

휴대폰 앱을 통한 철도인접지역의 열차진동 사용성평가

Train Vibration Serviceability Evaluation Near Railroad Areas Using Mobile-phone Application

정 영 석*
Jung, Young-Seok

윤 성 원**
Yoon, Sung-Won

Abstract

Recently, with development of city traffic network planning, there are various effects with living space from vibration of railway. But, study which about effect from vertical vibration in floor slab in nearing structure is lack in nowadays. This thesis have analysed result from acceleration response per distance as well as proceed with serviceability evaluation and extracted natural frequency from measuring vibration of railway using mobile phone application which is oriented for building which have distances about 5m to 22m from railway.

Keywords : Train vibration, Serviceability, Natural frequency, Mobile-phone, Vibration measurement

1. 서론

최근 도시 도로 교통망의 발달로 인하여, 각종 철도와 인간의 거주공간, 연구기관, 정밀 공장 등의 진동에 예민한 시설이 근접하는 경우가 증가하고 있어, 진동 평가 지점과 진동원과의 거리가 단축됨에 따라 열차진동이 지반을 통해 철도변 주민과 인접 건물에 전달되며 거주자의 사용성 문제가 발생하고 있다¹⁾. 실제 열차주행 시 철도진동이 지반에 끼치는 영향에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 인접 구조물의 바닥 슬래브의 수직진동에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구나 자료는 불충분한 실정이다²⁾.

교통기관 중에서 철도 진동원에 의한 환경진동의 가옥에 대한 영향 평가는 Mollock³⁾이 최초로 보고되어 있다. 이때의 진동수는 10~15Hz 범위로서, 가속도는 1gal에서 체감하며, 4~5gal 정도에 불쾌감을

느끼는 것으로 알려져 있다.

그 이후에 일본에서는 동경도 공해 연구소보⁴⁾에 동경도내의 국철과 사철의 노선구조별 진동레벨의 거리감쇠 회귀식을 산정하였다. 藤井⁵⁾ 등은 역사 건물형태별 2차원 유한요소해석을 적용하여 실측치와 해석치를 비교하였다⁶⁾.

국내의 지하철과 철도진동에 대한 연구로서 1993년 양신추⁷⁾는 고속철도의 진동원과 전과경로 및 수진부의 방진방법에 대하여 연구하였고, 최형일⁸⁾은 철도진동계측데이터에 근거하여 열차속도, 노선 및 철도의 종류에 따른 진동레벨을 분석하였다. 이재인⁹⁾은 실측을 통하여 철도진동의 특성, 거리감쇠, 영향 범위를 분석하였다. 1997년 김유석¹⁰⁾은 철도변 인접 건물의 진동예측을 위한 모형화 기법에 대하여 연구를 하였으며, 1998년 윤현욱¹¹⁾은 실험을 통하여 모형화기법의 효율성을 검증하였다. 박원형¹²⁾은 지하철 인접 신축건물에 대한 환경진동을 평가하였다. 2011년에 김지현¹³⁾은 철도인접지역의 신축예정건물의 진동평가를 지반에서의 계측데이터에 진동 전달률을 곱하여 신축건물의 진동을 예측하였다.

이와 같이 국내외의 연구에서는 철도인접건물의 해석모델, 진동의 전달 회귀식, 설계단계의 진동 전

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과 석사과정
Seoul National University of Science and Technology,
School of Architecture

** 교신저자, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
Seoul National University of Science and Technology,
School of Architecture
Tel: 02-970-6587, Fax: 02-979-6563
E-mail: swyoon@seoultech.ac.kr

달 예측식에 대한 연구는 많지만, 상대적으로 국내 철도인접지역의 건물을 대상으로 열차진동에 대한 사용성 평가에 대한 연구는 미약한 실정이다.




철도진동은 진동원으로부터 10~15m 떨어지면, 사용성을 만족하는 것으로 보고되고 있다⁶⁾. 따라서 이 논문에서는 철도인접지역 3동을 선택하였다. 계측건물은 6층 이하의 저층건물을 선택하였으며, 열차선로로부터 5~22m 떨어진 건물을 대상범위로 하였다. 열차가 통과할 때, 가속도응답과 건물바닥의 고유진동수를 산정하여 철도진동에 대한 사용성 평가를 실시하였다. 사용성 평가 시에는 열차의 종류와 열차의 선로로부터의 거리를 변수로 하여 분석하였다.

2. 열차진동 계측실험

2.1 대상건물의 특징

실제 철도인접건물에 대한 철도진동을 계측하기 위해 서대문구의 철도인접지역에 위치한 3동의 철근콘크리트 라멘조의 건물을 선정하였으며, 건물의 특징은 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Specifications of measured buildings

	Building A	Building B	Building C
Site	Seodaemun-gu, Seoul		
Structural type	RC	RC	RC
Floors	Above 6 floors	1 basement above 2 floors	Above 7 floors
Use of building	Office	Senior-citizen center	Office
Kind of train	Subway, Mugunghwa, Saemaetul, ITX, KTX, cement freight train		
Distance	Southbound lane 13m	Northbound 17m Southbound 22m	Northbound 10m Southbound 5m
Exterior of building			

2.2 계측방법 및 계측기기

기존의 진동 계측장비는 서보 가속도계, 신호 측정기(Signal conditioner), FFT 분석기 등을 각각 갖추어야 하며, 이 시스템을 구성하는데 상당한 고가의 비용이 소요될 뿐만 아니라 많은 인력과 시간이 소요된다. 따라서 이 논문에서는 <Fig. 1>과 같이 현장에서 환경에 제약이 없는 간단한 휴대폰 진동 애플리케이션을 이용하여 진동계측을 실시하였다. 휴대용 계측기는 2방향 수평 가속도와 1방향 수직 가속도에 대한 계측을 실시할 수 있으며, 동적특성도 모니터링 가능하다. 휴대용 진동계측기는 MEMS 가속도계가 내장되어 있으며, 3축 가속도계는 약 0.02g의 감도와 최대 ±2g까지 계측이 가능하다^{14),15)}.

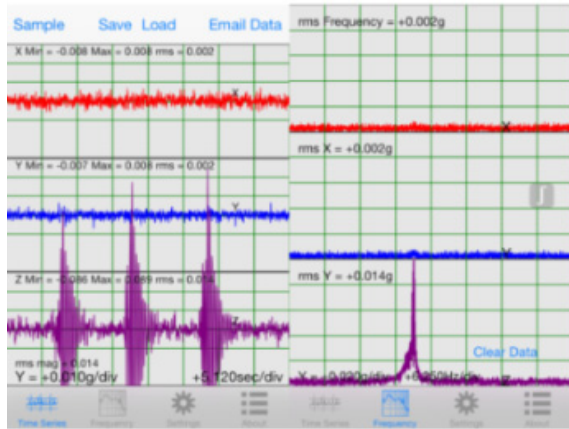
이 연구에 사용한 진동 계측 애플리케이션은 <Fig. 2>와 같이 Vibration과 I-jishin App을 사용하였고, 이는 0~100Hz의 주파수대역에서 실시간으로 3축에 대한 시계열 파형과 FFT분석이 가능하다.



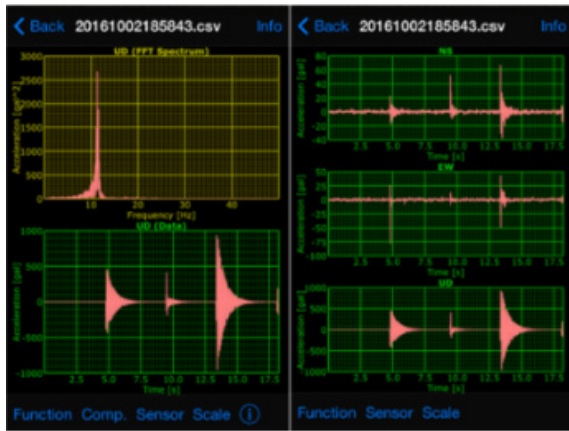
<Fig. 1> Expensive vibration devices²⁾

계측방법으로는 <Fig. 3>과 같이 철도에 인접한 대상건물의 각 층의 바닥슬래브 중앙부에 가속도계를 설치하였으며 열차 운행 시 진동을 측정하였다. 계측 시 사용되는 휴대용 진동계측기의 질량은 137g이며, 부착에 사용된 양면테이프의 경우, 하나 당 부착면적이 2.5cm²인데 부착강도가 100g/2.5cm²이므로 2개를 부착하면 200g의 질량을 견뎌내므로, 기존의 진동계측기와 같은 환경으로 계측이 가능하다. 열차가 계측건물에 근접하면 계측을 시작하였고, 진동파형은 휴대용 진동계측기에서 관찰할 수

있다. <Table 2>에 각 대상건물에 사용한 진동계측기와 진동계측 애플리케이션의 설정값을 나타내었다.

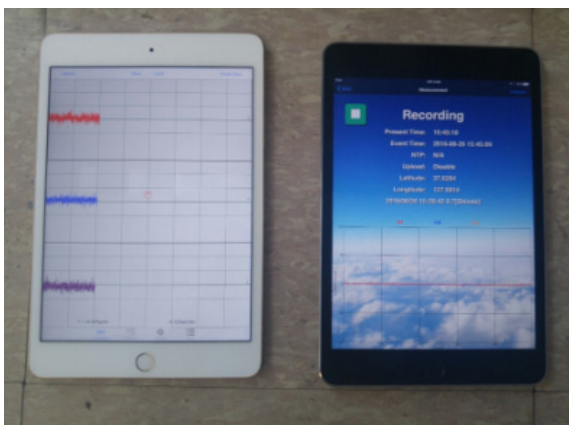


(a) Vibration app²⁾



(b) I-jishin

<Fig. 2> Time series and frequency of vibration measurement application



<Fig. 3> Attached vibration measuring instrument

<Table 2> Vibration accelerometer and settings for building

	Building A ²⁾	Building B	Building C
Model	iPhone4S/ iPad	iPad mini 4	iPad mini 4
Accelerometer	LIS331DLH	BMA280	BMA280
Application	Vibration	I-jishin	I-jishin
Sample rate	80Hz	100Hz	100Hz
Measuring time	51.20	40.96	
Analysis of data	4096		

철도진동계측은 APPLE사의 iPhone4S, iPad, iPad mini 4를 사용하였고, 각 장치에 내장된 MEMS 센서는 iPhone4s는 LIS331DLH이며 iPad mini 4는 BMA280로서 센서에 대한 제원은 <Table 3>에 나타내었다. 건물 A의 건물의 Sampling rate는 80Hz로 설정하였고, 건물 B와 건물 C의 경우에는 고유진동수가 고주파수대역에 있는 관계로 Sampling rate를 100Hz로 설정하여 계측을 진행하였다.

계측한 데이터에 대해서, 각 건물의 최대가속도 응답에 대해서 철도진동에 대한 사용성 평가를 진행하였고 철도와 건물의 거리별, 건물의 높이별 가속도응답을 분석하였다.

<Table 3> MEMS accelerometer specification

Axis	BMA280				LIS331DLH		
	3-Axis				3-Axis		
Acceleration range(±g)	2	4	8	16	2	4	8
Sensitivity (mg/LSB)	0.224	0.488	0.977	1.953	3.9	2	1
Voltagefed(V)	1.62-3.6				2.16-3.6		
Output type	Digital				Digital		
Bandwidth(Hz)	100-400				100-400		

3. 진동 계측데이터

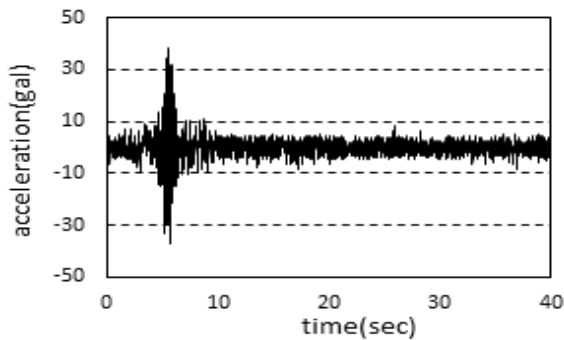
진동계측은 열차가 대상건물에 인접한 철도를 통과할 때 계측한 시계열 파형을 통해 최대응답가속

도를 산정하였으며, 시계열 파형에서 파워스펙트럼을 구하여 고유진동수를 산정하였다.

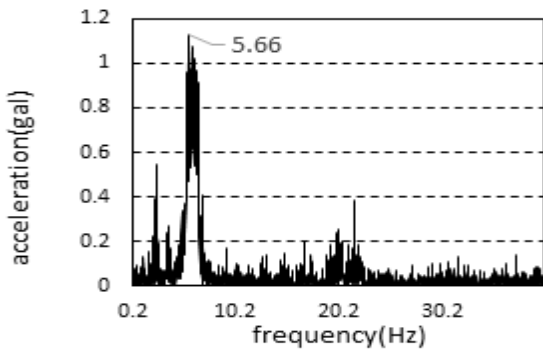
3.1 계측데이터

철도 계측은 <Table 2>에서 언급한대로 철도인접 지역의 대상건물들에 대해 80Hz, 100Hz의 Sampling rate로 각각 51.20초, 40.96초로 데이터를 기록하였다.

건물 A에 근접한 열차가 통과할 때 1층과 4층에 가속도계를 설치하여 계측을 진행하였는데, 건물 1층의 고유진동수의 평균값은 6.12Hz, 4층의 고유진동수의 평균값은 9.49Hz이다. 통과하는 열차 중 무궁화호인 경우 최대 가속도는 1층에서는 39.22gal, 4층에서는 13.07gal임을 알 수 있다. 무궁화호 이외에서는 고유진동수를 확인하기 어려웠는데, 이 이유는 운행속도가 비교적 저속이고 무궁화호는 디젤엔진을 사용하기 때문에 통과직전의 진동이 비교적 크기 때문인 것으로 판단된다. <Fig. 4>, <Fig. 5>는 건물 A의 1층과 4층의 수직방향의 시계열 파형 및 파워스펙트럼이다.

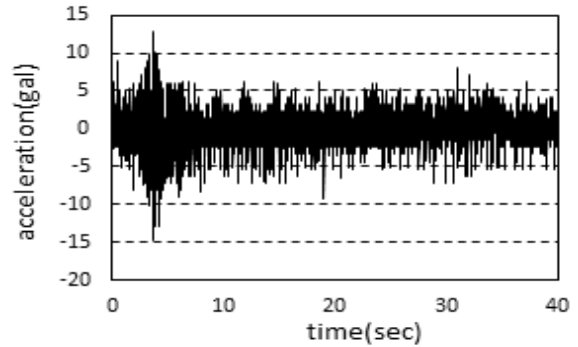


(a) Time series waveform of 1st floor

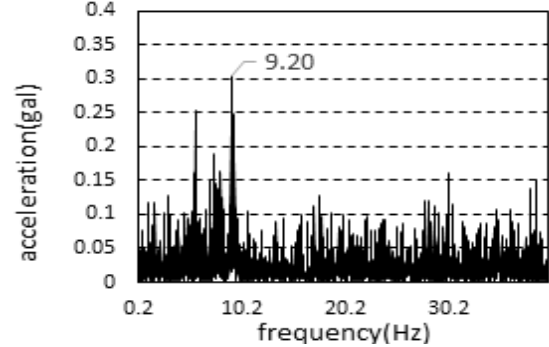


(b) Power spectrum of 1st floor

<Fig. 4> Train vibration of 1st floor Building A (Mugunghwa southbound lane)²⁾



(a) Time series waveform of 4th floor



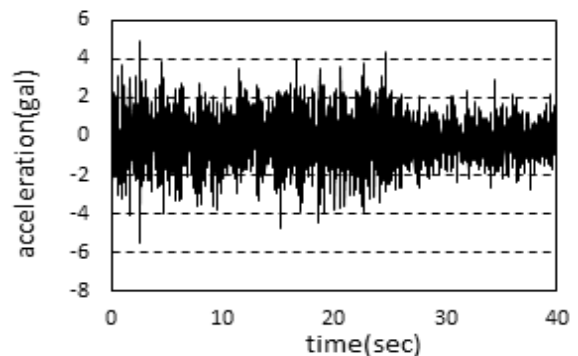
(b) Power spectrum of 4th floor

<Fig. 5> Train vibration of 4th floor Building A (Mugunghwa southbound lane)

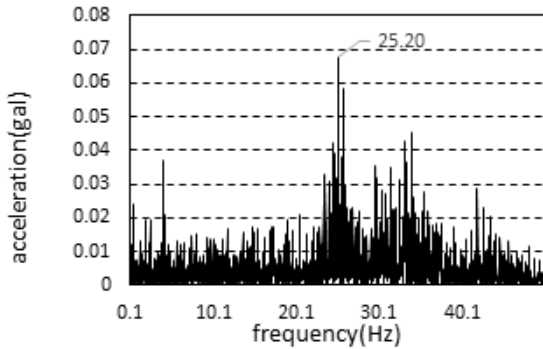
건물 B에서는 계측 시에는 철도와 건물 사이에 방음벽이 설치되어 있기 때문에, 열차의 종류를 파악하지 못한 상태로 계측을 진행하였다.

건물 B에서 최대 가속도는 상행선(17m)인 경우 6.16gal, 하행선(22m)인 경우 6.63gal인 것을 알 수 있다. 1층 바닥의 고유진동수는 25.1Hz이다.

<Fig. 6>은 수직방향의 시계열 파형 및 파워스펙트럼을 나타내었다.



(a) Time series waveform of 1st floor

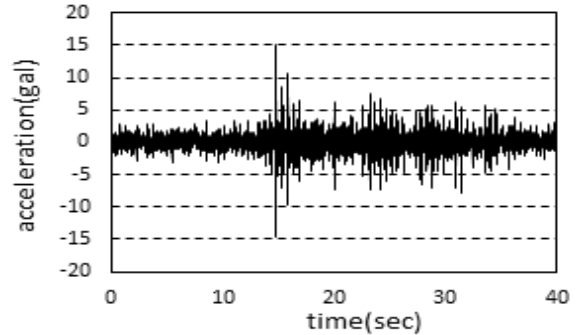


(b) Power spectrum of 1st floor
 <Fig. 6> Train vibration data of Building B

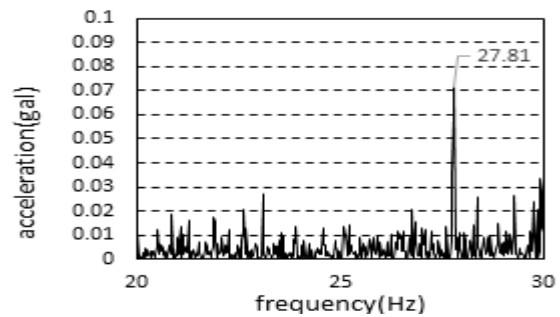
건물 B의 파워스펙트럼을 보면, 비교적 작은 가속도응답에 비해 고유진동수의 3차모드까지 나타나는 양상을 확인할 수 있다.

건물 C에서 무궁화호의 경우 최대 가속도는 하행선(5m)에서 26.81gal, 상행선(10m)에서 15.68gal임을 알 수 있다. 1층의 고유진동수는 40.93Hz이다.

<Fig. 7>과 <Fig. 8>은 무궁화호의 상하행선의 수직방향의 시계열 파형 및 파워스펙트럼이다.

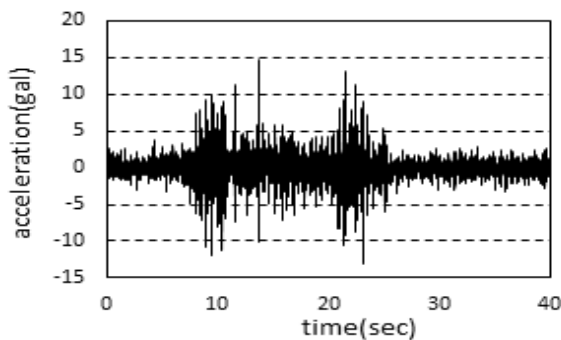


(a) Time series waveform of 1st floor

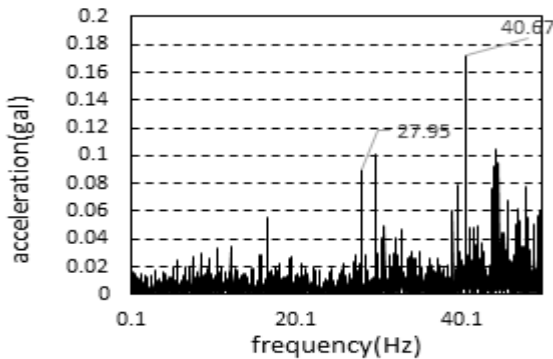


(b) Power spectrum of 1st floor

<Fig. 8> Train vibration of 1st floor Building C (Mugunghwa northbound lane)



(a) Time series waveform of 1st floor



(b) Power spectrum of 1st floor
 <Fig. 7> Train vibration of 1st floor Building C (Mugunghwa southbound lane)

3.2 최대가속도 및 고유진동수

열차가 각 대상건물을 통과할 때의 철도진동을 계속하였고 고유진동수와 최대가속도를 <Table 4>에 정리하였다.

열차와 13m 떨어진 건물 A에서 열차진동의 영향이 가장 크게 계측되었으며, 최대가속도는 39.22gal을 나타내었다. 이때의 진동원은 무궁화호 하행선이 건물에 비교적 빠른 속도로 운행할 때이다.

열차가 통과할 때 가속도 크기의 범위는 5gal에서 39gal까지의 범위로 계측이 되었고, 열차의 종류를 알 수 없는 건물 B를 제외하고 모두 무궁화호가 인접철도를 통과할 때, 가장 큰 가속도를 나타낸 것을 알 수 있다. 이는 무궁화호의 주행 시에 진동소음이 비교적 큰 디젤엔진을 사용하였기 때문으로 사료된다. 또한 전철이 통과할 때 1층에 8.10gal, 4층에 8.14gal로 가장 작은 영향을 보였다. 철도로부터 가장 먼 거리로 떨어져 있는 건물 B는 가장 작은 가속도 응답을 보였다.

<Table 4> Vibration data of buildings

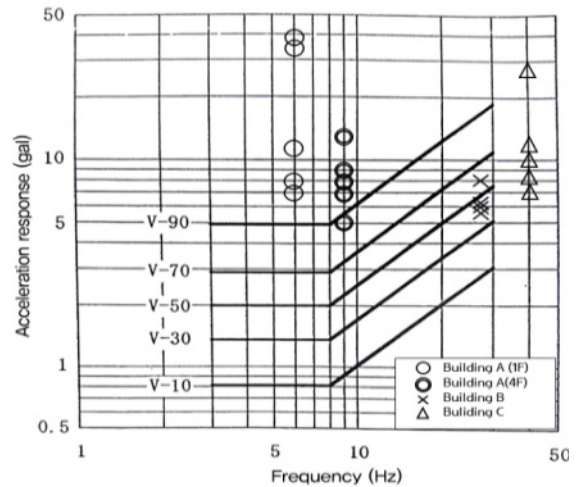
Name	Distance (m)	Natural frequency(Hz)		Vibrations source	Acceleration response(gal)	
		1F	4F		1F	4F
Building A	13 (Southbound lane)	6.12	9.49	Mugunghwa	39.22	13.07
				Cement freight	9.08	9.40
				Gyeongui subway	8.10	8.14
				ITX	11.10	9.39
				KTX	8.24	6.12
Building B	17 (Northbound lane)	25.1	-	NA	6.16	-
	22 (Southbound lane)		-	NA	6.63	-
Building C	5 (Southbound lane)	40.93	-	Mugunghwa	26.81	-
	Gyeongui subway			11.19	-	
	Mugunghwa			15.68	-	
	KTX			9.38	-	

4. 결과 및 분석

4.1 철도진동 사용성 평가

일본에서는 건물의 진동에 대하여 해외의 여러 진동평가기준을 종합적으로 연구하여 1991년도에 “건축물의 진동에 관한 거주 성능 평가 지침¹⁶⁾”을 제정하였으며, 2004년 개정판(AIGES-2004)에서 지침을 개정하였다. 이는 ISO2631-2, 마이스터곡선, GSA, CSA 등의 기준을 종합적으로 비교분석하여 진동평가곡선을 정한 것이며, 진동의 종별과 건물의 용도별로 허용진동의 등급을 나누고 있다¹⁷⁾.

진동계측을 통해 계측한 데이터를 바탕으로 일본의 각 고유진동수별 가속도 제한 값을 명시한 교통 진동 진동기준으로 사용성 평가를 실시하였고 <Fig. 9>와 같이 대상건물들을 구분하여 나타내었다.



<Fig. 9> Vibration serviceability evaluation¹⁶⁾

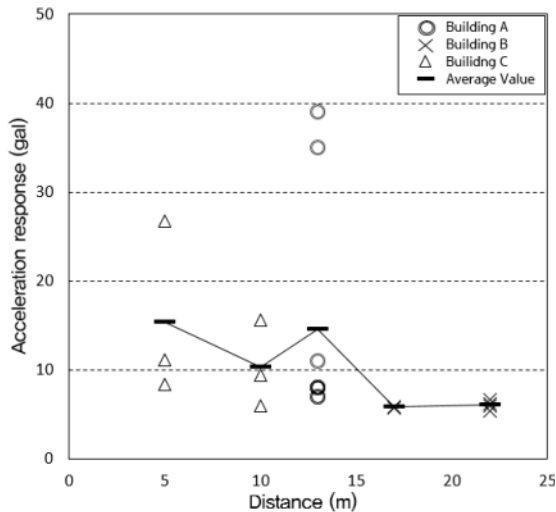
건물 A의 1층과 4층의 경우 모든 열차가 통과할 때 일반사무실에 대한 권장치(V-30)를 모두 초과하는 것을 알 수 있다. 건물 B의 경우에도 마찬가지로 노인정(주거)의 제한레벨인 V-10인 것에 비해 기준 범위를 넘어서고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 건물 C의 경우에는 주파수범위기준 밖에 있으므로, 명확하게 사용성 평가를 하는 것에는 제한이 있다.

건물 A와 B는 열차의 상·하행선 철도로부터 13, 17, 22m 떨어져 있음에도 불구하고 지역의 환경 진동에서 보고한 10~15m범위 이외에서도 사용성 문제가 발생함을 알 수 있다.

4.2 인접거리별 가속도응답 분석

철도인접지역의 대상건물 3동에 대한 계측데이터에 근거하여 인접철도와 건물의 거리에 대한 가속도응답을 <Fig. 10>과 같이 나타내었다.

<Fig. 10>에 의하면 5m 떨어진 건물 A의 평균최대가속도가 15.44gal에서 철도에서 17m 떨어진 건물의 평균가속도응답이 5.8gal로 가속도감쇠를 확인할 수 있다. 하지만 철도로부터 13m 떨어진 건물의 경우, 비교적 높은 값을 나타내고 있는데, 이는 계측 시 일반주행속도보다 비교적 빠르게 통과하여 가속도응답이 큰 무궁화호의 데이터가 포함되어있기 때문이라고 사료된다.



〈Fig. 10〉 Response according to the distance

5. 결론

서울의 철도인접지역에 위치한 3동의 건물에 대한 철도진동계측을 통하여 얻은 데이터를 통해 사용성 평가와 거리별 가속도응답을 비교하였다.

1) 무궁화호, 시멘트 화물열차, 경의선전철, ITX, KTX 중에서 무궁화호가 39.22gal로서 가장 큰 가속도 응답을 보인 반면에, 전철은 6.12gal로서 가장 작은 가속도응답을 나타내었다. 이는 무궁화호의 주행시에 진동소음이 비교적 큰 디젤엔진을 사용하였기 때문으로 사료된다.

2) 건물 A, B의 사용성 평가는 V-30~V-90의 범위에 있으며, 이는 사무실 권장치(V-30)과 주거 권장치(V-10)를 초과하는 수치임을 알 수 있다. 따라서 철도인접지역의 열차진동에 대한 사용성 평가는 만족하지 못하는 것을 알 수 있고, 지역의 환경 진동⁶⁾에서 보고된 철도인접거리 10~15m의 범위 밖인 22m 떨어진 건물에서도 사용성에 문제가 됨을 알 수 있다.

3) 향후 연구에서는 통과하는 열차에 대한 열차 속도, 지반의 상태, 승객의 수 등 세부적인 요소를 고려한 계측을 통한 국내에 대한 교통진동의 사용성에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2016R1A2B2014064)

References

1. J. H. Kim, S. W. Yoon, "Transmissibility Effect Evaluation of Buildings Near Railroad Areas", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 11, No.1, pp.131~138(2011)
2. Y. S. Jung, S. W. Yoon, "Train Vibration Evaluation near Railroad Area", Proceedings of KASS 2016 Spring Conference, Vol. 12, No. 1, pp.59~60(2016)
3. Mallock, H. R. A, "Vibration produced by the working of the traffic on the Central London Railway", Bd. Trade Rep. Cd. 951 (1902)
4. 後藤尚男, "交通申による振動障害について", 土木学会関西支部騒音振動委員会, No. 5 (1966)
5. 藤井元治郎, 蓮田常雄, 武居泰, 大迫勝彦, "鉄道からの環境振動予測一 駅建物形態別の数値解析一", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1999)
6. 日本騒音制御工学会, "地域の環境振動"(2001)
7. S. C. Yang, J. S. Shin, H. H. Lee, "Vibration and countermeasures in a high-speed railway", Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 3, No. 2. pp.103~111(1993)
8. S. H. Jung, H. I. Choi, "Study of Vibration on Residential Area Near by Railroad", Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 1, pp.117~125(1997)
9. S. D. Yu, D. S. Shin, J. M. Sul, D. J. Kang, J.

- C. Park and J.I. Lee, "Characteristic and Propagation of Railroad Vibration in Kyoungbu Line", Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 4, pp.597~604(1997)
10. Y. S. Kim, "Study of Application of Cryer model for vibration measurement near Railroad Area", Yonsei University Master's thesis, (1998)
11. H. U. Yoon, "Study of Estimation of Vibration Transfer of the concrete building", Yonsei University Master's thesis, (1998)
12. W. H. Park, "Impact assessment of environmental vibration for buildings under construction near subways by using semi-empirical method", Yonsei University Master's thesis(2002)
13. J. H. Kim, "Vibration Evaluation of Newly Planned Buildings Near Railroad Areas", Seoul national university of science and technology Master's thesis(2011)
14. S. W. Yoon, K. Y. Do, J. H. Ryu, and Y. K. Ju, "Vibration Measurement of Steel Foot-Bridge using Mobile Phone", Applied Mechanics and Materials, Vol.470, p.777-780(2014)
15. K. Y. Do, S. W. Yoon and D. H. Kim, "Vibration Measurements of the Foot-Bridges Using Mobile-Phone", Journal of the Korean Association for Spatial Structures", Vol. 14. No. 1, pp.61~68(2014)
16. Architectural Institute of Japan, "Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration"(1991)
17. H. J. Kim, M. J. Kim, D.H. Shin, H. M. Jo, J. O. Mok and S. J. Hong, "A Study on Vibration of standards", Architectural institute of korea(2015)
- Received : October 24, 2016
 - Revised : November 19, 2016
 - Accepted : November 21, 2016