

# 하부기둥에 따른 아치구조물의 고유주기 변화에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Natural Period for Arch Structure with Column

강주원\*  
Kang, Joo-Won

석근영\*\*  
Seok, Keun-Yung

이상훈\*\*\*  
Lee, Sang-Hoon

김기철\*\*\*\*  
Kim, Gee-Cheol

### 요 약

기존에 공간구조물의 동적거동에 관한 대부분의 연구는 수치해석적 방법을 이용하여 지붕구조의 동적거동 파악을 위주로 하고 있다. 그러나 실제 공간구조물의 지붕구조는 기둥 또는 벽체와 같은 하부구조에 의해 지지되므로 지진발생시 상부구조의 동적거동은 하부구조에 따라서 많은 영향을 받는다. 본 연구에서 아치구조물에 대한 하부 기둥구조의 재질을 황동과 폴리카보네이트로 하고 각각의 단면 및 길이 변화와 상부 지붕구조의 추가질량에 따른 고유주기 변화특성을 파악하고자 한다. 기둥의 단면 및 길이 변화에 따른 전체적인 고유주기의 변화는 유사하였으나, 폴리카보네이트 재질의 기둥이 황동 재질의 기둥과 비교하여 기둥의 강성 및 추가질량의 변화에 대하여 고유주기의 변화율이 상대적으로 크게 나타났다. 즉 하부 기둥구조의 강성이 상부 지붕구조의 강성과 비교하여 매우 큰 경우에 기둥구조의 강성변화나 지붕구조의 질량변화에 따른 공간구조물의 고유진동수 변화가 거의 없다.

### Abstract

The previous studies for dynamic behavior of spatial structure have been zoomed in on roof structure by numerical analytic method. But the roof structure of real spatial structures is supported by lower structure as column and wall. So, when earthquake is occurred, it is predicted that dynamic behavior of roof structure is affected by lower structure.

Therefore, on this study, natural period characteristics of arch structures are analyzed according to section, length and the modulus of elasticity of brass column and polycarbonate column and additional mass of roof structure by the scale-down model of arch structure as the most simple structure of spatial structures. The changes of natural periods are generally alike. But, when Polycarbonate column is connected to roof structure, the change of natural period for change of section is relatively large. That means that change of section and length of column and additional mass of roof structure have less influence on change of stiffness because the modulus of elasticity of brass is relatively large.

키워드 : 공간구조물, 동적거동, 지붕구조, 하부구조, 황동, 폴리카보네이트

Keywords : spatial structure, dynamic behavior, roof structure, lower structure, brass, polycarbonate

## 1. 서 론

공간구조물의 주요 용도가 체육관, 강당, 홀 등과 같이 대규모의 인원을 수용할 수 있는 시설로서 이용

되는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 건축물은 지진이나 태풍시 피난·방화거점으로 이용된다. 그러므로 공간건축물의 사용성 및 안정성 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다.<sup>1,6)</sup>

공간구조물은 아치, 배럴볼트, 돔형상을 기본으로 하고 있으며 그 동적거동에 있어서 아치의 진동특성으로 근본적으로 내재하고 있다. 기존 연구에 따르면 공간구조물의 지진에 대한 동적거동은 일반 라멘구조와는 다르게 상하로 진동하기 쉬우며 공간구조물의 동적특성으로 인하여 수평 지진동에 의해서 진동응답

\* 정회원 · 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

\*\* 영남대학교 대학원 건축학과 박사과정

\*\*\* 영남대학교 대학원 건축학과 석사과정

\*\*\*\* 교신저자, 정회원 · 서일대학 건축과 조교수, 공학박사

TEL : 02-490-7582 Fax : 02-490-7427

E-Mail : beat67@seoil.ac.kr

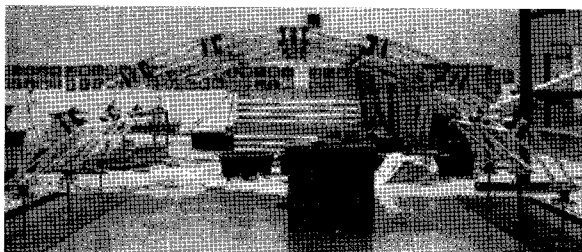
이 크게 발생하기도 한다. 또한, 고유주기가 서로 인접하여 있어 고차의 고유진동모드의 영향을 받기도 한다. 이들 연구는 공간구조물의 상부 지붕구조에 대한 수치해석적인 방법에 국한하여 연구된 것이 대부분이다. 그러나 실제 공간구조물에는 지붕구조를 지지하는 하부구조인 기둥 또는 벽체 등이 존재하게 되고, 지진발생시 이 하부구조는 상부구조 동적거동에 영향을 준다는 것을 예측할 수 있다.<sup>2)</sup> 그러므로, 공간구조물 특유의 진동특성을 내진설계에 반영하기 위해서는 실제 공간구조물과 같이 하부구조의 영향을 고려해야만 한다.

따라서, 본 연구에서는 아치구조물에 기둥을 설치한 축소모형을 대상으로 기둥의 강성에 영향을 주는 주요 인자들에 따른 아치구조물의 고유주기 변화를 분석하여, 공간구조물의 하부구조에 따른 상부구조의 기본적인 동적특성의 변화를 파악하고자 한다.

## 2. 시험체 및 실험방법

### 2.1 아치구조물 시험체

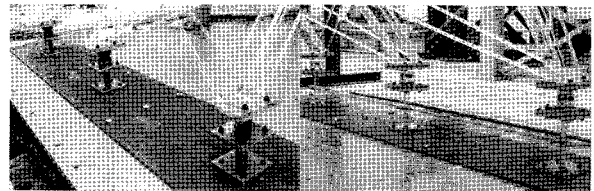
실제 공간구조물에 대하여 상사의 법칙을 적용하여 축소모형을 제작할 경우에 시험체 제작이 불가능할 정도의 부재단면이 설계되었으며, 축소된 모형의 강성이 너무 커서 공간구조물의 동적특성을 갖지 못하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 실제 공간구조물의 동적특성을 갖도록 아치 시험체의 상부 지붕구조와 하부 기둥구조의 재질, 단면, 길이 등을 선정하여 시험체를 제작하였다.



〈그림 1〉 축소모형

시험체의 지붕구조는 복층 아치구조물로 경간이 4m이고 높이가 1.2m이다. 재질은 폴리카보네이트(P.C.)이며 상하현재의 단면은 60×20(mm)이고 상하현 연결재의 단면은 30×10(mm)이다. 또한 상하현재

의 각각 7개 절점에 5N의 하중을 추가할 수 있도록 하였다. 하부구조는 기둥으로 선정하여 제작하였고, 지붕구조와의 접합부는 힌지로 제작되었다. 〈그림 1〉은 지붕구조와 기둥구조가 결합된 상태의 아치구조물 시험체이다. 기둥의 강성변화에 따른 아치구조물의 고유주기를 측정하기 위해서는 하부구조 재질의 변화가 요구되므로 〈그림 2〉에서와 같이 기둥의 재질을 황동과 폴리카보네이트로 선정하였다.



(a) 황동기둥 (b) 폴리카보네이트 기둥

〈그림 2〉 상부구조에 결합된 기둥

본 연구에서는 기둥 강성변화의 주요 요인으로 기둥 재질에 따른 기둥의 탄성계수, 기하학적 형상에 따른 기둥의 단면과 길이 그리고 각 경우에 대한 지붕구조의 추가질량의 변화로 선정하여 시험체에 적용하였다.

### 2.2 고유주기 측정장비

시험체의 고유주기를 측정하기 위하여 진동계측 전용장비인 가속계를 이용하여 가속도응답을 측정하였다. 가속도계는 ICP 타입으로 민감도는 50mV/g이며 측정범위는 0.3Hz~17,000Hz에서 ±120g까지 측정이 가능하다. A/D변환기의 분해능력은 12비트이며 초당 최대 200,000개의 데이터를 샘플링 할 수 있는 장치이다.



(a) 1/4 지점 (b) 1/2 지점

〈그림 3〉 상부구조에 장착된 가속도계

가속도계는 가운데에 있는 아치의 1/4지점과 1/2 지점에 〈그림 3〉과 같이 수평과 수직방향으로 각각 설치하였다. 가속도계를 1/4과 1/2지점에 설치한 이

유는 지진응답이 가장 크게 나타나며 이에 대한 분석을 통하여 아치구조물의 전체적인 거동을 분석할 수 있기 때문이다.<sup>1),2),5)6)</sup>

〈표 1〉 기둥의 제원과 지붕구조의 추가질량

재 질	단면 (mm×mm)	길이 (mm)	추가질량 (N)
황동(Brass) 탄성계수 ( $9.8 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	15×15	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10
	20×20	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10
	30×30	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10
폴리카보네이트 (polycarbonate) 탄성계수 ( $3.16 \times 10^8$ N/mm <sup>2</sup> )	15×15	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10
	20×20	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10
	30×30	100	0, 5, 10
		200	0, 5, 10
		300	0, 5, 10

### 2.3 시험체 구성 및 실험방법

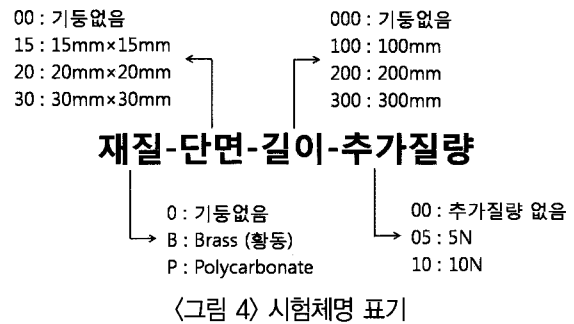
시험체는 〈표 1〉과 같이 기둥의 재질, 단면, 길이와 지붕의 추가질량에 따라 조합하여 조립할 수 있도록 하였다. 이에 따라 〈표 1〉과 같은 조건으로 기둥을 교체하면서 실험을 수행하였다. 고유주기를 측정하기 위해서 인력으로 가력한 후에 공진현상에 따라 진폭이 충분히 성장한 시점에서 가력을 정지하고 가속도계를 통해 측정된 자유진동응답을 측정하고 이를 분석하여 고유주기를 측정하고자 하였다.<sup>3),4)</sup>

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 실험 결과

〈표 2〉는 하부에 기둥이 없는 지붕구조만의 고유주기를 측정한 결과로서, 추가되는 하중이 커짐에 따라서 주기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 〈표 3〉은 기둥 재질, 단면 및 길이 그리고 추가질량의 변화에 따른 고유주기를 나타낸 것으로 기둥강성의 변화에 따라서 주기가 변하는 것을 볼 수 있다. 각 시험체 명칭의 표기는 〈그림 4〉와 같이 구성된다.

〈표 3〉에 회색으로 표시된 부분의 시험체들은 기둥의 단면이 상대적으로 작고 폴리카보네이트 재질의 탄성계수가 비교적 작아 상부구조의 자중에 의한 기둥의 변위가 매우 크게 발생하여 실험이 불가능하거나 신뢰할 수 없는 고유주기가 측정된 것을 나타낸다.



〈표 2〉 기둥이 없는 시험체의 고유주기

시 험 체	고유주기 (sec)
0-00-000-00	0.221
0-00-000-05	0.234
0-00-000-10	0.248

#### 3.2 기둥의 길이변화에 따른 고유주기 분석

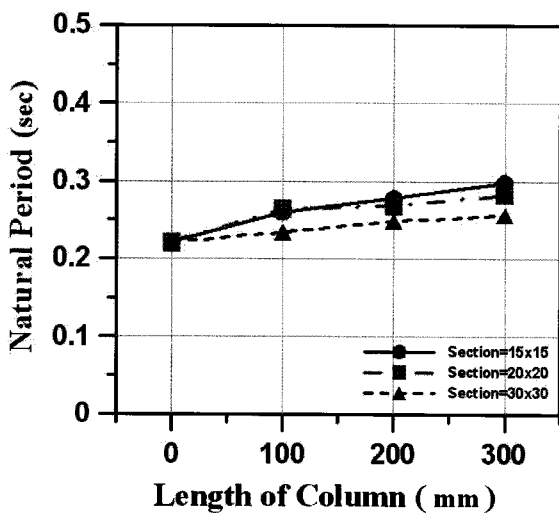
하부기둥의 길이 변화에 따른 축소모형 시험체의 고유주기의 변화를 분석하였다.

〈그림 5〉는 지붕구조에 추가질량별로 구분하여 각각의 경우에 대하여 황동기둥의 단면 크기별로 기둥 길이의 변화에 따른 고유주기의 변화를 나타내고 있다. 전체적으로 기둥의 길이가 증가함에 따라서 기

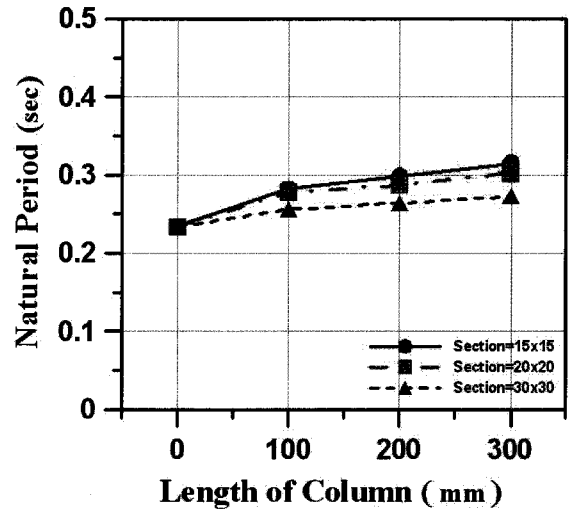
〈표 1〉 기둥의 제원과 지붕구조의 추가질량

시험체	고유주기 (sec)	시험체	고유주기 (sec)
B-15-100-00	0.260	P-15-100-00	0.364
B-15-100-05	0.282	P-15-100-05	0.455
B-15-100-10	0.298	P-15-100-10	0.468
B-15-200-00	0.278	P-15-200-00	1.000
B-15-200-05	0.298	P-15-200-05	1.000
B-15-200-10	0.315	P-15-200-10	1.000
B-15-300-00	0.298	P-15-300-00	1.000
B-15-300-05	0.315	P-15-300-05	실험불가
B-15-300-10	0.334	P-15-300-10	실험불가
B-20-100-00	0.264	P-20-100-00	0.298
B-20-100-05	0.278	P-20-100-05	0.328
B-20-100-10	0.293	P-20-100-10	0.349
B-20-200-00	0.269	P-20-200-00	0.410
B-20-200-05	0.287	P-20-200-05	0.400
B-20-200-10	0.303	P-20-200-10	0.400
B-20-300-00	0.282	P-20-300-00	실험불가
B-20-300-05	0.303	P-20-300-05	실험불가
B-20-300-10	0.315	P-20-300-10	0.443
B-30-100-00	0.234	P-30-100-00	0.278
B-30-100-05	0.256	P-30-100-05	0.298
B-30-100-10	0.273	P-30-100-10	0.321
B-30-200-00	0.248	P-30-200-00	0.298
B-30-200-05	0.264	P-30-200-05	0.321
B-30-200-10	0.282	P-30-200-10	0.341
B-30-300-00	0.256	P-30-300-00	0.331
B-30-300-05	0.273	P-30-300-05	0.356
B-30-300-10	0.293	P-30-300-10	0.381

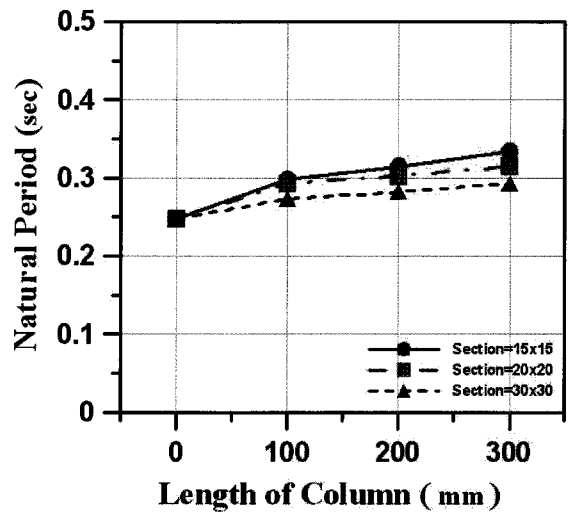
등의 강성이 작아지므로 고유주기가 증가하고 있다. 또한 〈그림 5〉의 (a), (b), (c)를 비교해 보면, 추가질량이 증가함에 따라 고유주기가 다소 커지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 고유주기의 변화가 그다지 크지 않으며 고유주기의 변화양상은 매우 비슷한 것으로 나타났다.



(a) 추가질량 mass=0



(b) 추가질량 mass=5N

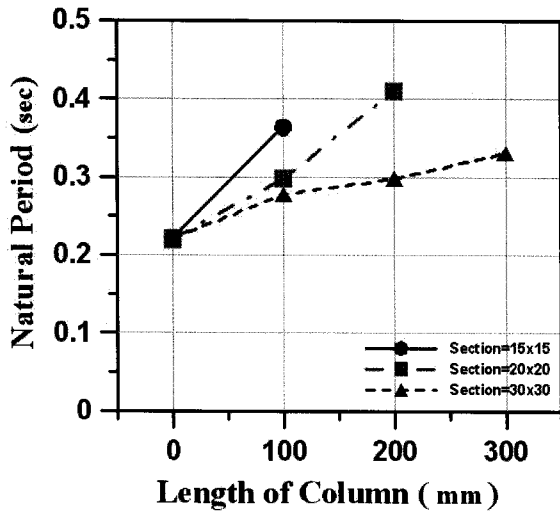


(c) 추가질량 mass=10N

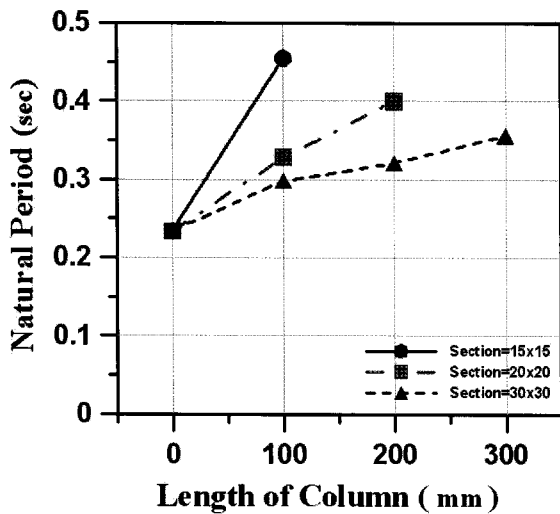
〈그림 5〉 황동기둥 길이에 따른 고유주기 변화

〈그림 6〉에서는 폴리카보네이트 재질 기둥의 고유주기를 타내고 있다. 기둥단면이 15×15(mm), 20×20(mm)인 경우에 기둥의 강성이 작아서 시험체 기둥에 큰 변위가 발생하여 고유주기의 측정이 불가능하였다. 기둥 길이 변화에 따른 고유 주기 변화 양상은 황동기둥의 경우와 같이 기둥의 길이가 길수록 고유주기가 길어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 고유주기의 증가정도가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 폴리카보네이트의 탄성계수가 황동과 비교하여 상대적으로 작기 때문에 기둥의 기하학적 형상에 의한 강성의 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 기둥단면이 30×30(mm)인 경우를 비교해 보면, 추가질량이 증가함에 따라 두 그래프의 기울기가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 매우 큰 탄성계수를

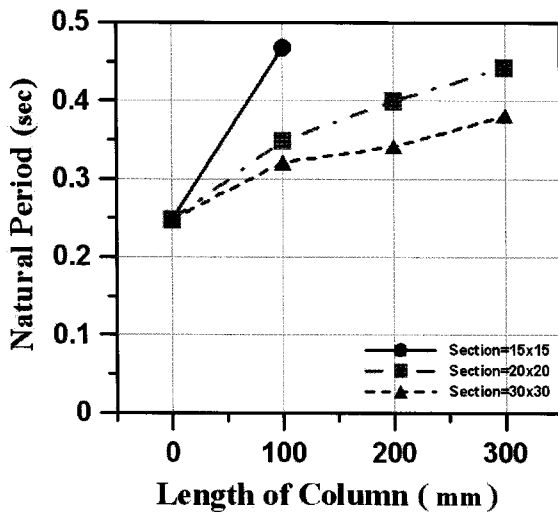
같은 황동기둥의 강성이 시험체의 고유주기 변화에 대하여 지배적인 것을 알 수 있다.



(a) 추가질량 mass=0



(b) 추가질량 mass=5N

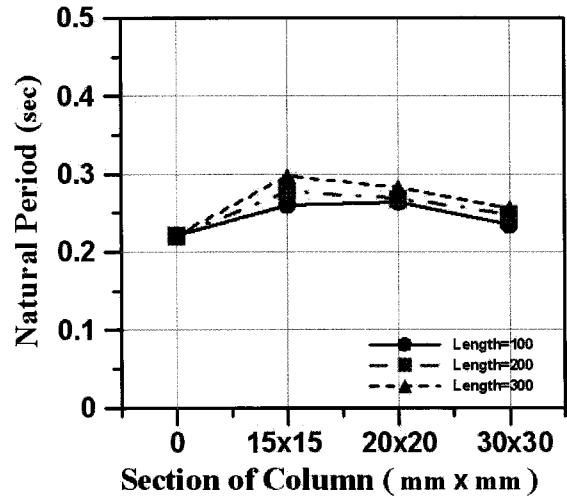


(b) 추가질량 mass=5N

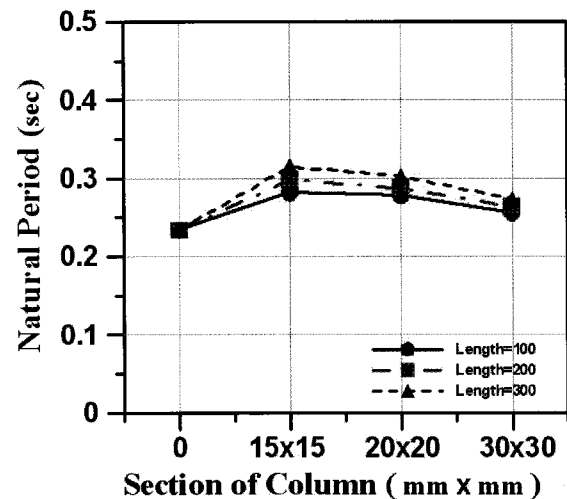
(그림 6) Polycarbonate기둥 길이에 따른 고유주기 변화

### 3.3 기둥의 단면변화에 따른 고유주기 분석

기둥의 길이별 단면 변화에 따른 시험체의 고유주기 변화를 분석하였다.

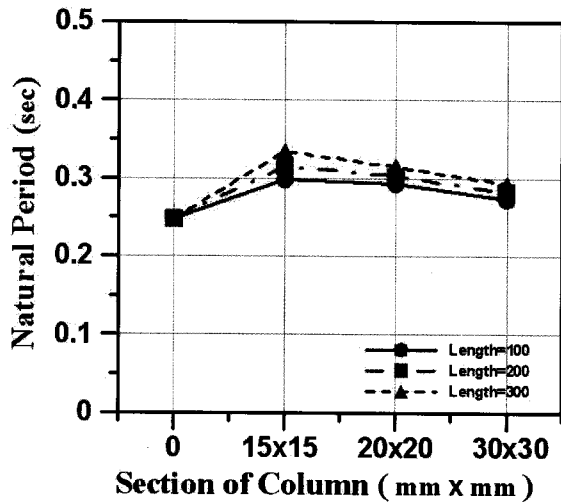


(a) 추가질량 mass=0

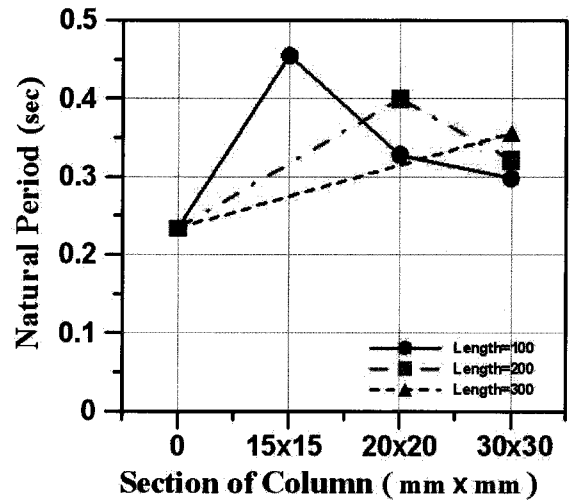


(b) 추가질량 mass=5N

(그림 7)은 황동기둥이 설치된 경우로서 단면이 증가함에 따라 강성이 커지므로 이로 인하여 고유주기가 감소하는 것을 나타낸다. 단면이 매우 큰 경우에 기둥강성이 상당히 커지므로 기둥이 강체거동을 하므로 고유주기가 상부구조가 기초에 직접 연결되는 아치구조의 고유주기와 같을 것이다. 추가질량별로 비교해 보면 질량이 증가할수록 전체적으로 고유주기가 증가하고는 있으나 그 변화가 크게 나타나지는 않고 있다. 이는 앞서 길이변화에 대한 경우와 마찬가지로 황동기둥의 탄성계수가 상대적으로 크고, 추가되는 질량의 증가가 비교적 작아서 탄성계수에 의한 기둥



(c) 추가질량 mass=10N

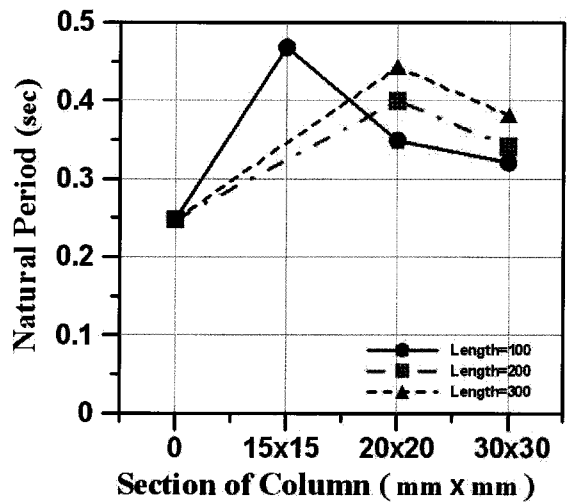


(b) 추가질량 mass=5N

〈그림 7〉 황동기둥 단면에 따른 고유주기 변화

강성이 시험체의 고유주기에 지배적인 영향을 미치고 있다고 할 수 있다.

〈그림 8〉은 폴리카보네이트 기둥이 설치된 경우이다. 황동기둥과 마찬가지로 각기둥 길이별로 단면이 증가함에 따라 기둥의 강성이 커져서 고유주기가 감소하는 양상을 보이고 있다. 추가질량별로 비교해보면, 황동기둥의 경우 비슷하게 질량이 증가할수록 고유주기가 다소 증가하게 된다. 그러나 황동기둥의 경우와는 다르게 단면이 변화함에 따라 그래프의 기울기가 비교적 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 기둥의 길이변화와 마찬가지로 폴리카보네이트 기둥의 탄성계수가 상대적으로 작아서 기둥의 기하학적 형상에 의한 강성의 영향이 큰 것을 의미한다.



(c) 추가질량 mass=10N

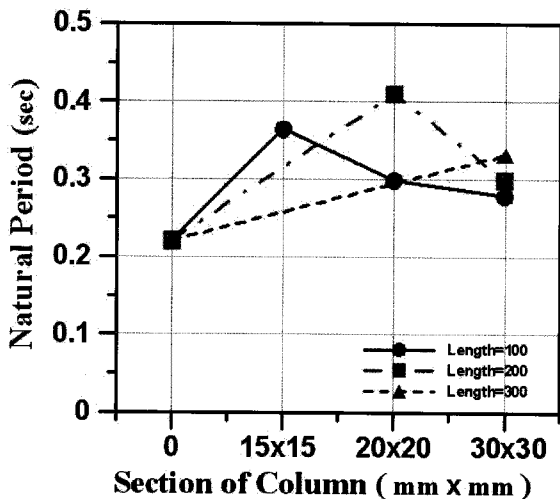
〈그림 8〉 Polycarbonate기둥 단면에 따른 고유주기 변화

### 3.4 기둥재질에 따른 고유주기 분석

기둥의 길이 및 단면의 변화에서 알 수 있듯이, 황동과 폴리카보네이트 기둥의 탄성계수의 차이로 인하여 고유주기 변화에 주요 요인들의 영향이 상대적으로 다르게 나타났었다. 이를 좀 더 명확하게 파악하기 위해 〈그림 9〉에서는 추가질량별로 구분하여 기둥의 재질에 따른 고유주기의 변화를 나타내고 있다.

〈표 1〉에서와 같이 시험체에 적용된 기둥의 재질인 황동의 탄성계수는 이고, ( $9.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ) 폴리카보네이트의 탄성계수는 ( $3.16 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ )이다.

〈그림 9〉에 나타난 것처럼, 탄성계수가 상대적으로 큰 황동기둥이 설치된 경우에 시험체의 고유주기가 작게 나타났다. 또한 기둥의 기하학적 강성이 작을



(a) 추가질량 mass=0

수록 폴리카보네이트 기동이 설치된 경우와 황동기동이 설치된 경우의 고유주기 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 폴리카보네이트 기동이 설치된 시험체가 기동의 단면 및 길이 변화에 따라 고유주기의 변화가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

추가질량에 따라 고유주기의 변화양상을 살펴보면, 추가질량이 증가함에 따라 전체적으로 고유주기가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 황동기동의 경우는 추가질량이 변화에 대해 단면 및 길이 변화에 따른 고유주기의 차이가 미소하나 폴리카보네이트 기동의 경우는 각 단면 및 길이 변화에 따른 고유주기 차이가 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급된 것처럼, 고유주기 변화에 있어서 기동의 탄성계수가 큰 경우에 하부구조의 강성이 크기 때문에 지붕구조의 질량변화에 의한 영향이 작다. 반대로 기동의 탄성계수가 작은 경우에 하부구조의 강성이 작기 때문에 지붕구조의 질량변화에 의한 영향이 커진다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

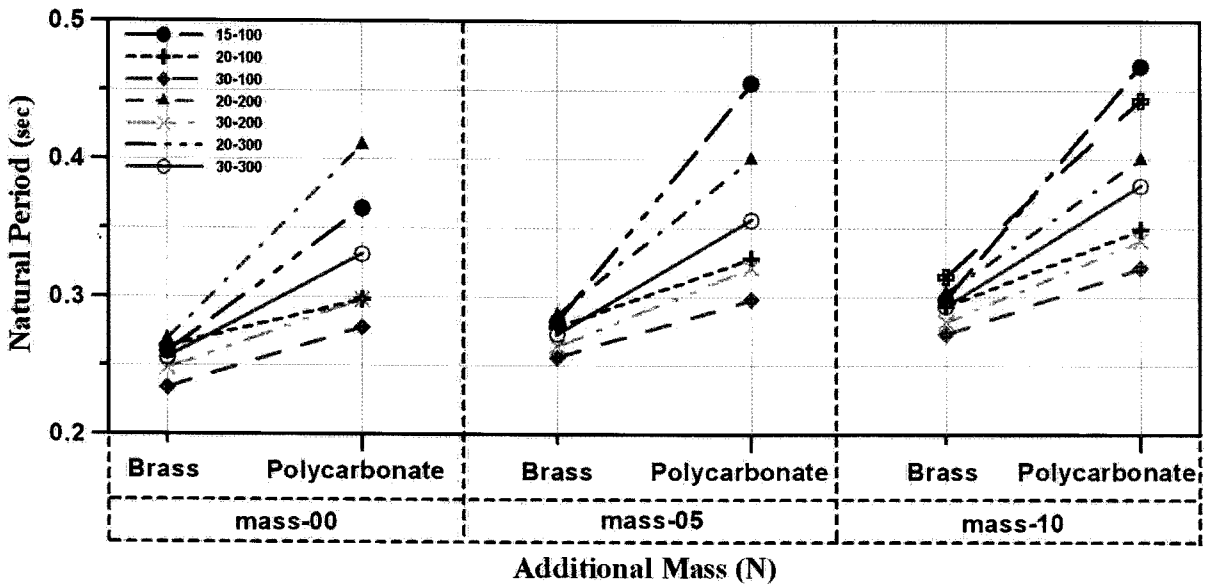
본 연구에서는 상부구조를 아치로 하부구조를 기동으로 한 축소모형의 기동의 재질, 단면 크기, 길이 변화와 지붕구조의 추가질량을 변화에 따른 시험체의 고유주기를 분석하였다.

기동의 길이를 증가시킬 경우에 상대적으로 탄성계수가 작은 폴리카보네이트 기동의 고유주기 증가정도가 크게 나타났다. 그리고 기동 단면의 크기가 작아질 경우에 기동의 길이변화와 마찬가지로 폴리카보네이트 기동의 고유주기 증가정도가 크게 나타났다.

지붕구조의 질량이 증가함에 따라 고유주기가 증가하는 경향을 보였다. 이 경우도 앞서 길이와 단면의 변화에 경우와 마찬가지로 폴리카보네이트 기동이 설치된 경우에 그 변화의 정도가 큰 것으로 나타났다.

황동 기동의 탄성계수가 상대적으로 크기 때문에 단면, 길이, 지붕 추가질량 등에 대하여 고유주기 변화가 크게 나타나지 않고 있으나, 폴리카보네이트 기동의 경우에 탄성계수가 상대적으로 작기 때문에 단면, 길이 및 지붕 질량변화에 대한 고유주기의 변화가 크게 나타났다. 즉, 하부 기동구조의 강성이 상부 지붕구조의 강성보다 상대적으로 매우 큰 경우에 기동구조의 강성변화나 지붕구조의 질량변화에 따른 공간구조물의 고유진동수 변화가 거의 나타나지 않고 있다.

향후 연구에 있어서는, 고유주기에 영향인자 중에서 탄성계수 및 기하학적 형상뿐만 아니라 하부구조의 길이 및 재질의 이질화에 따른 공간구조물의 동적 거동특성에 관한 실험적 연구도 필요할 것이다.



(그림 9) 기동재료에 따른 고유주기

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 정찬우, 박성무, 강주원, “아치구조물의 모의 지진파 입력에 따른 지진응답특성에 관한연구” 한국 공간 구조학회 논문집, 통권 34호, pp.59-66, 2008
2. 정찬우, 강주원, “하부구조가 지붕구조의 지진응답에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국 공간 구조학회 논문집, 통권 24호, PP.63~74, 2007
3. 윤성원, 강동균, “자유진동실험에 의한 저층 RC 건물의 진동특성 평가” 대한건축학회 학술발표 논문집, Vol. 22, No.1, 2002
4. 윤성원, “하프파워법과 인력가진법에 의한 감쇠율 비교”, 한국 공간 구조학회 논문집, 통권 30호, pp.95-103, 2008
5. 신지욱, 이기학, 정찬우, 강주원, “지진하중에 대한 복층 배럴볼트 시스템의 동적거동에 대한 연구”, 한국 공간 구조학회 논문집, 통권 35호, pp.87~94, 2009
6. 정찬우, 석근영, 강주원, “깁러킨법을 이용한 아치의 고유진동해석”, 한국 공간 구조학회 논문집, 통권 26호, pp.55~61, 2007

접수일자 : 2009년 4월 8일  
심사완료일자 : 2009년 5월 13일  
게재확정일자 : 2009년 5월 16일