

업데이트된 집중질량스틱모델과 진동대실험 지진응답 비교

Comparison of Seismic Responses of Updated Lumped-Mass Stick Model and Shaking Table Test Results

선취창¹⁾ · 홍상현²⁾ · 노화성^{3)*}

Sun, Hwchang¹⁾ · Hong, Sanghyun²⁾ · Roh, Hwasung^{3)*}

¹⁾前 전북대학교 토목공학과 석사과정, ²⁾前 한양대학교 건설환경플랜트공학과 연구교수, ³⁾전북대학교 토목공학과 부교수

¹⁾Former Graduate Research Assistant, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, ²⁾Former Research Professor, Department of Civil, Environmental & Plant Engineering, Hanyang University, ³⁾Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

/ A B S T R A C T /

A conventional lumped-mass stick model is based on the tributary area method to determine the masses lumped at each node and used in earthquake engineering due to its simplicity in the modeling of structures. However the natural frequencies of the conventional model are normally not identical to those of the actual structure. To solve this problem, recently an updated lumped-mass stick model is developed to provide the natural frequencies identical to actual structure. The present study is to investigate the seismic response accuracy of the updated lumped-mass stick model, comparing with the response results of the shaking table test. For the test, a small size four-story steel frame structure is prepared and tested on shaking table applying five earthquake ground motions. From the comparison with shaking table test results, the updated model shows an average error of 3.65% in the peak displacement response and 9.68% in the peak acceleration response. On the other hand, the conventional model shows an average error of 5.15% and 27.41% for each response.

Key words: Lumped-mass stick model, Shaking table test, Seismic responses, Frame structure

1. 서론

구조물의 지진응답해석에서 모델링의 간편성과 효율적인 변수분석을 위해 집중질량스틱(Lumped-Mass Stick; LMS) 모델이 자주 사용된다. 이러한 예로는 고층 빌딩[1], 타워 형 구조물[2, 3], 원전격납구조물[4-6], 교량[7-9], 전기 부싱[10], 송전타워[11] 등이 있다. 기존 집중질량스틱(Conventional LMS) 모델에서는 구조물의 기하학적 형상에 따른 부하면적(Tributary area)과 무게를 고려하여 각 절점에 집중질량을 결정하는 방법을 사용한다[12]. 하지만 기존 집중질량스틱 모델들의 고유진동수가 해당 구조물의 유한요소해석 모델과 차이가 발생하는 단점이 있으며 이러한 차이는 고차모드로 갈수록 더 커지는 경향을 나타낸다. 이를 개선하기 위해 고 유진동수를 목표하는 고차모드까지 일치시키는 진동수 순응형 집중질량스

틱(Frequency adaptive LMS) 모델을 개발하여 비균일 단면 기둥에 적용하여 동적응답을 비교하였다[13]. 또한, 이 순응형 집중질량스틱 모델을 원전격납구조물에 적용하여 층간 전단력 및 휨모멘트, 층 응답스펙트럼을 포함한 동적 성능을 비교한 연구가 있다[14, 15]. 그러나 순응형 집중질량스틱 모델은 실제 구조물에 비해 15%~20% 정도의 총 질량이 작아지는 문제점과 모드형상도 실제 구조물과 다소 상이함을 보였다. 이를 개선하기 위해 기존 LMS 모델 방법과 진동수 순응형 LMS 모델을 결합한 업데이트된 집중질량스틱(Updated LMS) 모델을 제안하였다[16]. 또한 이 업데이트된 집중질량스틱 모델의 동적응답 성능을 대칭 및 비대칭 구조물을 대상으로 시간이력해석을 통해 유한요소해석 모델과 비교하였다. 위와 같이 이전의 LMS 모델에 관한 연구에서는 모델의 지진응답 비교가 유한요소모델을 기준으로 이뤄졌다. 지진응답 정확도 분석을 위한 다른 한 방법은 진동대 실험 결과와 비교하는 것이다. 이러한 비교는 대상 구조물이 소형이거나 축소된 구조물이어서 실제 진동대 실험이 가능하고 이를 바탕으로 적합한 집중질량 모델을 생성하여 다양한 목적으로의 지진 응답해석이 필요할 때 유용하게 된다. 본 연구는 진동대 실험과 비교하는 것으로서 이를 위해 소형 프레

*Corresponding author: Roh, Hwasung

E-mail: hwasung@jbn.ac.kr

(Received May 2, 2019; Revised June 12, 2019; Accepted June 13, 2019)

입구조물을 제작하여 진동대 실험을 실시하였으며 업데이트된 LMS 모델의 지진응답 결과와 비교하였다.

2. 업데이트된 집중질량스틱(Updated LMS) 모델

업데이트된 집중질량스틱(Updated LMS) 모델에 대해 정리하면 다음과 같다. 다자유도를 고려한 기존 집중질량스틱모델의 n 차 모드 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기서 q_n 은 시간 t 에 따른 응답 좌표(coordinates)이고, ζ_n 은 감쇠비, ω_n 은 고유진동수, \ddot{u}_g 는 지반가속도, Γ_n 은 모드참여계수(Modal participation factor)을 의미한다. 모드참여계수(Γ_n)는 $\phi_n^T M \iota / \tilde{m}_n$ 로 정의되며, 최댓값을 1로 하고 각 모드별 모드형상을 나타내는 열 벡터(ϕ_n)를 적용하여 전체 모드에 대해서는 대각선 행렬로 구성된다. 여기서 M 은 집중질량행렬, ι 은 방향 또는 영향벡터(Influence vector)이다. 한편 각 모드별 Mass normalized eigenvector($\phi_{mass,n}$)를 사용하면 $\phi_{mass,n}^T M \iota$ 로 정의된다. 식 (1)에서 q_n 을 $\Gamma_n D_n(t)$ 로 대체하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\ddot{D}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{D}_n(t) + \omega_n^2 D_n(t) = \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

여기서 $D_n(t)$ 는 각 모드별 구조물의 고유진동수와 점성비에 의해 결정되는 응답변수로서 식 (3)과 같이 표현된다.

$$D(t) = [D_1(t) \ D_2(t) \ \dots \ D_n(t)]^T \quad (3)$$

지반가속도 \ddot{u}_g 에 의한 식 (2)의 응답은 각 모드마다의 점성비와 고유진동수에 의해 결정된다. 식 (2)를 이용한 구조물의 상대변위응답은 식 (4)로 표현된다.

$$u(t) = \Phi \Gamma D(t) \quad (4)$$

여기서 Φ 는 전체 모드에 대한 모드형상(최댓값을 1로 하는) 행렬이다. Γ 는 대각선 행렬을 이루는 모드참여계수이며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & & & \\ & \Gamma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Gamma_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (2)에 보듯이 변수 $D_n(t)$ 는 모드 형상이 아닌 각 모드별 진동수와 점성비에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 기존 집중질량스틱모델의 $D_n(t)$ 를 실구조물의 진동수와 점성비가 고려된 $D_n(t)$ 로 대체한다면 주기 오차는 0이 된다. 이와 같은 $D_n(t)$ 생성을 위해 진동수 순응형 집중질량스틱모

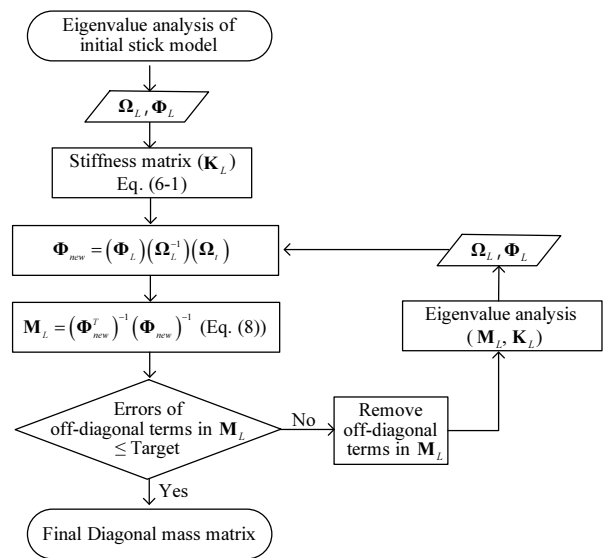


Fig. 1. Flowchart of frequency adaptive LMS model

델[14]을 사용하였다. 진동수 순응형 집중질량스틱모델의 기본 개념은 Eqs. (6)-(8)과 같다.

$$K_L = (\Phi_L^T)^{-1}(\Omega_L^2)(\Phi_L)^{-1} \quad (6-1)$$

$$= [(\Phi_L^T)^{-1}(\Omega_L^T)(\Omega_t^T)^{-1}][(\Omega_t^T)(\Omega_t)][(\Omega_t)^{-1}(\Omega_L)(\Phi_L)^{-1}] \quad (6-2)$$

여기서 K_L 은 등가 강성행렬로 실구조물의 강성을 나타내며, Ω_L 과 Φ_L 는 초기 집중질량에 따른 고유치와 Mass normalized eigenvector 행렬이다. 이 등가 강성행렬은 식 (6-1)로 얻어지며 생성과정에 대한 예는 5장에서 기술하였다. Ω_t 는 실구조물의 고유치(각진동수) 행렬로써 본 모델에서 최종적으로 얻고자 하는 목표고유치이다. 식 (6-2)에서 $(\Phi_L)(\Omega_L^{-1})(\Omega_t)$ 를 Φ_{new} 로 표시하여 다시 정리하면 식 (7)과 같이 된다.

$$K_L = (\Phi_{new}^T)^{-1}(\Omega_t^2)(\Phi_{new})^{-1} \quad (7)$$

식 (7)의 형태로부터 새로운 질량행렬(M_L)은 식 (8)과 같이 계산된다.

$$M_L = (\Phi_{new}^T)^{-1}(\Phi_{new})^{-1} \quad (8)$$

그러나 이렇게 생성된 새로운 질량행렬(M_L)은 대각 행렬이 아닌 일반 대칭행렬로 나타난다. 이 중에서 대각선 요소들만 추출하여 Fig. 1의 과정 [14]을 반복하면 목표고유치와 일치하면서 대각 행렬로만 구성된 질량행렬을 얻을 수 있다.

최종적으로 얻어진 질량행렬을 각 절점에 부여하고 고유치해석을 수행하면 실구조물의 모드별 점성비를 고려하여 얻어지는 진동수 순응형 집중질량스틱모델의 상대변위응답은 식 (9)로 표현된다.

$$u_f(t) = \Phi_f \Gamma_f D_f(t) \quad (9)$$

여기서 아래첨자 f 는 진동수 순응형 집중질량모델에서 얻어진 값을 의미한다. 식 (9)를 이용하여 구하고자 하는 응답변수 $D_f(t)$ 는 식 (10)과 같이 계산된다.

$$D_f(t) = (\Phi_f \Gamma_f)^{-1} u_f(t) \quad (10)$$

따라서 기존 LMS 모델의 응답정확도를 향상시키기 위해 기존 LMS 모델에 서의 ΦI (이후부터는 $(\Phi I)_c$ 로 나타냄)와 식 (10)으로부터 얻어진 $D_f(t)$ 를 이용하여 업데이트된 LMS의 절대변위 응답(u_{ad})과 절대가속도 응답(\ddot{u}_{ad})을 나타내면 Eqs. (11)과 (12)를 얻는다.

$$u_{ad} = u_g(t) + (\Phi I)_c (\Phi_f \Gamma_f)^{-1} u_f(t) \quad (11)$$

$$\ddot{u}_{ad} = \ddot{u}_g(t) + (\Phi I)_c (\Phi_f \Gamma_f)^{-1} \ddot{u}_f(t) \quad (12)$$

본 연구에서는 $(\Phi I)_c (\Phi_f \Gamma_f)^{-1}$ 행렬을 Correction matrix라 칭한다.

3. 실험체 제작 및 set-up

3.1 실험체 제원

본 연구에서 제작된 실험체는 소형 steel 프레임 구조물이며 형상은 Fig. 2와 같다. 제원은 스테인리스강으로서 탄성계수는 193 GPa, 전단탄성계수는 75 GPa이며, 기둥과 빔의 단면은 10 mm × 10 mm이다. 층과 층 사이의 높이는 300 mm이며 폭은 400 mm이다. Fig. 2(a)와 같이 빔(가로부재)은 각 층마다 그리고 층 사이마다 기둥과 연결되어 있다. 각 층에 놓이는 빔은 Fig. 2(c)와 같이 두께 1 mm의 플레이트와 일체되게 제작되었으며, 플레이트 위에는 스테인리스강으로 제작된 블록을 고정시켜 질량을 추가하였다. 또한 Fig. 2(c)처럼 모든 빔의 끝단에 나사홀(Screw hole)을 만들어 Fig. 2(d)와 같이 기둥과 나사(Screw)로 연결하였다. 제작된 실험체는 가로 410 mm, 세로 210 mm, 높이 1210 mm이고 총 무게는 약 32 kg이다.

3.2 실험 set-up

실험에 사용된 진동대는 모터방식이며 플랫폼 크기는 60 cm × 100 cm 이고 최대 500 kg의 무게를 지지할 수 있다. 가속도 및 변위 측정을 위한 계측기는 Fig. 3과 같이 설치하였다. 무선가속도계측기는 각 층에 1개씩 총 4개(Acc1, Acc2, Acc3, Acc4)를 설치하였으며 레이저 변위계는 2층(Dis2)과 4층(Dis4)에 설치하였다. 가속도와 변위 응답 계측기의 sampling rate는 모두 0.005 초(200 Hz)로 설정하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 계측기의 사양을 정리한 것이다.

4. 동특성 분석 및 지진응답 실험

실험체의 동특성 파악을 위해 충격가진 실험과 snap-back 실험을 실시

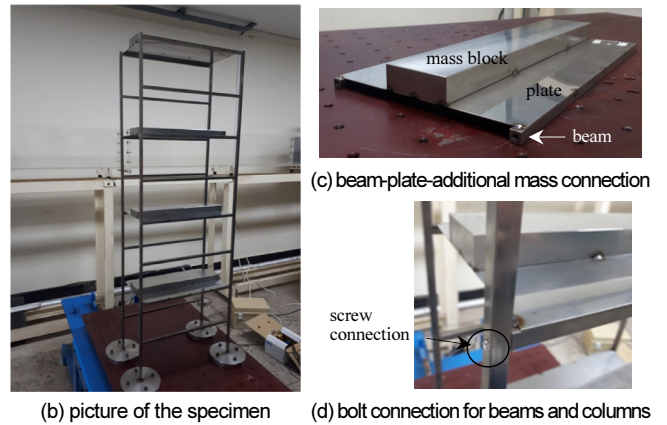
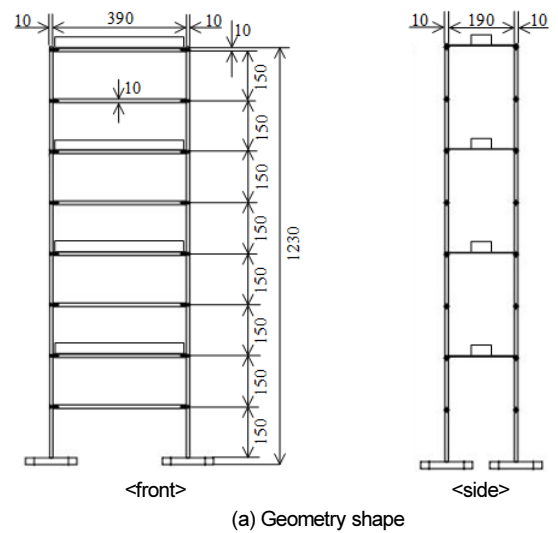


Fig. 2. Test specimen - steel frame structure

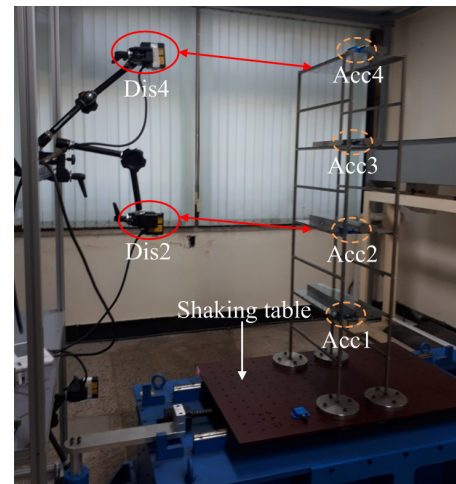
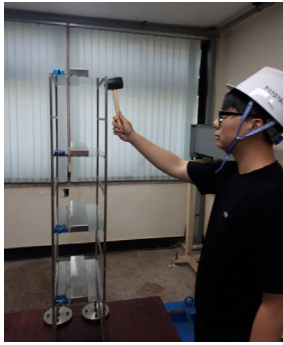


Fig. 3. Locations of accelerometer and displacement meter

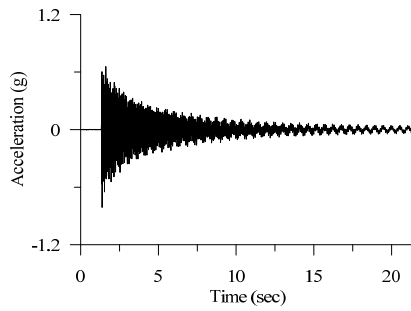
하였다. 충격가진 실험에서는 Fig. 4(a)와 같이 고무망치를 이용하여 4층에 충격을 가했으며 이때 발생된 3층에서의 가속도 응답을 Fig. 4(b)에 나타내었다. 고유진동수 분석을 위해 이 가속도 응답에 대해 Fig. 4(c)와 같이 FFT 해석을 실시하였으며 그 결과 1차에서 4차 모드까지 1.86 Hz, 10.35 Hz, 27.86 Hz, 48.83 Hz로 나타났다. 5차 모드의 진동수는 90 Hz 이상으로

Table 1. Specifications of accelerometer and displacement meter

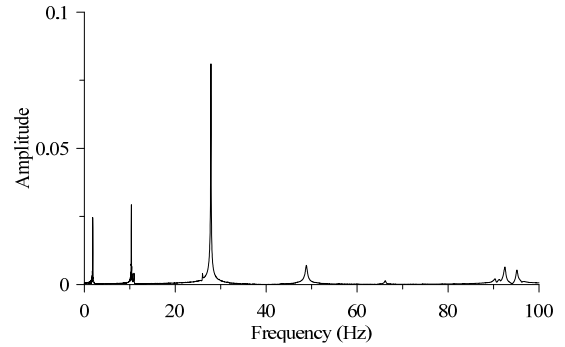
Wireless accelerometer		Laser displacement meter	
Range	± 1.7 g	Distance standard value	500 mm
Sampling rate	50 ~ 800 Hz	Range	± 200 mm, (300 ~ 700 mm)
Sensitivity	1 mg at 60 Hz	Sampling rate	1.25 kHz
Distance	1.2 km	Resolution	10 μm
Resolution	16 Bit	Repeatability	30 μm



(a) impact hammer testing scene



(b) acceleration response at third story (Acc3)



(c) FFT result

Fig. 4. Response of impact-hammer test and FFT results

Table 2. Information of selected ground motions

EQ code	Description	Magnitude	Distance (km)	Scale factor	Duration (s)	PGA (g's)	Scaled PGA (g's) for the study
LA03	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	1.01	39.39	0.39	0.1
LA06	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	0.84	39.09	0.23	
LA08	Landers, 1992, Barstow	7.3	36.0	3.20	80.00	0.43	
LA43	Imperial Valley, 1979	6.5	1.2	0.40	39.09	0.14	
LA44	Imperial Valley, 1979	6.5	1.2	0.40	39.09	0.11	

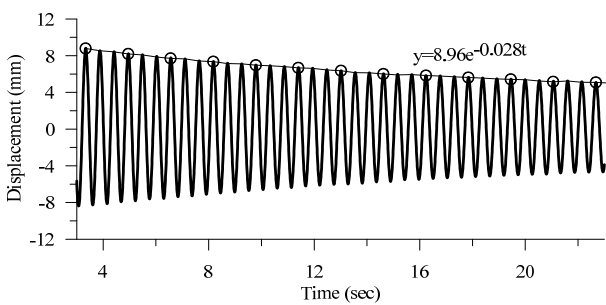


Fig. 5. Top displacement response of snap-back test

나타나 일반적인 지진파의 주파수 성분과는 차이가 매우 크게 나타났다.

1차 모드에 해당하는 감쇠비 분석을 위해 Snap-back 실험을 실시하였으며, Fig. 5에 나타난 4층에서의 변위응답에 대해 진동변위 저감 포락선을 추정하였다. 그 결과 감쇠식 $y = 8.96e^{-0.028t}$ 을 도출하였으며, 여기서 0.028은 1차 고유진동수와 감쇠비의 곱($= \zeta_1 \times \omega_1$)을 의미하므로 실험체의 1차 모드 감쇠비는 0.24%로 결정하였으며 이 감쇠비는 매우 작은 값으로서 구조물의 지진응답에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단된다.

지진응답 실험에 사용된 입력지진파는 SAC-LA 지진데이터 중 5개

(LA03, LA06, LA08, LA43, LA44)이며, 각 지진데이터에 대한 정보는 Table 2에 나타내었다. 모든 지진데이터의 최대지반가속도(PGA)는 0.1g로 조정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 본 연구에서 사용한 지진데이터의 가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것으로서 실험체의 1차 모드 주기인 0.54초(1.86 Hz) 이내에서 높은 가속도응답이 나타남으로 적절한 지진데이터 선택으로 판단된다.

Fig. 8은 선정된 입력지진 가속도에 의해 실험체 4층에서 계측한 변위응답(절대변위)을 나타낸 것이다. LA08의 경우 최대 응답은 약 20초 내외에서 발생하였으며 나머지 지진의 경우 약 7초 내외에서 발생하였다. 가장 큰 변위응답은 21 mm로 LA43 지진에 의해 발생하였다. 응답 결과에서 작은 떨림이 발생하는데 그 이유는 실험체의 점성이 작기 때문으로 파악된다.

5. 업데이트된 LMS 모델의 생성

Fig. 4에 나타난 동특성 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 유효모드를 4차 모드까지 고려하였으며 이에 따라 stick 모델에 4개의 절점과 집중 질량을 층별로 부여하였다. 대상 구조물의 등가 휨강성(EI)과 전단강성(GA)를 고려하여 stick 모델에 강성을 입력하였으며, 강성행렬의 효율적

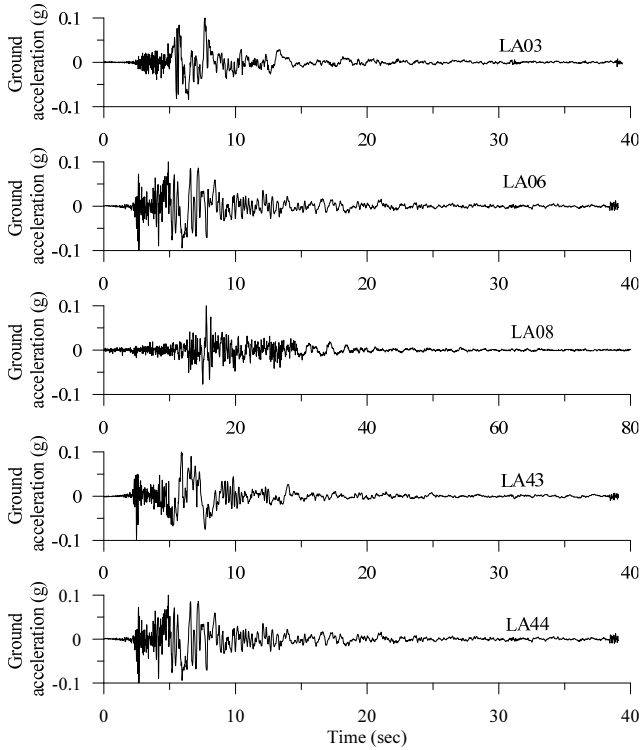


Fig. 6. Selected ground motions

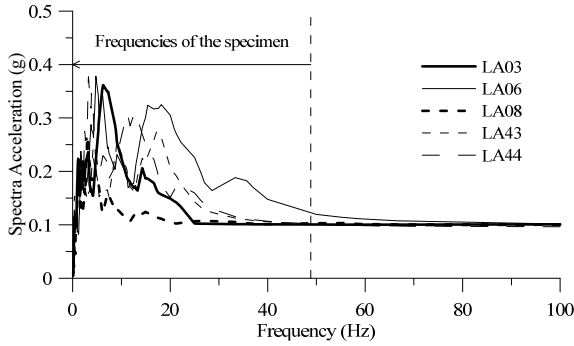


Fig. 7. Response spectrum of selected ground motions

인 생성을 위해 기하학적 부하면적과 무게를 고려하는 기존방식(Tributary area based 방식)을 적용하여 식(13)과 같은 집중질량 값을 초기 값으로 설정하였다.

$$M_c = \begin{bmatrix} 8.0284 & & & \\ & 8.0284 & & \\ & & 8.0284 & \\ & & & 7.2869 \end{bmatrix} (kg) \quad (13)$$

초기 집중질량과 강성이 부여된 stick 모델에 대해 고유치 해석을 실시하였으며, 이를 통해 얻어진 고유치와 Mass normalized eigenvector 행렬을 이용하여 식(6-1)과 같이 강성행렬($K_L = (\Phi_L^T)^{-1}(\Omega_L^2)(\Phi_L)^{-1}$)을 계산하면 식(14)와 같다. 또한 모드형상 행렬(Φ_c)과 모드참여계수(Γ_c) 행렬은 각각 식(15)와 식(16)과 같다.

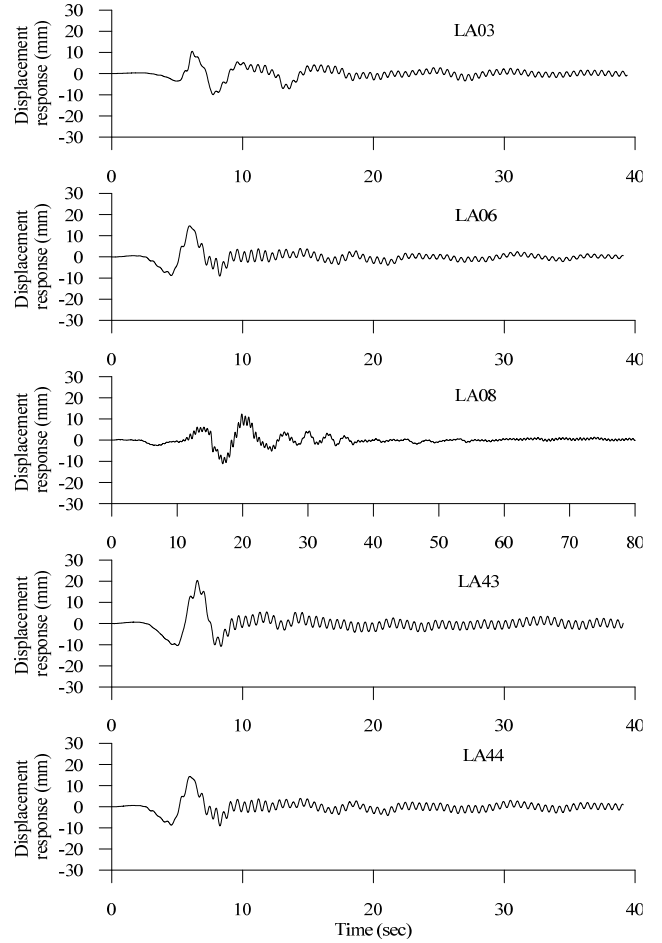


Fig. 8. Displacement response at the fourth story from test

$$K_L = \begin{bmatrix} 4.4670 & -2.8057 & 1.0567 & -0.1758 \\ & 3.4103 & -2.2787 & 0.6174 \\ & & 2.3536 & -0.8681 \\ & & & 0.3827 \end{bmatrix} \times 10^5 (N/m) \quad (14)$$

$$\Phi_c = \begin{bmatrix} 0.0930 & 0.5103 & 1 & 1 \\ 0.3291 & 1 & 0.3255 & -0.9710 \\ 0.6479 & 0.5184 & -0.9668 & 0.6218 \\ 1 & -0.7850 & 0.4696 & -0.1942 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Gamma_c = \begin{bmatrix} -1.3692 & & & \\ & -0.6303 & & \\ & & 0.3503 & \\ & & & 0.2008 \end{bmatrix} \quad (16)$$

실험 결과와 동일한 고유진동수를 제공하는 집중질량을 결정하기 위해 Fig. 1에 제시된 순서도에 따라 계산을 수행하면 각 절점의 집중질량은 식(17)과 같게 된다. 이때의 모드형상 행렬(Φ_f)과 모드참여계수 행렬(Γ_f)은 각각 식(18)과 식(19)와 같이 나타난다. Table 3은 기존방식과 진동수 순응형(Frequency adaptive) LMS 모델의 고유진동수 결과를 비교한 것이다. 기존방식으로는 고유진동수가 많게는 16%정도 차이가 발생하였으나 진동수 순응형 모델은 동일한 값을 제공하고 있다.

Table 3. Comparison of natural frequencies

Mode	Test result (Hz)	Conventional LMS (Hz)	Frequency adaptive LMS (Hz)
1	1.862	1.571	1.862
2	10.35	9.93	10.35
3	27.86	27.80	27.86
4	48.83	49.87	48.83

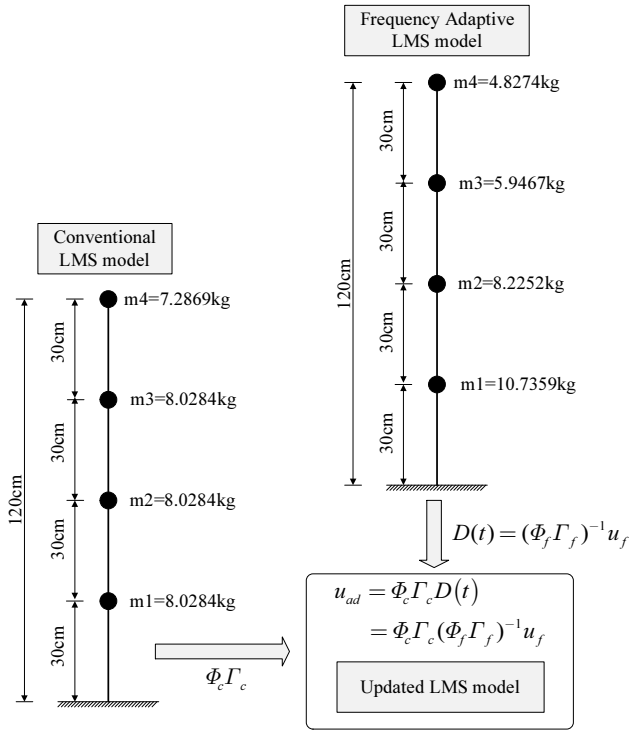


Fig. 9. Updated lumped-mass stick model

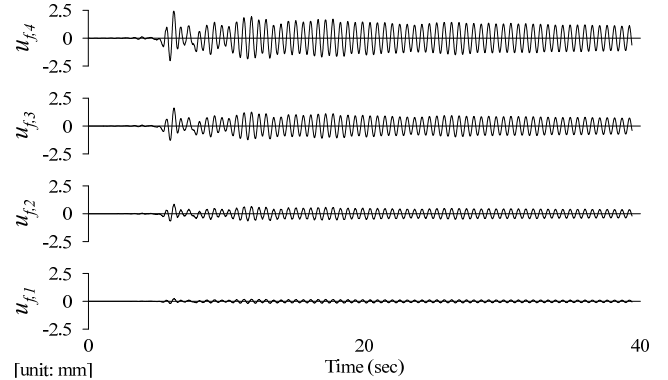
$$M_f = \begin{bmatrix} 10.7359 & & & \\ & 8.2252 & & \\ & & 5.9467 & \\ & & & 4.8274 \end{bmatrix} (kg) \quad (17)$$

$$\Phi_f = \begin{bmatrix} 0.0951 & -0.5346 & -0.9498 & -0.6936 \\ 0.3336 & -0.9646 & 0.0207 & 1 \\ 0.6514 & -0.3652 & 1 & -0.9893 \\ 1 & 1 & -0.6539 & 0.3969 \end{bmatrix} \quad (18)$$

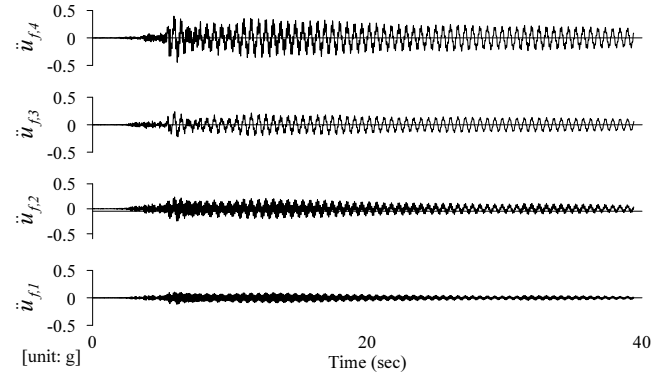
$$\Gamma_f = \begin{bmatrix} -1.5019 & & & \\ & 0.6943 & & \\ & & 0.3929 & \\ & & & 0.1627 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Eqs. (15)와 (16), Eqs. (18)과 (19)를 이용하여 Correction matrix, $(\Phi\Gamma)_c(\Phi_f\Gamma_f)^{-1}$, 를 계산하면 식 (20)과 같다.

$$(\Phi\Gamma)_c(\Phi_f\Gamma_f)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.1395 & -0.2610 & 0.1665 & -0.0450 \\ 0.0810 & 1.0395 & -0.1895 & 0.0690 \\ 0.0269 & 0.1218 & 0.8717 & -0.0204 \\ 0.0134 & 0.0494 & 0.1244 & 0.8128 \end{bmatrix} \quad (20)$$



(a) Relative displacement response for each story due to LA03



(b) Acceleration response for each story due to LA03

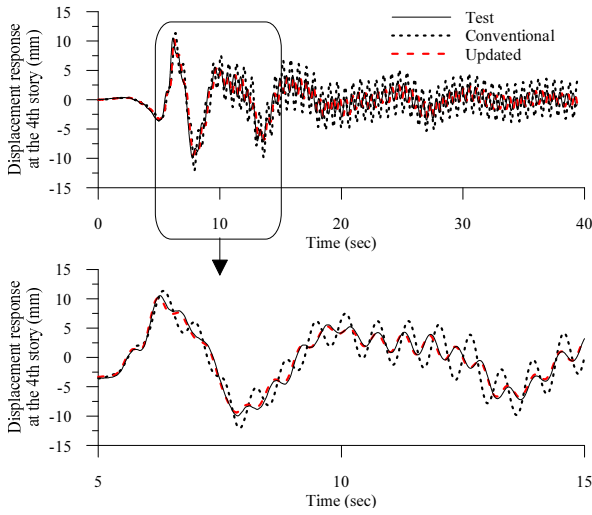
Fig. 10. Responses from frequency adaptive LMS model

Fig. 9는 이와 같은 결과를 바탕으로 대상 구조물에 대한 업데이트된 LMS 모델의 생성과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

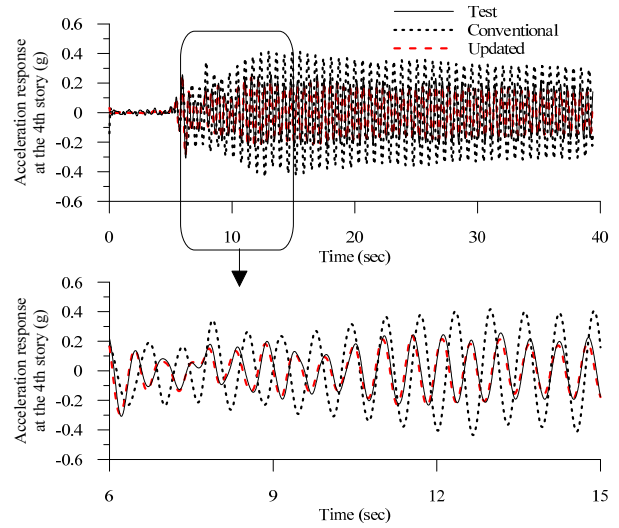
6. 업데이트된 LMS 모델의 지진응답 결과 및 비교

감쇠비 산정에서 1차 모드의 감쇠비가 0.24%로 매우 작은 값으로 분석되어 이후 모드에도 그 영향은 미비할 것으로 판단되어 2차~4차 모드의 감쇠비도 동일한 값으로 가정하였다. Fig. 10은 LA03 지반운동에 의한 진동수 순응형 LMS 모델에서 발생한 각 절점에서의 상대 변위(u_f)과 가속도 응답(\ddot{u}_f)을 나타낸 것이다. 이 결과를 바탕으로 식 (20)에서 계산된 Correction matrix를 이용하여 식 (11)과 식 (12)에 따른 지진응답 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 보듯이 기존 LMS 모델은 실험결과와 큰 차이를 나타내고 있으나 반면 업데이트된 LMS 모델의 변위와 가속도는 실험결과와 매우 유사한 응답을 나타내고 있다. 이러한 경향은 고유진동수의 정확도 차이로 발생하는 문제로 고려한 모든 지진데이터에서 유사한 경향을 보였다. 또한 최대 변위응답은 실험치와 기존 LMS 모델, 업데이트된 LMS 모델에서 각각 10.53 mm, 12.04 mm, 10.22 mm로 나타났으며, 실험치 대비 오차율로는 기존 모델과 업데이트된 모델에서 각각 14.34%와 2.94%이다. 최대 가속도응답은 실험치와 기존 모델, 업데이트된 모델에서 각각 0.29 g, 0.43 g, 0.31 g이며, 실험치 대비 오차율은 기존 모델과 업데이트된 모델에서 각각 38.71%와 6.45%이다. 이 결과를 볼 때 업데이트된 모델을 사용함으로



(a) Displacement response result



(b) Acceleration response result

Fig. 11. Comparison of seismic responses at the fourth story due to LA03 ground motion

Table 4. Maximum differences of displacement response in time phase

	2nd story		4th story	
	Conventional	Updated	Conventional	Updated
LA03	3.18%	0.77%	4.78%	0.53%
LA06	3.17%	1.67%	3.43%	0.98%
LA08	3.52%	1.17%	4.73%	0.56%
LA43	3.65%	1.52%	5.80%	0.71%
LA44	2.27%	1.13%	3.39%	0.53%
Average	<u>3.16%</u>	<u>1.25%</u>	<u>4.43%</u>	<u>0.66%</u>
Overall	Conventional LMS Model=3.79% Updated LMS Model=0.96%			

써 변위응답에서는 약 11%, 가속도응답에서는 약 32% 정도 정확도가 향상됨을 보였다.

Table 4는 Fig. 11과 같은 시간에 따른 변위응답(Displacement response in time phase)을 고려하여 실험 결과와 LMS 모델과의 응답차기 최대일 때 식 (21)에 따라 정확도를 비교한 것이다. 2층에서의 변위응답은 기존(Conventional) LMS 모델의 경우 3.16%의 평균 차이율을 보이나 업데이트된(Advanced) LMS 모델의 경우는 1.25%를 보였으며, 4층에서는 기존 LMS 모델의 경우 4.43%의 평균 차이율을 보이나 업데이트된 LMS 모델은 0.66%를 보여 업데이트된 모델이 보다 정확한 결과를 제공하고 있음을 알 수 있다. 전체적인 (Overall) 평균 차이율로 계산하면 기존 모델은 3.79%, 업데이트된 모델은 0.96%로 업데이트된 모델이 2.83% 향상됨을 보였다.

$$\frac{|u_{\text{test}} - u_{\text{LMS}}|_{\text{max}}}{\text{story elevation}} \times 100(\%) \quad (21)$$

Fig. 12는 5개의 지진데이터에 대한 2층과 4층에서의 최대 변위와 최대 가속도 응답을 비교한 것이다. 가로축(x축)은 진동대 실험결과의 최댓값이

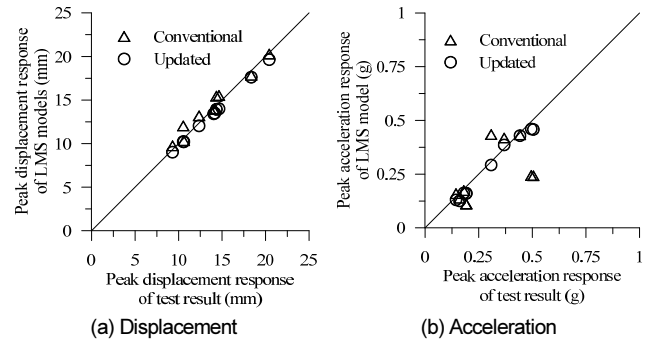


Fig. 12. Comparison of peak responses of shaking table and LMS model results

Table 5. Errors of peak responses of LMS models in overall time

	Story level	Displacement error (%)		Acceleration error (%)	
		Conventional	Updated	Conventional	Updated
LA03	2nd	4.95	3.01	14.29	7.14
	4th	14.34	2.94	38.71	6.45
LA06	2nd	2.13	4.73	42.11	15.79
	4th	6.01	4.51	51.02	6.12
LA08	2nd	2.36	3.68	12.50	18.75
	4th	6.80	2.51	13.51	5.41
LA43	2nd	2.72	3.98	5.56	11.11
	4th	1.64	3.82	2.27	2.27
LA44	2nd	2.78	4.42	42.11	15.79
	4th	7.81	2.86	52.00	8.00
Average	2nd	<u>2.99</u>	<u>3.96</u>	<u>23.31</u>	<u>13.72</u>
	4th	<u>7.32</u>	<u>3.33</u>	<u>31.50</u>	<u>5.65</u>
Overall		<u>5.15</u>	<u>3.65</u>	<u>27.41</u>	<u>9.68</u>

고 세로축(y축)은 LMS 모델에서의 최댓값을 나타낸다. 기준선(x=y)에 가까울수록 진동대 실험결과와 유사한 값을 가짐을 의미한다. 또한 이 결과를

바탕으로 실험결과 대비 오차율(식 (22))을 Table 5에 나타내었다.

$$\left| \frac{u_{\text{test}}|_{\text{peak}} - u_{\text{LMS}}|_{\text{peak}}}{u_{\text{test}}|_{\text{peak}}} \right| \times 100(\%) \tag{22}$$

Fig. 12(a)에 따르면 최대 변위 응답에서는 두 모델 모두 기준선을 중심으로 결과가 분포된다. 하지만 이를 평균(Average)오차율로 비교하면 2층의 경우 기존 모델이 업데이트된 모델에 비해 0.96% 정도 정확도가 높으나 4층의 경우 업데이트된 모델이 약 4% 정도 응답의 정확도가 높게 나타났다. 전체적(Overall)으로는 업데이트된 모델이 기존 모델에 비해 1.5% 정확도를 향상 시켜주었다. Fig. 12(b)에 나타난 최대 가속도 응답의 경우 업데이트된 모델의 결과들은 기준선에 매우 가깝게 분포되고 있지만 기존 모델의 결과들은 기준선을 다소 벗어남을 확인할 수 있다. 이를 평균(Average)오차율로 비교하면 2층과 4층 모두 업데이트된 모델이 응답의 정확도를 크게 향상 시켜주었으며, 전체적(Overall)으로는 기존 모델은 27.41%인 반면 업데이트된 모델은 9.68%로 17.7% 낮아 졌다.

7. 결론

본 연구에서는 업데이트된 LMS 모델의 성능 분석하기 위해 steel 프레임 구조물을 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 총 5개 지진 데이터를 고려하였으며 실험결과를 기준으로 기존 LMS 모델과 업데이트된 LMS 모델의 변위 및 가속도 응답을 비교하였다. 그 결과, 진동수 일치 여부에 따라 달라지는 시간에 따른 변위응답(Displacement response in time phase)에서는 기존 LMS 모델은 3.79%로 나타난 반면 업데이트된 LMS 모델은 0.96%로 나타나 업데이트된 모델이 2.83% 향상됨을 보였다. 최대 변위 응답 결과에서는 업데이트된 모델이 기존 모델에 비해 1.5% 오차율이 감소하였으며, 최대 가속도 응답의 경우 업데이트된 모델을 적용하였을 경우 9.68% 오차율로 기존 모델 27.41%에 비해 17.7% 정확도가 향상 되었다. 즉, 업데이트된 LMS 모델이 기존 LMS 모델에 비해 보다 정확한 응답을 제공해주고 있으며, 변위응답에 비해 가속도응답에서 보다 높은 정확도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2018년도 교육부 재원으로 한국연구재단 이공분야기초연구사업(No. 2018R1D1A1B07048759)의 지원으로 진행되었으며 지원에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Huo L, Qu C, Li H. TLCD Parametric optimization for the vibration control of building structures based on linear matrix inequality. *Journal of Applied Mathematics*, 2014 Jun; Article ID. 527530.
2. Halabian AM, El Nagggar MH, Vickery BJ. Nonlinear seismic response of reinforced-concrete free-standing towers with appli-

- cation to TV towers on flexible foundations. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2002 Apr;11(1):51-72.
3. Wilson JL. Earthquake response of tall reinforced concrete chimneys. *Engineering Structures*, 2003 Jan;25(1):11-24.
4. Varma V, Reddy GR, Vaze KK, and Kushwaha HS. Simplified approach for seismic analysis of structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2002;2(2):207-225.
5. Paskalov A, Saady A, Elgohary M. Response of ACR-1000 nuclear power plant to eastern north America high frequency input motions. *Proceeding 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-19)*, 2007 Aug. Toronto, Canada.
6. Huang YN, Whittaker AS, Luco N. Seismic performance assessment of base-isolated safety-related nuclear structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010 Sep;39(13):1421-1442.
7. Agrawal S, Jain AK. Seismic analysis of a S-curved viaduct using stick and finite element models. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2009;3(2):34-44.
8. Wibowo H, Sanford DM, Buckle IG, Sanders D. Preliminary parametric study of the effects of live load on seismic response of highway bridges. *Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. *Earthquake Engineering Research Institute*, 2014 Jul. Anchorage, Alaska.
9. Amirhormozaki E, Pekcan G, Itandi A. Analytical modeling of horizontally curved steel girder highway bridges for seismic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015 Sep;19(2):220-248.
10. Roh H, Ovielo ND, Reinhorn AM. Experimental test and modeling of hollow-core composite insulators. *Nonlinear Dynamics*, 2012 Sep; 69(4):1651-1663.
11. Chen B, Guo WH, Li PY, Xie WP. Dynamic response and vibration control of the transmission tower-line system: A State-of-the-Art Review. *The Scientific World Journal*, 2014 Jul; Article ID. 538457.
12. Chopra AK. *Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey. c2014.
13. Roh H, Youn J, Lee H, Lee JS. Development of a new lumped-mass stick model using the eigen-properties of structures. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2012 Aug;16(4):19-26.
14. Roh H, Lee, H, Lee JS. New lumped-mass-stick model based on modal characteristics of structures: development and application to a nuclear containment building. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013 Jun;12(2):307-317.
15. Lee H, Ou YC, Roh H, Lee JS. Simplified model and seismic response of integrated nuclear containment system based on frequency adaptive lumped-mass stick modeling approach. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015 Sep;19(6):1757-1766.
16. Ou YC, Hashlamon I, Kim WS, Roh H. Development of basic technique to improve seismic response accuracy of tributary area-based lumped-mass stick models. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2019 Jan;18(1):113-127.