

곡선부 통과 차량의 진동특성 및 안전성 평가

A Safety Assessment and Vibration Characteristics of Railway Vehicle Passing Curves

박 광 수† · 이 승 일* · 이 희 성**

Kwang Soo Park, Seung Il Lee and Hi Sung Lee

(2007년 8월 9일 접수 ; 2007년 9월 4일 심사완료)

Key Words : Railway Vehicle(철도차량), Running Safety(주행안전성), Derailment(탈선)

ABSTRACT

An analysis model has been developed to assess running safety of railway vehicle passing curves. By using ADAMS/Rail, a computer analysis has been conducted by changing various parameters according to the track conditions. Analysis results show as follows: A derailment coefficient of left wheel was increased according to increase of cant at low speed, while it was decreased as increase of cant at high speed. A unload rate of left wheel was also increased according to increase of cant at low speed, while it was decreased as increase of cant at high speed. A wear number of left wheel was increased according to increase of cant at all speed, but only at 35 m/s, it was decreased as increase of cant. A friction coefficient of left wheel was increased according to increase of cant at all speed, but only at 35 m/s. it was decreased as increase of cant.

1. 서 론

직선이 많은 선로에서는 차량의 최고속도 향상으로 표정속도를 향상시킬 수 있으나 국내와 같이 곡선이 많은 선로조건에서 차량의 곡선 통과속도를 향상시키기 위해서는 운행속도의 제한을 받게 되는 곡선부를 최소화하여야 한다. 그러나 현실적으로 이러한 곡선부를 최소화하는 것은 막대한 시설비 및 시간이 소요되므로 곡선 추종성이 매우 좋고 동시에 고속주행 안정성이 유지할 수 있는 대차 시스템 기술개발 연구를 하고 있다. 곡선 통과속도가 제한되는 이유로는 차량에 가해지는 원심력이 속도와 더불어

어 증가되어 바람과 진동 등의 영향을 받아 발생하는 전복과 초과원심력이 증가하면서 윤중과 횡압이 증가되어 궤도의 마모와 파괴가 촉진되고, 승차감이 악화되기 때문이다⁽¹⁾. 철도차량의 주행안전성에 영향을 미치는 요인으로는 차량과 궤도측면으로 대별할 수 있다. 차량측면에서는 정지윤중비, 1, 2차 현수장치, 스프링 강성, 차량의 유효 중심높이 등이 있으며, 궤도측면에서는 곡선반경, 캔트(철도차량이 곡선 지점을 원활하게 통과할 수 있도록 안쪽 레일을 기준으로 바깥쪽 레일을 높게 부설하는 것), 궤도틀림(수준틀림, 고저틀림, 줄틀림, 면틀림, 평면성틀림), 경좌 등이 영향을 줄 수 있다. 그 밖에 주행속도나 차량/레일 사이의 마찰계수도 주행안전성에 크게 영향을 미치는 요인이라 할 수 있다⁽²⁾.

이 연구에서는 탈선의 위험도가 높은 곡선부를 통과하는 차량의 탈선안전도를 평가하기 위해 상세설계에 의한 해석모형을 개발하였다. 개발된 해석모형

† 교신저자: 정희원 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

E-mail : pksoo22@hanmail.net

Tel : (02) 970-6877, Fax : (02) 970-6011

* 정희원, 한국철도대학 철도차량기계과

** 서울산업대학 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

을 이용하여 ADAMS/Rail에서 모드해석 및 안정성 해석을 수행하였고, 일정 곡선반경에서의 주행속도와 캔트량에 따른 동적해석을 수행하였다. 또한 차륜의 마모가 크게 발생하는 전대차 첫 번째 윤축을 대상으로 수치해석으로부터 구해진 크립력과 크리피지를 이용하여 마모수(wear number, 마모정도), 미끄럼수(sliding mean, 활주정도)와 마찰계수(friction coefficient)를 구하고 비교 검토하였다. 곡선구간에서는 내측 차륜보다 외측 차륜에서 횡압 등이 증가하여 차륜마모가 더 크게 되므로 외측 차륜을 대상으로 하였다.

2. 탈 선

탈선이란 좌우의 차륜과 차륜이 연결되어 있는 축으로 구성된 윤축이 레일로부터 벗어나는 것을 의미한다. 일반적으로 물체는 3개의 직선방향-전후, 좌우, 상하와 3개의 회전방향-롤링, 피칭, 요잉의 합계 6개 방향의 운동이 동시에 작용한다. 레일 위를 주행하는 윤축에는 좌우 각각의 레일과 차륜이 접촉하고 있는 2개의 구속조건이 더해지므로 6-2=4개 방향의 작용으로 한정된다. 즉, 윤축의 상하위치, 롤링 위치는 임의의 수치를 취할 수 없으며 좌우, 요잉 위치가 정해지는 데에 따라 결정되는 것이다. 탈선 외에 전복이라는 어휘를 사용하고 있으나 전복은 차량이 전도한 상태를 말하는 것이다. 전복에는 강한 횡풍 등을 받은 차량이 한쪽의 차륜은 레일 위에 있고 반대측 차륜이 들어 올려져 직접 전복에 이르는 1차적 전복과, 탈선의 결과로 전복하는 2차적 전복이 있다. 1차적인 전복은 탈선과 구별하는 경우가 많으나 양쪽 모두 그 과정에 있어 레일로부터의 구속조건을 잃는 면이 있으므로 같은 현상으로 생각할

수 있다. 따라서 이하 양자를 포함하여 탈선으로서 취급하도록 한다.

탈선에 이르는 과정에 따라 타고 오르는 탈선, 미끄러져 오름 탈선, 뛰어 오름 탈선의 3가지로 분류하고 있다. 여기서는 공격각이 중요한 파라미터가 된다. 공격각은 차륜의 진행방향과 레일의 방향과의 각도차를 말하는 것이다. 반시계방향으로 차축이 선회하는 Fig. 1의 우측 상태에서 공격각을 플러스, 시계방향으로 선회하고 있는 좌측 상태에서는 마이너스로 정의하고 있다⁽³⁾.

2.1 타고 오름 탈선(Climbing Derailment)

타고 오름 탈선은 공격각이 플러스 상태에서 일어난다. 좌차륜과 레일 접촉면에서는 공격각 보다 미소한 좌우방향 슬립이 발생하고, 이 슬립에 의하여 크리프력이라 불리는 횡력이 차륜이 향하는 방향, 곧 레일 방향으로 작용한다. 그 결과 차륜은 레일을 향하여 진행하고 차륜 플랜지부가 레일 건부를 회전하여 오름으로써 탈선에 이르게 되는 것이다.

2.2 미끄러져 오름 탈선(Slipping-up Derailment)

미끄러져 오름 탈선은 공격각이 마이너스인 상태에서 좌차륜이 레일로부터 떨어져 안전한 방향을 향하고 있는가의 여부에 상관없이 그것을 넘어서는 큰 레일 방향의 좌우력이 작용하여 최초 탈선에 이르게 되는 것이다. 따라서 타고 오름 탈선보다 일어나는 빈도가 적다.

2.3 뛰어 오름 탈선(Jumping-up Derailment)

탈선의 3번째 형태는 뛰어 오름 탈선이라 불리는 것이다. 급격한 좌우방향력이 차륜에 작용하면, 윤축의 레일에 대한 좌우방향의 속도가 커짐으로써 차륜이 레일에 충돌하여 뛰어 오름 현상을 일으켜 탈선에 이른다. 타고 오름 탈선의 경우 앞에서 기술한 것과 같이 차륜-레일간의 마찰력이 클수록 탈선하기 쉬우나, 뛰어 오름 탈선의 경우는 반대로 마찰력이 뛰어 오름에 브레이크를 거는 역할을 하므로 마찰력이 클수록 탈선하기 어렵다.

3. 전산해석

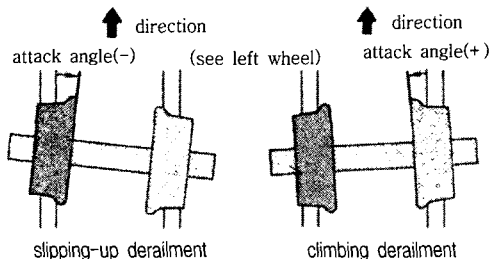


Fig. 1 Climbing derailment and slipping-up derailment

MSA(multibody system analysis), MSS

(mechanical system simulation)으로도 표현되는 다물체 동역학 해석은 대변위를 갖는 운동 하에서의 조인트에 의해 연결된 부품의 거동, 즉 시간변화에 따른 각 부품의 위치, 속도, 가속도, 조인트의 반력 뿐 만 아니라 시스템의 고유 진동수, mode shape, state space matrix 등의 정보도 얻을 수 있다. 여기에는 기계 계의 kinematic, static, quasi-static 해석 뿐 아니라 선형, 비선형 dynamic 해석이 포함된다. ADAMS를 이용한 동역학 해석은 각 part의 관성 및 외력을 고려한 시스템을 해석함으로써 시간 변화에 따른 속도, 변위, 가속도, 반력 등을 정확하게 구해준다. ADAMS는 여러 개의 구성요소로 이루어진 시스템의 시간변화에 따른 동적거동 특성을 컴퓨터를 통해 모의해석 할 수 있는 소프트웨어이다. 이러한 ADAMS의 특징을 바탕으로 ADAMS/Rail은 virtual prototyping 환경에서 정확한 철도차량 설계를 위해 특별히 제작된 프로그램으로서 철도 차량의 전체 거동을 가시적인 실제 시뮬레이션을 수행할 수 있게 한다. ADAMS/Rail을 이용하면 쉽고 빠르게 매개 변수로 되어진 철도차량을 제작하게 해주며 현가 장치, 윤축과 차륜/레일 접촉을 개선시킬 수 있게 해준다. 또한 차량의 안전성, 탈선 안전성 및 궤도의 하중 등을 결정하기 위해 kinematic, static, dynamic 시뮬레이션을 할 수 있다⁽⁴⁾. 이 연구에서는 새마을호 디젤동차(PMC)에 대하여 해석모델을 개발하고, 이를 이용하여 차량의 모드해석, 안전성 해석과 동적해석 등의 전산해석을 수행하였다.

3.1 차량모델

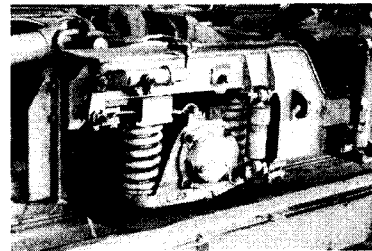
새마을호 디젤동차(PMC) 차량을 대상차량으로 사



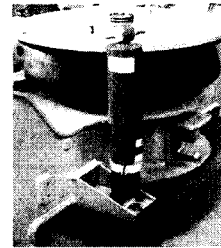
Fig. 2 Running Saemaul-ho diesel power car

Table 1 Specification of Saemaul-ho diesel power car bogie

Index	Specification	Note
Wheel base	2,500 mm	
Distance between axle bearings	1,972 mm	
Distance between air springs	2,000 mm	
Width of bogie	2,800 mm	
Length of bogie	3,800 mm	
Weight of bogie	8,800 kg(power car) 7,000 kg(trailer)	



(a) Primary suspension



(b) Secondary suspension

Fig. 3 Saemaul-ho diesel power car primary and secondary suspension

Table 2 Specification of Saemaul-ho diesel power car primary and secondary suspension

Suspension	Index	Specification
Primary suspension	Type	Coil + Leaf spring
	Material	SUP9A
	Spring constant	86.79 kg/mm
	Axle box damper coefficient	30,000 N/m/sec
Secondary suspension	Type	air spring
	Type of air spring	732 N2,100
	Axle box damper coefficient	40,000 N/m/sec
	Lateral damper coefficient	40,000 N/m/sec
	Yaw damper coefficient	87,000 N/m/sec

용하였다. Fig. 2는 새마을호 디젤동차의 모습을 나타내고 있으며, Fig. 3은 새마을호 디젤동차의 1차 현가장치와 2차 현가장치의 구성도를 나타내고 있다. Table 1은 새마을호 디젤동차의 대차 제원을 나타내고 있으며 Table 2는 1차와 2차 현가장치의 제원을 나타내고 있다⁽⁵⁾.

3.2 트랙과 차륜모델

트랙모델은 Fig. 4와 같이 곡선구간의 좌우, 상하 불규칙궤도 데이터를 사용하여 해석을 수행하였다. 차륜과 레일모델은 새마을호 디젤동차 차량에 적용되고 있는 Korean wheel로 차륜답면 구매가 1/40과 50 kg-N 형식인 레일을 Fig. 5와 같이 모델링하여 해석에 사용하였다⁽⁶⁾.

3.3 전산해석

Fig. 6은 해석 시 사용된 대차와 차체의 모델링을

나타내고 있으며, Fig. 7은 각각의 모델링을 결합한 차량상태를 나타내고 있다. Table 3은 새마을호 디젤동차 차량에 대한 각 부위별 물성치를 각각 나타내고 있다.

(1) 모드해석

새마을호 디젤동차(PMC) 차량에 대한 모드를 확인하기 위하여 다물체 동역학 상용해석 프로그램인 ADAMS/Rail를 이용하여 모드해석을 수행하였다. Fig. 8은 ADAMS/Rail 모드해석 결과로 각각의 주파수에서 전후, 좌우, 상하, 롤링, 요잉, 피칭 등의 6개 진동을 나타내고 있다.

(2) 안정성 해석

ADAMS/Rail은 계의 구성요소(질량, 강성, 댐퍼, 비선형 특성 등)만을 정의하면 프로그램 스스로 운동방정식을 작성하여 해석하는 상용프로그램으로 이 연구에서는 윤축 (4), 대차(2), 차체(1)의 구성요소

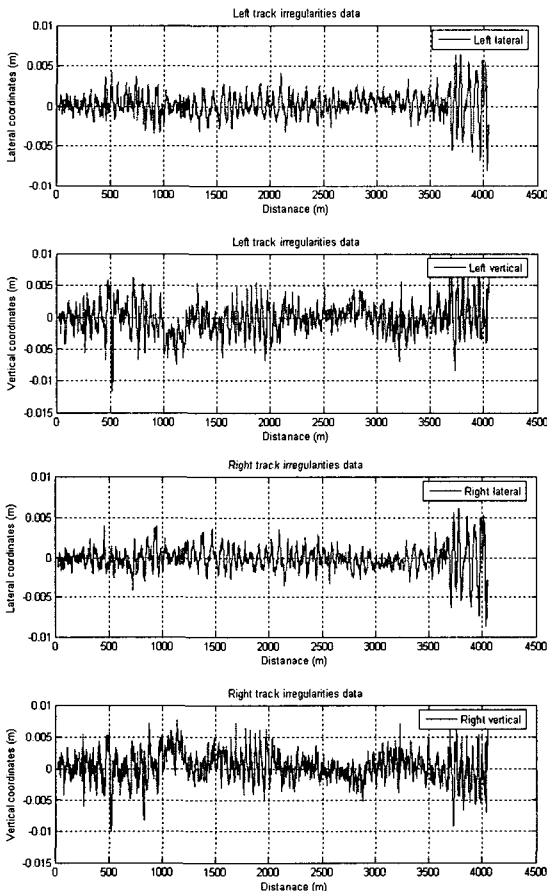


Fig. 4 Irregularity track model

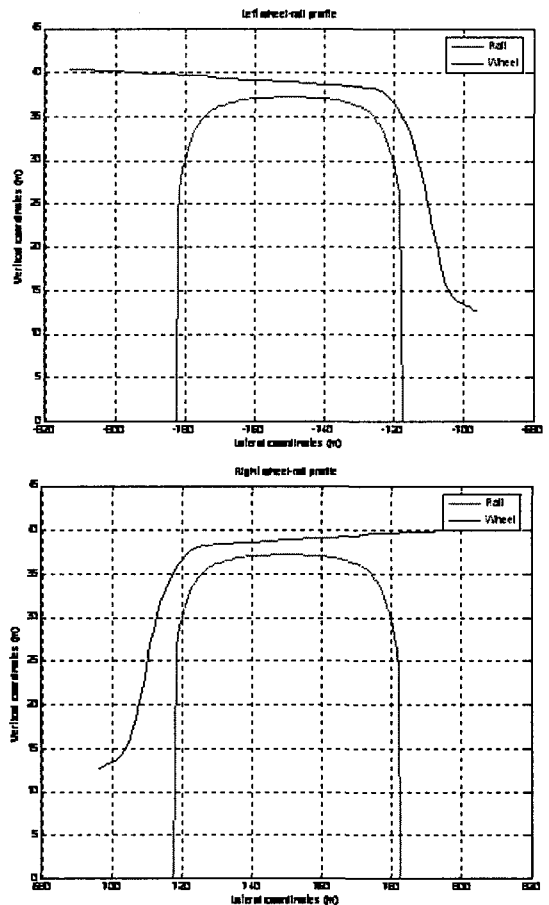


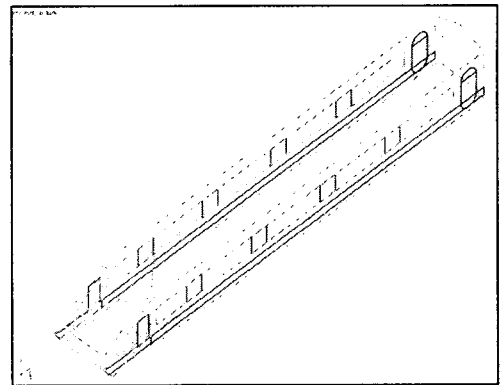
Fig. 5 Wheel model

(총 50 자유도계)를 정의하고 이를 강성 및 댐퍼장치를 이용하여 결합하였다. 새마을호 디젤동차(PMC) 차량에 대한 임계속도를 확인하기 위하여 다물체 동역학 상용해석 프로그램인 ADAMS/Rail를 이용하여 철도차량시스템(open loop)과 차륜담면형상(close loop)에 따른 안정성 해석을 수행하였다. Fig. 9는 주행속도 변화에 따른 차량의 안정성 해석

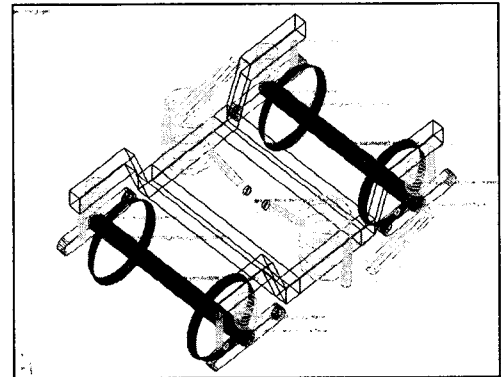
결과를 나타내고 있다. ADAMS/Rail을 통한 안정성 해석결과, 주행속도 75 m/s에서 damping ratio가 양(+)에서 음(-)이 되어 이 부근의 속도가 임계속도임을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 차륜담면 구배와 주행속도 변화에 따른 차량의 안정성 해석결과를 나타

Table 3 Specification of the PMC type bogie for passenger vehicle

Index	Parameters	Units	Value
Car body	Length	m	23.56
	Mass of empty car	ton	54.97
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	114.72
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1551.0
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	1525.0
	Height of gravity center on the rail	m	1.414
Bogie frame	Bogie frame mass	ton	3.5
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	1.58
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1.6
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	3.01
	Height of gravity center on the rail	m	0.52
Axle	Wheelsets mass	ton	2.65
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	1.36
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1.36
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	0.003
	Wheel diameter	m	0.43
Dimension	Distance between two bogie centers	m	15.2
	Distance between two axles	m	2.5
	Distance between 1st suspensions	m	0.5
	Distance between 2nd suspensions	m	2.0
Primary suspension	Longitudinal stiffness	MN/m	0.379
	Lateral stiffness	MN/m	0.379
	Vertical stiffness	MN/m	0.758
Secondary suspension	Longitudinal stiffness	MN/m	0.24
	Lateral stiffness	MN/m	0.24
	Vertical stiffness	MN/m	0.94
Primary damping	Vertical damping	MNs/m	0.03
Secondary damping	Yaw damping	MNs/m	0.169
	Lateral damping	MNs/m	0.04
	Vertical damping	MNs/m	0.04
Friction coefficient			0.4



(a) Car-body



(b) Bogie

Fig. 6 Modeling with ADAMS/Rail

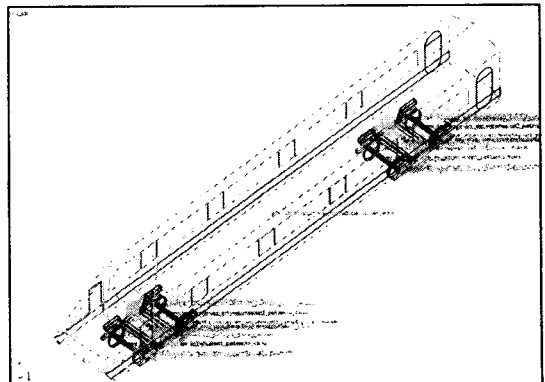


Fig. 7 Fully arranged cars

내고 있다. ADAMS/Rail을 통한 안정성 해석결과, 차륜담면구배가 1/40인 경우 주행속도 33 m/s 부근

의 속도가 임계속도임을 확인할 수 있었다.

(3) 동적해석

새마을호 디젤동차(PMC) 차량의 해석모델을 이용하여 ADAMS/Rail로 일정한 곡선부 형상에서 새마을호 디젤동차 차량의 동적해석을 수행하였다. 해석은 불규칙 트랙 곡선주행 시 통과속도와 캔트량의 변화에 따른 탈선계수, 윤증율(이동 수직력/초기 수직력), 마모수, 미끄럼수, 마찰계수 등과 같은 안전성을 검토하였다.

Table 4는 해석 시 사용된 곡선구간의 궤도조건을 나타내고 있다. Fig. 11~Fig. 15는 일정한 곡선반경, R250과 캔트변화에 따른 통과속도 15, 25, 35, 45 m/s로 주행하는 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 좌측 차륜의 탈선계수, 윤증율, 마모수, 미끄럼수와 마찰계수를 나타내고 있다. Fig. 11에서와 같이 저속에서는 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 탈선계수가 증가하였고, 반면에 고속에서 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 탈선계수가 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 12에서와 같이 저속에서는 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 윤증율이 증가하였고, 반면에 고속에서 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 윤증율이 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 13에서와 같이 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 마모수가 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 마모수가 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 14에서와 같이 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 미끄럼수가 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 미끄럼수가 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 15에서와 같이 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 좌측 차륜의 마찰계수가 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 좌

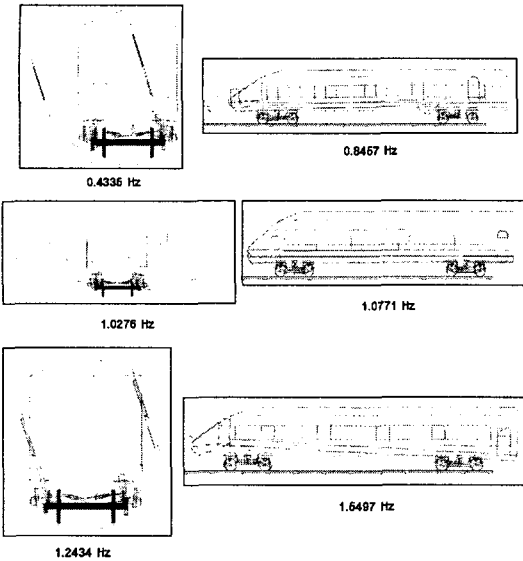


Fig. 8 Modal analysis

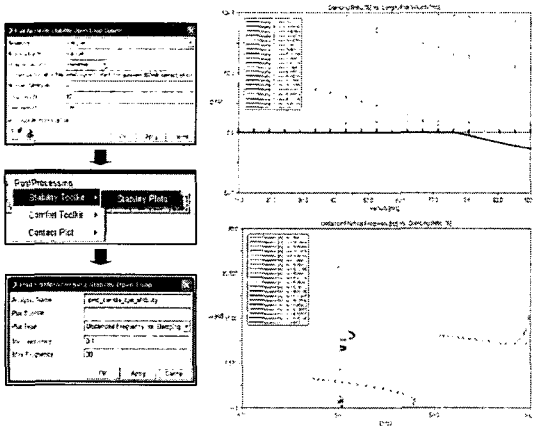


Fig. 9 Open loop analysis

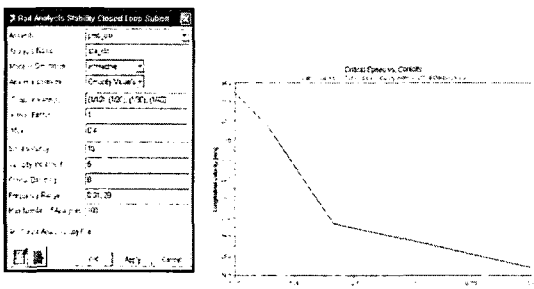


Fig. 10 Close loop analysis

Table 4 Condition of curved tracks for simulation

Index	Unit	Value
Gauge	mm	1,435
Rail name	-	KS50N
Inclination	mm	1:20
Radius of curvature	m	250
Length of transition curve	×cant	650
Cant	mm	144
Slack	mm	12

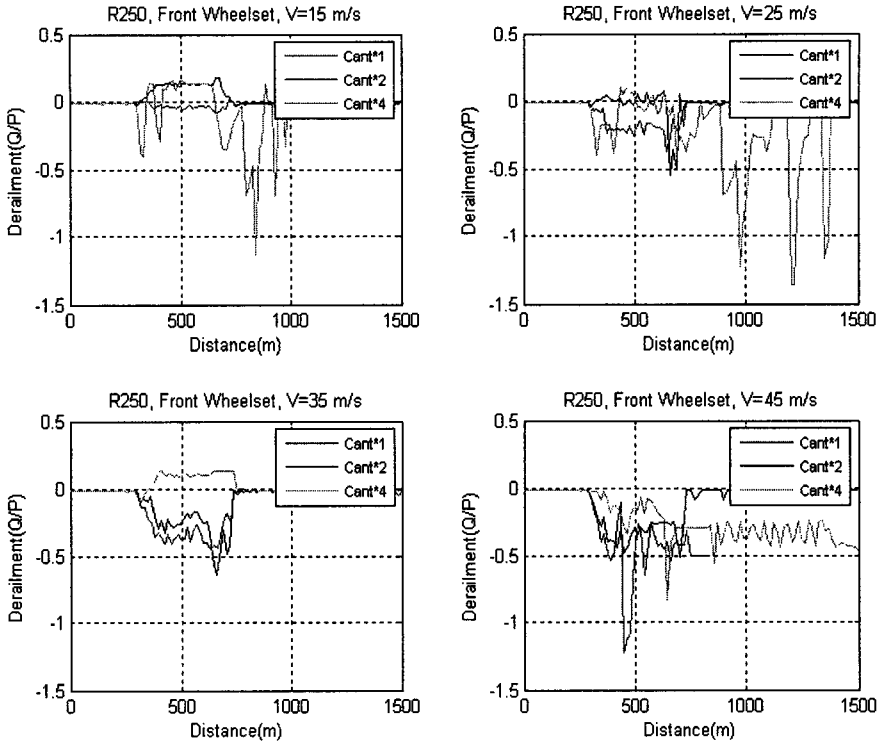


Fig. 11 Derailment coefficient on passing speed

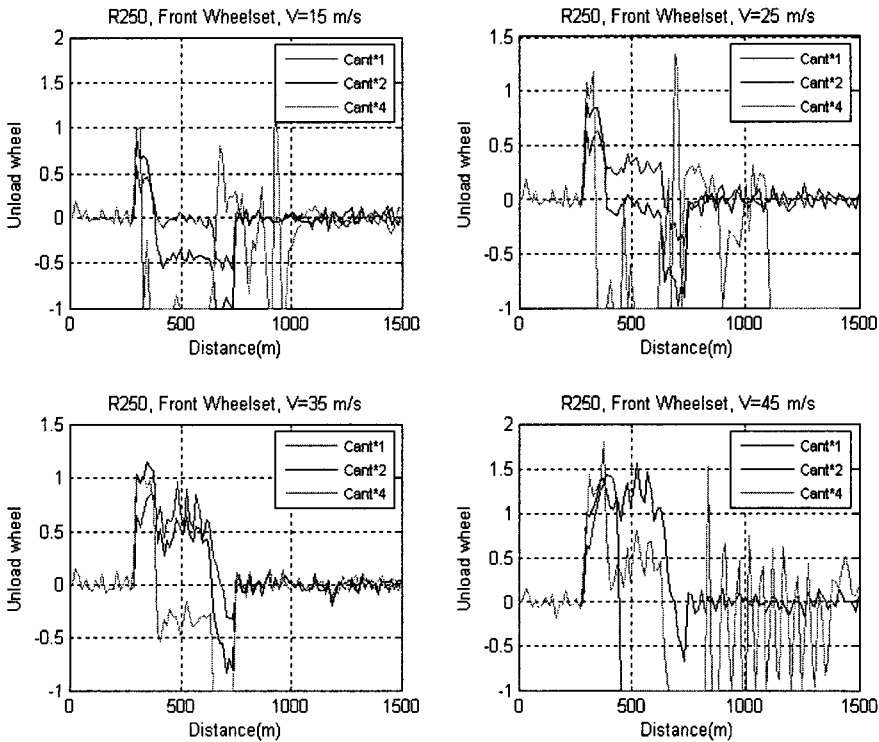


Fig. 12 Unload ratio on passing speed

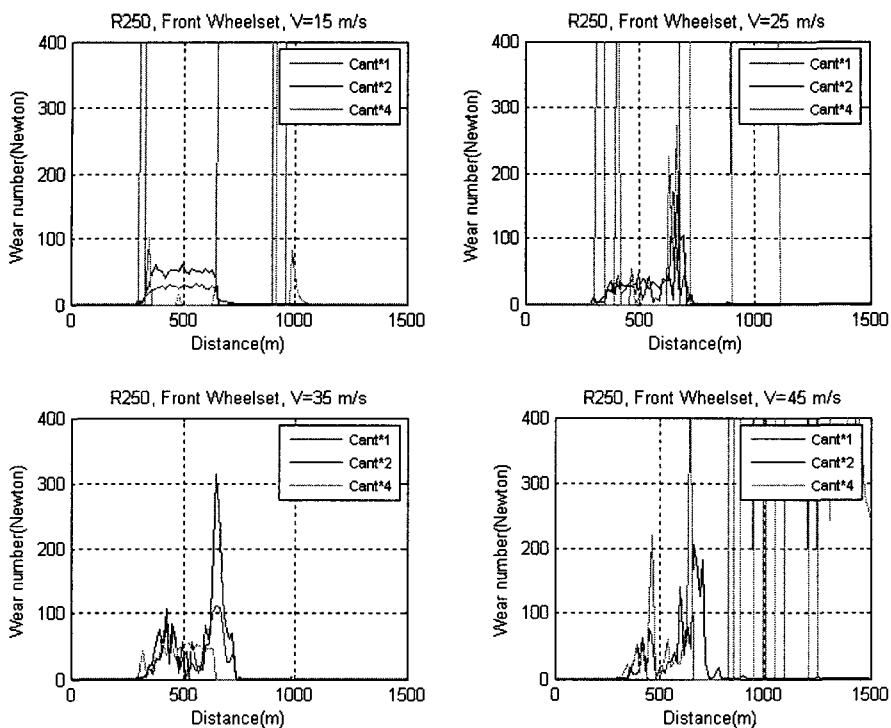


Fig. 13 Wear number on passing speed

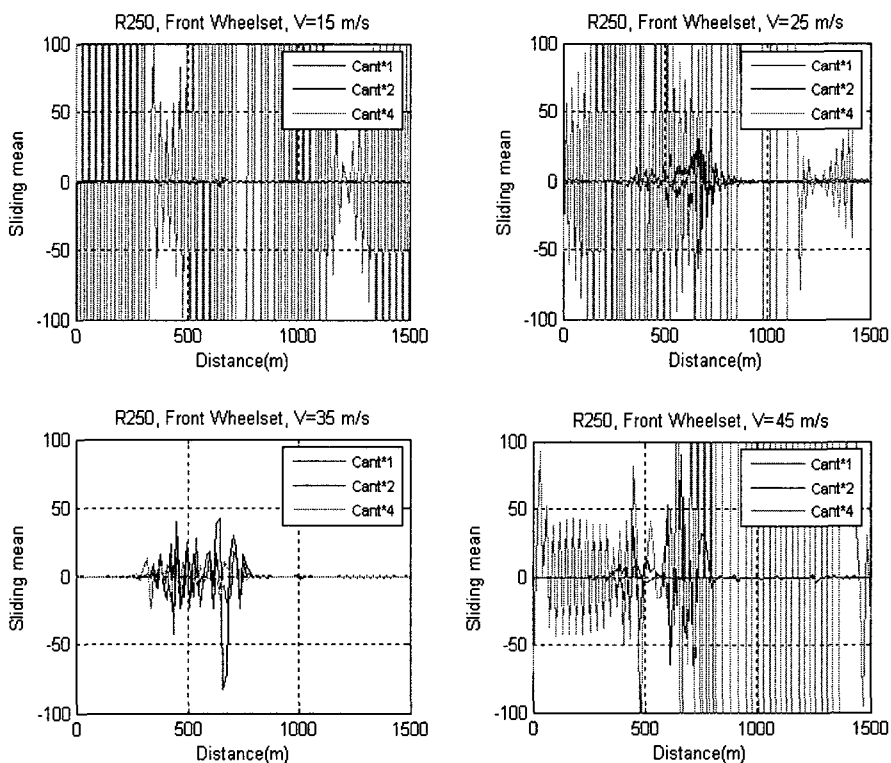


Fig. 14 Sliding mean on passing speed

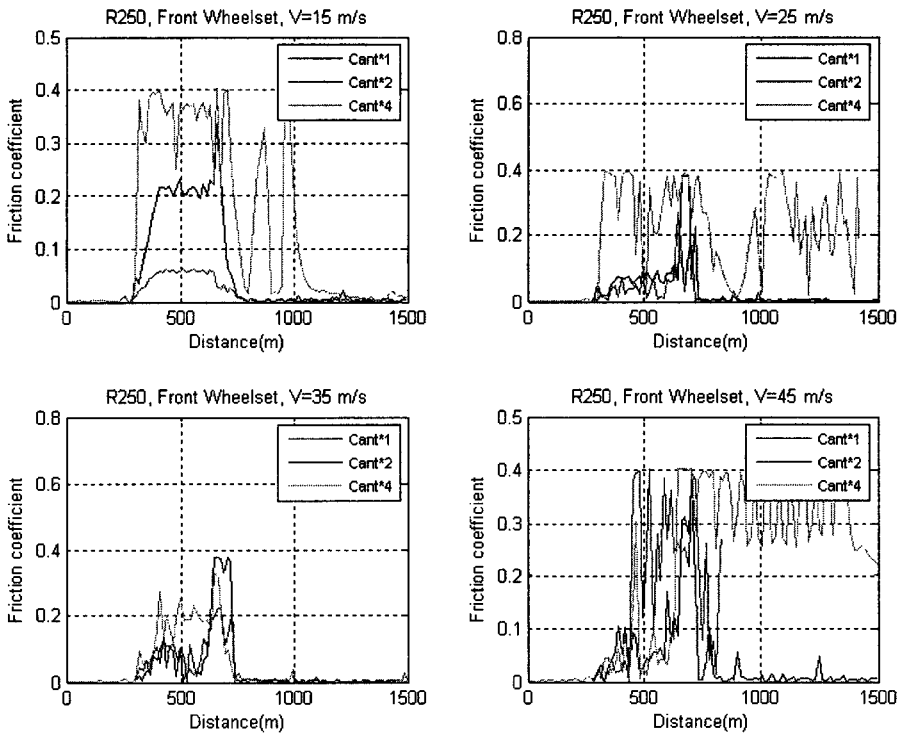


Fig. 15 Friction coefficient on passing speed

측 차량의 마찰계수가 감소함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

4. 결 론

곡선부를 통과하는 새마을호 디젤동차 차량의 주행안전성 평가를 위해 해석모델을 개발하고 이를 이용하여 ADAMS/Rail에서 안정성, 동적해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 일정한 곡선에서 통과속도와 캔트량변화에 따른 좌측 차량의 탈선계수와 윤중율은 저속에서 캔트 증가에 따라 증가하였고, 반면에 고속에서 캔트 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있었다. 좌측 차량의 마모수는 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있었다. 좌측 차량의 미끄럼수는 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 좌측 차량의 마찰계수는 모든 통과속도에서 캔트 증가에 따라 증가하였고, 반면에 통과속도 35 m/s에서는 캔트 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있었다.

- (1) Lee, S. I., Choi, Y. S., 2006, "Lateral Vibration Analysis for Design Parameter of the Scale Model of a Railway Vehicle", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp.1231~1237.
- (2) Lee, J. D., 2001, "Railroad engineering", Nohae Press.
- (3) Hiroaki, I., Kazuhiko, T., Kenji, U., Katoshi, F. and Masaki, M., 1995, "Safety Criteria for Evaluation of the Railway Vehicle Drealment", RTRI, Vol. 9, No. 3, pp. 79~91.
- (4) Mechanical Dynamics, 2005, "ADAMS/RAIL User's Guide,".
- (5) Railraod Office, 1994, "Front Rear Power Saemaulho Power Car(PMC) Main Device Parts List,"
- (6) Ham, Y. S., 1996, "A Study on the Vibration Prevention of Rolling Stock", KRRI, pp. 117~126.