

## 래티스 돔의 성능점 산정에 관한 연구

### A Study on Evaluation of Performance Point for the Latticed Dome

한 상 을\* · 이 상 주\*\* · 간 은 영\*\*\*

Han, Sang-Eul · Lee, Sang-Joo · Gan, Eun-Young

#### Abstract

Performance-based design concept is needed to evaluate the seismic capacity of building. In this study, the method estimating the performance point of the spatial structures based on capacity spectrum method (CSM) is proposed. And for efficient evaluation for the performance point of the spatial structures, the algorithm to convert spatial structural system to ESDOF system is simulated. Its efficiency is confirmed by comparing with time history analysis of full model. And dynamic behaviors of spatial structures are examined by using this method. At last, evaluation of structural performance according to variation of stiffness after plastic deformation on the substructures is carried out.

**Keywords** : Spatial Structural System, Performance Based Design, Capacity Spectrum Method, ESDOF, Ductility Ratio

#### 1. 서 론

기존의 내진설계기준에 의해 설계된 구조물들은 최근 세계의 여러 나라에서 발생한 지진 이후, 인명 피해 방지라는 측면에서는 적합하나, 많은 건물들이 구조요소 및 비구조 요소의 손상으로 인해 사용성의 관점에서 막대한 경제적 손실을 가져왔다. 그러므로 구조물의 실제거동을 포함하여 구조물이 보다 더 적절하고 예측 가능한 성능을 얻을 수 있는 개선된 설계법의 필요성이 인식되었다. 따라서 건축물의 구조설계법은 성능에 기초하여 성능기반공학(Performance-Based Engineering)의 개념을 도입한 설계법으로 그 흐름이 바뀌고 있다. 즉 기존 설계법의 개념은 구조물의 강성만을 고려하였으나, 최근에는 변형까지 고려하여 에너지흡수 능력으로 구조물의 성능을 평가하는 성능설계법이 제시되어 있다.

지진하중에 의한 구조물의 비선형 거동을 규명하기 위해서는 시간이력해석법이 가장 정확한 방법이지만, 구조설계의 실무적인 면에서는 입력지진하중 산정, 해석시간 증가, 해석결과 평가 등에서 여러 가지 문제점이 뒤따른다. 특히 대공간 구조물의 경우 일반 구조물과 달리 고차 모드의 영향이 크고 구조물을 구성하는 부재수가 많아 해석에 많은 시간이 필요하다. 따라서 효율적인 동적해석을 수행하기 위해서는 모델을 단순화 할 필요성이 대두된다.

본 논문에서는 대공간 구조시스템의 내진성능을 평가하기 위해 자유도가 많은 구조물의 동적특성을 어떻게 1자유도계의 동적모델로 표현할 것인가에 주목한다. 즉 구조물의 효율적인 동적해석을 수행하기 위해 상부 래티스 돔부분(이하 상부구조)을 병렬로 구성하는 등가 단순모델로 치환한다. 그리고 상부구조의 텐션링과 가새

\* 인하대학교 건축학부 교수 E-mail: hsang@inha.ac.kr

\*\* 플러스구조엔지니어링 선임연구원 E-mail: kyotolsj@empal.com

\*\*\* (주)일구조기술사 사무소 사원 E-mail: kan74@empal.com

를 가진 하부 프레임부분(이하 하부구조)의 주두를 동시변위로 하는 가정에 기초하여 하부구조를 포함한 상부 구조의 치환된 등가 모델을 등가 1자유도계 모델로 치환한다. 등가 1자유도계 모델에 있어서 상부구조는 복원력 특성을 탄성으로 하고, 하부구조는 탄소성으로 한다. 마지막으로 등가 1자유도계 모델을 이용하여 구조물이 보유하고 있는 저항능력과 지진하중에 의한 요구능력을 구하여 시스템의 동적평형 상태인 성능점을 산정한다.

본 논문에서는 대공간 구조물을 등가 1자유도계 모델로 치환하는 방법을 제시한 후, 등가 1자유도계의 비선형 지진 응답과 비선형 시간이력해석 응답을 비교, 분석하여 등가 1자유도계의 치환 방법의 타당성과 적용성을 검토하는 것을 첫 번째 목적으로 한다. 나아가 제안된 등가 1자유도계 모델을 이용하여, 결정된 변위연성비와 등가감쇠계수로 요구스펙트럼과 능력스펙트럼을 작성하고 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 이용하여 성능점 산정법을 제안하는 것을 두 번째 목적으로 한다. 이를 이용하여 하부구조의 소성 변형 후 강성의 변화에 따른 대공간 구조물의 성능을 평가하며, 대공간 구조물의 거동 특성을 파악하는 것을 최종의 목적으로 한다.

## 2. 등가 1자유도계의 정식화

### 2.1 하부구조의 총 복원력 특성

하부구조는 그림 1과 같이 단위프레임이 원형으로 연결된 구조를 대상으로 한다. 하부구조의 단위프레임은 좌굴 보강된 가새와 탄성 프레임으로 구성된 혼합구조이며, 면내방향으로만 강성을 갖고 텐션링(tension ring)은 강체로 가정한다. 원형으로 연결된 가새를 연속체로 가정한 경우 수평력에 의한 하부구조의 소성범위를 그림 2에 나타내었다. 여기에서  $\theta_0$ 는 소성범위 지표가 된다. 그리고 하부구조의 항복 충전단력  $Q_y$ 에 대한 충전단력  $Q_B$ 의 비를  $\alpha$ , 하부구조 소성변위  $\delta_y$ 에 대한 하부구조변위  $\delta_0$ 의 비를  $\mu$ 로 한다. 그림 3은 단위혼합구조의 초기강성에 대한 2차 강성비  $r$ 을 0.2로 한 경우의 소성범위 지표, 전단력 계수 및 변위 연성비의 관계를 나타낸다.

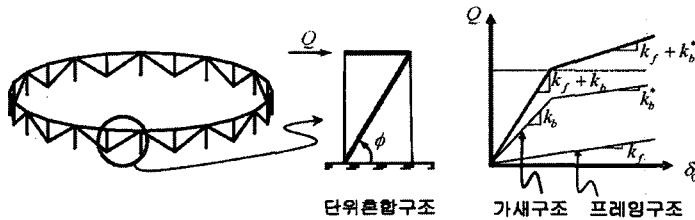


그림 1. 단위혼합구조와 복원력 특성

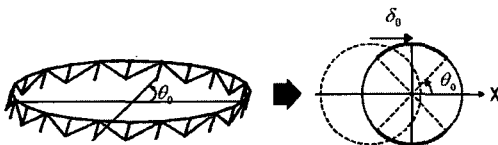


그림 2. 소성범위와 그 지표

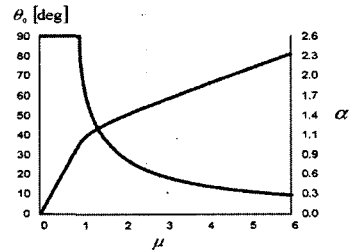


그림 3. 소성범위지표, 변위연성비 및 전단력계수의 관계

2.2 대상 구조물의 등가 모델

텐션링 위치에서의 수평변위  $u_{r0}$ 를 맨 끝의 자유도로 한 상부구조의 운동방정식은 다음 식으로 나타낸다.

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = -[M]\{\xi_x\}\ddot{u}_g \tag{1}$$

여기서  $\{D\}$ ,  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 변위 행렬, 집중질량 행렬, 감쇠 행렬, 강성행렬이다. 또한 X방향의 입력지진 가속도  $\ddot{u}_g$ ,  $\{\xi_x\}$ 는 X방향 지진동에 의한 지진영향 계수이고, 지진동을 직접 받는 X방향 변위성분에 대해서는 1, 그 이외의 성분에 대해서는 0이다. 감쇠는 강성비례형으로 가정한다.

고유치 해석을 수행하고 제 j차 고유모드에 상응하는 유효질량  $\overline{M}_j$ 와 유효강성  $\overline{K}_j$ 를 이용하여 전체 모델을 그림 4와 같이 등가 단순모델로 치환한다. 등가 단순모델에 있어서 p는 유효질량비가 90%이상 되도록 채용한 모드의 수이다.

2.3 등가 1자유도계 모델로의 치환

앞 절에서 치환된 등가 단순모델의 고유치 해석을 통하여 유효질량비가 80%이상 되도록 모드수를 선택함으로써 그림 4에 나타낸 것과 같이 등가 1자유도계로 치환한다. 구조물의 비탄성 특성을 평가하기 위해 등가감쇠계수  $h_e$ 를 조정하여 가속도 응답스펙트럼을 수정한다. 등가 1자유도계의 유효질량  $\overline{M}$ , 응답가속도  ${}_1S_a$ , 응답변위  ${}_1S_d$ 와 고유주기  ${}_1T$ 은 아래와 같다.

$${}_1\overline{M} = \frac{(m_0\mu\delta_y + \lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d \cdot \mu\delta_y)^2}{m_0(\mu\delta_y)^2 + \lambda^2\Sigma F_1 + 2\mu\delta_y\lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d(\mu\delta_y)^2} \tag{2}$$

$${}_1S_a = \frac{m_0(\mu\delta_y)^2 + \lambda^2\Sigma F_1 + 2\mu\delta_y\lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d(\mu\delta_y)^2}{(m_0\mu\delta_y + \lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d \cdot \mu\delta_y)^2} \alpha Q_y \tag{3}$$

$${}_1S_d = \frac{m_0(\mu\delta_y)^2 + \lambda^2\Sigma F_1 + 2\mu\delta_y\lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d(\mu\delta_y)^2}{\lambda \cdot m_0 \cdot g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_r \cdot \mu\delta_y + \lambda^2\Sigma F_3 + \lambda \cdot \mu\delta_y\Sigma F_4} \cdot {}_1S_a \tag{4}$$

$${}_1T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0(\mu\delta_y)^2 + \lambda^2\Sigma F_1 + 2\mu\delta_y\lambda\Sigma F_2 + \overline{M}_d(\mu\delta_y)^2}{\lambda \cdot m_0 \cdot g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_r \cdot \mu\delta_y + \lambda^2\Sigma F_3 + \lambda \cdot \mu\delta_y\Sigma F_4}} \tag{5}$$

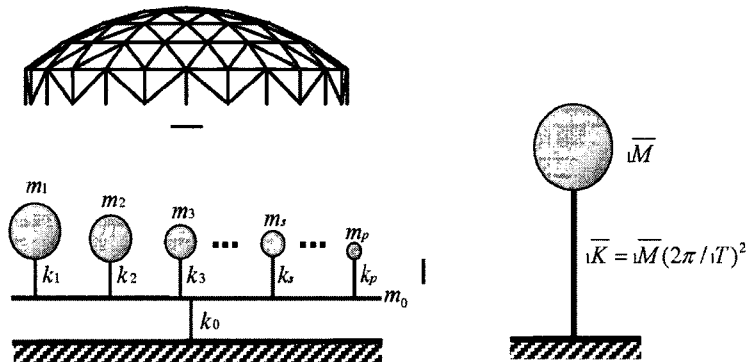


그림 4. 등가 단순모델 및 등가 1자유도계 모델로의 치환

여기서,

$$\begin{aligned} \Sigma F_1 &= \sum_{s=1}^p \eta_s^2 m_d \cdot \left( \frac{g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_s}{\omega_s^2} \right)^2, & \Sigma F_2 &= \sum_{s=1}^p \eta_s^2 m_d \cdot \frac{g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_s}{\omega_s^2} \\ \Sigma F_3 &= \sum_{s=1}^p \eta_s^2 m_d \cdot \left( \frac{g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_s}{\omega_s} \right)^2, & \Sigma F_4 &= \sum_{s=1}^p \eta_s^2 m_d \cdot g \cdot {}_1\beta \cdot {}_1U_s \end{aligned}$$

$m_0$ 는 텐션링 위치의 질량,  $\lambda$ 는 하중배율,  $\overline{M}_d$ 는 등가모델에 있어 상부구조의 질량,  ${}_1\beta$ 는 등가모델의 모드참여계수,  ${}_1U_r$ 은 r차 모드성분이다.

### 3. 단층 래티스 돔의 성능점 산정

#### 3.1 능력스펙트럼법(CSM)에 의한 성능점 산정

능력스펙트럼법은 ATC-40에서 제시하고 있는 건축 구조물의 비탄성 변형능력과 내진성능을 평가할 수 있는 방법이다. 능력스펙트럼법은 구조물이 보유하고 있는 지진에 대한 저항능력과 예상 가능한 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형식으로 서로 비교함으로써 비탄성 최대응답을 평가한다.(그림 5)

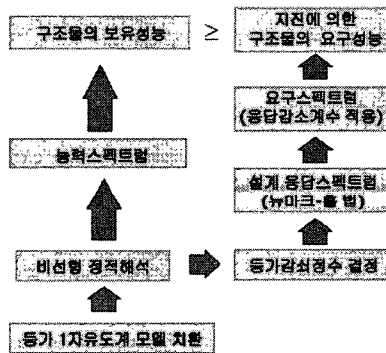


그림 5. 지진에 대한 설계개념

#### 3.1.1 능력스펙트럼(capacity spectrum)

등가 1자유도계의 응답스펙트럼해석에 의하여 산정된 구조물의 1차 모드에 대한 총전단력을 고려하여 지진하중을 분배하고 능력 스펙트럼을 작성한다.

#### 3.1.2 요구스펙트럼(demand spectrum)

지진하중에 의하여 구조물에 부가되는 요구수준은 일반적으로 주기(T)에 대한 응답가속도( $S_a$ )의 형태로 표현된다. 그러므로 구조물의 보유능력을 나타내는 능력스펙트럼과 비교하기 위해서는 동일한 좌표상에서 고려되어야 하기 때문에 응답가속도( $S_a$ )와 응답변위( $S_d$ )의 관계로 변환되어야 한다. 일반적으로 응답가속도와 응답변위와의 관계는 다음과 같다.

$$S_a = 4\pi^2 / T^2 \cdot S_d \tag{6}$$

ATC-40에서 비탄성 요구스펙트럼은 5% 감쇠비를 가지는 선형탄성 응답스펙트럼을 기준으로 구조물의

비탄성 변형에 의하여 평가될 수 있는 등가감쇠계수( $h_e$ )를 조정함으로써 응답스펙트럼의 비탄성 특성을 고려한다. 본 논문에서는 ATC-40에 준하여 그림 6에 나타낸 것과 같이 등가감쇠계수를 뉴마크와 홀(Newmark-Hall)의 지반운동 증폭계수를 이용한 응답감소계수(spectrum reduction factor)로 산정하며, 가속도구간 및 속도구간으로 구분하여 각각 다르게 적용한다. 가속도구간의 응답감소계수( $SR_A$ )와 속도구간의 응답감소계수( $SR_V$ )는 다음 식과 같이 산정된다.

$$SR_A = \{3.21 - 0.681\ln(h_e)\} / 2.12, \quad T \leq T_0 \tag{7-1}$$

$$SR_V = \{2.31 - 0.41\ln(h_e)\} / 1.65, \quad T > T_0 \tag{7-2}$$

### 3.1.3 성능점(performance point)

두 스펙트럼의 교차점인 성능점은 시스템의 동적 평형상태를 의미하며, 최대변위에서의 강성과 강도에 대한 영향을 매우 효과적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다. 능력스펙트럼과 요구스펙트럼이 교차되는 성능점은 그림 7과 같이 구조물의 저항능력과 고려하는 지진하중의 요구수준이 일치하는 점으로 평가된다. 그리고 성능점은 특정 지반운동에 대한 구조물의 손상 정도를 나타낼 수 있는 중요한 평가지수가 된다. 성능점을 이용하여 시스템의 변형정도를 파악하고, 비탄성 지진응답에 의한 구조물의 파괴메카니즘을 효과적으로 예측할 수 있다. 그러므로 능력스펙트럼법(CSM)을 이용한 시스템 연성요구도의 산정은 구조물의 능력스펙트럼에서 결정되는 항복변위와 성능점에서의 변위에 대한 비로서 평가할 수 있다.

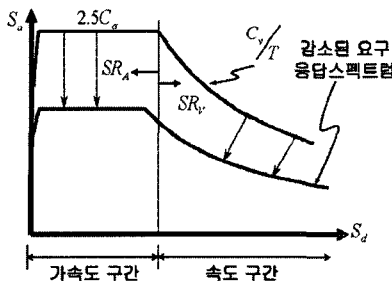


그림 6. 응답감소계수(SR)

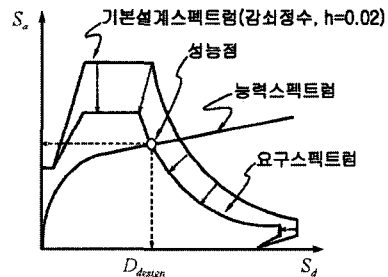


그림 7. 성능점의 산정

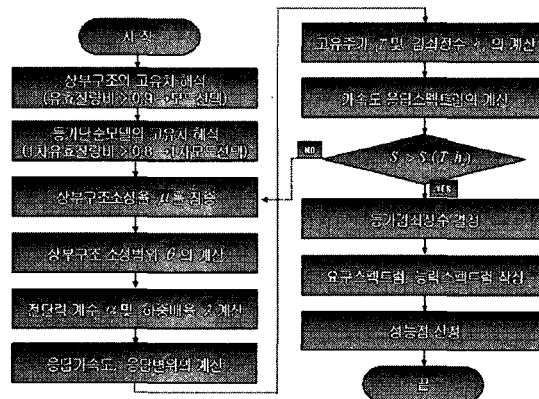


그림 8. 성능점 산정 수치해석 알고리즘

3.1.4 성능점 산정 수치해석 알고리즘

상부구조만을 대상으로 고유치 해석을 수행하고 질량 참여율이 90%되는 모드를 선택하여 등가단순모델을 구성한다. 다음 구성된 등가단순모델을 대상으로 고유치 해석을 수행하여 1차 진동모드, 모드참여계수를 구한다. 앞서 계산된 값을 이용하여, 등가가속도  ${}_1S_a$ 가 응답스펙트럼 값  $S_a({}_1T, h_e)$ 보다 크게 될 때까지 소성을  $\mu$ 를 점증시킨다. 이때 결정된 소성율로 등가감쇠계수를 결정하고, 능력스펙트럼과 요구스펙트럼을 산정하여 성능점을 구할 수 있다.

3.2 해석 모델 (패러럴 라멜라 돔)

해석 모델은 상부 돔 구조는 단층의 패러럴 라멜라 돔으로 스펠 40m, 반개각 30°, 절점 61개, 부재 156개, 지지점 24개이고, 하부 구조는 절점 48개, 부재 48개, 지점 24개인 트러스 요소로 이루어진 모델이다. 탄성계수는  $2,100tf/cm^2$ , 부재는 단면적  $12cm^2$ 인 원형 강관을 사용하였다.

X방향의 수평 입력 지진파로 El-Centro NS파(1940)를 사용한다. 그리고 입력 지진파는 0.01초 간격이고, 해석시간 증분은 0.01초, 해석 시간은 20초로 하였다. 감쇠는 강성비례형을 사용하고, 질량행렬은 집중질량행렬을 이용한다.

3.2.1 고유치 해석 결과

상부구조에 대하여 고유치 해석을 수행하고 등가 모델을 구성한다. 모드 참여계수  $\eta_s$ 는 큰 모드로부터 차례로 채용하는 것으로 한다. 상부구조를 정확히 해석하기 위해서는 상부구조 유효질량비  $\sum \eta^2$ 을 0.9이상으로 한다.

그림 11은 해석 모델의 고유치 해석에 따른 모드와 모드 참여계수를 나타낸 것으로 모드참여계수가 큰 순서대로 나열하여 전체 111개의 모드 중에서 7개의 모드를 나타낸 것이다. 본 해석 모델에서는 7개의 모드를 적용하였다.

하부구조를 탄성으로 하여 등가 모델의 고유치 해석을 수행하고 그 결과를 그림 9~11에 나타내었다. 해석결과 1차 모드의 유효질량비  ${}_1M_{el}/M$ 은 0.9437이다.

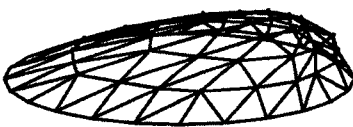


그림 9. S=1 상부구조의 1차모드

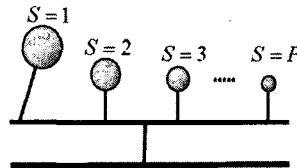


그림 10. 등가모델의 1차 모드

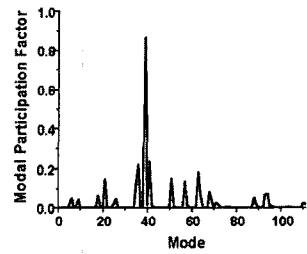


그림 11. 해석 모델의 모드와 모드참여계수

표 1. 등가 1자유도계 모델의 고유치 해석 결과

$i$	모드참여계수( $\eta_i$ )	모드	유효질량비( $\sum_{i=1}^n \eta_i^2$ )
1	0.9714	1	0.9437

3.2.2 지진파에 따른 성능점 산정

그림 12의 (a)는 EL-Centro 지진하중을 받는 래티스돔의 성능점을 구한 결과이다.  $r=1.0$ 에서는 하부구조가 탄성이기 때문에 응답변위-응답가속도관계( ${}_1S_a - {}_1S_d$ )는 선형관계가 된다. 반면,  $r=0.2$ 에서는 소성후의 강성이 작기 때문에 비선형성이 강하게 되며, 설계용 가속도 응답스펙트럼이 작게 되는 영역까지 고유주기가 길게 되는 것을 알 수 있다. 또한  $r=1.0$  일때와  $r=0.2$ 일때의 성능점을 비교하면 하부구조가 소성화 됨에 따라 응답가속도 값이 30%정도 줄어들음을 알 수 있다.

또한, 패러렐 라멜라 돔의 하부구조의 강성비에 따라 성능점을 구한 결과,  $r=0.2$ 일때는 11.67cm,  $r=0.5$ 일때는 9.63cm,  $r=1.0$ 일때는 8.46cm의 결과를 얻을 수 있다.

그림 12의 (b)는 Northridge NS 지진하중을 받는 래티스돔의 성능점을 구한 결과이다.  $r=1.0$ 에서는 하부구조가 탄성이기 때문에 응답변위-응답가속도관계( ${}_1S_a - {}_1S_d$ )는 선형관계가 된다. 반면,  $r=0.2$ 에서는 소성후의 강성이 작기 때문에 비선형성이 강하게 되며, 설계용 가속도 응답스펙트럼이 작게 되는 영역까지 고유주기가 길게 되는 것을 알 수 있다. 또한  $r=1.0$  일때와  $r=0.2$ 일때의 성능점을 비교하면 하부구조가 소성화 됨에 따라 응답가속도 값이 39%정도 줄어들음을 알 수 있다.

또한, 패러렐 라멜라 돔의 하부구조의 강성비에 따라 성능점을 구한 결과,  $r=0.2$ 일때는 11.12cm,  $r=0.5$ 일때는 9.06cm,  $r=1.0$ 일때는 8.35cm의 결과를 얻을 수 있다.

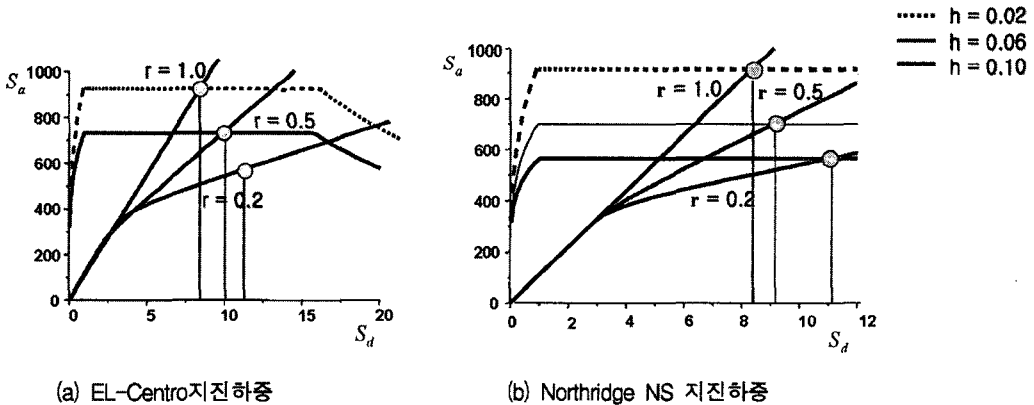


그림 12 하부구조의 강성의 변화에 따른 성능점 산정

4. 결론

본 연구에서는 하부구조의 영향을 고려한 대공간 구조 시스템의 지진 응답 해석을 수행하기 위하여 등가 단순모델 및 등가 1자유도계 모델을 제안하였다. 또한, 현재 활발히 수행되고 있는 성능 기반 설계법 (Performance-Based Design) 중 해석 방법의 하나인 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 적용하여 대공간 구조물에 대한 비선형 정적해석을 통해 구조물의 내진성능을 평가하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 등가 1자유도계 모델에 의한 대공간 구조물의 응답과 전체 모델의 시간이력 해석 결과와의 오차는 다음과 같다. 패러렐 라멜라 돔인 경우 수평 변위 응답은 약 3~8퍼센트, 연직 변위 응답은 약 7~25퍼센트의 오차를 나타냈다. 또한 패러렐 스웨들러 돔인 경우는 수평 변위 응답과 연직 변위 응답에서 약 5~30퍼센트의 오차를 보이고 그 중 최대변위가 발생할 때는 약 5~7퍼센트의 오차를 나타낸다. 또한 라멜라 네트워크

동은 수평 변위의 응답은 약 9~16퍼센트, 연직 변위 응답은 약 10~14퍼센트의 오차를 보이고 있어 등가 1 자유도계 모델을 대공간 구조물의 해석에 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다.

(2) 치환된 등가 1자유도계 모델을 이용하여 비선형 정적해석을 통해 변위연성비와 등가감쇠정수를 결정하여 요구스펙트럼과 능력스펙트럼을 작성함으로써 성능점을 산정한 결과, 등가 1자유도계에 의한 비선형 지진응답을 이용하여 구조물이 보유하고 있는 저항능력과 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형식으로 서로 비교함으로써 비탄성 최대응답을 평가하는 해석 방법을 제시할 수 있다.

(3) 본 연구에서 가정한 구조물의 항복 조건이 허용되는 범위 내에서 성능점 평가 시 구조물이 탄성인 경우에는 응답변위와 응답가속도 관계가 선형관계가 되고, 하부구조의 소성 변형 후에는 강성이 작아지기 때문에 비선형성이 나타나게 된다. 또한 응답 가속도스펙트럼이 감소된 만큼 고유주기가 길어진다. 고유주기가 길어진다는 것은 변위연성비가 커짐을 나타내므로, 구조물의 에너지 흡수능력이 증대됨을 의미한다. 하부구조물이 탄성인 경우와 소성 후의 결과를 비교하면 응답가속도값은 소성화됨에 따라 30~50%정도 저감됨을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- Kato, S., Nakazawa, S., Ueki, T., Uchikoshi, M. and Osugi, F. (1998) Earthquake Response of Domes implemented by Hysteresis Dampers for Earthquake Isolation, *Lightweight Structures in Architecture, Engineering and Construction, IASS/IEAust/LSAA International Congress*, pp.451-459, Sydney.
- 加藤 史郎 (2003) 空間構造の地震應答分析と設計法に関する研究, 豊橋技術科學大學.
- 崔原豪 (2003.10) 等價應答을 利用한 建築構造物의 非彈性 地震舉動 分析 및 耐震性能 評價, 成均館大學校 博士學位 請求論文.
- Chopra, A. K. (2001) *Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Meirovitch, L. (1980), *Computational Methods in Structural Dynamics*, Sijthoff & Noordhoff, Maryland.
- 정명채 외 (2002.12) 능력스펙트럼에 의한 복층 래티스들의 성능점산정에 관한 연구, 전주대학교 공학기술종합연구소 학술논문집.
- 김홍진 외 (2004) 능력스펙트럼법에서의 요구곡선의 산정에 관한 연구, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집.
- ATC (1996) *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.*
- 포스코개발주식회사 MIDAS-GENw User's Manual.