

운행속도에 따른 고속철도차량의 주행안정성 예측에 관한 연구

전창성

한국철도기술연구원 고속철도연구실

A Study on the Running Stability Prediction according to the Operating Speed of High-speed Train

Chang-Sung Jeon

High-speed Railroad Systems Research Laboratory, Korea Railroad Research Institute

요약 현재 국내에서 영업 운행하는 고속철도는 경부고속선과 호남고속선 두 가지로 오송역에서 분기된다. 이에 평택-오송 구간은 두 노선이 공용으로 사용하기 때문에 선로 용량은 거의 포화 상태에 이르렀으며, 열차의 운행 간격을 줄이는 것에는 한계가 있다. 이에 평택-오송 구간을 복복선화하여 선로용량을 확대하는 사업이 진행되고 있다. 새로 건설되는 평택-오송 구간은 지하 터널로 계획되었으며, 운행속도를 단계적으로 향상시킬 수 있도록 준비하고 있다. 이에 대한 대비로 고속철도차량의 운행속도를 단계적으로 높일 때의 주행안정성을 해석적 방법으로 검토하였다. 주행안정성을 검토하는 방안으로 고속철도차량 기술기준 3.2.2 주행안전 항목 참조하였으며, 철도차량 동역학 소프트웨어인 VAMPIRE를 이용한 동역학 해석을 수행하였다. 해석모델은 동력분산형 고속열차 시제 차량인 HEMU-430X이며, 6량 1편성으로 구성된다. HEMU-430X의 시운전 시 측정된 차체 진동 모드 주파수를 해석결과와 비교해 보니 주파수가 90% 이상 비슷하여 해석 모델이 검증되었다고 볼 수 있었다. 이 해석 모델을 이용하여 운행속도가 350, 370, 400km/h일 때 고속철도차량 기술기준 3.2.2 주행안전 항목인 윤증감소율, 탈선계수, 최대횡압을 검토하였다. 검토 결과 고속열차의 운행속도 증가에 따라 윤증감소율, 탈선계수, 최대횡압은 증가하였으나, 기준치 이내로 운행 시 안전할 것으로 예측되었다. 이를 통해 오송-평택 구간 노선 설계는 주행안정성 측면에서 문제가 없음을 확인하였다.

Abstract There are two high-speed railways in South Korea, the Gyeongbu and Honam high-speed lines, which branch off at Osong. Since the Pyeongtaek-Osong section is shared by both lines, the track capacity has almost reached saturation. A project to expand track capacity by double-tracking the section is in progress. The newly constructed Pyeongtaek-Osong section is planned as an underground tunnel, and the operating speed will be gradually increased. The running stability with the increase of operating speed was examined using dynamic analysis. To review running safety, technical standard 3.2.2 for the running safety of a high-speed train was referenced, and dynamic analysis was performed using VAMPIRE. The analysis model was the HEMU-430X, a power-distributed high-speed train prototype. The carbody vibration frequencies measured from the HEMU-430X were compared with the vibration mode analysis results, and the analysis model had accuracy over 90%. Using this model, the wheel unloading ratio, derailment coefficient, and sum of guiding forces were reviewed with speeds of 350, 370 and 400 km/h. The wheel unloading ratio, derailment coefficient, and sum of guiding forces increased with the operating speed, but the high-speed train was still predicted to be safe. The design of the Pyeongtaek-Osong section has no problems in terms of running stability.

Keywords : Derailment Coefficient, High-speed Train, Running Stability, Sum of Guiding Forces, Wheel Unloading Ratio

이 논문은 2023년도 국토교통부 '370kph 이상 고속운행을 위한 차량 핵심기술 및 기술기준 개정(안) 개발(RS-2022-0014-3396)' 과제의 지원을 받아 연구되었음.

*Corresponding Author : Chang-Sung Jeon(Korea Railroad Research Institute)

email: csjeon@krii.re.kr

Received September 14, 2023

Revised September 25, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

국내 영업 운행하는 고속철도는 경부고속선과 호남고속선 두 가지로 오송역에서 분기된다. 고속선 중 평택-오송 구간은 두 노선이 공용으로 사용하기 때문에 선로 용량은 거의 포화 상태이다. 이에 따라 평택-오송 구간을 복복선화하여 선로용량을 확대하는 사업이 진행되고 있다(Fig. 1). 새로 건설되는 복선 평택-오송 구간은 지하 터널로 계획되었으며, 운행속도를 단계적으로 향상시킬 수 있도록 준비 중이다. 이에 대한 대비로 고속철도차량의 운행속도를 단계적으로 높일 때의 주행안정성을 해석적 방법으로 검토하는 연구를 수행하였다.

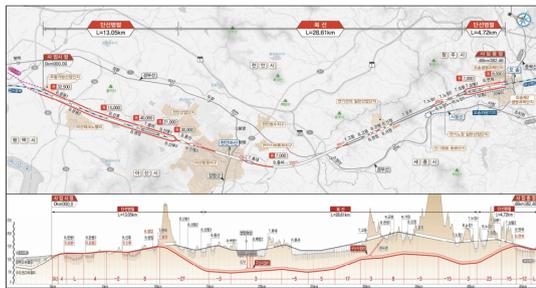


Fig. 1. Design of Pyeongtaek-Osong new line

동력분산형 고속철도 시제차량인 HEMU-430X(Fig. 2)의 동역학 해석에 관해서 다양한 연구들이 수행되었다. Park[1] 등은 1차 현가장치 탄성조인트의 탄성계수가 HEMU-430X의 주행안정성에 큰 영향을 미치며, 연결부나 측면 버퍼의 특성은 주행안정성에 큰 영향이 없음을 보고하였다. Park[2] 등은 HEMU-430X의 400km/h 주행시험을 대비하여 468km/h 속도에서의 주행안정성을 분석하였다. 또한 2차 현가장치의 비선형 특성을 고려하여 곡선 주행시의 횡가속도를 최소화할 수 있는 특성치를 도출하였다. Sim[3] 등은 HEMU-430X의 주행안정성을 UIC CODE 518 OR[4]에 따라 분석하였는데, 최고속도에서 탈선계수와 횡압이 기준치 이내인 것을 확인하였다. 고속철도 차량에서 시운전 시험 시의 진동가속도 데이터와의 비교를 통하여 해석 방법을 검증하는 연구는 저자 등의 다른 연구에서 발표하였다. Jeon[5] 등과 Jeon[6] 은 KTX -산천 동력차량 및 객차의 임계속도를 향상시키는 해석적 연구를 수행하였는데, 이때 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 KTX-산천 동력차량 및 객차에서 측정된 차체 횡방향 및 상하방향 가속도의 값을 해석결과 값과 비교하는 방법을 이용하였다. 이 방법

은 지반 침하 등 선로의 불규칙도가 바뀔 때마다 다시 측정하여 동역학 해석의 입력값으로 사용해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 철도차량 동역학 해석을 통한 고유진동 모드 분석과 시운전 시험 시의 차체 진동 주파수를 비교 분석하는 방법을 통해 해석 모델을 검증하는 방법을 제안한다. 또한 신규로 건설되는 평택-오송 복복선 구간의 운행속도를 단계적으로 높일 때의 주행안정성을 동역학 해석을 통해 검토하여 노선 설계의 타당성에 대해 검토한다.

2. 본론

2.1 고속철도차량 동역학 해석 모델 및 검증

주행안정성 예측을 위한 고속철도차량은 차세대 고속열차 시제차량(HEMU-430X, Fig. 2)을 기반으로 모델링하였다. HEMU-430X는 동력분산형 고속열차 시제차량으로 현재 영업운행 중인 KTX-이음 차량을 개발할 때의 시제차량이다.



Fig. 2. HEMU-430X

동역학 해석은 레조너트사(Resonate Group Limited)의 철도차량 전용 동특성 해석 프로그램인 Vampire를 이용하였다[7]. 해석용 시스템 편성 모델은 Fig. 3과 같이 6량 1편성 차량으로, TC(제어객차) + 4M(동력객차, M1~M4) + MC(제어동력차)로 총 6량으로 구성하였다. 대차는 TC(제어객차)용 부수대차(Tailer Bogie) 2대, 동력객차 및 제어동력차용(M, MC)용 동력대차(Motor Bogie) 10대로 구성된다. 차량의 중량은 공차(W0) 조건으로 계산하였으며, 휠셋의 번호는 TC 차량의 선두대차 휠셋부터 1~24번을 순차적으로 부여하였다.

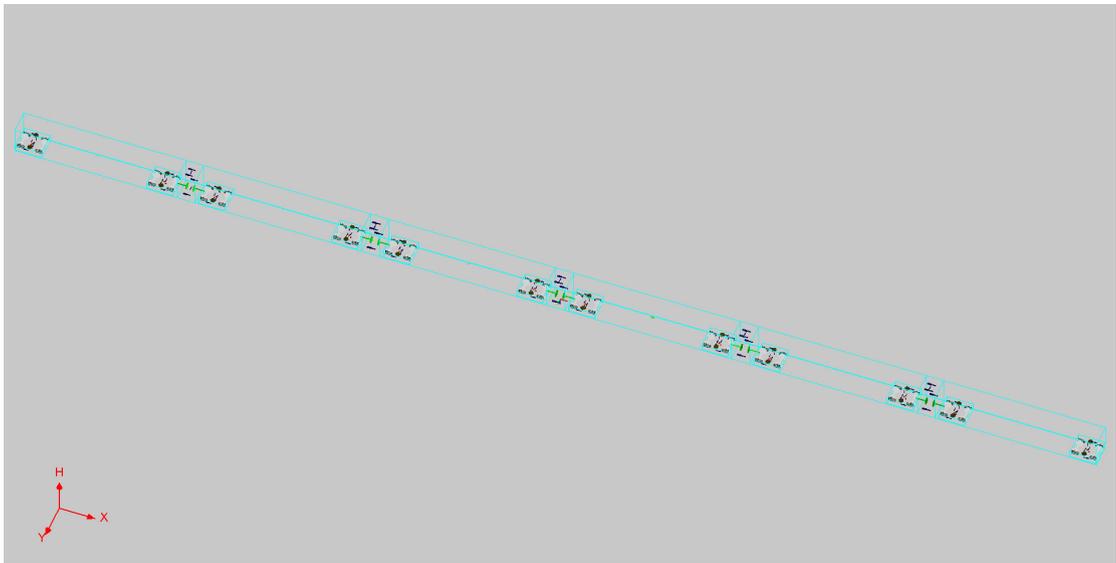


Fig. 3. Modeling of HEMU-430X

동력분산형 고속열차의 현가장치는 크게 휠셋과 대차를 연결하고 지지하는 1차 현가장치와 대차와 차체를 연결하고 지지하는 2차 현가장치로 구성되며 현가장치 구성 요소의 특성치는 제작사에서 제시한 자료를 이용하였다. 현가장치의 모델링은 동력대차 10대와 부수대차 2대로 이루어지며, 대차 현가장치를 살펴보면 1차 현가장치로 코일스프링, 탄성조인트, 수직댐퍼로 구분하였고, 2차 현가장치는 에어스프링, 수직댐퍼, 횡댐퍼, 요댐퍼, 횡방향 범프 스태프, 피봇 조인트로 구분하였다. 차량간 연결은 1개의 연결기와 5개의 댐퍼를 이용하여 연결하였으며, 모델을 Fig. 4에 나타내었다.

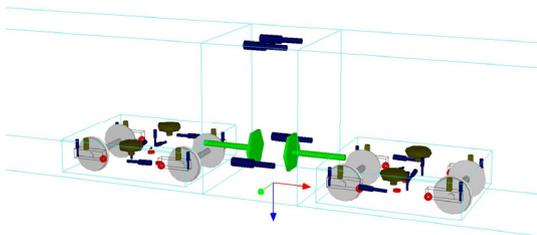


Fig. 4. Modeling of bogie and inter-car connection

해석에 사용된 선로는 국내 고속철도 노선에 설치되어 있는 선로 형상인 UIC60의 1/20 프로파일을, 휠의 형상은 XP55 프로파일을 사용하였다. XP55 차륜과 UIC60-20 레일의 접촉 모델은 Fig. 5와 같다.

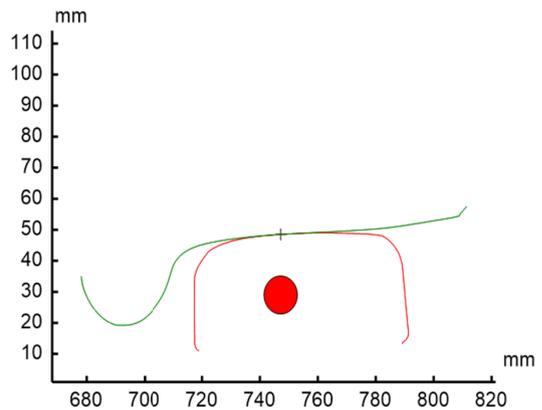


Fig. 5. Wheel-rail contact model

차량이 적절하게 모델링 되었는지는 고유모드 진동 주파수 해석 결과와 시운전 시험 시의 차체 진동 주파수 비교를 통해 검증하였다. Fig. 6은 2019년 9월 HEMU-430X가 호남고속철도 구간을 300km/h 속도로 주행할 때, TC 차량 차체 횡방향과 상하방향 가속도를 FFT(Fast Fourier Transfer) 분석한 결과이다. 차체 횡방향의 대표 주파수는 1.340Hz이고, 차체 상하방향은 2.084Hz의 피칭 모드의 진동이었다.

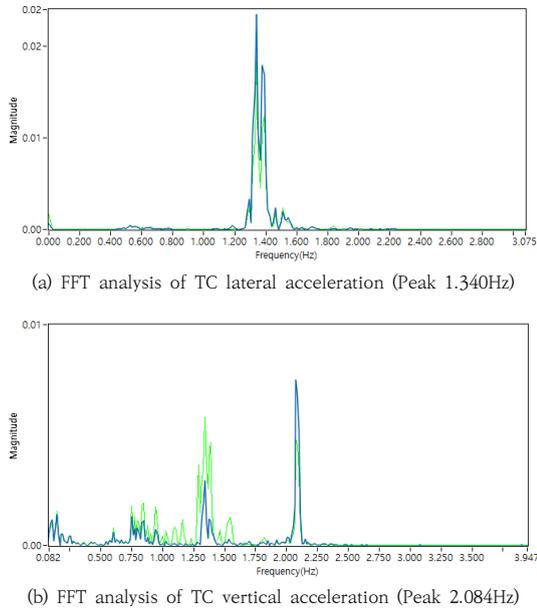


Fig. 6. FFT analysis result of TC at 300km/h

시운전 시험 결과와 해석 결과와의 비교를 위하여 6량 1편성 해석 모델의 고유진동 모드 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 차체 횡방향으로는 차량이 뺨처럼 움직이는 1.366Hz의 스웨이 모드가 있었으며, 차체 상하방향으로는 2.219Hz의 피칭모드가 있었다. 시운전 시험 주파수와 해석값의 비교 결과 차체 횡방향은 98.06%, 차체 상하방향은 93.47% 정도로 유사하여, 모델의 정확도가 90% 이상이라고 볼 수 있었다.

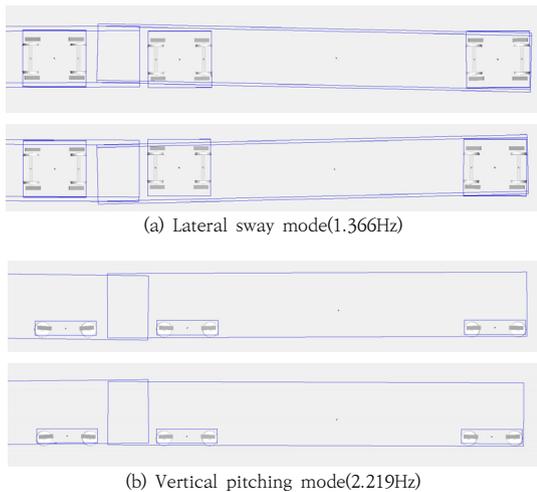


Fig. 7. Natural vibration mode of HEMU-430X

2.2 운행속도에 따른 주행안전성 예측

신규로 건설되는 평택-오송 복복선 구간은 지하 터널로 건설된다. 고속철도차량이 평택-오송 구간을 운행할 때 주행 속도에 따른 주행안전성을 해석적 방법으로 검토하였다. 이는 평택-오송 구간의 영업 운행 속도를 단계적으로 향상시킬 수 있는지 사전검토하는 과정 중 하나이다. 고속철도차량 기술기준[8] 3.2.2 주행안전 항목에 따라 윤증감소량, 탈선계수, 최대횡압을 예측하기 위하여 고속 주행 시 동역학 해석을 수행하였다. 해석구간은 경부고속선 평택-오송 간 47km 구간을 모델링하였다. 이 구간에는 R1500(설정칸트 50mm) 1개, R7000(설정칸트 130mm) 2개 등 총 3개의 곡선구간이 있다. Fig. 8에 해석구간의 선로디자인을 나타내었는데, 곡선반경을 표현하는 항목(Plan view curvature)과 곡선구간에서 회전을 탈선을 방지하기 위하여 선로의 바깥쪽을 높게 만드는 칸트(Cant)를 표시하는 항목(Cross level offset)이 있다. 선로불규칙도는 Fig. 9와 같이 경부고속선에서 실측한 선로불규칙도를 사용하였다. 선로 불규칙도에는 칸트 불규칙도(Cross level irregularity), 곡선반경에 대한 불규칙도(Curvature irregularity), 선로 횡방향 불규칙도(Lateral irregularity), 선로 상하방향 불규칙도(Vertical irregularity), 선로 간 간격 불규칙도(Gauge variation)가 포함된다.

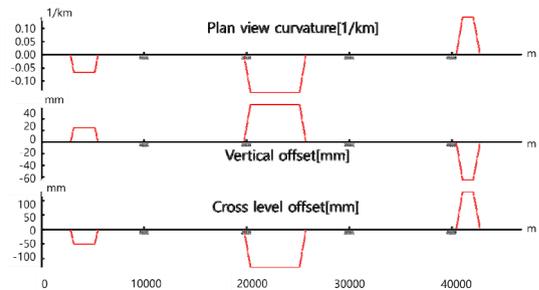


Fig. 8. Model of Pyeongtaek-Osong line

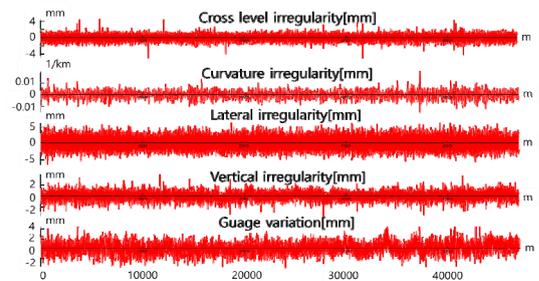


Fig. 9. Irregularity of Kyeongbu high-speed line

HEMU-430X가 평택-오송 47km 구간을 350, 370, 400km/h로 주행할 때 해석을 수행하였다. 한가지 예로 400km/h로 주행 할 때의 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에는 차륜의 상하방향(V)과 좌우방향(L) 힘의 비율을 나타내는 탈선계수(L/V, Derailment coefficient), 차륜의 정적윤중(V)에 대한 윤중 감소치(ΔV)를 나타내는 윤중감소량($\Delta V/V$, Wheel unloading ratio), 차륜이 레일에 횡방향으로 가하는 힘인 횡압(Y, Sum of guiding forces)이 포함되어 있다.

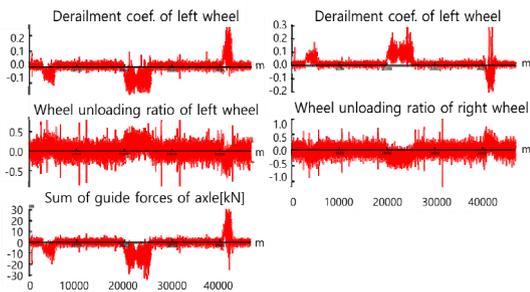


Fig. 10. Example of Analysis result at 400km/h

350, 370, 400km/h 주행시 선두차축 좌측차륜 윤중 감소율, 탈선계수를 고속철도차량 기술기준 3.2.2 주행 안전 항목에 따라 분석한 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11에서 X축은 윤중감소율($\Delta V/V$)을, Y 축은 고속철도차량 기술기준에 따라 분석한 윤중감소율의 빈도누적확률(Probability of accumulated number)을 나타내고, Fig. 12의 X축은 탈선계수(L/V)를, Y축은 탈선계수의 빈도누적확률을 나타낸다. Fig. 11과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 운행속도가 증가함에 따라 윤중감소율, 탈선계수는 증가하나 허용 기준치(Allowance limit) 이내였다.

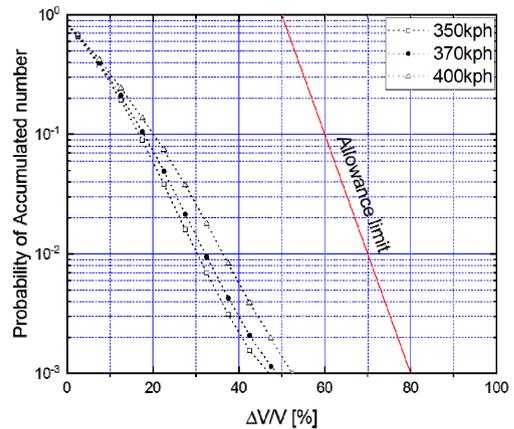


Fig. 11. Analysis result of wheel unloading ratio

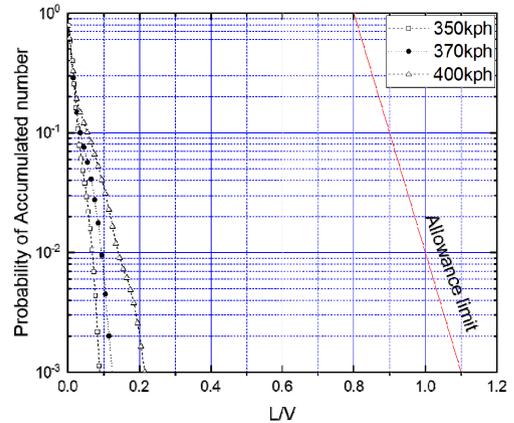


Fig. 12. Analysis result of derailment coefficient

HEMU-430X 해석 모델이 350, 370, 400km/h로 주행 할 때, 선두차축 좌측차륜의 최대횡압, 윤중감소율, 탈선계수 해석결과와 최대값을 Table 1에 정리하였다. 속도 증가에 따라 최대횡압, 윤중감소율, 탈선계수는 증가하나 기준치 보다는 다소 여유가 있어 주행안전성 측면에서는 문제가 없을 것으로 예측되었다.

Table 1. Maximum value of analysis results at 350, 370, 400km/h

Items	Criteria	350km/h		370km/h		400km/h	
		Left wheel	Right wheel	Left wheel	Right wheel	Left wheel	Right wheel
Sum of guiding forces [kN]	57.5kN	17.1kN		24.1kN		30.3kN	
Wheel unloading ratio [%]	80% (when 0.1%)	46.8%	47.9%	48.7%	49.5%	52.7%	52.3%
Derailment coefficient	1.1 (when 0.1%)	0.091	0.10	0.12	0.14	0.21	0.18

3. 결론

본 연구에서는 새로 건설되는 평택-오송 복복선 구간의 운행속도를 단계적으로 향상시킬 수 있는지를 검토하기 위해 동역학 해석을 통해 주행안정성을 검토하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 동역학 해석 모델은 동력분산형 고속철도 시제차량인 HEMU-430X이며, 6량 1편성으로 구성된다. HEMU-430X가 300km/h 속도로 시운전 시에 측정된 차체 횡방향의 대표 주파수는 1.340Hz이고, 차체 상하방향은 2.084Hz의 피칭모드 진동이 있었다. 동역학 해석을 통한 고유모드진동 분석 결과 차체 횡방향은 1.366Hz의 스웨이 모드가 있었으며, 차체 상하방향으로는 2.219Hz의 피칭모드가 있었다. 시운전 시험 주파수와 고유모드 진동 해석 비교 결과 차체 횡방향은 98.06%, 차체 상하방향은 93.47% 정도로 유사하였다. 이는 모델정확도가 90%이상으로 해석 모델이 검증되었다고 볼 수 있다.
2. 이 해석 모델을 이용하여 평택-오송 구간의 운행속도가 350, 370, 400km/h일 때 고속철도차량 기술기준 3.2.2 주행안정 항목인 윤중감소율, 탈선계수, 최대횡압을 검토하였다. 검토 결과 고속열차의 운행속도 증가에 따라 윤중감소율, 탈선계수, 최대횡압은 증가하였으나, 고속철도차량 기술기준의 기준치 이내로 운행 시 안전할 것으로 예측되었다.

본 연구에서는 철도차량 동역학 해석을 통한 고유모드 분석과 시운전시의 차체 진동 주파수 비교 분석을 통해 해석 모델을 검증하는 방법을 제안하였다. 기존 연구에서는 차체 진동 가속도의 값을 해석결과와 비교하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 지반 침하 등 선로의 불규칙도가 바뀔 때마다 다시 측정하여 해석의 입력값으로 사용해야 하는 단점이 있었다. 본 연구에서 제안한 차체 진동 주파수를 이용한 방법은 차량의 고유진동 특성이기 때문에 선로불규칙도가 바뀔 때도 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구에서는 신규 건설되는 평택-오송 복복선 구간의 운행속도를 단계적으로 높일 수 있는지 동역학 해석을 통해 검토하였는데, 운행속도를 350, 370, 400km/h로 증가시켜도 주행안정성 측면에서 문제는 없을 것으로 예측되었다. 이를 통해 오송-평택 구간 노선 설계는 주행안정성 측면에서 문제가 없음을 확인하였다.

References

- [1] C.K. Park, Y.G. Kim, K.K. Kim et al., "Analysis of the Suspension Characteristics for Next Generation High Speed Train Formed with 6 Cars in Concept Design Stage," *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp.387-392, 2008.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01084109>
- [2] C.K. Park, S.S. Kim, K.K. Kim et al., "Optimization of Non-linear Characteristics of the secondary dampers for the High Speed Electrical Multiple Train," *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp.2568-2572, 2009.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01296702>
- [3] K.S. Sim, T.W. Park, J.H. Lee et al., "An Evaluation on Derailment according to Running Safety of Next-Generation High Speed Train (HEMU-430X)," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.15, No.4, pp.343-351, 2012.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01950123>
- [4] UIC, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality," UIC CODE 518 OR, 2009.
- [5] C.S. Jeon, H.S. Cho, C.S. Park, S.W. Kim and T.W. Park, "Critical speed enhancement of a Korean high-speed train through optimization with measured wheel profiles," *Proc IMechE Part F : J Rail and Rapid Transit(OnlineFirst)*, 2016.
<http://pif.sagepub.com/content/early/recent> (August 2, 2016)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954409716662091>
- [6] C.S. Jeon, "A Study on Critical Speed Enhancement of High-speed Train Passenger Car," *Proc IMechE Part F : Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.12, pp.603-610, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.603>
- [7] Resonate Group Limited, VAMPIRE Pro V6.60 users' manual, 2018.
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2023-60, Technical Standards for High-speed Train (KRTS-VE-Part41-2023(R1)).
<http://www.molit.go.kr/>

전 창 성(Chang-Sung Jeon)

[정회원]



- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원
기계공학과 (기계공학석사)
- 2015년 2월 : 아주대학교 대학원
기계공학과 (기계공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2004년 7월 : 다산
네트웍스 주임연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

〈관심분야〉

철도차량 동역학, 기계공학