이	압축하중 2,000kN	수직하중 41.7 ton
2		윈도우 가드레일	압축하중 300 kN	
3		캔트 레일	압축하중 300 kN	
4	인장하중	연결기 높이	인장하중 1,500 kN	
5	조합하중 (인장+수직하중)		수직하중 58.2 ton 인장하중 1,500 kN	
6	수직하중		수직 하중 58.2 ton	
7	운행하중(1±0.2g)		수직 하중 (54.8ton±10.96ton)-13.09ton	
8	진동 시험		13.09 ton	Bareframe 상태
9	3 점지지 하중		수직하중 41.7 ton	
10	비틀림 하중		4ton · m	
11	비틀림 고유진동수		여진 가능 한 하중	Bareframe 상태

2.2.4 평가기준

하중조건 별 평가기준은 철도안전법에 따라 차체 사용재질의 항복강도를 각각의 안전계수로 나눈 값을 기준으로 한다. 단, 각 항목별 계산하중에서 제외된 구조체 중량에 해당하는 응력은 별도로 측정하여 각 항목별 하중시험 결과와 합산하여 평가한다. 운행하중의 평가기준은 Goodman 선도를 이용하여 평가하며, 운행 하중시험에서 측정한 1.0g 상태에서 측정응력을 mean stress 로, 1.2g 상태에 측정한 응력 값과 1.0g 상태에서의 측정응력 값의 차이(0.2g)를 stress amplitude 로 하여 Goodman 선도를 작성한다. 사이드실의 처짐 량

판정기준은 대차 중심 간 거리의 1/1000 인 이내로 한다. 또한 차체의 고유진동수는 성능시험의 구조체 하중시험 4. 평가기준(3)에 따라 굽힘 진동모드의 값을 적용하여 평가한다. 이상의 평가기준을 정리하면 Table 4 와 같다.

Table 4 Criteria of Car body Load Test

구 분	항 목	판정 기준	비 고
강 도	응력	항복강도/안전계수 이하 (모재=1.0, 용접부=1.1)	안전기준 별표 4 4. 평가기준
	응력(운행하중)	피로강도/안전계수 이하 (모재=1.5, 용접부=1.65) Goodman 선도	안전기준 별표 4 4. 평가기준을 활용한 Goodman 선도
강 성	Side Sill 의 최대처짐	14.0mm 이하 (대차 중심간 거리 1/1000 이하)	설명서 4.2.1 차체 구조 및 연결장치
고유진동수	1 차 굽힘 고유진동수	굽힘 진동모드의 값	-

위의 Table 4의 안전기준을 적용하여 사용재질의 허용응력 및 피로응력을 정리하면 다음 Table 5 와 같다.

Table 5 Criteria of Car body Material

(단위 : MPa.)

재질	항복강도	피로강도	허용응력		피로응력	
			모재부 (안전계수=1.0)	용접부 (안전계수=1.1)	모재부 (안전계수=1.5)	용접부 (안전계수=1.65)
SM490YB	≥ 355	≥ 160	355	322.7	106.7	97
S355JO	≥ 355	≥ 160	355	322.7	106.7	97
HSLA500	≥ 500	≥ 130	500	454.5	86.7	78.8
SM400B	≥ 245	≥ 135	245	222.7	90	81.8
S500MC	≥ 500	≥ 130	500	454.5	86.7	78.8
SS400	≥ 245	≥ 135	245	222.7	90	81.8

2.2.5 시험 DATA 측정

시험 차체는 시험 전에 캠버량과 중량을 측정하고, 구조해석 결과를 근거로 고응력이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착한다. 차체는 좌우 대칭을 이룬다고 볼 수 있으므로 1/2 영역에 집중적으로 스트레인 게이지를 부착하며, 언더프레임에는 1/2 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 하중의 대칭성을 확인한다. 스트레인 게이지는 1 축 게이지를 사용하며 측정 가능한 개수는 80 개이다. 사이드 실의 처짐량은 LVDT 를 이용하여 측정하며, 처짐량 측정점은 총 14 개소이고 출입문 개구부의 변형량 측정을 위하여 와이어 타입 게이지를 1 개소 설치하였다. 고유진동수 측정을 위한 가속도계 취부

위치는 사이드 실 중앙과 엔드 쪽 2 개소이며, 처짐량 측정위치는 사이드실을 따라 등 간격으로 설치하였다.

(1) 연결기 높이 압축시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 41.7 ton 을 가한 후, 차체 연결기 위치를 압축봉으로 지지한 상태에서 반대쪽 연결기 위치에서 유압 장비를 이용하여 압축하중을 가한다.

◎ 하중단계: 0 ton → 41.7 ton (차체 수직정하중)
0 kN → 1500 kN → 2000 kN (압축하중)

(2) 윈도우 가드레일 높이 압축하중시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 41.7 ton 을 가한 후, 앞쪽 운전실의 창문 아랫부분에 유압장비를 이용하여 압축하중을 가하고 후미부의 동일 높이 위치에서 압축하중을 지지하도록 지그를 설치한다.

◎ 하중단계: 0 ton → 41.7 ton (차체 수직정하중)
0 kN → 225 kN → 300 kN(압축하중)

(3) 캔트레일 높이 압축하중시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 41.7 ton 을 가한 후, 운전실의 창 윗부분에 유압장비를 이용하여 압축하중을 가하고 후미부의 동일 높이 위치에서 압축하중을 지지하도록 지그를 설치한다.

◎ 하중단계: 0 ton → 41.7 ton (차체 수직정하중)
0 kN → 225 kN → 300 kN(압축하중)

(4) 인장하중시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 41.7 ton 을 가한 후, 차체 커플러 패드 위치에 인장봉으로 고정한 상태에서 반대쪽 커플러 패드 위치에서 유압 장비를 이용하여 인장하중을 가한다.

◎ 하중단계: 0 ton → 41.7 ton (차체 수직정하중)
0 kN → 1125 kN → 1500 kN (인장하중)

(5) 조합하중시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 58.2 ton 을 가한 후, 차체 커플러 패드 위치를 인장봉으로 고정한 상태에서 반대쪽 커플러 패드 위치에서 유압 장비를 이용하여 압축하중을 가한다.

◎ 하중단계: 0 ton → 43.7 ton (75%) → 58.2 ton (100%) (차체 수직하중)
0 kN → 1500 kN → 2000 kN (압축하중)

(6) 수직하중시험

시험 차체는 수직하중 지그로 지지되며, 언더프레임 상면에 유압 실린더를 사용하여 등분포로 차체 수직하중 58.2 ton 을 단계별로 부가한다.

◎ 0 톤 → 43.7 ton(75%) → 58.2 ton(100%)

(7) 운행하중시험

시험 차체는 수직하중 지그로 지지되며, 언더프레임 상면에 유압 실린더를 사용하여 등분포로 차체 수직하중 52.7 ton 을 단계별로 부가한다.

◎ 차체부 수직하중 부하 단계: 0 톤 → 30.8 ton(0.8g) → 52.7 ton(1.2g)

(8) 3점지지 하중시험

리프팅 패드 4 곳에 수직받침대를 설치 후 차체 언더프레임 상면에 등분포로 차체 수직하중 41.7 톤을 가한 후, 리프팅 패드 한곳에 수직받침대를 리프팅 패드와 분리될 때 까지 서서히 내린다.

◎ 0 톤 → 41.7 톤(100%)

(9) 비틀림 하중시험

후미부에 2 개소를 지지대로 지지하고 반대편 전두부를 차체의 rolling 이 가능하도록 비틀림 지지대를 넣어 지지한 후, 도어 근처에서 4ton·m 의 하중을 부가한다.

◎ 0 톤 → 3ton·m(75%) → 4ton·m(100%)

(10) 굽힘 고유진동수 시험

굽힘 고유 진동수 시험시 차체는 수직지지대로 지지되며 언더프레임 상면 중앙에 유압 실린더를 사용하여 하중을 가한 후, 순간적으로 하중을 제거한다

(11) 비틀림 고유진동수 시험

구조체의 지지 방법은 비틀림 하중시험과 동일하게 적용한다. 시험하중은 비틀림 하중이 적용되는 곳에 하중을 부가하고 순간적으로 하중을 제거하여 구조체에 자유진동을 일으키는 방법을 사용하여 시험 계측하였다.

2.3. 시험 결과 검토

2.3.1 하중시험 결과

모든 하중조건에서의 최대 응력은 압축 조합 하중 조건 시 사이드 실에서 발생하였으며, 그 값은 427.9MPa로서 사용재질(HSLA500)의 모재부 허용응력 500MPa 이내에 있다. 또한 아래 Table 6 에서 볼 수 있듯이 8개의 각 하중 조건의 최대 발생응력이 각 사용재질의 허용응력 이

내에 존재하는 것을 알 수 있다. 위의 결과에 따라 신형고속열차용 동력차(PC) 구조체는 안전한 강도를 가진 것으로 판단된다. 각 하중조건에 대한 최대 응력은 Table 6 과 같다.

Table 6 The Results of Car body Static Load test

시험항목	Gage No.	발생응력	허용응력	사용재질	발생부위
연결기 높이 압축 하중시험	79	412.7MPa	500MPa	HSLA500	전두부 센터실
인장 하중시험	162	343.2MPa	355MPa	SM490YB	전두부 커플러 마운팅 패드
압축 조합 하중시험	102	427.9MPa	500MPa	HSLA500	사이드 실
수직 하중시험	44	259.2MPa	355MPa	SM490YB	사이드 포스트
윈도우 가드레일 압축 하중시험	59	306.7MPa	355MPa	SM490YB	사이드 프레임
캔트레일 압축 하중시험	13	207.1MPa	323MPa (용접부)	SM490YB	Cab 프레임
3 점지지 하중시험	117	282.4MPa	500MPa	HSLA500	사이드 실
비틀림 하중시험	186	155.9MPa	355MPa	SM490YB	Roof 프레임

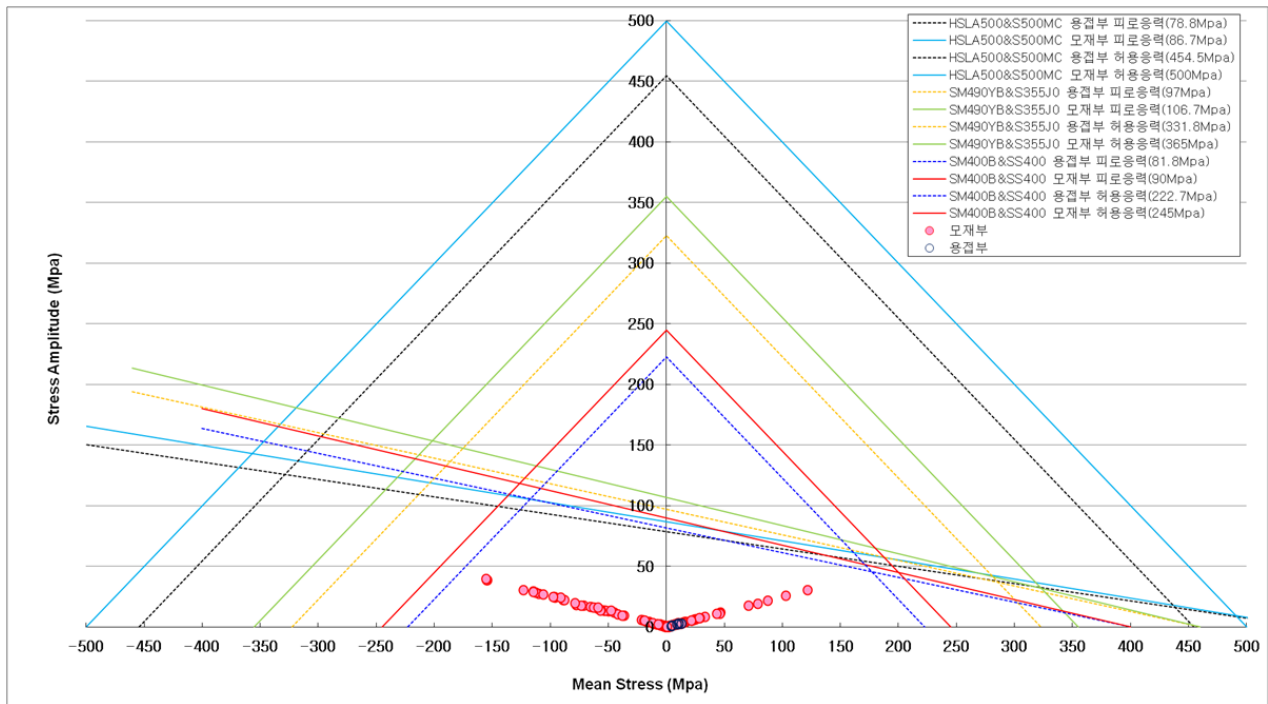


Fig. 3 Goodman Diagram of Car body Running Condition Load test

2.3.2 처짐량 시험결과

수직하중 조건에서의 최대처짐량은 11.88mm이며, 각 위치별 처짐량은 다음 Fig. 4 와 같다.

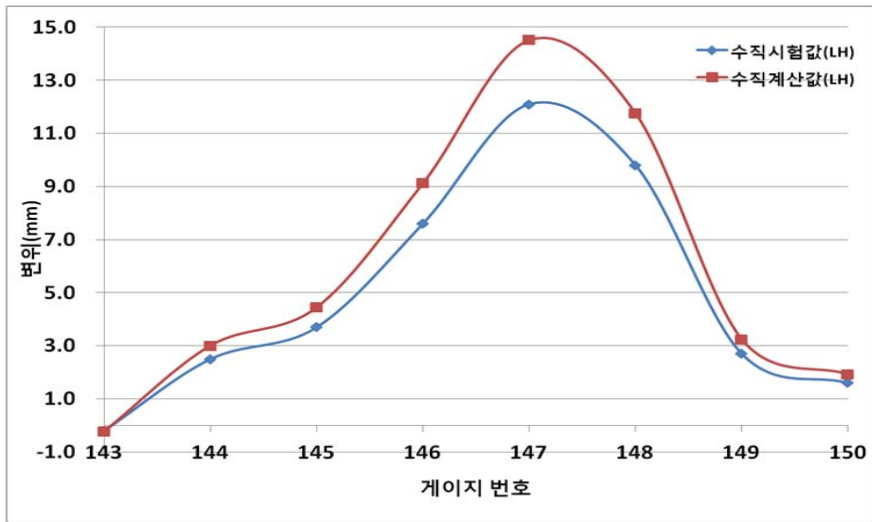


Fig. 4 The Results of Car body Deflection test

2.3.3 고유진동수 시험결과

관광열차 구조체의 굽힘 및 비틀림 고유진동수 측정결과는 다음 Table 7 과 Fig. 5 와 같음.

Table 7 The Results of Car body Natural Frequency

구 분	고유진동수(Hz)
굽힘 고유진동수	15
비틀림 고유진동수	14

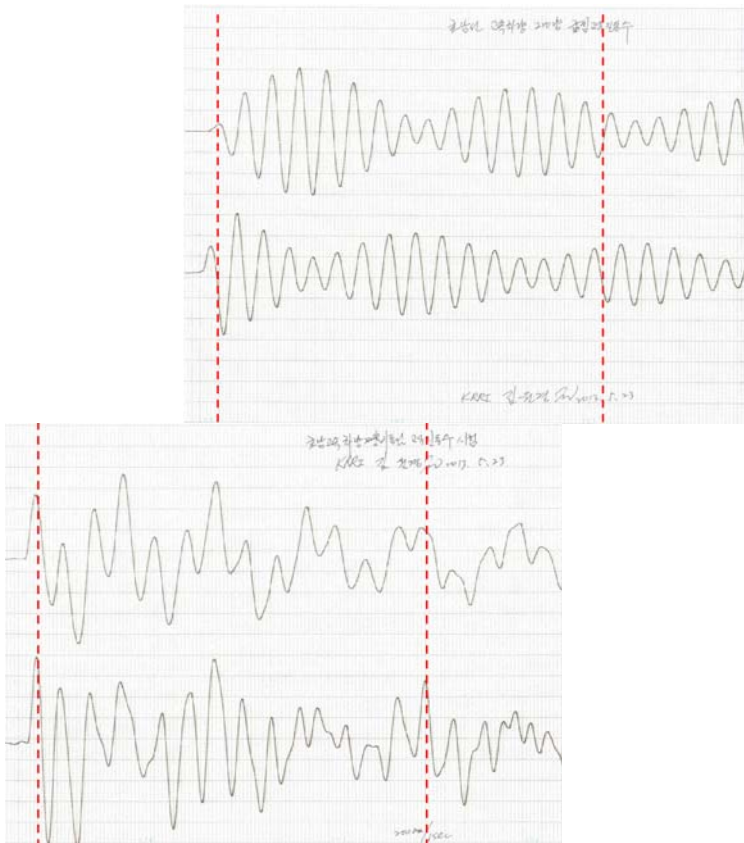


Fig. 5 Bending and Twist Natural Frequency test Results

3. 결론

- (1) 하중조건에서의 최대 응력은 압축 조합 하중 조건 시 사이드 실에서 발생하였으며, 그 값은 427.9 MPa 로서 사용재질(HSLA500)의 모재부 허용응력 500 MPa 이내에 있다. 또한 하중시험 결과에서 볼 수 있듯이 8 개의 각 하중 조건의 최대 발생응력이 각 사용재질의 허용응력 이내에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 신형 고속열차 동력차(PC) 구조체는 안전한 강도를 가진 것으로 판단된다.
- (2) 구조체의 굽힘 고유진동수는 15.0 Hz, 비틀림 고유진동수는 14.0 Hz로 나타났다.
- (3) 구조체의 사이드실 최대 처짐량은 최대 11.88 mm으로 기준치 14.0 mm 이내에 있다.
- (4) 운행하중조건 하에서의 발생응력은 각 사용재질의 피로 안전영역 내에 존재하여 안전한 것으로 판단된

이상의 결과로부터 신형고속열차 동력차(PC) 구조체는 충분한 강도 및 강성을 확보하는 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 철도안전법 성능시험규정에 따라 실시한 결과를 토대로 작성된 것임.

참고문헌

- [1] "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준" 국토해양부 고시 제2008-420호, (2008.8.12)
- [2] 철도안전법 철도차량 성능시험시행지침, 철도차량 안전기준에 관한 지침.
- [3] KS R 9228 ㉠철도차량 구체의 하중시험 방법
- [4] 산악지형 관광열차용 기관차 구조체 하중시험에 관한 연구(김원경, 2015, 춘계학술대회 논문집)