

# 경부고속철도 시험선 구간에서 G7 고속전철 차량의 동특성 검토

박찬경<sup>1</sup> · 김영국<sup>1</sup> · 배대성<sup>2</sup> · 박태원<sup>3</sup>

## Review on the Dynamic Behavior of G7 High Speed Train(KHST) in the KTX Test Line

Chan-Kyoung Park, Young-Guk Kim, Dae-Sung Bae and Tae-Won Park

**Key Words** : Railway Dynamics(철도차량동역학), Derailment(탈선), Suspension(현가장치), Vertical Force(윤중), Unloading(윤중감소), Lateral Load(횡압), High Speed Train(고속전철)

### ABSTRACT

The dynamic behavior of high speed train is very important because of its safety and passengers' ride comfort. The railway vehicle is composed of many suspension components, such as 1st springs, 1st dampers, 2nd springs and 2nd dampers, that have an influence on the dynamic characteristics of high speed train. Also, the wheel/rail shapes and the track geometry affect the dynamic behavior of high speed train. This paper reviews the dynamic behavior of KHST in the KTX test line. The VAMPIRE program is used for this simulation. The simulation results are within the limits of safety criteria. Thus the KHST can operate safely at 350 km/h in the KTX test line.

### 1. 서론

철도차량의 동적 요소는 차체, 대차 및 휠셋 등의 질량요소와 이들을 연결시키는 현가요소로 구성된다. 현가요소는 스프링과 댐퍼로 구성되며, 차체와 대차는 1차 현가요소, 대차와 휠셋은 2차 현가요소로 연

결되어 있기 때문에 현가요소는 철도차량의 동적 안전성에 중요한 영향을 준다. 또한, 철도차량이 레일 위를 운행되기 때문에 휠/레일 형상 및 선로조건에 따른 휠과 레일의 상호작용도 열차의 안전성에 중요한 영향을 미치는 요소 중의 하나이다[1].

경부고속철도가 2004년 상업운전을 목표로 건설 중이며, 전체 선로의 일부인 시험선 구간에서는 앞으로 운행될 고속열차를 300 km/h의 속도로 시험운행하고 있다. 경부고속철도의 상업 운전속도는 300 km/h이지만, 350 km/h까지도 운행할 수 있도록 선로조건(중/횡 곡률반경, 구배 등)이 설계되어 있다[2].

\*1 한국철도기술연구원 선임연구원

\*2 한양대학교 정밀기계공학과 교수

\*3 아주대학교 기계 및 산업공학부 교수

본 연구는 G7사업의 일환으로 개발이 진행되고 있는 운행속도 350 km/h인 한국형 고속전철(KHST)이 경부고속철도의 시운전 구간을 운행하였을 경우에 발생할 수 있는 고속열차의 동적 안전성 문제를 주행 안전성과 궤도 허용하중 분석을 통해 살펴보고자 한다.

## 2. 모델링

### 2.1 차량 모델

철도차량의 동적 해석은 AEA Technology사의 철도차량 전용해석 프로그램인 VAMPIRE S/W를 이용하여 수행하였다[3]. 이 해석을 위해 필요한 철도차량의 편성모델과 좌표계는 Fig. 1과 같다.

해석을 위한 고속전철의 차량은 6량으로 동력차, 동력객차, 3대의 객차 및 동력객차로 구성하였다. 차체를 지지하는 대차는 2대의 동력차용 동력대차(PMB), 2대의 전후 동력객차용 동력대차(MTB) 및 동력객차와 객차, 객차와 객차사이를 연결하는 4대의 관절대차(ATB)로 구성하였다.

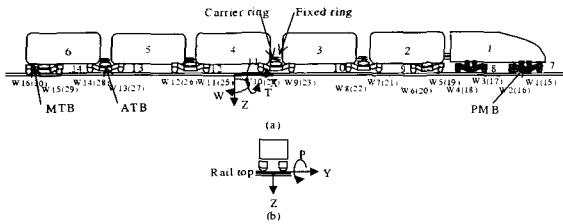
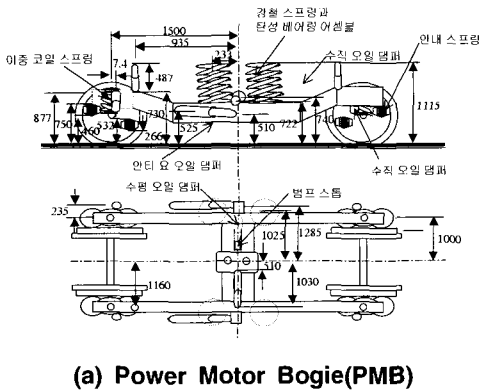
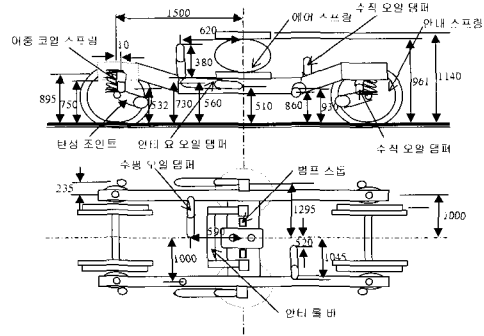


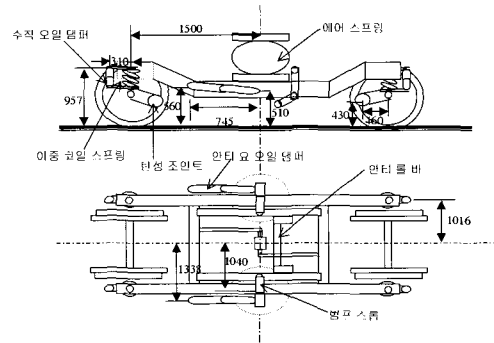
Fig. 1 Schematic Diagram and Axis system of Train



(a) Power Motor Bogie(PMB)



(b) Motorized Trailer Bogie(MTB)



(c) Articulated Trailer Bogie(ATB)

Fig. 2 Schematic Diagram of Bogie

Fig. 2는 동력차용 동력대차, 동력객차용 동력대차 및 관절형 대차를 나타낸다. 차체의 관성 특성치와 대차의 현가장치 특성치를 사용하여 VAMPIRE S/W로 표현한 해석 열차모델은 Fig. 3과 같다.

### 2.2 휠/레일 모델

휠과 레일의 형상은 휠과 레일의 상호작용을 일으키기 때문에 철도차량의 동특성 해석에 중요하다.

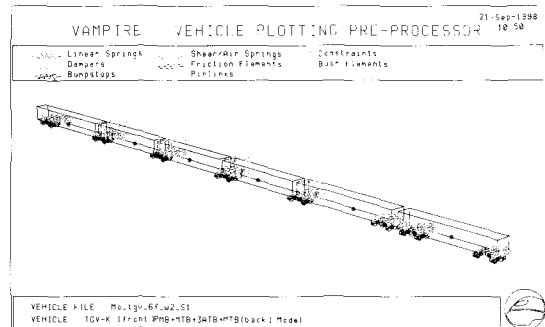


Fig. 3 VAMPIRE Vehicle Model

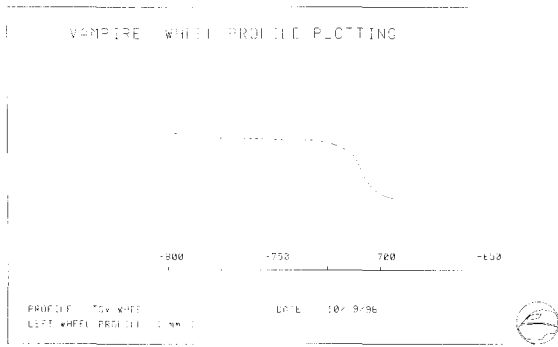


Fig. 4 Wheel Profile

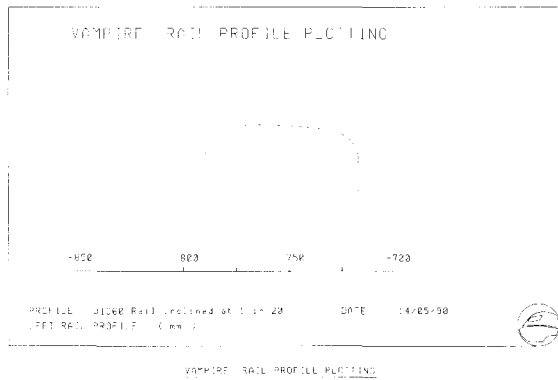


Fig. 5 Rail Profile

경부고속철도의 선로는 UIC 60 레일을 사용하였고, 개발 고속열차의 휠은 NFF 01-112에 규정된 경부고속철도(KTX)와 동일한 휠을 사용하였다. 휠과 레일의 형상은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

2.3 선로 모델

현재 시운전중인 경부고속철도 시운전 구간의 노선은 Fig. 6과 같이 시운전 구간의 전체 길이가 동서울역 기점 86 km지점에서 143.2 km지점까지 총 57.2 km이며, 이 구간에는 터널과 교량이 이어져 있으며 천안역과 오송역이 존재한다. 또한 최대 종구배는 14‰이며 최대 곡선반경은 7000 m로 3곳에 존재한다.

Fig. 7은 동서울 기점 106.3~136.3 km구간인 30 km에 대한 레일의 검측 결과로 시뮬레이션의 입력 데이터로 사용한다. 이 구간에서는 열차 진행방향의 우측(+Y 방향)에 회전중심을 갖는 곡률반경이 약 7000 m인 곡선부가 2곳 존재하며, 캔트는 최대 140

mm로 열차진행 방향에 대해 좌측레일이 우측레일보다 높게 설정되어 있다. 또한, 레일불규칙도는 좌우방향틀림이 전반적으로 ±4 mm, 최대 6mm, 고저틀림은 전반적으로 ±2 mm, 최대 6 mm, 궤간틀림은 전체적으로 3 mm가 넓혀져 있으며, ±3 mm의 변동을 갖고 있다.

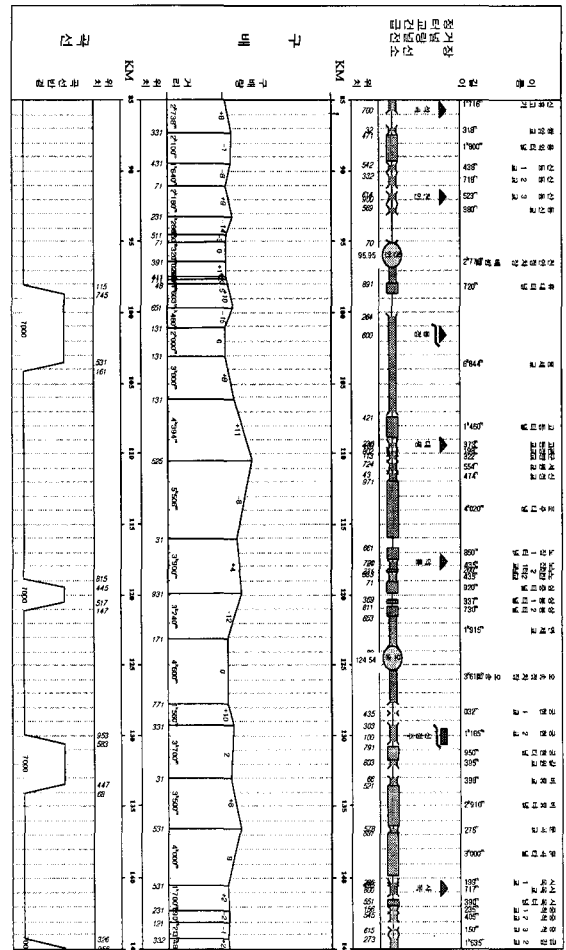


Fig. 6 KTX Test Line

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 조건

경부고속철도의 시운전 구간에서 KHST가 최고속도 350 km/h로 주행하였을 경우를 가정하여, 시운전 구간의 궤도 불규칙 모델을 입력으로 사용하여 주행속도 97.2 m/s(350 km/h)인 경우에 대해 VAMPIRE S/W로 시뮬레이션을 수행하였다.

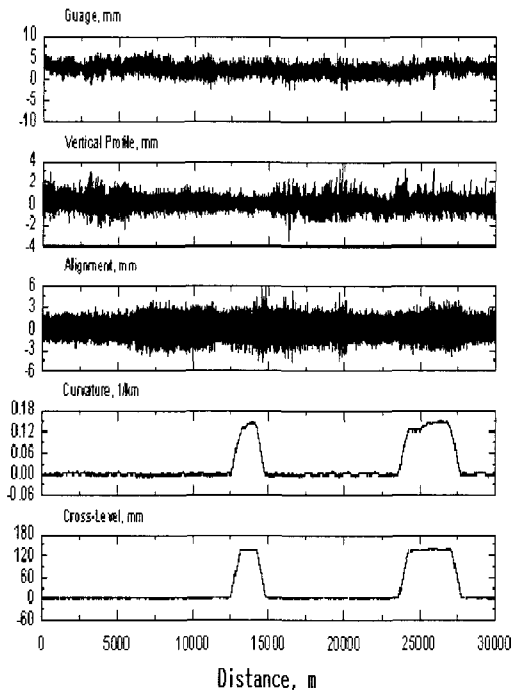


Fig. 7 Data of Track Irregularity

### 3.2 철도차량 안전성 판정

경부고속철도 시험선구간에서 KHST의 동적 안전성을 탈선계수, 운중감소 및 레일 작용력을 계산하여 판정한다[2][4].

탈선계수는 운중에 대한 횡압의 비(=횡압/운중)를 말하며, 경부고속철도 차량 요구조건[2]에 의하면 탈선계수를 평균 0.8이하, 최대 peak 1.2이하로 제한하고 있다.

운중감소는 운중에 대한 운중변동량의 비(=운중변동량/운중)이다. 운중감소에 대한 규제는 동적 운중감소와 정적 운중감소로 구분되어 질 수 있으나, 경부고속철도 차량 요구조건은 이에 대해 명확히 구분되어 있지 않고 0.4이하로만 제한하고 있다[2]. 프랑스에서 제출된 검토자료는 정적 운중감소에 의한 결과만이 제시되어 있을 뿐이다. 따라서, 정적 운중감소는 이 규제를 따라 판정하고, 동적 운중감소는 국내 철도청 시행규정[5]에 의한 평가로 판정한다.

레일 작용력은 레일의 허용하중에 대한 분석으로 운중과 횡압으로 구분하여 분석될 수 있다. 경부고속철도의 규제치를 사용하여 판정하며, 그 규제치는 좌우방향(횡압) ±60 kN, 상하방향(운중) 170 kN이하이다[2].

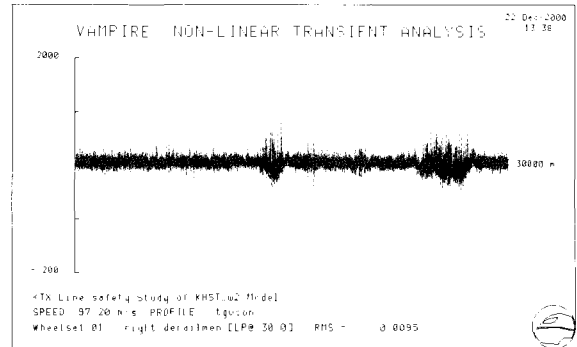


Fig. 8 Derailment Coefficient of 1st Right Wheel

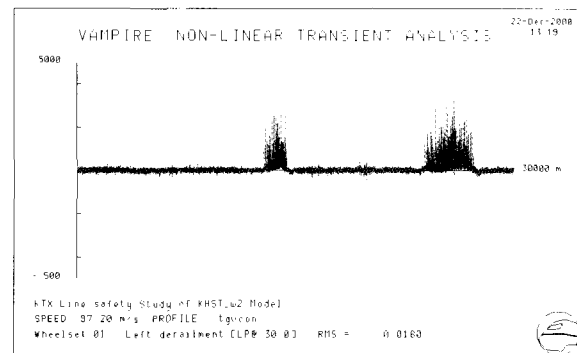


Fig. 9 Derailment Coefficient of 1st Left Wheel

### 3.3 탈선계수에 대한 분석

탈선계수 계산결과의 예로써 1번째 우측 휠과 좌측 휠에서의 탈선계수를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타낸 것으로 곡선부분에서 탈선계수가 최대가 된다.

Fig. 10은 모든 휠에 대한 탈선계수를 나타낸 것으로 우측 휠보다 좌측 휠의 경우에 탈선계수가 더 크다. 이것은 경부고속철도 선로의 균형켄트가 열차 속도 300 km/h로 설정되어 있기 때문에 350 km/h의 열차속도의 경우에는 켄트부족이 되고, 곡선이 열차 진행방향에 대해 시계방향이므로 좌측 휠이 우측 휠보다 훨씬 큰 횡방향의 하중이 걸리기 때문이다.

탈선계수의 최대는 좌측의 5번째 휠에서 걸리며, 그 때의 값은 0.4096으로 평균 규제치인 0.8의 1/2정도에 불과하므로 탈선계수의 관점에서는 KHST가 경부고속철도의 선로를 350 km/h로 운행하여도 동적 거동의 입장에서는 안전하다고 할 수 있다.

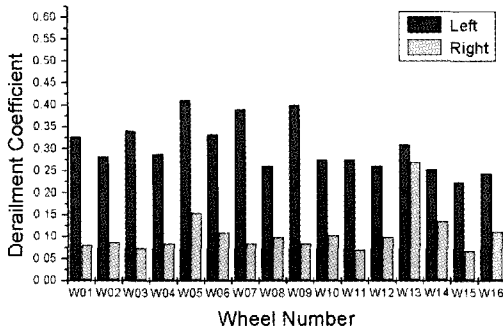


Fig. 10 Derailment Coefficient of Each Wheel

### 3.4 운중감소에 대한 분석

Fig. 11과 Fig. 12는 운중감소에 대한 계산결과의 예로써 1번째 우측 휠과 좌측 휠에서의 운중감소를 나타내는 데, Fig. 11 및 Fig. 12에서 보는 바와 같이 7000m의 곡선반경이 존재하는 곡선구간에서 운중감소가 크게 작용하고 있으며 탈선계수와는 반대로 좌측 휠보다 우측 휠에 크게 나타낸다. 이는 탈선계수에 대한 분석에서 설명한 바와 같이 350 km/h의 열차속도에서 곡선부에서 캔트부족이 되어 우측 휠이 들리는 효과를 갖기 때문에 우측 휠은 운중감소가 증가되는 반면에 좌측 휠은 운중이 오히려 증가된다.

Fig. 13은 우측의 모든 휠에서의 정적 운중감소를 나타낸 것으로 15번째와 16번째의 휠에서 최대 0.367을 갖는데, 이는 경부고속철도의 규제치인 0.4보다는 작은 값이다.

동적 운중감소의 경우는 최대 peak 값은 10번째 우측 휠에서 1.129를 나타나고 있으나 이는 간헐적인 peak값이므로 철도청 시행규정에 의한 평가인 누적빈도 확률에 의한 평가를 통해 판단해야 한다. 최대치를 나타내고 있는 10번째 우측 휠에 대해 이 평가법을 적용한 경우가 Fig. 14로 모든 확률분포에서 규제치보다 적다. 그 예로 0.1%의 누적빈도 확률일 때에 규제치는 0.8이지만 계산된 값은 0.6을 나타내고 있다. 따라서 이론적으로 계산된 정적 운중감소나 동적 운중감소값이 규제치보다 작으므로 운중감소 관점에서는 KHST가 경부고속철도의 선로를 350 km/h로 운행해도 안전상의 문제는 발생하지 않는다고 할 수 있다.

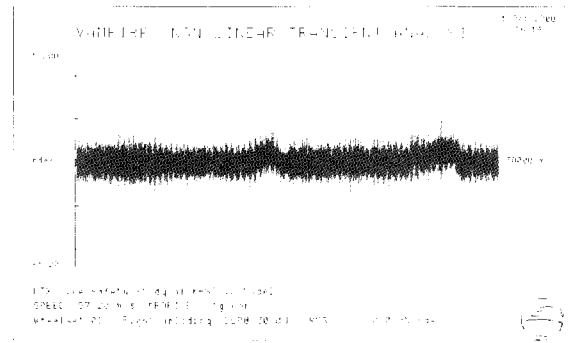


Fig. 11 Unloading of 1st Right Wheel

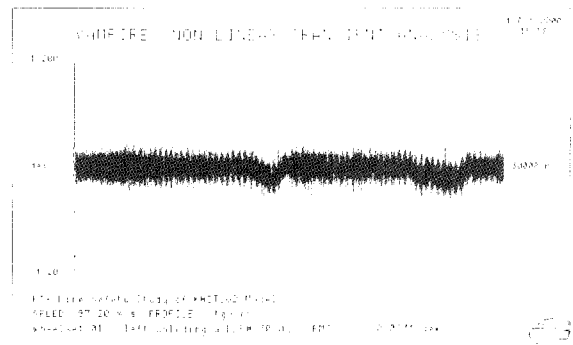


Fig. 12 Unloading of 1st Left Wheel

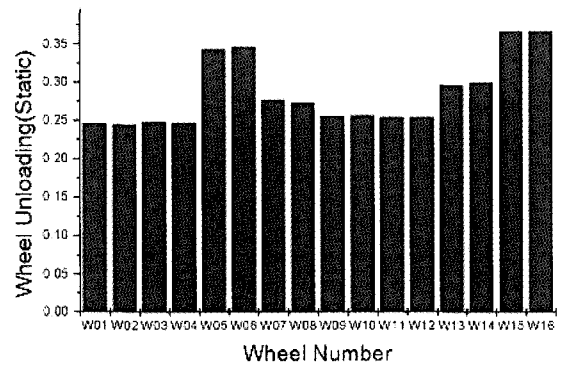


Fig. 13 Static Unloading of Each Wheel

### 3.5 레일 작용력에 대한 분석

Fig. 15, Fig. 16과 Fig. 18, Fig. 19는 궤도 작용력에 대한 계산결과의 예로써 1번째 우측 휠과 좌측 휠에 걸리는 운중과 횡압을 나타내는 데, 실제로 이 운중과 횡압의 반대방향의 힘이 궤도 작용력이 되며, 곡선부에서 큰 하중이 작용한다.

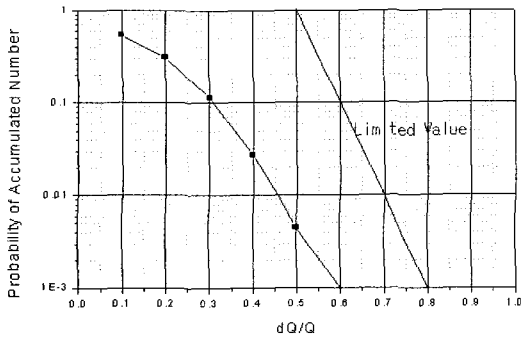


Fig. 14 Dynamic Unloading of Each Wheel

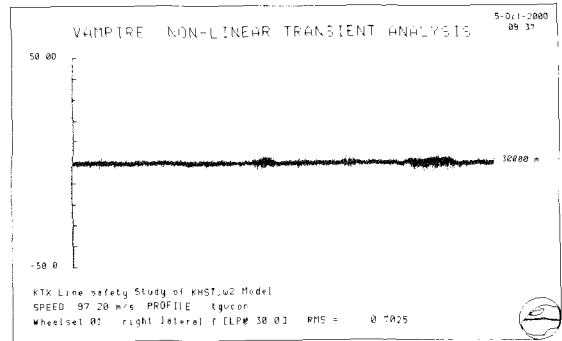


Fig. 18 Lateral Load of 1st Right Wheel

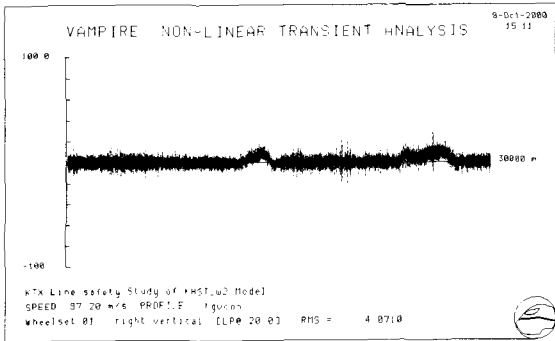


Fig. 15 Vertical Load of 1st Right Wheel

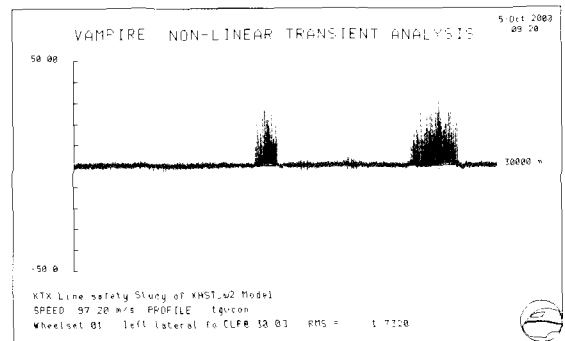


Fig. 19 Lateral Load of 1st Left Wheel

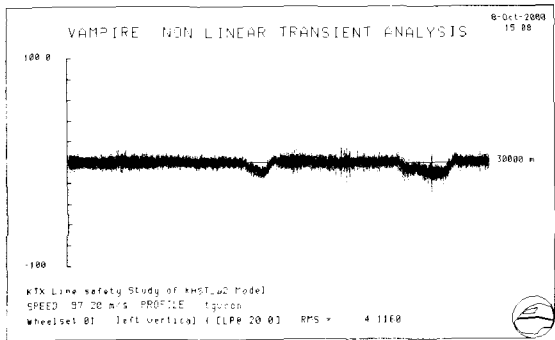


Fig. 16 Vertical Load of 1st Left Wheel

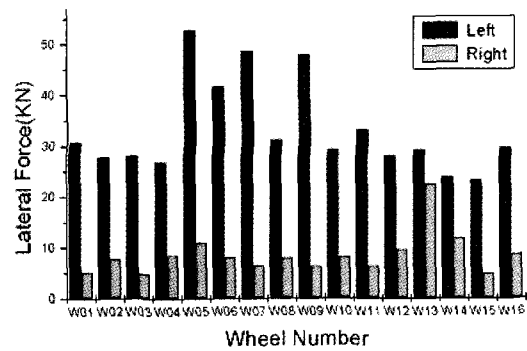


Fig. 20 Lateral Load of Each Wheel

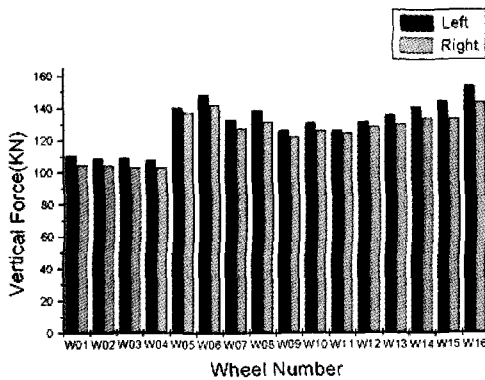


Fig. 17 Vertical Load of Each Wheel

Fig. 17과 Fig. 20은 모든 휠에서의 운동과 횡압을 나타내며, 탈선계수와 마찬가지로 좌측 휠이 우측 휠보다 큰 하중이 작용하고 있음을 보여준다. 운동은 Fig.17에서 보는 바와 같이 102 ~ 150 kN 정도로 16번째 휠에서 최대값을 나타내며, 횡압은 Fig. 20과 같이 4 ~ 53 kN 정도 5번째 휠에서 최대값이 나타나고 있다. 이는 레일 작용력의 한계치인 운동 170 kN, 횡압 ±60 kN 보다는 작은 값이기 때문에

KHST가 경부고속철도의 선로를 350 km/h 운행시에 도 궤도 허용하중을 초과하지 않는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

G7 고속전철 시제차량(KHST)이 경부고속철도 시 운전 구간을 350 km/h로 주행하였을 시 발생할 수 있는 동적 안전성 문제를 탈선계수, 윤중감소 및 궤도 작용력의 관점에서 검토하였으며, 각각에 대한 최대치는 아래와 같다.

- 탈선계수 : 0.4096
- 윤중감소  
정적 윤중감소 : 0.367  
동적 윤중감소(0.1%의 누적빈도 확률일 때) : 0.6
- 궤도작용력  
윤중 : 150 kN  
횡압 : 53 kN

이 최대치들이 모두 한계치 이하이므로 경부고속철도를 G7 고속전철 시제차량이 350 km/h로 주행해도 열차의 동적 안전성상 문제가 없는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 박찬경, 김기환 외2, 1998, "Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp510-516.
- (2) 한국고속철도건설공단, 1994, 경부고속철도 계약서, Vol.1
- (3) AEA TECHNOLOGY, 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (4) Interantional Union of Railways, 1995, UIC Code 518OR
- (5) 철도청, 1989, "철도기술연구보 부록Ⅲ 철도차량의 주행 안전성 평가방법(안)", Vol. 23, No.1, pp198-204.