

아치구조물의 형상비와 하부구조에 따른 지진응답특성에 관한 연구

Seismic Response of Arch Structure according to the Aspect Ratio and Columns

석 근 영*
Seok, Keun-Young

강 주 원**
Kang, Joo-Won

요 약

공간구조물은 높이-경간비 또는 개각과 같은 아치의 형상비에 따라 상이한 동적거동특성을 나타내며, 이러한 공간구조물은 지진의 영향을 직접적으로 받는 하부구조의 강성 및 그 접합부에 따라 상이한 지진응답특성을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 수직진동 모드와 수평진동모드의 영향이 다른 단층아치구조에 하부기둥의 강성과 접합부에 따른 지진응답특성을 분석하고자 한다. 하부기둥의 영향으로 단층아치구조는 수직방향 응답이 더 많은 영향을 받으며, 기둥의 접합부 회전강성에 있어서는 활절을 제외하고는 큰 영향이 없는 것으로 나타난다.

Abstract

The dynamic behavior of spatial structures is different depending on the aspect ratio of arch structure, as the rise-span ratio or open-angle, and these spatial structures show differently the character of seismic response in accordance with stiffness and connection of the lower support structures that are directly influenced by earthquake. Therefore, in this paper, dynamic analysis is conducted for seismic response of single layer arch structures by the influence of column's stiffness and connection, to reflect the different vertical and horizontal vibration mode of single layer arch structures. The vertical response of single layer arch structures is more influence by lower columns and the influence of column's connection rotational stiffness is not large, except to the hinged connections.

키워드 : 단층아치, 높이-경간비, 반개각, 하부구조, 지진응답

Keywords : Single layer arch, Rise-span ratio, Half-open angle, Lower structure, Seismic response

1. 서 론

최근 다양한 사회, 문화적 요구에 의해, 대공간구조물 형식의 건축물 건설에 많은 관심을 보이고 있다. 또한 도시적 또는 국가적 랜드마크의 역할을 함으로써, 대규모의 인원을 수용하게 되는 경우가 많다. 더불어, 재해, 재난시 방재거점으로 활용되기도 하여 대공간구조물의 내진안전성에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다.¹⁾

지진에 대해 많은 경험을 축적하고 있는 일반 라멘구조물과는 달리, 대공간구조물은 다양한 규모와 형상에 따라 그 구조적 특성이 매우 다르며 경험적으로 예측할 수 없는 요소가 많이 존재한다. 이러한 대공간구조물은 대부분 아치형상을 그 기본적인 구조로 내재하고 있고, 동적거동에 있어서 수평방향의 지반진동에 대해서 수평방향 응답과 수직방향 응답이 나타난다. 또한 수직방향 지반진동에 대해서도 수직방향 응답뿐만 아니라, 수평방향 응답도 나타난다. 이러한 수직, 수평방향 응답의 정도는 아치구조의 기본적인 형상비인 높이-경간비 또는 아치의 반개각 등에 따른 진동모드에 의해 결정된다.^{2),3)}

또한 실제 건설되는 대공간구조물은 대부분 하부

* 정회원, 영남대학교 공업기술연구소 연구원, 공학박사

** 교신저자, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

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

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

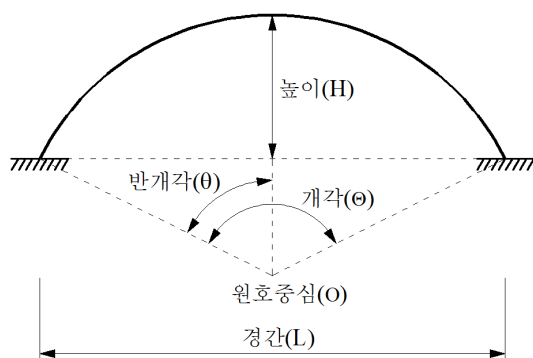
구조에 의해 지지되므로, 지진의 영향을 직접적으로 받는 하부구조에 따라 상부 지붕구조의 동적거동 특성이 달라질 것을 예상할 수 있고, 기존 연구에서도 이러한 결과를 나타내고 있다.³⁾⁴⁾⁵⁾ 하지만, 기존의 공간구조물에 하부구조의 영향에 관한 연구¹⁾⁴⁾⁶⁾는 특정 형상비를 가지는 상부구조에 관한 연구이며, 또한 상부구조와 하부구조의 접합부 특성이 반영되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 아치의 형상비에 따라 주요 진동모드가 다르게 나타나는 아치구조물을 고려하여 이에 따른 하부기둥의 강성변화와 기둥접합부의 회전강성 변화에 의한 지진응답특성을 분석하고자 한다.

2. 예제구조물의 개요

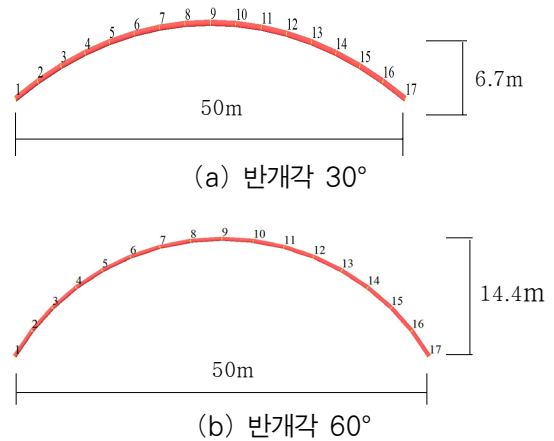
2.1 예제구조물의 제원

아치구조의 기본적인 동적특성으로 기존의 연구⁷⁾에 따르면, 단층 래티스 돔의 동적해석에 있어서, 반개각이 30°, 45°일때는 수직진동모드가 지배적이며, 반개각이 60°, 90°인 경우에는 수평진동모드가 지배적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 아치구조의 반개각이 30°, 60°인 아치구조물을 예제구조물로 선정함으로써 수직진동모드가 지배적인 경우와 수평진동모드가 지배적인 경우에 대해 상부아치구조의 동적거동에 있어서 하부구조의 강성 및 접합부 강성이 미치는 영향을 분석하고자 한다. 아치구조의 형상의 주요변수는 아래의 <그림 1>과 같이 표현된다.²⁾⁵⁾

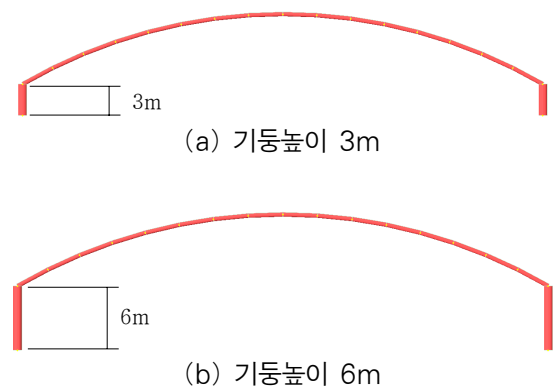


<그림 1> 아치의 주요 형상변수

본 연구의 예제구조물은 경간(L)이 50m인 아치구조로, 아치의 반개각(θ)에 따라 높이(H)를 다르게 모델링하였다. 상부 아치구조는 <그림 2>와 같이 총 16개의 부재와 17개의 절점으로 구성되어 있다.



<그림 2> 예제구조물의 상부 아치구조



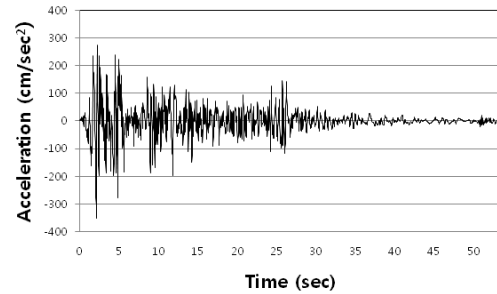
<그림 3> 기둥이 있는 반개각 30° 아치의 예제구조물

하부지지구조는 <그림 3>과 같이 기둥으로 가정하여 기둥의 높이를 0m, 3m, 6m로 설정함으로써 기둥의 강성변화에 대한 변수로 고려하였다. 기둥높이 0m는 아치구조가 하부구조의 지지없이 지반에 의해 직접적으로 지지되는 경우를 의미한다. 또한, 상부 아치구조와 하부기둥의 접합부 강성의 변화를 고려하기 위해 강절(rigid joint)일 때의 회전강성을 100%, 활절(hinged joint)일 때의 회전강성을 0%로 설정하여 25%의 간격으로 회전강성이 변화하도록 모델링하였다. 구조부재의 재질은 SM490강재로 설정하였으며, 상부 아치구조는 강관 $\phi 216.3 \times 4.5$,

하부기둥은 강관 $\phi 355.6 \times 8$ 로 동일하게 적용하였다. 예제구조물의 모델명 구성과 분류는 <표 1>, <표 2>과 같다.

<표 1> 예제구조물명 구성

Arch 반개각		- 기둥높이	- 접합부 회전강성
A	30 60	0	000
		3	025
		6	050
			075
			100



<그림 4> EL Centro NS(1940)
지진가속도 시간이력

2.2 예제구조물의 해석방법

본 연구에서는 아치구조의 모델링 및 동적해석을 수행하기 MIDAS Gen ver.795를 이용하여 모드중첩법에 의한 시간이력해석을 수행하였다. 입력지진파는 EL Centro NS(1940)파로 최대지반가속도가 $0.3569g(350.1189\text{cm/sec}^2)$ 이고, 지진의 지속시간은 53.72sec이다. 본 연구에서는 지진파의 지속시간을 50초까지 고려하였으며, EL Centro NS(1940)파의 가속도 시간이력은 <그림 4>과 같다.

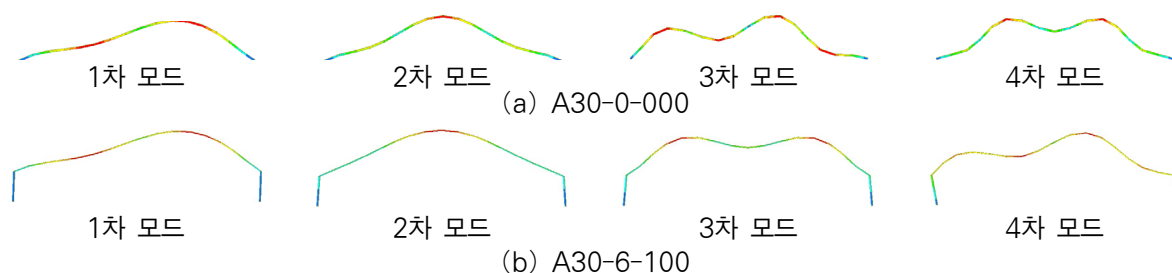
3. 예제구조물의 고유모드와 고유진동수

3.1 예제구조물의 고유모드

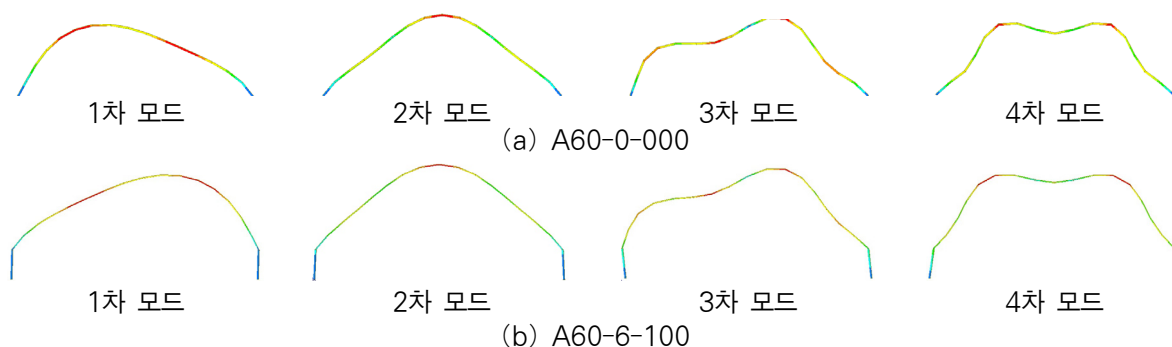
예제구조물 중 기둥이 없는 모델과 6m 기둥이 설치된 경우에 접합부를 강절로 가정한 모델의 1차~4차까지 고유모드는 <그림 5>, <그림 6>과 같다. 반개각 30°인 예제구조물에서 대칭모드와 역대칭모드가 명확하게 나타나고 있으나, 기둥이 설치된 모델과 기둥의 설치되지 않은 모델에서 3차와 4차 모드가 바뀌는 현상이 나타났다. 반면에 반개각 60°인

<표 2> 주요 변수에 따른 예제구조물의 분류

해석모델명	경간(m)	반개각(deg)	아치높이(m)	아치높이/경간	기둥높이(m)	접합부 회전강성
A30-0-000	50	30	6.699	0.13	0	
A30-3-000					3	0%
A30-3-025						25%
A30-3-050						50%
A30-3-075						75%
A30-3-100						100%
A30-6-000		60	14.434	0.29	6	0%
A30-6-025						25%
A30-6-050						50%
A30-6-075						75%
A30-6-100						100%
A60-0-000	50	30	6.699	0.13	0	
A60-3-000					3	0%
A60-3-025						25%
A60-3-050						50%
A60-3-075						75%
A60-3-100						100%
A60-6-000		60	14.434	0.29	6	0%
A60-6-025						25%
A60-6-050						50%
A60-6-075						75%
A60-6-100						100%



〈그림 5〉 반개각 30°모델의 고유모드형상



〈그림 6〉 반개각 60°모델의 고유모드형상

예제구조물의 고유모드에서는 수평성분이 더 많이 발생하여 역대칭모드가 다소 불명확하게 나타나지만, 기둥이 설치되지 않은 모델과 동일하게 각 모드들이 나타나고 있다.

동수는 차이가 없으나, 고차진동수로 갈수록 격차가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 접합부의 회전강성에 있어서, 활절인 경우를 제외하고는 회전강성이 증가함에 따른 고유진동수의 변화는 매우 작은 것으로 판단된다.

3.2 예제구조물의 고유진동수

각 모델별 1차에서 4차까지 고유진동수는 <표 3>과 같다. 반개각 30°인 모델군이 반개각 60°인 모델군보다 진동수가 전반적으로 크게 나타나고 있으며, 고차로 갈수록 그 차이가 증가하는 경향을 보인다. 두 모델군 모두 기둥이 설치됨으로 인해 진동수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 기둥의 높이가 높아짐에 따라 고유진동수는 감소하고 있으며, 반개각 30°인 모델군에서 기둥의 높이에 따른 진동수의 차이가 고차모드로 갈수록 크게 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이를 통해 상부 아치구조의 동적거동에 있어서 고차모드로 갈수록 하부기둥에 의한 영향이 커질 것으로 예상할 수 있다. 접합부의 회전강성을 활절로 가정한 A30-3-000, A30-6-000, A60-3-000, A60-6-000 모델들의 1차 고유진동수는 각 모델군에서 가장 작게 나타나고 있다. 반개각이 같은 모델군내에서 기둥의 높이에 따른 1차 고유진

〈표 3〉 각 모델별 고유진동수(Hz)

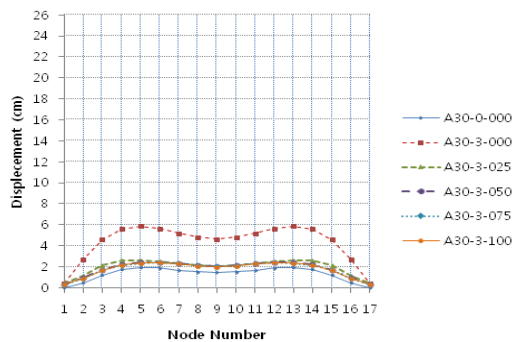
모델명	1차	2차	3차	4차
A30-0-000	0.74	1.35	2.45	3.55
A30-3-000	0.46	1.02	1.93	2.75
A30-3-025	0.68	1.19	2.26	2.62
A30-3-050	0.70	1.22	2.32	2.75
A30-3-075	0.71	1.23	2.32	2.75
A30-3-100	0.71	1.23	2.33	2.75
A30-6-000	0.46	0.89	1.32	1.86
A30-6-025	0.65	0.89	1.76	1.92
A30-6-050	0.66	0.89	1.79	1.92
A30-6-075	0.66	0.89	1.80	1.92
A30-6-100	0.67	0.89	1.81	1.92
A60-0-000	0.59	1.17	2.13	3.18
A60-3-000	0.35	0.87	1.68	2.65
A60-3-025	0.56	1.10	2.00	2.94
A60-3-050	0.56	1.11	2.02	2.96
A60-3-075	0.57	1.11	2.03	2.97
A60-3-100	0.57	1.12	2.03	2.97
A60-6-000	0.34	0.86	1.64	2.46
A60-6-025	0.52	0.98	1.79	2.46
A60-6-050	0.53	0.99	1.81	2.46
A60-6-075	0.53	1.00	1.81	2.46
A60-6-100	0.53	1.00	1.81	2.46

4. 예제구조물의 지진응답특성

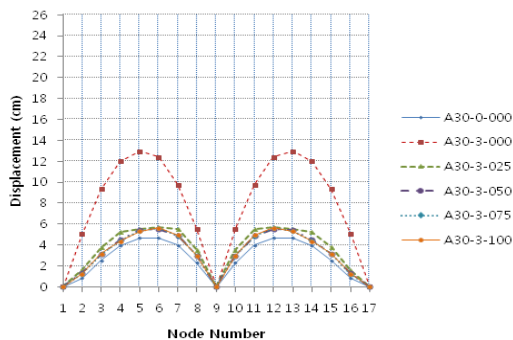
4.1 예제구조물의 각 절점별 최대변위

지진과 지속시간 50초 동안 각 절점별 최대 수평, 수직 변위응답분포는 <그림 7>~<그림 14>과 같다.

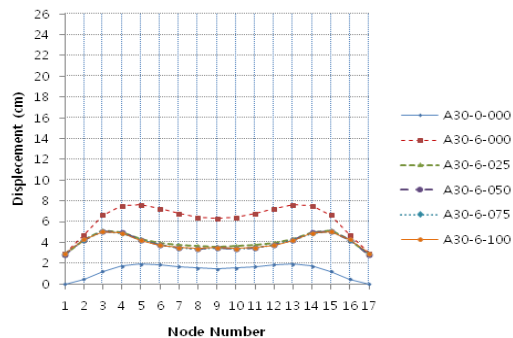
A30모델군에서는 최대 수평변위응답에 비해 최대 수직변위응답이 크게 나타나고 있다. 이는 A30 모델군이 수직진동모드가 지배적이기 때문이다.



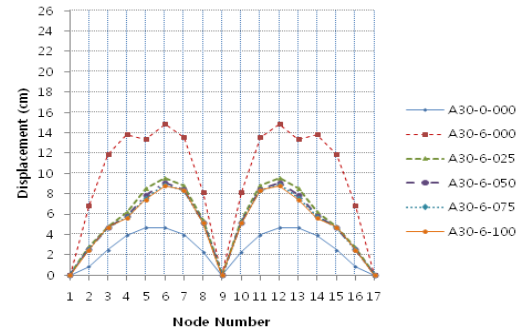
〈그림 7〉 최대 수평변위응답분포
(반개각 30°, 기둥높이 3m)



〈그림 8〉 최대 수직변위응답분포
(반개각 30°, 기둥높이 3m)



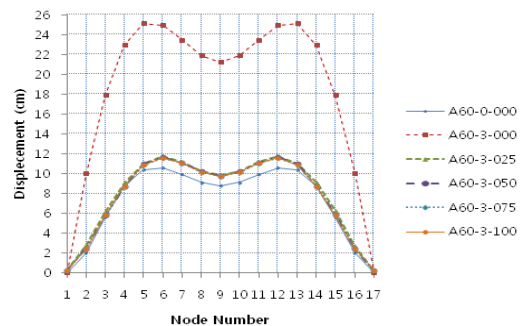
〈그림 9〉 최대 수평변위응답분포
(반개각 30°, 기둥높이 6m)



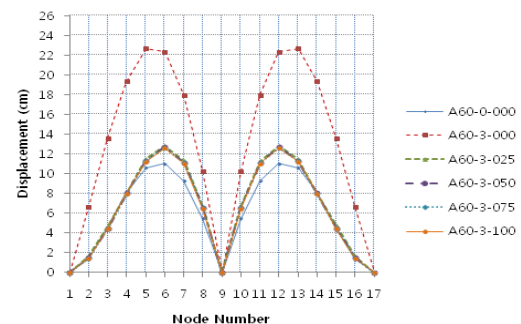
〈그림 10〉 최대 수직변위응답분포
(반개각 30°, 기둥높이 6m)

기둥이 설치됨에 따라 각 절점별 최대 변위응답이 증가하였으며, A30-6-000모델에서는 최대 수평 변위응답이 최대 950%, 최대 수직변위응답이 최대 710%의 증가율을 보였다. 또한 기둥이 없는 A30-0-000모델과 비교하여, 최대 수직변위응답은 아치의 3/4지점 부근인 6, 7절점 또는 11, 12절점 부근에서 증가폭이 더 크게 나타나고 있다.

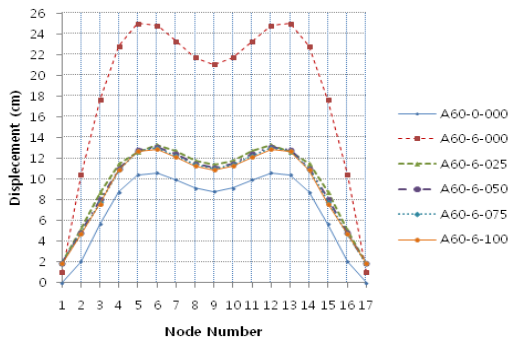
A60모델군의 변위응답도 <그림 11>~<그림 14>에서와 같이 A30모델군의 최대 변위응답 분포와 비슷한 경향을 보이고 있다.



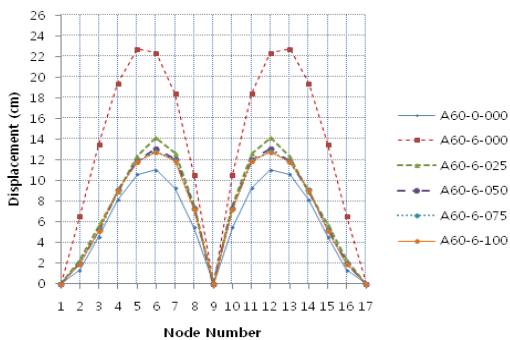
〈그림 11〉 최대 수평변위응답분포
(반개각 60°, 기둥높이 3m)



〈그림 12〉 최대 수직변위응답분포
(반개각 60°, 기둥높이 3m)



〈그림 13〉 최대 수평변위응답분포
(반개각 60°, 기둥높이 6m)



〈그림 14〉 최대 수직변위응답분포
(반개각 60°, 기둥높이 6m)

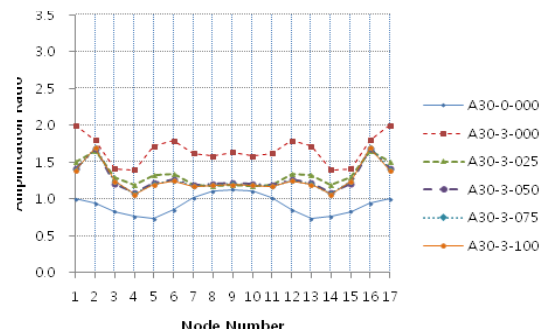
그러나 기둥의 높이가 높아짐에 따라 각 절점별 최대 수평, 수직변위응답의 증가폭은 A30모델군에 비해 적은 것으로 나타나고 있다. 이는 A60모델군은 수평진동모드가 지배적으로 작용하기 때문이며, 기둥의 강성이 급격하게 변하지 않는다면 최대 수평변위응답의 변화도 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 수직진동모드에 관한 영향이 작기 때문에, 기둥강성의 변화가 최대 수직변위응답에 미치는 영향도 적게 나타나는 것으로 판단된다. A60모델군에 있어서도 활절로 접합된 모델을 제외하고는 기둥과의 접합부 강성이 증가함에 따라 최대변위응답은 미소하게나마 감소하지만 큰 변화는 없는 것으로 나타나고 있다. 하지만 활절인 경우에 변위응답은 실제 구조물로 고려해 보면, 일부 부재가 항복할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

4.2 예제구조물의 각 절점별 최대 가속도응답 증폭배율

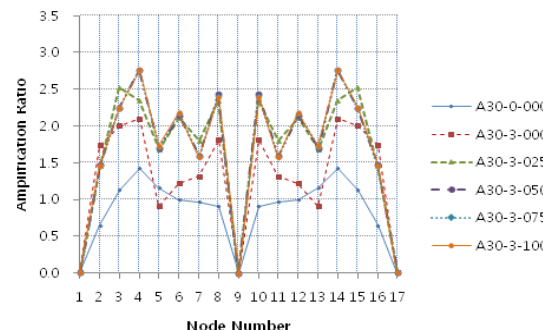
지진과 지속시간 50초 동안 각 절점별 최대 수평,

수직 가속도응답 증폭배율의 분포는 <그림 15>~<그림22>과 같다. 최대 가속도응답의 증폭배율은 지진과 지속시간 동안의 절대가속도응답 중에서 각 절점별 최대 가속도응답을 입력된 지반가속도를 기준으로 증폭된 배율을 나타내는 것이다.²⁾⁵⁾

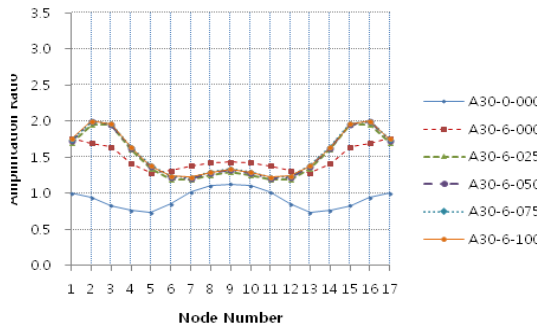
A30모델군의 최대 가속도응답 증폭배율인 <그림 15>~<그림18>을 살펴보면, 기둥이 설치된 경우에는 전반적인 최대 가속도응답이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 특히, 최대 수직가속도응답의 증폭배율이 최대 3.1배 증가되며, 기둥의 높이가 증가할수록 최대증폭배율이 나타나는 위치가 아치의 중앙점 부근으로 이동되고 있다. 또한 최대 수평가속도응답의 배율은 기둥과의 접합부 부근인 2, 17절점에서 최대 2.0배까지 증폭되지만, 중앙부 부근에서는 A30-3-000모델을 제외하고는 기둥이 없는 A30-0-000 모델과 증폭배율이 차이가 크지 않았다. 이는 A30 모델군이 수직진동모드가 지배적이므로 수직방향 응답이 주로 나타나는 중앙부 부근에서는 수평가속도응답의 증폭이 작고 대신에 수직가속도응답의 증폭배율이 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.



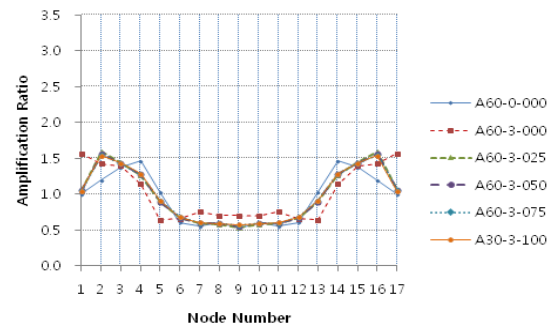
〈그림 15〉 최대 수평가속도응답 증폭배율 분포
(반개각 30°, 기둥높이 3m)



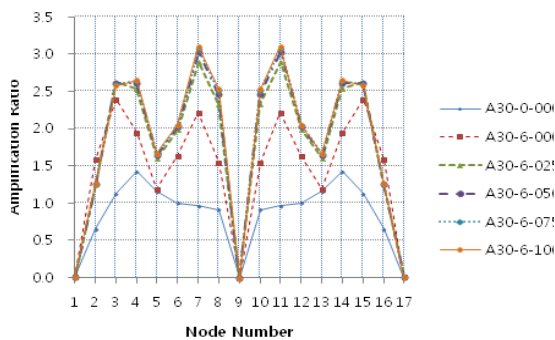
〈그림 16〉 최대 수직가속도응답 증폭배율 분포
(반개각 30°, 기둥높이 3m)



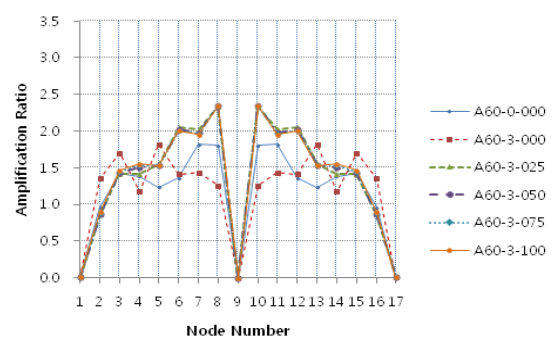
〈그림 17〉 최대 수평가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 30°, 기둥높이 6m)



〈그림 19〉 최대 수평가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 60°, 기둥높이 3m)



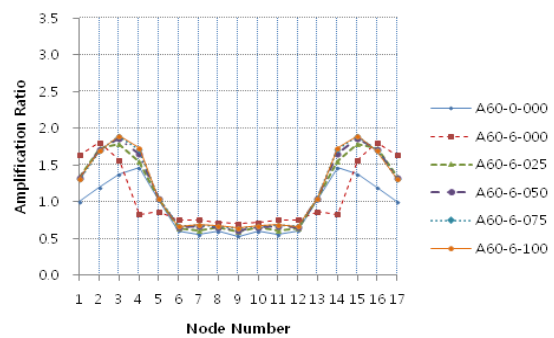
〈그림 18〉 최대 수직가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 30°, 기둥높이 6m)



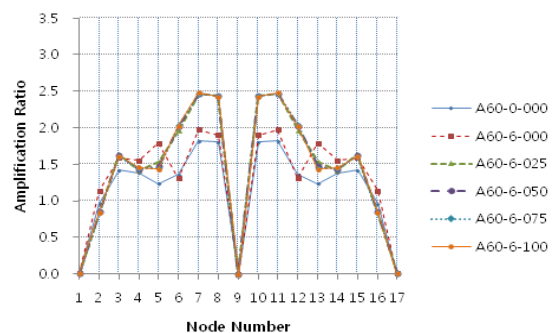
〈그림 20〉 최대 수직가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 60°, 기둥높이 3m)

접합부 회전강성에 있어서는 수평가속도응답에 있어서는 기둥높이가 3m인 경우에 접합부를 활절로 가정한 경우에 가장 크게 나타나지만, 기둥의 높이가 높아지면 타 접합부 회전강성에 비해 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 기둥이 높아져 구조물 전체의 수평방향 강성이 작아지게 되면 수평방향의 응답이 기둥의 수평방향 강성에 지배되는 것으로 판단된다. 수직가속도응답에 있어서는 접합부 강성이 활절인 경우에 최대 가속도응답 증폭배율이 가장 작게 나타나고 있다. 기둥의 높이가 3m이고 활절 접합부인 경우에는 지반에 직접 지지된 A30-0-000 모델의 경우보다 아치의 1/4지점에 해당하는 5번, 13번 절점에 최대 수직가속도응답의 증폭배율이 0.9배로 감소되어 나타나고 있다.

A60모델군의 최대 가속도응답 증폭배율은 <그림 19>~<그림 22>와 같다. A60모델군은 수평진동모드에 지배되는 모델로써 최대 수평가속도응답의 증폭배율은 기둥과의 접합부 부근에서 가장 크게 나타나고, 기둥의 높이가 6m인 경우에 최대 1.9배 증폭되는 것으로 나타나고 있다.



〈그림 21〉 최대 수평가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 60°, 기둥높이 6m)



〈그림 22〉 최대 수직가속도응답 증폭배율 분포 (반개각 60°, 기둥높이 6m)

기둥과의 접합부 부근에서의 증폭배율은 A30모델과 유사하게 나타나고 있지만, 아치의 중앙부 부근에서는 입력지반가속도보다 최대 가속도응답이 감소된 것으로 나타나고 있다. 수직방향에 있어서는 기둥의 높이가 높아짐에 따라 최대 2.47배로 최대 가속도응답의 증폭배율이 증가되는 것으로 나타나고 있다. 하지만, 수직진동모드에 지배되는 A30모델에 비해 전반적인 최대 수직가속도응답의 증폭배율은 작은 것으로 나타나고 있다. 접합부의 회전강성에 따라서는 최대 수평가속도응답에 있어서는 기둥과의 접합부를 제외하고는 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 최대 수직가속도응답에 있어서는 아치의 중앙부 부근에서는 확실히 가정한 경우에 증폭배율이 작게 나타나고, 일부 절점에서는 지반에 직접 지지된 모델에 비해 증폭배율이 작게 나타나고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 아치구조물의 형상비에 따라 하부지진거동에 미치는 하부구조의 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해, 반개각 30°와 60°의 아치구조물을 대상으로 하부구조의 강성 및 접합부 강성을 변수로 하여 최대 변위응답과 최대 가속도응답 증폭배율을 분석하였다.

아치구조물에서는 기둥의 높이가 증가함에 따라 수평 및 수직변위응답이 증가하는 것으로 나타났다. 최대 가속도응답의 경우도 증가하였으며, 특히 수직방향의 최대 가속도응답 증폭배율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 최대 변위응답의 분포에 있어서는 기둥과의 접합부가 확실히 경우에 변위응답이 크게 나타났으나, 이는 구조부재의 항복에 의한 값으로 판단되며, 이를 제외한 접합부의 회전강성이 아치구조에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한 수직진동모드가 지배적인 반개각 30°인 아치구조물의 경우 기둥의 설치로 인해 수직방향 가속도응답의 증폭배율이 크게 나타났다. 반면에 수평진동모드가 지배적인 반개각 60°인 아치구조물은 수직방향 가속도응답의 증폭배율이 반개각 30°인 아치구조물에 비해 작은 것으로 나타났다.

이를 통해 상부 아치구조물의 동적거동에 있어서

수직진동모드가 지배적인 높이가 낮은 아치의 경우가 기둥의 설치여부에 더욱 민감한 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 3차원적 공간구조물인 돔형상에 대한 연구와 더불어 다양한 하부구조 강성변화에 대한 연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0024354)

참고문헌

1. 강주원, 이상훈, “하부기둥을 갖는 아치 구조물의 지진응답에 관한 연구”, 한국공간구조학회지, 제10권, 제1호, pp.95~102, 2010.3
2. 정찬우, “수평·상하 지진을 받는 아치구조물에 대한 등가정적지진력 제안”, 한국공간구조학회지, 제7권, 제6호, 2007.12.
3. 日本建築学会, 空間構造の動的舉動と耐震設計, 2006.
4. 김기철, 강주원, 고현, “하부구조의 강성변화에 따른 대공간구조물의 지진거동”, 한국공간구조학회지, 제10권, 제3호, pp.81~90, 2010.9.
5. 정찬우, 정환목, “아치구조물에 대한 지진동의 수평·상하 동시입력에 대한 응답특성”, 2006년도 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 제3권, 제1호, pp.239-245, 2006.
6. 이상훈, 김기철, 강주원, “축소모형의 진동대 실험을 통한 아치구조의 지진응답에 관한 연구”, 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 제6권, 제1호, pp.139~142, 2009
7. 한상을, 정명채, 유용주, “지진하중을 받는 단층 래티스 돔의 동적 거동 특성에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집(구조계), 제19권, 제2호, pp.27~32, 1999.10.

(접 수 일 자 : 2012년 06월 29일)

(심사완료일자 : 2012년 08월 24일)

(게재확정일자 : 2012년 08월 31일)