

# 1 축 대차용 철도차량의 동특성 해석

양희주\*, 오택열\*\*

## Dynamic Analysis of Railway Vehicle Having Single Axle Bogie

Hee Joo Yang\*, Taek Yul Oh\*\*

### ABSTRACT

Studied in this paper was the vehicle dynamics simulation for development of single axle bogie using the multi-body dynamics simulation program (VAMPIRE). Single axle bogie vehicle is to the crew of freight vehicle. Method of analysis for dynamic behaviors of vehicle having single axle bogie was carried by UIC (International Union of Railways) code 518 and results of analysis were presented in terms of the hunting stability and the derailment ratio and the sum of wheel/rail lateral force. The results of analysis meet the criteria proposed by UIC.

**Key Words** : single axle bogie (1 축 대차), freight vehicle (화차), stability (안정성), safety (안전성), derailment (탈선), lateral force (횡압)

### 기호설명

- P = Vertical force between wheel and rail
- Q = Lateral force between wheel and rail
- $\Sigma Y$  = Sum of wheel/rail lateral force
- F = Coefficient of safety
- W = Axle-load

### 1. 서론

일반적으로 철도차량은 차체와 bogie 로 구성되어 있으며, bogie 는 2 개의 윤축과 각종 현가 장치로 구성되어 있다. 근래에 들어 유럽과 일본 같은 철도 선진국에서는 1 bogie 당 1 윤축(이하 1 축 대차)<sup>(1)</sup>에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 개념의 철도차량을 설계, 제작하기 위해서는

주행 안정성(stability), 주행 안전성(safety) 등 동적 성능이 충분히 만족하는 지를 사전에 해석해야 하며, 이러한 동적 성능들을 만족시키기 위해서는 각종 현가장치 특성치들을 변화시켜가며 해석해야 한다.

우리나라에는 화차로 운송되는 화물들의 이상 유무를 감시하는 승무원 전용차량이 없다. 화차용 차장차는 화차 승무원을 위한 차량이다.

본 논문은 화차용 차장차를 대상으로 경부선 선로를 이용하여 우리나라 선로 조건에 적합한 1 축 대차를 개발하기 위해 수행한 해석 결과이다. 해석 방법 및 평가 기준은 국제적으로 많이 인용되고 있는 UIC 규격<sup>(2)</sup>을 따랐으며, 화차용 차장차의 차량 동특성을 알아보기 위해 철도 차량 동특성 해석 전용 프로그램인 VAMPIRE<sup>(3)</sup> (Vehicle Dynamic Modeling Package In a Railway Environment)

\* 한국철도차량(주) 중앙연구소

\*\* 경희대학교 기계산업시스템공학부

을 이용하여 수행하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 차량 모델링

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

본 논문에 적용된 차량 모델링을 Fig. 1에 나타내었으며, 주요 변수들은 Table 1에 나타내었다.

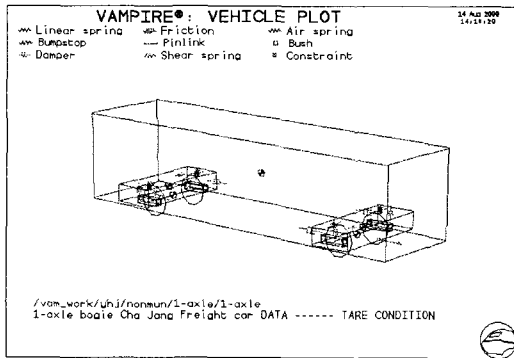


Fig. 1 Modeling of freight vehicle

Table 1 Main parameters for modeling

Carbody mass	12800 kg
Bogie mass	2092 kg
Wheelset mass	1247 kg
Primary suspension	Roll rubber spring
Secondary suspension	Rubber spring, Vertical & Lateral & Anti yaw damper, Traction link

### 2.2 궤도 불규칙도 모델링

궤도 불규칙도<sup>(4)</sup>란 철도차량이 주행하는 선로의 상태를 나타내는 말로서, 궤간 틀림, 수평 틀림, 궤도면 틀림, 궤도줄 틀림으로 구성되어 있다. 궤간 틀림은 좌우 레일의 간격 틀림이고, 수평 틀림은 좌우 레일 답면의 높이차이다. 궤도면 틀림은 좌우 레일의 평균 높이이며, 궤도줄 틀림은 좌우 레일의 평균 좌우 변위이다. 궤도 불규칙도는 차량에 가해지는 일차적인 외란으로서, 차량 운동 거동은 이 궤도 불규칙에 대한 차량의 응답 특성

이 된다.

본 논문에서 궤도 불규칙도 모델링은 경부선 곡선 구간을 적용하였으며, 궤도 불규칙도를 Appendix A에 나타내었다.

### 2.3 차륜/레일 모델링

차륜 및 레일은 차량운동에 영향을 미치는 외부 작용력이 가장 크게 나타나는 부분으로서 그 접촉 형상에 따라 각종 마찰력이 변하게 되어 차량 운동을 변화시키게 된다<sup>(5)</sup>. 따라서 접촉표면 형상은 차량거동에 있어서 매우 중요한 역할을 하는 부분이다.

본 논문에 적용된 차륜은 답면구배 1/20을 갖는 화차용 차륜으로서 차륜 직경이 860 mm이다. 레일은 우리나라 본선에 주로 설치되어 있는 50 kgN 레일을 사용하였으며, 궤간은 1,435 mm이다. Fig. 2는 본 논문에 적용된 차륜과 레일의 접촉 형상을 나타낸다.

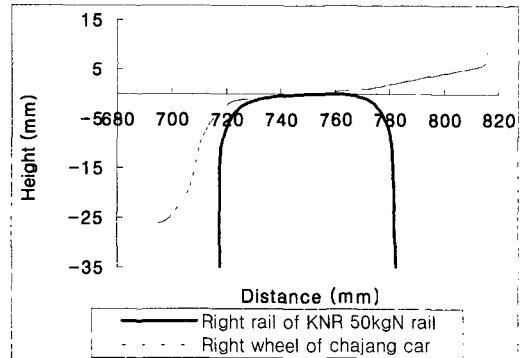


Fig. 2 Contact geometry of wheel and rail

## 3. 주행 안정성 해석

새로운 개념의 철도차량을 제작하기 위해서는 차량 동적 성능이 충분히 만족하는 지를 해석해야 하며, 동적성능 중 주행 안정성의 확보가 가장 먼저 해석되어야 한다. 차량이 최고속도로 주행 시에도 안정해야 하기 때문이다.

일반적으로 철도차량은 직선궤도 주행 시 차륜세트에 사행동(Kinematic Mode)이 발생하고, 어느 속도 이상에서는 이 행동이 급격히 확산되어 플랜지에 의해 억제되는 불안정한 현상이 발생한다. 이 현상을 Hunting이라 부르며, 이 현상이 발생하는 속도를 임계속도(Critical Speed)라 하며 주

행 안정성의 척도가 된다.

UIC Code 518 에 따르면 임계속도는 여러 가지 운행상의 조건을 고려하여 최고 운행 속도보다 10 % 정도 커야 한다. 여기서 10 %는 안전율이다.

노후시 임계속도(마모 차륜) >

차량 최고운행 속도 \* 1.1(10% 안전율)

차량 최고운행속도가 120 km/h 인 화차용 차장차의 임계속도 기준은 주행 안정성 해석에서 마모차륜 시 132 km/h 이상이어야 한다.

본 논문에서는 차량 주행 안정성을 평가하기 위해 선형 고유치 해석(Linear eigenvalue analysis)과 비선형 시간응답 해석(Non-linear transient analysis)을 병행하여 수행하였다. 주행속도를 50 km/h 에서 200 km/h 까지 증가시키고, 병행하여 임계속도에 큰 영향을 미치는 답면 구배(Conicity)를 신조시 0.05 에서 답면 마모가 심하게 되었을 때의 0.4 까지 5 단계로 변화시켜가며 해석을 실시하였다.

### 3.1 선형 고유치 해석

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

Fig. 3 은 공차 조건에서 선형 고유치 해석을 통한 답면구배별 임계속도의 변화를 나타내고 있다.

선형 고유치 해석 결과, 차륜 마모가 한도에 달했을 때(답면구배 0.4)의 임계 속도는 138 km/h 이다. 임계속도 기준치인 132 km/h 를 상회함으로써 주행 안정성을 만족하였다.

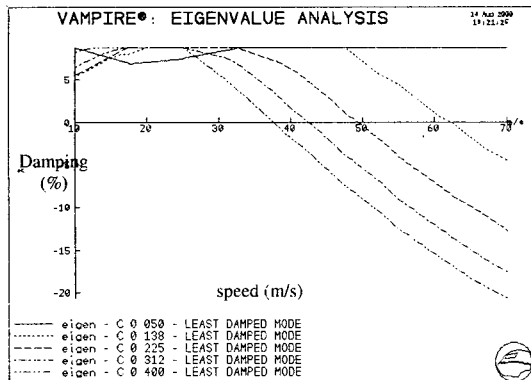


Fig. 3 Critical speed (linear eigenvalue analysis)

### 3.2 비선형 시간응답 해석

비선형 시간응답에서의 임계속도는 좌우 및 상하 방향 궤도 외란에 대한 윤축의 좌우 변위 수렴 여부를 파악하는 것이다.

Fig. 4 는 비선형 시간응답 해석을 적용하기 위한 궤도의 좌우, 상하 외란이고, Fig. 5 는 답면구배별 윤축의 좌우 수렴 여부를 속도별로 나타내었다.

비선형 시간응답 해석 결과, 차륜 마모가 한도에 달했을 때(답면구배 0.4)의 임계속도는 133 ~ 137 km/h 이다. 임계속도 기준인 132 km/h 를 상회함으로써 주행 안정성을 만족하였다.

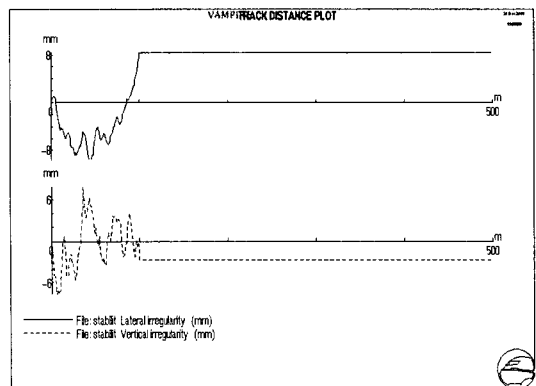


Fig. 4 Distortion of track

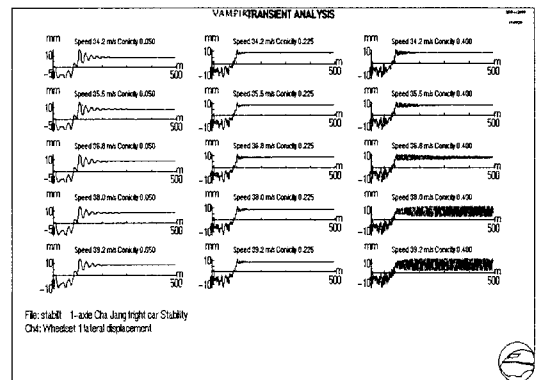


Fig. 5 Critical speed (non-linear transient analysis)

## 4. 주행 안전성 해석

주행 안전성을 평가하기 위한 항목으로서 UIC Code 518 에서는 탈선계수와 차륜/레일간 횡력의 합을 사용한다. 이 지표들은 주행 안전성을 평가 하는데 있어 중요한 항목으로서 정해진 허용한도 내에 있는지를 파악하는 것이 중요하다.

본 논문에서 주행 안전성 해석은 비선형 시간

응답 해석(Non-linear transient analysis)으로 수행하였으며, 차량 주행속도는 경부선 운전선로에 명시된 곡선반경별 최고 속도를 적용하였다. 안전성 해석에 적용된 궤도 조건을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Condition of track

Curve	Speed	Cant	Transition curve length
400 R	90 km/h	157 mm	155 m
800 R	110 km/h	150 mm	150 m
1000 R	120 km/h	137 mm	110 m

**4.1 탈선계수**

차량이 주행 시 레일과 차륜은 차량의 하중을 받을 뿐만 아니라 주행시의 복잡한 운동으로 인하여 레일에는 수직방향의 힘과 수평 방향의 힘이 작용한다. 이 수직 방향의 힘(수직력 P)에 대한 수평 방향의 힘(횡압력 Q)의 비(Q/P)를 탈선계수라 하며, 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어 넘어 탈선을 하게 되는 주행 안전성 검토의 기준이 된다.

탈선계수를 구하기 위해서 UIC Code 518 에서는 해석된 결과에 대해 20Hz Low-Pass Filtering 을 하고 그 값을 2 m 평균값에 0.5 m 단위로 변동평균값(sliding means value) 처리를 해야 한다. 이러한 모든 값들에 대한 통계 분포함수의 값은 0.15% ~ 99.85%의 값만 인정되며 그 외의 값은 평가에서 무시된다. 결과적으로 존재하는 최대 절대값은 99.85%의 값이다. UIC Code 518 에서 탈선계수 허용한도는 곡선 300R 이상에 대해 0.8 이하를 기준으로 하고 있다.

탈선계수 해석에 적용된 궤도 조건 및 해석 결과 최대값을 Table 3 와 Appendix B 에 나타내었다.

Table3 Results of analysis for derailment

Curve	Speed	Leading wheel	Trailing wheel
400 R	90 km/h	0.39	0.31
800 R	110 km/h	0.28	0.22
1000 R	120 km/h	0.33	0.28

해석 차량이 곡선반경별 최고속도로 주행 시,

선두 차륜과 후위 차륜에 대한 탈선계수는 UIC code 518 에서 제시한 허용 한도인 0.8 이내를 만족하였다.

**4.2 차륜/레일간 횡력의 합**

철도차량이 곡선주행 시 차륜과 레일사이에는 주행각이 있고, 특히 진행방향 선두차축의 외측 차륜 후렌지가 레일을 미는 상태가 된다. 차륜이 곡선을 따라 주행하려면 외측 차륜은 내측 차륜보다 많이 회전하지 않으면 안 되는데, 차륜은 차축에 고정되어 있어 각각 회전할 수 없고, 또 차체나 대차는 고정되어 있기 때문에 곡선중심을 향하여 차륜은 레일면에서 미끄러지면서 주행하게 된다. 이때 차륜으로부터 레일에 작용하는 횡 방향의 힘을 횡압이라 한다.

차륜/레일간 횡력의 합을 구하기 위해서는 해석된 결과에 대해 20Hz Low-Pass Filtering 을 하고 그 값을 2 m 평균값에 0.5 m 단위로 변동평균값(sliding means value) 처리를 해야 한다. 이러한 모든 값들에 대한 통계 분포 함수의 값은 0.15% ~ 99.85%의 값만 인정되며 그 외의 값은 평가에서 무시된다. 결과적으로 존재하는 최대 절대값은 99.85%의 값이다. UIC Code 518 에서 윤축당 차륜/레일간 횡력의 합 허용한도는 다음의 식에 따라 정하고 있다.

$$(\sum Y)_{2m} \leq F(10+W/3) = 32.10 \text{ kN}$$

여기서,

$\sum Y$  : 차륜/레일간 횡력의 합

F : 안전 계수(화차=0.85 적용)

W : 축 중(Axle load = 83.306 kN)

차륜/레일간 횡력의 합 해석에 적용된 궤도 조건 및 해석 결과 최대값을 Table 4 와 Appendix C 에 나타내었다.

Table 4 Results of analysis for sum of wheel/rail lateral force

Curve	Speed	Leading wheel	Trailing wheel
400 R	90 km/h	11.60 kN	12.50 kN
800 R	110 km/h	7.31 kN	8.61 kN
1000 R	120 km/h	10.96 kN	12.12 kN

해석 차량이 곡선반경별 최고속도로 주행 시, 선두 차륜과 후위 차륜에 대한 차륜/레일간 횡력의 합은 UIC code 518 에서 제시한 허용한도 32.1 kN 이내를 만족하였다.

### 5. 결론

1 축 대차를 장착한 화차용 차장차에 대해 국제적으로 많이 인용되고 있는 UIC 규정에 따라 동특성 해석을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 주행 안정성을 확인하기 위해 선형 고유치 해석과 비선형 시간응답 해석을 병행하여 해석하였다. 해석 결과, 가장 나쁜 조건인 공차이고 차륜이 마모한도 상태에서 임계속도가 각각 138 km/h 와 133 km/h 로 계산되었으며, 충분한 안정성이 있는 것으로 평가되었다.

- 탈선계수를 알아보기 위해 국내 선로 데이터와 곡선반경별 최고속도를 적용하여 비선형 시간 응답 해석을 하였다. 해석 결과, 탈선계수 최대치는 곡선 400R, 선두 차륜에서 0.395 로서 이는 탈선계수 허용 한도인 0.8 이내를 만족한다.

- 차륜/레일간 횡력의 합을 알아보기 위해 국내 선로 데이터와 곡선 반경별 최고속도를 적용하여 비선형 시간 응답 해석을 하였다. 해석 결과, 차륜/레일간 횡력의 합 최대치는 곡선 400R, 후위 차륜에서 12.50 kN 로서 이는 차륜/레일간 횡력의 합 허용 한도인 32.1 kN 이내를 만족한다.

- 주행안전성을 평가하기위해 탈선계수와 차륜,레일간 횡력의 합을 해석한 결과, 충분한 안전성을 갖는 차량으로 평가되었다.

### 참고 문헌

1. Yoshihira SUDA, "Development of Single Axle Truck with High Performance and Low cost," J-RAIL '99, pp. 183~186, 1999.
2. International Union of Railways, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour safety-track fatigue-ride quality," UIC Code 518 OR, pp. 1~51, 1995.
3. British Railway Research, "VAMPIRE user's manual," Vol. 1~2, 1994.
4. Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of

railway vehicle systems," pp. 80~103, 1984.

5. 이종득, "철도 공학," 노해출판사, pp. 87~148, 1989.
6. 철도기술연구원, "철도차량의 진동방지에 관한 연구," pp. 133~139, 1996.

### Appendix A – Track irregularity

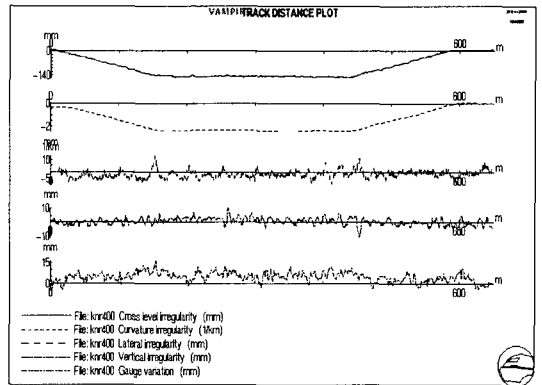


Fig. A-1 Curve – 400R

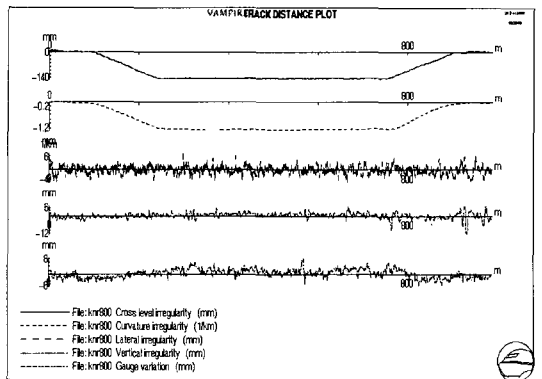


Fig. A-2 Curve – 800R

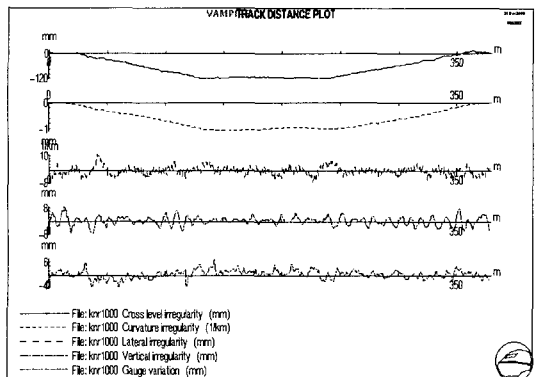


Fig. A-3 Curve – 1000R

**Appendix B – Derailment ratio**

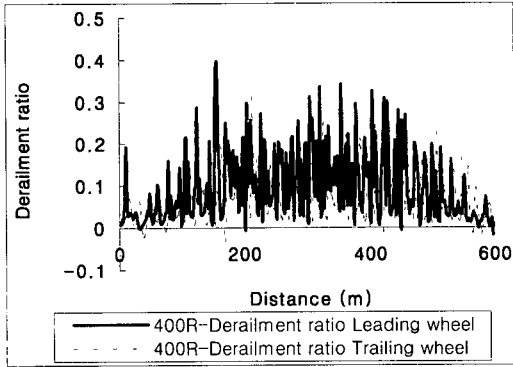


Fig. B-1 Curve 400R – Derailment ratio

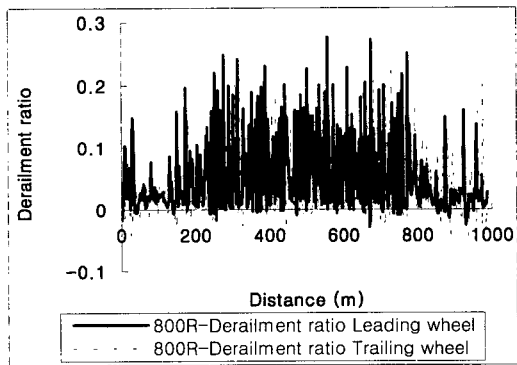


Fig. B-2 Curve 800R – Derailment ratio

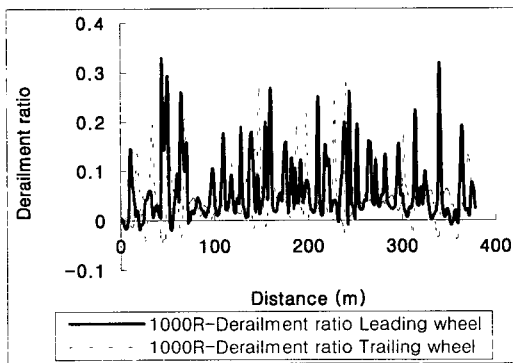


Fig. B-3 Curve 1000R – Derailment ratio

**Appendix C – Sum of wheel/rail lateral force**

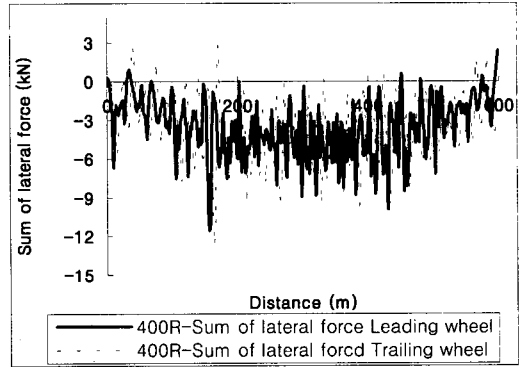


Fig. C-1 Curve 400R – Sum of lateral force

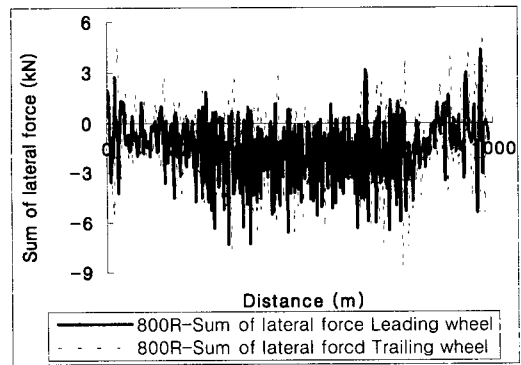


Fig. C-2 Curve 800R – Sum of lateral force

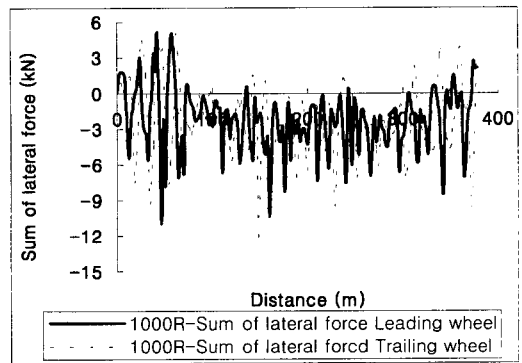


Fig. C-3 Curve 1000R – Sum of lateral force