

하부구조의 강성변화에 따른 대공간구조물의 지진거동

Seismic Response of Large Space Structure with Various Substructure

김기철* 강주원** 고현***
Kim, Gee-Cheol Kang, Joo-Won Ko, Hyun

요약

대공간구조물은 일반 라멘구조와는 다른 동적특성을 가지고 있으며, 이런 동적특성에 관해 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 특정 형태의 대공간구조물에 대해 수행되었으며, 내진설계를 위해 직접적으로 이용 가능한 연구결과는 매우 제한적이다. 본 연구에서는 대공간구조물의 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 대공간구조물의 내진설계에 있어서 수직방향 응답에 대한 고려가 더욱 많이 요구된다.

Abstract

Large 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 large spatial structures and, directly, the usable results of studies are very limited for seismic design of large spatial structures with the lower structure. So, this study is conducted about the truss arch structure that the basic dynamic characteristics of large 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 large spatial structures

키워드 : 동적응답특성, 대공간구조물, 아치, 하부구조

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

1. 서론

대공간구조물은 상부구조인 지붕구조와 하부구조인 기둥 또는 벽체로 구성되어 있으며 이러한 대공간구조물은 일반 라멘구조와는 다른 동적특성을 가지고 있다. 대공간구조물의 상부구조는 장경간을 이루어야 하므로 경량 시스템으로 되어 있으며 하부구조는 상부구조를 지지해야 하므로

강성과 질량이 상부구조에 비하여 매우 크다. 대공간구조물의 목적에 따라서 하부구조가 관람석으로 사용되는 경우에는 하부구조의 강성과 질량이 매우 크며 하부구조가 단순히 상부구조를 지지하는 경우에는 상부구조의 질량이 작기 때문에 하부구조의 강성과 질량이 비교적 작다.

대공간구조물에 대한 연구는 주로 상부 지붕구조의 거동에 대하여 수행되어져 왔으며 대공간구조물에 대한 하부구조의 영향에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 이는 대공간구조물의 거동이 주로 상부 지붕구조에 의해서 지배적이기 때문이다. 일반적으로 대공간구조물의 하부구조는 단순한

* 정희원, 서일대학 건축과 부교수, 공학박사
** 정희원, 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr
*** 정희원, 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

파이프 형태의 기둥으로 되어 있을 수 있다. 그리고 상부구조의 하중이 비교적 큰 경우에 기둥의 강성을 크게 하기 위하여 래티스 형태의 기둥으로 하기도 한다. 또한 대공간구조물의 하부를 콘크리트 기둥과 벽으로 하여 하부구조를 구성하기도 한다.

대공간구조물의 지진거동은 수평지진동에 의해 상하진동이 발생하기 쉬운 특성을 가지고 있으며 고유주기와 진동모드와 같은 동적특성은 형태, 라이즈비 및 하부 지지조건 등에 의하여 다양하게 나타난다.^{1),2)} 그리고 지진에 의한 대공간구조물의 피해보고서에 따르면 주요 피해는 상부구조를 지지하는 기둥 또는 벽체에서 발생되며 상부구조는 상대적으로 피해가 적었던 것으로 보고되었다. 또한 상부구조물을 지지하는 좌우 하부구조의 강성이 서로 다를 경우에 상부구조 양쪽 지점의 변위 차이로 인해 발생된 대공간구조물의 피해도 다수 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 배럴볼트 하부구조의 강성에 따른 상부구조의 지진거동을 분석하여 하부구조의 영향을 고찰하고자 한다. 본 연구에 의한 연구내용 및 결과는 대공간구조물의 안전성 확보 및 적합한 설계와 시공을 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

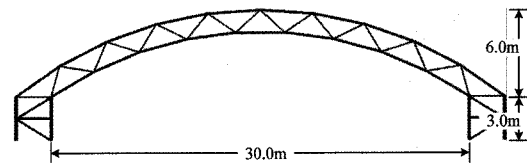
대공간구조물은 공간을 이루는 배럴볼트나 돔과 같은 상부의 지붕구조물이 하부의 기둥이나 벽에 지지되거나 직접 기초에 지지될 수도 있다. 대공간구조물의 동적특성은 구조물의 형상에 따라 영향을 받으며 일반적인 수평지진동에 반응하는 역대칭 모드와 상하 지진동에 반응하는 대칭모드가 나타난다.^{3),4),5),6)}

2. 예제 구조물의 동적특성

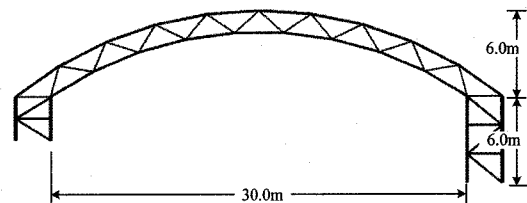
2.1 배럴볼트 예제 구조물

배럴볼트 예제 구조물의 경간은 30.0m, 높이는 6.0m이며 트러스 축은 1.5m로 하였다. 하부구조는 강관기둥, 래티스기둥 그리고 콘크리트 재질의 기둥과 벽체로 하여 하부구조의 강성을 변화시켰다. 그리고 하부구조의 좌우 강성을 다르게 하기 위하

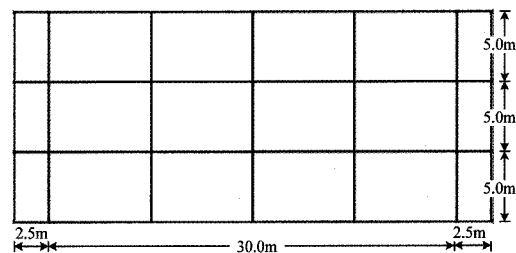
여 기둥의 길이를 다르게 하였다. <그림 1 (a)>는 하부구조를 래티스기둥으로 하고 좌우측 기둥의 길이를 3m로 하였으며 <그림 1 (b)>는 좌측 기둥의 길이를 3m로 우측 기둥의 길이를 6m로 한 것이다. 그리고 <그림 1 (c)>는 예제 배럴볼트의 평면도 이다. 상부 지붕구조의 모든 부재는 SWS 490의 원형 강관을 사용 하였으며 상현재와 하현재는 $\varnothing 139.8 \times 4.5$ 이며 사재는 $\varnothing 76.3 \times 4.0$ 로 되어 있다. 또한 본 연구에서 하부구조를 기둥으로 가정하였다.



(a) 해석모델(LC-L3-R3) 입면도



(b) 해석모델(LC-L3-R6) 입면도



(c) 해석모델(LC-R3-L3) 평면도

<그림 1> 해석모델 예

<표 1> 배럴볼트 예제 구조물을 표기한 것으로 UC, LC 및 WA는 각각 원형 강관기둥, 래티스기둥 그리고 콘크리트 기둥 및 벽체 하부를 갖는 배럴볼트 예제 구조물이다. L3-R3 및 L6-R6은 좌우 하부구조의 높이가 각각 3.0m 및 6.0m인 것의 의미하며 L3-R6은 좌측 하부구조의 높이가 3.0m, 우측 하부구조의 높이가 6.0m인 예제 구조물을 의미한다.

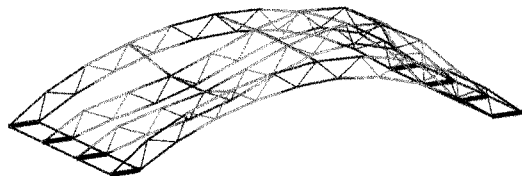
<표 1> 배럴볼트 예제 구조물

Mode NO.	좌측 하부구조 높이(m)	우측 하부구조 높이(m)	하부구조 형태
00-L0-R0	없음	없음	하부구조 없음
UC-L3-R3	3m	3m	원형 강관기둥
UC-L3-R6	3m	6m	
UC-L6-R6	6m	6m	
LC-L3-R3	3m	3m	래티스 기둥
LC-L3-R6	3m	6m	
LC-L6-R6	6m	6m	
WA-L3-R3	3m	3m	콘크리트 기둥+벽
WA-L3-R6	3m	6m	
WA-L6-R6	6m	6m	

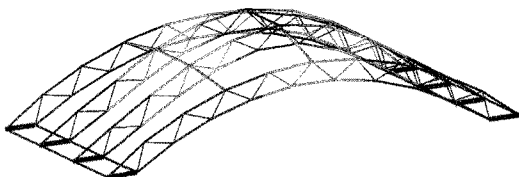
예제 구조물의 지진해석에 El-Centro(NS)를 적용하였다. 적용한 지진의 PGA(Peak Ground Acceleration) 0.3569g이며 El-Centro(NS) 지진의 지속시간은 53.72초 이지만 30초 이후의 지진 에너지는 미비함으로 본 연구에서는 30초까지의 지진데이터만을 사용하였다.

2.2 예제 구조물의 동적 특성

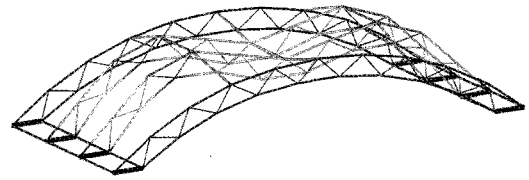
배럴볼트는 아치를 연속적으로 배열한 것으로 배럴볼트의 진동모드 형상은 아치의 진동모드 형상을 기본적으로 내재하고 있을 것이다.



(a) 00-L0-R0(1차 모드-17.00Hz)



(b) 00-L0-R0(2차 모드-19.17Hz)

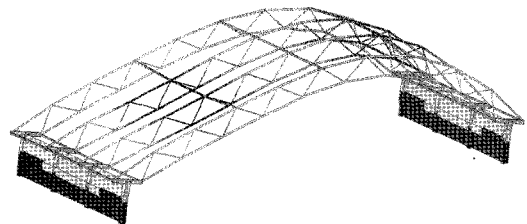


(c) 00-L0-R0(3차 모드-33.29Hz)

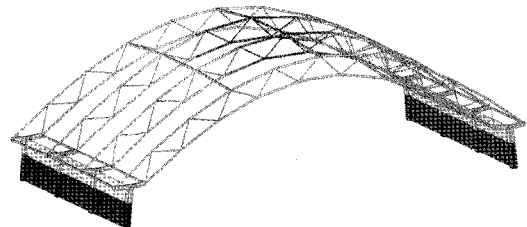
<그림 2> 하부구조 없는 배럴볼트의 동적특성

<그림 2>는 하부구조가 없는 배럴볼트 예제 구조물의 진동모드 형상과 고유진동수로 1차 모드와 3차 모드는 역대칭 모드형상, 2차 모드는 대칭 모드형상을 보이고 있다. 이는 아치 구조물의 전형적인 진동모드 형상이다.

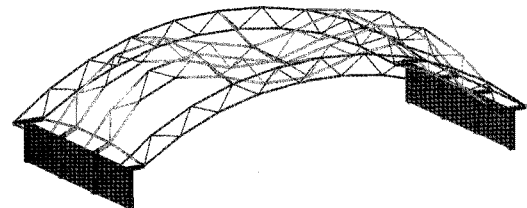
<그림 3>, <그림 4> 및 <그림 5>는 콘크리트 기둥과 벽체의 하부구조를 갖는 배럴볼트 예제 구조물의 주요 저차 진동모드 형상으로 상부구조의 진동모드 형상은 하부구조가 없는 배럴볼트 구조물의 진동모드 형상과 매우 유사하게 나타나고 있으나 전체적인 진동모드 형상은 하부구조 강성 변화에 따라서 약간 다르게 나타나고 있다.



(a) WA-L3-R3(1차 모드-10.99Hz)

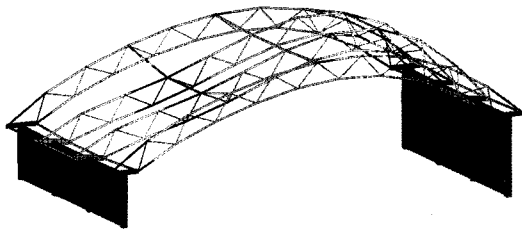


(b) WA-L3-R3(3차 모드-12.12Hz)

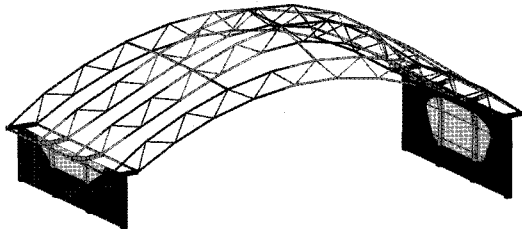


(c) WA-L3-R3(17차 모드-28.47Hz)

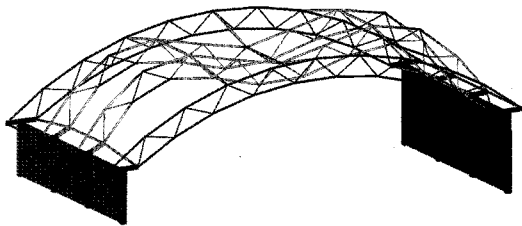
<그림 3> WA-L3-R3 예제 구조물의 동적특성



(a) WA-L3-R6(9차 모드-14.24Hz)



(b) WA-L3-R6(13차 모드-19.09Hz)

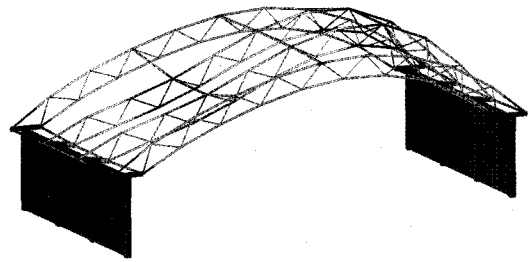


(c) WA-L3-R6(21차 모드-28.48Hz)

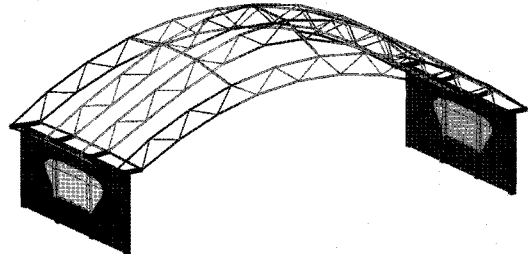
<그림 4> WA-L3-R6 예제 구조물의 동적특성

원형강관 기둥 및 래티스 기둥의 하부구조를 갖는 배럴볼트 예제 구조물의 주요 저차 진동모드 형상도 <그림 3>, <그림 4>, <그림 5>와 같이 콘크리트 기둥과 벽체의 하부구조를 갖는 배럴볼트 구조물의 진동모드 형상과 유사하게 나타나고 있다.

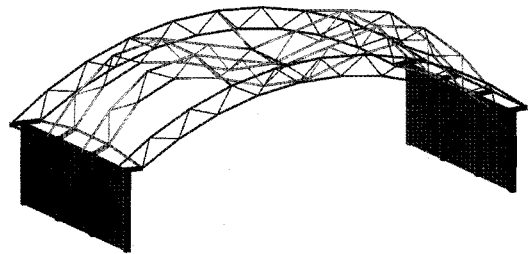
**L3-R3(좌우 높이가 3m인 UC, LC, WA 구조물) 및 **L6-R6(좌우 높이가 6m인 UC, LC, WA 구조물)같이 좌우 하부구조의 강성이 같은 배럴볼트 예제 구조물의 진동모드 형상은 <그림 2>와 같이 하부구조가 없는 배럴볼트 예제 구조물의 진동모드 형상과 유사하게 나타나고 있으나, **L3-R6(좌측-3m 우측-3m인 UC, LC, WA 구조물)과 같이 좌우 하부구조의 강성이 다른 배럴볼트 예제 구조물의 진동모드 형상은 하부구조의 강성차이에 의한 진동모드 형상이 먼저 나타나고 있다.



(a) WA-L6-R6(9차 모드-13.71Hz)



(b) WA-L6-R6(13차 모드-17.79Hz)



(c) WA-L6-R6(25차 모드-28.72Hz)

<그림 5> WA-L6-R6 예제 구조물의 동적특성

<표 2>는 하부구조 강성에 따른 배럴볼트 예제 구조물의 모드별 진동수를 나타낸 것이다. 배럴볼트 예제 구조물의 진동모드의 고유진동수는 강성과 질량에 의한 순서로 콘크리트 기둥 및 벽체, 원형강관기둥, 래티스기둥 순으로 나타나고 있다. 콘크리트 기둥 및 벽체의 하부를 갖는 배럴볼트 예제구조물의 1차 진동모드 고유진동수가 WA-L3-R3보다 WA-L3-R6 및 WA-L6-R6이 더 크게 나타나고 있다. 이는 하부구조의 강성이 작아서 횡방향 진동모드 영향이 매우 크기 때문이다.

하부구조의 강성이 작을수록 배럴볼트 예제 구조물의 고유진동수는 작게 나타나고 있다. 지지응답에 많은 영향을 끼치는 1차 진동모드의 고유진동수를 살펴보면 하부구조의 강성이 가장 큰 래티

스기동의 배럴볼트 예제 구조물의 고유진동수 차가 가장 작게 나타나고 있다. 그리고 3차 이상의 고차 진동모드에서는 하부구조의 형상과 높이에 대하여 비교적 영향이 작은 것을 볼 수 있다.

<표 2> 예제 구조물의 모드별 고유진동수(Hz)

Mode NO.	1차 모드	2차 모드	3차 모드	비고
00-L0-R0	17.00	19.17	33.29	
UC-L3-R3	11.56	12.27	28.20	
UC-L3-R6	11.16	7.80	28.09	1차, 2차 역전
UC-L6-R6	6.17	7.12	27.72	
LC-L3-R3	15.22	15.24	33.32	
LC-L3-R6	15.16	12.98	32.20	1차, 2차 역전
LC-L6-R6	12.59	13.49	31.72	
WA-L3-R3	10.99	23.09	28.47	
WA-L3-R6	14.24	19.09	28.49	횡방향
WA-L6-R6	13.71	17.79	28.72	진동모드 영향

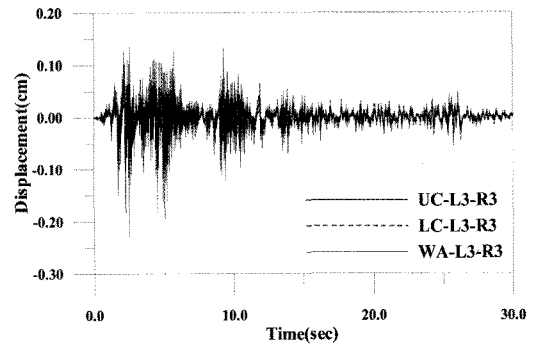
3. 예제 구조물의 지진응답

3.1 하부구조 형상에 따른 지진응답

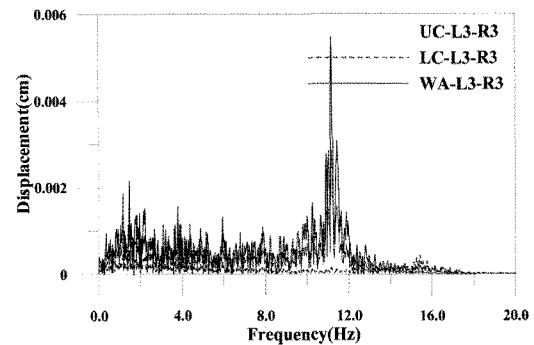
배럴볼트 예제구조물의 하부구조는 용도 및 상부구조의 무게에 따라서 벽체 및 기둥으로 구성할 수 있으며 하부구조의 형상에 따라서 하부구조의 강성에 영향을 끼치므로 그에 따른 지진응답이 다르게 나타날 수 있다.

<그림 6>은 하부구조 높이가 3m인 배럴볼트 예제 구조물에서 응답이 비교적 크게 나타나는 절점'a'의 수평방향 지진응답을 나타낸 것이다. <그림 6>의 배럴볼트 예제 구조물의 수평방향 지진응답을 살펴보면, 하부구조가 콘크리트 기둥과 벽체로 구성된 예제 구조물의 수평방향 지진응답이 가장 크게 나타나고 있으며 하부구조가 래티스 기둥으로 구성된 예제 구조물의 수평방향 지진응답이 가장 작게 나타나고 있다. 이는 하부구조의 강성이 클수록 상부구조의 변위응답이 작아지기 때문이다. 또한 지진응답 스펙트럼의 경우에 예제구조물의 응답에

가장 영향을 많이 끼치는 1차 모드 고유진동수에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.



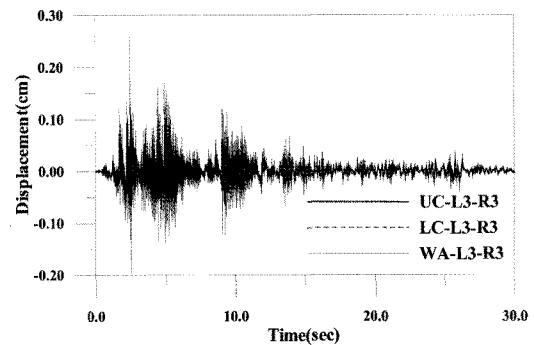
(a) 절점 'a'의 수평방향 변위응답



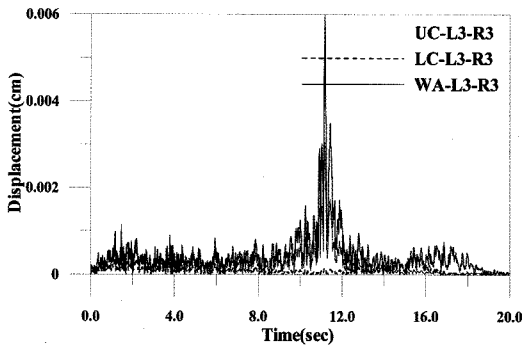
(b) 절점 'a' 수평방향 변위응답-FFT

<그림 6> **L3-R3의 수평방향 지진응답

배럴볼트 구조물의 경우에 수평방향 지진하중에 의해서 수평방향 지진응답은 물론 연직방향 지진응답도 크게 나타나고 있다. <그림 7>은 하부구조 높이가 3m인 배럴볼트 예제 구조물에서 연직방향 응답이 가장 크게 나타나는 절점'a'의 수평방향 지진응답을 나타낸 것이다.



(a) 절점 'a' 연직방향 변위응답



(b) 절점 'a' 연직방향 변위응답-FFT

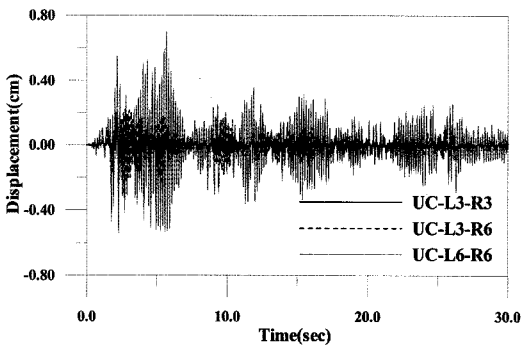
<그림 7> **-L3-R3의 연직방향 지진응답

배럴볼트 하부구조를 콘크리트 기둥과 벽체로 한 예제 구조물의 연직방향 변위응답이 가장 크게 나타나고 있으며, 배럴볼트 하부구조를 래티스 기둥으로 한 예제 구조물의 연직방향 변위응답이 가장 작게 나타나고 있다. 이는 수평방향 변위와 마찬가지로 하부구조의 강성이 증가함에 따라서 상부구조의 전체적인 연직방향 변위응답이 감소하는 것을 볼 수 있다.

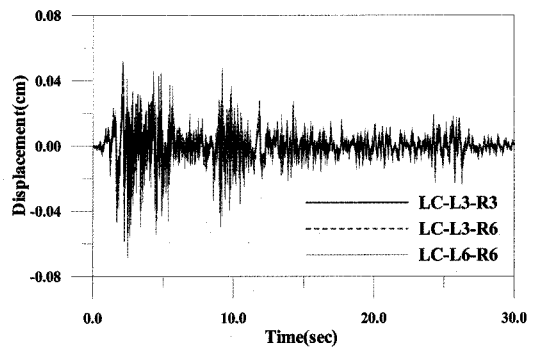
3.2 하부구조 높이에 따른 지진응답

대공간구조물의 용도에 따라서 하부구조의 형상은 물론 높이도 다를 수 있다. 따라서 하부구조의 높이에 의한 강성 영향을 분석할 필요가 있다.

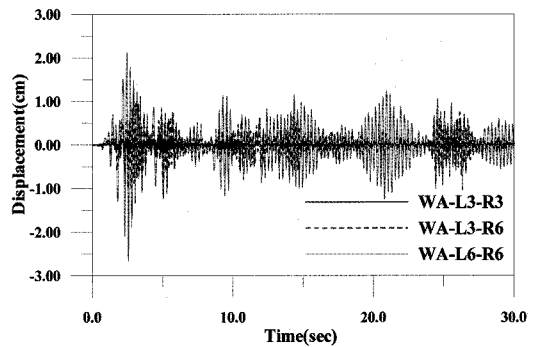
<그림 8>은 배럴볼트 예제 구조물의 하부구조 높이에 따른 절점 'a'에서의 수평방향 지진응답을 나타낸 것이다.



(a) UC 예제 구조물의 절점 'a' 수평 변위응답



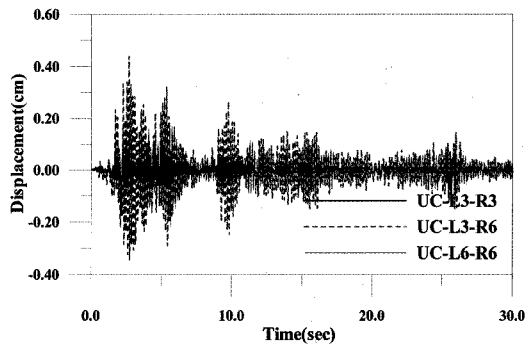
(b) LC 예제 구조물의 절점 'a' 수평 변위응답



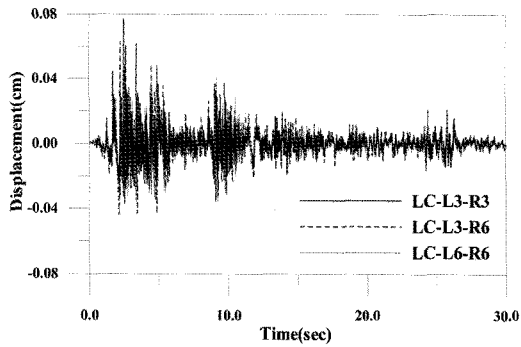
(c) WA 예제 구조물의 절점 'a' 수평 변위응답

<그림 8> 절점 'a'에서의 수평 지진응답

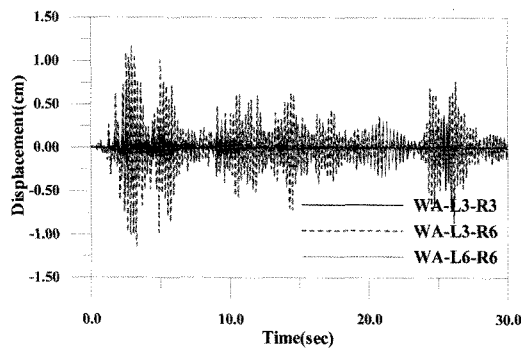
<그림 8>의 배럴볼트 예제 구조물의 수평방향 지진응답을 살펴보면, 하부구조의 높이가 좌우 6m인 예제 구조물의 수평방향 지진응답이 가장 크게 나타나고 있으며 하부구조의 높이가 3m인 예제 구조물의 수평방향 지진응답이 가장 작게 나타나고 있다. 하부구조의 높이가 높을수록 강성이 작아지기 때문에 상부구조의 변위응답이 작게 나타나는 것이다.



(a) UC 예제 구조물의 절점 'a' 연직 변위응답



(b) LC 예제 구조물의 절점 'a' 연직 변위 응답



(c) WA 예제 구조물의 절점 'a' 연직 변위 응답
<그림 9> 절점 'a'에서의 연직 지진 응답

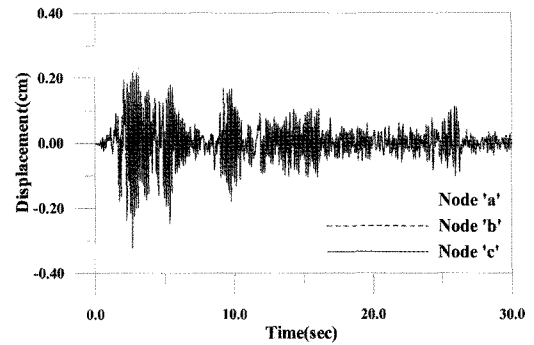
<그림 9>는 배럴볼트 예제 구조물의 하부구조 높이에 따른 절점 'a'에서의 연직방향 지진 응답을 나타낸 것이다. <그림 9>의 배럴볼트 예제 구조물의 연직방향 지진 응답을 살펴보면, 하부구조의 높이가 좌우 비대칭인 **L3-R6 예제 구조물의 연직방향 지진 응답이 가장 크게 나타나고 있다. 이는 하부구조 높이가 비대칭인 경우에 상부구조의 1차 모드 형상이 비대칭으로 하부구조 높이가 낮은 쪽으로 모드 형상이 집중되기 때문이다.

3.3 하부구조 좌우 강성차이에 따른 지진 응답

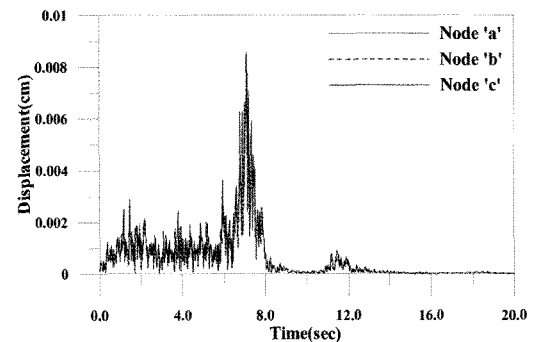
대공간구조물은 경간에 매우 크기 때문에 경우에 따라서 지반의 높이가 다를 수 있다. 따라서 대공간구조물의 좌우 하부구조의 높이에 의한 강성 영향을 분석하고자 한다.

<그림 10>, <그림 11> 그리고 <그림 12>는 좌

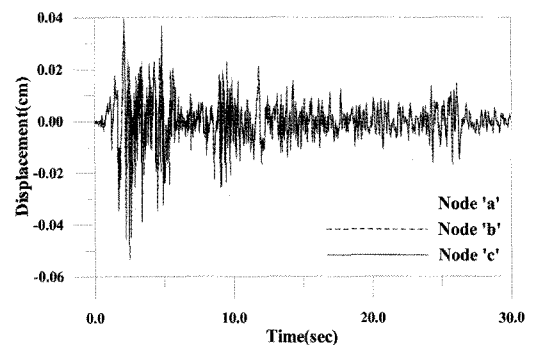
우 하부구조 강성 차이에 따른 상부구조 위치별 수평방향 지진 응답을 나타낸 것이다. 하부구조 좌우 강성이 다른 경우에 상부구조의 위치와 상관없이 수평방향 변위 응답은 유사하게 나타나고 있다. 하부구조가 콘크리트 기둥과 벽체로 구성되어 있는 예제 구조물의 경우에 수평방향 응답의 탁월한 진동수가 5.0Hz 정도인 것을 볼 수 있다. 이는 WA-L3-R6 예제 구조물의 1차 모드(4.77Hz)가 횡방향(수평방향) 모드로 나타나기 때문이다.



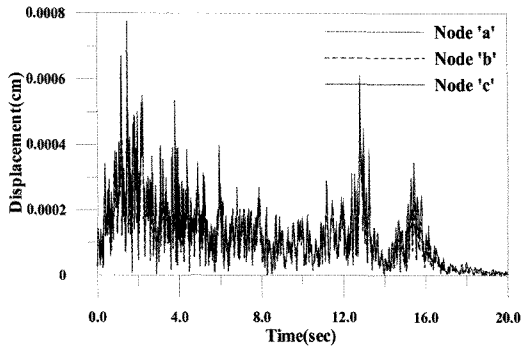
(a) UC-L3-R6의 수평방향 변위 응답



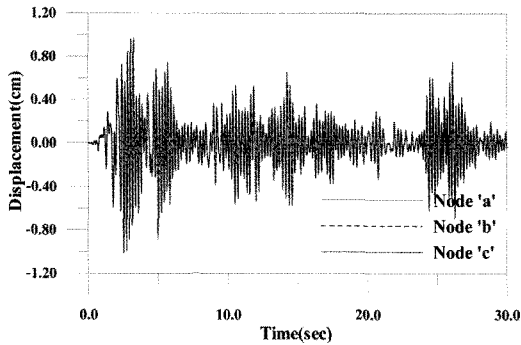
(b) UC-L3-R6의 수평방향 변위 응답 FFT
<그림 10> UC-L3-R6 수평방향 변위 응답



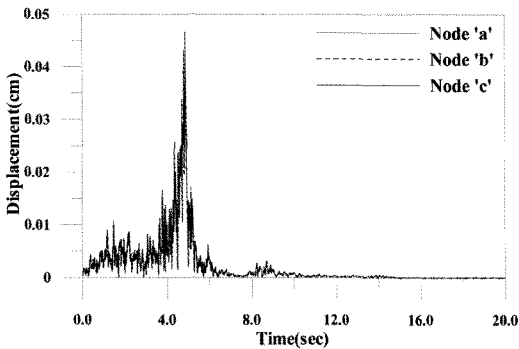
(a) LC-L3-R6의 수평방향 변위 응답



(b) LC-L3-R6의 수평방향 변위응답 FFT
<그림 11> LC-L3-R6 수평방향 변위응답



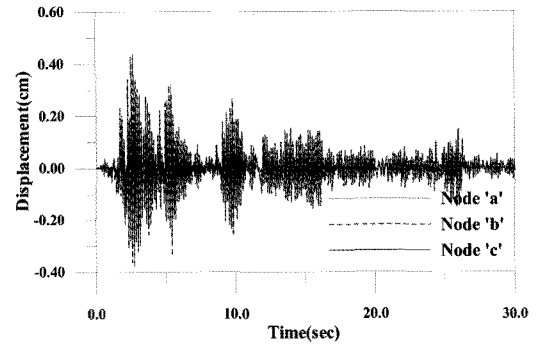
(a) WA-L3-R6의 수평방향 변위응답



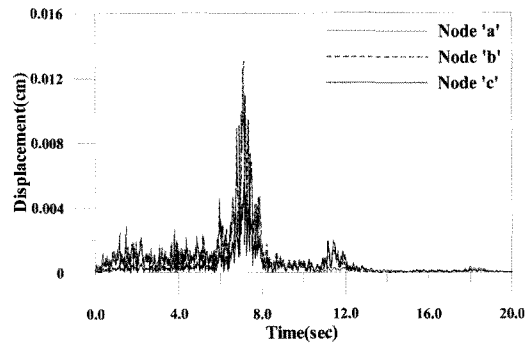
(b) WA-L3-R6의 수평방향 변위응답 FFT
<그림 12> WA-L3-R6 수평방향 변위응답

<그림 13>, <그림 14> 그리고 <그림 15>는 좌우 하부구조 강성 차이에 따른 상부구조 위치별 연직방향 지진응답을 나타낸 것이다. 하부구조 좌우 강성이 다른 경우, 수평변위응답과 다르게 상부구조의 위치에 따라서 응답이 다른 것을 볼 수 있다. 하부구조의 높이가 낮은 좌측에서의 변위응답이 다른 부분의 진동응답보다 큰 것을 볼 수 있다. 하부구조의 강성이 대칭

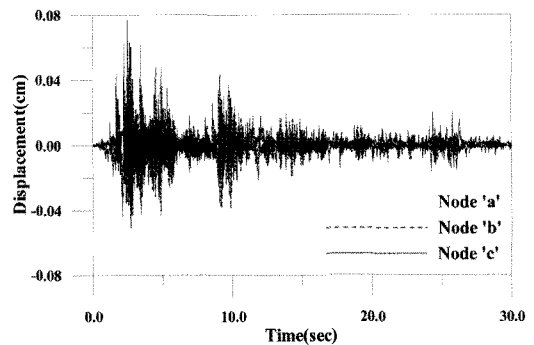
인 경우에 일반적으로 상부구조의 중앙점(절점'b')에서 지진응답이 매우 작게 나타나고 있으나 하부구조의 높이가 좌우 비대칭인 구조물인 경우에 상부구조의 중앙점(절점'b')에서도 변위응답이 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 하부구조의 좌우 비대칭 강성으로 인하여 상부구조의 진동모드 양상이 비대칭으로 나타나기 때문이다.



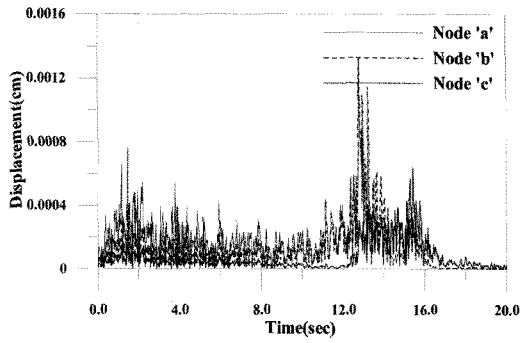
(a) UC-L3-R6의 연직방향 변위응답



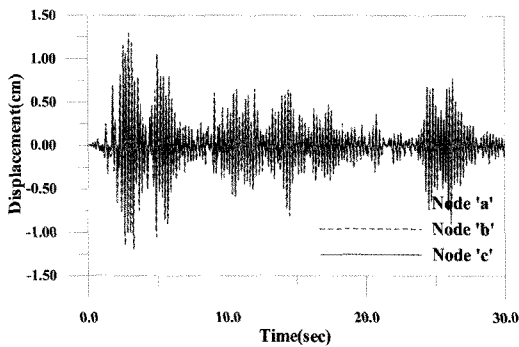
(b) UC-L3-R6의 연직방향 변위응답
<그림 13> UC-L3-R6 연직방향 변위응답



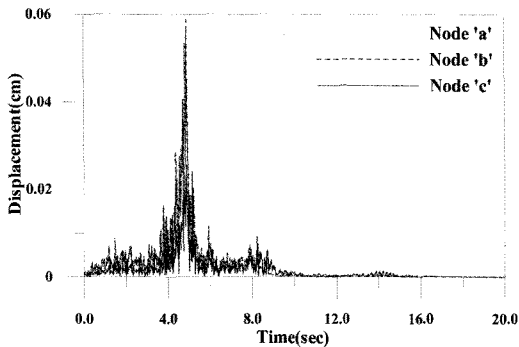
(a) LC-L3-R6의 연직방향 변위응답



(b) LC-L3-R6의 연직방향 변위응답 FFT
<그림 14> UC-L3-R6 연직방향 변위응답



(a) WA-L3-R6의 연직방향 변위응답



(b) WA-L3-R6의 연직방향 변위응답 FFT
<그림 15> WA-L3-R6 연직방향 변위응답

4. 결 론

본 연구에서는 배럴볼트 하부구조의 형상 및 높이에 의한 배럴볼트 구조물의 동적특성 영향을 분석하였다. 그리고 하부구조 강성에 따른 상부구조의 지진응답 영향을 분석하였다. 특히 하부구조의 좌우 높이가 비대칭인 배럴볼트 구조물에 대한 상부구조의 위치별 지진응답 비교 분석하였다.

- 하부구조의 강성이 작은 경우에 횡방향(수평

방향) 모드가 저차모드에서 우선적으로 나타나며 하부구조가 좌우 비대칭인 경우에 저차모드가 역전되어 나타나기도 한다. 이러한 저차모드는 구조물의 수평방향 변위응답에 많은 영향을 미치나 연직방향 변위응답에는 비교적 영향을 작게 미친다.

- 하부구조의 강성이 작을수록 수평방향 변위응답은 물론 연직방향 변위응답도 작게 나타나고 있으며 하부구조의 높이가 좌우 비대칭인 경우에 수평방향보다는 연직방향에 많은 영향을 준다.

- 연직방향 변위응답의 경우에 하부구조 높이가 좌우 대칭인 대공간구조물에서는 상부구조 경간의 중앙점에서 매우 미비하지만 하부구조 높이가 좌우 비대칭인 경우에 상부구조 경간의 중앙점에서도 변위응답이 비교적 크게 나타난다.

- 하부구조의 높이가 좌우 비대칭인 경우에 수평방향 변위응답은 상부구조 모든 위치에서 유사하게 나타나고 있지만 연직방향 변위응답은 하부구조의 높이가 낮은 쪽에서 크게 나타나고 있다.

- 하부구조의 강성이 작은 경우에 변위응답 스펙트럼의 탁월 진동수가 1차 모드에 집중되어 나타나며 하부구조의 강성이 큰 경우에 변위응답 스펙트럼의 탁월 진동수가 명확하게 나타나지 않고 있다.

대공간구조물의 하부구조 강성은 상부구조의 지진응답에 많은 영향을 미친다. 그리고 하부구조 높이 차이는 수평방향의 응답 보다는 연직 방향의 지진응답에 많은 영향을 미친다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구를 기반으로 추후 연구에서는 하부구조 강성변화에 따른 돔 상부구조의 동적특성 및 지진응답 분석에 대한 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정환목, 최석웅, 권택진, 복층 스페이스 프레임

구조물의 격자높이-스팬비에 따른 소요 부재 중량 평가, 대한건축학회 학술기사는논문집, 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, 박성무, 강주원, 아치구조물의 모의 지진과 입력에 따른 지진응답특성에 관한연구, 한국공간구조학회 논문집, 제8권 제6호, pp.59-66, 2008

4. 신지욱, 이기학, 김기철, 정찬우, 강주원, 복층 배럴볼트 시스템의 지진거동에 대한 연구, 한국공간구조학회 2009춘계학술발표회 논문집, 제6권 제1호, pp.133~138, 2009

5. John C. "Space Grid Structure", Architectural Press, 1999

6. Architectural Institute of Japan, "Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structure", Maruzen, 2006