

휴대용 계측기를 이용한 보도교 진동계측분석

Vibration Measurements of the Foot-Bridges Using Mobile-Phone

도기영* 윤성원** 김도현***
Do, Ki-Young Yoon, Sung-Won Kim, Do-Hyun

Abstract

The design of foot-bridge is often influenced by natural frequency. Consequently, vibration frequency becomes important. The empirical expressions used to quantify this parameter at the design phase have not been developed enough to give guideline to Korean foot-bridge. This paper is concerned with the vertical natural frequency of steel foot-bridges. It describes the vibration measurement methods employed for testing structures and presents reliable methods of assessing natural frequency from jumping vibration tests. Data from measurements on 16 structures in Seoul are given. Regression formulas of natural frequency for steel-framed foot-bridges are suggested. Finally, obtained formula are compared with empirical expressions of Seoul City's guideline.

Keywords : Mobile-phone, Vibration Measurement, Frequency, Foot-bridges

1. 서론

현대의 보도육교는 기본적인 구조적인 해결 외에 또 도시의 환경구조물로서 새로운 역할이 요구되고 있다. 보도교의 기능은 보행자를 자연 방해물 또는 도로를 넘어 통행하도록 두 지역을 연결하는 것이다. 그리고 구조적으로는 안전뿐만 아니라 합리적인 재료의 사용과 형태를 취함으로써 최선의 구조적 해결이 이루어져야 한다. 구조 디자이너의 관점에서 개념적인 디자인은 예술과 기술 양측을 이해하고 가설되어야 한다. 교량을 조형적으로 디자인 하되 구조적인 문제들에 대한 새로운 시공방법 또는 신기술의 적용을 유도하여야 한다.¹⁾

일반적으로 보도교는 경간이 40m 이상이 되는 경우 보도교는 진동에 예민하게 반응하며, 통행자에게 심리적 불안감을 발생시킬 수 있다. 보행자의 인체하중에 의한 보도교의 진동현상은 보행자의 통행에 불편을 줄 뿐 아니라 보행진동수와 보도교의 고유진동수가 동조되는 경우 보도교의 제한 범위를 초과하는 큰 진동을 유발하게 되어 사용성 뿐만 아니라 안전성 측면에도 큰 문제가 될 수 있다.²⁾

보도교는 다른 교량들에 비해 중요도, 기능성, 경제적인 측면에서 큰 관심을 불러일으키지 못하여 그에 관련된 설계기준이나 연구가 미비한 실정이다. 서울시 시설물·시공 및 유지관리 편람³⁾에서는 경간별 고유진동수를 제시하여 보도교 설계시 참고자료로 제시하고 있다. 또한, 보도교 설계시 보행할 때 수직 고유진동수는 1.5~2.3Hz 사이에 분포하므로 보행시 공진을 피하기 위하여 서울시에서 제시한 수직 고유진동수 범위를 피하여 설계할 것을 권장하고 있다. 그러나 서울시에 165개의 보도교가 있지만, 이 보도교의 보행시 공진 발생여부와 경간별 고유진동수의 상관관계에 대한 연구는 매우 미약한 실정이다. 따라서 이 논문에서는 서울시의 16개 보

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축학과 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, Professor.
Tel : 02-970-6587

E-mail : swyoon@seoultech.ac.kr

*** 정회원, 대우건설 방재연구팀 선임연구원, 공학박사
Daewoo E&C, Disaster Prevention Research Team

도교 진동계측을 통하여 공진발생여부와 경간별 고유진동수식을 제안하고자 한다.

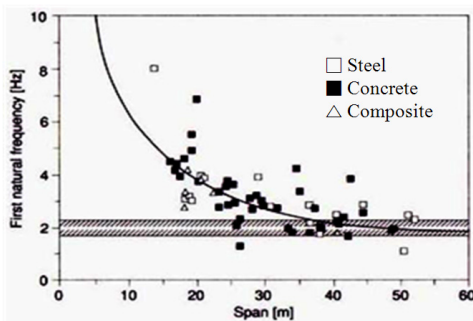
2. 선행 연구 분석

2.1 해외 연구

진동을 일으키는 사람의 움직임에는 걷기, 달리기, 뛰뛰기, 춤추기, 박수치기 등의 하중이 보도교에서 진동을 일으키는 주요 진동원이 된다.⁴⁾

1인 보행하중의 특성에 대하여 Andriacchi et al.(1977)⁵⁾은 계측 플레이트(Force Plate)를 이용하여 사람이 걸을 때 발생하는 보행하중을 계측하였다. 사람이 1걸음 진행할 때 발이 지면과 접촉하는 동안에 연직방향(Z축), 수평방향(X축), 보행진행방향(Y축)으로 발생하는 보행하중들을 분석하였다.⁴⁾

Bachmann et al.(1995)⁶⁾은 세계 각국에 가설된 67개의 보도교의 진동계측 데이터를 바탕으로 <Fig. 1>과 같이 재료형식별 지간장과 고유진동수와의 상관관계를 분석하였으며 <Table 1>과 같이 재료형식에 따른 고유진동수의 관계식을 제시하였다.



<Fig. 1> Footbridge fundamental frequency as a function of span⁶⁾

<Table 1> Relationship according to construction types⁶⁾

Construction types	Relationship	Quantity	Quantity hatched area
Concrete	$f = \frac{39}{L^{0.77}}$	45	12
Steel	$f = \frac{35}{L^{0.73}}$	16	3
Composite	$f = \frac{42}{L^{0.84}}$	6	1
Total	$f = \frac{33.6}{L^{0.73}}$	67	16

2.2 국내 연구

1990년 소비자보호원 안전조사보고서⁷⁾에서는 보도교의 불안전한 구조와 불충분한 관리로 인한 피해로부터 보행자의 안전을 도모하고자 서울 및 전국 5개 광역시의 보도교 총 367개소 중 66개소에 대해 면접조사, 실태조사, 자료조사 등을 실시하였다. 분석한 결과는 <Table 2>와 같이 보도교 중 서울 23개(35%)와 지방 8개(12%)가 진동에 대해 문제점이 있다고 조사되었다. 또한 보도교 관련 법규의 통합 및 법규내용의 보완이 필요하며 육교의 안전점검 및 보수활동의 강화가 필요하다고 지적하였다.

<Table 2> For vibration survey⁷⁾

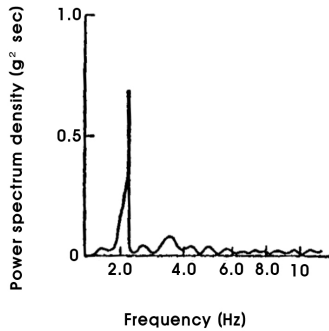
	Seoul	Other 5 major cities	Total
Vibration	23(35%)	8(12%)	31(47%)
No vibration	23(35%)	12(18%)	35(53%)
Total	46(70%)	20(30%)	66(100%)

조동협(2012)⁸⁾은 케이블지지 강보도교를 대상으로 무리보행하중을 해석적으로 구현하여 보도교의 동적특성을 살펴보고, 동조질량 감쇠장치(TMD) 설치 전·후의 진동성능 변화를 분석하였다. 성중수(2007)⁹⁾등은 국내·외 보도교 진동사용성 기준검토와 화성 동탄 보도교에 대한 TMD 적용성을 연구하였다. 유문식(2003)¹⁰⁾등은 민원이 제기된 보도교에 동조질량감쇠장치(TMD)를 설치하여 고유진동수, 상시진동 및 강제진동 측정을 실시하였다. 구조거동을 평가하고 이론적인 해석결과와 비교분석함으로써 보도교의 구조성능, 사용성, 진동원인을 분석하였다.

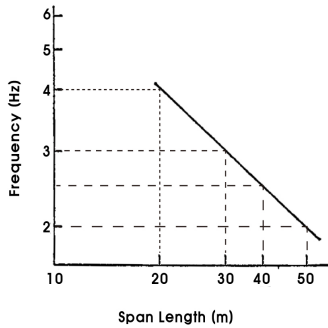
3. 서울시 보도교 진동기준

서울시는 2001년 11월 “시설물 설계·시공 및 유지관리 편람”³⁾에서 보도교의 적절한 설계를 위해 설치기준, 설계일반하중, 허용응력 및 허용지지력, 구조세목 등에 대하여 기술하고 있다. 서울시 편람에서 진동에 대한 설명은 다음과 같다. 최근에 횡단 보도교로서 규모가 큰 것이 계획되는 일이 많으나, 경간이 40m 정도를 넘는 판형교 형식에서는, 진동

에 대한 적절한 배려를 무시하면 보행자에 불안감, 불쾌감을 줄 위험성을 지적하고 있다. 보행자에 의한 동적하중의 특성은 <Fig. 2>와 같으며 보행자의 보행진동수를 평균적으로 약 2Hz로 분석하고 있다.



<Fig. 2> Pedestrian power spectrum³⁾



<Fig. 3> Frequency by span³⁾

보도교 주거더의 고유진동수가 2Hz에 근접하면 진동의 진폭이 커져 보행자에게 불쾌감을 발생시키므로 특별히 유의해야 한다. <Fig. 3>은 경간별 고유진동수의 상관관계를 나타낸 것이다.

4. 보도교 진동계측

4.1 진동계측장비

기존의 진동계측장비는 <Fig. 4>와 같이 서보 가속도계, 신호 측정기(Signal Conditioner), FFT 분석기 등을 각각 갖추어야 하며, 이 시스템을 구성하는데 상당한 고가의 비용이 소요된다. 또한 많은 인력과 시간이 소요된다. 따라서 이번 보도교 진동계측 연구에서는 <Fig. 5>와 같이 현장에서 전원 없이 간단하고 편리하게 계측할 수 있는 휴대폰의 진동 App을 이용하여 진동계측(이하 휴대용 진동계측기)을 실시하였다.

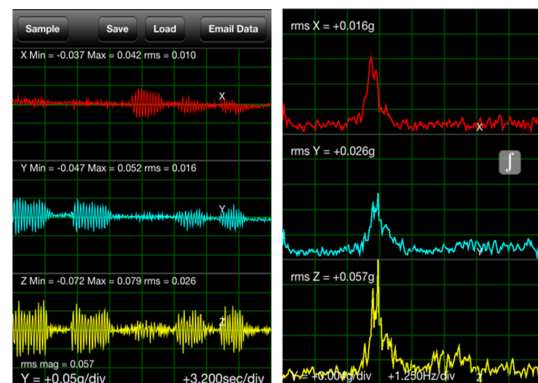


<Fig. 4> Expensive vibration devices



<Fig. 5> I-Phone app of vibration instruments mobile phone (vibration app ver. 2.01)

휴대용 진동계측기는 2방향(x, y축) 수평가속도와 1방향(z축) 수직가속도에 대한 계측을 실시간 할 수 있으며, 동적특성도 해석이 가능하다. 휴대용 진동계측기에는 MEMS의 가속도계가 내장되어 있으며, 3축 가속도계는 약 0.02g의 감도와 최대 ±2G까지 계측이 가능하다. 또한 Vibrations App은 0~100Hz 파형의 범위에서 Sampling Rate를 설정하여 실시간으로 <Fig. 6>과 같이 3축에 대한 시계열 파형과 FFT 분석이 가능하다.



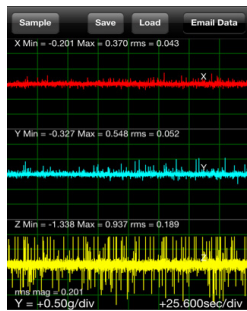
<Fig. 6> Time series view and Frequency view¹¹⁾

4.2 휴대용 진동계측기 적용성 검토

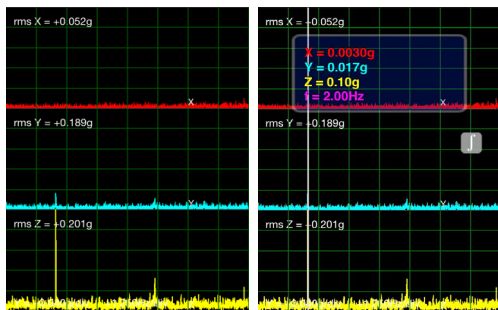
휴대용 진동계측기를 이용한 수직진동수의 정밀도를 검토하기 위하여 메트로놈(Seiko SQ100-77)의 신호음을 이용하였다. 메트로놈의 신호음을 2Hz로 설정하고, 이 신호음에 연동하여 휴대폰을 수직으로 10cm 정도 연속적으로 손으로 가진을 실시하였다.

<Table 3> Vibration measurement application review

Sampling rate (Hz)	Forcing frequency (Hz)	Sample length (sec)	1st(Hz)	2nd(Hz)	3rd(Hz)	Average
			freq. error	freq. error	freq. error	(Hz) error
20.0	2.0	51.2	2.01	2.01	1.99	2.00
			0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
		102.4	2.03	2.00	1.98	2.00
			1.50%	0.00%	1.00%	0.83%
		204.8	2.00	1.99	2.00	2.00
			0.00%	0.50%	0.00%	0.16%



(a) Time-series



(b) Power spectrum

(c) Frequency - 2Hz

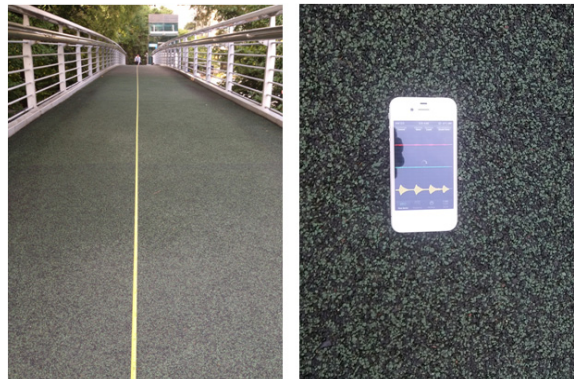
<Fig. 7> Mobile-phone calibration(3rd in 204.8)¹¹⁾

가진진동수를 2.00Hz로 가정하고 휴대용 진동계측기의 Sampling Rate를 20Hz로 설정한 후 계측시간을 51.2sec, 102.4sec, 204.8sec로 설정하여 3차례 실험하였다. 실험 결과의 값은 <Table 3>과 같으며, 각 시간에 따른 평균값은 모두 2.00Hz이다. 그러나 계측된 고유진동수를 가진진동수(2.00Hz)와의 오차를 계산하였고 그에 따른 평균값은 0.16~0.83%으로 나왔다. 정밀한 계측을 위하여 계측 시간을 204.8sec

로 설정하고 보도교 진동계측을 실시하였다. <Fig. 7>은 휴대용 진동계측기의 적용성검토를 실시한 결과의 예이다.

4.3 진동계측 방법

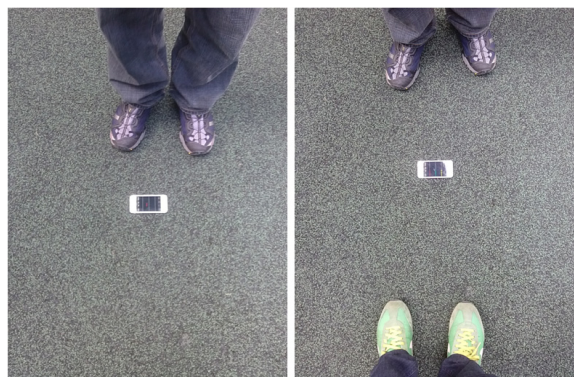
보도교의 진동계측을 위한 진동계측의 방법은 우선 <Fig. 8>의 (a)와 같이 보도교의 경간을 계측하고 보도교의 정중앙 바닥슬래브에 양면테이프를 이용하여 <Fig. 8>의 (b)와 같이 휴대폰의 모니터가 위쪽을 향하도록 하였다. 계측이 시작되면 진동과형을 휴대폰의 모니터에서 관찰할 수 있다. 이렇게 휴대폰이 교량 상면에 부착되면, <Fig. 9>의 (a), (b)와 같이 한명 또는 복수의 인원이 상하방향으로 10~20회 제자리 뛰기를 하였다. 이때 대부분의 보도교는 고유진동수가 1.5~7.1Hz에 해당되므로, 제자리 뛰기를 할 때 1.5Hz부터 서서히 가진진동수를 증가시키면서 보도교가 공진이 시작할 때까지 실시하였다.



(a) Measurement span

(b) Location

<Fig. 8> Measurement span and location



(a) 1 person

(b) 2 person

<Fig. 9> Method

<Table 4> Summary of the foot-bridges



(a) 1 person (b) 2 person

<Fig. 10> Method (metronome)

이와 같이 제자리 뛰기를 하면 보도교에 진동이 발생하게 되고, 휴대폰 진동계측기에 보도교의 고유진동파형이 3축 방향으로 각각 표시된다. 계측된 시계열파형을 주파수를 분석하기 위하여 파워스펙트럼을 구하였다. 이렇게 일반적으로 파워스펙트럼을 통해서도 충분히 고유진동수를 구할 수는 있지만, 경우에 따라서는 피크가 명확하지 않거나, 피크가 여럿 존재하는 경우에 더 정확한 고유진동수를 얻기 위해서는 좀 더 명확한 피크를 얻는 것이 필요하다. 이러한 경우에는 전자박자계를 이용하여 보도교의 진동파형을 다시 획득하였다. 이를 위하여 1차에 계측된 고유진동수에 맞춰, 전자박자계에서 발산되는 신호음에 맞춰 <Fig. 10>의 (a), (b)와 같이 1인~2인이 제자리 뛰기를 10~20회 실시하여 휴대폰 진동계측기에 보도교의 공진을 발생시켰다.

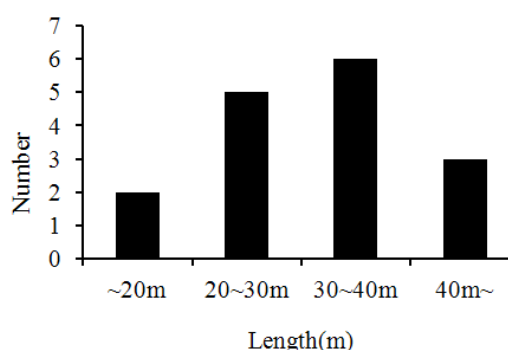
4.4 계측 보도교 개요

서울시에 위치한 16개소 보도교를 대상으로 진동계측을 하였다. <Table 4>는 진동계측을 한 보도교의 개요이며, 경간(Span)순으로 정리하였다.

계측 대상 보도교의 폭(Width)은 2.8~4m, 연장(Length)은 20~80m, 경간(Span)은 17.4~78m이다.

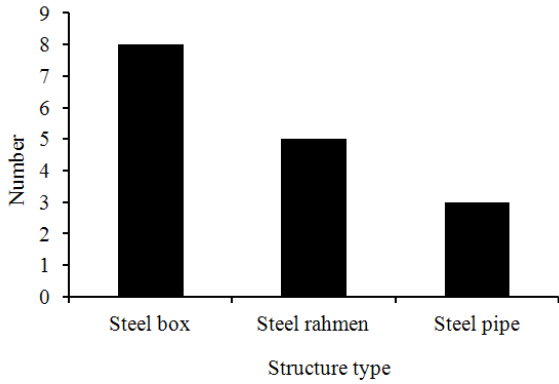
경간에 따른 보도교의 분포는 <Fig. 11>과 같으며 20m미만은 2개소, 20~30m 5개소, 30~40m 6개소, 40m이상은 3개소로 비교적 균등하게 분포하도록 보도교를 선정하고 계측하였다.

No.	Width (m)	Length (m)	Area (㎡)	Structure type	Span (m)
1	2.8	20.0	56.0	Steel beam (box)	17.4
2	4.0	27.5	110.0	Steel beam (box)	19.4
3	3.8	30.0	114.0	Steel rahmen	20.5
4	4.0	24.6	98.4	Steel beam (box)	22.2
5	3.0	20.4	61.2	Steel rahmen	22.8
6	3.5	29.8	104.3	Steel rahmen	22.8
7	4.0	26.0	104.0	Steel beam (box)	23.8
8	3.6	48.0	172.8	Steel beam (pipe)	32.0
9	4.0	28.0	112.0	Steel beam (box)	32.4
10	3.0	38.5	115.5	Steel beam (box)	35.3
11	3.9	33.9	132.2	Steel beam (box)	35.5
12	4.0	39.0	156.0	Steel beam (pipe)	37.7
13	4.0	44.0	176.0	Steel rahmen	38.6
14	5.0	70.2	351.0	Steel rahmen	40.4
15	3.2	50.0	160.0	Steel beam (box)	46.8
16	3.5	80.0	280.0	Steel beam (pipe)	78.0



<Fig. 11> Span by the number of foot-bridges

구조시스템은 Steel rahmen과 Steel beam으로 구분하였으며, Steel beam은 Box형식과 Pipe형식으로 구분하였다. 구조형식에 따른 16개소 보도교 분포는 <Fig. 12>와 같다. 제일 많은 구조시스템은 Steel beam의 Box형식으로 8개소이며, 가장 적은 구조시스템은 Steel beam의 Pipe형식으로 3개소이다.



〈Fig. 12〉 Structure type by the number of foot-bridges

5. 진동계측 데이터

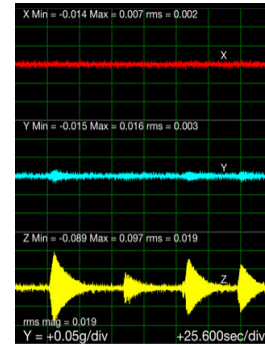
5.1 고유진동수 분석

진동계측 대상 보도교 16개에 대하여 자유진동실험을 실시하였으며, 각 육교마다 2차례 계측을 실시하였고 그에 따른 고유진동수의 평균값은 <Table 5>와 같다. <Fig. 13>은 No.10 보도교의 계측사례로서 자유진동실험을 실시한 결과 공진에 의한 시계열 파형과 파워스펙트럼을 나타내고 있다. <Fig. 13>에서 자유진동파형 통한 고유진동수의 피크도 확인할 수 있었다.

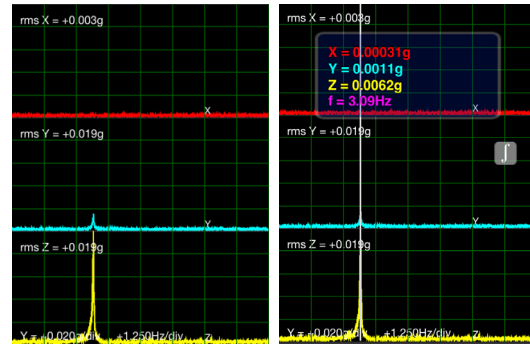
〈Table 5〉 Foot-bridges frequency

No.	Span(m)	Frequency(Hz)
1	17.4	7.02
2	19.4	5.77
3	20.5	6.47
4	22.2	4.54
5	22.8	5.11
6	22.8	4.57
7	23.8	6.89
8	32.0	3.67
9	32.4	3.56
10	35.3	3.09
11	35.5	3.45
12	37.7	2.12
13	38.6	3.43
14	40.4	3.38
15	46.8	1.76
16	78.0	2.02

16개 보도교를 계측한 결과 고유진동수가 가장 높은 보도교는 7.02Hz로 분석된 No.1의 보도교이며 고유진동수가 가장 낮은 보도교는 1.76Hz로 분석된 No.15의 보도교이다.



(a) Time-series



(b) Power spectrum

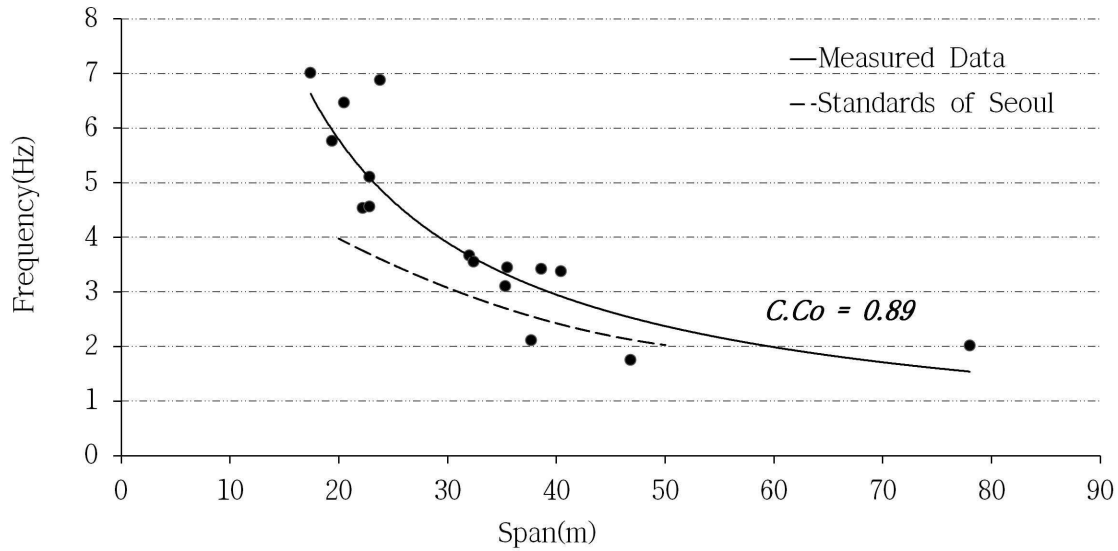
(c) Frequency - 3.09Hz

〈Fig. 13〉 An example of vibration tests (No.10)¹¹⁾

5.2 서울시 기준과 비교분석

서울시 시설물 설계·시공 및 유지관리 편람⁹⁾에서 제시하고 있는 보도교 관한 기준은 보행자에게 불편감을 주지 않도록 유해한 진동을 제거하고 공진을 적게 하도록 한 고유진동수의 범위는 다음과 같다. 수직 고유진동수는 2Hz 전후(1.5~2.3Hz)로 제시하고 있다.

<Fig. 14>는 이번 논문에서 계측한 보도교의 경간별 고유진동수와 서울시 시설물·시공 및 유지관리 편람³⁾의 경간별 보도교 설계기준과 비교분석한 결과이다. 또한, 계측한 보도교의 경간별 고유진동수의 상관관계에서 상관계수(Correlation coefficient)의 값은 0.89로서, 경간이 길어질수록 고유진동수는 작아진다는 것을 확인할 수 있다.



〈Fig. 14〉 Frequency distribution

경간별 고유진동수의 식 (1)에서는 고유진동수를 f (Hz)로 경간을 $L(m)$ 로 표현하였다.

$$f = \frac{107}{L} \quad (1)$$

<Fig. 14>에서 16개소 보도교의 경간별 고유진동수와 서울시 기준과 비교분석한 결과, No.12 보도교(2.12Hz)와 No.15 보도교(1.76Hz)를 제외한 14개소 보도교는 공진이 쉽게 발생되지 않게 적절한 설계가 되었다. 그러나 서울시 기준보다 고유진동수가 낮은 2개소 보도교의 경우에는 공진이 오랜 시간 발생하여 보행시 보행자에게 불안감을 줄 수 있다고 판단된다.

6. 결론

(1) 서울시에 위치한 16개의 보도교에 대하여 휴대용의 진동계측기를 이용한 1인~2인 자유진동실험을 실시하였고 자유진동파형을 통해 고유진동수를 산정할 수 있었다.

(2) 휴대용 진동계측기의 적용성검토를 위하여 메트로놈의 신호음에 맞춰 휴대폰을 수직으로 10cm정도 연속적으로 가진하였다.

(3) 보도교 16개소를 대상으로 자유진동실험을 실시한 결과 고유진동수가 가장 높은 보도교는 7.02Hz인 No.1의 보도교이며 고유진동수가 가장 낮은 보도교는 1.76인 No.15의 보도교이다.

(4) 경간이 길어질수록 고유진동수는 작아진다는 것을 확인할 수 있으며 경간 $L(m)$ 별 고유진동수 f (Hz)와의 관계식은 $f = \frac{107}{L}$ 로 나타낼 수 있다.

(5) 16개소 보도교에 관한 경간별 고유진동수를 서울시 기준과 비교한 결과 14개소 보도교는 적절하게 설계가 되었다. 그러나 나머지 2개소 보도교의 경우에는 고유진동수가 서울시 기준보다 낮아 보행시 보행자에게 불안감과 불쾌감을 줄 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Park, S. W., Lee, J. N.(2004), 'The Design Concept and World-wide Trends for the Structural Design of Footbridge', Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 4, No. 2, 107~115
2. Hong, H. J.(2010), 'A Study on Vibration Analysis Method for Human Vibration Effect Assessment in Footbridges', Ph.D. dissertation, Chonnam National University
3. Seoul(2001), 'Facility Design, Construction, and Maintenance Manuals'
4. Kim, M. A.(2006), 'Study on Dynamic Behaviors of Footbridges under Human Body Model-Induced Excitation', M.S dissertation, Yonsei University
5. Andriacchi, T. P., Ogle, J. A., Galante, J. O. (1977), 'Walking speed as a basis for normal and abnormal gait measurements', Journal of Biomechanics, Vol. 10, 261-268
6. Bachmann, H., Pretlove, A. J., and Rainer, H. (1995), 'Vibration problems in structures: practical guidelines', Birkhauser Verlag Publications, Basel.
7. Korea Consumer(1990), 'Safety Survey Report of footbridge'
8. Cho, D. H.(2010), 'Vibration Assessment of Footbridge using Tuned Mass Damper', M.S dissertation, Yonsei University
9. Sung, J. S., Lee, Y. H., Song, G. N., Park, J. G.(2007), 'The Standard Investigation of Vibration Serviceability for Footbridge and The Application of Tuned Mass Damper - Hwasung Dongtan Footbridge', Journal of Korean Society of Steel Construction(KSSC), Vol. 19, No. 1, 79~88
10. Yoo, M. S., Yoon, T. Y., Kurabayshi, H. (2003), 'Effective Vibration Control of Pedestrian Bridge Using Tuned Mass Damper', Journal of Korean Society of Steel Construction(KSSC), Vol. 15, No. 3, 24~31
11. Sung-Won Yoon, Ki-Young Do, Jae-Ho Ryu, and Young-Kyu Ju.(2013), 'Vibration Measurement of Steel Foot-Bridge using Mobile Phone', 2013 the 2nd ICMEMSCE

(접수일자 : 2013년 09월 24일)
(심사완료일자 : 2013년 10월 15일)
(게재확정일자 : 2013년 10월 21일)