

동력분산형 고속열차의 승차감 개선에 관한 연구

전창성*, 김상수, 김석원
한국철도기술연구원 고속철도연구팀

A Study on the Ride Quality Enhancement of the High-speed Electric Multiple Unit

Chang-Sung Jeon*, Sang-Soo Kim, Seog-Won Kim
High-speed Railroad Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구는 동력분산형 고속열차의 승차감을 개선하기 위하여 진행되었다. 동력분산형 고속열차 시제차량의 동역학 해석을 통해 300km/h 이상의 임계속도를 갖는 등가 담면구배의 범위는 0.05에서 0.25사이임을 확인하였다. 초기에 적용된 차량 프로파일 S1002는 4만km 이상의 누적주행거리에도 불구하고 등가 담면구배는 0.033 정도였고, 안정적인 운행을 위해서는 등가 담면구배가 0.061이 넘는 XP55가 더 적합함을 확인하였다. 동력분산형 고속열차의 승차감을 개선하기 위한 방안으로 요댐퍼의 설치 각도를 7.35°에서 0°로 변경하고, 민감도 분석과 최적화를 통해 도출된 공기스프링 횡 및 상하방향 강성 30% 감소, 2차 수직댐퍼 및 횡댐퍼 댐핑계수를 50% 증가시키는 방안을 제안하였다. 이를 적용하면 차체 가속도를 평균 20%정도 개선시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 도출된 승차감 개선 방법의 일부인 요댐퍼 설치각도를 0°로 변경하고 횡댐퍼의 댐핑계수를 30% 증가시킨 후 경부고속선에서 300km/h 속도로 시운전을 진행하였을 때, 차체 횡가속도는 평균 34.3% 개선되었고, 본 연구에서 제안된 추가적인 개선 방안은 향후 시운전 시험 시에 적용될 예정이다. 본 연구에서 사용된 승차감 개선 프로세스는 향후 동력분산형 고속열차의 상업 운행 시에 발생할 수 있는 승차감 관련 문제 해결에 사용될 수 있다.

Abstract This study was carried out to improve the ride quality of high-speed electric multiple unit. Through dynamic analysis of the HEMU-430X, the range of the equivalent conicity with a critical speed of 300 km/h was between 0.05 and 0.25. The initial adopted wheel profile of HEMU-430X was S1002. The equivalent conicity of S1002 with the mileage of more than 40,000 km was about 0.033 and it was confirmed that XP55 is more suitable for stable operation because XP55 has the equivalent conicity of over 0.061. In order to improve ride quality of high-speed electric multiple unit, the change of installation angle of the yaw damper was suggested from 7.35° to 0°. From sensitivity analysis and optimization, the air spring lateral and vertical stiffness was suggested to be reduced by 30% and the secondary vertical and lateral damper damping coefficient was increased by 50%. By applying this, it was expected that the car body acceleration could be improved by about 20% on average. The HEMU-430X's yaw damper installation angle was changed to 0° and the damping coefficient of the lateral damper was increased by 30%. When the test run was carried out at the speed of 300 km/h on the Kyungbu high-speed line, the vehicle lateral acceleration had improved by 34.3%. The effect of additional improvement measures proposed in this paper will be tested in the on track test. The riding quality improvement process used in this study can be used to solve ride quality problems that can occur in commercial operation of high-speed electric multiple unit in the future.

Keywords : High-speed Electric Multiple Unit, Optimization, Ride Quality, Wheel Profile, Yaw damper

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(18RTRP-C127546-02)으로 수행되었음.

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

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

Received September 27, 2018

Revised (1st October 22, 2018, 2nd October 31, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

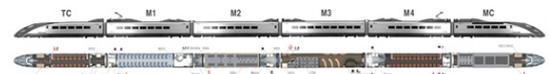
동력분산형 고속열차 시제차량(이하 “HEMU-430X”)은 2007년부터 개발이 시작되어 2012년 시운전을 시작하였고, 2013년 최고속도 421.4km/h를 달성하였다. 이후 안정화 시험이 진행되어 2018년 9월 현재 약 157,000km의 누적주행거리를 기록하고 있다. 이 차량의 성공적인 개발에 힘입어 경전선에 최고속도 250km/h인 EMU-250 차량이 상용화 진행 중이고, 최고속도 320km/h인 EMU-320차량도 발주되어 제작이 진행되고 있다. HEMU-430X 개발시 다양한 운영 속도 환경에 대응하기 위해 추진력을 조정하는 방안을 도입하였으며, EMU-250과 EMU-320은 비슷한 구성으로 추진력에 차이가 있으며 운영 속도에 차이가 있다. 그 외에도 HEMU-430X는 일반 고속철도용 무선통신 및 제어시스템(KRTCS) 실용화 과제, 고속 검측시스템개발 과제를 위한 시운전 차량으로 활용되어 성공적인 시스템 개발에 기여하였다. 현재 HEMU-430X는 진동저감 기술개발 및 활주방지장치(WSP, Wheel slide protection device) 고도화 기술개발을 위해 활용되고 있다.

HEMU-430X의 승차감과 관련된 다양한 연구들이 수행되었다. Park[1] 등은 HEMU-430X의 고속주행을 위하여 468km/h 속도 대역에서의 동적거동을 분석하였다. 2차 현가장치의 비선형 특성을 고려하였고, 주행성능을 개선하기 위한 1, 2차 현가요소의 특성치를 제시하였다. Baek[2] 등은 승차감을 향상시키기는 여러 가지 설계 인자들을 도출하였는데 차체 좌우 및 상하방향 진동의 주요인자는 2차 현가장치의 강성계수임을 확인하였다. Sim[3] 등은 HEMU-430X를 다물체 동역학 모델로 개발하여 차량-궤도 상호 안전성 해석을 수행하였으며, 이를 국제철도연합 규격으로 철도차량의 동적거동에 대해 규정하는 UIC 518[4]에 따라 평가하였다. 개발지 직선 구간에서 최고속도 430km/h로 주행할 수 있으며, 곡선에서도 탈선계수와 횡압이 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

HEMU-430X의 주행동특성에 대해서 본 저자 등의 선행연구가 진행되었다. Jeon[5] 등은 HEMU-430X의 시운전 인터페이스를 검토하기 위하여 동역학 해석 프로그램인 VAMPIRE[6]를 이용한 수치해석을 수행하였다. 편성의 양쪽 끝 차량의 전두부 형상 때문에 설치된 비대칭 요댐퍼 때문에 차량 후미에서 횡진동이 예상되었고,



(a) Picture of HEMU-430X



(b) Configuration of HEMU-430X

Fig. 1. HEMU-430X

이를 해결하기 위한 다양한 방안을 제시하였다. 실제 시운전시 후미 횡진동이 발생하였고 댐퍼방향 변경에 의해 300km/h까지 시운전을 진행할 수 있었다. Jeon[7] 등은 HEMU-430X가 300km/h이상 속도에서 주행할 때 주행거동을 EN 14363[8]에 따라 평가하였으며, 안전성 기준을 만족함을 확인하였다. 시운전시 속도가 올라감에 따라 후미 횡진동이 발생하였고, 차간 댐퍼 설치, 요댐퍼 댐핑계수 증가 등으로 후미 횡진동을 감소시켰다. Jeon[9]은 선행연구[7]에서 횡방향 진동개선을 위해 제안한 일부 요댐퍼를 제거하는 방안을 실제 적용하여 진동저감 효과가 있음을 확인하였고, 전체 차량에 대한 진동저감 방안을 해석적 방법을 통해 도출하였다.

본 연구에서는 동력분산형 고속열차의 차륜형상 및 마모에 따른 주행동특성을 살펴보고, 선행연구[9]에서 해석적 방법으로 도출한 차량 진동저감 방안에 더해 진동을 추가적으로 개선하기 위하여 현가장치 최적화를 수행한다. 최적화를 통해 도출된 현가장치 특성치를 차량에 적용하기 위한 방안을 도출하고, 이 중 일부를 적용한 시운전 시험결과에 대해 고찰한다.

2. 본론

2.1 차륜형상에 대한 고찰

HEMU-430X는 Fig. 1과 같이 6량 1편성의 동력 분

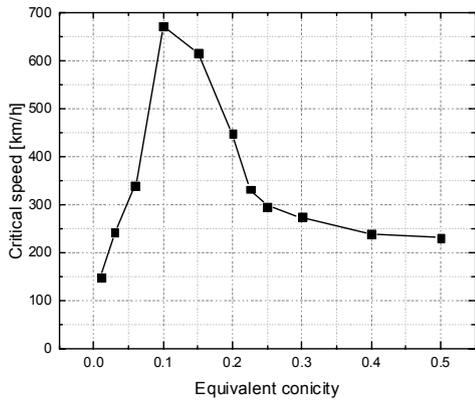


Fig. 2. Critical speed according to equivalent conicity

산형 고속열차로 TC(Tailer Controlled, 운전실이 있는 제어 객차)+4M(Motor Car, 동력객차, M1~M4)+MC(Motor Car Controlled, 운전실이 있는 동력차)로 구성되어 있다. 대차는 TC용 부수대차(Tailer Bogie) 2대, 동력객차 및 제어동력차용(M, MC)용 동력대차(Motor Bogie) 10대로 이루어진다. 대차에는 2개의 윤축이 있으며, 초기 차륜직경은 860mm이다. 유럽규격으로 차륜형상의 표준을 규정하는 EN 13715[10]에 따른 S1002를 차륜형상으로 채택하였다. HEMU-430X 동역학 모델에 대해 VAMPIRE[6]를 이용하여 열차가 불안해지는 속도인 임계속도(Critical speed)를 계산한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 휠-선로 접촉 모델은 선형 크립 데이터(Linear creep data)이다. 그림에서 알 수 있듯이 HEMU-430X의 임계속도가 300km/h이상인 구간은 등가담면구배(Equivalent conicity)가 0.05~0.25구간이다. 현재 HEMU-430X의 시운전 최고속도는 300km/h이고, 안전한 운행을 위해서는 등가담면구배가 0.05~0.25사이로 유지되어야 한다.

HEMU-430X의 초기 휠프로파일은 S1002이었고, 이후 후미진동 문제가 발생하여 M4, MC 2량을 프랑스 규격인 XP55로 변경하였고[7], 이후 추가로 M2, M3 차량도 XP55로 변경하였다. 유럽규격에 따른 S1002와 프랑스 규격 XP55는 레일과의 접촉면에서 기울기가 각각 1/40과 1/20로 S1002가 조금 더 편평하다. TC, M1 2량은 S1002의 마모 특성을 살펴보기 위해 그대로 유지하였다. XP55는 현재 국내 고속철도 차량인 KTX에서 사용 중인 휠 프로파일이다. 국내 고속철도의 선로 프로파일은 국제철도연합 규격으로 휠과의 접촉면에서의 기

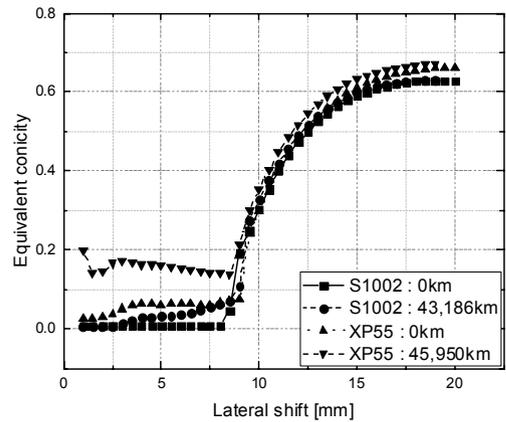


Fig. 3. Equivalent conicity with measured wheel profile



Fig. 4. Current yaw damper configuration

울기가 1/20인 UIC60-20이며, 이것과 HEMU-430X를 40,000km이상 주행한 후 측정된 S1002(주행거리 43,186km)와 XP55(주행거리 45,950km) 휠프로파일로 계산한 등가담면구배를 Fig. 3에 나타내었다. 횡방향 변위 5mm지점의 S1002의 등가담면구배는 신조시 0.01, 마모시 0.033이며, XP55는 신조시 0.061, 마모시 0.161이었다. HEMU-430X가 필요로 하는 등가담면구배는 0.05~0.25사이이기 때문에 S1002는 부적절한 것으로 판단되어 TC, M1 차량도 XP55로 향후 변경할 예정이다. 이를 고려하여 다음 절의 해석은 XP55(45,950km) 마모 상태의 휠 프로파일을 이용하여 진행되었다.

2.2 승차감 개선 방안 도출

선행연구[9]를 통한 현재의 HEMU-430X 요댐퍼설치 현황을 Fig. 4에 나타내었다. TC-M4 차량은 4개의 요댐퍼가 $\beta = 7.35^\circ$ 로, MC 차량은 $\beta = 0^\circ$ 로 설치되어 있다. 선행연구에서 전체차량의 진동저감을 위해 요댐퍼 설치 각도를 $\beta = 0^\circ$ 로 바꾸는 방안을 제안하였으며, 본 연구에서는 이 상태($\beta = 0^\circ$)에서 차량의 승차감을 개선하기 위하여 현가장치 특성치에 대한 최적화 연구를 수행하였다.

Table 1. Design variables and level

No	Design variables	Unit	Min[%]	Current[%]	Max[%]
x_1	Secondary air spring stiffness(y)	MN/m	70	100	130
x_2	Secondary air spring stiffness(z)	MN/m	70	100	130
x_3	Secondary vertical damper damping(z)	MNs/m	50	100	150
x_4	Secondary lateral damper damping(y)	MNs/m	50	100	150

HEMU-430X의 승차감 향상을 위한 최적화 방법론은 저자 등의 이전 연구[11, 12]에서 사용된 방법을 적용하였다. 목적함수는 HEMU-430X 6량 차량 전체에 대해 각 차량 전위대차 상부, 중앙부, 후위대차 상부의 차체 횡방향 가속도와 상하방향 가속도의 합으로 선정하였다. 목적함수에 영향을 주는 현가장치 특성치에 대한 민감도 분석을 위하여 Plackett-Burman design[13]을 이용하여 실험계획 및 해석을 수행하였다[14]. 차체 가속도에 상대적으로 영향이 큰 것으로 판단되는 2차 현가장치와 차간 댐퍼 등 9개 설계 변수를 선정하여 민감도 분석을 실시하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 민감도 분석 결과 차체 가속도에 영향을 크게 미치는 인자는 2차 수직댐퍼 댐핑계수(x_3), 2차 공기스프링 상하방향 강성(x_2), 2차 공기스프링 횡방향 강성(x_1), 1차 횡댐퍼 댐핑계수(x_4) 순으로 민감도가 큰 것을 알 수 있다. 민감도 분석에서 영향이 큰 상위 4개 인자에 대해 차량 승차감을 향상시키기 위하여 마모된 XP55 차륜프로파일(등가댐면구배=0.161)을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 민감도 분석 및 최적화에 사용된 설계변수의 변동 범위는 제작 가능성을 고려하여 Table 1과 같이 설정하였다.

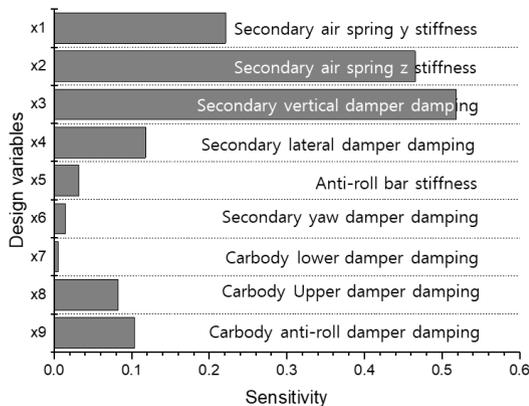
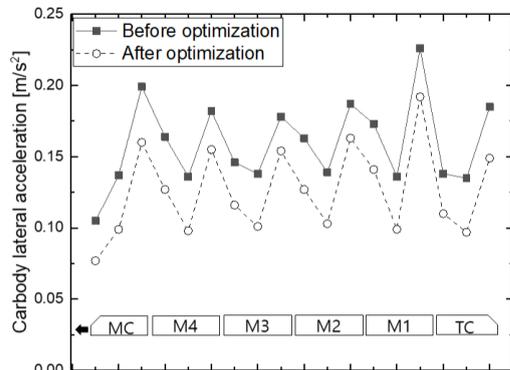
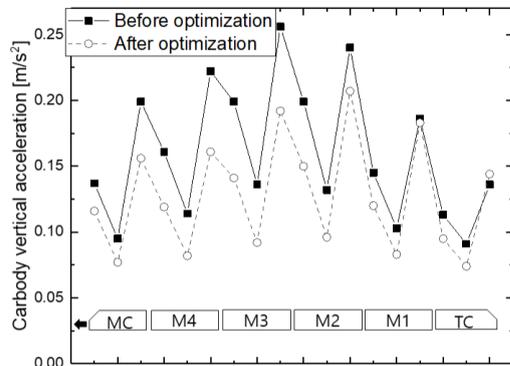


Fig. 5. Sensitivity analysis result



(a) Carbody lateral acceleration



(b) Carbody vertical acceleration

Fig. 6. Optimization result

반응표면분석법[15]에 의해 2차 회귀 모형 함수를 추정하였으며, Sequential Quadratic Programming(SQP) 방법[16]을 사용하여 목적함수인 차체 가속도의 합을 최소화시키는 설계 변수 값을 도출하였고, 이는 2차 공기스프링 횡방향 및 상하방향 강성 30% 감소, 2차 수직댐퍼 및 횡댐퍼 댐핑계수 50% 증가시키는 것이다. 전체 차량의 요댐퍼 각도를 $\beta = 0^\circ$ 로 바꾸고, 해석에서 도출된 개선된 특성치를 차량에 적용시켰을 때 HEMU-430X는 Fig. 6과 같이 차체 횡방향 가속도는 평균 20.1%, 상하방향 가속도는 평균 20.9% 개선될 것으로 예측되었다.



Fig. 7. Yaw damper angle adjustment

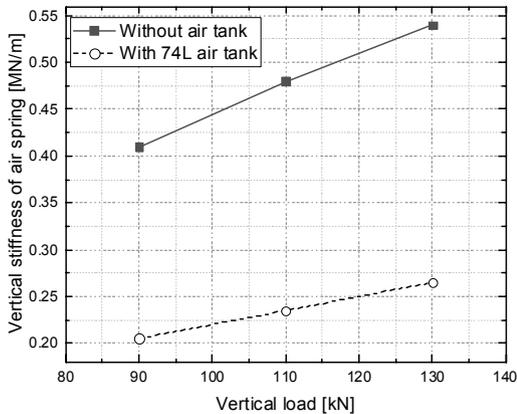


Fig. 8. Vertical stiffness of air spring

Table 2. Acceleration investigation of some cases

Indices	Sum of acceleration RMS[m/s ²]					
	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
		Ratio [%]				
Carbody Lateral	2.864	20.1	19.7	18.3	20.4	16.4
Carbody Vertical	2.867	20.9	16.2	21.1	20.0	20.9

승차감 개선을 위해 도출된 방안을 HEMU-430X에 적용할 수 있는 방안에 대해 검토하였다. 전체차량의 요댐퍼 각도를 $\beta = 0^\circ$ 로 조정하는 방안은 대차에 추가 브라켓을 설치하여 Fig. 7과 같이 전체 차량에 적용하였다. TC, M1 차량의 휠프로파일을 S1002에서 XP55로 변경하는 방안과 2차 수직댐퍼 및 횡댐퍼의 댐핑계수 50%

증가하는 방안은 추후 적용할 예정이다. 공기스프링의 경우 Fig.8과 같이 74리터의 보조공기통을 추가하여 수직방향 강성을 50%정도 줄일 수 있다. 이에 보조공기통을 열차에 취부하여 시험을 진행할 예정이다. 공기스프링 횡방향 강성의 경우 공기스프링 재설계가 이루어져야 하기 때문에 제작 기간과 비용 등을 고려해서 현 상태에서는 적용하지 못 하였다. 이를 고려하여 재해석을 수행한 결과 차체 상하방향 가속도는 차이가 없었고, 횡방향 가속도는 3.7% 정도 차이가 나 16.4% 정도 개선될 것으로 예측되었다.

앞의 해석 결과 차체와 대차를 연결하고 있는 주요 현가장치인 공기스프링과 2차 횡댐퍼, 2차 수직 댐퍼가 차체 횡 및 상하방향 가속도에 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있었다. Table 1의 설계변수의 변동 범위는 제작 가능성을 고려해 결정하였는데, 이 범위를 더 확장하였을 때 차체 가속도를 해석적 방법으로 살펴보았으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 현재 차량 상태(Case 0)에 비해 최적화 결과를 적용한 경우(Case 1), 댐퍼는 기존값을 유지하고 공기스프링 강성만 조정한 경우(Case 2), 최적 상태에서 2차 횡댐퍼 댐핑계수를 2배로 적용한 경우(Case 3)와 2차 수직댐퍼 댐핑계수를 2배로 적용한 경우(Case 4), 최적 상태에서 2차 공기스프링 강성만 현재 상태로 복귀 시킨 경우(Case 5)이다. Case 1부터 Case 4까지 차체 횡방향 가속도에서 2차 횡댐퍼 댐핑계수는 2배 정도 커졌을 때 오히려 차체 횡가속도가 증가하게 된다. 또한 차체 수직방향 가속도에 대한 고찰에서 2차 수직댐퍼 댐핑계수가 150~200% 사이에서는 큰 차이가 없으므로 댐핑계수를 150%로 설정한 최적화 연구결과는 타당하다고 사료된다. 본 연구에서 공기스프링 횡방향 강성 조정은 적용하지 못 했는데, 이는 최적상태와 비교해서 차체 횡가속도가 3.7% 정도 증가할 것으로 예상되었다(Case 5).

2.3 시운전 시험 결과 고찰

앞절의 승차감 개선 방법 중 일부를 HEMU-430X에 적용하여 경부고속선 대전~동대구 사이에서 300km/h속도로 시운전을 진행하였다. Fig. 4에서 요댐퍼 설치각도 $\beta = 7.35^\circ$ (TC~M4)를 기준(Original)으로 하여, 요댐퍼 설치 각도를 $\beta = 0^\circ$ (TC~M4)로 바꾸고(Yaw damper angle = 0°), 이후 신규 댐핑계수 150% 횡댐퍼 적용 전 기존 횡댐퍼의 댐핑계수를 130%로 변경이 가능하여 이

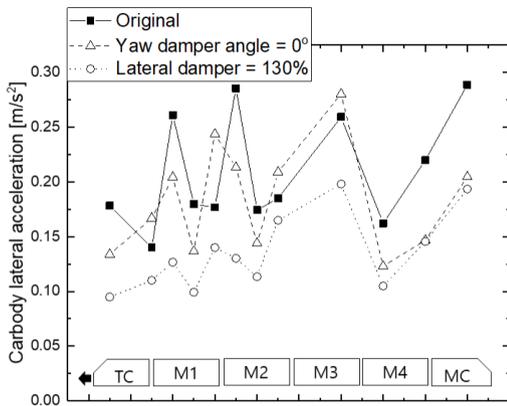


Fig. 9. On track test results

를 TC부터 M3차량까지 4량에 먼저 적용하였다(Lateral damper=130%). 이상의 방법은 차체 횡가속도를 개선하는 방법이기 때문에 경부고속선 KP 248~255 구간의 차체 횡가속도 데이터를 EN 14363[8]의 주행특성(Running characteristics) 항목에 따라 0.4~10Hz 필터를 적용한 후 RMS(Root mean square) 값을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. 기준(Original) 상태에 비해 요댐퍼 설치 각도 $\beta = 0^\circ$ 의 경우 전체적으로 차체 횡가속도가 평균 10.2% 정도 낮아졌으며, TC~M3 횡댐퍼를 130%로 증가시킨 경우 기준 상태 대비 차체 횡가속도가 평균 34.3% 개선되었다. 이는 본 연구에서 도출한 승차감 개선 방안이 효과가 있음을 보여준다. 휠프로파일 변경(S1002→XP55), 횡댐퍼 댐핑계수 150% 증가 방안은 차체 횡가속도를 더 개선시킬 것으로 사료되며, 공기스프링 강성조정과 2차 수직댐퍼 댐핑계수 150% 증가시키는 방안은 차체 상하방향 가속도를 20% 정도 개선시킬 수 있을 것이다. 이 방안들에 대해서는 향후 시운전시험시에 적용될 예정이다. 본 연구에서 사용된 승차감 개선 프로세스는 향후 동력분산형 고속열차의 상업 운행 시에 발생할 수 있는 승차감 관련 문제 해결에 사용될 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 동력분산형 고속열차의 차륜형상 및 마모에 따른 주행동특성을 살펴보고, 승차감 개선방안에 대한 연구를 진행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. HEMU-430X의 동역학 해석을 통해 300km/h 이상의 임계속도를 갖는 증가담면구배의 범위는 0.05에서 0.25사이임을 확인하였다. 초기에 적용된 차륜프로파일인 S1002는 4만km이상의 누적주행거리에도 불구하고 증가담면구배는 0.033정도였고, 안정적인 운행을 위해서는 증가담면구배가 0.061이 넘는 XP55가 더 적합함을 알 수 있었다.
2. HEMU-430X의 승차감을 개선하기 위한 방안으로 요댐퍼의 설치각도를 7.35°에서 0°로 변경하고, 최적화를 통해 도출된 공기스프링 횡 및 상하방향 강성 30% 감소, 2차 수직댐퍼 및 횡댐퍼 댐핑계수를 50% 증가시키는 방안을 제안하였다. 이를 적용하면 차체 가속도를 평균 20%정도 개선시킬 수 있을 것으로 예상되었다.
3. 도출된 승차감 개선 방법의 일부인 요댐퍼 설치각도를 0°로 변경하고 횡댐퍼의 댐핑계수를 30% 증가시킨 후 경부고속선에서 300km/h로 시운전을 진행하였을 때 차체 횡가속도는 평균 34.3% 개선되었고, 본 연구에서 제안된 추가적인 개선방안은 향후 시운전 시험 시에 적용될 예정이다. 본 연구에서 사용된 승차감 개선 프로세스는 향후 동력분산형 고속열차의 상업 운행 시에 발생할 수 있는 승차감 관련 문제 해결에 사용될 수 있다.

References

- [1] 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.
- [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] 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.
- [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, 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.

- [6] Resonate Group Limited. VAMPIRE Pro V6.40 users' manual, 2017.
- [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.
- [8] EN 14363 : 2005. Railway applications - acceptance of running characteristics of railway vehicles-testing of running behaviour and stationary tests.
- [9] C.S. Jeon, "A Study on the Dynamic Behavior Enhancement of the Korean High Speed Train," Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society, Vol.18, No.10, pp.81-87, 2017.
- [10] EN 13715 : 2006. Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Tread profile.
- [11] 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.
- [12] C.S. Jeon, H.S. Cho, C.S. Park et al., "Critical speed enhancement of a Korean high-speed train through optimization with measured wheel profiles," Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, Vol.232, No.1, pp.171-181, 2018.
- [13] R. L. Plackett, J. P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," Biometrika, Vol.33, No. 4, pp. 305-325, 1946.
- [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.

김 상 수(Sang-Soo Kim)

[정회원]



- 1999년 3월 : 일본 이바라키대학교 대학원 (기계공학석사)
- 2002년 3월 : 일본 이바라키대학교 대학원 (생산과학박사)
- 2002년 4월 ~ 2004년 6월 : 일본 아키타현 고도기술연구소 주임연구원
- 2004년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 진동제어, 기계공학

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 : 삼성 중공업 중앙연구소 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량 제동시스템, 기계공학

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