

# 극한 환경에서 온도 변화에 따른 실외 현장에서의 무선 MEMS 센서 계측 유효성 평가

## Evaluation of Wireless MEMS Sensor Measurements at an Outdoor Field With Temperature Variation in Extreme Environment

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 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, in extreme environments, the sensor may be less sensitive to temperature changes and to the distance between the sensor and data logger. This may compromise on the performance of the sensor and instrumentation. Therefore, in this paper, free vibration experiments were conducted using wireless MEMS sensors at an actual site. Measurement was assessed in time and frequency domain by changing the temperature variation at(- 8°C, - 12°C and - 16°C) and the communication distance (20m, 40m, 60m, 80m).

*Keywords : Extreme environment, Measurement, Wireless, MEMS, SHM, Vibration, Temperature variation*

## 1. 서론

최근 국내·외 건설 분야에서 초고층 및 비정형 건축물의 시공이 늘고 있는 추세이다. 특히 철골조 고층 건물의 경우 중량이 경량화 되어 건축물에 지진 하중 및 풍하중과 같이 큰 횡력이 작용할 경우를 대비하여 건축물의 Structural health monitoring의 중요성이 증대되고 있다<sup>1)</sup>.

기존 상용 유선 가속도 센서를 이용하여 모니터링을 할 경우 계측 정확도가 높은 반면 계측 장소의 여건 및 데이터로거(Data logger)를 연결하기 위한 케이블의 간섭으로 인해 자유롭지 못하며<sup>2)</sup>, 건축 시

공 단계에서 방해 요소로 작용하기 때문에 주요 구조물에만 실시되고 있는 실정이다<sup>3)</sup>.

현재 무선 MEMS 센서를 이용하여 건축 구조물 동특성 식별<sup>1),3),4)</sup> 및 통신 거리에 따른 계측의 유효성<sup>5)</sup> 그리고 환경 변수에 대한 영향 등에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 그 중 온도 챔버를 이용한 온도 변화에 따른 유선 MEMS 가속도계 성능 변화에 대한 실험 결과에서 센서의 감도가 적게 감소하는 경향을 띄며 온도 변화에 따른 유선 MEMS 가속도계 거동이 안정적인 것으로 평가되었다<sup>6)</sup>.

Lee, Cheon & Yoon(2017)은 상온(15~25°C)에서 무선 MEMS 센서(이하 G-Link-200)를 이용하여 통신 거리(20m, 40m, 60m, 80m)에 따른 실외 계측 유효성 평가를 실시하였다<sup>5)</sup>. Out door에서 센서와 데이터로거의 최대 통신 거리는 80m였으며, 데이터 손실 없이 데이터 수집이 가능하였다.

온도 변화에 따른 MEMS 가속도계 성능 변화를 계측하기 위한 실험<sup>6)</sup>이 선행 연구에서 실시되었다. 온도 챔버를 이용하여 챔버 내 온도를 상온(25°C)에서 영하 55°C로 바꿔 70°C 기온 변화에 대해 센서의 감도를 측정하였다. 그 결과, 극한 온도 변화에

\* 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

서 2.4%의 감도 변화를 측정하였고, 이는 건축물의 상시 진동 계측 및 건정성 평가에 큰 영향을 주지 않아 안정적인 거동을 보여주는 것으로 평가되었다.

그러나 극한 환경에서 온도 챔버가 아닌 실외에서의 MEMS 센서 계측 유효성 평가는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 자유 진동 실험을 통해 Out door에서 영하 8°C, 12°C, 16°C 3가지 온도 변화와 통신 거리(20m, 40m, 60m, 80m) 증가에 따른 무선 MEMS 센서를 이용한 계측 유효성을 시간 및 진동수 영역에서 평가하였다.

## 2. 무선 MEMS 시스템의 통신

무선 MEMS 센서는 MEMS 가속도계, 무선 데이터 송신기, 무선 데이터 수신기 3부분으로 구성되어 있다<sup>3)</sup>.

무선 신호의 통신 거리는 무선 출력, 수신 감도, 안테나 이득 값, 무선 케이블 및 각종 액세서리에 의한 손실, 대기 중 손실 그리고 전송 경로 중간에 위치한 장애물 등에 의해 결정된다. 실외 환경에서 최상의 무선 링크를 구축하기 위해서는 무선 안테나 사이에 가시권이 확보되어야 하고, 장애물에 의한 굴절로 인한 신호의 위상인 Fresnel zone 영역이 20% 이하로 영향을 받아야 한다.

건물이나 나무와 같은 장애물에 의해 신호가 감쇠되어도 높은 이득의 지향성 안테나를 사용하면 어느 정도 신호 보상이 가능하다. 일반적으로 Fresnel zone이 20% 이상 차단될 경우 데이터 전송 속도가 낮아지거나 데이터가 유실될 수 있다<sup>5)7)</sup>.

### 2.1 무선 MEMS 가속도계<sup>5)</sup>

본 논문에 사용된 무선 MEMS 가속도계는 Microstrain에서 개발한 G-Link200 가속도계이다. 센서의 크기는 46.6×43×44mm로 3축 가속도계이며 ±2~8g의 측정 범위를 가진다. 센서의 작동 온도 제한은 영하 40°C에서 영상 85°C이다. 상세 제원은 <Table 1>, 외관은 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> G-Link 200 node<sup>8)</sup>

<Table 1> Specifications of accelerometer<sup>5)</sup>

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

### 2.2 무선 데이터 수신기<sup>5)</sup>

무선 데이터 수신기는 Microstrain에서 개발한 WSDA-Base-104-LXRS를 사용하였다. 2.4GHz의 주파수를 가지고, 활성 채널수 및 샘플링 설정수에 따라 RF채널마다 최대 2,000개의 노드 설정이 가능하다. 수신기의 크기는 88×70×20mm로 양방향 RF 범위의 0.07~2km까지 통신이 가능하다<Fig. 2>. 이는 송신 전력 설정에 따라 달라지며, 전력당 최대 통신 거리는 <Table 2>에 나타났다.

<Table 2> Maximum range of data logger<sup>5)</sup>

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

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



<Fig. 2> WSDA-Base-104-LXRS<sup>9)</sup>

### 3. 진동 계측 방법

#### 3.1 실험 개요

온도 변화에 따른 G-Link-200 센서의 진동 계측 유효성을 평가하기 위해 Out door에서 2018년 1월 12일 최저 온도가 영하 16°C일 때 실험을 실시하였다. 영하 8°C, 12°C, 16°C일 때 센서와 데이터로거의 거리를 20m 간격으로 20m, 40m, 60m, 80m 계측하였다. 온도와 거리별 계측 개요는 <Table 3>에 나타내었다. 거리를 최대 80m까지 설정해 둔 이유는 선행 연구의 상온에서 계측 가능했던 최대 거리가 80m이기 때문이다.

<Table 3> Measurement plan

Temperature(°C)	Distance(m)			
-8	20	40	60	80
-12	20	40	60	80
-16	20	40	60	80

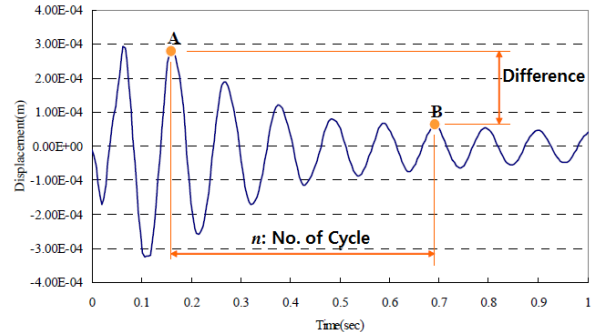
#### 3.2 실험 방법

진동 계측 방법으로는 얇은 나무판에 <Fig. 3>과 같이 팬을 떨어뜨리는 가진을 실시하였다.



<Fig. 3> Experimental view<sup>5)</sup>

나무판에 가진 위치를 표시하였고, 같은 높이에서 떨어뜨렸다. 샘플링은 64Hz로 설정하였으며 6초간 계측하였다. 나무판의 제원은 610×100×2mm이며, <Fig. 4>와 같이 각 계측마다 하나의 자유 진동 파형을 얻어 시계열 파형과 파워스펙트럼에서 비교 분석하였다.



<Fig. 4> Logarithmic decrement<sup>10)</sup>

감쇠율은 <Fig. 4>와 같이 대수감소법을 사용하였다. 대수감소율은 감쇠 자유 진동하는 물체의 진폭이 감소하는 정도를 나타내는 값으로 식 (1)과 같이 n개의 주기가 지난 시점에서의 진폭 감소비를 자연대수를 취해 구한 것이다<sup>11)</sup>.

$$\xi = \frac{\ln(A/B)}{n\pi} \quad (1)$$

$\xi$  : 감쇠율(%)

A, B : 반주기마다의 반진폭

n : 주기

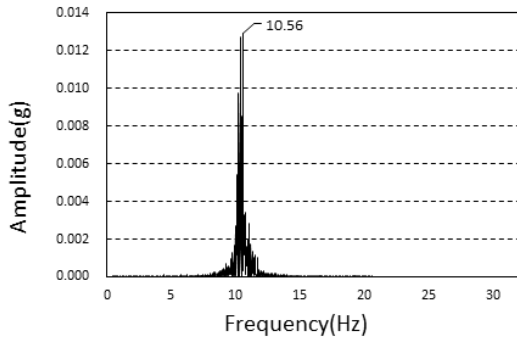
Decay curve의 시작점을 0.2g에 맞추었고, 13개의 Cycle로 감쇠율을 구해 나타냈다. 이는 감쇠율이 가속도 진폭이 증가함에 따라 같이 증가하는 진폭 의존성이 있기 때문이다<sup>12)</sup>.

### 4. 실험 결과

센서와 데이터로거의 거리 20m, 40m, 60m, 80m와 영하 8°C, 12°C, 16°C 3가지 온도 변화에 따른 실험을 실시하였다.

<Fig. 5>의 상온에서 실험한 결과(센서와 데이터로거의 거리 20m)를 Reference<sup>5)</sup>로 설정하여 고유진동수의 오차를 확인하였다. 영하 8°C의 고유진동수와 가장 작은 0.56%의 오차를 보이기 때문에 시간 이력, 고유진동수 그리고 감쇠율의 오차는 영하 8°C를 기준으로 분석하였다.

그 결과, 시간 이력에서 거리와 온도 변화에 따른 시간 지연(Time delay)의 발생과 고유진동수의 이동을 확인할 수 있었다. 감쇠율 또한 점차 증가하는 경향을 보여주었다.

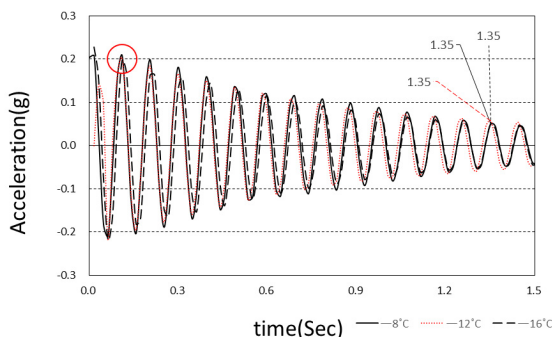


<Fig. 5> Power spectrum (20m, 25°C)<sup>5)</sup>

#### 4.1 20m

##### 4.1.1 Time history

센서와 데이터로거의 거리가 20m일 때 영하 8°C, 12°C, 16°C에서 진동 계측한 데이터로부터 얻은 시계열 파형은 <Fig. 6>에 나타났다.



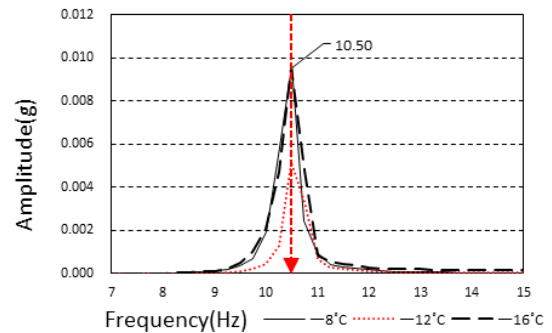
<Fig. 6> Time history

3가지 온도에서 계측된 시계열 파형 비교 그래프에서 Synchronization된 0.2g의 진폭부터 13번째 진폭의 시간이 3가지 온도 모두 1.35초로 동일하게 나

타나 시간 지연이 발생하지 않았다.

##### 4.1.2 Power spectrum

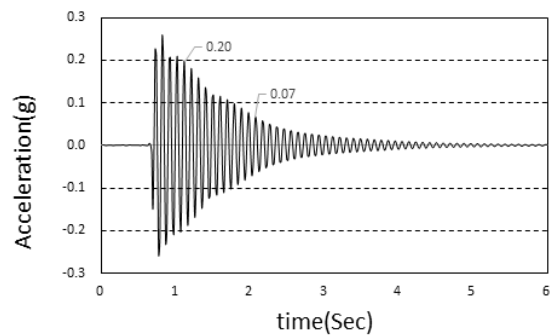
센서와 데이터로거의 거리가 20m일 때 3가지 온도에서 산정된 고유진동수는 모두 10.50Hz로 동일하게 나타났으며 <Fig. 7>과 같다.



<Fig. 7> Power spectrum (20m)

##### 4.1.3 Damping ratio

감쇠율은 0.2g의 진폭을 시작으로 10개의 Cycle로 산정하였으며 그래프의 예를 <Fig. 8>에 나타냈다.



<Fig. 8> Logarithmic decrement

센서와 데이터로거의 거리가 20m일 때 감쇠율 값은 <Table 4>에 나타났다. 영하 8°C를 기준으로 영하 12°C와 16°C일 때의 감쇠율의 오차를 나타냈다.

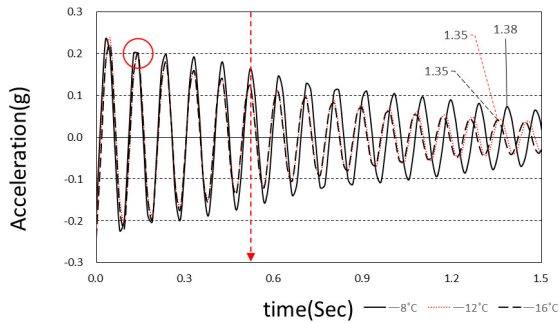
<Table 4> Damping ratio

Temperature(°C)	Damping ratio(%)	Difference(%)
-8	1.67	-
-12	1.67	0
-16	1.91	14.37

## 4.2 40m

### 4.2.1 Time history

센서와 데이터로거의 거리가 40m일 때의 시계열 파형을 <Fig. 9>에 나타냈다.

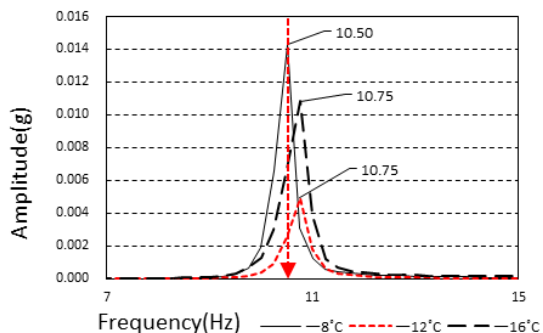


<Fig. 9> Time history

3가지 온도에서 계측된 시계열 파형 비교 그래프에서 시간 지연이 0.5초 부근부터 발생하기 시작하여 그래프에 표시된 13번째 진폭에서는 영하 8°C가 1.38초, 영하 12°C와 16°C가 1.35초의 시간 지연이 발생하였고 진폭의 크기 또한 온도가 감소함에 따라 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

### 4.2.2 Power spectrum

센서와 데이터로거의 거리가 40m일 때 3가지 온도에서 산정된 고유진동수는 영하 8°C일 때 10.50Hz, 영하 12°C와 16°C일 때는 10.75Hz로 나타났다<Fig. 10>.



<Fig. 10> Power spectrum

영하 8°C를 기준으로 영하 12°C와 16°C일 때 고유진동수의 오차를 <Table 5>에 나타냈다.

<Table 5> Natural frequency

Temperature(°C)	Natural frequency(Hz)	Difference(%)
-8	10.50	-
-12	10.75	2.38
-16	10.75	2.38

### 4.2.3 Damping ratio

<Fig. 9>와 같이 시간 지연도 존재하지만 진폭의 크기 또한 육안으로 확인이 가능할 정도의 차이를 보인다. 감쇠율의 차이를 <Table 6>에 나타냈다.

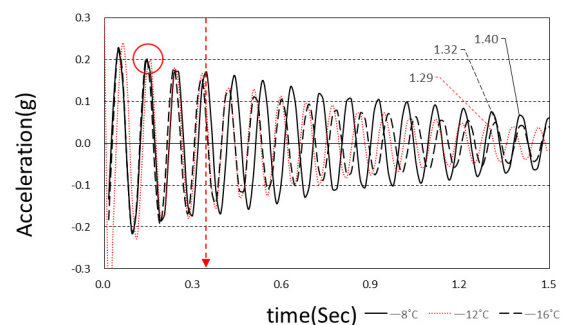
<Table 6> Damping ratio

Temperature(°C)	Damping ratio(%)	Difference(%)
-8	1.27	-
-12	1.92	51.18
-16	1.91	50.39

## 4.3 60m

### 4.3.1 Time history

센서와 데이터로거의 거리가 60m일 때의 시계열 파형을 <Fig. 11>에 나타냈다. 20m와 40m에 비교하였을 때 시간 지연과 진폭 크기의 변화가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다.



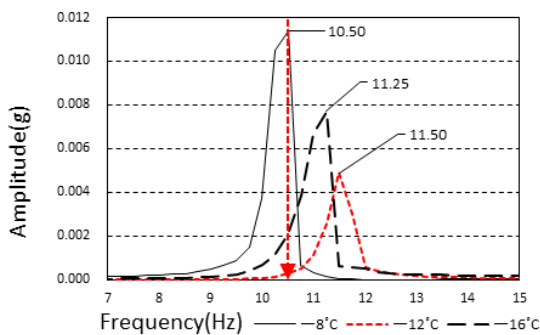
<Fig. 11> Time history

센서와 데이터로거의 거리가 40m일 때 약 0.5초 부근부터 시간 지연이 발생하였지만, <Fig. 11>의 그래프를 보면 0.35초 부근에서 발생되는 것을 볼 수 있다. 또한 13번째 진폭에서의 시간 지연은 영하 8°C가 1.40초, 영하 12°C가 1.29초, 영하 16°C가

1.32초로 나타났다. 온도가 변화할수록 시간 지연이 비례하지 않고 영하 12°C일 때가 가장 큰 차이를 보여주고 있다.

#### 4.3.2 Power spectrum

센서와 데이터로거의 거리가 60m일 때 3가지 온도에서 산정된 고유진동수는 <Fig. 12>와 같이 영하 8°C일 때 10.50Hz, 영하 12°C는 11.50Hz, 영하 16°C일 때는 11.25Hz로 나타났다.



<Fig. 12> Power spectrum

영하 8°C를 기준으로 영하 12°C와 16°C일 때의 고유진동수의 오차를 <Table 7>에 나타냈다. 고유진동수 또한 영하 12°C일 때가 가장 심한 차이를 나타내고 있다.

<Table 7> Natural frequency

Temperature(°C)	Natural frequency(Hz)	Difference(%)
-8	10.50	-
-12	11.50	9.52
-16	11.25	7.14

#### 4.3.3 Damping ratio

센서와 데이터로거의 거리가 60m일 때 감쇠율 값의 변화가 가장 크게 나타났다. 영하 8°C와 영하 16°C의 감쇠율 차이는 약 56.69%이며 <Table 8>과 같다. 20m의 14.37%에 비해 약 3.9배 높은 값을 보여준다.

<Table 8> Damping ratio

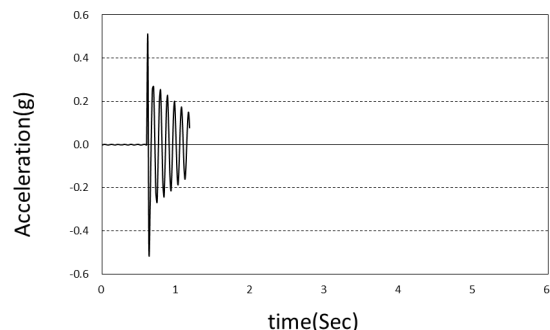
Temperature(°C)	Damping ratio(%)	Difference(%)
-8	1.27	-
-12	1.92	51.18
-16	1.99	56.69

#### 4.4 80m

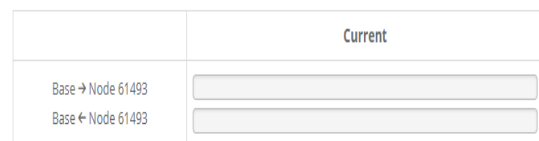
센서와 데이터로거의 거리가 80m일 때 G-Link-200 센서 시스템을 이용하여 진동 계측을 실시하였으나 계측이 원활하게 되지 않았다.

상온에서 80m까지 계측이 가능<sup>5)</sup>했던 반면 영하 8~16°C에서는 통신 연결이 어려웠으며, 5회 계측 동안 통신 연결을 시도하였지만 쉽게 연결되지 않았다.

5회 계측을 통하여 얻은 단 하나의 데이터는 <Fig. 13>에 나타내었으며, 그마저도 <Fig. 14>와 같이 약 1.3초 부근에서 통신이 끊겼다.



<Fig. 13> Time history (80m)



<Fig. 14> Communication state (Disconnect)



<Fig. 15> Communication state (Connect)

〈Table 9〉 Difference of measured results

Temperature Distance	Natural frequency(Hz)			Time delay(sec)			Damping ratio(%)		
	-8°C	-12°C	-16°C	-8°C	-12°C	-16°C	-8°C	-12°C	-16°C
20m	10.50	10.50	10.50	1.35	1.35	1.35	1.26	1.67	1.91
* Difference(%)		0	0		0	0		0	14.37
40m	10.50	10.75	10.75	1.38	1.35	1.35	0.84	1.92	1.91
* Difference(%)		2.38	2.38		2.17	2.17		51.18	50.39
60m	10.50	11.50	11.25	1.40	1.29	1.32	0.84	1.92	1.99
* Difference(%)		9.52	7.14		7.86	5.71		51.18	56.69
80m	N/A								

\* Calculated based on -8°C

## 5. 결론

극한 환경에서 무선 MEMS 센서(G-Link-200)를 이용하여 센서와 데이터로거의 통신 거리 및 극한 환경에서의 계측 유효성 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 영하 8°C까지는 상온과 같이 시간 지연(Time delay), 감쇠율, 고유진동수의 변화가 없는 것으로 확인되어 영하 8°C 그리고 거리 60m 이내 조건에서는 큰 오차 없이 계측 유효성이 있는 것으로 사료된다.

2) 온도가 영하 8°C에서 16°C로 떨어지고 통신 거리가 멀어짐에 따라 시간 이력에서 최대 7.86%의 시간 지연이 발생하였다. 감쇠율은 최대 56.69%의 차이가 발생하였고, 고유진동수도 온도의 감소에 따라 최대 9.52%의 오차가 발생하였다.

3) 상온의 실외 계측 결과, 최대 80m까지 계측이 가능하였지만, 영하 8~16°C의 극한 환경에서는 통신 연결이 되지 않아 상온의 결과에 미치지 못하는 최대 60m까지 계측이 가능하였다.

## 감사의 글

이 논문은 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Jung, Y. S. (2017). A study on Low-Noise Vibration Measurement System of the MEMS Sensor (Master's thesis). Seoul National University of Science and Technology
- 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
- Kim, H. J., Kim, B. Y., & Kim, W. J., "Evaluation of Wireless MEMS Sensor for System Identification of Building Structures", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.25, No.11, pp.3~10, 2009
- 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
- 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
6. Kim, J. H., Min, K. W., Lee, S. H., & Moon, D. H. (2015). Development of Monitoring Specification of Ambient and Earthquake Responses of Building Structures(Report No. 11-1750140-000091-14). Republic of Korea: National Disaster Management Research Institute
  7. RADIO LINK COVERAGE AND CALCULATION TOOLS. Retrieved from [http://www.witree.co.kr/banner\\_02/1550](http://www.witree.co.kr/banner_02/1550)
  8. G-Link-200 Datasheet (8400-0102) RevA-10 [Apparatus and software]. (2017). Williston, USA: Microstrain.
  9. WSDA-USB\_Datasheet\_8400-0074 [Apparatus and software]. (2017). Williston, USA: Microstrain
  10. Ryu, J. H., Ju, Y. K., & Yoon, S. W., "Dynamic Characteristic of Composite Beam using the Sandwich Plate System", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.4, pp.65~72, 2014
  11. Yoon, S. W., "Damping Ratio of Light Gauge Steel-Framed Floors", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, pp.17~26, 2000
  12. Yoon, S. W. (2003). Amplitude dependent Damping Ratio and Natural Frequency of Tall Building under the Strong Wind. Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea, pp.301~304
- Received : June 22, 2018
  - Revised : July 30, 2018
  - Accepted : August 14, 2018