

# 저노이즈형 진동계측 앱을 통한 MEMS 센서의 계측성능분석

## The Analysis in Measurement Performance MEMS Sensor Through the Low-Noise Vibration Measurement APP

정 영 석\*  
Jung, Young-Seok

윤 성 원\*\*  
Yoon, Sung-Won

### Abstract

With increasing number construction of high-rise building which has about 40 to 60 floors there have been many kinds of problem which related with usage from vibration. To predict response acceleration, it is important to assess correct natural frequency. However, due to the noise of MEMS sensor, it is difficult to measure dynamic characteristic such as natural frequency when measuring ambient vibration using MEMS sensor within cell phone. Therefore, a comparative analysis on vibration measuring applications was performed after measuring ambient vibration of 2 skyscrapers which have height between 133.5~244.3m that are located in Seoul and Observation tower using I-jishin APP with noise reduction function of MEMS sensor in order to verify the effectiveness of low noise type vibration measurement APP.

*Keywords : Mobile-phone, MEMS Seonsor, Vibration measurement, Ambient vibration, Natural frequecny, Low-noise*

## 1. 서론

최근의 고층건물은 초대형화, 경량화 등의 추세로 인하여 진동에 예민하게 반응하는 추세에 있다. 이러한 수평진동의 계측을 통한 사용성 평가는 고가의 진동계측장비에 의존하여 진동계측을 실시해야 한다. 이러한 진동계측장비는 설치시간 또한 오래 걸리며 전문지식을 갖춘 전문가를 필요로 한다. 그러나 스마트폰 시대가 도래함으로써 스마트폰 보급률이 증대됨에 따라 진동계측이 가능한 휴대폰 애플리케이션이 개발되는 등 휴대폰 애플리케이션의 진동계측시스템을 통하여 저가의 비용과 짧은 준비기간으로 수월하게 진동계측을 실시할 수 있는 기반이 조성되었다<sup>1)</sup>.

따라서 MEMS 센서에서 발생하는 노이즈레벨을 감안하여 2013년 윤성원, 도기영은 진동레벨이 상대

적으로 큰 서울시에 위치한 16개소 보도교를 대상으로 iPhone4의 진동계측앱인 Vibration을 통하여 고유진동수 등의 동적특성을 파악하여 휴대폰 내장형 MEMS 센서의 적용성을 최초로 확인하였다<sup>2)</sup>. 2013년 윤성원, 도기영은 휴대폰 MEMS 센서의 적용성을 확대하기 위하여 서울시에 가설된 65개소의 보도교를 대상으로 고유진동수를 산정하였다. 또한 이 값을 바탕으로 경간별 고유진동수의 상관관계와 구조시스템에 따른 경간과 고유진동수의 상관관계를 분석하여 관계식을 제안하였다<sup>3)</sup>. 2015년에는 고층건물에 대한 국내외의 228.6~828.0m 초고층 건축물 15개동의 상시진동계측을 실시하였다. 이 계측데이터를 근거로 고유진동수 근사식을 제안하고 기존 해외의 제안식과 비교하였다. 이 상시진동계측시에 15개 건물 중에서 명확한 고유진동수의 피크를 보인 것은 9동이고, 6동은 장변칙의 파워스펙트럼에서 다소 미약한 피크를 보이는 Vibration 앱의 한계점을 보였다<sup>4)</sup>.

이와 같이 핸드폰 내의 MEMS 센서에 의한 진동계측은 노이즈의 상시진동계측에 많은 한계점이 있는 것으로 알려져 있다. 이 이유는 iPhone4 이후,

\* 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

iPod touch, iPad 등에 사용되는 MEMS 센서를 예로 들면 조용한 장소에서 5gal 전후의 노이즈가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 경향은 계측파형의 연산과정에서 필터의 특성에 의하여 0.5~1Hz 부근의 신호가 크게 영향을 주지만, 진도 1~2 정도의 지진에는 MEMS 센서는 그 주파수 범위의 신호가 노이즈에 잠식되기 때문에 진동수 특성 분석 시 과대평가되는 것으로 알려져 있다.

따라서 이 논문에서는 기존의 휴대폰 진동계측앱인 Vibration과 노이즈 저감형 휴대폰 진동계측앱인 I-jishin을 이용하여 고층건물 2동과 전망타워의 상시진동계측을 실시하였다. 따라서 노이즈 저감형 진동계측앱을 이용하여 기존의 MEMS 센서의 한계를 어느 정도 해소하고자 하는 것이 이 논문의 목적이다.

## 2. 진동계측 애플리케이션

### 2.1 기존 Vibration

Vibration APP의 구성은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 진동의 파형을 알 수 있는 Time series, 파워스펙트럼을 알 수 있는 Frequency, 계측과 분석을 할 수 있게 조건을 설정하는 Settings, 사용 설명서인 About으로 구성되어 있다.

#### 2.1.1 Time series view

시계열 파형으로서, 가진실험 시 진동에 의한 파형은 <Fig. 1>에서 ①과 같이 X축, Y축, Z축에 계측되어 관찰 및 분석이 가능하도록 구성되어 있다. 각 축은 개별적으로 계측된 최대값, 최소값, RMS 값(②)이 계산되어 표기된다. 3축에서 동시에 나타내는 물리량 값은 RMS mag(③)에 나타난다. 화면 맨 아래에는 수평 및 수직에 대한 스케일(④)을 보여준다. 수평 스케일의 값은 데이터 설정에서 측정 속도와 길이에 따라 결정되고 수직 스케일의 값은 시계열 파형의 디스플레이 설정에서 정해진다. 또한, 화면을 터치하여 커서를 움직이면 정확한 계측 값(⑤)을 알 수 있다<sup>5)</sup>.

<Fig. 1>의 ⑥은 계측의 시작, 중단, 종료할 수 있는 버튼인 Sample, 데이터의 저장과 불러오기가 가능한 Save와 Load, 계측된 시계열 파형 및 주파

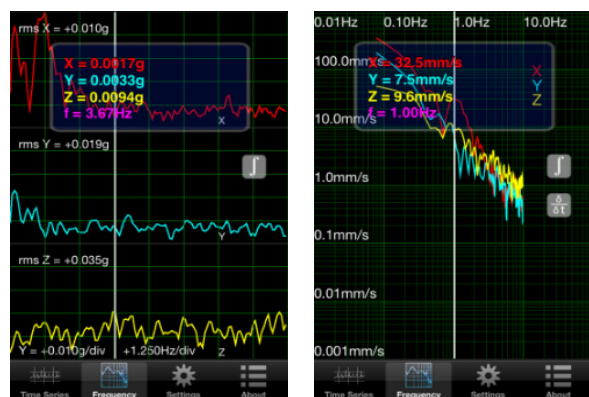
수 파형의 화면과 계측 데이터를 Excel 파일로 전자 메일에 보낼 수 있다<sup>5)</sup>.



<Fig. 1> Time series view<sup>5)</sup>

#### 2.1.2 Frequency view

구조물의 고유진동수를 분석할 수 있으며, <Fig. 2>와 같이 가속도계의 단위와 함수에 따라 다양하게 분석이 가능하다. 화면을 터치하여 커서를 움직이면 정확한 계측 값을 알 수 있고, 더 정확한 분석은 관심 영역에서 더블클릭을 하면 3배가 확대되어 자세한 파형분석이 가능하다. 고유진동수의 단위는 'Hz'로 표기된다<sup>5)</sup>.



(a) (b)

<Fig. 2> Frequency view<sup>5)</sup>

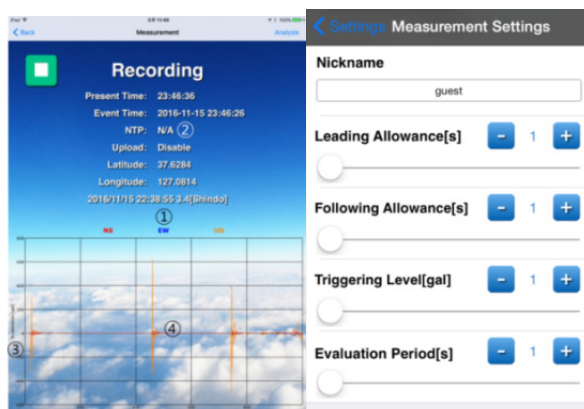
## 2.2 노이즈 저감형 I-jishin

I-jishin APP의 구성은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 실시간으로 진동의 파형을 확인하며 가속도응답을 저장하는 Seismometer, 클라우드 서버에 진동 데이터의 계측 위치를 알려주는 Map viewer, 클라우드 서버의 데이터와 직접 계측한 진동 데이터를 분석하는 Browser / Analyzer가 있다.

### 2.2.1 Seismometer<sup>6)</sup>

지진계의 기능으로서, 일정의 준비시간이 지난 후에 <Fig. 3 (a)>의 ①과 같이 동서, 남북, 상하의 방향으로 실시간 계측을 실시한다. 현재 시간, 진동 발생시간, 위도, 경도와 진도를 나타내며(②), 3축에서 동시에 나타내는 물리량 값은 gal값(③)으로 표시되며, Sample rate는 100Hz로 데이터 500개의 실시간 파형이 계측되어 관찰이 가능하도록 그래프로 나타난다(④).

데이터를 저장할 때의 설정값으로는 <Fig. 3>의 (b)와 같이 APPLE 기종의 식별에 사용되는 관측점 코드, 트리거 레벨의 가속도 레벨에 도달 이전의 데이터의 저장 시간인 프리 트리거 시간(Leading allowance), 트리거 레벨 이하의 가속도 레벨에 도달했을 때 데이터의 저장 종료시간인 포스트 트리거 시간(Following allowance), 트리거 레벨 (Triggering level), 트리거 레벨과 동등하거나 그 이상의 진동을 센서가 감지했을 때 지속 시간에 따라 데이터 저장이 시작되는 트리거 지속시간 (Evaluation period)이 있다.

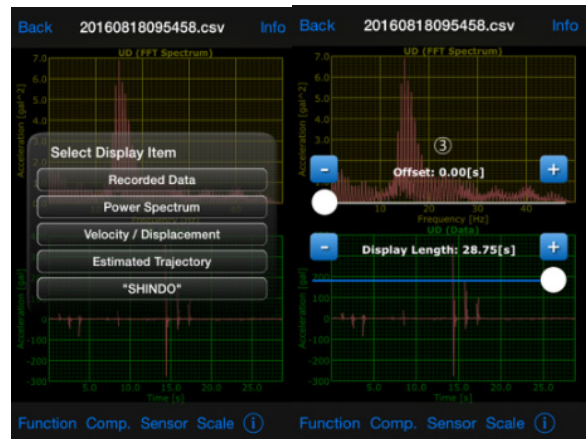


(a) (b)  
 <Fig. 3> Frequency view

### 2.2.2 Browser / Analyzer<sup>6)</sup>

저장된 시계열파형 데이터에 대해 방향별로 <Fig. 4>의 (a)와 같이 파워스펙트럼, 속도, 변위, Estimated trajectory를 분석이 가능하다.

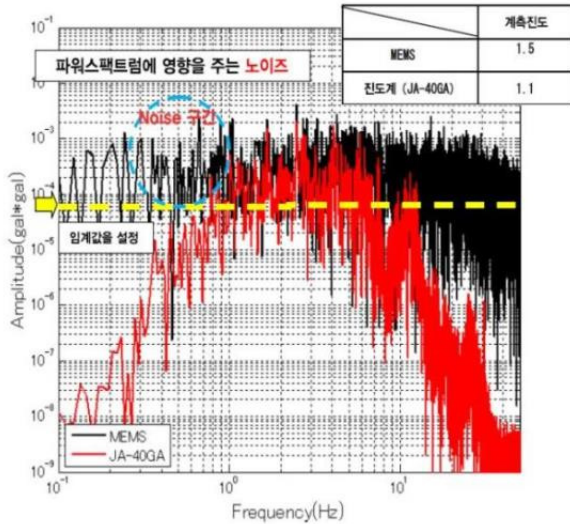
파워스펙트럼의 경우, 해당 축의 시계열파형과 파워스펙트럼이 동시에 표시된다. 그래프에 대해 X, Y 축의 Log스케일과 Linear스케일로 분석이 가능하며, 주파수(Hz)의 최대·최소값을 설정하여 그래프를 확대하여 자세한 파형분석이 가능하다. 또한 Scale 탭을 이용하여 시계열파형의 데이터 구간을 선택하여 파워스펙트럼 데이터가 갱신된다(<Fig. 4 (b)>의 ③). 이러한 스펙트럼의 설정정보는 i버튼을 탭하여 확인 가능하고, 확인화면에서 설정도 가능하다.



(a) Data select (b) Scale interval setting  
 <Fig. 4> Frequency view

### 2.2.3 계측데이터의 노이즈 성분 제거기능<sup>6)</sup>

IOS 단말기에 내장되어 있는 MEMS 가속도 센서에는 <Fig. 5>와 같이 최대 진폭이 약 ±5gal로 모든 주파수대에서 동일한 강도를 가진 성질을 가진 노이즈의 영향을 받게 되는데, 이는 앞서 언급했던 미진동을 계측하여 고유진동수를 산정하는 상시진동 계측에 제한이 된다. 따라서 주파수 스펙트럼에 일정한 역치를 설정하고, 그 이하의 데이터를 노이즈로 간주하여 제거함으로써 탁월한 주파수 성분을 남겨둔 채, 계측에 영향을 미치는 노이즈 성분을 제거하는 것이 가능하다<sup>7)</sup>.



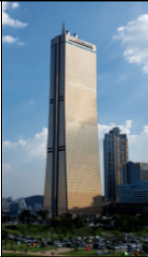

<Fig. 5> Noise component of MEMS sensor<sup>7)</sup>

### 3. 진동 계측

#### 3.1 진동계측 구조물

계측대상 구조물은 서울 소재의 고층건물 2동과 전망대 1동을 대상으로 하였다. <Table 1>은 계측 구조물 제원이다. 구조물 높이는 133.5~244.3m에 분포한다.

<Table 1> Specifications of measured buildings<sup>6)</sup>

Name	63 Square	Jong-ro Tower	Seoul N Tower	
Exterior				
Height(m)	244.3	133.5	236.7	
Floor(F)	60	35	6	
Dimension of building plan(m)	Long side	54	60	-
	Short side	33	25	-

<Table 2>는 계측된 3동의 구조 종별과 구조시스템으로 고층건물은 철골조, 전망타워는 철골조(주골조)와 철근콘크리트(탑신부) 혼합구조로 구성되어 있다.

<Table 2> Structural type and system of measuring buildings

Name	Height (m)	Structural type	Structural system
63 Square	244.3	Steel	Braced frames
Jong-ro Tower	133.5	Steel	Space structure
Seoul N Tower	236.7	RC+S	-

#### 3.2 진동계측 장비 및 방법

이 논문에서는 이 현장에서 전원 없이 간단하고 편리하게 계측할 수 있는 휴대폰의 진동 애플리케이션을 이용하여 2대의 iPad로 진동계측을 실시하였다. 1대의 iPad에는 Vibration APP을 설치하였고, 또 다른 iPad에는 I-jishin APP을 설치하였다.

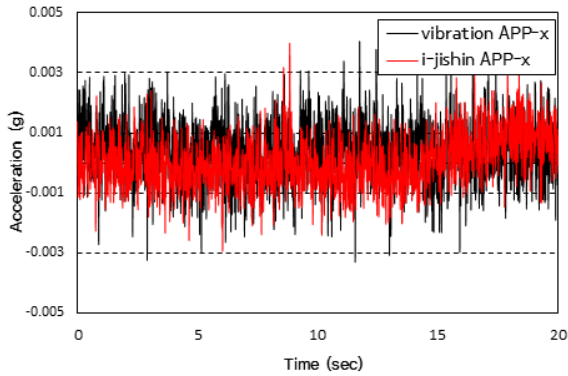
휴대폰 진동계측기는 2방향(X, Y축) 수평가속도와 1방향(Z축) 수직가속도에 대한 계측을 실시간 할 수 있지만, 2방향(X, Y) 수평가속도를 계측할 수 있도록 2축모드로 설정하였다. 100Hz의 Sampling rate를 설정하여 계측을 실시하였다.

진동계측은 양면테이프를 휴대폰 진동계측기의 뒷면에 부착하고 건축물의 계측데이터를 얻기 위하여 설치 가능한 건축물의 최상부 코어부분에 접한 바닥슬래브에 부착하였다. 또한 휴대폰 진동계측기의 모니터가 위쪽을 향하도록 하여 계측을 실시간으로 확인하면서 실시하였다.

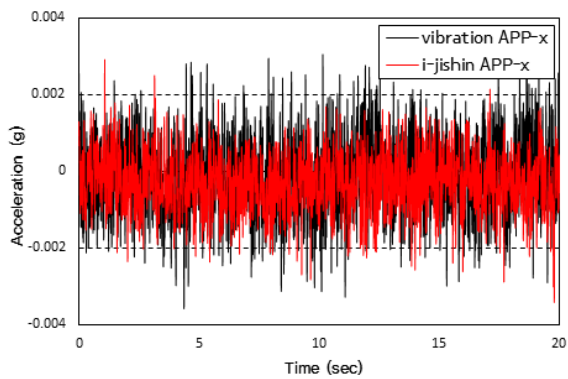
휴대용 진동계측기가 바닥 슬래브 상면에 부착되면 휴대폰 진동계측기에 계측건물의 고유진동수 파형이 3축 방향으로 각각 표기된다. 40.96초씩 수회 계측하였고 주파수를 분석하기 위하여 파워스펙트럼을 구하였다.

#### 3.3 APP 계측 데이터

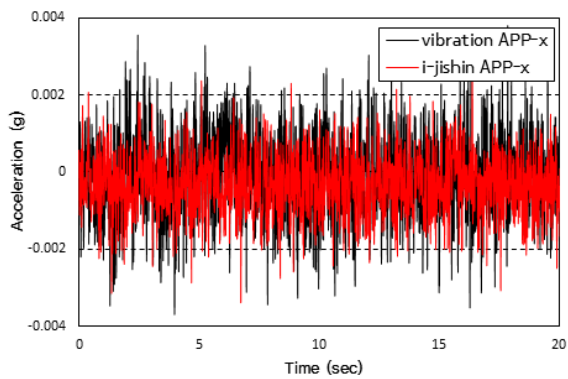
계측 구간에 대하여 진동계측 APP별 20초간 시간영역 가속도 그래프를 <Fig. 6>과 같이 나타내었다. Vibration APP의 시계열파형과 I-jishin APP의 시계열 파형을 동시에 나타내면 노이즈 저감 기능에 의해 I-jishin의 가속도응답이 Vibration APP의 가속도응답보다 비교적 작은 레벨을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) 63 Square



(b) Jong-ro Tower



(c) Seoul N Tower

〈Fig. 6〉 Example of time series waveform (Long direction)

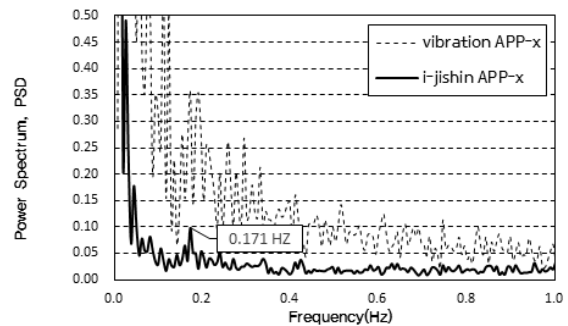
따라서 전체 계측 구간에 대하여 노이즈레벨을 산정하기 위하여 RMS를 산정하였고, 진동계측 APP 별로 최대 RMS 가속도를 산정한 결과는 <Table 3> 과 같다. Vibration APP의 최대 가속도 RMS 값이 I-jishin APP의 최대 가속도 RMS 값보다 평균적으로 16.6% 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 2.2.3에서 언급한 I-jishin APP의 MEMS 센서의 노

이즈필터링에 의해 가속도레벨이 낮아진 것을 확인 가능하다.

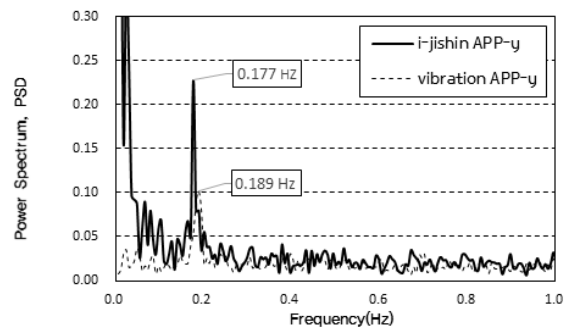
〈Table 3〉 Acceleration RMS Value of buildings

Name	Time (sec)	RMS(mg)		②/①×100
		Vibration ①	I-jishin ②	
63 Square	20	1.136	0.964	84.85
Jong-ro Tower	20	1.087	0.883	81.23
Seoul N Tower	20	1.087	0.914	84.08

63 스퀘어의 진동계측 APP별로 상시진동계측한 결과 파워스펙트럼은 <Fig. 7>과 같다. Vibration APP과 저노이즈형 I-jishin APP에서 얻은 고유진동수의 값이 단변에서 <Fig. 7 (b)>와 같이 각각 0.177Hz, 0.189Hz에서 고유진동수 값을 얻을 수 있었다. 그러나 장변에서는 Vibration APP에서 명료한 피크의 고유진동수를 산정할 수 없었지만 I-jishin APP에서는 <Fig. 7 (a)>와 같이 0.171Hz의 값의 명료한 피크의 고유진동수를 얻을 수 있었다.

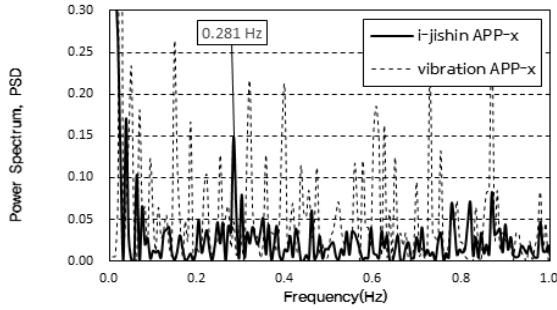


(a) Long direction

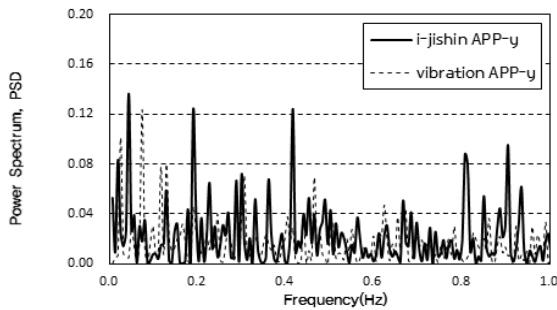


(b) Short direction

〈Fig. 7〉 Comparison of two applications(63 Square)<sup>6)</sup>



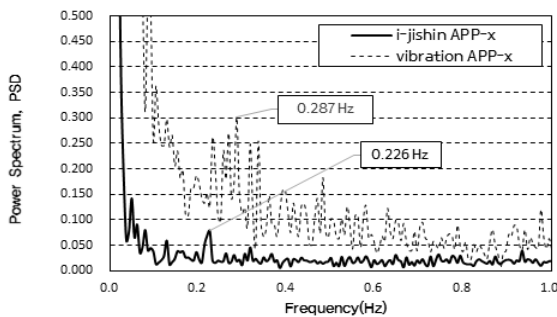
(a) Long direction



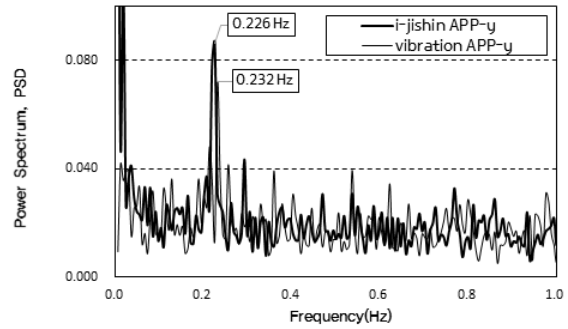
(b) Short direction

〈Fig. 8〉 Comparison of two applications (Jong-ro Tower)<sup>6)</sup>

종로 타워에 대해 2가지의 진동계측 APP로 동시에 계측한 장변과 단변방향의 파워스펙트럼을 <Fig. 8>과 같이 나타내었다. 장변의 경우 <Fig. 8 (a)>와 같이, Vibration APP에서는 MEMS 가속도계의 노이즈로 인해 피크값을 산정하기 어려웠지만, I-jishin의 경우에는 0.281Hz대역에서 명확히 산정할 수 있다. 또한 단변의 경우 <Fig. 8 (b)>와 같이 명확한 고유진동수 성분을 얻을 수 없었다.



(a) Long direction



(b) Short direction

〈Fig. 9〉 Comparison of two applications (Seoul N Tower)<sup>6)</sup>

서울 N 타워에 대하여 2가지의 진동계측 APP으로 동시에 계측한 장변과 단변방향의 파워스펙트럼을 <Fig. 9>와 같이 나타내었다. 장변의 경우 <Fig. 9 (a)>와 같이 Vibration APP에서는 MEMS 가속도계의 노이즈로 인해 피크값을 산정하기 어려웠지만, I-jishin의 경우에는 0.226Hz 대역에서 명확히 산정할 수 있다. 단변의 경우 <Fig. 9 (b)>와 같이 2가지 APP의 파워스펙트럼에서 고유진동수가 0.226Hz, 0.232Hz로 각각 비슷하게 산정되었다. 이는 구조물의 약축인 단변에 대한 반응이 장변에 대한 반응보다 비교적 크므로 노이즈의 영향이 적은 것으로 판단된다.

### 3.4 APP과 서보가속도계 비교

상시진동계측을 통하여 1차 모드 고유진동수를 산정하였으며, 이를 종합하면 다음과 같다 계측데이터는 초당 100개의 데이터샘플링을 하고 계측 시간은 40.96초로 설정하여, 양상블 하나당 4096개의 샘플을 계측하였다. 이를 파워스펙트럼을 통해 1차 모드 고유진동수를 산정하였다. 또한 63 스퀘어와 종로 타워의 경우, 선행 연구에서 서보 가속도계를 통해 계측한 데이터를 비교하여 정확성을 분석하였다.

2가지 진동계측 APP을 사용하여 3동의 고층건물의 상시진동계측을 통한 파워스펙트럼을 통해 고유진동수를 산정한 결과를 선행연구의 데이터<sup>8)</sup>와 함께 <Table 4>와 같이 정리하였다.

〈Table 4〉 Measurement data of buildings<sup>6)</sup>

Name		Sampling rate (No of. data/sec)	No. of ensemble	No. of samples	Natural frequency(Hz)	
					X-dir	Y-dir
63 Square	Vibration	100	9	16384	NA	0.189
	I-jishin				0.171	0.177
	Yoon's <sup>8)</sup>	12.5	19	16384	0.171	0.183
Jong-ro Tower	Vibration	100	1	16384	NA	NA
	I-jishin				0.281	NA
	Yoon's <sup>8)</sup>	12.5	20	1024	0.305	0.354
Seoul N Tower	Vibration	100	7	16384	NA	0.232
	I-jishin				0.226	0.226

63 스퀘어는 장변에서는 I-jishin과 서보가속도계가 동일한 값을 보였고, 단변에서는 3.3%의 차이를 보였다. 종로 타워의 경우는 I-jishin이 7.9%의 차이를 보였다. 이와 같이 차이가 나는 이유는 서보가속도계와 APP의 계측점이 정확히 일치하지 않은 이유로 사료된다. Vibration APP보다 노이즈 저감 성능을 갖춘 I-jishin APP이 선행연구에 더욱 일치하는 고유진동수를 산정할 수 있다. 종로 타워의 경우 양상블의 수가 적기 때문에 파워스펙트럼을 통해 명확하게 고유진동수를 산정하는 것은 어려웠다.

#### 4. 결론

서울에 위치한 고층건물 2동과 전망타워에 대하여 저노이즈형 진동계측 APP과 일반진동계측 APP의 상시진동계측 데이터를 비교하였다.

1) 저노이즈형 진동계측 APP인 I-jishin의 경우에는 종로타워의 단변방향을 제외한 모든 구조물에서 명확한 피크값을 통해 고유진동수 산정이 가능하였다. 그러나 Vibration APP은 63 스퀘어와 서울 N 타워의 단변방향에서만 고유진동수를 파악할 수 있었다.

2) 상시진동계측 시 진동계측 APP별 최대 가속도 RMS 값을 비교한 결과, I-jishin APP이 평균 16.6% 작은 수치를 나타내었다. 이는 I-jishin APP

의 노이즈 저감 기능에 의한 것으로 사료되며 더욱 명확한 상시진동의 응답을 계측할 수 있음을 알 수 있다.

3) I-jishin의 노이즈 저감 기능을 통해 기존의 진동계측 APP보다 더욱 명확한 고유진동수 산정이 가능하리라 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. S. H. Moon, S. W. Yoon, "Ambient Vibration Measurement of Buildings Horizontal Vibration Using a Mobile Phone Application", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 77~83 (2015)
2. K. Y. Do, S. W. Yoon, 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)
3. K. Y. Do, S. W. Yoon, "Analysis of Natural Frequency According to Span of Foot-bridges", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 26, No. 5, pp. 375~383 (2014)
4. Y. S. Jung, S. W. Yoon, "Dynamic Characterization of Large-scale Structures through Mobile-phone Application", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 4, pp. 99~105 (2015)
5. <http://dld-llc.com/>
6. Y. S. Jung, "A study on the low-noise vibration measurement system of the MEMS sensor", master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology (2016)

7. 内藤 昌平, “MEMS 센서による計測震度演算のためのノイズ低減手法の開発”, SATテクノロジー・ショーケース 2014
8. S. W. Yoon, Y. K. Ju, “Natural Frequecny of Tall Building Through Ambient Vibration Measurement”, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 15, No. 2, pp. 117~124 (2003)

- Received : January 10, 2017
- Revised : February 13, 2017
- Accepted : February 13, 2017