

## 면진장치를 적용한 대공간구조물의 지진응답 분석

### Seismic Behavior of the Spacial Structure with Seismic Isolation

김기철\*  
Kim, Gee-Cheol

주동현\*\*  
Ju, Dong-Hyem

#### 요약

지진에 의한 구조물의 응답을 저감시키기 위하여 다양한 면진장치가 사용되고 있으며 면진장치가 설치된 구조물은 고유주기가 길어져서 지진파의 탁월 주기를 벗어나게 된다. 대공간 구조물의 상부(지붕)구조인 트러스 아치는 하부구조인 기둥에 의하여 지지되는 경우가 있을 수 있다. 본 연구에서는 하부 기둥에 따른 면진 트러스 아치구조물의 거동을 분석하고자 한다. 면진장치를 대공간 구조물에 적용할 경우에 수평지진하중에 의하여 수평방향 지진응답이 저감되는 것은 물론 면진장치의 수직강성으로 인하여 수직응답도 현저하게 저감되는 것을 알 수 있었다. 하부의 기둥 강성이 큰 경우에 트러스 아치의 거동은 기둥 없이 트러스 아치가 지반에 직접 지지되는 트러스 아치의 거동과 유사하게 나타나고 있다. 또한 하부구조의 강성이 비교적 작은 대공간구조물에 면진장치를 적용할 경우에는 지진응답에 대한 우수한 제어 성능을 얻을 수 있을 것이다.

#### Abstract

The seismic isolation systems could be used to reduce the seismic response of a structure. The natural period of a structure with seismic isolation system got be long to avoid the prominent seismic period. The purpose of this study is to analyzed the seismic behavior of the truss arch that is supported to column with LRB. Truss arch structures subjected to horizontal seismic have large horizontal and vertical response unlike seismic behavior of normal rahmen structures. When seismic load is applied to the truss arch with isolation systems, the horizontal acceleration response of the truss arch is reduced and the vertical seismic response is remarkably reduced. Also, the seismic behaviors of the truss arch with strengthen column as like lattice column are very similar to that of the truss arch supported to directly foundation. The Seismic Isolation system can be applied to reduce efficiently the seismic response of the spacial structure with not strong column.

키워드 : 면진장치, 지진응답, 고유주기, 트러스 아치, 납-고무면진장치

Keywords : Seismic Isolation, Seismic Response, Natural Period, Truss Arch, LRB

## 1. 서론

대공간구조물은 자중이 작고 장경간의 구조물로 지진에 대하여 일반적인 구조물과는 다른 동적거동을 하게 된다. 따라서 대공간구조물에 대한 적합한 내진설계를 위해서는 지진에 의한 대공간구조물의 진동특성의 정확하게 분석할 필요가 있다. 또한, 대공간구조물의 지진동제어를 위한 다양한 장치의 적용성을 알아볼 필요가 있다. 대공간구조물은 일반

라멘구조와는 다르게 형태적 특성으로 인하여 수평 지진에 의하여 상하진동이 발생하며 고유진동주기가 다소 길어 일반적인 라멘구조물과는 구별되는 지진거동을 나타내고 있다.<sup>1-4)</sup>

지진으로 인한 구조물의 피해를 최소화하는 방법 중에 하나가 면진장치를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 대공간구조물의 면진장치 설계에 앞서 면진장치를 적용한 대공간구조물의 지진거동을 분석하고 면진장치에 대한 제어성능을 알아보고자 한다.

본 연구는 면진장치를 적용한 대공간구조물의 지진거동 분석에 대한 것으로 대공간구조물이 많이 건설된 일본의 예를 살펴보면 대공간 구조물의 고유주기가 대체적으로 1.5초 이하에 존재하며 이는

\* 정회원 · 서일대학 건축과 조교수  
TEL: 490-7582 FAX: 490-7427  
E-mail: beat67@seoil.ac.kr

\*\* 정회원 · (주)TNI엔지니어링 사장, 구조기술사

지진의 가속도스펙트럼이 탁월한 진동수영역의 범위에 있음을 알 수 있다. 공간구조물은 상하로 진동하기 쉬우며 지진동의 수평력에 대하여서도 역대칭모드가 공진현상을 보인다. 또한, 많은 고유진동수가 서로 인접하여 있어 고차의 고유진동모드까지 지진동의 가속도응답스펙트럼이 크게 나타나는 영역에 걸쳐 있음을 보여준다. 따라서, 공간구조의 내진설계에 있어서는 그 특유의 진동성상을 고려한 후 안정성을 검토할 필요가 있다.<sup>5)</sup>

대공간구조물은 공간을 이루는 아치나 돔과 같은 상부의 지붕구조가 하부의 기둥이나 벽에 지지되거나 지반에 직접 지지될 수 있다. 본 연구에서는 지반에 직접 지지되는 트러스 아치와 기둥에 지지되는 트러스 아치를 예제 구조물로 선정하여 지진에 의한 구조물의 동적거동을 분석하고자 한다.

아치구조물이나 돔구조물의 동적특성 중에 하나인 진동모드 양상은 상하진동에 반응하는 대칭모드와 수평진동에 대하여 응답이 크게 발생하는 역대칭모드가 나타난다. 또한 일반 라멘구조와 다르게 수평진동에 의하여 수평방향 응답은 물론 연직방향 응답도 나타나고 있다.<sup>5)</sup>

## 2. 지진진동 제어를 위한 면진 장치

### 2.1 면진장치의 특성

면진장치는 지반진동을 상부구조물로 전달되는 것을 최소화하기 위한 시스템으로 면진장치의 특성은 구조물의 주기를 길게 만들어 지진파의 에너지가 집중된 주기를 벗어나게 하는 것이다.

면진장치는 다음과 같은 기본적인 성질을 가져야 한다. 첫째, 구조물의 주기를 길게 하기 위하여 유연성을 가진다. 둘째, 구조물과 지반사이의 상대변위를 조절하기 위한 에너지 소산능력을 갖는다. 셋째, 작은 하중에 대하여 견딜 수 있는 적절한 강성을 가져야 한다.

지진에 의한 구조물의 진동을 제어하는 면진장치로 적층고무 시스템과 마찰진자 시스템이 가장 널리 사용되고 있다.

### 2.2 적층고무 및 마찰진자 면진장치

납-고무 면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)는

고무와 보강 철판을 번갈아 겹쳐놓은 것으로 철판은 고무의 과도한 팽창을 방지하고 수직강성을 증가시키는 역할을 한다. 그리고 초기강성과 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 단면 중앙에 납을 삽입한다. 마찰진자 면진장치(Friction Pendulum System, FPS)은 상부 구조물이 수평력을 받을 때 쉽게 미끄러지도록 한 것으로 상부 구조물에 연결된 볼록한 덮개 부분이 마찰력이 있는 오목한 구형의 표면을 미끄러지도록 설계한 시스템이다.

납-고무 면진장치와 마찰진자 면진장치는 비선형 이력거동을 하며 <그림 1>과 같이 bilinear로 모형화가 가능하다. 면진장치의 비선형 해석에 대한 제약을 해결하기 위하여 비선형 이력특성을 등가의 선형으로 치환하여 해석을 수행한다.<sup>6-8)</sup>

납-베어링면진장치는 설계변위( $D$ ), 탄성강성( $K_1$ ), 항복 강성( $K_2$ ) 그리고 납항복강도( $Q$ )를 기초로 유효강성( $K_{eff}$ )은 식(1)과 같이 구할 수 있으며 또한 마찰진자면진장치는 구조물의 무게( $W$ ), 마찰진자면진장치의 곡률반경( $R$ )과 마찰계수( $\mu$ )로 등가강성( $K_{eff}$ )을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

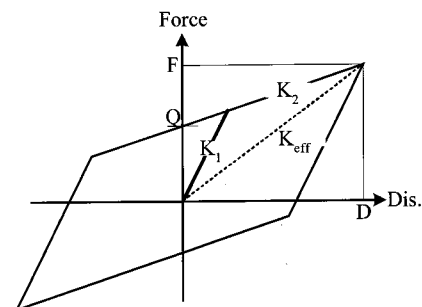
$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \tag{1}$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \tag{2}$$

그리고 등가강성에 의한 면진장치의 진동주기와 유효감쇠( $\beta_{eff}$ )는 식 (3)와 식 (4)과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}} \tag{3}$$

$$\beta_{eff} = \frac{Area}{2\pi K_{eff} D^2} \tag{4}$$



<그림 1> 면진장치 이력거동

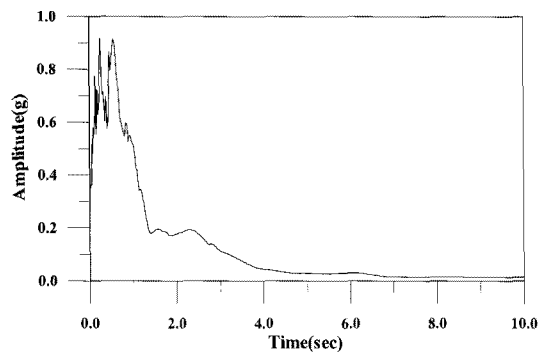
여기서  $g$ 는 중력가속도이며 Area는 hysteresis loop의 면적이다.

### 3. 면진장치 갖는 대공간구조물의 지진거동

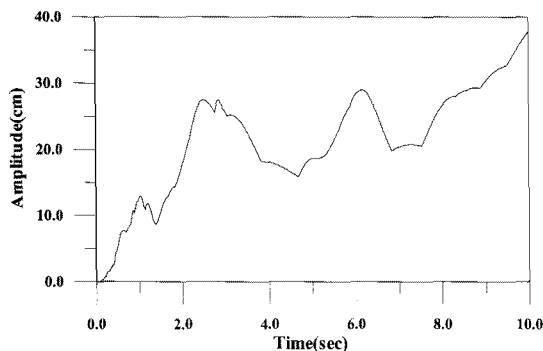
본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조인 트러스 아치 구조물을 수치해석 예제 구조물로 선정하였다. 예제 구조물은 라이즈 비가 0.15인 트러스 아치로 하부구조인 기둥의 강성을 다르게 하였다. 예제 구조물에 대한 입력 지진은 대공간구조물의 지진거동 분석에 많이 사용되는 El-Centro NS를 적용하였다.

#### 3.1 예제 구조물 적용 지진하중 특성

El-Centro NS는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 1.0초 이하의 주기에서 가속도성분이 매우 크며 1.5초 이상의 주기에서는 가속도성분이 현저하게 줄어들고 있다. 그리고 변위성분의 경우에 2.0초 이상의 주기에서 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 면진장치의 주기를 1.5초로 할 경우에 예제 구조물의 가속도응답은 현저하게 줄어들고 변위응답



(a) 가속도스펙트럼



(b) 변위스펙트럼

<그림 2> El-Centro NS 지진 스펙트럼

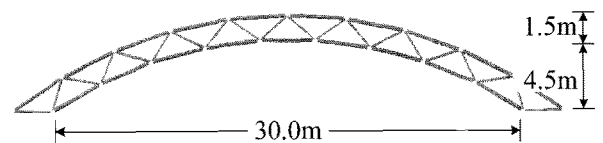
은 약간 증가할 것으로 예상된다.

#### 3.2 예제 구조물

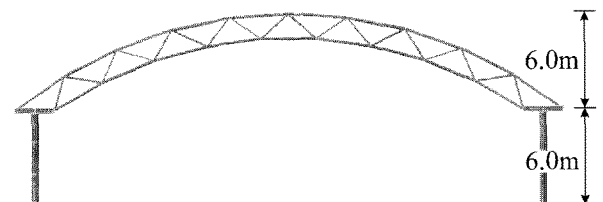
예제 트러스 아치의 경간은 30.0m, 높이는 4.5m이며 트러스 아치의 춤은 1.5m로 <그림 3>은 상부 지붕구조인 트러스 아치의 지지 조건에 따른 예제 구조물을 나타낸 것이다. 트러스 아치의 상현재와 하현재는  $\phi$  139.8×3.6이며 사재는  $\phi$  76.3×2.8로 되어 있다. <그림 3(a)>는 상부구조인 트러스 아치가 지반이 직접 지지된 것이다. <그림 3(b)>는 트러스 아치가 하부의 단일부재 기둥에 의하여 지지된 것으로 하부구조의 강성을 비교적 작게 한 것이다. 그리고 <그림 3(c)>는 트러스 아치가 래티스 기둥에 의하여 지지된 것으로 하부구조의 강성을 매우 크게 한 것이다. 상부 지붕구조와 기둥과의 연결조건은 힌지로 하였다.

#### 3.3 예제 트러스 아치의 동적특성

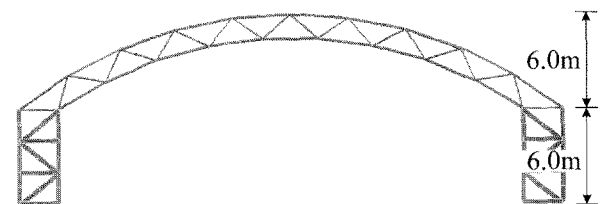
예제 구조물의 진동모드는 <그림 4>, <그림 5> 및 <그림 6>과 같이 일반적인 트러스 아치의 진동모드를 보이고 있다. 상부 지붕구조인 트러스 아치가 래티스



(a) 상부 지붕구조가 지반에 직접 지지

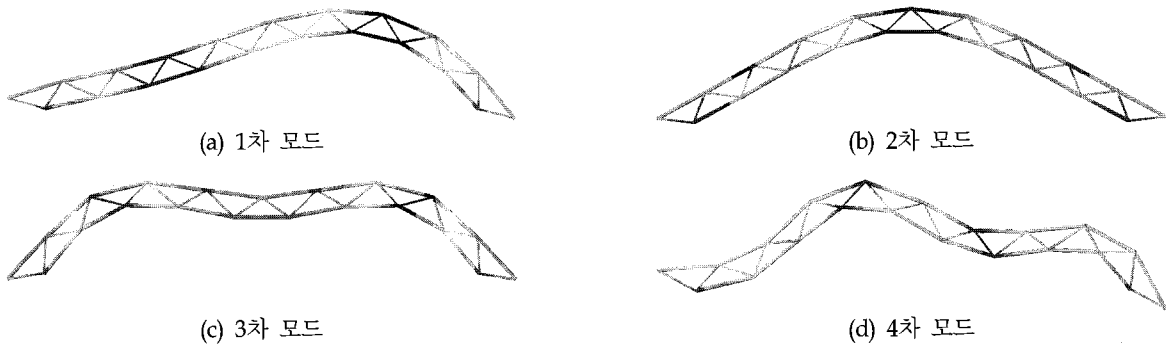


(b) 상부 지붕구조가 단일부재 기둥에 지지

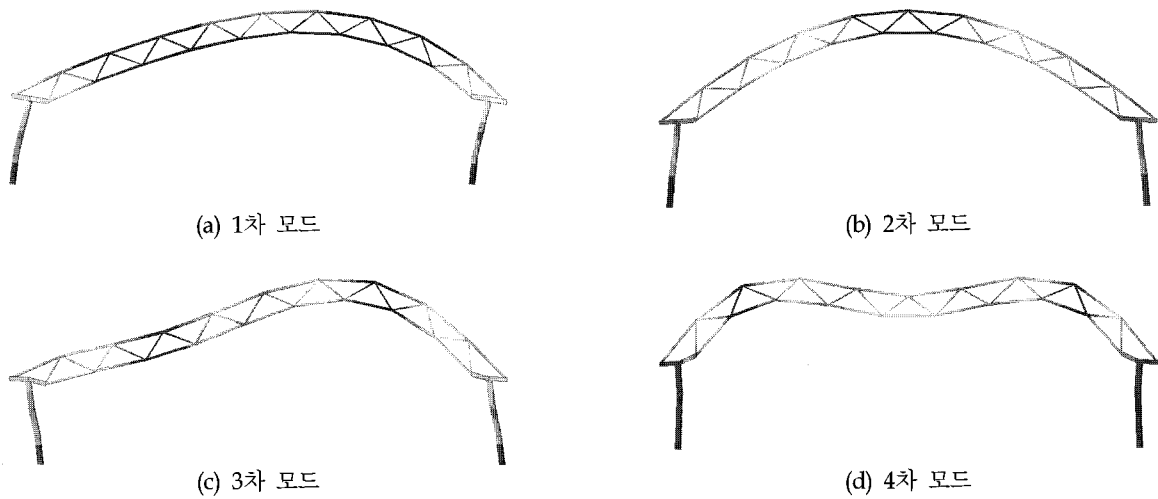


(c) 상부 지붕구조가 래티스 기둥에 지지

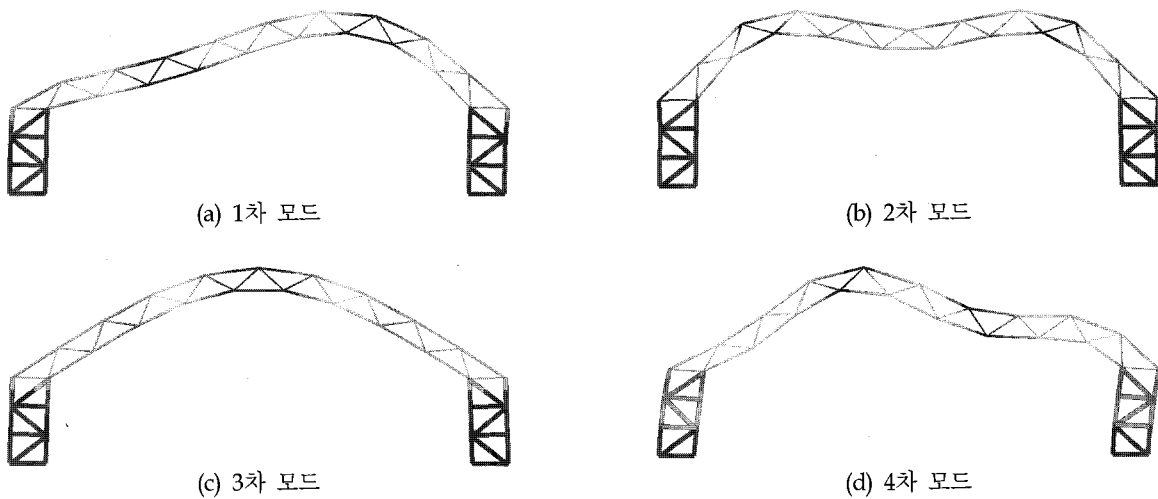
<그림 3> 트러스 아치 예제 구조물



〈그림 4〉 지반에 직접 지지된 트러스 아치의 진동모드



〈그림 5〉 단일부재 기둥에 지지된 트러스 아치의 진동모드



〈그림 6〉 래티스 기둥에 지지된 트러스 아치의 진동모드

기둥에 지지된 예제 구조물의 진동모드는 트러스 아치가 지반에 직접 지지된 예제 구조물의 진동모드가 같다. 그러나 상부 트러스 아치가 단일부재 기둥에 예 지지된 예제 구조물의 진동모드는 다른 예제 구조물

의 진동모드와 다르게 나타나고 있다.

〈표 1〉은 예제 구조물의 모드 주기를 나타낸 것으로 저차모드 주기가 지진하중의 에너지가 집중된 주기에 근접한 것을 볼 수 있다. 상부 트러스 아치

〈표 1〉 모드별 진동수 (단위: sec)

모드	지반 직접 지지	단일부재 기둥 지지	라티스 기둥 지지
1차모드	0.301079	0.553296	0.257443
2차모드	0.208182	0.465983	0.238209
3차모드	0.121179	0.224162	0.119803
4차모드	0.099700	0.143361	0.109469
5차모드	0.071711	0.094405	0.077950
6차모드	0.069306	0.076359	0.066183

가 하부 라티스 기둥에 지지된 예제 구조물의 모드별 진동수는 하부구조의 강성이 크기 때문에 지반에 직접 지지된 트러스 아치의 모드별 진동수와 매우 유사하게 나타나고 있다. 그러나 하부구조가 단일부재 기둥인 예제 구조물은 하부구조의 강성이 작기 때문에 모드별 주기가 다른 예제 구조물의 모드별 주기보다 크게 나타나고 있다.

### 3.4 예제 트러스 아치의 지진응답

LRB의 진동주기는 면진장치 상부구조물의 무게와 면진장치의 유효강성에 의하여 결정된다. 본 연구에서

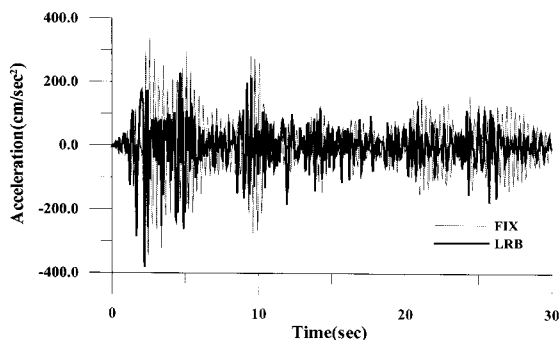
는 LRB의 진동주기가 1.5초가 되도록 설계하였으며 지진하중은 El-Centro NS를 수평방향으로 가하였다. 대공간구조물은 라멘 구조물과 달리 수평지진에 의하여 수직방향으로 응답이 크게 나타나는 경우가 많다. 본 연구에서는 수평응답과 수직응답이 크게 나타나는 경간의 1/4점에서의 지진응답을 분석하고자 한다.

#### 3.4.1 지반에 직접 지지된 트러스 아치의 LRB 적용

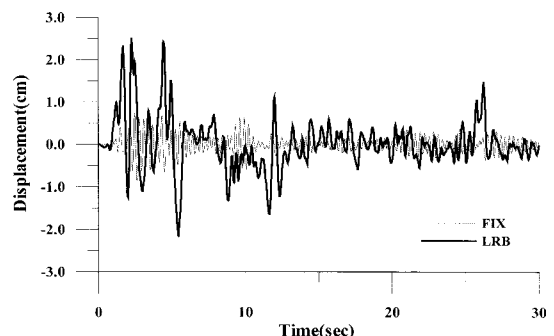
상부 지붕구조가 기초에 직접 지지되는 대공간구조물의 지진거동 분석을 통하여 대공간구조물의 하부구조 영향을 고찰하는데 활용할 수 있을 것이다. 본 절에서는 기초에 직접 지지된 트러스 아치구조를 예제 구조물로 선정하여 면진 거동을 분석하였다.

<그림 7>은 상부 지붕구조인 트러스 아치가 지반에 직접 지지된 예제 구조물의 지진응답으로 FIX는 지지조건이 고정인 것을 의미하며 LRB는 면진장치를 장착한 것을 의미한다.

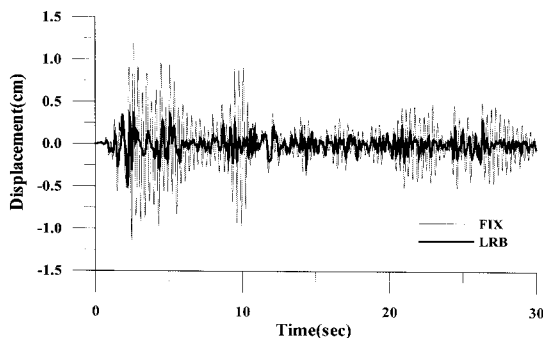
수평방향의 가속도응답의 경우에 면진장치 설치로 약간 줄어든 것을 볼 수 있으며 수평방향의 변위응답은 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치의



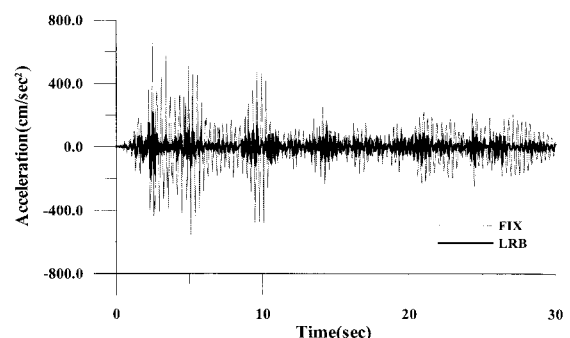
(a) 수평방향 가속도응답



(b) 수평방향 변위응답

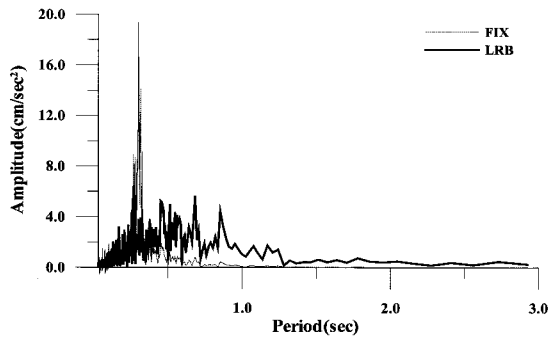


(c) 연직방향 가속도응답

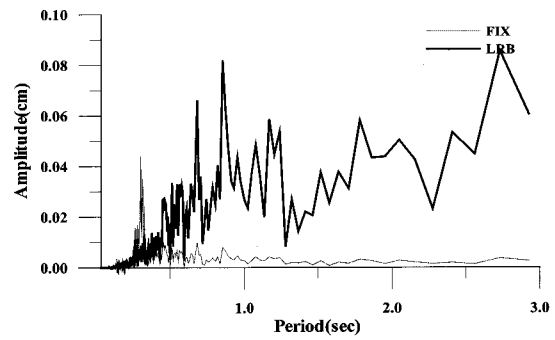


(d) 연직방향 변위응답

〈그림 7〉 지반 직접 지지 트러스 아치의 지진응답



(a) 지반 직접 지지-가속도 스펙트럼



(b) 지반 직접 지지-변위 스펙트럼

〈그림 8〉 수평방향의 지진응답 스펙트럼

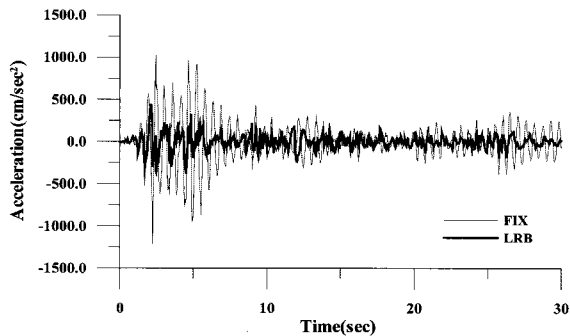
설치로 인하여 트러스 아치의 주기가 장주기로 이동되었기 때문이다. 또한 LRB의 연직방향 강성의 영향으로 연직방향의 가속도응답과 변위응답이 모두 감소하는 것을 볼 수 있다.

〈그림 8(a)〉은 수평방향 가속도응답에 대한 스펙트럼으로 FIX에서는 구조물의 고유진동주기인 0.3 초 부근에서 가속도 응답이 집중되는 것을 볼 수 있다. 그리고 면진장치를 적용한 경우에는 가속도응답이 분산되어 나타나고 있다. 〈그림 8(b)〉에서 볼 수 있듯이 면진장치를 적용한 경우에 수평방향 변위응

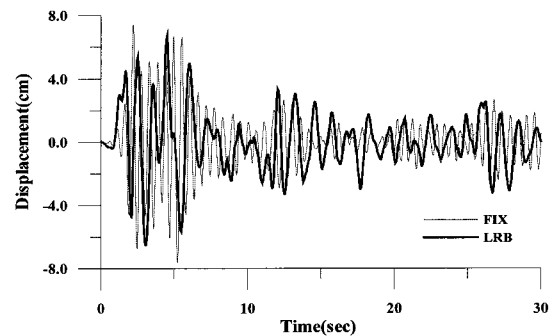
답이 장주기로 갈수록 응답이 커지고 있다.

### 3.4.2 단일부재 기둥에 지지된 트러스 아치의 LRB 적용

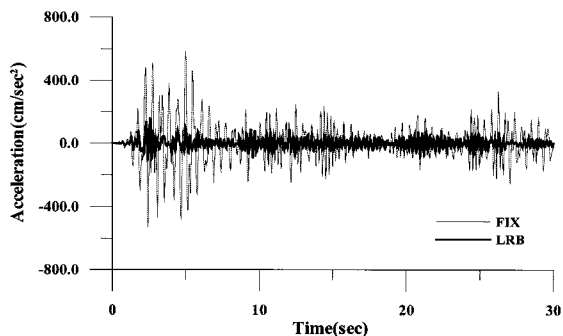
대공간구조물은 지붕구조가 지반에 직접 지지되지 않고 기둥에 지지되는 경우가 있으므로 기둥의 강성을 다르게 하여 트러스 아치의 지진응답을 분석하였다. 〈그림 9〉는 상부 지붕구조인 트러스 아치의 강성이 비교적 약한 기둥에 지지된 예제 구조물의 지진응답이다. 면진장치의 영향으로 수평방향의 가속도



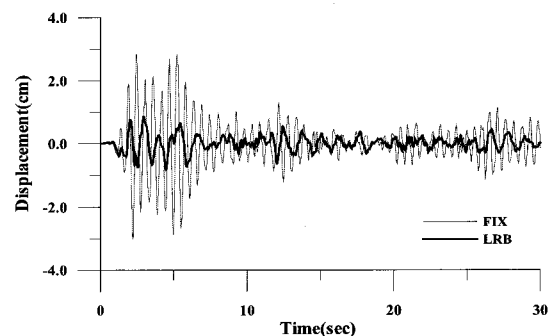
(a) 수평방향 가속도응답



(b) 수평방향 변위응답

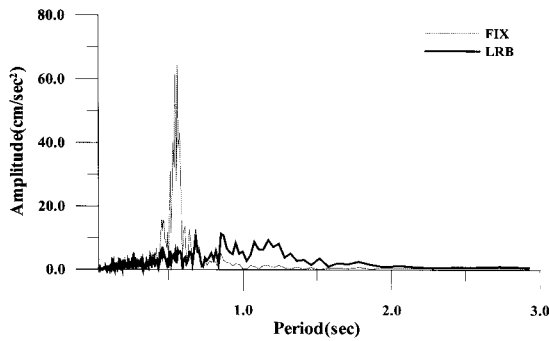


(c) 연직방향 가속도응답

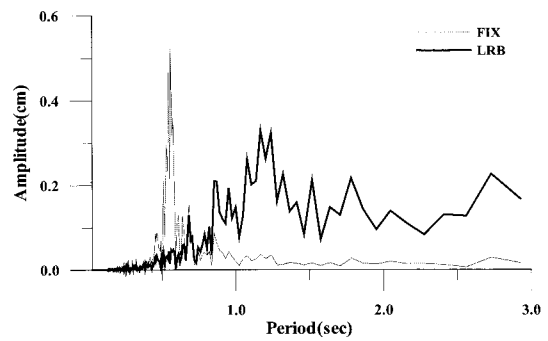


(d) 연직방향 변위응답

〈그림 9〉 단일부재 기둥 지지 트러스 아치의 지진응답



(a) 단일부재 기둥 지지-가속도 스펙트럼



(b) 단일부재 기둥 지지-변위 스펙트럼

〈그림 10〉 수평방향 지진응답 스펙트럼

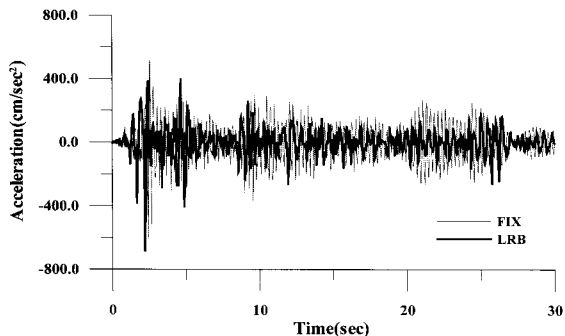
응답이 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 수평 방향의 변위응답은 면진장치를 설치하지 않은 FIX 예제 구조물과 비교하여 그 차이가 거의 없다. 기둥의 강성이 작기 때문에 면진장치를 설치한 예제 구조물의 주기가 증가하여도 수평방향 변위는 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 연직방향의 가속도 응답과 변위응답은 LRB의 연직방향 강성의 영향으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

〈그림 10〉는 수평방향 가속도응답과 변위응답에 대한 스펙트럼으로 구조물의 1차 진동모드 주기인 0.5

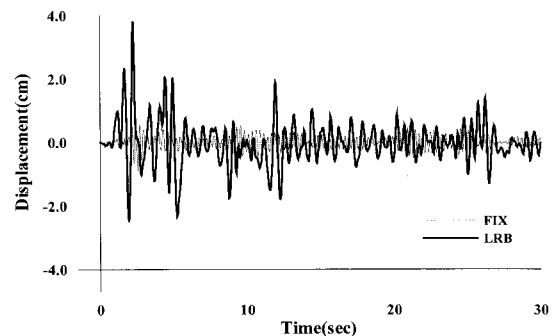
초의 단주기에서 지진응답이 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 면진장치를 적용한 경우에는 가속도 응답이 매우 작게 나타나고 있다. 변위응답의 경우에는 〈그림 10(b)〉에서 볼 수 있듯이 면진장치의 주기인 1.5초 부근에서 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3.4.3 래티스 기둥에 지지된 트러스 아치의 LRB 적용

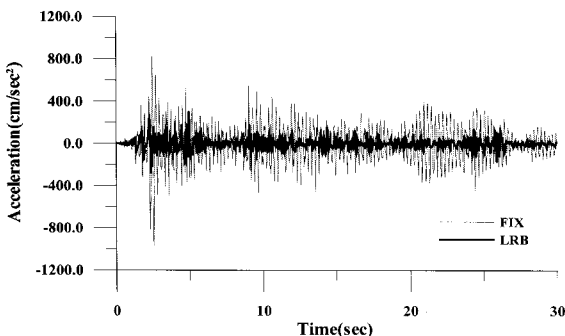
상부구조인 트러스 아치를 지지하는 기둥의 강성에 따라서 예제 구조물의 지진응답이 다르게 나타날 것이다. 본 절에서는 강성이 비교적 큰 래티스



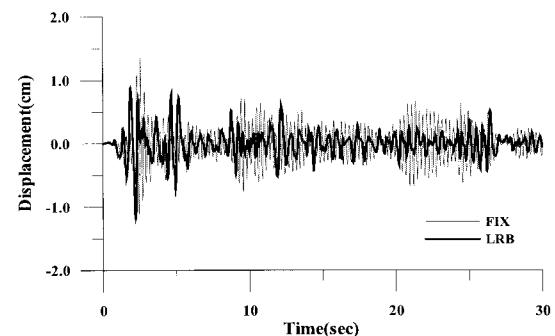
(a) 수평방향 가속도응답



(b) 수평방향 변위응답

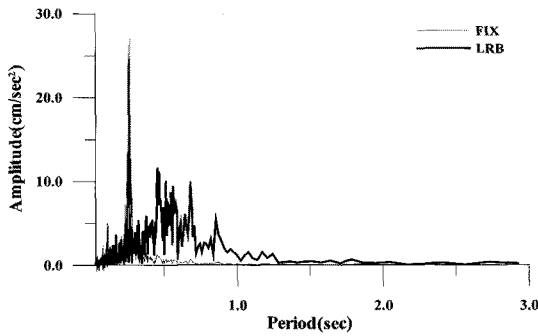


(c) 연직방향 가속도응답

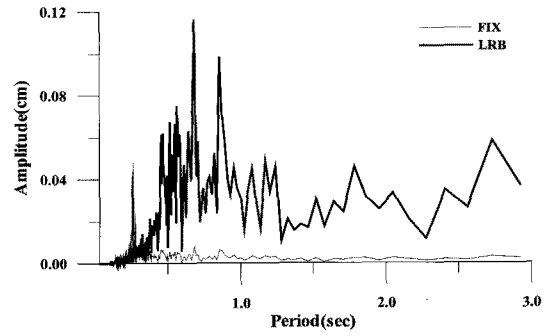


(d) 연직방향 변위응답

〈그림 11〉 래티스 기둥 지지 트러스 아치의 지진응답



(a) 래티스 기둥 지지-가속도 스펙트럼



(b) 래티스 기둥 지지-변위 스펙트럼

<그림 12> 래티스 기둥 지지 트러스 아치의 응답스펙트럼

기둥에 트러스 아치가 지지된 예제 구조물의 지진 응답을 분석하였다.

<그림 11>에서 볼 수 있듯이 수평방향의 가속도 응답은 면진장치 설치로 줄어든 것을 볼 수 있으며 수평 방향의 변위응답은 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치의 설치로 인하여 트러스 아치가 지반에 직접 지지된 예제 구조물의 수평방향 가속도 응답과 마찬가지로 트러스 아치의 주기가 장주기로 이동되었기 때문이다. 또한 면진장치의 영향으로 연직방향의 가속도 응답과 변위응답이 모두 감소하는 것을 볼 수 있다.

<그림 12(a)>는 수평방향 가속도응답에 대한 스펙트럼으로 FIX에서는 0.25초 부근의 단주기에서 가속도 응답이 집중되는 것을 볼 수 있다. 그리고 면진장치를 적용한 경우에는 가속도응답이 0.5초 이상의 주기에서 분산되어 나타나고 있다. <그림 12(b)>에서 볼 수 있듯이 면진장치를 적용한 경우에 수평방향 변위응답이 0.5초 이상의 장주기로 갈수록 응답이 커지고 있다.

#### 4. 결론

대공간구조물의 기하학적 특성으로 인하여 일반 라멘구조물과는 다르게 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향 및 수직방향의 지진응답이 크게 나타나고 상부 지붕구조의 지지조건에 따라서 지진응답이 다양하게 나타난다. 본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 형태인 트러스 아치를 예제 구조물로 선택하였다. 그리고 하부구조 영향을 고찰하고자 트러스 아치의 지지 기둥의 강성을 다르게 하여 트러스 아치의 면진거동을 분석하였다.

면진장치의 특성으로 인하여 고유주기가 길어진 대공간구조물은 수평지진하중에 의하여 수평방향의 가속도응답이 감소하며 변위응답은 증가한다. 그리고 면진장치의 영향으로 연직방향 가속도응답과 변위응답도 줄어든다. 상부구조인 트러스 아치가 강성이 비교적 큰 기둥에 지지된 경우의 면진거동은 트러스 아치가 지반에 직접 지지된 경우의 면진거동과 유사하게 나타난다. 트러스 아치가 지지되는 기둥의 강성이 작은 경우에 면진장치의 영향으로 수평변위의 증가 없이 가속도응답을 현저하게 감소한다. 따라서 하부구조의 강성이 비교적 작은 대공간 구조물에 면진장치를 적용할 경우에는 지진응답에 대한 우수한 제어 성능을 보이고 있다.

본 논문은 대공간구조물의 기본적인 특성을 내재하고 있는 트러스 아치에 대한 면진거동을 분석하였다. 그러나 대공간구조물은 형상에 따라서 지진응답이 다르게 나타나며 또한 면진장치의 위치에 따라서도 면진거동이 다르게 나타난다. 그러므로 추후 연구에서는 대공간구조물의 형상, 상하부구조의 형태는 물론 면진장치의 위치에 따른 지진응답을 분석하고 이에 대한 면진장치의 적용성을 알아보려고 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2007년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Arjang Sadeghi, "Horizontal Earthquake Loading and linear/Nonlinear Seismic Behavior of



- Double Layer Barrel Vaults," International Journal of Space Structure, Vol.19, No. 1, 2004, pp. 21-37.
2. Ikuo Tatemich and Mamoru Ka waguchi, "A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures," International Journal of Space Structure, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 145-3154.
  3. Ikuo Tatemich and Mamoru Ka waguchi, "A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures," International Journal of Space Structure, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 145-154.
  4. Hassan A. Moghaddam, " Seismic Behavior of Space Structures," International Journal of Space Structure, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 119-135.
  5. 강주원, 정찬우, "대공간 건축물의 형태별 지진 거동특성" 한국공간구조학회지 학술기사, 제8권 제 1호, 2008년 2월, pp. 5-12.
  6. 김대곤, 이동근, 정재은, 남궁계홍, "정형 및 비정형 건물에 대한 비선형 면진장치의 적용" 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, 2001년 2월, pp. 37-44.
  7. Farzad Naeim and James M. Kelly, "DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES," John Wiley & Sons Inc. 1999
  8. ASCE/SEI, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," ASCE STANDARD, 2005, pp. 177-185.
- 접수일자 : 2008년 9월 23일  
 심사완료일자 : 2008년 10월 17일  
 게재확정일자 : 2008년 11월 6일