

돔 구조물의 지진응답 저감을 위한 중간 면진장치의 적용

Application of Mid-story Isolation System for Seismic Response Reducing of Dome Structure

김기철*
Kim, Gee-Cheol

김수근**
Kim, Su-Geun

강주원***
Kang, Joo-Won

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 dome 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.

Keywords : Dome structure, Seismic response, Isolation system, Base isolation, Mid-story isolation

1. 서론

최근 한반도에도 규모 5.0 이상의 비교적 큰 지진이 발생하고 있어 한반도도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아님을 확인할 수 있다¹⁾. 이로 인하여 국내에서도 구조물에 대한 내진설계 기준이 강화되고 있으며 비내진 구조물에 대한 내진보강이 이루어지고 있다. 특히, 대공간구조물은 자연재해 및 재난 발생 시 중요성이 높은 구조물로 내진설계 및 지진에 대한 보강이 반드시 수행되어야 한다.

돔 구조물과 같은 대공간구조물은 지진하중에 의한 진동응답이 일반 라멘구조물과는 다른 양상을 나타내며, 또한 상부 지붕구조의 강성이 작고 중량이 작은 특징을 가지고 있다²⁾. 구조물의 지진응답을 저감하기 위하여 면진장치를 적용하고, 대공간구조물에 면진장치를 올바르게 적용하기 위해서는 지진응

답에 대한 면진장치 영향을 정확하게 분석할 필요가 있다³⁻⁵⁾.

돔 구조물의 지진응답은 구조물의 형상을 결정하는 개각, 라이즈비 및 걸보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 본 연구에서는 면진장치 적용 위치에 따른 돔 구조물의 지진응답 분석을 목적으로 하고 있으므로 예제 구조물의 개각과 라이즈 등을 동일하게 하여 지진해석을 수행하고 이에 대한 진동응답을 분석하고자 한다.

2. 구조물의 면진장치

2.1 면진장치

일반적으로 면진장치는 수평방향에 대한 유연성을 가져야 하며 수직방향에 대하여 적절한 강성을 가져야 한다. 또한 지진에너지에 대한 에너지 소산 능력을 가지고 있어야 한다. 구조물의 면진장치로 적층고무받침과 마찰진자받침 등이 가장 널리 사용되고 있다. 적층고무받침에 초기강성과 에너지 소산 능력을 증가시키기 위하여 단면 중앙에 납을 삽입하기도 한다. 이를 납-고무 면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)라 한다.

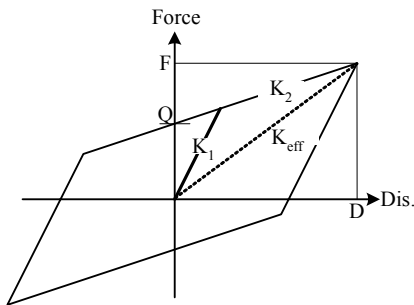
* 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축과 부교수
College of Architecture, Seoil University
Tel: 02-490-7582 Fax: 02-490-7427
E-mail: beat67@seoil.ac.kr

** 정회원, 영남대학교 건축학부 대학원생
School of Architecture, Yeungnam University

*** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수
School of Architecture, Yeungnam University

2.2 면진장치의 모형화

납-고무 면진장치와 마찰진자 면진장치는 비선형 이력거동을 하며 <Fig. 1>과 같이 Bilinear로 모형화가 가능하다. 그리고 면진장치의 비선형 해석에 대한 제약을 해결하기 위하여 면진장치의 비선형 이력특성을 등가의 선형으로 치환하여 해석을 수행하기도 한다^{6,9)}.



<Fig. 1> Bilinear hysteric loop

납-고무 면진장치는 설계변위(D), 탄성강성(K₁), 항복 강성(K₂) 그리고 납항복강도(Q)를 기초로 유효강성(K_{eff})는 식 (1)과 같이 구할 수 있으며, 또한 마찰진자면진장치는 구조물의 무게(W), 마찰진자 면진장치의 곡률반경(R)과 마찰계수(μ)로 등가강성(K_{eff})을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

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

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

납-고무 면진장치의 수평저항력(F)은 식 (3)과 같으며 납이 항복할 때까지의 높은 탄성강성(K₁)에 의하여 탄성적으로 거동하며 납이 항복한 후에는 감소된 항복강성(K₂)에 의하여 거동하게 된다. 그리고 마찰진자면진장치의 수평저항력(F)은 식 (4)와 같으며 수평강성(K_H)에 의한 복원력과 마찰계수(μ)에 의한 마찰력에 따라서 거동한다.

$$F = K_2 D + Q \tag{3}$$

$$F = K_H D + \mu W(\text{sgn} \dot{D}) \tag{4}$$

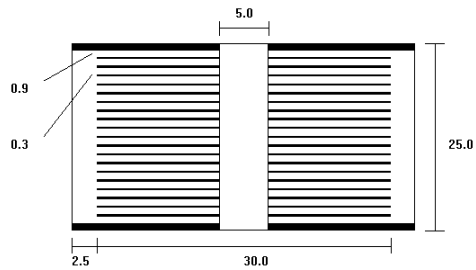
여기서 $K_H = \frac{W}{R}$ 이다.

그리고 등가강성에 의한 면진장치의 진동주기와 유효감쇠(β_{eff})는 식 (5)와 식 (6)과 같다. 여기서 g는 중력가속도이며 Area는 이력곡선의 면적이다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}} \tag{5}$$

$$\beta_{eff} = \frac{Area}{2\pi K_{eff} D^2} \tag{6}$$

본 논문의 예제 돔 구조물에 적용하고자 하는 LRB는 <Fig. 2>와 같다. LRB의 직경 35cm, 높이 25cm, 삽입 납 직경 5cm, 철판 0.3cm, 적층고무 20개로 구성되어 있다.



<Fig. 2> LRB design

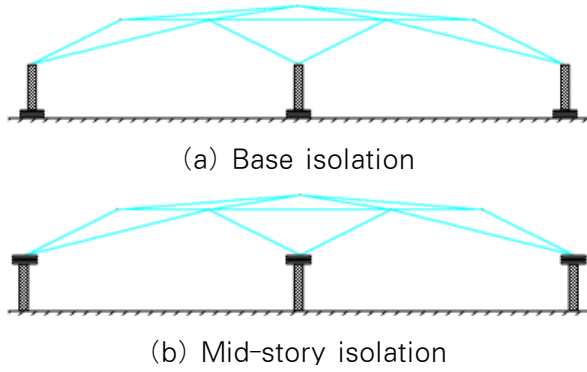
2.3 기초면진과 중간면진

구조물의 면진설계 기본개념은 구조물을 지반과 분리시키는 것이다. 그러나 이는 현실적으로 불가능하므로 기초와 구조물(기둥) 사이에 면진장치를 설치하여 지반분리 효과를 유도한다. 이러한 기초면진은 가장 일반적인 면진 방법으로 지반과 기초로부터 전달되는 지진동이 상부 구조물로 전달되는 것을 줄여준다.

기초면진의 경우에 구조물 전체를 지진동에 대하여 면진시키므로 구조물의 진동응답도 저감시킬 수 있으나, 면진장치가 지지해야 하는 하중이 매우 크다. 그리고 대공간구조물과 같이 강성이나 질량이 급격히 변하는 지붕하부(기둥상부)에서 지진응답이 크게 나타날 수 있다. 따라서 돔 구조물의 경우에 효율적인 면진거동을 유도하기 위하여 지붕하부(기

등상부)에 면진장치를 설치하는 경우가 있다.

<Fig. 3>은 기초면진과 중간면진에 대한 기본적인 개념을 나타낸 것이다.



<Fig. 3> Isolation system position

중간면진은 기초면진과 달리 구조물의 중간부분에 면진장치를 설치하는 것으로 구조물의 강성이나 단면이 급격히 변하는 곳에 설치한다. 대공간구조물의 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 기둥과 같은 하부 구조물이 면진거동을 하지 못하므로 지진에 의하여 하부 기둥구조가 파괴될 수도 있다.

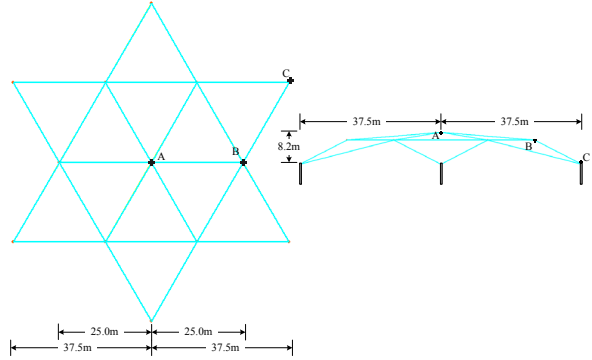
3. 돔 구조물의 동적특성

3.1 예제 돔 구조물

스타 돔은 돔 구조물의 기본적인 동적특성을 내재하고 있어 돔 구조물의 구조적 특성 분석에 있어서 많이 사용되는 수치해석 예제 구조물이다. 본 연구에서 <Fig. 4>와 같이 스타 돔을 예제 구조물로 선정하였다²⁾.

예제 구조물의 상부 지붕구조의 경간은 75m, 높이는 8.2m이다. 상부 지붕부재는 탄성계수가 $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$, 단면이 $\varnothing 165.2 \times 6 \text{mm}$ 의 강관으로 구성되어 있다. 그리고 하부 기둥구조는 5.0m이며 단면이 $500 \text{mm} \times 500 \text{mm}$ 의 콘크리트 기둥으로 되어 있다. 예제 구조물의 고정하중 및 적재하중에 의한 처

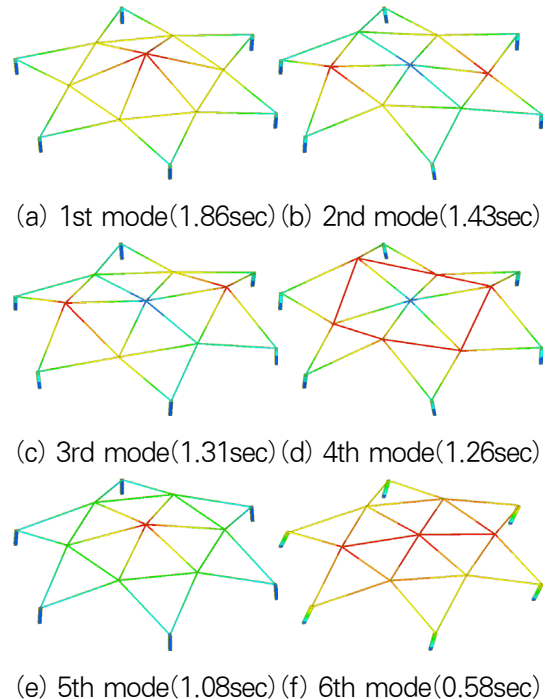
짐은 41.3cm로 경간의 약 1/200 정도의 정적처짐을 보이고 있다.



<Fig. 4> Example roof dome structure

3.2 고정기초 돔 구조물의 동적특성

돔 구조물의 고유진동모드 및 고유진동수와 같은 동적특성은 돔의 형상, 개각, 길보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 고정기초의 예제 돔 구조물의 진동모드 양상은 <Fig. 5>의 (a), (c), (e)와 같이 대칭 모드 그리고 <Fig. 5>의 (b), (d)와 같이 역대칭 모드로 보이고 있으며, <Fig. 5>의 (f)와 같이 수평모드를 나타내고 있다.

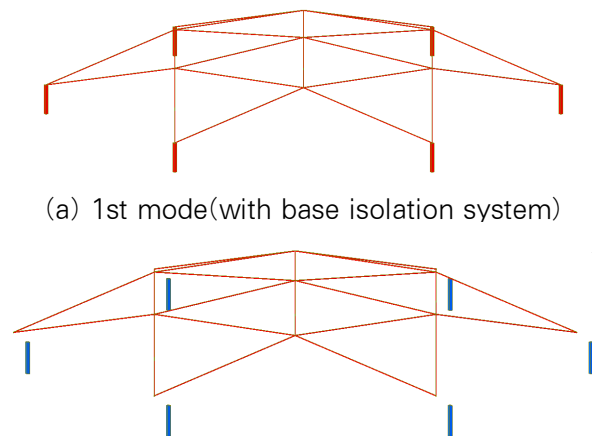


<Fig. 5> Natural vibration mode and frequency of dome structure without isolation system

예제 돔 구조물의 진동모드 형상은 지붕구조 강성이 매우 작은 돔 구조물의 특징을 반영하고 있다. 1차~5차 모드는 상부 지붕에 의한 진동모드, 6차 모드는 하부 기둥에 의한 진동모드 거동을 보이고 있다.

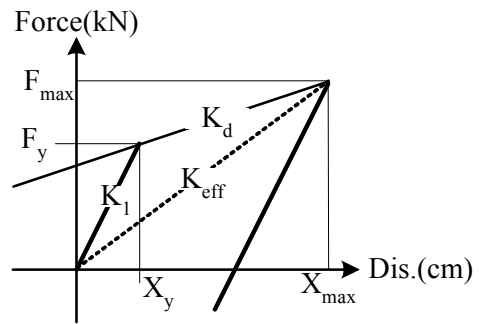
3.3 면진 돔 구조물의 동적특성

면진장치가 기둥하부 기초에 설치된 돔 구조물은 일반 라멘구조와 마찬가지로 수평방향 진동응답 저감에 매우 효과적이며 그리고 상하방향의 진동응답도 감소되는 것을 볼 수 있다⁵⁾. 그러나 이러한 기초면진 방법을 돔 구조물에 그대로 적용시키기에는 여러 가지 문제점이 있다. 돔 구조물의 상부구조인 지붕은 하부구조인 기둥/벽체/관람석과 비교하여 강성과 질량이 매우 작으므로 지붕 하부와 기둥/벽체/관람석 상부 사이에 면진장치를 설치하는 중간(지붕)면진방법이 바람직 할 수 있다⁴⁾.



(a) 1st mode(with base isolation system)
 (b) 1st mode(with mid-story isolation system)
 <Fig. 6> 1st mode shape of dome structure with isolation system

기초면진 및 지붕면진의 예제 돔 구조물의 진동모드 형상은 <Fig. 6>과 같이 1차 모드는 구조물의 면진에 의한 수평 진동모드 형상을 나타내고 있으며 그리고 2차, 3차, 4차 등 저차 모드의 진동모드 양상은 고정기초 예제 돔 구조물의 진동모드 형상과 같게 나타나고 있다. 면진장치는 고정기초 예제 돔 구조물의 수평방향 진동모드인 6차 모드에 대하여 설계하였다.



<Fig. 7> Force-Dis. of isolation system

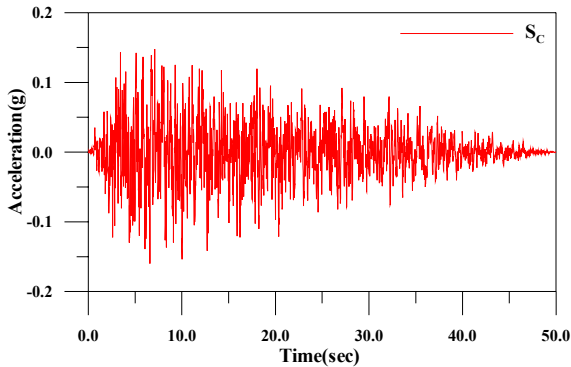
<Table 1> Isolation system parameter

| | | | |
|--|------|--|-------|
| Design dis. (Xmax)(cm) | 10 | Damping coefficient | 0.208 |
| Upper structure weight(kN) | 150 | Yield horizontal stiffness(Kd) (kN/cm) | 3 |
| Buckling load(kN) | 950 | Yield dis.(Xy) (cm) | 0.71 |
| Vertical stiffness (kN/cm) | 1228 | Yield load.(Fy) (kN) | 18 |
| Effective horizontal stiffness(Keff) (kN/cm) | 45 | Initial horizontal stiffness(Ku) (kN/cm) | 25 |

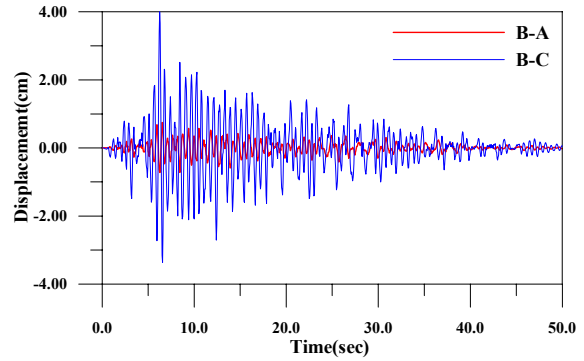
4. 면진장치를 적용한 돔 구조물의 지진응답

4.1 인공지진 하중

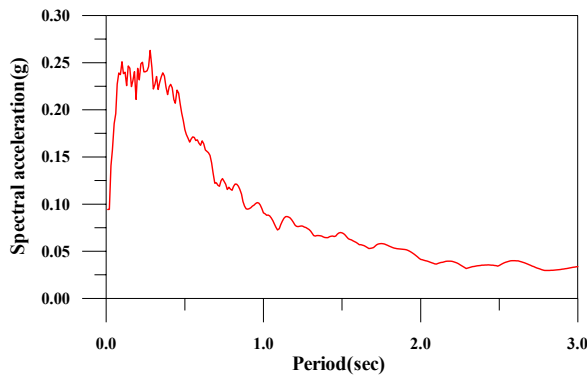
예제 돔 구조물에 인공 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행하였다. 인공 지진하중은 KBC 2009의 내진설계에 따른 가속도 설계응답스펙트럼을 사용하고 지반은 Sc로 최대지반가속도는 0.12g을 적용하였다. 인공 지진하중의 시간이력 그래프를 <Fig. 8>에 각각 나타내었다. 적용한 지진하중은 1.0 초 이하의 단주기에서 가속도성분이 매우 크며 2.0 초 이상의 주기에서는 가속도성분이 현저하게 줄어드는 특성을 가지고 있다.



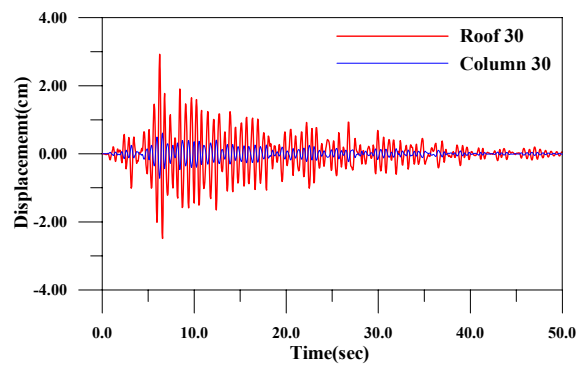
(a) Acceleration time history of artificial earthquake



(b) Difference of displacement of roof



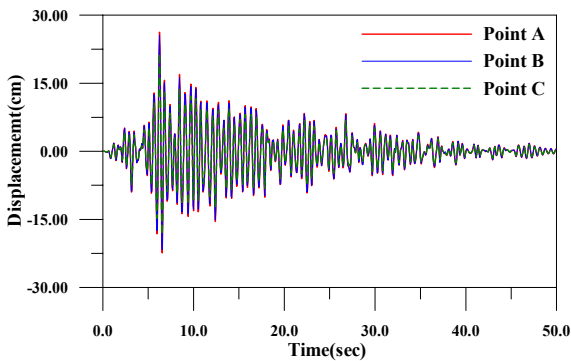
(b) Acceleration spectrum of artificial earthquake
<Fig. 8> Artificial earthquake(KBC 2009)



(c) Difference of displacement of column
<Fig. 9> Displacement of roof without isolation

4.2 돔 구조물의 지진응답

예제 돔 구조물의 면진장치 적용을 위하여 지붕 구조의 강성이 작은 돔 구조물의 지진하중에 지진 응답을 분석하고자 한다. Point A는 지붕경간의 중앙지점, Point B는 지붕경간의 1/4지점, Point C는 기둥상부 지점, 변위응답은 수평방향 변위응답을 의미한다.

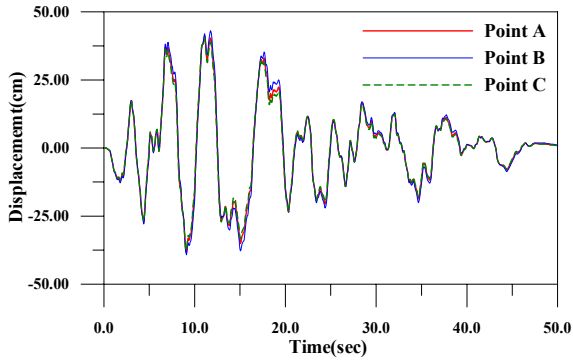


(a) Displacement of roof

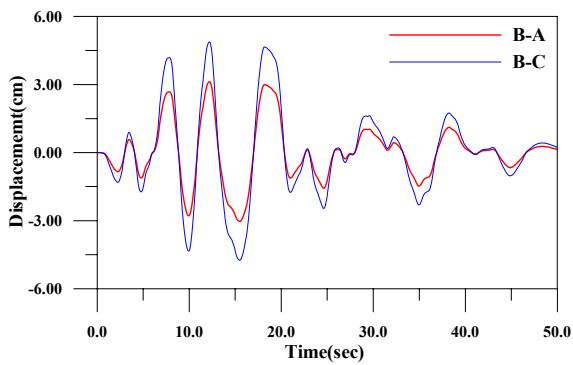
<Fig. 9 (a)>를 살펴보면 지붕의 위치에 관계없이 변위형상이 같은 것을 볼 수 있다. <Fig. 9 (b)>는 B점 변위응답과 A점 또는 C점 변위응답 차를 나타낸 것이다. B점과 A점의 변위응답은 거의 차이가 없고, C점의 경우에 B점에 대하여 크기는 4cm 이상의 변위 차가 나타나는 것을 볼 수 있다. <Fig. 9 (c)>는 지붕부재와 기둥부재의 접합부인 C점에서 지붕과 기둥으로 각각 30cm 떨어진 지점에서의 변위를 나타낸 것이다. 강성이 큰 기둥부재와의 변위 차보다 강성이 작은 지붕부재와의 변위 차가 큰 것을 볼 수 있다. 예제 돔 구조물의 상부 지붕구조와 하부 기둥구조의 강성 차이가 크기 때문이다. 따라서 이러한 부위에 응력이 크게 발생할 가능성이 매우 크다.

4.3 면진 돔 구조물의 지진응답

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

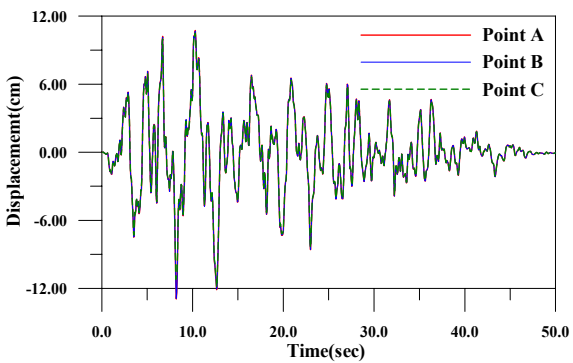


(a) Displacement of roof

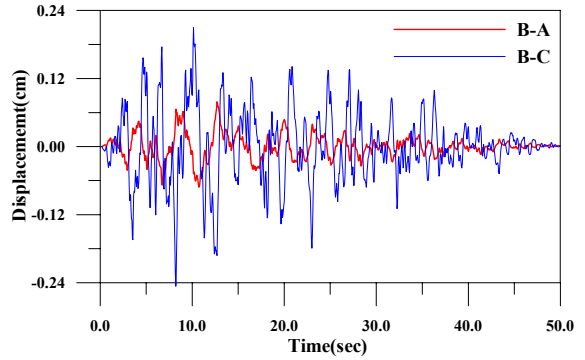


(b) Difference of displacement of roof
 <Fig. 10> Dis. of roof with base isolation

<Fig. 10>의 기초면진 예제 돔 구조물의 변위 응답은 면진장치의 특성으로 인하여 <Fig. 9 (a)>의 고정기초 예제 돔 구조물의 변위 응답보다 크게 나타나고 있다. 이는 기초에 면진장치가 설치되어 있어서 상부 지붕구조의 변위가 상대적으로 크게 발생하기 때문이다.

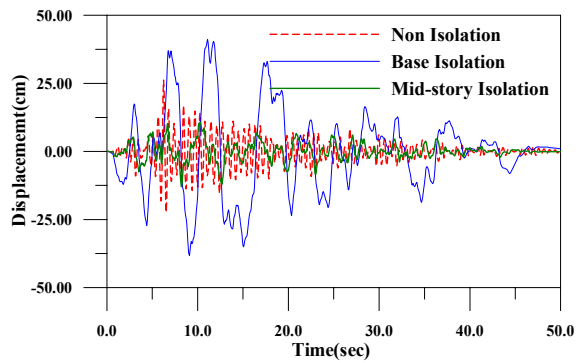


(a) Displacement of roof

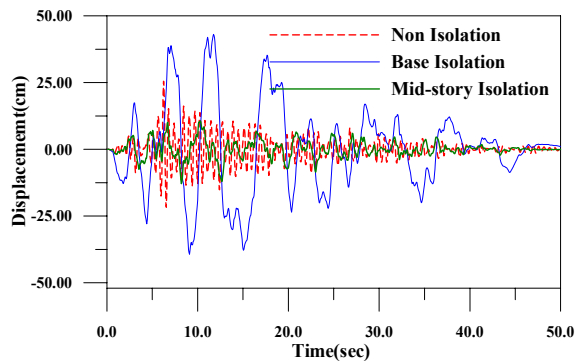


(b) Difference of displacement of roof
 <Fig. 11> Dis. of roof with mid-story isolation

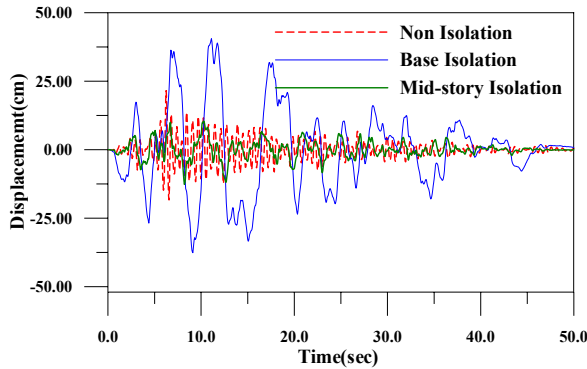
<Fig. 11>의 중간면진 예제 돔 구조물의 변위 응답은 <Fig. 9 (a)>의 고정기초 예제 돔 구조물의 변위 응답과 비교하여 1/2로 매우 작게 나타나고 있다. 또한 <Fig. 11 (b)>에서 보는 바와 같이, 지붕 하부에 설치된 면진장치로 인하여 지붕 위치에 따른 B 점 변위 응답과 A점 또는 C점 변위 응답 차가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 면진장치가 지붕하부에 설치되어 지붕구조가 면진거동을 하기 때문이다.



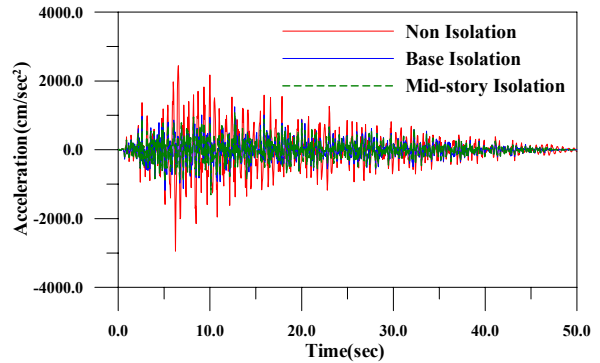
(a) Displacement of Point A



(b) Displacement of Point B



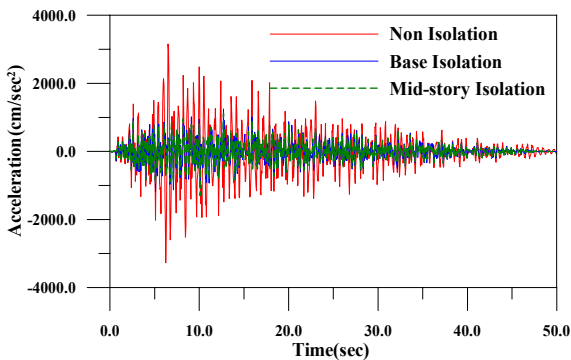
(c) Displacement of Point C
 <Fig. 12> Displacement of roof



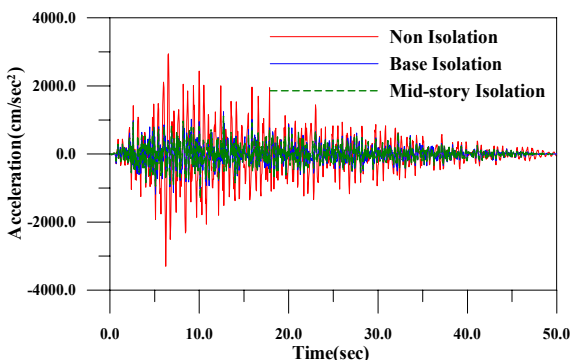
(c) Acceleration of Point C
 <Fig. 13> Acceleration of roof

<Fig. 12>는 고정기초, 기초면진, 중간면진에 의한 지붕의 변위응답으로 면진장치의 특성으로 인하여 기초면진 예제 구조물의 변위응답이 고정기초 예제 구조물의 변위응답보다 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 중간면진을 갖는 예제 돔 구조물의 변위응답은 고정기초 예제 구조물의 변위응답보다 작은 것을 볼 수 있다.

<Fig. 13>은 고정기초, 기초면진, 중간면진에 의한 지붕의 가속도응답으로 고정기초예제 구조물의 가속도 응답보다 면진장치를 갖는 예제 구조물의 가속도 응답이 작은 것을 볼 수 있다. 기초면진과 중간면진을 갖는 예제 돔 구조물의 가속도응답이 유사한 것을 볼 수 있다.



(a) Acceleration of Point A



(b) Acceleration of Point B

5. 결론

대공간구조물은 동적특성으로 인하여 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향의 지진응답은 물론 연직방향의 지진응답이 매우 크게 나타나고 있다. 본 연구에서는 면진장치의 설치위치에 따른 지진응답을 분석하여 하부 기둥구조와 상부 기둥구조 사이에 면진장치를 설치한 지붕면진 장치의 효율성을 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 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(16AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. An Earthquake of Gyeongju(Monday, September 12, 2016 07:00PM), The Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr>
2. J.W. Kang, C.W. J, "Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 1, 2008, pp. 5-12
3. 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
4. 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
5. G.C. Kim, K.I. Kim and J.W. Kang, "The seismic behavior of the truss-arch structure with seismic isolation", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 2, 2008, pp. 73~84
6. D.K. Kim, D.G. Lee, J.E. Jung, and K.H. Nam-Gung, "Application of Non-linear Seismic Isolators in Regular and Irregular Buildings", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 5, No. 1, 2001, pp. 37-44
7. G.C. Kim, D.H. Ju, "Seismic Behavior of the Spacial Structure with Seismic Isolation", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 6, 2008, pp.49~57
8. D.K. Kim, D.S. Moon, W.B. Kim, "Application of Friction Pendulum System for Reduction of Torsional Deformation of Irregular Structures", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 20, No. 8, 2004, pp. 59~66
9. S.G. Cho, W.K. Park, S.M. Yun, "Finite Element Analysis of Lead Rubber Bearing by Using Strain Energy Function of Hyper-Elastic Material", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 36, No. 3, 2016, pp 361~374

■ Received : October 17, 2016

■ Revised : October 31, 2016

■ Accepted : October 31, 2016