

철도 선하역사 진동 전달 특성의 실험적 분석

Experimental Analysis of Vibration Transfer Characteristics of an Elevated Railroad Station

Sanghyun Choi^{a,1}, Yong Yoo^a, Jinho Kim^{b,*}, Segon Kwon^c

^a Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-763, Republic of Korea

^b Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

^c Korail, 240 Joongang-ro, Dong=gu, Daejeon 300-720, Republic of Korea

ABSTRACT

To reduce noise inside an elevated railroad station, the vibration of the station structure should be lowered, and to establish more effective anti-vibration measures it is required that, reflecting the track-bridge-structure interaction, the transfer characteristics of vibration induced by a train is well identified. In this paper, the current status of domestic railroad stations is classified, and the vibration transfer characteristics is analyzed via measurement data from representative elevated stations. From the analysis results on the measurement data, in transferring vibration from the track to the structure, remarkable vibration reduction in higher frequency range is observed, and, in some stations, amplified response characteristics in lower frequency range is identified. Also, for stations with floating track system or TPS type, relatively greater reduction in transferred vibration is observed.

KEYWORDS

elevated station
vibration transfer
acceleration
frequency domain
analysis

선하역사 내부에 발생하는 소음을 저감하기 위해서는 진동의 감소가 필요하며, 보다 효과적인 진동 저감 대책 수립을 위해서는 궤도-접속교량-구조물의 상호작용 특성을 감안하여 열차 운행으로 발생하는 진동이 전달되는 경로 및 특성에 대한 명확한 이해가 필요하다. 이 논문에서는 국내 선하역사 현황을 구조적으로 분류하고 대표 선하역사에 대한 진동 측정을 통하여 역사에 발생하는 진동의 전달 특성을 분석하였다. 주파수응답을 통한 분석 결과 궤도의 진동이 역사로 전달되면서 고주파 성분이 큰 감소를 나타냈으며, 일부 역사에서 저주파 대역 내 증폭 구간이 발견되었다. 플로팅궤도가 적용되거나 TPS 구조의 역사는 궤도로부터 전달되는 진동이 비교적 큰 감소를 나타냈다.

선하역사
진동전달
가속도
주파수영역 분석

© 2015 Koea Society of Diaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-460-5774. Fax. 82-31-460-5749.
Email. ziminpa@krri.re.kr

1 Tel. 82-70-8855-1654. Email. schoi@ut.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Recieved Feb. 23, 2015
Revised Mar. 05, 2015
Accepted Mar. 22, 2015

1. 서론

최근 철도교통의 중요성이 부각됨에 따른 신설 및 개량노선의 증가, 콘크리트 궤도로의 점진적 교체, 열차 증속 및 증편 등으로 인하여 다양한 민원이 증가하고 있다. 이중 소음·진동에 대한 불만은 철도교통 활성화에 큰 걸림돌이 되고 있으며, 철도의 소음·진동 저감을 통한 쾌적한 환경 조성은 철도의 가장 큰 이슈가 되고 있는 상황이다. 특히 선하역사의 경우 노반이 고가구조물로 건설되는 구간에 선로하부의 유희공간을 활용하여 역사를 건축하는 방식으로 부지면적을 최소화하고 여객동선을 단축할 수 있어 경제적이거나, 열차의 소음·진동이 노반구조물을 통하여 역사내부로 직접 전달되므로 역내 종사원과 이용객을 위한 실내 환경을 쾌적하게 조성하기 어려운 구조이다(Kim et al., 2008; Choi et al., 2014).

실제 주요 선하역사에서 측정된 진동 레벨은 기준치보다 훨씬 높은 것으로 나타난 바 있으며, 역사 실내에서 측정되는 소음은 경우 차량-궤도에서 발생하는 진동의 전달로 인하여 발생하는 고체소음(structure borne noise)이 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다(Lee, 2014). 그러므로 선하역사 내부에 발생하는 소음을 저감하기 위해서는 진동을 감소시키는 것이 중요하며, 효과적인 진동 저감 대책 수립을 위해서는 궤도, 접속교량, 구조물 간 상호작용을 감안하여 열차 운행으로 발생하는 진동의 전달 경로 및 특성에 대한 명확한 이해가 필요하다.

현재까지 선하역사의 진동과 관련한 연구는 대부분 플로팅궤도 등 진동 저감 대책의 효과 검토에 집중되어 있으며, 진동전달 특성에 대한 연구는 많지 않은 상황이다. 역사 진동의 일차적인 원인인 차량-궤도시스템의 상호작용 및 플로팅궤도 기술의 비교 검토는 Kim et al.(2008)에 의하여 수행되었다. Jung et al.(2012)은 열차속도에 따라 고속철도역사에서의 소음예측을 하였으며, 속도 증가에 따라 소음진동 레벨(dB)이 증가한다고 분석하였다. Kim et al.(2013)은 철도구조물의 에너지 전달특성과 관련하여, 전달되는 진동에너지의 공진 등과 연관되는 고유진동 특성은 해당요소가 가지고 있는 단면, 강성 등 물리적 크기에 의해 결정된다고 하였다.

해외의 경우도 진동의 전달 특성과 관련한 연구보다는 소음·진동의 발생 특성이나 저감 기법과 관련한 연구가 다수이다. Pamanikabud et al.(2003)은 역사의 소음은 열차의 통과로 인한 소음 뿐 아니라 열차의 시동 및 제동으로 인한 소음도 중요한 인자임을 제시하였다. Ju et al.(2009)의 연구에 따르면 진동의 크기는 열차의 속도와 축간격으로 결정되는 지배주파수에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Wang et al.(2013)은 열차, 궤도 및 역사의 상호작용을 고려한 해석을 수행하고 플랫폼에서의 진동 특성을 분석하였다. Yang et al.(2013)은 선하역사에서의 진동 측정 결과 및 특성을 제시하였다. 측정된 역사 진동은 플랫폼 하부 슬래브의 수직 진동이 최고, 천정 아치에서의 가로방향 진동이 최소로 나타났다. 또한, 열차의 속도 증가 변화 또는 가진 주파수에 따라 진동이 증폭될 수 있는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 실제 선하역사에 대한 진동 측정을 통하여 역사에 발생하는 진동의 전달 및 발생 특성을 검토하였다. 구조적 차이에 따른 진동 특성의 변화를 보기 위하여 먼저 진입차량 유형, 접속교량 형식, 궤도 형식 및 층수 등에 따라 국내 선하역사를 분류하고 각 유형별로 대표역사를 선정하였다. 진동 측정은 오송역, 대천역, 금곡역 등 선정된 총 12개의 대표역사에 대하여 수행하였으며, 진동 전달 경로에 따라 레일, 침목, 슬래브, 기둥의 가속도를 측정하였다. 진동 전달 특성 분석은 현장에서 측정된 가속도에 대한 주파수응답을 이용하여 수행하였다.

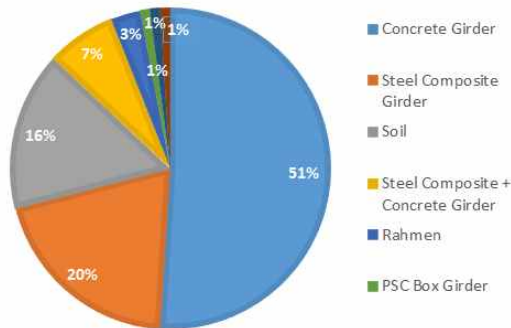
2. 대표 선하역사 선정

2.1 국내 선하역사 현황

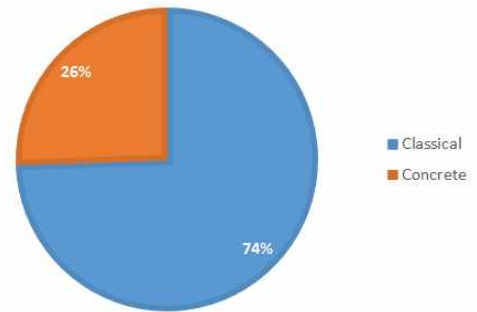
현재 국내에는 1,198개의 철도역사가 존재하며, 이중 선하역사는 전체의 약 8.2%인 98개이다(Lee, 2014). 운영기관 및 선구별 현황은 Table 1과 같다. Table 1의 선하역사를 접속교량 형식, 궤도형식, 층수 및 진입차량 유형에 따라 분류하면 Fig. 1와 같다. 참고로 층수는 지상만을 고려하였다. Fig. 1에서 국내 선하역사의 가장 보편적인 형식은 자갈궤도가 부설되고 콘크리트거더 교량이 접속되는 2층 도시철도역사가 가장 보편적인 형식으로 판단할 수 있다.

Table 1. The number of elevated stations

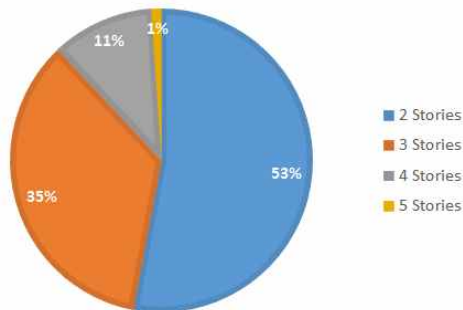
operating company	line name	number of stations	operating company	line name	number of stations
Korail	Gyungboo high speed	3	Korail	Sooin	6
	Gyungboo	2	Seoul Metro	2 nd	10
	Gyungeui	1		3 rd	1
	Gyungwon	14		4 th	4
	Gyungjeon	3	Seoul Metro. Rap. Trans.	7 th	1
	Janghang	6	Incheon Trans. Co.	1 st	1
	Jeonra	2	Busan Trans. Co.	1 st	6
	Gyungchoon	9		2 nd	3
	Joongang	6		3 rd	4
	Gyungin	1		4 th	5
	Ansan	6	Daegu Metro. Trans.	2 nd	1
	Ilsan	2	Gwangju Metro Trans.	1 st	1



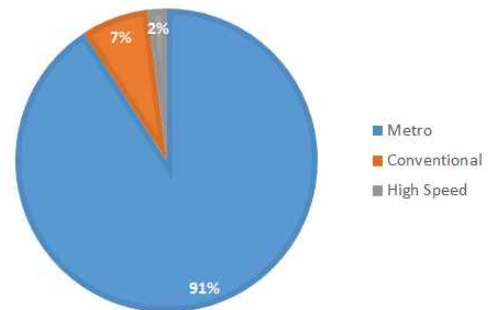
(a) types of connected bridges



(b) track types



(c) number of stories



(d) types of trains

Fig. 1. Classification of elevated railway stations

2.2 대표역사 선정

Fig. 1의 분류 결과 및 비중 등을 참조하여 Table 2와 같이 대표역사를 선정하였다. 참고로 구조형식(structural type)은 TBS(Track on Building System)와 TPS(Track on Pier System)로 분류하였으며, Fig. 2와 같다. TBS는 건물 형식의 역사구조물 위에 궤도가 부설된 형태이며, TPS는 교량 형식의 노반구조물 좌우로 역사구조물이 존재하는 형태이다.

Table 2. Selected representative elevated stations

station name	line type	bridge type	train type	track type	number of story	structural type
Ohsong	high speed	rahmen	KTX	concrete	3	TBS
Shinkyungjoo	high speed	rahmen	KTX	concrete	2	TBS
Daecheon	conventional	concrete girder	SME, MGH	classic	2	TBS
Bansung	conventional	rahmen	KTX, MGH	classic	2	TBS
Goonbook	conventional	concrete girder	KTX, MGH	concrete	2	TBS
Haman	conventional	concrete girder	KTX, MGH	concrete	2	TBS
Dobong	metro	steel composite	EMU	classic	2	TBS
Joongang	metro	concrete girder	EMU	classic	2	TBS
Wondang	metro	concrete girder	EMU	classic	3	TBS
Geomgok	metro	concrete girder	EMU	classic	4	TBS
Sangbong	metro	soil	EMU	classic	3	TBS
Deokgye	metro	concrete girder	EMU	classic	2	TPS

* EMU: Electric Multiple Unit, MGH: Moogoonghwa, SME: Saemaetul

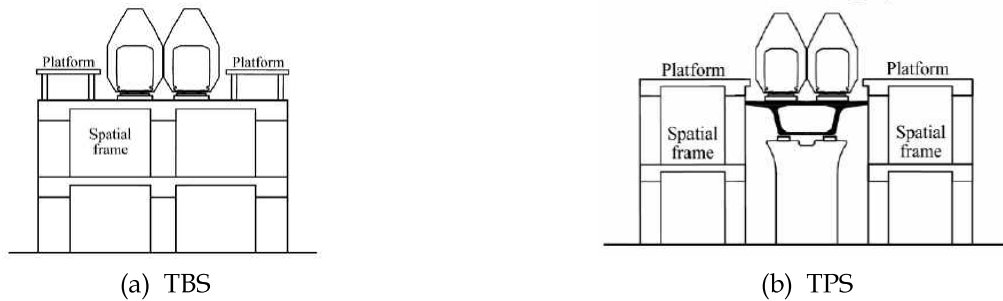


Fig. 2. Types of railway station systems

3. 현장계측

3.1 측정 위치 및 장비

진동전달 경로에 대한 측정은 가속도계를 이용하여 수행하였다. 측정 위치는 Fig. 3과 같이 레일, 침목, 궤도하부 슬래브, 역사기둥 및 기둥 하단 슬래브(이하 ‘바닥슬래브’) 등 예상 진동전달 경로를 따라 선정하였다. 진동 측정은 열차가 역사에 진입하는 시각부터 통과 후까지 수행하였다. Table 3은 측정에 사용된 장비이며, Fig. 4는 가속도계의 현장 설치 사진이다. 가속도계는 궤도의 경우 레일 북부 및 침목 중앙부, 역사 구조물의 경우 궤도하부 슬래브는 침목과 침목 사이 중앙부, 기둥은 양단으로부터 50cm 이상 이격된 위치, 바닥슬래브도 기둥으로부터 50cm 이상 이격된 위치에 부착하였다.

3.2 측정 결과 분석

열차 진입 시부터 정차 또는 통과 시까지 측정된 진동은 12.5Hz ~ 250Hz 사이의 주파수응답을 이용하여 비교 및 분석을 수행하였다. 고속철도역사의 측정 결과는 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5에서 콘크리트궤도이므로 침목과 궤도하부 슬래브의 값이 전반적으로 유사한 값을 나타내고 있으며, 궤도에서 전달된 진동이 저주파보다는 고주파 영역에서 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 오송역의 경우 기둥 상부에서 큰 진동을 보이고 있는데, 이는 불가피하게 가속도 센서를 기둥부재를 감싸고 있는 외장재에 부착한 이유로 판단되므로 궤도의 계측값과 기둥하부 및 바닥슬래브 간의 비교를 통하여 궤도-구조물 사이의

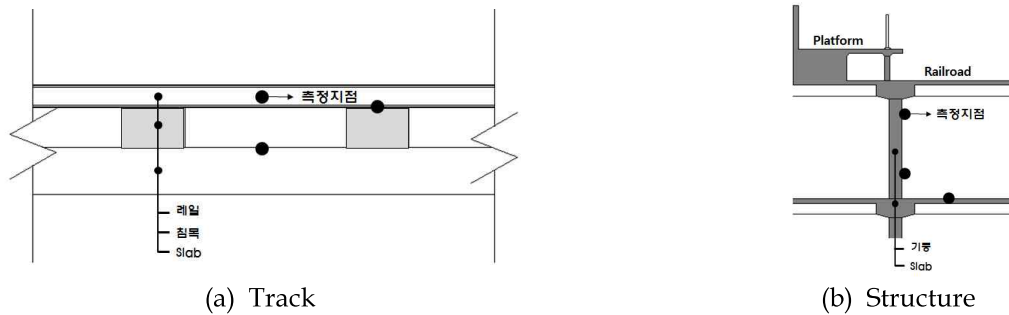


Fig. 3 Measurement location for vibration path



(a) Track






(b) Column



(c) Column bottom slab

Fig. 4. Accelerometers attached to the railway station for field measurement

Table 3. Devices and sensors for measurement

Device	Numbers	Functions	
Sound and Vibration Analyzer	1		- Net dB PRO-121_12 channels
Accelerometer	2 (50 mV/g)		- Measurement Range : ± 100g pk - Frequency Range : 1~5000 Hz
	2 (100 mV/g)		- Measurement Range : ± 50g pk - Frequency Range : 0.7~6500k Hz
Calibrator	1 (Accelerometer)		- Output Level : 10m/s ² , 10mm/s, -10µm rms . (159.15 Hz)

진동만을 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다. KTX 통과시를 비교할 때 저주파대역에서 궤도의 가속도 크기가 상이하나, 오송과 신경주역 모두 역사의 응답은 유사한 추세를 나타냈다. KTX가 통과하는 동일한 콘크리트궤도인 군북역의 경우(Fig. 7) 오송과 유사한 경향을 보였다.

Fig. 6은 도시철도역사 6곳의 측정결과이다. 이중 덕계역의 경우 타 역사들과 달리 TPS 형식으로 비교적 궤도에서 전달되는 진동량이 작으며, 상봉역 측정결과에서 대표적으로 발견되는 60Hz~100Hz 사이의 저주파대역 증폭 구간도 발견되지 않음을 알 수 있다. 접속교량의 형식이 다른 도봉과 상봉의 경우 큰 차이는 없었으나, 궤도와 궤도하부 슬래브 간의 진동이 다른 역사에 비해 큰 차이를 보였으며 상봉역은 저주파대역에서 기둥부의 진동이 비교적 크게 측정되었다.

Fig. 7은 일반철도역사인 대천역, 반성역, 함안역 및 군북역의 측정 결과이다. KTX가 정차하는 함안역의 경우 신경주 및 오송역과 유사한 경향을 보이고 있으나 구조물에 전달되는 진동은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 함안역에 설치된 플로팅궤도시스템의 영향으로 판단된다. 특히 다른 역사구조물에 대한 측정 결과에서 발견되는 60Hz~100Hz 사이의 증폭되는 부분이 크게 완화되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 무궁화 정차 시의 경우도 마찬가지로 나타났다.

4. 결론

이 연구에서는 국내 선하역사 현황을 구조적으로 분류하고 실제 선하역사에 대한 진동 측정을 통하여 역사에 발생하는 진동의 전달 및 발생 특성을 분석하였다. 측정된 진동에 대한 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 현재 1,198개의 국내 철도역사 중 선하역사는 전체의 약 8.2%인 98개이며, 가장 보편적인 형식은 자갈궤도가 부설되고 콘크리트거더 접속교량을 갖는 2층 도시철도역사이다.

(2) 진동 전달 특성을 분석한 결과 궤도의 진동은 역사구조물로 전달되면서 저주파보다는 고주파 영역에서 큰 감소를 나타냈으며, 대부분 60Hz~100Hz 사이의 저주파대역에서 증폭 구간이 발견되었다.

(3) 타역사와 달리 TPS 구조를 갖는 덕계역의 경우 궤도에서 전달되는 진동 감소가 비교적 크고 저주파대역 증폭 구간도 발견되지 않았다.

(4) 플로팅궤도가 적용된 함안역의 경우 KTX 정차시 타 역사와 유사한 경향을 보였으나, 구조물에 전달되는 진동은 크게 감소하는 것으로 나타났다.

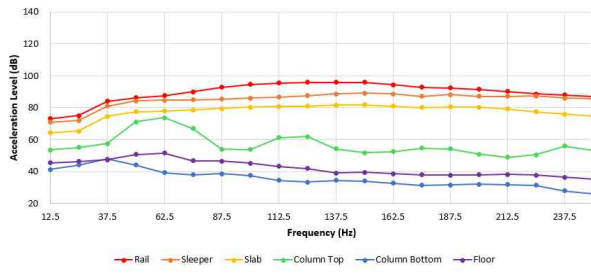
(5) 기둥의 경우 대부분의 역사가 외장재로 둘러져있어 진동이 증폭되는 경향을 보이는 경우가 많았으며, 향후 이러한 점을 감안한 측정 및 해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

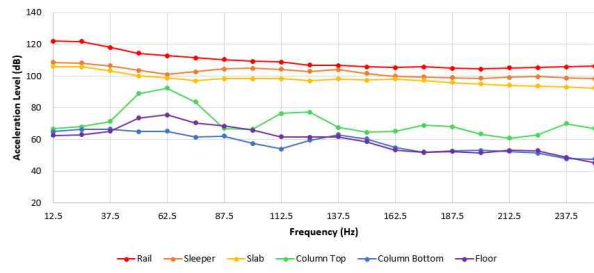
이 연구는 2014년도 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업 “역사 구조물 소음/진동 저감기술 개발” 지원에 의하여 수행되었음

References

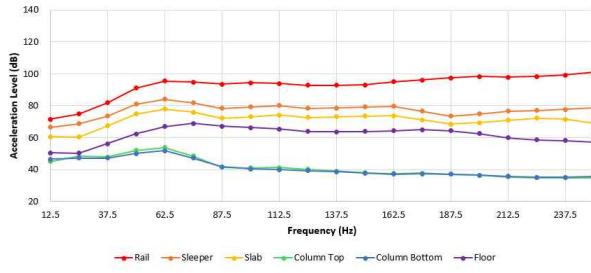
- Choi, S., Kwon, S. (2014). "Vibration analysis of an elevated railroad station considering station-bridge connection characteristics." *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol.10, No.2, pp.274-281.
- Ju, S.H., Lin, H.T., Huang, J.Y. (2009). "Dominant frequencies of train-induced vibrations." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.319, pp.247-259.
- Kim, J.H., Han, S.Y. (2008). "The review of floating slab tracks for vibration reduction of railway station." *Korean Journal of Environmental Engineers*, Vol.30, No.6, pp.581-586.
- Kim, J. T., Kim. T. (2013). "Vibration transmission characteristics of mechanical and building structures in railway." *Proceedings of Korean Society for Railway*, KSR2013A110, pp.428-429.
- Lee, J. (2014) *Improvement of Vibration Mitigation Efficiency for an Elevated Railroad Station Considering Transfer Characteristics*, Master's Thesis, Korea National University of Transportation.
- Pamanikabud, P., Paoprayoon, S. (2003). "Predicting mass rapid transit noise levels on an elevated station." *Journal of Environmental Management*, Vol.67, pp.353-362.
- Wang, T., Wei, Q. (2013). "Vibration characteristics of the platform in high-speed railway elevated station." *Telkomnika*, Vol.11, No.3, pp.1383-1392.
- Yang, N., Guo, T., Sun G. (2013). "Train-induced vibration on elevated railway station." *Journal of Central South University*, Vol.20, pp.3745-3753.



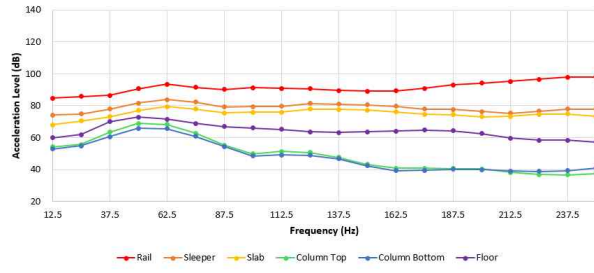
(a) Ohsong KTX (stopping)



(b) Ohsong KTX (passing)

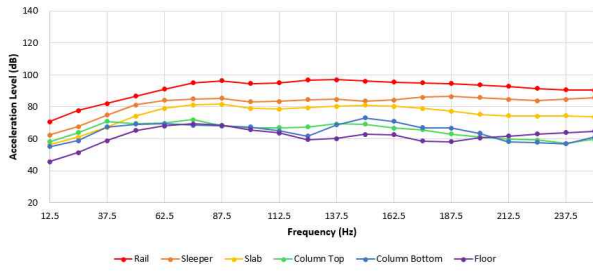


(c) Shinkyungjoo (stopping)

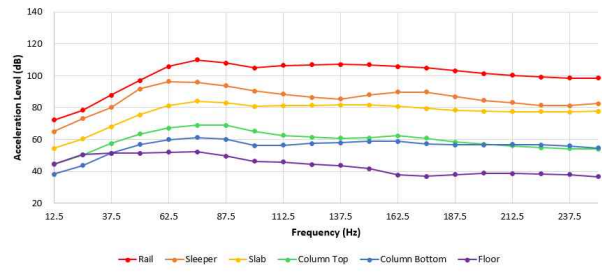


(d) Shinkyungjoo (passing)

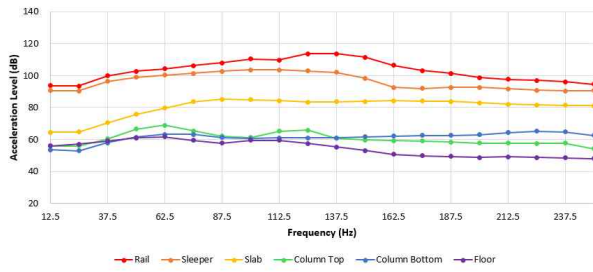
Fig. 5. Measured acceleration levels for high speed railroad stations



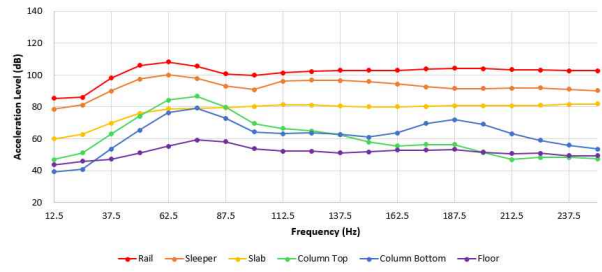
(a) Joongang EMU (stopping)



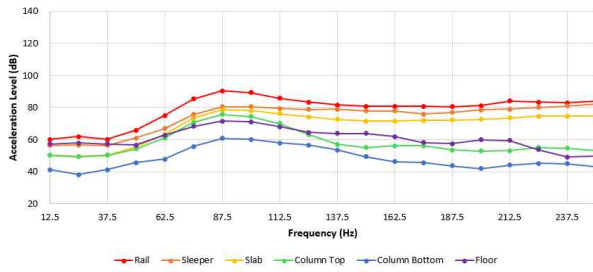
(b) Wondang EMU (stopping)



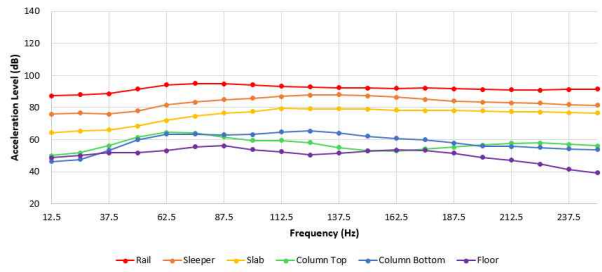
(c) Dobong EMU (stopping)



(d) Sangbong EMU (stopping)

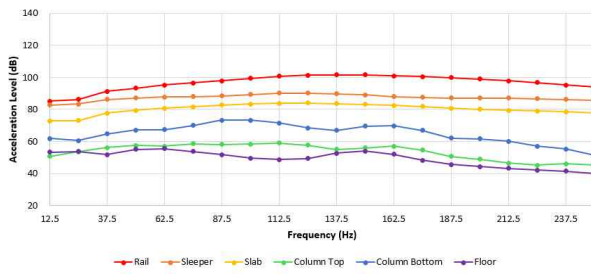


(e) Geomgok (stopping)

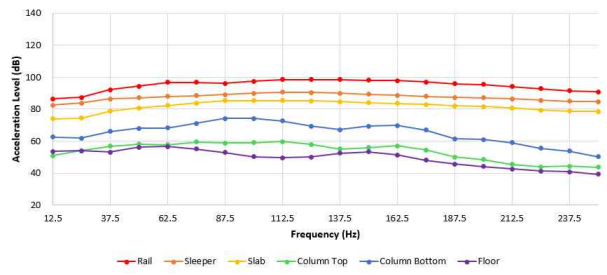


(f) Deokgye EMU (stopping)

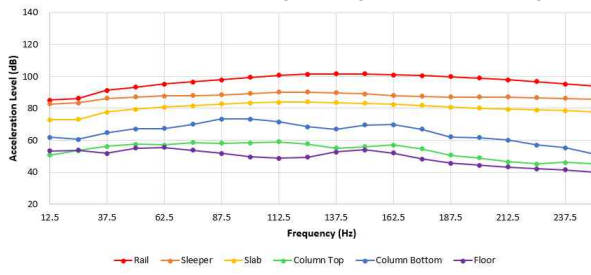
Fig. 6. Measured acceleration levels for metro railroad stations



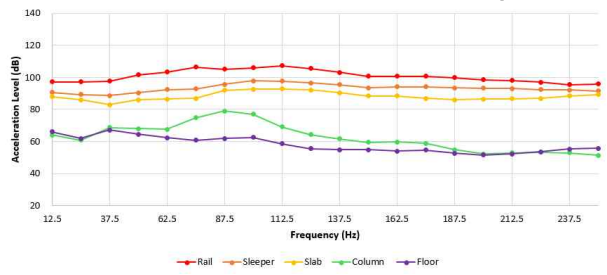
(a) Daecheon Moogoonghwa (stopping)



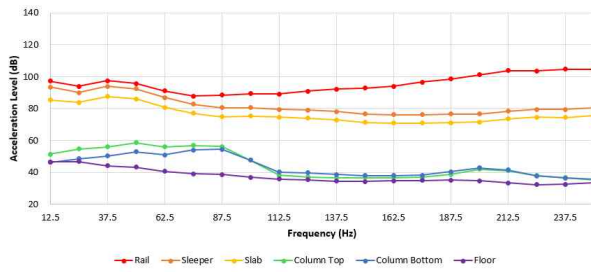
(b) Daecheon Saemaoul (stopping)



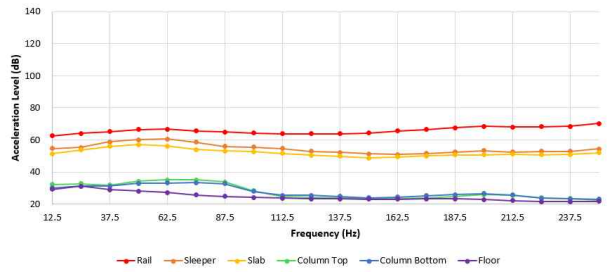
(c) Bansung Moogoonghwa (stopping)



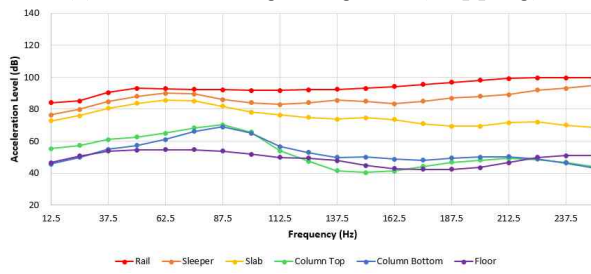
(d) Bansung KTX (passing)



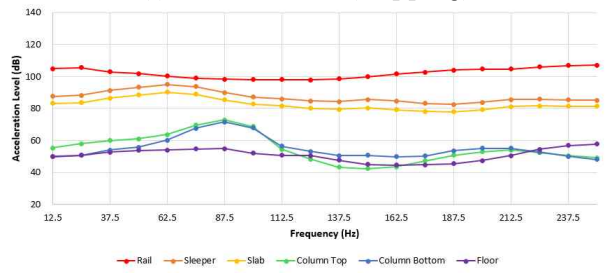
(e) Haman Moogoonghwa (stopping)



(f) Haman KTX (stopping)



(g) Goonbook Moogoonghwa (stopping)



(h) Goonbook KTX (passing)

Fig. 7. Measured acceleration levels for conventional railroad stations