

구조안전도 평가를 위한 동적변위 기반 손상도 추정 기법 개발

신윤수¹, 김준희^{2*}

Damage estimation for structural safety evaluation using dynamic displacement measurement

Yoon-Soo Shin¹, Junhee Kim^{2*}

Abstract: Recently, the advance of accurate dynamic displacement measurement devices, such as GPS, computer vision, and optic laser sensor, has enhanced the structural monitoring technology. In this study, the dynamic displacement data was used to verify the applicability of the structural physical parameter estimation method through subspace system identification. The subspace system identification theory for estimating state-space model from measured data and physics-based interpretation for deriving the physical parameter of the estimated system are presented. Three-degree-freedom steel structures were fabricated for the experimental verification of the theory in this study. Laser displacement sensor and accelerometer were used to measure the displacement data of each floor and the acceleration data of the shaking table. Discrete state-space model generated from measured data was verified for precision. The discrete state-space model generated from the measured data extracted the floor stiffness of the building after accuracy verification. In addition, based on the story stiffness extracted from the state space model, five column stiffening and damage samples were set up to extract the change rate of story stiffness for each sample. As a result, in case of reinforcement and damage under the same condition, the stiffness change showed a high matching rate.

Keywords: Displacement data, State-space model, Structural physical parameter estimation, Subspace system identification

1. 서론

전통적으로 구조물의 변위 응답은 구조물의 변형 및 변형률과 직결되어있는 유용한 정보이며 최근 건전도 모니터링, 구조 안전성 및 상태 평가, 시스템 식별 분야의 연구가 활발해짐에 따라 변위 측정에 대한 요구가 높다(Kim and Sohn, 2013). 건물의 경우 비행기 격납고, 체육관, 공연장 등의 대공간 구조물의 천장 처짐을 측정하여 구조물의 건전도를 파악하고(Park et al., 2013), 교량의 경우 주행 중인 트럭의 적재 용량을 교량의 처짐 정도에 따라 추정하는 연구가 수행되었다(Kim et al., 2011). 특히, 동적변위 데이터는 시스템 식별 분야에서 물리적으로 해석 가능한 전산모델을 획득할 수 있기 때문에 정적변위 데이터보다 선호된다(Kim and Lynch, 2012).

변위는 상대적인 물리량이므로 기준점이 필요하여 가속도 계측보다 까다롭다. LVDT와 같은 접촉식 변위 센서는 고정된

기준점을 추가적으로 설치해야 하므로 비용이 증가하고 측정 정확도가 떨어질 수 있다. 그 대안으로 비접촉 광학 기술인 레이저 변위계(Kim et al., 2013), 컴퓨터 비전(Min et al., 2016), GPS(Celebi, 2000)를 이용한 변위 측정법에 관한 연구가 진행 중이다. 실내에서 주로 사용되는 레이저 변위계와 컴퓨터 비전 변위 측정법은 레이저 및 카메라 하드웨어의 발전으로 거리 및 해상도에 따라 마이크로미터(μm)의 정밀도와 수 천 헤르츠(Hz)의 샘플링 주파수(Sampling frequency)로 변위 계측이 가능하다(Kim et al., 2016). 실외 변위계측에서 주로 사용되는 GPS는 정밀한 위치정보를 갖고 있는 베이스(Base)로부터 GPS 데이터를 오차를 보정해주는 GPS RTK(Real Time Kinematic) 기술을 사용할 경우 1~2cm의 정밀도를 확보할 수 있어 드론, 무인자동차, 건물 시공 중 연직도 관리에 사용하기 위한 연구가 수행되고 있다.

부공간 시스템 식별법(Overschee and Moor, 1994, 1996)은 구조물의 동적 응답 데이터를 활용하여 전산해석이 가능한 이산화 된 상태공간모델(State-space model)을 추정하는 블랙박스(black-box) 시스템 식별로 평가받고 있다. 기존 층별 가속도 데이터를 활용하여 모드해석 및 모드정보를 추정하고 모델 업데이트 수행하여 전산구조모델을 획득하였고(Kim and Lynch, 2012) 더 나아가, 부공간 시스템 식별법을 활용한 구조

¹정회원, 단국대학교 건축공학과 박사과정

²중신회원, 단국대학교 건축공학과 부교수

*Corresponding author: junheekim@dankook.ac.kr

Architectural Engineering, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea, 16890

•본 논문에 대한 토의를 2020년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

물의 물리량 추정 기법을 적용하여 정량적인 구조물성치를 획득하는 연구가 수행되었다(Kim and Lynch, 2012). 그러나 층별 변위 데이터를 이용하여 모드 해석 및 부공간 시스템 식별법을 적용한 구조물 물리량 추정에 관한 연구는 거의 없다.

본 논문에서는 실험실 규모의 동적가진기와 3층 철제 구조물을 이용하여 각 층의 변위 데이터 획득 및 특이값 분석(Singular Value Decomposition)을 통해 모드를 추출하고 부공간 시스템 식별법을 적용하여 3층 철골 구조물의 구조물성치를 획득하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에는 시계열 데이터로부터 시스템의 상태공간모형을 추정하는 부공간 시스템 식별법의 이론과 구조물성치를 추정하는 방법론에 대해 기술하였다. 3장에는 기술된 이론을 검증하기 위해 구조물 모형의 동적 실험을 수행하여 기동 강성이 변화된 시나리오별로 기동 강성을 추출하여 그 결과를 정량적으로 기술하였다.

2. 이론

2.1 계측 데이터로부터의 상태공간모형 추정

부공간 시스템 식별은 시스템의 기본 물리학을 고려하지 않고 시스템으로부터 계측된 시계열 데이터에서 직접 시스템의 상태공간모형을 추정할 수 있다. 다수의 시스템 식별 알고리즘 중에서, 부공간 시스템 식별을 위한 수치 알고리즘이 본 연구에서 선형시간불변(Liner time invariant) 상태공간모형 추정을 위해 채택되었다(Overschee and Moor, 1994, 1996). 부공간 시스템 식별 알고리즘은 두 가지 주요 단계로 구성된다. 우선 칼만필터 상태시퀀스는 사영(Projection) 즉, QR 분해의 수치 연산과 배치 형태의 입출력(Input-output) 데이터를 사용한 특이값 분해에 의해 추정된다. 그 후 추정된 상태시퀀스 \hat{X}_i 및 \hat{X}_{i+1} 에 기초하여, 이산 시간(Discrete time) 상태공간모형에 대한 시스템 행렬 $[A, B, C, D]$ 는 최소자승법에 의해 식(1)과 같이 고유하게 결정된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_i \\ U_{i+1} \end{bmatrix}^\dagger \quad (1)$$

여기서 \bullet^\dagger 는 무어-펜로즈 의사역행렬이며 U_{i+1} 및 Y_{i+1} 는 각각 측정된 입력 및 출력 데이터다. 일반적으로, 시스템 동역학이 적절하다고 가정하면 직통 행렬 D 는 부분 공간 시스템 식별에서 무효한 행렬(Null matrix)로 결정된다. QR 분해의 특성으로 인해, 추정된 상태시퀀스의 정규직교기저(Orthogonal basis)는 시스템의 물리량과 관계없이 임의로 선택된다. 또한

시스템 행렬 $[A, B, C, D]$ 의 추정값은 실수로 구성되기 때문에 완전한 매개변수화 된 상태공간모형에 대한 시스템 식별로 해석될 수 있으며 물리적으로 해석되지 않으므로 블랙박스 모델이라고 한다.

블랙박스모형을 물리적으로 해석할 수 있는 순서도가 Fig.1에 제시되어 있다. 우선 이산시간 상태공간모형을 연속시간(Continuous time) 상태공간모형으로 변환한다. 그 후 상태공간모형의 관측가능한표준형식(Observability canonical form)은 유사변환(Similarity transformations)을 통해 계산된다. 관측가능한표준형식은 선형 시스템 이론에서 측정된 외부 시스템 출력으로부터 내부 상태 식별에 의해 해석될 수 있으며 상태공간모형에서 계측행렬 C 는 단위행렬의 부분적인 형태를 갖는다(Brewer, 1978). 이러한 과정은 블랙박스모형을 그레이박스모형(Gary-box model)로 변환한다. 변환의 자세한 과정은 참고 문헌(14)에서 찾을 수 있다. 그 결과, n 개의 자유도를 가진 시스템에 대한 n 개의 계측에 대해 그레이박스모형의 최종 형태는 다음과 같다.

$$A_{gr} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ X & Y \end{bmatrix} \in R^{2n \times 2n} \quad (2)$$

$$B_{gr} = \begin{bmatrix} \approx 0 \\ Z \end{bmatrix} \in R^{2n \times n} \quad (3)$$

$$C_{gr} = [I \ 0] \in R^{n \times 2n} \quad (4)$$

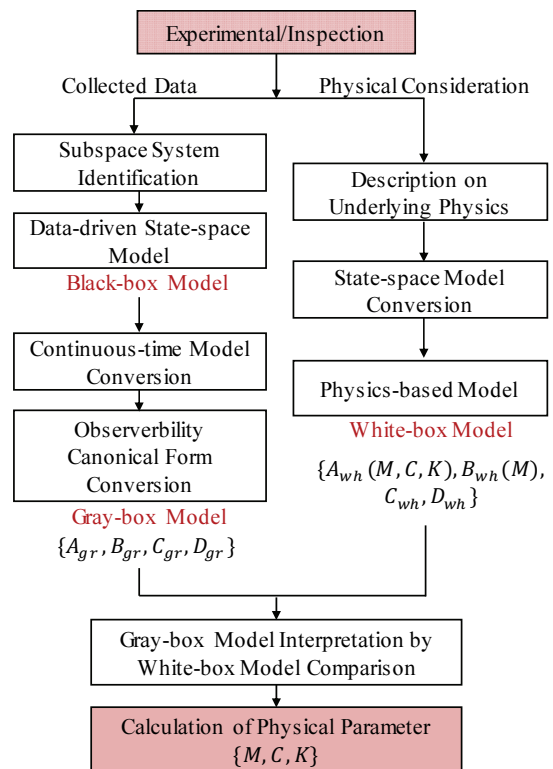


Fig. 1 Data-driven physical parameter estimation

$$D_{gr} = [W] \in R^{n \times n} \quad (5)$$

여기서, 아래 첨자 gr은 그레이박스모델이며 $I \in R^{n \times n}$ 과 $0 \in R^{n \times n}$ 은 각각 항등 행렬과 무효한 행렬이다. $\approx 0 \in R^{n \times n}$ 은 0과 근사한 값의 행렬이며 $X \in R^{n \times n}$, $Y \in R^{n \times n}$ 및 $W \in R^{n \times n}$ 은 0이 아닌 값을 갖는 시스템 행렬의 일부다.

2.2 구조물의 지반가진 동적 실험으로부터의 물리량 추정

식별된 상태공간모델로부터의 물리량 추정은 해당 시스템에 대한 물리학의 기본 원리에서 파생된 추가 모델이 필요하며 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 n층의 전단구조물을 예로 들었다.

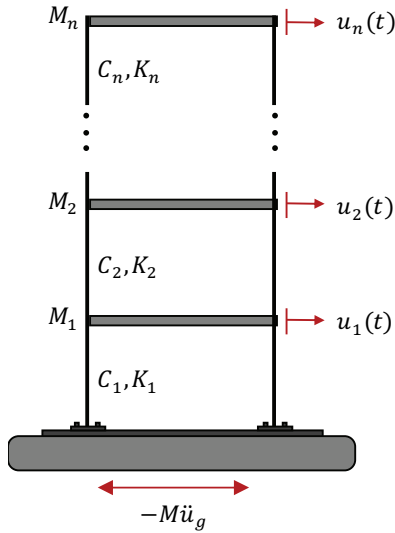


Fig. 2 A dynamic test of an n-story lumped mass shear frame structure

지반 가진시 점성감쇠를 갖고 전단구조물로 이상화된 다자유도 시스템의 운동방정식은 식(6)과 같이 구성된다.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

$M \in R^{n \times n}$, $C \in R^{n \times n}$, $K \in R^{n \times n}$ 은 각각 시스템의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며 $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ 는 각 층의 가속도, 속도, 변위 벡터의 시간함수이며 지반지점으로부터의 상대값, $-M\ddot{u}_g(t)$ 는 지반에 가진되는 가속도 벡터의 시간함수다. 구조물의 변위응답이 계속 값일 때 상태공간모델의 상태벡터는 $x(t) = [u(t)^T \dot{u}(t)^T]^T$ 로 정의된다. 정의된 상태벡터에 따라 물리 기반 모델은 식(7)~(9)와 같이 시스템 행렬을 사용하는 연속시간 상태공간모델로 도출된다.

$$A_{wh} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \in R^{2n \times 2n} \quad (7)$$

$$B_{wh} = \begin{bmatrix} \{0\} \\ -\{1\} \end{bmatrix} \in R^{2n \times n} \quad (8)$$

$$C_{wh} = \begin{bmatrix} \{I\} \\ \{0\} \end{bmatrix} \in R^{n \times 2n} \quad (9)$$

여기서, 아래첨자 wh은 화이트박스모델을 나타낸다. 본 연구에서 위의 상태공간모델 즉, 식(7)~(9)는 기본 물리학에 의해 해석 가능하고 시스템의 물리량 포함하기 때문에 화이트박스 모델로 불린다. 화이트박스모델을 사용함으로써, 실험적으로 유도된 그레이박스모델 즉, 식(2)~(4)로부터 물리량이 결정될 수 있다. 화이트박스와 그레이박스모델 사이에서 행렬이 비교됨으로써 식(10)~(12)와 같이 정의된다.

$$X = -M^{-1}K \quad (10)$$

$$Y = -M^{-1}C \quad (11)$$

$$Z = M^{-1} \quad (12)$$

그레이박스모델로부터 X, Y, Z 가 주어질 때, 질량 행렬 M 은 식(12)에 의해 결정되며, 질량이 결정된 강성 및 감쇠행렬 C 및 K 는 각각 식(10), (11)에 의해 결정된다.

3. 실험

3.1 실험 개요

변위응답 데이터와 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법의 실험적 검증을 위해 진동대와 3자유도 구조물을 이용하여 Fig. 3과 같이 동적 가진 및 변위응답 계측 실험 시스템을 구축하였다.

실험을 위해 높이 1.56m, 약 60kg의 3층 철제 구조물이 제작되었다. 철제 구조물의 슬래브는 무게 20kg, 두께 2cm이며 기둥은 높이 0.5m, 폭 6cm, 두께 3mm의 철판 4개를 층의 모서리를 따라 약축 방향으로 L형 플레이트와 볼트, 너트로 고정되었다. 또한 기둥 강성 보강 실험을 위해 4mm 두께의 기둥이 추가적으로 제작되었다.

진동 실험을 위해 서보모터로 구동되는 1방향 진동대를 활용하여 구조물의 약축 방향으로 최대 가속도 0.5g의 백색 잡음(White noise)으로 55초간 철제 구조물이 가진되었으며 진동대의 급격한 움직임으로 인한 구조물의 충격하중을 방지하기 위해 백색 잡음에 튜키 윈도우(Tukey window)를 적용하여 가진 초기, 후기의 진동크기를 감소시켰다.

구조물의 시스템 식별 및 물리량 추정 기법 적용을 위해

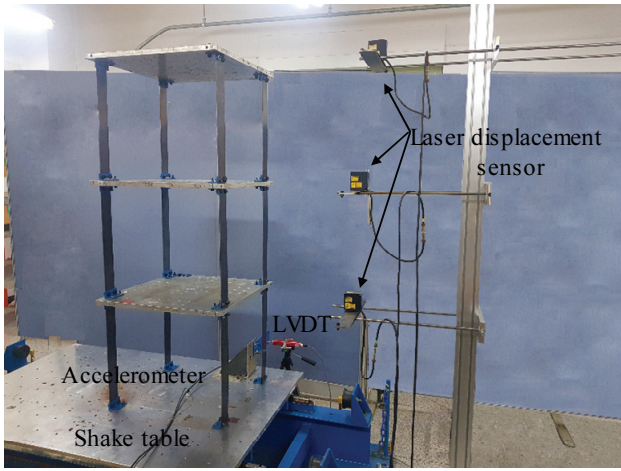


Fig. 3 Experimental set-up: three-story building frame on the shake table and laser sensors

200Hz의 샘플링 주파수로 데이터를 획득하였다. 철제 구조물의 각 층의 변위를 계측하기 위해 광삼각 레이저 변위계가 진동대 외부의 지그(Jig)에 설치되었고 지반의 변위와 가속도를 계측하기 위해 LVDT, 가속도계가 설치되었다. 철제 구조물이 진동대로부터 55초간 가진되는 동안 계측을 하며 가진이 종료된 후 15초간의 자유진동이 추가적으로 계측되었다. 또한 변위응답 데이터의 부공간시스템 식별법 적용을 위한 상대변위 획득을 위해 레이저 변위계로부터 계측된 철제 구조물의 변위 데이터에서 LVDT에서 계측된 진동대의 변위를 제거하여 상대변위를 추출하였다.

계측된 데이터로부터 철제 구조물의 최적화된 상태공간모형을 결정하기 위해 진동대의 가속도데이터와 철제 구조물의 상대변위를 활용한 입출력 부공간(Input-output subspace) 식별 시스템으로부터 이산화 된 상태공간모형을 생성하고 상태공간방정식(State-space equation)을 통해 시간이력 해석을 수행하여 생성된 상태공간모형의 타당성을 검증하였다. 또한, 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법의 정밀성을 파악하기 위해 철제구조물의 기동 강성을 5가지의 보강 및 손상 시나리오를 설정하여 출력 데이터만 사용하는 부공간(output-only subspace)식별법을 활용하여 강성 손상도 변화를 파악하였다.

3.2 베이스라인(Baseline) 구조물의 실험 및 강성추정

진동대에 가진한 백색 잡음에 대한 개별 층증 위치별 70초 동안 200Hz로 계측한 결과가 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4(a)는 진동대의 LVDT에서 측정된 변위데이터이다. 서보모터에 입력된 최대 가속도 0.5g의 백색잡음 신호는 1.5mm의 최대 변위로 진동함을 확인하였다. Figs.4(b)~(d)는 각각 철제 구조물의 1, 2, 3층의 절대변위 즉, 진동대의 움직임이 포함된 변

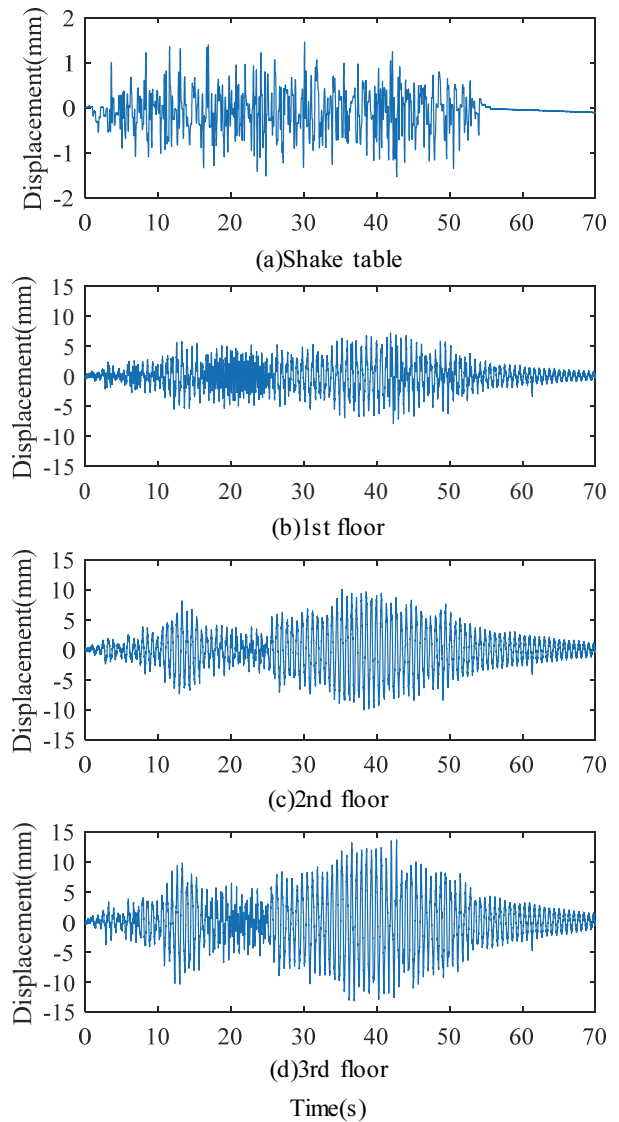


Fig. 4 Absolute displacement data measured from displacement sensors

위가 레이저 변위계로부터 측정된 데이터이다. 1층의 최대 변위는 6.8mm 발생했으며 3층의 최대변위는 13.9mm 발생하였다. 또한 55초 동안의 가진이 끝난 후 15초 동안 진동대의 변위는 발생하지 않고 철제 구조물의 1, 2, 3층에서 감소 자유진동 현상이 나타난다.

입출력 부공간 식별 시스템으로부터 이산화 된 상태공간모형을 생성하기 위해 입력 데이터인 진동대의 가속도가 계측되어 Fig. 5에 제시되어 있다. 최대 가속도는 0.51g로 계측되었으며 튜키 윈도우가 적용된 신호가 가진되어 작은 진동으로 시작하여 작은 진동으로 종료되고 55초 동안의 진동 후에 15초 동안 진동이 발생하지 않았다.

광삼각 레이저로부터 측정된 철제 구조물의 1, 2, 3층 절대변

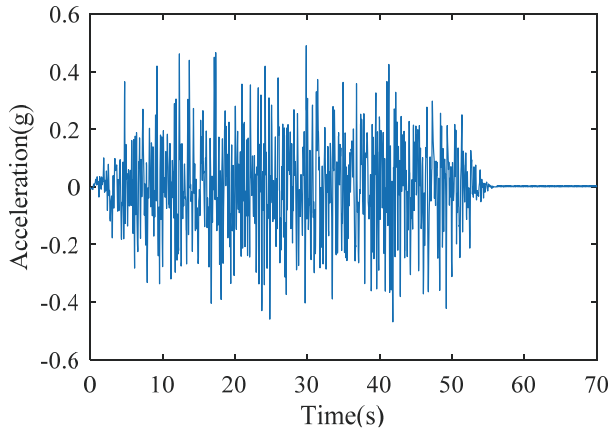


Fig. 5 Acceleration data measured on the shake table

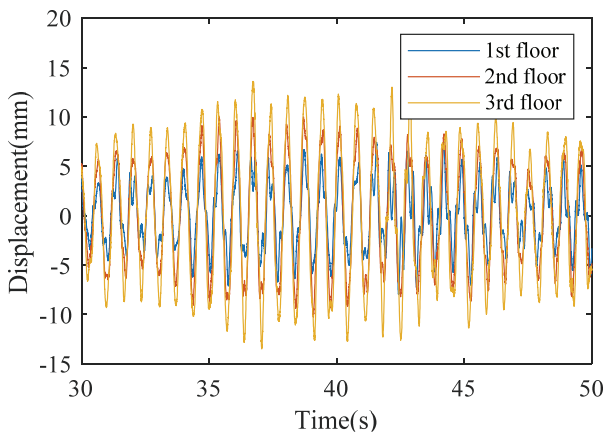


Fig. 6 Relative displacement data for each story to ground motion

위에서 LVDT로부터 측정된 진동대의 변위가 제거되어 상태공간 모델을 생성하기 위한 철재 구조물의 상대변위가 도출되었고 30초부터 50초 사이를 확대한 그래프가 Fig. 6에 제시되어 있다. 진동대의 움직임에 비해 철재구조물의 움직임이 월등히 크기 때문에 철재구조물의 상대변위와 절대변위의 전체적인 진동 형상 트렌드에는 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

진동대의 가속도와 철재 구조물의 상대변위 데이터의 입출력 부공간 식별 결과로 이산화된 질량, 강성, 감쇠 행렬 등의 상태공간모델이 생성되었으며 상태공간방정식을 통해 전산 해석된 상태공간 모델의 예측 데이터를 실제 상대 변위 데이터와 비교하였다. 두 데이터 사이의 rms 오차는 1, 2, 3 층 각각 0.13mm, 0.07mm, 0.09mm로 높은 정확성을 나타내고 있어 이를 통해 높은 정밀도의 상태공간 모델이 생성되었음을 확인하였다. 데이터의 직접 비교를 위해 두 데이터를 겹쳐 그렸으며 30초부터 50초 사이를 확대하여 Fig. 7에 제시하였으며 예측된 데이터가 실제 계측 데이터를 따라 거동하는 것을 관측할 수 있다.

이산화된 상태공간모델은 물리적인 의미를 내포하지 않아

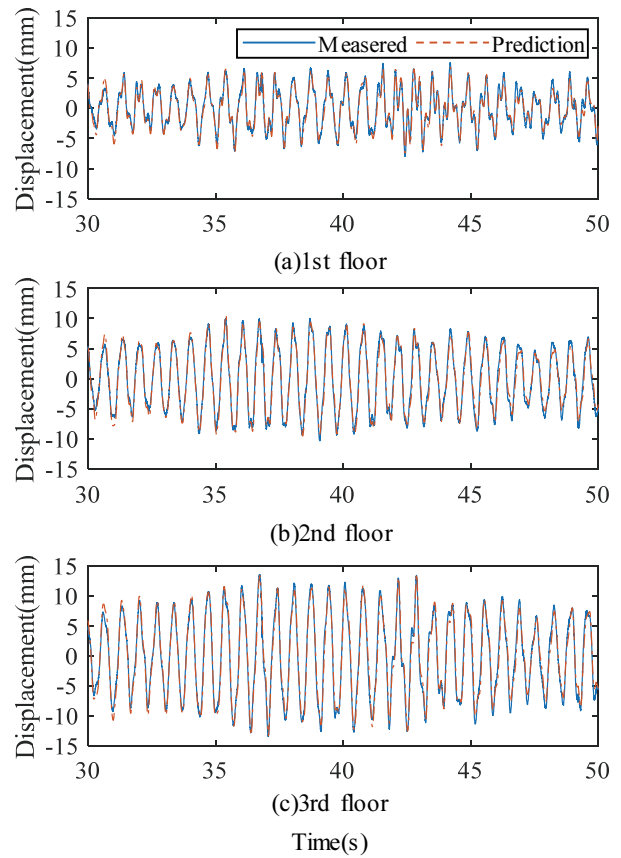


Fig. 7 Comparison of predicted and measured displacement data

물리적인 의미를 갖도록 연속시간 모델로 변환하여 물리적 해석이 가능한 최종적인 시스템 모델 행렬을 구성한 뒤 관측 가능정규형 상태공간 모델의 물리적 해석을 통해 물리변수 형태의 모델을 획득하였다. 또한, 특정 숫자의 조합에 불과한 해석된 강성행렬에 물리적 의미를 부여하기 위해 단위를 결정하기 위해 미리 계측한 층 질량을 3층, 2층, 1층에 각각 20kg, 21kg, 21kg 으로 대입하였다. 기둥의 질량을 분배하여 층 질량에 포함시켰기 때문에 층간 질량은 상이하다. 그 결과 철재 구조물의 강성 행렬은 식(13)과 같다. 약 9000N/m의 층 강성이 대칭행렬(Symmetric matrix)의 형태로 도출되었다.

$$K_{IO} = \begin{bmatrix} 18092 & -9086 & 173 \\ -8687 & 18143 & -8866 \\ 150 & -9838 & 9235 \end{bmatrix} (N/m) \quad (13)$$

출력 데이터만을 사용하는 부공간 식별 시스템은 입출력 부공간 식별 시스템과 달리 입력 데이터를 사용하지 않기 때문에 상태공간모델을 이용한 해석 데이터와 실제 데이터를 비교 분석할 수 없기 때문에 입출력 부공간 식별 시스템과의 최종 강성 행렬의 비교를 통해 타당성을 검증하였다. 출력 데

이터만 사용하는 부공간 식별 시스템과의 강성 행렬은 식(14)와 같다.

$$K_O = \begin{bmatrix} 18025 & -9055 & 147 \\ -8671 & 18137 & -8859 \\ 155 & -9834 & 9237 \end{bmatrix} (N/m) \quad (14)$$

정량적인 비교를 위해 $|(K_{IO} - K_O)/K_{IO} \times 100|$ 을 하여 입출력 부공간 식별 시스템으로부터 추정된 강성 행렬(K_{IO})에 대한 출력 데이터만 사용하는 부공간 식별 시스템과의 강성 행렬(K_O)의 오차율을 산정할 수 있다.

$$|(K_{IO} - K_O)/K_{IO} \times 100| = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.84 & 1.07 \\ 0.23 & 0.25 & 0.31 \\ 0.17 & 0.27 & 0.28 \end{bmatrix} (\%) \quad (15)$$

식(15)과 같이 입출력 부공간 식별 시스템과 출력 데이터만 사용하는 부공간 식별 시스템에서 구성된 상태공간 모델로부터 추정되는 강성 행렬의 오차는 대체로 1%미만으로 미미하다. 따라서 입출력 부공간 식별 시스템과 같이 출력 데이터만 사용하는 부공간 식별 시스템 역시 신뢰할 수 있다는 결과를 확인하였고 출력 데이터만 사용하는 부공간 식별 시스템으로부터 추출된 강성을 베이스라인으로 이후 연구 과정을 수행하였다.

3.3 기둥의 보강 및 손상 시나리오별 강성추정

베이스라인 데이터를 기준으로 철재 구조물의 보강 및 손상 시나리오를 결정하고 기둥의 강성 변화율을 식별하는 실험을 수행하였다. 시나리오 단계별로 각각 다른 부분의 기둥 강성을 손상 및 보강시켜 5가지의 손상시나리오를 설정하였으며, 출력 데이터만을 사용하는 부공간 시스템 식별법으로

강성행렬을 도출하였다. 보강 및 손상 방법은 기둥을 제거하거나 두께를 3mm에서 4mm 교체 혹은 너트를 제거하였으며 자세한 내용은 Table 1에 기술되어있다.

각 시나리오별로 철재구조물의 1, 2, 3층 상대변위를 추출하여 출력 데이터만 사용하는 부공간 식별법을 활용하여 도출된 층강성 변화율이 Fig. 8에 제시되어있으며 정량적 수치는 Table 2에 제시되어있다. Case1에서 1층의 기둥 1개소를 4mm 두께의 부재로 교체하였을 때 1층의 층강성이 36.6% 증가했으며 Case2에서 2층의 기둥 1개소를 제거했을 때 2층의 층강성이 25.7% 감소하였다. Case3에서는 Case1과 같이 3층의 기둥 1개소를 4mm 두께의 부재로 교체하여 35.2%의 층강성 증가율이 확인되었다. Case4에서는 3층 슬래브와 기둥을 연결하는 L형 플레이트의 너트를 2개 제거했을 때 층강성이 16.3% 감소했으며 Case5에서는 1층, 2층의 너트를 각각 2개씩 제거했을 때 각각 14.9%, 15.1%의 감소된 층강성이 확인되었다.

기둥 1개소의 두께를 4mm로 변경한 Case1, 3의 1, 3층 강성 변화율이 각각 36.6%, 35.2%이고, 너트 2개를 제거한 Case4,

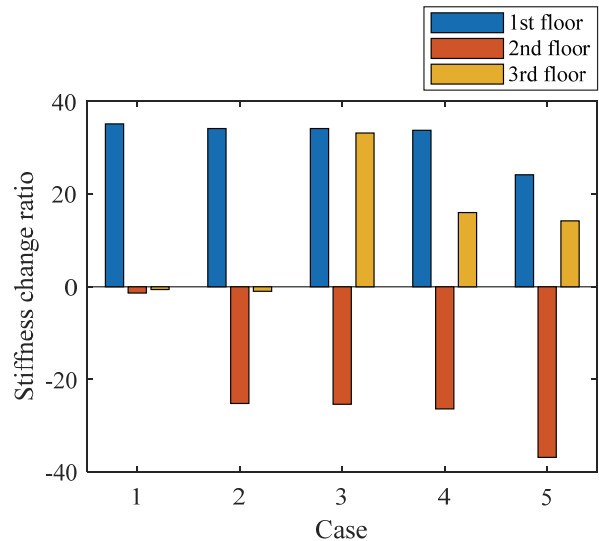


Fig. 8 Story stiffness change ratio for each case

Table 1 Damage scenario

	Location		
	1st floor	2nd floor	3rd floor
Case1	·Replace 1column (3mm → 4mm)	-	-
Case2	·Reinforce 1column (3mm → 4mm)	·Remove 1column	-
Case3	·Reinforce 1column (3mm → 4mm)	·Remove 1column	·Reinforce 1column (3mm → 4mm)
Case4	·Reinforce 1column (3mm → 4mm)	·Remove 1column	·Reinforce 1column (3mm → 4mm) ·Remove 2nuts
Case5	·Reinforce 1column (3mm → 4mm) ·Remove 2nuts	·Remove 1column ·Remove 2nuts	·Reinforce 1column (3mm → 4mm) ·Remove 2nuts

Table 2 Story Stiffness change ratio for each scenario

	Damaged and reinforced contents	Story stiffness change ratio [%]
Case1	·1st floor : Reinforce 1column	·1st floor : +36.6
Case2	·2nd floor : Remove 1 column	·2nd floor : -25.7
Case3	·3rd floor : Reinforce 1column	·3rd floor : +35.2
Case4	·3rd floor : Remove 2nuts	·3rd floor : -16.3
Case5	·1st floor : Remove 2nuts ·2nd floor : Remove 2nuts	·1st floor : -14.9 ·2nd floor : -15.1

5에서 1, 2, 3층의 강성 변화율이 각각 14.9% 15.1% 16.3%로, 동일한 조건의 보강 및 손상에 대한 강성 변화율이 높은 일치율을 보이는 것을 확인하였다.

3. 결론

최신의 GPS, 컴퓨터비전, 광학레이저센서의 개발로 구조물의 진동 변위응답 계측이 용이해지고 있는 구조물 계측분야의 움직임에 반영하여, 본 논문에서는 동적 변위데이터를 활용한 부공간 시스템 식별법이 적용된 구조물 물리량 추정 기법의 적용성을 검증하였다. 본 연구의 이론적 내용은 진동 시스템의 계측 데이터로부터의 상태공간모형을 추정하기 위한 부공간 시스템 식별 이론 및 그레이박스모형 변환 과정으로 구성되어 있다. 이를 바탕으로 시스템의 물리량을 도출하기 위한 물리적 해석방법론 제시하였고, 개발된 이론의 실험적 검증을 위해 동적 실험을 수행하였다.

구조물의 동적변위 데이터를 획득하기 위해 실험실 규모의 3자유도 철제 구조물을 제작하였으며 진동대를 활용해 지반 가진하여 각 층의 변위 데이터와 진동대의 가속도 데이터를 계측하였다. 계측된 데이터를 활용해 입출력 부공간 시스템 식별법으로부터 이산화 된 상태공간모형을 생성하였고 상태공간 모델의 정밀도를 파악하기 위해 상태공간방정식을 통해 전산 해석 하여 실제 데이터와 예측 데이터의 높은 일치율을 확인하였으며, 철제 구조물의 상태공간모델로부터 층강성을 추출하였다.

또한 출력 데이터만 사용하는 경우의 상태공간모형을 입출력 데이터를 사용한 상태공간모형과의 비교를 통해 출력 데이터만 사용하는 상태공간모형의 정밀성을 검증하였고 출력 데이터만 사용하는 상태공간모델로부터 추출된 층강성을 기준으로 5가지의 기동강성 보강 및 손상 시나리오를 설정하여 매 표본별 층강성 변화율을 추출하였으며 동일한 조건의 보강 및 손상의 경우, 강성 변화가 높은 일치율을 보이는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신기획평가원이 주관하는 ICT융합서비스경쟁력강화(No.20180015400022002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Kim J.H., Sohn H., (2013), In situ measurement of structural mass, stiffness, and damping using a reaction force actuator and a laser Doppler vibrometer, *Smart Materials and Structures*, 22(2013).
2. Park H.S., Kim J.M., Choi S.W., Kim Y.S., (2013), A Wireless Laser Displacement Sensor Node for Structural Health Monitoring, *Sensors*, 13(10), 13204-13216.
3. Kim J.H., Lynch P.J., Lee J.J., Lee C.G., (2011), Truck-based mobile wireless sensor networks for the experimental observation of vehicle-bridge interaction, *Smart Materials and Structures*, 20(6), 065009.
4. Kim J.H., Lynch P.J., (2012), Subspace system identification of support excited structures—Part II: Gray-box interpretations and damage detection, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(15).
5. Kim J.H., Kim K.Y., Sohn H., (2013), Data-driven physical parameter estimation for lumped mass structures from a single point actuation test, *Journal of Sound and Vibration*, 10(16).
6. Min K.W., Jang S.J., Kim J.H., (2016), A Standalone Vision Sensing System for Pseudodynamic Testing of Tuned Liquid Column Dampers, *Journal of Sensors*, 2016(4), 1-11.
7. Celebi M., (2000), GPS in dynamic monitoring of long-period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(5), 477-483.
8. Kim J.H., Kim K.Y., Sohn H., (2016), Development and full-scale dynamic test of a combined system of heterogeneous laser sensors for structural displacement measurement, *Smart Materials and Structures*, 25(6), 065015.
9. Kim J.H., Lynch P.J., (2012), Subspace system identification of support-excited structures?Part I: theory and black-box system identification, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(15).
10. Kim J.H., Lynch P.J., (2012), Autonomous Decentralized System Identification by Markov Parameter Estimation Using Distributed Smart Wireless Sensor Networks, *Journal of Engineering Mechanics*, 138(5), 478-490.
11. Overschee P.V., Moor B.D., (1994), N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems, *Automatica*, 30(1), 75-93.
12. Overschee P.V., Moor B.D., (1996), Subspace Identification for Linear Systems, *Kluwer Academic Publishers*.
13. Brewer J.W., (1978), Kronecker products and matrix calculus in system theory, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 25, 772-781.
14. Kasai T., Lin K.M. (2002), Identification of non-proportional modal damping matrix, *Systems and Signal Processing*, 921-934.

Received : 10/25/2019

Revised : 12/20/2019

Accepted : 12/30/2019

요 지 : 최근 구조물 계측분야에서 구조물의 동적 변위응답 측정에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 본 연구는 이와 같은 동적 변위데이터의 활용도를 넓히고자 구조안전도 평가를 위한 방법론 제시를 목표로, 동적 변위데이터를 활용하여 부공간 시스템 식별법이 적용된 구조물 물리량 추정기법을 개발하였다. 진동 변위 데이터로부터의 상태공간모델을 추정하기 위한 부공간 시스템 식별 이론과 시스템의 물리량을 도출하기 위한 물리해석 기법을 제시하였고 실험적 검증을 위해 동적 실험을 수행하였다. 3자유도 철골 구조물을 제작하여 진동대를 활용해 지반 가진하여 각 층의 변위 데이터와 진동대의 가속도 데이터를 계측하였다. 계측된 데이터를 활용해 이산화 된 상태공간모델을 생성하였고 정밀도 파악을 위해 상태공간방정식을 통한 전산 해석을 수행하였으며, 실제 구조물의 상태공간모델로부터 층강성을 추출하였다. 또한 상태공간 모델로부터 추출된 층강성을 기준으로 5가지의 기둥강성 보강 및 손상 시나리오를 설정하여 매 시나리오별 층강성 변화율을 추출하였으며 동일한 조건의 보강 및 손상의 경우, 강성 변화가 높은 일치율을 보이는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 변위데이터, 상태공간모델, 구조물물리량추정기법, 부공간시스템식별법
