

차륜-레일형 초고속 철도의 주행 안전 및 승차감 평가 기초 연구

A Preliminary Study on Evaluation of the Running Safety and Ride Comfort of Wheel-on-Rail Ultra-High Speed Railway

황성호*, 장승엽*†, 양신추*

Sung Ho Hwang*, Seung Yup Jang*†, Sin Chu Yang*

Abstract Recently a preliminary study on the wheel-on-rail ultra-high speed railway is ongoing. This paper aims to evaluate the running safety and ride comfort, by predicting the dynamic behavior of ultra-high-speed train from the train-track interaction analysis considering the train model with 1-axle bogie and light car body. To take into account for the impact of track irregularity, the vertical track irregularity PSD obtained at the concrete slab track of Kyeong-Bu high speed line. The result shows that the use of 1-axle bogie reduces the fluctuation of wheel load, but the impact of track irregularity on the wheel load variation is greater, which suggests that track irregularity should be maintained with stricter standards.

Keywords : Ultra-high speed railway, running safety, ride comfort, train-track interaction, track irregularity

초 록 최근 차륜-레일 형식으로 초고속 철도를 실현하기 위한 기초 연구가 추진되고 있다. 이 연구에서는 기초 연구로 1축 대차, 경량 차체 등이 고려된 차량 모델을 적용한 차량-궤도 동적 상호작용 해석을 통해 레일형 초고속 철도의 동적 거동을 예측하고, 주행 안전을 평가하였다. 궤도틀림의 영향을 고려하기 위하여 경부고속철도 콘크리트궤도 구간에서 계측된 면틀림 데이터로부터 구한 궤도틀림 PSD를 모델에 반영하였다. 해석 결과는 1축 대차 적용 시 윤중 변동이 감소하지만, 이보다는 궤도틀림의 영향이 더 지배적이며, 초고속 대역에서 주행 안전을 확보하려면 궤도틀림을 더 낮은 수준으로 관리해야 한다는 점을 시사하고 있다.

주요어 : 초고속 철도, 주행 안전, 승차감, 차량-궤도 상호작용, 궤도틀림

1. 서 론

2004년 KTX 개통에 이어 HSR 350X, HEMU 430X를 개발하면서 국내에서도 열차의 초고속화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 일환으로 철도연에서는 최근 차륜-레일 형식으로 초고속 철도를 구현하기 위한 기초 연구를 수행 중에 있다. 차량 설계에 있어서 점착구동의 한계를 극복하기 위해 LSM 추진 방식을 채택하고, 안정성 향상을 위해 저중심 설계된 경량 차체와 1축 대차를 적용한다.

이와 같은 레일형 초고속 철도 기술의 실현을 위해 무엇보다 중요한 것은 차량 주행안전의

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(syjang@krri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

확보이다. 이에 이 연구에서는 기초 연구로서 1축 대차, 경량 차체 등이 고려된 차량 모델을 적용한 2차원 차량-궤도 동적 상호작용 해석을 통해 레일형 초고속 철도의 동적 거동을 예측하고, 주행 안전과 승차감을 평가한다.

2. 본 론

2.1 해석모델 구축

2.1.1 초고속 철도 차량-궤도 상호작용 해석 모델

앞서 기술한 바와 같이 초고속 철도 차량은 1축 대차구조를 적용할 계획이므로, 차량 모델에는 기존의 2축 대차 모델을 수정하여 1축 대차구조를 적용하였다(Fig. 1). 또한 경량화된 차체 및 대차의 형상을 적용함에 따라 축중을 165kN으로 가정하였다. 현가장치 물성과 차체, 대차, 차축 질량, 대차 및 차축 중심 간 거리는 개발하려는 차량의 예상 제원 및 KTX 차량을 참고로 하여 표 1에 나타난 바와 같이 가정하였다. 궤도 모델은 경부고속철도의 콘크리트 궤도 물성을 적용하였다[1]. 해석은 양신추[2]에 의해 개발된 차량-궤도 상호작용 해석 프로그램을 사용하였다.

Table 1. Main parameter of train (half model)

Parameter	Unit	Power car
Mass of car body	ton	12.5
Inertia moment of car body	ton.m ²	150
Mass of bogie	ton	1.35
Unsprung mass	ton	0.75
Primary vertical spring stiffness	MN/m	2.4
Primary vertical dashpot	MN.sec/m	0.04
Secondary vertical spring stiffness	MN/m	1.2
Secondary vertical dashpot	MN.sec/m	0.01

2.1.2 궤도틀림

초고속 열차의 주행 안전을 평가하기 위해 궤도틀림에 의해 발생하는 운중감소율을 계산해야 한다[3]. 국내 경부 1단계 터널 구간의 콘크리트 궤도에서 측정된 궤도틀림 PSD를 공간 주파수 영역에 표시하고, Fig. 2와 같이 외국 문헌의 궤도틀림 PSD 수준과 비교한 결과, 국내 콘크리트 궤도의 궤도틀림은 SNCF PSD의 10% 수준으로 분석되었다. 해석에서는 이를 해석의 입력값으로 사용하였다.

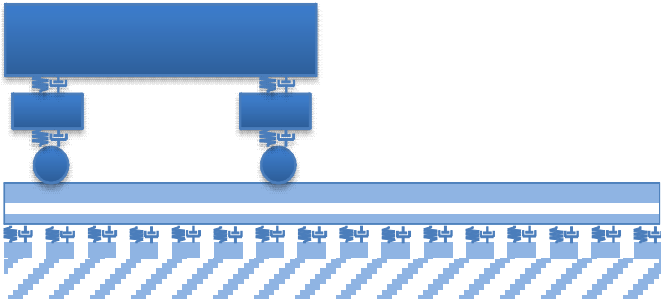


Fig. 1 Train-track interaction model with 1-axle bogies

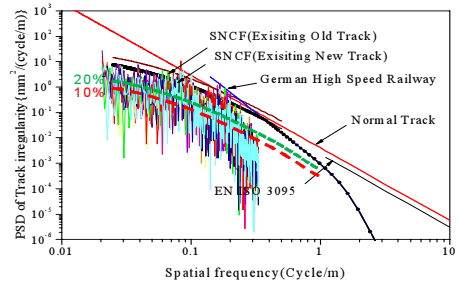


Fig. 2 Frequency result of track irregularity

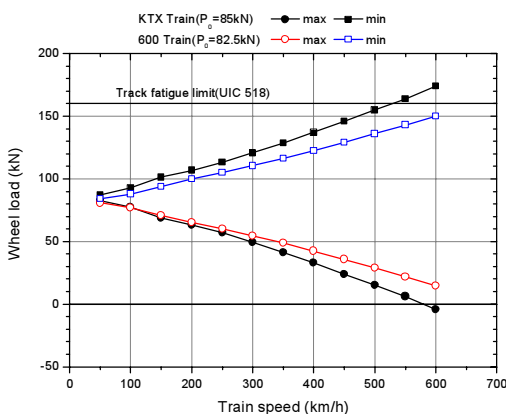
2.2 해석결과

2.2.1 속도향상에 따른 해석 결과

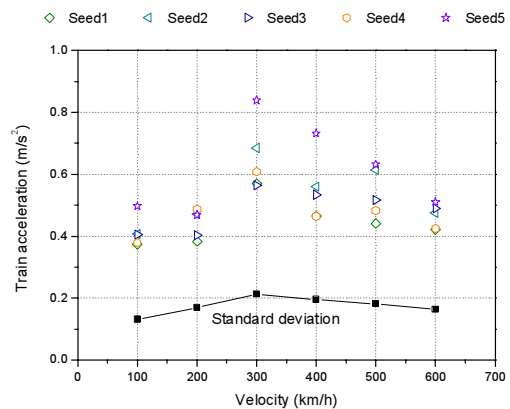
Fig. 3 (a)는 KTX 열차와 초고속 열차에 대해 속도 증가에 따른 윤중 변동의 변화를 나타낸 결과이다. 여기서 윤중의 최대, 최소값은 초과 확률 99.97%에 해당하는 값이다. 그림에서 일축 독립차륜 적용으로 KTX 열차에 비해 동일 조건에서 윤중 변동 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 대차의 pitching motion에 의한 영향이 제거되었기 때문이라고 판단된다. 그러나, 일축 대차를 적용하더라도 400km/h에서는 50%, 600km/h에서는 80% 가까이 윤중감소율이 증가하여 주행안전을 확보하기 어려운 것으로 분석되었다. Fig. 3 (b)는 증속에 따른 차체 수직 가속도를 보여 주고 있다. 300km/h 까지는 차체 가속도가 증가하다가 이후 다소 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이는 차량 현가장치의 동적 특성에 의한 영향으로 판단된다.

2.2.2 궤도틀림 크기 변화에 따른 해석 결과

입력한 궤도틀림 수준으로는 초고속 대역에서의 주행안전을 확보할 수 없으므로, 궤도틀림 크기 변화에 따라 윤중과 차체 가속도가 어떻게 변화하는지 차량 속도가 300km/h인 경우와 600km/h인 경우 2 가지에 대해 각각 윤중 변동 및 차체 가속도를 분석해 보았다(Fig. 4).



(a) Variation of wheel load



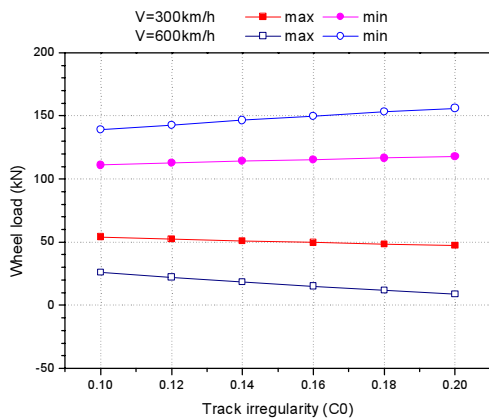
(b) Train acceleration

Fig. 3 Train response according to train speed

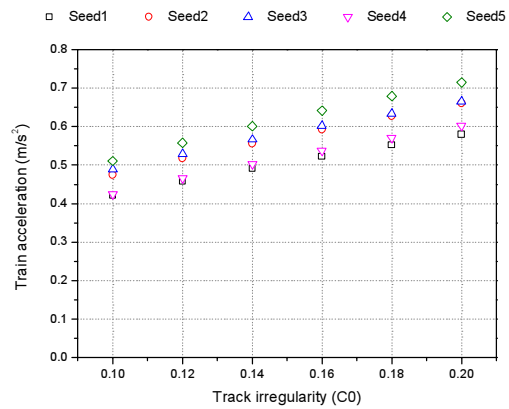
궤도틀림 수준에 따라 비교적 큰 폭으로 운중 변동과 차체 가속도가 변화하는 것으로 알 수 있다. 따라서, 초고속 철도에서 주행안전 및 승차감을 확보하기 위해서는 보다 엄격한 기준으로 궤도틀림을 관리해야 한다는 것을 알 수 있다.

2.1.3 차량 현가장치 강성 변화에 따른 해석 결과

위와 마찬가지로 차량 현가장치 강성 변화에 따라 주행 안전에 미치는 영향을 분석하기 위해 차량 속도가 300km/h인 경우와 600km/h인 경우 2 가지에 대해 각각 운중 변동 및 차체 가속도를 분석해 보았다(Fig. 5). 그림에서 알 수 있듯이 차량 현가장치 강성이 운중 변동에 미치는 영향은 현저히 작은 반면 차체 가속도에 미치는 영향은 매우 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 승차감 확보 차원에서는 현가장치의 강성이 더욱 중요하며 초고속 열차에 맞도록 최적화가 필요하다.

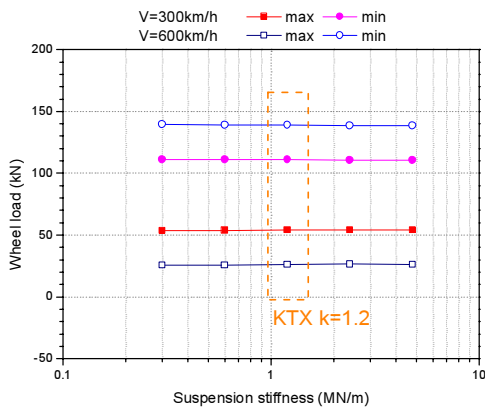


(a) Variation of wheel load

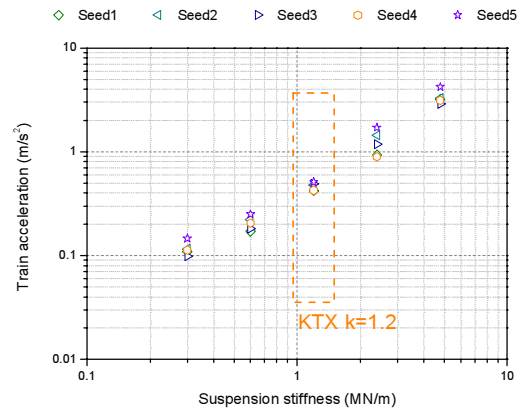


(b) Train acceleration

Fig. 4 Train response according to track irregularities



(a) Variation of wheel load



(b) Train acceleration

Fig. 5 Train response according to suspension stiffness

3. 결 론

레일형 초고속 열차의 주행안전에 대한 기초 연구로, 개발하려는 차량을 모델링하고 초고속 대역에서의 주행안전과 승차감을 분석해 보았다. 그 결과, 1축 대차 적용 시 윤중 변동이 감소하지만, 이보다는 궤도틀림의 영향이 더 지배적이며, 초고속 대역에서 주행 안전을 확보하려면 궤도틀림을 더 낮은 수준으로 관리해야 한다는 점을 시사하고 있다. 또한 승차감을 확보하기 위해서는 엄격한 궤도틀림 관리와 함께 현가장치의 강성 최적화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] S. C. Yang, S. Y. Jang, E. Kim (2011) Determination of upper limit of rail pad stiffness for ballasted and concrete track of high-speed railway considering running safety, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.14, No.6, pp.526-534.
- [2] S. C. Yang (2009) Enhancement of the finite-element method for the analysis of vertical train-track interactions, *Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, Vol. 223, pp. 609-620.
- [3] Design Standards for Railway Structures and Commentary - Limit for displacement (2006) Railway Technology Research Institute, Railway Division, Ministry of Land and Transport (in Japanese).