

고속열차 주행안전성 평가법에 대한 검증 연구

류상현^{a*}, 김상수^b, 김대식^a, 김상영^a, 홍준희^c, 이기준^c

Verification of Running Safety Evaluation Method for High-speed Railway

Sang-Hyun Ryu^{a*}, Sang-Soo Kim^b, Dae-Sik Kim^a, Sang-young Kim^a, June-Hee Hong^c, Ki-Jun Lee^c^a KORAIL Research Institute Technology Research Department, 240, Jungangro, Dong-gu Daejeon 300-720, Republic of Korea^b High-speed Railroad Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo Banagmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Republic of Korea^c Department of Mechanical Engineering, Chungnam University, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	December	2013
Revised	1	June	2014
Accepted	4	June	2014

Keywords:

High-speed train
 UIC 518 OR
 Running safety evaluation
 HEMU-430X
 Simplified method
 Running behavior

ABSTRACT

The Next-generation High-speed Rail Technology Development Project was started in 2007 by the Korean Government with the aim of developing the core technologies for a high-speed electric multiple unit (EMU) railway system. This is the first attempt to develop a high-speed EMU railway. High-speed EMU trains have superior acceleration and deceleration compared to push-pull high-speed railways such as KTX(Korean Train eXpress). A prototype train was developed and tested on a high-speed line starting in 2012. The new train must maintain running safety during the test. Generally, the international standard (UIC518) is adopted to evaluate the running safety of trains. This method suggests that the test zone must have over 25 sections, and the length of each section must be 500 m. However, it is difficult to implement these test conditions for a real high-speed line.

In this study, we analyzed the running safety using several test section lengths (100 m to 500 m) and compared the results. The results of this study will be used to establish a running safety evaluation method for high-speed EMU railways.

1. 서론

동력분산식 고속열차(HEMU-430X : High speed Electric multiple unit-430km/h experiment)는 세계 철도시장에 대응하기 위하여 차량시스템 성능확보를 목적으로 제작된 시험차량이다. 최고속도 달성을 위한 증속시험구간은 경부2단계의 울산에서 고모IEC 간이며, 증속시험결과 최고시험 속도 421.4 km/h를 달성하였다. 시험회수 57회, 누적거리 22,312 km라는 짧은 시험회수 및 주행거리

임에도 불구하고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 세계 4위에 해당되는 기록을 달성하였다. 현재 1차 증속시험을 종료하고 차량시스템 안정화를 위해 상업열차 속도를 적용하여 부산-광명 간 안정화시험을 수행 중이다.

증속시험 수행 시 다음 속도증가를 위한 조건은 동적거동(주행안전성), 승차감, 집전성능 등 성능시험항목 별 평가기준에 충족하였을 때에만 가능하기 때문에 증속단계에 따라 성능평가를 수행하였다. 차세대고속열차는 국내 최초로 기존 동력집중식 방식이 아닌 동

* Corresponding author. Tel.: +82-42-615-4721

Fax: +82-2-361-8542

E-mail address: djguy2240@hanmail.net

력분산식 방식을 적용하였고, 관절대차에서 독립대차 방식을 적용함에 따라 과거 본선에서의 성능검증 사례가 없는 국내 현설과 350 km/h 이상 속도에서의 안전성 측면을 보았을 때 열차증속에 따른 주행안전성 확보의 중요성이 부각되었다. 이에 300~350 km/h 까지 주행안전성에 대한 연구를 1차적으로 진행하였고, 350 km/h 이상 속도에서의 주행안전성 검증 연구를 지속적으로 수행한 결과 안전성 허용한계 이내를 만족하는 것으로 나타났다.^[1]

차세대고속열차의 주행안전성 평가는 국제철도연맹(UIC : International Union of Railways)에서 제정한 UIC 518 OR^[2] 기준의 가속도계를 이용한 단순방법(Simplified method)을 적용하여 평가를 수행하고 있다.

UIC 518 OR에서는 Fig. 2의 예와 같이 주행안전성평가 시 일정속도 유지일 때 구간길이 500 m씩 25개 이상 분할하여 분석한 값을 허용한계 기준 값과 비교하여 평가하도록 제시되어 있다. 그러나 증속시험 환경여건상 일정속도를 유지하는데 어려움이 있어 구간길이 100 m씩 25개 이상 분할하여 분석한 값을 허용한계 기

준 값과 비교하여 안전성평가 및 유효성을 제시한 사례가 있다.^[1,3,4] 이와 같은 분석방법은 국내 시험환경을 고려한 평가방법으로는 유효하다고 생각할 수 있으나 국제기준을 충족하기에는 미흡한 실정이다. 특히 철도시설 설계규격을 고려하였을 때 속도 350 km/h 이상 증속 시 최고속도시점 도달 후 철도시설 안전을 감안하여 감속을 해야 하는 현실적인 애로사항을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 국제기준에서 제시한 시험조건을 부합할 수 있도록 일정속도를 최대한 유지하려 노력하였고, 구간길이 100 m씩 100~500 m까지 증가시켜 분석결과 값의 상대적인 차이를 확인하여 분석방법의 유효함에 대한 의견을 제시하고자 한다. 아울러 안정화시험을 통해 최초로 동력분산식 고속열차가 상업선 부산-광명구간을 운행함에 따라 이에 대한 구간별 동적거동 특성을 파악하기 위하여 국제기준에서 제시한 구간길이 500 m씩 25개로 분할하여 분석한 결과 값이 허용한계 기준 값 이내를 만족하는지에 대한 평가를 수행하였다.

2. 주행안전성 평가 시험

2.1 시험개요

본 연구에 이용된 시험열차는 Fig. 3과 같이 제어객차인 TC (Trailer car + Controlled), 동력객차인 M1~M4 (Motor car), 제어동력차인 MC (Motor car + Controlled)로 구성된 6량 1편성으로 구성하였다. 주행안전성 분석을 위해 DYTRAN사의 가속도센서를 대차프레임과 차체 바닥에 설치하였다.

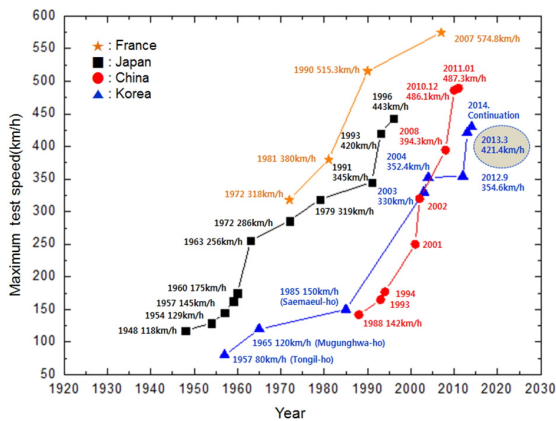


Fig. 1 Maximum test speed by country



Fig. 3 Test vehicle configuration

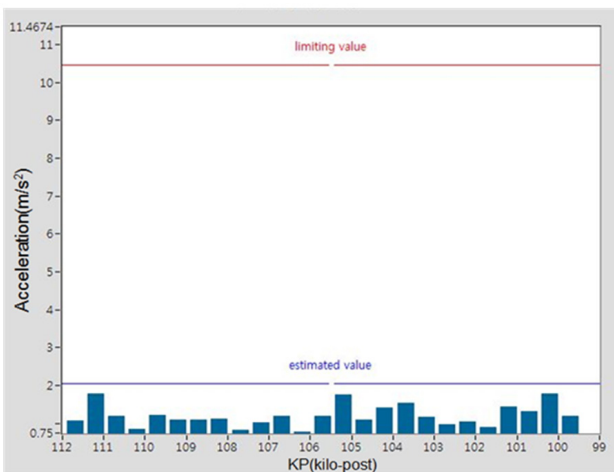


Fig. 2 Example of the UIC 518 OR analysis results

Table 1 Test sections for the UIC 518 OR analysis

KP	Maximum speed (km/h)	Minimum speed (km/h)	Average speed (km/h)
89.5-77	272.1	267.1	269.6
62.5-50	271.6	265.8	268.7
100-112.5	230.8	228.1	229.45

Table 2 Test sections for the UIC 518 OR analysis

Running a direction	Test section	Average speed(km/h)
Dongdaegu → Daejeon	KP249-236.5	267.6
Daejeon → Cheonan-Asan	KP111.7-99.2	268.1
Cheonan-Asan → Gwangmyeong	KP42-29.5	267.85
Daejeon → Dongdaegu	KP189.5-202	227.45
Dongdaegu → Busan	KP347.5-360	247

대차 및 차체의 계측데이터 수집 및 저장을 위한 모듈은 차량 간 통로에 랙 형태로 설치하였고, 계측된 데이터는 내셔널인스트루먼트(National Instruments)사의 SCXI 및 PXI를 통해 디지털로 저장되며, Sampling frequency는 1 kHz이다.^[5]

구간길이 변화에 따른 평가대상 값 분석을 위해 선정된 시험구간과 주행속도는 Table 1에서 보는 바와 같고, 주행안전성 평가를 위한 시험구간은 Table 2에서 보는 바와 같다. KP (Kilo-post)는 서울(0 km)을 기점으로 해당지점까지의 거리를 나타낸다.

2.2 데이터처리 및 분석방법

국제철도연맹에서 제정한 시험 항목은 안전성(Safety), 주행거동(Running behavior), 궤도피로(Track fatigue)로 구분된다. 안전성(Safety)은 차량의 동적거동에 대한 안전성을 평가하는 항목으로 가속도계를 이용한 단순방법(Simplified method)과 탈선계수를 이용한 정상방법(Normal method)으로 나뉜다. 주행거동(Running behavior)은 승차감 측면에서 차량의 주행특성을 평가하는 항목이다. 아울러 궤도피로(Track fatigue)는 차량 주행 중 궤도에 작용하는 부담력을 분석하여 안전성을 평가하는 항목이다. 본 연구에서는 주행안전성 평가항목 중 가속도계를 이용한 단순방법을 이용하였다.

단순방법은 대차 횡 방향 가속도, 차체의 횡·상하 방향 가속도 계측데이터를 이용하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 선정한 해당 시험구간에서의 주행안전성을 평가하는 방법이며, 데이터처리 시 필터링은 Table 3에서 보는 바와 같다.

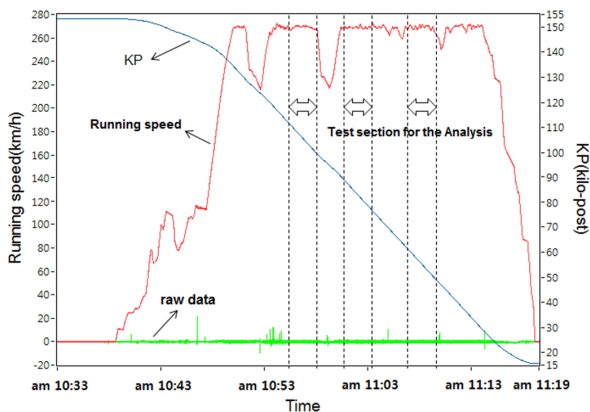


Fig. 4 Test sections for the running safety evaluation

Table 3 Method filtering for the data processing

Item	Filter
Bogie lateral acceleration	10 Hz low-pass filter
Body lateral acceleration	6 Hz low-pass filter
Body vertical acceleration	0.4 ~ 4 Hz band-pass filter

본 연구에 이용된 분석방법은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 평가를 위한 구간의 필터링 한 가속도 데이터의 값 중 상위 99.85% (F1) 혹은 하위 0.15% (F2)값 중 큰 값의 절대 값을 해당 구간의 대표 값으로 정하였다. 각 구간에서 계산된 통계 값은 전체 시험구간에서 취합하며, 취합된 값의 평균 값(X_{mean})과 표준편차(s)를 이용하여 예측 값(X_m)을 식 (1)과 같이 계산하였다. 이 예측 값을 UIC 518 OR에서 규정된 허용한계 기준 값과 비교하여 안전성을 판정하였다.

$$X_m = X_{mean} + s \cdot k \quad (1)$$

여기서 k 는 평가항목 및 가속도 특성에 따른 지수를 나타내며, UIC 518 OR의 규정에 의해 대차는 3, 차체는 2.2를 적용하였다. Table 4는 대차 횡, 차체 횡 및 상·하의 주행안전성 허용한계 기준 값을 나타낸 것이고, M_b 는 대차 질량(ton)을 의미한다. TC차량의 대차 질량은 6.407 ton, M차량(M1~MC)의 대차 질량은 7.663 ton이므로 식 (2.1)에 적용하여 계산하면 TC차량의 대차 횡 방향 가속도 허용한계 기준 값은 약 10.72 m/s^2 가 되고, M차량의 대차 횡 방향 가속도 허용한계 기준 값은 약 10.47 m/s^2 이 된다.^[6-7] 본

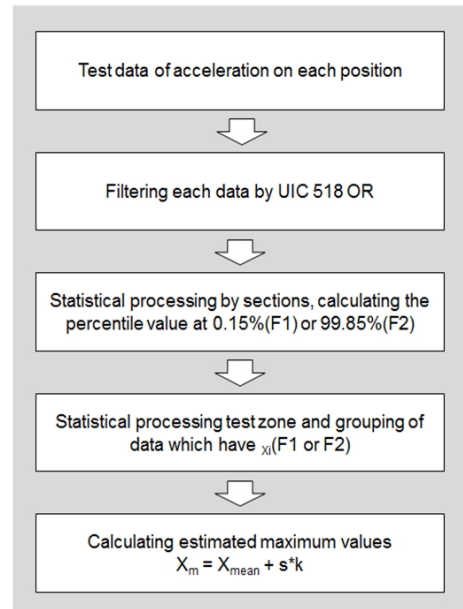


Fig. 5 The flow chart of data processing in UIC 518 OR analysis

Table 4 Limit value of the safety evaluation

Item	Limit value (m/s^2)
Bogie lateral acceleration	$12 - M_b/5$
Vehicle body lateral acceleration	3
Vehicle vertical acceleration	3

연구에서는 주행안전성 분석을 위해 최적화된 별도의 프로그램을 개발하여 이용하였다.^[8]

2.3 주행안전성 평가 시험결과

2.3.1 구간길이 변화에 따른 분석결과

구간길이 변화에 따른 평가대상 값의 경향을 파악을 위해 100 m에서 500 m까지 100 m씩 증가시켜 분석하였으며, 분석대상은 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡·상하 방향 가속도이다. 대차 횡 방향 가속도 측정대상 대차는 선두차량인 TC차량(제어차량) 방향을 기준으로 TC차량의 1번 대차(BN01 : Bogie number 01), M2차량(동력차)의 5번 대차(BN05), MC차량(동력제어차)의 12번 대차(BN12)이고, 차체 가속도 측정대상 차량은 TC차량, M2차량, MC차량이다.

해당 시험구간은 대전에서 광명 상행 시 KP89.5-77과 KP62.5-50이며, 광명에서 대전 하행 시 KP100-112.5이다. 해당 시험구간에서의 열차 각각의 평균속도는 Table 1에서 나타낸 것과 같이 KP89.5-77에서는 269.6 km/h, KP62.5-50에서는 268.7 km/h, KP100-112.5에서는 229.45 km/h였다. 각 시험구간 별 최고속도와 최저속도는 평균속도의 ± 3 km/h 이내였다. 이에 대한 시험구간 별 구간길이 변화에 따른 분석결과는 다음과 같다.

2.3.1.1 KP89.5-77 시험구간 분석

Table 5는 대전-광명 간 상행 KP89.5-77 시험구간에서의 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡·상하 방향 가속도 측정데이터에 대해 구간길이 100 m에서 500 m까지 100 m씩 증가시켜 분석한 결과를 나타낸다.

구간길이 변화에 따른 경향을 살펴보면 구간길이가 증가됨에 따라 평가대상 값이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 구간길이 변화에 따른 대차 횡 방향 가속도를 분석한 결과이다. 1번 대차 횡 방향 가속도 값은 구간길이를 100 m로 하여 분석하였을 때 4.063 m/s^2 , 구간길이를 500 m로 하여 분석하였을 때에는 4.812 m/s^2 로 나타났으며, 평가 값은 0.749 m/s^2 가 증가하였다. 대차에 대한 허용한계 기준 값은 10.72 m/s^2 으로 평가값 아래에서 안정함

Table 5 Analysis results for the section length change (KP89.5-77)

Section length (m)	Bogie lateral acc.(m/s ²)			Vehicle body lateral acc.			Vehicle body vertical acc.		
	BN01	BN05	BN12	TC	M2	MC	TC	M2	MC
100	4.063	2.918	4.780	0.683	0.928	1.835	0.688	1.196	1.180
200	4.578	3.273	5.202	0.754	1.039	1.875	0.742	1.306	1.252
300	4.697	3.429	5.420	0.799	1.083	1.922	0.773	1.384	1.324
400	4.844	3.517	5.395	0.814	1.135	1.871	0.810	1.391	1.365
500	4.812	3.621	5.449	0.826	1.089	1.924	0.826	1.379	1.406

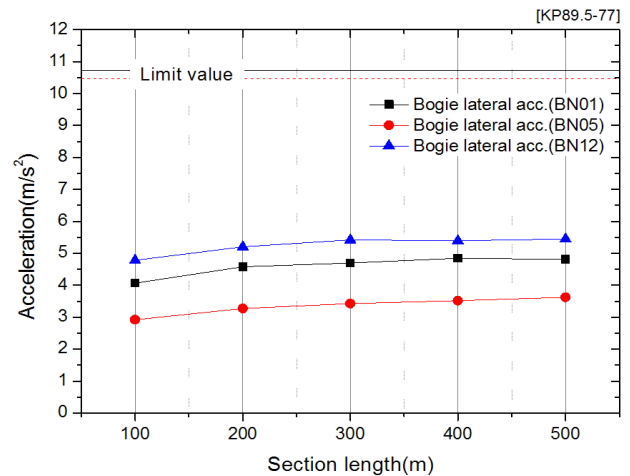


Fig. 6 Analysis results for Section length change (bogie lateral acceleration)

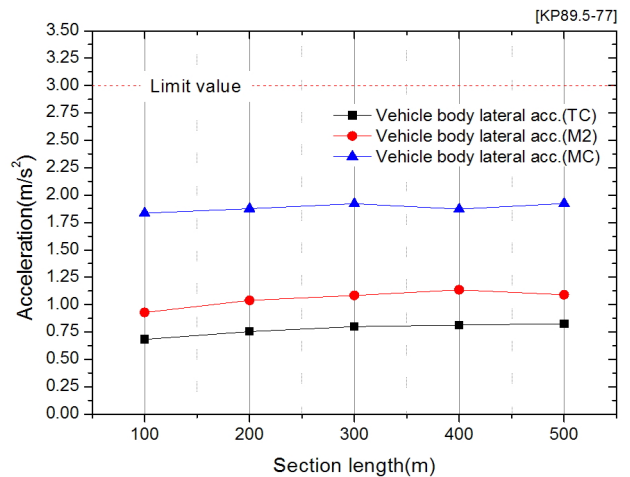


Fig. 7 Analysis results for Section length change (vehicle body lateral acceleration)

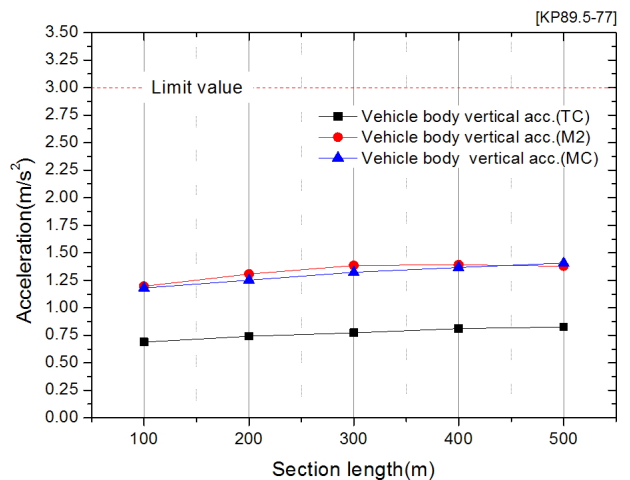


Fig. 8 Analysis results for Section length change (vehicle body vertical acceleration)

을 알 수 있다. 5번 대차의 경우, 구간길이를 100 m로 하여 분석하였을 때 2.918 m/s²로 나타났고, 구간길이를 500 m로 하여 분석하였을 때에는 3.621 m/s²로 나타났다. 또한, 12번 대차의 경우 구간길이를 100 m로 하여 분석하였을 때보다 구간길이를 500 m로 하여 분석하였을 경우 0.669 m/s² 증가함을 나타냈다.

차체 가속도에 대한 허용한계 기준 값은 3.0 m/s²이며, 차체 횡 방향 가속도 분석결과를 살펴보면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 TC차량, M2차량, MC차량에 대해 구간길이 100 m로 분석하였을 때 TC차량은 0.683 m/s², M2차량은 0.928, MC차량은 1.835 m/s²로 각각 나타났고, 구간길이 500 m로 분석하였을 때 TC차량은 0.826 m/s², M2차량은 1.089 m/s², MC차량은 1.924 m/s²로 각각 나타났다. 이에 대해 구간길이 100 m에서 500 m까지의 평가대상 값의 증가율은 TC차량은 20.94%, M2차량은 17.35%, MC차량은 4.85%이었다. 차체 상·하 방향 가속도의 경우, Fig. 8에서 보는 바와 같이 구간길이를 100 m에서 500 m로 증가시켰을 때 각 차량별로 평가값이 증가함을 알 수 있다. 구간길이 100 m에서 500 m까지의 평가대상 값의 증가율은 TC차량은 20.06%, M2차량은 15.30%, MC차량은 19.15%이었다.

KP89.5-77 시험구간에서의 전반적인 분석결과를 보았을 때 구간길이가 증가함에 평가대상 값이 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 동일한 구간에서 평가 구간길이를 늘림에 따라 분할개수 감소로 인한 통계적 편차로 인한 현상이라 추정된다. 아울러 KP89.5-77 시험구간에서의 대차 및 차체의 안전성 평가대상 값은 각각 허용한계 기준 값 이내를 만족하는 것을 확인하였다. 또한, Fig. 7-8에서 나타난 구간길이 변화에 따른 각각의 차체 횡 및 상·하 방향 가속도 분석결과, 대차 횡 방향 가속도의 분석결과와 유사한 형태 변화를 나타내었다.

2.3.1.2 KP62.5-50 시험구간 분석

Table 6은 대전-광명 간 상행 KP62.5-50 시험구간에서의 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡 방향 상·하 방향 가속도 측정데이터에 대해 구간길이 100 m에서 500 m까지 100 m씩 증가시켜 분석한 결과

를 나타낸다.

구간길이가 증가함에 따라 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡·상·하 방향 가속도 안전성 평가대상 값이 증가하는 것으로 나타났다. 대차 횡 방향 가속도에 대해 구간길이 100 m에서 500 m로 증가시켜 분석한 결과 값에 대한 증가율을 분석해보면, 1번 대차의 경우 41.38%, 5번 대차의 경우 28.50%, 12번 대차의 경우 16.48%로 나타났다.

차체 횡 방향 가속도의 경우 TC차량은 11.04%, M2차량은 24.74% 증가하는 것으로 나타났으나 MC차량은 오히려 0.28% 감소하는 것으로 나타났다.

Table 7 Analysis results for the average and corresponding standard deviation for the selected section length (Bogie lateral acceleration)

Section length (m)	Bogie number 01		Bogie number 05		Bogie number 12	
	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)
100	1.254	0.477	0.946	0.334	2.135	0.625
200	1.426	0.565	1.071	0.371	2.416	0.667
300	1.515	0.627	1.143	0.395	2.553	0.672
400	1.555	0.684	1.211	0.409	2.652	0.701
500	1.606	0.731	1.225	0.427	2.800	0.624

Table 8 Analysis results for the average and corresponding standard deviation for the selected section length (Vehicle body lateral acceleration)

Section length (m)	TC car		M2 car		MC car	
	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)
100	0.283	0.071	0.278	0.133	1.003	0.254
200	0.308	0.070	0.328	0.148	1.049	0.249
300	0.322	0.071	0.351	0.152	1.086	0.228
400	0.333	0.067	0.378	0.157	1.092	0.235
500	0.347	0.068	0.382	0.154	1.126	0.211

Table 9 Analysis results for the average and corresponding standard deviation for the selected section length (Vehicle body vertical acceleration)

Section length (m)	TC car		M2 car		MC car	
	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)	Standard deviation (m/s ²)	Average (m/s ²)
100	0.293	0.106	0.451	0.159	0.605	0.193
200	0.330	0.101	0.507	0.161	0.661	0.193
300	0.354	0.0967	0.539	0.155	0.701	0.199
400	0.362	0.103	0.563	0.156	0.746	0.180
500	0.387	0.091	0.589	0.152	0.770	0.168

Table 6 Analysis results for the section length change (KP62.5-50)

Section length (m)	Bogie lateral acc.(m/s ²)			Vehicle body lateral acc.			Vehicle body vertical acc.		
	BN01	BN05	BN12	TC	M2	MC	TC	M2	MC
100	4.063	2.918	4.780	0.683	0.928	1.835	0.688	1.196	1.180
200	4.578	3.273	5.202	0.754	1.039	1.875	0.742	1.306	1.252
300	4.697	3.429	5.420	0.799	1.083	1.922	0.773	1.384	1.324
400	4.844	3.517	5.395	0.814	1.135	1.871	0.810	1.391	1.365
500	4.812	3.621	5.449	0.826	1.089	1.924	0.826	1.379	1.406

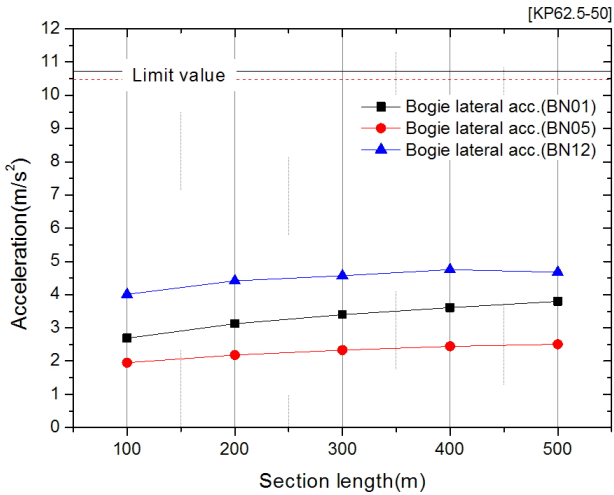


Fig. 9 Analysis results for Section length change (bogie lateral acceleration)

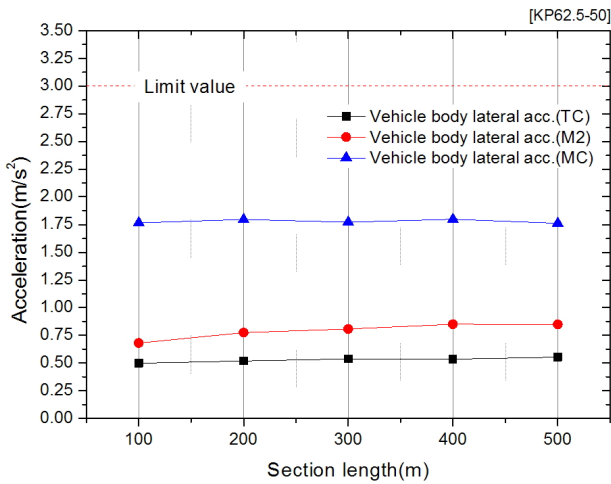


Fig. 10 Analysis results for Section length change (vehicle body lateral acceleration)

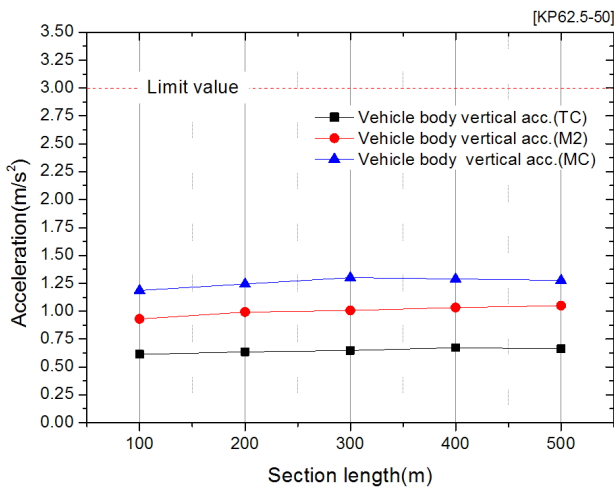


Fig. 11 Analysis results for Section length change (vehicle body vertical acceleration)

차체 상·하 방향 가속도의 경우 TC차량은 7.83%, M2차량은 12.69%, MC차량은 7.5% 증가하는 것으로 나타났다. 전반적으로 구간길이가 증가할수록 평가대상 값도 증가하는 것으로 나타났으나, M2차량 횡 방향 가속도의 경우 오히려 감소함을 보였다. 이러한 분석결과를 바탕으로 구간길이가 증가에 따라 평가대상 값이 반드시 비례적으로 증가하는 것이 아님을 추정할 수 있다. 따라서 Table 7-9에서 보는 바와 같이 구간길이가 변화에 따른 구간 평균값과 표준편차의 경향을 분석하였다.

Table 7의 대차 횡 방향 가속도에 대한 구간 평균값과 표준편차를 살펴보면, 1번 대차와 5번 대차의 구간 평균값과 표준편차는 구간길이가 증가에 따라 증가함을 나타내었다. 12번 대차의 경우 구간 평균값은 구간길이가 증가함에 따라 증가하였으나 표준편차는 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 Table 8의 차체 횡 방향 가속도의 경우에도 TC차량의 경우 4.23%, MC차량의 경우 16.93% 감소하였음을 알 수 있었다. Table 9의 차체 상·하 방향 가속도의 경우 TC차량은 14.15%, M2차량은 4.4%, MC차량은 12.95%로 표준편차가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과를 바탕으로 구간길이가 증가함에 따라 평가대상 값은 반드시 증가하지 않음을 추정할 수 있고, 평가대상 값이 증가해도 표준편차는 감소할 수 있는 것을 알 수 있었다. 아울러 표준편차가 감소해도 구간 평균값이 증가함을 나타낸 것으로 보아 구간 평균값이 평가대상 값에 대해 표준편차 보다 상대적으로 기인하는 것으로 생각된다.

또한, Fig. 9-11에서 보는 바와 같이 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡 및 상·하 방향 각각의 가속도 평가대상 값이 구간길이가 500 m로 하여 분석하여도 허용한계 기준 값 이내를 만족함을 확인하였다.

아울러 MC차량의 대차(BN12)와 차체 가속도가 TC차량과 M2차량에 비해 높은 것으로 나타났다. 이는 TC차량과 M2차량의 대차와 차체의 동적거동 성능이 MC차량에 비해 우수한 것으로 사료된다.

3. 주행안전성 분석 결과 및 예측

3.1 시험구간 별 주행안전성 분석결과

앞 절에서 사용한 주행안전성 평가법을 사용하여 Table 10에서

Table 10 Analysis results for the test sections

KP	Bogie lateral acc. (m/s ²)			Vehicle body lateral acc.			Vehicle body vertical acc.		
	BN01	BN05	BN12	TC	M2	MC	TC	M2	MC
249-236.5	5.050	2.376	4.546	0.614	0.645	1.607	0.512	0.941	0.972
111.7-99.2	3.173	2.045	3.995	0.607	0.707	1.708	0.814	1.198	1.117
42-29.5	3.983	2.521	4.239	0.623	0.880	1.372	0.762	1.243	1.121
189.5-202	3.289	2.416	6.008	0.538	0.728	0.675	0.551	0.842	0.562
347.5-360	2.505	2.038	2.953	2.323	0.862	2.022	1.023	0.986	0.653

보는 바와 같이 시험구간 및 열차주행방향을 선정하여 주행 시험을 실시하였다. Table 10의 각 시험구간에 대해 구간길이 500 m, 25 개씩 분할하여 분석한 결과 값을 허용한계 기준 값과 비교하여 안전성을 평가하였다.

시험구간 별 대차 횡 방향 가속도의 경향을 분석한 결과 본 연구에서 정한 전체 시험구간에서 5번 대차의 횡 방향 가속도 안전성 평가대상 값이 1번과 12번 대차에 비해 작게 나타났고, KP249-236.5 시험구간에서는 1번 대차의 안전성 평가대상 값이 가장 크게 나타났다.

또한, KP189.5-202 시험구간에서는 12번 대차의 안전성 평가대상 값이 가장 크게 나타났으며, 이 값은 전체 시험구간에서 가장 높은 값에 해당된다. 아울러 동일한 시험구간 조건 측면에서 분석한 결과 12번 대차의 안전성 평가대상 값이 전반적으로 크게 나타났다.

이와 같이 본 연구를 통해 5번 대차의 주행성능이 1번 12번 대차에 비해 성능이 우수하고, 12번 대차는 1번과 5번 대차에 비해 주행성능이 다소 떨어짐을 확인하였다. 따라서 12번 대차의 주행성능 확보를 위한 개선이 필요할 것이라 생각된다.

시험구간 별 차체 횡 방향 가속도의 경향을 분석한 결과 KP249-236.5, 111.7-99.2, KP42-29.5 각각의 시험구간에서는 MC차량의 차체 횡 방향 안전성 평가대상 값이 가장 크게 나타났으며, KP189.5-202 시험구간에서는 M2차량의 차체 횡 방향 안전성 평가대상 값이 TC차량과 MC차량에 비해 근소한 차이를 보였다. 차체 상·하 방향 가속도의 경우 전체 시험구간 중 KP347.5-360 시험구간에서 TC차량의 차체 상·하 방향 안전성 평가대상 값이 M2 및 MC차량과 근소한 차이를 보였으며, 이 시험구간을 제외한 시험구간에서는 TC차량의 차체 상·하 방향 안전성 평가대상 값이 가장 작게 나타났다. 이와 같이 시험구간의 선로조건, 시험시간대

의 기후 등 시험환경 여건이 다르기 때문에 평가대상 값의 차이는 있을 수 있다고 생각된다.

전체 시험구간에 대해 주행안전성 허용한계 기준 값 대비 평가대상 값 최고치를 살펴보았을 때, 대차는 안전성 허용한계 기준 값의 약 57.38% 수준이었고 차체 횡 방향은 약 77.43%, 차체 상·하 방향은 41.43% 수준으로 나타났다. 따라서 대차 및 차체 모두 허용한계 기준 값 이내를 충족하기 때문에 주행안전성 평가결과 양호한 것으로 판정하였다.

3.2 평가 구간 길이에 따른 주행안전성 예측

KP89.5-77와 KP62.5-50 시험구간에서의 평가대상 값 등에 대한 분석결과를 통해 향후 주행안전성평가 시 시험환경 여건상 요구되는 일정속도 유지 및 구간길이 500 m 기준을 충족하지 못하였을 경우를 대비하여 구간길이 100 m로 하였을 때 분석결과 값을 예측한 수준으로 증가시켜 구간길이 500 m일 때 수준의 분석결과 값에 대응할 수 있는지에 대해 검토를 수행하였다.

Table 11은 광명-대전 간 하행 KP100-112.5 시험구간에서 각각의 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡 및 상·하 방향 가속도 측정데이터에 대해 구간길이 100 m에서 500 m까지 100 m씩 증가시켜 분석한 결과를 나타낸다. 이 분석결과는 KP89.5-77와 KP62.5-50 시험구간 분석결과와 유사한 형태로 구간길이가 증가함에 따라 평가대상 값도 전반적으로 증가함을 나타내었다.

앞 절에서 분석한 KP89.5-77 및 KP89.5-77 시험구간에서 구간길이 100 m에서 500 m로 증가하였을 때의 증가율에 대해 최고치와 최저치를 제외한 평균치 약 22%를 KP100-112.5 시험구간에서의 구간길이 100 m로 분석한 결과 값에 적용하여 예측 값을 구하고 구간길이 500 m로 분석한 결과 값과 비교하였다.

Table 12는 이에 대한 예측 값을 나타낸 것이고 구간길이 500 m로 분석한 결과 값을 비교해 보면, M2차량과 MC차량의 차체 횡 및 상·하 방향 가속도 예측 값은 구간길이 500 m로 분석한 결과 값보다 다소 작게 나타났으며, TC차량의 경우 약간 크게 나타났다. 이러한 예측 값은 구간길이 500 m로 분석한 결과 값의 약 ± 5% 이내 수준임을 확인하였다. 대차 횡 방향 가속도의 경우 1번 대차는 22.46%, 5번 대차는 18.89%, 12번 대차는 23.27%로 예측 값이 구간길이 500 m로 분석한 결과 값보다 작게 나타났다. 이는 구간길이를 500 m로 하였을 때의 분석결과 값이 구간길이 100 m일 때 보다 45-50% 큰 수준인 것을 알 수 있다.

이와 같이 차체 가속도보다 대차 횡 방향 가속도의 예측 오차율이 더욱 크게 나타났다. 시험구간, 선로상태, 기후 등 서로 다른 여러 변수들이 주행조건에 작용하는 만큼 이를 예측하기가 쉽지는 않다. 따라서 일정한 속도유지가 어렵더라도 구간길이 500 m씩 25개 이상 분할하여 분석하고 평가하는 것이 유효하다 판단된다.

Table 11 Analysis results for the section length change (KP100-112.5)

Section length (m)	Bogie lateral acc.(m/s ²)			Vehicle body lateral acc.			Vehicle body vertical acc.		
	BN01	BN05	BN12	TC	M2	MC	TC	M2	MC
100	3.186	2.011	3.181	0.512	0.569	0.490	0.550	0.837	0.599
200	3.829	2.377	3.802	0.545	0.671	0.542	0.601	0.919	0.663
300	4.258	2.628	4.219	0.584	0.688	0.566	0.602	0.970	0.713
400	4.512	2.751	4.547	0.582	0.725	0.579	0.635	1.000	0.734
500	4.760	2.917	4.784	0.598	0.740	0.614	0.650	1.063	0.762

Table 12 Estimate analysis results for the apply of the average increase rate (22%)

Bogie lateral acc.(m/s ²)			Vehicle body lateral acc.			Vehicle body vertical acc.		
BN01	BN05	BN12	TC	M2	MC	TC	M2	MC
3.886	2.453	3.880	0.624	0.694	0.597	0.671	1.021	0.730

4. 결론

본 연구에서는 국제기준(UIC 518 OR)의 단순방법을 이용하여 별도로 선정한 시험구간에서의 대차 횡 방향 가속도, 차체 횡 및 상·하 방향 가속도 데이터에 대해 구간길이 100-500 m까지 100씩 증가시켜 각 구간의 평가대상 값과 구간 평균값, 표준편차의 변화되는 경향을 비교하여 분석하였다. 아울러 선정한 시험구간에 대해 구간길이 500 m로 분석하여 주행안전성 허용한계 기준 값 이내를 만족하는지에 대한 평가를 수행하였다.

- (1) 구간길이 100-500 m까지 100 m씩 증가시켜 분석한 결과 구간길이가 증가할수록 전반적으로 평가대상 값이 다소 증가함을 확인하였다
- (2) KP100-112.5 시험구간에서 구간길이 100 m로 분석한 평가대상 값에 약 22%를 증가시킨 예측 값을 구간길이 500 m로 분석한 평가대상 값과 비교한 결과 차체보다 대차의 경우 오차가 증가하였다. 이에 일정속도 유지조건을 충분히 만족하지 못할 시에도 구간길이 500 m로 분석하는 것이 유효할 것으로 사려 된다.
- (3) 국제기준 충족을 위해 일정속도를 최대한 유지하였고, 구간길이 500 m, 25개씩 분할하여 분석한 결과 해당 시험구간에서의 주행안전성은 모두 허용한계 기준 값 이내를 충족하였다.

본 연구는 국내 시험환경 여건상 국제기준 적용에 다소 어려움이 있는 현실적인 사항을 고려한 실제 선로에서의 기초연구라 할 수 있다. 국제기준의 주행안전성 평가의 허용한계 기준 값은 국외에서 수많은 시간과 경험치 등을 바탕으로 탈선 등의 안전사고를 예방하기 위해 정해놓은 것이다. 따라서 수치적으로 정해 놓은 기준에 최대한 만족할 수 있는 시험조건 적용이 필요하며, 국내 시험환경을 고려한 자체적인 평가기준(안) 마련도 구체화 할 필요성이 있으며, 이를 위하여 본 연구결과는 주요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사려 된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업(430 km/h급 고속열차 실용화 기술개발) 연구비 지원으로 수행하였습니다. 이에 감사를 표하는 바입니다.

References

- [1] Ryu, S. H., Kim, S-S., Hong, J. H., Song, D. S., Guo, Y. Y., 2013, A Study on the Safety Evaluation of HEMU-430X's Dynamic Behavior using an Accelerometer, Journal of Korean Society for Railway 16:1 32-39.
- [2] UIC, 2005, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-Safety-Track fatigue-Ride quality, UIC Code 518 OR, International Union of Railway, Europe.
- [3] Park, C. K., Kim, K. H., Mok, J. Y., Kim, Y. K., Kim, S. W., 2005, Analysis of the Dynamic Vibration for Korean High Speed Train at Speed 350Km/h, Conference Proceedings of KSR 136-141
- [4] Park, C. K., Kim, K. H., Kim, Y. K., Kim, S. W., Mok, J. Y., 2006, Estimation of the Dynamic Behavior for Korean High Speed Train at 350km/h using the Accelerations according to the UIC Code 518 OR, J. KSR 9:5 342-347.
- [5] Lee, Y. Y., Ryu, S. H., Lee, J. O., 2009, A Study on Overall Measurement System of HEMU, Conference Proceedings of KSR 1785-1790.
- [6] Kim, S. S., Ryu, S. H., Jeon, C. S., Oh, H. K., Park, C. S., 2013, Running Safety Assessment of Korea Next-generation High-speed Train, Proceedings of APVC.
- [7] Ryu, S. H., 2013, Safety Evaluation of Dynamic Behavior for the Development of the High-Speed EMU(Electric Multiple Unit), A Thesis for a Doctorate, Chungnam University, Republic of Korea.
- [8] Ryu, S. H., Hong, J. H., Oh, K. H., 2013, A Study on measuring system development for HEMU-430X performance test(II) - software, Conference Proceedings of KSMTE 299-299.
- [9] Cho, J., Han, M., 2012, Structural Analysis on the Wheel of Railway Vehicle, J. KSMTE 21:3 451-458.