

# 최적화를 통한 동력분산형 철도차량의 횡방향 승차감 개선에 관한 연구

전창성

한국철도기술연구원 고속철도연구실

## A Study on the Lateral Ride Quality Improvement of Electric Multiple Unit by Optimization

Chang-Sung Jeon

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

**요약** 본 연구는 동력분산형 철도차량의 일종인 수소철도차량의 횡방향 승차감 개선에 관한 것이다. 본 연구의 수소철도차량은 국가연구개발사업으로 개발 중인 수소연료전지를 동력으로 사용하는 철도차량이다. 2량 1편성 차량이며, 대차는 동력대차 2대와 부수대차 2대 등 총 4대로 이루어진다. 수소철도차량의 승차감 평가를 위해 철도차량 동역학 소프트웨어인 Vampire를 이용하여 동역학 해석을 수행하고, 그 결과를 KS R 9216에 따라 승차감을 평가하였다. 직선구간 5km를 150km/h로 주행할 때, 수소철도차량의 승차감을 평가한 결과 차체 횡방향은 109.2dB로 '보통', 차체 상하방향은 98.7~99.1dB 정도로 '매우 우수' 수준을 보였고, 차체 횡방향의 승차감은 개선될 필요가 있음을 확인하였다. 횡방향 승차감 개선을 위하여 기존 현가장치 설계안에 대해 민감도 분석 및 최적화를 수행하였고, 차체 횡방향 가속도는 25.8% 개선 가능함을 확인하였다. 추가적인 횡방향 승차감 개선을 위해 차륜 프로파일을 현재 사용 중인 KNR20 대신 S1002로의 변경을 고려하였고, 차륜 프로파일 변경 시 횡방향 승차감은 초기값 대비 52.8% 정도 개선될 수 있을 것으로 예측되었다. 향후 시운전 시험 시 차체 횡방향으로 진동이 심할 경우 간단한 해결 방안으로 차륜 프로파일을 S1002로 변경하는 것을 고려할 수 있을 것이다.

**Abstract** This paper reports the improvement of the lateral ride comfort of a hydrogen railway vehicle, which is a type of power distribution type railway vehicle. The hydrogen railway vehicle in this study is a railway vehicle using a hydrogen fuel cell as a power source, which is being developed as a national research and development project. It is a two-car train. The bogie consists of four units, including two power bogies and two auxiliary bogies. The ride comfort of hydrogen railway vehicles was evaluated by dynamic analysis using Vampire, a railway vehicle dynamics software, according to the KS R 9216 standard. The ride comfort of a hydrogen railway vehicle when driving a 5km straight section at 150km/h was 109.2dB, which was 'normal', and the vertical ride comfort was 98.7-99.1dB. The ride comfort in the lateral direction needs to be improved. Sensitivity analysis and optimization were performed on the existing suspension design to improve the lateral ride comfort, which could be improved by 25.8%. To further improve the lateral ride comfort, it was suggested to change the wheel profile to S1002 instead of the currently used KNR20. Therefore, changing the wheel profile to S1002 is a simple solution to the excessive vibration in the lateral direction of the vehicle body during an on-track test.

**Keywords** : Dynamic Analysis, Hydrogen Powered Train, KS R 9216, Lateral Ride Quality Improvement, Optimization

이 논문은 2022년도 국토교통부 '370kph 이상 고속운행을 위한 차량 핵심기술 및 기술기준 개정(안) 개발(RS-2022-0014-3396)' 과제의 지원을 받아 연구되었음.

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

email: csjeon@krii.re.kr

Received September 22, 2022

Revised October 28, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

## 1. 서론

세계적인 기후 변화에 따라 친환경 에너지로 수소의 사용이 많아지고 있다. 수송수단으로 국내에서는 수소연료전지를 이용한 승용차가 이미 상용화 되었고, 수소 트럭, 수소 버스 등의 개발이 진행되고 있다. 철도분야에서는 수소연료전지를 사용하는 동력분산형 수소철도차량이 국가연구개발사업으로 Fig. 1과 같이 개발되었고, 시운전 시험을 준비하고 있다. 본 수소철도차량의 사양은 최고속도 110km/h(향후 150km/h 대응), 최대출력 1.2MW, 1회 충전 주행거리 600km 이상이며, 수소연료전지-배터리 하이브리드 동력시스템, 수소연료전지용 고효율 DC-DC 컨버터, 추진제어장치, 보조전원장치 등의 전장품이 탑재된다. 일반적인 철도차량과의 차이점은 수소연료전지를 동력원으로 사용하는 것이다[1].



Fig. 1. Hydrogen powered train

해외의 수소철도차량 개발 동향을 살펴보면, 2006년 동일본 철도(JR-East)에서 수소연료전지와 축전지를 동력으로 하는 하이브리드 철도차량을 50km/h 속도(최고 설계속도 100km/h)로 주행시험을 실시했다고 보고했다 [2]. 2016년 프랑스의 알스톰사는 기존 디젤열차를 대체할 목적으로 수소열차 코라디아 아이린트(Coradia iLint)를 공개하였는데, 최고 운영속도는 100km/h이며, 1회 충전으로 600~800km 주행이 가능하다고 한다[2]. 이상과 같이 해외에서는 디젤 열차의 대체수단으로 수소철도차량의 개발이 활발하다. 국내에서는 본 연구의 수소철도차량을 개발하기 위하여 다양한 연구들이 수행되었는데, Oh 등[3]은 규칙기반 알고리즘을 이용하여 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량을 모델링하였다. Jeong 등[4]은 수소연료전지 철도차량용 영구자석 동기전동기의 토크 및 냉각성능 개선 설계를 수행하였다.

이상의 연구들은 수소철도차량 및 전장품 개발 등에 관한 것이다. 본 연구에서는 수소철도차량의 주행거동을 고찰하고, 승차감 평가를 실시하였다. 승차감 평가 시 횡

방향 승차감의 개선 필요성을 확인하였고, 현가장치 최적화 등을 통한 승차감 개선 방안을 제시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 수소철도차량의 주행거동 고찰

수소철도차량은 Fig. 1과 같이 2량 1편성 차량으로 Mc1(Motor Car Controlled, 운전실이 있는 동력차)+Mc2로 구성되며, 대차는 동력대차(Motor Bogie) 2대와 부수대차(Tailer Bogie) 2대 등 총 4대로 이루어진다. 수소철도차량의 주행거동 검토를 위해 철도차량 동역학 소프트웨어인 Vampire Pro Ver 6.60[5]을 이용하여 2량 1편성 모델을 Fig. 2와 같이 작성하였는데, 수소철도차량 제작사에서 제공한 대차, 현가장치 특성치 자료를 이용하였다. Fig. 2(b)에서 차축과 대차는 1차 현가장치인 링크암, 1차 수직댐퍼, 코일스프링으로 연결되며, 대차와 차체는 공기스프링, 2차 수직댐퍼, 횡댐퍼, 요댐퍼로 연결된다. 국내 일반선에서 많이 사용하는 KNR20(1/20) 차륜과 K60(1/40) 선로모델을 적용하였으며, 이는 한국철도공사에서 주로 사용하는 휠과 레일의 조건으로 휠과 레일 접촉모델은 Fig. 3과 같다.

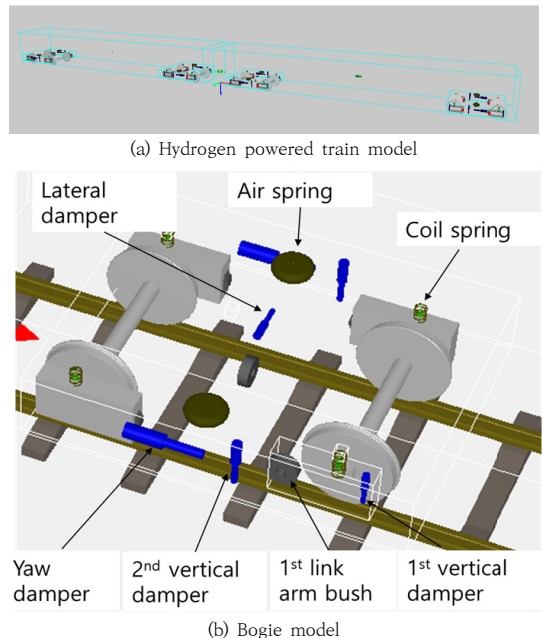


Fig. 2. Simulation model of hydrogen powerd train

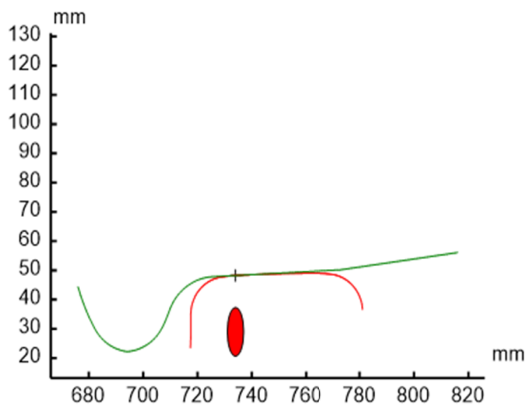
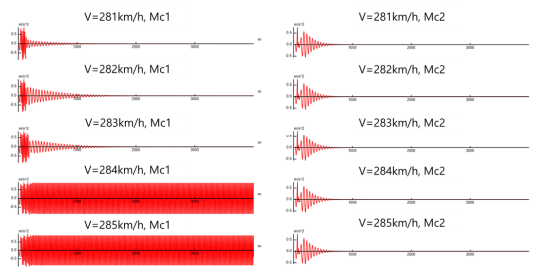
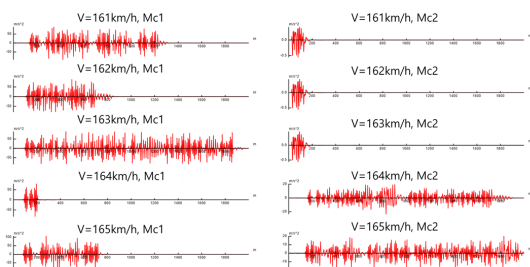


Fig. 3. Wheel-rail contact model(KNR20 and K60)

먼저 수소철도차량의 임계속도 해석을 수행하였는데, 임계속도(Critical speed,  $V_{cr}$ )란 철도차량이 불안정해지는 속도이다. KNR20 차륜과 K60 선로를 이용한 비선형 임계속도 해석결과는 283km, 선형 임계속도 해석결과는 신조차륜( $EC=0.1$ , Equivalent Conicity)일 때 310km/h, 마모차륜( $EC=0.4$ )일 때 162km/h로 수소철도차량의 최고 운행속도인 150km/h보다 높아서 안전한 것으로 예측되었다(Fig. 4).



(a) Non-linear critical speed analysis result( $V_{cr}=283\text{km/h}$ )



(b) Linear critical speed analysis result( $EC=0.4$ ,  $V_{cr}=162\text{km/h}$ )

Fig. 4. Critical speed analysis results

다음으로 철도차량 기술기준에 의한 주행안전성을 검토하였다. 철도차량의 주행안전성은 차륜과 레일 사이에 작용하는 힘의 관계에 의해 영향을 받는다. 탈선에 대한 안전성을 평가하는 평가 항목으로는 차륜과 레일의 횡방향 작용력과 수직방향 하중의 비인 탈선계수, 감소된 윤중에 대한 정적윤중의 비인 윤중감소량을 들 수 있으며, 차량이 궤도에 주는 힘인 횡압 등도 있다. 주행안정성 평가기준은 일반철도차량 기술기준 3.2.2 주행안전(6) 관련 내용 중 윤중 감소량, 최대횡압, 탈선계수 항을 검토하였다. 먼저 Table 1의 곡선 구간(R80, R140, R250, R400)에서의 주행안전성을 평가하였는데 최대횡압 (Table 2), 윤중 감소량(Fig. 5), 탈선계수(Fig. 6)는 기준치 이내였다.

Table 1. Curve condition

Curve radius[m]	Speed[km/h]	Cant[mm]	Ttransition curve length[m]
80	26	0	15
140	40	35	21
250	60	70	42
400	75	66	40

Table 2. Maximum sum of guiding force at curves

Position	Curve radius[m]	Criteria[kN]	Maximum sum of guiding force[kN]
Front axle of Mc1	80	48.7	46.1
	140		35.6
	250		23.7
	400		17.2

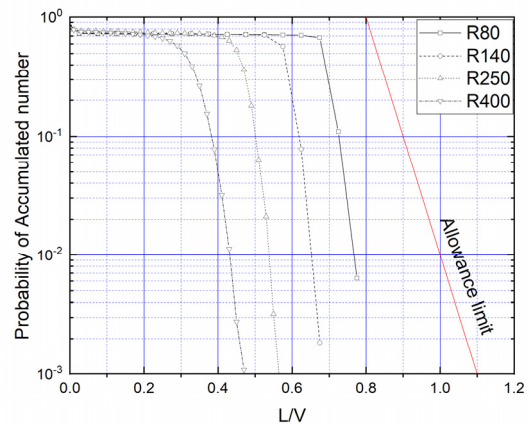


Fig. 5. Wheel weight reduction ratio at curves

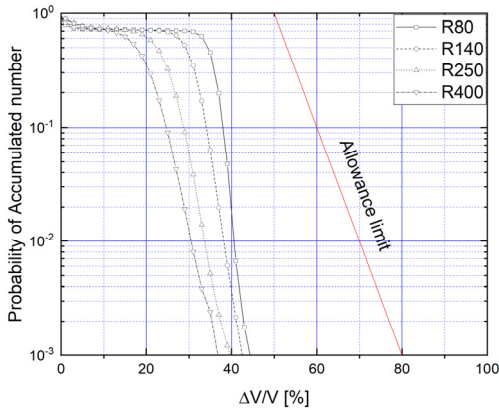


Fig. 6. Derailment coefficient at curves

수소철도차량이 향후 시운전을 수행하게 될 오송 시험선 구간에서의 주행안전성을 검토하였다. 수소철도차량이 150km/h를 낼 수 있는 시험선의 구간은 KP 2~9 까지 7km 이다. 이 구간에는 R10000, R3500 곡선이 1개씩 존재한다(Fig. 7). 선로 불규칙도는 Vampire[5] 에서 제공하는 160km/h 선로불규칙도를 적용하였다. 150km/h 주행 시 해석결과를 일반철도차량 기술기준[6]에 의해 평가하면 운중감소량(Fig. 8), 탈선계수(Fig. 9), 최대횡압(Table 3) 등이 기준치 이내로 주행안전성에 문제가 없을 것으로 예측되었다.

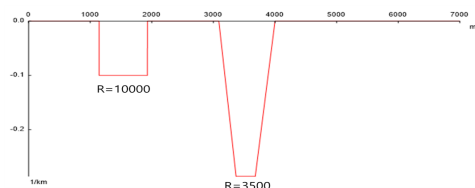


Fig. 7. Osong test track(7km)

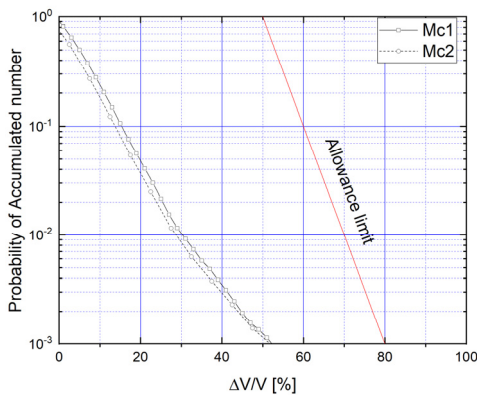


Fig. 8. Wheel weight reduction ratio at 150km/h

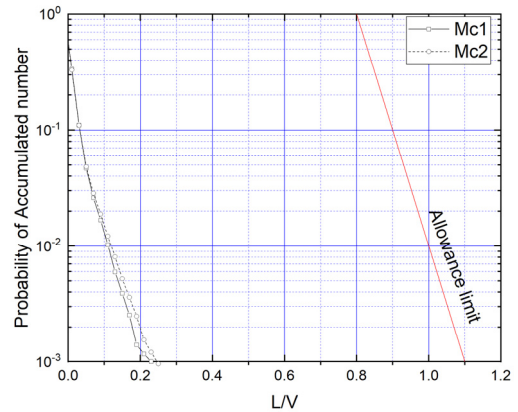


Fig. 9. Derailment coefficient at 150km/h

Table 3. Maximum sum of guiding force at 150km/h

Position	Criteria[kN]	Maximum sum of guiding force[kN]
Front axle of Mc1	48.7	25.2
Front axle of Mc12	44.6	23.2

수소철도차량이 직선구간을 150km/h로 주행할 때의 승차감을 평가하였다. 승차감 평가기준은 Table 4에 있는 KS R 9216:2000 철도 차량 - 승차감 측정 및 평가 방법[7]을 따랐다. 직선구간 5km를 150km/h로 주행 시 차체 가속도 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었고, KS R 9216에 따른 승차감 평가 결과를 Table 5에 나타내었다. 평가 결과 차체 횡방향은 보통(not uncomfortable), 차체 상하방향은 매우 우수(very good comfortable) 수준으로 차체 횡방향의 승차감의 개선이 필요하였다.

Table 4. Ride quality criteria of KS R 9216

Ride level	RMS value [m/s <sup>2</sup> ]	Assessment
Bellow 100dB	Bellow 0.1	Very good comfortable
Over 100dB to bellow 105dB	Over 0.1 to bellow 0.178	Good comfortable
Over 105dB to bellow 110dB	Over 0.178 to bellow 0.315	Not uncomfortable
Over 110dB to bellow 115dB	Over 0.315 to bellow 0.562	A little uncomfortable
Over 115dB to bellow 120dB	Over 0.562 to bellow 1	Uncomfortable
Over 120dB to bellow 125dB	Over 1 to bellow 1.779	Very uncomfortable
Over 125dB	Over 1.779	Extremely uncomfortable

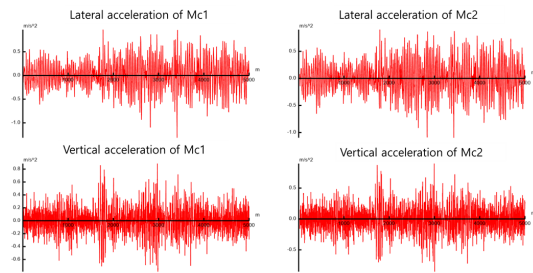


Fig. 10. Carbody acceleration at 150km/h

Table 5. Ride level of hydrogen powered train

Direction	Cars	Ride level[dB]
Lateral	Mc1	109.2
	Mc2	109.2
Vertical	Mc1	98.7
	Mc2	99.1

## 2.2 최적화를 통한 횡방향 승차감 개선

앞 절의 연구에 이어 횡방향 승차감 개선을 위한 연구를 수행하였다. 횡방향 승차감 개선을 위하여 도출된 현가장치 설계안에 대해 최적화를 수행하여 추가 개선 여지를 검토하였다. 최적화는 Plackett-Burman design[9]을 이용하여 설계변수에 대해 실험계획 및 해석을 수행하고, 민감도가 큰 상위 3개의 변수에 대해 중심합성시험계획법과 반응표면 분석법[10]으로 2차 회귀 모형함수를 추정한 후, Sequential Quadratic Programming(SQP) 방법으로 목적함수를 최소화시키는 설계변수를 도출하는 방법으로 실시하였다[8]. 최적화 과정은 설계변수, 목적함수(성능지수)를 정의하고 Vampire[5]을 통해 나온 성능지수 값을 이용하여 최적화를 수행하였다. 목적함수는 차체 횡가속도의 합(Mc1(전위+중앙+후위)+Mc2(전위+중앙+후위))으로 설정하였고, 설계변수는 차체 횡가속도에 영향을 많이 줄 것으로 판단되는 현가장치 특성치 6개를 선정하였다. 이 변수들은 Fig. 2(b)에서 1차 링크암 부시 반경방향 강성( $x_1$ ), 1차 링크암 부시 축방향 강성( $x_2$ ), 2차 공기스프링 횡방향 강성( $x_3$ ), 2차 횡댐퍼 댐핑계수( $x_4$ ), 2차 요댐퍼 댐핑계수( $x_5$ ), 2차 요댐퍼 시리즈 강성( $x_6$ ) 등이다. 설계변수의 변동 범위는 제작 가능성을 고려하여 고무류는  $\pm 20\%$ , 댐퍼류는  $\pm 30\%$ 로 설정하였다. Plackett-burman design[9]을 이용한 민감도 분석 수행하였는데 2차 공기스프링 횡방향 강성( $x_3$ ), 2차 횡

댐퍼 댐핑계수( $x_4$ ), 2차 요댐퍼 댐핑계수( $x_5$ ), 1차 링크암 부시 반경방향 강성( $x_1$ ), 1차 링크암 부시 축방향 강성( $x_2$ ), 2차 요댐퍼 시리즈 강성( $x_6$ ) 순으로 민감하였다 (Fig. 11). 민감도 분석에서 나온 상위 3개 인자를 이용해 반응표면 분석법[10]으로 최적화를 수행한 결과, 차체 횡방향 가속도는 Table 7과 같이 25.8% 개선 가능함을 확인하였다. 상기 현가장치 최적화 연구를 통해 2차 공기스프링 횡방향 강성 감소, 2차 횡댐퍼 댐핑계수 증가, 2차 요댐퍼 댐핑계수 감소 등을 통해 차체 횡방향 승차감을 개선할 수 있다.

추가적인 횡방향 진동 개선을 위해 차륜 프로파일을 KNR20(1/20) 대신 유럽 표준에 있는 휠 프로파일인 S1002(1/40)로의 변경을 고려하였다[11]. S1002는 독일 고속철도차량(ICE)에서 사용 중이다. 또한 KNR20에서 S1002로의 변경은 김포경전철 횡방향 진동 개선 사례를 참고로 한 것이다. 차륜 프로파일을 S1002로 변경했을 때 차체 횡방향 진동은 초기값 대비 52.8% 정도 개선될 수 있을 것으로 예측되었다(Table 8). 향후 시운전 시험 시 차체 횡방향으로 진동이 심할 경우 차륜 프로파일을 S1002로 변경하는 것을 고려할 수 있다.

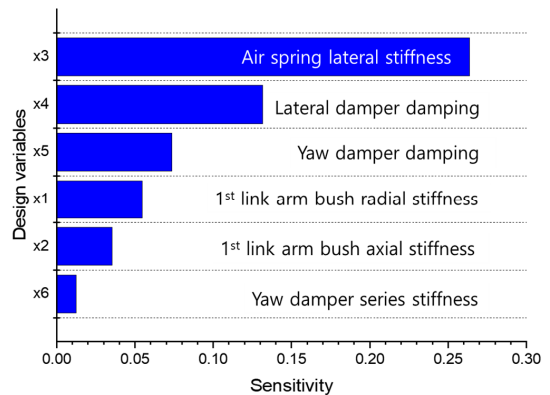


Fig. 11. Sensitivity analysis result

Table 6. Optimization result

Design variables	Optimum value
Air spring lateral stiffness( $x_3$ )	-20%
Lateral damper damping( $x_4$ )	+30%
Yaw damper damping( $x_5$ )	-20%

Table 7. Ride level improvement after optimization

Index	Initial		After optimization	
	Lateral Acc. RMS[m/s <sup>2</sup> ]	Ride level[dB]	Lateral Acc. RMS[m/s <sup>2</sup> ]	Ride level[dB]
Average	0.290	109.2	0.215	106.7
Improvement	-		25.8%	

Table 8. Ride level with S1002 wheel

Index	Initial		After optimization and S1002 wheel	
	Lateral Acc. RMS[m/s <sup>2</sup> ]	Ride level[dB]	Lateral Acc. RMS[m/s <sup>2</sup> ]	Ride level[dB]
Average	0.290	109.2	0.137	102.7
Improvement	-		52.8%	

### 3. 결론

본 연구에서는 국가연구개발사업으로 개발 중인 수소 연료전지를 동력으로 사용하는 철도차량의 주행거동을 일반철도차량 기술기준 및 KS R 9216에 따라 분석하였고, 횡방향 승차감의 개선이 필요하다고 판단되어 이에 대한 연구를 진행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 수소철도차량이 작은 곡선구간과 오송시험선 구간을 150km/h의 속도로 주행할 때, 주행거동을 일반철도차량 기술기준에 의해 분석하였다. 주행안전 관련 항목인 윤중감소량, 탈선계수 및 최대횡압은 기준치 이내였고, 주행안정성 측면에서 안전한 것으로 판단되었다.
2. 수소철도차량이 직선구간을 150km/h로 주행할 때의 승차감을 KS R 9216에 의해 평가하였다. 5km 직선구간을 150km/h로 주행 시 승차감 평가 결과 차체 횡방향은 109.2dB로 '보통(not uncomfortable)', 차체 상하방향은 98.7~99.1dB 정도로 '매우 우수(very good comfortable)' 수준으로 차체 횡방향의 승차감의 개선이 필요하였다.
3. 차체 횡방향 승차감 개선을 위하여 기존 현가장치 설계안에 대해 민감도 분석 및 최적화를 실시하였고, 차체 횡방향 가속도는 25.8% 개선 가능성을 확인하였다. 추가적인 횡방향 승차감 개선을 위해 차륜 프로파일을 현재 사용 중인 KNR20 대신 S1002로의 변경을 고려하였고, 차륜 프로파일 변

경 시 차체 횡방향 승차감은 초기값 대비 52.8% 정도 개선될 수 있을 것으로 예측되었다. 향후 시 운전 시험 시 차체 횡방향으로 진동이 심할 경우 간단한 해결 방안으로 차륜 프로파일을 S1002로 변경하는 것을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 개발되는 동력분산형 철도차량의 일종인 수소철도차량의 주행안정성 및 승차감을 해석적 방법으로 고찰하였으며, 횡방향 승차감 개선 방법을 제시하였다. 본 연구 결과는 향후 동력분산형 철도차량의 승차감 개선 연구에 유용하게 활용될 수 있다.

### References

- [1] C. S. Kim and S. D. Kim, "Development Trend of the Eco-friendly Hydrogen Railway Vehicle Technology," Railway Journal, Vol.23, No.2, pp.15-20, 2020. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09352154>
- [2] S. M. Lim, S. W. Sung, Y. K. Lee *et al.*, "Technical Trends of Hydrogen fuel cell railway rolling stock," Proceedings of 2018 Autumn conference of the Korean Society for Railway, pp.314-317, 2018. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07557304>
- [3] Y. G. Oh, B. Han, Y. K. Oh *et al.*, "Modeling of Hybrid Railway Vehicles with Hydrogen Fuel-Cell/Battery using a Rule-Based Algorithm," j.inst.Korean.electr. electron.eng. Vol.24, No.2, pp.610-618, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2020.24.2.610>
- [4] G. J. Jeong, J. B. Lee, H. W. Lee *et al.*, "Torque and Cooling Performance Improvement Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Railway Vehicles," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.23, No.12, pp.1172-1180, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2020.23.12.1172>
- [5] Resonate Group Limited, VAMPIRE Pro V6.60 users' manual, 2018.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2021-1263, Technical Standards for General Train (KRTS-VE-Part41-2021(R2)), <http://www.molit.go.kr/>
- [7] Korean Standards Association (2000) Railway rolling stock - Test and evaluation method for passenger comfort, KS R 9216.
- [8] 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://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.81>
- [9] R. L. Plackett, J. P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," Biometrika, Vol.33, No.

4, pp. 305-325, 1946.

- [10] R.H. Myers, D.C. Montgomery. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [11] European Standard (2020) Railway Applications- Wheelsets and Bogies-Wheels-Tread Profile, EN 13715:2020.

---

전 창 성(Chang-Sung Jeon)

[정회원]



- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원  
기계공학과 (기계공학석사)
- 2015년 2월 : 아주대학교 대학원  
기계공학과 (기계공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2004년 7월 : 다산  
네트웍스 주임연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기  
술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 기계공학