

# 최고속도 200km/h급 중국 1등객차의 동특성 해석연구

## A Study on Dynamic Characteristics of the 200km/h Chinese First Class Passenger Car

이강운\*

Lee, Kang-Wun

---

### ABSTRACT

In this study we have studied running stability, safety and passenger comfort of the Chinese first class passenger car made by our company and CCRW. A fine analysis model of 72 d.o.f. was constructed for simulating dynamic behavior of the car on straight and curved tracks having irregularity configurations. We have calculated the various characteristic values such as critical speed, lateral force, derailment ratio, wheel unloading ratio and passenger comfort index, then evaluated them by comparing with reference values.

---

## 1. 서론

본 연구의 목적은 최고속도가 200km/h인 중국장춘대차(CW-2A)가 장착된 중국 1등객차에 대한 주행안정성 및 주행안전성을 판단하기 위해서 영국 B.R.R.에서 개발된 철도차량 동역학 해석전용 S/W인 VAMPIRE를 사용하여 동역학 해석을 실시함으로써 실노선 시험전에 차량의 동적인 특성들을 예측하는 데에 있다. 본 연구에서는 먼저 차량의 주행안정성을 판단하기 위하여 차량의 주행속도와 주행안정성에 큰 영향을 미치는 차륜담면구배(conicity)를 일정구간 내에서 변화시키면서 선형고유치 해석을 실시하여 차량의 임계속도(critical speed)를 산출하고 운전최고속도와 비교하였다. 다음에 차량의 주행안전성을 판단하기 위하여 직선-완화곡선-본곡선-완화곡선-직선으로 구성되고 궤도불규칙도를 가지는 노선에서 차륜과 레일 사이에 작용되는 횡압, 탈선계수, 윤증감소율, 승차감지수 등을 비선형과도응답 해석을 통해서 산출한후 제한치와 비교하였다.

## 2. 해석모델 및 제원

### 2.1 대차의 모델링

대차의 동특성해석을 위해서는 복잡한 실제의 대차구조를 질량과 스프링, 댐퍼, 기타 동특성해

---

\* (주)한진중공업 연구개발부 선임연구원, 정회원

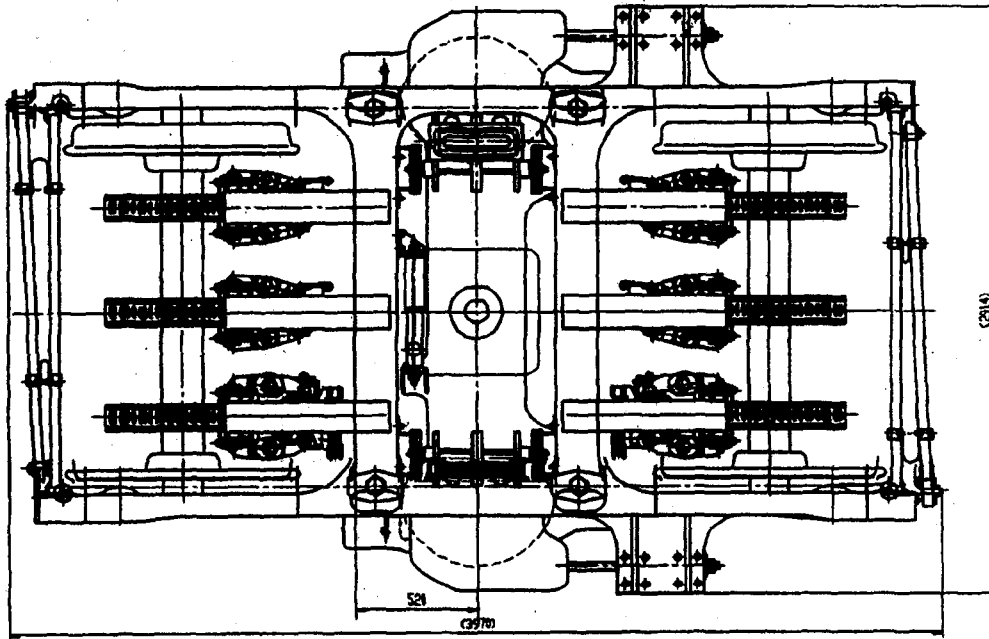
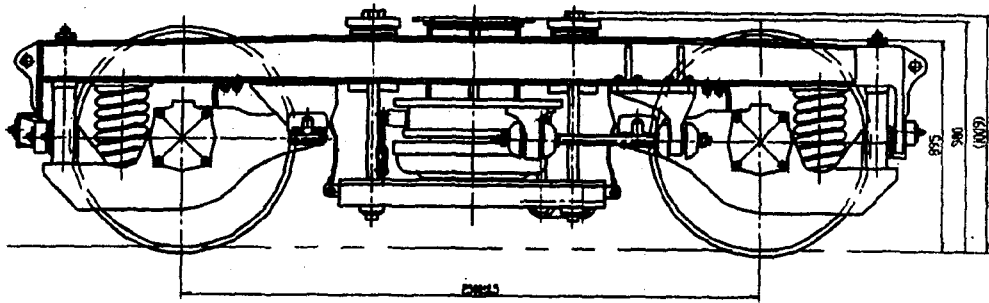


그림 1. 대차 일반도

석을 위해서 개발된 해석요소들을 이용해서 간략화된 수학적 모델로 구성하여야 한다. 먼저 대차를 구성하는 질량요소로 대차 후레임과 볼스터, 휠세트로 세분화하고 후레임과 볼스터 사이에 공기스프링과 횡방향 댐퍼를, 후레임과 휠세트 사이에 1차코일스프링과 수직댐퍼를 설치하였으며 대차 일반도를 그림 1에 도시하고 해석시 고려된 대차의 동역학적 파라미터값들을 도표 1에 정리하였다.

도표 1. Parameters of the Analysis Model

PART	PARAMETER LIST	VALUE	UNIT
BODY	Mass	33.93	Mg
	Roll inertia	80.91	Mgm <sup>2</sup>
	Pitch inertia	1992	Mgm <sup>2</sup>
	Yaw inertia	1995	Mgm <sup>2</sup>
	Height of center of gravity above rail level	1.742	m
BOGIE FRAME	Mass	3.175	Mg
	Roll inertia	2.1334	Mgm <sup>2</sup>
	Pitch inertia	2.2317	Mgm <sup>2</sup>
	Yaw inertia	4.5052	Mgm <sup>2</sup>
	Height of center of gravity above rail level	0.7083	m
BOLSTER	Mass	0.578	Mg
	Roll inertia	0.2	Mgm <sup>2</sup>
	Pitch inertia	0.1	Mgm <sup>2</sup>
	Yaw inertia	0.5	Mgm <sup>2</sup>
	Height of center of gravity above rail level	0.546	m
WHEELSET	Mass	1.6	Mg
	Roll and Yaw inertia	0.9672	Mgm <sup>2</sup>
	Axlebox pitch inertia	0.14	Mgm <sup>2</sup>
	Nominal wheel radius	0.4575	m
1차스프링	Vertical stiffness	0.358	MN/m
2차스프링	Vertical stiffness	0.43	MN/m
TRAILING ARM BUSH	Longitudinal shear stiffness	3.0	MN/m
	Lateral shear stiffness	3.07	MN/m
	Vertical stiffness	0.448	MN/m
TORSION BAR	Rolling stiffness	1.73	MN/rad
PRIMARY VERTICAL DAMPER	Damping coefficient	0.025	MNs/m
SECONDARY LATERAL DAMPER	Damping coefficient	0.055	MNs/m

## 2.2 궤도의 모델링

차량의 주행안전성 해석시 고려된 레일의 형상은 표준궤도(1,435mm)를 가지는 UIC60-20궤도 이다.

## 2.3 차륜의 모델링

차량의 주행안전성 및 안정성 해석시 고려된 차륜의 형상은 Brazilian차륜이고 그림 2에 신조시의 형상을 도시하였다.

## 2.4 차륜/레일의 접촉데이터

차륜의 답면구배가 선형이고 차륜이 심하게 마모되기 전에는 차륜의 레일에 대한 상대운동이 비교적 작아서 주행안전성 해석시 선형접촉이론의 적용이 가능하나 차륜의 답면구배가 변화하거나 차륜이 심하게 마모된 경우에는 비선형 접촉이론을 적용하여야한다.

이를 위해서 차륜과 레일사이의 접촉데이터가 필요하며 차륜과 레일의 형상데이터와 차륜직경, 윤축하중 등을 이용하여 접촉데이터를 얻게 된다.

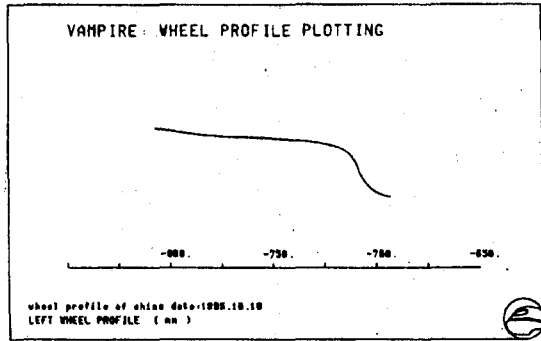


그림 2. 휠 형상

## 2.5 궤도 불규칙도의 모델링

차량의 주행안전성 해석시 고려되는 궤도 불규칙도는 직선구간 뿐만아니라 특히 곡선구간 주행시의 차륜과 레일사이에서 작용되는 횡압, 탈선계수, 윤축감소율, 승차감지수 등에 큰 영향을 미치며 본 연구에서 고려된 궤도 불규칙도의 종류와 그 정도를 그림 3에 도시하였다.

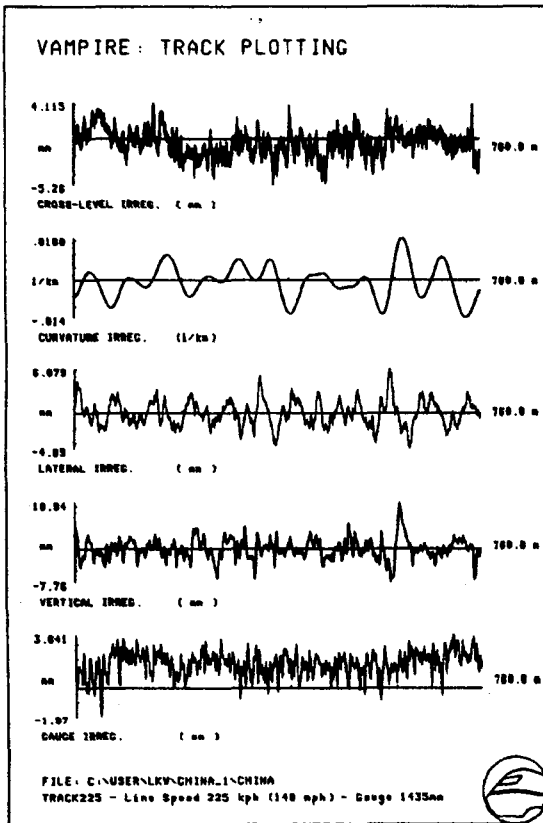


그림 3. 궤도 불규칙도

## 3. 해석종류 및 제한치

### 3.1 주행안정성 해석

일반적으로 차량의 주행안정성은 대차의 헌팅(사행동)이 발생하는 속도에 의해서 결정된다. 이속도를 임계속도라 부르며 임계속도 이상에서는 궤도로부터의 조그만 가진에도 대차진동의 진폭은 점차 증가하는 방향으로 발산하게 된다. 임계속도의 수학적 인 의미는 특정 진동모우드, 일반적으로 대차의 횡방향 및 yaw 모우드에 대한 유효감쇠비가 양에서 음으로 전환되는 속도로서 선형고유치 해석을 통해서 구할수 있다. 본 해석에서는 차량의 주행속도를 144km/h에서 288km/h까지 점차로 변화시키고 임계속도에 큰 영향을 미치는 차륜답면구배(conicity)를 신조시 0.05에서 답면이 마모되었을때의 0.2까지 변화시키면서 선형고유치 해석을 실시하였다. 임계속도의 제한치는 해석시 고려된 차륜의 답면구배내에서 차량의 운전최고속도인 200km/h이상 이어야 한다.

### 3.2 주행안전성 해석

주행안전성 해석의 경우에는 실제의 차륜과 레일의 형상으로부터 만들어진 차륜/레일의 접촉데이터와 설정된 궤도조건을 이용하여 비선형 과도해석을 수행하게 된다.

#### 3.2.1 횡압

차량이 직선 또는 곡선구간 통과시에 차륜과 레일 사이에는 마찰력으로 인하여 횡방향으로 힘이 작용하게 되며 그 힘의 크기는 레일의 유지, 보수와 차량의 안전 측면에서 제한치를 만족해야 하고 중국규정(GB 5599-85)에서 정의된 제한치는 다음과 같다.

레일고정철못의 안전측면에서,

제 1한계

$$Q \leq 1.9 + 0.3P_{st} \quad (1)$$

제 2한계

$$Q \leq 2.9 + 0.3P_{st} \quad (2)$$

나무침목에 대하여,

$$H \leq 0.85 \left( 1 + \frac{P_{s1} + P_{s2}}{2} \right) \quad (3)$$

콘크리트 침목에 대하여,

$$H \leq 0.85 \left( 1.5 + \frac{P_{s1} + P_{s2}}{2} \right) \quad (4)$$

여기서 Q는 차륜에 가해지는 횡압(kN), H는 대차후레임에 가해지는 횡압(kN),  $P_{st}$ ,  $P_{s1}$ ,  $P_{s2}$ 는 차륜에 가해지는 정적인 수직하중(kN)이다

#### 3.2.2 탈선계수

탈선계수는 차륜과 레일사이에 작용되는 수평력(횡압)을 수직력으로 나눈값이며 윤증감소율과 함께 차량의 탈선가능성을 예측하는 중요한 계수이고 중국규정(GB 5599-85)에서 정의된 제한치는 다음과 같다.

제 1한계

$$\frac{Q}{P} \leq 1.2 \quad (5)$$

제 2한계

$$\frac{Q}{P} \leq 1.0 \quad (6)$$

여기서 Q는 차륜에 가해지는 횡압(kN), P는 차륜에 가해지는 수직하중(kN)이다.

#### 3.2.3 윤증감소율

차륜에 작용되는 횡압이 그다지 크지 않아도 윤증이 심하게 감소하면 탈선을 일으킬수 있다. 그 원인으로서는 여러 가지가 있으나 특히 대차중심간 거리가 큰 차량이 곡선출입부의 완화곡선 부에서 캔트구역을 통과하는 경우에 차량의 대차 비틀림강성이 강하고 2차 스프링등이 강한 경우에 윤증감소가 생기기 쉽다. 윤증감소율은 윤증감소량을 차륜수직하중으로 나눈값이며 중국규정(GB 5599-85)에서 정의된 제한치는 다음과 같다.

제 1한계

$$\frac{\Delta P}{P} \leq 0.65 \quad (7)$$

제 2한계

$$\frac{\Delta P}{P} \leq 0.6 \quad (8)$$

여기서  $\Delta P$ 는 윤중변화량(kN),  $P$ 는 차륜수직하중(kN)이다.

### 3.2.4 승차감 지수

승차감지수란 차량운행시 승객이 느끼는 승차감의 정도를 정량적으로 표시한 지수이며 일반적으로 차량의 바닥면에서 측정된 가속도 성분들을 운행거리에 대해서 조합하고 일정한 주파수 대역에 대해서 필터링한후 계산된다. Sperling Ride Comfort Index(Wz)는 UIC에서 채택하고 있는 승차감지수로서 본 해석에서 적용한다.

## 4. 해석결과

### 4.1 주행안정성 해석

선형고유치 해석결과 임계속도는 그림 4에서와 같이 차륜담면구배가 0.05일때에는 277km/h이고 0.2일때에는 234km/h로써 차량의 운전최고속도인 200km/h를 상회하므로 선형조건하에서 차량의 운행중에는 사행동이 발생되지 않아서 안정성이 있는 것으로 판단된다. 차량의 주행속도가 144km/h이고 차륜담면구배가 0.05일 경우의 각 모드별 진동주파수와 유효감쇠비, mode shape를 정리하면 도표 2와 같다.

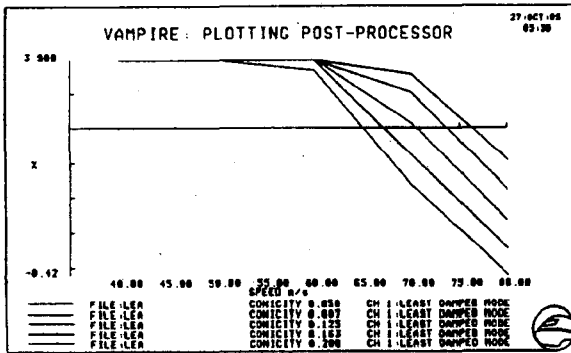


그림 4. 임계속도 해석결과

도표 2. 선형고유치 해석결과(주행속도 V=144km/h, 담면구배 0.05)

MODE NUM.	V (km/h)	FREQ. (Hz)	DAMPING	MODE SHAPE
1	144	0.073	18.2	TRANS.
2	144	0.544	18.3	ROLL
3	144	1.026	48.8	BOUNCE
4	144	1.132	32.7	YAW
5	144	1.232	57.5	PITCH

### 4.2 주행안전성 해석

횡압, 탈선계수, 윤중감소율 계산시 고려된 윤축의 번호는 그림 5과같고 승차감지수 계산시 고려한 승차감 지수 계산위치는 그림 6에 도시하였다.

#### 4.2.1 횡압

설정된 궤도를 주행할때에 차륜과 레일사이에 작용되는 횡압을 각각의 차륜별로 정리하면 도표

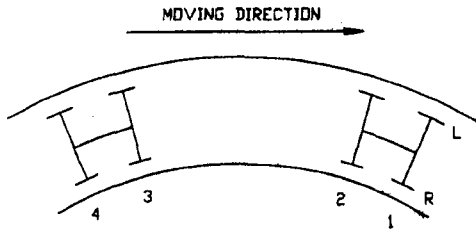


그림 5. 휠세트 번호

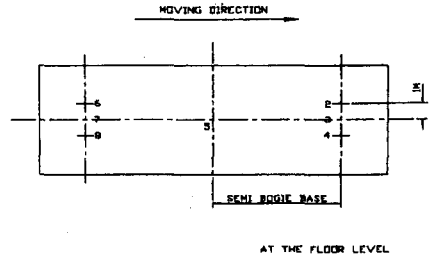


그림 6. 가속도 계산위치

3과 같다. 차량의 주행속도가 160km/h인 경우 1번 윤축의 왼쪽 휠에서 제1, 2한도를 초과하고 4번 윤축의 왼쪽휠에서는 제 1한도는 초과하지만 제 2한도 미만이다. 상세해석후 현가장치 특성치의 변경이 검토 되어져야 한다.

#### 4.2.2 탈선계수

설정된 궤도를 주행할때의 탈선계수결과를 각각의 차륜별로 정리하면 도표 4와 같다. 각각의 휠에서의 탈선계수 최대치들이 제한값을 만족함을 알 수 있다.

#### 4.2.3 윤중감소율

설정된 궤도를 주행할때의 윤중감소율 결과를 각각의 차륜별로 정리하면 도표 5와 같다. 2번 윤축의 좌, 우휠에서의 최대값이 제1한도를 초과하나 제 2한도 미만이다. 상세해석후 1차현가장치의 특성치 변경이 필요하다.

도표 3. 횡압결과(최대값)(kN)

Number of wheelset		R=1400m, C=105mm			
		V(km/h)			
		160	180	200	한계치1/ 2
1	Left	25.73	23.99	40.13	18.44/ 19.44
	Right	-7.0	-5.77	-5.68	19.47/ 20.47
2	Left	17.65	25.72	47.64	18.44/ 19.44
	Right	-7.76	8.041	-9.13	19.47/ 20.47
3	Left	9.578	13.54	18.34	19.52/ 20.52
	Right	-5.64	-5.93	-6.3	20.56/ 21.56
4	Left	20.27	24.93	51.84	19.52/ 20.52
	Right	8.921	9.703	-9.5	20.56/ 21.56

도표 4. 탈선계수결과(최대값)

Number of wheelset		R=1400m, C=105mm		
		V(km/h)		
		160	180	200
1	Left	0.4271	0.3567	0.4846
	Right	0.1408	-0.101	-0.192
2	Left	0.2625	0.3549	0.5886
	Right	-0.192	-0.209	-0.499
3	Left	0.1319	0.1937	0.2188
	Right	0.0929	-0.129	-0.176
4	Left	0.2615	0.3047	0.6032
	Right	-0.207	-0.24	-0.247

도표 5. 윤중감소율 결과(최대값)

Number of wheelset		R=1400m, C=105mm		
		V(km/h)		
		160	180	200
1	Left	-0.543	-0.675	-0.857
	Right	0.4668	0.6318	0.7573
2	Left	-0.63	-0.697	-0.919
	Right	0.628	0.7533	0.9206
3	Left	-0.471	-0.581	-0.754
	Right	0.4398	0.5959	0.7117
4	Left	-0.588	-0.67	-0.847
	Right	0.5651	0.7089	0.8

#### 4. 2. 4 승차감지수

160km/h의 속도로 R=1400m의 곡선을 통과할때의 승차감지수결과는 2번위치에서 횡방향 2.3, 수직방향 2.6정도로 전반적으로 횡방향 승차감이 수직방향 승차감보다 좋으며 차량의 주행속도가 증가할수록 방향에 상관없이 승차감이 나빠지는것을 알 수 있다.

### 5. 결론

- 차량의 주행안정성 평가를 위한 선형고유치 해석을 실시한 결과 임계속도는 차륜답면구배가 0.05일때에는 277km/h이고 차륜이 어느정도 마모가 진행되어 0.2일때에는 234km/h로써 차량의 운전최고속도인 200km/h를 상회하므로 안정성이 있는 것으로 판단된다.
- 횡압 계산결과는 주행속도가 160km/h인 경우 1번윤축의 왼쪽휠은 한계치 2도 초과하고 4번윤축의 왼쪽휠은 한계치 1은 초과하나 한계치 2 미만이다.
- 탈선계수를 계산한 결과 제 1한계치와 제2한계치를 만족한다.
- 윤중감소율을 계산한 결과 2번 윤축의 좌, 우휠에서는 제 1한계는 만족하나 제 2한계는 초과한다.
- 승차감지수를 계산한 결과 횡방향 승차감이 수직방향보다 좋으며 곡선구간인 경우 횡방향으로는 최대 2.33이고 수직방향으로는 최대 2.65이다.

### 6. 참고문헌

1. Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle System", Academic Press, 1984.
2. 이종득 Ph.D, "철도공학", 노해출판사, 1993
3. "VAMPIRE User Manual Volume 1, 2", British Rail Research, 1994.
4. "철도차량의 진동방지에 관한 연구", 제 2차년도 중간보고서, 한국철도산업기술연구원, 1995.
5. R Illingworth, MA. DPhill. CEng. MIMechE, "The role of theoretical prediction methods in the design of railway vehicle suspensions and track geometry", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 200, 1986.
6. Miyuki Yamamoto and Machi Nakata, "Dynamic Analysis of High Speed Railway Trucks for the Shinkansen", 住友金屬, Vol. 39, No. 3, 1987.