

# 무선 MEMS 센서를 이용한 보도교 진동 계측

## Vibration Measurements of Footbridges Using Wireless MEMS Sensor

이 중 호\*  
Lee, Jong-Ho

천 동 진\*\*  
Cheon, Dong-Jin

윤 성 원\*\*\*  
Yoon, Sung-Won

### Abstract

Recently, measuring instruments for SHM of structures has been developed. In general, the wireless transmission of sensor signals, compared to its wired counterpart, is preferable due to the absence of triboelectric noise and elimination of the requirement of a cumbersome cable. However, the low-cost wireless MEMS sensor has high noise density and transmits the signal wirelessly, so data transmission delay occurs during measurement. Therefore, the footbridges that was previously measured by a mobile phone in 2014 was remeasured using G-Link-200, iPad and iPhone to compare their performance.

**Keywords :** *Vibration, Measurement, Wireless, MEMS, Mobile phone, Portable, Footbridge*

## 1. 서론

최근 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 진보로 인해 작고 저렴한 센서를 사용하여 구조물의 상태를 감지할 수 있다. 또한 무선 센서 네트워크(WSN)을 통해 데이터를 전송할 수 있어 기술자가 케이블 연결로 인한 제한을 받지 않는다<sup>1)</sup>.

위기 시나리오가 발생하였을 때 이를 파악하기 위한 목적으로 피해를 감지하는 모니터링 프로세스를 SHM(Structural Health Monitoring)이라 한다. 노화 구조물을 제어하기 위한 몇 가지 방법이 개발되었지만 교량에는 아직도 육안 검사가 사용되는 경우가 많다<sup>1)</sup>.

보도교의 기능은 보행자가 자연 방해물 또는 도

로를 넘어 통행할 수 있도록 두 지역을 연결하는 것이다. 보도교는 이러한 기본적인 구조적 해결 외에 도시의 환경 구조물로서 새로운 역할이 요구되고 있다. 따라서 구조적으로 안전할 뿐만 아니라 합리적인 재료의 사용과 형태를 취함으로써 최선의 구조적 해결이 이루어져야 한다<sup>2)</sup>.

일반적으로 보도교는 경량 및 고강도 재료로 만들어지며 상당히 긴 스패를 가지고 있다. 또한 세장한 구조물인 경향이 있어 보행자의 걸음걸이에 공진이 일어날 수 있기 때문에 동적 효과가 더 뚜렷하게 나타난다<sup>3)</sup>.

대부분의 경우 진동 문제는 보행자들의 걸음걸이에 의해 발생하는 강제 운동이다. 일반적으로 보도교는 경간이 40m 이상 되는 경우 진동에 예민하게 반응하며 통행자에게 심리적 불안감을 줄 수 있다. 보행자의 인체 하중에 의한 보도교의 진동 현상은 보행자 통행에 불편을 주게 되고, 보행 진동수와 보도교의 고유진동수가 동조되는 경우 공진이 발생하여 보도교의 제한 범위를 초과하는 큰 진동이 유발됨에 따라 사용성 뿐만 아니라 안정성 측면에서도 큰 문제가 될 수 있다<sup>4)</sup>.

보도교는 다른 교량에 비해 중요도, 기능성, 경제적인 측면에서 큰 관심을 불러일으키지 못하여 그

\* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 박사과정  
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

에 관련된 설계 기준이나 연구가 미비한 실정이다. 서울시 시설물·시공 및 유지관리 편람<sup>5)</sup>에서는 경간별 고유진동수를 보도교 설계 시 참고자료로 제시하고 있다<sup>2)</sup>. 또한 보행할 때 수직 고유진동수는 1.5~2.3Hz 사이에 분포하므로 공진을 방지하기 위하여 서울시에서 제시한 수직 고유진동수 범위를 피하여 보도교를 설계할 것을 권장하고 있다. 그러나 서울시에 위치한 165개 보도교의 보행 시 공진 발생 여부와 경간별 고유진동수의 상관관계에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다<sup>2)</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Do, Yoon & Kim(2014)<sup>2)</sup>은 휴대용 계측기(이하 Mobile phone)로 서울시 16개 보도교의 진동을 계측하여 공진 발생 여부와 경간별 고유진동수 관계식을 분석하고 사용성 평가를 실시하였다. Mobile phone은 가속도계, 데이터 송신기 및 수신기가 일체형으로 구성되어 있고, 구조물 진동 계측 중에 실시간으로 진폭 및 고유치를 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한 케이블에 대한 간섭이 없기 때문에 유연한 계측 조건을 만들 수 있으며, 가속도 센서 외에 많은 장비의 설치 및 이동에 대한 부담이 적어 효율적이다.

Lee, Cheon & Yoon(2018)<sup>6)</sup>은 현재 연구 중인 무선 MEMS 센서(이하 G-Link-200)를 이용하여 iPhone과 iPad를 동시 계측 및 분석하였으며, Mobile phone은 진폭이 작을 경우 명확한 고유진동수 피크를 산정할 수 없음을 확인하였다.

Shrestha, Dang & Wang(2018)<sup>7)</sup>은 Mobile phone으로 진동 계측 시 시간 영역에서 Time lag가 발생하는 문제를 언급하였다. 모든 기기에 대해 샘플링을 동일하게 설정하더라도 각 기기가 제공하는 실제 Time interval은 랜덤으로 차이가 나기 때문에 불안정한 샘플링을 발생시키고 고유진동수 또한 이동될 수 있다.

G-Link-200의 경우 계측 총 시간과 Time interval이 항상 일정하게 계측되는 반면, Mobile phone의 경우 계측 총 시간과 Time interval이 랜덤으로 다르게 계측된다. 실제로 얻은 Raw 데이터의 이미지를 <Fig. 1>에 나타내었다.

본 논문에서는 선행 연구 Do, Yoon & Kim(2014)<sup>2)</sup>의 Mobile phone을 이용한 보도교 16개

소의 진동 계측 결과와 새로 계측된 G-Link-200의 계측 결과를 시간 및 고유진동수 영역에서 비교·분석하여 이를 토대로 센서 유효성을 확인하였다.

Time	G-Link-200	Time	G-Link-200
10:56:33.031250000	-0.997811	11:01:56.031250000	-1.001798
10:56:33.062500000	-0.997929	11:01:56.062500000	-1.001264
10:56:33.093750000	-0.998238	11:01:56.093750000	-1.000024
10:56:33.125000000	-0.999322	11:01:56.125000000	-0.997826
10:56:33.156250000	-0.999772	11:01:56.156250000	-0.997093
10:56:33.187500000	-1.000684	11:01:56.187500000	-0.996262
10:56:33.218750000	-1.001497	11:01:56.218750000	-0.996483
10:56:33.250000000	-1.000478	11:01:56.250000000	-0.998135
10:56:33.281250000	-1.000169	11:01:56.281250000	-0.999635

(a) G-Link-200

2048 Points		2048 Points	
32 Sample Rate (Hz)		32 Sample Rate (Hz)	
0 Longitude		127.0804 Longitude	
0 Latitude		37.59622 Latitude	
0 Speed (m/s)		-1 Speed (m/s)	
Frequency	Acceleration	Frequency	Acceleration
Time	Z	Time	Z
0	-0.00054	0	-0.00412
0.032315	-0.00048	0.032287	0.000805
0.064847	-0.00049	0.064583	-0.00115
0.097206	-0.00245	0.096369	-0.00202
0.129604	-0.00239	0.128921	-0.00295

(b) Mobile phone

<Fig. 1> Random time interval

## 2. 진동 계측 개요

### 2.1 계측 보도교 개요

<Table 1> Overview of footbridges<sup>2)</sup>

No.	Width (m)	Length (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Structure type	Span (m)
S-1	3.0	38.5	115.5	Steel beam	35.3
S-2	5.0	70.2	351.0	Steel rahmen	40.4
S-3	4.0	28.0	112.0	Steel beam	32.4
S-4	2.8	20.0	56.0	Steel beam	17.4
S-5	4.0	24.6	98.4	Steel beam	22.2
S-6	4.0	27.5	110.0	Steel beam	19.4
S-7	3.0	20.4	61.2	Steel rahmen	22.8
S-8	4.0	26.0	104.0	Steel beam	23.8
S-9	3.6	48.1	173.0	Steel beam	32.0
S-10	3.2	50.0	160.0	Steel beam	46.8
S-11	3.8	30.0	114.0	Steel rahmen	20.5
S-12	3.5	29.8	104.3	Steel rahmen	22.8
S-13	4.0	39.0	156.0	Steel beam	37.7

대상 보도교는 Do, Yoon & Kim(2014)<sup>2)</sup>의 “휴대용 계측기를 이용한 보도교 진동계측분석” 논문에서 계측한 동일 보도교 13개소이다. 선행 연구에서는 16개소를 계측하였지만 2018년 재계측할 당시 2개소의 보도교가 철거되었고 1개소의 보도교는 공사 중인 관계로 13개소의 보도교만 재계측하였다. 개요는 <Table 1>와 같다.



<Fig. 2> Footbridge (S-1)

## 2.2 계측 장치

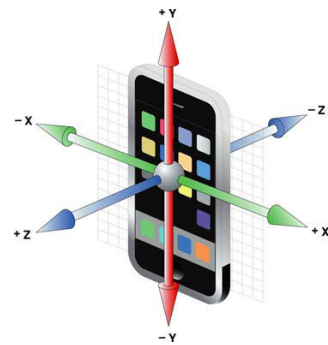
### 2.2.1 Mobile phone

본 논문에 사용된 Mobile phone 진동 계측 시스템은 Apple의 iPhone 4S와 iPad mini4이다. 두 기기는 센서, 데이터 로거, FFT 분석기가 일체화 되어 있으며 사용법과 인터페이스가 간편하기 때문에 일반인도 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다<sup>8)</sup>.



(a) Vibration measuring instrument - App (b) Vibration measuring instrument - Main view  
<Fig. 3> Vibration of iOS app (Vibration app ver. 2.01)<sup>8)</sup>

Mobile phone은 <Fig. 4>와 같이 x, y, z의 3축 방향(2방향 수평 가속도, 1방향 수직 가속도)에 대해 실시간으로 계측할 수 있으며, 모니터 상에서 동적 특성 해석도 가능하다. 3축 가속도계는 약 0.02g 감도와 최대  $\pm 2g$ 까지 계측이 가능하다. 또한 휴대용 진동 계측 모바일 애플리케이션은 0~100Hz 파형의 범위에서 샘플링 간격(Sampling rate)을 설정할 수 있다<sup>8)</sup>.



<Fig. 4> i-Phone 3 axial direction<sup>7)</sup>

### 2.2.2 G-Link-200(가속도 센서 및 송신기)

본 논문에 사용된 무선 MEMS 센서는 Microstrain에서 개발한 G-Link200 가속도 센서 노드이다<sup>9)</sup>. 노드의 크기는 46.6×43×44mm이며, 내부에 ANALOG DEVICES의 ADXL354/355 가속도계가 장착되어 있다. 가속도 센서로부터 얻은 데이터를 노드 안에 장착된 데이터 송신기를 통해 무선 데이터 수신기로 송신한다.  $\pm 2\sim 8g$ 의 측정 범위를 제공하고, 외관과 상세 제원은 <Fig. 5> 및 <Table 2>에 나타내었다.



<Fig. 5> G-Link 200 node<sup>10)</sup>

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

Accelerometer channels	
Integrated sensors	3 channels (X, Y, Z)
Measurement range	±2~8g
Accelerometer bandwidth	DC to 1kHz
Resolution	20-bit
Noise density (±2 g)	25 μg/√Hz
Non-linearity	0.1% full-scale
0g offset (±2 g)	±25mg (typ), ±75mg (max)
Operating temperature	-40°C to +85°C

2.2.3 무선 데이터 수신기<sup>9)</sup>

무선 데이터 수신기는 Microstrain에서 개발한 WSDA-Base-104-LXRS를 사용하였다. 2.4GHz의 주파수를 가지고, 활성 채널 수 및 샘플링 설정 수에 따라 RF 채널마다 최대 2,000개의 노드 설정이 가능하다. 수신기의 크기는 88×70×20mm로 양방향 RF 범위의 0.07~2Km까지 통신이 가능하다<Fig. 6>. 이는 송신 전력 설정에 따라 달라지며 전력당 최대 통신 거리는 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Maximum range of data logger<sup>11)</sup>

Setting	Power output (dBm)	Max. range (Km)
Extended	16	2
Standard	10	1
Low	0	0.07

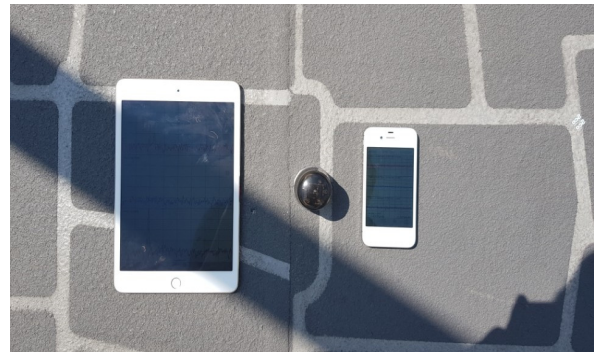
이 무선 MEMS 센서 시스템은 출력 전력을 0~16dBm까지 설정할 수 있다. 전력에 따라 최대 통신 거리가 달라지며 미국 외 국가에서는 10dBm으로 제한되어 있다. 본 논문에서는 기본(출력 전력 10dBm, 최대 거리 1Km)으로 설정하여 실험하였다.



<Fig. 6> WSDA-Base-104-LXRS<sup>11)</sup>

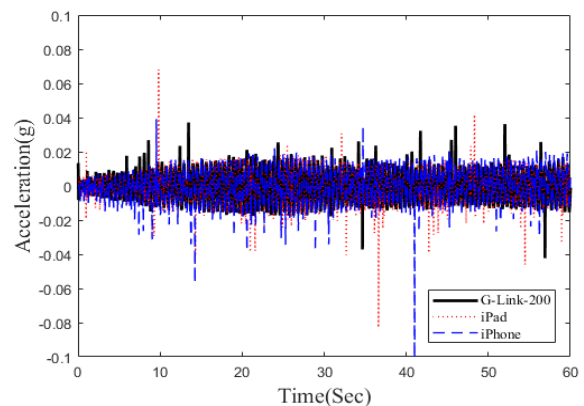
3. 진동 계측

3.1 계측 방법



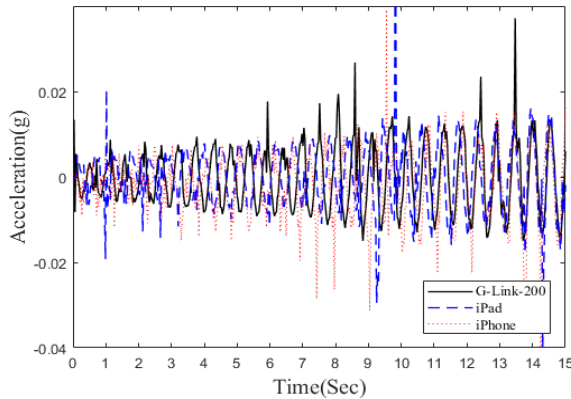
<Fig. 7> Sensors installation

<Fig. 7>과 같이 13개소 보도교에서 3종류의 센서, Mobile phone(iPhone 4S, iPad mini4), G-Link-200 센서의 동시 계측을 실시하였다. 가진 방법으로는 12개소 보도교에서 힘임펄스 가진을 하였으며, S-10 보도교에서는 Mobile phone의 가속도 노이즈 레벨이 크고 바닥의 마감이 목재로 되어 있어 마감재의 진동수가 지배적이었다. 때문에 고유진동수 산정이 어려워 메트로놈으로 보도교와 같은 고유진동수로 보행 진동을 하여 공진을 유발시켜서 실험을 실시하였다. S-10 보도교의 공진 시계열 파형 그래프는 <Fig. 8>에 나타내었다.



(a) Whole data





(b) Expansion (0 to 15sec)

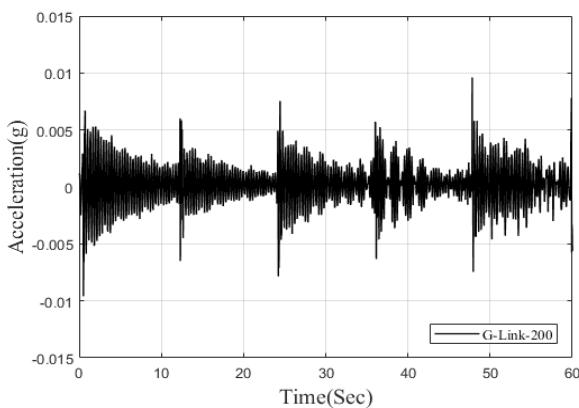
<Fig. 8> Time history (S-10 Resonance)

### 3.2 계측 조건

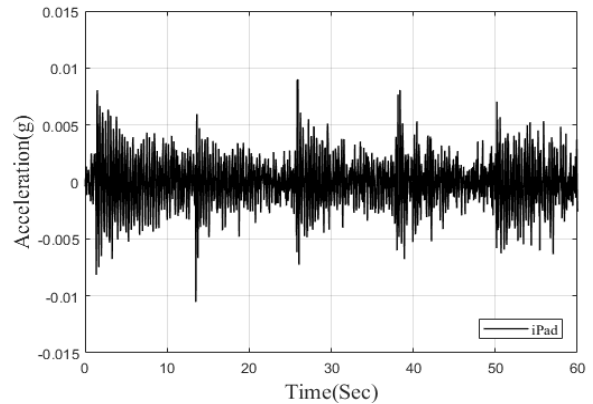
3종류의 계측 기기 모두 샘플링은 32Hz, 계측 시간은 64초로 13개소 보도교에서 총 2,048개의 데이터를 수집하였다. 동시 계측을 통하여 시간 영역에서 Time lag의 발생 여부, 진동수 영역에서 고유진동수의 이동을 확인하였다.

## 4. 실험 결과

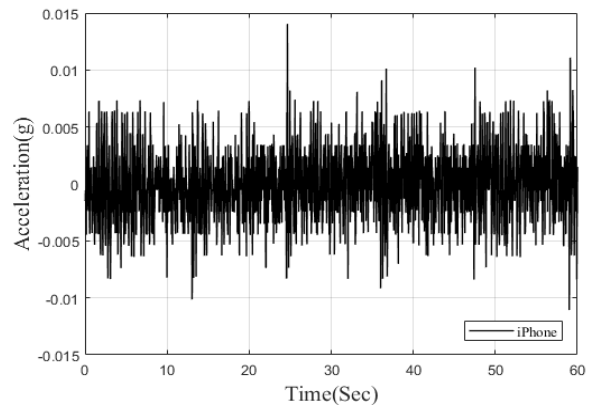
iPad, iPhone으로 계측된 13개소의 보도교 대다수에서 힐임펄스 가진으로부터 얻은 시계열 파형의 자유 진동 파형이 G-Link-200에 비해서 깨끗이 나오지 않았다. <Fig. 9> 시계열 파형 그래프 a, b (G-Link-200)의 경우 자유 진동 파형이 비교적 뚜렷이 구분이 되지만, c(iPhone)의 경우 자유 진동 파



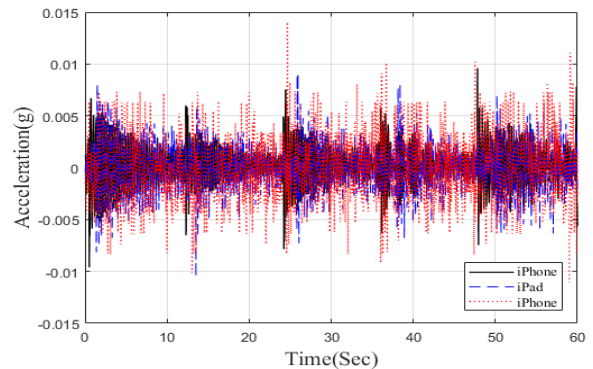
(a) G-Link-200



(b) iPad



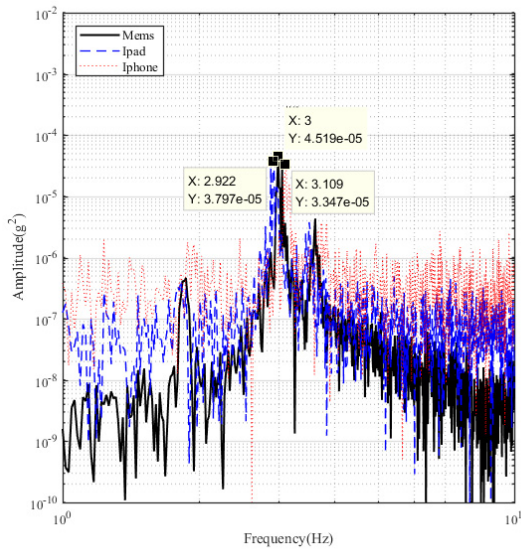
(c) iPhone



(d) All of sensors

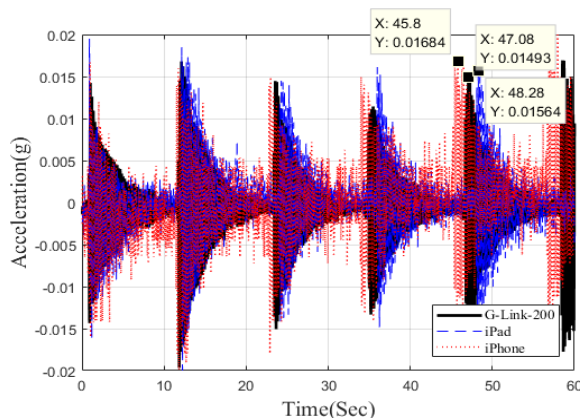
<Fig. 9> Time history (S-1)

형의 구분이 어려우며, 상시 진동과 같은 노이즈 진폭 양상을 보였다. 때문에 Time lag의 발생 여부를 확인하지 못하였다. 하지만 <Fig. 10> 파워 스펙트럼 그래프에서는 고유진동수를 확인할 수 있었다. G-link-200의 고유진동수는 3.00Hz, iPad는 2.92Hz, iPhone은 3.10Hz로 나타났다.



<Fig. 10> Natural frequency (S-1)

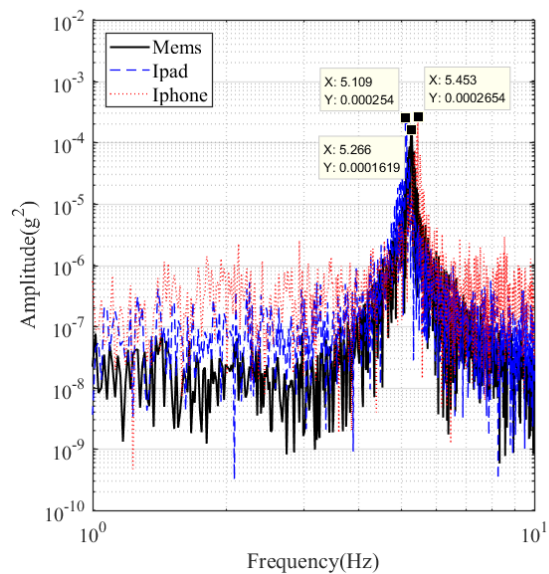
<Fig. 9>를 포함한 다른 보도교와 달리 S-7 보도교는 시계열 파형 그래프에서 자유 진동 파형이 뚜렷이 나타났기 때문에 Time lag를 명확하게 비교할 수 있었다. <Fig. 11> 그래프의 계측 시작점에서는 피크(Peak)점이 동일하게 시작되지만, 5번째 자유 진동 파형의 최대 가속도 피크에서 iPhone은 45.80초, G-Link-200은 47.08초, iPad는 48.28초로 Time lag가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 시간이 흐르면서 오차가 점차 더 커지는 것을 확인하였으며, 시간 영역에서 iPad는 시간 지연이 나타났고 반대로 iPhone은 샘플 시간 간격이 단축되었다.



<Fig. 11> Time history (S-7)

<Fig. 12>는 S-7 보도교의 고유진동수를 나타낸 그래프이다. iPhone이 5.11Hz, G-Link-200이 5.27Hz, iPad가 5.45Hz로 Time interval이 항상 일정한 G-Link-200 센서를 기준으로 iPhone 및 iPad의 고유진동수가 이동된 것을 확인할 수 있었다. 이는 <Fig. 11> 시간 영역(시계열 파형) 그래프에서 확인한 Time lag로 인해 발생하는 것으로 사료된다. 이처럼 랜덤으로 발생하는 시간 지연 및 단축은 고유진동수 이동을 발생시켜 정확한 계측 및 분석이 필요할 때에는 사용이 부적절할 수 있음을 확인하였다. 나머지 13개소 보도교 계측 결과 분석을 통하여 iPad와 iPhone은 전체적으로 랜덤 시간 이동이 발생하는 것으로 나타났고, 이에 따라 고유진동수 이동이 발생한 것을 확인하였다.

13개소 보도교 전체의 계측 결과를 <Table 4>에 나타내었다. 오차는 1.58~3.83% 범위에 있었으며 기기별 오차의 평균은 iPad가 2.74%, iPhone이 3.23%로 iPad의 고유진동수의 오차가 iPhone의 오차보다 약 0.49% 더 작게 나타났다.



<Fig. 12> Natural frequency (S-7)

〈Table 4〉 Result of measurement

No.	Span (m)	Sensors	Natural frequency (Hz)	Difference (%)
S-1	35.3	G-Link-200	3.00	Reference
		iPad	2.92	2.67
		iPhone	3.11	3.67
S-2	40.4	G-Link-200	3.52	Reference
		iPad	3.42	2.84
		iPhone	3.64	3.41
S-3	32.4	G-Link-200	3.50	Reference
		iPad	3.41	2.57
		iPhone	3.63	3.71
S-4	17.4	G-Link-200	7.16	Reference
		iPad	6.92	3.35
		iPhone	7.41	3.49
S-5	22.2	G-Link-200	4.47	Reference
		iPad	4.34	2.91
		iPhone	4.61	3.13
S-6	19.4	G-Link-200	7.08	Reference
		iPad	6.89	2.68
		iPhone	7.33	3.53
S-7	22.8	G-Link-200	5.27	Reference
		iPad	5.11	3.04
		iPhone	5.45	3.04
S-8	23.8	G-Link-200	6.33	Reference
		iPad	6.23	1.58
		iPhone	6.45	1.89
S-9	32.0	G-Link-200	3.63	Reference
		iPad	3.50	3.58
		iPhone	3.70	1.93
S-10	46.8	G-Link-200	1.77	Reference
		iPad	1.72	2.82
		iPhone	1.83	3.39
S-11	20.5	G-Link-200	6.52	Reference
		iPad	6.38	2.15
		iPhone	6.77	3.83
S-12	22.8	G-Link-200	5.06	Reference
		iPad	4.92	2.77
		iPhone	5.23	3.36
S-13	37.7	G-Link-200	2.22	Reference
		iPad	2.16	2.70
		iPhone	2.30	3.60

## 5. 결론

본 논문에서는 선행 연구에 사용된 휴대폰 MEMS 센서의 계측 정확도를 알아보기 위하여 13개소 보도교에서 무선 MEMS 센서 3종(G-Link-200, iPad,

iPhone)을 이용하여 재계측을 실시하였으며, 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시간 영역에서 분석한 결과, Time interval이 항상 일정한 G-Link-200 센서에 비해 iPad와 iPhone 센서는 랜덤으로 Time interval의 지연과 단축이 발생하였고 전체 계측 시간 또한 일정하지 않게 나타났다. 다만 항상 일정했던 것은 Time interval 간격이 iPad는 항상 지연되었고, iPhone은 항상 단축되었다.

2) 13개소 전체의 고유진동수 오차를 분석한 결과, 고유진동수 영역에서 G-Link-200의 고유진동수를 기준으로 iPad의 고유 주기가 더 느리게 나타났으며 평균 2.74%의 오차를 나타내었다. 반면 iPhone의 경우 고유 주기가 더 빨랐으며 평균 3.23%의 오차를 나타내었다. 특정 보도교에서 고유진동수의 오차가 특별히 크거나 작게 나타난 것이 아니라 랜덤으로 발생하였고, 2개의 Mobile phone을 비교하였을 때 iPad의 고유진동수 오차가 iPhone의 오차보다 약 0.49% 더 작게 나타났다.

3) Mobile phone 진동 계측 장비는 구조물 진동 계측 중에 실시간으로 진폭 및 고유치를 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있고, 케이블에 대한 간섭이 없기 때문에 유연한 계측 컨디션을 만들 수 있다. 또한 가속도 센서 외 많은 장비의 설치 및 이동에 대한 부담이 적어 효율적이다. 하지만 시간 영역에서 발생한 시간 지연과 단축으로 인하여 고유진동수 이동이 발생하였다. 이는 구조물의 정확한 동적 특성을 파악하는데 지장을 줄 수 있는 요소이므로 보다 정확한 계측 및 분석을 필요할 때에는 사용이 적절하지 않다고 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. Sabato, A. (2015). Pedestrian bridge vibration monitoring using a wireless MEMS accelerometer board. Proceedings of the 2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, Italy
  2. Do, K. Y., Yoon, S. W., & Kim, D. H., "Vibration Measurement of the Foot-Bridges Using Mobile-Phone", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.1, pp.61~68, 2014
  3. Oliveira, C. S., "Fundamental Frequencies of Vibration of Footbridges in Portugal: From in Situ Measurements to Numerical Modelling", Shock and Vibration, Vol.2014, pp.1~22, 2014
  4. Hong, H. J. (2010). A Study on Vibration Analysis Method for Human Vibration Effect Assessment in Footbridges (Doctoral dissertation). Chonnam National University, Republic of Korea.
  5. Seoul Metropolitan Government, "Facility Design, Construction, and Maintenance Manuals", 2001
  6. Lee, J. H., Cheon, D. J., & Yoon, S. W., "The Evaluation of Effectiveness on Horizontal Ambient Vibration Measurement of Tall Building Using Wireless MEMS Sensor", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.2, pp.51~58, 2018
  7. Shrestha, A., Dang, J., & Wang, X., "Development of a smart-device-based vibration-measurement system: Effectiveness examination and application cases to existing structure", Structural Control Health Monitoring, Vol.25, No.3, 2018
  8. Do, K. Y. (2014). Analysis of Natural Frequency through Vibration Measurement of Foot-bridges (Master's thesis). Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea.
  9. 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
  10. G-Link-200 Datasheet (8400-0102) RevA-10 [Apparatus and software]. (2017). Williston, USA: Microstrain.
  11. WSDA-USB\_Datasheet\_8400-0074 [Apparatus and software]. (2017). Williston, USA: Microstrain.
- Received : December 05, 2018
  - Revised : January 07, 2019
  - Accepted : January 11, 2019