

# 고속열차의 주행동특성 개선에 관한 연구

전창성

한국철도기술연구원 고속열차연구팀

## A study on the Dynamic Behavior Enhancement of the Korean High-speed Train

Chang-Sung Jeon

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

**요약** 본 연구는 고속열차 시운전 시험과 이에 따른 주행동특성 고찰 및 개선에 관한 것이다. 고속열차 시운전 시험을 통한 선형 연구에서 도출한 요댐퍼 설치 방법에 따른 후미 진동 개선 방안을 실제 고속철도 차량의 시운전시에 적용하여 후미 진동 저감 효과가 있음을 확인하였다. 또한 전체 차량에 대한 진동저감 방안을 동역학 해석 소프트웨어를 사용하여 수치 해석적 방법으로 도출하였으며, 그 효과를 시운전 시험을 통하여 확인하였다. 개선된 설계안은 실제 2층 고속열차 객차에 적용되어 주행동특성 문제없이 시운전을 진행하였다. 차세대 고속열차 임계속도에 영향을 미치는 현가장치 파라미터들에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 임계속도에 크게 영향을 미치는 4개의 설계변수를 도출하였는데, 이는 1차 탄성조인트 열차진행 방향 강성, 2차 요댐퍼 시리즈 강성, 2차 횡댐퍼 댐핑계수, 차간 댐퍼 댐핑계수 순이었다. 이 설계변수에 대한 최적화를 통하여 임계속도를 23.3% 향상시키는 현가장치 파라미터를 제시하였으며, 이는 차세대 고속열차 상용화 모델의 설계에 이용될 수 있다.

**Abstract** This paper describes the dynamic behavior and enhancement of Korean high-speed trains. The tail vibration reduction method of the yaw damper installation method change, which was derived from previous research, was applied to the running test of high-speed train. In addition, the vibration reduction method for the entire vehicle was derived by a numerical method and its effect was confirmed by a running test. The improved design was applied to the double-deck high-speed train coaches and the commissioning proceeded without problems in dynamic behavior. Sensitivity analysis of the suspension parameters affecting the critical speed of Korean next-generation high-speed trains was performed and four design variables that greatly affected the critical speed were derived. These were in the order of the primary elastic joint x-directional stiffness, the secondary yaw damper series stiffness, the secondary lateral damper damping coefficient, and the carbody damper damping coefficient. By optimizing the design variables, the suspension parameter that improves the critical speed by 23.3% can be used in the commercial designs of Korean next-generation high-speed trains.

**Keywords** : Critical speed, High-speed train, Optimization, Tail vibration, Yaw damper

### 1. 서론

국내 고속열차 KTX의 300km/h 성공적인 영업 운행에 힘입어 속도향상의 필요성이 대두되었고, 2007년부터 차세대 고속열차 시제차량(HEMU-430X)의 개발이

시작되었다. HEMU-430X는 6량 1편성의 시제차량이 정부 주도로 개발되어 경부고속철도(광명~부산) 및 호남고속철도(오송~광주송정) 구간에서 시운전이 진행되었다. 2013년 3월 28일 최고속도 421.4km/h를 달성하였으며, 2017년 8월까지 13만km의 누적주행거리를 기록 중

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(16RTRP-B067706-04)으로 수행되었음.

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

Tel: +82-31-460-5508 email: csjeon@krii.re.kr

Received September 8, 2017

Revised (1st October 10, 2017, 2nd October 12, 2017)

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

이다. 현재는 국가 R&D 사업인 일반 고속철도용 무선통신 및 제어시스템(KRTCS) 실용화 과제와 고속 궤도검측시스템 개발을 위한 시운전 차량으로 활용 중이다. 기존 KTX 및 KTX-산천이 동력차와 객차로 구분되는 동력 집중식 차량이라면 차세대 고속열차는 동력 분산형 추진시스템을 적용하여 기존 KTX에 비해 300km/h까지 도달시간을 2분정도 단축할 수 있어, 역이 많은 우리나라 지형에 더 유리한 차량이라고 할 수 있다[1].

HEMU-430X의 주행동특성에 관해서 다양한 연구들이 수행되었는데, Back[2]등은 승차감 향상을 위하여 진동에 영향을 미치는 여러 가지 설계 인자들을 도출하였다. Park[3]등은 1차 현가장치의 탄성계수가 6량 편성의 HEMU-430X의 주행안정성에 큰 영향을 미치며, 6량 편성시 고려사항이 되었던 연결부(Hook Joint)나 측면버퍼(Side Buffer)의 특성은 안정성에 영향이 없음을 보고하였다. Park[4]등은 HEMU-430X를 400km/h로 시험주행 가능하게 하기 위하여 468km/h 속도 대역에서의 동적거동 및 안정성을 분석하였다. 또한 2차 현가장치의 비선형 특성치를 고려하여 곡선 주행시의 가속도를 최소화할 수 있는 설계 특성을 도출하였다. Sim[5]등은 HEMU-430X의 차량-궤도안전성을 UIC CODE 518 OR[6]에 따라 평가하였는데, 최고속도에서 탈선계수와 횡압이 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

HEMU-430X의 후미진동에 대해서는 본 저자 등의 선행연구가 진행되었다. Jeon[7]등은 HEMU-430X의 시운전을 진행하기 전 동역학 해석 소프트웨어인 VAMPIRE[8]를 이용한 수치해석을 통하여 전두부 유선형 형상유지를 위하여 설치된 한방향 요댐퍼 때문에 후미진동이 예상되었고, 이를 해결하기 위한 다양한 방안을 제시하였다. 실제 시운전시 150km/h 속도에서 후미진동이 발생하였고, 요댐퍼를 양방향으로 바꾸었을 때 후미진동이 사라지고 300km/h까지 시운전을 진행하였다. Jeon[9]등은 HEMU-430X 증속 시운전시험 시의 주행거동에 대해 EN 14363[10]에 따라 평가하였으며, 안전성 기준을 만족함을 확인하였다. 시운전시 후미진동은 150, 350, 387km/h에서 발생하였으며, 각각 요댐퍼 방향 변경, 차간 댐퍼 설치, 요댐퍼 댐핑계수 증가 등으로 후미진동을 감소시켰다. HEMU-430X의 누적주행거리가 늘어남에 따라 후미진동이 발생하는 속도는 점점 낮아졌다. 이는 요댐퍼 설치 각도에 따른 과도한 횡방향 댐핑 때문으로 사료되었고, 일부 요댐퍼를 제거하는 방안

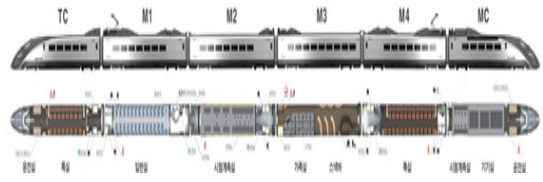


Fig. 1. HEMU-430X Configuration

을 제안하였다.

본 연구에서는 선행연구[9]에서 제안한 방법을 실제 적용한 시운전 시험결과에 대해 검토하고, 후미진동 뿐만 아니라 전체 차량의 진동수준을 분석하고, 이를 향상시킬 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 또한 향후 상용화 모델에 적용할 수 있도록 현가장치 최적화를 통하여 임계속도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 시운전 시험결과고 고찰

HEMU-430X는 6량 1편성의 동력 분산형 고속열차 시제차량으로 Fig. 1과 같이 TC(Tailer Controlled, 운전실이 있는 제어 객차)+4M(Motor Car, 동력객차, M1~M4)+MC(Motor Car Controlled, 운전실이 있는 동력차)로 구성되어 있다. 대차는 제어객차(TC)용 부수대차(Tailer Bogie) 2대, 동력객차 및 제어동력차(M, MC)용 동력대차(Motor Bogie) 10대로 이루어진다.

HEMU-430X는 12만km의 안정화 시운전 이후 일반 고속철도용 무선통신 및 제어시스템(KRTCS) 실용화 과제와 고속 궤도검측시스템 개발을 위한 시운전 차량으로 사용하기 위해 개조작업이 진행되었다. TC차량에는 고속 궤도검측시스템(4톤)이 장착되었고, 중량이 MC차량(43톤)과 유사한 42톤이 되었다. M4 차량에는 KRTCS 시스템이 장착되었으나, 이를 위해 기존 의자를 제거하여 중량은 비슷하게 유지되었다.

선행연구[9]에서 TC 방향을 선두로 운행했을 때 후미 MC차량에서 발생한 횡진동은 차체현팅으로 사료되었다. 참고문헌[11]에서 차체현팅을 피하기 위해서는 차체와 대차를 연결하는 횡방향 강성(Lateral stiffness)과 감쇠력(Lateral damping)이 너무 과하지 않게 설정되어야 한다고 하였다. 이 부분에 착안하여 HEMU-430X의 횡방향 감쇠력을 고려하였다. HEMU-430X는 차체의 폭이 대차의 폭보다 넓기 때문에 요댐퍼를 Fig. 2와 같이 약

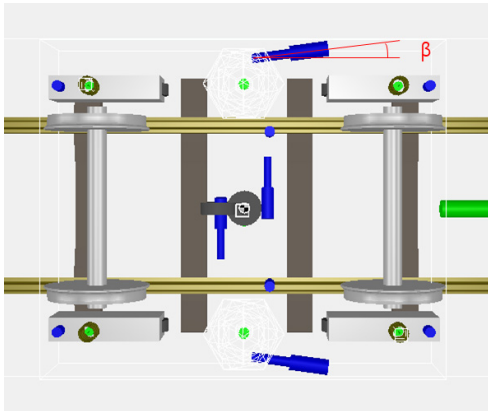


Fig. 2. Anti-yaw damper angle

$\beta = 7.35^\circ$ 의 각도를 두고 설치하였다. 이는 요댐퍼 댐핑계수의 횡방향 성분 ( $\sin\beta$ )만큼 횡방향 댐핑계수 ( $2 \times 0.02$ (횡방향 댐핑계수) +  $0.07$ (요댐퍼의 횡방향 댐핑성분)  $Ns/m$ )를 증가시키게 되고, 이로 인하여 후미진동이 발생하는 것으로 예상되었다. 이에 요댐퍼 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 로 바꾸면 임계속도(Critical speed)가 상승하여 후미진동이 저감될 수 있음을 이전 연구[9]에서 해석적 방법으로 보였고, 그 이유를 동역학적으로 고찰하였다.

본 연구에서 요댐퍼 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 로 만들기 위하여 MC 차량의 대차에 설치하는 요댐퍼 브라켓을 재설계하여 Fig. 3과 같이 차량에 설치하였다. 이후 시운전 시험을 진행하였고, MC 차량의 후미진동 발생 상황은 Fig. 4의 XP55 휠 프로파일(★)과 같다. 요댐퍼 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 으로 만든 후 후미진동 발생속도는 조금씩 증가하다가, 300km/h 이상 속도의 시운전에서도 후미진동이 발생하지 않았다. 이를 통해 선행연구[9]에서 예측했던 후미진동 저감 방법이 효과가 있음을 실험적으로 확인하였다.

Fig. 4에는 선행연구[9]의 결과도 같이 포함되어 있는데, HEMU-430X의 시운전은 최고속도를 위한 증속시험



Fig. 3. Yaw damper installation change

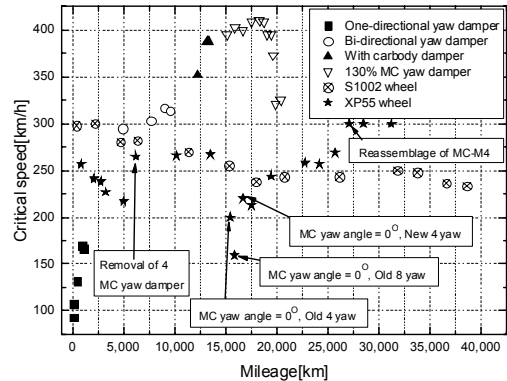


Fig. 4. Critical speed as a function of mileage

과 300km/h에서 차량의 안정성시험이 있다. 초기에 HEMU-430X는 유선형 전두부를 유지하기 위하여 차량 양끝단 대차에 한쪽방향의 댐퍼를, 나머지는 양쪽방향의 댐퍼를 설치하였고, 증속시험 전 해석을 통하여 후미진동이 예측되었고, 한방향 댐퍼를 양방향으로 바꾸었을 때 후미진동이 사라짐을 예측하였다[7]. 실제 증속시험 시 후미진동이 90km/h와 170km/h에서 나타났으며(Fig. 4의 One-directional yaw damper), 한방향 댐퍼를 양방향으로 바꾸었을 때 300km/h까지 후미진동이 없었다. 300~320km/h에서 다시 후미진동이 발생하였는데 차간 댐퍼를 설치하면서 사라졌고(Fig. 4의 Bi-directional yaw damper), 350~387km/h의 후미진동은 해석적 방법으로 제안된 MC차량의 요댐퍼 댐핑계수를 130% 증가시키면서 사라졌다(Fig. 4의 With carbody damper). 이후 421.4km/h의 최고속도를 달성한 이후 차륜 마모 및 또 다른 이유로 후미진동이 나타나는 속도는 감소하면서 증속시험은 종료되었다(Fig. 4의 130% MC yaw damper). HEMU-430X의 초기 휠프로파일은 S1002 (1/40)이고, 증속시험 이후 300km/h 속도의 안정화시험을 위해 휠 삭정을 실시하였고, 초기에는 후미진동이 없었다. 이후 차륜마모가 진행됨에 따라 후미진동이 발생하는 속도는 낮아졌다(Fig. 4의 S1002 wheel). 해석을 통하여 휠 프로파일을 XP55(1/20)으로 바꾸었을 때 철도차량이 불안정해지는 임계속도가 S1002보다 더 높게 예측되어 차량에 적용하였으나, 큰 효과가 없었다. 이후 과도한 횡방향 감쇄력이 임계속도를 저하시키는 것으로 예상되어, MC 차량의 요댐퍼 제거(Fig. 4의 Removal of 4 MC yaw damper) 및 설치각도를 조정하는 연구를 수행하였다(Fig. 4의 XP55 wheel). MC 차량의 요댐퍼 개

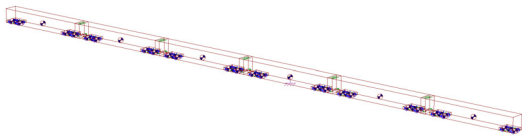


Fig. 5. HEMU-430X model

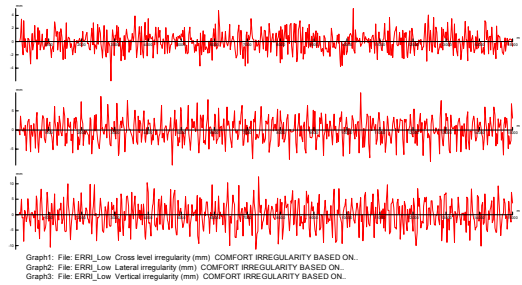


Fig. 6. Track irregularity for high-speed rail(ERRI\_Low)

수는 4개, 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 일 때 후미진동 발생속도는 서서히 증가하다가 MC, M4차량 중점검 및 대차 재조립 (Reassemble of MC-M4)이후 300km/h 속도에서 후미진동이 사라졌다.

2.2 전체차량의 진동저감

HEMU-430X의 KRTCS 시험을 위해 MC 차량을 선두방향으로 운행하였을 때, 무거워진 TC 차량 때문에 앞결과 동일한 후미진동이 TC차량에서 발생하였다. 이를 고찰하기 위해 VAMPIRE[8]를 이용한 동역학 모델을 Fig. 5와 같이 구성하였다. 선로불규칙도는 Fig. 6과 같이 VAMPIRE[8]에서 제공하는 고속선에서 많이 사용하는 직선 15km 구간(ERRI\_Low)의 불규칙도를 이용하였다. 차륜 프로파일은 HEMU-430X 12번 대차에서 삭정 후 37,370km 주행한 마모된 XP55(1/20) 프로파일을, 선로 프로파일은 경부고속철도 상행 KP(Kilometer Point) 38.4지점에서 측정된 값을 이용하였다.

동역학 해석은 Table 1의 세 가지 경우에 대하여 실시하였다. 먼저 HEMU-430X 현재 요댐퍼 설치 상태인

Table 1. Simulation Cases

Indices	Yaw damper formation			
	TC~M4		MC	
	Number	Angle	Number	Angle
Case 1	8	7.35°	4	0°
Case 2	4	7.35°	4	0°
Case 3	4	0°	4	0°

Table 2. Simulation results

Indices		Acceleration RMS[m/s <sup>2</sup> ]				
		Case 1		Case 2		Case 3
		RMS	RMS	[%]	RMS	[%]
Lateral	MC	0.148	0.138	6.8	0.132	4.3
	M4	0.257	0.174	32.3	0.187	-7.5
	M3	0.327	0.235	28.1	0.231	1.7
	M2	0.300	0.257	14.3	0.222	13.6
	M1	0.221	0.221	0.0	0.178	19.5
	TC	0.195	0.189	3.1	0.169	10.6
	Avg.	-	-	14.1	-	7.0
Vertical	MC	0.184	0.184	-	0.184	-
	M4	0.228	0.228	-	0.229	-
	M3	0.185	0.186	-	0.187	-
	M2	0.180	0.179	-	0.180	-
	M1	0.178	0.178	-	0.179	-
	TC	0.199	0.199	-	0.200	-

데, TC~M4 차량은 Fig. 7과 같이 요댐퍼가 양방향으로 8개 설치되어 있고, MC 차량은 가운데 4개가 제거되고 요댐퍼 설치각도가  $\beta = 0^\circ$ 이다(Case 1). 두 번째는 TC~M4 차량의 가운데 요댐퍼 4개가 제거된 상태로, 요댐퍼 설치각도는  $\beta = 7.35^\circ$ 이고(Case 2), 마지막으로 이 상태에서 요댐퍼 설치각도를  $\beta = 0^\circ$ 로 설치한 경우이다(Case 3). 위 세가지 경우에 대해 동역학 해석을 수행하고, 각 차량의 가속도 RMS(Root Mean Square)값을 Table 2에 나타내었다. 현재 상태인 Case 1에 비해 TC~M4 차량의 가운데 요댐퍼 4개를 제거할 경우(Case 2), 전체 차량의 횡방향가속도가 저감되고, 그 값의 Case 1에 비해 평균 14.1% 정도 개선되었다. 이는 Fig. 7에서 8개의 요댐퍼가 있을 경우 차체 요방향 운동을 제대로 억제하고 있지 못한 상태이며, 가운데 4개를 제거했을 때 차체 요방향 운동에 대한 댐핑기능이 제대로 작동하고 있기 때문으로 사료된다. 이 상태에서 요댐퍼 설치각도를  $\beta = 0^\circ$ 으로 변경할 경우(Case 3), 차체 횡방향가속도가 Case 2에 비해 평균 7%정도 더 개선될 수 있음을 해석적으로 예측하였다. 이는 횡방향 감쇄력 감소에 의한 차체현팅 감소로 사료된다. Table 2에서 상하방향

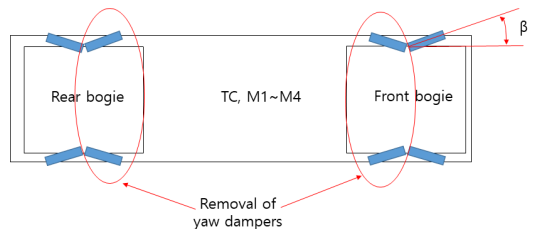


Fig. 7. Removal of yaw dampers

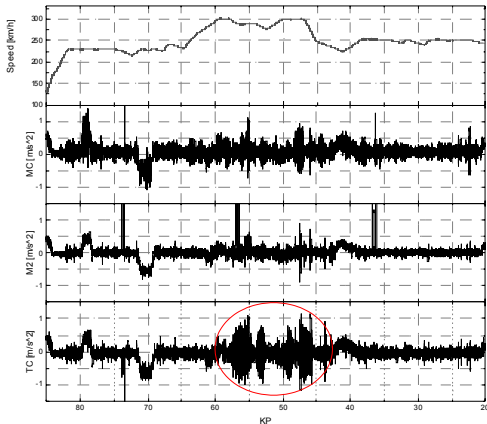


Fig. 8. Lateral acceleration of carbody(8 yaw dampers)

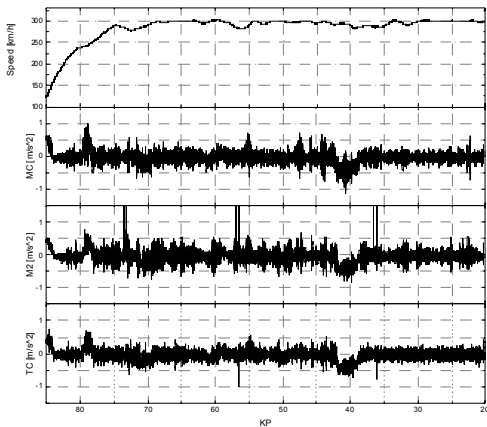


Fig. 9. Lateral acceleration of carbody(4 yaw dampers)

가속도의 경우 요댐퍼 설치 형태의 변경에 따라 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

상기의 해석을 통해 도출된 진동저감 방안의 일부를 HEMU-430X에 적용하여 시운전 시험을 진행하였다. 시운전은 호남고속철도 상행선 광주송정역~오송역 구간에서 최고속도 300~350km/h로 진행되었다. Fig. 8은 TC~M4 차량의 요댐퍼가 8개인 상태(Case 1)로 익산~오송구간을 최고속도 300km/h로 주행할 때의 MC, M2, TC 차량의 차체 횡방향가속도 그래프이다. TC 차량의 경우 270km/h 이상에서 후미진동에 의해 횡가속도가 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 동일 구간을 TC~M4 차량의 요댐퍼를 Fig. 7과 같이 4개씩 제거한 상태(Case 2)에서 운행한 결과이다. 300km/h 주행시 TC 차량의 후미진동이 없어져 횡방향가속도가 양호함을 알 수 있다.

Table 3. Running test results

Indices		Acceleration RMS[m/s <sup>2</sup> ]		
		Case 1		Case 2
		RMS	RMS	[%]
Lateral	MC	0.488	0.322	34.0
	M4	0.273	0.134	51.1
	M3	0.283	0.457	-61.4
	M2	0.356	0.369	-3.6
	M1	0.276	0.314	-14.0
	TC	0.667	0.178	73.3
	Avg.	-	-	13.1
Vertica l	MC	0.249	0.246	-
	M4	0.197	0.196	-
	M3	0.330	0.335	-
	M2	0.188	0.201	-
	M1	0.205	0.208	-
	TC	0.310	0.249	-

Table 3은 Fig. 8과 9의 데이터 중 KP 50~47(공주역 부근) 3km구간의 차체 가속도데이터를 EN14363 [10]의 주행거동에 따라 분석한 결과이다. TC 차량의 횡방향가속도의 경우 후미진동 유무에 따라 0.667m/s<sup>2</sup>에서 0.178m/s<sup>2</sup> 까지 감소함을 알 수 있다. 횡방향 가속도는 전체적으로 13.1% 정도 감소하며, M1~M3차량은 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 이는 전체 차량의 요댐퍼 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 로 할 경우(Case 3) 횡진동이 감소할 것으로 예상된다. 이상의 시험 결과는 선행연구[9]의 결과와 같이 과도한 횡방향 감쇄력이 차체현팅을 일으키고, 이를 적절히 조정하면 차체현팅을 제어할 수 있음을 보여준다. 차체 상하방향 가속도의 경우 수치해석 결과와 유사하게 크게 변화는 없으나, TC차량의 경우 후미진동의 감소에 따른 영향으로 상하방향 가속도도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 현재 전체 차량의 요댐퍼 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 를 만들기 위하여 대차 브라켓을 추가 제작 중이며, HEMU-430X에 적용하여 진동저감 효과를 확인할 예정이다.

이상의 연구결과는 Fig. 10과 같이 실제 2층 고속열차 객차 2량의 설계에 반영되어 전체 8량 차량 중에서 2층 고속열차 객차 2량의 요댐퍼 4개를 설치각도  $\beta = 0^\circ$ 로 설치하였다. 이후 HEMU-430X 6량(전체 요댐퍼 4개 및 TC~M4 :  $\beta = 7.35^\circ$ , MC :  $\beta = 0^\circ$ )에 2층 고속열차 객차 2량을 추가한 8량 1편성 차량(TC-M1-M2-DT1 (Double Deck Trailer 1)-DT2-M3-M4-MC)은 300km/h 속도까지 차체 횡방향가속도에 문제없이 시운전을 진행하였다.



Fig. 10. Double deck high-speed train

### 2.3 임계속도 향상을 통한 주행동특성 개선

임계속도(Critical speed)는 열차가 불안정해지는 속도이며, 차륜 마모에 따라 감소하는 경향을 보인다[12]. 임계속도를 향상시키면 누적주행거리에 따른 차륜 마모 시에도 주행안정성을 유지할 수 있다. HEMU-430X의 임계속도를 더 향상시키기 위하여 현가장치 파라미터 최적화를 실시하였다. 이는 상용화 모델 설계에 이용될 수 있으며, 최적화 방법론은 이전 연구[12]에서 사용된 방법을 적용하였다. 현가장치 특성치에 대한 민감도 분석을 위하여 Plackett- Burman design[13]을 이용하여 실험계획 및 해석을 수행하였다. 상대적으로 중요한 것으로 판단되는 9개 변수를 선정하고, 목적함수는 차량의 임계속도로 하여 민감도 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 민감도 해석 결과 1차 탄성조인트 x방향 강성( $x_1$ ), 2차 요댐퍼 시리즈 강성( $x_6$ ), 2차 횡댐퍼 댐핑 계수( $x_4$ ), 차간 댐퍼 댐핑계수( $x_8$ ) 순으로 민감도가 큰 것을 알 수 있다. 앞의 민감도 분석에서 영향이 큰 상위 4개 인자에 대해 차륜 마모상태일 때의 임계속도를 향상시키기 위하여 마모된 S1002 차륜프로파일을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 4개의 설계변수에 대한 중심합성 실험 계획표[14]와 반응표면 분석법[15]에 의해 2차 회귀 모형 함수를 추정하였으며, Sequential Quadratic Programming(SQP) 방법[16]을 사용하여 목적 함수를 최소화시키는 설계 변수 값을 도출하였고 이를 Fig. 12에 나타내었다.

최적화 결과 임계속도는 23.3% 정도 향상되는 결과를 보였고, 이때의 현가장치 특성치는 HEMU-430X의 상용화 모델의 설계에 이용될 수 있다.

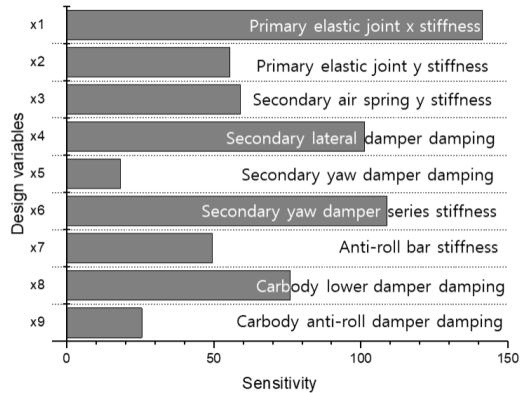


Fig. 11. Sensitivity analysis result

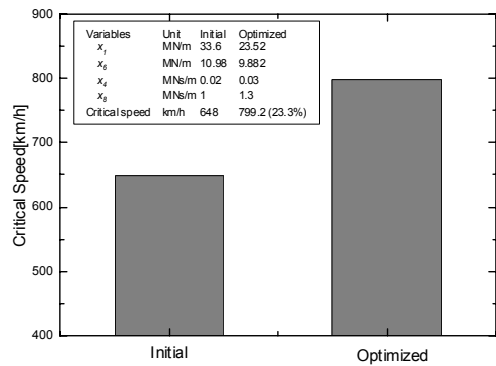


Fig. 12. Optimization result

## 3. 결론

본 연구는 고속열차 주행동특성을 개선하기 위하여 진행되었다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 선행연구를 통하여 도출한 요댐퍼 설치 방법에 따른 후미진동 개선안을 실제 차량의 시운전시에 적용하여 후미 진동저감 효과가 있음을 확인하였다. 또한 전체차량에 대한 진동저감 방안을 수치 해석적 방법으로 도출하였으며, 그 중 일부의 효과를 시운전을 통하여 확인하였다. 개선된 설계 방안은 실제 2층 고속열차 객차에 적용되어 주행동특성 문제없이 시운전을 진행하였다.
2. 차세대 고속열차 임계속도에 영향을 미치는 현가장치 파라미터들에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 1차 탄성조인트 x방향 강성, 2차 요댐퍼 시리즈 강성, 2차 횡댐퍼 댐핑 계수, 차간 댐퍼 댐핑 계수 순으로 임계속도에 크게 영향을 주었다. 이

설계 변수들에 대한 최적화를 통하여 임계속도를 향상시키는 방안을 제시하였으며, 초기상태보다 23.3% 정도 임계속도가 증가함을 확인하였다. 최적화된 현가장치 파라미터는 차세대 고속열차 상용화 모델의 설계에 이용될 수 있다.

## References

[1] S. W. Kim, C. S. Park, S.Y. Kwon et al., "Research on Commissioning Test of 430km/h High-speed Train," Infrastructure R&D Report 15PRTD-B063984-04, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015.

[2] S. G. Baek, R. M. Lee, B. S. Shin et al., "Vibration Reduction of the High-speed EMU for Improvement of Ride Comfort," *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp. 1435-1440, 2008.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.  
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.343>

[6] 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.

[7] C. S. Jeon, Y. G. Kim, S. W. Kim et al., "A Study on Tail Vibration Reduction for the Next Generation High Speed EMU," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 15, no. 6, pp. 543-549, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.543>

[8] Resonate Group Limited. VAMPIRE Pro V6.40 users' manual, 2017.

[9] 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>

[10] EN 14363 : 2005. Railway applications - acceptance of running characteristics of railway vehicles-testing of running behaviour and stationary tests.

[11] Simon Iwnicki, "Handbook of Railway Vehicle Dynamics," Taylor & Francis, pp. 385-395, 2006.

[12] C. S. Jeon, "A study on Critical Speed Enhancement of

High-speed Train Passenger Car," *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 12, pp. 603-610, 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.603>

- [13] R. L. Plackett, J. P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," *Biometrika*, vol. 33, no. 4, pp. 305-325, 1946.  
DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305>
- [14] S. H. Park, "Design of Experiments," Minyoung Publishing Co., 2009.
- [15] R. H. Myers, D. C. Montgomery. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [16] S. S. Rao. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc. 1996.

## 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 선임연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 기계공학