

## 전동차 현가구조에 따른 동적거동특성 분석

허현무<sup>1\*</sup>, 노학락<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 차세대철도차량본부, <sup>2</sup>서울교통공사 차량정비처

### Analysis on the Dynamic Behavior according to Suspension Structure of the Urban Railway Vehicle

Hyun-Moo Hur<sup>1\*</sup>, Hak Rak Noh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>Department of Rolling-stock Maintenance, Seoul Metro

**요약** 다수의 승객을 운송하는 도시철도 전동차는 도시 철도교통시스템의 핵심이다. 따라서 차량의 동적성능이 확보가 차량 안전 확보 및 승객서비스 차원에서 선행되어야 한다. 철도차량의 진동, 승차감과 같은 동적거동은 현가시스템 구조 및 현가요소에 따라 크게 영향을 받는다. 철도차량의 현가시스템은 윤축과 대차간 1차현가시스템, 대차와 차체간 2차현가시스템으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 국내에서 운용되고 있는 전동차 현가구조에 따른 전동차의 동적거동에 대하여 분석하고자 한다. 현가구조가 상이한 2종류의 전동차에 대하여 실제 선로에서 동일 주행조건으로 주행시험을 수행하였으며 차량의 진동을 측정하였고 진동과 승차감, 진동감쇠율과 같은 동적거동 특성을 분석하였다. 시험결과, 차체 진동 성능은 좌우방향은 B대차가, 상하방향은 A대차가 상대적으로 우수하게 나타났다. 승차감은 전반적으로 A대차가 B대차에 비하여 우수하게 나타났다. 진동감쇠율을 보면, 1차현가시스템은 고무스프링이 적용된 A대차에 비하여 코일스프링이 적용된 B대차의 진동감쇠 성능이 우수하며 2차현가시스템은 코일스프링에 비하여 공기스프링이 적용된 A대차의 진동감쇠 성능이 우수하다. 본 논문의 결과는 향후 철도차량 신차 설계 과정에서 현가구조 설계 및 현가요소 선정 시, 유용한 자료로 활용될 것이라 기대된다.

**Abstract** Urban railroad vehicles carry many passengers and are the core of an urban railroad transportation system. Therefore, the dynamic performance of the vehicle must be ensured. Dynamic behaviors such as the vibration and ride comfort of railway vehicles are affected by the structure of the suspension system. We analyzed the dynamic behavior of a railway vehicle according to the suspension system of an urban railway vehicle, which is mainly operated in Korea. For two types of vehicles with different suspension structures, the vibration of the vehicles on railway tracks was measured, and dynamic behavior characteristics such as vibration, ride, and vibration reduction rate were analyzed. The result of the test shows that the vibration performance of the body is superior to that of B-bogie in the lateral direction and that of A-bogie in the vertical direction. Overall, the ride quality of the A-bogie car is superior to that of B-bogie. When analyzing the vibration attenuation rate of primary suspension system, the vibration attenuation performance of B-bogie with coil spring was superior to that of A-bogie with a conical rubber spring. The secondary suspension system has better vibration attenuation performance for A-bogie with air springs compared to coil springs.

**Keywords** : Suspension, Coil Spring, Conical Spring, Vibration, Ride Index

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 "철도차량 사고예방을 위한 지능형 고속대차 핵심기술개발(PK2002D1)" 지원에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hyun-Moo Hur(Korea Railroad Research Institute)

email: hmhur@krii.re.kr

Received October 7, 2020

Revised November 2, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

## 1. 서론

도시철도구간을 운행하는 전동차는 도시 철도교통 수단의 핵심으로 매일 대규모의 승객을 수송한다. 따라서 이용 승객의 안전과 승차감, 동적성능을 확보하기 위한 차량 설계가 필요하다. 철도차량의 진동, 승차감 등과 같은 동적성능은 윤축과 대차간 1차현가시스템, 대차와 차체간 2차현가시스템으로 구성된 현가시스템 구조에 따라 영향을 받는다.

철도차량의 현가시스템은 차체 하중을 지지하고 레일로부터 전달되는 진동을 감쇠하는 기능을 수행하고 있다. 따라서 현가시스템 구조와 현가시스템을 이루는 스프링, 댐퍼의 같은 구성요소에 따라 진동 및 동적거동 특성이 달라진다.

따라서 본 논문에서는 국내에서 주로 운용되고 있는 전동차의 현가구조에 따른 전동차의 동적거동을 분석하고자 한다. 현가구조가 상이한 두 종류의 전동차를 대상으로 실선로 주행시험을 수행하였으며 차량의 윤축, 대차, 차체의 진동을 계측하였다. 현가구조에 따른 진동 감쇠 특성과 진동, 승차감과 같은 동적거동을 분석한 결과에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 현차시험 개요

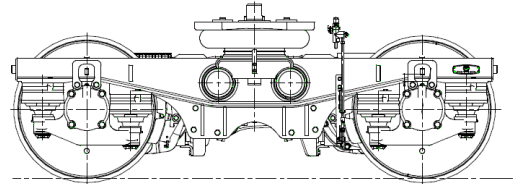
### 2.1 대차 현가구조

시험차량은 최고속도 100 km/h 급으로 설계된 대차 현가구조가 전혀 상이한 두 종류의 전동차를 대상으로 하였다. 본 논문과 관련된 현가구조의 차이를 보면 다음과 같다. Fig. 1과 Fig. 2는 시험대상 차량의 전동차 대차 구조로 각 A대차, B대차의 형상과 구조를 나타낸다.

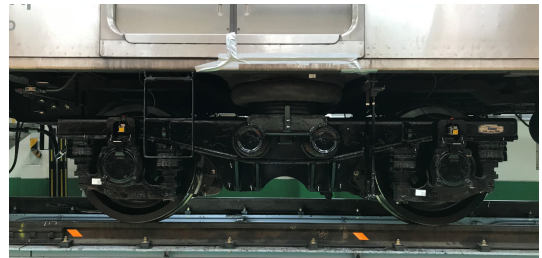
Fig. 1은 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 A대차의 도면과 형상으로 1차현가시스템이 코니컬고무스프링이 적용되어 있고 2차현가시스템은 볼스터가 없는 볼스터리스 구조로 공기스프링이 적용되어 있다. 1차 스프링은 총 8개의 코니컬고무스프링이 정칙되어 2개의 윤축과 대차 프레임을간의 하중지지 및 가이드 역할을 수행한다. 2차현가시스템은 2개의 공기스프링이 대차프레임과 차체 간 하중지지 역할을 수행한다.

Fig. 2는 B대차의 도면과 실물 형상으로 1차현가시스템이 코일스프링으로 구성되어 있고 2차현가시스템도 코일스프링과 수직댐퍼를 적용한 스윙볼스터 구조로 되어 있다. 1차 코일스프링은 총 8개가 2개의 윤축과 대차프

레임간 하중지지 및 가이드 역할을 수행한다. 2차현가시스템은 외부스프링 안에 내부스프링이 삽입된 구조로 총 4조의 볼스터코일 스프링으로 구성되어 있으며 대차프레임과 볼스터 간의 하중을 지지한다. 볼스터는 4개의 스윙 링크로 구성되며 차체 하중을 지지하는 구조로 되어 있다. 코일스프링으로 인한 공진을 저감시키기 위하여 수직 댐퍼가 장착되어 있다.

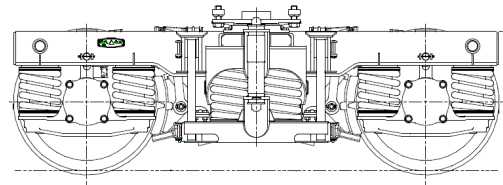


(a)



(b)

Fig. 1. A Bogie: (a) bogie structure; (b) bogie shape



(a)



(b)

Fig. 2. A Bogie: (a) bogie structure; (b) bogie shape

### 2.2 동적 거동 계측

A대차와 B대차를 적용한 시험차량의 동적거동을 계측하고자 주행속도와 차량 각 부의 진동을 계측하기 위

한 계측시스템을 구성하였다. 진동 측정 부위는 레일로부 터 전달되는 진동의 전달 경로인 윤축, 대차, 차체로 하였다. 진동가속도계는 각 각  $\pm 50G$ ,  $\pm 10G$ ,  $\pm 2G$  용량의 진동가속도계를 전위 윤축, 대차 중앙, 차체 상부 바닥에 각 각 설치하였다. Fig. 3은 진동가속도계 설치 사례와 계측시스템을 나타낸다.

시험차 하중조건은 승객이 탑승하지 않은 공차상태로 하였다. 그리고 시험차의 속도조건을 동일하게 하고 운행 선로도 동일하게 하기 위하여 Fig. 4와 같이 A대차 적용 시험차와 B대차 적용 시험차를 앞뒤로 나란히 조성하여 한 시험열차 편성에 포함시켰다. 시험 선로는 시험차가 영업 운행하는 선로(부천-동묘 구간)을 대상으로 주행 시험하는 것으로 하였다. Fig. 5는 시험선로 구간의 곡률정보를 나타낸다.

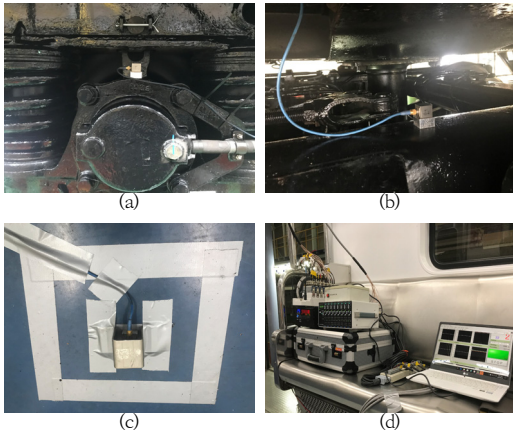


Fig. 3. Measuring system: (a) wheelset; (b) bogie; (c) carbody; and (d) data acquisition system



Fig. 4. Test train

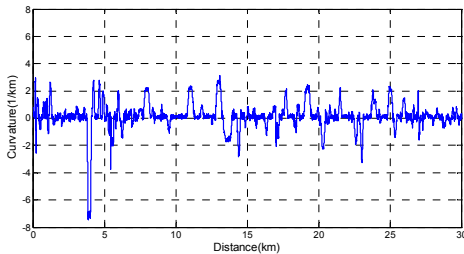


Fig. 5. Curvature distribution of the test line

### 3. 동적거동 분석

#### 3.1 분석방법

Fig. 6와 Fig. 7은 주행시험을 수행하여 측정한 A대차 시험차와 B대차 시험차에서 각 각 측정한 시험데이터이다. 윤축, 대차에 대하여 좌우방향, 상하방향 진동을 측정 한 데이터와 차체에 대하여 전후, 좌우, 상하방향으로 측정한 데이터이다.

이 시험데이터에 대하여 철도차량의 동적거동을 분석 함에 적용되고 있는 차체 진동성능, 승차감 그리고 윤축/ 대차, 대차/차체간 진동감쇠율을 분석하였다.

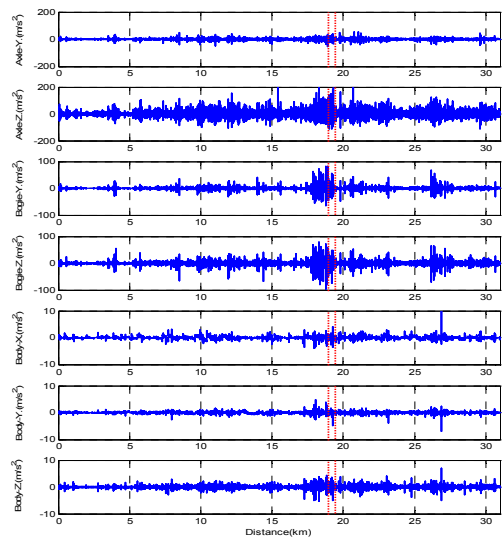


Fig. 6. Measuring data (A bogie)

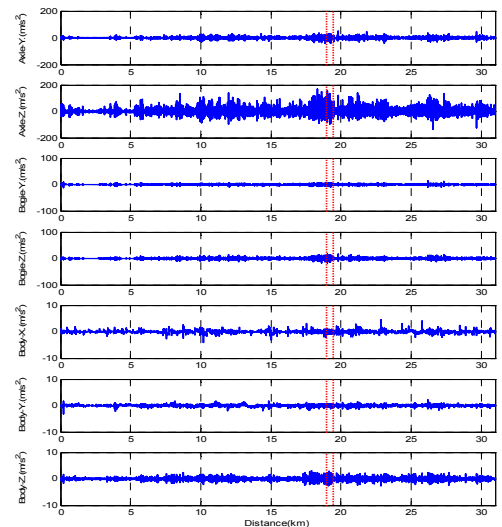


Fig. 7. Measuring data (B bogie)

### 3.2 차체 진동성능

차체의 흔들림을 나타내는 차체 진동성능은 "KS R 9160 철도차량의 진동특성 - 측정방법"에 의거하여 차체의 좌우방향, 상하방향 진동을 분석하였으며 분석방법은 다음과 같다[1,2]. 차체진동을 10Hz 저주파대역필터로 필터링한 후, 거리 100m 간격으로 나누어 그 구간에서의 전진폭(peak-peak) 최대치와 주행속도를 구한다. 속도 대역별로 분석한 결과값에 대하여 최대값과 산술평균을 구하여 분석하는 방법으로 속도에 따른 진동 수준을 평가하는데 적합한 분석기법이라 할 수 있다. 진동 수준은 "우수"에서 "불량"까지 통상 5단계의 레벨로 구분된다.

Fig. 8은 차체 좌우방향 진동 전진폭 분석결과이다. 최대값은 60km/h 속도 이상 대역에서 A대차가 B대차에 비하여 전진폭이 증가하는 경향을 보이고 있다. 평균값도 같은 경향을 보이고 있으며 A대차는 "보통", B대차는 "양호" 수준으로 평가된다.

Fig. 9는 차체 상하방향 진동 전진폭 분석결과이다. 전진폭 최대값과 평균값은 전 속도대역에서 A대차에 비하여 B대차가 크게 나타나고 있다. 평균값을 기준으로 A대차는 "양호", B대차는 "보통" 수준으로 평가된다.

따라서 10Hz 이하의 차체 흔들림을 평가하는 차체 진동성능은 좌우방향은 B대차가 A대차에 비하여 양호하고 상하방향은 A대차가 B대차에 비하여 양호함을 알 수 있다.

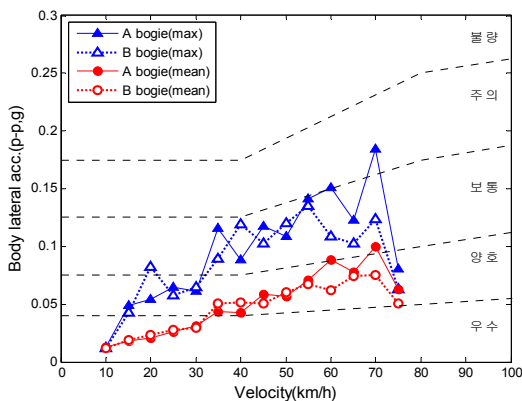


Fig. 8. Peak-peak analysis of the carbody lateral acceleration

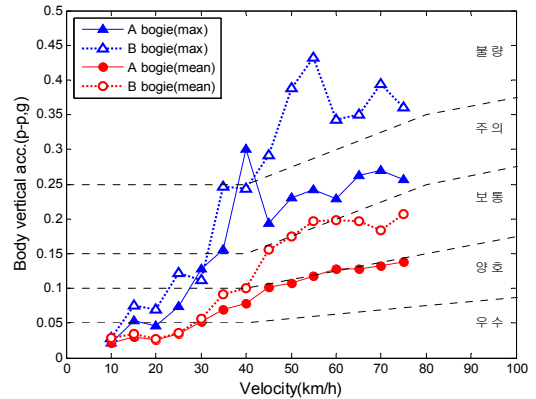


Fig. 9. Peak-peak analysis of the carbody vertical acceleration

### 3.3 승차감

차량의 동적거동 항목 중, 승차감은 차체 진동을 승객이 느끼는 승차감지수로 평가하는 방법이다. 두 시험차의 승차감 수준을 평가하기 승차감 시험규격인 "KS R 9216 철도차량 - 승차감 측정 및 평가방법"을 준용하여 승차감지수(ride index)를 분석하였다[3,4].

승차감지수는 전후, 좌우, 상하방향으로 측정된 차체 진동가속도 신호에 대해 Fig. 10과 같은 승차감 가중필터(weighting filter)를 처리한 후, 매 5초마다 실효값을 구하고 빈도를 누적하여 통계분석하여 각 방향으로 상위 95%에 해당하는 값을 구한 후 승차감지수( $N_{mm}$ ) 약식법 산출식에 적용하여 승차감지수를 구한다.

Fig. 11은 승차감지수 분석결과이다. 시험 구간 중 정상적으로 주행한 속도 50km/h 이상의 시험 구간에 대하여 승차감을 분석하였다. 구간별 승차감지수는 전반적으로 B대차의 승차감지수가 A대차에 비하여 크게 나타나 승차감은 A대차가 B대차에 비하여 상대적으로 양호함을 알 수 있다. A대차의 최댓값은 2.53, 평균은 1.62로서 B대차의 최댓값 2.82, 평균은 1.91에 비하여 작게 나타나고 있다. 이 승차감지수 분석결과는 좌우방향, 상하방향으로 각각 구분하여 전진폭을 분석하는 진동성능과 달리 전후, 좌우, 상하방향 진동을 모두 포함하고, 0.1 ~ 100Hz까지 주파수 대역별로 승차감 가중필터 처리하여 95%에 해당하는 실효치를 구하는 분석방법 특성에 따른 결과이다.

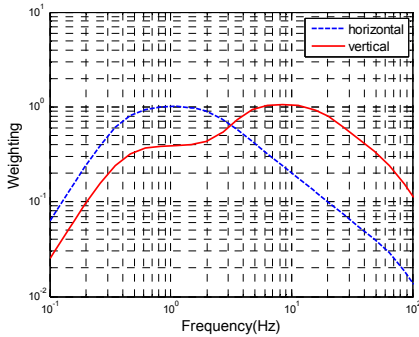


Fig. 10. Ride weighting filter

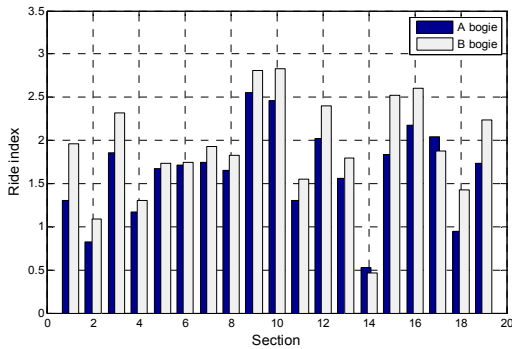


Fig. 11. Ride index

### 3.4 진동감쇠율

전동차 현가구조에 따른 진동감쇠 성능을 분석하고자 측정된 데이터 구간 중, 승차감이 가장 취약한 구간(Fig. 6, Fig. 7의 점선 구간) 데이터를 대상으로 진동감쇠 성능을 분석하였다.

Table 1은 해당구간의 윤축, 대차, 차체의 좌우, 상하방향 진동의 실효치를 나타낸다. Table 2와 Fig. 12, Fig. 13은 윤축과 대차간 진동감쇠율, 대차와 차체간 진동감쇠율, 윤축과 차체간 진동감쇠율을 나타낸다.

윤축과 대차간 진동감쇠율은 좌우, 상하방향 모두 A대차에 비하여 B대차가 커 감쇠성능이 우수하다. 반면, 대차와 차체간 진동감쇠율은 좌우, 상하방향 모두 B대차에 비하여 A대차가 커 감쇠성능이 우수하다. 종합적으로 윤축으로부터 대차를 거쳐 차체로 전달되는 진동감쇠율은 좌우는 A대차, B대차 모두 93.5%로 동일하다. 반면 상하는 A대차가 97.1%, B대차가 95.5%로 A대차가 B대차에 비하여 다소 양호함을 알 수 있다.

즉 윤축/대차간 진동은 A대차의 코일스프링에 비하여 B대차의 코일스프링이 진동감쇠가 우수함을 나타낸다. 그리고 대차/차체간 진동은 A대차의 공기스프링

이 B대차의 코일스프링에 비하여 진동감쇠가 우수함을 나타낸다. 이는 Fig. 14와 Fig. 15의 윤축, 대차, 차체 진동데이터에 대한 주파수 분석결과에서도 확인할 수 있다. A대차의 대차 진동은 윤축 진동에 비하여 감소되는 경향이 작은 반면, B대차는 전반적으로 좌우, 상하방향 모두 진동이 감소되는 경향을 보이고 있다. 반면, 대차에서 차체로 전달되는 진동은 좌우, 상하방향 모두 A대차가 B대차 비하여 현저히 저감됨을 알 수 있다.

한편, B대차의 경우 상하방향 1.9Hz의 차체 공진이 발견되고 있다. 이는 코일스프링을 적용한 2차현가시스템 구조에서 비롯된 결과로 차체 상하방향 공진을 저감시키기 위하여 2차수직댐퍼를 적용하였음에도 불구하고 진동 저감효과가 미미함을 의미한다. 이로 인하여 Fig. 9에서와 같이 B대차의 10Hz 이하 차체 상하방향 진동이 크게 나타난 원인이 된 것으로 판단된다. 따라서 이러한 차체 공진으로 인한 문제점을 해결하기 위한 2차수직댐퍼 감쇠계수 재조정 등의 추가 연구도 필요할 것으로 판단된다.

Table 1. Magnitude of vibration(unit:  $m/s^2$ )

part	lateral		vertical	
	A bogie	B bogie	A bogie	B bogie
axle	4.359	4.243	15.128	14.872
bogie	3.756	1.268	5.703	2.207
body	0.282	0.277	0.441	0.668

Table 2. Vibration reduction(%)

part	lateral		vertical	
	A bogie	B bogie	A bogie	B bogie
axle/bogie	13.8	70.1	62.3	85.2
bogie/body	92.5	78.2	92.3	69.7
axle/body	93.5	93.5	97.1	95.5

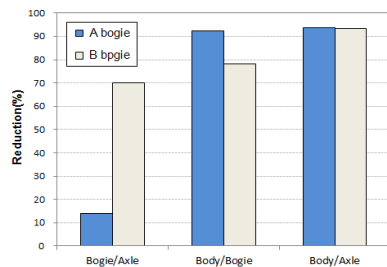


Fig. 12. Lateral vibration reduction

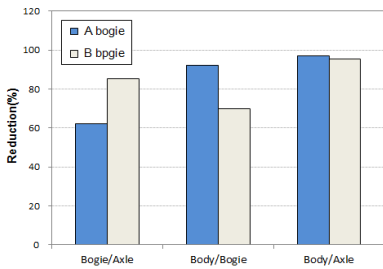
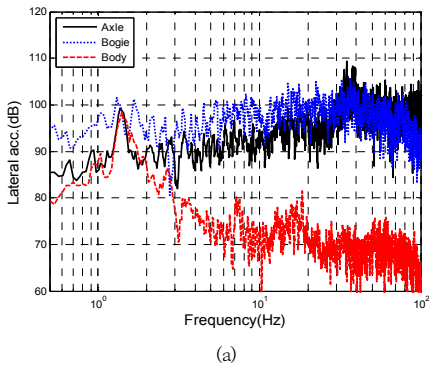
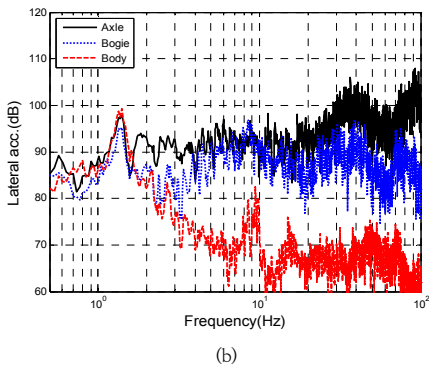


Fig. 13. Vertical vibration reduction

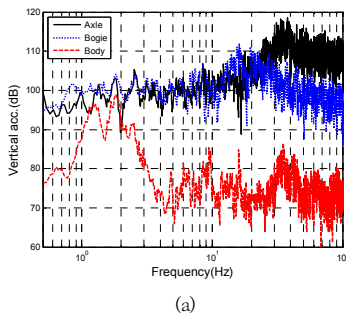


(a)

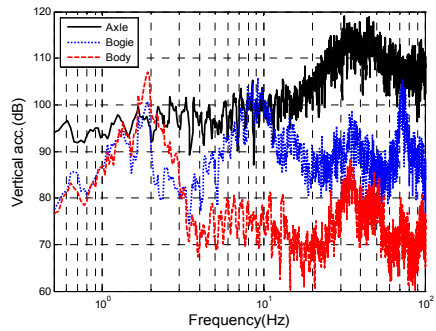


(b)

Fig. 14. Frequency analysis of the lateral acceleration: (a) A bogie; (b) B bogie



(a)



(b)

Fig. 15. Frequency analysis of the vertical acceleration: (a) A bogie; (b) B bogie

#### 4. 고찰

국내에서 운용되고 있는 전동차의 현가구조에 따른 동적거동을 분석하고자 현가구조가 상이한 두 종류의 전동차를 대상으로 현차 주행시험을 수행하였으며 동적 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

10Hz 이하의 차체 진동을 분석한 차체 진동성능은 좌우방향은 B대차가, 상하방향은 A대차가 양호한 특성을 보이고 있다. 즉, 좌우방향 평균은 A대차는 “보통”, B대차는 “양호” 수준으로 평가된다. 상하방향 평균은 A대차는 “양호”, B대차는 “보통” 수준으로 평가된다. 특히, B대차는 상하방향 1.9Hz의 차체 공진이 발견돼 상하방향 진동이 증가하는 결과로 나타나 이에 대한 개선책 마련이 필요하다.

승차감지수로 분석한 승차감은 A대차가 B 대차에 비하여 양호하게 나타나고 있다. 최댓값과 평균을 비교하여 보면, A대차는 최댓값 2.53, 평균 1.62로서 B대차의 최댓값 2.82, 평균은 1.91에 비하여 작게 나타나고 있다. 이는 0.1 ~ 100Hz까지 전후, 좌우, 상하방향 진동을 포함하여 가중필터 처리 후 통계분석한 결과로 승차감 측면의 진동감쇠특성이 A대차의 현가시스템 구조가 B대차의 현가시스템 구조에 비하여 양호함을 나타낸다.

윤축, 대차, 차체 간 진동 전달경로에 대한 진동감쇠율을 보면 윤축/대차간 1차현가시스템의 경우, 코니컬고무스프링을 적용한 A대차가 좌우 13.8%, 상하 62.3%로 코일스프링을 적용한 B대차의 좌우 70.1%, 상하 85.2%에 비하여 진동감쇠율이 저하하고 있다. 이는 고무제품을 사용하면 진동감쇠가 클 것이라는 생각과는 전혀 다른 실험적 결과로서 고무제품의 노화에 따른 교체 필요성, 이

에 따른 유지보수비용 증가 등의 문제점을 고려하면 추후 신차 설계 과정에서의 현가요소 선정 시, 심도 있는 검토가 필요하다고 사료된다.

대차/차체간 2차현가시스템의 경우, 진동감쇠율은 공기스프링을 적용한 A대차는 좌우 92.5%, 상하 92.3%로 코일스프링을 적용한 B대차 좌우 78.2%, 상하 69.7%에 비하여 코일스프링을 적용한 B대차에 비하여 진동감쇠율이 현저히 우수하다. 특히 코일스프링은 차체 공진현상이 발생함에 비하여 공기스프링은 공진현상이 발견되지 않고 주파수 전 영역에 대하여 우수한 진동감쇠 특성을 보이고 있다.

위와 같이 현가계 구조와 현가요소가 상이한 전동차를 대상으로 진동성능, 승차감, 진동감쇠율과 같은 동적거동 특성을 현차주행시험을 통하여 실험적으로 분석하였다. 이 결과는 향후 철도차량 신차 설계 과정에서 현가구조 설계 및 현가요소 선정 시, 유용한 자료로 활용될 것이라 기대되며 동적거동과 유지보수성을 함께 고려한 현가시스템 최적 설계에 대한 연구가 지속적으로 필요하리라 사료된다.

## References

- [1] Korean Standards Association (2007) KS R 9160 Vibration characteristics of railway rolling stock - Measuring methods
- [2] H. M. Hur, J. H. Park, W. H. You, T. W. Park, C. S. Yang, "An Analysis on the Influence of Wheel Flange Wear on the Vibration of EMU", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 12, pp. 230-235, 2009
- [3] Korean Standards Association (2000) KS R 9216 Railway rolling stock - Test and evaluation method for passenger comfort
- [4] H. M. Hur, C. S. Jeon, S. W. Kim, "A Review on Test Standard for Ride Comfort of Railway Vehicle considering the Domestic Railway Test Environment", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 21, No. 8, pp. 746-754, 2018  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2018.21.8.746>

허 현 무(Hyun-Moo Hur)

[정회원]



- 1990년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 아주대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1993년 5월 ~ 1996년 6월 : 고등기술연구원 주임연구원
- 1996년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 주행장치

노 학 락(Noh Hakrak)

[정회원]



- 2008년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원(공학석사)
- 1994년 12월 ~ 현재 : 서울교통공사 정비처장

<관심분야>

철도차량 주행장치