지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물의 유한요소모델 업데이팅 기법개발

Development of FE Model Updating for Three-Story Building considering Soil-Structure Interaction

박건* · 정종원** · 윤형철***

Park, Gun*, Jung, Jongwon**, and Yoon, Hyungchul***

Abstract

Owing to the development of construction technology, structures are becoming increasingly taller. Furthermore, with the improvement in construction materials, the service life of the structures is also increasing. The increased service life of large structures has highlighted the importance of structure maintenance and performance evaluation; thus, the need for an accurate model development for performance evaluation is increasing. This study predicts the structural characteristics through finite element (FE) model updating using a genetic algorithm (GA). The GA was applied to determine whether the structural member was damaged. In particular, it is intended to improve the reliability of the FE model updating during a seismic load by considering the soil-structure interaction effect that has been overlooked in the existing model updating study. The results of this study show that the model that considers the soil-structure interaction can estimate the dynamic characteristics of the structure more accurately compared to the model that does not consider the soil-structure interaction. The accuracy of the updated parameters by the proposed method was found to be over 90%.

Key words : Structural Health Monitoring, Soil-Structure Interaction, Model Updating, Damage Detection

요 지

국가경제와 산업의 발전으로 구조물이 고층화, 대형화되고 있으며, 건설재료의 향상으로 구조물의 사용연한 또한 증가하고 있다. 이러한 대형구조물의 사용연한 증가는 구조물의 유지 보수 및 성능 평가에 대한 중요성을 부각시켰으며, 이에 따라 성능 평가를 위한 정확한 모델 개발의 필요성이 증가하고 있다. 이 연구에서는 지진하중과 구조물응답을 사용하여 유전자 알고리즘을 적용한 유한요소 모델 업데이팅을 통해 구조부재의 손상도 여부를 판별하였다. 특히 기존 모델업데이팅 연구에서 간과되어왔던 지반-구조물 상호작용 효과를 고려함으로써 모델업데이팅에 대한 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 연구결과, 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델이 그렇지 않은 모델에 비하여 모형실험 결과와 더 높은 유사성을 나타냈다. 또한 이 연구에서 제안된 방법에 의한 구조물 손상도 예측은 90% 이상의 정확성을 보여 상당한 신뢰성을 확보하였다. 따라서 향후 기 건설된 구조물의 노후도 평가 또는 내진평가 등을 위한 유한요소 모델업데이팅을 수행할 때 지반-구조물 상호작용을 고려한다면 정확한 결과를 나타낼 것으로 기대된다.

핵심용어 : 구조건전성평가, 지반-구조물 상호작용, 모델업데이팅, 손상도 검출

*정회원, 충북대학교 토목공학부 박사후연구원(E-mail: silvist@chungbuk.ac.kr)

Member, Post Doc., Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**정회원, 충북대학교 토목공학부 교수(E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

***교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 교수(Tel: +82-43-261-2404, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: hyoon@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

국가경제와 산업의 발전으로 구조물이 고층화, 대형화되고 있으며, 건설재료의 품질 향상으로 구조물의 사용연한 또한 증가하고 있다. 이러한 대형구조물의 사용연한 증가는 구조물의 유지 보수 및 성능 평가에 대한 중요성을 부각시켰으며, 이에 따라 성능 평가를 위한 정확한 모델 개발의 필요성이 증가하고 있다(Gong and Park, 2019). 2015년 서해대교에서 낙뢰로 인해 케이블이 파단되었을 때, 현재 상태를 반영하는 사용 가능한 유한요소모델의 개발에 72시간 이상의 시간이 소요된 것으로 파악되었으며(Gil et al., 2016), 소록대교의 구조식별 작업에 준비 단계를 제외한 순수 계측 및 분석에 약 2일이 소요되었고, 모델 업데이트 작업의 최적화 프로그램 실행에 약 2일이 소요된 것으로 알려져 있다(Sung, 2018). 따라서 예상치 못한 하중이나 자연재해로 인한 구조물의 손상을 대비하기 위해서는 실시간에 가까운 모델 업데이트를 통한 주기적인 구조물의 구조건전성 평가가 필요할 것으로 판단된다.

구조물의 성능을 평가하는 가장 대표적인 기술은 진동기반 구조물 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)이다. 진동기반 구조물 건전성 모니터링은 구조물의 진동을 측정하여 이 데이터로부터 구조물의 건전성을 모니터링하는 기술이다. SHM에는 계측한 구조물의 동적 거동 정보로부터 구조물의 동적 특성을 파악하는 System Identification, 강성저하 등 구조물의 손상을 탐지하는 Damage Detection, 설계 당시의 유한요소 모델을 현재에 동적 거동에 맞게끔 업데이트 해주는 모델 업데이트 등이 있다. Yoon et al. (2016)은 영상기반 변위 측정데이터를 바탕으로 System Identification을 통한 구조물의 고유특성을 파악하였으며, Dorvash et al. (2015)은 자체 개발된 알고리즘인 Influence-based Damage Detection (IDDA) 알고리즘을 통하여 구조물의 국부적 손상을 파악하는 연구를 수행하였다. 또한 Tran-Ngoc et al. (2018)은 Particle Swarm Optimization (POS) 알고리즘과 유전자 알고리즘을 적용하여 실제 공용중인 트러스 교량의 동적 특성을 가장 정확히 나타낼 수 있는 연결부를 찾아내는 연구를 수행하였다. 최근 들어 상태공간방정식(State Space Equation), System Identification, 기계학습(Machine Learning) 등을 통하여 구조물의 성능을 평가하는 연구들도 수행되고 있다(Lin et al., 2017; Tran-Ngoc et al., 2018; Yoon et al., 2018; Lim and Yoon, 2019; Wang and Cha, 2020).

구조물의 성능 해석을 위한 또 다른 방법은 유한요소 모델을 통한 시뮬레이션 기법이다(Jaishi and Ren, 2005). 그러나 유한요소 모델은 대부분 설계 당시를 기준으로 작성되기 때문에, 시공 오차 또는 노후화로 따른 변화를 반영하지 못한다. 시공 오차 또는 노후화로 인해 설계 당시의 유한요소 모델과 현재 구조물의 거동은 일치하지 않게 되며, 이를 최적화 기법을 사용하여 설계 당시의 유한요소 모델을

현재의 구조물 모델로 업데이트 하는 방법을 유한요소모델 업데이트라고 한다. Jung and Kim (2013)은 유전자 알고리즘과 변형된 Nelder-Mead의 결합을 통한 하이브리드 유전자 알고리즘을 기반으로 유한요소모델을 업데이트하는 방법을 제시하였으며, Cho (2017)는 고층건물의 자연진동 실험으로부터 추출한 모달계수를 바탕으로 설계당시의 유한요소모델보다 실제적이며 정확한 거동을 예측할 수 있는 모델로 향상시키기 위한 자동화 기법에 대한 연구를 수행하였다.

유한요소모델 업데이트에서 구조부재의 강성은 예측하고자 하는 주요 파라미터 중 하나이다. 구조물의 강성은 설계 단계에서 예상하지 못한 하중 혹은 예측을 초과하는 하중에 의해 구조부재가 손상을 입을 경우 변화될 가능성이 매우 크다. 특히 지진과 같은 자연현상에 의해 발생하는 하중은 설계 단계에서 하중의 크기를 명확히 선정하기 어려울 뿐 아니라 기준에서 제시된 하중의 크기를 넘어서는 하중이 발생할 가능성이 항상 존재하므로 구조물의 강성을 변화시킬 수 있는 대표적인 하중이라 할 수 있다. 따라서 지진 발생이 빈번한 지역의 구조물은 지진 발생 전·후 구조물의 강성 변화를 통해 구조물의 성능평가를 수행해야 한다.

기존의 유한요소모델 업데이트 방법을 실무에 적용하였을 때 여러 가지 이유로 인하여 오차가 발생하게 되며, 지반 조건이 그 하나이다. 기존 연구들에서 지진하중에 의한 구조물의 동적거동 예측에는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)이 중요한 역할을 한다고 밝히고 있다. 이는 기반암에서 발생된 지진이 지반의 특성에 따라 강도가 증가하고 주기가 변화하기 때문이며, 1985년 멕시코시티에서 발생된 지진이 그 대표적인 예라고 할 수 있다(Raheem et al., 2015). 따라서 최근 수행되고 있는 구조물의 동적거동과 관련된 연구들에서는 이와 같은 지반의 특성을 반드시 고려하여 연구를 진행하고 있다(Wang et al., 2013). 또한, ASCE 4-98 (ASCE, 1998)에서는 지진하중에 의한 구조물의 동적거동 예측 시 지반-구조물 상호작용 효과를 반드시 고려해야 하는 기준을 제시하고 있다. 그러나 모델업데이트와 관련된 기존 연구들(Jung and Kim, 2013; Tran-Ngoc et al., 2018; Gong and Park, 2019)에서는 이러한 지반특성을 고려한 연구를 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델 업데이트 기술을 개발하고 지반-구조물 상호작용이 연구결과에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다. 또한 구조물응답과 지진하중을 사용하여 구조물의 시스템을 상태공간방정식 형태로 예측하고자 한다. 그리고 System Identification을 통해 예측한 구조물의 시스템과 유한요소모델의 동적특성이 일치하도록 유전자 알고리즘을 활용하여 최적화하였다. 이 때 최적화 알고리즘에 사용되는 유한요소모델에 지반-구조물 상호작용을 고려하여 지반과 구조물의 동적 상호작용이 모델업데이트에 미치는 영향을

보고자 한다. 이상의 내용을 개략적인 순서도로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Flowchart of FE Model Updating Considering Soil-Structure Interaction (SSI)

2. 이론적 배경

2.1 지반-구조물 상호작용

원자력발전소 격납구조물, 고층빌딩, 장대교량 및 댐과 같은 대형구조물의 진동특성은 구조물 자체의 동특성 이외에도 구조물을 지지하는 지반의 영향을 고려하여야 한다. 이처럼 구조물의 진동특성이 주변 지반에 따라 변화되는 효과를 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)이라고 한다. 이러한 지반-구조물 상호작용은 역학적 특성에 따라 관성상호작용(Inertial Interaction)과 운동상호작용(Kinematic Interaction)으로 구분된다. 전자는 동적 상호작용이라고 할 수 있으며, 후자는 준정적상호작용(Quasi-Static Interaction)이라고 할 수 있다(Kim, 2006). 이러한 지반-구조물 상호작용의 개념은 개략적으로 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 2. Soil-Structure Interaction

기반암(Bed Rock)에서 발생한 지진은 지반을 통하여 지표면으로 전달될 경우(Point: A) 지반의 특성에 따라 증폭되거나 감소하게 된다. 그러나 이렇게 증폭되거나 감소되는 지진의 경우 계측기가 설치된 몇몇 중요 구조물을 제외하고

측정의 어려움이 있다. 따라서 일반적으로 사용되는 지진은 지표면에 표출되어 있는 기반암(Point: B)에서 측정된 지진을 사용하게 된다. 그러나 이렇게 측정된 지진하중을 구조물에 작용시키면, 구조물이 위치한 지역의 지반특성이 반영되지 않으므로 구조물의 거동이 과소평가될 우려가 있다. 따라서 ASCE 4-98에서는 이러한 SSI효과를 고려하기 위한 기준을 다음과 같이 제시하고 있다.

- (1) 암반 또는 암반류 지반이 아닌 경우에는 SSI영향을 고려하여야 한다.
- (2) 암반 또는 암반류 지반에서 Eq. (1)의 조건을 만족해야만 SSI 효과를 무시한 고정기초해석이 가능하다.

$$f_{soil} \geq 2f_{fixed} \text{ or } T_{fixed} \geq 2T_{soil} \quad (1)$$

여기서, ν 는 지반의 포아송비, G 는 지반의 전단탄성계수, R 은 원형기초의 반지름, ρ 는 지반의 단위중량을 나타낸다. 또한 원형기초의 β_ψ 는 Eq. (2)에 의해 계산될 수 있으며, 사각형 기초의 β_x , β_ψ , β_z 는 L/B의 비율에 의해서 Fig. 3에 보인 그림에서 값을 산정할 수 있다. 또한 I_t 는 구조물과 기초의 극관성 모멘트를 나타낸다.

$$\beta_\psi = \frac{3(1-\nu)I_0}{8\rho R^5} \quad (2)$$

Fig. 3. Constants β_x , β_ψ and β_z for Rectangular Bases (ASCE 4-98)

ASCE 4-98에서 제안하고 있는 SSI해석 기준에 적용되는 암반의 조건은 SRP 3.7.2에서 전단파속도가 1,100 m/s (3,500 ft/s) 이상인 지반을 암반으로 분류하고 있다. f_{fixed} 은 고정기초에 대한 고유진동수, f_{soil} 은 구조물이 강제일 때 지반의 영향을 고려한 시스템의 고유진동수, T_{fixed} 와 T_{soil} 는 각 고유진동수에 대응하는 고유주기이다. 지반의 영향을 고려한 시스템의 고유진동수를 계산하기 위한 지반스프링상수의 경우 Tables 1, 2를 적용하여 계산하도록 하고 있다.

Table 1. Lumped Representation of Structure-Foundation Interaction at Surface for Circular Base (ASCE 4-98)

Motion	Equivalent Spring Constant	Equivalent Damping Coefficient
Horizontal	$k_x = \frac{32(1-\nu)GR}{7-8\nu}$	$c_x = 0.576k_x R\sqrt{\rho/G}$
Rocking	$k_\psi = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$	$c_\psi = \frac{0.30}{1+B_\psi} k_\psi R\sqrt{\rho/G}$
Vertical	$k_z = \frac{4GR}{1-\nu}$	$c_z = 0.85k_z R\sqrt{\rho/G}$
Torsion	$k_t = 16GR^3/3$	$c_t = \frac{\sqrt{k_t I_t}}{1+2I_t/\rho R^5}$

Table 2. Lumped Representation of Structure-Foundation Interaction at Surface for Rectangular Base (ASCE 4-98)

Motion	Equivalent Spring Constant	Equivalent Damping Coefficient
Horizontal	$k_x = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{BL}$	Use the Results for circular base with the following equivalent radius R: (1) $R = \sqrt{BL/\pi}$ for translation (2) $R = \sqrt[4]{BL^3/3\pi}$ for rocking
Rocking	$k_\psi = \frac{G}{1-\nu}\beta_\psi BL^2$	
Vertical	$k_z = \frac{G}{1-\nu}\beta_z \sqrt{BL}$	
Torsion	$R = \sqrt[4]{BL(B^2+L^2)/6\pi}$	

2.2 동역학적 운동방정식

구조물에 지진하중이 작용할 때 구조물의 층별 응답은 Eq. (3)에 의해 계산된다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (3)$$

여기서, $\ddot{u}$, $\dot{u}$ 및 u 는 구조물의 상대가속도, 상대속도 및 상대변위이고, $\ddot{u}_g$ 는 지반가속도이며, M 은 질량행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성행렬이다. 감쇠행렬 C 는 다양한 방법에 의해 계산될 수 있으나 이 연구에서는 모드중첩법을 사용하였다.

2.3 상태공간모델

동역학적 운동방정식의 계산을 위해 Eq. (4)와 같이 상태공간모델을 작성하였다(Geffroy et al., 2007).

$$\begin{cases} \dot{x} = A_s \cdot x + B_s \cdot u \\ y = C_s \cdot x + D_s \cdot u \end{cases} \quad (4)$$

여기서, x 는 상태벡터(State Vector), u 는 입력벡터(Input Vector), y 는 출력벡터(Output Vector)로써 Eq. (5)와 같이 재정의할 수 있다.

$$x = \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ q \end{Bmatrix} \quad u = \{F\} \quad y = \begin{Bmatrix} q_{out} \\ \dot{q}_{out} \\ F_{out} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

또한, Eq. (4)의 A_s 는 상태(State) 또는 시스템(System)행렬, B_s 는 입력(Input)행렬, C_s 는 출력(Output)행렬, D_s 는 Feedthrough 또는 Feedforward행렬로써, Eqs. (6)~(9)에 의해 계산될 수 있다.

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K - M^{-1}C & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \\ I \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, I 는 $n \times n$ 의 단위행렬이다.

2.4 System Identification

지진하중에 의해 구조물이 손상을 입으면 구조부재의 강성 변화로 인하여 2.2절에서 보인 식들을 통하여 구조물의 거동을 예측하는 것이 불가능하다. 따라서 Fig. 4에 보인 시스템과 Eq. (10)을 통하여 역으로 Eq. (4)의 A_s , B_s , C_s , D_s 및 구조물 강성을 유추하였다.

Fig. 4. General form of System Identification (Van Overschee and De Moor, 1996)

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_s \cdot x_k + B_s \cdot u_k + w_k \\ y_k = C_s \cdot x_k + D_s \cdot u_k + v_k \end{cases} \quad (10)$$

여기서, u_k 는 입력데이터, y_k 는 출력데이터, v_k 는 노이즈 항, Δ 는 지연시간, k 는 이산시간지수(Discrete time index)이고, 모든 화살표는 벡터신호를 나타낸다.

2.5 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 생물 진화의 원리에 근원을 둔 것으로, 우수한 형질을 가진 개체가 우수한 자손들을 생성한다는 자연법칙을 알고리즘에 적용한 것이다. 이러한 유전자 알고리즘은 전통적 최적화 방법(Classical optimization)들과는 상당히 다르다. 전통적 최적화 방법들은 도함수(Gradient)를 이용하여 한정된 공간에서 모든 점의 목적함수(Objective function)를 한 번에 하나씩 탐색을 하거나, 어떤 임의의 점을 선택하여 탐색을 시작하는 방법들을 사용하였다. 그러나 유전자 알고리즘은 Fig. 5에 보인 바와 같이 도함수의 개념을 사용하지 않고 방향성 있는 탐색과 확률 탐색을 수행하기 때문에 연속-불연속의 혼합, 불연속, Non-convex 영역 등을 포함하는 최적화 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 유전자 알고리즘은 이진수의 조합으로 구성된 개체(Individual, 염색체)들의 집단(Population)을 가지고, 선택(Selection), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)라는 세 가지 과정을 수행함으로써 최적화를 하는 알고리즘이다(Park and Ryu, 1999).

일반적으로 구조물최적화문제에서 목적함수는 주로 비용(Cost)을 사용하고 있으나(Kim and Kwon, 2007), 이 연구에서는 벽체의 두께를 목적함수로 사용하였다. 제약조건은 구조물의 초기 벽체 단면적과 최소벽체두께로 고려하였으

며, 구조물의 이산최적화문제에 대한 목적함수 W 및 제약조건은 Eqs. (11)~(13)과 같다.

Fig. 5. Flow of Genetic Algorithm

$$\text{Minimize: } W = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\omega_{ai} - \omega_{ei})^2}{n}} \quad (11)$$

$$\text{subject to: } 0 < A_{obj} \leq A_0 \quad (12)$$

$$0 < t_{obj} \leq t_0 \quad (13)$$

여기서, ω_{ai} 는 해석을 통해 산정된 구조물의 i 번째 고유주기이며, ω_{ei} 는 실험을 통해 산정된 구조물의 i 번째 고유주기이다. A_0 는 초기 벽체의 단면적, A_{obj} 는 손상된 벽체의 단면적이며, t_{obj} 는 손상된 벽체의 두께, t_0 는 초기 벽체의 두께다.

3. 진동대실험 및 구조물 손상도 예측

이 연구에서 제시하고 있는 모델 업데이트의 검증을 위해 진동대 축소모형실험을 수행하였다. 실험에 사용된 구조물의 형상, 재원 및 재료특성은 Fig. 6 및 Table 3에 보인 바와 같으며, 구조물 기초와 슬래브는 강재(Steel)를 적용하였고, 벽체는 알루미늄(sus304)을 적용하였다. 또한 진동대에 작용하는 지진하중은 Fig. 7에 보인 Band-Limited White Noise (BLWN)를 제하여 구조물 응답을 확인하였다.

Table 3. Material Properties

	Basement	Slab	Wall
Material	steel	steel	sus304
Modulus of Elastic (MPa)	210,000	210,000	201,000
Poisson's Ratio	0.30	0.30	0.30
Weight Density (kN/m ³)	78.50	78.50	79.00

(a) Specification of Test

(b) Shaking Table Test

(c) FE Model considering SSI

(d) FE Model w/o considering SSI

Fig. 6. Experimental Setup and FE Model

Fig. 7. Ground Motion used for the Validation Test (Band Limited White Noise)

3.1 손상벽체 강성 계산

Fig. 6에 보인 바와 같이 벽체의 손상을 모사하기 위하여 총 10개의 구멍을 뚫어 벽체의 강성을 저하시켰다. 그러나 이러한 특이형상을 가지는 단면의 강성을 일반적인 공식을 통하여 산정하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 이 연구에서는 유한요소 모델을 사용하여 Fig. 8의 (a)에 보인바와 같이 손상벽체를 모델링하고 Fig. 8의 (b)에 보인 손상이 없는 벽체의 두께를 변화시키면서 손상이 없는 벽체가 손상이 있는 벽체와 유사한 구조적 특성을 가질 때 손상이 없는 벽체의 강성을 계산하였다.

Table 4에 보인 바와 같이 손상된 벽체(Damaged Wall)와 유사한 구조적 특성을 가지도록 손상이 없는 벽체(Equivalent Undamaged Wall)의 두께를 조정한 결과 손상이 없는 벽체의 두께가 손상이 있는 벽체 두께의 약 90.8%를 가질 때 손상된 벽체와 손상되지 않은 벽체의 고유주기 및 모드형상이 유사한 것으로 나타났다.

(a) Damaged Wall

(b) Equivalent Undamaged Wall

Fig. 8. FE Model of Damaged and Equivalent Undamaged Wall

Table 4. Thickness and Stiffness for Damaged and Equivalent Undamaged Wall

Type	Thickness (mm)	Stiffness (N/mm)
Damaged Wall	1.20	584,240
Equivalent Undamaged Wall	1.09	
Ratio (%)	90.833	-

손상된 벽체와 손상되지 않은 벽체의 고유진동수를 Table 5에 나타내었으며, 두 벽체의 주요 모드(Mode)인 1차, 2차, 3차 모드에 대하여 0.3%에서 1.5%의 오차를 가지는 것으로 확인되었다.

Table 5. Natural Frequencies for Damaged and Equivalent Undamaged Wall

Type	Natural Frequency (Hz)		
	1st	2nd	3rd
Damaged Wall	10.444	66.438	187.235
Equivalent Undamaged Wall	10.599	66.286	185.260
Error (%)	1.463	-0.229	-1.066

또한 Fig. 9에 보인 바와 같이 손상된 벽체와 치환 벽체의 모드 형상 또한 1차, 2차, 3차 모드 모두에서 유사한 형상을 보임을 확인하였다. 이상의 결과를 바탕으로 손상된 벽체의 강성이 적절히 산정되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 9. Mode Shape for Damaged and Equivalent Undamaged Wall

3.2 구조물 손상도 예측

지반-구조물 상호작용이 고려된 구조물의 동적변위 데이터를 바탕으로 Figs. 6의 (c), (d)에 보인바와 같이 지반을 고려한 유한요소모델과 지반을 고려하지 않은 유한요소모델에 대한 모델업데이팅을 수행하였다. 모델 업데이팅에 적용된 FE모델은 프레임 및 스프링 요소를 사용하여 구조물 및 지반을 이상화시켰으므로 실제 구조물 및 지반의 특성을 100% 반영하기 어렵다. Kwon et al. (2016)은 이러한 지반-구조물 상호작용 FE모델 작성 시 지반을 근역과 원역으로 구분하여 근역 지반의 경우 솔리드요소로 모델링하고 원역 지반의 경우 스프링 요소를 적용하였다. 이 연구에서도 선행 연구의 모델링 작성 방법을 참고하여 근역의 경우 프레임요소를 모델링하고 원역은 스프링요소를 적용하였다. 또한 프레임요소의 경우 구조물의 연결부에 대한 모델링이 불가능하므로 해당 부분의 질량을 노드에 추가시켜 FE모델의 층별 질량을 진동대실험 모델과 유사하도록 작성하였다. 지반을 고려하지 않은 모델의 경우 구조물은 지반을 고려한 FE모델과 동일하게 작성하였으며, 기초를 고정단으로 처리하였다. 이렇게 작성된 FE모델의 모델업데이팅을 수행한 결과 Table 6에 보인 바와 같이 지반의 고려 유무에 관계없이 모두 5% 이내의 오차를 보여 구조물의 강성을 매우 정확히 예측한 것으로 나타났다.

3.3 상관도 해석

모달변위 등과 같은 모델계수를 개별응답으로 취급하거나 혹은 Modal Assurance Criterion (MAC)값을 산정하고 전체응답으로 취급하여 다양한 상관계수를 정의할 수 있다 (Cho, 2017). MAC값은 Eq. (14)로 산정될 수 있으며, r 은 이론적 모드의 차수, q 는 실험에서 산정된 모드의 차수이다. 또한 ψ_A 는 이론적 모드벡터, ψ_X 는 실험에서 구한 모드벡터이고, 윗첨자 T 는 치환행렬을 나타낸다. MAC값은 최종적으로 0에서 1사이의 값을 가지게 되며, 이론적 모드형상과 실험의 모드형상이 유사할 경우 1에 가까운 값을 가지게 된다.

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\psi_A\}_r^T \{\psi_X\}_q|^2}{(\{\psi_A\}_r^T \{\psi_A\}_r) (\{\psi_X\}_q^T \{\psi_X\}_q)} \quad (14)$$

이 연구에서는 모델업데이팅 시 지반-구조물 상호작용 고려 유·무에 따른 고유주기, 모드형상 및 MAC값에 대한 상관도 해석을 수행하였다. 모델업데이팅 시 지반-구조물 상호작용 고려 유·무에 따른 고유주기는 Table 7에 보인 바와 같이 지반-구조물 상호작용을 고려하였을 경우 실험결과와 비교하여 최고 10.616%의 오차를 보임을 확인하였다. 그러나 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 모델의 경우 2차와 3차 모드에서는 실험값과 비교하여 4%대의 낮은

Table 6. Estimated Stiffness using FE Model Considering SSI and FE Model w/o Considering SSI

Floor	Experiment (N/mm)	Considering SSI		w/o Considering SSI	
		Prediction (N/mm)	Error (%)	Prediction (N/mm)	Error (%)
1	1,286,400	1,285,853	0.043	1,268,955	1.356
2	1,227,440	1,281,802	-4.429	1,284,286	-4.631
3	1,286,400	1,281,699	0.365	1,285,902	0.039

Table 7. Estimated Natural Frequencies w/ or w/o SSI

	Experiment	w/ SSI	Error (%)	w/o SSI	Error (%)
1st	1.121	1.240	-10.616	1.578	-40.767
2nd	4.589	4.351	5.186	4.384	4.467
3rd	6.509	6.180	5.055	6.234	4.225
Avg.	-	-	6.952	-	16.486

오차를 보였으나, 1차 모드에서는 40.767%의 높은 오차를 보였다. 따라서 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 FE 모델의 경우 모델 업데이트를 통하여 구조물의 고유특성을 정확히 예측하지 못하는 것으로 판단된다. 모델업데이트를 통하여 구조물의 모드형상, 고유벡터 및 MAC값을 비교하였으며 그 결과를 Table 8, Figs. 10, 11에 나타내었다.

구조물의 모드형상, 정규화된 고유벡터 및 MAC값은 지반-구조물상호작용 고려 유무에 무관하게 비슷한 값을 보였다. 그러나 모드형상에서 지반-구조물 상호작용을 고려한 FE모델의 경우 구조물의 기초가 실험과 유사하게 수평방향으로 변위가 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 FE모델의 경우 구조물 기초가 고정단으

로 처리되었으므로 수평방향의 변위가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

구조물의 동적거동에서 구조물 기초의 변위는 지반의 영향으로 구조물 상부에 비하여 상대적으로 아주 작은 값을 가진다. 따라서 Fig. 11에 보인 구조물 모드형상이 지반-구조물 상호작용 고려 유·무와 무관하게 큰 차이를 보이지 않는 것이다. 특히 이 연구에서 적용된 축소모형실험의 규모를 고려하였을 때 이러한 특징이 더욱 두드러진 것으로 판단된다. 그러나 실제 규모의 지반-구조물 상호작용 실험을 통한 결과에서는 구조물 기초의 변위가 이 연구에 적용된 실험보다 클 가능성이 있으므로, 지반-구조물 상호작용에 대한 효과를 더욱 명확히 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8. MAC Values Considering SSI and w/o Considering SSI

		Considering SSI			w/o Considering SSI		
		Prediction (Ψ_A)			Prediction (Ψ_A)		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Experiment (Ψ_X)	1st	1.000	0.004	0.002	0.998	0.010	0.005
	2nd	0.000	0.959	0.025	0.001	0.962	0.016
	3rd	0.006	0.017	0.988	0.003	0.011	0.994

Fig. 10. MAC Values w/ and w/o Considering SSI

(a) Considering SSI

(b) w/o Considering SSI

Fig. 11. Mode Shapes w/ and w/o Considering SSI

4. 결 론

이 연구에서는 Structural Health Monitoring (SHM, 구조물 건전성 모니터링)의 한 분야인 유한요소 모델업데이트 수행 시, 지반-구조물 상호작용 고려 유무에 따른 유한요소 모델 업데이트의 정확도를 확인하였다. 연구결과 구조물의 강성 예측, 모드형상 및 MAC Value는 SSI 효과 고려한 FE모델과 그렇지 않은 모델이 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인되었으나, 구조물의 고유진동수는 SSI를 고려한 FE모델의 경우 평균정확도오차 6.952%를 보인 반면, SSI를 고려하지 않은 FE모델의 경우 16.486%를 나타내었다. 따라서 기반암이 아닌 지반에 건설된 구조물의 경우 구조물의 모델 업데이트 수행 시 지반-구조물 상호작용을 고려하여야 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원(20CTAP- C153021-02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

American Society of Civil Engineers (ASCE). (1998). *Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary*. ASCE Standard 4-98, ASCE Standard Series.

Cho, S.H. (2017). Natural excitation test and FE analysis model updating for a tall building. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 1, pp. 265-272.

Dorvash, S., Pakzad, S.N., Lacrosse, E.L., Ricles, J.M., and Hodgson, I.C. (2015). Localized damage detection algorithm and implementation on a large-scale steel

beam-to-column moment connection. *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 3, pp. 1543-1566.

Geffroy, N., Brunetti, L., Bolzon, B., Jeremie, A., and Lottin, J. (2007). *Creation of a state-space model from a finite element model for the active control algorithm efficiency tests*. EUROTeV-Report-2007-054, European Design Study Towards a Global TeV Linear Collider.

Gil, H.B., Hur, J.H., and Kwon, H. (2016). Cable fire due to lighting and repair of Seohae bridge. *KSCE Magazine*, Vol. 64, No. 7, pp. 16-19.

Gong, M., and Park, W. (2019). Finite element model updating of structures using deep neural network. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 1, pp. 147-154.

Jaishi, B., and Ren, W.-X. (2005). Structural finite element model updating using ambient vibration test results. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 617-628.

Jung, D.S., and Kim, C.Y. (2013). Finite element model updating on small-scale bridge model using the hybrid genetic algorithm. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 481-495.

Kim, B.I., and Kwon, J.H. (2007). Optimum design of two-dimensional steel structures using genetic algorithms. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 75-80.

Kim, W.H. (2006). *Evaluation of a simplified criterion for SSI analysis*. Mastre's thesis, Chonnam National University.

Kwon, S.Y., Kim, S.J., and Yoo, M.T. (2016). Numerical simulation of dynamic soil-pile interaction for dry condition observed in centrifuge test. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 4, pp.

- Lim, J.H., and Yoon, H.C. (2019). Real-time pedestrian dynamic-load localization using vision-based motion sensing. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 323-330.
- Lin, Y., Nie, Z., and Ma, H. (2017). Structural damage detection with automatic feature-extraction through deep learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 32, No. 12, pp. 1025-1046.
- Park, J.S., and Ryu, S.K. (1999). Optimal design by genetic algorithm. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 27, No. 4, pp. 155-161.
- Raheem, S.E.A, Ahmed, M.M., and Alazrak, T.M.A. (2015). Evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic response demands of multi-story MRF buildings on raft foundations. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 11-30.
- Van Overschee, P., and De Moor, B. (1996). *Subspace identification for linear systems: Theory, implementation, applications*. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Sung, M.W. (2018). *Finite element model update of structure using large-scale global optimization algorithm*. Master's thesis, Mokpo National University.
- Tran-Ngoc, H., Khatir, S., De Roeck, G., Bui-Tien, T., Nguyen-Ngoc, L., and Abdel Wahab, M. (2018). Model updating for Nam O bridge using particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm. *Sensors*, Vol. 18, No. 12, 4131. doi:10.3390/s18124131
- Wang, H., Lou, M., Chen, X., and Zhai, Y. (2013). Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 54, pp. 31-38.
- Wang, Z., and Cha, Y.J. (2020). Unsupervised deep learning approach using a deep auto-encoder with an one-class support vector machine to detect structural damage. *Structural Health Monitoring*, Article in press. doi:10.1177/1475921720934051
- Yoon, H.C., Elanwar, H., Choi, H.J., Golparvar-Fard, M., and Spencer Jr, B.F. (2016). Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 23, No. 12, pp. 1405-1416.
- Yoon, H.C., Shin, J.H., and Spencer Jr, B.F. (2018). Structural displacement measurement using an unmanned aerial system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 183-192.

Received	September 22, 2020
Revised	September 24, 2020
Accepted	October 5, 2020