

# 무선 MEMS 센서를 이용한 초고층 건물 수평 상시진동 계측의 유효성 평가

## The Evaluation of Effectiveness on Horizontal Ambient Vibration Measurement of Tall Building Using Wireless MEMS Sensor

이 종 호\*  
Lee, Jong-Ho

천 동 진\*\*  
Cheon, Dong-Jin

윤 성 원\*\*\*  
Yoon, Sung-Won

### Abstract

Recently, measuring instruments for SHM of structures had being developed. In general, the wireless transmission of sensor signals, compared to its wired counterpart, is preferable due to its absence of triboelectric noise and elimination of the requirement for cumbersome cable. However, the research on the tall buildings with relatively small vibration levels is insufficient. Therefore, in this paper, we used the wireless MEMS sensor and iPad to compare and analyze the vibration measurements of three tall buildings and two towers.

*Keywords : Ambient, Horizontal vibration, Measurement, Wireless, MEMS, SHM, Mobile-phone vibration*

## 1. 서론

마이크로 전자 기계 시스템(MEMS) 기반의 감지 요소는 정적 및 동적(모바일)을 포함한 애플리케이션에 폭넓게 수용 및 채택되고 있다. 최근 안정적인 무선 MEMS 가속도계에 대한 수요가 증가함에 따라 고가의 기존 상용 가속도계를 대체하기 위한 멀티컨트롤 및 모니터링 작업을 수행해야 했다<sup>1)</sup>.

무선 MEMS 가속도 센서는 크기와 비용 및 편리성에 따른 대안 중 하나이다. 기존 상용 유선 가속도 센서에 비해 가격이 저렴하며 크기가 작고 케이블에 대한 간섭이 없으므로 장소의 여건에 관계없이 측정자의 더욱 편리한 계측을 가능하게 하지만

MEMS 가속도계가 장착된 저가형 무선 센서는 높은 잡음 밀도가 단점으로 지적되고 있다.

무선 MEMS 센서가 장착된 휴대폰 앱을 이용한 고층 건물의 수평 상시진동 계측<sup>2)</sup>과 타워전망대의 수평 상시진동 계측<sup>3)</sup>에 대한 연구가 진행되었다. 명료한 고유진동수를 찾을 수는 있었지만 높은 노이즈 레벨 때문에 대다수의 고유진동수 그래프가 명확하지 않았다. 상시진동 계측은 추가적인 외력이 없는 상태에서 가장 쉽게 계측할 수 있다는 장점이 있지만, 가속도 응답 진폭이 작아 노이즈에 의한 영향이 커서 센서와 데이터 수집 장치의 높은 정밀도가 요구되기 때문이다<sup>4)</sup>.

휴대용 계측기의 계측 한계를 확인하고 현재 연구 중인 무선 MEMS 센서, 이하 G-Link-200(Microstraion)은 저층 건물에서 상시진동 계측<sup>5)</sup>을 실시하여 고유진동수 계측이 가능함을 확인하였지만 미진동 및 저역대인 초고층 건물에서의 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 휴대용 계측기를 이용한 진동 계측<sup>2,3)</sup>에서 고유진동수를 산정하지 못한 초고층 건물 3개동 그리고 타워 2개동을 무선 MEMS 센서인 G-Link-200과 iPad를 사용하여 재계측하여 결과를 비교·분석하였다.

\* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정  
Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

\*\* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정  
Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

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

## 2. 진동 계측 개요

### 2.1 계측 건물 개요

대상 건물은 Moon & Yoon(2015)<sup>2)</sup>의 “휴대폰 앱을 이용한 건물 수평진동의 상시진동계측”과 Moon & Yoon(2016)<sup>3)</sup>의 “휴대폰 애플리케이션을 통한 타워전망대 동적특성 분석” 논문에서 계측 결과 전체 15개동 중 고유진동수 계측이 되지 않은 건물 5개동을 선정하였다. 5개동의 건물은 서울의 고층 건물이 집중되어 있는 여의도, 종로에 위치한 3개동의 초고층 건물과 각 지역의 랜드마크 타워인 구리타워, 하남 유니온타워이다.

<Table 1>은 계측 건물의 제원으로서, 건물의 외관 및 층수, 높이, 기준층 평면 치수, 구조 종별을 정리하였다<sup>2)</sup>.

<Table 1> Measured buildings<sup>2),3),6)</sup>

No	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Ref.	-	Yoon & Ju (2003) <sup>6)</sup>	Moon & Yoon (2016) <sup>3)</sup>		
Exterior of building					
Height(m)	116.2	133.5	243.3	105	100
Measure location(F)	27	35	60	2	2
Dimension of building	Long side	61	60	33	-
Short side	37	20	54	-	-
Structural system	SRC	S	S	S	SRC

### 2.2 계측 장치

#### 2.2.1 핸드폰 계측 장치

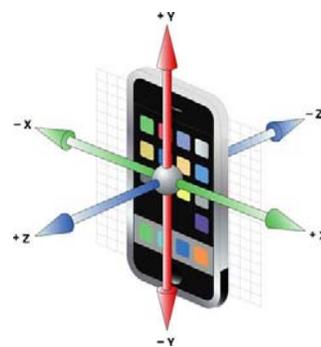
모바일 진동 계측 시스템은 센서, 신호 측정기, FFT 분석기가 일체화되어 있고 일반인도 쉽게 사용할 수 있는 장점을 갖추고 있다<sup>7)</sup>.



(a) Vibration measuring instrument App (b) Vibration measuring instrument main view

<Fig. 1> Vibration of iOS App (Vibration App ver. 2.01)<sup>7)</sup>

휴대용 진동 계측기는 <Fig. 2>와 같이 X, Y, Z의 3축 방향(2방향 수평 가속도와 1방향 수직 가속도)에 대한 실시간 계측을 할 수 있으며, 동적 특성도 모니터 상에서 해석이 가능하다. 휴대용 진동 계측 장비에는 MEMS의 가속도계(BMA280, Bosch Sensortech)가 내장되어 있어 3축의 가속도계는 약 0.02g 감도와 최대 ±2G까지 계측이 가능하다. 또한 휴대용 진동 계측기 App은 0~100Hz 파형의 범위에서 샘플링 간격(Sampling rate)을 설정할 수 있다<sup>7)</sup>.



<Fig. 2> i-Phone 3 axial direction<sup>7)</sup>

#### 2.2.2 무선 MEMS 계측 장치

무선 MEMS 가속도 계측 장치는 Microstrain사에서 개발한 G-Link-200 가속도계 시스템을 사용하였다<Fig. 3>.



(a) Node<sup>8)</sup>



(b) Data acquisition<sup>9)</sup>

<Fig. 3> G-Link 200<sup>10)</sup>

센서의 크기는 46.6×43×44mm로 3축 가속도계이며 1~8g의 측정 범위를 가진다. 자세한 제원은 <Table 2>와 같다<sup>10)</sup>.

<Table 2> Specifications of accelerometer<sup>10)</sup>

Accelerometer channels	
Integrated sensors	3 channels(X, Y, Z)
Measurement range	1~8g
Accelerometer bandwidth	DC to 1kHz
Resolution	20-bit
Noise density ( $\pm 2$ g)	$25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Non-linearity	0.1% full-scale
0g offset ( $\pm 2$ g)	$\pm 25\text{mg}(\text{typ}), \pm 75\text{mg}(\text{max})$
0g offset vs temperature ( $\pm 2\text{g}$ )	$\pm 0.1\text{mg}/^\circ\text{C}(\text{typ}), \pm 0.15\text{mg}/^\circ\text{C}(\text{max})$

가속도계는 무선 MEMS 센서의 사양들을 비교하여 SHM 적용성 평가를 한 연구 내용<sup>11)</sup>을 참고하여 고성능에 중점을 두어 선정하였다<sup>10)</sup>.

상시진동 계측 시에는 노이즈 계측 장비의 노이즈 레벨이 낮아야 명확한 동적 특성을 알아낼 수 있다. 따라서 G-Link-200과 기존 가속도계(휴대용 계측기)의 Noise density 크기를 비교하여 <Table 3>에 나타냈다.

<Table 3> Comparison of noise density

Equipment	Noise density( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
G-Link-200	25
iPhone	120

G-Link-200의 노이즈 밀도는  $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고 iPhone에 내장된 BMA280의 노이즈 밀도는  $120 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 약 4~5배 노이즈 밀도 크기의 차이가 있다.

### 3. 진동 계측

#### 3.1 계측 조건

<Table 4>는 진동 계측 시 계측 기기의 계측 조건이다. 5개동의 샘플링은 기존 진동 계측기의 샘플링 조건을 같게 하기 위해서 iPad와 G-Link-200 2개의 장비를 이용하여 동시 계측을 실시하였다.

<Table 4> Vibration equipment condition in measurement

No.	Data		
	Samples/ensemble	Frequency band(Hz)	Number of ensemble
S-1	1,024	8	12
S-2	1,024	8	12
S-3	1,024	8	12
S-4	1,024	8	12
S-5	1,024	8	12

데이터 샘플링은 8Hz로 설정하였고 <Table 4>와 같이 앙상블당 샘플수는 1,024개로 하여 512초씩 계측하였다. 앙상블 수는 12개이며 총 1,536초간 계측하여 12,288개의 데이터를 수집하였다.

#### 3.2 계측 방법

계측 대상 건물의 기준층 중앙부에 G-Link-200 센서와 iPad를 <Fig. 5>와 같이 설치하여 수평 상시진동 계측을 실시하였다.

계측은 최대한 사람이 없는 시간에 실시하였으며, G-Link-200과 iPad의 데이터어쿠션 프로그램이 다르기 때문에 최대한 동시에 계측 시작 트리거를 발동시켰다.

### 3.3 계측 결과

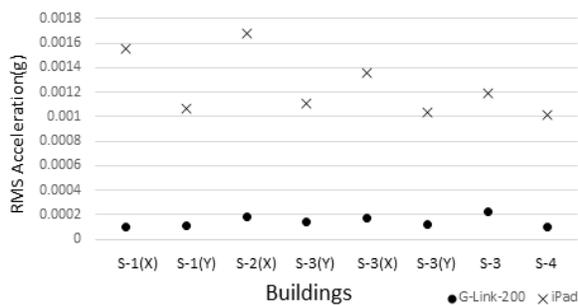
#### 3.3.1 시계열 파형

<Fig. 6~13>과 같이 건물 5개동 시계열 파형 그래프는 G-Link-200과 iPad의 데이터를 비교할 수 있게 나타났다. 건물 5개동의 시계열 파형 그래프에서 RMS 가속도 값 및 오차는 <Fig. 4>와 <Table 5>에 나타났다.

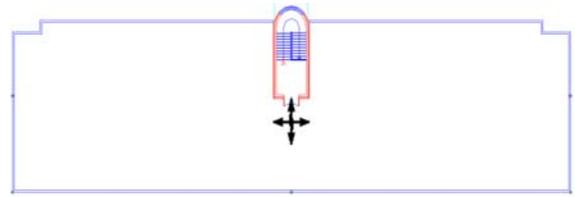
<Table 5> RMS of amplitude

Bldg.	Axis	Accelerometer	RMS of amplitude(g)	Error (%)
S-1	X	G-Link-200	0.00010	93.1
		iPad	0.00145	
	Y	G-Link-200	0.00011	88.5
		iPad	0.00096	
S-2	X	G-Link-200	0.00018	88.0
		iPad	0.00150	
	Y	G-Link-200	0.00014	85.5
		iPad	0.00097	
S-3	X	G-Link-200	0.00017	85.7
		iPad	0.00119	
	Y	G-Link-200	0.00012	86.9
		iPad	0.00092	
S-4	-	G-Link-200	0.00022	77.3
		iPad	0.00097	
S-5	-	G-Link-200	0.00010	89.0
		iPad	0.00091	

G-Link-200과 iPad의 RMS 가속도 오차는 77.3~93.1%까지 나타났다. S-4, S-5는 타워이며 타워의 특성상 X, Y축이 대칭인 관계로 데이터는 장변, 단변으로 구분하지 않고 하나로 통일하였다.



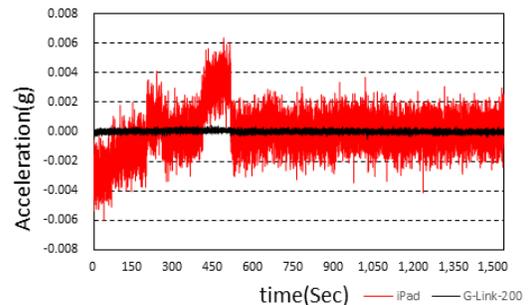
<Fig. 4> RMS of amplitude



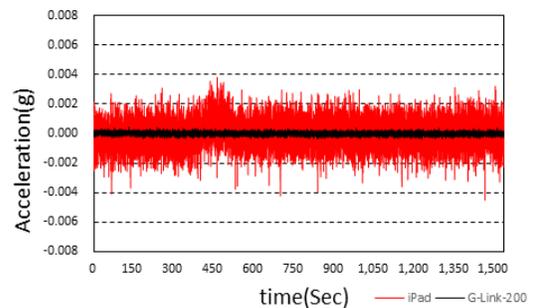
(a) Measurement point



(b) Accelerometer  
<Fig. 5> Installing sensor

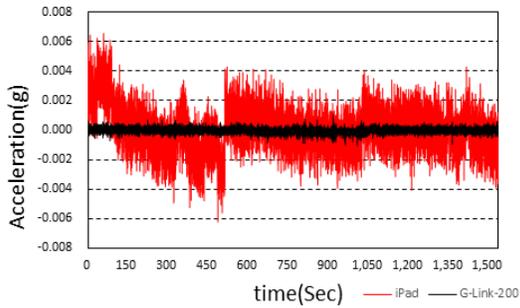


<Fig. 6> Time history(S-1, X axis)

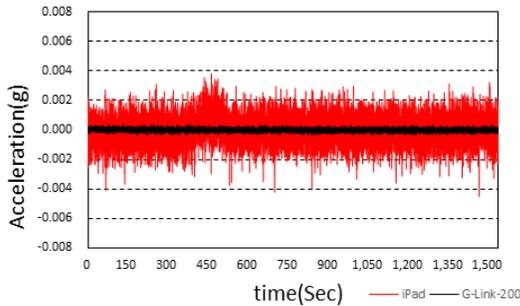


<Fig. 7> Time history(S-1, Y axis)

건물 S-1에서 장변 X축의 RMS 가속도 값은 G-Link-200이 0.00010g 그리고 iPad가 0.00145g로 G-Link-200의 가속도 값이 약 14.5배 작았으며 단변 Y축의 RMS 가속도 값은 각각 0.00011g 그리고 0.00096g로 약 8.7배 작게 나타났다.

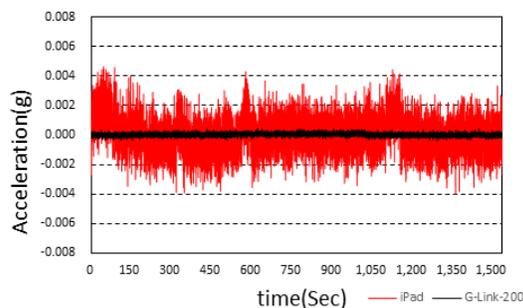


<Fig. 8> Time history(S-2, X axis)

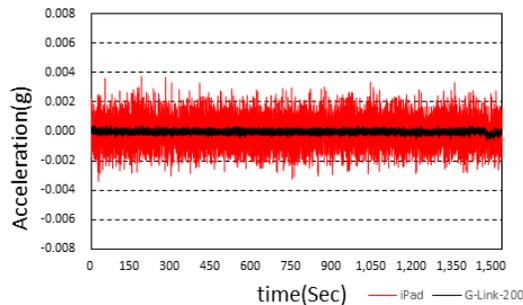


<Fig. 9> Time history(S-2, Y axis)

건물 S-2에서는 X축이 약 8.3배, Y축이 약 7배 차이를 보였다.

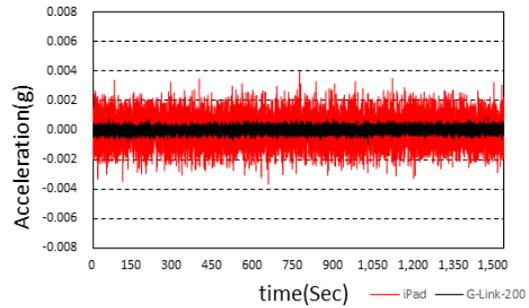


<Fig. 10> Time history(S-3, X axis)



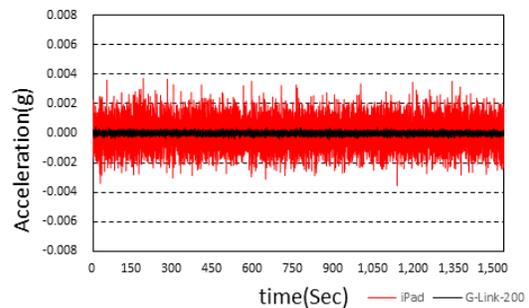
<Fig. 11> Time history(S-3, Y axis)

건물 S-3에서는 X축이 약 7배, Y축이 약 7.6배 차이를 보였다.



<Fig. 12> Time history(S-4)

건물 S-4에서 RMS 가속도 값은 G-Link-200이 0.00022g 그리고 iPad가 0.00097g로 약 4.4배의 차이를 보였다.



<Fig. 13> Time history(S-5)

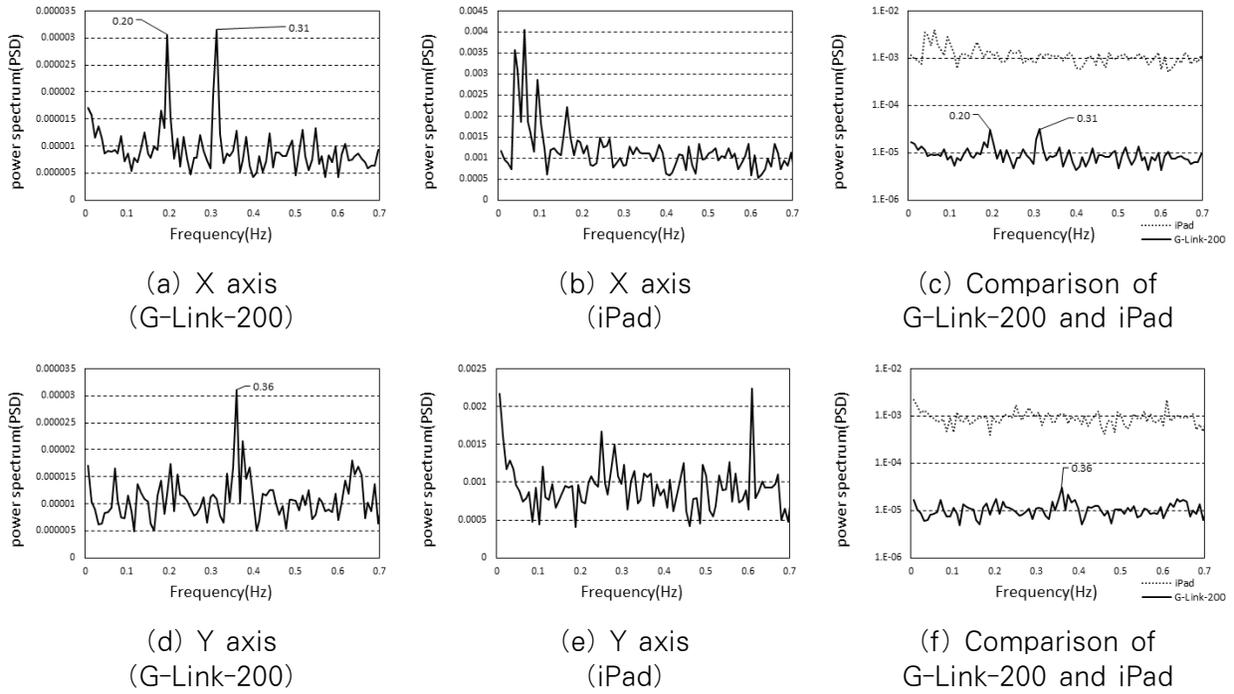
건물 S-5에서 RMS 가속도 값은 G-Link-200이 0.00010g 그리고 iPad가 0.00091g로 약 9.1배의 차이를 보였다.

### 3.3.2 고유진동수

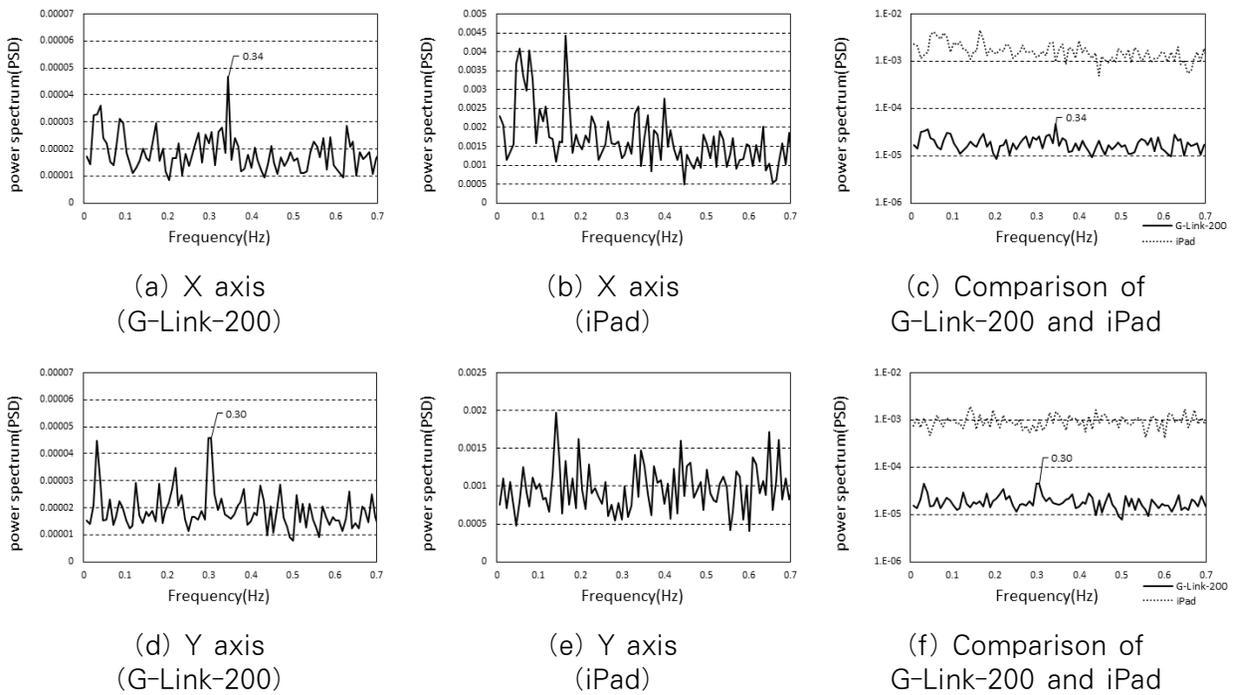
초고층 건물 3개동과 타워 2개동 고유진동수 분석 결과 G-Link-200은 건물 S-3의 X축 하나의 파워스펙트럼을 제외하고 명료한 피크를 보여주는 반면, iPad는 건물 S-3의 Y축 하나의 고유진동수만 찾아낼 수 있었다. 건물 5개동의 파워스펙트럼 그래프는 <Fig. 14~18>에 나타냈으며, 고유진동수 값은 <Table 6>에 나타냈다.

<Table 6> Natural frequency of X axis

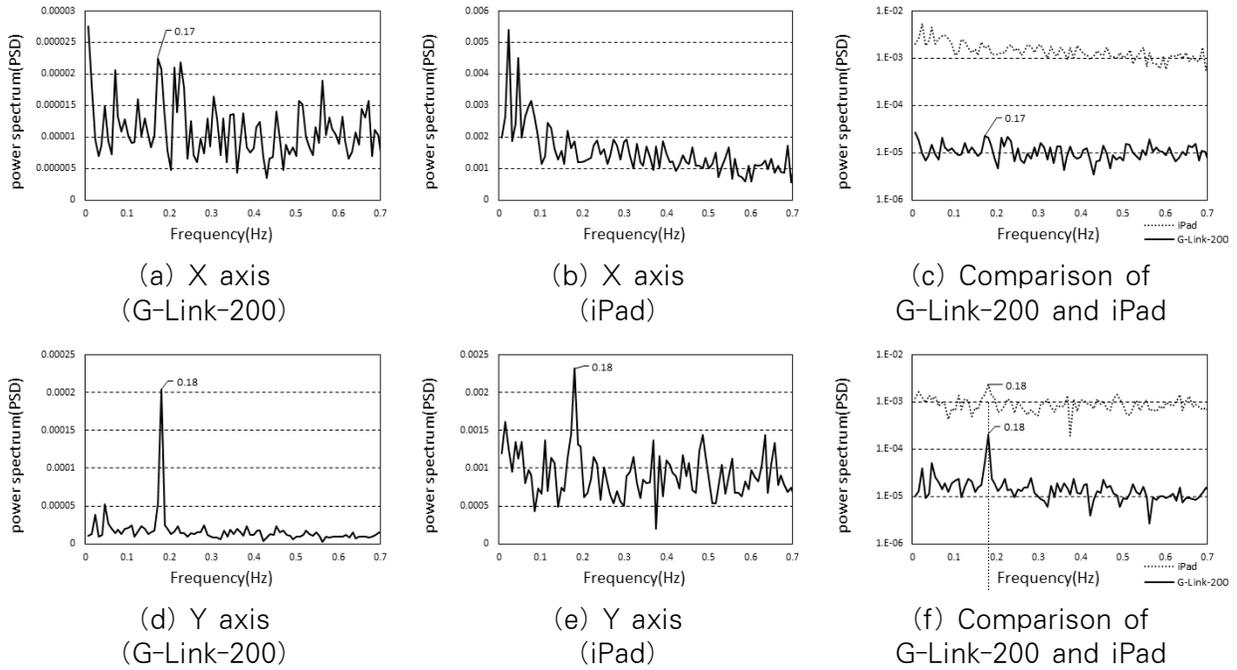
Accelerometer	Natural frequency(Hz)							
	S-1		S-2		S-3		S-4	S-5
	X	Y	X	Y	X	Y		
G-Link-200	0.31	0.36	0.34	0.30	0.17	0.18	0.16	0.32
iPad	-	-	-	-	-	0.18	-	-



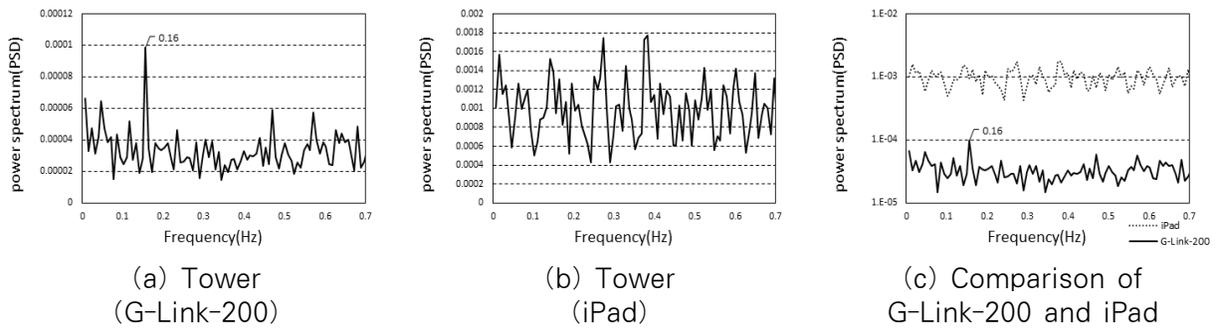
<Fig. 14> Natural frequency(S-1)



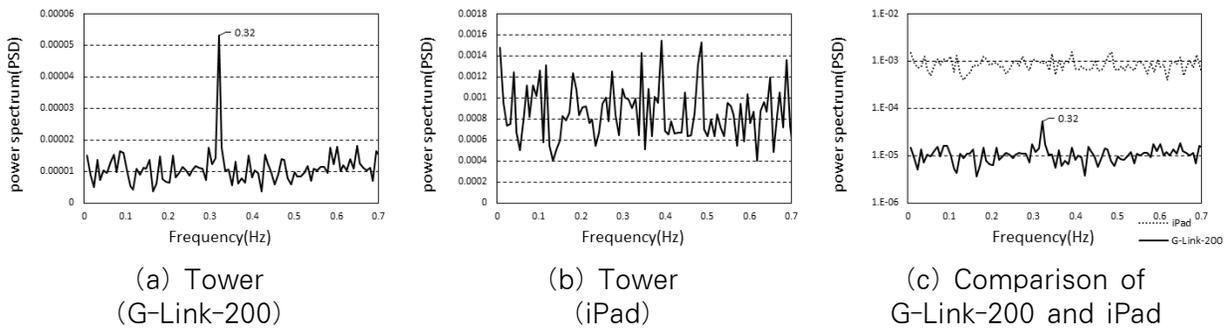
<Fig. 15> Natural frequency(S-2)



<Fig. 16> Natural frequency(S-3)



<Fig. 17> Natural frequency(S-4)



<Fig. 18> Natural frequency(S-5)

## 4. 결론

무선 MEMS 센서(G-Link-200)와 휴대용 계측기(iPad)를 이용하여 초고층 건물 3개동과 타워 2개동의 수평 상시진동 계측을 실시하였고, 계측 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수평 상시진동 계측 시 iPad의 RMS 가속도가 G-Link-200 가속도계보다 적게는 4.4배에서 크게는 14.5배 크게 나왔다.

2) 파워스펙트럼 그래프에서 G-Link-200의 고유진동수 피크를 명확히 확인할 수 있는 반면, iPad는 노이즈 레벨이 크기 때문에 명확한 피크를 확인할 수 없었다.

3) 무선 MEMS 센서인 휴대용 계측기의 시간 이력, 고유진동수 영역에서의 계측 한계점을 확인하였고, 초고층 건물의 수평 상시진동 계측에서 G-Link-200을 이용하여 초고층 건물의 수평 상시진동 계측의 유효성을 확인하였다.

계측 결과 본 논문에 사용된 G-Link-200 가속도계를 이용하여 미진동 및 저역대 구조물에서 동적 특성 분석에 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1A2B2014064)

### References

1. Albarbar, A., & Teay, S. H., "Advanced Mechatronics and MEMS Devices II", Springer Verlag, Manchester, pp.19~40, 2016.
2. Moon, S. H., & Yoon, S. W., "Ambient Vibration Measurement of Buildings Horizontal Vibration Using a Mobile Phone Application", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.15, No.3, pp.77~83, 2015
3. Moon, S. H., & Yoon, S. W., "Analysis on Dynamic Characteristics of an Observatory Tower by Using Mobile-phone Application", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.2, pp.47~54, 2016
4. Jang, Y. J., Cho, B. H., & Kim, H. J., "Comparison of Dynamic Property Estimation by Transient Vibration and Synchronized Human Excitation", Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.24, No.3, pp.259~266, 2011
5. Lee, J. H., & Yoon, S. W., "The Evaluation of Effectiveness on Horizontal Transient Vibration Measurement of Low-Rise Building Using Wireless MEMS Sensor", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.3, pp.57~64, 2017
6. Yoon, S. W., & Ju, Y. K., "Natural Frequency of Tall Building Through Ambient Vibration Measurement", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.15, No.2, pp.117~124, 2003
7. Do, K. Y. (2014). Analysis of Natural Frequency through Vibration Measurement of Foot-bridges (Master's dissertation). Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea
8. Microstrain, G-Link-200 Datasheet (8400-0102) RevA-10, Williston, 2017
9. Microstrain, WSDA-USB\_Datasheet\_8400-0074, Williston, 2017
10. Lee, J. H., Cheon, D. J., & Yoon, S. W. "The Evaluation of Communication Distance Using Wireless MEMS Sensor in Building Structure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.4, pp.93~102, 2017
11. Kurata, N., Suzuki, M., Saruwatari, S., & Morikawa, H. (2008, October). Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. International Association for Earthquake Engineering, China.

■ Received : February 27, 2018

■ Revised : May 08, 2018

■ Accepted : May 08, 2018