

등가 모델을 이용한 대공간 구조물의 동적 거동 특성에 관한 연구 A Study on the Characteristics of dynamic Behaviors for the Spatial Structures using Equivalent Lumped Mass Model

한 상 을* 이 상 주** 김 민 식*** 이 정 현***
Han, Sang-Eul Lee, Sang-Ju Kim, Min-Sik Lee, Jung-Hyun

ABSTRACT

The earthquake-resistant structural systems have to ensure the sufficient stiffness and ductility for the stability. For those purposes, recently, the performance design concept to increase the degree of absorbed energy level of structures has been proposed. One practical way of the performance design in the spatial structures is to apply the isolation system to boundary parts of roof system and sub-structure to obtain the target performance. So, it is necessary to examine the characteristics of dynamic behavior of spatial structures governed by higher modes rather than lower modes different from the cases of high rise buildings. The objectives of this paper are to develop the equivalent lumped mass model to simplify the analytical processes and to investigate the dynamic behavior of roof system according to the mass and the stiffness of sub-structures as a fundamental study of performance design for the spatial structures.

1. 서 론

구조물의 내진설계에서는 강성과 연성을 동시에 확보하고자 하는 성능설계의 개념에 기초하여 연구가 활발히 수행¹⁾되고 있지만, 성능목표를 어떻게 설정할 것인가에 대해서는 아직 명확한 근거를 제시하지 못하고 있는 실정이다. 성능설계란 외력에 대해서 구조물의 연성 즉 소성변형능력을 증대시킴으로써 구조물이 흡수 가능한 에너지를 증대시키는 것이라 정의할 수 있고, 목표성능에 대응하여 설계기준을 규정할 필요성이 대두되고 있다.

일반 구조물의 경우 내진성능을 향상시키기 위해 내진, 제진, 면진시스템의 도입이 실용화되고 있으며, 대공간 구조물의 내진설계에서도 내진성능을 확보할 수 있는 구조시스템으로서 이들 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히 면진시스템은 면진 층에서 지진입력에너지를 충분히 흡수함으로써 면진층보다 상부의 응답을 현저하게 저감시키는 것이 가능하므로, 상부 돔 구조와 하부구조 사이에 면진 층의 도입에 따른 거동특성과 및 적용성에 대한 연구가 진행되고 있다^{2,3)}. 또한 상부 돔 구조의 지진응답특성은 하부구조의 강성, 질량 및 소성화 등의 특성에 크게 영향 받을 것으로 예상되기 때문에, 이들을 고려하여 상부 돔 구조 지지부

* 정회원 · 인하대학교 건축학부 교수

** 정회원 · (주)Plus구조 부설 기술연구소 수석연구원

*** 인하대학교 건축공학과 석사 과정

의 입력지진을 추정할 필요가 있다. 하부구조의 응답가속도는 저감시킬 필요가 없다하더라도 상부 돔 구조는 대지진에 대해서도 탄성을 유지하며, 붕괴되지 않는다는 성능목표를 설정하는 경우, 상부 돔 구조와 하부 구조 사이에 면진층을 도입하는 것은 상호구조에의 영향을 최소화할 수 있고, 최소한의 비용으로 설계목표를 달성할 수 있다.

또한 일반 고층구조물의 내진해석에 있어서 접합부 등을 고려한 적절한 수평강성을 부여하는 경우, 구조물의 거동은 저차 모드에 크게 영향을 받는다. 그러나 대공간 구조물은 고차모드의 영향이 커서 이를 무시할 수 없으며, 또한 재료비선형 뿐만 아니라 기하학적 비선형 및 수평지진동에 의한 연직방향의 응답도 고려할 필요가 있다. 이로 인해 자유도수가 많은 대공간 구조물은 해석에 많은 시간이 소요된다.

본 연구는 상부 돔 구조와 하부구조 사이에 면진 층을 도입함에 따른 구조물의 거동특성을 파악하기 위한 기초적인 연구로서 구조물의 등가모델화를 수행하고 모델의 타당성을 검증한다. 또한 하부구조의 질량과 강성에 따른 상부 돔 구조의 거동특성을 규명한다.

2. 대공간 구조물의 등가모델화

그림 1은 하부구조를 갖는 단층 래티스 돔으로, 지지부를 기준으로 상부 돔 구조와 하부구조로 구분한다. 여기에서 하부구조의 층수는 2층으로 가정하며, 서론에 서술한 것처럼 해석 시간의 단축과 해석의 단순화를 목적으로 구조물을 그림 2와 같이 모델화 한다.

하부구조는 다질점의 1축 모델로 가정할 수 있으며, 수평 두 방향에 변위가 발생하는 경우도 같은 방법으로 기술할 수 있기 때문에 여기에서는 단순화를 위하여 수평의 X방향으로 이동하는 경우를 다룬다. 이 하부구조 모델은 같은 높이에서는 같은 수평변위로 가정하고 있기 때문에 상부 돔 구조의 지지부에서는 X방향과 동일한 수평변위가 발생하는 것으로 한정한다.

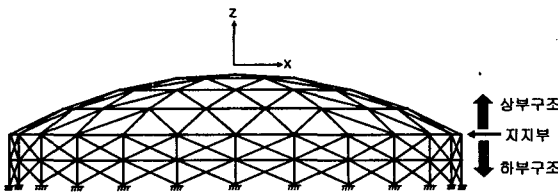


그림 1. 하부구조를 갖는 단층 래티스 돔

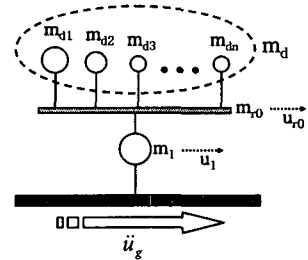


그림 2. 등가 모델

입력위치 X방향의 입력지진가속도는 \ddot{u}_g 로 하고 하부구조 1층과 최상층의 변위는 u_1, u_{r0} 로 한다. 최상층의 변위는 상부 돔 구조의 지지부 위치 수평변위이며, 각 층의 질량은 m_1, m_{r0} 이다. 단, 최상층의 질량은 최상층과 동일한 변위가 발생하는 지지부의 질량도 포함한 질량이고, 상부 돔 구조의 질량은 m_d 로 한다.

상부 돔 구조는 트러스 부재로 구성되어 있고, 면진층 도입을 가정하여 탄성 선형거동을 전제로 한다. 지지부의 수평변위를 0으로 하고, 이것을 자유도로부터 제외한 경우의 운동방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기에서 $\{u\}$, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 변위 매트릭스, 집중질량 매트릭스, 감쇠 매트릭스, 강성 매트릭스이다. 또한, $\{\xi_x\}$ 는 X방향 지진동에 의한 지진영향계수이고, 지진하중을 직접 받는 X방향 변위성분에 대해서는 1, 그 이외의 성분에 대해서는 0이다. 따라서 $\{\xi_x\}$ 는 입력 지진동이 X방향의 성분만 존재하므로,

$$\{\xi_x\}^T = \{1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots\} \quad (2)$$

으로 표현되고, 비감쇠 자유진동모드와 진동수는

$$\omega_i^2 [M] \{u_i\} = [K] \{u_i\} \quad (3)$$

로부터 구하며, 여기에서 ω_i 는 i 차 모드의 고유진동수이다. 고유모드는 상부 돔 구조의 질량 m_d 를 기준으로 다음과 같이 정규화 한다.

$$\{u_i\}^T [M] \{u_i\} = m_d \quad (4)$$

하부구조의 응답 특성에 따른 상부 돔 구조의 영향을 고려하기 위해 상부 돔 구조의 변위, 가속도를 먼저 구한 n 개의 고유모드, $\{\xi_x\}$ 와 최상층의 변위 u_{r0} 를 이용하여 다음과 같이 표시한다.

$$\{u\} = \{\xi_x\} u_{r0} + \sum_{i=1}^n \eta_i q_i(t) \{u_i\} \quad (5)$$

$$\{\ddot{u}\} + \{\xi_x\} \ddot{u}_g = \{\xi_x\} \ddot{u}_g + \{\xi_x\} \ddot{u}_{r0} + \sum_{i=1}^n \eta_i (\ddot{q}_i(t)) \{u_i\} \quad (6)$$

여기에서, $q_i(t)$ 는 일반화변위이고, η_i 는 모드참여계수이며 다음 식으로 표현된다.

$$\eta_i = \{u_i\}^T [M] \{\xi_x\} / \{u_i\}^T [M] \{u_i\} \quad (7)$$

상부 돔 구조와 하부구조에 대하여 가상일의 원리를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta E_D + \delta E_B = 0 \quad (8)$$

단, δE_D 과 δE_B 는 각각 상부 돔 구조, 하부구조에 대한 가상일이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta E_D = \delta \{u\} \left([M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} + [M] \{\xi_x\} \ddot{u}_g \right) \quad (9)$$

$$\delta E_B = \delta(u_{r0} - u_1) \{Q_{r0}\} + \delta(u_{r0}) m_{r0} \{u_{r0} + \ddot{u}_g\} + \delta(u_1) \{Q_1\} + \delta(u_1) m_1 \{u_1 + \ddot{u}_g\} \quad (10)$$

여기에서, Q_{r0} , Q_1 은 최상층과 1층의 복원력이다. 다시 식 (5)를 식 (9)에 대입하고, $y_i = q_i + u_{r0}$ 로 하여 식을 정리하면 다음과 같은 매트릭스 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_n \\ \delta u_{r0} \\ \delta u_1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \eta_1^2 m_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_2^2 m_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_n^2 m_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{r0} + \left(1 - \sum_{i=1}^n \eta_i^2\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 + \ddot{u}_g \\ \ddot{y}_2 + \ddot{u}_g \\ \vdots \\ \ddot{y}_n + \ddot{u}_g \\ u_{r0} + \ddot{u}_g \\ u_1 + \ddot{u}_g \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& \begin{Bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_n \\ \delta u_{r0} \\ \delta u_1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2h_1\omega_1\eta_1^2m_d & 0 & 0 & 0 & -2h_1\omega_1\eta_1^2m_d & 0 \\ 0 & 2h_2\omega_2\eta_2^2m_d & 0 & 0 & -2h_2\omega_2\eta_2^2m_d & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2h_n\omega_n\eta_n^2m_d & -2h_n\omega_n\eta_n^2m_d & 0 \\ -2h_1\omega_1\eta_1^2m_d - 2h_2\omega_2\eta_2^2m_d \cdots - 2h_n\omega_n\eta_n^2m_d & m_{r0} + \sum_{i=1}^n 2h_i\omega_i\eta_i^2m_d + c_2 & & & -c_1 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \vdots \\ \dot{y}_n \\ \dot{u}_{r0} \\ \dot{u}_1 \end{Bmatrix} \\
+ & \begin{Bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_n \\ \delta u_{r0} \\ \delta u_1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \eta_1^2\omega_1^2m_d & 0 & 0 & 0 & -\eta_1^2\omega_1^2m_d & 0 \\ 0 & \eta_2^2\omega_2^2m_d & 0 & 0 & -\eta_2^2\omega_2^2m_d & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_n^2\omega_n^2m_d & -\eta_n^2\omega_n^2m_d & 0 \\ -\eta_1^2\omega_1^2m_d - \eta_2^2\omega_2^2m_d \cdots - 2\eta_n^2\omega_n^2m_d & \sum_{i=1}^n \eta_i^2\omega_i^2m_d + k_2 - k_1 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ u_{r0} \\ u_1 \end{Bmatrix} = 0 \quad (11)
\end{aligned}$$

상부 돔 구조는 그림 2에서 보는 바와 같이 2층 1축 모델의 최상층에 n 개의 집중질량으로 분해하여 모델화할 수 있다. 병렬 집중질량의 i 모드 유효질량 m_{di} , 유효강성 K_{di} , 유효감쇠계수 C_{di} 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{di} = \eta_i^2 m_d, \quad k_{di} = \omega_i^2 m_{di}, \quad c_{di} = 2h_i k_{di} / \omega_i \quad (12)$$

여기에서 보인 바와 같이 모드분해법을 이용함으로써, 상부 돔 구조를 병렬 집중질량으로 모델화할 수 있다. 필요한 채용 모드 수는 구조시스템의 특성이나 정도에 따라 다르지만, 일반적으로 유효질량비가 90퍼센트 이상이 되도록 선택한다.

3. 등가 모델을 이용한 대공간 구조물의 해석

3.1 해석 모델과 입력 지진파

해석 모델의 상부 돔 구조는 그림 3의 단층 패러렐 라멜라 돔으로, 스펠 20m, 반개각 30°, 절점 61개, 부재 156개, 부재 단면적 12cm²인 트러스 모델이다.

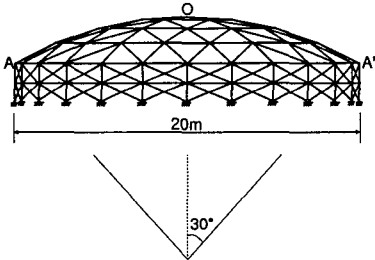


그림 3. 해석 모델

표 1. 해석 모델의 상부 돔 구조

스 판	20m
반 개 각	30°
절 점	61개
부 재	156개
부재 단면적	12cm ²

입력 지진파는 그림 4의 El-Centro NS 지진파로 수평방향의 성분만 고려하였으며, 최대 가속도는 341.7cm/s²이다.

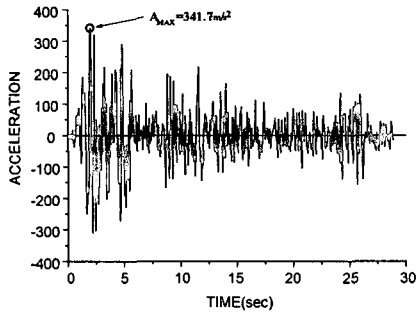


그림 4. EL-Centro NS 지진파

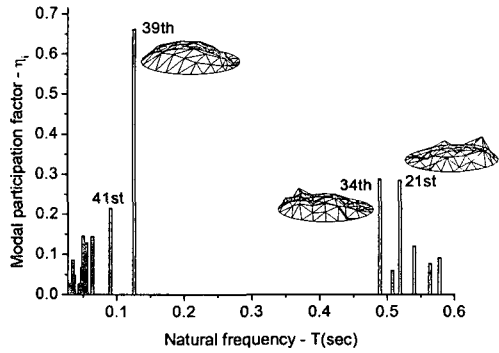


그림 5. 해석 모델의 고유주기와 모드참여계수

3.2 돔의 진동모드

그림 5에 돔의 수평지진에 대한 모드참여계수 η_i 가 큰 모드의 고유주기와 모드참여계수, 고유진동모드를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모드참여계수가 큰 고유진동모드는 돔이 역대칭의 면외방향으로 진동하는 모드이며, 돔은 수평지진에 대해 큰 연직가속도 응답이 생기는 것으로 판단된다.

3.3 돔의 응답 분포

그림 5로부터 8개의 모드를 채용한 등가모델을 작성하여 최대 가속도와 최대 변위 응답분포를 비교하였다. 모드참여계수 제곱의 합 $\sum \eta_i^2$ 은 상부 돔 구조 질량의 크기를 나타내는 것이며 상부 돔 구조 모드의 누적유효질량비이다.(여기에서는 간단히 유효질량비라고 부른다). 8개의 모드를 채용한 경우에 유효질량비는 $\sum \eta_i^2 = 0.911$ 이다. 그림 6은 등가모델과 전체모델의 가속도 응답 최대값 분포를 비교한 것이다. 등가모델의 최대가속도는 전체모델과 비교할 때 연직방향으로 33퍼센트 정도, 수평방향으로 5퍼센트 정도의 오차를 보이고 있다. 그림 7은 등가모델과 전체모델의 변위 응답 최대값 분포를 비교한 것이다. 등가모델의 최대 변위는 전체모델과 비교할 때 연직방향으로 46퍼센트 정도, 수평방향으로 5퍼센트 정도의 오차로 수평방향의 응답은 오차가 거의 없는 것으로 나타나지만, 연직 방향의 응답은 오차가 큰 것으로 나타났다.

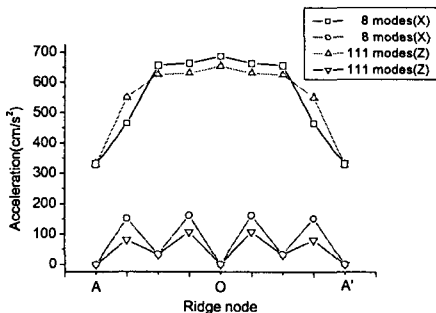


그림 6. 선택 모드에 따른 최대 가속도 응답

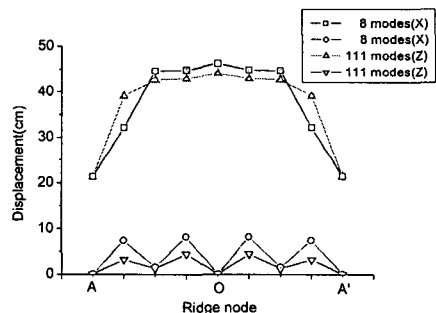


그림 7. 선택 모드에 따른 최대 변위 응답

3.4 하부구조의 질량과 강성의 변화에 의한 상부 돔 구조의 응답 변화

하부구조의 질량과 강성의 변화가 상부 돔 구조의 응답에 미치는 영향을 알아보기 위해 하부구조의 질량과 강성을 초기값에 비해 70퍼센트, 50퍼센트, 20퍼센트로 변화시키고, 그 때의 연직·수평 가속도 응답, 연직·수평 변위 응답의 변화를 살펴보았다.

질량 변화에 따른 상부 돔 구조 Ridge node의 최대 연직 가속도 응답을 그림 8, 최대 수평 가속도 응답을 그림 9에 나타내며, 최대 연직 변위 응답을 그림 10, 최대 수평 변위 응답을 그림 11에 나타내었는데, 최대 수평 변위 응답은 질량의 감소에 따라 일정한 변화를 보이지 않지만, 나머지 응답은 증가한다.

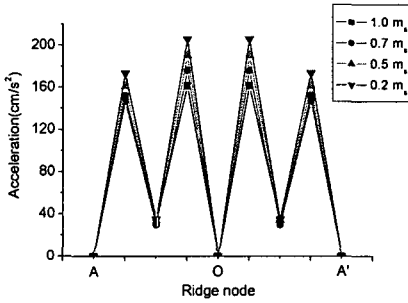


그림 8. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 연직 가속도 응답

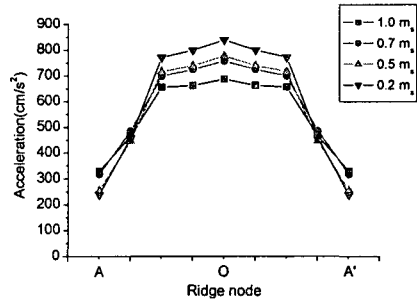


그림 9. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 수평 가속도 응답

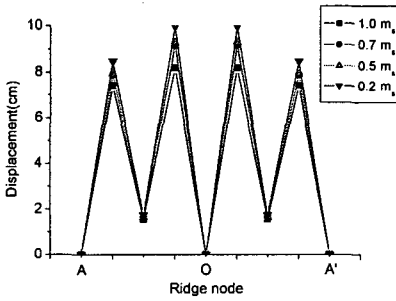


그림 10. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 연직 변위 응답

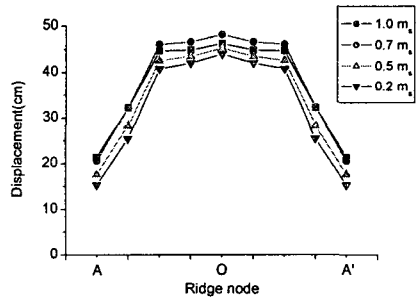


그림 11. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 수평 변위 응답

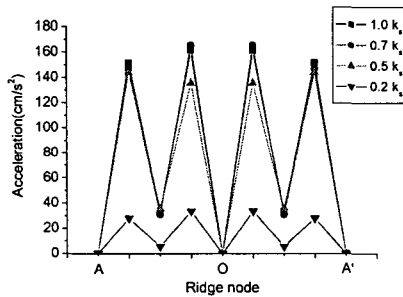


그림 12. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 연직 가속도 응답

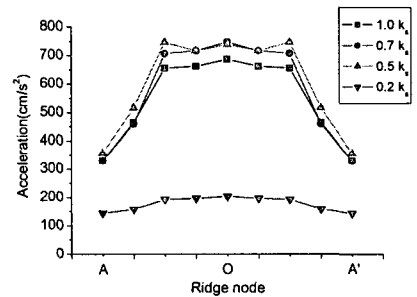


그림 13. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 수평 가속도 응답

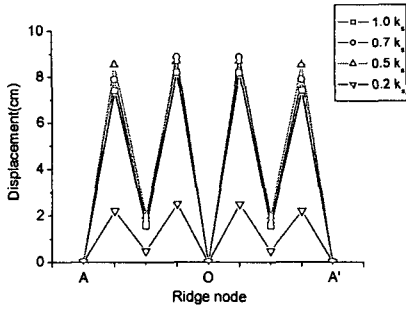


그림 14. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 연직 변위 응답

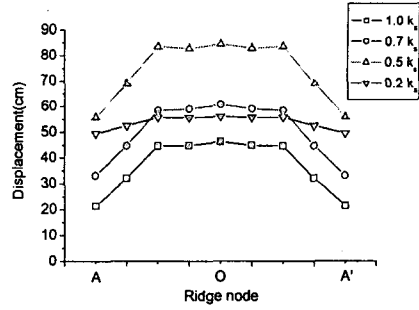


그림 15. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 연직 변위 응답

강성 변화에 따른 상부 돔 구조 Ridge node의 최대 연직 가속도 응답을 그림 12, 최대 수평 가속도 응답을 그림 13에 나타내며, 최대 연직 변위 응답을 그림 14, 최대 수평 변위 응답을 그림 15에 나타내었는데, 최대 수평 변위 응답은 강성의 감소에 따라 일정한 변화를 보이지 않지만, 나머지 응답은 줄어든다.

그림 16과 17은 질량 변화에 따른 상부 돔 구조의 최대 가속도와 최대 변위를 나타내고, 그림 18과 19는 강성 변화에 따른 최대 가속도와 최대 변위를 나타내며, 그림 20과 21은 질량과 강성의 변화에 따른 상부 돔 구조 지지부의 가속도 \ddot{u}_{r0} 의 분포를 나타낸다. 이 그림들로부터, 상부 돔 구조의 응답은 하부구조의 질량과 강성의 변화에 따라 변하는 \ddot{u}_{r0} 의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

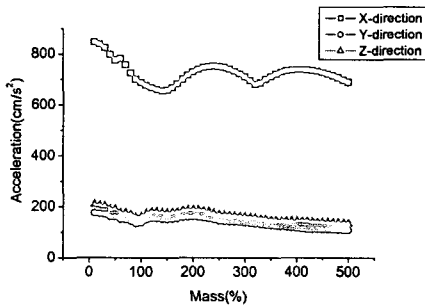


그림 16. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 가속도 응답

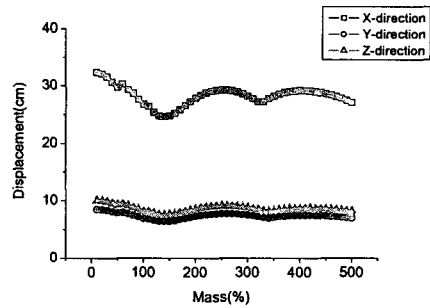


그림 17. 하부구조의 질량변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 변위 응답

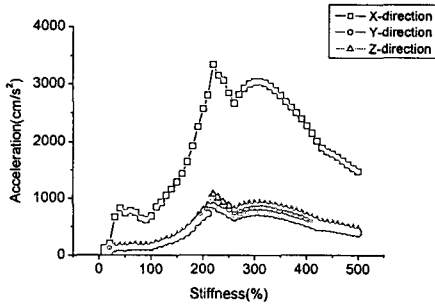


그림 18. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 가속도 응답

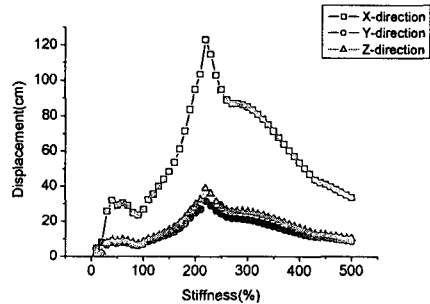


그림 19. 하부구조의 강성변화에 의한 상부 돔 구조의 최대 변위 응답

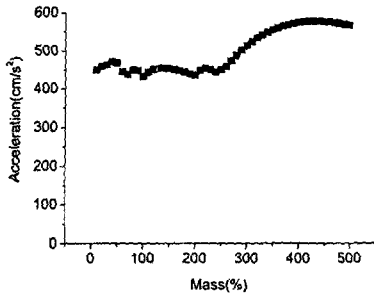


그림 20. 하부구조의 질량변화에 의한 $\ddot{u}_{r,0}$ 의 분포

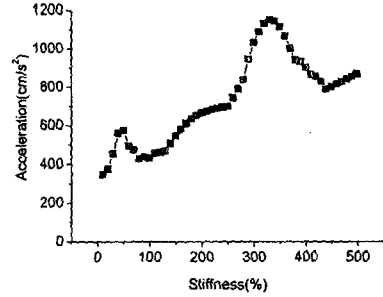


그림 21. 하부구조의 강성변화에 의한 $\ddot{u}_{r,0}$ 의 분포

4. 결 론

본 논문에서는 지진하중을 받는 단층 래티스 돔 구조물을 등가모델로 치환하여 지진응답해석을 수행하였다. 또한 등가모델을 이용하여 구조물의 가속도와 변위 응답을 파악하였으며, 특히 하부구조의 질량과 강성 변화에 의한 상부 돔 구조의 거동 특성을 규명하였다. 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 대공간 구조에서는 일반 고층구조물과 달리 고차의 모드들이 구조물의 거동에 지배적이다.
- 2) 유효질량비를 0.9 정도로 하면 Full 모델의 해석과 비교하였을 때, 수평가속도 응답의 오차는 거의 없지만, 연직가속도 응답의 오차는 큰 것으로 나타났다.
- 3) 수평 방향의 입력 지진에 따른 상부 돔 구조의 연직방향 응답은 수평 방향 응답의 20~30퍼센트 정도이며, 이를 고려해야 함을 알 수 있다.
- 3) 하부구조의 질량이나 강성 등의 변화에 따라 상부 돔 구조의 응답은 크게 영향을 받으며, 그것은 지지부의 X방향 가속도 응답과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

이상과 같이 본 논문에서는 면진 시스템의 도입에 따른 구조물의 거동 특성을 규명하기 위한 기초적인 연구를 수행하였으며, 상부 돔 구조를 탄성 거동에 머물게 하기 위한 면진 시스템의 성능을 정량화하는 것이 향후의 연구 과제로 남아있다.

참고 문헌

1. 崔原豪, “等價應答을 利用한 建築構造物의 非彈性 地震學動 分析 및 耐震性能 評價”, 成均館大學校 博士學位 論文, 2003.10
2. 加藤 史郎, “空間構造의 地震應答分析と設計法に關する研究”, 豊橋技術科學大學, 2003
3. 加藤 史郎, “免震ドーム의 動的學動と設計法に關する基礎的研究”, 豊橋技術科學大學, 2002
4. Anil K. Chopra, Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, 2001
5. L. Meirovitch, Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff & Noordhoff, 1980
6. Joseph W. Tedesco, Structural Dynamics-Theory and Applications, Addison-Wesley, 1999
7. Robert Levy, Analysis of Geometrically Nonlinear Structures, Chapman & Hall, 1994