



# 보도교의 구조시스템별 고유진동수 분석

도기영<sup>1</sup> · 윤성원<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연구원, 연세대학교, 친환경건축연구센터, <sup>2</sup>교수, 서울과학기술대학교, 건축학부

## Analysis of Natural Frequency According to Span of Foot-bridges

Do, Ki Young<sup>1</sup>, Yoon, Sung Won<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Center for Sustainable Building, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, Korea

<sup>2</sup>Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung, Nowon, Seoul, 139-743, Korea

**Abstract** - In Seoul, total 166 places of foot-bridges were constructed but a study on correlation between resonance occurrence status by gait vibration and natural frequency by each span and that between span based on structural system and natural frequency is very unsatisfactory in reality. Consequently in this study, time series wave form, power spectrum and natural frequency were analyzed based on resonance occurrence by targeting 65 places of foot-bridges being constructed in Seoul through convenient and simple portable vibration meter.

**Keywords** - Mobile-phone, Vibration measurement, Natural frequency, Foot-bridges

### 1. 서론

최근 보도교는 장경간화의 경향을 나타내며 주변 경관을 고려한 미관중심으로 가설되어, 구조적인 형태는 점차 세장하고 심미적인 경향을 나타내고 있다. 그러나 보도교는 일반적으로 폭이 좁은 구조이고 단위질량이 작아 보행자의 통행에 의해 진동이 쉽게 발생할 가능성이 있다. 특히 보행자의 보행이 보도교의 고유진동수와 근접할 경우 공진현상에 의해 큰 진폭이 발생하여 보행자에게 불안감을 조성시킬 수 있다<sup>[1],[2]</sup>.

일반적으로 보행자가 4차선 이상의 도로상에 설치되어 있는 보도교의 경간이 40m인 경우는 노후화로 인한 심한 진동과 처짐이 발생하여 민원이 늘어나고 있는 현실이다. 이러한

보도교의 진동문제를 해결하기 위하여 구조물의 강성을 증가시키거나 교각을 증설하는 방안 등이 있으나 근본적인 해결방법이 되지 못하고 있는 현실이다<sup>[3]</sup>.

보도교는 보행자의 이동이 주요 목적이므로 다른 교량에 비하여 중요도나 기능성, 경제적인 측면에서 일반적으로 큰 관심을 불러일으키지 못하여 그에 관련된 설계기준이나 연구가 미비한 실정이다. 서울시 시설물·시공 및 유지관리 편람<sup>[4]</sup>에서는 경간별 고유진동수를 제시하여 보도교 설계시 참고자료로 제시하고 있다. 또한 수직 보행진동수는 1.5~2.3Hz 사이에 분포하므로 보도교 설계시 보행 시 공진을 피하기 위하여 서울시에서 제시한 수직 고유진동수를 고려하여 설계하고 있다. 그러나 보도교의 구조시스템은 물론이고 구조재료에 따른 고유진동수 제안식은 마련되어 있지 않다.

이와같이 국내에서는 보도교의 구조재료와 구조시스템에 따른 경간별 고유진동수의 상관관계식에 대한 연구는 매우 미약하다. 해외의 경우에도 Bachmann의 보도교 고유진동수 제안식이 구조재료로는 분류되어 있지만, 구조시스템별로는 제안식을 마련하고 있지 않다. 따라서 장경간 보도교가 강구조인 면을 감안할 때 강구조 보도교의 구조시스템별 고유진동수 식의 제안이 절실한 실정이다.

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 11, 2014; revised May 12, 2014; approved on July 10, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-970-6587 Fax. +82-2-979-6587

E-mail. [swyoon@seoultech.ac.kr](mailto:swyoon@seoultech.ac.kr)

따라서 이 논문에서는 국내외 최초로 강구조 보도교의 구조시스템별 고유진동수 제안식을 마련하기 위하여 진동계측을 실시하였다. 일반적으로 보도교의 진동특성을 파악하기 위해서는 기존의 고가의 진동계측기를 대신 휴대용의 진동 App(이하 휴대용 진동계측기)을 이용하여 진동계측과 고유진동수 분석을 실시하였다. 따라서 이 논문에서는 휴대용 진동계측기의 진동특성을 검증하였으며, 서울시에 가설된 65개소의 보도교를 대상으로 제자리 뛰기(10~20회)를 2~5회 실시하여 공진발생에 따른 자유진동실패형에서 고유진동수를 분석하였다. 파워스펙트럼에서 분석한 고유진동수를 바탕으로 경간별 고유진동수의 상관관계와 구조시스템에 따른 경간과 고유진동수의 상관관계를 분석하여 관계식을 제안하였다<sup>[2]</sup>.

## 2. 선행연구분석

### 2.1 국내연구

1990년 소비자보호원 안전조사보고서<sup>[4]</sup>에서는 보도교의 불안정한 구조와 불충분한 관리로 인한 피해로부터 보행자의 안전을 도모하고자 서울 및 전국 5개 광역시의 총 367개소 보도교 중 66개소에 대해 면접조사, 실태조사, 자료조사 등을 실시하였다. 조사결과 Table 1과 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 보도교의 안전점검 및 보수에 대한 강화가 필요하다고 지적하였다<sup>[2]</sup>.

김창현(2008)은 해외 각국의 진동사용성 기준을 조사하고 그 적용방법을 비교분석하여 설계자가 보도교에 대한 적합한 기준을 선택할 수 있도록 연구하였다. 보도교의 근본적인 진동 저감 방안을 연구하기 위하여 국내·외 설치 사례를 분석하였다. 지인권(2007)은 보도교 준공 후 통행 시 진동에 의한 보행자가 불안감 및 불쾌감 발생 등이 발생한 보도교에 대하여 고유주기 조사와 상진동 및 강제진동에 대한 동적

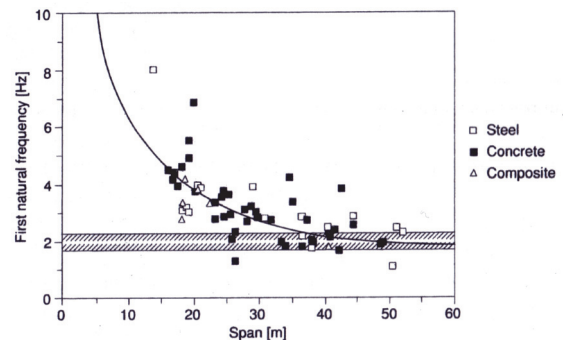
**Table 1.** Vibration survey<sup>[4]</sup>

	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%)

거동을 평가 검토하고 이론적인 해석결과와 비교분석하였다. 또한 대상보도교의 구조성능, 사용성, 구조 안전성 및 진동발생의 원인 분석을 수행하였으며 분석 데이터를 바탕으로 동조질량 감쇠기를 설계, 시공하여 이에 따른 진동 감소의 효과를 실측을 통하여 비교분석하였다. 홍혜진(2010)은 보행자의 인체하중에 대한 진동실험을 수행하고 인체하중 이상화파형과 시간이력모델을 통한 구조해석으로 보도교의 동적거동을 비교 분석을 바탕으로 진동 사용성평가를 실시하여 가장 적합한 보도교의 인체진동에 대한 평가기법을 제시하였다. 성증수 등 (2007)은 국내·외 보도교 진동사용성 기준검토와 진동제어방법 중에 하나인 TMD의 기존 설치 사례를 분석하였으며 화성동탄 보도교에 대한 TMD 적용성을 연구하였다<sup>[2]</sup>.

### 2.2 해외연구

Bachmann *et al.* (1995)<sup>[5]</sup> 등은 세계 각국의 보도교의 진동계측 데이터를 바탕으로 Fig. 1과 같은 재료형식별 경간장과 고유진동수와의 상관관계를 분석하였으며 Table 2와



**Fig. 1.** Footbridge fundamental frequency as a function of span<sup>[5]</sup>

**Table 2.** Relationship according to construction types<sup>[5]</sup>

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	$f = \frac{33.6}{L^{0.73}}$	0	16

같이 재료형식에 따른 고유진동수의 관계식을 제시하였다.

Pimentel *et al.* (2001)은 Europe과 Canada에서 적용하고 있는 보도교의 수직하중에 대한 진동사용성에 대한 규정들을 비교 및 분석하였고 설계지침의 진동사용성에 대한 문제점을 바탕으로 3개소 보도교를 실험을 실시하였다. Hartley *et al.* (1999)은 경간이 35m인 케이블지지 보도교를 대상으로 수정된 유한요소모형화와 진동실험을 수행하고 보행하중에 의해 보도교에 발생하는 가속도를 구할 때 수정된 유한요소모형을 사용하여 수치해석 결과와 실험을 통해 얻은 결과를 비교하여 유한요소모형의 적용성을 검토하였다. Zivanovic *et al.* (2005)은 보도교 진동관련 200편의 논문을 분석하여 진동의 원인, 보행자가 느끼는 진동, 동적특성, 인체와 보도교의 동적 상호관계, 설계절차와 지침들을 분석하였다<sup>[5]</sup>.

### 3. 보도교 진동에 관한 국내기준

서울특별시 2001년 11월 “시설물 설계·시공 및 유지관리 편람<sup>[6]</sup>”에서 소규모강교 및 보도교를 포함하여 설계편람을 마련하였다. 보도교의 적절한 설치를 위해 기술적 기준인 설치기준, 설계일반하중, 허용응력 및 허용지지력, 구조세목 등에 대하여 기술하고 있다<sup>[6]</sup>. 서울시 편람에서 진동에 대한 설명은 다음과 같다. 최근에 횡단보도교로서 규모가 큰 것이 계획되는 일이 많으나, 경간 길이가 40m 정도를 넘는 판형교 형식에서는, 진동에 대한 적절한 배려를 무시하면 보행자에 불안감, 불쾌감을 줄 위험이 있다. 보행자에 의한 동적하중의 특성에 있어서는 Fig. 2와 같이 보행자의 보행진동수가 평균적으로 약 2Hz이다<sup>[6]</sup>.

횡단보도교의 주 거더의 수직 진동의 고유진동수가 약 2Hz에 가까운 경우에는, 처짐 진동의 진폭이 커져 보행자에 대한 불쾌감을 증진시키며 구조물에 대해서도 좋지 않는 영

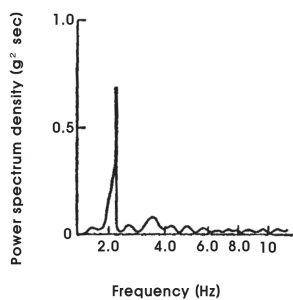


Fig. 2. Pedestrian's power spectrum<sup>[6]</sup>

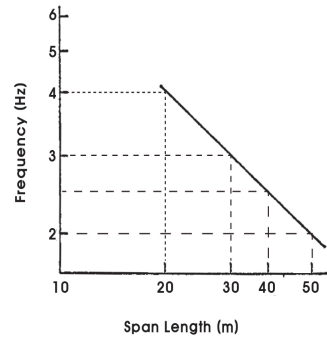


Fig. 3. Frequency by span<sup>[6]</sup>

향을 끼친다. Fig. 3은 횡단보도교의 경간과 고유진동수와 의 상관관계를 나타낸 것이다. 보도교는 보행자에게 불쾌감을 주지 않도록 유해한 진동을 제거하고 공진을 적게 하는 것이 우선시 되어야 한다. 또한 감쇠율을 크게하고 보도교의 최소 진동수가 보행진동수와 일치하지 않도록 하여야한다. 사용성검토를 위한 보도교 고유진동수의 범위는 다음과 같다. 수직 고유진동수는 2Hz 전후(1.5~2.3Hz)이며, 수평 고유진동수는 1Hz 전후이다<sup>[6]</sup>.

### 4. 진동계측 장비 및 방법

#### 4.1 진동계측장비

기존의 진동계측 장비는 Fig. 4와 같이 서보 가속도계, 신호 측정기(Signal Conditioner), FFT 분석기 등을 각각 갖추어야 하며, 이 시스템을 구성하는데 상당한 고가의 비용이 소요된다. 또한 사용법을 익히는데 많은 시간이 소요되며, 이 장비는 구조나 진동관련 전문가만이 쉽게 사용할 수 있는 측면이 있다. 그러나 휴대용 진동계측기는 센서, 신호 측정기, FFT 분석기가 일체화되어 있고 일반인도 쉽게 사용할



Fig. 4. Vibration measurement system<sup>[7]</sup>



Fig. 5. I-Phone app of vibration instruments (vibration app ver. 2.01)<sup>[7],[8]</sup>

수 있는 장점을 갖추고 있다<sup>[7],[8]</sup>.

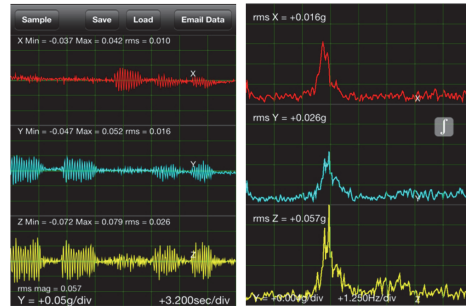
이번 보도교 진동계측은 Fig. 5와 같이 현장에서 전원없이 간단하고 편리하게 계측할 수 있는 휴대용의 진동 App을 이용하여 진동계측(이하 휴대용 진동계측기)을 실시하였다. 휴대용 진동계측기는 x, y, z의 3축 방향(2방향 수평가속도와 1방향 수직가속도)에 대한 실시간 계측을 할 수 있으며, 동적특성도 모니터 상에서 해석이 가능하다. 휴대용 진동계측기 장비에는 MEMS의 가속도계가 내장되어 있어 3축의 가속도계는 약 0.02g 감도와 최대 ±2G까지 계측이 가능하다. 또한, 휴대용 진동계측기 App은 0~100Hz 파형의 범위에서 Sampling Rate를 설정 할 수 있다<sup>[7],[8]</sup>.

#### 4.2 휴대용 진동계측기 분석

휴대용 진동계측기의 구성은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 진동의 파형을 알 수 있는 Time Series, 파워스펙트럼을 알 수 있는 Frequency, 계측과 분석을 할 수 있게 조건을 설정하는 Settings, 사용 설명서인 About으로 구성되어 있다. 대표적으로 Time Series와 Frequency에 구성에 대한 설명하고자 한다<sup>[2]</sup>.

##### 4.2.1 Time Series View

시계열 파형으로서, 가진실험시 진동에 의한 파형은 Fig. 6의 (a)와 같이 x축, y축, z축을 계측할 수 있으며 실시간으로 관찰 및 분석이 가능하도록 구성되어있다. 각 축은 개별적으로 계측된 최대값, 최소값, rms값이 계산되어 표기된다. 3축에서 동시에 나타내는 물리량 값은 rms mag에 나타난다. 수평 스케일의 값은 데이터 설정에서 Sampling rate와 계측시간길이에 따라 결정된다. 또한 화면을 터치하여 커서를 움직이면 정확한 계측 값을 알 수 있고, 더 정확한 분석은 관심 영역에서 더블클릭을 하면 3배가 확대되어 자세한



(a) Time Series (b) Frequency

Fig. 6. Time Series View and Frequency View<sup>[2]</sup>

파형분석이 가능하다<sup>[2]</sup>.

##### 4.2.2 Frequency View

보도교의 고유진동수를 분석할 수 있으며, Fig 6의 (b)와 같이 가속도계의 단위와 함수에 따라 다양하게 분석이 가능하다. 화면을 터치하여 커서를 움직이면 정확한 계측 값을 알 수 있고, 더 정확한 분석은 관심 영역에서 더블클릭을 하면 3배가 확대되어 자세한 파형분석이 가능하다<sup>[2]</sup>.

#### 4.3 휴대용 진동계측기의 적용성 검토

휴대용 진동계측기를 이용한 수직진동수의 정밀도를 검토하기 위하여 메트로놈(Seiko SQ100-77)의 신호음을 이용하였다. 메트로놈의 신호음을 2Hz로 설정하고, 이 신호음에 연동하여 휴대용 진동계측기를 수직으로 10cm 정도 연속적으로 손으로 가진을 실시하였다<sup>[7],[8]</sup>.

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 3과 같으며, 각 시간에 따른 평균값은 모두

Table 3. Vibration measurement application review<sup>[7],[8]</sup>

Forcing frequency (Hz)	Sampling rate (Hz)	Sample length (sec)	1st (Hz)	2nd (Hz)	3rd (Hz)	Average (Hz)
			error	error	error	error
20.0	2.00	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%



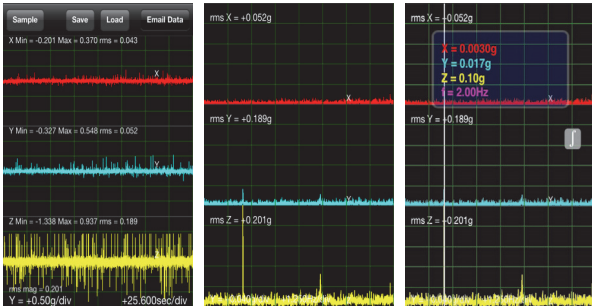


Fig. 7. Mobile-phone calibration (3rd in 204.8 - 2.00Hz)<sup>[7]</sup>

2.00Hz로 나왔다. 그러나 계측된 가진진동수의 오차를 계산한 결과 평균값은 0.16~0.83%로 나왔다. 계측시간이 51.2sec보다 204.8sec가 보도교를 계측하기 위한 시간이 충분하고 정밀한 분석이 가능하다는 판단 하에 Sampling rate를 20Hz로 설정하고 계측시간은 204.8sec로 설정 후 진동 계측을 실시하였다. Fig. 7은 휴대용 진동계측기의 적용성 검토를 실시한 결과의 예이다<sup>[7],[8]</sup>.

#### 4.4 진동계측 방법

보도교의 진동 계측을 위하여 우선 Fig. 8과 같이 경간을 측정하였다. 보도교 제원은 보도교의 기둥과 기둥 중앙을 중심을 기준으로 하였다. 휴대용 진동계측기의 부착위치와 방법은 양면테이프를 휴대용 진동계측기의 뒷면에 부착하고 보도교의 정중앙 바닥슬래브에 부착 고정하여 휴대용 진동계측기의 모니터가 위쪽을 향하도록 하였다<sup>[2],[8]</sup>.

휴대용 진동계측기를 보도교의 상면에 부착한 후에, Fig. 9와 같이 한명 또는 복수의 인원이 상하방향으로 10~20회 제자리 뛰기를 하였다. 보도교의 진동발생이 고유진동수가 2.0Hz 전후에서 발생하므로 2.0Hz부터 서서히 가진진동수를 증가시켜 보도교에 공진을 발생시켰다. 계측 완료 후에는 시계열파형과 진동수를 분석하기 위한 파워스펙트럼을 구하

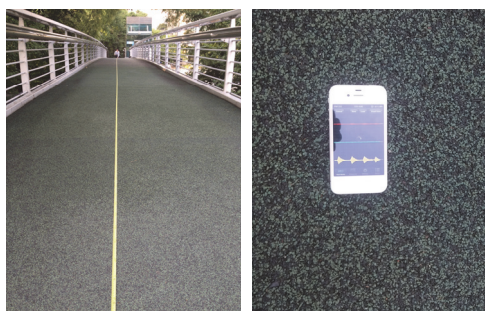


Fig. 8. Measured span and location<sup>[7],[8]</sup>

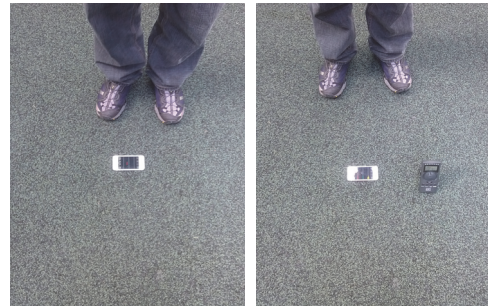


Fig. 9. Vibration method<sup>[8]</sup>

였다. 이렇게 일반적으로 파워스펙트럼을 통해서도 충분히 고유진동수를 구할 수는 있지만, 경우에 따라서는 자유진동 파형이 형성되지 않는 경우가 있다. 이 경우에는 파워스펙트럼에서 산정한 고유진동수에 동조한 전자박자계를 이용하여 보도교의 공진파형을 다시 획득하였다. 이를 위하여 1차에 계측된 고유진동수를 전자박자계에 설정하여 박자계에서 발산되는 신호음에 맞춰 다시 제자리 뛰기를 하여 휴대용 진동계측기에 보도교의 공진을 발생시켰다<sup>[2],[8]</sup>.

### 5. 보도교 진동계측

#### 5.1 계측 대상 보도교 현황 및 구조시스템

서울시에서 제공받은 자료에 의하면 현재 서울시에는 166개소에 보도교가 가설되고 20~30m 사이에 보도교가 57개소로 가장 많이 가설되어 있으며 보도교에서 진동과 처짐이 발생할 수 있는 범위인 40m 이상의 보도교 수는 73개소에 가설되어 있다. 서울시에 가설된 166개소 보도교 중 연속교 52개소를 제외한 단경간 114개소 보도교 중 경간과 구조시스템을 고려하여 65개소의 보도교를 선정하였다. 보도교의 디자인 또는 보강공사로 인한 경간이 다르기 때문에 경간을

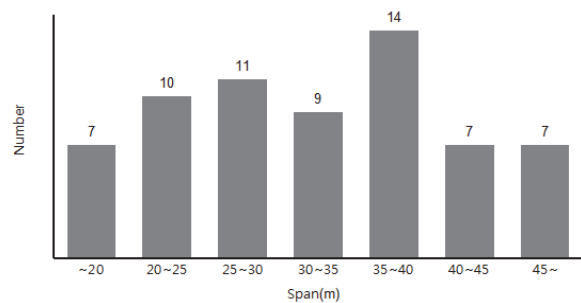


Fig. 10. Span by the number of foot-bridges

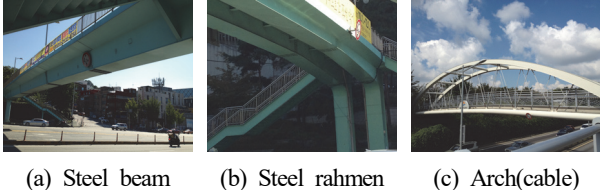


Fig. 11. Structure type

측정하였으며 Fig. 10과 같이 계측대상 보도교를 경간별로 분류하였다<sup>[2]</sup>.

구조시스템은 Fig. 11의 (a)와 같이 보도교의 메인 보가 수평으로 가설된 Box형식 또는 Pipe형식의 보도교를 강구조보로, (b)와 같이 구조물의 기본적인 뼈대로 기둥과 보의 절점이 강접합으로 하나로 이루어진 보도교를 강구조 라멘으로, (c)와 같이 아치 또는 케이블지지로 이루어진 보도교를 아치로 정리하였다. 계측대상 보도교 65개소의 구조시스템을 정리한 결과, 강구조 보의 구조시스템이 38개소로 가장 많으며 강구조 라멘은 22개소, 아치는 5개소이다<sup>[2]</sup>.

5.2 보도교 진동계측 결과

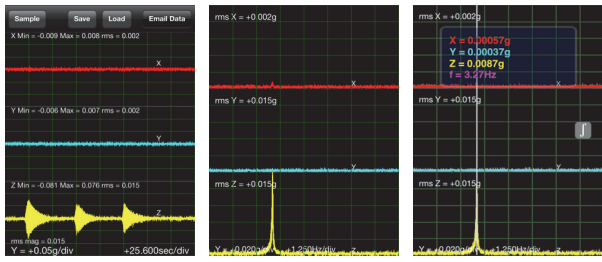
휴대용 진동계측기를 통하여 진동계측 대상 보도교 65개소에 대하여 자유진동실험을 실시하였으며 각 보도교마다 2차레 계측을 실시하였다. 공진으로 인한 시계열파형을 분석하여 나온 고유진동수의 결과는 Table 4와 같으며 경간 순으로 정리하였다. 계측대상 보도교의 시설명은 본 논문에서는 제외하기로 하였다.

보도교 진동계측 결과, 고유진동수가 가장 낮은 보도교는

Table 4. Summary of the foot-bridges<sup>[2]</sup>

No.	Width [m]	Length [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Structure type	Span [m]	Frequency
1	4.0	22.0	88.0	Steel rahmen	15.9	8.35
2	4.0	18.2	72.8	Steel beam(box)	16.0	8.29
3	2.8	20.0	56.0	Steel beam(box)	17.4	7.02
4	4.0	22.0	88.0	Steel beam(box)	18.1	6.21
5	4.0	21.4	85.6	Steel rahmen	19.1	6.16
6	4.0	27.5	110.0	Steel beam(box)	19.4	5.75
7	4.0	21.5	88.0	Steel rahmen	19.4	7.21
8	4.0	22.6	90.4	Steel beam(box)	20.3	5.35
9	4.0	22.8	91.2	Steel beam(box)	20.4	6.62
10	3.8	30.0	114.0	Steel rahmen	20.5	6.46
11	4.0	24.6	98.4	Steel beam(box)	22.2	4.54
12	4.6	25.2	115.9	Steel beam(pipe)	22.8	6.53
13	3.0	25.4	76.2	Steel rahmen	22.8	5.11
14	3.5	29.8	104.3	Steel rahmen	22.8	4.57

15	4.0	25.4	101.6	Steel beam(box)	23.2	4.42
16	4.0	26.0	104.0	Steel rahmen	23.8	6.89
17	3.5	26.7	93.5	Steel beam(box)	24.5	4.42
18	4.0	26.0	104.0	Steel beam(box)	25.5	4.02
19	3.4	26.2	89.1	Steel beam(pipe)	25.5	4.31
20	4.0	27.3	109.2	Steel beam(box)	26.0	4.07
21	4.0	32.3	129.2	Steel beam(box)	26.2	5.25
22	4.0	29.8	119.2	Steel rahmen	26.6	6.09
23	3.3	32.6	107.6	Steel beam(box)	27.0	4.41
24	4.0	29.6	118.4	Steel beam(box)	27.4	3.68
25	4.0	30.0	120.0	Steel rahmen	27.5	3.17
26	4.0	30.0	120.0	Steel beam(box)	28.0	4.44
27	4.0	30.0	120.0	Steel rahmen	28.4	3.15
28	4.0	30.0	120.0	Steel beam(box)	29.0	3.45
29	4.0	32.6	130.4	Steel beam(box)	30.3	3.38
30	5.5	33.0	181.5	Steel rahmen	31.5	5.71
31	2.5	32.1	80.25	Steel beam(box)	31.7	4.07
32	3.6	48.1	173.2	Steel beam(pipe)	32.0	3.67
33	4.0	28.0	112.0	Arch	32.4	3.56
34	4.0	34.6	138.4	Steel rahmen	32.5	3.09
35	4.6	40.0	184.0	Steel beam(pipe)	33.0	2.56
36	3.3	34.8	114.8	Steel rahmen	33.4	3.38
37	2.1	37.0	77.7	Steel beam(box)	34.8	2.83
38	3.0	38.5	115.5	Steel beam(box)	35.3	3.09
39	3.9	33.9	132.2	Steel beam(box)	35.5	3.45
40	4.7	49.0	230.0	Arch	35.7	6.09
41	2.8	39.0	109.2	Steel beam(box)	36.0	2.14
42	4.0	36.0	144.0	Steel beam(pipe)	36.2	2.63
43	4.0	41.0	164.0	Steel rahmen	36.4	2.79
44	4.0	40.6	162.4	Steel beam(box)	37.0	2.46
45	3.1	44.0	136.4	Steel beam(box)	37.5	2.03
46	3.0	44.0	132.0	Steel beam(box)	37.6	3.38
47	4.0	39.0	156.0	Steel beam(pipe)	37.7	2.12
48	4.0	40.0	160.0	Steel rahmen	38.0	3.44
49	4.0	44.0	176.0	Steel rahmen	38.6	3.43
50	2.8	40.0	112.0	Steel rahmen	38.7	3.27
51	4.0	43.0	172.0	Steel rahmen	39.2	2.78
52	5.0	70.2	351.0	Steel rahmen	40.4	3.38
53	5.0	43.3	216.5	Steel beam(pipe)	41.0	1.99
54	4.0	45.0	180.0	Steel beam(box)	42.0	2.80
55	4.0	44.6	178.4	Steel beam(box)	42.2	2.63
56	4.0	45.0	180.0	Steel rahmen	43.3	2.56
57	4.0	46.0	184.0	Steel rahmen	44.0	2.54
58	4.0	46.6	186.4	Steel beam(box)	44.5	2.20
59	5.4	46.0	248.0	Arch	45.5	4.18
60	4.5	53.6	241.2	Steel beam(pipe)	46.0	3.55
61	4.0	48.7	194.8	Steel beam(box)	46.4	2.29
62	3.2	50.0	160.0	Steel beam(pipe)	46.8	1.76
63	3.5	55.0	192.5	Steel rahmen	51.8	1.79
64	3.5	80.0	280.0	Arch	78.0	2.02
65	5.8	89.0	516.2	Arch	78.0	4.15



(a) Time-series (b) Power spectrum (c) Frequency-3.27Hz

Fig. 12. An example of vibration tests (No.50)

1.76Hz가 나온 Steel beam(pipe) 형식의 No.62 보도교이며 가장 높은 보도교는 8.35Hz의 강구조 라멘 형식의 No.1 보도교로 분석되었다. Fig. 12는 No.50 보도교의 계측사례로서 자유진동실험을 실시한 결과 공진에 의한 시계열 파형과 파워스펙트럼을 나타내고 있다.

### 5.3 진동 계측결과 분석

서울시 시설물 설계·시공 및 유지관리 편람(2001)<sup>[6]</sup>에서 제안한 경간장과 고유진동수의 관계 그래프와 Bachmann *et al.* (1995)<sup>[5]</sup>이 세계 각국의 보도교의 진동계측 데이터를 바탕으로 제안한 재료형식별 경간과 고유진동수의 상관관계를 이번 서울시 65개소 진동계측결과와 비교분석을 실시하였다. 비교분석은 크게 2가지를 실시하였으며, 첫 번째는 경간에 따른 고유진동수의 상관관계를 분석하였고 두 번째는 구조 시스템별 경간에 따른 고유진동수 상관관계를 분석하였다<sup>[2]</sup>.

계측결과 분석 방법은 상관관계에서 상관계수(Correlation coefficient, 이하  $C, Co$ )가 가장 높은 식으로 회귀식을 작성하였다.

#### 5.3.1 경간에 따른 고유진동수의 상관관계

본 논문에서 계측한 서울시의 65개소 보도교 계측결과와 서울시 편람식과 Bachmann 식을 비교분석을 실시하였으며 그에 따른 결과는 Fig. 13과 같은 상관관계를 도출하였다. Fig. 13에서 경간이 길수록 고유진동수는 작아진다는 것을 확인하였다. 따라서 이 논문에서는 경간에 따른 고유진동수의 식 (1)을 제안하고자 하며 고유진동수는  $f$  (Hz)로 경간은  $L$ (m)로 표현하였다<sup>[2],[8]</sup>.

$$f = \frac{88.81}{L^{0.92}} \quad (\text{소수점 셋째자리에서 반올림}) \quad (1)$$

65개소 계측에 의한 제안식은 서울시 제안식과 Bachmann 식 보다 동일 경간에서 고유진동수가 큰 것을 알 수 있다. 여기에서 서울의 보도교는 일반적으로 서울시 제안식과 Bachmann 식보다 보수적으로 설계되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 보행시 95%의 보행자가 1.65Hz ~ 2.35Hz로 보행하므로 이 영역에 있는 보도교는 총 9개 인 것을 Table4에서 확인할 수 있다. 이 9개의 보도교는 보행시 공진으로 인하여 보행자가 진동을 감지할 수 있는 것으로 확인되었다<sup>[2]</sup>.

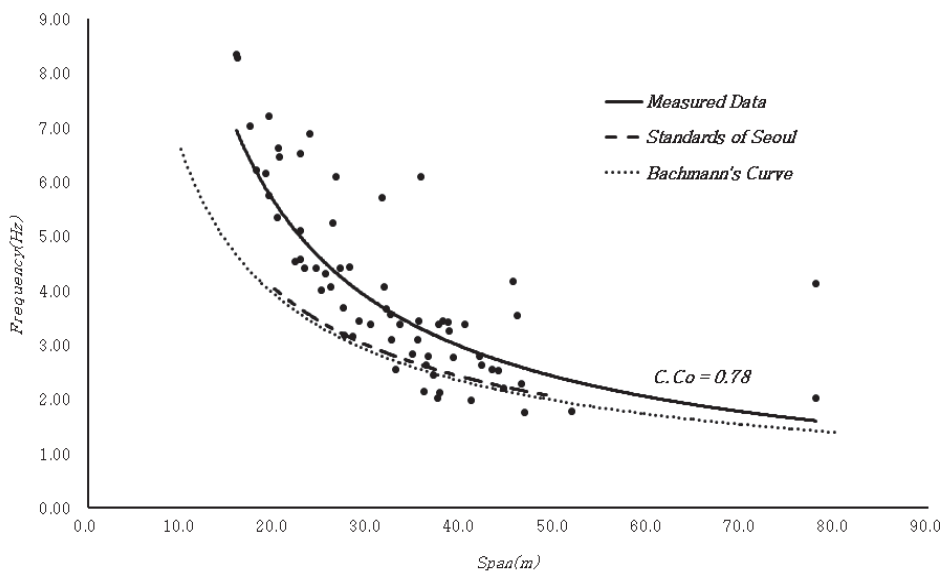


Fig. 13. Correlation between the natural frequency of span<sup>[2]</sup>

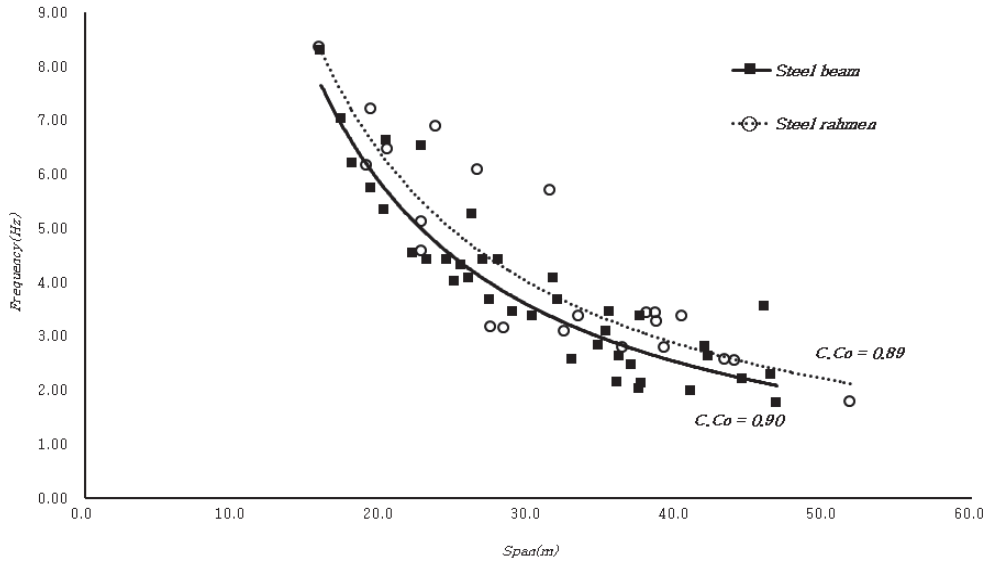


Fig. 14. Correlation between the natural frequency corresponding to the span of the structure type<sup>[2]</sup>

5.3.2 구조시스템별 경간에 따른 고유진동수의 상관관계

계측한 65개소 보도교의 고유진동수를 바탕으로 Steel beam 38개소, Steel rahmen 22개소를 구조시스템별 경간에 따른 고유진동수 식을 분석하였다. 그러나 Arch 구조시스템의 경우 계측 보도교가 5개에 불과해 상관관계를 분석하는데 어려움이 있어 이번 결과분석에서는 제외하였다. 또한 Table 4의 No 40, No 59, No 65와 같은 아치 보도교는 경간에 따른 고유진동수가 다른 구조시스템의 보도교 보다 매우 큰 값을 보이는 점이 특이한 점이다.

구조시스템별 경간에 따른 고유진동수 식은 Fig. 14와 같다. 또한 구조시스템에 따른 고유진동수 제안식은 Table 5와 같으며 고유진동수는  $f$  (Hz)로 경간은  $L$ (m)로 표현하였다. Fig. 14에서 Steel beam과 rahmen의 경간별 고유진동수 상관계수의 값은 전체 보도교 상관계수인 0.78보다 큰 0.9와 0.89로 나타났다<sup>[2]</sup>.

Table 5을 분석한 결과 Steel beam의 고유진동수 제안식과 Steel rahmen의 제안식은 65개소의 고유진동수 제안식보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한 Bachmann *et al.* (1995)<sup>[5]</sup>

Table 5. Relationship according to structure type<sup>[2]</sup>

Structure type	Relationship quantity	Relationship	Correlation coefficient
Steel beam	38	$f = \frac{217.75}{L^{1.21}}$	0.90
Steel rahmen	22	$f = \frac{204.59}{L^{1.16}}$	0.89

의 재료형식에 따른 고유진동수 제안식에서 재료형식이 Steel일 때 고유진동수 제안식과 많이 차이가 나는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 휴대용 진동계측기를 이용하여 서울시의 65개소의 보도교를 대상으로 진동계측을 실시하였다. 공진파형의 시계열파형에서 파워스펙트럼으로 구한 고유진동수를 바탕으로 경간별 고유진동수 식과 구조시스템별 경간에 따른 고유진동수의 식을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 휴대용 진동계측기의 정밀도를 검토하기 위하여 Sample rate를 20Hz로 설정하고 계측 실험시간은 51.2sec, 102.4sec, 204.8sec에 맞춰 각각 3차례 가진한 결과 0.83% 이내의 오차로 주파수 정확도를 보여 주었다.
- (2) 국내 계측된 보도교의 경간에 따른 고유진동수 식은 서울시 가이드라인과 Bachmann의 제안식 보다 동일 경간에서 큰 고유진동수 값을 보여주는 것을 알 수 있었다.
- (3) 보도교의 고유진동수를 바탕으로 아치 보도교를 제외한 강재보 보도교 38개소, 강재 라멘 22개소에 대하여 구조시스템별 경간에 따른 고유진동수 식을 제안하였으며 상관관계가 0.89 이상으로 경간별 고유진동수가 일관된 경향을 보이는 것을 확인하였다.



## 감사의 글

본 연구는 2014년도 서울과학기술대학교 교내학술 연구비에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- [1] 유문식, 윤탈양, 구라바야시 히로시(2003) 동조질량감쇠 장치를 이용한 보도교의 효율적 진동제어, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제15권, 제3호, pp.24-31.  
Yoo, M.S., Yoon, T.Y., and Kurabayashi, H. (2003) Effective Vibration Control of Pedestrian Bridge Using Tuned Mass Damper, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.3, pp.24-31 (in Korean).
- [2] 도기영(2014) 보도교의 진동계측을 통한 고유진동수 분석, 석사학위논문, 서울과학기술대학교.  
Do, K.Y. (2014) *Analysis of Natural Frequency Through Vibration Measurement of Foot-Bridges*, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea (in Korean).
- [3] 김창현(2008) 보도교에서의 진동이 인체에 미치는 영향 및 저감방안에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교.  
Kim, C.H. (2008) *A Study on the Decreasing Method and the Effects of Vibrations to the Human Body in Pedestrian Bridge*, Master's Thesis, Chonnam National University, Korea (in Korean).
- [4] 한국소비자보호원(1990) 육교의 안전실태 조사보고서.  
Korea Consumer Agency (1990) *Survey Report on Safety Situation of Foot-Bridges*, KCA, Korea (in Korean).
- [5] Bachmann, H., Ammann, W.J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I. Hirsch, G.H., Klein, G.K., Lande, G.J., Mahrenholtz, O., Natke, H.G., Nussbaumer, H., Pretlove, A.J., Rainer, J.H., Saemann, E.-U., and Steinbeisser, L. (1995) *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, Birkäuser, Germany.
- [6] 서울특별시 기술심사담당관, 한국건설품질연구원(2001) 시설물 설계·시공 및 유지관리 편람 - 소규모강교 및 보도육교, 학술용역보고서 2001-1, pp.151-206.  
Technical Juries of Seoul Metropolitan City, and Korea Construction Quality Research Center (2001) *Manual for Facility Construction/Maintenance/Design: Small-Sized Steel Structures and Foot-Bridges*, Academic Research Report No. 2001-1, Korea, pp.151-206 (in Korean).
- [7] Yoon, S.W., Do, K.Y., Ryu, J.H., and Ju, Y.K. (2014) Vibration Measurement of Steel Foot-Bridge Using Mobile-Phone, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Vol.470, pp.777-780.
- [8] 도기영, 윤성원, 김도현(2014) 휴대용 계측기를 이용한 보도교 진동계측 분석, 한국공간구조학회지, 한국공간구조학회, 제14권, 제1호, pp.61-68.  
Do, K.Y., Yoon, S.W., and Kim, D.H. (2014) Vibration Measurement of the Foot-Bridge Using Mobile Phone, *Journal of the Korean Association for Spatial Structure*, KASSS, Vol.14, No.1, pp.61-68 (in Korean).

---

**요 약 :** 최근 자전거나 보행자들이 쉽고 편리하게 이동 할 수 있는 보도교와 미관중심의 보도교가 가설되고 있다. 그러나 보행자의 보행이 보도교의 고유진동수와 근접할 경우 공진현상에 의해 큰 진폭이 발생하여 보행자에게 보행시 불안감을 조성시킨다. 그러나 보행시 진동에 따른 연구는 매우 미약하다. 따라서 휴대용 진동계측기를 통하여 서울시에 가설된 65개소의 보도교를 대상으로 공진발생에 따른 고유진동수를 분석하였고 경간별 고유진동수 상관관계와 구조시스템에 따른 경간과 고유진동수의 상관관계를 분석하였다.

**핵심용어 :** 휴대용 진동계측기, 진동계측, 고유진동수, 보도교

---