

라이즈-스팬비에 따른 면진 아치구조물의 지진응답 분석

The Seismic Response According to Rise-Span Ratio of the Arch Structure With Seismic Isolation

김수근*
Kim, Su-Geun

김유성*
Kim, Yu-Seong

김기철**
Kim, Gee-Cheol

강주원***
Kang, Joo-Won

Abstract

In order to reduce the seismic response of the spatial structure, a seismic isolation system with sufficient flexibility is used. The natural period of structure with seismic isolation system got be long to avoid prominent period. In this study, The seismic response of the truss-arch structure, which is modeled in three types according to the rise-span ratio is analyzed on El-centro, Northridge and Artificial Earthquake and compared with the seismic response of the truss-arch structure with lead rubber bearing(LRB). When seismic load is applied to the truss arch with isolation system, the horizontal acceleration response of the truss arch is reduced and vertical seismic response is also reduced. The application of the seismic isolation system is effective in controlling the seismic response.

Keywords : Seismic behavior, Dynamic characteristics, Arch structure, Spatial structure, Seismic isolation system

1. 서론

대공간구조물은 다양한 규모와 형태를 가지며, 일반 라멘구조물과는 구조특성이 다르고 예측할 수 없는 변수가 많다. 일반 라멘구조물에 비해 자중이 작고 장경간인 대공간구조물은 형태적, 구조적 특성으로 인해 지진하중을 받았을 때 나타나는 동적응답을 파악하는 것이 어렵다. 또한 대공간구조물은 경기장, 강당, 관람시설 등 많은 사람들이 이용하는 공공건물로 사용되며, 지진하중에 의하여 구조물이 손상된다면 인명피해가 매우 심각할 것으로 예상된다.

대공간구조물에 대한 올바른 설계와 안전성을 확보하기 위해, 지진하중을 받는 대공간구조물의 동적응답에 대한 연구가 진행되고 있다¹⁾. 기존 연구를

살펴보면 대공간구조물은 수평 지진동에 대해 수평 방향 응답보다 수직 방향 응답이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있고²⁾, 상부구조를 지지하는 기둥 아래에 면진장치를 설치하는 것보다 상부구조에 직접적으로 면진장치를 연결했을 때 응답 저감효과가 높게 나타난다는 것을 알 수 있다³⁾. 따라서 면진장치를 이용하여 대공간구조물의 지진응답을 저감시키기 위해서는 수평 방향 응답과 수직 방향 응답을 고려해야 한다. 본 연구에서는 아치구조물의 기본 형태인 트러스-아치구조를 선정했다. 면진장치는 납-고무면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)를 아치구조물에 직접적으로 설치하여 라이즈-스팬비에 따른 지진응답을 비교, 분석하고자 한다.

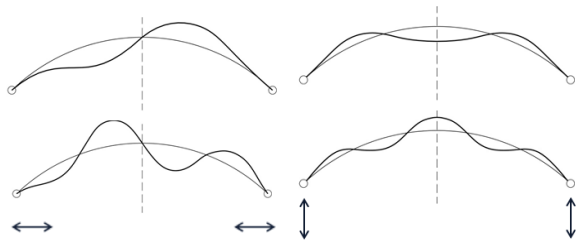
2. 면진 아치구조물의 동적거동

2.1 아치구조의 동적특성

아치구조물은 형상을 결정하는 개각과 겹보기 세장비에 의해 동적특성이 좌우된다. 라이즈-스팬비 조절하여 비교함으로써 개각과 겹보기 세장비에 의한 영향을 예측할 수 있다. 아치의 고유모드를 구해

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학부, 석사과정
School of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 서일대학교 건축학과 교수, 공학박사
College of Architecture, Seoil University
*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-3544 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

보면, <Fig. 1>과 같이 수평지진에 의한 역대칭모드와 상하지진에 의한 대칭모드를 얻을 수 있다. 대공간구조물은 라멘구조와 다르게 형태적 특성으로 인하여 수평지진에 의해 수평응답뿐만 아니라 수직응답이 나타나고, 구조물의 형상에 따라 수직응답이 크게 발생할 수 있다^{4),5)}.



(a) Asymmetry mode (b) Symmetry mode
 <Fig. 1> Characteristic mode of arch structure

2.2 구조물의 면진장치

면진장치는 구조물과 기초를 이격시킴으로서 외부의 지진진동으로부터 구조물을 보호하는 시스템이다. 유연한 부재를 구조물과 기초 사이에 삽입함으로써 전체 구조물의 주기를 지진에너지가 집중된 탁월 주기에서 벗어나게 해준다.

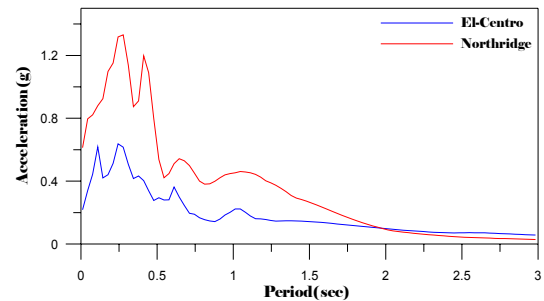
납-고무면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)는 가장 많이 사용되는 면진장치이며, 납으로 이루어진 코어와 이를 보강시켜주는 고무와 철판으로 구성된다. 여기서 납은 단면의 중앙부에 삽입되어 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시켜준다. 면진장치를 적용한 아치구조물은 일반적인 면진구조물의 거동 함께 아치구조물의 거동을 보이므로 면진 라멘구조물과는 다른 진동응답을 나타나게 된다. 따라서 아치구조물과 같은 대공간구조물에 면진장치를 적용하기 위해서는 이에 대한 정확한 분석이 요구된다.

3. 면진장치를 갖는 아치 예제구조물

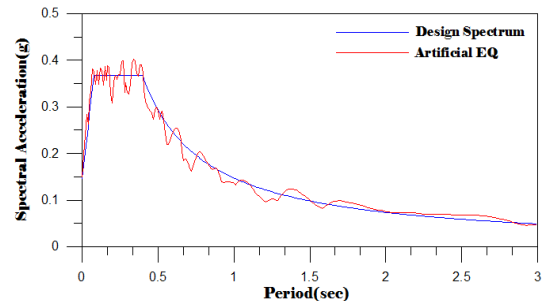
3.1 예제구조물 적용 지진하중

라이즈-스팬비에 따른 면진 아치구조물의 지진응답을 분석하기 위해서 대공간구조물의 지진응답 비교, 분석에 많이 사용되는 El-Centro, Northridge 지진하중과 2016년에 고시된 건축구조설계기준을

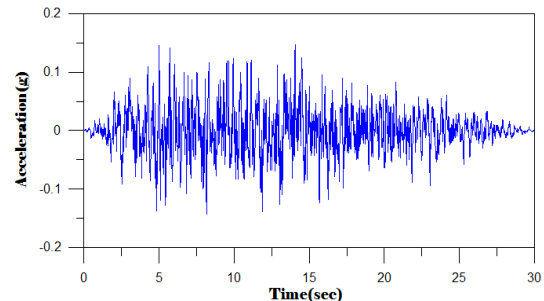
바탕으로 인공지진하중을 생성하여 적용했다.



<Fig. 2> Acceleration spectrum of earthquake load



<Fig. 3> Design response and artificial earthquake load acceleration spectrum



<Fig. 4> Acceleration time history of artificial earthquake load

<Fig. 4>는 El-Centro와 Northridge 지진의 가속도스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 인공지진하중은 건축구조설계기준을 바탕으로 설계응답가속도스펙트럼을 작성했다. 지반은 보통암으로 설정했으며, 지역계수는 0.22g를 사용하여 설계응답가속도스펙트럼 그래프를 작성했다. <Fig. 5>는 설계응답가속도스펙트럼과 인공지진하중의 가속도스펙트럼을 나타내었다. 인공지진하중의 가속도스펙트럼이 설계응답가속도스펙트럼과 유사하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 <Fig. 6>은 인공지진하중의 가속도시간이력 그래프이다. 인공지진하중의 가장 큰 값(Peak Ground Acceleration, PGA)이 0.146g

으로 나타난다. 이는 우리나라에서 발생하는 지진 중 중약진 지진하중으로 볼 수 있다. 3가지 지진하중 모두 1.0초 이하의 단주기에서 가속도응답이 크게 발생하며, 2.0초 이상의 주기에서는 가속도응답이 줄어든다⁶⁾⁷⁾.

3.2 아치 예제구조물

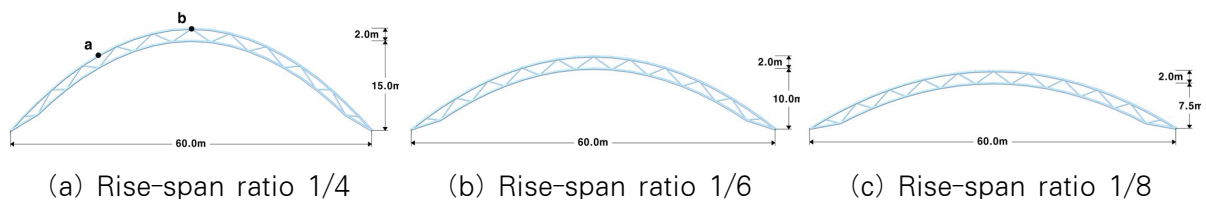
예제 아치구조물의 상현재, 하현재는 $\phi 355.6 \times 6.3$ 이고 사재는 $\phi 216.3 \times 4.5$ 의 강관을 사용했다. 구조물의 경간은 60m이며 라이즈-스팬비의 변화와 관계없이 일정하게 했다. 예제구조물의 높이는 라이즈-스팬비에 따라 각각 15m, 10m, 7.5m로 설정했다. <Fig. 7>은 라이즈-스팬비 1/4, 1/6, 1/8인 트러스-아치구조물을 나타낸 것이다. <Fig. 7>에서 절점 a는 예제구조물의 1/4지점, 절점 b는 1/2지점(중앙)을 나타낸다. 또한 면진장치가 설치되지 않은 예제구조물의 경우, 상부구조인 트러스-아치구조물이 직접적으로 기초에 연결되어 있으며, 면진장치가 설치된 경우에는 상부구조는 면진장치와 직접적으로 설치되었다.

3.3 예제구조물의 동적특성

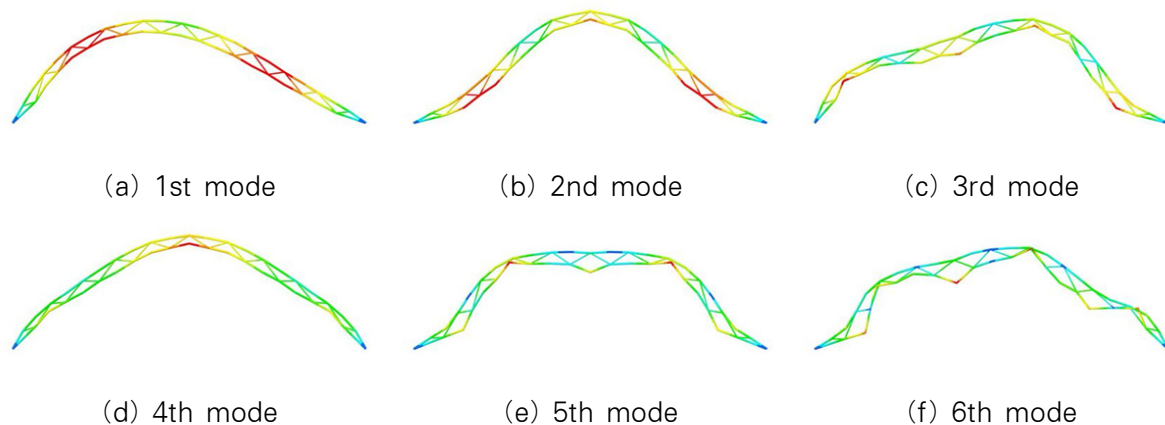
<Fig. 8>은 라이즈-스팬비가 1/4인 아치구조물의 진동모드를 나타내고 있다. 진동모드는 대칭모드와 비대칭모드가 나타나는 일반적인 아치구조의 동적특성을 보이고 있다. 반면 라이즈-스팬비가 1/6, 1/8인 경우, 3, 4차 진동모드의 순서가 반대로 나타난다. 이는 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 수직방향 응답이 크게 나타나기 때문이다. <Table 1>은 3가지 예제구조물의 진동모드별 주기를 나타낸 것이다. 예제구조물의 주기가 구조물에 적용된 지진하중의 가속도스펙트럼에서 응답이 크게 나타나는 단주기 영역(0.08~0.4sec)에 근접하는 것을 볼 수 있다.

<Table 1> Natural period of arch structure(Unit : sec)

Mode	Rise-span ratio 1/4	Rise-span ratio 1/6	Rise-span ratio 1/8
1st	0.4337	0.3301	0.2941
2nd	0.1987	0.1582	0.1709
3rd	0.1265	0.1382	0.1432
4th	0.1084	0.1025	0.0941
5th	0.0938	0.0782	0.0723
6th	0.0820	0.0694	0.0650



<Fig. 5> Truss-arch structure according to rise-span ratio



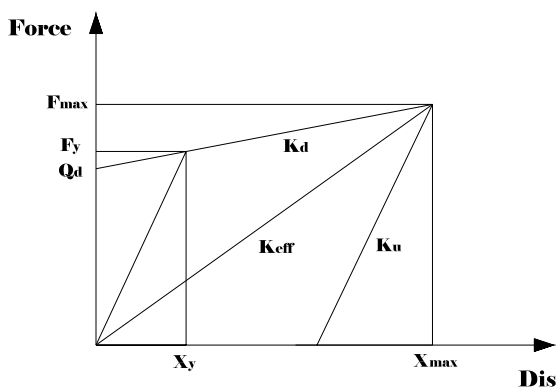
<Fig. 6> Characteristic mode of rise-span ratio 1/4

3.4 면진장치 설계

면진장치의 진동주기는 면진장치의 유효강성과 상부구조물의 무게에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 3가지 예제구조물에 동일한 면진장치를 설치하였으며, 라이즈-스팬비에 따른 지진거동을 분석하기 위해서 면진장치가 설치된 예제구조물의 1차 고유주기가 $1.12 \pm 0.03 \text{sec}$ 가 되도록 설계했다. 라이즈-스팬비가 1/4인 경우의 1차 고유주기는 1.153sec 이며 라이즈-스팬비가 1/6, 1/8인 경우는 각각 1.111sec , 1.099sec 이다. 예제구조물에 설치된 면진장치의 물성치는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Property of isolation system(Unit : sec)

Design distance(cm)	10	Upper structure weight(tonf)	13.569
Yield horizontal stiffness(Kd) (tonf/cm)	0.12	Effective horizontal stiffness(Keff) (tonf/cm)	0.46
Initial horizontal stiffness(Ku) (tonf/cm)	2.08	Buckling load(tonf)	0.41
Vertical stiffness (tonf/cm)	83.37	Yield distance(cm)	1.73
Effective damping (tonf·sec/cm)	0.0968	Yield load(Fy) (tonf)	3.60



<Fig. 7> Bilinear hysteric loop

4. 면진장치가 설치된 대공간구조물의 지진응답

대공간구조물은 일반 라멘구조물과 달리 수평방

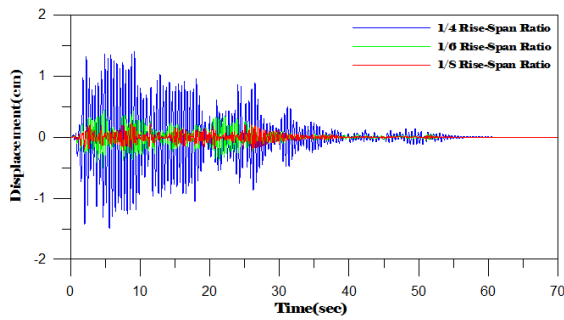
향 지진에 대해 수직응답이 발생한다. 선행된 연구에 따르면 아치구조물의 중앙지점에서는 수직응답이 매우 작게 나타난다. 이는 대공간구조물의 지진응답에 많은 영향을 끼치는 1차 모드형상이 역대칭 모드로 나타나며, 이때에 중앙지점(절점b)은 모드형상의 변곡점으로 모드벡터가 영(Zero)이기 때문이다⁷⁾. 본 연구에서는 수평, 수직응답이 크게 나타나는 <Fig. 7>의 절점a에서의 수평, 수직 방향 변위 및 가속도응답을 분석하고자 한다.

4.1 아치구조물의 지진응답

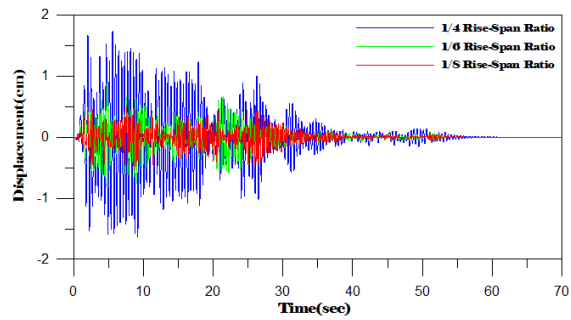
<Fig. 10>은 면진장치를 설치하지 않은 아치구조물에 El-Centro 지진을 수평 방향으로 가한 경우의 지진응답 그래프이다. <Fig. 10>의 (a)와 (b)를 보면, D_x 보다 D_z 가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 D_x 최대값과 D_z 최대값의 비는 각각 1.23, 2.00, 2.26으로 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 증가한다. 이는 라이즈-스팬비가 0.30 이하에서는 D_x 와 D_z 가 동시에 발생하고, 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 D_z 가 D_x 보다 더 크게 발생할 수 있기 때문이다. 예제구조물의 라이즈-스팬비는 각각 0.25, 0.167, 0.125로서 D_x , D_z 가 동시에 발생하며, 라이즈-스팬비가 충분히 낮기 때문에 D_z 가 D_x 보다 크게 나타난다.

<Fig. 10>의 (c), (d)는 가속도응답을 나타낸 그래프로서, 변위응답과 비슷하게 A_x 보다 A_z 가 크게 나타난다. 이는 변위응답과 같은 이유로, 라이즈-스팬비가 낮기 때문에 나타나는 현상으로 생각할 수 있다. 라이즈-스팬비가 1/4인 경우에는 A_x 와 A_z 가 비슷한 값을 가지지만, 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 A_x , A_z 의 격차가 커지는 것을 볼 수 있다.

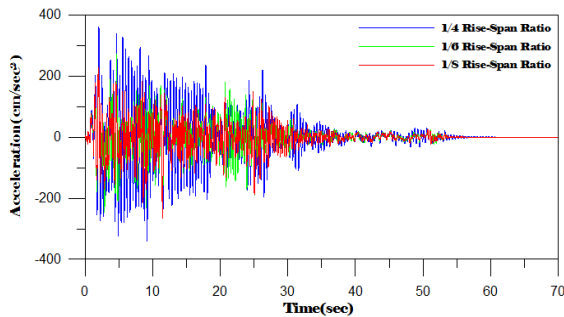
<Fig. 11>은 Northridge 지진을 적용한 예제구조물의 변위, 가속도응답 그래프이다. Northridge 지진을 적용했을 때에 변위응답은 라이즈-스팬비가 높을수록 D_x , D_z 값이 커지며, D_x 보다는 D_z 값이 크게 나타난다. 반면 D_x 최대값과 D_z 최대값의 비를 보면, 라이즈-스팬비가 1/4, 1/6, 1/8인 경우 각각 1.22, 1.74, 2.27로 나타나며, 라이즈-스팬비가 낮아질수록 D_x 보다는 D_z 의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.



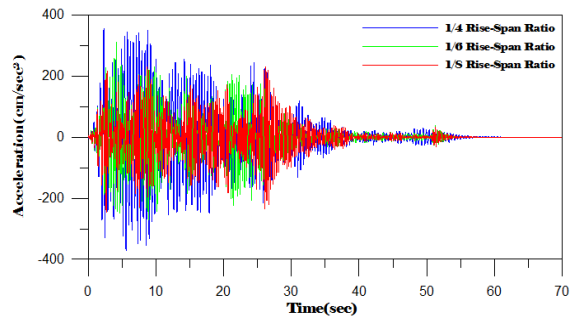
(a) Displacement of direction X (D_x)



(b) Displacement of direction Z (D_z)

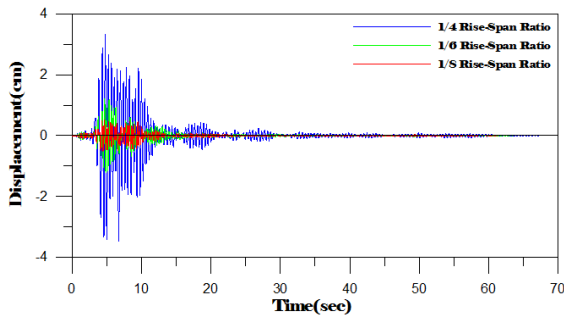


(c) Acceleration of direction X (A_x)

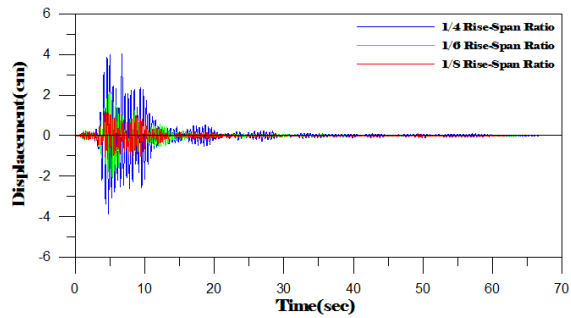


(d) Acceleration of direction Z (A_z)

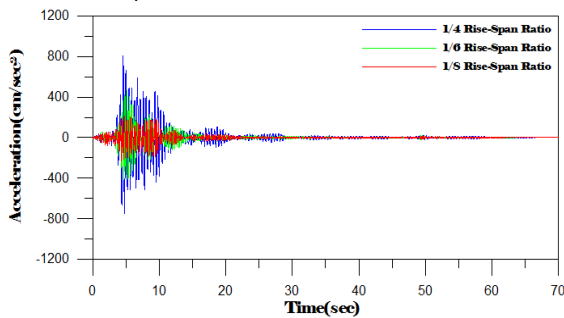
(Fig. 8) Seismic response of nodal point a(1/4) by El-Centro(No LRB)



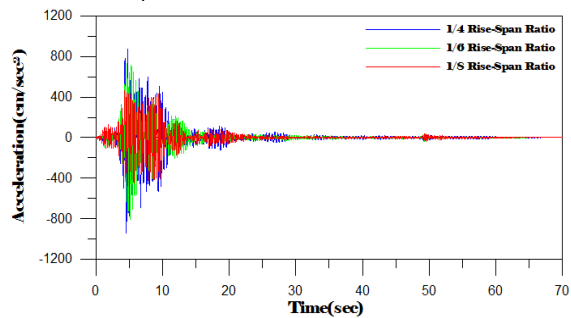
(a) Displacement of direction X (D_x)



(b) Displacement of direction Z (D_z)



(c) Acceleration of direction X (A_x)



(d) Acceleration of direction Z (A_z)

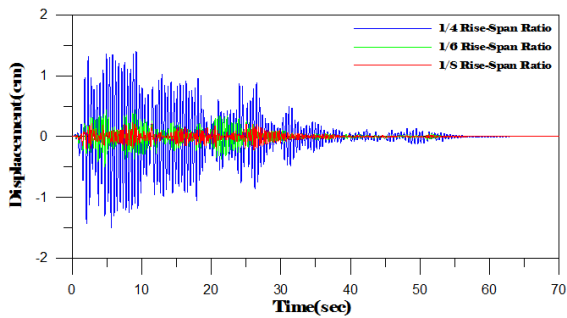
(Fig. 9) Seismic response of nodal point a(1/4) by Northridge(No LRB)

Northridge 지진을 적용한 가속도응답의 경우 A_x 보다는 A_z 값이 크게 발생하지만, <Fig. 11 (d)>에 나타나듯이 A_z 방향 가속도응답의 차이가 작다. 라이즈-스팬비에 따라 A_z 는 차이가 없지만, A_x 의 경우 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 작아지기 때문에, A_x 최대값과 A_z 최대값의 비는 라이즈-스팬비가

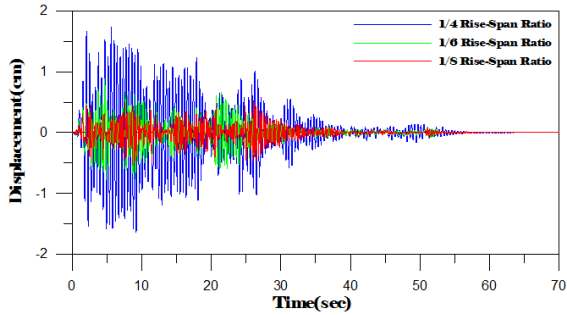
낮아질수록 증가하는 것을 알 수 있다.

<Fig. 12>는 건축구조설계기준을 바탕으로 생성한 인공지진하중을 3가지 예제구조물에 적용한 변위, 가속도응답 그래프이다. 앞서 적용한 지진과 비슷하게 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 변위, 가속도응답이 작아지는 것을 볼 수 있다. D_x 최대값과

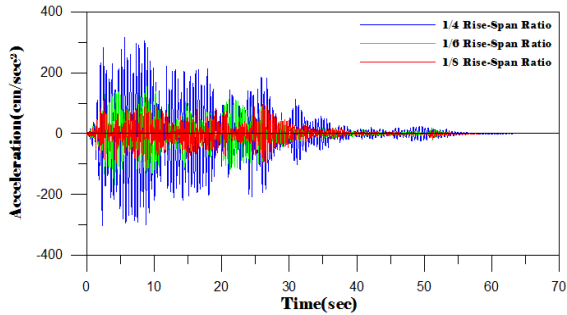
Dz 최대값의 비는 라이즈-스팬비에 따라 각각 1.24, 2.00, 2.26으로 나타나고 Ax 최대값과 Az 최대값의 비는 1.12, 1.94, 2.00으로, 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 수평지진동에 대해 수평응답보다는 수직응답의 영향이 커지는 것을 알 수 있다.



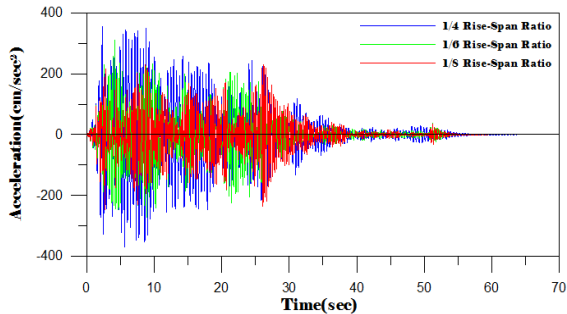
(a) Displacement of direction X (Dx)



(b) Displacement of direction Z (Dz)



(c) Acceleration of direction X (Ax)



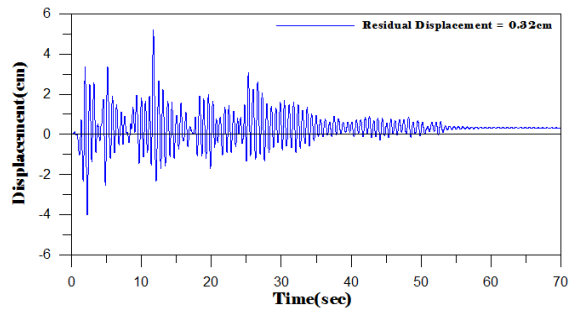
(d) Acceleration of direction Z (Az)

〈Fig. 10〉 Seismic response of nodal point a(1/4) by artificial earthquake(No LRB)

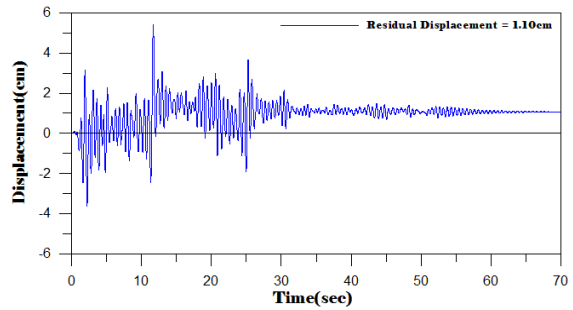
4.2 면진 아치구조물의 잔류변형

〈Fig. 13〉은 예제구조물에 El-Centro 지진을 수평 방향으로 가하여 발생하는 절점a의 X방향 변위응답을 나타낸 그래프이다. 지반에 대한 절점a의 X방향 상대변위이며, 지진하중에 의해서 잔류변위가 생기는 것을 볼 수 있다.

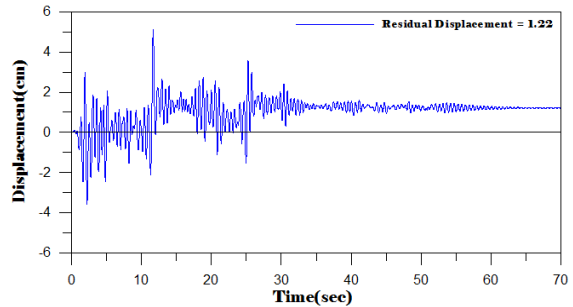
라이즈-스팬비가 1/4인 경우는 잔류변위가 0.32cm, 라이즈-스팬비가 1/6, 1/8인 경우에는 각각 1.10cm, 1.22cm의 잔류변위가 발생한다. 지진하중에 대한 지점반력이 라이즈-스팬비가 1/4, 1/6, 1/8 일 때에 각각 +3634.7kgf, -3747.5kgf, +3770.6kgf이며, 잔류변위는 지점반력에 의해서 발생한다.



(a) Displacement of rise-span ratio 1/4

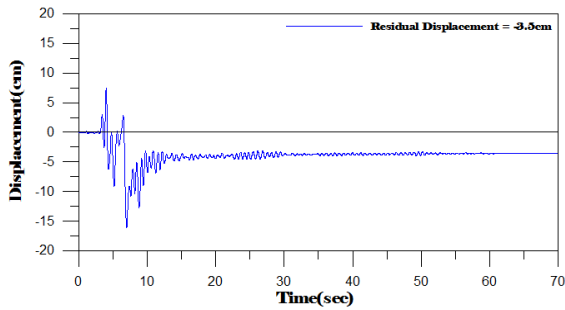


(b) Displacement of rise-span ratio 1/6

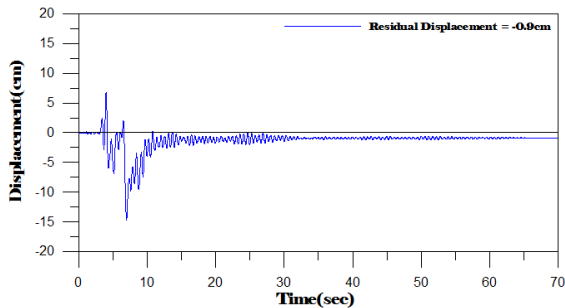


(c) Displacement of rise-span ratio 1/8

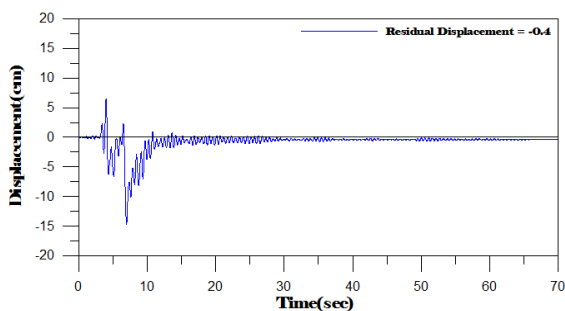
〈Fig. 11〉 Displacement of nodal point a(1/4) by El-Centro(LRB)



(a) Displacement of rise-span ratio 1/4



(b) Displacement of rise-span ratio 1/6

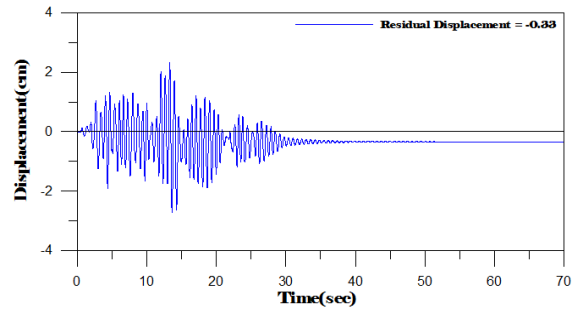


(c) Displacement of rise-span ratio 1/8

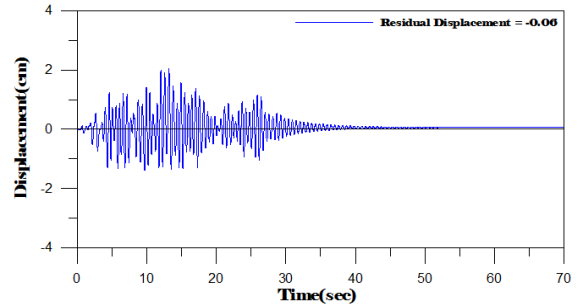
〈Fig. 12〉 Displacement of nodal point a(1/4) by Northridge(LRB)

〈Fig. 14〉는 라이즈-스팬비가 1/4, 1/6, 1/8인 아치구조물에 Northridge 지진을 수평 방향으로 가했을 경우의 절점a에 대한 X방향 상대변위이다. 〈Fig. 13〉과 같이 Northridge 지진에 대해서도 예제구조물에 잔류변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. 라이즈-스팬비가 1/4일 경우 -3.5cm, 라이즈-스팬비가 1/6, 1/8일 경우에는 각각 -0.9cm, -0.4cm로 나타난다. El-Centro 지진하중을 적용했을 때와는 반대로 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 잔류변위 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 지진하중에 의해 발생하는 예제구조물의 반력은 라이즈-스팬비에 따라 5255.9kgf, 5116kgf, 5104.4kgf로 나타난다.

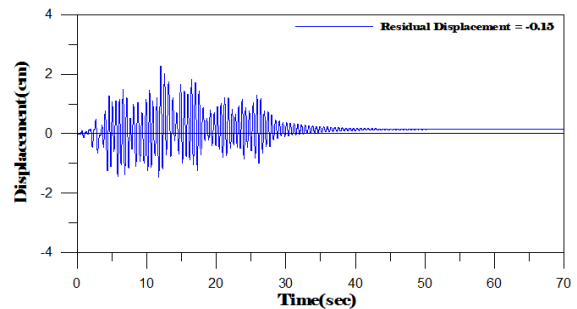
〈Fig. 15〉는 인공지진을 적용했을 때에 발생하는



(a) Displacement of rise-span ratio 1/4



(b) Displacement of rise-span ratio 1/6



(c) Displacement of rise-span ratio 1/8

〈Fig. 13〉 Displacement of nodal point a(1/4) by artificial earthquake(LRB)

변위응답이다. 예제구조물에 발생하는 잔류변위의 경우, 라이즈-스팬비에 따라 -0.34cm, 0.06cm, 0.15cm로 나타난다. 앞서 지진을 적용한 예제구조물과는 다르게 라이즈-스팬비 1/4에서 크게 발생하고, 라이즈-스팬비가 1/6일 때 가장 작게 나타난다.

El-Centro, Northridge, 인공지진에서 잔류변위가 서로 다르게 나타나는 이유는 지진하중의 주기, 구조물의 고유진동수, 모드형상 등 동적특성에 의해서 달라지는 것으로 판단된다. 또한 예제구조물에 잔류변위가 발생하기 때문에 상대변위를 이용한 응답분석은 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 면진장치와 아치구조물을 연결해주는 절점과 절점a의 절대변위를 이용하여 분석했다.

4.3 면진 아치구조물의 지진응답

<Fig. 16>은 El-Centro 지진을 적용한 3가지 예제 구조물의 진응답을 비교하여 보여주고 있다. <Fig. 16>의 (a)와 (b)는 면진장치와 상부구조물을 연결하는 절점과 절점a의 X, Z방향 절대변위응답이다. 라이즈-스팬비가 낮아질수록 Dx, Dz값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 반면, 3가지 예제구조물의 Dx최대값에 대한 Dz최대값의 비는 라이즈-스팬비가 1/4일 때 1.154, 라이즈-스팬비 1/6, 1/8일 때에는 각각 1.592, 2.541로서 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 커지는 것을 알 수 있다.

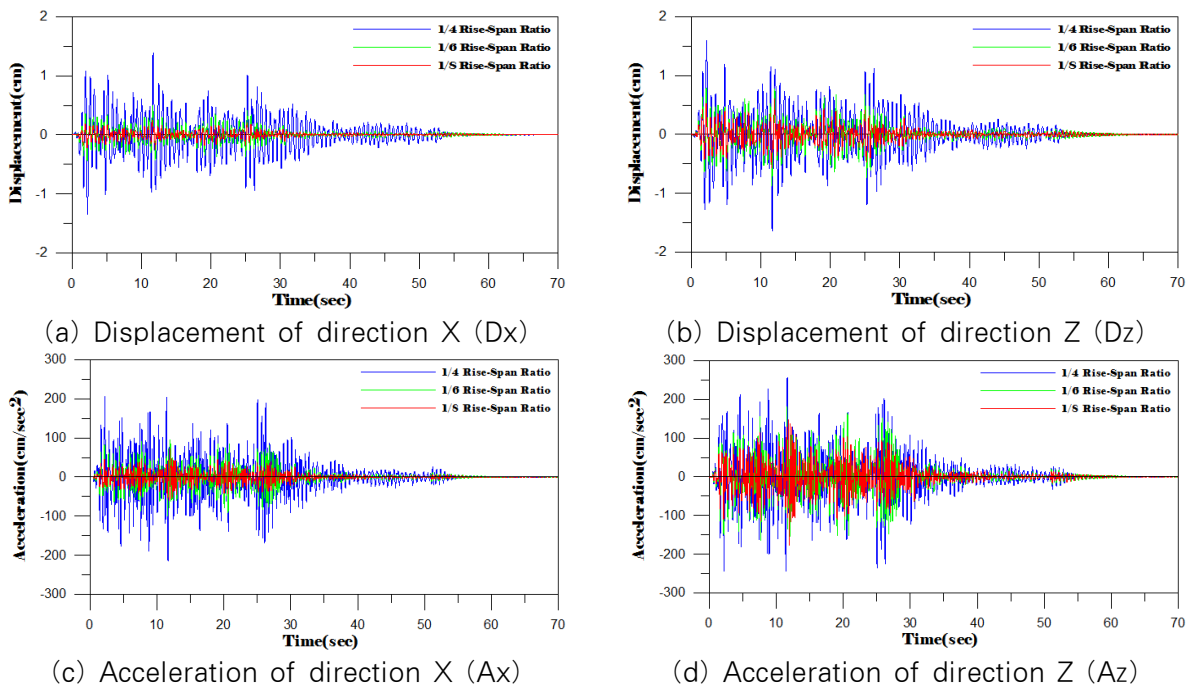
<Fig. 16> (c)와 (d)는 절점a의 X, Z방향 절대가속도응답이다. 절대가속도응답의 경우, 절대변위응답과 유사하게 라이즈-스팬비가 1/4, 1/6, 1/8인 경우 모두 Ax보다 Az가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 Ax보다 Az값이 더 크게 발생하는데 이는 절대변위응답과 같은 이유로, 라이즈-스팬비가 낮기 때문에 나타나는 현상이다. Ax최대값에 대한 Az최대값의 비 또한 라이즈-스팬비가 낮아짐에 커진다.

<Fig. 17>은 Northridge 지진이 적용된 트러스-아치구조물의 지진응답을 보여준다. <Fig. 16>의

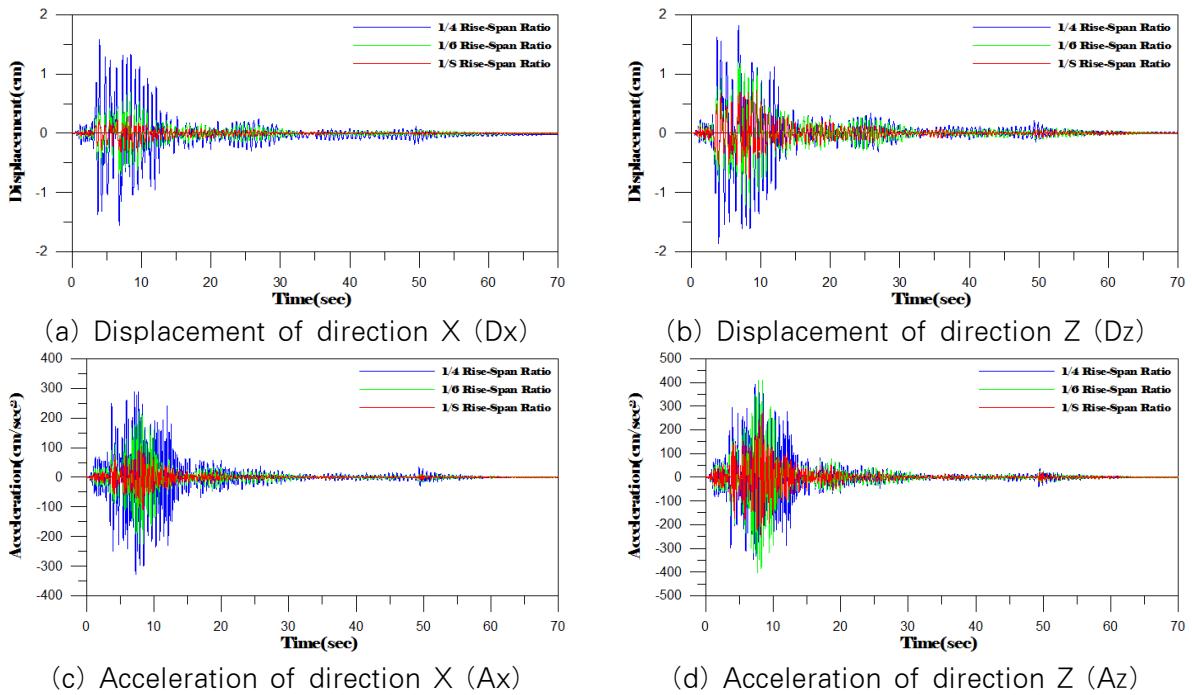
(a), (b)의 경우 El-Centro 지진을 적용한 경우와 비슷하게 라이즈-스팬비에 상관없이 Dx보다 Dz가 크게 나타난다. 반면 Dx최대값과 Dz최대값의 비는 라이즈-스팬비에 따라 각각 1.16, 1.76, 2.38로 나타나며, 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 크게 발생한다. 면진장치가 적용되지 않은 예제구조물의 변위응답보다 Dx, Dz가 작게 나타나며, 변위응답의 주기가 길게 나타난다.

<Fig. 17>의 (c)의 경우, 면진장치가 설치되지 않았을 때의 가속도응답과 유사하게 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 값이 작아지지만, <Fig. 17>의 (d)는 라이즈-스팬비에 따른 변화가 작다. 하지만 면진장치를 설치하지 않았을 때보다 설치했을 때에 가속도응답이 분산되어 나타나고 있으며, 면진장치를 설치하지 않았을 때보다 면진장치를 설치했을 때의 Ax, Az가 현저히 작게 나타난다.

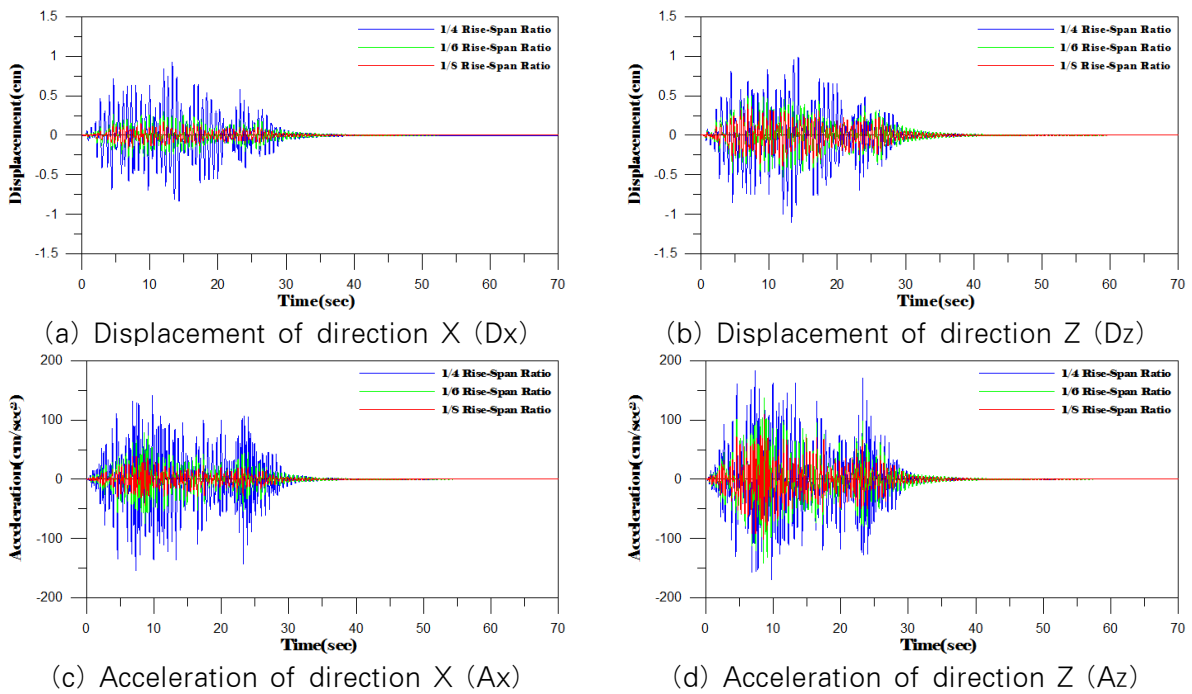
<Fig. 18>은 <Table 1>을 바탕으로 만들어진 <Fig. 6>의 인공지진하중을 적용한 면진 트러스-아치구조물 지진응답이다. 인공지진하중을 적용한 경우에도 앞서 적용한 El-Centro, Northridge 지진의 지진응답과 비슷한 양상을 보인다. 인공지진을 적용한 예제구조물에서는 라이즈-스팬비에 따라 Dx,



<Fig. 14> Seismic response of nodal point a(1/4) by El-Centro(LRB)



〈Fig. 15〉 Seismic response of nodal point a(1/4) by Northridge(LRB)



〈Fig. 16〉 Seismic response of nodal point a(1/4) by artificial earthquake(LRB)

D_z , A_x , A_z 값이 작아지며, 라이즈-스팬비가 낮아질수록 D_x 최대값과 D_z 최대값, A_x 최대값과 A_z 최대값의 비는 증가하는 것을 볼 수 있다.

면진장치가 설치되지 않은 예제구조물의 X방향 변위응답에 비해 면진장치가 설치된 예제구조물의 X방향 상대변위응답이 크게 나타나는 것을 볼 수

있다. 반면 X방향 절대변위응답의 경우 면진장치가 설치되었을 때가 설치되지 않았을 때보다 작게 나타난다. 또한 가속도응답의 경우 면진장치가 설치되지 않은 가속도응답보다 면진장치가 설치되었을 때의 가속도응답이 작게 나타난다. 이는 면진장치가 설치될 경우 아치구조물의 수평 방향 강성이 작아

져 구조물의 주기가 장주기로 이동되었기 때문이다. 구조물의 주기가 길어지면서 수평 방향의 변위응답은 증가하게 되고 가속도응답은 줄어든다. 그리고 설치된 면진장치의 수직 방향 강성의 영향으로 수직 방향 가속도응답이 감소하게 된다. 수평 방향 절대변위의 경우 가속도응답이 줄어들기 때문에 면진장치가 설치되지 않았을 때보다 설치되었을 때에 줄어든다.

5. 결론

본 연구에서는 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 갖는 아치구조물에 LRB를 설치하여 라이즈-스팬비에 따른 지진응답을 비교 분석하였다.

면진장치가 설치된 아치구조물에서 지반과 절점a의 상대변위를 보면, 면진장치가 설치되지 않은 예제구조물보다 수평 방향 변위응답이 증가한다. 또한 지중에 대한 지점반력으로 인해 예제구조물에 잔류변위가 발생한다. 또한 면진장치의 상판과 절점a의 절대변위의 경우, 면진장치를 설치하지 않았을 때의 변위응답보다 면진장치가 설치되었을 때의 절대변위응답이 줄어든다. 또한 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 X, Z방향 변위응답은 작아지지만, X방향 최대값과 Z방향 최대값의 비는 증가한다.

면진장치를 설치한 아치구조물의 가속도응답의 경우에, 면진장치를 설치하지 않은 아치구조물의 가속도응답보다 약 50~70%정도 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 변위응답과 유사하게 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 X방향 최대값에 대한 Z방향 최대값의 비는 커진다.

대공간구조물에 면진장치를 설치할 경우, 지진동 제어에 우수한 성능을 보이고 있지만, 라이즈-스팬비가 낮아짐에 따라 수평지진동에 대한 수직응답이 수평응답보다 커지기 때문에 면진장치 적용 시 수직강성에 대해 유의할 필요가 있다. 또한 면진장치를 적용하면 지진하중에 대한 구조물의 지점반력으로 인해 잔류변위가 발생하기 때문에 면진장치의 설치방향에 대해서 생각해볼 필요가 있다.

본 논문은 지반과 면진장치의 상판이 평행을 이루게 설치하여 연구를 수행했다. 상판과 지반이 평

행을 이루게 설치했을 경우, 지진하중에 대한 지점반력으로 인해서 잔류변위가 남게 되고 이는 면진장치의 거동에 영향을 끼치게 된다. 따라서 추후 연구에서는 면진장치의 설치 방향을 트러스-아치구조물의 축방향 및 반력의 합력 방향으로 면진장치를 설치하여 지진응답을 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(18AUDP-B100343-04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Moghaddam, H. A., "Seismic Behavior of Space Structures", *International Journal of Space Structure*, Vol.15, No.2, pp.119~135, 2000
2. Kang, J. W., & Jung, C. W., "Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.8, No.1, pp.5~12, 2008
3. Kim, G. C., Kim, S. G., & Kang, J. W., "Application of Mid-Story Isolation System for Seismic Response Reducing of Dome Structure", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.16, No.4, pp.37~44, 2016
4. "Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structure", *Architectural Institute of Japan*, 2006
5. Kim, G. C., Kim, K. Il., & Kang, J. W., "The Seismic Behavior of the Truss-Arch Structure with Seismic Isolation", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.8, No.2, pp.73~84, 2008
6. Yun, C. B., "Development of Vibration Control System with Laminated Rubber Bearings", *Korea Advanced Institute of*

Science and Technology, 1996

7. Kang, J. W., & Kim, G. C., "Seismic Response Control of Arch Structure by Using Passive TMD", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.26, No.7, pp.37~44, 2010

- Received : November 03, 2017
- Revised : November 19, 2017
- Accepted : November 19, 2017