

# 납-고무면진장치가 적용된 트러스-아치 구조물의 지진거동 분석

## The Seismic Behavior of the Truss-Arch Structure with Lead Rubber Bearing(LRB)

신민기\*                      김기철\*\*                      강주원\*\*\*  
Shin, Min-Gi                      Kim, Gee-Cheol                      Kang, Joo-Won

### 요약

본 연구에서는 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조이기도 한 아치에 납-고무면진장치를 적용하여 지진거동을 분석하였다. 대공간구조물의 지진거동은 일반적인 골조구조물의 지진거동과 달리 수평지진에 의하여 수직방향으로 큰 지진응답이 나타나고 있다. 면진장치를 대공간 구조물에 적용할 경우에 수평지진하중에 의하여 수평방향 지진응답이 저감되는 것은 물론 면진장치의 수직강성으로 인하여 수직응답도 현저하게 저감되는 것을 알 수 있었다.

### Abstract

In this study, the seismic behavior of arch structure with lead rubber bearing(LRB) is analyzed. The arch structure is the simplest structure and has the basic dynamic characteristics among large spatial structures. Also, Large spatial structures have large vertical response by horizontal seismic vibration, unlike seismic behavior of normal rahmen structures. When horizontal seismic load is applied to the large spatial structure with isolation systems, the horizontal acceleration response of the large spatial structure is reduced and the vertical seismic response is remarkably reduced.

**키워드 :** 대공간구조물, 지진거동, 면진장치, 납-고무면진장치, 동적특성  
**Keywords :** Spatial structure, Seismic Behavior, Seismic Isolation, LRB, Dynamic Characteristics

### 1. 서론

대공간 구조물은 구조물이 가지는 본연의 목적이외에 재난에 의한 피난거점으로도 이용될 수 있으며 자중이 작고 장경간의 구조물로 지진에 대하여 일반적 구조물과는 다른 동적거동을 한다. 따라서 대공간구조물에 대한 적합한 설계와 시공을 위해서는 지진에 의한 대공간구조물의 진동특성에 대한 정확하고 세밀한 분석과 대공간구조물의 지진동제어를 위한 다양한 장치의 적용성을 알아볼 필요가 있다. 본 연구는 면진장치를 적용한 대공간 구조물의 지진거동 분석에 대한 것으로 대공간 구조물 중에서 자중이 비교적 커서 지진응답이 크

게 나타나는 스페이스 프레임의 트러스 아치구조를 대상으로 하여 연구를 진행하였다.

아치 구조물은 일반라멘구조와는 다른 형태적 특성으로 인하여 수평지진에 의하여 상하지진동이 발생하며 공진동주기가 다소 길어 일반적인 라멘 구조물과는 구별되는 지진거동을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 직접기초에 지지된 아치구조를 예제 구조물로 선정하여 동적거동을 분석하고자 한다.

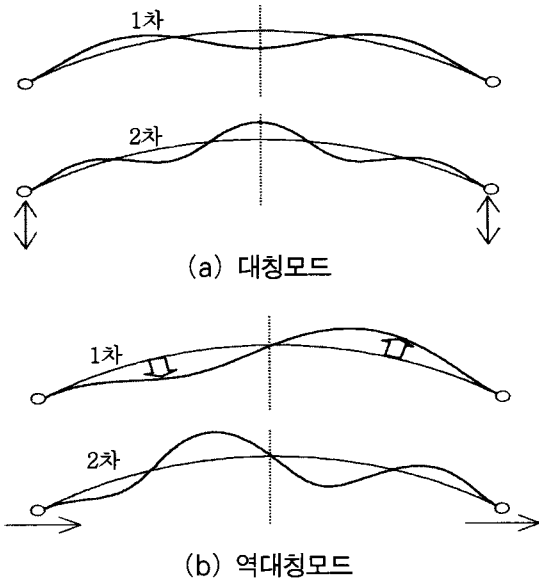
아치구조물의 동적특성은 구조물의 형상을 결정하는 개각(open angle)과 겹보기 세장비(단면이차 반경/원호길이)에 의하여 좌우된다. 동적특성 중에 하나인 진동모드 양상은 그림 1 (a)와 같이 상하지진동에 반응하는 대칭 모드와 그림 1 (b)와 같이 수평지진동에 대하여 응답이 크게 발생하는 역대칭 모드가 나타난다. 아치에서는 이들의

\* 정희원, 영남대학교 대학원 건축학과 석사과정

\*\* 정희원, 서일대학교 건축과 조교수

\*\*\* 정희원, 영남대학교 건축학부 부교수

모드의 고유주기가 어느 정도 접근해 있기 때문에, 수평지진동에서는 역대칭 모드의 복수개정도(複數個程度), 상하지진동에서는 대칭모드의 복수개정도가 탁월할 경우가 많다.

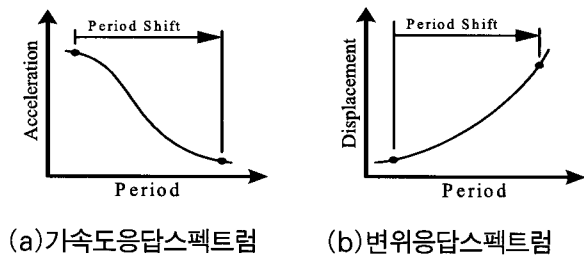


〈그림 1〉 아치구조의 고유진동 모드

## 2. 지진진동 제어를 위한 면진장치

면진장치는 기초로부터 지진동이 상부구조물로 전달되는 것을 최소화하기 위한 시스템이다. 면진장치의 특성은 그림 2에서 알 수 있듯이 구조물의 주기를 길게 만들어 지진파의 탁월주기를 벗어나게 하는 것이다.

진동제어를 위하여 사용되는 면진장치로는 적층고무받침과 마찰진자받침이 가장 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서는 적층고무받침을 중점적으로 다루고자 한다.

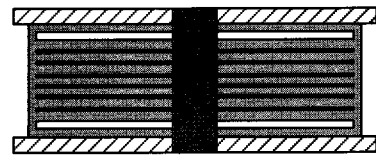


〈그림 2〉 면진시스템에 의한 구조물 거동

### 2.1 적층고무면진장치

적층고무받침(Laminated Rubber Bearing)은 얇은 고무와 보강 철판을 번갈아 겹쳐놓은 것으로 철판은 고무의 과도한 팽창을 방지하고 수직강성을 증가시키는 역할을 한다. 그리고 초기강성과 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 단면 중앙에 납을 삽입하기도 하며 이를 납-고무면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)라 한다.

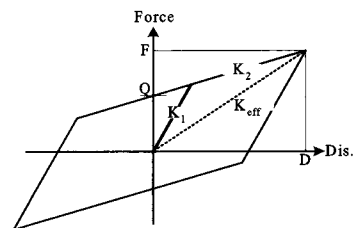
LRB는 그림 3와 같이 다층의 고무판과 철판이 층상화되어 제작된 것으로 수직강성은 매우 높고, 수평강성은 유연한 특성이 있다. 이것은 고무의 이력감쇠를 이용하거나 다른 감쇠기와 함께 사용하여 구조물의 지진격리 시스템에 사용된다. LRB의 연직 방향 강성은 매우 크기 때문에 면진구조에서 요구되는 조건을 만족하게 된다. 수평변형능력을 확보하기 위해서는 고무판의 층수를 증가시키고, 고무판 두께를 크게 하면 되지만, 이 경우 연직방향 지지력이 저하하고 수평방향 강성이 연직방향 하중의 크기에 의존하는 성질이 있다.



〈그림 3〉 Lead Rubber Bearing

### 2.2 면진장치의 모형화

납-고무면진장치는 비선형 이력거동을 하며 그림 4와 같이 bilinear로 모형화가 가능하다. 면진장치의 비선형 해석에 대한 제약을 해결하기 위하여 비선형 이력특성을 등가의 선형으로 치환하여 해석을 수행한다.



〈그림 4〉 Bilinear 이력거동

납-고무면진장치는 설계변위( $D$ ), 탄성강성( $K_1$ ), 항복 강성( $K_2$ ) 그리고 납항복강도( $Q$ )를 기초로 유효강성( $K_{eff}$ )은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad (1)$$

납-고무면진장치의 수평저항력( $F$ )은 식 (2)과 같으며 납이 항복할 때까지의 높은 탄성강성( $K_1$ )에 의하여 탄성적으로 거동하며 납이 항복 후에는 감소된 항복강성( $K_2$ )에 의하여 거동하게 된다.

$$F = K_2 D + Q \quad (2)$$

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

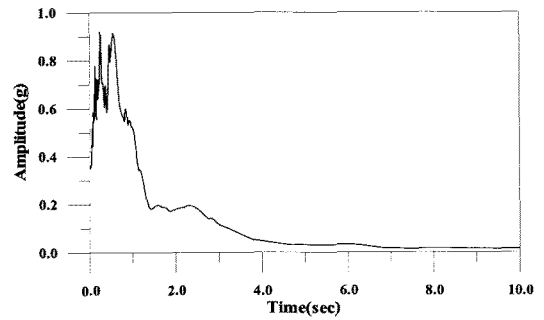
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}} \quad (3)$$

$$\beta_{eff} = \frac{Area}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (4)$$

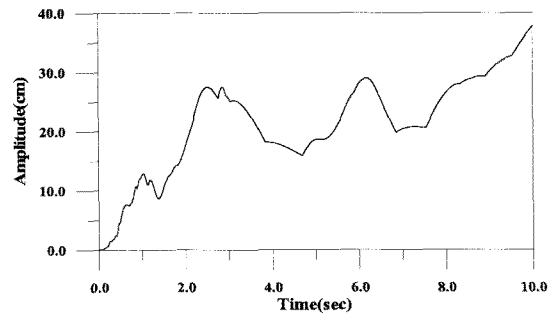
여기서  $g$ 는 중력가속도이며, Area는 hysteresis loop의 면적이다.

### 3. 납-고무면진장치가 적용된 대공간 구조물의 지진거동

본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조인 트러스 아치 구조물을 수치해석 예제 구조물로 선정하였다. 예제 구조물의 겹보기 세장비는 0.15와 0.30 두 가지를 적용하였으며 예제 구조물에 대한 입력 지진은 대공간구조물의 지진거동 분석에 많이 사용되는 El-Centro NS를 적용하였다. 적용한 지진 하중은 그림 5에서와 같이 1.0초 이하의 단주기에서 가속도성분이 매우 크며 2.0초 이상의 주기에서는 가속도성분이 현저하게 줄어들고 있다. 그리고 변위성분의 경우에 그 반대로 단주기 보다는 장주기에서 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



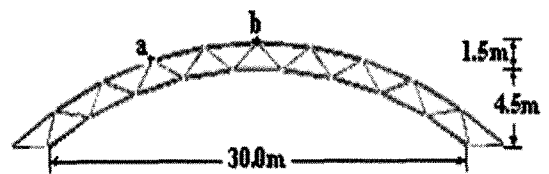
(a) El-Centro NS 가속도스펙트럼



(b) El-Centro NS 변위스펙트럼

〈그림 5〉 지진하중 스펙트럼

예제 트러스 아치의 길이는 30.0m이며 높이는 겹보기 세장비에 따라서 4.5m와 9.0m로 하였다. 그리고 트러스 아치의 춤은 1.5m이다. 트러스 아치의 상현재와 하현재는  $\phi$  216.3×4.5로 하였으며 사재는  $\phi$  101.6×3.2로 되어있다. 그림 6은 겹보기 세장비가 0.15인 예제 구조물이다.



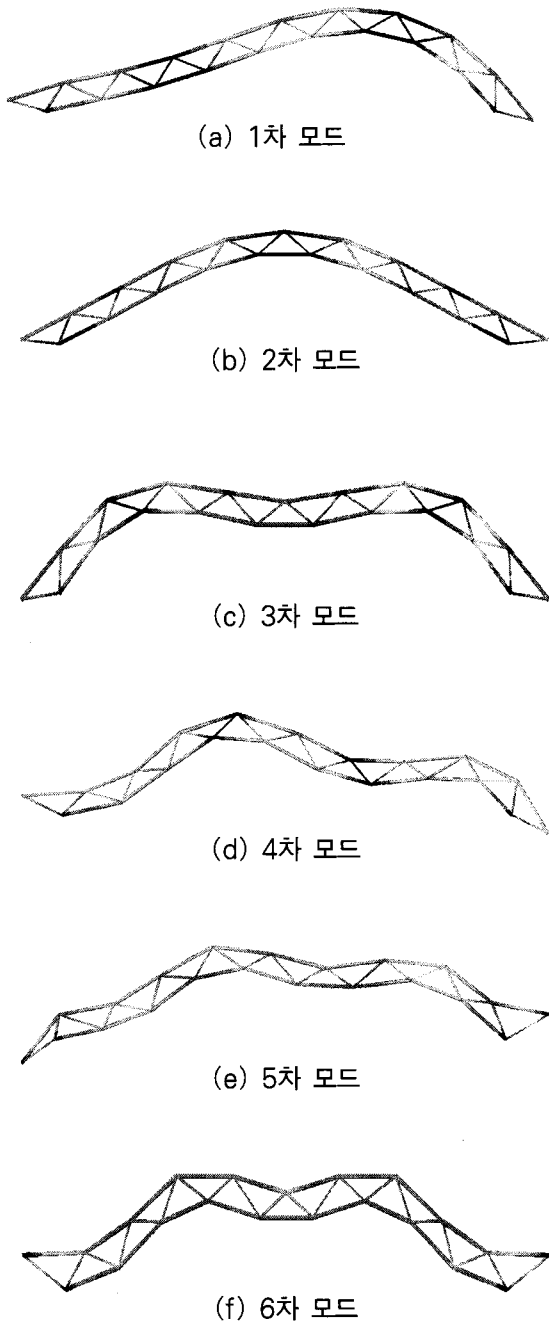
〈그림 6〉 트러스 아치 구조물

#### 3.1 예제 구조물의 동적특성

예제 구조물의 동적특성은 일반적인 트러스 아치구조물의 동적특성을 보이고 있다. 그림 7은 겹보기 세장비가 0.15인 트러스 아치의 진동모드를 보여주고 있다.

겹보기 세장비가 0.30인 경우에는 트러스 아치의 길이에 대하여 높이가 커지므로 3차 모드와 4

차 모드의 순서 그리고 5차 모드와 6차 모드의 순서가 역전되어 나타나고 있다.



〈그림 7〉 예제 구조물의 진동모드

표 1은 공간구조물의 기본적인 특성을 가지고 있으며 동시에 가장 간단한 구조인 트러스 아치 구조물의 모드 주기를 나타낸 것으로 지진응답에 많은 영향을 미치는 저차모드 주기가 지진하중의 에너지가 집중된 주기에 근접한 것을 볼 수 있다.

〈표 1〉 모드별 진동주기 (단위: sec)

모드	겔보기 세장비 : 0.15	겔보기 세장비 : 0.30
1차모드	0.224	0.376
2차모드	0.155	0.177
3차모드	0.092	0.104
4차모드	0.076	0.085
5차모드	0.056	0.069
6차모드	0.053	0.061

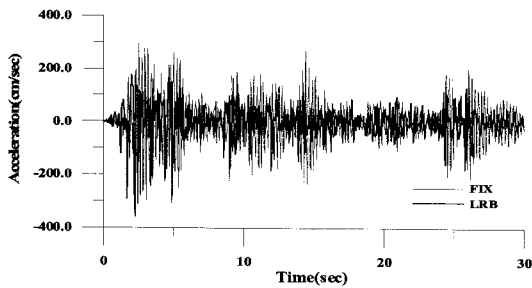
3.2 대공간구조물에 대한 납-고무면진장치 적용 건축물의 내진 대책으로 많이 사용되고 있는 면진시스템을 대공간구조물의 내진 대책으로 적용하고자 한다. 그 중 본 연구에서는 그중 납-고무면진장치(LRB)를 사용하고자 한다.

LRB의 진동주기는 면진장치 상부구조물의 무게와 면진장치의 유효강성에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 트러스 아치의 겔보기 세장비가 0.15인 경우에 LRB의 진동주기가 1.32초가 되도록 설계하였으며 겔보기 세장비가 0.30인 경우에 LRB의 진동주기가 1.41초가 되도록 설계하였다. 그리고 지진하중은 El-Centro NS를 수평방향으로 가하였다.

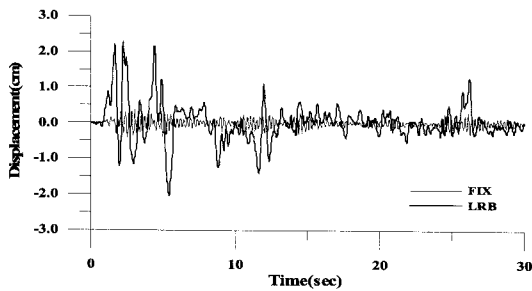
대공간구조물은 라멘 구조물과 달리 수평지진에 의하여 수직방향으로 응답이 크게 나타나는 경우가 많다. 본 연구에서는 수평응답과 수직응답이 크게 나타나는 그림 6의 절점 a에서의 지진응답을 분석하고자 한다.

그림 8은 겔보기 세장비가 0.15인 트러스-아치에 El-Centro NS의 지진하중을 수평방향으로 가한 경우의 지진응답이다. FIX는 예제 트러스-아치의 지지조건이 고정으로 한 것을 의미하며 LRB는 진동주기가 1.32초가 되도록 설계한 납-고무면진장치를 의미한다. 가속도응답의 경우에 수평방향과 수직방향 모두 응답이 줄어들었으며 변위응답의 경우에 수평방향은 증가하고 수직방향은 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 면진장치의 설치로 인하여 트러스-아치의 수평방향 강성이 작아져서 구조물의 주기가 장주기로 이동되었기 때문에 나타나는 현상이다. LRB의 연직방향 강성의 영향으로 수직방향 가속도지진응답이 감소하는 것은 물론 변위

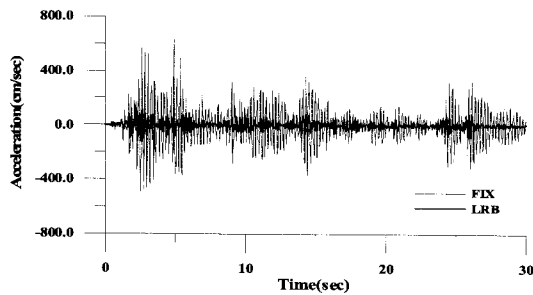
응답도 감소하는 것을 볼 수 있다.



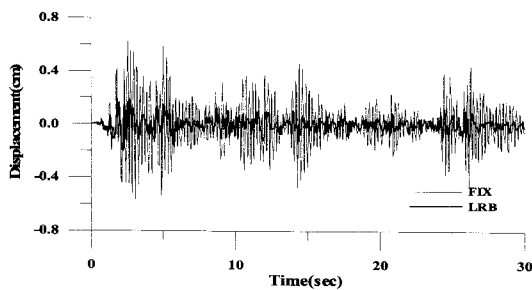
(a) 015-X방향 가속도응답-시간이력



(b) 015-X방향 변위응답-시간이력



(c) 015-Z방향 가속도응답-시간이력

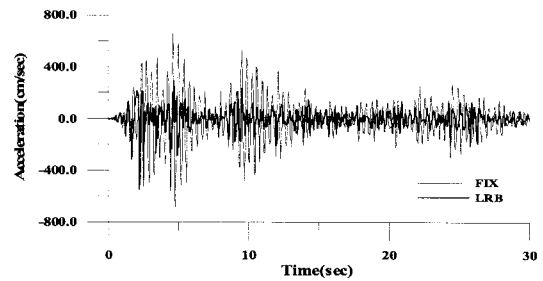


(d) 015-Z방향 변위응답-시간이력

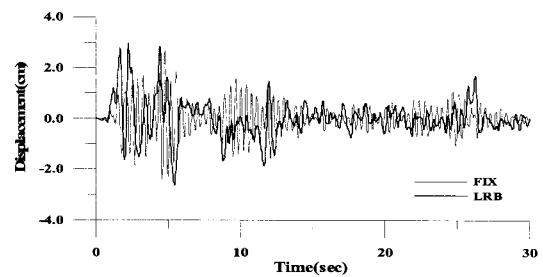
〈그림 8〉 걸보기 세장비 0.15 트러스-아치의 지진응답(EI-Centro NS)

그림 9은 진동주기 1.41초의 납-고무면진장치를 설치한 걸보기 세장비가 0.30인 트러스-아치에 EI-Centro NS의 지진하중을 수평방향으로 가한 경

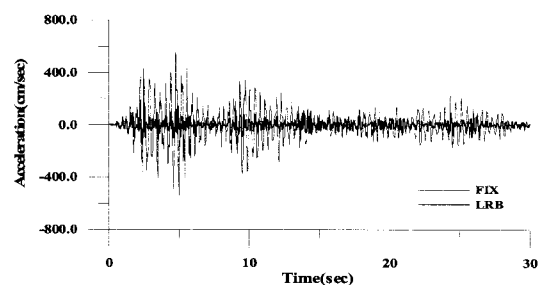
우의 지진응답이다. 걸보기 세장비에 따라서 예제 구조물의 고유진동수가 다르므로 지진응답의 절대 값은 다르게 나타나지만 그림 8와 같이 가속도응답의 경우에 수평방향과 수직방향 모두 응답이 줄어들고 변위응답의 경우에 수평방향은 증가하고 수직방향은 감소하는 지진응답 양상을 볼 수 있다.



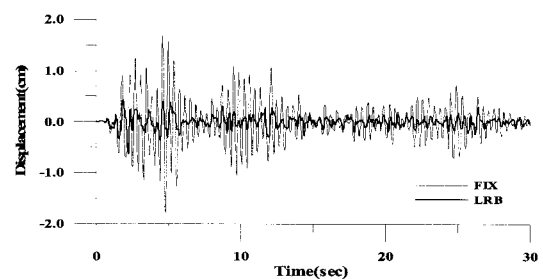
(a) 030-X방향 가속도응답



(b) 030-X방향 변위응답



(c) 030-Z방향 가속도응답



(d) 030-Z방향 변위응답

〈그림 9〉 걸보기 세장비 0.30 트러스-아치의 지진응답(EI-Centro NS)

#### 4. 결론

본 연구에서는 공간구조물의 기본적인 형태인 트러스-아치에 납-고무면진장치를 설치하여 지진 응답을 분석하고 대공간구조물에 대한 면진장치의 적용성을 살펴보았다. 공간구조물의 지진동 제어를 위하여 면진장치를 적용할 경우에 우수한 제어 성능을 보이고 있다.

본 논문은 납-고무면진장치를 기초부분에 설치한 기초면진에 국한하여 연구를 수행하였다. 대공간구조물은 형상에 따라서 지진응답이 다르게 나타나며 상부구조와 하부구조의 형태에 따라서도 지진응답이 다르게 나타난다. 따라서 추후 연구에서는 대공간구조물의 형상, 형상비, 상·하부구조의 형태는 물론 면진장치의 위치에 따른 지진응답을 분석하고 이에 대한 면진장치의 적용성을 알아보 고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구개발사업의 연구비지원 (과제번호# 06 건설핵심 B03)에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Arjang Sadeghi, "Horizontal Earthquake and Loading 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 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.
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. 145-154.
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, 문대식, "비정형 구조물의 비틀림 저감을 위한 마찰진자시스템의 적용" 대한건 축학회 논문집, 제20권 제8호, 2004년 8월, pp. 59-66.
7. 김우범, 이경진, "마찰진자를 이용한 면진장 치의 원전 주 제어실 적용에 관한 연구" 한국강구조학회 논문집, 제17권 제4호, 2005년 8월, pp. 407-417.
8. 김대곤, 이동근, 정재은, 남궁계홍, "정형 및 비정형 건물에 대한 비선형면진장치의 적용" 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, 2001년 2월, pp. 37-44.
9. Farzad Naeim and James M. Kelly, "DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES," John Wiley & Sons Inc. 1999
10. ASCE/SEI, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," ASCE STANDARD, 2005, pp. 177-185.