

# 공간구조물의 지진응답 저감을 위한 중간면진장치의 적용

## Application of Mid-Story Isolation System for Reducing Seismic Response of Space Structure

김기철\*  
Kim, Gee-Cheol

강주원\*\*  
Kang, Joo-Won

김형만\*\*\*  
Kim, Hyung-Man

### 요약

면진장치는 기초와 구조물 사이에 면진장치를 설치하여 상부로 전달되는 지진에너지를 감소시키는 장치로 면진장치의 설치위치에 따라서 기초면진과 중간(지붕)면진으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 면진장치 설치 위치에 따른 아치구조물의 지진응답을 비교 분석하여 면진장치의 효율성을 검증하였다. 지붕면진 시스템은 기초면진 시스템과 비교하여 상부 지붕구조의 지진응답 저감에 있어서 보다 효과적이다. 또한 하부구조와 상부구조의 강성 및 질량변화 그리고 시공성에 있어서 지붕면진이 기초면진 시스템 보다 우수한 것으로 사료된다.

### Abstract

The seismic isolation system reduces the seismic vibration that is transmitted from foundation to upper structure. This seismic isolation system can be classified into base isolation and mid-story isolation by the installation location. In this study, the seismic behavior of arch structure with mid-story isolation is analyzed to verify the effect of seismic isolation. Mid-story isolation is more effective than base isolation to reduce the seismic responses of roof structure. Also, this isolation would be excellent in structural characteristics and construction.

키워드 : 공간구조물, 동적특성, 기초면진, 중간면진

Keywords : Spatial Structure, Dynamic Characteristics, Base Isolation, Mid-story Isolation

## 1. 서론

아치 구조물과 같은 공간구조물은 일반 라멘구조물과는 다른 기하학적 형상을 가지고 있어서 수평방향의 지진에 의하여 연직방향 진동이 크게 발생한다. 또한 상부 지붕구조의 경량화로 인하여 고유진동주기가 길게 나타난다.<sup>1,2)</sup> 따라서 공간구조물에 면진장치를 올바르게 적용하기 위해서는 공간구조물의 진동특성에 대한 고찰과 함께 면진장치가 공간구조물에 미

치는 영향을 정확하게 분석할 필요가 있다.<sup>3)</sup>

### 1.1 공간구조물의 진동특성

공간구조물은 구조형식에 따라 셸 구조, 공기막 구조, 케이블 구조, 스페이스 프레임 구조 등으로 나눌 수 있다. 이러한 공간구조물 중에서 지진에 대한 영향을 가장 많이 받는 구조물은 트러스 형태의 아치구조이다.

아치구조물의 지진동은 구조물의 형상을 결정하는 개각, 라이즈비 및 걸보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 그러나 본 연구에서는 면진장치 적용에 대한 아치구조물의 동적거동 분석을 목적으로 하고 있으므로 개각과 라이즈 등을 동일하게 한 예제 구조물에 대해

\* 정회원 · 서울대학 건축과 조교수

\*\* 교신저자, 정회원 · 영남대학교 건축공학과 부교수  
TEL: 053-810-2429 FAX: 053-810-4625  
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 허브구조엔지니어링 소장 · 구조기술사

여 진동응답을 분석하고자 한다.

### 1.2 면진 아치구조의 동적거동

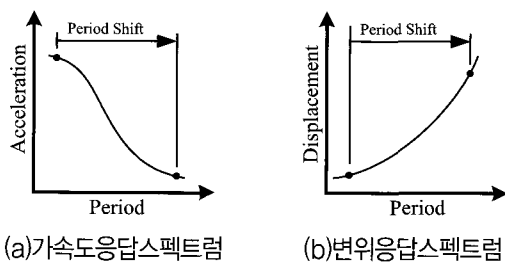
공간구조물은 아치나 돔과 같은 상부의 지붕구조가 하부의 기둥이나 벽에 지지되거나 또는 직접 기초에 지지될 수 있다. 기초면진의 기본적인 개념은 지반과 구조물을 분리하는 것으로 기초와 구조물 사이에 면진장치를 설치하여 구조물로 전달되는 지진하중을 줄이고자 하는 것이다. 면진장치가 설치된 공간구조물은 일반 라멘구조와 마찬가지로 수평 진동응답 저감에 매우 효과적인 것을 볼 수 있다. 그리고 일반 라멘구조와는 다르게 상하방향의 진동응답도 현저하게 감소시키는 것을 볼 수 있다.<sup>4)</sup> 그러나 이러한 기초면진 방법을 공간구조물에 그대로 적용시키기에는 여러 가지 문제점이 있다. 공간구조물은 상부구조인 지붕은 하부구조인 기둥/벽체와 비교하여 강성과 질량이 급격히 달라지므로 지붕과 기둥/벽체 사이에 면진장치를 설치하는 중간(지붕)면진방법이 바람직 할 수 있다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 기초면진과 중간면진에 따른 아치 구조물의 동적거동을 분석하여 공간구조물의 면진 위치에 따른 면진장치의 효용성을 알아보하고자 한다.

## 2. 공간구조물의 면진장치 적용

### 2.1 면진장치의 특성

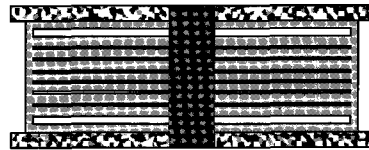
면진장치는 수평방향에 대한 유연성을 가져야 하며 수직방향에 대하여 적절한 강성을 가져야 한다. 또한 지진에너지에 대한 에너지 소산능력을 가지고 있어야 한다. 따라서 이러한 특성을 가지고 있는 면진장치를 설치한 구조물은 구조물의 주요 모드 주기가 지진파의 탁월 주기를 벗어난다. <그림 1>에서 볼 수 있



<그림 1> 면진시스템에 의한 구조물 응답

듯이 면진장치의 설치로 인하여 구조물의 고유주기가 길어지면서 구조물의 가속도 응답이 감소하고 변위응답이 커지게 된다.

이러한 특성을 가지고 있는 면진장치 중에서 적층 고무받침과 마찰진자받침 등이 가장 널리 사용되고 있다. 적층고무받침은 고무층과 보강철판 층을 번갈아 겹쳐놓은 것으로 철판은 고무의 과도한 팽창을 방지하고 수직강성을 증가시키는 역할을 한다. 그리고 초기강성과 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 <그림 2>와 같이 단면 중앙에 납을 삽입하기도 하며 이를 납-고무면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)라 한다.



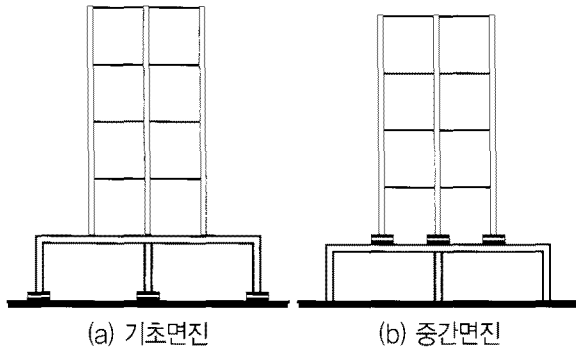
<그림 2> LRB 면진장치

### 2.2 기초면진과 중간면진

면진설계의 기본개념은 구조물을 지반과 분리시키는 것이나 이는 현실적으로 불가능하므로 기초와 구조물 사이에 면진장치를 설치하여 지반분리 효과를 유도한다. 이러한 기초면진은 가장 일반적인 면진기법으로 기초로부터 전달되는 지진동이 상부 구조물로 전달되는 것을 최소화 한다.

기초면진의 경우에 구조물 전체를 지진동에 대하여 면진시키므로 하부구조인 기둥과 벽체의 진동응답도 저감시킬 수 있으나 면진장치가 지지해야 하는 하중이 매우 크다. 또한 공간구조물과 같이 강성이나 질량이 급격히 변하는 지붕하부(기둥상부)에서 진동응답이 크게 나타날 수 있다. 따라서 공간구조물의 경우에 기초면진보다는 지붕하부에 면진장치를 설치하는 경우가 많다.

건축물을 증축할 경우 또는 고층건물과 주상복합 건물과 같은 구조물에는 기초면진 시스템을 적용하는데 문제가 있다. 따라서 이러한 경우에는 기초면진 대신 중간층에 면진장치를 설치하여 구조물을 분리하므로 상부구조물로 전달되는 지진 에너지를 감소시킨다.



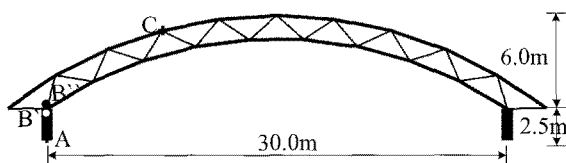
〈그림 3〉 기초면진 및 중간면진

중간면진은 기초면진과 달리 구조물의 중간부분에 면진장치를 설치하는 것으로 구조물의 강성이나 단면이 급격히 변하는 곳에 설치한다. 공간구조물의 경우에는 지붕구조와 하부 기둥구조의 기하학적 형상이 변하므로 지붕 하부에 면진장치를 설치하여 중간면진 거동을 유도하게 된다. 기초면진과 비교하여 중간면진의 경우에는 면진장치를 설치하는데 있어서 시공상의 어려움이 있으며 하부구조물이 면진되지 못하므로 지진에 의하여 하부구조가 파괴될 수도 있다. 〈그림 3〉은 기초면진과 중간면진에 대한 기본적인 적용방법을 나타낸 것이다.

### 3. 기초면진과 지붕면진 공간구조물의 지진거동

#### 3.1 예제 구조물 및 지진하중

본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조인 트러스 아치 구조물을 수치해석 예제 구조물로 선정하였다. 예제 구조물에 대한 입력 지진은 공간구조물의 지진거동 분석에 많이 사용되는 El-Centro NS를 적용하였다. 적용한 지진하중은 1.0초 이하의 단주기에서 가속도 성분이 매우 크며 2.0초 이상의 주기에서는 가속도 성분이 현저하게 줄어드는 특성을 가지고 있다. 변위성분의 경우에 그 반대로 단주기 보다는 장주기에서 매우 크게 나타나고 있다.



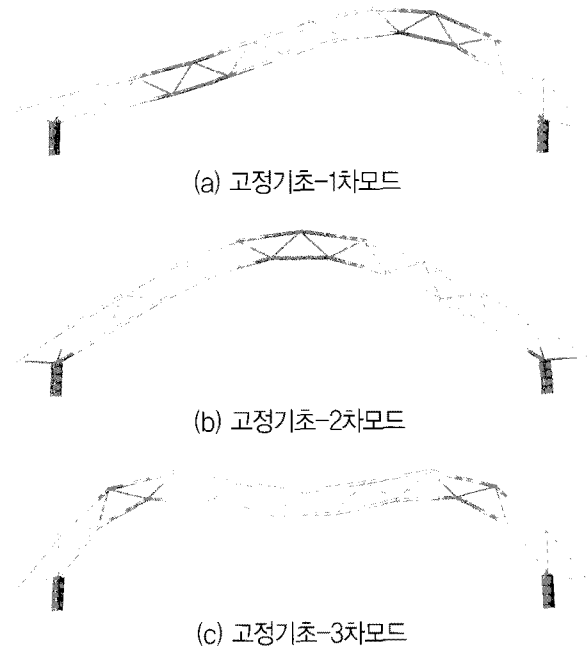
〈그림 4〉 예제구조물

예제 아치구조물은 〈그림 4〉에서 볼 수 있듯이 경간이 30.0m이며 높이는 6.0m로 하였으며 춤은 1.5m이다. 하부 기둥의 높이는 2.5m로 하였다. 예제 아치구조물의 상현재와 하현재는  $\phi 216.3 \times 4.5\text{mm}$ , 사재는  $\phi 101.6 \times 3.2\text{mm}$ 로 하였다. 그리고 하부 기둥은  $\phi 711.2 \times 22\text{mm}$  강관으로 하였다. LRB의 진동주기는 면진장치 상부구조물의 무게와 면진장치의 유효 강성에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 LRB의 진동주기가 1.76초가 되도록 설계하였다.

#### 3.2 예제 구조물의 동적특성

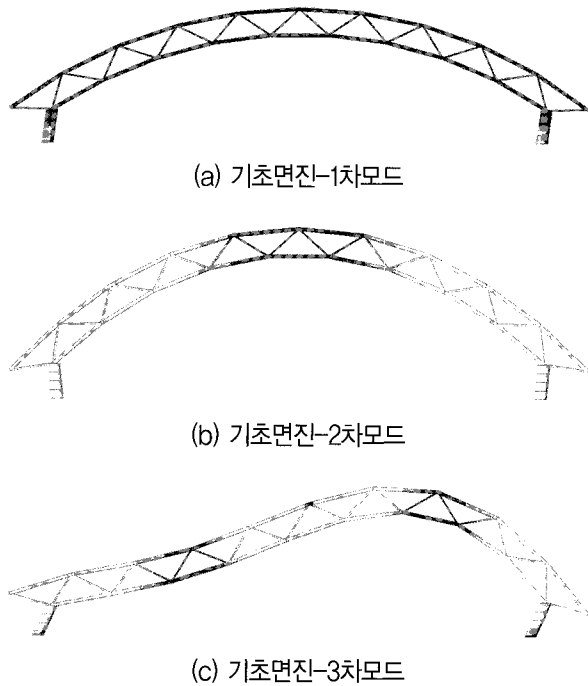
아치구조물의 진동모드는 일반적으로 주요 저차 모드에서 대칭적인 형상을 갖는 대칭 모드와 상하 모드형상이 역으로 나타나는 역대칭 모드를 나타낸다. 면진장치를 설치한 예제 구조물의 경우에 1차 모드형상이 면진장치에 의한 수평이동 모드가 나타난다.

고정기초 예제 구조물의 진동모드는 〈그림 5〉와 같이 전형적인 아치구조물의 진동모드로 1차 모드는 역대칭 모드를 보이고 있으며 2차 모드와 3차 모드는 대칭 모드를 보이고 있다. 기둥을 갖는 아치 구조물의 경우에 기둥의 강성에 따라서 저차 모드에서 기둥에 의한 진동모드 형상이 나타나기도 한다.

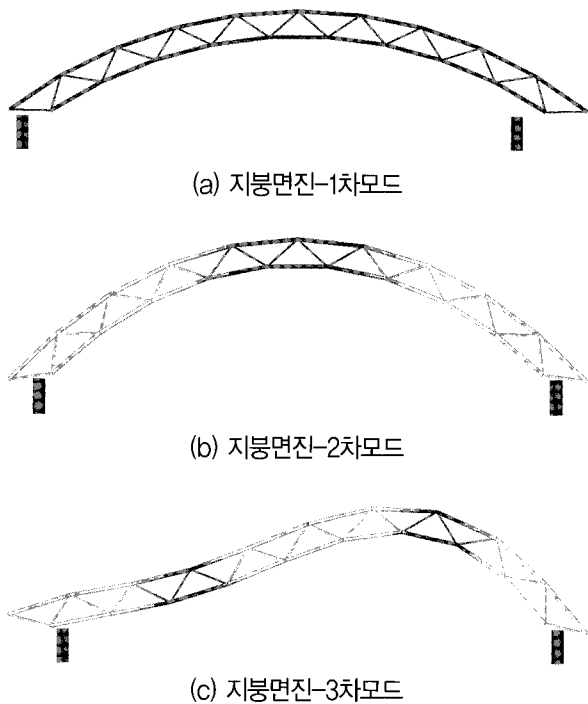


〈그림 5〉 고정기초 구조물의 진동모드

기초면진 예제 구조물의 진동모드 형상은 <그림 6>과 같이 1차 모드는 기초면진에 의한 진동모드 형상을 나타내고 있으며 2차 모드와 3차 모드가 고정기초 예제 아치구조물의 모드형상과 비교하여 역전되는 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치의 특성을 반영하고 있기 때문이다.



<그림 6> 기초면진 구조물의 진동모드



<그림 7> 지붕면진 구조물의 진동모드

지붕면진 예제 구조물의 진동모드 형상은 1차 모드는 지붕면진에 의한 진동모드 형상을 나타내고 있으며 2차 모드와 3차 모드는 기초면진 예제 구조물의 진동모드와 같이 대칭 모드 형상을 보이고 있다.

<표 1>은 예제 아치구조물의 모드 주기를 나타낸 것으로 고정기초 예제 구조물의 경우에 지진응답에 많은 영향을 미치는 저차모드 주기가 지진하중의 에너지가 집중된 주기에 근접한 것을 볼 수 있다.

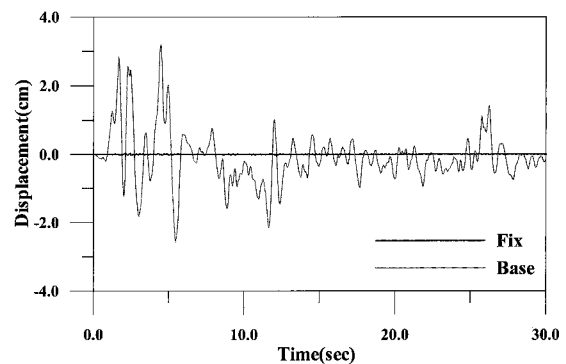
<표 1> 모드별 고유주기 (단위: sec)

경계조건	1차모드	2차모드	3차모드	4차모드
고정조건	0.226	0.169	0.094	0.081
기초면진	1.778	0.614	0.193	0.108
지붕면진	1.583	0.619	0.189	0.105

고정기초 예제 아치구조물의 1차 모드와 기초 및 지붕 면진 예제 아치구조물의 3차 모드가 같은 형상으로 주기 또한 비슷하게 나타나고 있다.

### 3.3 기초면진 공간구조물의 지진거동

기둥 하부에 면진장치를 설치한 기초면진 예제 구조물(Base)의 지진응답을 고정기초 예제구조물(Fix)의 지진응답과 비교한 결과, 공간구조물의 상부 지붕 구조는 물론 하부 기둥구조의 가속도응답은 감소하나 변위응답은 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

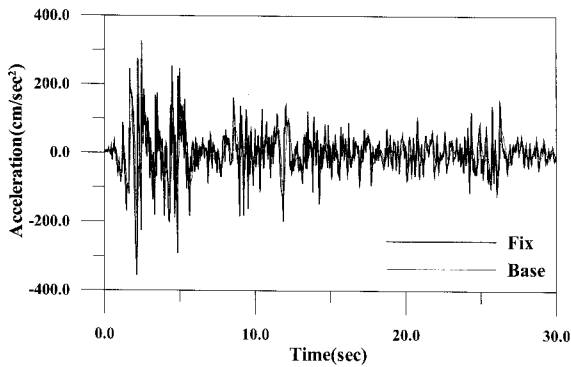


<그림 8> 기둥 상부(점B) 변위응답

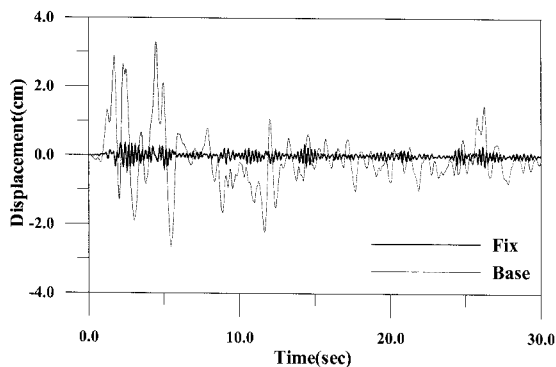
<그림 8>과 <그림 9>는 기둥 상부(점B)에서의 진동응답을 나타낸 것으로 변위응답은 증가하고 가속도응답은 감소하는 전형적인 면진장치에 의한 진동응답을 보여주고 있다. 가속도응답의 경우에 면진장치에 의한 응답의 감소가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

고정기초와 기초면진 예제 구조물의 상부구조에서

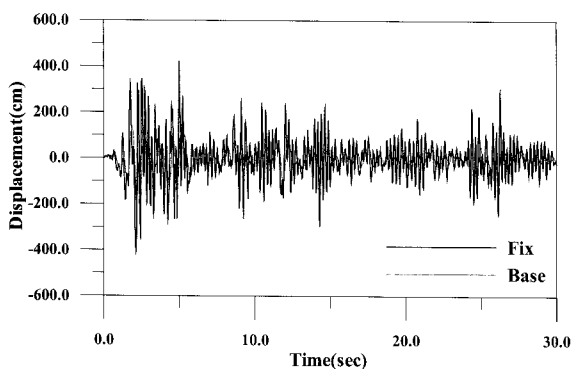
지진응답을 <그림 10>과 <그림 11>에서 비교하였다. 기둥 상부의 지진응답과 마찬가지로 면진장치에 의하여 변위응답은 증가하고 있으며 가속도응답은 감소하는 면진거동을 볼 수 있다.



<그림 9> 기둥 상부(점B') 가속도응답



<그림 10> 상부구조(점C) 변위응답

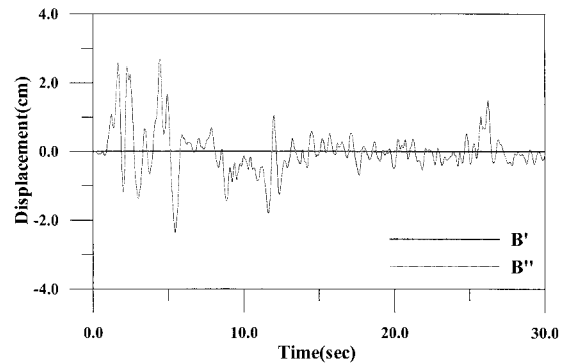


<그림 11> 상부구조(점C) 가속도응답

기초면진에 의한 가속도응답의 감소에 있어서 기둥 상부에서의 감소보다는 상부구조에서 더 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 기초면진의 경우에 기둥 상부보다는 상부구조의 가속도응답 저감에 보다 효과적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

### 3.4 지붕면진 공간구조물의 지진거동

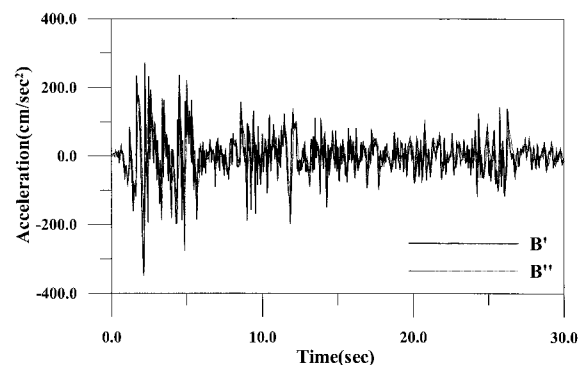
대공간 구조물의 시공성 또는 경제성을 고려하여 대부분의 경우에 면진장치를 지붕 하부(기둥/벽체 상부)에 설치하고 있다. 이는 지진거동에 있어서 하부구조(기둥 또는 벽체)와 상부 구조(지붕)의 강성이 현저하게 차이가 나거나 또는 재질이 다르기 때문에 지진에 대한 진동응답을 저감하기 위한 것이다.



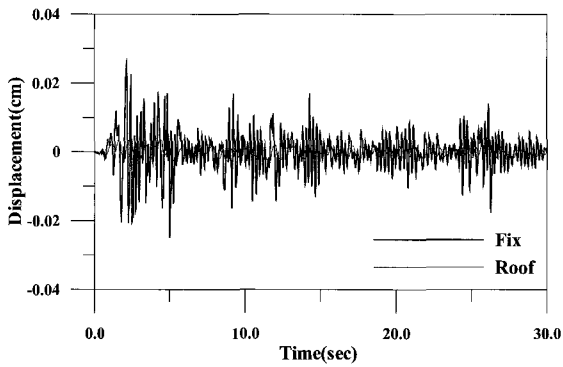
<그림 12> 면진위치에서의 변위응답(X방향)

지붕 하부에 면진장치가 설치된 예제 구조물에 있어서 면진위치에서의 변위응답과 가속도응답을 <그림 12>와 <그림 13>에 나타내었다. 면진위치에서 변위응답은 현저하게 증가하고 가속도응답은 약간 감소하는 것을 볼 수 있다.

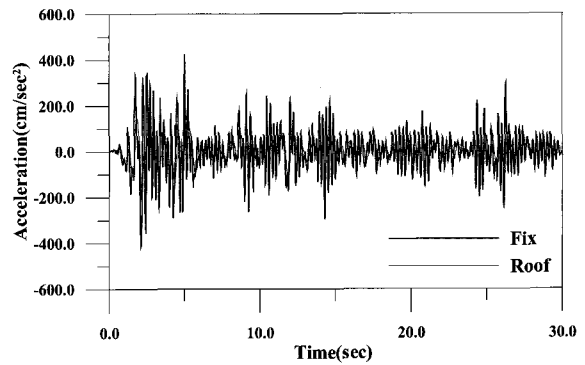
<그림 14>는 지붕 하부에 면진장치를 설치한 지붕면진 예제 구조물(Roof)과 고정기초 예제 구조물(Fix)의 기둥 상부에서의 변위응답을 비교한 것이다. 기초면진 예제 구조물과 다르게 지붕면진 예제 구조물의 변위응답(기둥상부)이 고정조건 예제 구조물의 변위응답보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치에 의하여 상부구조가 하부 기둥의 변위를 제어하는 것으로 사료된다.



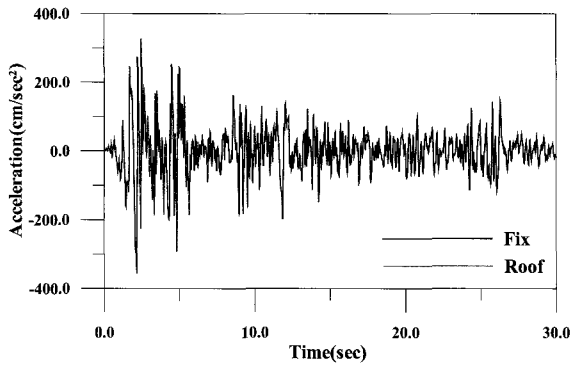
<그림 13> 면진위치에서의 가속도응답(X방향)



〈그림 14〉 기둥 상부(점B) 변위응답(X방향)

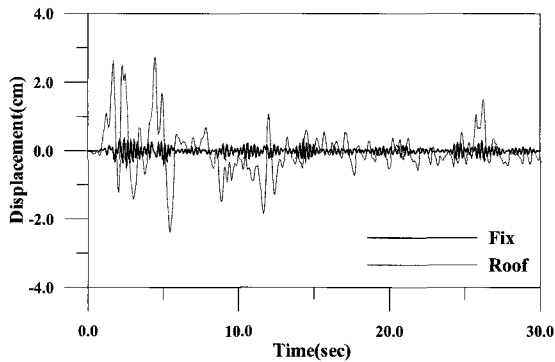


〈그림 17〉 상부구조(점C) 가속도응답(X방향)



〈그림 15〉 기둥 상부(점B) 가속도응답(X방향)

〈그림 15〉는 지붕면진 예제 구조물(Roof)과 고정 기초 예제 구조물(Fix)의 가속도응답을 비교한 것으로 면진장치가 지붕하부에 설치되기 때문에 가속도응답의 감소효과가 거의 나타나지 않고 있다.



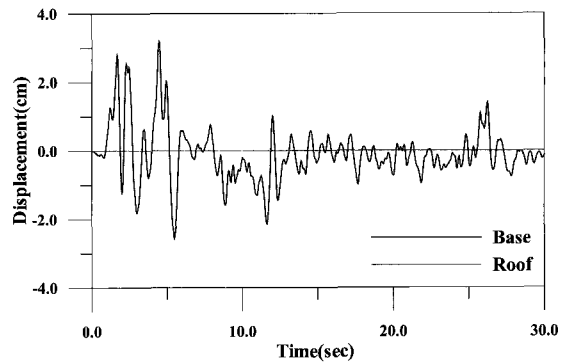
〈그림 16〉 상부구조(점C) 변위응답(X방향)

고정기초와 지붕면진 예제 구조물의 상부구조 지진응답을 〈그림 16〉과 〈그림 17〉에서 비교하였다. 변위응답의 경우에 기초면진 예제 구조물과 마찬가지로 증가하는 것을 볼 수 있으며 가속도응답의 경우에는 감소하는 것을 볼 수 있다. 지붕면진에 의한 진동응

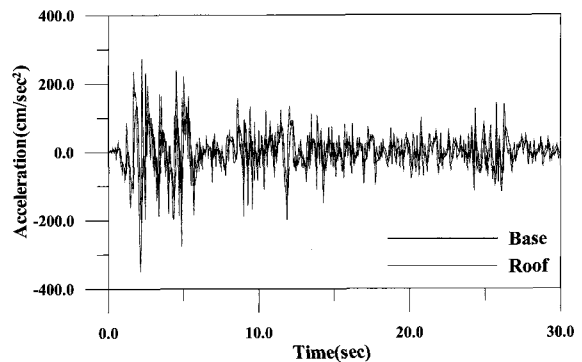
답은 기둥상부에서 변위가 감소되고 또한 상부구조에서 가속도응답이 감소되고 있다. 따라서 지붕면진은 기초면진 구조물보다 효과적인 것으로 사료된다.

### 3.5 기초면진과 지붕면진의 지진거동 비교

기초면진 및 지붕면진장치를 설치한 예제 구조물의 지진응답을 비교하여 면진장치의 적용 위치에 따른 성능을 평가하고자 한다.



〈그림 18〉 기둥 상부(점B) 변위응답(X방향)

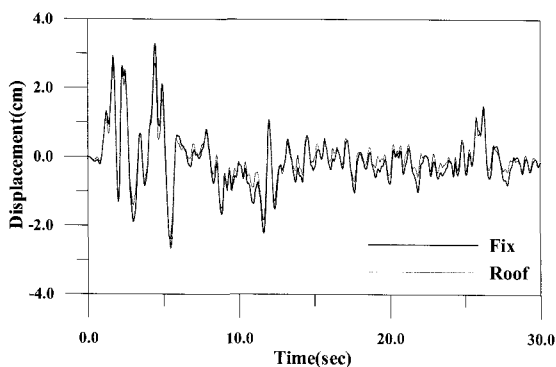


〈그림 19〉 기둥 상부(점B) 가속도응답(X방향)

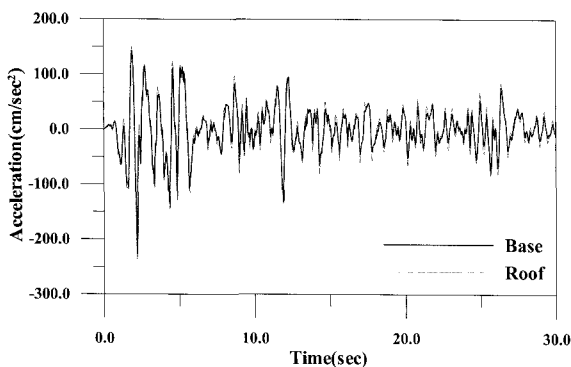
〈그림 18〉은 기둥 상부에서의 변위응답을 나타낸 것으로 지붕면진에 의한 변위가 기초면진에 의한 변

위보다 현저하게 작은 것을 볼 수 있다. <그림 19>는 기둥 상부에서의 가속도응답을 나타낸 것으로 면진장치의 위치에 따라서 기초면진에 의한 가속도응답이 약간 더 감소하는 것을 볼 수 있다. 기둥상부의 면진 거동은 기초면진에 의해서 나타나기 때문에 이러한 거동이 나타나는 것이다.

기초면진과 지붕면진에 의한 상부구조의 지진응답을 <그림 20>과 <그림 21>에 비교하여 나타내었다. 변위응답의 경우에 기초면진에 의한 응답이 더 크게 나타나고 있으나 그 차이는 매우 미비하며 가속도응답의 경우에 지붕면진에 의한 응답이 더 크게 나타나고 있다. 따라서 면진장치의 특성상 변위응답이 증가하고 가속도응답을 저감하기 위해서는 지붕면진장치가 더 효과적인 것으로 사료된다.



<그림 20> 상부구조(점C) 변위응답(X방향)



<그림 21> 상부구조(점C) 가속도응답(X방향)

#### 4. 결론

공간구조물은 동적특성으로 인하여 수평방향 지진 하중에 의하여 수평방향의 지진응답은 물론 연직방향의 지진응답이 매우 크게 나타나고 있다. 본 연구에서는 면진장치의 설치 위치에 따른 지진응답을 분석하여 하부 기둥구조와 상부 지붕구조 사이에 면진장치

를 설치한 지붕면진장치의 효용성을 알아보았다.

상부 지붕구조의 지진응답 저감에 있어서 지붕면진은 기초면진과 비교하여 거의 차이가 없다. 그러나 지붕면진의 경우에 하부 기둥구조의 변위응답이 매우 작게 나타나고 있으므로 대공간구조물의 면진장치 적용에 있어서 지붕면진이 기초면진보다 효과적이다.

본 논문은 아치 구조물에 국한하여 연구를 수행하였으나 대공간구조물에 대한 면진장치 적용의 타당성을 입증하기 위해서는 대공간구조물의 형상, 형상비, 상·하부구조의 형태는 물론 면진장치의 위치에 따른 응답 분석이 필요할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

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. 강주원, 정찬우, "대공간 건축물의 형태별 지진거동특성" 한국공간구조학회지 학술기사, 제8권 제1호, 2008년 2월, pp. 5-12.
3. Ikuo Tatemich and Mamoru Kawaguchi, "A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures," International Journal of Space Structure, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 145-3154.
4. 김기철, 김광일, 강주원, "면진 트러스-아치 구조물의 지진거동 분석" 한국공간구조학회 논문집, 제8권 제2호, 2008년 4월, pp. 73-84.
5. 김대곤, 이동근, 정재은, 남궁계홍, "정형 및 비정형 건물에 대한 비선형 면진장치의 적용" 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, 2001년 2월, pp. 37-44.

접수일자 : 2009년 9월 13일

심사완료일자 : 2009년 10월 21일

게재확정일자 : 2009년 10월 23일