

래티스돔의 지진 하중 방향에 따른 지진 응답 분석

The Seismic Response Analysis of Lattice Dome According to Direction of Seismic Load

김 유 성*
Kim, Yu-Seong

강 주 원**
Kang, Joo-Won

김 기 철***
Kim, Gee-Cheol

Abstract

Vertical earthquake motions can occur along with horizontal earthquakes, so that Structure should be designed to resist Seismic loads in all directions. Especially, due to the dynamic characteristics such as the vibration mode, when the vertical seismic load, the dynamic response of the Spatial structure is large. In this study, the seismic response of the lattice dome to horizontal and vertical seismic loads is analyzed, and a reasonable seismic load combination is analyzed by combining horizontal and vertical seismic response results. In the combination of the horizontal seismic load, the largest result is obtained when the direction of the main axis of the structure coincides with the direction of seismic load. In addition, the combination of vertical seismic load and horizontal seismic load was the largest compared with the combination of horizontal seismic load. Therefore, it is considered that the most reasonable and stable design will be achieved if the seismic load in vertical direction is considered.

Keywords : Seismic design, Spatial structure, Earthquake orthogonal

1. 서론

지진동은 원래 3차원적이므로 수평 지진동과 함께 연직 지진동이 발생할 수 있다. 이에 따라 구조물에 지진이 가해질 때 지진의 방향성을 예측하기 어려우므로 모든 방향의 지진 하중에 대하여 저항할 수 있도록 내진 설계를 실시하여야 한다. 현행 건축 구조 기준상 일반 구조물의 경우 연직 지진동에 대한 지진 응답이 수평 지진동의 지진 응답에 비해 크지 않기 때문에 수평 지진동만을 고려한다. 이에 따라 수평 방향의 지진 하중은 직교하는 두 축에 대하여 각각 지진 해석을 수행한 후 100/30법, SRSS법에 따라 지진 응답을 조합한 결과를 내진 설계에 적용하고 있다¹⁾. 대공간 구조물은 진동 모드와 같은 동적 특성으로 인해 연직 방향의 지진 하중에

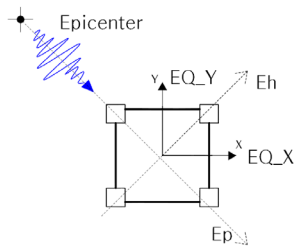
의한 동적 응답이 크게 나타나게 된다. 특히 대공간 구조물의 기본적인 동적 특성을 내재하고 있는 래티스돔은 반개각이 작을수록 수평 방향 진동 모드보다 연직 방향 진동 모드가 지배적이기 때문에 연직 방향의 동적 응답이 크게 나타난다²⁾. 이에 따라 일본의 경우 대공간 구조물의 내진 설계에 있어서 수평 방향과 연직 방향의 지진동을 모두 고려하여 지진 해석을 실시하고 있으며, 수평 방향 지진 응답과 연직 방향 지진 응답을 조합하여 가장 불리한 지진 응답 결과를 내진 설계에 적용하고 있다^{3/4)}. 이에 본 연구에서는 대공간 구조물의 합리적인 내진 설계를 위하여 래티스돔 구조물에 수평 방향 및 연직 방향 지진 하중을 적용하여 지진 응답을 분석하고, 수평 방향과 연직 방향 지진 응답 결과를 조합한 지진 응답의 분석을 통하여 합리적인 지진 하중 적용에 대하여 제안하고자 한다.

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정
Department of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
*** 교신저자, 정회원, 서울대학교 건축과 교수
School of Architecture, Seoul University
Tel: 02-490-7582 Fax: 02-490-7427
E-mail: beat67@seoil.ac.kr

2. 지진 하중의 직교성

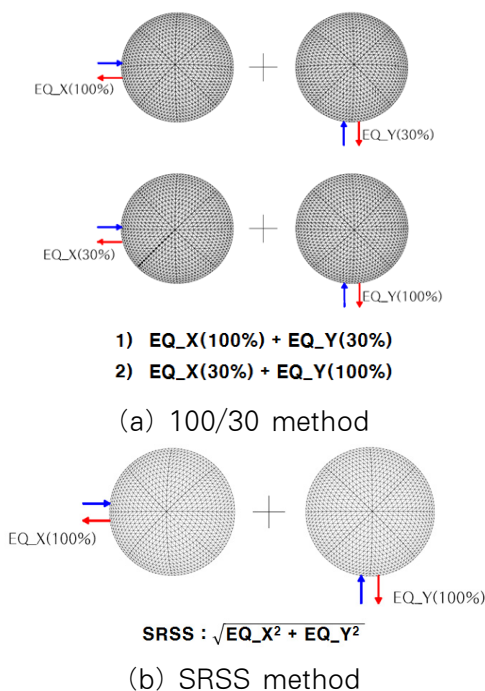
지진파가 구조물에 작용할 경우 지진의 방향은 <Fig. 1>과 같이 지진파가 발생한 진앙과 구조물이

이루는 축 (Ep)와 이에 직각인 축 (Eh)를 설정할 수 있다. 이때 구조물의 기준이 되는 축을 X축, Y축이라고 하고 기준축에 대한 지진파를 EQ_X, EQ_Y로 하면 지진의 직각 방향으로도 지반 운동이 작용하게 되는데 이를 지진의 직교성이라고 한다.



〈Fig. 1〉 Earthquake orthogonal

지진의 직교성과 관련하여 Newmark & Rosenblueth (1971)는 지진 방향과 직각 방향 지진의 크기를 Housner의 속도 스펙트럼법에 따라 정량화 한 후 지진 방향의 크기(S1)와 직교하는 직각 방향의 지진 크기(S2)의 비를 통계적으로 구한 결과, S2/S1의 값은 0.9~0.95였으며 직각 방향으로도 지진 방향에 상응하는 크기의 지진력이 가해짐을 알 수 있다^{5),6)}.



〈Fig. 2〉 Combination of earthquake orthogonal

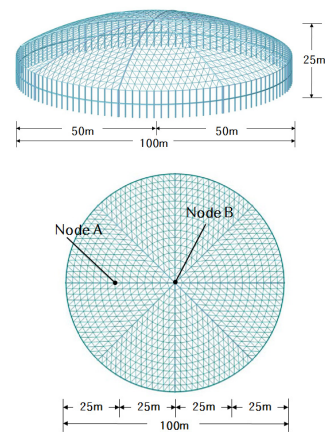
〈Fig. 2〉와 같이 현행 건축 구조 기준상 수평 방향의 지진 하중 조합은 100/30법과 SRSS법을 사용

한다. 100/30법은 한 방향의 지진력에 대한 하중 효과(100%)와 그 축에 직교한 방향으로 지진력이 작용했을 때 하중 효과(30%)를 더한 값으로 결정하며, 총 8개의 하중 조합 중 가장 불리한 방향으로 조합하여 사용한다. SRSS법은 직교하는 두 축의 지진 하중을 제곱합 제곱근 방법으로 사용하며, 2개의 하중 조합으로 가능하다.

3. 예제 구조물 선정

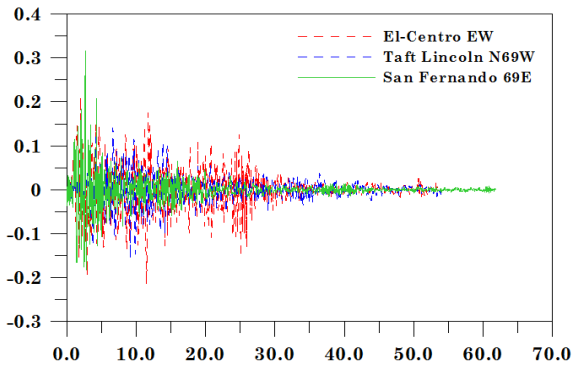
3.1 예제 구조물

본 연구의 예제 구조물은 〈Fig. 3〉과 같이 대공간 구조물의 기본적인 동적 특성을 내재하고 있는 래티스돔을 선정하였으며, 경간은 100m, 높이는 하부 구조 포함 25m로 설정했다. 지붕 부재의 자오선 방향 지지 부재와 브레이스는 각각 원형 강관 $\varnothing 500.0 \times 14$, $\varnothing 139.8 \times 6$ 을 사용하였고 하부 구조의 경우 콘크리트 재료 강도 24MPa로 모델링 하였다.

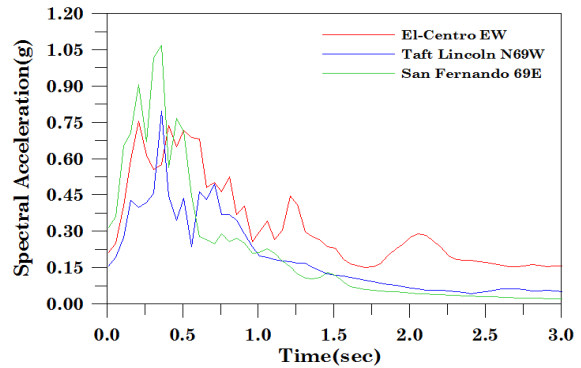


〈Fig. 3〉 Example structure

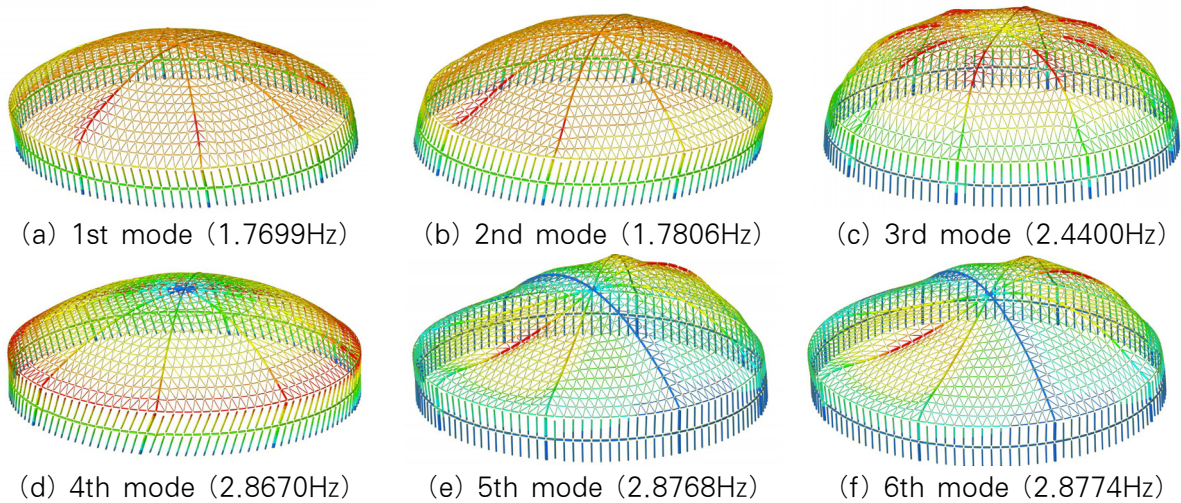
본 예제 구조물의 해석 프로그램으로 MIDAS/Gen ver. 870을 사용하였으며 적용된 지진 하중은 〈Fig. 4〉와 같이 El-Centro EW(1940), Taft Lincoln school N69W(1952), San Fernando 69E(1971)로 3개의 지진 하중을 이용하여 시간 이력 해석을 수행하였다. KBC2016에 고시된 바와 같이 시간 이력 해석 결과는 입력되는 지진의 특성에 매우 민감하기 때문에 최소한 3개 이상의 지진 기록을 사용하게 되어있으며 기준에 따라 3개의 지반 운동에 대해 최대 응답을 사용하여 지진 응답 해석을 실시하였다.



<Fig. 4> Acceleration time history



<Fig. 5> Acceleration spectrum

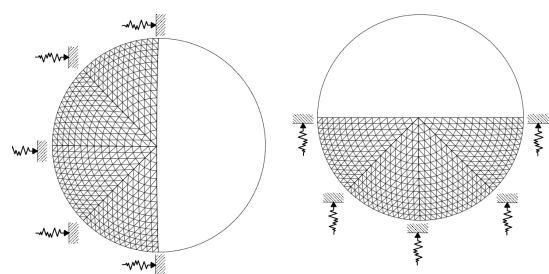


<Fig. 6> Natural vibration mode and frequency

3.2 예제 구조물 동적 특성

본 예제 구조물에 대하여 고유치 해석 결과, 진동 모드 양상은 <Fig. 6>과 같이 대칭 모드와 비대칭 모드가 나타나는 일반적인 래티스돔 구조물의 동적 특성을 보이고 있다. 예제 구조물의 진동 모드별 주기는 고유 주기가 1.0초 이하의 지진 하중에 대한 가속도 스펙트럼에서 응답이 크게 나타나는 탁월 주기 영역으로 분포하기 때문에 지진 하중에 대한 진동 응답은 매우 크게 나타날 것으로 예상된다. 또한 진동 모드의 동적 응답 특성에 의해 수평 방향 지진에 대해 수직 응답이 발생하며 이에 따라 연직 방향의 지진 하중을 가할 경우 연직 방향의 동적 응답은 크게 나타날 것으로 예상된다.

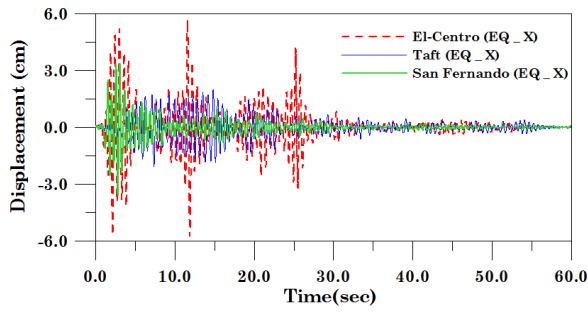
4.1 수평 방향 지진 하중 적용시 지진 응답



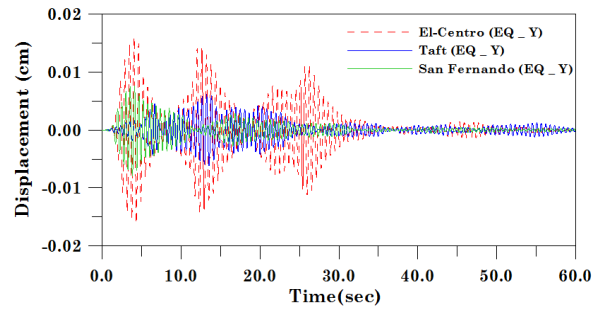
(a) Earthquake (EQ_X) (b) Earthquake (EQ_Y)
<Fig. 7> Seismic load direction

본 예제 구조물의 지진 하중은 직교성을 고려하여 <Fig. 7>와 같이 EQ_X 및 EQ_Y 방향으로 가하였다. 예제 구조물은 대칭성을 가진 래티스돔이므로 구조물의 주축은 지진의 가력 방향 EQ_X(0°)이며 그에 따라 직교하는 주축은 가력 방향 EQ_Y(90°)로 설정하였다.

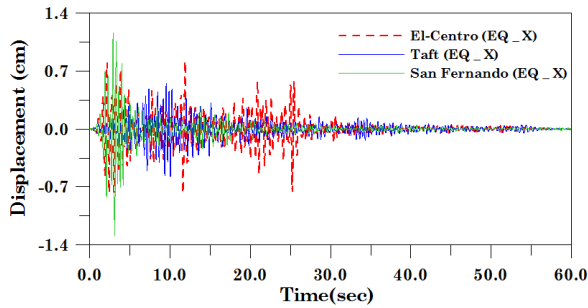
4. 수평 및 연직 방향 지진 하중 적용시 지진 응답



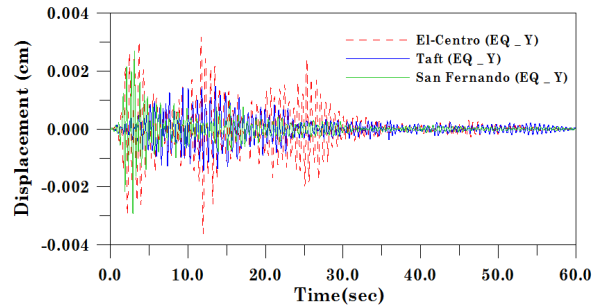
(a) Horizontal displacement responses at Node A



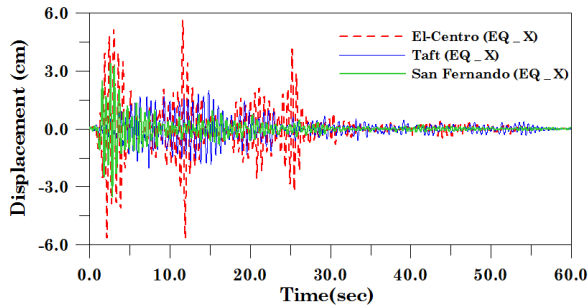
(a) Horizontal displacement responses at Node A



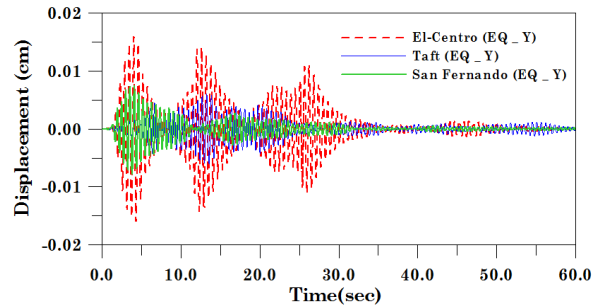
(b) Vertical displacement responses at Node A



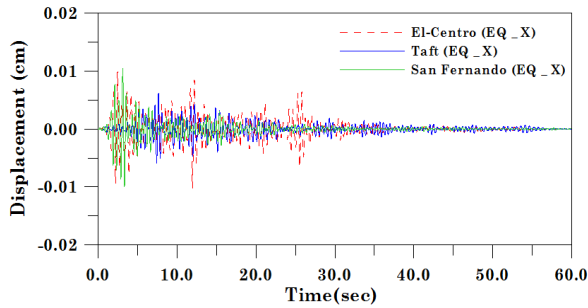
(b) Vertical displacement responses at Node A



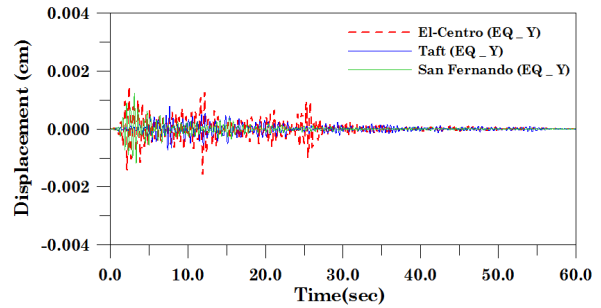
(c) Horizontal displacement responses at Node B



(c) Horizontal displacement responses at Node B



(d) Vertical displacement responses at Node B
 <Fig. 8> Displacement responses (EQ_X)



(e) Vertical displacement responses at Node B
 <Fig. 9> Displacement responses (EQ_Y)

<Table 1> Maximum displacement response

	Node A		Node B			
	Horizontal (cm)	Vertical (cm)	Horizontal (cm)	Vertical (cm)		
EQ_X	El-Centro	5.718	0.872	El-Centro	5.629	0.012
	Taft	2.083	0.574	Taft	2.032	0.005
	San Fernando	3.612	1.156	San Fernando	3.378	0.011
EQ_Y	El-Centro	0.016	0.004	El-Centro	0.016	0.001
	Taft	0.006	0.001	Taft	0.006	0.001
	San Fernando	0.008	0.003	San Fernando	0.008	0.001

<Fig. 8>, <Fig. 9>는 수평 방향 지진 하중을 가할 때 지진 하중의 종류에 따라 경간 1/4에서의 절점 A와 경간 중앙부에서의 절점 B의 수평 및 연직 방향의 변위 응답 그래프이다. <Table 1>에 절점 A와 절점 B의 수평 및 연직 방향 변위 응답의 최대값을 나타내었다. 절점 A에서 EQ_X 방향의 지진 하중을 가할 때 3개의 지진 하중에 대해 수평 방향의 최대 변위 응답은 5.718cm, 2.083cm, 3.612cm으로 크게 나타났고, 연직 방향의 최대 변위 응답은 0.872cm, 0.574cm, 1.156cm로 EQ_Y 방향의 변위 응답에 비해 크게 나타났다. 이는 본 예제 구조물의 주축 방향이 EQ_X의 지진 하중 가력 방향과 일치하여 수평 및 연직 방향의 변위 응답이 크게 나타난 것으로 판단된다.

<Table 2> Combination of horizontal and vertical displacement (Node A)

Horizontal	El-Centro	Taft	San Fernando
EQ_X(100%) + EQ_Y(30%)	5.723	2.085	3.614
EQ_X(30%) + EQ_Y(100%)	1.732	0.631	1.092
SRSS (EQ_X,EQ_Y)	5.718	2.010	3.612
Vertical	El-Centro	Taft	San Fernando
EQ_X(100%) + EQ_Y(30%)	0.873	0.575	1.157
EQ_X(30%) + EQ_Y(100%)	0.265	0.174	0.350
SRSS (EQ_X,EQ_Y)	0.872	0.574	1.156

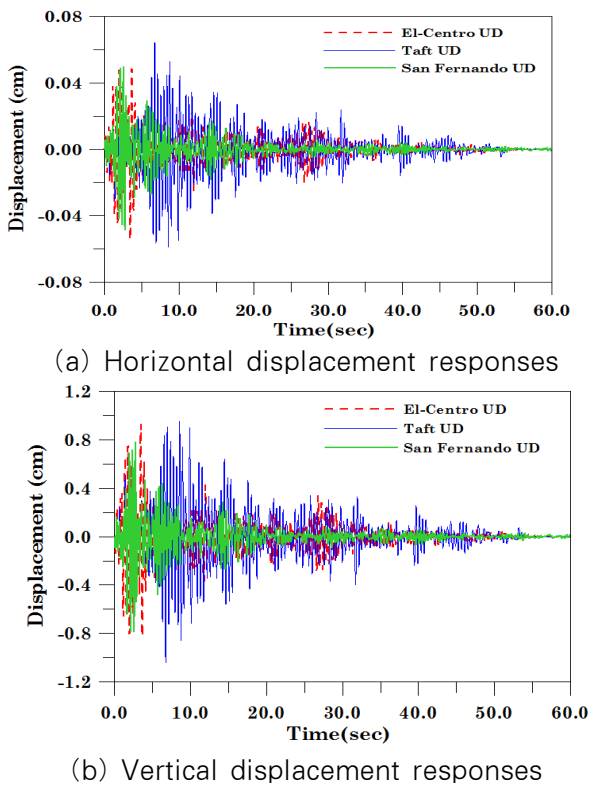
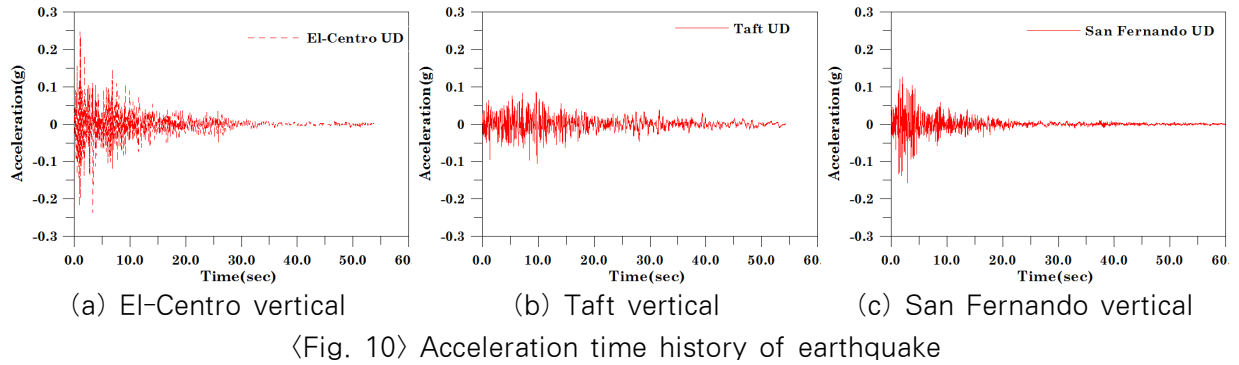
<Table 2>는 지진 하중별로 100/30법, SRSS법을 사용하여 조합한 변위 응답 결과를 나타내었다. 수평 방향 변위 및 연직 방향 변위는 El-Centro EW, Taft Lincoln school N69W, San Fernando 69E 지진 하중 모두 EQ_X(100%)와 EQ_Y(30%) 조합법, SRSS 조합법이 EQ_X(30%)와 EQ_Y(100%) 조합법에 비해 수평 방향 3.31배, 연직 방향 3.30배 큰 것을 볼 수 있다. 이는 구조물의 주축이 EQ_X(0°) 방향과 일치함에 따라 EQ_X(0°) 방향의 지진 하중이 수평 방향의 하중 효과에 지배적이기 때문이다. 또

한 EQ_X와 EQ_Y를 SRSS 조합한 결과값도 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

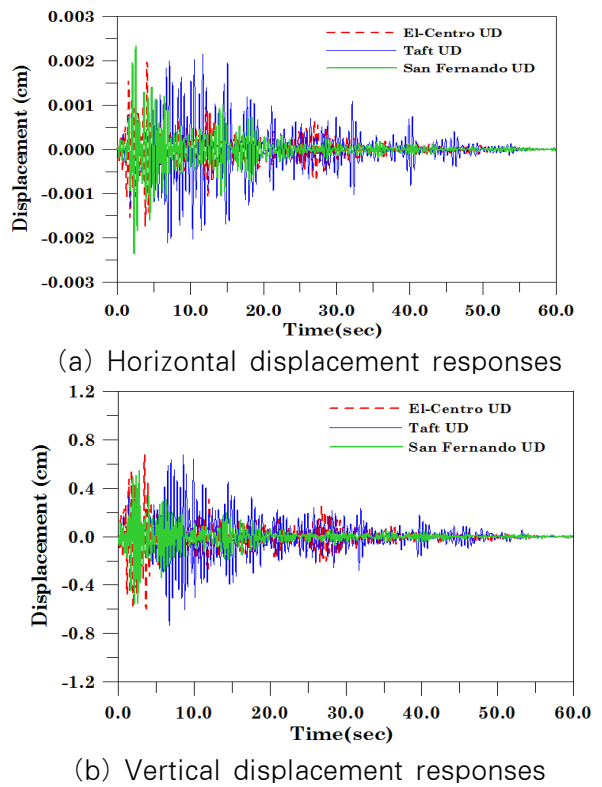
4.2 연직 방향 지진 하중 적용시 지진 응답

현행 건축 구조 기준상 일반 구조물의 내진 설계시 수평 방향만을 고려하며, 일반 라멘 구조물은 연직 방향 지진 하중의 응답이 미비하여 고려하지 않고 있다. 그러나 대공간 구조물의 경우 진동 모드의 동적 특성으로 인해 연직 방향 지진 하중에 의한 영향을 고려하여야 한다. 연직 방향 지진 하중의 내진 설계 기준은 미국과 유럽 등 여러 나라에서 지진 하중의 연직 방향 성분의 특성을 고려하여 제시하고 있다. 유럽의 경우 EC8에서 지반의 조건 및 지진 강도에 따라 연직 방향 지반 운동의 설계 스펙트럼을 유형별로 분류하여 적용하도록 제안하고 있다⁷⁾. 일본의 대공간 구조물 내진 설계의 경우 지진 응답 해석을 할 때 수평 방향의 지진 하중과 연직 방향의 지진 하중 영향을 평가하고 있으며, 연직 지진동의 적용은 실제 관측된 지진파 혹은 수평 지진동 가속도에 50% 스케일 다운한 연직 지진동을 채용하여 지진 응답 해석을 실시하고 있다³⁾. 수평 지진동 가속도에 50% 스케일 다운하는 경우는 역사 지진파 중 관측된 연직 지진파가 없거나 인공 지진파를 적용할 때 연직 방향의 지진파는 수평 인공 지진파의 50% 가산하여 지진 응답 해석을 실시한다. 이에 따라 지진 하중의 조합은 EQ_X(100%)와 EQ_Vertical 조합법, EQ_X(100%)와 EQ_Z(50% EQ_X) 조합법을 적용한다.

이에 본 연구에서는 예제 구조물인 래티스돔에 연직 지진 하중으로 관측 지진파인 El-Centro UD(1940), Taft Lincoln school UD(1952), San Fernando UD(1971) 지진 하중을 연직 방향으로 재하를 하여 시간 이력 해석을 실시하였으며, <Fig. 10>은 연직 방향 지진 하중의 가속도 시간 이력 그래프를 나타내었다. 또한 수평 지진동인 El-Centro EW (1940), Taft Lincoln school N69W(1952), San Fernando 69E(1971)를 50% 스케일 다운하여 연직 방향 지진 하중으로 가진하였으며 이에 대한 지진 응답을 관측된 연직 지진동의 지진 응답과 비교 분석하였다.



〈Fig. 11〉 Displacement responses at Node A (EQ_Vertical)

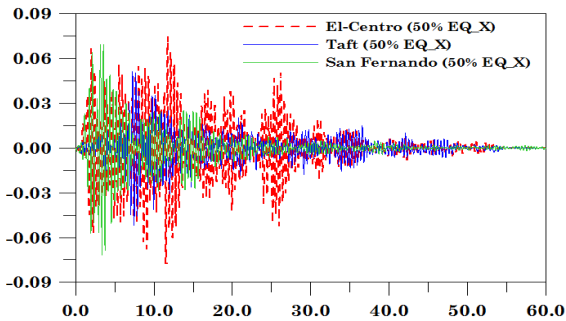


〈Fig. 12〉 Displacement responses at Node B (EQ_Vertical)

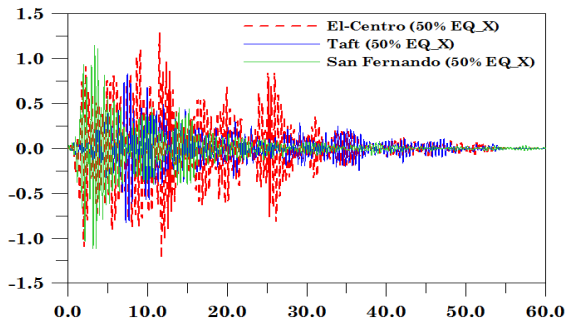
〈Table 3〉 Maximum displacement response

Node A	Horizontal (cm)	Vertical (cm)	Node B	Horizontal (cm)	Vertical (cm)
El-Centro UD	0.055	0.917	El-Centro UD	0.002	0.648
El-Centro 50%	0.075	1.287	El-Centro 50%	0.004	0.907
Taft UD	0.064	1.043	Taft UD	0.002	0.734
Taft 50%	0.051	0.828	Taft 50%	0.002	0.583
San Fer UD	0.050	0.789	San Fer UD	0.002	0.556
San Fer 50%	0.072	1.145	San Fer 50%	0.003	0.806

<Fig. 11>, <Fig. 12>는 절점 A와 절점 B에 대해 각 연직 방향의 지진 하중에 대한 변위 응답값을 나타내었다. 이에 따라 <Table 3>은 연직 방향의 지진 하중에 대한 수평 및 연직 방향 최대 변위값을 나타내었다. 경간의 1/4점인 절점 A에서 연직 방향의 지진 하중 El-Centro UD, Taft UD, San Fernando UD에 대한 연직 방향의 최대 변위값은 0.971cm, 1.043cm, 0.789cm로 수평 방향 지진 하중 적용시 최대 변위값에 비해 크게 나타났다.



(a) Horizontal displacement responses at Node A



(b) Vertical displacement responses at Node A

<Fig. 13> Displacement responses (50% EQ_X)

<Fig. 13>은 수평 방향 지진 하중 El-Centro EW, Taft Lincoln school N69W, San Fernando 69E를 50% 스케일 다운한 지진 하중을 연직 방향으로 적용하여 나타낸 절점 A의 수평 및 연직 방향 변위 응답 그래프이다. 수평 방향 최대 변위 응답은 각각 0.075cm, 0.051cm, 0.072cm이며 연직 방향 최대 변위 응답값은 1.287cm, 0.828cm, 1.145cm로 관측 지진동인 Elcentro Vertical UD, Taft Vertical UD, San Fernando Vertical UD의 변위 응답값과 비교하여 유사한 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 지진 응답 해석을 할 때 실제 연직 방향의 관측 지진동이 없는 경우 혹은 지반에 따른 모의 지진파를 적용할 경우 수평 방향의 지진동에 50% 정도로 스케일 다

운하여 연직 방향 지진 하중으로 가진하여도 지진 응답이 유사하게 나타날 것으로 판단된다.

<Table 4> Combination of horizontal and vertical displacement (Node A)

Horizontal	El-Centro	Taft	San Fer
EQ_X(100%) + EQ_Y(30%)	5.723	2.085	3.614
EQ_X(100%) + EQ_Vertical	5.773	2.147	3.662
EQ_X(100%) + EQ_Z(50%)	5.793	2.134	3.684
SRSS (EQ_X,EQ_Z)	5.718	2.084	3.612
Vertical	El-Centro	Taft	San Fer
EQ_X(100%) + EQ_Y(30%)	0.873	0.575	1.157
EQ_X(100%) + EQ_Vertical	1.789	1.617	1.945
EQ_X(100%) + EQ_Z(50%)	2.159	1.402	2.301
SRSS (EQ_X,EQ_Z)	1.265	1.191	1.400

이에 따라 수평 방향의 지진 하중 조합에서 최대 값을 가진 절점 A에서 EQ_X(100%)와 EQ_Y(30%)를 조합한 경우와 연직 방향의 지진 하중 조합을 추가하여 <Table 4>와 같이 비교하였다. 연직 방향 지진 하중의 조합법은 일본의 내진 설계 기준에 따라 EQ_X(100%)와 EQ_Vertical(100%)을 조합하는 방법, EQ_X(100%)와 EQ_Z(50% EQ_X)를 조합하는 방법을 사용하였다. 3개의 지진 하중 모두 수평 방향 지진 하중 EQ_X와 연직 방향 지진 하중 EQ_Vertical을 조합하였을 때 수평 방향과 연직 방향 응답값에서 가장 큰 결과를 나타내었다. 또한 수평 방향의 지진 하중 El-Centro EW, Taft N69W, San Fernando 69E에 50% 가속도 비율을 적용하여 EQ_X(100%)와 EQ_Z(50% EQ_X)를 조합하는 방법과 EQ_X(100%)와 EQ_Vertical을 조합하는 방법을 비교한 결과, 응답값의 차이는 미소하였다.

따라서 대공간 구조물의 내진 설계시 지진 응답 분석에 있어서 수평 방향 지진 하중의 조합에 의한 지진 응답보다 수평 및 연직 방향 지진 하중의 조합에 의한 지진 응답이 가장 불리한 결과를 나타내고 있으므로 수평 및 연직 방향의 지진 하중을 고려할

때 합리적이고 안정적인 설계가 이루어 질 것으로 판단된다.

또한 수평 방향 지진 하중의 50% 스케일 다운하여 연직 방향으로 가진한 경우의 지진 응답이 관측된 역사 지진과의 연직 방향 지진 하중의 지진 응답과 거의 차이가 없으므로 내진 설계에 있어서 수평 방향의 50%에 해당하는 비율을 연직 방향 지진 하중으로 적용하여도 타당할 것으로 사료된다.

5. 결론

지진동은 수평 지진동과 함께 연직 지진동을 수반할 수 있으며 구조물의 내진 설계에 있어서 모든 방향의 지진동에 저항 가능하도록 설계하여야 한다. 특히 대공간 구조물의 경우 진동 모드의 동적 특성으로 인해 연직 방향 지진 하중의 영향이 크므로 합리적인 내진 설계를 위해 지진 응답 조합에 있어서 연직 방향 지진 하중의 조합을 고려하여야 한다.

1) 수평 방향 지진 하중 조합의 결과, El-Centro EW, Taft N69W, San Fernando 69E 3가지 지진 하중 모두 EQ_X 방향(100%)과 EQ_Y 방향(30%)을 조합하는 방법과 SRSS 조합법이 가장 큰 결과를 나타내었으며, 이는 본 예제 구조물이 대칭성을 가진 래티스돔으로 주축이 EQ_X(0°) 방향과 일치하여 변위 응답이 크게 나온 것으로 판단된다.

2) 연직 방향 지진 하중 적용에 있어서 연직 방향의 관측 지진동인 Elcentro UD, Taft UD, San Fernando UD의 지진 응답과 수평 방향 지진동인 El-Centro EW, Taft N69W, San Fernando 69E의 50% 스케일 다운하여 적용한 지진 응답과 거의 차이가 없는 것으로 보아 지진 응답 해석을 할 때 실제 관측된 연직 지진동이 없는 경우 혹은 지반에 따른 모의 지진과를 적용할 경우 수평 방향의 지진동에 50% 스케일 다운하여 연직 방향으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 연직 방향 지진 하중 조합과 수평 방향 지진 하중 조합의 결과를 비교하였을 때 수평 방향 지진 하중 EQ_X와 연직 방향 지진 하중 EQ_Vertical 조합법이 수평 및 연직 방향 변위 응답에서 가장 큰 결과를 나타내었다. 이에 따라 돔 구조물의 내진 설

계시 진동 모드 특성에 의해 연직 방향 지진 하중을 고려하여 설계한다면 가장 합리적이고 안정적인 설계가 이루어 질 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(18AUDP-B100343-04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Korea Building Code, 2016
2. Han, S. E., & Bae, S. D., "The Characteristics of Dynamic Behaviors for the Single-Layer Latticed Domes Under Earthquake Load", Journal of KSNVE, Vol.11, No.3, pp389~394, 2001
3. Japan Architectural Institute Committee, "Spatial Structures Seismic Design and Realization in Japan", Architectural Institute of Japan, pp.45~371, 2001
4. Japan Architectural Institute Committee, "Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structure", Architectural Institute of Japan, pp.114~125, 2006
5. Lee, H. S., Ko, D. W., & Jeong, S. W., "Directional and Orthogonal Effects of Seismic Loads on Design Member Forces", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.9, No.3, pp.51~58, 2005
6. Newmark, N. M., & Rosenblueth, E., "Fundamentals of Earthquake Engineering", Prentice-Hall, pp.1~640, 1971.
7. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 2004

- Received : August 10, 2018
- Revised : August 28, 2018
- Accepted : August 29, 2018