

교량의 동적 거동 계측을 위한 스마트폰 가속도센서의 적용성에 관한 연구

A Study on the Applicability of Smart-phone Accelerometer for the Measurement of Dynamic Behavior in Bridges

이형진^{1*}

Hyeong-Jin Lee^{1*}

〈Abstract〉

In recent years, measurement in a smart-phone environment is attracting attention in various fields due to its easy set-up process, various functions, convenience and expandability. Even in the field of safety evaluation and maintenance of large-scale infra-structures, the appropriate application of these effective and convenient measurement techniques can be of great help. In this paper, an experimental study was conducted to investigate the effectiveness, problems and complementary methods of applying smart-phone accelerometers to the measurement in infra-structure such as bridges. In model bridge subjected to impact and moving loads, the measured accelerations using a smart-phone and a professional accelerometer were directly compared in time domain. And the statistical and frequency characteristics of the measured signal and transfer function were also examined in frequency domain. The results show that the accuracy of measurement using smart-phone sensor is primarily affected by its incomplete sampling performance. In conclusion, smart-phone sensors cannot be considered suitable for precise assessment, where measurements must be accurate over a wide frequency range, but we can say that the technique is still useful and fairly accurate for some purpose over a limited frequency range, such as the low pass frequency range, which is a major concern for civil structures.

Keywords : Smart-phone Accelerometer, Transfer Function, Sampling Time, Bridge Dynamics

^{1*} 정회원, 교신저자, 창원대학교 토목공학과, 교수
E-mail: leehjn@changwon.ac.kr

^{1*} Dept. of Civil Engineering, Changwon National University

1. 서론

보통 교량과 같은 사회 기간시설물의 안전도 평가, 유지관리에서 필수적인 요인 중 하나가 구조물의 실제 거동 계측이다. 그런 이유로 최근의 사회 기간시설물에는 구조물 거동 계측을 위한 장기 모니터링 시스템이 설치되고 있다. 그러나 사회 기간시설물의 특성상 고가의 계측 장비 사용과 설치나 유지관리의 어려움으로 충분한 계측에는 부족한 경우도 많다. 따라서 추가적인 계측이 수행되어야 하는 경우도 빈번하다. 이런 경우, 목적에 따라 정확도가 다소 부족해도 설치나 운용이 좀 더 편리한 장비나 방법은 큰 도움이 될 수 있다.

이런 관점에서 영상 변위(vision-based displacement) 계측이나 GPS를 이용한 변위 계측, MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 센서를 이용한 무선(wireless) 계측[1] 등이 많이 연구되었고, 최근에는 스마트폰 센서를 이용하는 방법[2]에 관한 연구도 많이 이루어지고 있다. 스마트폰에 도입된 가속도센서도 이들 MEMS 계열이라 할 수 있지만, MEMS 센서의 장점과 더불어 스마트폰 시스템을 이용한 무선 계측, 원격 실시간 작업 가능성과 그 외의 다양한 기능성, 편의성 및 확장성으로 주목받고 있다. 그러나 스마트폰 센서는 초기에 위치제어나 카메라 손 떨림 보정 등의 목적으로 도입되어 구조물 계측에 대한 적합성은 떨어진다는 문제점이 있다. 그런 이유로 다양한 실제 구조물 계측에의 적용을 위한 연구[3]와 더불어 계측 앱(App.)의 보완에 관한 연구[4]도 활발히 수행되고 있다.

이 논문에서는 이런 연구의 연장선상에서 사회 기간시설물에 대한 스마트폰 센서의 적용에 관한 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 먼저 스마트폰 계측의 특성을 분석하고, 목적에 따라 스마트폰 센서의 적용이 가능한 분야와 그 한계점을 제시하려 하였다. 특히 저주파 특성이 강한 토목구조물

에 대한 적용성을 알아보기 위해 교량을 대상으로 한 실험이 수행되었고, 계측 신호의 주파수 대역(frequency range)별 정확도 분석이 이루어졌다.

2. 교량 동적 거동과 스마트폰 가속도센서

2.1 동적 거동 계측의 목적과 요구 특성

교량과 같은 사회 기간시설물 계측의 주목적은 크게 두 가지로 나눌 수 있다(Fig 1.). 첫 번째는 정보(alarm) 시스템으로 가속도, 변위 등의 응답이나 풍속, 온도 등을 모니터링해서 일정 기준치를 초과하면 알려주는 경우이다. 이 경우는 보통 최대 크기 계측의 정확도가 중요하다. 두 번째는 계측 결과의 추가적인 분석을 통해 구조물의 안전도 관련 자료로 만들어 내는 구조물 안전도 평가(safety evaluation of structural systems) 분야가 있다. 구조물 안전도 평가 분야는 구조물의 강성이나 케이블 장력과 같이 안전도 관련 핵심 내력을 찾아내는 분야[5]이다. 이 분야는 평가 목적에 따라 간단하게는 고유진동수나, 최대 크기만 알아도 되는 분야부터 진동 파형을 포함한 크기, 주파수 성분 등이 모두 정확해야 하는 구조 손상도 추정(damage assessment)[6] 등의 정밀 분석 분야가 있다.

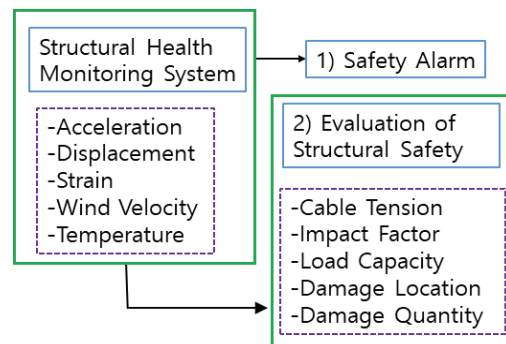


Fig. 1 Branches of structural health monitoring

이 논문은 스마트폰 센서의 계측이 이들 분야 중 어디에 적합한지에 대한 평가를 주목적으로 한다.

이를 위하여 샘플링 특성과 주파수 대역에 따른 진동 크기, 주파수 성분의 정확도를 분석하였다. 특히, 스마트폰 센서의 계측은 주파수 대역별로 정확도가 많이 다른 성질이 있으므로 주파수 대역별로 세분화해 각각의 가능성을 분석할 필요가 있다.

또한, 대형 사회 기간시설물의 동적 거동 계측은 다른 분야의 계측과는 다른 고유의 특징이 있다. 대표적인 특징은 저주파 영역(대략 0~50Hz)에서 주된 거동을 보인다는 것이다. 이는 외부하중의 주파수 대역과 구조물의 고유진동수 모두 저주파인 경우가 많기 때문이다[7]. 특히, 주행하중에 따른 교량 동적거동은 준정적(quasi-static) 성분이 주가 되는 대표적인 저주파 거동의 경우이다. 따라서 이들 하중에 대한 거동은 주파수 대역 중 저주파 대역의 정확도를 중점적으로 살펴볼 필요가 있다.

2.2 스마트폰 센서의 특성 및 적용성

센서 특히, 가속도계 중에서 저주파 대역 계측에 적합하여 토목구조물 계열에서 많이 사용되던 가속도계(accelerometer)는 기계식 종류(mechanical, servo type)이다. 이 종류는 크기가 크고 고가인 경우가 많아 이를 보완하는 의미로 압전형(piezoelectric)과 기계식 가속도계의 중간 성능을 보이는 MEMS와 같은 센서가 사용되기도 했다[1].

스마트폰 가속도센서도 이런 MEMS 기반 센서로, MEMS 센서의 기능성이라는 장점과 정확도가 다소 부족하다는 단점을 동시에 가지고 있다. 이러한 특성이 스마트폰 환경과 결합하면서 기능성, 적응성은 크게 확장되었으나 계측 정확도는 오히려 일부 저하되는 경향이 있다. 특히 큰 문제는 고속 샘플링에 어려움이 크다는 점이다. 설정 가

능한 샘플링 주파수($f_s = 1/\Delta t$)가 대략 100Hz까지로 한계가 있고, 그마저도 샘플링 타임(Δt)이 일정하지 않은 경우가 많다[13-14]. 샘플링 주파수의 제약은 계측 가능한 주파수 대역의 제약을 의미한다. 또한, 크기 정확도도 전문 가속도계와 비교해 많이 부족하고, 이마저도 고속 샘플링에 따라 크기 해상도가 급격히 저하되는 특성이 있다고 알려져 있다. 이런 샘플링 문제는 MEMS 센서의 특성이라기보다 스마트폰 기기가 데이터 로거(data logger)로서의 한계성을 가지기 때문으로 생각된다[4, 8].

그러나, 스마트폰 센서의 계측 가능한 주파수 대역의 제약에도 교량 등의 토목구조물의 주요 주파수 대역이 저주파임을 고려하면 스마트폰 센서의 활용 가능성은 여전히 크다고 평가된다.

따라서 이 논문에서는 스마트폰 센서의 특성이 교량 구조에서 요구되는 저주파수 대역에서의 안정적인 계측에 적합한지를 분석하고 스마트폰 계측 자료의 이용 한계점, 추후의 스마트폰 센서 및 앱에서의 개선 방향 등을 정리하려 하였다.

3. 스마트폰 센서 특성 분석을 위한 주파수 영역 방법

일반적으로 전달함수(transfer function)(혹은 주파수 응답함수(frequency response function))는 구조물 혹은 시스템의 입, 출력 간의 관계를 나타내는 것으로 이들 구조물이나 시스템의 특성을 보여주는 함수이다. 이 관계는 센서를 이용한 계측이나 신호처리 전후의 신호 변조 관계에 대해서도 동일하게 적용할 수 있다. 이는 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{s-acc}(f) = H(f) Y_{acc}(f) \quad (1)$$

여기서, $Y_{s-acc}(f)$ 는 스마트폰 가속도 $y_{s-acc}(t)$ 의 푸리에 변환(Fourier transform)($\mathcal{F}\{y_{s-acc}(t)\}$)이며, $Y_{acc}(f)$ 는 전문 가속도계의 가속도 신호 $y_{acc}(t)$ 의 푸리에 변환이다. $H(f)$ 는 전달함수로 전문 가속도계에 대한 스마트폰 가속도센서의 주파수 변조 특성을 나타내는 함수라 할 수 있다. 이 전달함수는 아래의 식 (2)와 같이 계측 신호를 전문 가속도계 신호로 보정(calibration)하는 방법으로 사용할 수 있다.

$$Y_{acc}(f) = H^{-1}(f) Y_{s-acc}(f) \quad (2)$$

여기서 $H^{-1}(f)$ 는 전달함수 $H(f)$ 의 역함수이다. 이 논문에서는 스마트폰 센서의 특성을 분석하기 위해 이들 관계를 이용한 주파수 분석기법을 사용하였다. 스마트폰 가속도 계측 결과의 시간영역 분석 외에 주파수 함수, 전달함수를 통한 분석도 수행되었다.

4. 모형실험을 통한 특성 분석

교량 동적 거동에서의 스마트폰 가속도 계측 특성을 분석하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 교량 가진(excitation)을 위해 주파수 특성 분석에 가장 많이 쓰이는 충격하중과 교량의 가장 특징적인 하중인 주행하중이 사용되었다.

4.1 실험의 구성 및 모형 교량

모형은 아크릴을 사용한 단경간 교량이며, 총길이는 240cm, 지점 간 거리(유효길이)는 190cm이다. 제작된 교량 모형과 단면의 형태는 아래 Fig 2.와 같다.

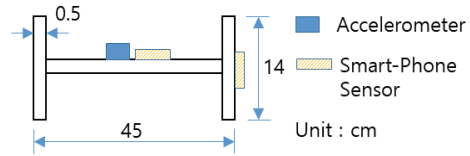
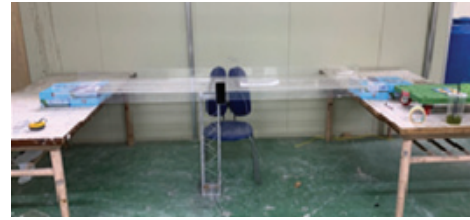


Fig. 2 Bridge model for experiments

충격은 일반 고무망치를 사용하였고, 주행하중의 모형 차량은 Fig 3.과 같이 따로 제작된 차량을 사용하였다. 차량은 40cm×60cm 상부 패널에 22cm×40cm에 바퀴를 설치한 형태이며, 실험에 사용된 무게는 5kgf(=49.05N)이다. 주행하중의 평균 주행 속도는 42cm/sec로 평가되었다.


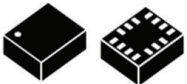


Fig. 3 Vehicle for moving load

실험에 사용된 스마트폰 및 앱은 일반적으로 많이 사용되고 있는 안드로이드 기반 S사 스마트폰과 이에 탑재한 Physics Toolbox Accelerometer란 앱을 사용하였다. 이를 통해 대표적 경향은 파악할 수 있을 것으로 기대되었다.

또한, 기준이 되는 전문 계측기로는 기존 토목 구조물의 진동 계측에 안정적으로 사용되고 있는

Table 1. Accelerometers and data loggers

Servo-Type	MEMS-Type
	
NI based Data Logger	Smart-phone+Physics Toolbox Accelerometer (App.)

기기인 서보(servo type) 가속도계(RS-U2)와 NI 기반 데이터 로거가 사용되었다. 이는 Table 1에 정리되었다.

또한, 충격, 주행하중 각각에 대해 20Hz, 100Hz, 200Hz의 샘플링 주파수로 계측이 이루어졌다. 이들 실험의 종류 및 횟수는 Table 2에 정리되었다.

Table 2의 경우 외에 스마트폰 부착 방법과 부착 위치에 따른 경우의 분석도 진행되었으나 이 논문의 내용에서는 제외하였다.

Table 2. Experimental cases

Sampling frequency	Impact load	Moving load
20Hz	5~6 × 5 set	1 × 5 set
100Hz	5~6 × 5 set	1 × 5 set
200Hz	5~6 × 5 set	1 × 5 set

4.2 충격실험 결과 분석

충격실험에서 가장 먼저 보이는 문제는 앞서 언급되었던 샘플링 문제이다. Fig. 4에 보이듯이 고속 샘플링에서는 동일 시간의 샘플링이 반복되다 갑자기 다음 시간대로 전이되는 현상이 발생하고 있다. 이는 반복 횟수만큼 실제 샘플링 간격(Δt)이 크다는 것을 의미한다. 또한, 이들 반복 횟수 및 다음 시점과의 간격도 일정하지 않아 최대 간격으로 따지면 최대 샘플링 타임은 더욱 클

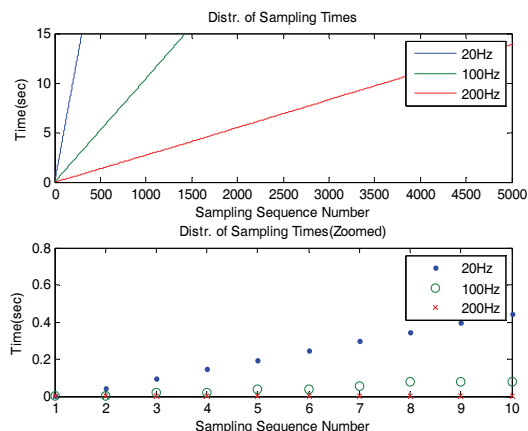


Fig. 4 Distribution of sampling times

것으로 생각되었다. 유효 주파수 대역은 이들 최대 샘플링 타임에 따라 결정되므로, 문헌[4, 8]에서 언급되는 가능한 샘플링 주파수(약 100Hz, 주파수 대역~50Hz)보다 실제로는 더욱 줄어들 수 있다고 추정되었다. 이는 다음 Fig.들에서 확인할 수 있다.

이런 샘플링 특성을 바탕으로 20, 100, 200Hz 샘플링 주파수에 따라 시간이력을 계측하고, 이들 시간이력의 주파수 변환 결과 및 전문 가속도계와 스마트폰 가속도계 계측 사이의 전달함수를 비교하였다. 이때, 스마트폰 가속도는 보간법(interpolation method)을 이용하여 일정 간격의 샘플링 타임으로 변환한 경우이다. 그 결과의 일부는 Fig. 5~13과 같다.

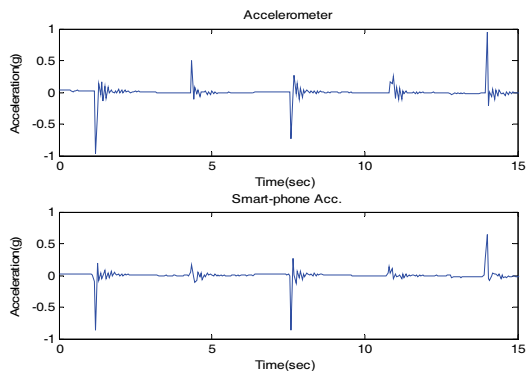


Fig. 5 Comparison of time histories (Impact, 20Hz)

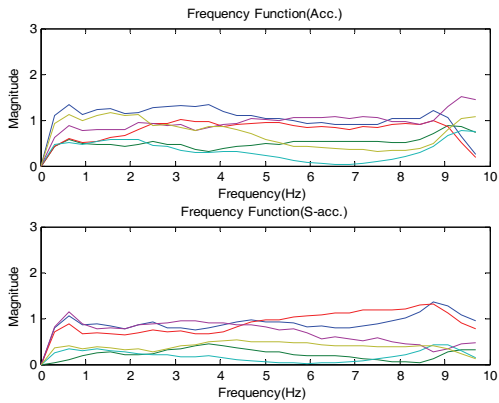


Fig. 6 Comparison of FFT results (Impact, 20Hz)

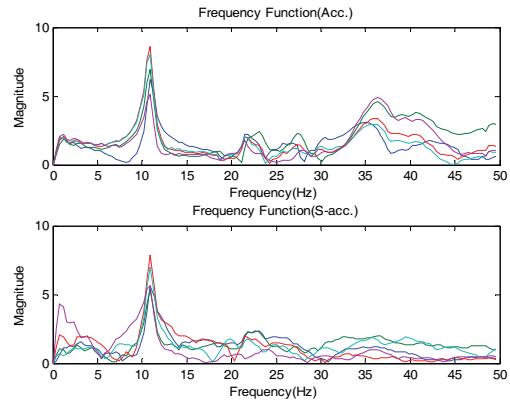


Fig. 9 Comparison of FFT results (Impact, 100Hz)

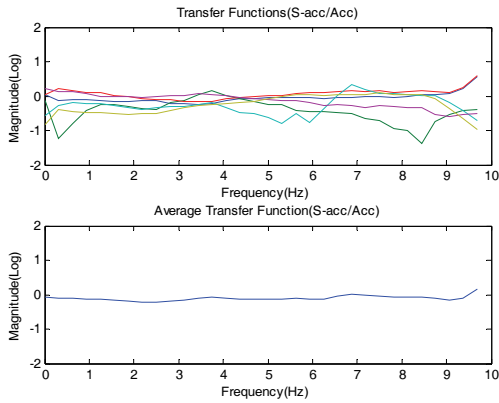


Fig. 7 Each and average transfer functions (Impact, 20Hz, logarithmic)

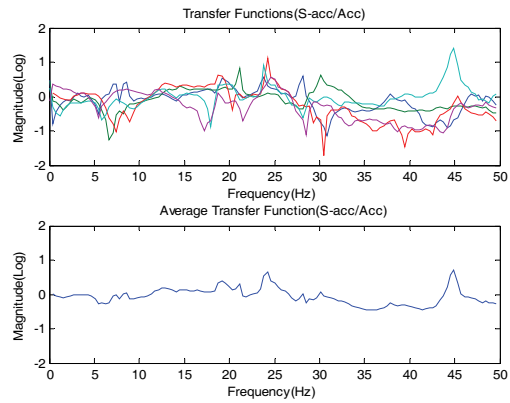


Fig. 10 Each and average transfer functions (Impact, 100Hz, logarithmic)

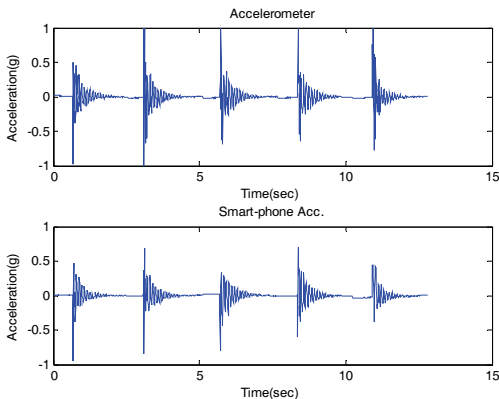


Fig. 8 Comparison of time histories (Impact, 100Hz)

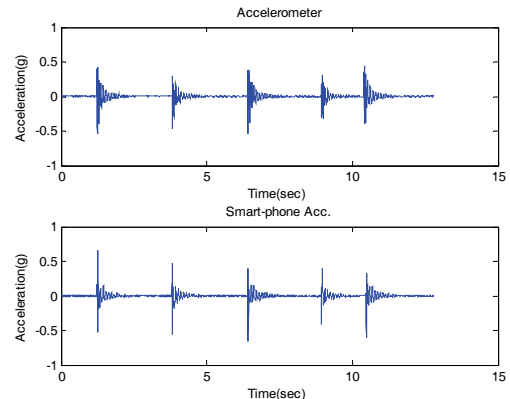


Fig. 11 Comparison of time histories (Impact, 200Hz)

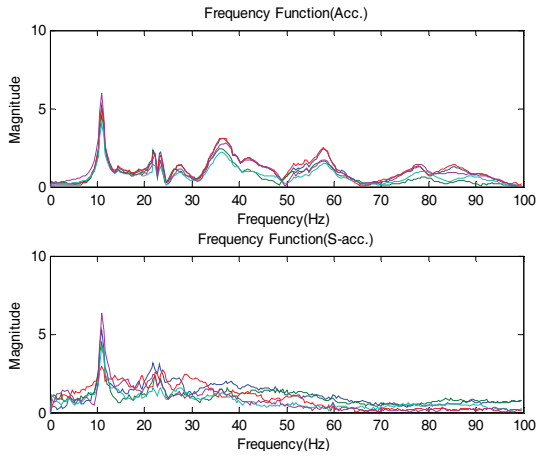


Fig. 12 Comparison of FFT results (Impact, 200Hz)

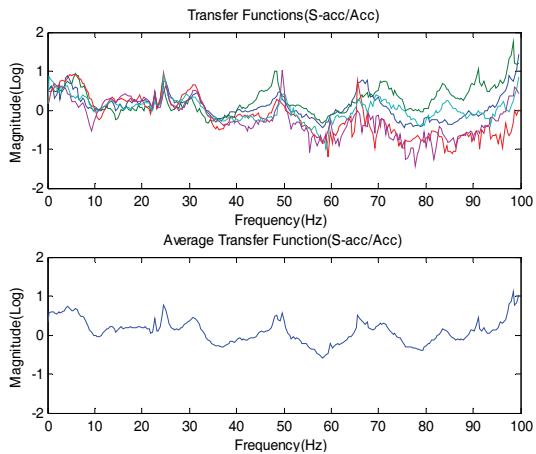


Fig. 13 Each and average transfer functions (Impact, 200Hz, logarithmic)

전체적으로 전문 가속도계 계측 결과와 비교해 스마트폰 계측은 변동성이 큰 것을 확인할 수 있고, 샘플링 문제로 대략 30Hz를 경계로 고주파 영역에서는 변동성이 급격히 커짐을 볼 수 있다.

또한, 스마트폰 계측에서는 피크(peak) 부분 신호의 유실(missing) 현상이 전문 가속도계와 비교해 더욱 자주 발생함을 볼 수 있다. 이는 고속 샘플링에서 스마트폰 계측의 크기 해상도가 낮아지는 현상과도 관련 있다고 생각된다.

그리고, 전문 가속도계에서는 계측 범위($\pm 1g$)를 초과하는 센서 포화(sensor saturation) 현상으로 인한 오차도 관찰할 수 있었다.

4.3 주행하중 실험 결과 분석

다음은 저주파 성분 특성이 더욱 강한 주행하중에 대한 실험이 수행되었다. 그 결과의 일부는 Fig. 14~22와 같다. 이 경우의 시간이력은 각 set의 계측을 이어서 보인 것이다.

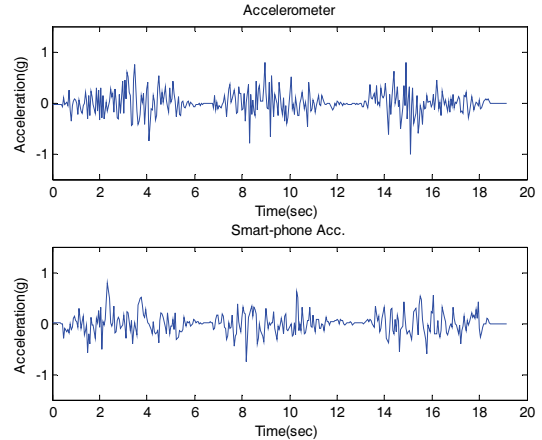


Fig. 14 Comparison of time histories (moving, 20Hz)

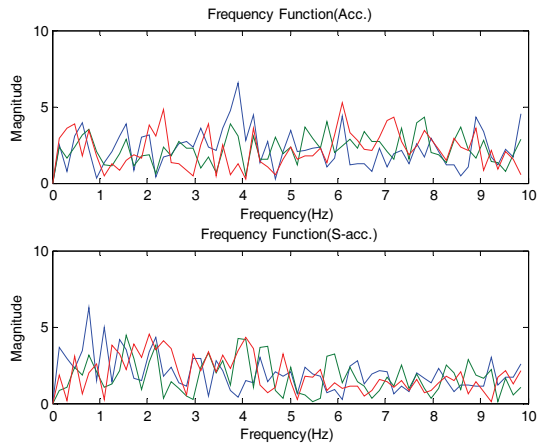


Fig. 15 Comparison of FFT results (moving, 20Hz)

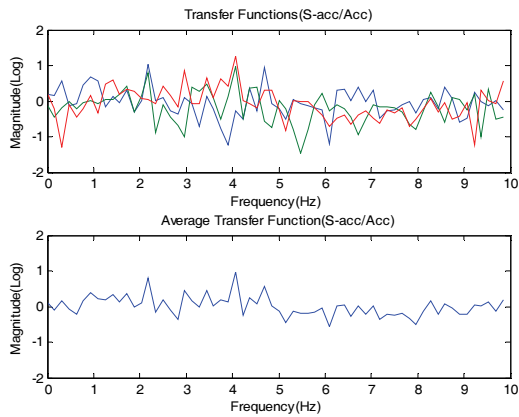


Fig 16. Each and average transfer functions (moving, 20Hz, logarithmic)

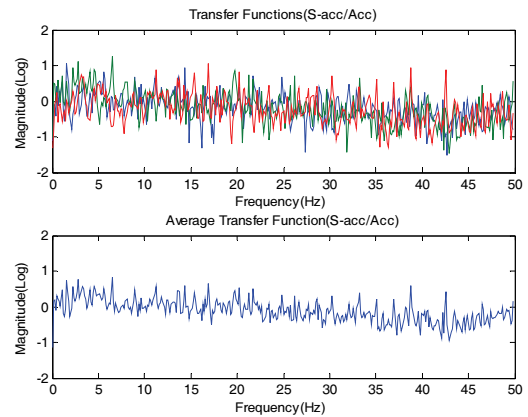


Fig 19. Each and average transfer functions (moving, 100Hz, logarithmic)

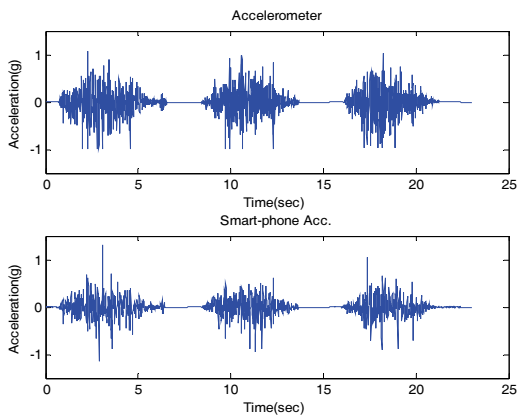


Fig 17. Comparison of time histories (moving, 100Hz)

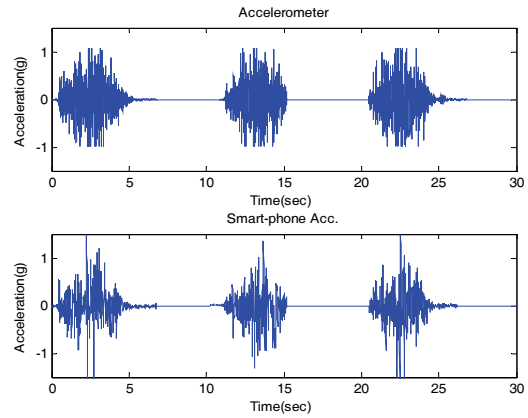


Fig 20. Comparison of time histories (moving, 200Hz)

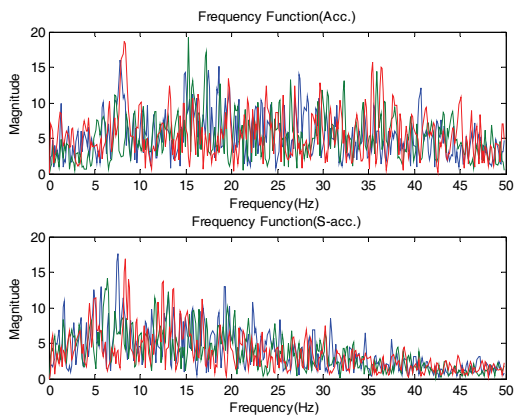


Fig 18. Comparison of FFT results (moving, 100Hz)

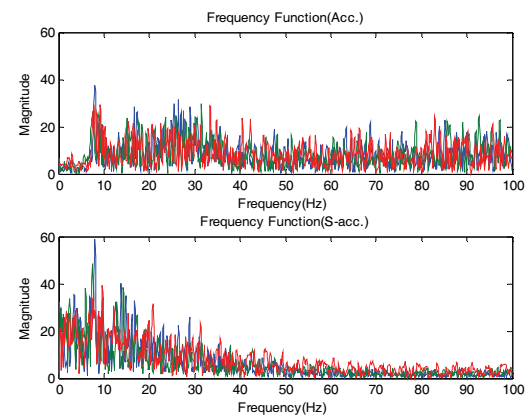


Fig 21. Comparison of FFT results (moving, 200Hz)

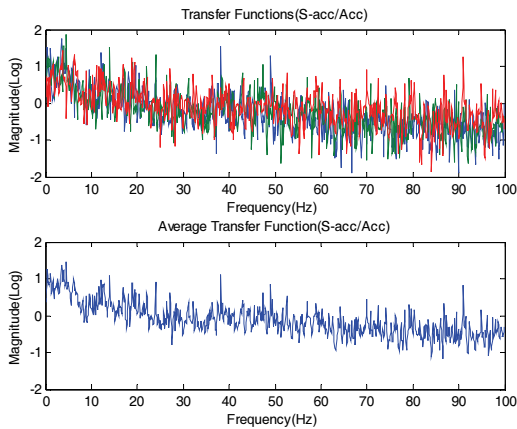


Fig. 22 Each and average transfer functions (moving, 200Hz, logarithmic)

실험 결과에서 주목할만한 사항은 차량의 부가 질량 효과로 인해 낮아진 고유진동수($10-\alpha$ Hz 근처)를 관찰할 수 있다는 것이다. 충격하중의 경우에서도 고유진동수($10+\alpha$ Hz 근처)는 잘 나타나고 있어 충격, 주행하중 모두에서 이 구간에 고유진동수가 있다면 고유진동수 추정은 비교적 잘 이루어질 수 있음을 의미한다.

또한 스마트폰 계측의 고주파 영역은 측정에 오차가 많고, 충격하중의 경우에 비해서도 전체적으로 오차가 더욱 큰 것을 볼 수 있다. 이는 전문 가속도계의 센서 포화 현상, 스마트폰 센서의 고속 샘플링에서의 크기 해상도 저하 등에 기인하는 것이라 추측된다. 특히, 주행하중의 경우에는 저주파 영역에서도 상당한 오차를 가짐을 볼 수 있는데, 이는 계측 신호의 오프셋(offset) 처리 과정의 왜곡 현상으로 보인다. 따라서, 주행하중의 경우는 더욱 엄밀한 오프셋 처리 방법이 필요하리라 생각된다.

결론적으로 주행하중에 대한 스마트폰 계측 결과는 정밀 분석에서는 사용하기 어려울 듯하나, 최대 크기, 주요 고유진동수 추정 등의 목적에는 충분히 활용 가능하다고 평가된다.

4.4 실험 결과 정리

이 절에서는 앞의 실험 결과로부터 보이는 경향을 정리하였다. 정확한 수치에 의한 정량적 분석은 어려움이 많아 각 경우의 특징을 정리하는 정성적 분석이 이루어졌고, 이를 Table 3에 보였다.

Table 3. Accuracies of measurements using smart-phone sensor (qualitative evaluation)

Sampling Frequency	Impact Load		Moving Load	
	Visual	Frq.	Visual	Frq.
20Hz	H	H	M	L~M
100Hz	M	M~H	M	M
200Hz	M	M~H	L~M	M

(*) H : High, M : Medium, L : Low

먼저 육안(visual) 평가는 파형과 크기의 정확도를 기준으로 분류하였다. 이 결과는 최대 크기 등이 중요한 경우와 관련된 항목이라 할 수 있다. 다음은 주파수(frequency) 영역 분석으로 평가 주파수 대역(총 주파수 대역의 50%의 저주파 대역) 기준으로 안정적인 전달함수 값이 존재하느냐로 판단하였다. 이 항목은 고유진동수 추정 결과 핵심인 분야에서의 정확도와 연관된 항목이다.

또한 전체적으로 개개의 계측 결과 신뢰성은 다소 떨어지나 계측 결과들의 평균적인 값은 유의미한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 스마트폰의 부족한 정확도도 많은 계측으로 보완할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 다량의 계측, 스마트폰 기기의 발전으로 스마트폰 계측 기술의 약점이 보완될 수 있음을 의미한다고 판단된다.

5. 결론

이 논문에서는 대형 구조물, 특히 교량의 계측

에서 스마트폰 센서 적용의 문제점을 파악하고 적용의 기준을 정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과는 아래와 같다.

1. 스마트폰 계측에서의 가장 큰 문제점은 고속 샘플링에서의 불균일성, 낮은 크기 해상도인 것으로 분석되었다. 이는 내장 센서의 문제이기보다는 데이터 로거로서는 스마트폰이 한계성을 가지기 때문이라 평가된다.
2. 스마트폰 계측에서의 샘플링 불균일성이 토목구조물에서의 관심 영역인 저주파 대역에도 다소 영향을 주나 정밀 분석 외의 다양한 분석은 여전히 가능하다고 평가된다. 즉, 넓은 주파수 대역이 모두 정교해야 하는 엄밀한 분석에는 적합하지 않으나 고유진동수 추정 등의 목적에는 충분히 활용 가능한 계측 방법이라 생각된다.
3. 스마트폰 계측 결과는 전체적으로 일관성이 떨어지나 평균적 결과는 특정 결과로 수렴하는 경향을 보인다. 이는 많은 계측으로 부족한 정확도를 보완할 수 있다는 뜻으로 해석된다.
4. 스마트폰 가속도 계측은 완전한 구조 안전도 모니터링에는 아직도 부족한 점이 많으나 그 확장성, 편의성 그리고 기기의 발전 속도에 비추어 미래의 활용 가능성은 여전히 큰 계측법이라 생각되며 지속적인 보완 연구가 필요하리라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Alessandro Sabato and Maria Q. Feng, "Feasibility of Frequency-Modulated Wireless Transmission for a Multi-Purpose MEMS-Based Accelerometer", *Sensors*, 14(9), pp. 16563-16585, (2014)
- [2] A. Sharma and D. Gupta, "Smartphone as a real-time and participatory data collection tool for civil engineers", *Int. J. Modrn. Comput. Sci.*, 2(5), pp. 22-27, (2014)
- [3] Paul Cahill, Lucy Quirk, Priyanshu Dewan and Vikram Pakrashi, "Comparison of smartphone accelerometer applications for structural vibration monitoring", *Advances in Computational Design*, Volume 4, Issue 1, pp.1-13, (2019)
- [4] Adam J. Bittel, Ashraf Elazzazi, and Daniel C. Bittel, "Accuracy and Precision of an Accelerometer-Based Smartphone App Designed to Monitor and Record Angular Movement over Time", *Telemedicine and e-Health*, Vol. 22, No. 4, pp. 302-309, (2016)
- [5] H. Zui, T. Shinke and Y. Namita, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method. ASCE Journal of SE", Vol. 122, No. 6, pp. 651-656, (1996)
- [6] Damir Zenunovic, Mirsad Topalovic, Radomir Folic, "Identification of Modal Parameters of Bridges Using Ambient Vibration Measurements", *Shock and Vibration*, Vol. 2015, pp. 1-21, (2015)
- [7] 김두기 : *구조동역학*, 4판, 구미서관, 서울, (2017)
- [8] Michael B. del Rosario, Stephen J. Redmond and Nigel H. Lovell, "Tracking the Evolution of Smartphone Sensing for Monitoring Human Movement, *Sensors*, 15, pp. 18901-18933, (2015)

(접수: 2020.07.07. 수정: 2020.08.10. 게재확정: 2020.08.17.)