

# 진동대실험을 통한 축소 아치구조물의 고유진동주기 분석

## Natural Vibration Period of Small-scaled Arch Structure by Shaking Table Test

김기철 \*  
Kim, Gee-Cheol

강주원 \*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

Large spatial structures can not easily predict the dynamic behavior due to the lack of construction and design practices. The spatial structures are generally analyzed through the numerical simulation and experimental test in order to investigate the seismic response of large spatial structures. In the case of analysis for seismic response of large spatial structure, the many studies by the numerical analysis was carried out, researches by the shaking table test are very rare. In this study, a shaking table test of a small-scale arch structure was conducted and the dynamic characteristics of arch structure are analyzed. And the dynamic characteristics of arch structures are investigated according to the various column cross-section and length. It is found that the natural vibration periods of the small-scaled arch structure that have large column stiffness are very similar to the natural vibration period of the non-column arch structure. And in case of arch structure with large column stiffness, primary natural frequency period by numerical analysis is very similar to the primary natural frequency period of by shaking table test. These are because the dynamic characteristics of the roof structure are affected by the column stiffness of the spatial structure.

**Keywords :** *Small-scaled arch structure, Dynamic characteristic, Shaking table test, Column stiffness*

## 1. 서론

구조물의 동적응답을 분석하기 위해서는 구조물의 고유진동수 및 진동모드 등과 같이 구조물에 대한 동적특성 분석이 우선되어야 한다. 이와 같은 구조물의 동적특성 분석은 일반적으로 고유치 해석을 통한 수치적 연구와 실험체 실험에 의한 실험적 연구로 수행된다<sup>5,6)</sup>. 실험 구조체가 매우 큰 대공간구조물의 실험적 연구는 실험장비 및 실험체 제작 등의 한계로 인하여 축소모형 실험을 수행하는 것이 일반적이다.

대공간구조물의 축소모형 실험을 통한 정확한 지진응답 분석을 위해서는 실험 크기의 동적특성이 나타나도록 상사법칙을 적용하여 축소모형을 제작해야 한다. 대공간구조물은 일반적인 건축물과는 다른 구조적 특성으로 인하여 수평지진동에 대하여 수평방향 지진응답은 물론 수직방향 지진응답도 크게 나타나고 있다. 또한 대공간구조물은 상부 지붕구조와 하부 기둥(벽)구조로 분리되어 있어 이러한 경우에 하부 기둥구조의 강성에 따라서 상부 지붕구조의 동적응답이 다양하게 나타난다. 따라서 대공간구조물의 정확한 지진응답 분석을 위해서는 하부 기둥구조의 강성에 대한 영향을 고려해야 하지만 대부분 상부 구조만을 고려한 연구가 수행되어 왔고 하부 구조를 고려한 대공간구조물의 연구는 미비한 실정이다.

아치구조물은 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 가지고 있으므로 본 연구에서는 상부 지붕구조의 형태를 아치구조물로 선정하였다. 하부 기둥

\* 정희원, 서울대학교 건축과, 부교수  
Seoul University, Dept. of Architecture Eng.  
Associate Professor

\*\* 교신저자, 영남대학교 건축학부, 교수  
Yengnam University, School of Architecture,  
Professor  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

구조는 기둥의 재질, 단면 및 길이를 다양하게 하여 하부 기둥구조의 강성에 변화를 주었다<sup>2,4)</sup>.

본 연구에서는 하부 기둥구조의 재질, 단면과 길이의 변화에 따른 아치구조물의 고유진동주기 특성을 분석하기 위하여 축소 아치구조물의 고유치해석과 진동대실험을 수행하였다<sup>1,3)</sup>.

## 2. 축소 아치구조물 및 진동대

### 2.1 축소 아치구조물

축소 아치구조물의 상부 지붕구조는 <Fig. 1>과 같이 경간-높이 비가 0.3으로 경간이 4.0m이며 높이가 1.2m인 아치구조물이다. 축소 아치구조물은 더블 레이어드 아치로 상현재, 하현재 및 수직재로 구성되어 있으며 상부 지붕구조의 고정하중과 적재하중을 고려하기 위하여 상현재와 하현재 각각 7개의 절점에는 1.0kg의 질량을 추가할 수 있게 하였다.



<Fig. 1> Small-scaled model



(a) Brass column



(b) PC column

<Fig. 2> Column shape

상부 지붕구조와 하부 기둥구조의 재질, 단면 및 길이를 <Table 2>와 <Table 3>에 나타내었다.

지붕구조의 재질은 폴리카보네이트이며 상현재와 하현재의 단면은 60mm×20mm, 수직재의 단면은 30mm×10mm이다. 하부 기둥구조의 재질은 폴리카보네이트 또는 황동이며 단면은 정방형으로 크기는 15mm, 20mm, 30mm로 하였다. 그리고 기둥의 길이는 100mm, 200mm, 300mm로 하였다. 지붕과 기둥의 연결부는 회전이 가능하도록 힌지(hinge)로 하였으며 재질, 단면 및 길이가 다르게 제작된 기둥을 교체하면서 실험을 수행할 수 있도록 하였다.

축소 아치구조물에 적용한 상사법칙은 기본적으로 질량, 길이, 시간을 기본차원으로 하여 가속도 기반으로 하였다. 본 실험의 축소 아치구조물은 구조물의 고유진동주기가 매우 중요하므로 축소 아치구조물의 고유진동주기를 실제 대공간구조물의 고유진동주기와 유사하도록 제작하였다<sup>8)</sup>.

<Table 1> Similitude Law Scale

Quantity	Scale factor
Length	n
Mass	n <sup>2</sup>
Time	n <sup>0.5</sup>
Acceleration	1
Natural Frequency	1/n <sup>0.5</sup>

<Table 2> Roof structure members

Items	Section
Material	Polycarbonate(PC)
Upper/Lower chord member (mm)	60 × 20
Vertical member (mm)	30 × 10

<Table 3> Column structure members

Items	Specification
Material	Brass Polycarbonate(PC)
Section (mm)	15 × 15, 20 × 20, 30 × 30
Length (mm)	100, 200, 300

## 2.2 진동대 및 가속도계 제원

본 실험의 진동대(shaking table)는 가로방향 5.0m, 세로방향 3.0m 규모의 1축(uniaxial) 진동대이다. 진동대의 상세한 제원은 <Table 4>와 같으며 최대 수평이동 거리  $\pm 100\text{mm}$ , 최대 속도  $50\text{cm/sec}$  그리고 최대 가속도  $1.0\text{g}$ 을 구현할 수 있다. 진동응답을 계측하기 위한 가속도계는 ICP 타입으로 민감도는  $50\text{mV/g}$ 이며 계측범위는  $0.3\text{Hz} \sim 17,000\text{Hz}$ 에서  $\pm 120\text{g}$ 까지 계측이 가능하다. 또한 A/D변환기의 분해능력은 12bit이며 초당 최대 200,000개의 데이터를 계측할 수 있다.

<Table 4> Shaking table spec.

Items	Specification
Dimension	5m × 3m
Max. Specimen weighted	30 tonf
Table Mass	10 ton
Control Mode	uniaxial horizontally
Max Stroke	$\pm 100\text{ mm}$
Max. Velocity	50 cm/sec
Max. Acceleration	1.0 g
Max. Overturning Moment	50 ton · m
Frequency Range	DC-30 Hz

## 3. 축소 아치구조물의 진동모드

수치해석에 의한 진동모드와 고유진동수 분석을 바탕으로 축소모형의 진동응답 계측위치 선정하거나 진동응답 범위 등을 예상하게 된다. 따라서 축소 아치구조물의 수치해석에 의한 진동모드 양상을 비교 분석이 필요하다. <Fig. 3>과 <Fig. 4>는 축소 아치구조물들의 1차 진동모드를 나타낸 것이다.



(a) 0-00-000 (0.2703sec)



(b) B-30-100 (0.2733sec)

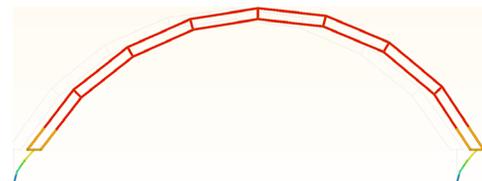


(c) B-20-200 (0.2881sec)



(d) B-15-300 (0.2984sec)

<Fig. 3> Vibration modes



<Fig. 4> Vibration modes of model P-10-300 (0.7226sec)

<Fig. 4>와 같이 하부구조의 강성이 매우 작은 축소 아치구조물의 경우에 다른 구조물과는 다른 진동모드 양상을 보이고 있다.

축소 아치구조물의 명칭은 기둥의 재질, 단면 크기, 기둥길이에 따라서 다음과 같이 표현한다.

### B-30-100

B: 기둥 재질(P: 폴리카보네이트, B: 황동)  
30: 단면 크기(15, 20, 30mm)  
100: 기둥 길이(100, 200, 300mm)

본 논문의 축소 아치구조물은 <Table 3>과 같이 다양한 하부 기둥을 가지고 있다. 따라서 축소 아치구조물의 진동모드와 고유진동수는 하부 기둥구조의 강성에 따라서 다르게 나타날 것이다.

<Fig. 3>은 하부 기둥구조의 강성에 따른 축소 아치구조물의 1차 진동모드를 나타낸 것으로 축소 아치구조물의 진동모드는 <Fig. 3 (a)>와 같이 상부구조가 직접기초에 연결된 아치구조물의 진동모드와 유사하게 나타내고 있다. 축소 아치구조물의 1차 진동모드는 수평진동에 크게 반응하는 역대칭 모드를 나타내고 있다. 또한 하부 기둥구조의 강성에 따라서 고유진동주기가 다르게 나타나고 있다.

그러나 P-15-300, P-15-200 및 P-20-300과 같은 일부 축소 아치구조물은 1차 진동모드가 <Fig. 4>와 같이 다른 모델의 진동모드의 양상과 다른 강체 거동을 보이고 있다. 이는 상부 지붕구조의 강성에 비교하여 하부 기둥구조의 강성이 매우 작아 하부 기둥구조에 의한 변형모드를 보여주고 있다.

#### 4. 축소 아치구조물의 고유진동수

##### 4.1 축소 아치구조물의 하부 기둥구조 강성

하부 기둥의 횡강성과 휨강성을 고려한 강성식은 식 (1)과 같다. 따라서 하부 기둥의 강성은 탄성계수와 단면에 비례하고 길이에 반비례한 것을 볼 수 있다. 황동의 탄성계수는  $96,105N/mm^2$ , 폴리카보네이트의 탄성계수는  $2,255N/mm^2$ 로 하였다.

$$k = \frac{12EI}{L^3} - \frac{6EI}{L^2} \quad (1)$$

<Table 5>는 하부 기둥의 강성이 가장 작은 P-15-300-10 모델의 기둥강성에 대한 비율을 나타낸 것으로 하부 기둥의 강성이 가장 큰 것은 B-20-100으로 P-10-300-10과 약 6,000배 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

<Table 5> Column stiffness ratio

Models	Stiffness ratio	Models	Stiffness ratio
B-15-100	378.3	P-15-100	8.9
B-15-200	95.5	P-15-200	2.2
B-15-300	42.6	P-15-300	1.0
B-20-100	1195.7	P-20-100	28.1
B-20-200	302.0	P-20-200	7.1
B-20-300	134.7	P-20-300	3.2
B-30-100	6053.4	P-30-100	142.1
B-30-200	1528.8	P-30-200	35.9
B-30-300	681.7	P-30-300	16.0

하부 기둥의 강성은 황동재질의 기둥을 갖는 모델이 폴리카보네이트 재질의 기둥을 갖는 모델보다 큰 것을 볼 수 있으며 하부 기둥의 강성은 기둥의 길이보다는 기둥의 재질이 지배적인 것을 볼 수 있다.

##### 4.2 축소 아치구조물의 고유치 해석

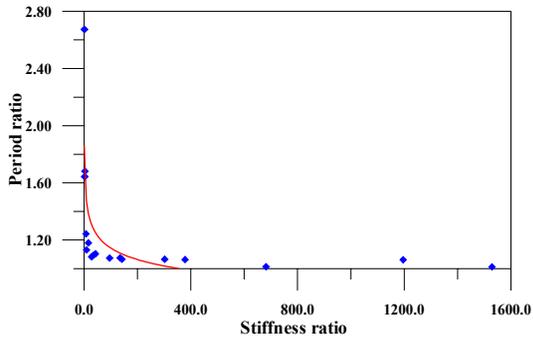
수치해석에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기를 <Table 6>에 나타내었다.

<Table 6> Natural period by numerical analysis

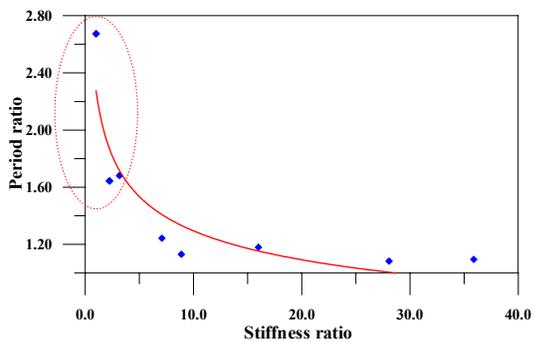
Models	Period (sec)	Models	Period (sec)
0-00-000	0.270		
B-15-100	0.287	P-15-100	0.306
B-15-200	0.290	P-15-200	0.444
B-15-300	0.298	P-15-300	0.723
B-20-100	0.287	P-20-100	0.293
B-20-200	0.288	P-20-200	0.336
B-20-300	0.291	P-20-300	0.455
B-30-100	0.273	P-30-100	0.288
B-30-200	0.274	P-30-200	0.296
B-30-300	0.275	P-30-300	0.319

하부 기둥의 강성이 가장 큰 모델 B-30-100-10의 고유진동주기가 가장 작게 나타나고 있다. 상부 지붕구조의 강성에 비교하여 하부 기둥구조의 강성이 작은 모델 P-15-200, P-15-300 및 P-20-300의 진동주기가 다른 모델의 진동주기와 비교하여 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이는 세 모델의 진동모드가 다른 모델의 진동모드와 다른 진동모드를 가지

고 있기 때문이다.



(a) Stiffness ratio: ~ 1600



(b) Stiffness ratio: ~ 40

<Fig. 5> Period ratio by numerical analysis

<Fig. 5>는 <Table 5>의 강성 비율에 따른 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기 비율을 나타낸 것이다. 강성비율에 따라서 고유진동주기 비율이 매우 상이하게 나타나므로 고유진동주기 비율을 강성비율에 따라서 <Fig. 5 (a)>와 <Fig. 5 (b)>로 구분하여 나타내었다.

모델들의 1차 고유진동주기 비율은 하부 기둥 구조가 없는 모델 0-00-000의 1차 고유진동수에 대한 비율이다. 하부 기둥구조의 강성이 클수록 기둥이 없는 모델에 근접한 것을 볼 수 있다.

상부 지붕구조의 강성에 비교하여 하부 기둥구조의 강성이 작은 모델 P-15-200, P-15-300 및 P-20-300의 진동주기가 다른 모델의 진동주기와 비교하여 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이는 세 모델의 1차 진동모드가 다른 모델의 1차 진동모드와 다른 진동모드 양상을 가지고 있기 때문이다.

하부구조의 강성이 가장 큰 모델 B-30-100, 200, 300의 1차 진동주기는 하부구조가 없는 모델

0-00-000의 1차 고유진동주기와 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 이는 하부구조 기둥의 강성이 상부 지붕구조의 강성보다 상대적으로 매우 크기 때문이다.

### 4.3 축소 아치구조물의 진동대 실험

진동대 실험에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기를 <Table 7>에 나타내었다. 축소 아치구조물 경간의 1/4와 1/2에서 측정한 자유진동 영역에서의 가속도응답을 FFT하여 축소 아치구조물의 고유진동주기를 구하였다<sup>7)</sup>. 하부 기둥의 강성이 가장 큰 모델 B-30-100-10의 고유진동주기가 가장 작게 나타나고 있다. 그리고 모델 P-15-200과 P-15-300과 같이 하부 기둥구조의 강성이 매우 작은 모델들은 상부 지붕구조의 무게에 의하여 하부 기둥에서 과도한 정적변위가 발생하여 진동대 실험을 수행할 수 없었다.

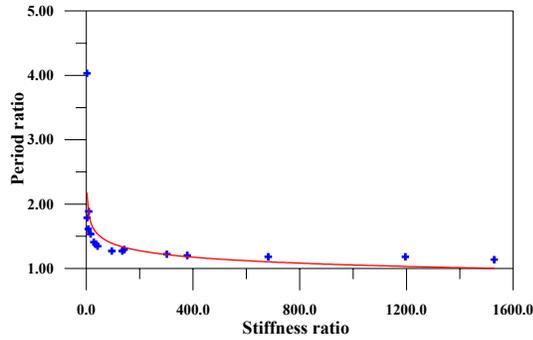
<Table 7> Natural period by shaking table test

Models	Period (sec)	Models	Period (sec)
0-00-000	0.248		
B-15-100	0.298	P-15-100	0.468
B-15-200	0.315	P-15-200	I
B-15-300	0.334	P-15-300	Non
B-20-100	0.293	P-20-100	0.349
B-20-200	0.303	P-20-200	0.400
B-20-300	0.315	P-20-300	0.443
B-30-100	0.273	P-30-100	0.321
B-30-200	0.282	P-30-200	0.341
B-30-300	0.293	P-30-300	0.381

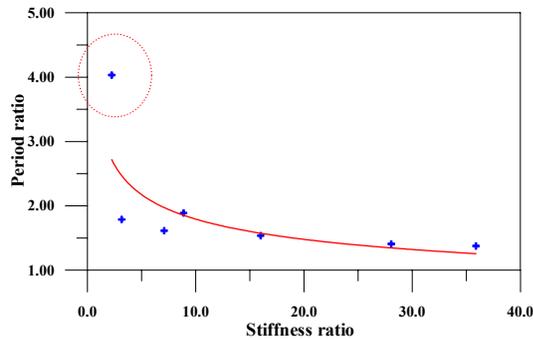
실험이 가능하였던 모델 중에서 모델 P-15-100과 모델 P-15-200의 측정 데이터의 신뢰성이 떨어지므로 실험에 의한 1차 고유진동주기 분석에 활용하지 않는다.

<Fig. 6>은 실험에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동수 비율을 나타낸 것이다. 일부 모델을 제외하고는 대부분 모델들의 1차 고유진동수 비율이 하부 기둥구조가 없는 모델 0-00-000의 1차 고유진동수와 비교하여 약간 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 하부 기둥구조의 강성이 전체 구조물

의 고유진동주기에 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다.



(a) Stiffness ratio: ~ 1600



(b) Stiffness ratio: ~ 40

<Fig. 6> Period ratio by shaking table test

하부구조 강성이 가장 큰 모델 B-30-100의 1차 고유진동주기가 하부 기둥구조가 없는 모델 0-00-000의 1차 고유진동주기와 비교하여 약 10% 더 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 하부구조 강성이 비교적 가장 작은 P-20-300의 1차 고유진동주기가 하부 기둥구조가 없는 모델 0-00-000의 1차 고유진동주기와 비교하여 약 78% 더 큰 것을 볼 수 있다.

#### 4.4 축소 아치구조물의 고유진동 주기 분석

수치해석에 의한 1차 고유진동주기와 진동대 실험에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기의 비를 <Table 8>과 <Table 9>에 나타내었다. <Table 8>은 하부 기둥의 재질이 황동이며 <Table 9> 하부 기둥의 재질이 폴리카보네이트이다.

<Table 8> Natural period of models with brass material

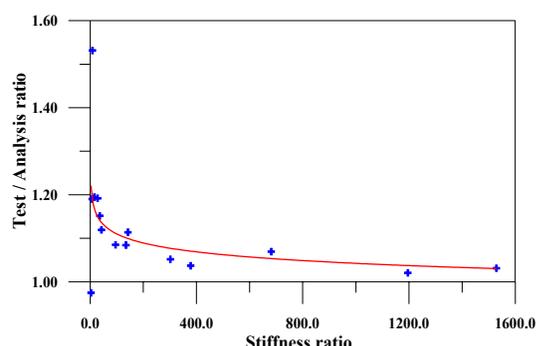
Models	Analysis (sec)	Test (sec)	Ratio
B-15-100-10	0.287	0.298	104%
B-15-200-10	0.290	0.315	109%
B-15-300-10	0.298	0.334	112%
B-20-100-10	0.287	0.293	102%
B-20-200-10	0.288	0.303	105%
B-20-300-10	0.291	0.315	108%
B-30-100-10	0.273	0.273	100%
B-30-200-10	0.274	0.282	103%
B-30-300-10	0.274	0.293	107%

하부 기둥의 재질이 황동인 모델들의 수치해석과 진동대 실험에 의한 1차 고유진동주기는 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 고유진동주기 차가 가장 큰 것이 모델 B-15-200으로 약 9% 차이를 보이고 있다. 모델 B-30-100은 고유진동주기 차가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

<Table 9> Natural period of models with PC material

Models	Analysis (sec)	Test (sec)	Ratio
P-15-100-10	0.306	0.468	153%
P-15-200-10	0.444	I	-
P-15-300-10	0.723	Non	-
P-20-100-10	0.293	0.349	119%
P-20-200-10	0.336	0.400	119%
P-20-300-10	0.455	0.443	97%
P-30-100-10	0.288	0.321	111%
P-30-200-10	0.296	0.341	115%
P-30-300-10	0.319	0.381	119%

하부 기둥의 재질이 폴리카보네이트 모델들의 수치해석과 진동대 실험에 의한 1차 고유진동주기의 차는 약 20% 정도 나타나고 있다. 모델 B-20-300은 다른 모델과 다르게 진동대 실험에 의한 1차 고유진동주기가 수치해석에 의한 1차 고유진동주기보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 실험체 조립시 체결에 문제가 있었을 것으로 판단된다.



<Fig. 7> Period ratio shaking table test with analysis

<Fig. 7>은 수치해석에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기와 진동대 실험에 의한 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기의 비를 그래프로 나타낸 것이다. 하부 구조의 강성이 클수록 수치해석과 진동대 실험에 의한 1차 고유진동주기의 차가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하부구조의 강성에 따른 대공간 구조물의 동적특성을 알아보기 위하여 수치해석과 진동대 실험을 통하여 축소 아치구조물의 고유진동주기를 분석하였다.

하부구조 강성비율에 따른 축소 아치구조물의 1차 고유진동주기 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

하부 기둥구조의 강성이 클수록 축소 아치구조물의 고유진동주기가 기둥이 없는 구조물의 고유진동주기와 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다.

또한, 하부구조의 강성이 비교적 큰 황동재질의 축소 아치구조물은 수치해석에 1차 고유진동주기가 진동대 실험에 의한 1차 고유진동주기와 매우 유사하다.

향후 연구에서는 기둥의 강성의 영향을 고려함에 있어서 재료적 강성의 차이와 상부의 질량변화에 의한 아치구조물의 동적거동의 변화를 알아 볼 필요가 있을 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 2015년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음

## References

1. Joo-Won Kang, Keun-Yung Seok, Sang-Hoon Lee and Gee-Cheol Kim(2009), Experimental Study on Natural Period for Arch Structure with Column, Journal of the Association for Spatial Structure, Vol. 9, No. 2, pp.83-90
2. Gee-Cheol Kim, Joo-Won Kang and Hyun Ko, (2010), Seismic Response of Large Space Structure with Various Substructure, Journal of the Association for Spatial Structure, Vol. 10, No. 3, pp.81-90
3. Joo-Won Kang and Keun-Yung Seok, (2010), Shaking Table Tests of Arch Structure with Various Column Stiffness for Evaluation of Seismic Responses, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 26, No. 1, pp.87-94
4. Joo-Won Kang and Sang-Hoon Lee and Gee-Cheol Kim(2010), Seismic Response of Arch Structure with Column, Journal of the Association for Spatial Structure, Vol. 10, No. 1, pp.95-102
5. Gee-Cheol Kimn and Joo-Won Kang, (2014), Seismic Response Control of Dome Structure Subjected to Multi-Support Earthquake Excitation, Journal of the Association for Spatial Structure, Vol. 14, No. 4, pp.89-98
6. Gee-Cheol Kimn and Joo-Won Kang, (2014), Seismic Response Analysis of Spatial Structure According to Earthquake Excitation Direction, Journal of the Regional Association of Architectural

- Institute of Korea, Vol. 16, No. 6,  
pp.189-195
7. Gee-Cheol Kimn and Joo-Won Kang,  
(2015), Analysis of Seismic Response  
Characteristics of Small Scale Arch  
Structure by Shaking Table Test, Journal of  
the Association for Spatial Structure, Vol.  
17, No. 4, pp.129-135
  8. SungPil Chang, NamSo Cho, JuWon Seo  
and HuiGwan Yang, (2006), A Study on  
Similitude Law for Pseudodynamic Tests  
and Shaking Table Tests on Small-scale  
R/C Models, Proceedings of Earthquake  
Engineering Society of Korea, Vol. 10, No.  
1, pp.545-552

- Received : November 24, 2015
- Revised : December 08, 2015
- Accepted : December 08, 2015