

지진하중을 받는 단층 래티스 돔의 동적 거동 특성

한 상 을* · 배 상 달**

(*인하대학교 건축공학과, **(주) PLUS 구조기술사무소)

1. 머리말

최근 우리나라에서는 인천국제공항 여객터미널 및 행거, 2002 Korea/Japan Worldcup Game, 아시아-유럽 정상회의(ASEM)등과 같은 대규모 국가적 행사로 인해 대공간 구조물에 대한 관심이 높아짐에 따라 이들 시스템의 구조적 거동 특성에 관한 체계적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 따라서, 이런 대공간 구조물 중 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 단층 래티스 돔의 지진하중에 따른 동적 거동과 지진격리 장치를 이용한 면진설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

단층 래티스 돔은 구조물의 규모와 기하학적 형상에 따라 다양한 거동 특성을 가지며, 높이-스팬비에 따라 수평하중 뿐만 아니라 수직하중에 대해서도 크게 영향을 받기 때문에, 고층건물과 같은 구조물과는 달리 동적 거동 특성을 파악하는데 많은 어려움이 있다. 동적 해석을 통한 구조물의 내진설계를 함에 있어서는 단지 구조물을 튼튼히 설계하여 지진에 대비할 수도 있지만, 지진파에는 단주기 성분보다 장주기 성분이 상대적으로 에너지를 적게 내포하고 있다는 사실이 발견된 후에, 구조물의 고유주기를 길게 하는 면진설계도 최근 많이 활용되고 있다.

이 논문에서는 단층 래티스 돔을 대상으로 고유값 해석을 통해 고유진동수와 고유진동모드를 파악하고, 지진하중 작용시 단층 래티스 돔이 갖는 동적 거동 특성을 규명하며, 지진격리 장치인 적층고무받침이 설치된 경우 단층 래티스 돔의 가속도 응답과 변위 및 주기를 비교, 분석하여 응답 저감효과를 규명하고자 한다.

* E-mail : hsang@inha.ac.kr

2. 수치해석 알고리즘

이 논문에서는 동적 해석과정에 있어서 자유도를 줄이는 효과적인 방법으로 구조물의 자유진동 모드벡터들을 이용한 모드 중첩법을 사용한다. 모드 중첩법에 의한 해석과정을 간단히 설명하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P\} - [M]\{1\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기에서, $\ddot{u}_g(t)$ 는 지반가속도, $\{1\}$ 은 지진이 가해지는 방향의 자유도에 대해서는 1, 그 이외에는 0인 상수벡터이다. 변위함수 $\{u(t)\}$ 는 일반 모드좌표계에 의해서 다음과 같이 가정한다.

$$\{u(t)\} = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i = [\Phi]\{q(t)\} \quad (2)$$

여기에서, $[\Phi]$ 는 자유진동 모드벡터로 구성된 상수, $\{q(t)\}$ 는 일반 모드좌표계로서 미지의 함수이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입해 정리하면, 자유진동모드의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성 때문에 아래와 같이 모드좌표계에 대해 독립적인 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \mu_i \omega_i^2 q_i(t) = -L_i \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

여기에서, $\mu_i = \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i$, $2\mu_i \xi_i \omega_i = \{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_i$, $\mu_i \omega_i^2 = \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i$, $L_i = -\{\phi\}_i^T [M] \{1\}$ 로서, $\{\phi\}_i$ 는 i 번째 자유진동모드이고, μ_i , $2\mu_i \xi_i \omega_i$ 와 $\mu_i \omega_i^2$ 은 i 번째 모드에 대한 일반화 질량계수, 일반화 감쇠계수, 일반화 강성계수라 하며, L_i 는 모드 참여계수이다. 식 (3)으로부터 i 번째 모드에 대한 응답 $sq_i(t)$ 를

$i=1, 2, 3, \dots, l$ 번째 모드까지 증첩해서 전체응답을 구한 후, 식 (2)를 통해서 구조물의 변위벡터를 구할 수 있다. 시간이력해석은 Newmark- β 법의 선형가속도법($\gamma=1/2, \beta=1/6$)을 사용한다. 강접합된 래티스 돔의 경우 증분시간 Δt 의 값이 일정값 이상이 되면 수치해석과정 중 발산하는 경우가 자주 발생하므로, 0.002초 이하의 시간을 도입한다. 질량은 정합질량과 집중질량을 이용하고, 감쇠는 레일리(Rayleigh) 감쇠 행렬을 이용한다.

3. 수치해석 결과

3.1 고유값 해석에 의한 단층 래티스 돔의 응답

해석모델은 그림 1과 같이 부재배치와 절점수, 부재수에 따라 절점이 61개, 부재가 165개인 단층 네트

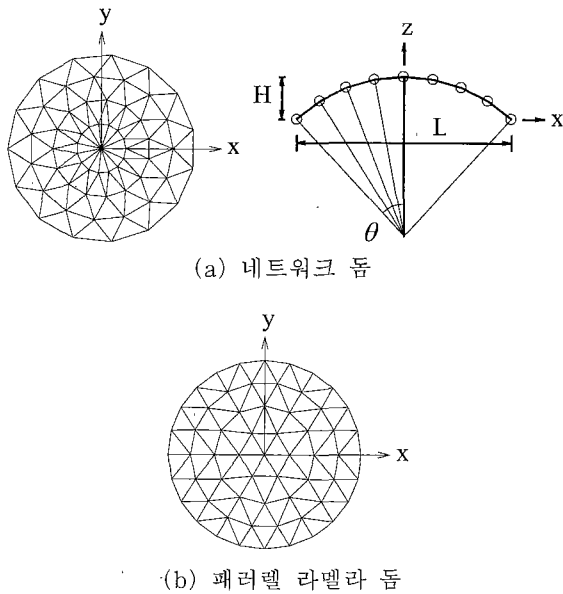


그림 1 해석모델(I)

표 1 해석모델(I)의 제원

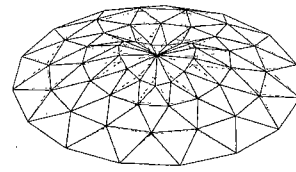
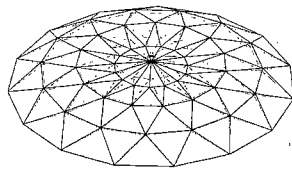
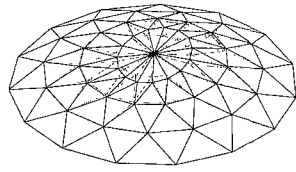
| Half open angle (θ) | Rise (H, cm) | Span (L, cm) | Rise/span ratio (H/L) |
|------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| 30° | 264.95 | 2000.0 | 0.13 |
| 45° | 414.21 | 2000.0 | 0.20 |
| 60° | 577.35 | 2000.0 | 0.28 |
| 90° | 1000.0 | 2000.0 | 0.50 |

워크 돔(single layer network dome)과 절점이 61개, 부재가 156개인 단층 패러렐 라멜라 돔(single layer parallel lamella dome)을 대상으로 하고, 지점조건은 고정단, 절점조건은 강접합으로 가정하여 해석을 수행한다. 해석모델(I)의 스패는 20m로 동일하며, 각 부재 길이는 약 3m 정도로 한다. 부재의 탄성계수는 $2,100 t/cm^2$, 항복응력 $\sigma_y=2.4 t/cm^2$, 단면적은 $12.18 cm^2$ ($\phi-114.3 \times 3.5$)로 가정한다.

질량은 적재하중을 고려해서 각 절점에 집중질량으로 $1.02 kg \cdot sce^2/cm$ 을 적용시키고, 부재 자체에 대해서는 정합질량을 적용한다. 표 1은 해석모델의 제원을 나타낸다. 해석모델(I)-(a)와 (b)의 고유값 해석을 수행하여 각 모델에 대한 고유진동수, 고유주기 및 고유진동모드를 구한다. 각 해석모델에서 반개각이 30°, 90°인 돔은 수직 또는 수평방향으로의 진동성분이 다른 돔에 비하여 큼을 알 수 있다. 반개각이 30°, 45°인 돔에서는 진동모드가 수직방향의 형태로 나타나고, 반면에 반개각이 60°, 90°인 돔에서는 진동모드가 수평방향의 형태를 나타내고 있으며, 반개각이 90°인 돔은 진동모드가 수직, 수평 모두의 형태를 나타내고 있다. 그림 2는 고유진동모드, 표 2는 고유진동수와 고유주기를 나타낸다. 여기에서는 지진파를 입력하여 단층 래티스 돔의 지진응답 거동에 대한 수치해석을 수행한다. 수치해석을 위한

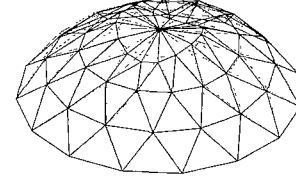
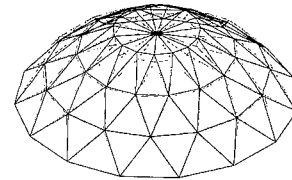
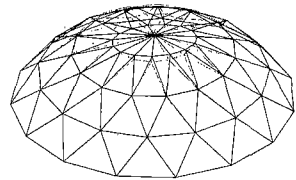
표 2 고유진동수와 고유주기

| | | 네트워크 돔 | | | | 패러렐 라멜라 돔 | | | |
|-----|------------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| | | 30° | 45° | 60° | 90° | 30° | 45° | 60° | 90° |
| 1st | ω_1 | 28.1606 | 36.8243 | 43.3324 | 42.7259 | 40.7223 | 54.6917 | 61.1072 | 52.6618 |
| | T_1 | 0.2231 | 0.1706 | 0.1450 | 0.1470 | 0.1542 | 0.1150 | 0.1028 | 0.1193 |
| 3rd | ω_3 | 33.6968 | 44.9663 | 53.5730 | 59.1932 | 42.1703 | 58.1836 | 70.6416 | 80.1758 |
| | T_3 | 0.1864 | 0.1397 | 0.1172 | 0.1061 | 0.1489 | 0.1079 | 0.0889 | 0.0783 |
| 5th | ω_5 | 40.1170 | 48.8635 | 55.9650 | 62.4957 | 44.6149 | 59.6790 | 71.9670 | 83.0172 |
| | T_5 | 0.1566 | 0.1285 | 0.1122 | 0.1005 | 0.1408 | 0.1052 | 0.0873 | 0.0756 |



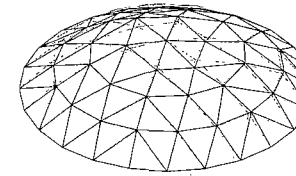
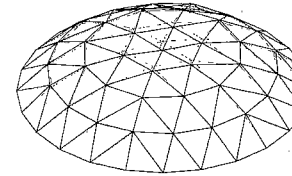
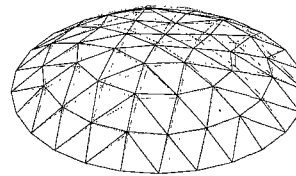
1st mode ($T_1 = 0.2231$ sec) 3rd mode ($T_3 = 0.1864$ sec) 5th mode ($T_5 = 0.1566$ sec)

(a) 네트워크 돔의 고유진동모드 ($\theta = 30^\circ$)



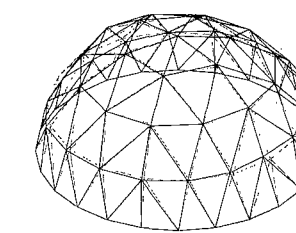
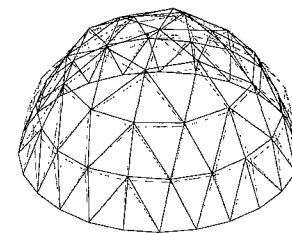
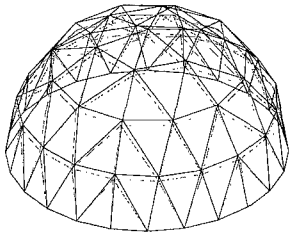
1st mode ($T_1 = 0.1450$ sec) 3rd mode ($T_3 = 0.1172$ sec) 5th mode ($T_5 = 0.1122$ sec)

(b) 네트워크 돔의 고유진동모드 ($\theta = 60^\circ$)



1st mode ($T_1 = 0.1150$ sec) 3rd mode ($T_3 = 0.1079$ sec) 5th mode ($T_5 = 0.1052$ sec)

(c) 패러렐 라멜라 돔의 고유진동모드 ($\theta = 45^\circ$)



1st mode ($T_1 = 0.1193$ sec) 3rd mode ($T_3 = 0.0783$ sec) 5th mode ($T_5 = 0.0756$ sec)

(d) 패러렐 라멜라 돔의 고유진동모드 ($\theta = 90^\circ$)

그림 2 해석모델(I)의 모드형상

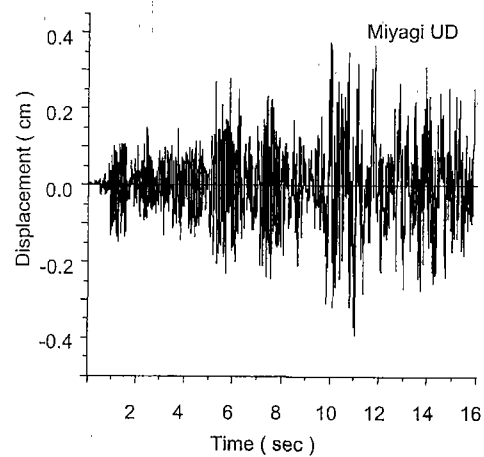
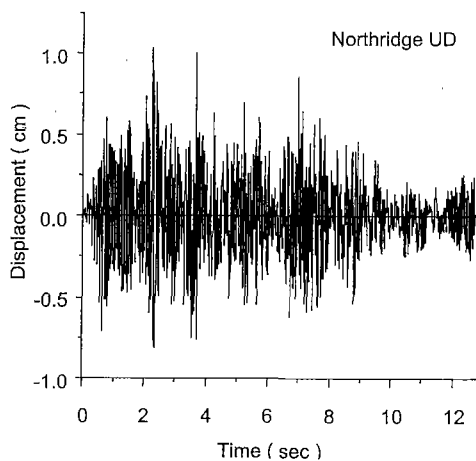


그림 3 네트워크 돔의 정상부에서의 수직변위 ($\theta = 30^\circ$)

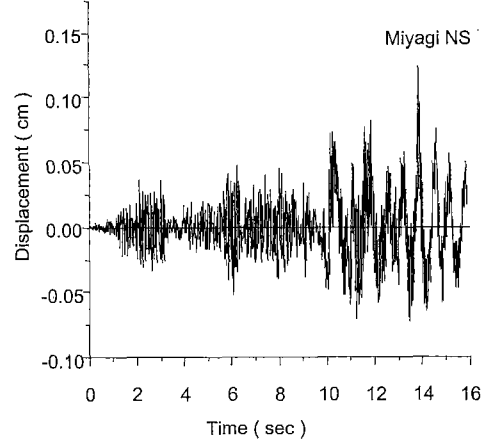
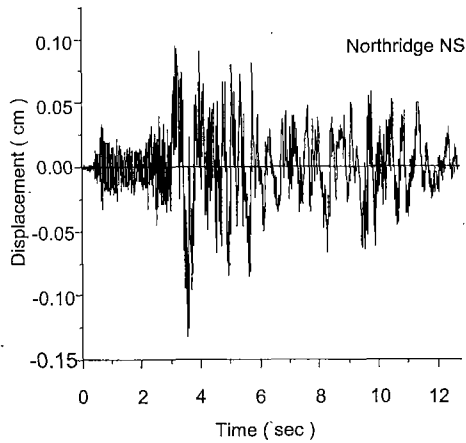


그림 4 네트워크 돔의 정상부에서의 수평변위 ($\theta=30^\circ$)

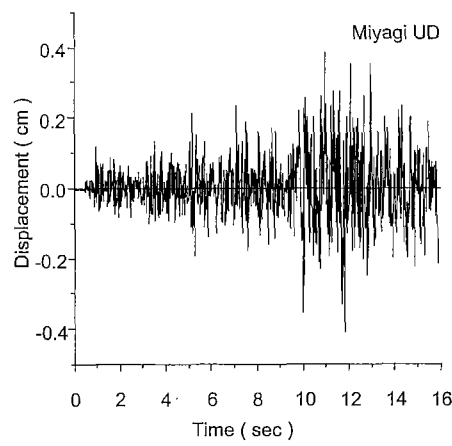
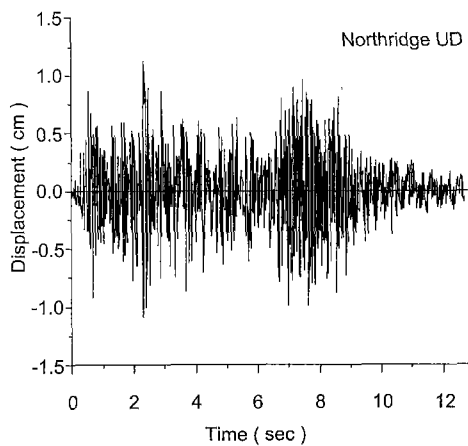


그림 5 패러렐 라멜라 돔의 정상부에서의 수직변위 ($\theta=30^\circ$)

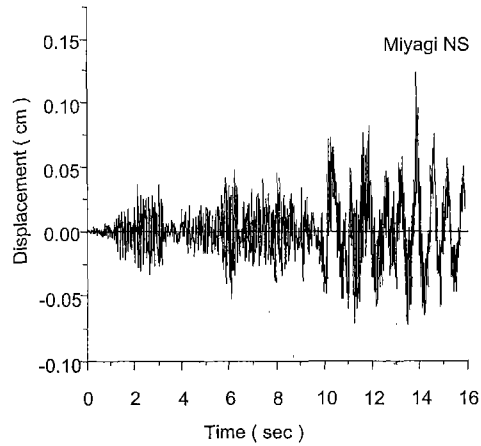
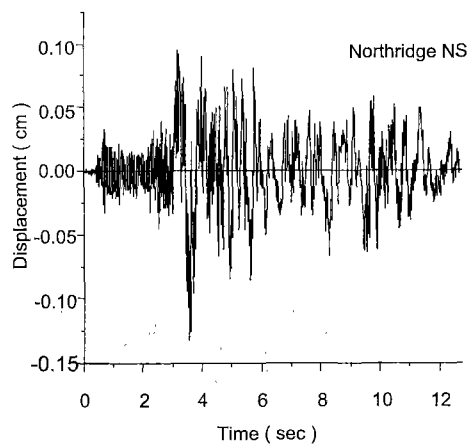


그림 6 패러렐 라멜라 돔의 정상부에서의 수평변위 (30°)

감쇠비(ξ)는 0.02로 하고, 증분시간 Δt 는 0.001초로 가정한다. 입력지진파로는 Miyagi UD(수직), NS(수평), Northridge UD(수직), NS(수평)파를 사용한다. 지진파의 해석시간은 최대지반 가속도를 포함하는 구

간으로 한다.

래티스 돔의 형태에 따른 해석에서 네트워크 돔은 상부에 부재들이 모여있는 반면에 하부에는 부재가 적기 때문에 수직지진파에 대해서 정상부의 수직변위

는 작고, 수평지진파에 대한 수평변위는 큰 것을 알 수 있다. 패러렐 라멜라 돔은 구조물 전체에 부재가 골고루 배치되어 있기 때문에 네트워크 돔에 비해 수직지진파에 대한 정상부의 수직변위는 크지만, 수평지진파에 대한 수평변위는 작은 것을 알 수 있다. 부재의 배치면에서 볼 때 구조물 전체에 골고루 배치된 패러렐 라멜라 돔은 일부분에 부재가 집중된 네트워크 돔보다는 안정적일 것으로 판단된다.

3.2 적층 고무 받침이 설치된 단층 래티스 돔의 동적거동

해석모델(II)의 형상은 그림 7과 같이 지점 24개, 절점 61개, 부재가 156개인 3방향 그리드 돔으로서 스패는 30 m, 반경은 17.3205 m, 반개각은 60°, 부재 길이는 4.52 m이다. 부재의 탄성계수(E)는 2,100 t/cm², 부재의 단면적은 15.52 cm² (ϕ -114.3×4.5)로 선정하고, 질량은 자중과 적재하중을 고려해서 각 절점에 집중질량으로 5 kg·scc²/cm을 적용시킨다. 지점에 지진격리 장치로써 적층 고무 받침을 적용할 경우에 고무의 전단계수는 9.99 kg/cm², 탄성계수는 ν =29.37 kg/cm², 포아송비 0.47로 가정한다. 적층 고무 받침은 16개의 지점에 설치하고, 고무의 감쇠비는 0.02로 가정한다. 입력지진파는 El Centro NS파(1940)를 이용하며, 증분시간 Δt 는 0.001초로 한다. 적층 고무 받침이 설치되지 않은 경우는 44차 모드까지, 적층 고무 받침이 설치된 경우는 56차 모드까지 고유값 해석을 한다. 그림 9(a)에서 보는 바와 같

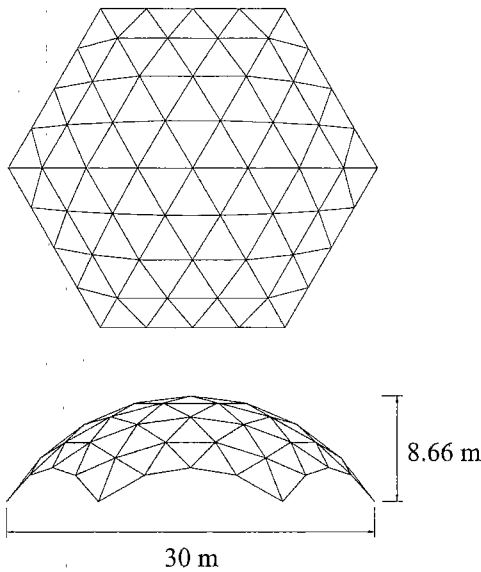
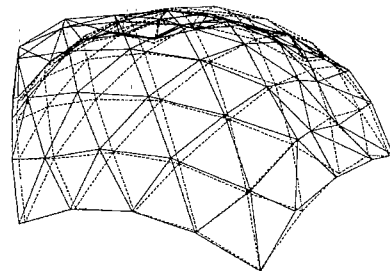
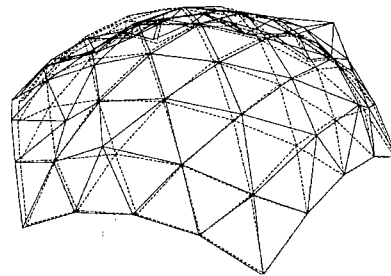


그림 7 해석모델(II)

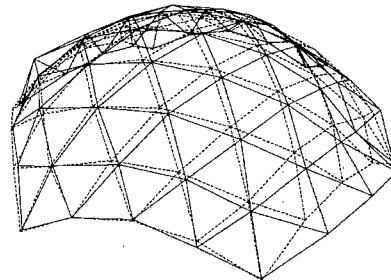
이 적층 고무 받침이 설치되지 않은 경우 최대가속도응답은 -959.452 cm/scc²이지만, 적층 고무 받침이 설치된 경우는 최대328.798 cm/scc²로서 약 34%정도 저감되었다. LRB의 제원은 표 3과 같고, 그림 8과 그림 9는 모드형상과 응답곡선을 나타낸다.



1st mode



2nd mode



38th mode

그림 8 해석모델(II)의 모드형상

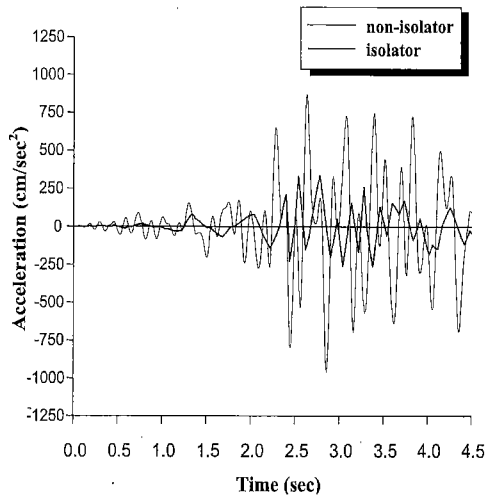
표 3 적층 고무 받침(LRB)의 제원

단위:mm

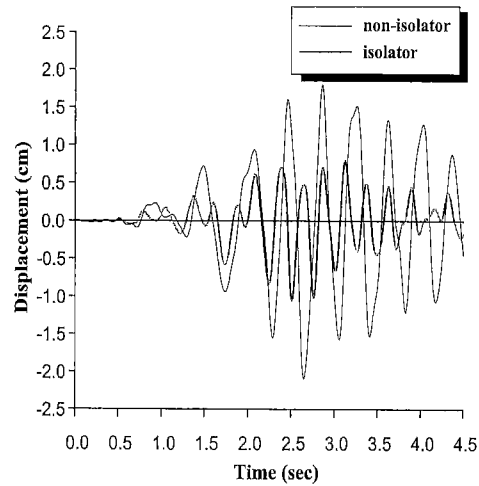
| | D_b | H | n | D_s | t_r | t_s | t_e | 고무의 층두께 |
|-----|-------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|---------|
| LRB | 400 | 250 | 380 | 8.7 | 3.5 | 35 | 15 | 130.5 |

여기서,

- D_b : LRB의 지름
- H : LRB의 높이
- n : 고무층의 개수
- D_s : 강철판의 지름
- t_r : 고무층의 두께
- t_s : 강철판의 두께
- t_e : Base plate의 두께



(a) 수평가속도



(b) 수평변위

그림 9 해석모델(II)의 정상부에서의 응답

4. 맺음말

단층 래티스 돔은 부재의 질량에 비해 강성이 대단히 큰 구조물이므로, 고유진동수가 다른 구조물에 비해 크고, 고유주기가 짧으며, 고유진동모드를 통하여 돔의 변형 형상을 예측할 수 있다. 즉 반개각이 작은 30°와 45°의 경우는 상하 수직진동모드가 지배적이어서 수평변위보다는 수직변위가 크게 나타났으며, 반개각이 큰 60°와 90°의 경우는 수평진동모드가 지배적이기 때문에 수직변위보다는 수평변위가 크게 나타났다. 그러나 반개각이 90°인 돔은 수평과 수직모드의 영향이 다른 돔에 비해 커서 지진파에 불리한 형태의 구조물이라고 판단된다. 따라서, 반개각이 작은 래티스 돔에서는 스냅스루 좌굴, 반개각이 큰 래티스 돔에서는 하부의 극부좌굴에 의해 구조적 거동이 지배되는 것을 예상할 수 있다. 또한 단층 래티스 돔의 지점부근에 적층 고무 받침을 설치한 경우에는 구조물과 지반을 지진 하중으로부터 분리시켜서 구조물의 고유주기를 길게 함으로써 구조물에 입력되는 지진력의 크기가 작아짐을 예상할 수 있었다. 즉 적층 고무 받침을 사용할 경우에 구조물에 전달되는 진동의 영향이 감소되는 것은 지진력리 장치의 감쇠효과로 인해 에너지가 흡수, 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

참고 문헌

(1) Lin, B. C., Tadjbakhsh, I. G., Papa-georgiou,

A. S. and Ahmadi, G., 1990, "Performance of Earthquake Isolation Systems", J. Engrg. Mechanics, Vol. 116, No. 2, pp. 446~461.

(2) Ishikawa, K. and Kato, S., 1993, "Dynamic Buckling Behavior of Single and Double Layer Latticed Domes due to Vertical Earthquake Motion", Space Structures 4, Thomas Telford, London, Vol. 12, pp. 466~475.

(3) Kato, S. and Nakazawa, S., 1998, "Earthquake Response of Domes Implemented by Hysteresis Dampers for Earthquake Isolation", IASS, LSA98, pp. 451~459.

(4) Kato, S., Shomura, M., Mukaiyama, Y., Mutoh, I. and Kubota, R., 1996, "Dynamic Response and Collapse Acceleration of Single Layer Reticular Domes under Earthquake Motions", Proc. of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatial Structure, Beijing, China, pp. 704~711.

(5) Mamoru Kawaguchi and Ikuo Tatemichi., 2000, "Seismic Isolation Systems and their Application in Space Structures", Proc. of IASS-Symposium 2000, Istanbul, Turkey, pp. 217~228.

(6) Douglas D. Reynolds., 1981, "Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control", Allyn and Bacon.

(7) Ivan Skinner, R., 1993, "An Introduction to Seismic Isolation", John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester.