

# 지진하중에 대한 복층 배럴볼트 시스템의 동적거동에 대한 연구

## Research on Dynamic Behavior of Double-Layer Barrelvault Arch Systems Subjected to Earthquake Loadings

신지욱\*  
Shin, Ji-Wook

이기학\*\*  
Lee, Ki-Hak

정찬우\*\*\*  
Jung, Chan-Woo

강주원\*\*\*\*  
Kang, Joo-Won

### 요약

본 논문은 지진하중에 대한 복층 배럴볼트 시스템의 동적거동을 조사한 것이다. 시간이력해석에 따른 지진에 대한 거동을 조사하기 위하여 6개의 다른 개각과 각 개각에 대하여 0.5초 간격으로 4개의 추가적인 고유 진동수가 고려되었다. 전체 24개의 해석모델들이 컴퓨터 해석 프로그램인 MIDAS Gen.에 의해 설계되었고 5%의 감쇠비가 고려된 3개의 지진에 대하여 시간이력해석이 수행되었다. 지진이 적용될 때 수평방향에 대한 응답반응만 고려하는 라멘 구조물과는 달리 대공간 구조물의 경우 수평방향 뿐만 아니라 상하 방향의 동적거동을 고려하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 수평방향 지진(H)과 수직방향 지진(V)에 대하여 X-, Y- 그리고 Z- 방향에 대한 동적거동 특성에 대하여 평가하였다. 개각과 진동수에 따른 동적거동 특성을 파악하기 위하여 최대 응답이 나타나는 시간에서 배럴볼트 시스템의 특정 질점들에 대한 가속도 응답비를 살펴보았다. 본 논문에서 동적거동을 조사한 가장 중요한 목적은 본 연구의 최종 목적인 배럴볼트시스템에 대한 등가정적지진력을 구하는 식을 제안하기 위함이다.

### Abstract

This paper presents dynamic behavior of double-layer barrelvault systems subjected to earthquake loadings. In order to investigate different seismic behaviors according to Time History Analysis (THA), six open angles were employed and different fundamental frequencies corresponding to each open angle were considered. A total of 24 double-layer structures were developed by using Midas Gen., which is a computer analysis program and then THA with three different earthquakes with 5% damping ratio was performed. This study investigated the characteristics of the dynamic response for X-, Y- and Z- directions, both subjected to the horizontal earthquake (H) and applied to the vertical earthquake (V) with respect to the each variable, which assumed to be important aspects for spatial structure. In order to examine the dynamic characteristics, the ratio of acceleration in specific nodes of barrelvaults was evaluated at the time with maximum response. The main purpose of this study is to obtain equations of the equivalent earthquake loading with respect to the barrelvault systems.

키워드 : 복층 배럴볼트, 동적 거동, 시간이력해석, 등가정적지진력

Keywords : Double-Layer Barrelvault system, Seismic behavior, Time history analysis, Equivalent earthquake loading

## 1. 서론

일반적으로 대공간구조란 장스팬으로 구성되고 라이즈를 갖는 구조인 아치, 배럴볼트, 돔 등을 말한다.

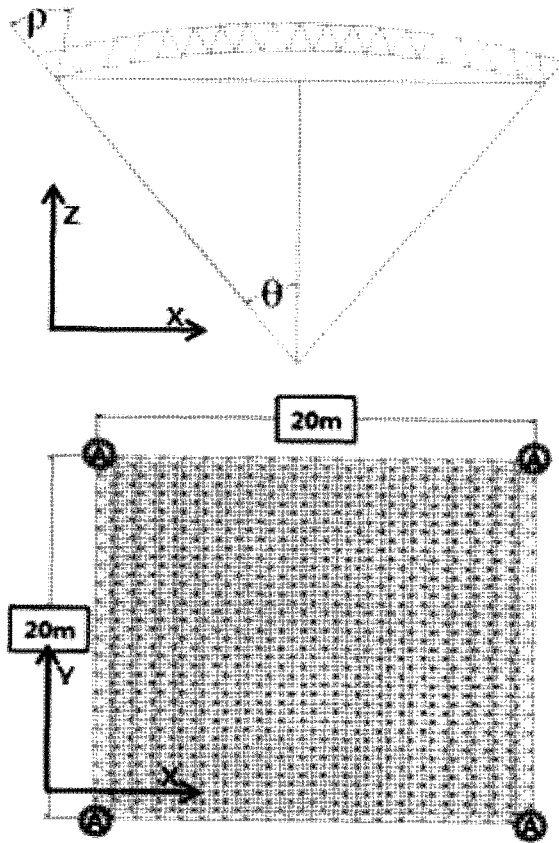
\* 학생회원 · 세종대학교 건축공학과 석사과정  
Tel: 02-3408-3331 Fax: 02-3408-4331  
E-mail : bbyong0225@hanmail.net

\*\* 정회원 · 세종대학교 건축공학과 부교수, 공학박사,

\*\*\* 정회원 · 경북대학교 건축공학과 박사후 과정

\*\*\*\* 정회원 · 영남대학교 건축학부 부교수

대공간 구조물의 경우 일반 라멘구조형식의 중층 건물과 마찬가지로 수평지진동의 영향을 크게 받는다. 그러나 대공간 구조와 일반 구조물의 차이점은 대공간 구조물의 경우 수평지진동에 대하여 상하진동이 발생하기 쉬우며 구조물의 라이즈비에 따라 상하진동에 영향을 받는다. 또한 스펀이 길어지면 구조물에 대한 진동의 고유주기가 다소 길어지고 구조체의 상하진동주기가 상하진동의 특정고유주기대와 일치할

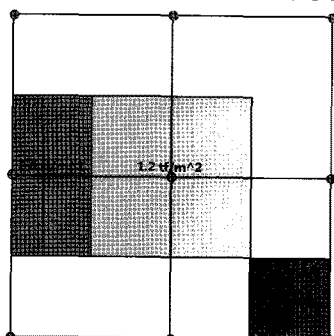


〈그림 1〉 본 연구에 고려된 배럴볼트 해석모델

때 구조물에 큰 규모의 상하진동의 발생 가능성이 높다. 따라서 대공간 구조물의 경우 고유주기와 진동모드는 공간구조의 형태, 높이, 스패 그리고 지지조건에 따라 변할 수 있기 때문에 동적거동을 평가할 때 이를 고려하여 분석할 필요가 있다.

또한 일반 라멘 구조물과는 달리 셸 또는 공간 구조물의 현재 기준에서 층 전단력을 설정하는 방법과 상하방향의 지진력에 대한 해석법을 제시하지 않고 있기 때문에 이러한 특성에 대하여 조사 및 분석이 요구된다.<sup>1)~4)</sup>

따라서 본 연구에서는 수평지진동과 상하진동에 대한 복층 배럴볼트의 동적 응답특성을 개각과 해



〈그림 2〉 본 연구의 적재하중 적용 방법

석 모델의 진동수를 다르게 적용하여 조사하였으며 이는 본 연구의 최종 목적인 배럴볼트 구조물의 등가 정적지진력의 설정 방법을 제안하기 위함이다.

## 2. 본 연구에 적용된 해석 모델

본 연구에서 해석 모델의 그리드 형태는 square on square offset이 적용되었다. 〈그림 1〉에 나타난 배럴볼트의 규모는 20m×20m이고, 상하현재 사이의 높이는 1 m로 고려되었다. 이는 프레임의 경간(span)과 레이어의 층(depth)의 비를 1/20으로 설정한 것이다. 이는 기존 연구에서 보통 레이어의 층의 값은 경간의 1/15~1/20의 값을 가질 때 경제적인 것으로 조사되었기 때문이다.<sup>5)~6)</sup> 그리드의 결합점 사이의 거리(모듈)는 해석모델의 길이와 모델링할 때 고려되는 분할수에 의해 결정되도록 설정되었다. 이 모듈은 그리드의 높이를 결정하게 되고 사재와 상하현재의 허용가능 각( $\phi$ )을 결정한다. 기존 연구에서  $\phi$  값이 30도 보다 작으면 사재의 하중과 길이가 상대적으로 초과하게 되며 60도보다 크면 사재의 밀도가 매우 큰 것으로 조사되었다.<sup>7)~8)</sup> 따라서 본 연구에서는 이전의 연구결과를 바탕으로 본 논문에서는 모델에 대해 20×20의 분할 수를 적용하였으며 사재와 상하현재의 각을 60도로 설정하였다.

해석 모델에 적용된 부재는 실제 구조물에 사용되어지는 KS 규격에 따라 설정되었으며 구조물의 자중과 적재 하중 0.12 tf/m<sup>2</sup>을 고려하여 컴퓨터 해석 프로그램인 MIDAS Gen.을 통해 외력/내력이 최대값을 갖도록 하여 설계되었으며 각각의 구조물에 대한 지지상태는 〈그림 1〉의 ㉠ 절점의 위치에핀 고정으로 고려되었다.

그리고 각 절점에 대하여 적재하중을 균등하게 분배하기 위해서 〈그림 2〉와 같은 방법을 적용하였다.<sup>8)</sup>

배럴볼트의 개각에 대한 지진에 대한 동적거동 특징을 조사하기위해서 개각( $\theta$ )은 30도~180도까지 30도 간격으로 설정하였으며 개각에 따라 구조물의 고유진동수( $f_1$ )가 변하게 되는데 이를 임의로 질량비와 강성을 조절하여 다른 개각이 적용된 해석모델들이 같은 진동수를 갖도록 고려되었다. 이는 수평 또는 상하 지진동에 대해 개각의 변화에 따른 구조물의 동적 거동을 조사하기 위함이다. 또한 1차 고유진동수에

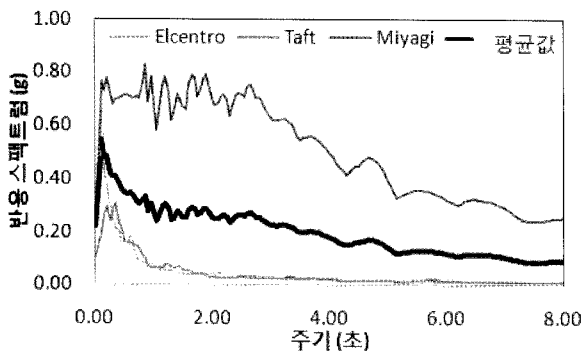
〈표 1〉 본 연구에 적용된 해석모델

개 각( $\theta$ )	높이(h)	부재 강도	부재 크기		부재 면적( $\text{cm}^2$ )
			상·하현재	사재	
30도	1.31m	SM 490	상·하현재	$\phi 114.3 \times 6.0$	87.36
			사재	$\phi 48.6 \times 3.2$	22.72
60도	2.67m		상·하현재	$\phi 114.3 \times 4.5$	68.50
			사재	$\phi 48.6 \times 2.6$	15.40
90도	4.13m		상·하현재	$\phi 114.3 \times 3.2$	46.03
			사재	$\phi 48.6 \times 2.3$	9.89
120도	5.76m		상·하현재	$\phi 89.1 \times 3.2$	29.94
			사재	$\phi 48.6 \times 2.3$	9.89
150도	7.65m		상·하현재	$\phi 89.1 \times 3.2$	22.72
			사재	$\phi 48.6 \times 3.2$	9.89
180도	9.97m		상·하현재	$\phi 89.1 \times 3.2$	19.13
			사재	$\phi 60.5 \times 3.2$	12.26

대하여 구조물의 단위 질량을 조절함으로써 2Hz~3.5Hz까지 0.5Hz씩 차이가 나는 모델을 설정하였으며 〈표 1〉은 본 연구에서 고려된 24개의 해석 모델들에 대하여 정리되어있다.

### 3. 지진동의 입력조건

일반적인 라멘 구조물에 있어서 상하지진동은 수평지진동에 비하여 구조물에 미치는 영향이 적기 때문에 내진설계에서 수평지진동만을 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 공간구조물에서는 수평지진동에 의한 수평방향 뿐아니라 수직방향에 대한 구조물의 동적응답이 크게 증폭되고 또한 상하지진동에 대해서도 수직방향뿐만 아니라 수평방향으로도 구조물의 동적응답이 크게 증폭되는 특성을 갖는다. 따라서 수평과 상하의 지진동을 모두 고려함과 동시에 각각의 구조물의 응답에 대해서 수직방향과 수평방향을 모두 고려하여야한다. 일본의 경우 상하지진동의 적용에 있어서 지진의 크기는 수평 지진력의 1/2의 수준으로 고려하도록 제시되어있다.<sup>3)~4)</sup> 본 논문에서 고려된 실



〈그림 3〉 본 연구에 적용된 지진의 응답스펙트럼

지진 기록들은 〈그림 3〉에 5%의 감쇠비가 적용된 응답 스펙트럼으로써 제시되어있다. 본 연구에서는 각 지진동의 수평성분과 상하성분을 각각 독립적으로 적용할 경우에 개각과 진동수에 따른 구조물의 동적응답결과를 조사하였다.

### 4. 해석모델의 동적특성 조사

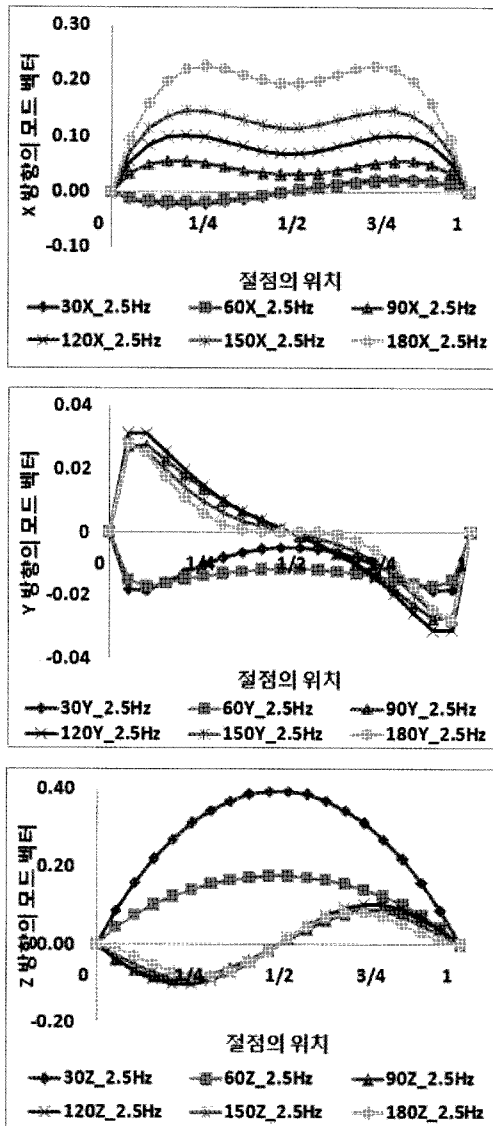
지진에 대한 응답결과를 비교하기 전에 개각에 따른 구조물의 고유 동적특성을 조사하기위해서 자유진동해석을 수행하였다. 〈그림 4〉는 2Hz와 3.5Hz의 진동수를 갖는 6 개의 다른 개각이 적용된 구조물의 1차 고유진동 모드를 보여준다.

개각이 30도에서 60도를 갖는 경우 개각의 변화에 상관없이 같은 동적특성을 갖지만 수평(X, Y)과 수직방향(Z)에 대해서 개각이 증가할 때 모델의 1/4 절점에서 최대 반응의 진폭이 감소하는 것으로 조사되었다.

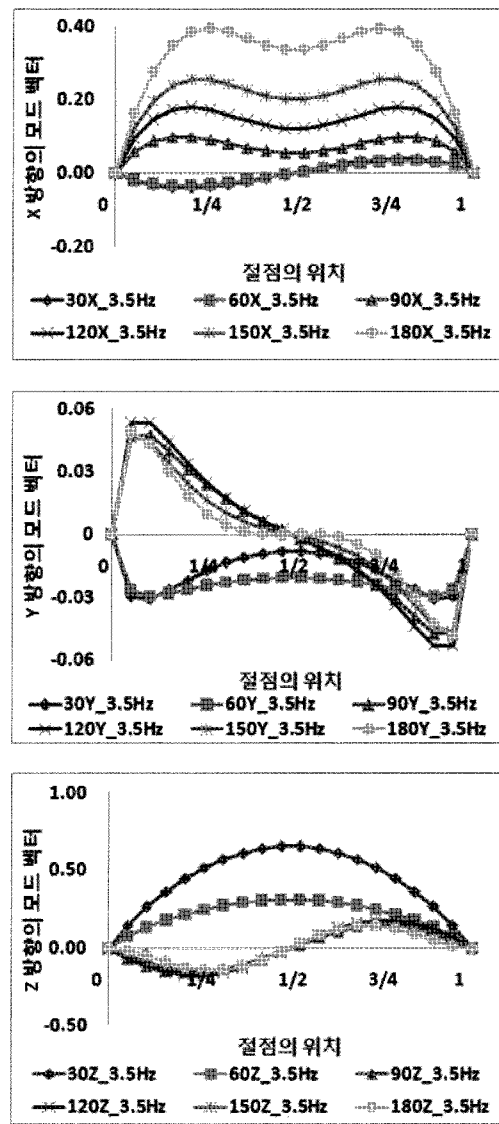
개각이 90도부터 180도까지의 해석모델은 개각이 증가할 때 X방향에 대한 변위성분의 진폭이 증가하는 것으로 조사되었으며 Y방향과 Z방향에 대한 변위 성분의 진폭은 감소되는 것을 보여줬다.

개각이 변함에 따라 해석모델의 동적 특성이 다르게 조사된 이유는 개각에 따라 모드형상을 구성하는 수평성분과 수직성분의 구성비율이 변하기 때문이다.<sup>9)</sup>

각 모델에 대한 고유 동적특성을 근거로 배럴볼트의 진동 특성은 입력 지진동 각각의 진동 특성과 대응하여 지진응답 특성에 영향을 미칠수 있지만 30도와 60도의 해석모델과 90도부터 180도까지의 해석모델은 각각 일정한 경향의 동적거동을 보일 것이라는 것을 알 수 있다.



(a) 2.5Hz 해석모델의 모드 벡터



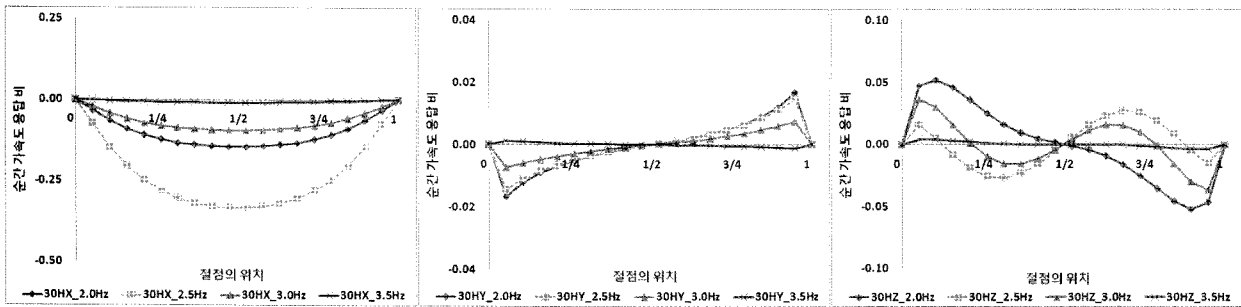
(a) 3.5Hz 해석모델의 모드 벡터

〈그림 4〉 개각에 따른 2.0 Hz와 3.5 Hz 해석모델의 모드 벡터

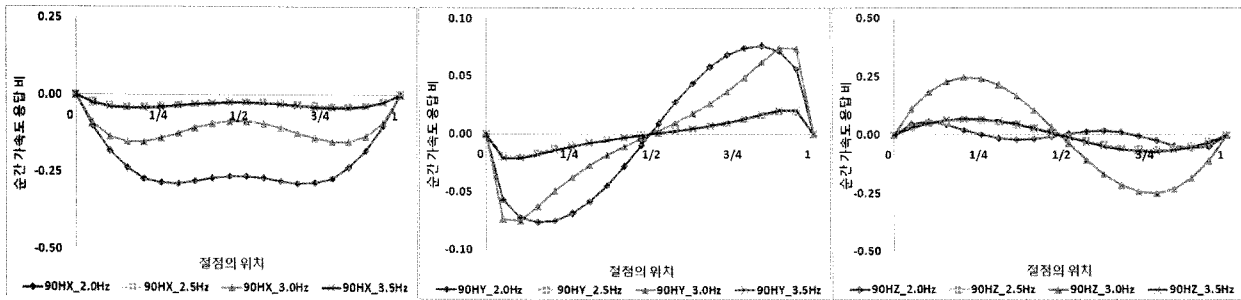
### 5. 순간가속도응답분포

대공간 구조물의 지진응답특성은 특정 시각의 순간적인 가속도응답분포를 비교함으로써 고찰 할 수 있다. 순간 가속도응답분포를 추출하는 시각의 판단 조건으로써 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각에서의 가속도응답을 적용하였다.<sup>3)~4)</sup> 〈그림 5〉부터 〈그림 7〉까지는 수평지진동(H)이 고려된 배럴볼트의 개각과 고유진동수에 따른 각 방향에 따른 구조물의 응답 분포를 나타내고 있고 〈그림 8〉부터 〈그림 10〉까지는 수직지진동(V)이 적용되었을 때의 가속도 응답비를 보여준다. 〈그림 5〉는 1차 고유진동수 2.0~3.5 Hz로 구성된 30도 개각을 갖는 구조물을

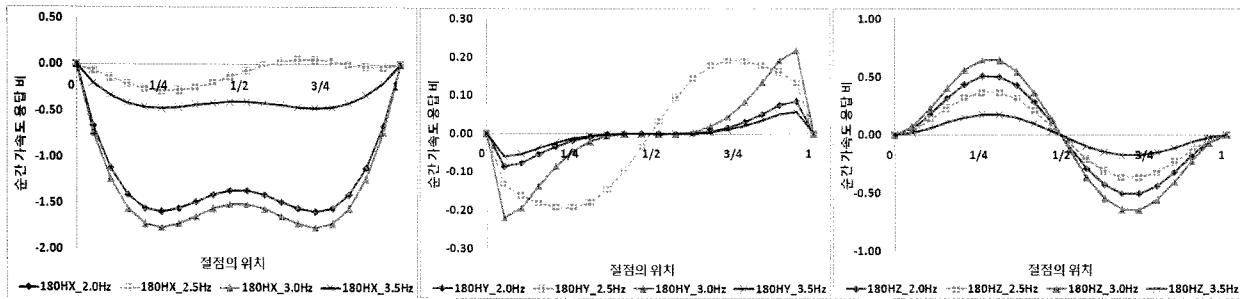
대상으로 하고 있고 〈그림 6〉은 1차 고유진동수 2.0~3.5 Hz이고 개각이 90도인 구조물의 응답을 나타낸다. 〈그림 7〉은 1차고유진동수 2.0~3.5 Hz를 갖고 180도의 개각이 적용된 구조물의 순간가속도 응답비를 보여준다. 각 응답의 분포는 수평지진동(H)이 적용되었을 때 X(가로 방향), Y(경선 방향) 그리고 Z(연직 방향)의 응답을 비교하였고 본 논문에서는 HX, HY 그리고 HZ로 표현되었으며 상하지진동(V)이 적용되었을 때 또한 구조물의 X, Y 그리고 Z방향의 응답비가 비교되었고 각각 VX, VY 그리고 VZ로 나타났다. 본 논문의 공간 제약을 고려하여 30도, 90도 그리고 180도의 개각에 대한 동적 거동만을 포함하였다.



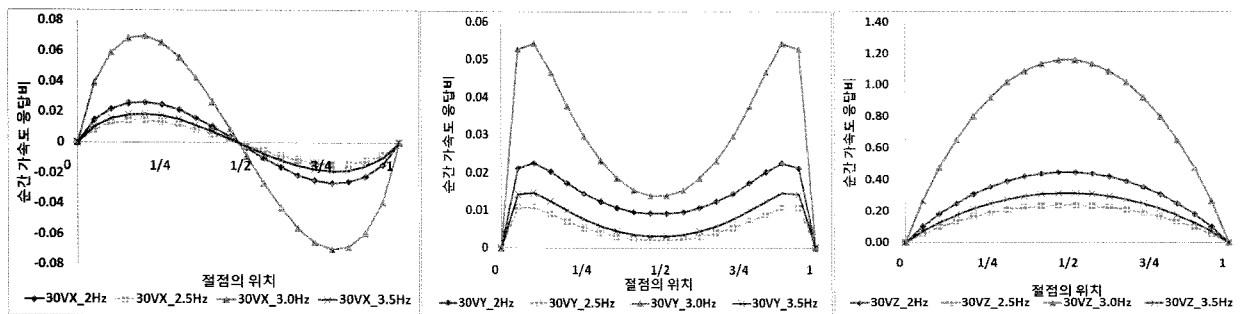
〈그림 5〉 수평지진동에 대한 30도 개각에 대한 순간 가속도응답분포



〈그림 6〉 수평지진동에 대한 90도 개각에 대한 순간 가속도응답분포



〈그림 7〉 수평지진동에 대한 180도 개각에 대한 순간 가속도응답분포

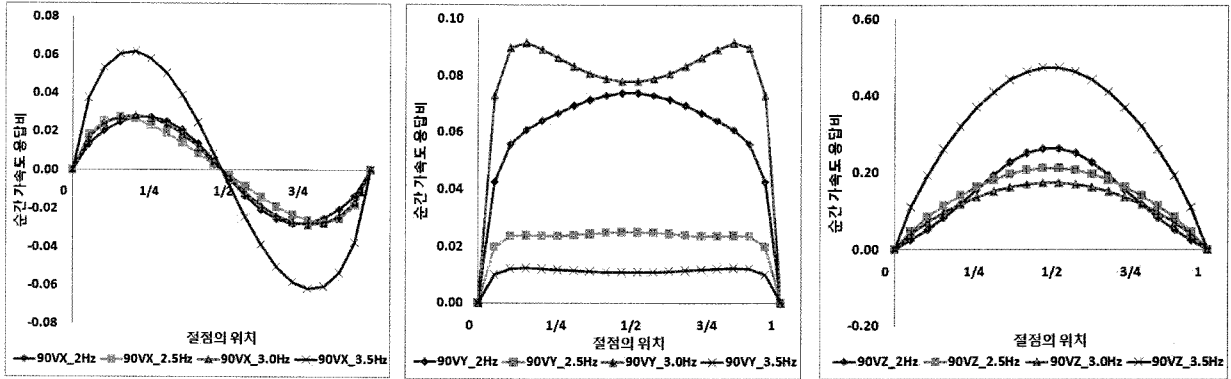


〈그림 8〉 상하지진동에 대한 30도 개각에 대한 순간 가속도응답분포

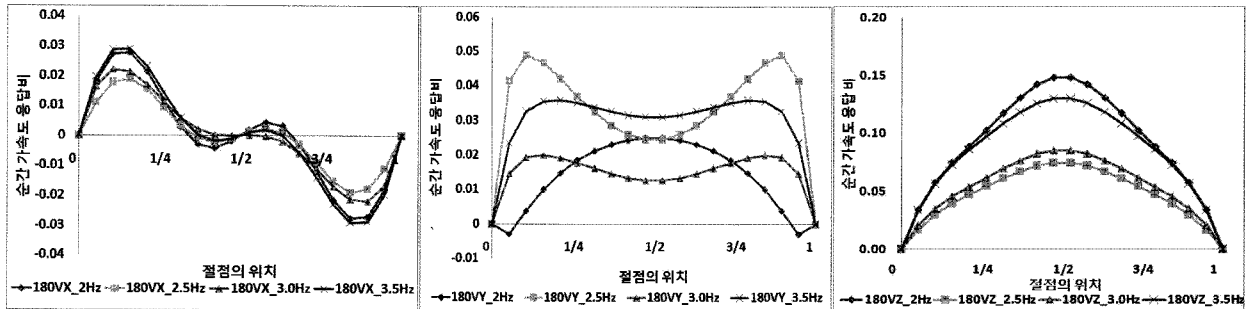
각 응답에 대하여 HX, VY 그리고 VZ에 대한 반응은 개각과 진동수가 변해도 중심 절점을 기준으로 대칭하는 분포를 갖고 HY, HZ 그리고 VX는 중심절점에서 최소의 응답을 갖고 비대칭의 순간가속도 응답분포를 보였다. 이는 개각에 따라 구조물이 본래 갖는 진동특성이 반영되었거나 해석모델에 적용된 각각의 지진동의 응답특성이 반영되었기 때문이다.

본 연구의 4절에서 조사된 구조물의 고유 진동모

드와 본 절에서 조사된 순간가속도응답을 비교했을 때 수평지진동(H)이 고려된 경우 30도와 60도의 개각을 갖는 해석구조물은 각 가속도응답 분포는 지진파의 특성에 민감하게 반응했으며 90도에서 180도까지의 개각으로 구성된 해석모델은 구조물의 동적특성이 가속도응답분포에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 반면에 수직지진동(V)에 대해서 30도와 60도의 개각을 갖는 구조물들은 구조물의 고유 동적특



〈그림 9〉 상하지진동에 대한 90도 개각에 대한 순간 가속도응답분포



〈그림 10〉 상하지진동에 대한 180도 개각에 대한 순간 가속도응답분포

성이 가속도응답에 큰 영향을 주었지만 90도부터 180도까지의 해석모델들은 지진파의 응답특성에 따라 가속도응답이 변하는 것을 볼 수 있다.

수평지진동(H)과 수직지진동(V)에 대한 응답비의 경우 각 구조물의 개각에 따라 진동수의 변화에도 비슷한 형태의 동적응답을 보였다. 그러나 개각의 변화에 따라 구조물의 동적 응답이 다르게 나타나는 것으로 조사되었다. HX의 응답비는 30도의 개각에 대해서 중심절점에서 최대의 응답을 보이는데 비해서 90도와 180도의 개각을 갖는 해석모델들은 1/4와 3/4 지점의 절점에서 최대 응답을 보이는 것으로 조사되었다. 또한 180도의 개각을 갖는 구조물은 X방향에서 가장 큰 응답을 갖는 것으로 조사되었다. HY의 가속도 응답에 비해 비교적 큰 반응을 보인 HZ의 응답의 경우 개각이 증가할 때 가속도의 응답비가 커지는 것을 알 수 있었으며 중심절점에서 최소의 응답분포를 갖는 것으로 조사되었다.

수직지진동(V)이 고려되었을 때 각 해석모델의 응답은 수직방향(VZ)에 대한 가속도 응답은 수평 응답(VX와 VY방향)에 비해 상대적으로 민감하게 반응하는 것으로 조사되었다. 수직방향의 지진동(V)에 대한 Z방향의 가속도 응답(VZ)은 중심절점에서 최대의 값

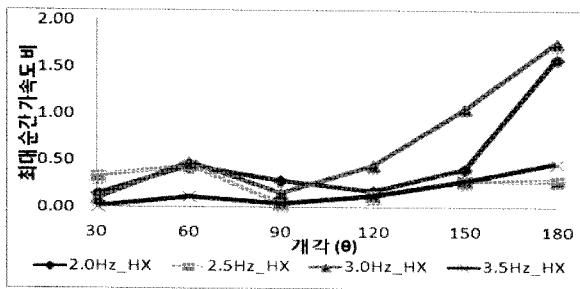
을 갖는 것으로 조사되었으며 개각이 증가함에 따라 순간 가속도응답이 감소하는 것을 볼 수 있다.

본 절에서 조사된 응답비의 분포를 통해 배럴볼트의 가속도응답 분포는 진동수와 개각에 영향을 받는 것을 알 수 있는데 특히 30도와 60도의 개각이 고려된 해석모델과 90도부터 180도까지의 개각이 고려된 해석모델들은 각각 비슷한 동적거동을 보이는 것으로 조사되었다.

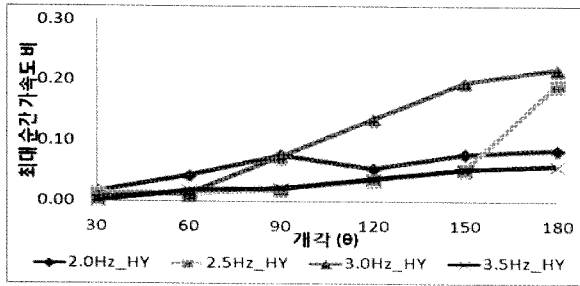
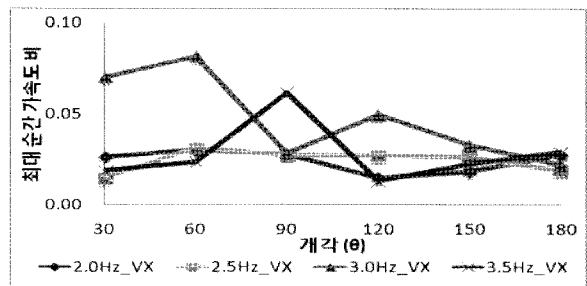
## 6. 개각과 진동수에 대한 최대 가속도 응답비

배럴볼트 구조물이 개각과 진동수가 변화함에 따라 가속도응답에 어떤 영향을 주는지를 조사하였다. HX에 대한 응답을 통하여 180도의 개각으로 구성된 배럴볼트의 경우 응답비가 2.0 Hz와 3.0 Hz에서 큰 폭으로 증폭하는 것을 알 수 있으며 대체적으로 개각이 증가함에 따라 응답비가 증가하는 것으로 조사되었다. 반면에 그림 11의 (b)와 같이 상하지진동에 의한 VX의 응답은 대체적으로 개각이 감소할 때 최대 순간 가속도응답비가 작아지는 경향을 보이지만 90도의 개각에서는 응답의 차이를 갖는 것으로 조사되었다.

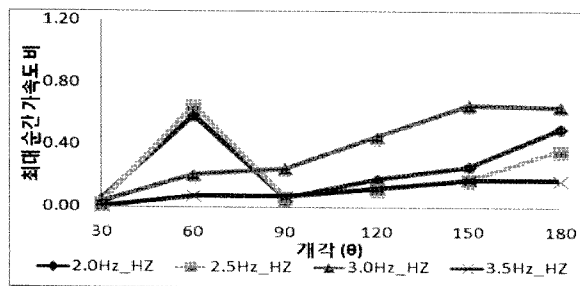
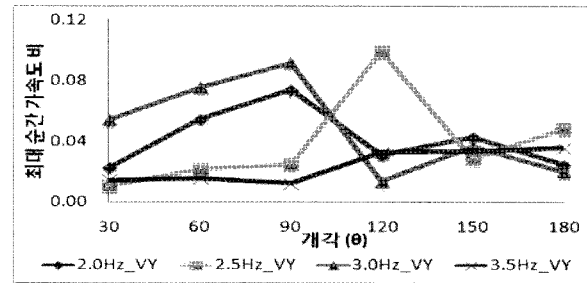
HY에 대한 응답은 전체적으로 개각이 증가함에



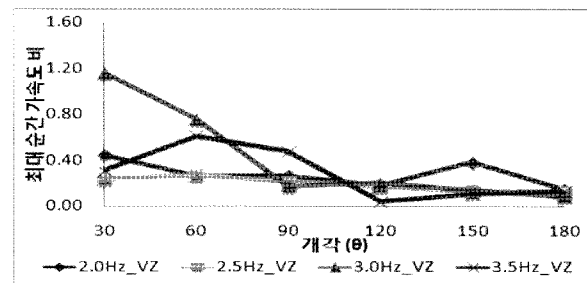
(a) 수평 지진동과 수직 지진동에 대한 X 방향의 최대 순간가속도비



(b) 수평 지진동과 수직 지진동에 대한 Y 방향의 최대 순간가속도비



(c) 수평 지진동과 수직 지진동에 대한 Y 방향의 최대 순간가속도비



〈그림 11〉 개각과 진동수에 따른 최대 순간가속도응답비

따라 응답비도 증가하는 것으로 조사되었으며 VY에 대한 응답의 경우 개각의 변화와 진동수의 변화에 따라 응답이 다양한 특성을 보이는 것으로 조사되었다. 또한 수평지진동(H)과 상하지진동(V)에 대한 Y방향의 응답은 다른 방향에 비해 상대적으로 작은 응답을 보였다.

수평지진동(H)이 고려되었을 때 Z방향의 응답은 개각이 증가함에 따라 커지는 경향을 갖고 있지만 60도의 개각에서 민감하게 반응하는 것으로 조사되었다. 수직방향의 지진동(V)이 고려되었을 때의 경우 개각이 증가함에 따라 최대 가속도 응답이 감소하는 경향을 보였다.

〈그림 11〉을 통해 수평지진동(H)은 X방향에 대해 가장 큰 영향을 주고 Z방향에 대해서도 가속도 응답에 큰 영향을 주었다. 상하지진동(V)이 적용된 경우 Z방향에서 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었으며

X와 Y방향의 응답은 큰 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다.

## 7. 결론

본 논문에서는 각 구조물에 대하여 개각과 고유진동수를 다르게 적용하여 실제 지진을 적용시켜 시간 이력해석을 수행하였으며 이를 통해 배럴 볼트의 순간가속도응답의 분포를 살펴보고 그에 대한 최대 응답비에 대하여 조사 하였다. 본 연구에서 관찰, 분석된 결과는 다음과 같다.

1) 자유 진동해석을 통해 구조물의 동적특성을 조사하였을 때 30도와 60도의 개각을 갖는 해석모델과 90도에서 180도까지의 개각이 적용된 해석모델들의 모드벡터들은 각각 비슷한 동적 경향을 갖는 것으로 조사되었다. 개각에 따라 서로 다른 모드벡터를 갖는

것으로 조사되었는데 이는 모드벡터에 영향을 주는 수평성분과 수직성분의 구성이 개각에 따라 다르게 고려되었기 때문이다.

2) 순간 가속도응답은 HX, VY 그리고 VZ에서 중심 절점을 기준으로 대칭하는 분포를 보였으며 특히 HX와 VZ의 경우 중심 절점에서 최대의 응답을 갖는 것으로 조사되었다. 또한 HY, HZ 그리고 VX는 최소의 응답을 갖는 중심 절점에 대하여 비대칭하는 가속도 분포를 보였다. 30도와 60도의 개각을 갖는 해석모델의 HX, HY 그리고 HZ는 입력 지진파의 진동특성에 영향을 받는 것으로 조사되었고 VX, VY 그리고 VZ의 경우 구조물의 고유 진동특성이 가속도응답 분포에 반영된 것을 알 수 있었다. 90도~180도까지의 HX, HY 그리고 HZ의 순간가속도 응답은 각각 해석모델의 고유 진동특성에 의해 결정되었고 VX, VY 그리고 VZ의 응답 분포는 지진응답 특성에 의해 결정되어졌다. 각 해석모델에 진동수의 크기를 다르게 적용한 경우는 가속도 분포에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었지만 개각에 따라 배럴볼트의 가속도 응답비는 다양한 동적 거동을 보였고 특히 30도와 60도의 개각을 갖는 해석모델과 90도에서 180도까지의 개각이 고려된 해석모델들은 각각 비슷한 형태의 가속도응답 분포를 갖는 것으로 조사되었다.

3) 수평방향의 지진동(H)이 적용된 경우에 X방향의 응답은 개각이 증가함에 따라 커지는 것을 보여주었으며 수직방향의 지진동(V)은 개각이 증가함에 따라 Z 방향의 응답이 감소하는 것으로 조사되었다. 배럴볼트에 수평방향의 지진동(H)이 적용된 경우 X 방향에서 가장 큰 응답을 갖는 것으로 조사되었으며 Z 방향에 대해서도 Y방향에 비해 비교적 큰 응답을 갖는 것으로 조사되었다. 수직방향의 지진동(V)가 고려된 경우 Z방향에서의 응답이 가장 큰 응답을 보였으며 상대적으로 X와 Y방향의 응답은 크지 않은 것으로 조사되었다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)과 특정기초연구사업(R01-2007-000-20765-0)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Ikuo Tatemich and Mamoru Ka waguchi, " A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures.", International Journal of Space Structures Vol. 15, No. 2, 2000.
2. A. Sadeghi, "Horizontal Earthquake Loading and Linear/Nonlinear Seismic Behaviour of Double Layer Barrel Vaults", International Journal of Space Structures Vol. 19, No. 1, 2004.
3. 강주원, 정찬우, "대공간 건축물의 형태별 지진 거동특성", 한국공간구조학회지 학술기사, 제 8권, 제 1호, 2008년 2월, pp.5-12.
4. 정찬우, 정환목, "아치구조물에 대한 지진동의 수평·상하 동시입력에 대한 가속도 응답특성", 한국셀공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 2006년 5월 pp.239-345.
5. H.B. Walker, "The Design and Construction of Double-Layer Space Frame Grids", Constrado, Croydon, Surrey, U.K.
6. John C. "Space Grid Structure", Architectural Press, 1999.
7. Suk, C., "복층 평판형 공간 트러스의 그리드 형태 및 지지상태에 따른 좌굴특성", 한국건축학회 논문집, 제 20권, 제 9호, 2004년 9월, pp.95~102.
8. 정환목, 최석웅, 권택진, "복층 스페이스 프레임 구조물의 격자 높이-스팬비에 따른 소요 부재 중량 평가", 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 1999년 10월, pp85~90.
9. 정찬우, 석근영, 강주원, "갠러킨법을 이용한 아치의 고유진동해석", 한국공간구조학회 논문집, 제 7권, 제 4호, 2007년 8월, pp.55~61.
10. Jun, B., "Design of Building Structures, MIDAS Gen Manual", Korea.
11. M. Fujimoto, "Dynamic Response Analysis of Barrel Vault Double Layer Space Truss Supported by Substructure due to Earthquake Motion.", IAASS International Symposium '97 on Shell & Spatial Structures, 10-14 November 1997, Singapore.

접수일자 : 2009년 1월 5일

심사완료일자 : 2009년 2월 27일

게재확정일자 : 2009년 3월 7일