

# 스마트폰 가속도센서를 이용한 대구도시철도 주행진동평가

권동희<sup>1</sup>, 장성현<sup>1</sup>, 문형진<sup>2</sup>, 최민호<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 토목공학과 석사과정, <sup>2</sup>성결대학교 정보통신공학부 조교수,  
<sup>3</sup>계명대학교 건축토목공학부 조교수

## The Running Vibration Assessment of Daegu Metropolitan Transit using Smartphone Acceleration Sensor

Dong-Hee Kwon<sup>1</sup>, Sung-Hyun Jang<sup>1</sup>, Hyung-Jin Mun<sup>2</sup>, Min-Ho Chey<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Civil Engineering, Keimyung University

<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Information & Communication Engineering, Sungkyul University

<sup>3</sup>Assistant Professor, Faculty of Architecture & Civil Engineering, Keimyung University

요 약 최근 대도시 핵심 교통수단인 도시철도의 대중화와 노후화에 따른 다양한 문제점이 발생되고 있다. 본 연구에서는 이의 해결을 위해 스마트폰 내장형 가속도센서와 이를 활용한 어플리케이션을 사용하여 대구광역시 도시철도 1호선 전 구간에 대한 진동가속도를 측정하고 열차진동 특성을 평가하였다. 이를 위해 국내 철도차량 진동 측정 방법(KS R 9160)을 따라 주행 시 발생하는 3축 방향 가속도를 기반으로, 32개 역사 구간 및 방향 별 진동가속도 특성을 분석하였다. 또한, 1997년 개통 당시 측정된 주요 구간 진동가속도와와의 비교를 통해 열차 진동환경 변화에 따른 진동증폭 양상을 모니터링하였다. 진동가속도 분석 결과, 20년에 걸친 철도시설 환경의 노후화에 따른 수평 및 수직 방향 진동가속도 증가 특성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 추후 도시철도 승차감 평가와 주변 구조물에 대한 진동영향성 평가를 위한 주요한 자료로서의 가치가 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 도시철도, 스마트폰, 진동가속도, 가속도센서

Abstract Recently, various problems have arisen due to the popularization and aging of urban railway transit, which is the key transportation of large cities. In this study, the vibrational accelerations for the Daegu Metropolitan City Urban Railway(Line 1) were measured and evaluated using the smartphone built-in acceleration sensor and the approved application. For this purpose, the three axes running accelerations were measured according to the domestic standard (KS R 9160), and the acceleration data along the 32 stations (3 directions) were analyzed and compared. In addition, the increasing of acceleration values caused by the change of vibrational environment was monitored along the main stations between the time in 1997 and 2017. It was found that there are considerable increase of lateral and vertical directional accelerations due to the aging of railway facility environment for the last 20 years. The results of this study have valuable means for evaluating the ride quality of urban railway and the vibration influence on surrounding structures.

Key Words : Railway Transit, Smartphone, Vibrational Acceleration, Acceleration Sensor

\*Corresponding Author : Min-Ho Chey(mchey@kmu.ac.kr)

Received May 4, 2019  
Accepted June 20, 2019

Revised June 4, 2019  
Published June 28, 2019

## 1. 서론

도시철도는 높은 수송효율을 기반으로 도심지 교통난을 완화시킬 수 있는 핵심적인 교통수단으로 평가 받고 있다. 국내에서는 1974년 서울지하철 1호선의 개통을 시작으로, 현재는 5개 지방 대도시를 중심으로 우수한 철도시설과 효율적 운행관리시스템을 통해 안전하고 쾌적한 열차환경을 제공하고 있다. 하지만 도시철도 운행시, 열차의 차륜이 지상의 궤도를 통과하면서 발생시키는 주기적인 동적하중과 변화된 주행 환경으로 인한 진동 현상은 쾌적한 승차환경에 악영향을 미치기도 한다.

대구광역시에는 현재 총 3개 노선의 도시철도가 운행 중이며, 1호선의 경우 대구광역시에서 가장 먼저 개통(1997년 11월)한 도심형지하철로서 2개의 환승역을 비롯한 총 32개의 역과 주요 상권을 통과하고 있다. 또한, Table 1과 같이 3개 노선 중 가장 많은 수송인원(2019년 현재, 약 460,000명/일)을 자랑하고 있기도 하다. 그러나 개통 후 20년 이상이 지난 현재, 열차 및 궤도의 노후화 등에 따른 주행 시 소음과 열차진동의 증가로 승객들의 승차감에도 영향을 주고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 대구지하철 1호선 전 구간에 대한 주행 시 진동가속도를 정량적으로 측정하여 승객들의 승차감 평가를 위한 진동적합성을 분석하고, 추후 예상되는 열차진동환경의 변화를 추정해보고자 한다.

Table 1. Daegu metropolitan transit line 1 status[1]

Item	Value
Opening year	1997
Total distance	28.4 km
Total (Transfer) station No.	32(2)
Passenger No.	460,000/day
Max. speed	80 km/h
Motor RPM	1,900
Weight	199.6 ton·f(6 cars)

## 2. 진동 측정

철도진동의 영향을 분석 및 평가하기 위해서는 일반적으로 ISO 2631, JIS E 4023, UIC 513R, CEN ENV 12299 등의 여러 해외기준들이 사용되고 있으며, 국내에서는 이러한 기준들을 기반으로 국내 현실에 맞게 제정된 KS R 9160(철도차량의 진동 특성-측정 방법)이 활

용되고 있다[2,3].본 연구에서는 국내 기준을 따라 차량의 차체 바닥에 가속도센서를 부착하여 대구도시철도 1호선 전 구간에 대해 Fig. 1과 같이 주행 방향(X), 주행 방향의 좌우(Y) 및 상하 방향(Z)에 대한 진동가속도를 각각 측정하였다[4-6]. 기본적으로 열차의 진동가속도는  $m/s^2$ 의 단위로 측정하였고, 1호선 개통 당시 측정했던 진동데이터와의 상대적 비교평가 단계에서는 상기의 단위를 진동평가 기준으로 활용되는 복진폭(Peak-Peak, g) 단위로 변환하여 사용하였다. Fig. 2.

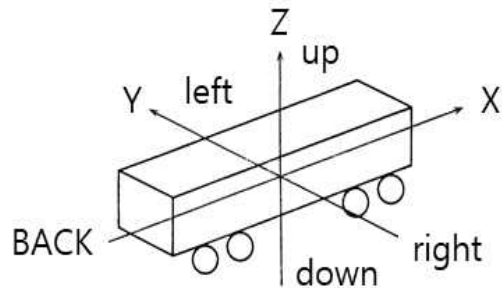


Fig. 1. Acceleration measurement axes

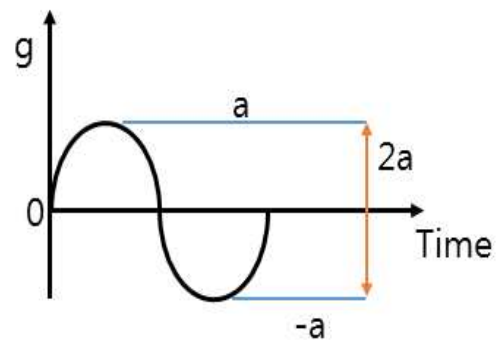


Fig. 2. Double amplitude of acceleration

### 2.1 측정 대상 및 위치

현재 운행되고 있는 대구도시철도 1호선은 통근형 직류전동차로서 1,435 mm 궤간으로 운행되고 있으며, 편성공차 중량은 199.6 ton(6량 기준)이다. 또한, Fig. 3와 Table 2와 같이 차체 길이는 17,500 mm, 차폭은 2,750 mm이며, 운용속도는 80 km/h(설계속도는 100 km/h)이다. 차량은 기능에 따라 구별되며, 본 연구의 진동가속도 측정 대상 차량으로는 증편되지 않은 일반 차량 6량에서 승객들이 탑승하는 일반객차(T1)로 선정하였다. 본 연구의 대상인 도시철도 차량의 진동가속도는 추후 연구 내용인 도시철도 승차감 평가를 위한 기본적인

수치적 자료로서의 의미를 갖는다.



Fig. 3. Train type[1]

Table 2. Train function [1]

Train title	Function
TC	Trailer car with driver's cab
M1	Motor car with pantograph
M2	Motor car without pantograph
T	Trailer car
MC	Motor & control car
M	Motor car

본 연구에서는 철도차량의 진동 측정에 대한 국내 기준[2]에 따라 차량의 진동가속도 측정 시 Fig. 4와 같이 진동가속도계를 차체 중앙부 바닥면(○)에 고정하되, 차량의 진행 방향(X)에 대해 측정 축을 맞추고 지상면에 대하여 수평이 되도록 하였다[7-9].

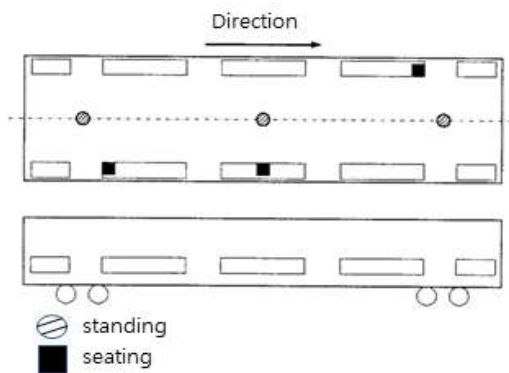


Fig. 4. Accelerometer detection points

### 2.2 가속도센서 및 애플리케이션

본 연구에서는 열차의 진동가속도 측정을 위해 Rebecca Vieyra에 의해 개발된 모바일 진동측정용 애플리케이션인 Physics Toolbox Suite Pro를 사용하였다[10]. 이 애플리케이션은 디지털신호처리 칩(Digital signal processing chip)과 마이크로 기계센서

(Micro-mechanical sensor)로 구성되어 있는 스마트폰 내장용 가속도센서와 연동된다. Physics Toolbox Suite Pro에서는 진동가속도 측정 시, 현재시간(Clock time) 또는 경과시간(Elapsed time)을 기반으로 측정 대상 가속도의 특성에 따라 다양한 시간 간격(Fastest, Game, Normal, UI)을 지정할 수 있다. 또한 3축 방향의 가속도( $m/s^2$ ) 값을 실시간으로 그래프 확인 및 데이터(CSV 형식)로 저장할 수 있고, 측정 지점에서의 가속도 데이터를 이메일 전송하거나 주요 클라우드에 저장도 가능하여 공간의 제약 없이 신속한 처리가 용이하다.

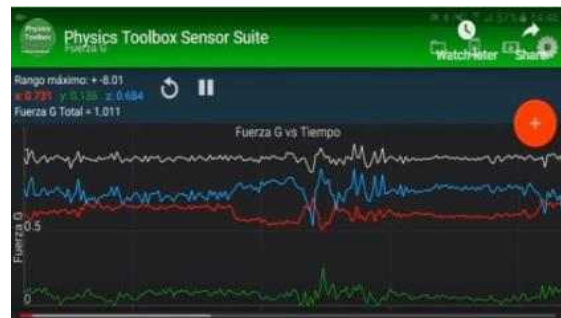


Fig. 5. Physics Toolbox Suite Pro[10]

### 3. 측정 결과 및 분석

본 연구에서는 Physics Toolbox Suite Pro를 이용하여 대구도시철도 1호선 전 구간(32개 역)의 3축 방향 진동가속도를 오전 10시에서 11시 사이에 평균 0.01초 간격으로 측정하였다. 총 측정시간은 3,317 초(약 55분)가 소요되었으며, 각 방향 별로 331,576 개의 진동가속도 데이터(총 994,728 개)가 생성되었다.

Fig. 6은 상대적으로 인구밀집도가 높고 유동인구가 많은 구간인 영대병원역(13번째 역)에서 대구역(18번째 역) 사이 6개 구간에 대한 3축(X,Y,Z) 방향 가속도를 나타낸 것이고, Fig. 7은 반월당역(16번째 역)에서 중앙로역(17번째 역) 사이 한 구간(40초)을 확대하여 가속도시간이력을 나타낸 것이다. 열차의 출발과 함께 진동가속도가 증가하기 시작하여 정차 시점을 향해서는 가속도가 0에 가까워지는 등 열차의 출발과 주행 그리고 정차의 시점을 구별할 수 있으며, 각 방향 별 가속도의 크기 및 진동수 특징에 대한 상대적 비교도 가능하다. 전반적으로 상하 방향(Z축)이 주행 방향(X축)과 좌우 방향(Y축)이 비해 상대적으로 큰 가속도 값을 보이고 있어 추후 해당 방향의 승차감 평가에도 영향을 줄 것으로 판단된다[11].

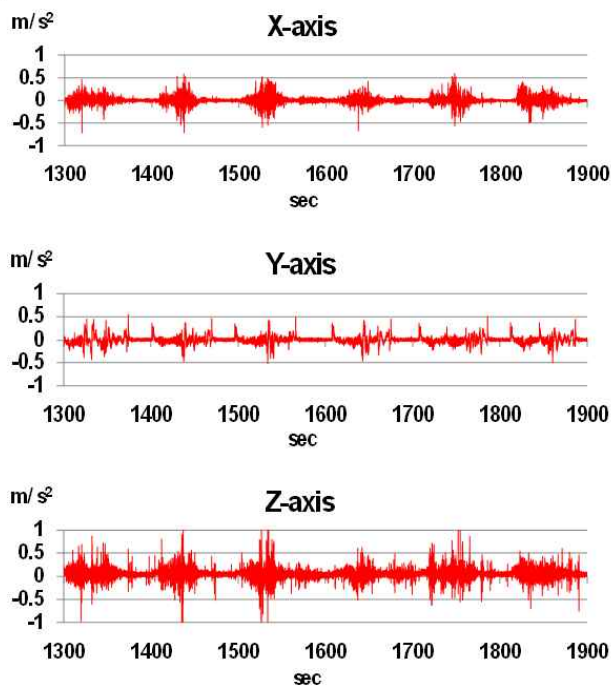


Fig. 6. Acceleration results through the 13<sup>th</sup> to 18<sup>th</sup> stations (3 axes)

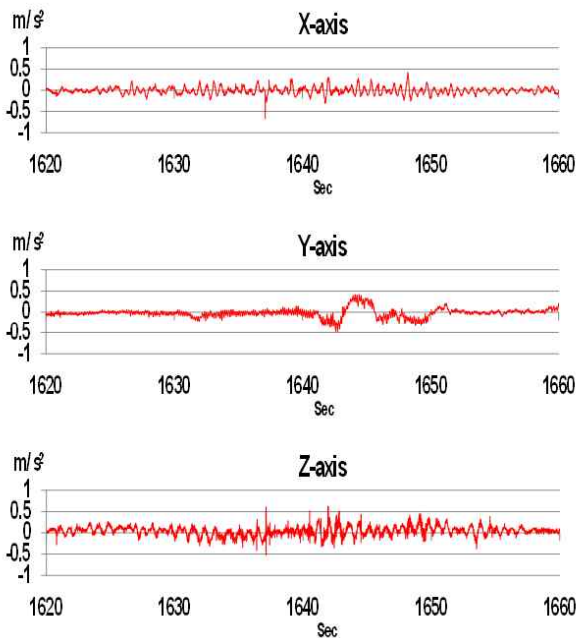


Fig. 7. Acceleration results of the one section (the 16<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup> stations, 3 axes)

#### 4. 진동가속도 평가

본 연구에서는 대구도시철도 1호선에 대한 전반적인 진동가속도 특성 파악뿐만 아니라, 개통 당시 진동 특성과의 비교분석을 통해 차량 및 궤도 노후화에 따른 진동가속도 변화를 분석하고자 하였다. 이는 중장기적 가속도 특성의 예측과 승차감 평가를 위한 기본 자료로서의 의미가 있다[12-14].

Fig. 8과 9는 진천역에서 중앙로역 사이 13개 구간에 대해 최근(2017년) 측정(Physics Toolbox Suite Pro 이용)한 진동가속도와 1997년 개통 당시 가속도계(Accelerometer)로 측정한 주행 방향을 기준으로 좌우(Y) 및 수직(Z) 방향의 구간 별 최대복진폭 가속도(Maximum Peak-Peak, 2a) 값을 각각 비교한 것이다. 또한, 이러한 복진폭 값을 기준으로 다섯 단계의 진동가속도 평가 기준(우수-양호-보통-주의-불량)을 함께 표기하였다[15]. 이러한 비교 분석은 20년이 지난 현 시점에서 승차감에 영향을 주는 두 방향(좌우 및 수직)의 진동가속도 변화에 대한 모니터링의 의미를 갖는다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 분석되는 바와 같이, 전반적으로 두 방향 모두에서 뚜렷한 진동가속도 증가의 특징을 발견할 수 있으며, 이는 다양한 요인에 따른 열차 및 부속 시설 노후화의 결과로 판단된다. 좌우 방향의 경우, 1997년 개통 당시에는 측정된 모든 구간에서 ‘우수’한 진동가속도 특징을 보였으나, Fig. 8에서와 같이 최근 측정된 최대복진폭에서는 ‘양호’~‘보통’ 수준의 가속도 분포를 보인다. 이는 열차의 탈선 등을 고려하여 좌우 방향에 대해 설치된 댐퍼 등 완충장치의 효과에 의한 것으로 판단되며, 준공 당시(1997년)에 비해 진동가속도가 평균 73.8% 증가한 것이다. 한편, Fig. 9와 같이 열차 중량이 작용하는 수직 방향의 경우에는 개통 당시에 ‘양호’~‘보통’ 수준에 분포하였던 진동가속도가 최근에는 ‘보통’~‘주의’ 수준에 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, ‘월촌→송현’ 구간에서는 ‘불량’ 수준을 보이고 있기도 하다. 이는 수직 방향은 좌우 방향과 달리 열차 중량 등의 영향으로 방향성에 따른 탈선의 위험이 작은 이유로 완충장치의 활용이 상대적으로 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 수직 방향은 준공 당시(1997년)에 비해 진동가속도가 평균 42.1% 증가하였다.

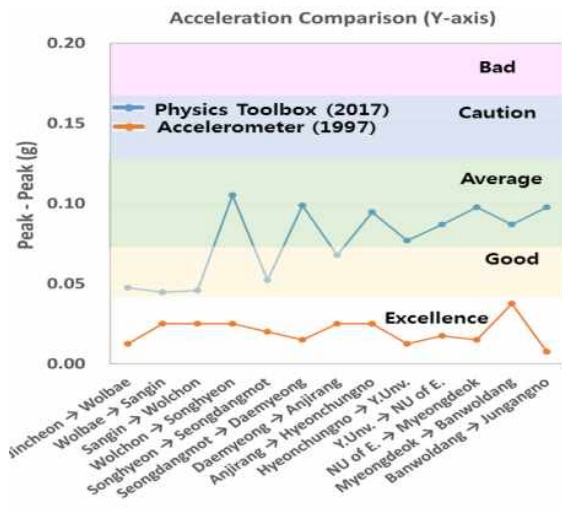


Fig. 8. Acceleration properties in the years of 1997 and 2017 (Y-axis)

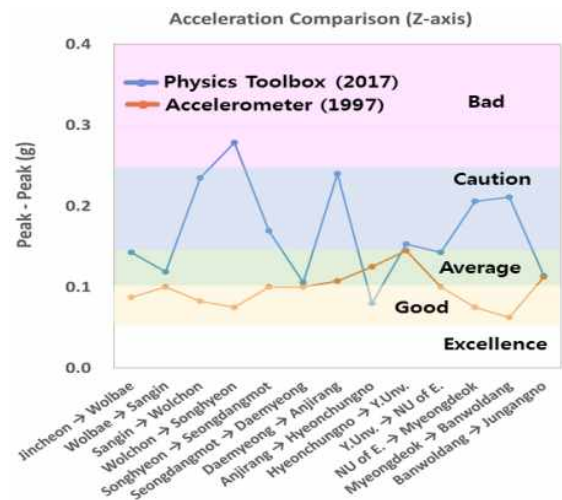


Fig. 9. Acceleration properties in the years of 1997 and 2017 (Z-axis)

### 5. 결론

본 연구에서는 개통 후 20년이 지난 대구도시철도 1호선 전 구간에 대한 진동가속도 측정 및 분석을 통해 도심지 중심 교통수단인 도시철도의 진동환경 변화를 모니터링 하였다. 진동 측정을 위해 최근 ICT 기술의 발전에 따라 광범위하게 활용되고 있는 스마트폰 내장용 가속도센서와 국제적으로 검증된 가속도 측정용 애플리케이션을 함께 활용하여 대용량의 가속도데이터를 수집한 후, 이에 대한 비교, 분석 및 평가 과정을 거쳤으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 사용된 스마트폰 내장용 가속도센서는 철도 진동 가속도 측정을 위해서 측정 범위가  $\pm 50 \text{ m/s}^2$  이 내인 가속도계를 사용할 것을 권장하는 철도차량 진동측정 기준에 적합하며, 기존의 가속도계 대비 측정비용 절감과 공간 활용상의 강점이 있음을 확인하였다.
- 측정된 3축 방향 시간이력 기반의 진동가속도 값을 통해 방향 및 구간 별 가속도 특성을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 전반적인 승차감 예측도 가능할 것으로 판단된다.
- 20년에 걸친 열차환경의 노후화(열차 및 궤도, 곡선 구간 등) 영향에 따른 두 방향(Y,Z)의 진동가속도 증가가 확인되었고, 최대북진폭 기반의 진동가속도 기준에 의해 그 변화 양상이 평가되었다.
- 주행 좌우 방향의 경우, 향후 10년 뒤에는 ‘주의’ 단계의 진동가속도 수준에 해당하는 구간이 발생할 것으로 판단되며, 수직 방향으로는 방향 특성에 적합한 수정된 평가 기준에 대한 고려도 필요할 것으로 보인다.
- 추후 열차의 기계적 진동이 역사 주변 구조물에 미치는 영향[16]에 대한 추가적인 연구를 계획하고 있으며, 또한 스마트폰 내장용 가속도센서의 경우 캡스톤디자인 등 공학교육을 위한 학습도구로서 높은 활용가치를 가질 것으로 판단된다.

### REFERENCES

- [1] Daegu Metropolitan Transit Corporation (2008). *DTRO Homepage*, Facility status, <http://www.dtro.or.kr>
- [2] Korean Agency for Technology and Standards, (2002). *Vibration characteristics of railway rolling stock-Measuring method (KS R 9160:2002)*.
- [3] Korean Agency for Technology and Standards (2000). *Railway rolling stock-Test and evaluation method for passenger comfort (KS R 9216:2000)*.
- [4] B. G. Jeon & N. S. Kim. (2007). Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration. *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 17(10), 923-935. DOI : 10.5050/KSNVN.2007.17.10..923
- [5] H. J. Eun et al. (1995). A Study for the Noise and Vibration of the High-Speed Rails: their criteria and prevention measures, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Research Report No. 1995(3-1).

- [6] J. Y Kim & M Sagong. (2013). Dynamic Analysis for Low Depth Track System Under Train and Car Moving Loads. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), 67-75.
- [7] K. S Park & Y. S Choi. (2008). Vibration Analysis and Mitigable Countermeasures of Semi High-speed Subway Electric Trains. *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 18(10), 1014-1023. DOI : 10.5050/KSNVN.2008.18.10.1014
- [8] S. H Kim, S. C. Lee & J. H. Kim. (1992). A Study on the Characteristic of Railroad Noise and Vibration Propagation, *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 1992(11), 36-41.
- [9] C. H. Lee, J. K. Lee, S. S. Yoon & W. S. Yoo. (2003). Development of an Evaluation System For Ride Comfort and Vibration On Railway Vehicles. *Journal of The Korean Society for Railway*, 6(2), 94-101.
- [10] R. E. Vieyra & C. Vieyra. (2014). Analyzing Forces on Amusement Park Rides with Mobile Devices. *American Association of Physics Teachers*, 52(3), 149-151. DOI : 10.1119/1.4865516 ISSN :0031-921X
- [11] J. K. Choi. (2014). An Experimental Study on Railroad Vibration Characteristics Nearby Elevated Railway. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 16(5), 1921-1927. DOI : 10.17958/KSMT.16.5.201410.1921
- [12] K. Y. Do, S. W. Yon & D. H. Kim (2014). Vibration Measurements of the Foot-Bridges Using Mobile-Phone. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 14(1), 61-68. DOI : 10.9712/KASS.2014.14.1.061
- [13] C. H. Lee, W. S. Lee, J. T. Kim & W. S. Yoo. (2003). Review of Comparative Test Results of Ride Evaluation for Railway Vehicle, *Conference of The Korean Society for Railway*, 10(1), 28-35.
- [14] J. H. Lee, C. H. Lee & W. S. Yoo. (2006). Analysis of Ride Comfort Test Result for Passenger Coach, *Conference of The Korean Society for Railway*, 11(9), 43-49.
- [15] Ministry of Land and Maritime of Korea. (2019). *Standards for performance testing of urban railway vehicle, Notification No. 2009-641.*
- [16] T. K. Lee & B. S. Kim. (2011). The Prediction of Vibration Reduction due to Vibration Isolating Countermeasure at Railway Station, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 13(1), 11-16.

권 동 희(Dong-Hee Kwon) [학사회원]



- 2017년 2월 : 계명대학교 건축토목공학부(공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 토목공학과 석사과정
- 관심분야 : 열차진동 및 승차감, 비구조요소, 면제진구조
- E-Mail : mydon333@naver.com

장 성 현(Sung-Hyun Jang) [학사회원]



- 2017년 2월 : 계명대학교 건축토목공학부(공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 토목공학과 석사과정
- 관심분야 : U-CITY, 도시인프라 지진손상 분석 및 평가
- E-Mail : sha09089@daum.net

문 형 진(Hyung-Jin Mun) [중신회원]



- 2002년 2월 : 충남대학교 수학과(이학석사)
- 2008년 2월 : 충북대학교 전자계산학(이학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 성결대학교 정보통신공학부 조교수
- 관심분야 : 정보보안, IoT, 네트워크

보안  
· E-Mail : jinmun@gmail.com

최 민 호(Min-Ho Che) [장학원]



- 1992년 2월 : 동아대학교 건축공학과(공학사)
- 2001년 4월 : 쉐터베리대 토목공학과(공학석사)
- 2008년 5월 : 쉐터베리대 토목공학과(공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 건축토목공학부 조교수

· 관심분야 : 면제진구조설계, 자연모사설계, 도시방재  
· E-Mail : mchey@kmu.ac.kr