

# 구조물의 동적 고유특성을 이용한 새로운 집중질량모델 개발

## Development of a New Lumped-Mass Stick Model using the Eigen-Properties of Structures

노화성<sup>1)</sup> · 윤지만<sup>2)</sup> · 이후석<sup>3)</sup> · 이종세<sup>4)</sup>

Roh, Hwasung · Youn, Jiman · Lee, Huseok · Lee, Jong Seh

**국문 요약** >> 구조물의 내진설계 또는 내진성능평가를 위해서는 구조물의 축소모형을 이용한 실험적 분석이나 유한요소모델을 기반으로 한 수치적 방법이 고려된다. 수치적 방법을 위해서는 정교한 모델링이 요구될 경우 3차원 유한요소해석을 실시하나 민감도 분석이나 지진 취약도 분석과 같은 방대한 지진데이터를 이용한 평가에서는 집중질량모델이 선호된다. 하지만 기존의 집중질량모델은 일반적으로 구조물의 기하학적 형상을 고려하여 집중질량을 산출하는 방식인데, 이 경우 제공되는 고유치는 실구조물의 고유치와 일치하지 않는다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고 실구조물과 유사한 동적 거동을 발현하는 새로운 형식의 주파수 순응형 집중질량모델을 제안하였다. 제안된 모델은 실구조물의 고유치와 고유 벡터, 모드 형상 등을 고려하여 생성하며, 모델의 성능을 검증하기 위해 비균일 단면을 갖는 기둥에 대해 동적해석을 수행하였다. 또한 감쇠비에 따른 동적성능을 분석하기 위해 1%에서 5%까지의 Rayleigh Damping 적용하여 그 결과를 유한요소모델 결과와 비교하였다.

**주요어** 주파수 순응형 집중질량모델, 고유치, 유한요소모델, 동적해석, 감쇠비

**ABSTRACT** >> For a seismic design or performance evaluation of a structure, an experimental investigation on a scale model of the structure or numerical analysis based on the finite element model is considered. Regarding the numerical analysis, a three-dimensional finite element analysis is performed if a high accuracy of the results is required, while a sensitivity or fragility analysis which uses huge seismic ground motions leads to the use of a lumped-mass stick model. The conventional modeling technique to build the lumped-mass stick model calculates the amount of the lumped mass by considering the geometric shape of the structure, like a tributary area. However, the eigenvalues of the conventional model obtained through such a calculation are normally not the same as those of the actual structure. In order to overcome such a deficiency, in this study, a new lumped mass stick model is proposed. The model is named the "frequency adaptive-lumped-mass stick model." It provides the same eigenvalues and similar dynamic responses as the actual structure. A non-prismatic column is considered as an example, and its natural frequencies as well as the dynamic performance of the new lumped model are compared to those of the full-finite element model. To investigate the damping effect on the new model, 1% to 5% of the critical damping ratio is applied to the model and the corresponding results are also compared to those of the finite element model.

**Key words** Frequency adaptive-lumped-mass stick model, Eigenvalues, Finite element model, Dynamic analysis, Damping ratio

## 1. 서론

구조물의 내진 설계 및 성능평가를 위해서는 유한요소모

델이나 집중질량모델(Lumped-Mass Stick Model)을 이용한다. 구조물의 정교한 모델링을 바탕으로 하는 유한요소해석(FEA)은 수치적인 방법 중 가장 정확한 방법 중 하나이다. 이에 반해 집중질량모델은 구조물을 기둥(Sticks)과 기둥 양끝단에 질량을 집중시키는 간략화된 모델링 방법으로 동적해석 시간을 상당히 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 이유로 다소 정확도가 떨어져도 구조물의 내진해석, 민감도 해석, 지진취약도 분석과 같이 많은 지진데이터를 이용하는 동적해석에서는 집중질량모델을 이용하는 방법이 선호된다. 일반적으로 집중질량모델에서는 구조물의 기하학적 형상(Tributary Area)을 고려하여 각 절점에 부여

<sup>1)</sup> 정희원·한양대학교, 연구교수

<sup>2)</sup> 한양대학교, 석사과정

<sup>3)</sup> 한양대학교, 박사과정

<sup>4)</sup> 정희원·한양대학교, 교수

(교신저자: jonglee@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 5. 25 / 수정일 1차: 2012. 6. 21, 2차: 2012. 6. 22 / 게재확정일 : 2012. 6. 29)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

되는 집중질량과 강성을 산출하는 방법이 가장 많이 사용된다.<sup>(1)</sup> Bose et al.<sup>(2)</sup>은 변형에너지를 이용하는 새로운 집중질량모형을 개발하여 기존의 방법과 비교하였으며 각 방법들이 모두 유한요소모델과 비교하여 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다. 그러나 각 모델들의 고유진동수는 모드의 차수가 증가할수록 일치하지 않았다. 본 연구에서는 실구조물에서 동적해석에 필요한 모드들을 선택한 후 선택된 모드의 고유진동수가 거의 일치하는 새로운 기법의 집중질량모형을 제안했다. 이 새로운 모델은 실구조물의 고유치와 모드형상, 그리고 각 모드별 질량참여도 등과 같은 동적특성을 이용하여 집중질량을 결정하는 기법이다. 제안된 집중질량모형의 동적성능 검증을 위해 시간이력해석을 수행하였으며, 유한요소모델의 결과와 비교하였다.

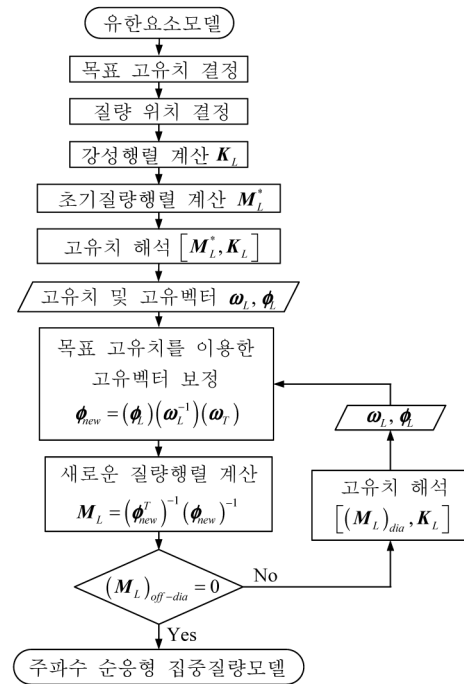
## 2. 고유특성을 이용한 집중질량모형의 개발

### 2.1 개발 절차

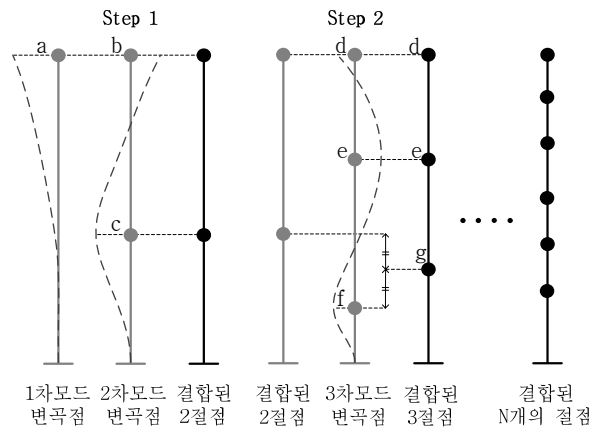
본 연구에서 제안된 집중질량모형을 만들기 위해 먼저 실구조물에 대한 유한요소모델을 작성한 후 고유치해석을 수행한다. 이를 바탕으로 질량참여율이 90%를 초과하거나 설계응답스펙트럼의 최대주파수까지 포함하는 모드를 선택한다. 이와 같이 선택된 유한요소모델의 고유치를 본 논문에서는 ‘목표고유치’라 명명하였다. 집중질량모형의 목표고유치가 결정되었으면 각 목표고유치의 모드형상에서 변곡점들(Vertex)의 위치를 확인하고 순차적으로 선형보간하여 집중질량(절점) 위치를 결정한다. 여기에서 각 질량의 위치 또는 절점을 연결하는 기둥(Sticks)의 강성은 실구조물과 동일한 정적거동이 나오도록 실제의 강성을 적용한다. 기하학적 형상을 고려한 질량에 위에서 결정된 기둥의 강성과 목표고유치의 조합으로 새로운 질량행렬을 산출한다. 이 과정에서 얻어진 질량행렬이 대각선행렬이 아닐 경우 대각선행렬(Diagonal Elements)만 추출하여 질량행렬을 다시 산출한다. 이러한 과정을 반복하면 실구조물의 목표고유치와 일치하는 대각선 질량행렬을 얻게 된다. 그림 1은 위의 제안된 집중질량모형의 개발 절차를 도식화한 것이며, 자세한 방법은 다음 2.2와 2.3장에 기술하였다.

### 2.2 집중질량의 위치결정

일반적으로 건물과 같이 층의 구분이 명확한 구조물은 집중질량모형으로 간략화시킬 경우 집중질량의 위치는 일반적으로 층의 위치 또는 Beam-Column 연결부가 된다. 하지만 층의 구분이 불명확한 구조물의 경우에는 공학적으로 응답



〈그림 1〉 제안된 집중질량모형의 개발 절차



〈그림 2〉 절점의 위치 결정 과정

의 측정이 필요한 위치에 집중질량을 위치시키며, 대표적으로 원자력 발전소의 원전격납건물이 이에 해당된다.<sup>(3-5)</sup> 본 연구에서는 집중질량위치를 결정하기 위해 유한요소모델의 목표고유치에 해당하는 각 모드의 형상(Mode-Shape)을 바탕으로 하는 방법을 제안하였다. 예를 들기 위해 그림 2에 기둥의 3차까지의 모드형상을 나타내었다. 각 모드형상에서 나타난 변곡점(Vertex)의 위치(점 a, b, c, d, e, f)를 찾아 저차 모드의 변곡점부터 순차적으로 선형보간하여 집중질량의 위치를 결정한다. 그림 2에서 Step 1은 1차 모드와 2차 모드의 변곡점을 결합하여 질량 위치를 결정하기 위한 과정이다. 모델의 최상부에서 두 모드의 변곡점이 동일하기 때문에 질량의 위치는 2차 모드의 변곡점 위치와 동일하게 된다. 다음 Step 2에서는 Step 1에서 결정된 위치와 3차 모

드의 변곡점을 선형보간하여 새로운 위치를 결정한다(점 d, e, g). 3차 모드에서는 최상부의 변곡점 위치를 제외하고 두 개의 변곡점이 존재하므로 Step 1에서 결정된 절점과 가까운 변곡점을 결합시켜 새로운 위치를 결정하고 나머지 변곡점은 위치 변경 없이 그대로 유지되어 총 3개의 집중질량 위치가 결정된다. 4차 이상의 모드를 고려할 경우에도 이와 같은 방법으로 보간을 실시한다. 이때 질량의 최종 개수는 고려된 목표고유치의 총 개수와 같게 된다.

### 2.3 제안된 집중질량모델의 질량계산

각 절점의 질량을 계산하기 위해 강성과 질량 관계식인  $\mathbf{K}_L \boldsymbol{\phi} = \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\omega}^2$ 을 이용하였다. 여기에서  $\mathbf{K}_L$ 는 집중질량모델의 수평강성 행렬 또는 Static Condensed Stiffness Matrix이며 휨강성과 전단강성의 조합으로 구성된다. 이 강성들은 실구조물의 단면이 일정할 경우에는 일반적으로 이론식으로 계산할 수 있으나 단면이 불규칙하게 변할 경우 Push-Over 해석을 통해 얻어진 힘-변위관계를 이용하여 등가강성으로 계산된다.

산출된 강성행렬( $\mathbf{K}_L$ )과 목표고유치( $\boldsymbol{\omega}_T$ ), 그리고 유한요소모델의 Maximum Normalized Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}$ )을 이용하여 초기질량행렬( $\mathbf{M}_L^0$ )을 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\mathbf{M}_L^0 = \left( (\boldsymbol{\phi}^T)^{-1} (\boldsymbol{\omega}_T^2) (\boldsymbol{\phi})^{-1} \right)^{-1} \mathbf{K}_L \quad (1)$$

이 때, 유한요소모델의 Maximum Normalized Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}$ )은 목표고유치 행렬과 동일한 크기(Dimension)을 가지고 있어야 하므로 집중질량 위치에 일치하는 값들만 구성되어야 한다. 이 때 Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}$ )은 특정위치의 값만을 추출하여 을 구성하였으므로 직교성을 상실되게 된다. 따라서 식 (1)에서 구한 초기질량행렬( $\mathbf{M}_L^0$ )는 대각선 행렬로 나타나지 않게 되고 식 (2)와 같이 행렬전체에서 값을 갖는 Full-Matrix가 된다.

$$\mathbf{M}_L^0 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1N} \\ m_{21} & \cdots & \cdots & m_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{N1} & m_{N2} & \cdots & m_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 질량행렬을 대각선 행렬로 만들기 위해 다음과 같은 절차를 수행하였다. 식 (2)에서 계산된 질량행렬에서 각 행들의 값들을 합하여 식 (3)과 같은 대각선 초기질량행렬

( $\mathbf{M}_L^*$ )을 구한다. 이는 각 모드에 분포되는 질량의 분포를 최대한 반영하기 위한 절차이다.

$$\mathbf{M}_L^* = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N m_{1i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^N m_{2i} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \sum_{i=1}^N m_{Ni} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 대각선 초기질량행렬( $\mathbf{M}_L^*$ )과 강성행렬( $\mathbf{K}_L$ )에 대한 고유치 해석을 수행하여 구해진 고유치 행렬( $\boldsymbol{\omega}_L$ )과 Mass Normalized Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}_L$ )을 강성행렬( $\mathbf{K}_L$ )의 구성요소로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{K}_L = (\boldsymbol{\phi}_L^T)^{-1} (\boldsymbol{\omega}_L^2) (\boldsymbol{\phi}_L)^{-1} \quad (4)$$

식 (4)의 강성행렬은 어떤 경우에도 항상 그 값을 유지하므로 만약 목표고유치 행렬( $\boldsymbol{\omega}_T$ )과 임의의 새로운 Mass Normalized Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}_{new}$ )의 조합으로 강성행렬을 표현하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(\boldsymbol{\phi}_L^T)^{-1} (\boldsymbol{\omega}_L^2) (\boldsymbol{\phi}_L)^{-1} = (\boldsymbol{\phi}_{new}^T)^{-1} (\boldsymbol{\omega}_T^2) (\boldsymbol{\phi}_{new})^{-1} \quad (5)$$

우변항의 목표고유치 행렬( $\boldsymbol{\omega}_T$ )을 좌변항으로 이항하여 정리하면 식 (6)과 같은  $\boldsymbol{\phi}_{new}$ 가 정의된다.

$$\boldsymbol{\phi}_{new} = (\boldsymbol{\phi}_L) (\boldsymbol{\omega}_L)^{-1} (\boldsymbol{\omega}_T) \quad (6)$$

이 Mass Normalized Eigenvector 행렬( $\boldsymbol{\phi}_{new}$ )을 이용하여 새로운 질량행렬( $\mathbf{M}_{new}$ )을 식 (7)과 같이 계산한다.

$$\mathbf{M}_{new} = (\boldsymbol{\phi}_{new}^T)^{-1} (\boldsymbol{\phi}_{new})^{-1} \quad (7)$$

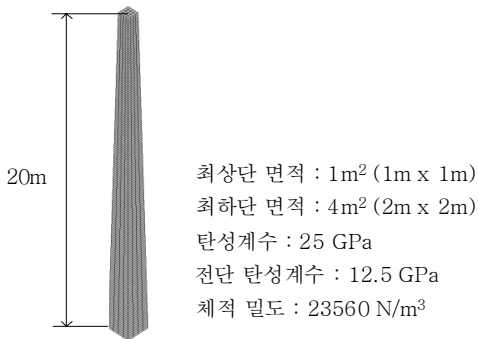
이 때,  $\mathbf{M}_{new}$ 의 대각선 요소(Diagonal Elements)의 값들만 추출하여 식 (4)부터 식 (7)까지의 과정을 반복하면 목표고유치와 일치하면서 대각선 행렬을 이루는 질량행렬이 구해진다. 최종적으로 구해진 질량행렬을 갖는 집중질량모델이 본 연구에서 제안하는 주파수 순응형 집중질량모델이며 다음 장에서 이 개발 과정을 예제를 통해 설명하였다.

### 3. 비균일 단면 기둥을 이용한 모델 검증

#### 3.1 집중질량모델 작성

제안된 집중질량모델의 동적성능을 검증을 위하여 그림 3과 같이 높이에 따라 단면적이 변화하는 기둥을 고려하였다. 이 비균일 단면 기둥의 높이는 20m 이며 3차원 Solid 요소를 사용하여 모델링하였다.

표 1은 이 기둥에 대한 고유치해석을 통해 얻어진 결과를 정리한 것이다. 질량참여도가 90% 초과되는 시점이 7차 모드이므로 목표고유치( $\omega_T$ )를 7차 모드까지로 선정하였다. 각 모드형상을 바탕으로 선형보간하여 그림 4와 같이 최종 집중질량의 위치를 결정하였다. 휨강성과 전단강성으로 구성된 집중질량모델의 강성행렬을 구하기 위해 먼저 각 단면의 등가유효 전단면적을 고려하여 전단강성( $k_s$ )을 이론적으로 구했다. 휨강성은 직접적으로 구하는 게 어려우므로 Push Over 해석을 수행하여 등가수평강성( $k_f$ )을 계산한 후, 앞서 계산된 전단강성과의 관계( $k_f = k_b \cdot k_s / (k_b + k_s)$ )를 고려하여 산출하였다. 이러한 방법으로 각 Stick Member의 휨강성과 전단강성을 산출한 후, 이를 이용하여 집중질량모델의 Static Condensed Stiffness Matrix( $K_L$ )을 결정한다.



〈그림 3〉 비균일 단면 기둥의 형상 및 유한요소모델링(SAP2000<sup>6)</sup>)

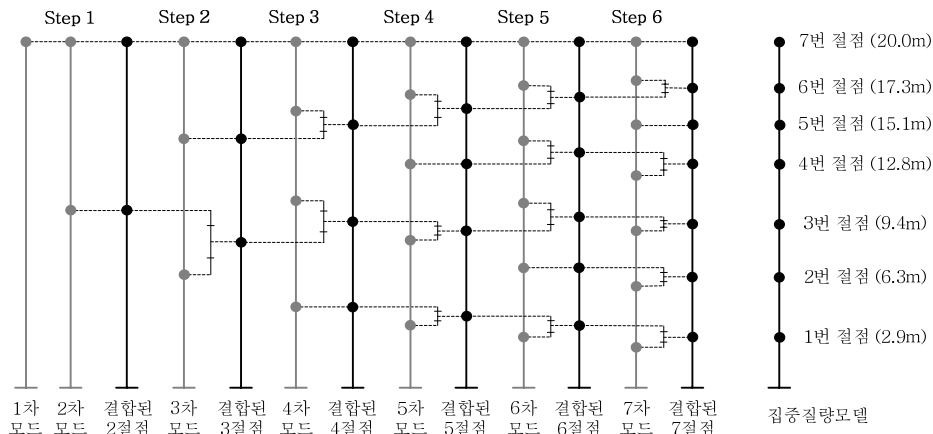
식 (1)과 같이 강성행렬과 목표고유치, 절점 또는 질량위치에 해당하는 유한요소모델의 Maximum Normalized Eigenvector 값을 이용하여 질량행렬을 구하고, 이 질량행렬의 각 행들을 더하여 식 (3)과 같은 대각선 초기질량행렬( $M_L^*$ )을 구했다. 이 대각선 초기질량행렬( $M_L^*$ )과 강성행렬( $K_L$ )을 이용하여 고유치해석을 수행한 결과를 표 2에 정리하였다. 표 2의 고유치는 표 1의 유한요소모델의 고유치와 비교하여 6차 모드에서 최대 11.84%의 오차율을 보이며, 모든 모드에서 평균 5.56%의 오차율을 보임을 알 수 있다. 식 (4)부터 식 (7)의 과정을 목표고유치와의 오차율이 0.5% 이하가 될 때까지 반복하여 실행하면 표 3과 같은 최종 질량행렬의 값을 얻을 수 있다. 그림 5와 6, 7은 반복횟수에 따른 고유치와 질량행렬의 변화를 나타낸 것이며, 이 때 계산시간은 1초 이

〈표 1〉 집중질량모델의 목표 고유치

모드 차수	고유치(rad/sec)	고유진동수(Hz)	질량참여도(%)
1차 모드	21.415	3.408	45.46
2차 모드	88.706	14.118	66.69
3차 모드	213.502	33.980	76.71
4차 모드	387.047	61.600	82.52
5차 모드	600.313	95.543	86.31
6차 모드	844.585	134.420	88.97
7차 모드	1112.693	177.091	90.93

〈표 2〉 대각선 초기질량행렬을 이용한 고유치 해석결과

모드 차수	고유치 (rad/sec)	고유진동수 (Hz)
1차 모드	22.343	3.556
2차 모드	92.466	14.716
3차 모드	218.634	34.797
4차 모드	391.958	62.382
5차 모드	536.784	85.432
6차 모드	737.941	117.447
7차 모드	1121.462	178.486

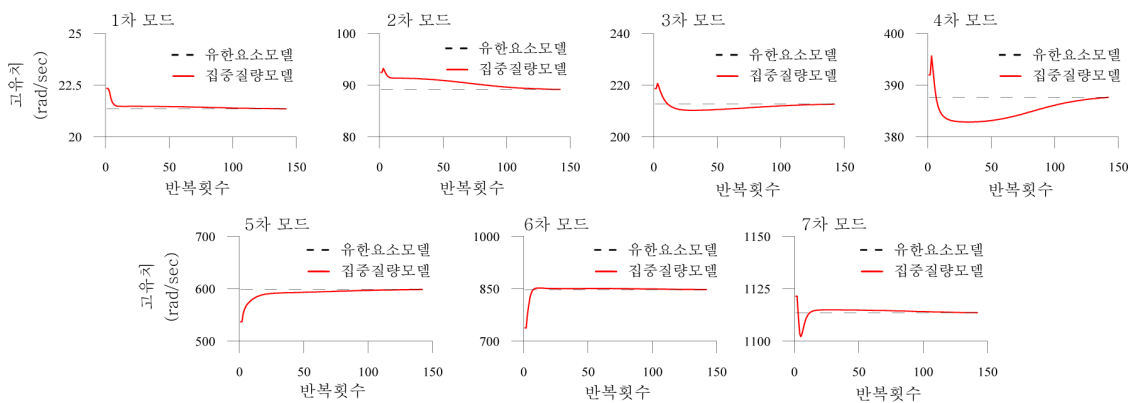


〈그림 4〉 비균일 단면 기둥의 질량위치 결정 과정

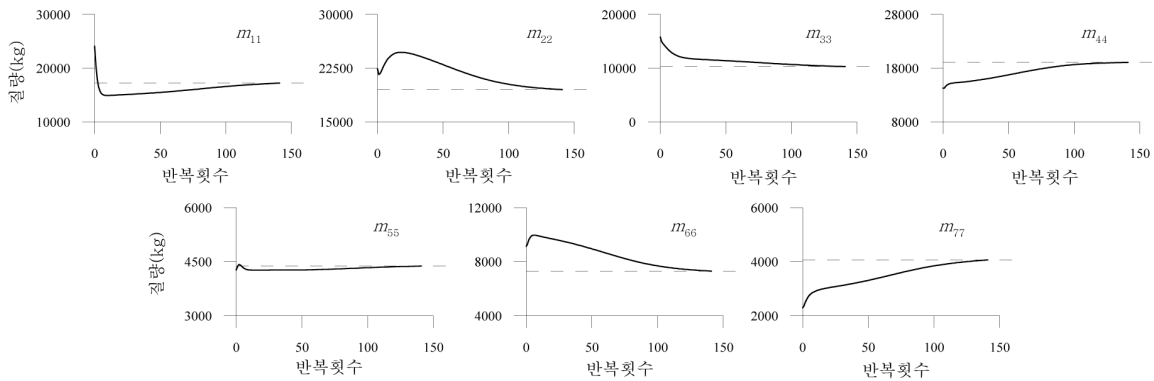
〈표 3〉 대각선 초기 및 최종 질량행렬

질량값	대각선 초기질량행렬 $M_i^*$ (kg)	최종 질량행렬 $M_{new}$ (kg)
$m_{11}$	24113.888	17241.673
$m_{22}$	22432.830	19521.272
$m_{33}$	15791.806	10301.776
$m_{44}$	14279.981	19070.274
$m_{55}$	4269.818	4375.764
$m_{66}$	9134.520	7301.995
$m_{77}$	2287.604	4063.531

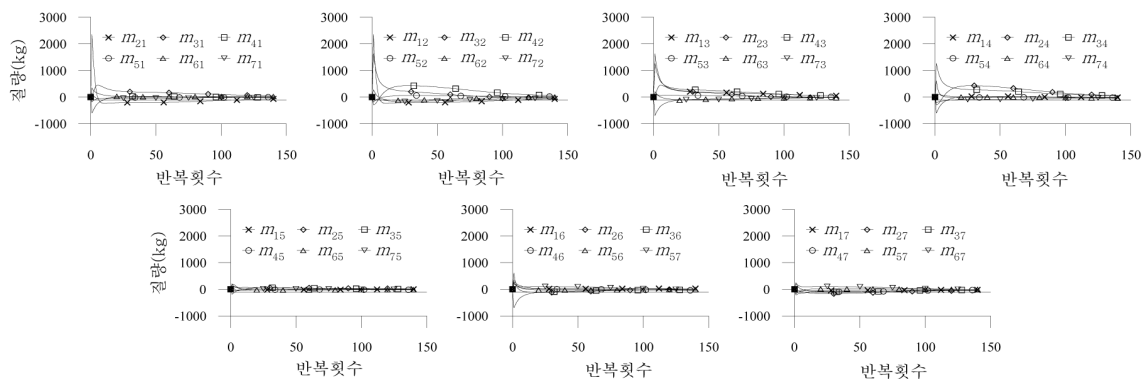
하의 매우 적은 시간을 소요되었다. 반복횟수가 증가할수록 집중질량모델의 고유치는 목표고유치에 수렴함을 알 수 있다. 또한 그림 6과 7에서 보듯이 대각선 행렬은 점차 어느 일정한 값에 수렴하고 나머지 행렬요소들(Off-Diagonal Elements)은 “0”에 수렴함을 알 수 있다. 이 때 대각선 행렬 이외의 값들의 변화는 모델의 상부보다 하부에서 크게 나타났으며 이는 기둥 하부의 질량이 집중질량모델의 고유치변화에 많은 영향을 주고 있음을 의미한다. 최종 집중질량의 크기는 81,876.29kg으로 유한요소모델의 73.03%로 작게 나타났다.



〈그림 5〉 집중질량모델의 목표고유치 수렴 과정



〈그림 6〉 질량행렬의 대각선 요소의 변화

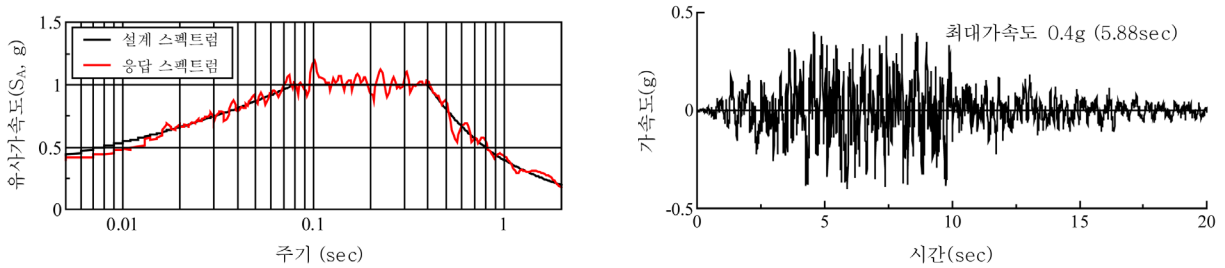


〈그림 7〉 대각선 이외의 질량행렬 요소의 변화

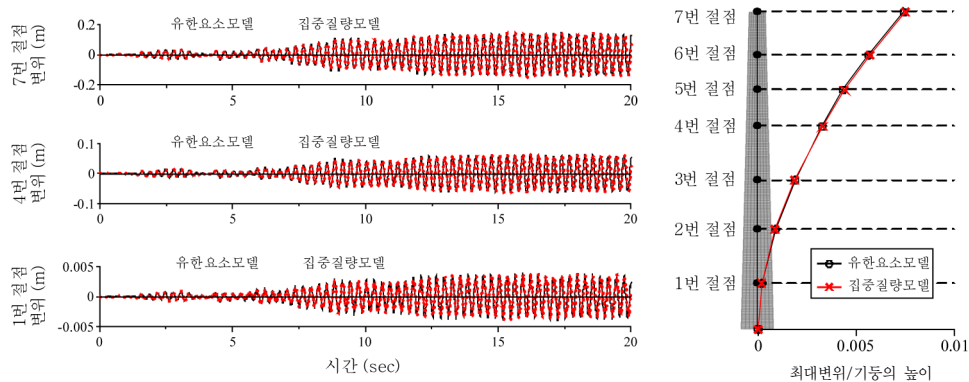
### 3.2 시간이력해석

시간이력해석에 사용된 인공지진하중은 미국토목학회의 ASCE/SEI 7-10<sup>(7)</sup>에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 사용하였다. 이를 바탕으로 SIMQKE<sup>(8)</sup>를 사용하여 그림 8과 같은 인공지진파를 생성하였다. 최대지반가속도(PGA)는 0.4g 이고 지속시간은 20초로 고려하였다. 시간이력해석시 구조물의 감쇠비는 고려하지 않았다. 그림 9는 집중질량모델과 유한요소모델의 하부(1번 절점), 중앙부(4번 절점), 상부(7번 절점)의 변위응답과 각 절점별 최대변위를 비교한 것이다. 시간이력해석 결과 두 모델의 변위응답은 매우 일치하게 나타났다. 그림 10은 7번 절점의 가속도 응답과 각 절점의 최대가속도 응답이다. 두 모델의 고유치가 7차까지 일치

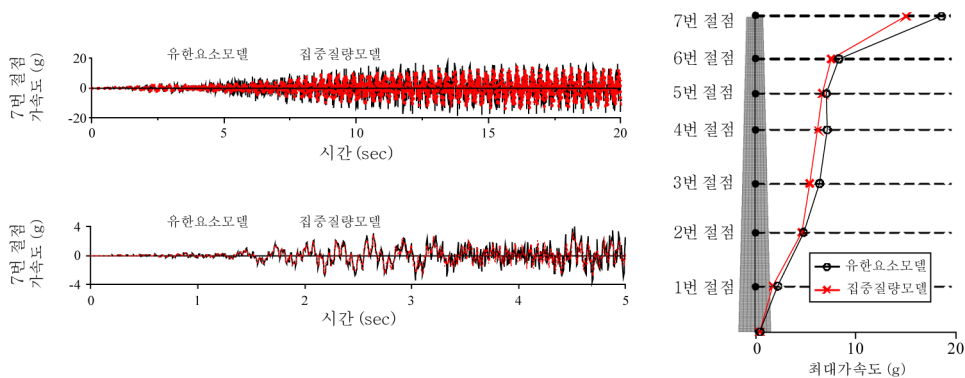
하므로 시간에 따른 응답이력(Phase)은 거의 일치함을 알 수 있다. 최대가속도는 대체로 유사한 경향을 보였지만 3, 4, 7번 절점에서 다소 작게 나타났다. 이는 집중질량모델의 총 질량이 실구조물(유한요소모델)의 질량보다 다소 작게 산출되어 이에 따른 지반하중의 크기 또한 작게 입력되기 때문이다. 따라서 목표고유치를 보다 높게 설정하여 집중질량의 크기를 증가시키면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이를 검증하기 위하여 질량참여율을 95%까지 고려해 11차의 목표고유치를 갖는 집중질량모델을 만들었다. 이 모델의 최종질량은 94,797.06kg으로 유한요소모델의 총 질량에 85%이다. 그림 11은 유한요소모델과 질량참여율 90%, 95%를 고려한 집중질량모델의 최대가속도응답을 비교한 것이다. 질량참여율 95%를 더 고려한 집중질량모델의 3번 절점과 4



〈그림 8〉 설계스펙트럼 및 생성된 인공지진파

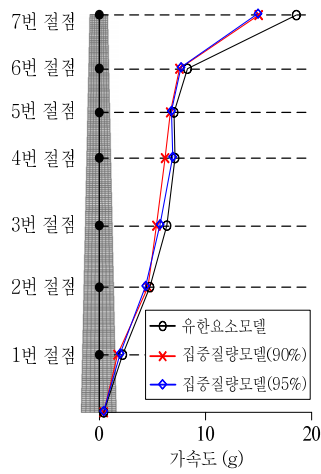


〈그림 9〉 유한요소모델과 집중질량모델의 변위응답 및 최대 변위 비교



〈그림 10〉 유한요소모델과 집중질량모델의 가속도응답 및 최대가속도 비교

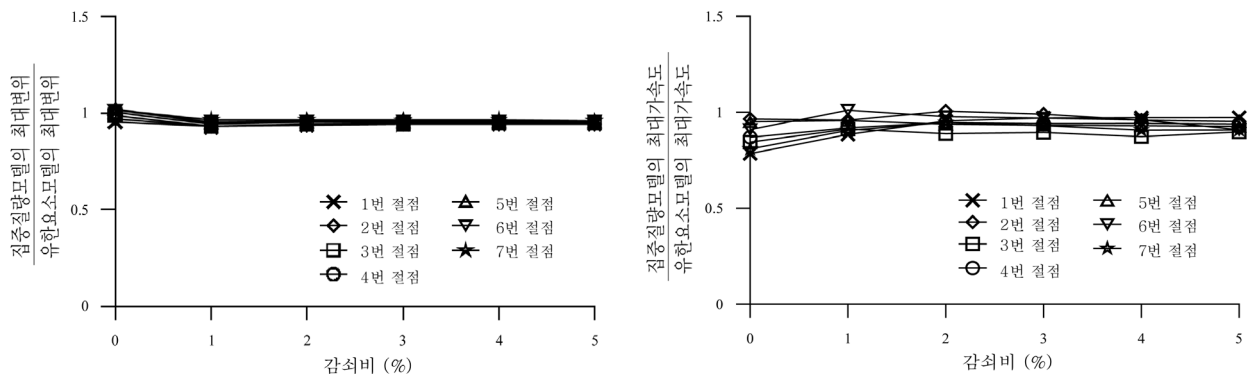
변 절점 응답이 90% 고려한 모델과 비교하여 유한요소모델에 더 유사해진 것을 확인할 수 있다.



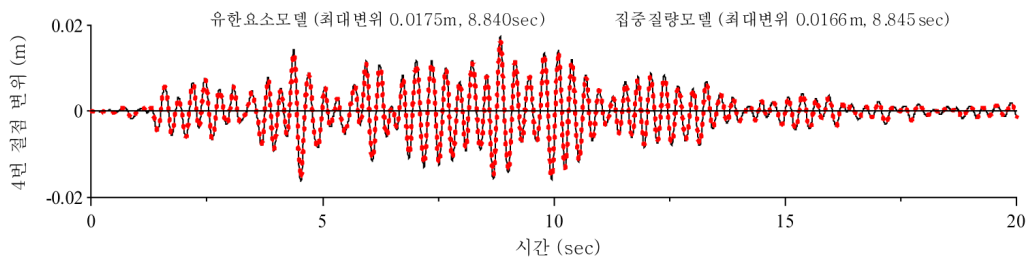
〈그림 11〉 다른 질량참여율을 고려한 집중질량모델의 최대가속도 비교

#### 4. 구조물의 감쇠비에 따른 모델의 성능

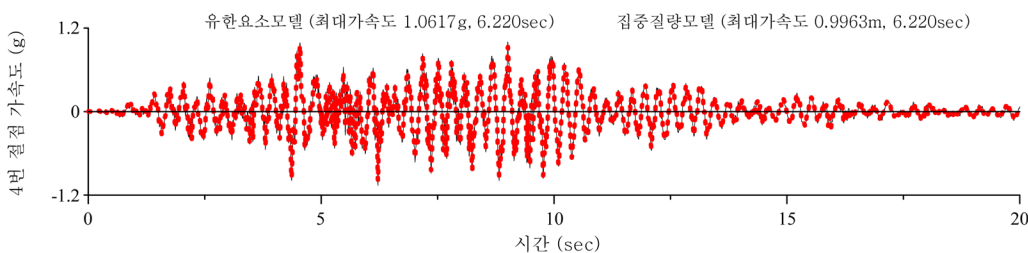
감쇠비 변화에 따른 제안된 집중질량모델의 성능을 평가하기 위하여 구조물의 감쇠비를 1%에서 5%까지 1%씩 증가시키면서 시간이력해석을 수행하였다. 감쇠는 Rayleigh Damping 모델을 사용하였으며 1차와 4차 모드에서 동일한 감쇠비를 나타내도록 설정하였다. 지진하중은 그림 8에 나타난 인공지진파를 사용하였다. 유한요소모델과 집중질량모델에 적용된 감쇠비의 변화에 따라 각 절점에서 발생하는 변위 응답과 가속도 응답을 그림 12에 나타내었다. 각 절점에서의 변위 응답은 감쇠비를 적용했을 때가 적용하지 않았을 때에 비해서 전체적으로 매우 작게 감소했으며 이후 감쇠비의 변화에도 큰 영향을 받지 않다. 집중질량모델의 최대변위는 유한요소모델의 약 93%~97% 범위에서 일정하게 유지됨을 보였다. 가속도 응답은 변위응답과는 달리 각 절점마다 감쇠비에 따라 불규칙하게 변함을 알 수 있다. 절점



〈그림 12〉 감쇠비 변화에 따른 유한요소모델과 집중질량모델의 변위 응답과 가속도 응답



〈그림 13〉 유한요소모델과 집중질량모델의 변위응답 비교(5% 감쇠비)



〈그림 14〉 유한요소모델과 집중질량모델의 가속도 응답 비교(5% 감쇠비)

2와 6번의 경우 1%와 2% 감쇠비에서 유한요소모델과 매우 유사한 응답을 보였으나 절점 3과 7번의 경우는 감쇠비가 증가함에 따라 가속도 응답이 감소함을 보였다. 하지만 전체적인 경향을 보면 감쇠비가 증가하여도 집중질량모델의 최대가속도는 유한요소모델의 87%에서 100%사이의 일정한 값을 보였다. 그림 13과 14는 감쇠비가 5%일 때 중앙부(4번 절점)에서의 변위응답과 가속도응답을 나타낸 것이다. 유한요소모델과 집중질량모델은 8.84초에 0.0175m와 0.0166m의 최대변위를 나타냈으며 최대가속도는 6.22초에 1.0617g와 0.9963g를 나타냈다. 또한, 두 응답 모두 집중질량모델의 응답이력(Phase)이 유한요소모델의 결과와 매우 유사하였으며, 다른 절점 및 감쇠비에서도 이와 같은 경향을 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유한요소모델의 고유치와 모드형상을 고려한 새로운 집중질량모델을 제안하였다. 제안된 집중질량모델은 유한요소모델의 각 모드형상에서 나타나는 변곡점을 순차적으로 선형보간하여 최종 집중질량(절점)의 위치를 결정하며, 이 모델의 고유치는 유한요소모델에서 나타나는 값(목표고유치)과 거의 동일하다. 제안된 집중질량모델의 동적성능 검증을 위하여 비균일단면 기둥에 대한 시간이력 해석을 수행하였으며 지진하중은 ASCE의 설계 스펙트럼에 근거한 인공지진하중을 생성하여 적용하였다. 시간이력해석 결과 각 절점에서의 최대변위 응답은 유한요소모델의 결과와 매우 일치하는 경향을 보였지만 최대가속도 응답의 경우 일부 절점에서 차이를 보였다. 이는 집중질량모델의 전체 질량이 유한요소모델(또는 실구조물)의 전체 질량보다 작고 이로 인해 지반입력하중(질량 지반가속도) 또한 작아졌기 때문으로 목표고유치를 더 많이 고려하여 집중질량을 증가시킬 경우 응답을 개선할 수 있었다. 또한 집중질량모델의 응답이력(Phase)은 모든 절점에서 매우 유사한 경향을 보였으며 이는 제안된 모델의 고유치가 유한요소모델의 고유치와 거의 일치하기 때문이다. 구조물의 감쇠비가 적용되었을 때의 성능을 검증하기 위하여 Rayleigh Damping을 1%에서 5%까지 1%씩 증가시키면서 시간이력해석을 수행하였다. 이 결과 제안된 집중질량모델의 최대변위와 최대가속도

응답은 감쇠비의 변화에도 일정한 정확도를 유지함을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 원전기술혁신사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.(No. 2010T100101066)

## 참고 문헌

1. Chopra, A.K., Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 2006.
2. Bose, M.K., Soni, R.S., Mahajan, S.C., and Kakodkar, A., "Strain energy concept for developing lumped mass stick model of complex structures," Proceeding of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, Paper No. 1507, 1996.
3. Huang, Y., Whittaker, A.S., and Luco, N., "Seismic performance assessment of base-isolated safety-related nuclear structures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, No. 13, 1421-1442, 2010.
4. Varma, V., Reddy, G.R., Vaze, K.K., and Kushwaha, H.S., "Simplified approach for seismic analysis of structures," International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 2, No. 2, 207-225, 2002.
5. Paskalov, A., Saady, A., and Elgohary, M., "Response of ACR-100TM nuclear power plant to eastern north America high frequency input motions," Proceeding 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-19), Toronto, Canada, 2007.
6. Computers and Structures, Inc. (CSI). SAP2000 Version 15.0, 2011.
7. ASCE 7-10, Minimum Design loads for Building and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Virginia, 2009.
8. Gasparini, D.A., and Vanmarcke, E.H., "Simulated earthquake motion compatible with prescribed response spectra," R76-4, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, 1976.