

동력분산형 고속열차의 횡방향 진동저감에 관한 연구

전창성*, 박준혁, 김상수, 김석원
한국철도기술연구원 고속철도연구팀

A Study on the Lateral Vibration Reduction of the High-speed Electric Multiple Unit

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

요약 본 연구는 동력분산형 고속열차의 횡방향 진동을 저감하기 위하여 진행되었다. 동역학 해석을 통한 연구에서 동력분산형 고속열차 시제차량(HEMU-430X)은 고속열차에서 주로 사용되는 차륜프로파일(XP55, GV40, S1002)에 관계없이 낮은 등가담면구배에서 횡방향 진동이 커지고, 차륜 마모가 진행되어 등가담면구배가 커지면 횡진동이 감소하는 경향을 보였다. 이는 HEMU-430X에 적용된 현가장치 특성치들의 조합된 결과로 인해 등가담면구배가 낮을 때 차체와 대차가 1.4Hz의 주파수로 공진하여 차체 헌팅이 발생되기 때문이다. 고속열차의 횡방향 진동저감에 대한 해외 사례에서 요댐퍼의 유압강성(Hydraulic stiffness)을 낮추어 진동을 개선한 사례를 고찰하였다. 요댐퍼의 시리즈 강성은 유압강성과 탄성조인트의 조합인데 본 연구에서는 유압강성 조정대신 비교적 간단하게 할 수 있는 탄성조인트의 강성을 낮추어 횡방향 진동을 개선하고자 하였다. 신규 제작된 탄성조인트를 적용한 요댐퍼의 시리즈 강성은 기존 요댐퍼 대비 60% 수준으로 낮았다. 60% 수준의 시리즈 강성이 적용된 요댐퍼를 HEMU-430X의 TC~M2 3량에 설치하여 시운전 시험을 수행하였다. 시운전 시험 결과 TC를 선두로 한 하행 주행 시 TC~M1의 횡방향 진동이 개선되고, MC를 선두로 한 상행 주행 시 후미 TC차량의 횡진동이 개선되는 결과를 보였다. 본 연구의 진동저감 방안은 향후 영업운전을 위해 도입되는 EMU-250 및 EMU-320의 횡방향 진동 문제 발생 시 해결책으로 적용할 수 있다.

Abstract This study was carried out to reduce the lateral vibration of high-speed electric multiple units. In the study, the high-speed electric multiple unit prototype (HEMU-430X) has a high lateral vibration at low equivalent conicity regardless of the wheel profiles (XP55, GV40, S1002). As wheel wear progresses and the equivalent conicity increases, the lateral vibration tends to decrease. The reason is that a combination of the suspension characteristics causes the body and bogie to resonate at a frequency of 1.4 Hz when the equivalent conicity is low, resulting in body hunting. An investigation of the lateral vibration of overseas high-speed trains showed that a decrease in the hydraulic stiffness of the yaw damper could improve the vibration. The series stiffness of the yaw damper is a combination of the hydraulic stiffness and elastic joint. In this study, an attempt was made to improve the lateral vibration by lowering the stiffness of the elastic joint. The series stiffness of the adjusted yaw damper was approximately 60% compared to the original one. The on track test results showed improvement in the lateral vibration for both running directions. The vibration reduction method of this study can be used for EMU-250 and EMU-320 in future commercial operations.

Keywords : High-Speed Electric Multiple Unit, Lateral Vibration, Wheel Profile, Yaw Damper, Series Stiffness

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(19RTRP-C127546-03)으로 수행되었음.

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

email: csjeon@krii.re.kr

Received September 27, 2019

Revised November 4, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

1. 서론

국내에서 고속철도 시스템에서 처음으로 2004년 상업운전을 시작한 KTX(20량 1편성)의 경우 프랑스 TGV 기술이 사용되었다. 이후 고속철도기술의 국산화가 진행되었고 KTX를 기반으로 KTX-산천(10량 1편성)이 성공적으로 개발되어 2010년부터 영업운행을 시작하였다. 이후 KTX-산천은 KTX-호남, KTX-수서, KTX-원강 등으로 점차적으로 개량되며 국산화된 고속철도 차량으로 정착하였다. KTX-산천의 성공적인 국산화에 이어 동력분산형 고속열차의 필요성이 대두되어 Fig. 1과 같이 차세대 동력분산형 고속열차 시제차량(6량 1편성)이 개발되었고, 2013년 최고속도 421.4km/h를 달성하였다. 이후 안정화 과정을 거쳐 동력분산형 고속열차를 설계할 수 있는 기본 모델이 되었다. HEMU-430X를 기반으로 최고속도 250km/h를 주행할 수 있는 EMU-250 차량 19편성(8량 1편성, 총 114량)이 발주되어 경전선(부전~순천), 중앙선(청량리~부전), 서해선(송산~익산), 중부내륙선(이천~문경) 등에 투입될 예정으로 차량 제작이 진행되고 있다. 또한 최고속도 320km/h인 EMU-320차량도 2편성(16량)이 발주되어 경부고속선과 호남고속선 투입을 목표로 제작이 진행되고 있다. 이처럼 HEMU-430X를 기반으로 제작되는 국내 동력분산형 고속열차는 추진시스템의 용량 변경에 따라 다양한 운영 속도에서의 운행이 가능하다는 장점이 있다.

HEMU-430X의 승차감과 관련하여 몇 가지 연구들이 수행되었다. Park[1] 등은 HEMU-430X의 고속주행 가능여부를 예측하기 위하여 468km/h 속도 대역에서의 동특성 해석을 수행하였다. 2차 현가장치인 요댐퍼의 비선형 특성을 고려하였고, 주행특성을 개선할 수 있는 1, 2차 현가장치의 물성치를 제안하였다. Sim[2] 등은 HEMU-430X를 동역학적으로 모델링하여 차량과 궤도 간의 상호 안전성 해석을 수행하였다. 이 결과는 UIC 518[3]에 의해 평가되었는데, 직선구간에서 최고속도 430km/h로 주행 가능하며, 곡선구간에서도 횡압과 탈선계수 등이 기준치 이내로 안정적인 시운전이 가능하리라 예측하였다.

HEMU-430X의 진동성능 개선에 대해서 본 저자 등의 선행연구가 진행되었다. Jeon[4] 등은 300km/h이상 속도에서 진행된 HEMU-430X 시운전 시의 주행동특성을 EN 14363[5]에 따라 평가하였다. 속도의 증가에 따라 차량 후미에서 횡방향 진동이 발생하였고, 차간 댐퍼 설치와 요댐퍼 댐핑계수 증가 등으로 감소시켰다. Jeon[6]



Fig. 1. The picture of HEMU-430X

은 차량 횡방향 진동저감을 위해 요댐퍼 일부를 제거하는 방안을 실제 HEMU-430X에 적용하여 진동저감 효과가 있음을 확인하였다. Jeon[7] 등은 HEMU-430X의 승차감 개선방안으로 요댐퍼 설치각도 변경과 횡댐퍼 댐핑계수 변경 등을 제안하였다.

본 연구에서는 선행연구를 통해서 어느 정도 저감된 동력분산형 고속열차의 횡방향 진동을 추가적으로 개선하기 위한 방안에 대해 검토한다. 차체와 대차를 연결하여 차체의 진동을 저감하기 위한 2차 요댐퍼 시리즈 강성에 대하여 고찰하며, 요댐퍼 강성을 변경시킬 수 있는 방안을 검토하였다. 이 방안을 HEMU-430X의 시운전시에 적용하여 그 효과에 대해 고찰한다.

2. 본론

2.1 횡방향 진동에 대한 고찰

Fig. 2는 차륜형상과 마모정도에 따른 HEMU-430X의 차체 횡방향 가속도를 동역학 해석 프로그램인 VAMPIRE[8]를 이용하여 해석적으로 구한 값이다. 해석에 적용된 차륜 프로파일은 총 3가지이다. 첫 번째와 두 번째는 각각 프랑스 규격으로 KTX와 KTX-산천에 적용된 XP55(1/20)와 KTX-호남에 적용된 GV40(1/4)이다. 세 번째는 유럽규격으로 차륜형상을 규정하는 EN 13715[9]에 따른 S1002로 초기에 HEMU-430X에 적용되었다. 국내 고속선에 적용된 레일 프로파일인 UIC60(1/20)을 적용했을 때 신조 차륜의 등가답면구배는 XP55의 경우 0.061, GV40의 경우 0.026, S1002의 경우 0.001이다. 차륜 마모에 따라 등가답면구배가 증가하고 고속차량의 경우 보통 등가답면구배가 0.3~0.4정도에서 차륜을 삭정하여 신조 차륜의 형상을 갖도록 한다.

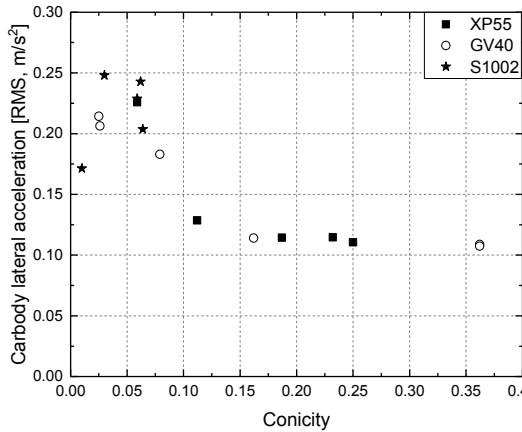
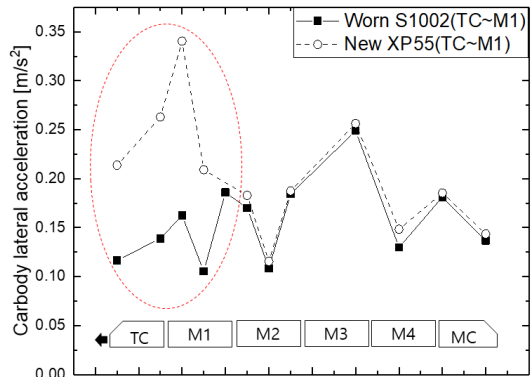


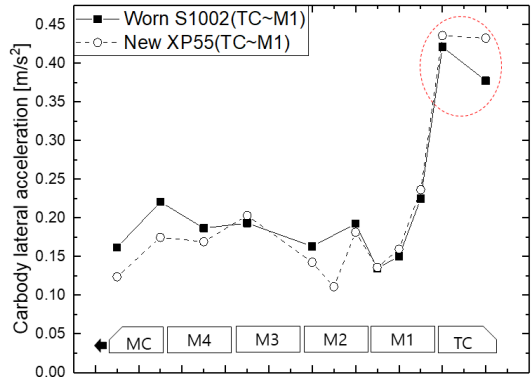
Fig. 2. Lateral acceleration according to equivalent conicity

Fig. 2에서 HEMU-430X는 차륜의 신조상태보다 어느 정도 마모된 후(등가답면구배 0.10이상) 횡방향 진동이 줄어들 것으로 예측되었다. 이는 HEMU-430X에 적용된 현가장치 특성치들의 조합된 결과로 인해 등가답면구배가 낮을 때 차체와 대차가 1.4Hz의 주파수로 공진하여 차체 헌팅이 발생하여 횡방향 진동이 증가하기 때문이다 [4]. HEMU-430X는 TC-M1-M2-M3-M4-MC 6량 1편성으로 구성되어 있고, 초기의 휠프로파일은 S1002이었다. 횡방향 차체 헌팅 구간을 빨리 피하기 위하여 차륜 프로파일 S1002에서 XP55로 변경을 시도하였다. 이는 S1002보다 XP55의 등가답면구배가 크기 때문이다. 처음으로 M4, MC 2량을 프랑스 규격인 XP55로 변경하였고, 이후 추가로 M2, M3 차량도 XP55로 변경하였다[4]. 마지막으로 2018년 10월경 TC, M1차량의 휠 프로파일을 S1002에서 XP55로 변경하는 과정에서 TC, M1 차량의 횡방향 진동문제가 다시 발생하였다.

HEMU-430X가 호남고속선을 주행할 때의 차체 횡가속도를 Fig. 3에 나타내었다. 하행 시(Southbound lane)에는 익산~광주 KP107~116 구간을, 상행 시(Northbound lane)에는 광주~익산 KP140~135 구간을 300km/h로 주행할 때 차체 횡방향 가속도를 EN 14363[5]의 주행특성(Running characteristics) 항목에 따라 0.4~10Hz 필터를 적용한 후 구한 RMS(Root mean square) 값을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 TC-M1-M2-M3-M4-MC는 6량 1편성 중 각 차량의 위치를 나타내고, ±5g를 측정할 수 있는 스트레인 게이지 타입(Strain Gauge Tyoe)의 횡방향 가속도 센서는 TC와 MC차량은 전위와 후위 차체 바닥 중앙부에 2개, M1



(a) Southbound lane



(b) Northbound lane

Fig. 3. Lateral vibration of carbody

과 M2차량은 전위, 차량 중앙과 후위 차체 바닥 중앙부에 3개, M3차량은 후위 차체 바닥 중앙부에 1개, M4차량은 차량 중앙의 차체 바닥 중앙부에 1개 등 총 12개가 설치되었다. 그림에서 알 수 있듯이 하행 시 TC, M1차량의 횡가속도가 증가하였으며, M2~MC 차량은 큰 차이가 없다. 상행 시에는 S1002와 XP55 차륜형상 모두 후미차량인 TC에서 횡방향 진동이 크게 증가하였다. 이 문제를 해결하기 위하여 차륜형상 및 마모정도와 크게 관계없이 횡방향 가속도를 개선하기 위한 방안이 필요하여 본 연구를 수행하게 되었다.

2.2 횡방향 진동 저감 방안

고속열차의 횡방향 진동 문제에 관한 선행 연구들을 살펴보면 중 해외 고속열차에서 유사한 문제가 있었음을 확인할 수 있었다. Huang[10] 등에 의하면 개통 초기 중국 고속열차는 신조 차륜 상태에서 200~300km/h 속도

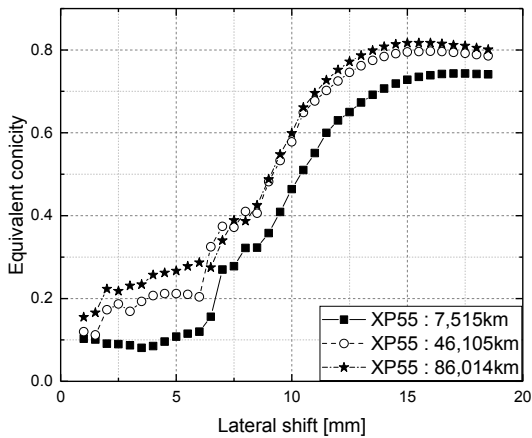


Fig. 4. Equivalent conicity with measured wheel profile

대역에서 차체 횡팅에 의해 횡방향 가속도가 증가했고, 차륜이 마모됨에 따라 진동이 저감하는 경향을 보였다. 이 현상에 대해 다양한 현가장치의 특성을 살펴보던 중 차체와 대차를 연결하는 요댐퍼의 강성이 강하여 발생된 문제임을 인식하고, 유압강성(Hydraulic stiffness)을 감소시킨 새로운 요댐퍼를 제작하여 고속열차에 설치하였을 때 기존 요댐퍼보다 횡방향 진동을 저감시키는 것을 확인하였다. 이 사례를 참고하여 HEMU-430X에서 요댐퍼 강성이 횡방향 진동에 미치는 영향을 VAMPIRE[8]를 이용하여 해석적으로 고찰하였다. 해석 모델 및 선로불규칙 등은 저자의 선행연구[6]에 있는 모델을 활용하였다. HEMU-430X는 차량 2량씩 삭정시기가 다르기 때문에 차륜의 마모상태도 다르다. 이를 고려하여 차륜 형상은 2019년 3월에 차량에서 직접 측정된 값을 사용하였고 이를 Fig. 4에 나타내었다. TC~M1은 삭정 후 7,515km, M2~M3는 46,105km, M4~MC는 86,014km 주행 후의 데이터이며 주행거리가 늘어남에 따라 등가담면구배도 증가하는 것을 알 수 있다.

앞 절에서 TC, M1차량의 횡방향 진동이 증가하였기 때문에 이를 개선하기 위하여 TC~M2 차량의 요댐퍼의 강성을 조정하여 해석을 수행하였다. 현재 강성 특성치를 100%로 하고 각각 70%, 50%일 때의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 요댐퍼의 강성이 낮아짐에 따라 TC~M2 차량의 차체 횡가속도가 개선되는 것을 확인할 수 있다. M3~MC는 요댐퍼 강성 조정이 없었기 때문에 차체 횡가속도에도 차이가 거의 없다. 이상의 결과로 HEMU-430X의 경우 요댐퍼 강성을 낮추어 차체 횡방향 진동을 저감할 수 있음을 알 수 있다.

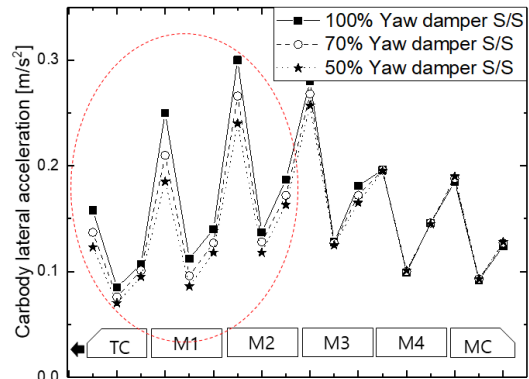


Fig. 5. Simulation results

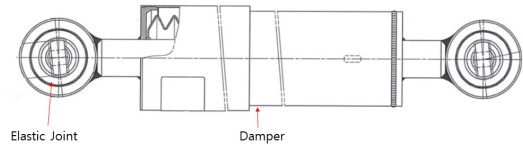


Fig. 6. Yaw damper for HEMU-430X

2.3 실제 차량에의 적용

앞 절의 결과인 요댐퍼 강성을 낮출 수 있는 방안에 대해 검토하였다. HEMU-430X에 사용된 요댐퍼는 Fig. 6과 같이 가운데 유압댐퍼가 있고 양쪽에 차체와 대차에 고정하기 위한 탄성조인트로 구성된다. 요댐퍼의 강성은 댐퍼의 유압강성(k_{hs} , Hydraulic stiffness)과 양쪽 탄성조인트의 강성이 조합된 시리즈 강성(Series stiffness)이다. 댐퍼시험기를 통한 요댐퍼의 시리즈 강성(k_{ss})은 12MN/m이었고, 댐퍼 제조사에서 제공받은 탄성조인트 1개의 강성(k_{cs})은 50MN/m이었다. 이를 토대로 다음 식에 의해 댐퍼의 유압강성을 계산할 수 있다. 계산된 유압강성(k_{hs})은 23MN/m이었다.

$$\frac{1}{k_{ss}} = \frac{1}{k_{cs}} + \frac{1}{k_{hs}} + \frac{1}{k_{cs}} \quad (1)$$

요댐퍼의 강성은 유압강성을 조정하는 방법과 탄성조인트의 강성을 조정하는 방법이 있다. 앞에서 살펴본 중국 사례[10] 같은 경우에는 유압강성을 조정하였지만, 본 연구에서는 탄성조인트의 강성을 조정하는 방법을 적용하였다. 요댐퍼의 시리즈 강성을 60% 수준으로 맞추기 위하여 탄성조인트의 강성은 21MN/m로 제작을 의뢰하

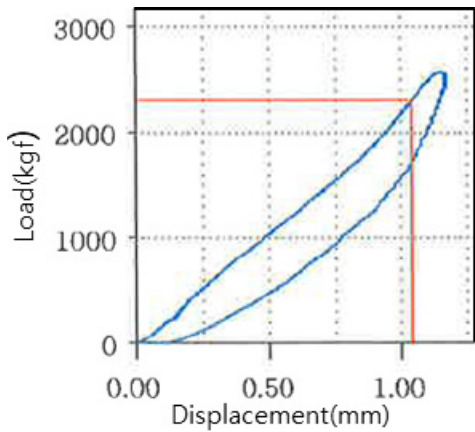


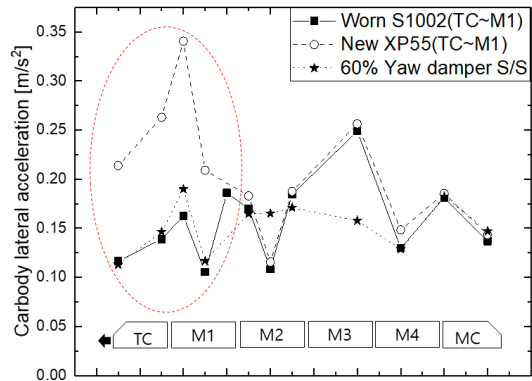
Fig. 7. Static spring constant test result



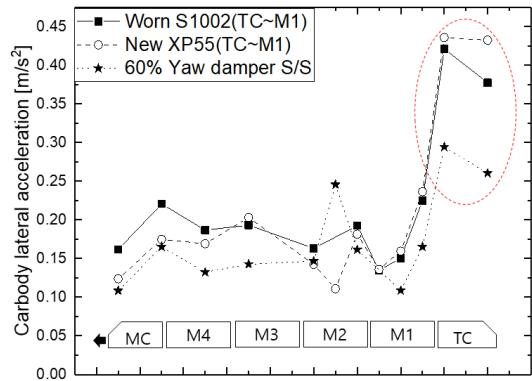
Fig. 8. Assembly of new elastic joint



Fig. 9. Replacement of yaw damper



(a) Southbound lane



(b) Northbound lane

Fig. 10. Lateral vibration of carbody with adjusted yaw damper

였고 강성 시험 결과는 Fig. 7과 같이 양호하였다. 신규 제작된 탄성조인트를 Fig. 8과 같이 기존 요댐퍼의 탄성 조인트와 교체하여 총 24개의 요댐퍼를 준비하였다. 준비된 요댐퍼의 시리즈 강성은 7.2MN/m로 기존 12MN/m 대비 60% 수준이다. 준비된 24개의 요댐퍼를 Fig. 9와 같이 HEMU-430X의 TC~M2차량에 설치하여 횡방향 진동 저감 효과를 확인하기 위한 시운전 시험을 수행하였다. 시운전 시험 결과는 Fig. 10과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 요댐퍼의 강성을 조정한 후 하행 시((a) Southbound lane) TC~M1의 차체 횡가속도는 큰 폭으로 개선되었고, 상행 시에도((b)Northbound lane) TC차량의 후미진동 또한 상당히 감소하였다. 따라서, 본 연구에서 도출한 요댐퍼의 시리즈 강성을 감소시키는 방안은 HEMU-430X의 횡방향 진동 저감에 효과가 있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 동력분산형 고속열차 HEMU-430X의 횡방향 진동에 대해 고찰하고, 진동 저감 방안에 관한 연구를 진행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 동역학 해석을 통한 연구에서 동력분산형 고속열차 시제차량(HEMU-430X)은 고속열차에서 주로 사용되는 차륜프로파일(XP55, GV40, S1002)에 관계없이 낮은 등가답면구배에서 횡방향 진동이 커지고, 차륜 마모가 진행되어 등가답면구배가 커지면 횡진동이 감소하는 경향을 보였다. 이는 HEMU-430X에 적용된 현가장치 특성치들의 조합된 결과로 인해 등가답면구배가 낮을 때 차체와 대차가 1.4Hz의 주파수로 공진하여 차체 현팅이 발생되기 때문이다.

2. 고속열차의 횡방향 진동저감에 대한 해외 사례에서 요댐퍼의 유압강성을 낮추어 진동을 개선한 사례를 고찰하였다. 요댐퍼의 시리즈 강성은 유압강성과 탄성조인트의 조합인데 본 연구에서는 유압강성 조정대신 비교적 간단하게 할 수 있는 탄성조인트의 강성을 낮추어 횡방향 진동을 개선하고자 하였다. 신규 제작된 탄성조인트를 적용한 요댐퍼의 시리즈 강성은 기존 요댐퍼 대비 60% 수준이었다.

3. 60% 수준의 시리즈 강성이 적용된 요댐퍼를 HEMU-430X의 TC~M2 3량에 설치하여 시운전 시험을 수행하였다. 시운전 시험 결과 TC를 선두로 한 하행 주행 시 TC~M1의 횡방향 진동이 개선되고, MC를 선두로 한 상행 주행 시 후미 TC 차량의 횡진동이 개선되는 결과를 보였다. 본 연구의 진동저감 방안은 향후 영업운전을 위해 도입되는 EMU-250 및 EMU-320의 횡방향 진동 문제 발생 시 해결책으로 적용할 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] 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.

[3] 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.

[4] 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://dx.doi.org/10.1177/0954409715576355>

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

[6] 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.81>

[7] C.S. Jeon, S.S. Kim, S.W. Kim, "A Study on the Ride Quality Enhancement of the High-speed Electric Multiple Unit," Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society, vol.19, no.11, pp.561-567, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.561>

[8] Resonate Group Limited. VAMPIRE Pro V6.60 users' manual, 2018.

[9] EN 13715 : 2006. Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Tread profile.

[10] C. Huang, J. Zeng, S. Liang, "Carbody hunting investigation of a high speed passenger car," Journal of Mechanical Science and Technology, vol.27, no.8, pp.2283-2292, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s12206-013-0611-z>

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

박 준 혁(Joon-Hyuk Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 연세대학교 대학원 (기계공학석사)
- 2005년 2월 : 연세대학교 대학원 (기계공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2006년 3월 : 연세대학교 자동화기술연구소 연구원
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 능동현가장치

김 상 수(Sang-Soo Kim)

[정회원]



- 1999년 3월 : 일본 이바라끼대학교 대학원 (기계공학석사)
- 2002년 3월 : 일본 이바라끼대학교 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 : 대우조선해양 대리
- 1994년 3월 ~ 1997년 2월 : 삼성중공업 중앙연구소 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량 제동시스템, 기계공학