

고속철도 분기기 구간에서의 열차 주행안정성에 관한 연구

전창성

한국철도기술연구원 고속철도연구실

A Study on the Running Stability of Train at the High-speed Turnout

Chang-Sung Jeon

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

요 약 현재 국내에서는 300km/h인 고속철도의 운행 속도를 점진적으로 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 고속열차가 분기기 구간을 선로를 바꾸지 않고, 고속으로 주행할 때 현재 300km/h인 운행 속도를 400km/h 속도까지 운행 가능성을 시운전 시험과 해석적 방법을 통하여 검토하였다. 고속열차가 정읍역 분기기 구간을 선로를 바꾸지 않고, 평균속도 352.1~398.0km/h, 최대 401.1km/h까지 주행하는 시운전 시험을 수행하였으며, 차체와 대차에 부착된 가속도 센서 데이터를 이용하여, EN 14363에 의한 안전성(Safety) 과 주행거동(Ride characteristics)을 평가한 결과 가속도 값은 기준치 이내였고, 주행안정성 측면에서 안전성을 확보하였다. 분기기 구간에서 운행할 수 있는 고속열차의 최대 속도를 예측하기 위하여 철도차량 동역학 소프트웨어인 VAMPIRE를 이용하여 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석결과와 시운전시험 데이터와의 비교를 통하여 해석 결과를 검증하였으며, 임계속도 해석을 수행하여 고속열차는 최대 423km/h까지 운행할 수 있을 것으로 예측되었다. 현재 300km/h로 운행되는 분기기 구간에서 400km/h의 속도로 운행하여도 문제가 없는 것으로 예측되었으며, 본 연구 결과는 향후 국내 고속철도의 운영 속도 향상 연구에 유용하게 활용될 수 있다.

Abstract At present, efforts are made to gradually improve the operating speed of the high-speed rail, which is currently at 300 km/h. In this study, the possibility of enhancement of train operating speed in a turnout from 300km/h to 400km/h was reviewed through on-track tests and simulation. On-track tests were conducted at average speeds of 352.1 to 398.0 km/h, and the maximum speed was 401.1 km/h. Evaluating the safety and riding characteristics with EN 14363 showed that the acceleration was within the value set by the criteria and deemed safe. A dynamic analysis was performed to predict the maximum speed of the train in turnout. The dynamic analysis results were verified by a simulation that used the on-track test data. Moreover, a critical speed analysis predicted that the train could operate up to 423 km/h. In essence, this study can be used to study the operating speed increase of high-speed trains.

Keywords : EN 14363, High-Speed Train, Operating Speed Increase, Running Stability, Turnout

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2102B1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

email: csjeon@krri.re.kr

Received October 20, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised November 9, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

고속철도에서 열차를 다른 선로로 주행시키기 위해서는 선로 분기기(turnout)가 필요하다. 선로 분기기는 Fig. 1과 같이 2개의 레일을 교차시킨 것으로 포인트(Point)부, 리드(Lead)부, 크로싱(Crossing)부로 구성된다. 포인트부는 선로의 전환 방향을 결정하며, 전환 방향에 따라 이동하는 차륜은 리드부를 통과하여 크로싱부에서 전환된 선로로 빠져나간다. 본 연구는 선로 분기기의 구조보다 선로 분기기를 주행할 때 고속열차의 주행거동에 관한 것이기 때문에, 자세한 선로분기기에 대한 구조에 대한 설명은 참고문헌[1]을 참조하기 바란다.

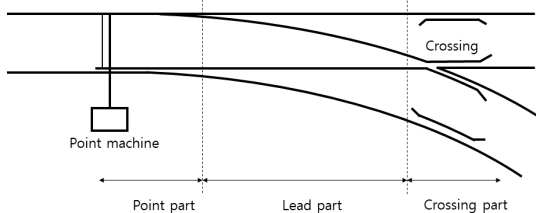


Fig. 1. Schematic of turnout system

선로 분기기에서 열차의 주행 안정성에 관해서는 몇 가지 연구가 수행되었다. Kim 등[2]은 분기기 단면 형상 변화가 차량의 주행안전성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 포인트부, 크로싱부의 단면 형상 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하였고, 포인트부의 경우 F10 분기기 길이는 기존보다 500 mm 줄이고, F12 분기기의 경우 기존보다 500 mm 늘리는 것을 제안하였다. Eom 등[3]은 F10/F12 분기기에서의 가드레일 길이 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하였는데, 가드레일 길이를 연장할수록 분기기 통과 시 주행안전성 확보하는 측면에서 유리하다고 보고하였다. 이는 가드레일의 길이가 길어지면 전륜과 후륜이 동시에 가드레일부를 통과하게 되어 주행안전성이 향상되는 것을 의미한다. Yoon 등[4]은 철도 차량이 분기기 통과시 발생되는 사행동(Hunting oscillation) 증폭현상에 의한 분기기 주행 성능저하 문제의 원인을 분석하였으며, 이를 개선하기 위한 방안으로 FAKOP(Fahrkanten Optimierung, KGO) 방법을 적용하였고, 기존 고속철도용 분기기와 비교를 통해 FAKOP 효과를 확인하였으며, 파라미터 스터디를 통한 동적해석으로 최적의 궤간 확대량을 선정하였다.

그 외 분기기에 관한 연구로 Kim 등[1, 5]은 분기기의 건전성을 유지하기 위해 콘크리트 도상에 가속도센서와

LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 이용한 진단시스템을 설치하고, 차량이 주행할 때 물리량의 변화를 측정하였다. LVDT의 경우 차량의 속도 증가에 따라 변위의 평균값이 커졌으며, 향후 이를 이용한 진단알고리즘을 개발이 필요하다고 보고하였다.

이상의 연구들은 분기기 구간에서 선로가 바뀔 때 철도차량의 주행안정성에 관한 연구들이다. 이들 연구와는 다르게 본 연구는 분기기 구간에서 선로가 바뀌지 않은 상태로 고속주행 시의 철도차량의 주행안정성 부분에 관해 연구하였다. 현재 국내에서는 300 km/h인 고속철도의 운행속도를 점진적으로 향상시키기 위한 연구가 수행되고 있다. 분기기 구간 또한 현재 300 km/h의 속도로 주행하고 있는데, 이 구간의 운행속도를 400 km/h까지 높여도 문제가 없는지를 시운전시험결과와 해석적 방법을 통하여 고찰한다.

2. 본론

2.1 시운전 시험을 통한 주행안정성 고찰

본 연구에서 검토된 분기기 구간은 Fig. 2와 같이 호남고속철도 정읍역 구내에 있다. 이 구간에는 고속선 상하선 본선 및 부분선, 상하선 선로를 바꿀 때 사용하는 선로 분기기가 존재한다. 분기기 구간의 위치는 KP133.0~130.5로 2.5 km 구간이다. 이 구간 사이의 KP131.94 지점에 정읍역이 존재한다.

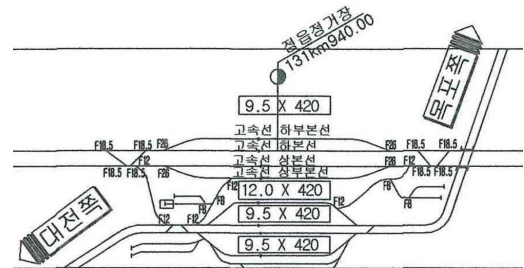


Fig. 2. Jeongeup station turnout

이 구간에서는 2015년 2월부터 3월까지 차세대 고속열차 시제차량(HEMU-430X)의 증속시험이 수행되었으며, 최고속도 414 km/h를 달성하였다. 시운전은 Fig. 3의 HEMU-430X Mc차량을 선두로 하여 수행되었으며, 주행안정성 분석을 위해서 차체, 대차, 축상에 다양한 가속도센서가 부착되었다. 분기기 구간의 시험 데이터는

Table 1. Criteria and filter on EN 14363

Items		Criteria(m/s ²)		filter
Safety	Bogie lateral acceleration	$12-M_b/5$ $M_b = \text{Bogie weight(ton)}$		10Hz low pass filter
	Carbody lateral acceleration	3.0		6Hz low pass filter
	Carbody vertical acceleration	3.0		0.4~4.0Hz band pass filter
Ride characteristics	-	Max.	R.M.S.	-
	Carbody lateral acceleration	2.5	0.5	0.4~10.0Hz band pass filter
	Carbody vertical acceleration	2.5	0.75	0.4~10.0Hz band pass filter

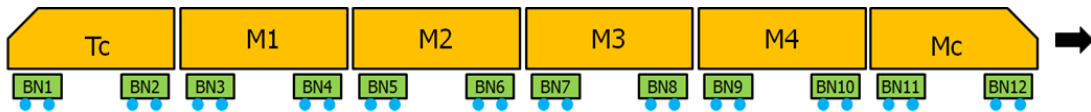


Fig. 3. Configuration of HEMU-430X

이 기간 중에 획득한 데이터 중에서 선두차량(Mc) 전위 대차(BN12) 상부의 차체 횡 및 상하방향 가속도와 전위 대차(BN12) 프레임의 횡방향 가속도값을 활용하였다. 분기기 구간에 대한 평가 규정이 따로 없어 EN 14363:2005[6]에 따라 평가를 실시하였다. 이 규격은 분기기 구간처럼 가속도가 급변하는 구간에 대해 평가하기에는 부족함이 있으나, 따로 분기기 구간에서 활용할 수 있는 국제 규격이 없어서 이에 따라 평가를 수행하였다. EN 14363 평가 방법에 대한 자세한 설명은 저자 등의 선행연구[7]를 참조하기 바란다. Table 1에 EN 14363에 따른 평가 항목과 기준, 데이터 처리시 적용되는 필터에 대해 표시하였다.

HEMU-430X가 정읍역 분기기 구간을 통과할 때 선두차량(Mc) 전위와 선두대차(BN12)의 가속도 예를 Fig. 4에 나타내었다. 열차 속도는 394.2~400.4 km/h 정도였고, 분기기의 크로싱 부분을 통과할 때 대차 및 차체 가속도가 조금씩 증가했다가 감소하는 것을 알 수 있었다.

분기기 구간에서 속도를 증가하면서 취득한 가속도 데이터에 대해 Table 1의 EN 14363에 의한 필터 적용 후 평가한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 분기기 구간의 통과 속도는 평균 352.1~398.0 km/h이고, 최대 값은 358.3~401.1 km/h사이였다. Fig. 5의 안전성(Safety) 평가와 Fig. 6의 주행거동(Ride characteristics) 평가 결과에서 알 수 있듯이 대차와 차체의 가속도는 기준치 이내이다. 따라서, HEMU-430X열차가 정읍역 분기기 구간을 400 km/h 속도로 운행해도 문제가 없을 것으로 예측된다.

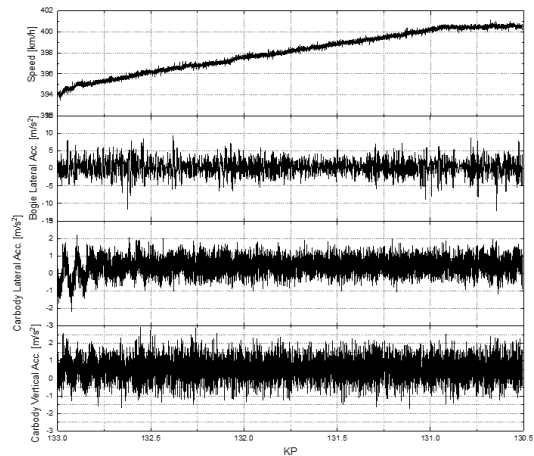
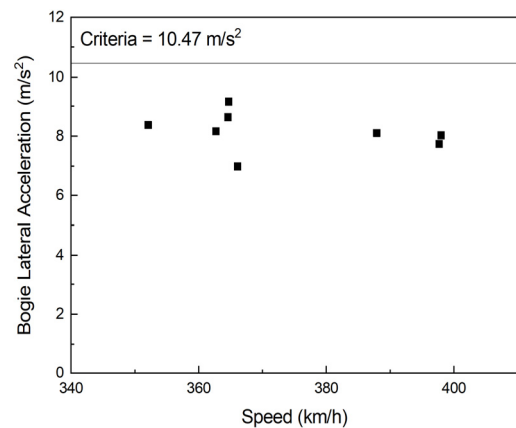


Fig. 4. Acceleration at Jeongeup turnout



(a) Bogie lateral acceleration

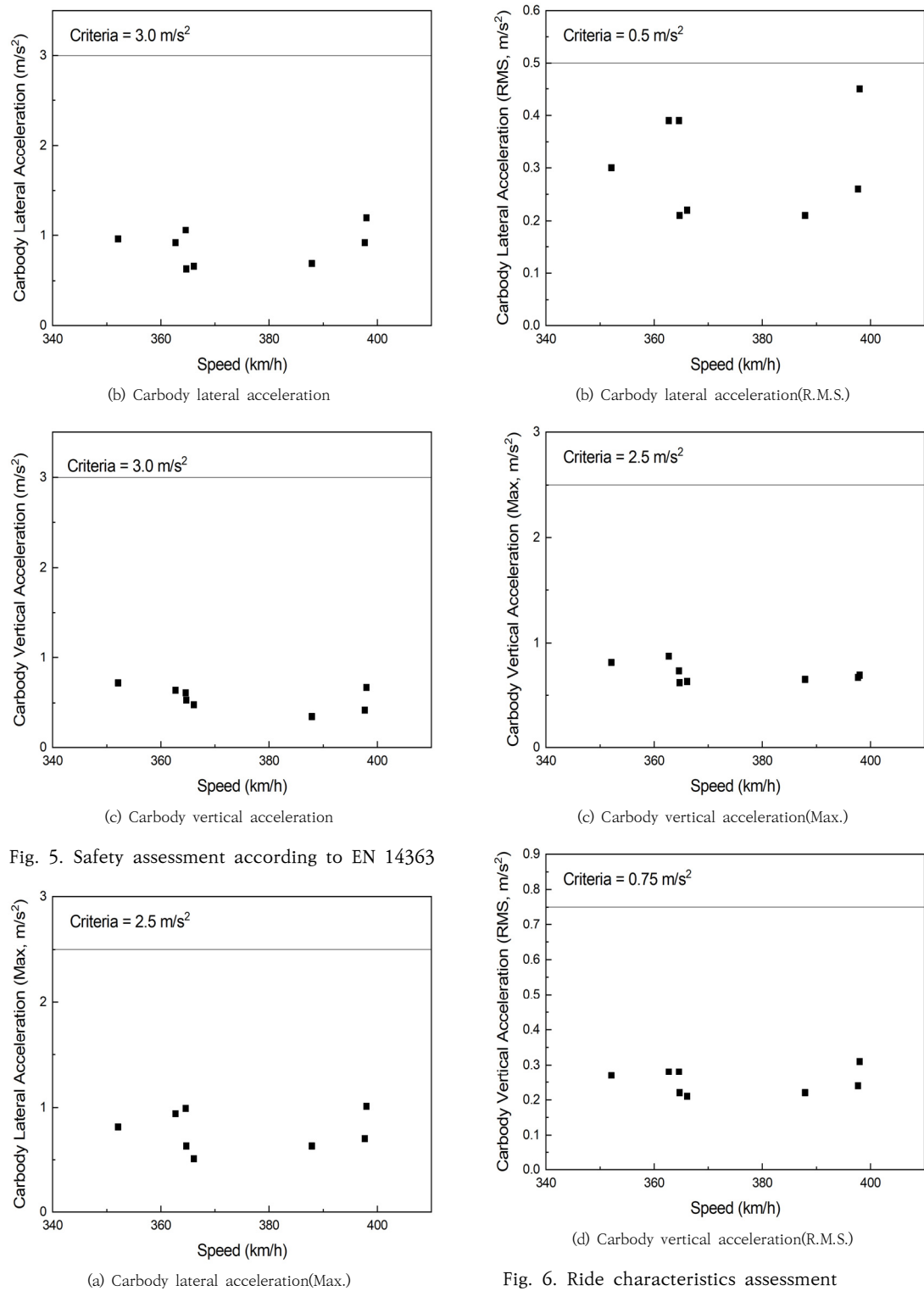


Fig. 5. Safety assessment according to EN 14363

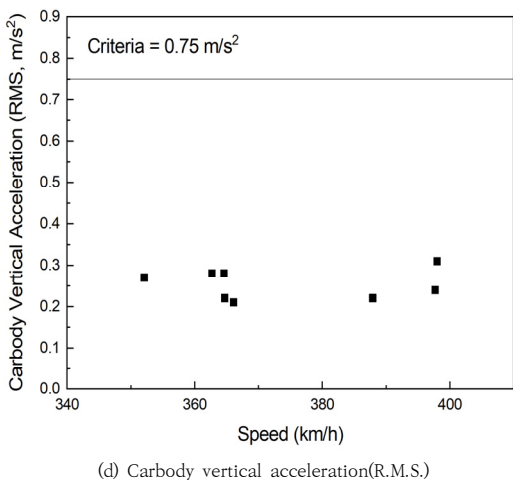
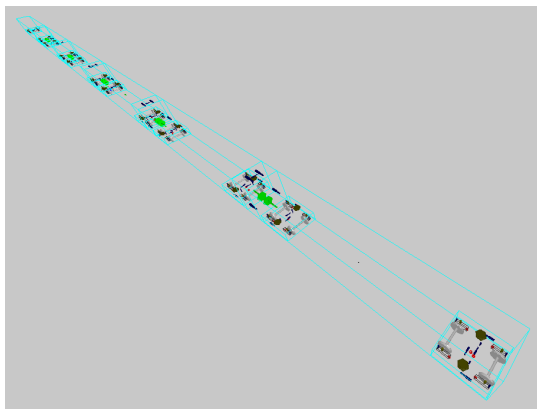


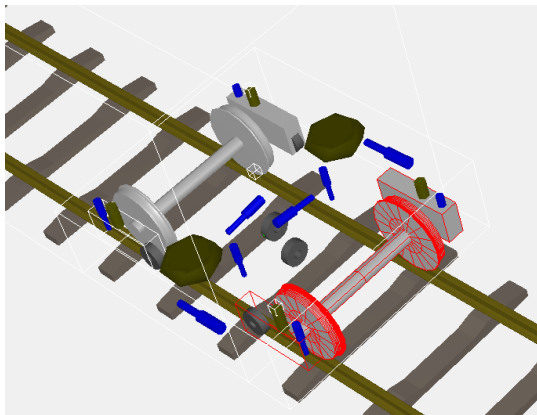
Fig. 6. Ride characteristics assessment

2.2 동역학 해석을 통한 주행안정성 고찰

시운전 시험을 통해 HEMU-430X는 정읍역 분기기 구간을 401.1 km/h의 속도로 운행하여도 문제가 없다는 것을 알 수 있었다. 분기기 구간을 운행할 수 있는 최대속도를 예측하기 위하여 철도차량 동역학 소프트웨어인 VAMPIRE[8]를 이용한 동역학 해석을 수행하였다. HEMU-430X 6량 1편성 차량과 대차의 동역학 해석 모델을 작성하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 차량은 TC(제어차) + M1(동력객차) + M2 + M3 + M4 + MC(동력제어차)로 구성된다. 레일의 형상은 현재 고속철도 노선에서 사용되는 UIC60-20을, 휠 프로파일은 XP55를 이용하였다.



(a) HEMU-430X train model



(b) Front bogie model

Fig. 7. Simulation model of HEMU-430X

분기기 구간 선로불규칙도는 Fig. 8과 같이 모델링하였다. 분기기 구간 직선선로를 주행할 때 주로 크로싱부에서 심한 충격이 가해지기 때문에 이를 모델링하기 위하여 크로싱부에 Fig. 8과 같이 횡방향과 상하방향으로

큰 값의 불규칙도를 적용하였다. HEMU-430X가 모델링된 분기기 구간을 390 km/h로 주행할 때 해석 예를 Fig. 9에 나타내었다. 가속도, 탈선계수, 최대횡압이 적용된 선로불규칙도와 같은 경향으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 해석 방법에 대한 검증 방안으로 EN 14363의 주행거동 평가에서 차체 횡방향 가속도 최대값의 해석결과와 앞 절의 시운전 결과를 Fig. 10에 같이 나타내었다. 주행속도에 따른 해석결과와 시험결과가 유사한 값과 경향을 보이므로 해석방법이 검증되었다고 볼 수 있다. 이때 해석결과 값이 시운전 시험에서 나온 값보다 조금 적게 나오는 것은 Fig. 8에서 모델링한 분기기 구간의 불규칙도와 실제 선로 불규칙도가 조금 차이가 있기 때문이다.

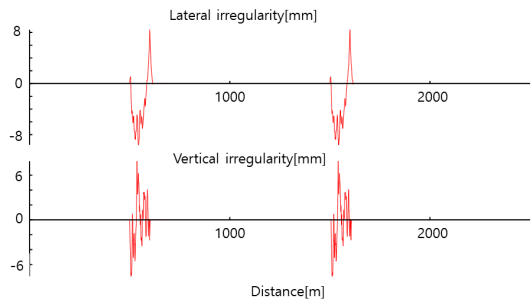


Fig. 8. Track irregularity of turnout

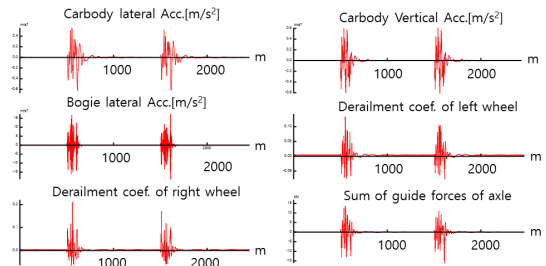


Fig. 9. Simulation examples at 390 km/h

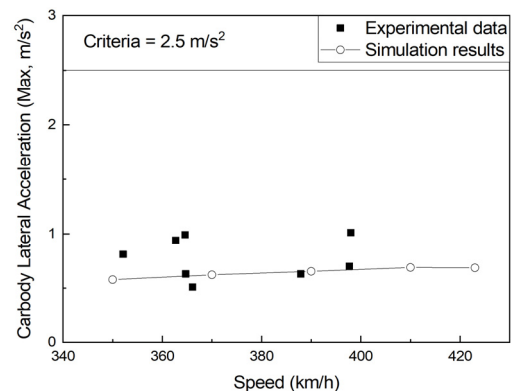


Fig. 10. Comparison of experimental and simulation data

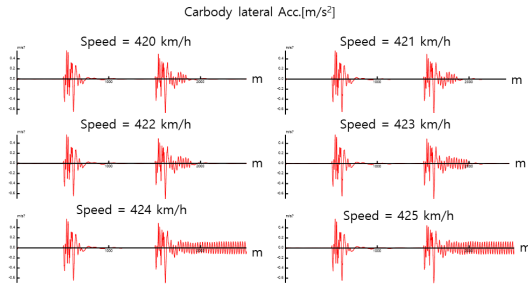


Fig. 11. Critical speed analysis result

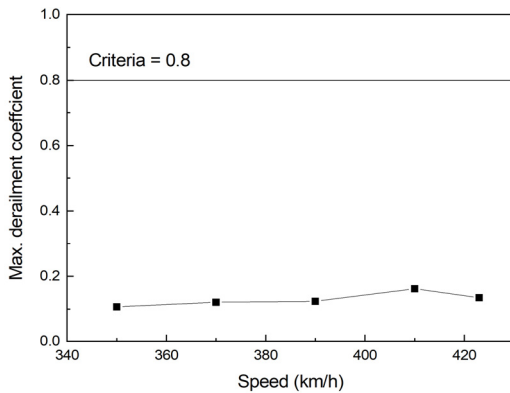


Fig. 12. Derailment coefficient assessment

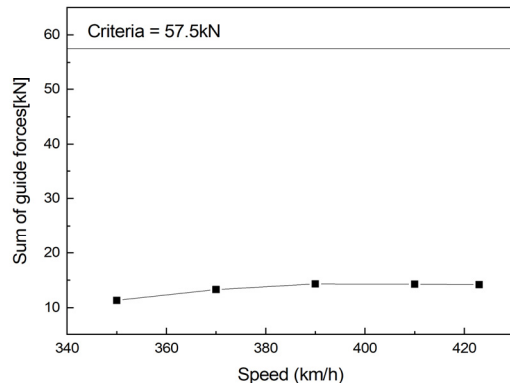


Fig. 13. Assessment of sum of guide forces

이상의 해석 모델을 이용하여 분기기 구간에서 운행할 수 있는 최대속도를 예측하기 위해 철도차량이 불안정해지는 속도인 임계속도(Critical speed)를 확인하는 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 차체 횡방향 가속도를 표시하였는데 열차가 424 km/h 이상의 속도로 주행할 때 분기기를 지나서 좌우로 흔들리는 현상(Hunting oscillation)이 발생하므로,

임계속도는 423 km/h이다. 350~423 km/h 속도로 주행할 때 EN 14363에 따라 탈선계수(Derailment coefficient)와 최대횡압(Sum of guide forces)을 평가하여 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 탈선계수와 최대횡압은 기준치에 비해 다소 여유가 있으므로 열차는 안전하다고 할 수 있다. 이상의 결과로 HEMU-430X는 분기기 구간을 423 km/h 속도까지 운행 가능하리라고 예측된다.

3. 결론

현재 국내에서는 300 km/h인 고속철도의 운행속도를 점진적으로 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 고속열차가 분기기 구간을 선로를 바꾸지 않고 고속으로 주행할 때, 현재 300 km/h인 운행 속도를 400 km/h 속도까지 향상시킬 수 있는 가능성을 검토하였다. 이를 위해 시운전 시험과 해석적 방법을 통하여 열차의 주행안정성을 고찰하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 고속열차가 정읍역 분기기 구간을 선로를 바꾸지 않고, 평균속도 352.1~398.0 km/h, 최대 401.1 km/h까지 주행하는 시운전 시험을 수행하였다. 이 때 획득한 차체와 대차 가속도를 이용하여, EN 14363에 의한 안전성(Safety) 과 주행거동(Ride characteristics)을 평가한 결과 가속도 값은 기준치 이내였고, 주행안정성 측면에서 안전성을 확보하였다.
2. 분기기 구간에서 운행할 수 있는 고속열차의 최대속도를 예측하기 위하여 철도차량 동역학 소프트웨어인 VAMPIRE를 이용한 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석결과와 시운전시험 데이터를 비교하여 해석결과를 검증하였으며, 임계속도 해석을 통해 최대 423 km/h까지 운행할 수 있을 것으로 예측되었다. 이 때 탈선계수와 최대횡압은 기준치에 여유가 있어서 문제가 없을 것으로 예측된다.

본 연구에서는 분기기 구간을 고속으로 주행할 때 고속열차의 주행안정성을 고찰하였으며, 현재 300 km/h로 운행되는 분기기 구간에서 400 km/h의 속도로 운행하여도 문제가 없는 것으로 예측된다. 본 연구 결과는 향후 국내 고속열차의 운영 속도를 높이는 연구에 유용하게 활용될 수 있다.

References

- [1] Y. S. Kim, Y. J. Yoon, I. C. Back *et al.*, "A Study on a Diagnosis System for HSR Turnout Systems (I)," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.20, No.2, pp.210-222, 2017.
DOI <https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.210>
- [2] S. J. Kim, B. G. Eom, B. B. Kang *et al.*, "A Study of Running Safety According to the Section of an F10/F12 Turnout," Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.35, No.6, pp.591-598, 2011.
DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.6.591>
- [3] B. G. Eom, S. J. Kim, S. I. Lee *et al.*, "Analysis of Running Safety According to Changes of Guard Rail Length on F10/F12 Turnout," Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.37, No.6, pp.723-730, 2013.
DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.6.723>
- [4] B. H. Yoon, M. C. Kim, Y. H. Bae *et al.*, "Study on the Optimization of Gauge Expansion for Improvement of Running Performance of High-speed Railway Turnouts," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.23, No.12, pp.1196-1205, 2020.
DOI <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2020.23.12.1196>
- [5] Y. S. Kim, Y. J. Yoon, I. C. Back *et al.*, "A Study on a Diagnosis System for HSR Turnout Systems (II)," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.20, No.2, pp.223-233, 2017.
DOI <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.223>
- [6] EN 14363 : 2005. Railway applications - acceptance of running characteristics of railway vehicles-testing of running behaviour and stationary tests.
- [7] C. S. Jeon, Y. G. Kim, J. H. Park *et al.*, "A study on the dynamic behavior of the Korean next-generation high-speed train," Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, Vol.230, No.4, pp.1053-1065, 2015.
DOI <https://doi.org/10.1177/0954409715576355>
- [8] Resonate Group Limited, VAMPIRE Pro V6.60 users' manual, 2018.

전 창 성(Chang-Sung Jeon)

[정회원]



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

<관심분야>

철도차량 동역학, 기계공학