

중간층 면진을 적용한 돔 구조물의 하부 구조 높이에 따른 지진 응답 분석

Seismic Response Analysis According to the Height of Substructure of the Dome Structure Using Mid-Story Isolation System

최 나 영*
Choi, Na-Young

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

강 주 원***
Kang, Joo-Won

Abstract

Spatial structure does not have columns and walls installed inside, so they have a large space. There are upper structure and substructure supporting them. The response of seismic loads to the upper structure may be increased or decreased due to the effects of the substructure. Therefore, in this study, the seismic response of the upper structure and the floor response spectrum of the substructure were compared and analyzed according to the height of the substructure in the spatial structure where the LRB was installed. As a result, the possibility of amplification of response was confirmed as seismic waves passed through the substructure, which is likely to increase the response of the upper structures.

Keywords : Mid-story isolation system, Seismic response, Large spatial structure, Floor spectrum

1. 서론

산업화로 인하여 인구가 늘어남에 따라 문화 및 집회 시설, 공공시설 등 다양한 건축물이 점점 많이 건설되고 있으며, 구조물 재료의 경량화로 인하여 고층화·대형화된 구조물의 수요가 증가하고 있다¹⁾.

일반 라멘 구조와 달리 다양한 크기와 형상을 가진 대공간 구조물은 지진에 의한 동적 응답이 다른 양상으로 나타난다. 또한 수평 및 연직 방향 응답이 발생하기 쉬우며 예측하기 어려운 변수들이 존재한다^{2),3)}. 이와 더불어 내부에 기둥과 벽체를 설치하지 않아 넓은 공간을 가지며, 상부 구조물과 이를 지지하는 하부 구조물이 존재한다. 지붕 상부 구조물은 하부 구조물에 비해서 강성과 중량이 작은 특징을 갖는다⁴⁾.

지진파가 도달하였을 때 하부 구조물의 영향으로 상부 구조물에 전달되는 지진 하중의 응답이 증폭 또는 감소될 수 있고, 부재 크기가 다른 상부 구조물과 하부 구조물 사이에 응답이 크게 나타날 수 있다^{5),6)}. 이에 따라 구조물의 면진 장치 설계 시 경계층의 응답을 추가적으로 고려해야 하지만 관련된 연구가 부족한 실정이다.

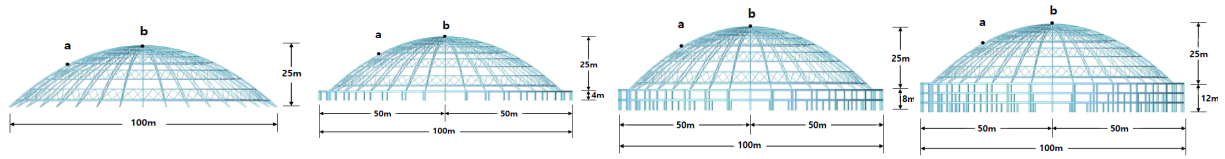
따라서 본 연구에서는 하부 구조물이 설치되지 않은 모델에 기초 면진을 설치하고, 하부 구조물이 설치된 모델 중간층에 면진 장치 중 LRB(Lead Rubber Bearing)를 설치하여 지진 응답 및 경계층에서의 층 응답 스펙트럼을 비교 분석하고자 한다.

2. 해석 모델

2.1 해석 모델의 개요

LRB를 설치한 돔 구조물의 하부 구조물 높이에 따른 상부 구조물의 지진 응답을 분석하기 위해 상용 프로그램 MIDAS/Gen ver. 860을 이용하여 해석을 진행하였다. 해석 모델은 대공간 구조물의 기본적인 특성을 가지는 트러스 요소로 구성된 3차원

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture & Civil Engrg., Sunmoon University
*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr



(a) Without substructure (b) 1st floor substructure (c) 2nd floor substructure (d) 3rd floor substructure
 <Fig. 1> Analysis models

리브돔 구조물로 선정하였다. <Fig. 1>과 같이 하부 구조물이 설치되지 않은 돔 구조물과 1~3층에 하부 구조물이 설치된 돔 구조물로 해석 모델을 선정하였다. 하부 구조물의 각 층 높이는 4m로 모델링을 하였다. 해석 절점은 경간의 1/4 지점인 절점 a, 1/2 지점인 절점 b로 선정하였다. 해석 모델의 일반 사항은 <Table 1>과 같다.

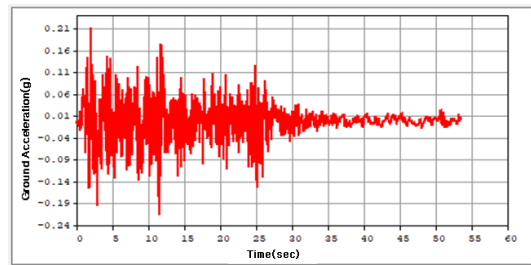
<Table 1> Specification of example structure

	Material	SS490
Upper structure	Section	Upper chord Lower chord Diagonal member
		$\phi 355.6 \times 6.3$ $\phi 101.6 \times 3.2$
	Span	100m
	Height	25m
Sub-structure	Material	Concrete
	Section	Column Beam
		500mm X 500mm 700mm X 400mm
	Span	2m

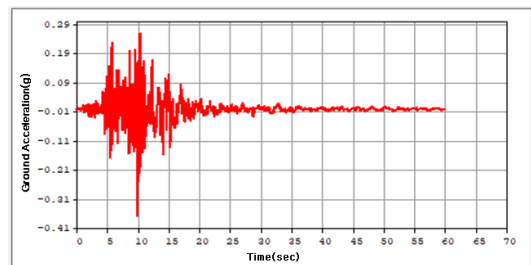
해석 방법은 지진파를 이용한 시간 이력 해석을 사용하였다. 입력 지진파는 역사 지진파인 El-centro EW(1940)와 Northridge(1994)를 양방향으로 동시에 가력하였으며, 가속도 시간 이력 그래프를 <Fig. 2>와 같이 나타내었다.

2.2 해석 모델의 면진 장치

면진 장치는 지진에 대한 구조물의 진동수를 줄이기 위하여 고무와 같이 유연한 부재를 사용하며, 수평 방향에 대한 유연성과 지진 에너지를 감소시키기 위해 뛰어난 에너지 소산 능력을 가져야한다. 또한 상부 구조물의 하중을 견디기 위해 수직 방향



(a) El-centro earthquake



(b) Northridge earthquake

<Fig. 2> Acceleration time history of earthquake load

에 대한 적절한 강성을 가져야한다⁷⁾. 이에 따라 본 해석 모델에는 적층 고무 받침과 단면 중앙에 납을 일체화 시킨 면진 장치인 LRB를 적용하였다. 동적 해석을 위한 면진 장치의 모델링은 경계 비선형 시간 이력 해석을 수행하기 위해 수평 방향으로 비선형 전단 스프링 요소를 사용하였다. 36개의 면진 장치는 하부 구조물이 설치되지 않은 모델의 경우 상부 구조물과 지반이 만나는 절점에 설치하였으며, 하부 구조물이 설치된 모델은 상부 구조물과 하부 구조물 사이의 절점에 설치하였다.

또한 면진 장치는 2가지 입력 지진파의 가속도 응답 스펙트럼을 통해 스펙트럼 가속도가 가장 작게 나타나는 주기인 1.0sec 이상을 면진 주기로 선정하고 허용 변위를 70cm로 가정하여 설계하였다. 해석 모델에 설치된 면진 장치의 제원을 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2> Property of isolation system

Design distance (cm)	70	Upper structure weight (kN)	1,752.2
Yield horizontal stiffness (Kd) (kN/cm)	37.28	Effective horizontal stiffness (Keff) (kN/cm)	37.93
Initial horizontal stiffness (Ku) (kN/cm)	253.13	Effective damping (kN·sec/cm)	0.015
Vertical stiffness (Kv) (kN/cm)	73,010.9	Yield load (Fy) (kN)	50.27
Energy dissipation area (cm ²)	1,195.5	Yield distance (cm)	0.2

3. 해석 모델의 지진 응답

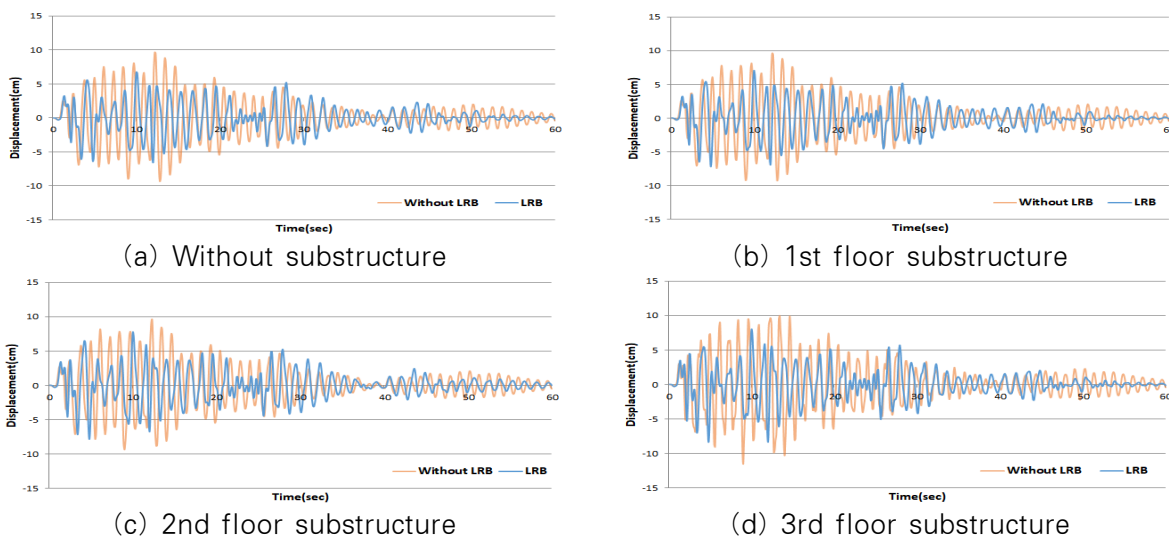
기존 연구 결과에 따르면 돔 구조물의 고유 모드 동적 특성으로 인해 수평 방향 지진 하중에 대하여 상부 구조물의 동적 응답이 수평 방향보다 수직 방향으로 더 크게 발생할 수 있다⁸⁾. 또한 돔 상부 구조물의 중앙 지점에서 수직 방향 동적 응답이 수평 응답보다 매우 작게 나타난다. 이는 대공간 구조물의 지진 응답에 많은 영향을 미치는 1차 모드 형상

이 역대칭 모드로 나타나고, 돔 상부 구조물 스패의 1/2 지점은 변곡점으로 모드벡터가 0인 지점이기 때문이다³⁾. 따라서 본 연구에서는 수평 및 수직 응답이 크게 나타나는 1/4 지점인 절점 a에서 변위 및 가속도 응답을 분석하였다.

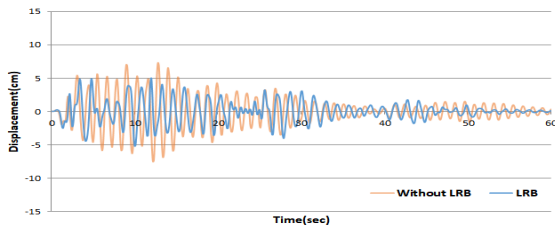
3.1 El-centro 지진에 대한 동적 응답

<Fig. 3>과 <Fig. 4>는 El-centro 지진파를 가했을 때 LRB 설치 유무에 따른 절점 a의 수평 및 수직 방향 변위 응답을 비교한 그래프이다. <Fig. 5>와 <Fig. 6>은 가속도 응답을 비교한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 LRB의 설치 유무와 상관 없이 최대 수평 방향보다 최대 수직 방향의 응답이 크게 나타나며, 하부 구조물의 높이가 높아질수록 상부 구조물 응답의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

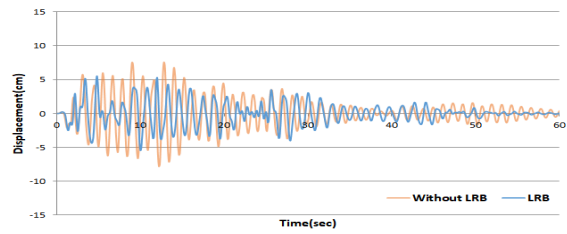
El-centro 지진파를 가려하였을 때 LRB 설치로 인한 상부 구조물의 수평 및 수직 방향 최대 변위 응답 감소율은 모든 해석 모델에서 25~30% 값으로 큰 차이가 없었다. 최대 가속도 수평 방향 응답은 다른 해석 모델보다 3층 하부 구조물을 가지는 해석 모델에서 상대적으로 큰 52%의 감소율이 나타났다. 수직 방향 응답은 3층 하부 구조물을 가지는 해석 모델을 제외한 나머지 해석 모델에서 오히려 증가하였다.



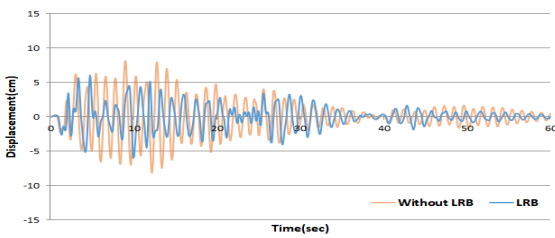
<Fig. 3> Displacement response of nodal point a(Dz) by El-centro earthquake



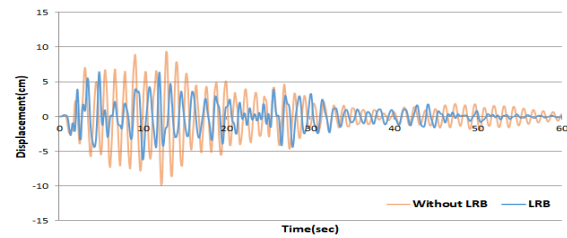
(a) Without substructure



(b) 1st floor substructure

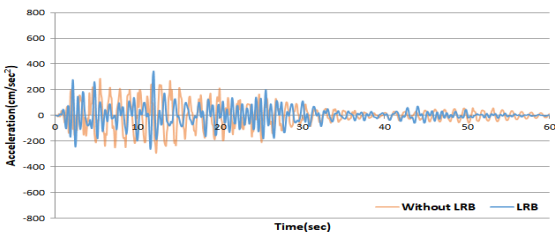


(c) 2nd floor substructure

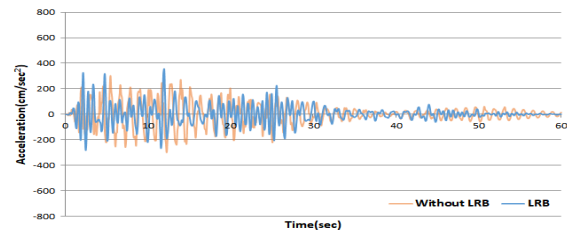


(d) 3rd floor substructure

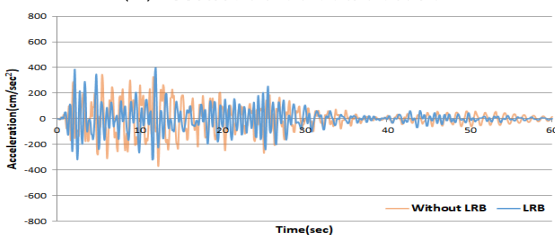
〈Fig. 4〉 Displacement response of nodal point a(Dx) by El-centro earthquake



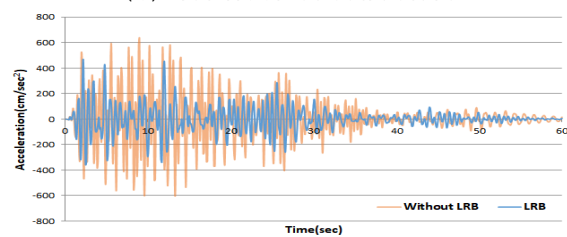
(a) Without substructure



(b) 1st floor substructure

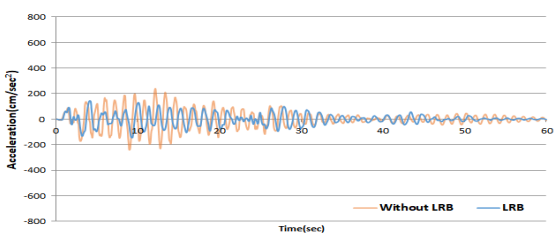


(c) 2nd floor substructure

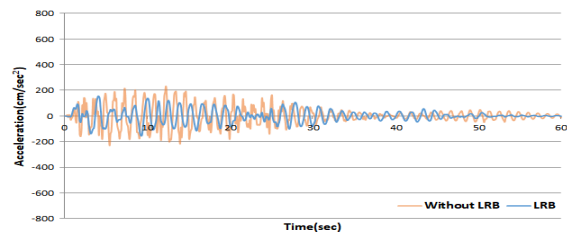


(d) 3rd floor substructure

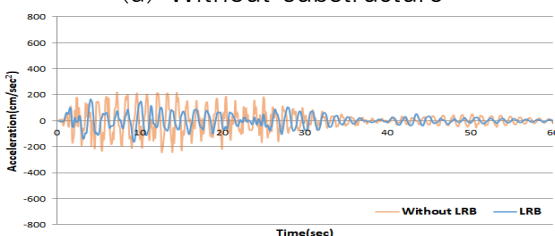
〈Fig. 5〉 Acceleration response of nodal point a(Dz) by El-centro earthquake



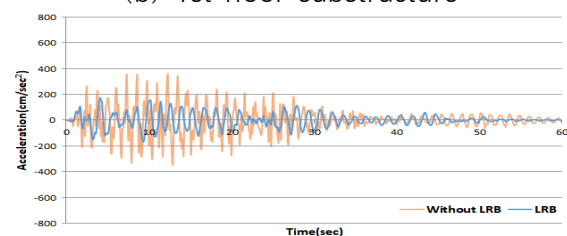
(a) Without substructure



(b) 1st floor substructure



(c) 2nd floor substructure



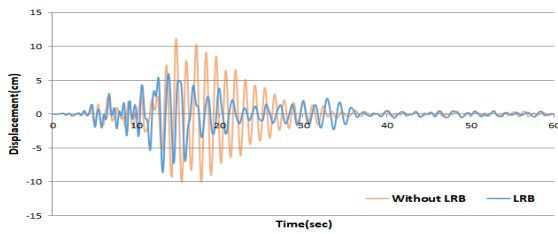
(d) 3rd floor substructure

〈Fig. 6〉 Acceleration response of nodal point a(Dx) by El-centro earthquake

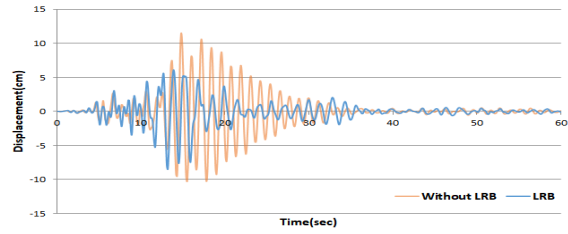
3.2 Northridge 지진에 대한 동적 응답

<Fig. 7>과 <Fig. 8>은 Northridge 지진파를 가력하였을 때 LRB 설치 유무에 따른 절점 a에서의 수평 및 수직 방향 변위 응답을 비교한 그래프이다. <Fig. 9>와 <Fig. 10>은 가속도 응답을 비교한 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 앞서 분석한 El-centro 지진파와 마찬가지로 LRB의 설치 유무와 관계없이 수평 방향의 최대 변위 응답보다 수직 방향의 최대 변위 응답이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 하부 구조물의 높이가 증가할수록 상부 구조물에서 최대 변위 및 최대 가속도 응답의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

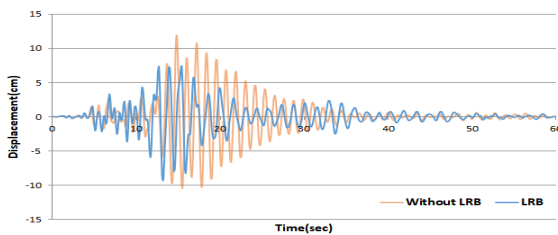
Northridge 지진파를 가력하였을 때 LRB 설치로 인한 상부 구조물의 수평 및 수직 방향 최대 변위 응답 감소율은 모든 해석 모델에서 22~30% 값으로 비슷하게 나타났다. 최대 가속도 응답 감소율의 경우 수평 방향에서는 30~35% 값으로 모든 해석 모델에서 비슷하게 나타났다. 수직 방향에서는 2층 하부 구조물을 가지는 해석 모델을 제외한 구조물에서 21~26% 값으로 비슷하게 나타났지만 2층 하부 구조물을 가지는 해석 모델은 5%의 감소율로 다른 구조물보다 낮은 감소율이 나타난 것을 확인할 수 있었다.



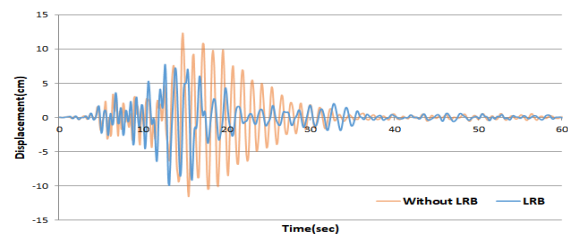
(a) Without substructure



(b) 1st floor substructure

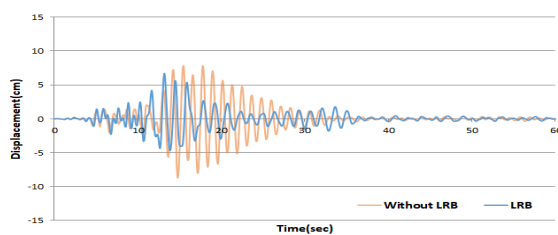


(c) 2nd floor substructure

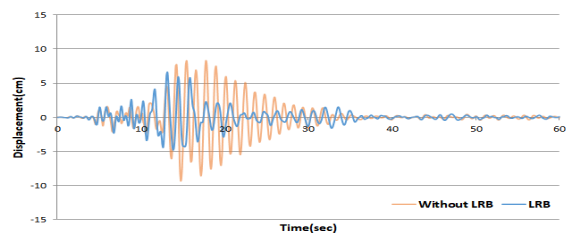


(d) 3rd floor substructure

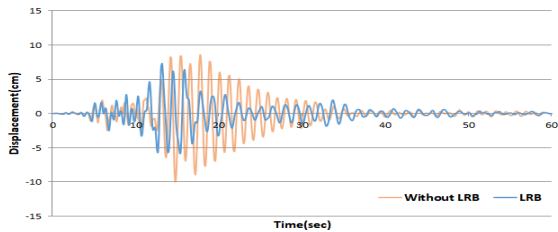
<Fig. 7> Displacement response of nodal point a(Dz) by Northridge earthquake



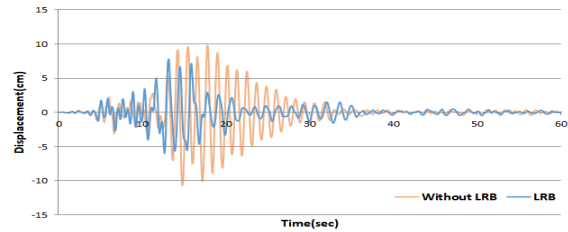
(a) Without substructure



(b) 1st floor substructure

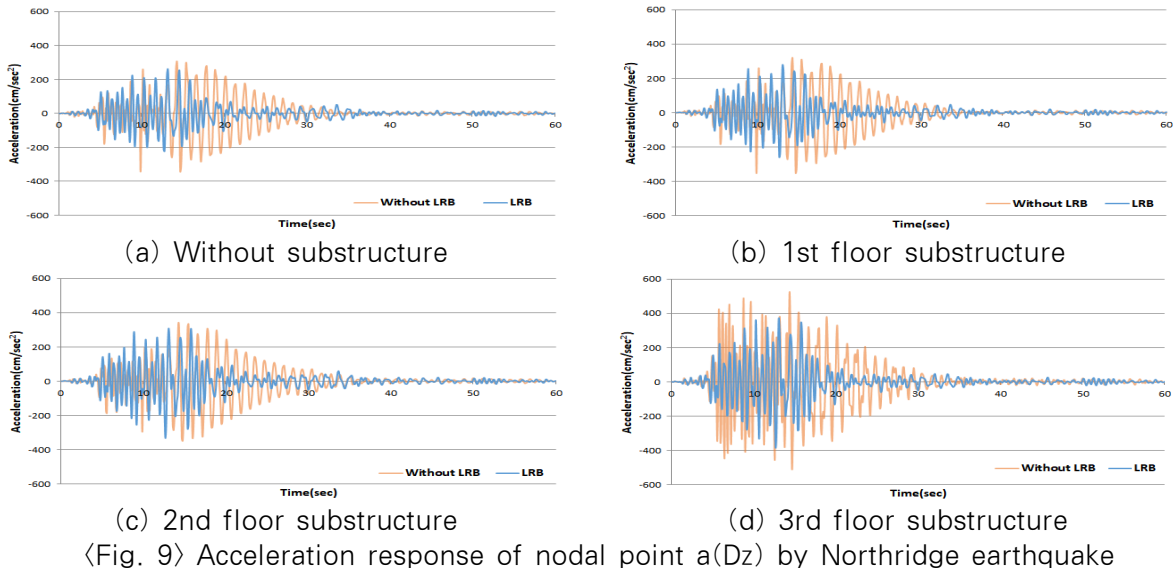


(c) 2nd floor substructure

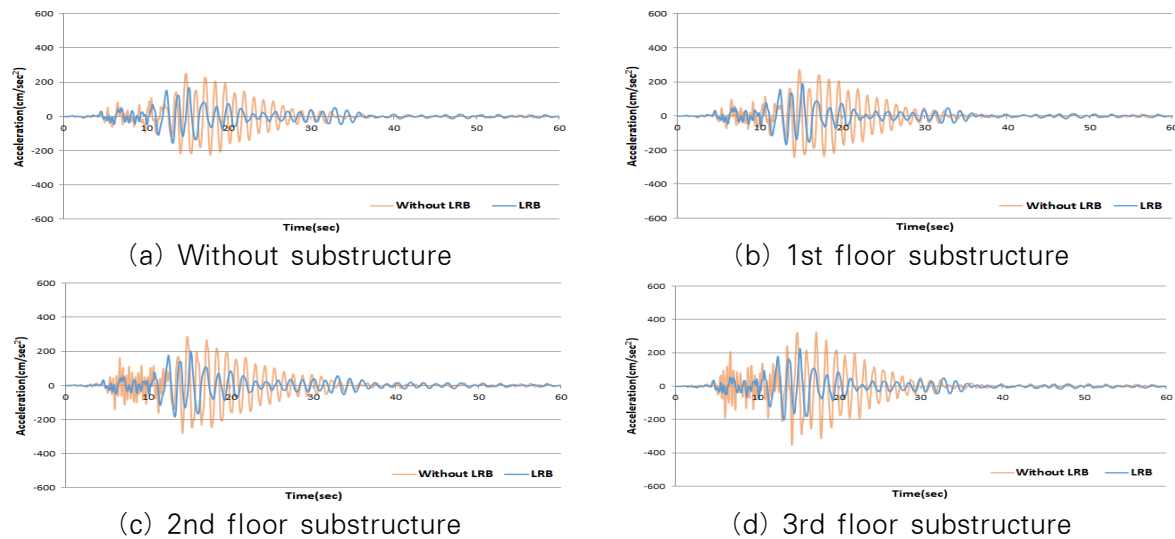


(d) 3rd floor substructure

<Fig. 8> Displacement response of nodal point a(Dx) by Northridge earthquake



(Fig. 9) Acceleration response of nodal point a(Dz) by Northridge earthquake



(Fig. 10) Acceleration response of nodal point a(Dx) by Northridge earthquake

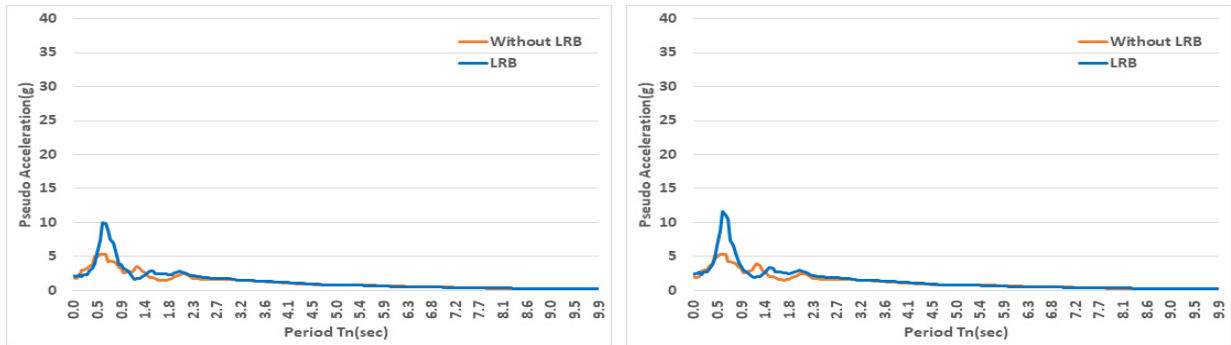
4. 해석 모델의 층 응답 스펙트럼

하부 구조물이 설치되지 않은 구조물은 지진파가 지반을 흔들어 상부 구조물에 직접적으로 영향을 미친다. 하지만 하부 구조물이 설치된 구조물의 경우 지진파가 상부 구조물에 영향을 미치기 위해서는 하부 구조물을 통과해야 하며, 지진파의 가속도가 증가 또는 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지진파가 하부 구조물을 지나면서 변화된 특성을 알아보기 위하여 하부 구조물이 설치된 구조물에서 하부 구조물과 상부 구조물 사이 절점의 가속도 응답을 추출하여 층 응답 스펙트럼(Floor response spectrum)을 작성하였다. 하부 구조물이 설치되지 않은 구조물에서는 입력 지진파

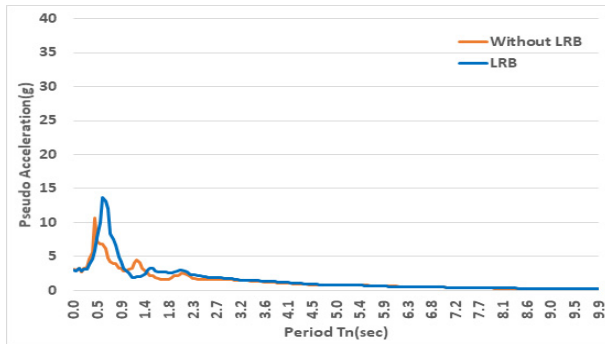
의 가속도 응답을 추출하여 응답 스펙트럼을 작성하였다.

<Fig. 11>과 <Fig. 12>는 하부 구조물에 El-centro 지진파와 Northridge 지진파를 가려하였을 때의 층 가속도 응답 스펙트럼을 나타낸다. LRB 설치 유무 및 지진파에 상관없이 하부 구조물의 높이가 높아질수록 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 3층 하부 구조물을 가지는 해석모델에서 다른 구조물보다 응답의 증가가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. LRB를 설치한 경우 해석 모델 중 3층 하부 구조물을 가지는 모델에서만 응답이 저감되며, 나머지 구조물에서는 오히려 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Without substructure

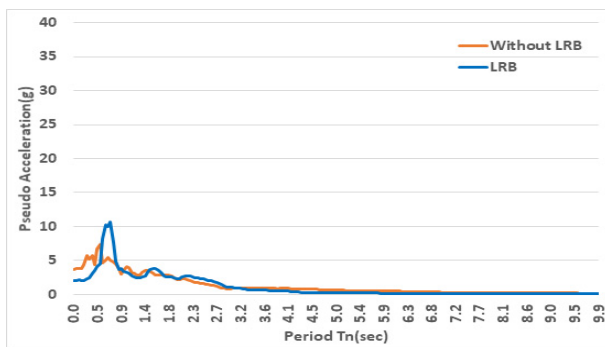
(b) 1st floor substructure



(c) 2nd floor substructure

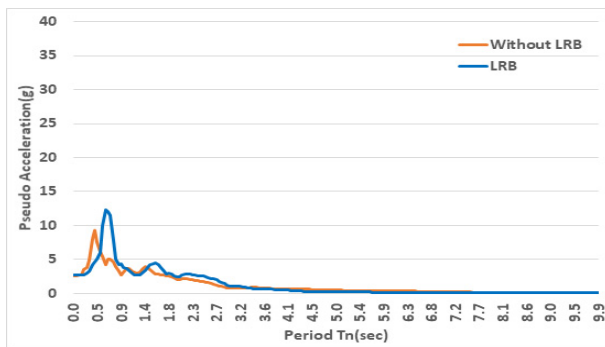
(d) 3rd floor substructure

〈Fig. 11〉 Acceleration response spectrum (El-centro earthquake)



(a) Without substructure

(b) 1st floor substructure



(c) 2nd floor substructure

(d) 3rd floor substructure

〈Fig. 12〉 Acceleration response spectrum (Northridge earthquake)

5. 결론

본 연구에서는 면진 장치인 LRB를 설치한 돔 구조물의 하부 구조 높이에 따른 비교 분석을 진행하기 위하여 해석 모델을 선정 후 시간 이력 해석을 수행하였다. 또한 층 응답 스펙트럼의 결과 값을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 상부 구조물과 하부 구조물 사이에 중간층 면진 장치를 설치하였을 때 지진과마다 차이는 있었지만 상부 구조물의 변위 및 가속도 응답 제어에 효과적이라는 것을 확인하였다. 돔 구조물에 적절한 중간층 면진 장치를 설계한다면 지진 응답을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 층 응답 스펙트럼을 확인한 결과, 지진과가 하부 구조물을 통과하면서 응답이 증폭될 수 있음을 확인하였으며, 증폭된 지진과로 인하여 상부 구조물의 응답이 증가할 수 있는 것으로 사료된다. 따라서 하부 구조물을 가지는 대공간 구조물에 중간층 면진장치를 설계할 때 하부 구조물의 층 응답 스펙트럼을 고려할 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(19AUDP-B100343-05)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kang, J. W., "Trend of Large spatial Structures Technology by Internal and External", Journal of the Korean Institute of Building Construction, Vol.16, No.4, pp.16~23, 2016
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, S. G., Kim, Y. S., Kim, G. C., & Kang, J. W., "The Seismic Response According to

Rise-Span Ratio of the Arch Structure With Seismic Isolation", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.18, No.1, pp.55~65, 2018

4. Lee, Y. R., Seok, K. Y., & Kang, J. W., "A Study on Dynamic Response Property of Latticed Domes According to Natural Frequency Ratio of Substructure", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.3, pp.59~66, 2016
5. Kim, G. C., & Ju, D. H., "The Seismic Behavior of the Spatial Structure with Seismic Isolation", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.6, pp.49~58, 2008
6. Lee, Y. R. (2016). A Study on Dynamic Response Characteristics according to Natural Frequency Ratio between Dome Structure and Substructure (Master's thesis). Yeungnam University, Republic of Korea.
7. Kim, G. C., Kim, K. I., & 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
8. 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 : August 22, 2019
- Revised : September 10, 2019
- Accepted : September 10, 2019