

## 휴대폰 어플리케이션을 통한 타워전망대 동적특성 분석

### Analysis on Dynamic Characteristics of an Observatory Tower by Using Mobile-phone Application

문 상 현\*

Moon, Sang-Hyoun

윤 성 원\*\*

Yoon, Sung-Won

#### Abstract

It is very important to calculate natural frequency of the observatory tower correctly because it is keenly affected by wind response vibration due to its large slenderness ratio, weight and small damping ratio. Additionally, suggestion equation of natural frequency being used in the design phase has considerable difference between actual measured value thereby making it inappropriate to be used in the serviceability design of the observatory tower. Therefore, this paper conducted an ambient vibration measuring on 10 observatory towers through mobile-phone application thereby calculating the natural frequency and comparing the result with the domestic and foreign standards and that of the eigen-value analysis. This paper suggested approximate equation of the natural frequency of the observatory tower;  $T=0.0266H$ . The square of the correlation coefficient is 0.940, which is high.

*Keywords : Tower, Mobile-phone, Vibration measurement, Ambient vibration, Natural frequency*

#### 1. 서론

국내의 급속한 경제적 성장에 따른 국민들의 시간적인 여유는 여가활동 인구를 증가시켰으며, 문화시설과 여가 시설의 수요를 발생시키고 있다. 최근 이러한 수요에 따른 공급으로 타워전망대의 건설이 증가하고 있다. 타워전망대는 전국 각 지역의 도심과 자연미관 지역 등에 위치하며, 경관 조망에 대한 다양한 이용방향을 제시한다. 또 한 지역의 특성을 대변하는 랜드마크적인 역할 뿐만 아니라 그 자체가 관광 상품화 되고 목적지화 되어 지역주민 및 관광객들에게 지역의 홍보와 문화여가 시설을 제공하는 등 그 중요성이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 철골조 타워전망대는 세장비가 크고 중량, 감쇠율의 감소로 인하여 풍하중에 의해 예민하게 진동한다. 특히 건

물의 최상층의 응답가속도가 일정 수준 이상을 초과하면 사용자가 불쾌감을 느끼는 사용성 문제가 발생한다. 설계단계에서의 사용성 검토는 해외기준이나 풍동실험을 이용하여 일정재현주기별 응답가속도를 산정하여 검토할 수 있으나 신뢰성 있는 응답가속도를 산정하기 위해서는 정확한 고유진동수의 예측이 매우 중요하다. 고유진동수는 설계단계에서 일반적으로 고유치해석을 통해서 산정할 수 있지만, 비구조체의 모델링 등의 어려움으로 실제 건물의 정확한 고유진동수를 예측하는데 어려움이 있다. 해외의 연구결과에 의하면 계층치에 의한 고유진동수가 해석치보다 평균적으로 20% 전후로 큰 것으로 보고되고 있다<sup>2)</sup>.

이러한 응답가속도를 산정하기 위해서는 현재 고가의 진동계측 장비를 이용하여 계측하는 실정이다. 그러나 현재의 진동계측 장비는 고가이며 설치 시간 또한 오래 걸리며 전문지식을 갖춘 전문가를 필요로 한다. 이러한 기존의 고가의 진동계측장비를 대체하여 이 논문에서는 저가의 비용과 짧은 준비기간으로 계측을 수행할 수 있는 휴대폰 어플리케이션의 진동계측 시스템을 활용하여 상시진동 계측

\* 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

을 실시하였다.

국내외에서의 상시진동 등의 계측을 통한 고유진동수에 대한 연구는 윤성원(2013)<sup>2)</sup>, 구혜진(2015)<sup>3)</sup>, Ellis(1998)<sup>4)</sup>, Suda(1995)<sup>5)</sup>, Lago-marsino(1998)<sup>6)</sup> 등에 의하여 광범위 하게 수행되었다. 그러나 이 연구는 기존 진동계측기를 통하여 고유진동수에 특성을 분석하였다. 휴대폰 애플리케이션을 활용한 연구는 도기영(2014)<sup>7)</sup>의 연구가 있으나, 보도교를 대상으로 경간에 따른 고유진동수의 관계를 분석했다. 건물을 대상으로 한 연구는 윤성원, 문상현(2015)<sup>8)</sup>의 휴대폰에 의한 고층건물의 진동계측을 통해 기존진동계측 장비와 고유진동수를 비교하여 휴대폰 애플리케이션 진동계측시스템의 적용성에 대하여 검토한 연구가 있다. 또한 초고층 건물을 대상으로한 연구는 윤성원, 정영석(2015)<sup>9)</sup>의 국내외 초고층건물을 휴대폰에 애플리케이션을 통해 계측 후 기존 제안식과 비교하여 새로운 제안식을 제안한 연구가 있다. 그러나 아직 휴대폰 애플리케이션을 이용하여 타워전망대 계측을 통한 진동특성 분석에 대해서는 휴대폰 진동계측기를 이용하여 상시진동계측을 실시한 사례는 아직 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 국내의 대표적인 타워전망대 건축물의 진동을 휴대폰 애플리케이션으로 계측하였다. 국내의 높이 22.2~236.7m의 타워전망대 10개소의 상시진동계측을 실시하였다. 타워전망대의 데이터를 대상으로 고유진동수를 산정하고 근사식을 제안하였으며, 국내외 기준 및 고유치해석 결과와 비교하였다.

## 2. 진동 계측

### 2.1 계측 타워전망대의 건축개요

계측대상은 국내 타워전망대 10개소로 각 지역을 대표하는 랜드마크 타워로 선정하였으며 서울 1개소, 경기 2개소, 강원 4개소, 경상 3개소로 총 10동이다.

<Table 1>은 계측 타워의 제원으로서, 계측된 10개소의 타워 층수, 높이, 구조 종별로 정리하였다. <Table 2>는 계측 타워의 외관을 나타내고 있다.

<Table 1> Measured buildings

Name	Height	Floor	Year of completion	Structural system
Seoul N Tower	236.7 m	8F	1975	SRC
E World 83 Tower	202m	83F	2013	RC
Yangsan Tower	160m	6F	2007	S
Yongdusan Tower	120m	10F	1999	RC
Alpensiar Tower	109m	4F	2009	SRC
Hanam Union Tower	105m	4F	2006	S
Guri Tower	100m	2F	1992	SRC
Sokcho Tower	74m	15F	1973	SRC
Mountaintop Tower	27.2m	3F	2008	SRC
Songjiho Tower	22.2m	4F	2001	RC

<Table 2> Exterior of the towers



## 2.2 계측장치

기존의 진동계측장비는 <Fig. 1>과 같이 서보 가속도계, 신호 측정기(Signal conditioner), FFT 분석기 등을 각각 갖추어야 하며, 데이터 처리과정은 서보가속도계의 센서→signal conditioner→FFT분석기→PC 등으로 시스템을 구성하는데 상당한 고가의 비용이 소요된다. 또한 많은 인력과 시간이 소요된다. 따라서 이 연구에서는 <Fig. 2>와 같이 센서, 신호 측정기, FFT 분석기가 일체화되어 있고 일반 인도 현장에서 전원 없이 간단하고 편리하고 쉽게 사용할 수 있는 장점을 갖춘 휴대폰의 진동 애플리케이션을 이용하여 진동계측(이하 휴대용 진동계측기)을 실시하였다<sup>9)</sup>.



(a) Servo accelerometer installation situation



(b) Signal conditioner and acquisition system installation situation

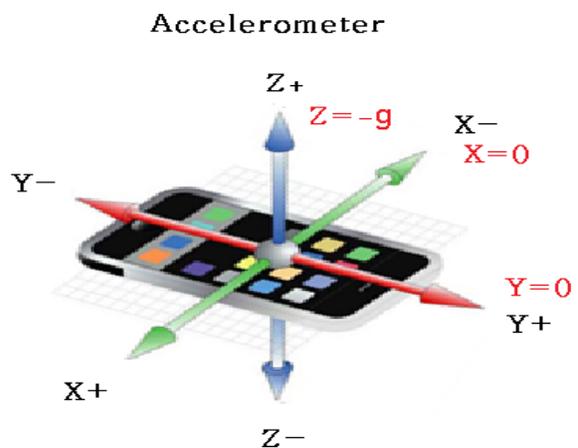
<Fig. 1> Expensive vibration devices



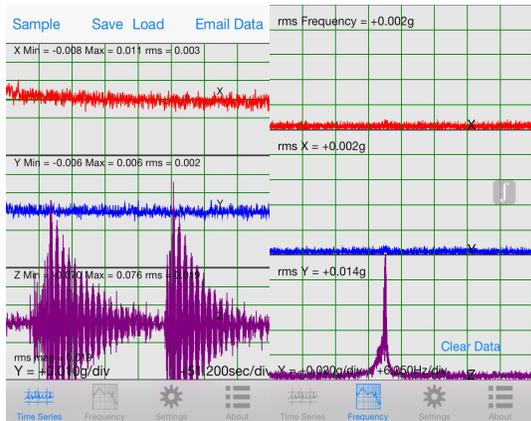
(a) Vibration measuring instrument. App (b) Vibration measuring instrument. Main view

<Fig. 2> I-Phone app of vibration instruments mobile phone (vibration app ver. 3.05)

휴대용 진동계측기는 <Fig. 3>과 같이 X, Y, Z의 3축 방향(2방향 수평가속도와 1방향 수직가속도)에 대한 실시간 계측을 할 수 있으며, 동적특성도 해석이 가능하다. 휴대용 진동계측기에는 MEMS의 가속도계가 내장되어 있으며, 3축 가속도계는 약 0.02g의 감도와 최대  $\pm 2G$ 까지 계측이 가능하다. 또한 Vibrations App은 0~100Hz 파형의 범위에서 Sampling rate를 설정하여 실시간으로 <Fig. 4>와 같이 3축에 대한 시계열 파형과 FFT 분석이 가능하다<sup>9)</sup>.



<Fig. 3> I-Phone 3 Axial direction



〈Fig. 4〉 Time series view and frequency view

휴대용 진동계측은 휴대용 진동계측기의 뒷면에 양면테이프를 부착하고 건축물의 계측데이터를 얻기 위하여 설치 가능한 건축물의 최상부 코어부분에 접한 바닥슬래브에 부착·고정하여 휴대용 진동계측기의 모니터가 위쪽을 향하도록 하여 실시한다. 계측 시 사용되는 휴대폰의 질량은 137g이며, 부착에 사용된 양면테이프의 경우, 부착면적이 645mm<sup>2</sup>, 부착강도가 100g/250mm<sup>2</sup>이므로 기존의 진동계측기와 같은 환경으로 계측이 가능하다. 슬래브와 계측이 시작되면 진동파형을 휴대용 진동계측기에서 관찰할 수 있다<sup>9)</sup>.

휴대용 진동계측기가 바닥 슬래브 상면에 부착되면 휴대용 진동계측기에 계측건축물의 고유진동수 파형이 3축 방향으로 각각 표기된다. Sampling rate를 10Hz로 했을 때 409초간 계측이 진행된다. 계측된 시계열파형과 주파수를 분석하기 위한 파워스펙트럼을 구하였다.

### 3. 진동계측데이터

진동계측은 상시진동계측을 통하여 얻은 시계열파형의 파워스펙트럼을 이용하여 고유진동수를 산정하였다.

#### 3.1 기존 고유주기 제안식

기존의 선행연구 및 해외기준에 명시되어 있는 고유주기 제안식 중 계측데이터로부터의 회귀분석을 통해 구한 경험식들을 선별하여 비교하고자 한

다. 고유주기 회귀식이 제안된 경우는 일본의 철골철근콘크리트구조와 철골구조의 사용성 기준<sup>10)</sup>인 식 (1), (2), Ellis<sup>4)</sup>의 철골철근콘크리트구조, 철골구조의 건물에 대한 회귀식인 식 (3), 윤성원<sup>2)</sup>의 철골구조와 철골철근콘크리트 구조 계측치에 대한 회귀식인 식 (4), 식 (5), 식 (6)이다.

$$T = 0.015H \quad (1)$$

$$T = 0.020H \quad (2)$$

$$T = 0.022H \quad (3)$$

$$T = 0.021H \quad (4)$$

$$T = 0.024H \quad (5)$$

$$T = 0.0155H \quad (6)$$

여기서 T : 고유주기(sec)

H : 건물높이(m)

〈Table 3〉에서 대상 건축물 회귀식, 구조에 반영된 건축물의 최대 높이, 계측 횟수 등을 명시하였다. 제안식의 대부분은 높은 수치의 상관관계를 나타내고 있다.

〈Table 3〉 The proposed formula and criteria of natural period

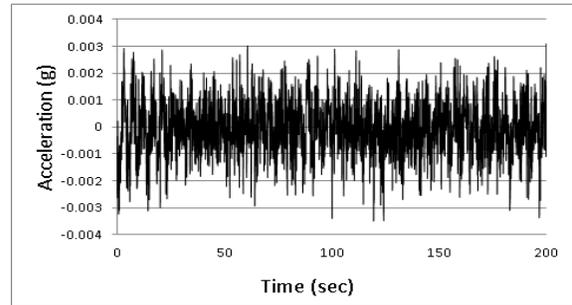
Author	Formula	Structural system	Highest height	Sample	Year	R <sup>2</sup>
AIJ 2000 <sup>10)</sup>	T=0.015H	RC/SRC	129.8	43	2000	-
	T=0.020H	S	167.4	25		-
Ellis <sup>4)</sup>	T=0.022H	S	200	163	1980	0.88
		SRC RC				
Yoon <sup>2)</sup>	T=0.021H	SRC	233.9	10	2003	0.93
	T=0.024H	S	243.3	11		0.86
	T=0.0155H	S/SRC	828	10	2015	0.965

### 3.2 고유진동수 분석

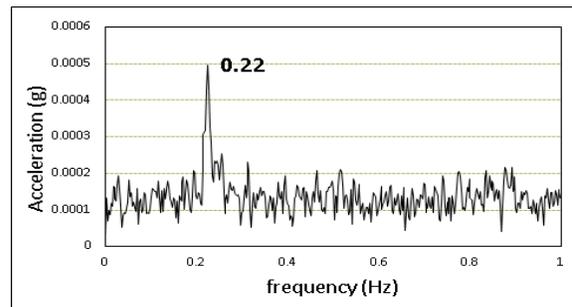
타워의 상시진동계측 이용하여 휴대용 진동계측을 실시하여 1차모드의 고유진동수를 산정하였으며, 다음 <Table 4>와 같이 종합하였다. 10개소의 진동 대역은 10Hz로 계측시간은 현장 계측 여건과 계측된 파형의 명료 등을 감안하여 409.6초로 설정하여, 앙상블당 샘플수는 4,096로 하였고, 앙상블 수는 12~15개로 설정하였다. 타워의 특성상 X, Y축 좌우 대칭인 관계로 고유진동수는 장변, 단변으로 구분하지 않고 하나로 통일하였다. <Fig. 5>는 휴대용 진동계측기를 통하여 얻은 데이터 중 Seoul N Tower와 Yongdusan Tower의 시계열파형과 파워스펙트럼의 예시를 보여주고 있다. 10개의 계측데이터 중에서 E World 83 Tower와 Hanam Union Tower의 계측데이터가 명확하지 않아 고유진동수를 얻을 수 없었다. <Fig. 6>은 Seoul N Tower와 Yongdusan Tower를 제외한 8개소의 타워전망대의 파워스펙트럼이다.

<Table 4> Measurement data of buildings

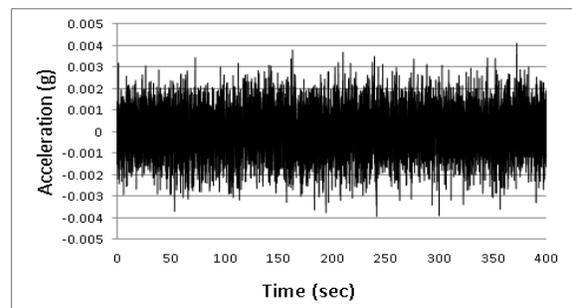
Name	Height (m)	Analysis of data			Natural frequency (Hz)
		Sample/Ensemble	Frequency band(Hz)	Number of ensemble	
Seoul N Tower	236.7	4096	10	12	0.22
E World 83 Tower	202	4096	10	12	N/A
Yangsan Tower	160	4096	10	15	0.26
Yongdusan Tower	120	4096	10	12	0.24
Alpensiar Tower	109	4096	10	15	0.48
Hanam Union Tower	105	4096	10	12	N/A
Guri Tower	100	4096	10	12	0.49
Sokcho Tower	74	4096	10	12	0.57
Mountaintop Tower	27.2	4096	10	12	0.77
Songjiho Tower	22.2	4096	10	12	1.24



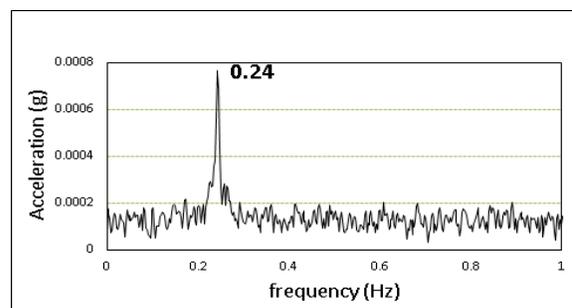
(a) Seoul N Tower of time series waveform



(b) Seoul N Tower of power spectrum

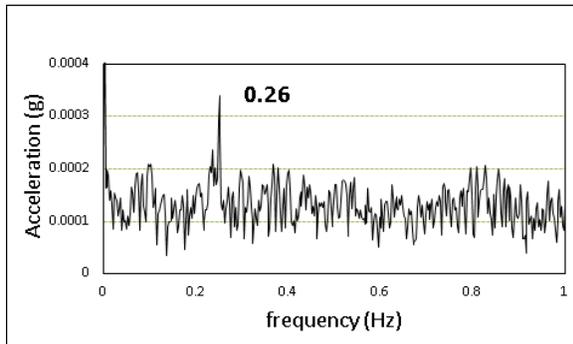


(c) Yongdusan Tower of time series waveform

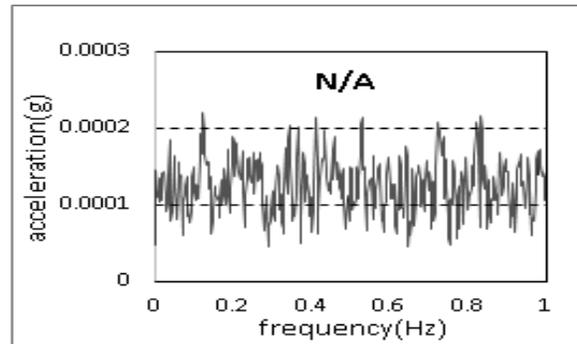


(d) Yongdusan Tower of power spectrum

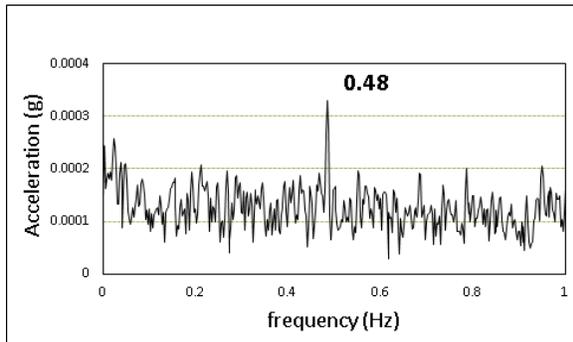
<Fig. 5> Ambient vibration measurement



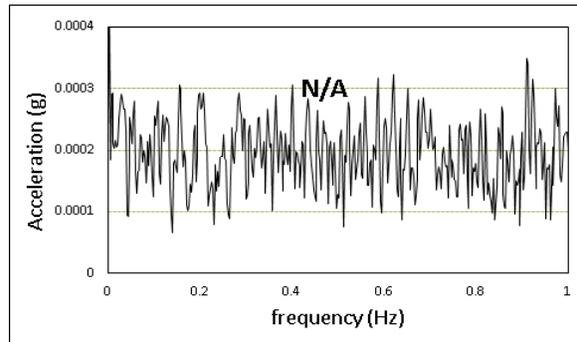
(a) Yangsan Tower of power spectrum



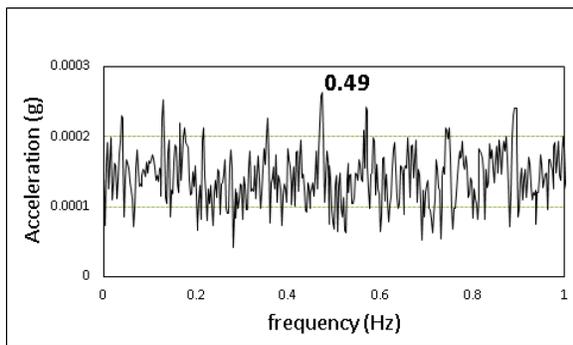
(b) E world 83 Tower of power spectrum



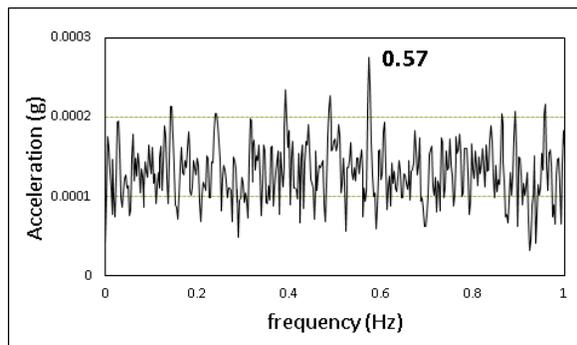
(c) Alpensiar of power spectrum



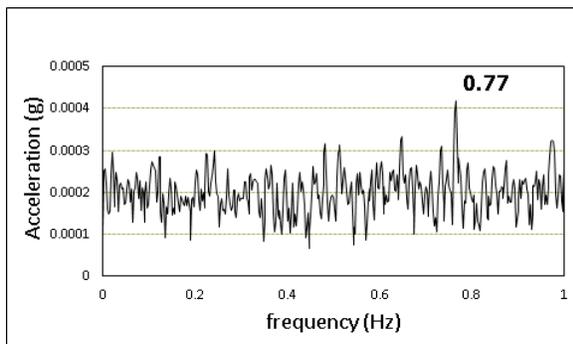
(d) Hanam Union Tower of power spectrum



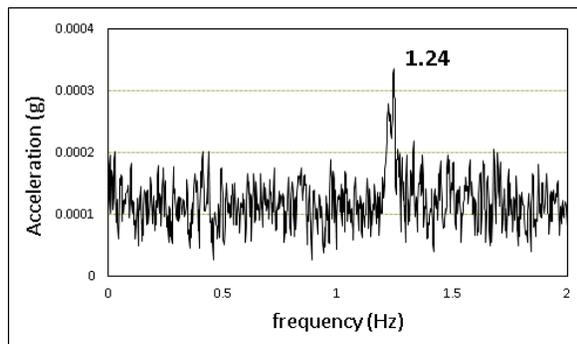
(e) Guri Tower of power spectrum



(f) Sokcho Tower of power spectrum



(g) Mountaintop of power spectrum



(h) Songjiho of power spectrum

〈Fig. 6〉 Power spectrum of Observatory-tower

### 3.3 고유진동수 계측치의 근사식

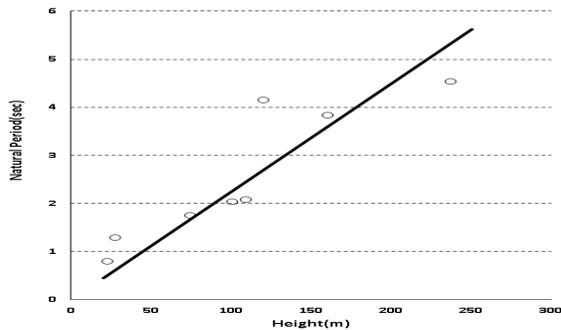
10개소의 전체 계측데이터에 근거하여 산정하고, 제안식의 간편화를 위하여 고유진동수식을 고유주기의 회귀식으로 제안하였다.

<Fig. 7>은 8개소의 대상 타워의 고유주기 계측치에서 얻은 회귀식이다. <Fig. 8>로부터 얻은 식 (7)의 상관계수의 자승인  $R^2$ 은 0.940로서 높은 상관성을 보이고 있다. 식 (7)의 근사식은 장변과 단변의 평균치를 사용하였다. <Fig. 8>로부터 고유주기와 건물높이와는 선형의 비례관계를 가지는 것을 확연히 알 수 있다.

$$T = 0.0226H \quad (7)$$

여기서 T : 고유주기(sec)

H : 건물높이(m)



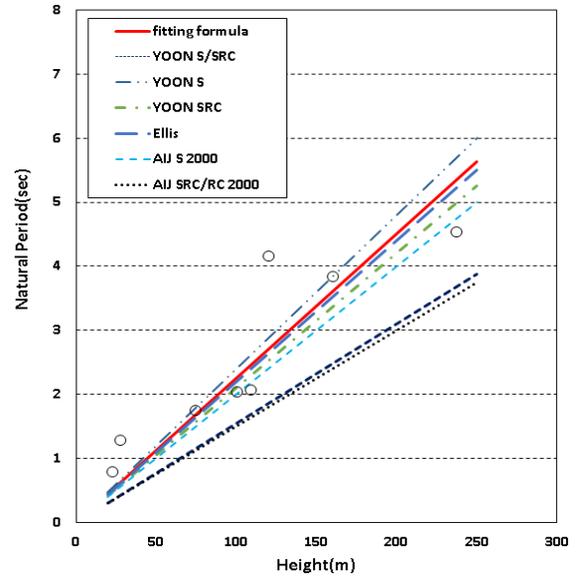
<Fig. 7> Regression equations of natural period

### 3.4 계측치와 국내외기준 및 해석치 비교

상시진동계측한 데이터를 바탕으로 기존의 국내외 고유주기 근사식과 비교하였다. 국내외 고유주기 제안식과 해외기준을 나타내었고, 이를 이 연구의 고유진동수 회귀식과 비교하였다.

<Fig. 8>는 10개소의 타워에 대한 계측치와 국내외 기준을 비교한 것이다. 철골철근콘크리트구조에 대한 사용성 제안식인 Ellis<sup>4)</sup> 연구의 계측데이터에 대한 회귀식인 식 (3)  $T=0.022H$ 와 윤성원<sup>2)</sup>의 강구조 건물 제안식 (5)  $T=0.024H$ 와 가장 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 나머지 국내외 기준식은 초고층건물의 고유주기 제안식이기 때문에 타워의 계

안식과는 차이가 큰 것을 알 수 있다.



<Fig. 8> Comparison of domestic and foreign natural period proposed formula

## 4. 결론

이 연구에서는 휴대용 진동계측기를 이용하여 국내 타워 중에서 서울과 경기 및 강원과 경상도 10개소를 대상으로 상시진동계측을 실시하였다. 22.2m ~ 236.7m 범위의 타워전망대에 대한 진동계측을 통하여 얻은 고유주기 근사식을 기존의 국내외 고유주기 근사식과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 10개소의 국내 타워의 상시진동계측에서 산정한 고유주기의 근사식은  $T= 0.0226H$ 와 같다. 회귀식의 상관계수의 자승인  $R^2$ 은 0.940로서 높은 상관성을 보이고 있다.

2. 10개소의 국내 타워의 계측치는 Ellis<sup>4)</sup>의 철골구조에 대한 사용성 기준식인  $T= 0.022H$ 에 가장 일치하는 것을 알 수 있다.

3. 휴대용 진동계측기를 이용한 상시진동 계측데이터에서 10개소의 타워전망대 중에 8개소의 계측데이터에서 명확한 고유진동 피크를 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구는 2016년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2013R1A1A2006737)과 국토교통부 도시건축사업(15AUOP-B100343-0)의 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

1. Son In-Sung, Shim Jae-Hyun, A Study on the Situation about Architectural Planning in Observatory Tower, Journal of KSSC, Vol.30, No.12, pp. 21-30, 2014
2. Yoon Sung-Won, Joo Young-Kyu, Natural Frequency of Tall building Through Ambient Vibration Measurement, Journal of KSSC, Vol.15, No.2, pp. 117-124, 2003
3. Gu Hye-Jin, Kim Hong-Jin, Natural period and Damping ratio of RC buildings in Korea, Gyeongbuk University master's thesis, 2014.12
4. Ellis, R, Full-scale Measurements of Dynamic Characteristics of Buildings in the UK, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 59, pp. 365-382, 1998
5. Suda Kenichi et al, Damping Properties of Buildings in Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, September, pp 383-392, 1995
6. Lagomarsino, S., Forecast model for damping and Vibration Periods of Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp 221-239, 1998
7. Do Ki-Young, Yoon Sung-Won , Analysis of Natural Frequency through Vibration Measurement of Foot-bridge, SNUST master's thesis, 2014.12
8. Yoon Sung-Won, Moon, Sang-Hyoun, Ambient Vibration Measurement of Buildings Horizontal Vibration Using a Mobile Phone Application, Journal of KSSC, Vol.15 No.3, pp. 77-83, 2015
9. Jung Young-Seok, Moon Sang-Hyun, Yoon sung-won, Ambient Vibration Measurement of High-Rise Building by Mobile Phone, Proceedings of KASS Vol. 11, No.1, pp.112-113, 2015
10. Architectural Institute of Japan (AIJ), Damping in buildings, Tokyo, 2000
11. Ellis, On Predictiong the response of Tall Buildings to Wind Excitation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 173-182, 1983
12. EUROCODE 1, Basis of Design and Actions on Structures, Part 2-4, wind Action, CEN/TC 250/SC 1, Steering Panel Draft, 1994
13. Jeong Jin-Hee, Kim Hong-Jin, Choi Sun-Young, Comparison of Design Code Damping Formulae and Measured Damping Ratios of Tall Buildings under Wind Loads, Journal of AIK, Vol29. No.4, pp. 11-18, 2015

■ Received : February 15, 2016

■ Revised : May 04, 2016

■ Accepted : May 04, 2016