1축 대차의 개발
(Development of single axle bogie)

양희주, 임용규*, 김진태, 오형식**, 오택렬***

ABSTRACT

This paper presents the results of vehicle dynamics simulation for development of single axle bogie for freight vehicle. Those results consists of hunting stability, ride comfort and curving performance such as derailment ratio, unloading ratio. Dynamic behaviors of vehicle having single axle bogie is carried out using the multi-body dynamics simulation program(VAMPIRE).

The results of analysis meet the criteria proposed by Korean National Railroad(KNR) and Korea Railroad Research Institute(KRRI).

1. 서론

일반적으로 철도차량은 차체와 bogie로 구성되어 있으며, bogie는 2개의 윤축과 각종 현가장치로 구성되어 있다. 근래에 들어 유럽과 일본 같은 철도 선진국에서는 1bogie당 1윤축(이하 1축 대차)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 개념의 철도차량을 설계, 제작하기 위해서는 주행 안정성, 승차감, 곡선 추종 성능 등의 동적 성능이 충분히 만족하는 지를 사전에 해석해야 하며, 이러한 동적 성능들을 만족시키기 위해서는 각종 현가 장치 특성치들을 변화시켜가며 해석해야 한다.

본 논문에서는 화차용 차장차를 대상으로 경부선 선로를 이용하여 우리나라 선로 조건에 적합한 1축 대차를 개발하기 위해 수행한 해석 결과를 나타내었다. 화차용 차장차의 차량 동특성을 알아보기 위해 철도 차량 동특성 해석 전용 프로그램인 VAMPIRE(Vehicle Dynamic Modeling Package In a Railway Environment)을 이용하여 수행하였다.

2. 모델링

2.1 차량 모델링

1 축 대차를 장착한 화차용 차장차에 사용된 모델링은 차체와 2개의 대차 후레임, 2개의 윤축 질량요소로 하여 그 사이에 적절한 스프링과 댐퍼를 연결시켜 모델링 하였다.

대차 프레임과 윤축 사이의 1차 현가 장치는 롤 고무 스프링으로 구성 되어 있으며, 대차 프레임과 차체 사이의 2차 현가 장치는 고무 스프링 과 2차 수직 방향 댐퍼, 2차 횡방향 댐퍼, 2차 안티 요 댐퍼로 구성 되어 있다. 또한 차체 와 대차를 견인 링크로 연결 하였으며, 대차 프레임

* 한국철도차량(주) 중앙연구소 기초연구팀
** 한국철도차량(주) 중앙연구소 주행장치개발팀
*** 경희대학교 정교수

상부 센타 좌우에 설치된 Stopper는 bumpstop 요소로 모델링 하였다.

본 논문에 적용된 차량 제원 과 차량 모델링을 Appendix A에 나타내었다.

2.2 궤도 불규칙도 모델링

궤도 불규칙도란 철도차량이 주행하는 선로의 상태를 나타내는 말로서 궤간 틀림, 수평 틀림, 궤도 면틀림, 궤도 줄틀림으로 구성되어 있다. 궤도 불규칙도는 차량에 가해지는 일차적인 외란으로서, 차량 운동 거동은 이 궤도 불규칙에 대한 차량의 응답 특성이 된다.

본 논문에서 궤도 불규칙도 모델링은 경부선 일부선로의 직선 구간 및 곡선 구간을 적용하였으며, 궤도 불규칙도를 Appendix B에 나타내었다.

2.3 차륜/레일 모델링

차륜 및 레일은 차량 운동에 영향을 미치는 외부 작용력이 가장 크게 나타나는 부분으로서 그 접촉 형상에 따라 각종 마찰력이 변하게 되어 차량 운동을 변화시키게 된다. 따라서 접촉 표면 형상은 차량 거동에 있어서 매우 중요한 역할을 하는 부분이다.

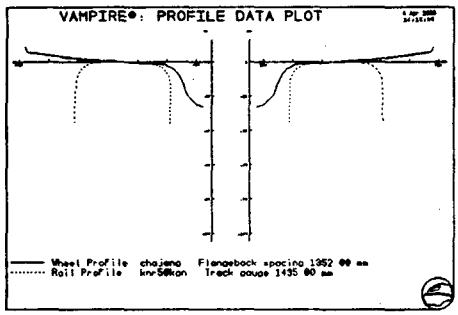


그림 1. 차륜 - 레일 접촉 형상

본 논문에 적용된 차륜은 답면구배 1/20을 갖는 화차용 차륜으로서 차륜 직경이 860㎜, 차륜간 플랜지 후면 간격이 1352㎜이다. 레일은 우리나라 본선에 주로 설치되어 있는 50kgN레일을 사용하였으며, 궤간은 1435㎜이다. 그림 1은 본 논문에 적용된 차륜과 레일의 접촉 형상을 나타낸다.

3. 주행 안정성 해석

새로운 개념의 철도 차량을 제작하기 위해서는 주행 안정성, 승차감, 곡선 추종 성능 등의 동적 성능이 충분히 만족하는 지를 해석해야 하며, 동적 성능 중 주행 안정성의 확보가 가장 먼저 선행되어 해석되어야 한다. 차량이 최고 속도 주행시에도 안정해야 하기 때문이다.

일반적으로 철도차량은 직선궤도 주행시 차륜세트에 사행동(Kinematic Mode)이 발생하고, 어느 속도 이상에서는 이 행동이 급격히 확산되어 플렌지에 의해 억제되는 불안정한 현상이 발생한다. 이 현상을 Hunting이라 부르며, 이 현상이 발생하는 속도를 임계 속도(Critical Speed)라 하며 주행 안전성의 척도가 된다.

임계 속도는 여러 가지 운행상의 조건을 고려하여 최고 운행 속도보다 10%정도 크도록 하며, 10%는 안전율이다.

노후시 임계속도(마모 차륜) > 차량 최고 운행 속도 X 1.1(10% 안전율)

차량 최고 운행 속도가 120 ㎞/h인 화차용 차장차의 임계 속도 기준은 주행 안정성 해석에서 마모 차륜시 132 ㎞/h이상 이여야 한다.

본 논문에서는 차량 주행 안전성을 평가하기 위해 일반적으로 많이 사용하고 있는 선형 고유치 해석(Linear eigenvalue analysis)과 비선형 시간응답 해석(Non linear transient analysis)으로 수행하였다. 주행 속도를 50 ㎞/h에서 200 ㎞/h까지 증가시키고, 병행하여 임계속도에 큰 영향을 미치는 답면 구배(conicity)를 신조시 0.05에서 답면 마모가 심하게 되었을 때의 0.4 까지 변화 시켜 가며 해석을 실시하였다.

3.1 선형 고유치 해석

선형 고유치 해석에서 임계 속도는 특정 진동 모우드, 일반적으로 대차의 횡 방향 및 yaw 모우드에 대한 유효 감쇄비가 양에서 음으로 전환되는 지점의 속도를 말한다.

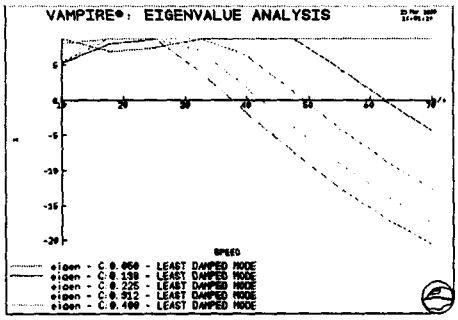


그림 2. 임계 속도 (선형 고유치 해석)

그림2는 선형 고유치 해석을 통해 공차 조건에서 답면구배에 따른 임계속도의 변화를 나타내고 있다. 선형 고유치 해석 결과, 차륜 마모가 한도에 달했을 때(답면구배 0.4)의 임계 속도는 138 km/h이다. 임계 속도 기준인 132 km/h를 상회함으로서 주행 안정성을 만족하였다.

3.2 비선형 시간 응답 해석

비선형 시간 응답에서의 임계 속도는 좌우 및 상하 방향 궤도 외란에 대한 윤축의 좌우 변위 수렴 여부를 파악하는 것이다.

그림 3은 비선형 시간응답 해석을 적용하기 위한 궤도의 좌우, 상하 외란이고, 그림 4는 답면구배별 윤축의 좌우 수렴 여부를 속도별로 나타내었다.

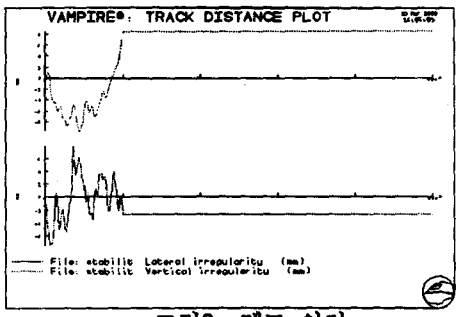


그림3. 궤도 외란

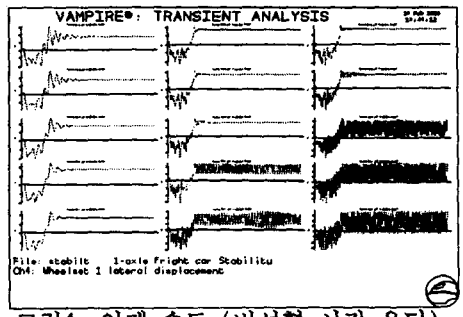


그림4. 임계 속도 (비선형 시간 응답)

비선형 시간응답 해석 결과, 차륜 마모가 한도에 달했을 때(답면구배 0.4)의 임계속도는 133 ~ 137 km/h이다. 임계 속도 기준인 132 km/h를 상회함으로서 주행 안정성을 만족하였다.

4. 승차감 해석

대중 교통 수단에 대한 승객의 요구와 기대가 점차 다양하게 증가하고 있는 실정이다. 교통 수단의 특성을 평가하는데 있어 승차감은 주행 안정성과 안전성처럼 중요한 요소가 되었다. 승차감은 진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 좌석 디자인 등과 같은 많은 요소에 의해 결정되며 이 모든 요소들을 고려하여 정량적으로 평가하기는 거의 불가능하다. 일반적으로 철도 차량에서 승차감이란 차량 주행시 발생하는 진동이나 가속도에 의한 평가 혹은 느낌을 의미한다.

본 논문에서 승차감 해석은 공차 상태를 대상으로 비선형 시간응답 해석(Non linear transient analysis)으로 수행 하였다.

4.1 진동 승차감

차량이 선로 위를 달릴 때 궤도 불규칙도에 의해서 차량에 외력이 가해지며, 이 외력이 진동을 유발시킨다. 이 진동은 1차 현가 장치를 통하여 대차프레임에 전달되고 다시 2차 현가 장치를 통하여 차체로 전달된다. 차체로 전달된 진동은 승객에게 직접영향(서있는 승객)을 미치거나 의자를 통하여 영향(앉아있는 승객)을 주게 된다.

차량의 승차감이란 진동이 승객에게 주는 쾌적의 정도를 나타내는 것으로, 차량에서 측정된 진동 가속도를 사람이 느낄 수 있는 수준으로 보정하여 나타내는 지수로서 Leq 또는 Ride index로 표현되어 진다.

국내의 승차감 표현방법은 ISO 승차감 WEIGHTING FILTER(ISO 2631 D5/UIC)를 이용한 방법으로 Leq 값을 승차감 표현 단위로 사용한다. 평가 기준은 현 한국철도기술연구원(KRRI, 구 철도청 산하 철도기술연구소)에서 정한 기준이 통용되고 있다. 평가 기준은 표1과 같다.

표1. 국내의 승차감 평가 기준

기준	103 dB 이하	103 ~ 108 dB	108 ~ 113 dB	113 ~ 118 dB	118 dB 이상
평가 기준	우 수	양 호	보 통	불 량	극히 불량

본 논문에서 승차감 해석은 공차 상태를 대상으로 해석하였으며, 차량 주행 속도는 80 km/h에서 최고 속도 120 km/h까지를 적용하였다. 승차감 계산 위치는 차량 중앙부이며, 수직 방향 및 좌우 방향에 대한 진동 가속도를 이용하여 승차감을 나타내었다. 해석에 적용된 조건 및 해석 결과는 표2와 Appendix C에 나타내었다.

표2. 해석 조건 및 승차감 해석 결과

궤도	운행 속도	상하 방향		평가	좌우 방향		평가
		진동가속도 RMS(mg)	승차감 (Leq)		진동가속도 RMS(mg)	승차감 (Leq)	
직선 구간	80 km/h	24.25	107.5 dB	양호	22.33	106.8 dB	양호
	90 km/h	25.15	107.8 dB	양호	23.61	107.3 dB	양호
	100 km/h	26.18	108.2 dB	보통	24.60	107.7 dB	양호
	110 km/h	27.42	108.6 dB	보통	25.72	108.0 dB	보통
	120 km/h	29.17	109.1 dB	보통	26.47	108.3 dB	보통

주행 속도의 증가는 운행 시간 단축이라는 장점을 가지고 있는 반면에 진동 가속도의 증가로 인한 승차감 악화의 원인도 된다.

본 논문에서는 주행 속도를 80~120 km/h까지 10 km/h씩 증가시켜 승차감을 해석 하였으며, 해석 결과 최대치는 주행속도 120 km/h에서 상하 방향 109.1 dB, 좌우 방향 108.3 dB로서 승차감 평가 기준의 보통에 해당하는 결과가 나왔다.

4.2 곡선 주행시의 승차감.

철도차량이 곡선 구간을 통과할 때 차량에서 발생하는 원심력이 곡선 외측에 작용하여 차량이 외측으로 전복, 승객이 외측으로 쏠리어 승차감을 해치고, 차량의 중량과 횡압이 외측 레일에 부담을 크게 주어 레일에 손상을 주게 된다. 이러한 악영향을 방지하지 위해 내측 레일을 기준으로 외측 레일을 높게 하는 것을 캔트(CANT)라 한다.

일반적으로 곡선 구간 주행시 승차감은 정상 횡가속도 항으로 표현되며, 국내의 횡가속도 기

준은 0.08 g 이하를 기준으로 삼고 있다.

본 논문에서 곡선 주행시 승차감 해석은 공차 상태를 대상으로 해석하였으며, 차량 주행 속도는 곡선 반경별 최고 주행 속도를 적용하였다. 계산 위치는 차량 중앙부이며, 횡 방향에 대한 진동가속도를 이용하여 곡선 주행시의 승차감을 나타내었다. 해석에 적용된 조건 및 해석 결과는 표3과 Appendix C에 나타내었다.

표 3. 해석 조건 및 곡선 주행시 승차감 해석 결과

곡선 반경	운행 속도	정상횡가속도	평가
400R	90 km/h	0.055 g	< 0.08 g
800R	110 km/h	0.026 g	< 0.08 g
1000R	120 km/h	0.040 g	< 0.08 g

곡선 반경별 최고 주행 속도를 적용하여 해석한 결과, 곡선 반경 400R에서 0.055 g, 곡선반경 800R에서 0.026 g, 곡선 반경 1000R에서 0.040 g의 정상 횡가속도가 나왔으며 이는 기준치인 0.08 g이하를 만족하는 결과이다.

5. 곡선주행성능 해석

주행 안전성을 나타내는 지수로는 동적 탈선계수, 동적 윤중감소율이 있다. 이 지수들은 곡선 주행 성능을 평가하는데 있어 중요한 항목으로서 정해진 허용한도 내에 있는지를 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 곡선 궤도는 직선 - 완화곡선 - 원곡선 - 완화 곡선으로 구성되어 있으며, 곡선주행성능 해석에 적용된 곡선 궤도 조건은 표4에 나타내었다.

표4. 곡선 궤도 조건

궤도	곡선부 거리	운행 속도	캔트	캔트 부족량	완화 곡선
400R 곡선	600 m	90 km/h	157 mm	82 mm	155 m
800R 곡선	990 m	110 km/h	150 mm	80 mm	150 m
1000R 곡선	380 m	120 km/h	137 mm	94 mm	110 m

본 논문에서 주행 안전성 해석은 공차 상태를 대상으로 비선형 시간응답 해석(Non linear transient analysis)으로 수행하였으며, 차량 주행 속도는 경부선 운전선로에 명시된 곡선반경별 최고 속도를 적용하였다.

5.1 동적 탈선 계수

차량이 주행시 레일과 차륜은 차량의 하중을 받을 뿐만 아니라 주행시의 복잡한 운동으로 인하여 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평 방향의 힘을 작용시킨다. 이 수평 방향의 힘(횡압력 Q)에 대한 수직 방향의 힘(수직력 P)의 비(Q/P)를 탈선 계수라 하며, 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어 넘어 탈선을 하게 되고 주행 안전성 검토의 기준이 된다.

30Hz 필터링된 VAMPIRE 탈선계수 해석 결과에 대해 0.5m길이 단위당 탈선계수(Q/P) 중 가장 큰 값을 해당구간의 탈선계수 대표값으로 읽는다. 이렇게 구해진 탈선계수(Q/P)를 0.05단위로 구분하여 빈도누적확률을 계산한다. 동적 탈선계수의 허용한도는 빈도누적확률에 따라 Q/P값 100%시 0.8, 0.1%시1.1까지 허용하고 있다.

동적 탈선계수 해석에 적용된 조건 및 해석 결과 최대치를 표5에 나타내었으며, 해석 결과, 허용한도 이내를 만족하였다.

표 5. 곡선 구간 궤도 조건 및 동적 탈선계수 해석 결과

궤도	운행 속도	선두 차륜	후위 차륜	평가
400R 곡선	90 km/h	0.84	0.63	< 1.1
800R 곡선	110 km/h	0.60	0.53	< 1.1
1000R 곡선	120 km/h	0.78	0.53	< 1.1

그림 5와 그림 6은 해석 차량이 곡선 반경별 최고 속도로 주행시, 선두 차륜과 후위 차륜에 대한 동적 탈선계수를 평가 기준인 빈도누적확률로 나타낸 것이다.

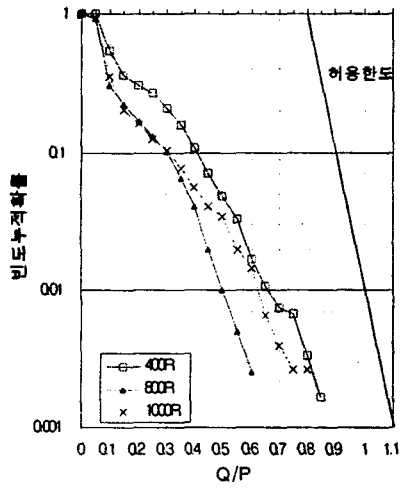


그림 5. 동적 탈선계수 (선두 차륜)

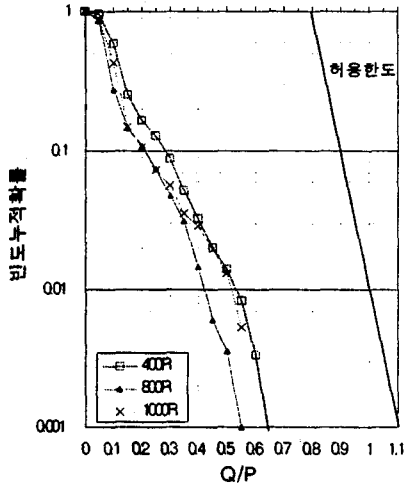


그림 6. 동적 탈선계수 (후위 차륜)

5.2 동적 윤중 감소율

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량 평면성의 틀림, 곡선에서의 Cant 및 원심력, 풍압력 등에 의해 윤중 감소가 생긴다. 이때 윤중 감소치(ΔP)에 대한 정적 윤중(P)의 비($\Delta P/P$)를 윤중감소율이라 하며, 이 값이 허용한도를 넘으면 탈선의 위험이 있다.

30Hz 필터링된 VAMPIRE 윤중감소율($\Delta P/P$) 해석 결과에 대해 0.5m길이 단위 당 윤중감소($\Delta P/P$)중 가장 큰 값을 해당구간의 윤중감소율 대표값으로 읽는다. 이렇게 구해진 윤중감소율을 0.05단위로 구분하여 빈도누적확률을 계산한다. 동적 윤중감소율 허용한도는 빈도누적확률에 따라 $\Delta P/P$값 100%시 0.5, 0.1%시0.8까지 허용한다.

동적 윤중감소율 해석에 적용된 조건 및 해석 결과 최대치를 표6에 나타내었으며, 해석 결과, 허용한도 이내를 만족하였다.

표 6. 곡선 구간 궤도 조건 및 동적 윤중감소율 해석 결과

궤도	운행 속도	선두 차륜	후위 차륜	평가
400R 곡선	90 km/h	0.49	0.47	< 0.9
800R 곡선	110 km/h	0.29	0.30	< 0.9
1000R 곡선	120 km/h	0.42	0.38	< 0.9

그림 7과 그림 8은 해석 차량이 곡선 반경별 최고 속도로 주행시, 선두 차륜과 후위 차륜에 대한 동적 윤중감소율을 평가 기준인 빈도누적확률로 나타낸 것이다.

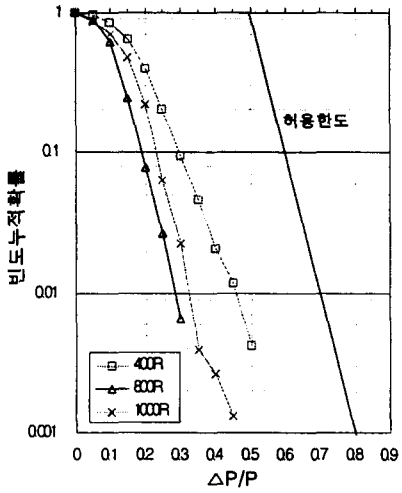


그림7. 동적 윤중감소율 (선두 차륜)

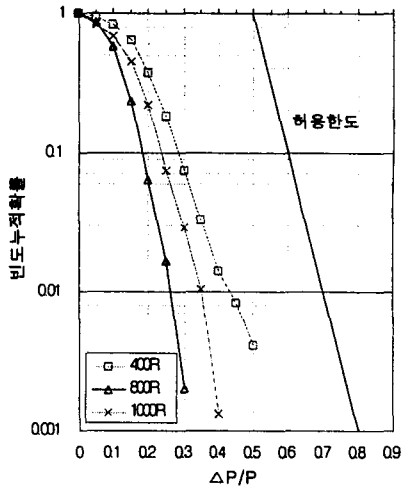


그림8. 동적 윤중감소율 (후위 차륜)

6. 결 론

1축 대차를 장착한 화차용 차장차에 대한 동특성 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 주행 안정성

선형 고유치 해석과 비선형 시간응답 해석 결과, 가장 나쁜 조건인 공차/ 마모한도 상태에서도 임계 속도가 134 km/h로서 충분한 안정성이 있는 것으로 평가되었다.

- 승차감

국내 선로 데이타를 적용하여 승차감을 해석한 결과, 승차감 최대치는 주행 속도 120 km/h에서 상하 방향 109.1 dB, 좌우 방향 108.3 dB로서 국내 승차감 평가기준의 보통 구간에 해당한다. 곡선주행시의 승차감 최대치는 곡선 구간 400R에서 0.055 g로서 허용한도 이내를 만족하였다.

-곡선 주행 성능

국내 선로 데이타를 적용하여 곡선 주행 성능을 해석한 결과, 동적 탈선계수 최대치는 곡선 구간 400R에서 0.84로서 동적 탈선계수 허용한도 이내를 만족하였으며, 동적 윤중감소율 최대치는 곡선 구간 400R에서 0.49로서 동적 윤중감소율 허용한도 이내를 만족하였다.

7. 참고자료

(1) Hideyuki Takai, Changes in Evaluation Method for Riding Comfort, RTRI Report Vol. 9, No. 8, 1995, August

(2) H Suzuki, Research trends on riding comfort evaluation in Japan, F00997v. IMechE 1998.

(3) Yoshihiri SUDA, Development of Single Axle Truck with High Performance and Low cost, J-RAIL '99

(4) Modern Railway Track, Coenraad Esveld, 1989.

(5) VAMPIRE user's manual, British Railway Research

(6) 철도 공학, 이종득, 노해출판사, 1989.

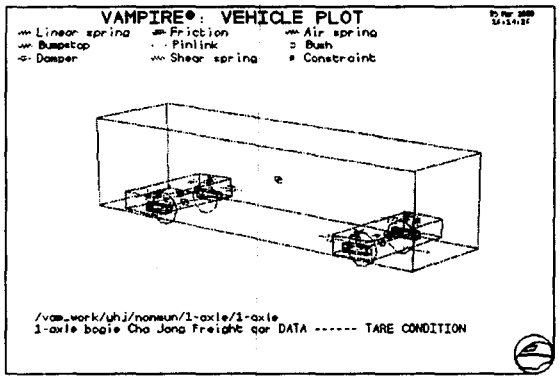
(7) 철도기술연구보, 철도기술연구소, Vol. 23, No. 1, 1989.

Appendix A - 차량 모델링

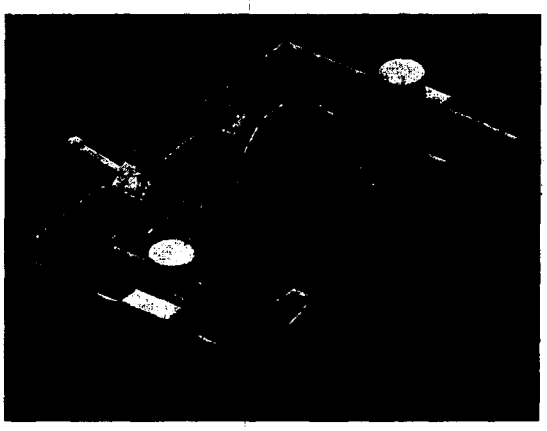
A-1. 차량 제원

항 목	차량 제원	비 고
차량 중량	17.0 ton	공차 상태
차체 중량	12.8 ton	
대차 중량	4.20 ton	2ea/차량
1차 현가 장치	롤 고무 스프링	8ea/차량
2차 현가 장치	고무 스프링+좌우 댐퍼+수직 댐퍼 + 요 댐퍼	고무 스프링 : 4ea/차량 좌우 댐퍼 : 2ea/차량 수직 댐퍼 : 4ea/차량 요 댐퍼 : 4ea/차량
제동 장치	P4a (답면 제동)	
윤축간 거리	6500 mm	
궤간	1435 mm	
최고 속도	120 km/h	

A-2 차량 모델링



A-3 대차 모델링



Appendix B - 궤도 불규칙도

B-1. 궤도 불규칙도 모델링

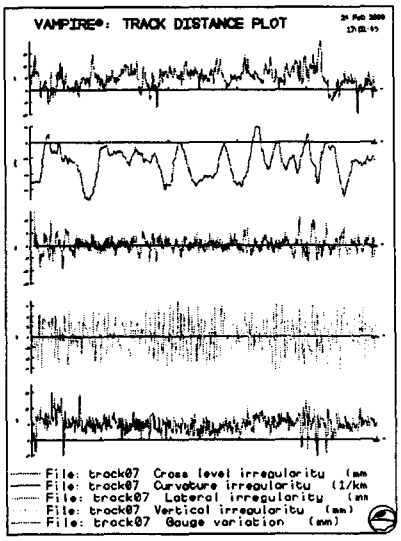


그림 B-1-1. 직선 구간

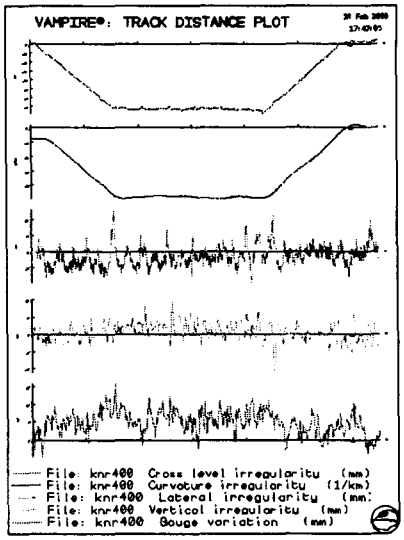


그림 B-1-2. 곡선 구간 (400R)

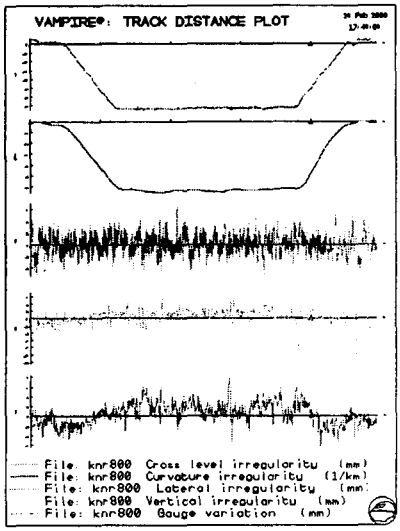


그림 B-1-3. 곡선 구간 (800R)

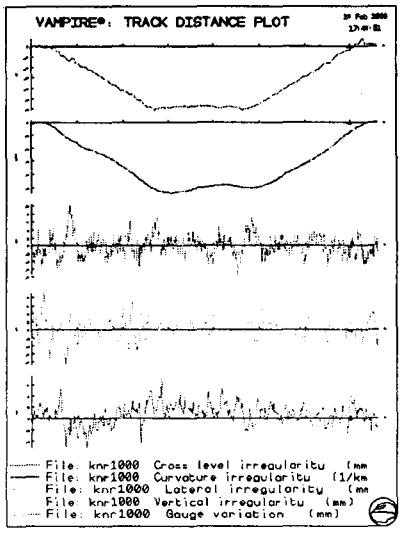


그림 B-1-4. 곡선 구간 (1000R)

Appendix C - 승차감

C-1. 진동가속도

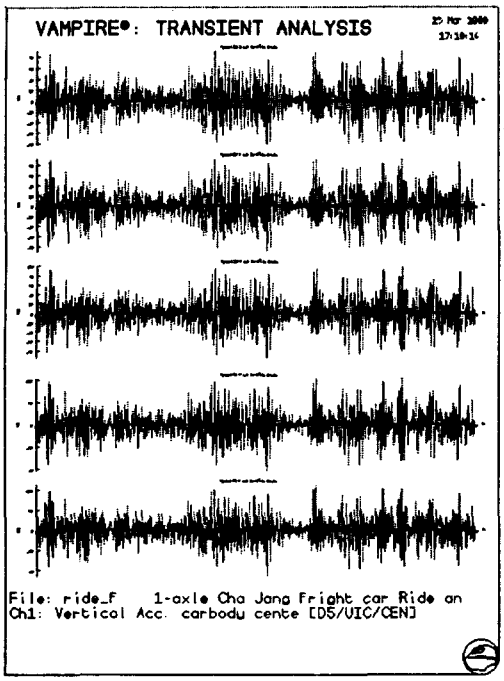


그림 C-1-1. 상하방향 진동가속도(80~120km/h)

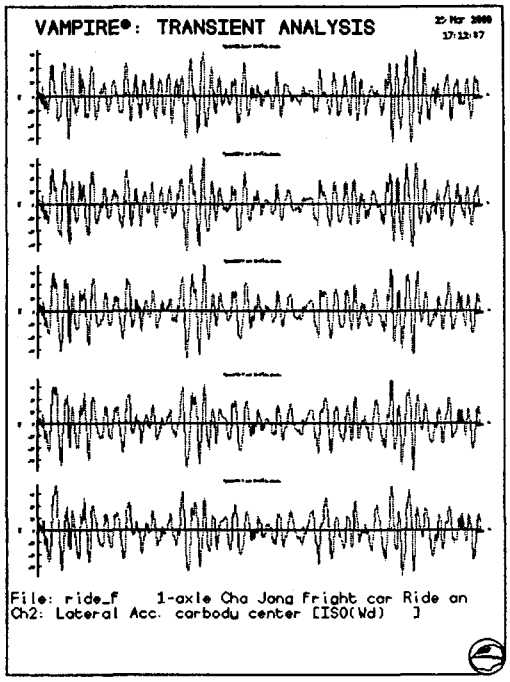


그림 C-1-2. 좌우방향 진동가속도(80~120km/h)

C-2. 정상 횡가속도

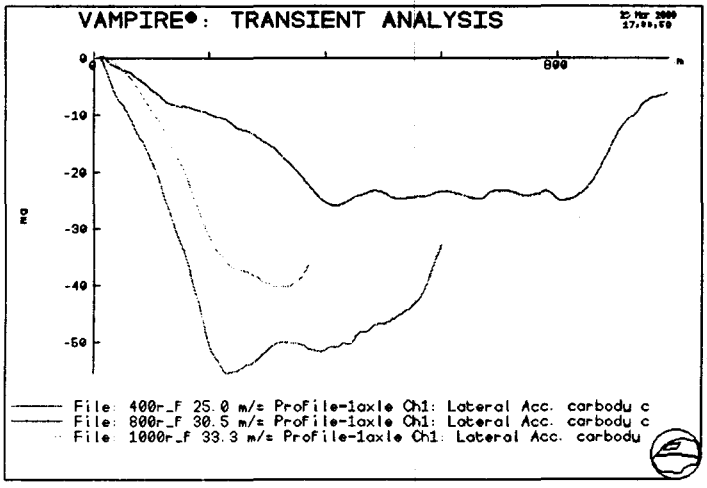


그림 C-2. 곡선 반경별 정상 횡가속도