

# 하부기둥을 갖는 아치 구조물의 지진응답에 관한 연구

## Seismic Response of the Arch Structure with Column

강 주 원\*  
Kang, Joo-Won

이 상 훈\*\*  
Lee, Sang-Hoon

### 요 약

공간구조물은 일반 라멘구조와는 다른 동적특성을 가지고 있으며, 이런 동적특성에 관해 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 특정 형태의 공간구조물에 대해 수행되었으며, 내진설계를 위해 직접적으로 이용 가능한 연구결과는 매우 제한적이다. 본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 동적특성을 내재한 트러스-아치구조물을 대상으로 양단의 기둥의 길이가 다른 경우에 트러스-아치구조물의 지진응답변화를 분석하고자 한다. 양단 기둥 길이의 차이에 따라, 가속도 응답이 수평방향에 비해 수직방향에서 더 많은 영향을 받는다. 따라서 상부구조물을 지지하는 하부구조물의 강성이 다른 경우에 공간구조물의 내진설계에 있어서 수직방향 응답에 대한 고려가 더욱 많이 요구된다.

### Abstract

Spatial structures have the different dynamic characteristics from general rahmen structures and many studies on dynamic behavior of it is conducted. But most studies was conducted about the particular shape of spatial structures and, directly, the usable results of studies are very limited for seismic design of spatial structures with the lower structure. So, this study is conducted about the truss arch structure that the basic dynamic characteristics of spatial structure is inherent in, and the change of its seismic response is analyzed when columns have different length on both ends of it. According to the difference of column's length on both ends, the vertical acceleration response of truss arch structure is affected more than the horizontal acceleration response of it. Therefore, when the stiffness of lower structures that support the upper structure is different, the consideration of the vertical response is significantly required for the seismic design of spatial structures

키워드 : 동적응답특성, 공간구조물, 아치, 하부구조

Keywords : Dynamic Response Character, Spatial Structure, Arch, Lower Structure

## 1. 서 론

공간구조물은 일반 라멘구조물에 비하여 경량이기 때문에 내진설계에 적용되는 지진하중은 비교적 작다. 그러나 대부분의 공간구조물은 체육관, 강당, 홀 등의 시설로써 이용되며 대규모의 인원을 수용할 수 있다. 이로 인해

지진시의 피난거점으로서도 이용될 수 있으므로 이러한 공간구조물은 지진에 대한 안전성 확보가 요구된다. 특히 최근에 고층화, 대형화 되고 있는 건축시장의 동향을 분석해 볼 때, 공간구조물의 안전성 확보 및 적합한 설계와 시공을 위해 공간구조물의 동적 특성에 대한 연구가 필요할 것이다.<sup>3),5)</sup>

공간구조물의 동적거동에 있어서 일반 라멘구조물과 유사하게 수평지진동의 영향이 크지만, 수평지진동에 의해 상하진동이 발생하기 쉬운 특성을 가지고 있다. 특히 라이즈(Rise)가 큰 구조형식에서는 이러한 특성이 크게

\* 정희원 · 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

Tel: 053-810-2429 Fax:053-810-4625

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

\*\* 영남대학교 대학원 건축학과 석사과정

나타난다. 또한 스패인이 길어지게 되면 고유주기가 다소 길어지는 특징을 보이게 된다. 공간구조물의 고유주기와 진동모드는 그 형태와 높이, 스패인, 지지조건에 영향을 크므로, 동적거동에 관해 일반적 서술보다도 형태와 지지 형식 등에 대한 분석이 필요하게 된다.<sup>6),8)</sup>

1995년 고베 지진에 의한 공간구조의 피해보고서에 따르면, 주요 피해는 상부구조를 지지하는 기둥 또는 벽체에서 발생되며, 상부구조는 상대적으로 피해가 적었던 것으로 보고되었다. 또한 상부구조물을 지지하는 양쪽 하부구조의 강성이 서로 다를 경우 상부구조에서는 양쪽 지점의 변위 차이로 인해 발생한 공간구조물의 피해도 다수 보고되었다.<sup>8)</sup> 그래서 많은 연구들이 지붕구조와 하부구조물인 기둥 또는 벽체의 상호작용과 하부구조물의 항복에 따른 지붕구조의 응답저감효과에 대해 집중되어 왔으나 대부분의 연구들은 공간구조의 특정형태에 대해서만 수행되어져 왔다. 따라서 공간구조물의 내진설계에 있어 하부구조물의 영향이 고려되어질 경우에 직접적으로 이용 가능한 연구결과는 매우 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 라이즈(Rise)를 가지는 공간구조물의 기본적인 동적특성을 가지는 아치구조물을 상부구조로 하고 이를 지지하는 하부구조의 길이를 양단에서 서로 다르게 함으로써 양단하부구조의 강성 차이에 따른 상부구조의 지진응답 특성의 변화를 분석하고자 한다.

## 2. 아치구조물의 동적특성

공간구조물은 공간을 이루는 아치나 돔과 같은 상부의 지붕구조물이 하부의 기둥이나 벽에 지지되거나 직접 기초에 지지될 수도 있다. 공간구조물의 동적거동은 상부구조물이 직접기초에 연결된 아치구조의 동적거동을 기본적으로 내재하고 있다. 그러나 실제 구조물은 대부분 하부구조에 지지되며, 하부구조에 지지되어도 그 응답 특성은 기본적으로는 직접기초에 지지된 아치구조와 유사한 응답 특성을 보인다.<sup>6),8)</sup>

아치구조물의 동적특성은 구조물의 형상에 따라 영향을 받으며, 라이즈-스팬비(Rise-span ratio)에 의해 이들의 전반적인 영향을 유추할 수 있다. 일반적인 아치구조물의 진동모드 양상은 <그림 1>에서처럼 수평지진동에

반응하는 역대칭 모드와 상하 지진동에 반응하는 대칭모드가 얻어진다.



1차 모드 (역대칭 모드)



2차 모드 (대칭모드)



3차 모드 (역대칭모드)



4차 모드 (대칭모드)

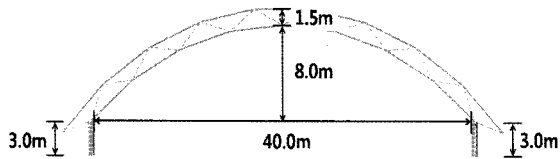
<그림 1> 아치구조물의 고유모드

## 3. 예제 해석모델의 제원 및 동적특성

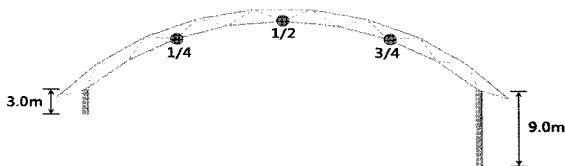
### 3.1 예제 트러스 아치

예제 트러스 아치의 경간은 40.0m, 높이는 8.0m로서 라이즈-스팬비(Rise-span ratio)가 0.2에 해당된다. 트러스 아치의 축은 1.5m로 <그림 2>는 상부구조인 트러스 아치의 지지조건에 따른 예제 트러스아치를 나타낸 것이다. 트러스 아치의 모든 부재는 SWS 490의 원형 강관을 사용 하였으며 상현재와 하현재는  $\phi 139.8 \times 4.5$ 이며 사재는  $\phi 76.3 \times 4.0$ 으로 되어 있다. 또한 본 연구에서 하부구조를 기둥으로 가정하였다. 기둥은 SWS 490의 원형강관  $\phi 711.2 \times 16$ 으로 하고 양단 하부구조의 강성을 다르게 하기 위해 하부구조 길이를 다르게 적용하

였다. <그림 2>의 b)에서와 같이 1/4지점의 좌측기둥의 길이를 3m로 고정 시키고 3/4지점의 우측기둥의 길이를 3m, 5m, 7m, 9m로 변화를 주었다.



(a) 하부구조 3m-3m

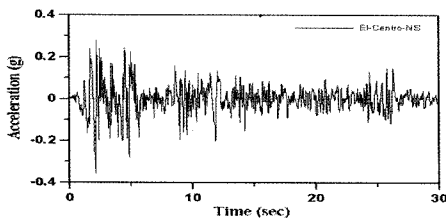


(b) 하부구조 3m-9m

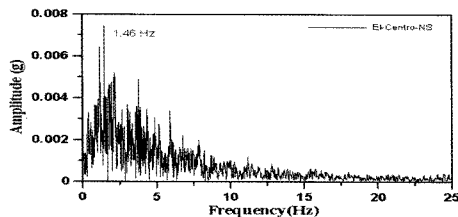
<그림 2> 트러스 아치 예제 구조물

### 3.2 입력 지진데이터

본 연구에서의 해석모델에 입력된 지진동은 공간구조물의 지진거동 분석에 많이 사용되는 El-Centro-NS를 적용하였다. <그림 3>은 PGA (Peak Ground Acceleration) 0.3569g인 El-Centro-NS파의 가속도 시간이력과 가속도 스펙트럼 그래프이다. 또한 El-Centro-NS파의 지속시간은 53.72초이지만 30초 이후의 지진 에너지는 미비함으로 본 연구에서는 30초까지의 지진데이터만을 사용하였다.



(a) 가속도 시간이력



(b) 가속도 스펙트럼

<그림 3> El-Centro-NS

### 3.3 예제 트러스 아치의 동적 특성

<표 1>은 예제 트러스아치의 모드별 진동수를 나타낸 것이다. 저차모드 진동수가 지진하중의 에너지가 집중되어 있는 진동수 영역에 근접해 있는 것을 볼 수 있다. 1차 모드에서의 고유진동수를 기둥 길이별로 비교해 보면, 양단 기둥의 길이 차이가 커질수록 고유진동수가 작아지고 있음을 알 수 있으며, 이는 한쪽 기둥의 길이가 상대적으로 길어짐에 따라 강성이 감소했기 때문이라고 판단되어진다.

<표 1> 모드별 진동수 및 진동수비 (단위 : cycle/sec)

Mode NO.		1	2	3	4	5
3m-3m	Frequency	1.8353	3.3871	5.8371	6.181	9.014
	Frequency ratio	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3m-5m	Frequency	1.7968	2.9606	4.9497	6.0635	7.9231
	Frequency ratio	0.98	0.87	0.85	0.98	0.88
3m-7m	Frequency	1.6675	2.3872	4.4545	6.0504	7.6009
	Frequency ratio	0.91	0.70	0.76	0.98	0.84
3m-9m	Frequency	1.3989	2.1267	4.2972	6.0463	7.4928
	Frequency ratio	0.76	0.63	0.74	0.98	0.83

\* Frequency ratio : 3m-3m를 기준으로 함

아래의 <그림 4>와 <그림 5>은 3m-3m모델과 3m-9m 모델의 진동모드를 나타낸 것이다. 3m-3m 기둥에 지지된 예제 트러스아치의 진동모드는 상부의 트러스 아치의 모드가 저차모드에서 나타남으로서 <그림 1>의 아치구조물의 고유모드와 유사한 형태를 나타내게 된다. 그러나 한쪽 기둥은 3m로 고정되고 다른 한쪽의 길이가 길어짐에 따라서 저차모드에서는 상부 트러스 아치의 모드 형상 보다는 하부구조인 기둥에 의한 모드형상이 먼저 나타나며 이러한 현상은 <그림 5>의 3m-9m 모델에서 더욱 잘 나타난다. 이러한 결과는 <그림 1>의 기본적인 아치구조물의 고유모드 형상과는 상이한 결과이다. 이는 한쪽 기둥의 길이가 상대적으로 길어짐에 따라서 하부구조의 강성이 비대칭 발생하여 야기되는 것으로 구조물의 진동응답에 상당한 영향을 끼칠 것으로 사료된다.



(a) 1차 모드

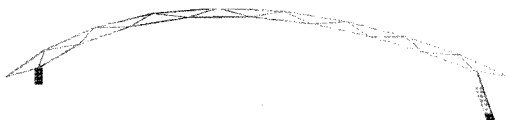


(b) 2차 모드



(c) 3차 모드

〈그림 4〉 3m-3m 예제 구조물의 진동모드



(a) 1차 모드



(b) 2차 모드



(c) 3차 모드

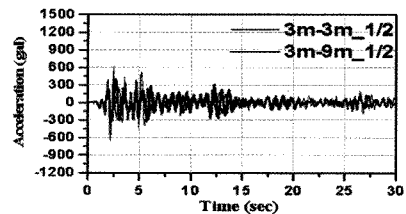
〈그림 5〉 3m-9m 예제 구조물의 진동모드

## 4. 예제 트러스 아치의 지진응답

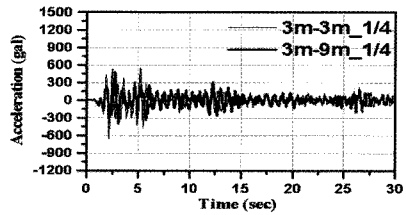
### 4.1 가속도 시간이력 분석

아래 〈그림 6〉은 El-Centro-NS파 적용시의 상기 〈그림 2〉에 나타난 것처럼 상부구조물의 1/2지점, 1/4지점, 3/4지점에서의 각각 수평방향 가속도 응답 그래프로서 양쪽 기둥의 강성이 동일한 경우인 3m-3m일 때와 양쪽 기둥의 강성의 차이를 둔 3-9m일 때의 가속도 응답을 비교한 그래프이다.

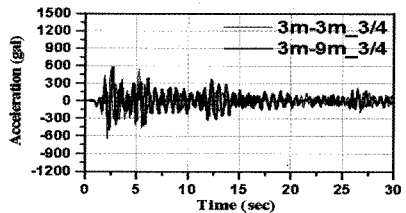
양쪽 기둥의 강성이 동일한 3m-3m모델에 비해 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라서 각 지점별 수평 방향 가속도 응답은 대체로 유사한 추이를 보이고 있었으며, 이는 3m-9m모델의 가속도 응답 그래프와의 비교를 통해서 확인해 볼 수 있다.



(a) 1/2 지점



(b) 1/4 지점

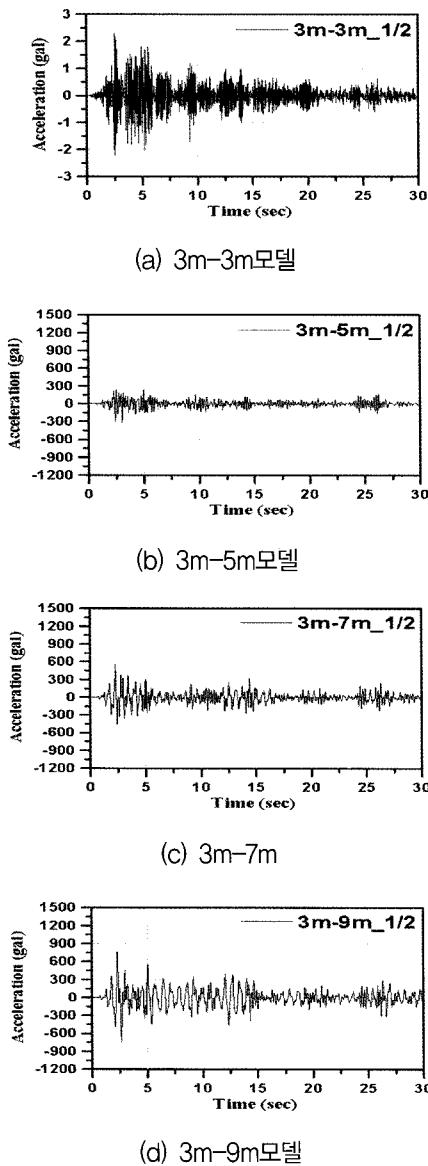


(c) 3/4 지점

〈그림 6〉 각 지점별 수평방향 가속도 응답

아래의 〈그림 7〉은 El-Centro-NS파 적용시의 1/2지점에서의 연직방향 가속도 응답으로서 양단 기둥의 강성 차이에 따른 가속도 응답을 살펴보기 위해서 한쪽기둥은

3m로 고정하고 다른 한쪽 기둥을 5m, 7m, 9m로 증가 시킴에 따른 그래프를 나타내었다.

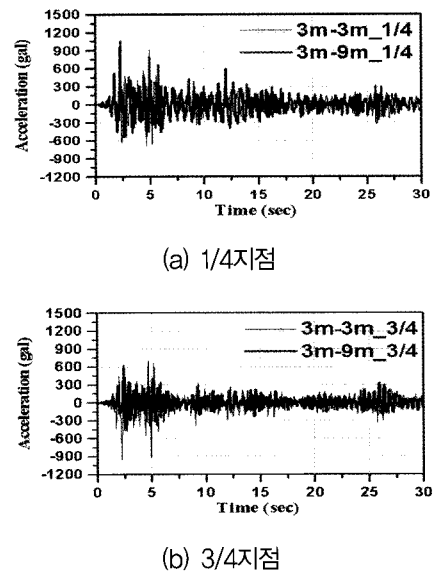


〈그림 7〉 1/2지점에서의 연직방향 가속도 응답

1/2지점에서의 연직방향의 가속도 응답의 경우에는 〈그림 7〉의 (a-d)를 비교해보면 응답에 상당한 차이가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이는 진동모드에서도 확인할 수 있듯이 3m-3m 모델에서의 1차 모드가 중앙점(1/2지점)을 기준으로 역대칭이므로 연직방향 응답이 상대적으로 매우 작게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 하지만 양단의 기둥 길이 차이가 커질수록 상대적인 하부구조의 강성차이로 인하여 모드는 더 이상 중앙점(1/2지점)을 기준으로 하여 역대칭 형상을 보이지 않게 된다.

따라서 그림에서 보는 바와 같이 1/2지점에서의 가속도 응답은 크게 증가 한다.

아래 〈그림 8〉 (a), (b)는 각각 1/4지점과 3/4지점에서 연직방향 가속도 응답으로서, 양쪽 기둥의 강성이 동일한 3m-3m모델에 비해 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라 상대적으로 강성이 큰 짧은 기둥의 영향으로 가속도 응답이 크게 나타나는 1/4지점과는 달리, 3/4지점은 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라서 상대적으로 강성이 약한 긴 기둥의 영향으로 인해 가속도 응답이 저감되었다고 사료된다. 이는 아래의 3m-3m모델과 3m-9m모델의 가속도응답의 비교를 통해서 확인할 수 있다.



〈그림 8〉 연직방향 가속도 응답

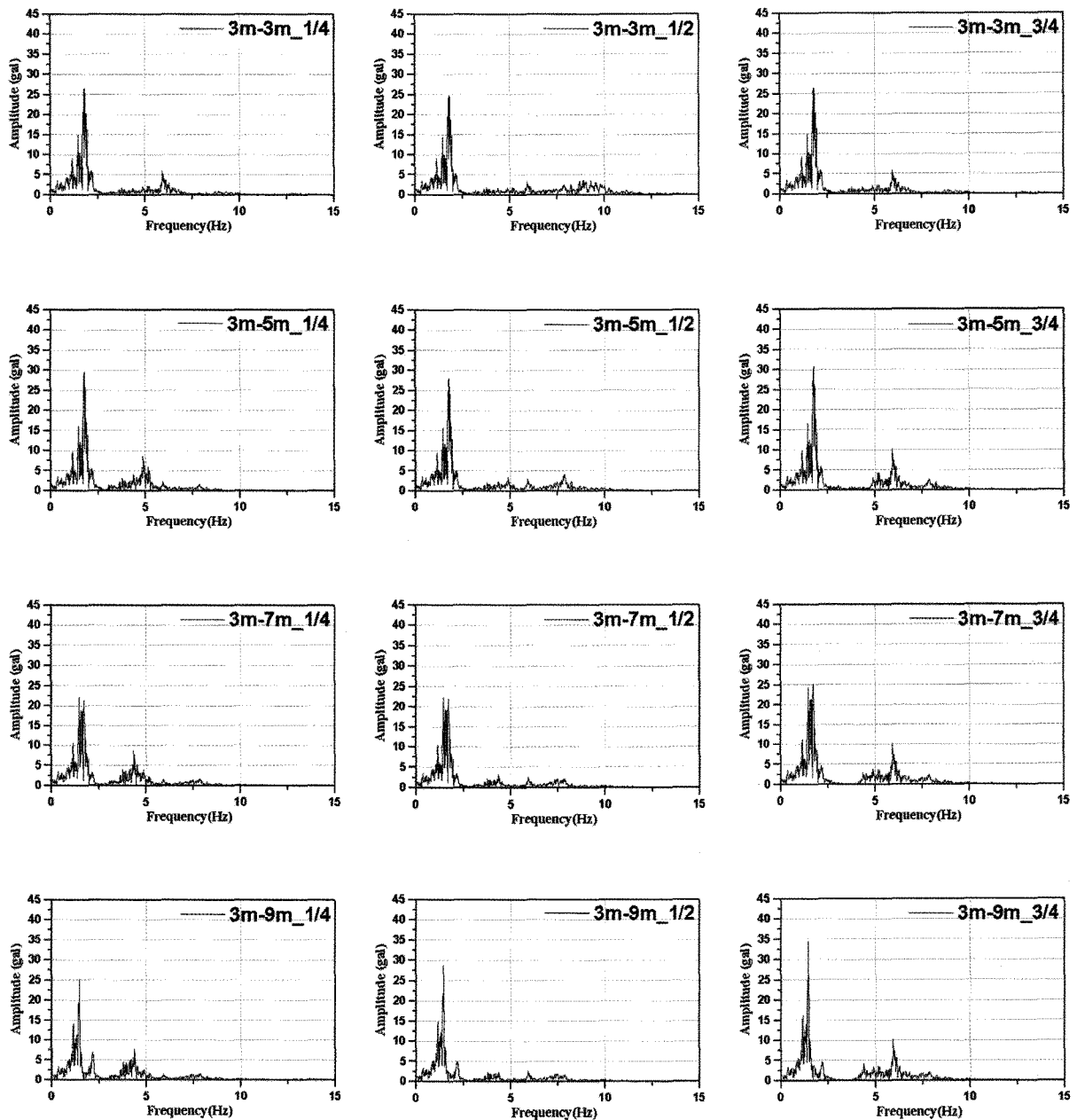
위와 같은 사실을 통해서 기둥의 강성차이로 인해 더욱 많은 영향을 받는 부분은 수평방향 응답보다는 연직방향 응답임을 알 수 있었다. 또한 1/2지점의 수평방향의 응답에 있어서는 전체적으로 유사한 양상의 응답 분포를 보이고 있으나, 1/2지점의 연직방향의 응답의 경우에 있어서는 양쪽 기둥의 강성이 동일한 경우에 비해서 양쪽 기둥의 강성이 차이가 발생됨에 따라서 그 가속도 응답이 큰 폭으로 증가된다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 응답스펙트럼 분석

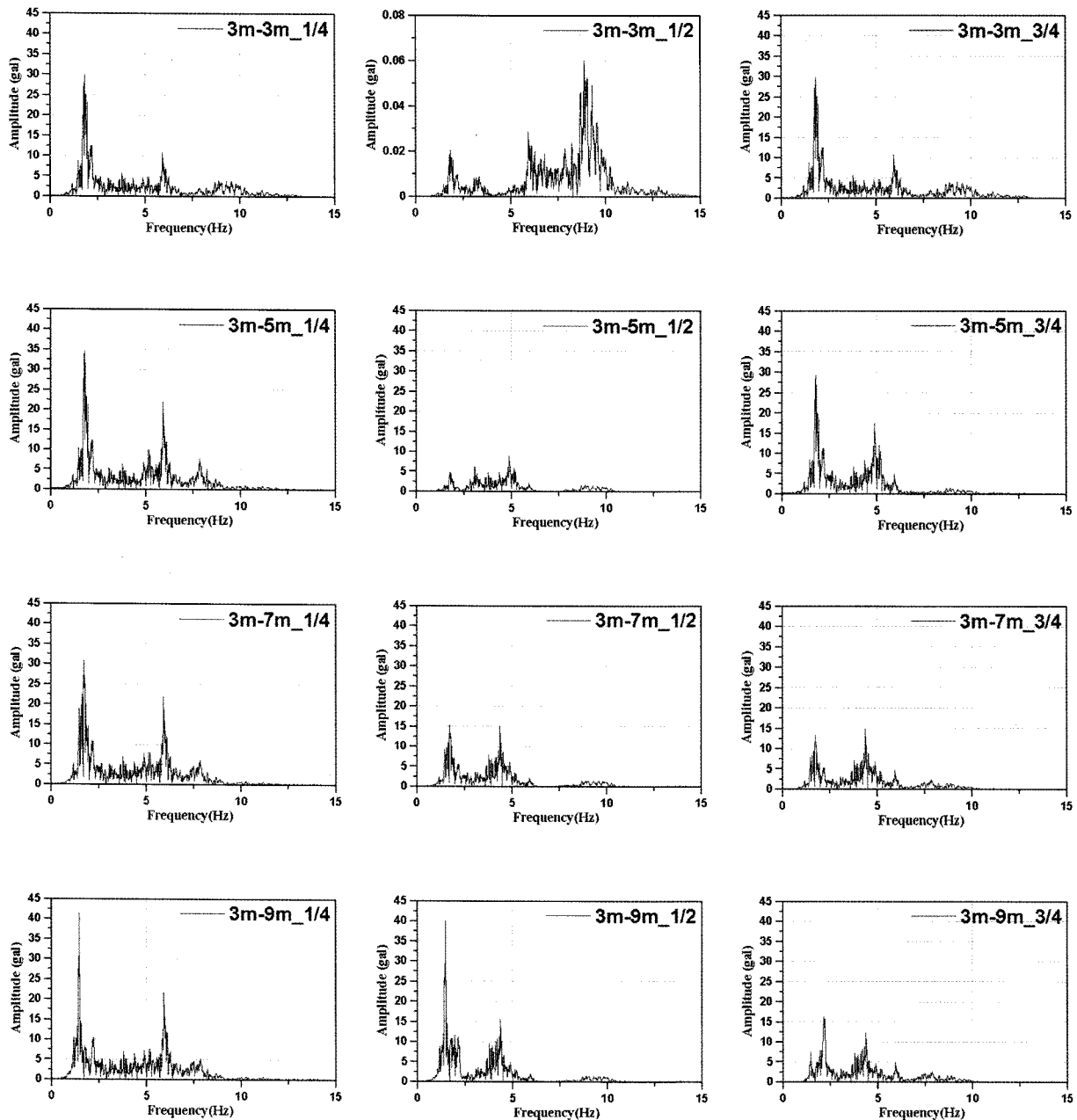
〈그림 9〉 수평방향 응답 스펙트럼 아래의 〈그림 9〉는 El-Centro-NS파 적용시의 양단 기둥의 길이 차이에 따

른 1/2지점, 1/4지점, 3/4지점의 수평 방향 응답 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 3m-3m모델은 좌우 기둥의 길이가 같아 하부기둥의 강성이 대칭이므로 1/4지점과 3/4지점에서의 응답이 같게 나타나고 있으며 1/2지점과도 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 그러나 우측 기둥의 길이가 늘어남에 따라서 1/4지점의 응답보다 3/4지점의 응답이 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 우측의 기둥이 길어짐에 따라서 우측 하부기둥의 수평강성이 작아지므로 이에 따라 응답이 커지는 것으로 사료된다

다음으로 아래의 <그림 10>은 El-Centro-NS파 적용시의 양단 기둥의 길이 차이에 따른 1/2지점, 1/4지점, 3/4지점의 연직 방향 응답 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 1/2지점에서의 연직 방향의 가속도 응답 스펙트럼 그래프를 살펴보면 양쪽 기둥의 강성이 동일한 3m-3m 기둥인 경우에 비해서 양쪽 기둥강성의 차이가 커질수록 가속도 응답 스펙트럼은 응답이 큰 쪽으로 상승되고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 9> 수평방향 응답 스펙트럼



〈그림 10〉 연직 방향 응답 스펙트럼

또한, 1/4지점과 3/4지점을 비교해볼 때 수평방향의 응답스펙트럼과 다르게 왼쪽과 오른쪽 기둥과의 길이 차이가 커짐에 따라 3/4지점에서보다 1/4지점에서의 응답이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라서 상대적으로 강성이 약해지고 이로 인해 가속도 응답이 작아졌다고 판단된다. 3/4지점에서 3m-3m기둥일 때와 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따른 가속도 응답스펙트럼을 비교해 보면 저차모드의 응답

이 감소함에 따라 상대적으로 고차모드의 영향이 커지는 것과 같은 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 1/2지점에서의 양쪽 기둥의 강성이 동일한 경우에 비해서 양쪽 기둥의 강성에 차이가 발생됨에 따라 저차모드의 응답이 우세해지는 특징과는 다른 현상이다. 1/4지점과 3/4지점에서 양쪽 기둥의 길이 차이가 커짐에 따라서 고차모드의 영향이 우세해지는 이유는 〈표 1〉에서 살펴본 바와 같이 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라서 각 모드별 고

유진동수가 서로 인접하여 있어 고차의 고유진동모드까지 응답이 크게 나타나고 있다고 판단되어진다.

## 5. 결 론

본 연구는 공간구조물의 기본적인 동적 특성을 가지고 있는 트러스 아치형식의 예제 구조물에 대한 해석을 통해서 그 응답특성을 분석하고자 하였다. 특히 하부구조를 기둥으로 가정하여 양쪽에 지지되는 기둥의 길이를 서로 다르게 함으로써 구조물에 미치는 응답영향을 분석하였다.

- 1/4지점과 3/4지점에서의 수평·연직방향 가속도 응답 스펙트럼은 양단 기둥의 강성차이가 발생됨에 따라 고차모드의 영향이 커졌다.

- 한쪽 기둥의 길이가 길어짐에 따라 각 모드별 고유진동수는 지진에너지가 집중된 진동수 영역에 더욱 조밀하게 진동수가 분포되어 고차의 고유진동모드까지 응답이 크게 나타났다.

- 3/4지점의 연직방향 가속도 응답 스펙트럼은 양단 기둥의 강성차이가 발생됨에 따라 응답이 저감하였다. 이는 기둥 길이의 변화에 따라 한쪽 기둥인 3m에 비해 다른 쪽 기둥인 9m기둥의 강성이 상대적으로 감소하기 때문이다.

상기와 같은 분석을 통하여 공간구조물을 지지하는 양쪽 하부구조의 강성 차이는 수평방향의 응답 보다는 연직 방향의 응답에 큰 영향을 미친다는 것을 확인 할 수 있었다. 차후 연구에서는 양쪽 하부구조의 강성을 다르게 하되 기하학적인 조건을 동일하게 하고 재료적인 측면에서의 강성변화를 통해 분석해볼 필요가 있다고 생각된다.

## -감사의 글-

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

## -참고문헌-

1. 정환목, 최석용, 권택진, 복층 스페이스 프레임 구조물의 격자높이-스팬비에 따른 소요 부재 중량 평가, 대한건축학회 학술기사논문집, 제19권 제2호, pp.85~90, 1999
2. 석창목, 복층 평판형 공간 트러스의 그리드 형태 및 지지상태에 따른 좌굴특성, 대한건축학회논문집, 제20권 제9호, pp.95~102, 2004
3. 정찬우, 석근영, 강주원, "갈려킨법을 이용한 아치의 고유진동해석", 한국 공간 구조학회 논문집, 제7권 제4호, pp.55~61, 2007
4. 김기철, 면진장치를 적용한 대공간구조물의 지진응답분석, 한국공간구조학회 논문집, 제8권 제6호, pp.49~57, 2008
5. 정찬우, 박성무, 강주원, 아치구조물의 모의 지진파 입력에 따른 지진응답특성에 관한연구, 한국 공간 구조학회 논문집, 제8권 제6호, pp.59~66, 2008
6. 신지욱, 이기학, 김기철, 정찬우, 강주원, 복층 배럴 볼트 시스템의 지진거동에 대한 연구, 한국공간구조학회 2009춘계학술발표회 논문집, 제6권 제1호, pp.133~138, 2009
7. John C. "Space Grid Structure", Architectural Press, 1999
8. Architectural Institute of Japan, "Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structure", Maruzen, 2006

▶ 접수일자 : 2009년 12월 18일

▶ 심사 완료일자 : 2010년 2월 5일

▶ 게재 확정일자 : 2010년 2월 10일