

## 차륜답면 형상변화에 따른 KTX의 동특성

### Effects of Wheel Profile on KTX Dynamic Characteristics

장종기<sup>1</sup> · 이승일<sup>2</sup> · 최연선<sup>3</sup>

Jong-Ki Chang · Seung-Il Lee · Yeon-Sun Choi

#### Abstract

The running safety of a railway vehicle depends on the design parameters and contact condition between wheel and rail. In this study, the effect of the conicity of wheel tread is analyzed using ADAMS/RAIL software on running situation. Modal analysis shows in 0.6 Hz natural frequency of lateral mode in fully arranged the KTX cars. The excessive vibration of the tail cars occurs in the 17th car as the speed and the stiffness of the secondary suspension increases, and especially for 1/40 conicity of the GV40 wheel. Also, the analysis shows that combination of wheel profile, GV40 for power cars and XP55 for passenger cars can reduce the lateral vibration of the tail cars.

**Keywords :** Wheel conicity(차륜답면구배), Tail car vibration(차량후미진동), KTX, ADAMS/RAIL, GV40, XP55

#### 1. 서론

KTX는 동력차와 동력객차 사이의 연결을 제외한 객차부의 차량간 연결이 댐퍼와 관절대차로 연결되어 있어 차량간 상대운동이 연성되는 특징이 있다. KTX를 비롯한 철도차량에서 차륜답면 형상은 차량의 주행안정성에 중요한 영향을 미친다. 그러나 시험운전에 의한 차륜답면 형상에 따른 주행 안정성 판별은 쉽지 않은 과제이다. 이와 관련하여 박찬경[1]은 VAMPIRE로 KTX 열차의 동적 안정성을 연구하였다. 강부병[2]은 VAMPIRE로 KTX 열차를 16량으로 모델링하여 차륜답면구배와 2차 현가장치가 KTX 열차의 동특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이찬우[3,4]는 KTX 열차의 실차시험을 통하여 차륜답면형상이 XP55(1/20)를 비교하여 XP55가 보다 안정적임을 보여주었다. 본 연구에서는 차륜답면 형상이 20량 완편성 KTX 열차의 주행안정성에 미치는 영향을 조사하고, ADAMS/RAIL을 이용하여 실제 운행편성인 20량 완편성, GV40(1/40)과 KTX 열차의 동특성에 GV40과 XP55의 차륜형상이 미치는 영향을 검토하였다.

#### 2. 차륜답면 영상

차륜답면은 차륜과 레일이 접촉하는 차륜의 외주면을 말하며 플랜지(flange)와 구배를 설치한 것은 곡선 통과시 운전을 원활히 하기 위함이다. 플랜지는 진행방향을 유도하는 동시에 차량의 진동에 의한 횡압으로부터 탈선을 방지하는 역할을 한다. 일반차량의 차륜답면구배는 1/10~1/20의 2단 구배, 준고속 객차는 1/20 혹은 1/40의 단일구배, 화차는 1/20 단일구배를 갖는 경향이 있다[5]. 곡선을 통과 시 외측 레일은 내측 레일에 비해 길기 때문에 차륜의 직경이 동일하다면 외방차륜은 회전거리 부족을 일으킨다. 그러나 구배를 주었기 때문에 차량이 곡선 통과 시 원심력으로 인해 차량이 곡선의 외측으로 밀려 차륜반경 큰 부분이 레일과 접촉함으로써 곡선 경로를 원활히 통과하게 된다. Fig. 1은 차륜

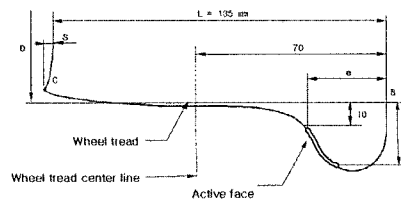


Fig. 1. Wheel profile

1 학생회원, 성균관대학교 대학원 석사과정  
2 정회원, 한국철도대학 차량기계과  
3 정회원, 성균관대학교 기계공학부, 교수

답면의 상세도이다. 여기서  $e$ 는 차륜 플랜지의 두께,  $H$ 는 차륜 플랜지의 높이,  $S$ 는 돌출량,  $D$ 는 차륜답면 중심선의 직경,  $L$ 은 차륜 림의 폭이다[6].

### 3. ADAMS/RAIL 해석

#### 3.1 차량모델

ADAMS/RAIL을 이용한 20량 완편성 KTX 열차의 해석 모델은 Fig. 2에서와 같이 P(동력차)+MT(동력객차)+16+MT(동력객차)+P(동력차)로 전체 차량모델은 총 531자유도로 모델링하였다. 대차모델은 동력차용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 4대, 동력객차(MT)용 동력대차(MTB, Motorized Trailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Trailer Bogie) 17대로 모델링하였다. 객차와 객차사이에는 관절대차와 더불어 차체와 차체 사이의 연결기(interbody connector)를 삽입하였다. Fig. 3은 연결부위 모델의 상세도이다. 차체간의 결합은 상부는 부쉬(bush)로 연결하고 하부는 고정링 조인트를 이용하여 연결하였다. ADAMS/RAIL을 이용하여 20량

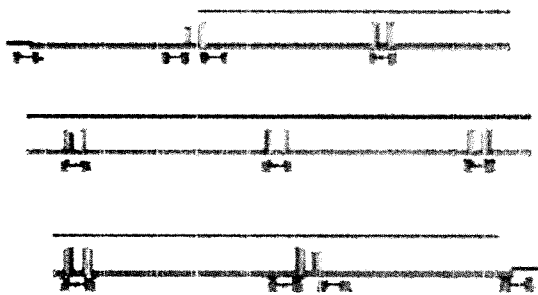


Fig. 2. ADAMS/RAIL model for arranged cars

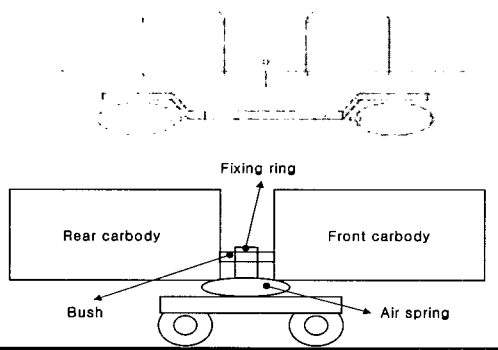


Fig. 3. ADAMS/RAIL model for articulated bogie

완편성 KTX 열차를 시뮬레이션하였다.

#### 3.2 트랙모델

서울기점 경부선 고속선(106.3~123.3km) 구간에서 실제 측정된 궤도자료를 ADAMS/RAIL에서 사용할 수 있도록 변환하여 입력하였다. Fig. 4는 본 연구에서ADAMS/RAIL에 사용된 궤도자료를 나타내고 있으며, 시험구간에서 측정된 궤도자료의 궤간, 좌우, 상하방향의 불규칙도이다. 본 연구에서는 궤도의 불규칙도가 차륜 가진으로 작용할 때 차륜의 응답을 검토하였다.

#### 3.3 차륜과 레일모델

차륜답면 모델은 KTX 열차에 적용된 GV40과 XP55를 모델링하였고, UIC 60 레일을 사용하였다. Fig. 5의(a)와 (b)는 GV40과 XP55에 대한 차륜답면 형상을 나타내었고, (c)에서는 두 차륜답면 형상을 비교하였다.

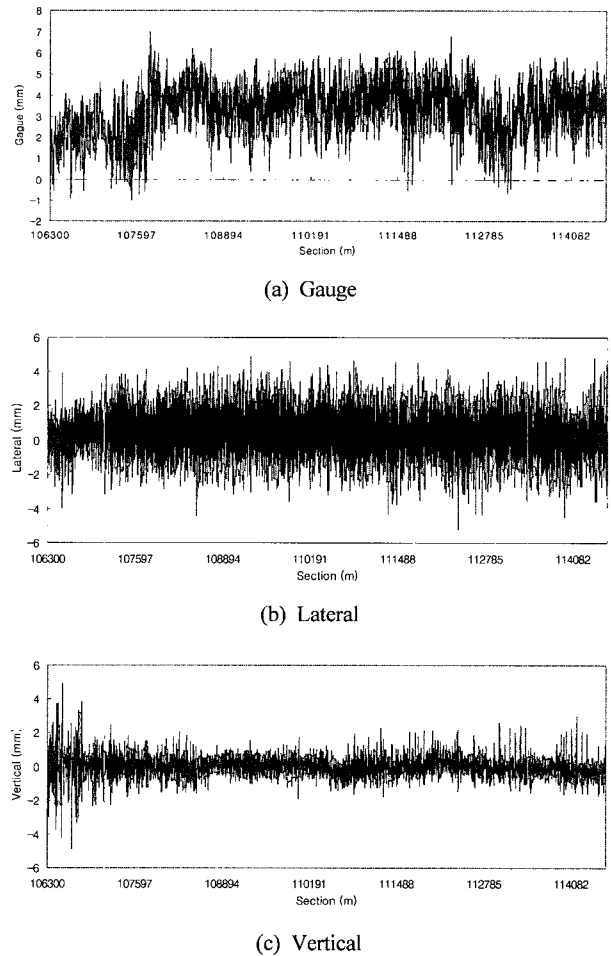
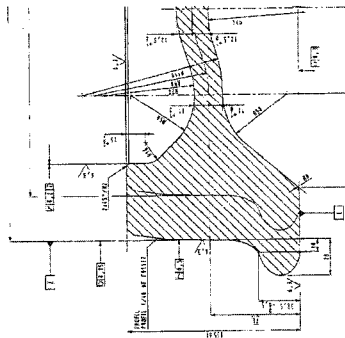


Fig. 4. Track irregularity of Kyungbu line

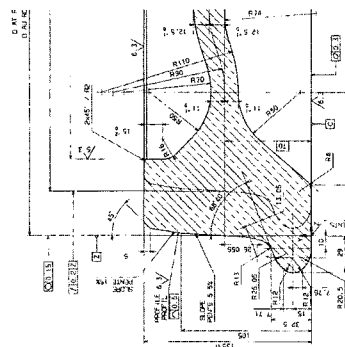
#### 4. ADAMS/RAIL 해석결과

KTX 열차의 모드형상을 검토하기 위하여 ADAMS/ RAIL 를 이용하여 모드해석을 수행하였다. 모드해석 결과, Fig. 6 에서와 같이 0.50~0.65Hz 사이에서 열차의 사행동 모드형 상이 발생하는 것을 확인하였다. 차륜담면 형상에 따른 KTX 열차의 동특성을 검토하기 위하여 ADAMS/ RAIL을 이용하여 주행속도에 따른 시뮬레이션을 차륜담면 구배별 로 수행하였다. KTX 열차의 2차 현가장치는 공기스프링으로 고무온도가 20℃에서 -20℃까지 감소함에 따라 공기스프링 횡방향 강성값은 반비례하여 증가하고, 외기온도가 20℃ 를 기준으로 동절기에 -10℃까지 하강하면 공기스프링 강성 값은 약 30%까지 증가하고, -20℃에서는 약 60%정도 증가 한다. 그러므로 2차 현가장치의 횡방향 강성값을 변화시키 면서 주행속도에 따른 차량의 응답을 검토하였다. 2차 현가 장치의 횡방향 강성값(0.1, 0.2, 0.3, 0.4MN/m)과 주행속도 (150, 200, 250, 300km/h)를 변화시켜가면서 차량응답을 검 토하였다. Fig. 7은 GV40과 XP55 차륜을 장착하고 150~ 300km/h 주행하는 KTX 열차의 2차 현가장치의 횡방향 강 성값이 0.1MN/m일 때 전체 차량의 차량별 횡방향 가속도 값이 커지는 것을 알 수 있다.

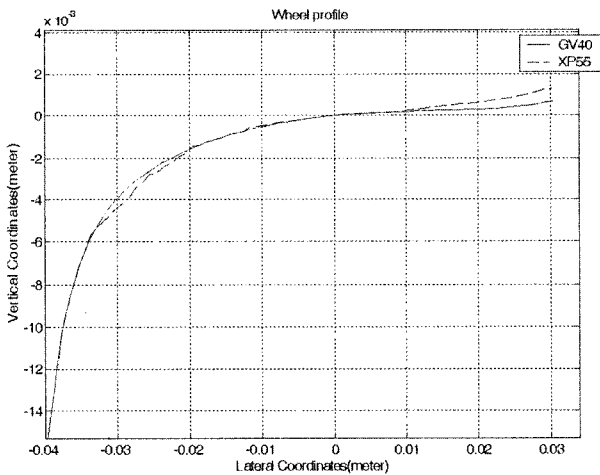
또한 GV40과 XP55가 비슷한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 2차 현가장치의 횡방향 강성값이 0.2MN/m인 경 우, Fig. 8에서와 같이 KTX 차량별 횡방향 가속도 값은 2차



(a) GV40



(b) XP55



(c) GV40 and XP55

Fig. 5. Wheel profile

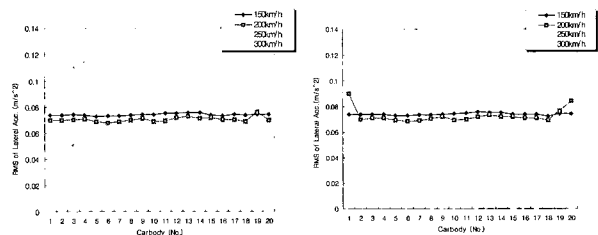


(a) 0.55Hz



(b) 0.64Hz

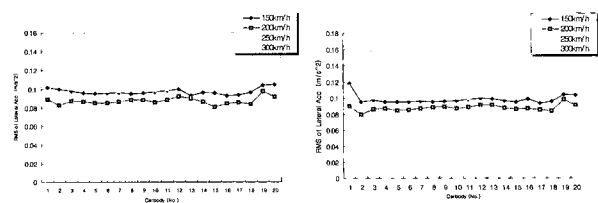
Fig. 6. Mode shapes of arranged 20 cars



(a) GV40

(b) XP55

Fig. 7. Lateral accelerations of KTX ( $K_y = 0.1 \text{ MN/m}$ )



(a) GV40

(b) XP55

Fig. 8. Lateral accelerations of KTX ( $K_y = 0.2 \text{ MN/m}$ )

현가장치 횡방향 강성값이 0.1MN/m인 경우보다 전체적으로 진동이 커짐을 알 수 있다. 또한 2차 현가장치 강성값이 커짐에 따라 XP55 차륜을 장착한 경우가 GV40 차륜을 장착한 경우보다 진동이 약간 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 차량별 진동은 같은 주행속도에서 큰 차이가 없음을 확인하였다. 그러나 Fig. 9와 10에서와 같이 2차 현가장치의 횡방향 강성값이 0.3과 0.4MN/m일 경우, GV40은 주행속도 150 km/h에서 KTX 열차의 후미부 차량에서 승차감 기준치 ( $0.183\text{m/s}^2$ )를 크게 초과하는 진동이 발생하였다[4]. 그러나 XP55의 경우는 전체 차량이 승차감 기준치를 초과하지 않는 범위에서 진동이 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 11은 GV40을 장착한 KTX 열차가 150km/h의 속도로 주행할 때

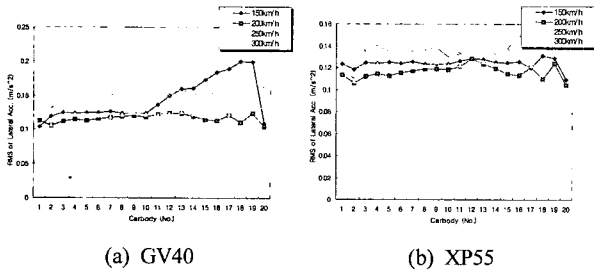


Fig. 9. Lateral accelerations of KTX( $K_y=0.3 \text{ MN/m}$ )

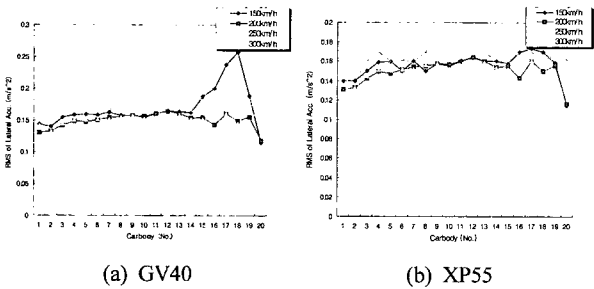


Fig. 10. Lateral accelerations of KTX( $K_y=0.4 \text{ MN/m}$ )

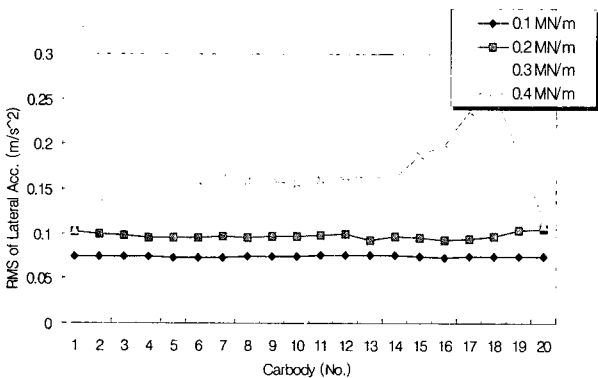


Fig. 11. Lateral accelerations of KTX( $v=150\text{km/h}$ )

2차 현가장치의 횡방향 강성값 변화에 따른 차량별 횡가속도의 양을 나타낸 것이다. 2차 현가장치의 강성값이 0.3MN/m, 0.4MN/m인 경우, KTX 열차의 후미부 차량에서 승차감 기준치를 크게 초과하는 이상 진동현상이 발생함을 확인하였다. 이는 KTX 열차에서 채용하고 있는 공기스프링은 동절기 때 기온이 저하함에 따라 강성값이 커질 수 있는 바, 동절기에 KTX 열차의 후미부 차량에 발생하는 과다진동의 원인이 될 수 있는 것이다. Fig. 12는 차량후미 진동이 발생하는 GV40 차륜의 경우( $v=150\text{km/h}$ ), 17번째 차량의 진동가속도 신호를 주파수 분석 해 본 결과로 Fig. 12에서와 같이 0.6Hz의 성분이 나타남을 확인하였다. 반면 Fig. 13과 같이 차량이 XP55인 경우( $v=150\text{km/h}$ ), 17번째 차량의 진동가속도에 대한 주파수 분석결과, 0.6Hz가 아닌 1.12Hz성분이 나타남을 확인하였다.

즉, KTX 열차의 후미부 차량에 과다진동으로 인한 이상 진동현상은 GV40 차륜 장착에 따른 모드 연성효과가 차체의 횡진동 모드를 유발하는 것으로 판단된다. Fig. 14는 전체 차량 중 동력차를 제외한 모든 객차에 XP55 차륜을 장착하고, 전·후 동력차에 XP55(case A)차륜과 GV40(case B) 차륜을 장착한 경우를 비교한 결과이다. 동력차의 차륜담면 구배를 XP55으로 하였을 경우가 GV40에 비하여 전체적으로 진동값이 약간 커지는 경향이 나타났다. 따라서 전·후 동력차는 GV40 차륜담면을 적용하는 것이 차량 전체를

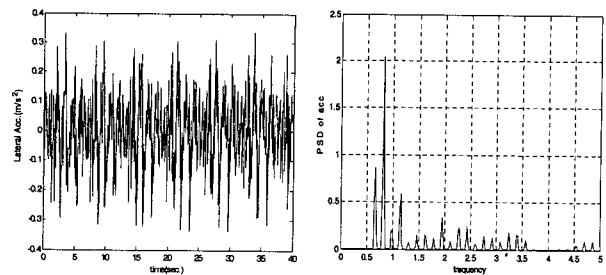


Fig. 12. Car-body motion with tail car vibration ( $\lambda=1/40, v=150\text{km/h}$ )

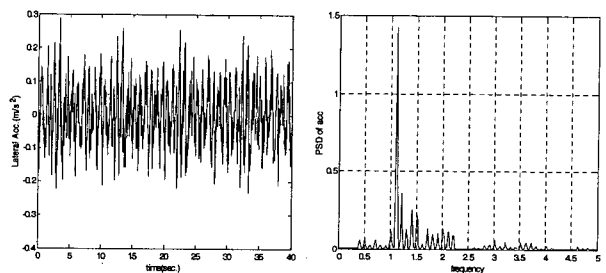


Fig. 13. Car-body motion without tail car vibration ( $\lambda=1/20, v=150\text{km/h}$ )

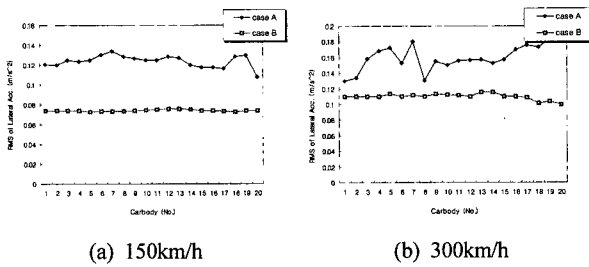


Fig. 14. Lateral acceleration with different wheel tread at power trailed car

XP55 차륜을 장착하는 것 보다 KTX 열차의 차체 진동을 줄이는 효과가 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

ADAMS/RAIL을 이용하여 실제 운행 편성인 20량 완편성 KTX 열차의 동적해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. KTX 열차에 대한 모드해석한 결과, 0.50~0.65Hz사이에서 차량의 사행동 모드가 발생함을 알 수 있었다. 또한 차륜담면구배가 1/20인 XP55 차륜을 장착하고 주행하는 KTX 열차는 전체적으로 속도 증가에 따라 차량의 진동이 약간 증가하였으나 KTX 열차의 후미부 차량에서 과다진동으로 인한 이상 진동현상은 없었다. 그러나 GV40 차륜을 장착한 KTX 열차의 경우, 주행속도 150km/h, 2차 현 가장치의 횡방향 강성값이 0.3MN/m이상에서 KTX 열차의 후미부 차량에서 0.6Hz의 과다 횡진동으로 인한 이상진동 현상이 발생하였다. 또한 전체 차륜담면구배를 1/20로 장착한 차량이 전·후 동력차의 차륜담면구배를 1/40로 하고 관절대차에 1/20로 장착한 차량보다 진동이 커지는 경향이 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박찬경, 김기환, 홍진환, 심태웅, "Vampire를 이용한 경부고속 철도차량의 동적 안정성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.510-516, 1998.
2. 강부병, 김영우, 왕영용, "KTX 차량 후미 진동 해석(1)", 한국철도학회논문집, 제6권, 제2호, pp.122-128, 2003.
3. 이찬우, 김재철, "철도차량에서의 차륜담면 등가구배 특성", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.641-644, 2003.
4. 이찬우, 김재철, 문경호, "경부고속차량의 차륜담면 형상별 차체진동분석", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.730-733, 2003.
5. Eric E. Magel, Joseph Lalousek, "The Application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding", wear, Elsevier Science, 2003.
6. 한국철도기술연구원, "철도차량의 진동 방지에 관한 연구", 철도청, 1996.
7. 임진수, "철도차량의 동역학", 한국소음진동공학회, 제9권 제3호, pp.425-430, 1999.
8. 이승일, 최연선, "고속주행용 화차의 주행안정성", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.179-185, 2001.
9. 철도청, "고속철도 차량 시스템 엔지니어링", 제2권, 한국고속철도, 제1권 26장, 1996.
10. "GETTING STARTED USING ADAMS VERSION 11.0", Mechanical Dynamics Co., 2002.