

고속열차의 풍압 및 교행에 의한 주행안정성 연구

전창성*, 윤수환, 김석원
한국철도기술연구원 고속철도연구팀

A Study on the Running Stability of the High-speed Train by Wind Pressure and Crossing

Chang-Sung Jeon*, Su-Hwan Yun, Seog-Won Kim
High-speed Railroad Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구는 고속열차가 개활지와 터널을 운행할 때, 풍압과 교행 등에 의한 외력이 차량에 가해질 때 고속열차의 주행안정성에 대해 고찰하기 위하여 진행되었다. 고속열차 교행에 의한 외력이 없을 때, 400 km/h 속도로 주행 시 8량 1편성의 고속열차의 주행안정성을 검토한 결과 윤중 감소량, 횡압, 탈선계수는 국내 법규인 고속철도차량 기술기준의 주행 안전 부분을 만족하였다. 선로중심 간격 4.6 m일 경우 터널 내, 개활지 강풍이 없을 때 고속열차 교행에 의한 외력의 영향은 차체의 횡가속도에 조금 영향을 주나 윤중 감소율, 횡압, 탈선계수에는 크게 영향이 없고, 고속철도차량 기술 기준에서 허용하는 기준치 이내였다. 선로중심 간격이 4.6~5.0 m이고, 열차가 400 km/h로 주행 시 개활지 강풍 20 m/s 및 교행에 의한 외력이 있을 때 윤중 감소율, 횡압 및 탈선계수는 허용치 이내이고, 강풍 30 m/s 및 교행에 의한 외력이 있을 때 윤중 감소율 및 횡압은 허용치를 초과하고, 탈선계수는 허용치 이내였다. 이 결과로 400 km/h급 고속열차는 풍속이 20 m/s 정도까지 안전하게 운행할 수 있으며, 풍속이 30 m/s에서는 감속 운행이 이루어져야 할 것으로 예측되었다.

Abstract This study was conducted to investigate the running stability of a high-speed train operated in a tunnel and an open field when external forces such as wind pressure and train crossings were applied to the vehicle. With no external force, the running stability at 400 km/h was examined, and the wheel weight reduction ratio, lateral pressure of the axles, and derailment coefficient satisfied the criteria of the technical standards for a high-speed train. When the distance between the centers of the tracks is 4.6 m, the external force caused by train crossing slightly affects the lateral acceleration of the vehicle but does not significantly affect the wheel weight reduction rate, lateral pressure, and derailment coefficient in a tunnel and open filed. When the distance is 4.6~5.0 m, the wheel weight reduction ratio, lateral pressure, and derailment coefficient satisfy the criteria with 20 m/s wind. When the wind speed was 30 m/s, the derailment coefficient satisfied the criteria, and the other variables exceeded them. It is predicted that a high-speed train can be operated safely at 400 km/h with wind speed of up to 20 m/s, and it should be slowed down at a wind speed of 30 m/s.

Keywords : High-speed Train, Running Stability, Technical Standards for High-speed Train, Wind Pressure, Train Crossing

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2002D1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

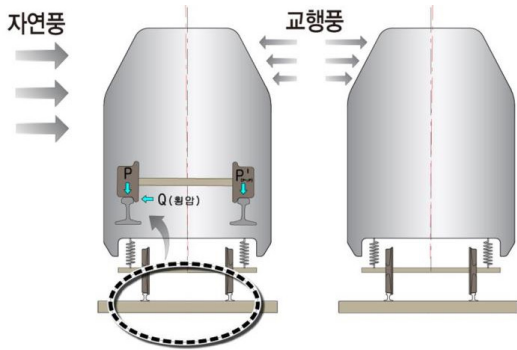
*Corresponding Author : Chang-Sung Jeon(Korea Railroad Research Institute)
email: csjeon@krri.re.kr

Received October 27, 2020
Accepted December 4, 2020

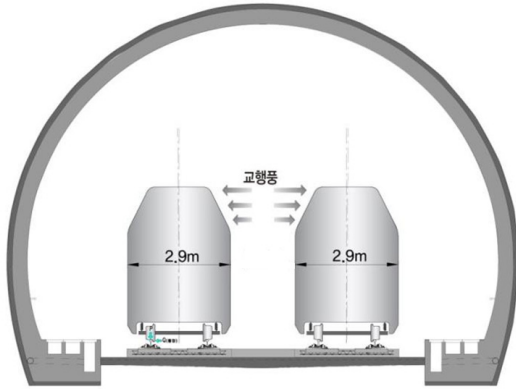
Revised December 1, 2020
Published December 31, 2020

1. 서론

고속철도차량이 선로 위를 주행할 때 편심과 이상 진동이 없는 것으로 가정할 때 차체에 작용하는 힘은 곡선 통과 시의 원심력에 의한 힘, 차량 중량에 의한 중력, 횡풍 및 교행 열차풍에 의한 풍압으로 구성된다. Fig. 1은 개활지와 터널 내에서의 풍력에 의한 힘을 보여주는데, 개활지에서는 횡풍과 교행풍이, 터널내에서는 교행풍만이 존재한다.



(a) Train crossing and wind pressure in open field



(b) Train crossing and wind pressure in tunnel

Fig. 1. Wind pressure according to train crossing and force acting on the track

철도차량의 주행안정성은 차륜과 레일사이에서 작용하는 힘의 관계에 의해 영향을 받는다. 탈선에 대한 안전성을 평가하는 항목으로는 차륜과 레일의 횡방향 작용력과 수직방향 하중의 비인 탈선계수, 감소된 윤중에 대한 정적윤중의 비인 윤중 감소율을 들 수 있으며, 차량이 궤도에 주는 힘인 횡압 등도 고려된다. 주행안정성 평가기준은 고속철도차량 기술기준 3.2.2 주행안전[1] 관련내용 중 윤중 감소량, 횡압, 탈선계수 항을 검토하였다.

풍압과 교행에 따른 철도차량의 안정성에 관해서는 몇

가지 연구가 수행되었다. Nam[2]은 다물체 모델에 기초한 철도차량의 전복안정성 이론식을 개발하였고, 이는 윤중 감소율을 평가하는데 사용되어온 상용 프로그램을 이용한 방법을 대체하여 해석할 수 있음을 보였다. Nam 등[3-5]은 호남고속철도에 적합한 선로 중심 간격을 검토하는데 필요한 차량 주행 안전성을 해석하기 위하여 선로 중심 간격 변화로 인한 교행 열차 풍압을 예측하였으며, 이를 실차 실험과 선로변 현장 실험 결과를 토대로 공력 영향을 평가하였다. 또한, 차량 전복 안전성에 끼치는 열차 풍압의 영향에 대한 파라미터 연구를 수행하였다. Nam 등[6]은 터널 내에서 교행하는 열차의 풍압 변동 해석을 위하여 고정 격자계를 이용하여 특성 방정식에 대한 전산 해석법을 개발하였고, 교행시의 터널 진입 조건에 따라 압력 변화가 달라짐을 정량적으로 분석하였다. 이상의 연구 결과들은 풍압 및 교행에 관한 연구들이며, 주행안정성 부분에 대해서는 자세하게 다루지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 고속열차가 개활지와 터널을 운행할 때, 풍력과 교행 등에 의한 외력이 차량에 가해질 때 고속열차의 주행안정성에 대해 해석적인 방법으로 고찰하는 방법을 자세히 제시한다. 또한 본 연구는 철도의 건설 기준에 관한 규정[8]의 설계 최고속도를 350 km/h에서 400 km/h 상향하기 위한 기초 연구로 진행되었다.

2. 본론

2.1 주행안정성 검토 개요

Fig. 2는 동력분산형 고속열차 시제차량(6량 1편성)을 기반으로 한 8량 1편성의 고속열차 및 대차와 차량 연결부 모델이다. 차량은 TC(제어차) + M1(동력객차) + M2 + M2' + M3 + M3' + M4 + MC(동력제어차)로 구성된다. 레일 형상은 현재 고속철도 노선에서 사용되는 UIC60-20을, 휠 프로파일은 XP55를 이용하였다. 고속열차의 주행안정성은 동역학 해석 프로그램인 VAMPIRE[7]를 이용하여 해석적 방법으로 검토하였다.

고속열차의 운행은 경부고속선 평택-오송 간 47km 구간을 400 km/h의 속도로 운행하는 것으로 가정하였다(Fig. 3(a)). 이 구간에는 곡선구간 R15000(설정칸트 50 mm) 1개, R7000(설정칸트 130 mm) 2개 구간이 있으며, 철도의 건설기준에 관한 규정(국토교통부 고시 제 2020-503호)[8] 제7조(칸트)를 적용하면 R15000구간의 제한속도는 478.3 km/h, R7000 구간의 제한속도는 392.7 km이다. R7000 구간에서 400 km/h로 주행하려

면 설정칸트 140 mm가 필요함을 알 수 있었다. 해석은 철도차량 동역학 해석 소프트웨어 VAMPIRE Pro 6.60[7] 이용하였으며, 선로불규칙도는 VAMPIRE에서 제공하는 고속선용 ERRI_Low를 사용하였다(Fig. 3(b)). 본 연구에서는 향후 건설 예정인 400 km/h급 고속철도에 적용할 선로중심 간격인 4.6~5.0 m를 고려하였다.

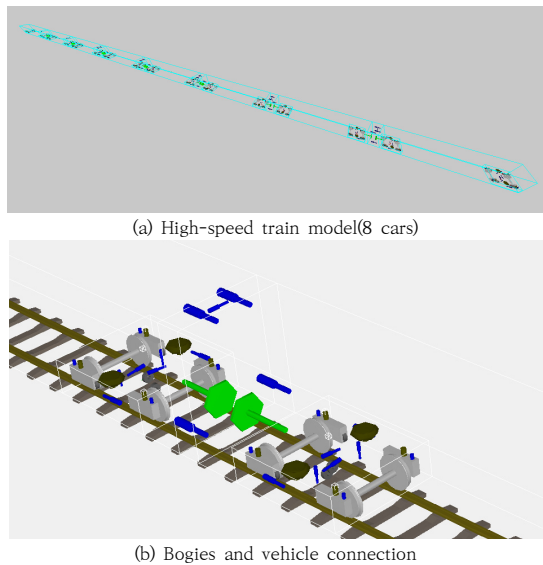


Fig. 2. Analysis model for high-speed train

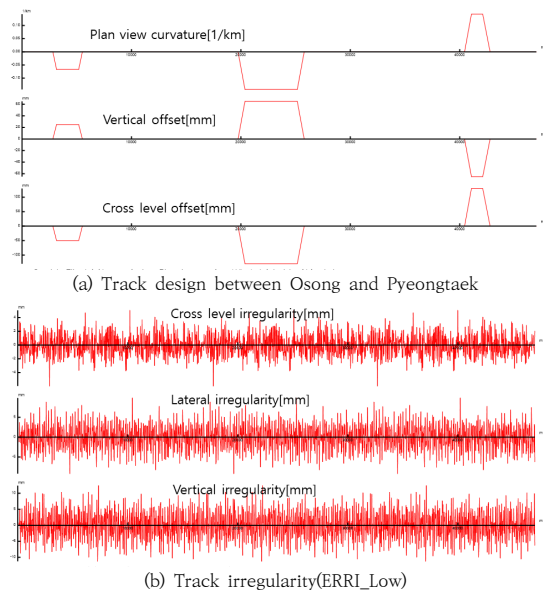


Fig. 3. Track design and irregularity

2.2 외력이 없을 때 고속열차의 주행안정성

먼저 고속열차가 단독으로 오송~평택 구간을 400 km/h 속도로 주행할 때 주행안정성을 고속철도차량 기술기준[1]에 따라 검토하였다. 선로중심 간격이 4.6 m일 때 시운전 구간에서의 운중 감소량, 최대 횡압, 탈선계수 계산 결과는 Fig. 4와 같다.

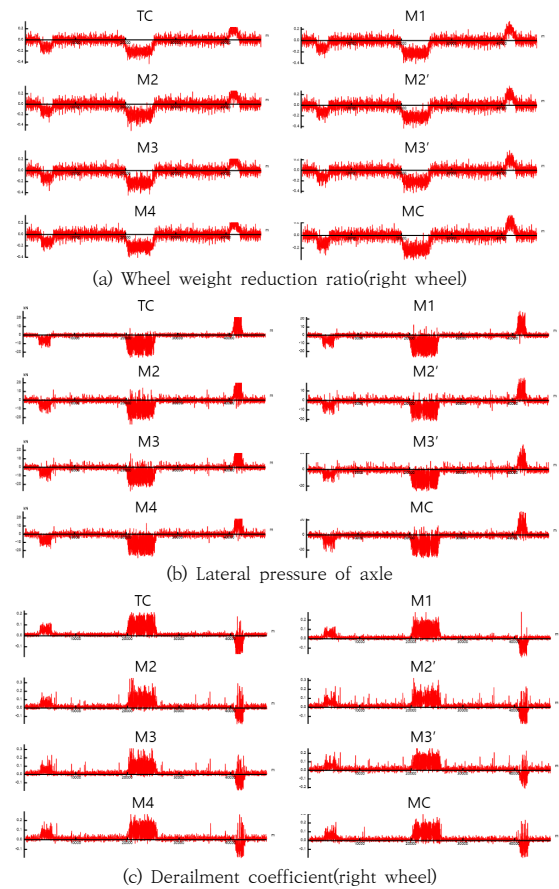


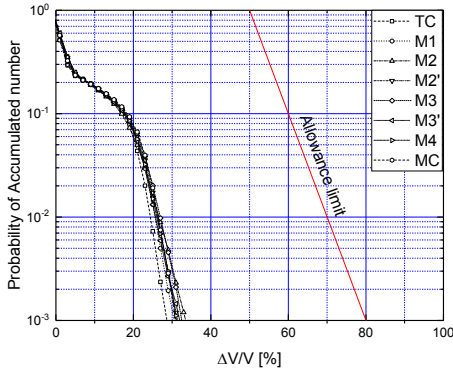
Fig. 4. Analysis results without external force

고속철도차량 기술기준에서는 철도차량의 운행상태에서의 운중 감소량은 빈도누적확률이 100 %인 경우에는 50 %까지, 0.1 %인 경우에는 최대 80 %까지 허용된다.

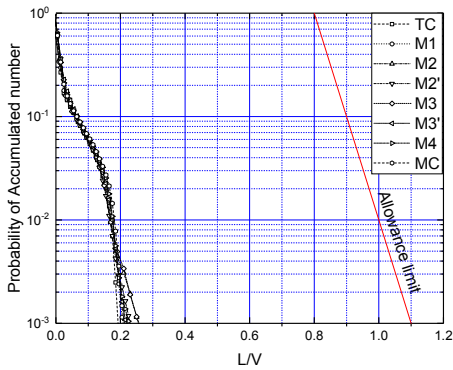
횡압의 기준은 $Y = \frac{P}{3} + 10$ (kN) 으로 정의하고 있다.

여기서, Y 는 1축 당 횡압(kN), P 는 축중(kN)이다. 본 연구 대상 고속열차의 증량은 차량별로 상이하며 동력객차인 M2가 가장 가볍고, 제어동력차인 MC가 가장 무겁다. 탈선계수는 곡선반경이 250 m 이상인 구간에서는 1개의 차륜에서 빈도누적확률이 100 %인 경우에는 0.8까지

허용하고, 0.1 %인 경우에는 1.1까지 허용하며, 최대값은 1.2까지 허용한다. 운중 감소량, 최대횡압 및 탈선계수를 고속철도차량 기술기준[1]에 의해 분석한 결과를 Fig. 5와 Table 1에 나타내었으며, 그 값은 허용치 이내로 주행안정성 측면에서 문제가 없을 것으로 예측되었다.



(a) Wheel weight reduction ratio(right wheel)



(b) Derailment coefficient(right wheel)

Fig. 5. Analysis results without external force according to technical standards for high-speed train

Table 1. Maximum lateral pressure of axle

Vehicle	Criterion[kN]	Analysis results[kN]
TC	51.5	28.1
M1	54.9	29.8
M2	49.9	27.7
M2'	49.9	23.9
M3	51.1	27.9
M3'	51.1	30.2
M4	54.6	29.0
MC	57.5	31.3

2.3 터널 내 주행 시 고속열차의 주행안정성

선로 중심 간격이 4.6 m인 터널 내에서 두 열차가 400 km/h의 속도로 반대 방향으로 교행하는 경우에 대한 주행안정성을 검토하였다. 이 때 터널 내에서는 강풍은 없고 열차 교행에 따른 교행풍이 존재하며, 이는 운행하는 열차에 외력으로 작용한다. 터널 내 교행풍에 의한 외력을 공력해석을 통하여 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 공력해석에 대한 자세한 내용은 저자 등의 다른 논문[6]에 상세히 소개되어 있다.

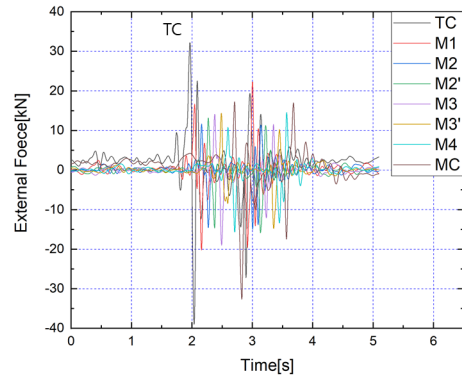


Fig. 6. External force with train crossing in tunnel (4.6m track distance)

도출된 교행풍에 의한 외력은 선두차량인 TC에 가장 크게 작용한다. 이 외력이 Fig. 7과 같이 오송~평택 구간 중 직선구간(15 km지점) 및 R7000 곡선구간(22 km, 47 km지점)에서 작용할 때 열차의 운중 감소율, 탈선계수, 최대횡압 및 차체 횡가속도의 해석결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 교행에 의한 열차풍은 차체 횡가속도에는 영향을 미치지(Fig. 8(b)), 차륜과 관련된 운중 감소율, 최대횡압, 탈선계수에는 영향이 미미하다(Fig. 8(a)). 또한, 터널 내 열차풍에 의한 외력이 작용할 때 고속철도차량 기술기준에 의해 분석한 운중 감소율, 최대횡압 및 탈선계수는 기준치 이내로 주행안정성 기준을 만족하였다.

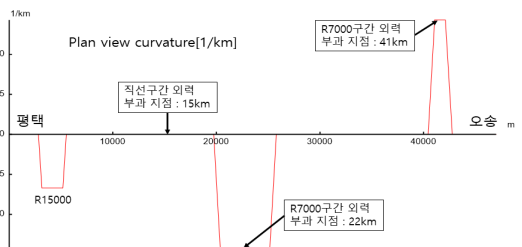


Fig. 7. External force imposition point

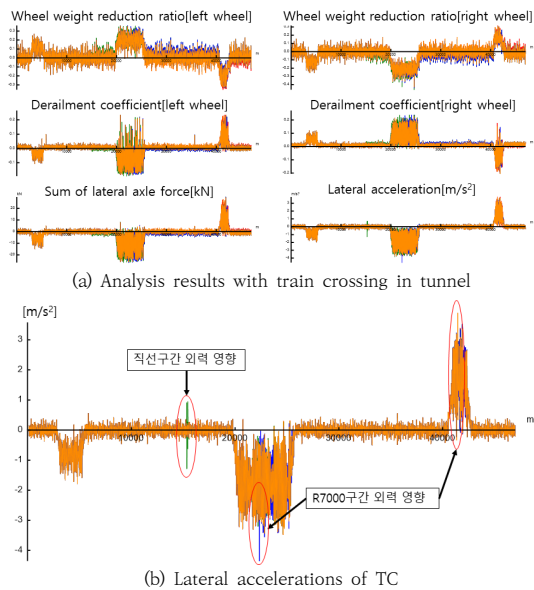


Fig. 8. Analysis results with train crossing in tunnel(4.6m track distance)

2.4 개활지 주행 시 고속열차의 주행안정성

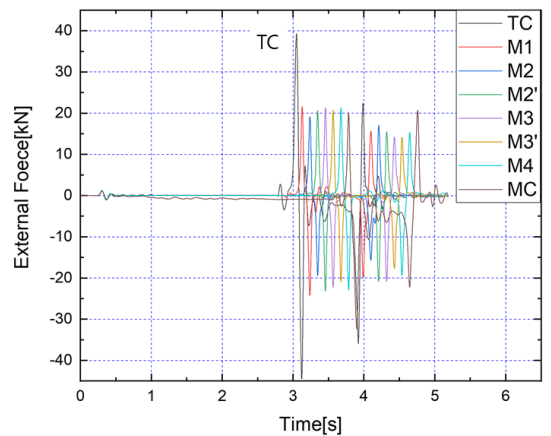
현재 국내의 고속철도 운전취급 세칙[9]에 의하면 풍속이 45 m/s 이상일 경우 운행 보류 또는 중지, 40~45 m/s일 때 90 km/h이하 속도로 운행, 30~40 m/s일 때 170 km/h이하 속도로 운행하며, 풍속이 30 m/s미만일 경우 풍속에 따라 단계적으로 감속운행을 하게끔 규정한다. 통상 20 m/s까지는 정상속도로 운행하며, 20~30 m/s까지는 상황에 따라 감속운행을 한다.

개활지 주행은 강풍에 의한 외력이 없고, 열차 교행풍만 있을 때(풍속 = 0 m/s)와 강풍에 의한 외력(풍속 = 20 m/s, 30 m/s)과 교행풍이 같이 있을 때를 검토하였으며, 강풍이 있을 때는 선로 중심 간격을 4.6~5.0 m까지 변화를 주며 주행안정성을 검토하였다. 개활지에서의 강풍 및 교행풍에 의한 외력은 앞 절과 마찬가지로 공력 해석을 통하여 도출되었으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 풍속이 높을수록 외력도 크게 작용한다.

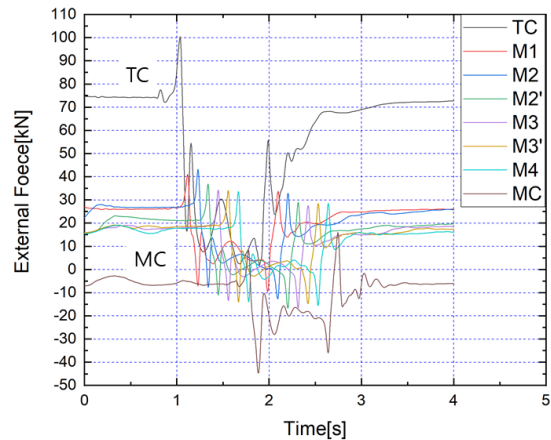
강풍에 의한 외력이 없고, 열차 교행풍만 있을 때의 해석결과는 앞 절의 터널 내에서 교행풍만 있을 때와 유사하며 운중 감소율, 최대횡압, 탈선계수는 고속철도차량 기술기준을 만족하였다. 개활지에서 풍속이 20 m/s일 때 400 km/h로 운행하는 고속열차의 주행안정성 해석 결과의 일부를 Fig. 10 및 Table 2에 나타내었다. 강풍에 의한 외력이 없을 때보다 운중감소율, 탈선계수, 최대 횡압은 증가하지만 허용된 기준치 이내였다. 이는 20

m/s의 강풍 속에서 고속열차는 400 km/h로 운행해도 문제가 없음을 의미한다.

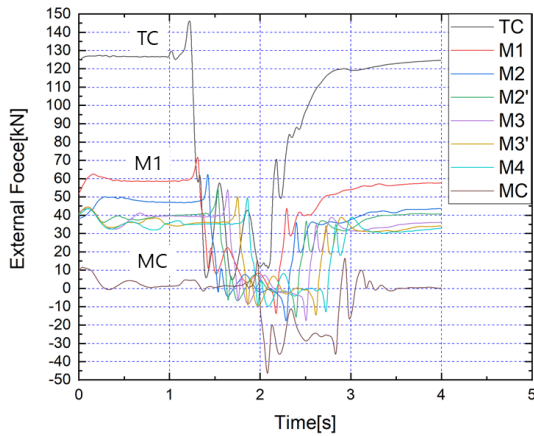
개활지에서 풍속이 30 m/s일 때 400 km/h로 운행하는 고속열차의 해석결과의 일부를 Fig. 11과 Table 3에 나타내었는데, 선두 TC 차량의 운중 감소율과 최대횡압은 허용기준치를 초과하였고, 탈선계수는 허용치 이내였다. 이는 풍속이 30 m/s일 때 고속열차는 400 km/h로 운행하는 것은 주행안정성 측면에서 위험함을 의미한다. 풍속이 20 m/s와 30 m/s일 때 400 km/h로 운행하는 고속열차의 주행안정성 해석 결과들을 정리하여 최대값을 Table 4와 5에 나타내었는데, 앞에서 설명한 것과 같이 20 m/s는 허용기준치 이내이고, 30 m/s일 경우 운중 감소율과 최대횡압이 허용기준치를 초과하였다. 이상의 결과로 400 km/h급 고속열차는 풍속이 20 m/s 정도까지 안전하게 운행할 수 있을 것이며, 30 m/s에서는 감속 운행이 이루어져야 할 것이다.



(a) External force with train crossing in open field



(b) External force with train crossing and 20m/s wind in open field

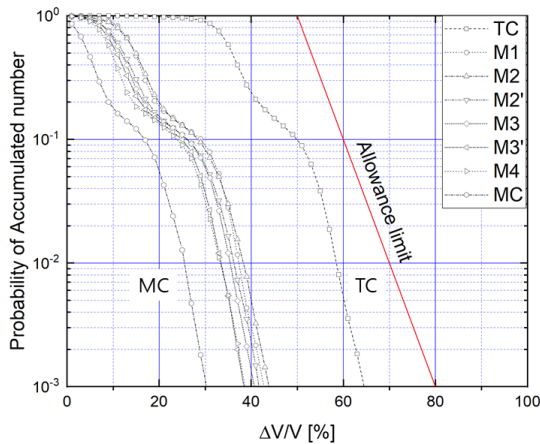


(c) External force with train crossing and 30m/s wind in open field

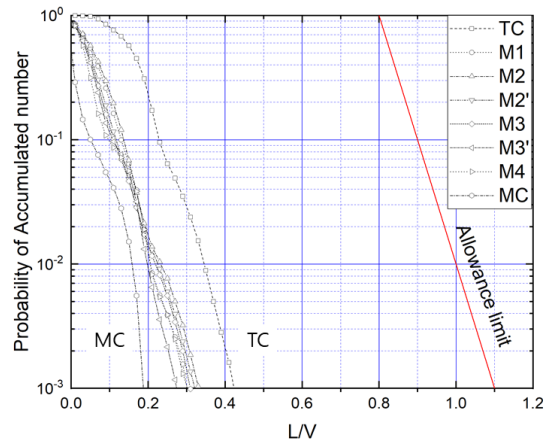
Fig. 9. External force with train crossing and wind in open field(4.6m track distance)

Table 2. Maximum lateral pressure of axle with 20m/s wind

Vehicle	Criteria[kN]	Analysis results[kN]
TC	51.5	50.1
M1	54.9	38.4
M2	49.9	37.3
M2'	49.9	29.6
M3	51.1	30.2
M3'	51.1	29.5
M4	54.6	34.6
MC	57.5	38.9



(a) Wheel weight reduction ratio(right wheel)

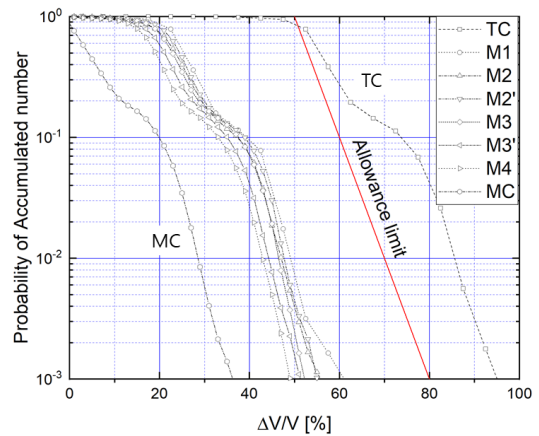


(b) Derailment coefficient(right wheel)

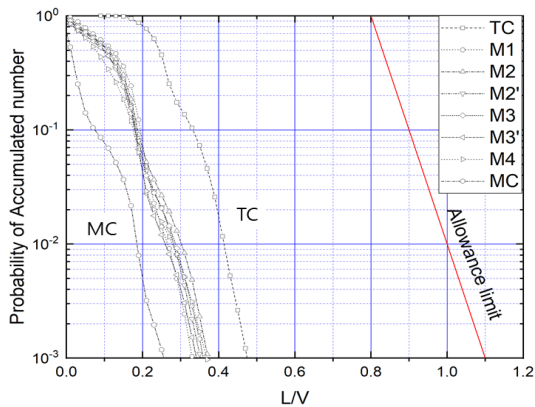
Fig. 10. Analysis results with train crossing and 20m/s wind in open field according to technical standards for high-speed train(4.6m track distance, external force at R7000 22km point)

Table 3. Maximum lateral pressure of axle with 30m/s wind

Vehicle	Criteria[kN]	Analysis results[kN]
TC	51.5	71.1
M1	54.9	36.7
M2	49.9	36.4
M2'	49.9	36.4
M3	51.1	38.2
M3'	51.1	48.4
M4	54.6	46.0
MC	57.5	32.4



(a) Wheel weight reduction ratio(right wheel)



(b) Derailment coefficient(right wheel)

Fig. 11. Analysis results with train crossing and 30m/s wind in open field according to technical standards for high-speed train(4.6m track distance, external force at R7000 22km point)

3. 결론

본 연구에서는 고속열차가 개활지와 터널을 운행할 때, 풍력과 교행 등에 의한 외력이 차량에 가해질 때 고속열차의 주행안정성에 대해 고찰하는 방법을 제시하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 교행에 의한 외력이 없을 때 400 km/h 주행 시 8량 편성의 고속열차의 주행안정성을 검토한 결과 윤증 감소량, 횡압, 탈선계수는 고속철도차량 기술 기준을 만족하였다.
2. 선로중심 간격 4.6 m일 경우 터널 내, 개활지 강풍이 없을 때 교행에 의한 외력은 차체기속도에 조금 영향을 주나, 윤증감소율, 횡압, 탈선계수에는 큰 영향이 없고 허용치 이내였다.
3. 선로중심 간격 4.6~5.0 m일 경우 개활지 강풍 20 m/s 및 400 km/h 주행 시 교행에 의한 외력이 있

Table 4. Analysis results with train crossing and 20m/s wind in open field

Items	Track distance	Criteria	Maximum results
Wheel reduction	4.6m	80% (0.1% frequency cumulative probability)	64.3
	4.7m		64.2
	4.8m		61.5
	4.9m		61.5
	5.0m		63.8
Lateral pressure of axle	4.6m	51.5kN	50.1
	4.7m		49.9
	4.8m		49.9
	4.9m		49.9
	5.0m		49.7
Derailment coefficient	4.6m	1.1 (0.1% frequency cumulative probability)	0.43
	4.7m		0.41
	4.8m		0.42
	4.9m		0.42
	5.0m		0.40

Table 5. Analysis results with train crossing and 30m/s wind in open field

Items	Track distance	Criteria	Maximum results
Wheel reduction	4.6m	80% (0.1% frequency cumulative probability)	95.4
	4.7m		91.6
	4.8m		89.6
	4.9m		91.4
	5.0m		90.6
Lateral pressure of axle	4.6m	51.5kN	71.1
	4.7m		68.6
	4.8m		69.4
	4.9m		68.4
	5.0m		68.4
Derailment coefficient	4.6m	1.1 (0.1% frequency cumulative probability)	0.48
	4.7m		0.48
	4.8m		0.48
	4.9m		0.48
	5.0m		0.48

을 때 운중감소율, 횡압 및 탈선계수는 허용치 이내였고, 개활지 강풍 30 m/s 및 400 km/h 주행 시 교행에 의한 외력이 있을 때 운중감소율 및 횡압은 허용치를 초과하고, 탈선계수는 허용치 이내였다. 이상의 결과로 400 km/h급 고속열차는 풍속이 20 m/s 정도까지만전하게 운행할 수 있을 것이며, 30 m/s에서는 감속 운행이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 고속열차에 풍력이나 교행 등에 의한 외력이 가해질 때 차량의 주행안정성을 해석적으로 고찰하는 방법론을 제시하였고, 향후 외력이 있는 경우의 고속열차 주행안정성을 검토하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 제시한 400 km/h로 운행하는 고속열차의 외력 및 선로중심 간격에 따른 주행안정성 자료는 향후 선로 및 고속열차 설계 시 참고로 활용할 수 있다. 또한 본 연구는 철도의 건설 기준에 관한 규정[8]의 설계 최고속도를 350 km/h에서 400 km/h 상향하기 위한 기초 연구로 진행되었으며, 규정은 성공적으로 개정되었다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-664, Technical Standards for High-speed Train(KRTS-VE-Part31-2020(R1)), <http://www.molit.go.kr/>
 - [2] S. W. Nam, "Theoretical Analysis on Overturn Safety of Train affected by Wind Pressure," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.15, No.6, pp.537-542, 2012.
 - [3] S. W. Nam, "Parametric Study of the Effects of Train on Turnover Safety," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.12, No.6, pp.961-966, 2009.
 - [4] S. W. Nam, H. B. Kwon, Y. S. Nam, "Experimental Study to Measure the Characteristics of KTX Train Win Pressure by using Field Test," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.11, No.6, pp.575-580, 2008.
 - [5] S. W. Nam, H. B. Kwon, "A Study of Aerodynamical Effects for Determining the Distance between Track Centers by using Real Train Experiment," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.10, No.5, pp.487-491, 2007.
 - [6] S. W. Nam, S. H. Yoon, "Development of Simulation Program for Pressure Transient of Railway Tunnel," *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp.154-159, 2013.
 - [7] Resonate Group Limited, VAMPIRE Pro V6.60 users' manual, 2018.
 - [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-503, Regulations on Railroad Construction Standards, <http://www.molit.go.kr/>
-
- [9] Korail, High-speed Rail Oeration and Handling Rules, 2018, <http://www.korail.com/>
-
- 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
-
- 윤 수 환(Su-Hwan Yun)

[정회원]
-
- 2005년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부(항공공학석사)
 - 2010년 8월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부(항공공학박사)
 - 2010년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- <관심분야>
- 고속열차 및 인프라 공기역학, 공력소음
-
- 김 석 원(Seog-Won Kim)

[정회원]
-
- 1989년 8월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (조선해양공학석사)
 - 2007년 2월 : 아주대학교 대학원 기계공학과 (기계공학박사)
 - 1987년 2월 ~ 1994년 2월 : 대우 조선해양 대리
 - 1994년 3월 ~ 1997년 2월 : 삼성중공업 중앙연구소 선임연구원
 - 1997년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원
- <관심분야>
- 철도차량 제동시스템, 기계공학