

차륜 답면형상에 따른 KTX의 동특성 검토

Dynamic Characteristics of the KTX on Wheel Conicity

장종기 *, 이승일 **, 최연선 ***
Jong-Ki Chang, Seung-Il Lee, Yeon-Sun Choi

ABSTRACT

The running safety of the rolling stock depends on the design characteristics and the contact condition between wheel and railway. In this study, the effect of the conicity of wheel tread on the running safety is analyzed. The modal analysis results in 0.5~0.6Hz natural frequency with lateral modes. However, the frequency analysis for the running simulation shows the frequency components near 1Hz. The running simulation shows that the KTX with GV40 wheel has less lateral vibration than that of XP55 as the KTX goes higher speed.

1. 서론

2004년 4월 개통을 목표로 하고 있는 KTX는 현재 최고속도 300km/h로 시험운전 중이다. KTX는 객차부 차량간 연결이 차량간 댐퍼와 관절대차로 연결되어 차량간 상대운동이 연성되는 특성이 있다. KTX 동적거동에서 차륜답면의 형상은 차량의 주행안전성과 주행안정성에 중요한 영향을 미친다. 여러 가지 요인이 있지만 온도, 차륜답면, 속도에 의한 영향 등이 KTX의 동적거동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 현재 시운전중인 KTX는 다양한 시험조건하에서 시험운행을 하고 있다. 그러나 KTX 차륜답면 형상 변화에 따른 주행시험은 쉽지 않은 과제이다. 이에 본 연구에서는 차륜 답면구배가 철도차량에 미치는 영향에 초점을 두고, 이를 바탕으로 전산해석을 수행하여 차륜답면 형상별 KTX의 진동특성을 검토하였다.

이와 관련하여 박찬경⁽¹⁾과 강부병⁽²⁾은 KTX 차량 후미 진동해석을 철도차량 해석 프로그램인 Vampire를 통하여 해석하였다. 특히 강부병은 Vampire를 이용하여 다량으로 편성되어 있는 KTX차량에 대해서 답면구배와 2차 현가장치의 특성이 KTX에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 이찬우⁽³⁾는 철도차량에서 차륜형상이 차량의 주행안정성 측면에 미치는 영향을 연구하였다. 이승일⁽⁴⁾은 철도차량 한량에 대하여 답면구배에 의한 영향을 살펴본 결과 임계속도는 차륜 답면구배가 감소함에 따라 증가하고, 차륜과 레일의 접촉거리가 증가함에 따라 감소한다는 연구 결과를 발표했다. 본 연구에서는 답면구배에 의하여 KTX의 진동 특성이 어떻게 나타나는지 살펴보고, 실제 주행시험 결과와 비교하였다. KTX 차량의 동특성 해석은 기존 국내 연구에서는 주로 영국 AEA에서 개발한 철도차량 동역학 전용해석 프로그램인 Vampire를 이용하여 해석하였지만 본 연구에서는 ADAMS/RAIL을 이용하여 20량으로

* 성균관대학교 석사과정, 학생회원
** 성균관대학교 박사과정, 학생회원
*** 성균관대학교 교수, 정회원

편성된 KTX차량을 모델링하여 해석하였다.

2. 차륜담면과 레일 접촉

윤축의 사행동은 차륜담면에 구배가 있기 때문이며 담면 구배를 i , 차륜직경을 $2r$, 궤간을 $2a$ 라고

하면 차륜담면 구배에 의한 대차의 운동학적 사행동 파장 S 는 $S=2\pi\sqrt{\frac{a \cdot r}{i}}$ 으로 주어진다. 따라서 담

면 구배가 작게 됨에 따라서 파장 S 는 크게 되어 좌우 운동에는 유리하게 작용한다.

차륜 담면 등가구배 특성은 차량의 주행안정성 판별 이용되는 임계속도에 영향을 주고 있다. 임계속도는 차륜 담면 등가구배 때문에 차량이 주행 중에 윤축의 미소한 횡방향 변위가 궤도 중심쪽으로 향하는 힘을 발생시켜 윤축의 운동방향을 궤도 중심으로 쏠리게 한다. 이후 윤축의 운동방향이 궤도의 중심선을 지나게 되면 반대쪽에서도 같은 현상이 일어나서 차량의 횡방향 흔들림 현상이 발생하게 된다. 실제로 차륜 담면구배가 너무 낮은 경우에는 차륜이 궤도방향으로의 유도작용이 불충분하게 되고, 차륜담면 구배가 너무 크면 대차의 불안정성이 커져서 차량의 사행동이 발생되게 된다. 이때 차륜과 레일 사이의 상호 복원력이 불충분하게 되면 차량 탈선이 일어나게 되며 차량은 이때 “임계속도”에 도달했다고 보는 것이다.

차륜담면형상을 결정할 때 다음 사항을 고려하여 설계가 이루어진다.

- 1) 탈선의 위험이 적을 것.
- 2) 차량의 진동이 적을 것.
- 3) 차륜과 Rail의 미끄럼 마찰이 적을 것.
- 4) 삭정이 가장 경제적으로 행해질 수 있는 마모일 것.
- 5) 차륜과 Rail의 접촉 압력이 적을 것.

3. 해석모델

3.1 차량 모델

해석용 시스템 편성 모델은 Fig. 1에서와 같이 P(동력차)+MT(동력객차)+16T+MT(동력객차)+P(동력차)로 구성하였으며, 대차는 동력차용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Trailer Bogie)등 17대로 구성되어 있다. 차량과 차량 사이의 결합 관계는 KTX의 특징인 관절 형식으로 모델링하였다. Vampire에서는 차량과 차량 사이를 고정링으로 결합하고 그것을 대차로 지지하는 형태로 모델링하였으나, 본 연구에서는 ADAMS/RAIL을 이용하여 Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 차량과 차량 사이에 부시 형태의 연결기(Interbody connector)로 모델링하고 두 차량 사이에 대차를 밑에 놓고 각 차량과 대차는 2차 현가장치로 지지되는 형태로 모델링하였다. 이런 식으로 관절 대차를 모델링하여 전체 차량 20량을 모델링하였다. 각 차량의 질량과 관성값을 table 1에 나타내었다.

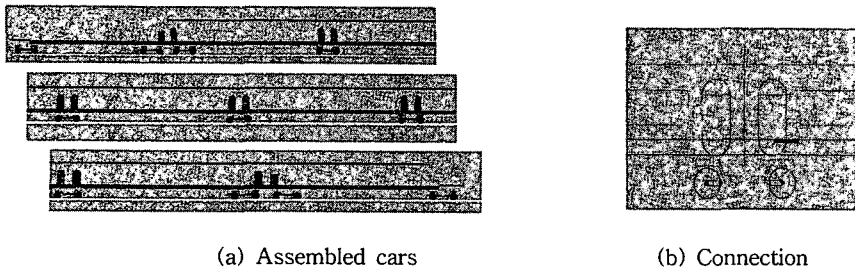


Fig. 1 Articulated connection model

Table 1 Specification of the KTX

		질량 (ton)	집광관성모멘트($\text{ton}\cdot\text{m}^2$)		
			bx	by	bz
동력차	차체	54.916	59.4	1131.9	1112
	대차	2.445	1.645	2.533	3.068
동력객차 (전방)	차체	38.558	50.11	1482.17	1530.37
	대차	3.076	2.07	3.26	3.85
동력객차 (후방)	차체	38.448	49.97	1477.94	1526
	대차	3.076	3.076	2.07	3.26
객차	T2	22.673	29.496	843.662	843.662
	T3	22.886	29.756	851.96	851.96
	T4-T7	22.325	29.014	830.713	830.713
	T8	22.194	28.843	825.839	825.839
	T9	19.928	25.898	741.521	741.521
	T10	22.586	29.366	840.797	840.797
	T11	22.194	28.843	825.839	825.839
	T12-T16	22.963	29.102	833.234	833.234
	T17	22.105	28.728	822.527	822.527
	대차	3.018	2.03	3.2	3.79

3.2 트랙 모델

트랙은 실제 트랙에서 측정한 데이터를 ADAMS/RAIL 프로그램에서 사용할 수 있도록 변환하였다. 실제로 ADAMS/RAIL에서 트랙을 직선으로 한 경우 차량의 횡변위는 속도에 관계없이 일정 시간이 지나면 모두 감소하게 되어 원하는 결과를 얻을 수 없다. 따라서 실제 트랙 데이터를 ADAMS/RAIL에서 사용하였다. Fig. 2은 궤도 검측차로 검측한 실제 데이터이며, 서울기점 106.3Km~123.3Km 구간에서 검측한 데이터 중 일부분을 ADAMS/RAIL에서 사용한 것이다.

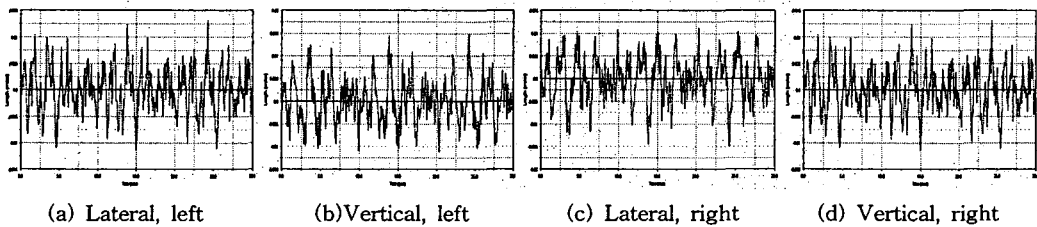


Fig. 2. Measured track data

3.3 휠/레일 모델

차륜 담면부 형상 모델에는 KTX에 적용된 GV40(담면구배 1/40)와 담면구배 증가시 특성을 검토하기 위하여 시험선에서 시험중인 XP55(담면구배 1/20)를 사용하였고 레일 형상에는 ADAMS/RAIL에서 제공되는 UIC60 레일을 사용하였다. Fig. 3(a)는 UIC60레일이고, Fig. 3(b)에 실선으로 나타낸 부분이 GV40에 대한 형상이고 점선으로 나타낸 부분이 XP55의 형상을 나타낸 것이다. 이 두 가지 차륜담면의

형상을 이용하여 각각의 차륜 답면구배가 KTX 차량의 특성에 어떠한 영향을 나타내는지 살펴보고자 한다.

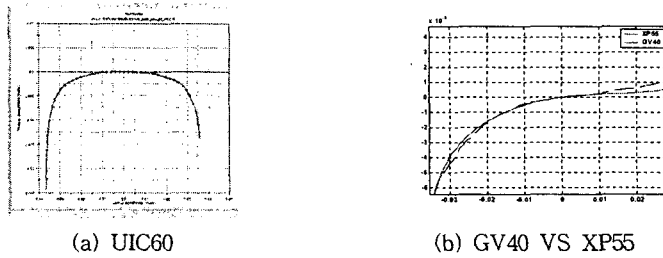
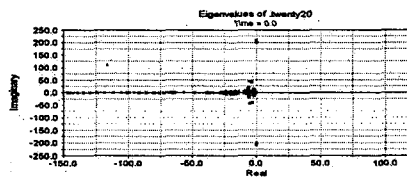


Fig. 3 Model of Wheel and Rail

4. ADMAS 해석

4.1 모드해석

모드 해석에 의한 고유치를 Fig. 4에 나타내었다. 고유치 해석은 차량의 동적 특성을 미리 판단해 볼 수 있는 방법으로서 현가요소와 스프링, 댐퍼, 부시 등의 선형 혹은 비선형 입력값이 포함된 수학적 차량 모델의 적정성 여부와 대칭성 여부를 알 수 있으며 각각의 모드를 분리하여 각 모드별 특성을 확인해 볼 수 있다. 해석 결과 0.5~0.6Hz 부근에서 차량의 횡변위가 커지는 모드형상이 생기는 것을 알 수 있다. Fig. 4(a)에 보면 모드해석 후 차량의 고유치를 나타내었다. 고유치의 실근이 0으로 근접하는 값에서 살펴본 결과 그때의 주파수가 약 0.5~0.6Hz이고 Fig. 4(b),(c)에 그 부근에서의 모드형상을 나타내었다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)은 철도 차량을 위에서 본 그림이고, 횡방향 변위가 심하게 나타남을 알 수 있다. 기타 다른 주파수에서 모드형상을 살펴본 결과 차체, 휠, 현가장치 등에서 부분적인 변형이 생기는 모드가 나타났다.



(a) Eigenvalues



(b) 0.55HZ



(c) 0.64Hz

Fig. 4. Mode shapes of the KTX

4. 2 주행 시뮬레이션

먼저 차량의 횡방향 가속도와 각각의 주파수 성분을 살펴보았다. ADAMS/RAIL에서 동적 해석은 해석 시간과 스텝 사이즈를 결정하고, 주행 시 트랙의 물성치와 휠과 레일의 차륜 접촉 관계에 대한 환경 변수 파일, 차량의 주행 속도를 입력하여 해석한다. ADAMS/RAIL에서 동적 해석 후 얻을 수 있는 결과는 차량별, 대차별, 차륜별 각각의 횡방향, 종방향, 현가장치의 강성 변화값 등이다. ADAMS/RAIL로 동적 해석을 할 경우 해석 시간을 40초, 스텝사이즈를 1600으로 해서 KTX 차량 20량을 해석 시 대략 8~10시간이 소요되었다. 동적 해석결과 차륜 담면구배에 따른 횡방향 가속도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 또한 그것의 주파수 성분을 table 2에 나타내었다. 각각의 경우 1Hz 부근의 저주파수 성분이 주로 나타남을 알 수 있다.

Table 2 Generated frequency of GV40 and XP55

	GV40	XP55
150km/h	1.11Hz	0.82Hz, 1.03Hz
240km/h	0.65Hz, 0.82Hz	1.11Hz
300km/h	0.84Hz, 1Hz	0.84Hz, 1.03Hz

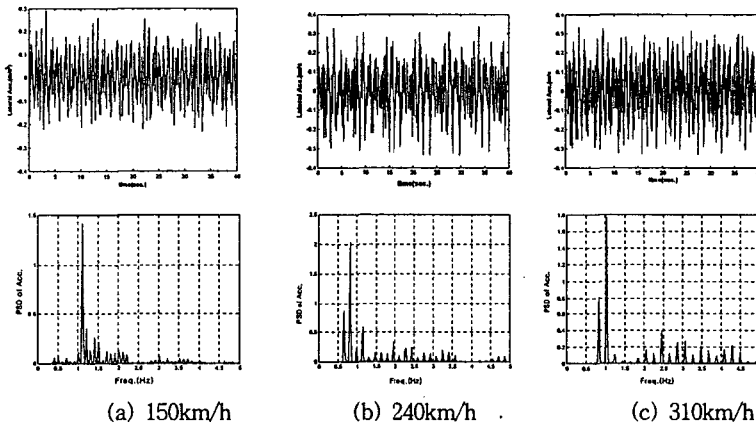


Fig. 5 Lateral acceleration and PSD of acceleration(GV40)

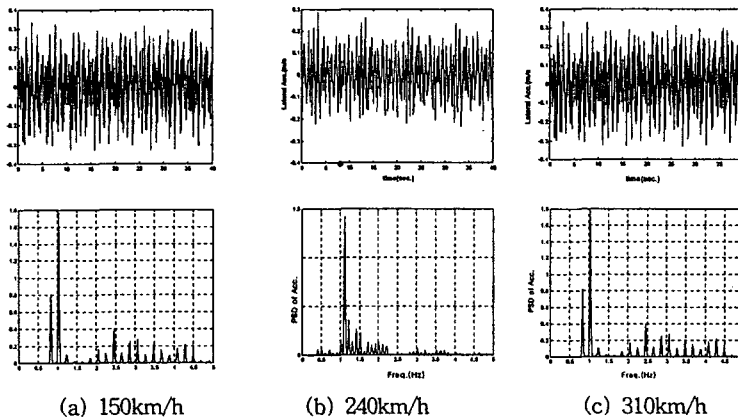


Fig. 6 Lateral acceleration and PSD of acceleration(XP55)

또한 20량 전체 차량의 진동 가속도별 RMS값을 Fig. 7에 나타내었다. 150km/h에서 차륜 담면구배의 영향은 크게 나타나지 않는다. 다만 GV40의 경우 후미부 17번째 차량에서 후미진동이 나타남을 알 수 있다. Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 점차 고속으로 갈수록 차륜 담면구배가 큰 XP55차륜이 GV40차륜보다 진동이 커짐을 볼 수 있다. GV40은 승차감 기준치 이하인데 반하여 XP55는 승차감 기준치 (0.183m/s^2)를 크게 초과하는 결과를 나타냈다.

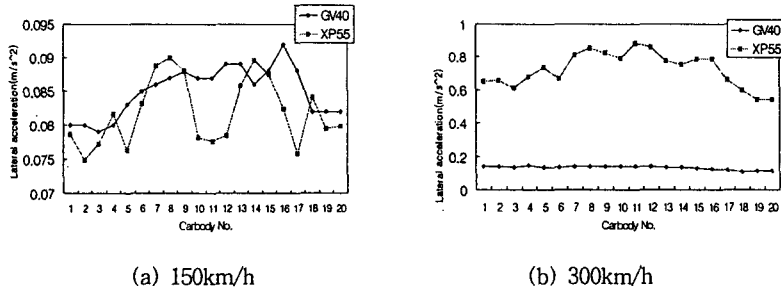


Fig. 7 RMS of Lateral Acceleration

5. 결론

본 연구에서는 차량의 주행안전성에 영향을 주는 차륜담면에 대하여 검토하였다. 다량편성 KTX 차량에 대한 전산해석으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 철도차량 해석 시 국내에서 기존의 경우 Vampire를 이용한 해석을 하였으나, 본 연구에서는 20량으로 편성된 KTX차량을 ADAMS/RAIL으로 해석하는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. KTX차량을 모드해석한 결과 0.5~0.6Hz 부근에서 차량의 횡변위모드가 발생함을 알 수 있었다. 주행 시뮬레이션 결과 각각의 속도별 차량의 횡방향 가속도를 나타내었고, 각각의 주파수 성분이 2Hz 미만의 저주파 성분이 주로 나타남을 알 수 있었다. 또한 차량별 횡방향 RMS값을 담면구배별로 비교해 본 결과 고속으로 갈수록 담면구배의 영향이 커짐을 알 수 있었고, 특히 300km/h인 고속에서는 XP55차륜 보다는 GV40차륜의 횡방향 진동 가속도가 작음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박찬경, 김기환, 홍진환, 심태용, "Vampire를 이용한 경부 고속철도차량의 동적 안정성 해석," 한국철도학회 춘계학술대회, pp. 510~516, 1998.
2. 강부병, 김영우, 왕영용, "KTX 차량 후미 진동 해석(1)," 한국철도학회논문집, 제6권 제2호, pp.122~128, 2003.
3. 이찬우, 김재철, "철도 차량에서의 차륜담면 등가구배 특성," 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 641~644, 2003.
4. 이승일, 김재철, 최연선, "KTX현팅 운동 해석," 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 755~761, 2003.
5. Eric E. Magel, Joseph Lalousek, "The Application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding," wear, Elsevier Science, 2003.
6. 이승일, 최연선, "고속주행용 화차의 주행안전성," 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 179~185, 2001.
7. "고속철도 차량 시스템 엔지니어링", 제2권, 한국고속철도, 1996.
8. "GETTING STARTED USING ADAMS VERSION 11.0," Mechanical Dynamics Co., 2002.