

원격 레이저 변위계측과 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법

Structural Parameter Estimation using Remote Laser Displacement Measurement System and Subspace System Identification Method



김 준 희*
Kim, Junhee

1. 구조물 유지관리를 위한 시스템 식별 기술의 개요

사용중 건설구조물의 유지관리를 위한 정기적인 육안조사를 대체하고자, 유지관리의 자동화(automation) 및 상태기반 유지관리(condition-based maintenance)와 같은 새로운 유지관리 방법론의 패러다임을 제시한 구조건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 시스템의 적용이 대형 건축물 및 중요도가 높은 사회기반시설물을 중심으로 증가되고 있다. 이는 구조물 계측 및 계측 데이터의 공학적 처리를 바탕으로 구조물의 상태를 파악하고자하는 구조 시스템 식별 문제로 귀결되며,

시스템 식별 기술은 본 구조건전성 모니터링 시스템의 핵심기술이 된다.

시스템 식별 기술에 관한 구조공학분야에 특화된 기술들 중에 하나가 모드 해석/실험(modal analysis /testing)이다. 본 기술은 지난 40여 년간 기계, 항공 분야에서 선도적으로 기술적, 학문적인 발전이 이루어져, 현재 실용화 기법으로 해당분야 산업현장에서 자리매김을 하였다(Maia et al. 1997, Ewins 2000). 이에 대한 연구확장으로 추정된 대상 구조물에 대한 모드정보(modal parameters)를 바탕으로 도면기반의 전산구조해석 모델을 수정하는 모델 업데이트(model updating) 기법이 현재 구조공학분야에서 활발히 활용되고 있다. 구조물 형식별로, 철근콘크리트 골조건물(Yu et al. 2007), 타워 구조물(Chung et al. 2012), 장대 현수교(Kurata et al. 2013)에 대한 국내 연구자들의 모델 업데이트

* 단국대학교 건축대학 건축공학과 조교수,
junheekim@dankook.ac.kr

트 연구결과를 확인할 수 있다.

본 모드 해석/실험에 기반한 모델 업데이트 기법을 대형 건축구조물에 적용할 수 있는 현실적인 방법은 상시진동 계측에 의한 모드 추정일 수 있다. 풍하중 혹은 주변 기계 진동원 의한 백색잡음에 대한 구조물의 상시진동응답을 계측 후 대상 구조물의 모드정보를 추정하고 모델 업데이트 수행하여 전산구조모델을 획득할 수 있다. 다만, 대형 건축/토목구조물의 경우 본 기법의 적용이 용이하나, 중소 건축물의 경우 상시진동 응답이 매우 작아, 모드 정보를 추정하기 힘든 경우가 발생하기도 한다.

상기의 상시진동원 미약 및 부재와 같은 모델 업데이트 기법의 실험적 제약뿐만 아니라, 모델 업데이트 기법의 해석적 부분인 유한요소모델 수정기술의 역학적 혹은 수학적 문제점들이 지적될 수 있다. 대상 구조물을 대변하는 전산구조모델을 결정하기 위한 유한요소모델 수정기술은 초기 유한요소모델 구축시의 다양한 기본가정(물성치, 부재간의 접합, 지점/경계조건 등)에 큰 영향을 받아 사용자의 공학적 결정이 매우 중요하다. 또한, 수학적 관점에서 유한요소모델 수정기술은 최적화 문제(optimization problem)를 푸는 문제로, 실험을 통해 추정된 제한된 수의 모드정보로부터 유한요소모델의 다양한 변수를 결정하는 구속조건이 부족한(under-determined) 최적화문제로서 최종 해의 유일성을 보장할 수 없다(Kim et al. 2013 a). 따라서 민감도 해석 및 수정 부재의 그룹화(Yu et al. 2007) 등 대상 구조물에 대한 역학적 고려가 필요하므로 자동화에 어려움이 있다. 보다 근본적인 문제점으로 대상 구조물의 물성치 수정은 강성에만 국한하여, 구조물 질량은 기지의 가정값을 그대로 활용하는 한계가 있다.

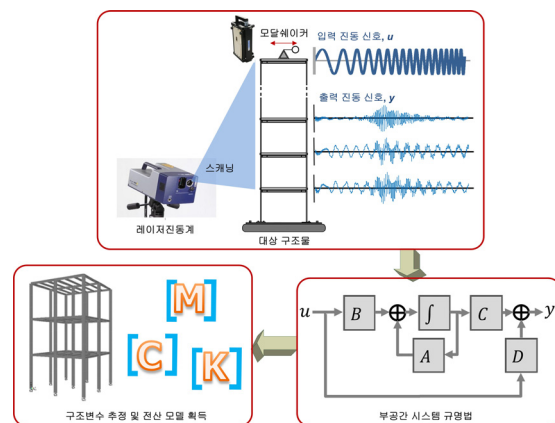
본 기술기사에서는 사용중 구조물의 전산구조모델을 추정하는 시스템 식별을 위해, 원격 레이저 변위계측과 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법을 소개하고자 한다. 본 방법은 현장 적용성이 뛰어난 비접촉식 레이저 모니터링 시

스템과 상용 가진기에 의한 효율적인 구조물 가진 실험을 통해 대상 구조물의 동적데이터 수집 후, 부공간 시스템 식별법(subspace system identification)을 적용하여 상태공간모델을 추정하여 데이터 기반 유한요소모델(data-driven finite element model)이라 명명된 구조물의 전산구조모델을 추출하는 기법으로 구성된다. 실 구조물 적용 예로 소형 철골 구조물 및 공연장 건물의 콘크리트 발코니에 대한 구조 물리량 추정을 소개한다.

2. 현장 가진실험에 기초한 구조 물리량 추정 기법

2.1 기법 개요

원격 레이저 변위계측과 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법은 <Fig. 1>과 같이 도식적으로 요약될 수 있다. 모달셰이커(modal shaker)를 사용하여 구조물을 가진하고 비접촉 레이저 계측기 및 스캐닝(scanning)기법을 이용하여 다점의 구조물 출력 변위응답을 계측하여 입출력 데이터를 획득한다. 부공간 시스템 규명법을 사용하여 획득된 입출력 데이터 처리를 통해 상태공간 모델(state-space model)이 추정된다. 추정된 상태공간모델의 물리적 해석을 통해 이산화된 질량, 강성, 감쇠 행렬과 같은 구조변수(physical parameters)가 최종적으로 추정된다.



<Fig. 1> Structural parameter estimation

2.2 원격 레이저 변위계측 기반 동적 가진 실험

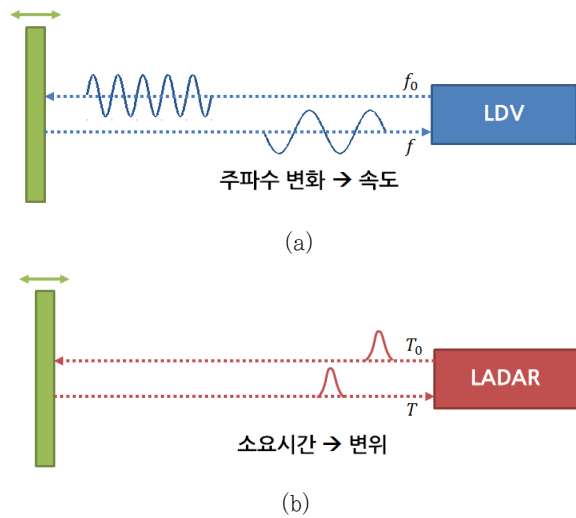
레이저 스캐닝에 의한 동적응답 계측 시스템은 센서를 대상 구조물에 직접 설치할 필요가 없는 비접촉식 계측 시스템이므로 계측이 매우 편리하며 다점의 계측이 가능하다. 건설구조물 거동 계측에 사용 가능한 스캐닝 기능이 포함된 레이저 계측기는 레이저 진동계(laser Doppler vibrometer, LDV)와 라이다(light detection and ranging, LiDAR)가 대표적이다(〈Fig. 2〉). 두가지 레이저 계측기의 동적거동 측정원리는 다음과 같다.



〈Fig. 2〉 Laser doppler vibrometer(left) and LiDAR(right)

- 레이저 진동계(LDV): 측정대상에 특정 주파수를 갖는 레이저광선을 조사하면 도플러효과에 의해 반사광선의 주파수가 측정대상의 속도에 따라 변조된다(〈Fig. 3 (a)〉). 레이저 도플러 속도계는 입사광선과 반사광선의 위상차를 탐지하는 간섭장치로서, 디모듈레이션(demodulation)을 거쳐 측정대상의 움직임에 대한 속도/변위를 연속적으로 추출한다.

- 라이다(LiDAR): 레이저 펄스를 조사하고 반사된 레이저 펄스의 도달시간을 측정하여 공간상 거리를 획득하고(〈Fig. 3 (b)〉), 내장거울의 회전각으로 공간위치좌표를 계산해 3차원 정보를 추출한다. 레이저 펄스의 도달시간으로 위치나 변위를 계측하므로 신호편향과 같은 오차가 없으나, 측정 빈도가 최대 수십 Hz에 불과해 높은 샘플주파수의 동적 데이터 획득이 불가능하다.



〈Fig. 3〉 Working principle of laser devices: (a) LDV, (b) LiDAR

현장 구조물의 경제적이고 효율적인 가진을 위해 질량의 회전운동을 이용한 편심가진기(eccentric mass shaker) 혹은 선형왕복운동을 이용한 선형가진기(linear mass shaker) 등이 활용될 수 있다. 특히 이동 가능한 중소 가진기(모달 셰이커, 〈Fig. 4〉)들이 전문 업체들에서 생산되고 있으며, 일례로 APS420(APS Dynamics)는 집중질량의 직선운동을 이용해 20Hz까지의 주파수 범위에서 900N의 반작용력(reaction force)을 구조물에 전달한다. 특히나 집중질량의 직선운동의 모니터링을 통해 가진력의 크기를 측정할 수 있어 가진실험(forced vibration test)을 구조물에서 수행할 수 있다.



〈Fig. 4〉 Modal shakers of APS Dynamics (<http://www.apsdynamics.com/>)

구조물의 진동원인 이상적인 백색잡음(white

noise)의 가정을 만족하기위해 장시간의 진동 계측이 필요한 상시 진동실험과는 달리, 본 구조물 가진 실험은 단시간(수십 초)내에 신속하게 동적실험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 무엇보다 본고의 서두에서 언급했듯이 중소형 건축물 혹은 구조물의 일부를 대상으로 하는 진동실험의 경우 상시 진동원의 크기가 미소해 진동계측이 불가능한 경우가 많아, 본 가진실험이 시스템 규명을 위한 현장 실험의 대안이 된다. 가진 력과 구조물 응답의 동기화된 계측을 통해 정밀한 입출력 시스템 규명법(input-output system identification)을 구현할 수 있다.

3. 부공간 시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법

3.1 부공간 시스템 식별법

구조물의 동적거동 계측데이터로부터 대상 구조물의 상태공간모형을 추정하는 부공간 시스템 식별법 또한 수많은 수학자들과 전자공학자들의 30여년의 연구결과의 산물로서(Gevers 2006), 전자공학, 기계/항공, 화학공학, 건축/토목 등 공학 전분야의 오랜 난제였던 시스템 규명의 해법을 제시하며, 이론적 완성으로 평가받고 있다(Viberg 1995).

부공간 시스템 식별법은 시스템 이론, 선형대수학, 칼만 필터(Kalman filter), 랜덤진동론(random vibration), 부공간(subspace)에서의 투영(projection) 및 특이값 분석(singular value decomposition) 등 각종 수치해석 기법에 관한 다양한 이론들이 포괄하고 있는 매우 복잡한 기법이다. 하지만 본 기법의 대중화를 위해 시스템 규명분야의 세계적인 권위자인 스웨덴의 Ljung교수가 수치 해석 및 프로그래밍 공학용 소프트웨어인 Mathworks사의 Matlab 프로그램의 System Identification Toolbox에 본 방법을 공개하여, 복잡한 이론의 이해 없이도 누구나 손쉽게 본 방법을 사용할 수 있다(Ljung 2009).

부공간 시스템 식별법의 개발에는 많은 학자들의 다양한 이론 개발이 있었으며, 이에 N4SID(Van

Overschee and De Moor 1994) 및 MOESP(Verhagen 1994) 등이 있으나 수치적 해석법에서 약간 차이가 날 뿐 큰 차이는 없다. 한가지 언급하고 싶은 점은 근래 국내 구조공학분야에서 활발히 활용되는 출력만의(output-only) 시스템 규명법인 SSI(stochastic subspace system identification, Peeters et al. 1999)에 대한 것으로, 본 부공간 시스템 식별법이 상시진동 실험을 바탕으로 구조공학 분야에 적용된 것이다.

부공간 시스템 식별법은 측정된 입출력(input-output) 혹은 출력만(output-only)의 데이터를 이용하여 다음과 같은 이산 시간(discrete time)영역의 선형시간불변(linear time-invariant) 상태공간 모델을 추정한다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

여기서, A는 시스템 동역학 행렬, B는 입력 행렬, C는 계측 행렬, D는 직통과(feed-through) 행렬로 추정대상인 시스템 모델이 된다. \mathbf{x}_k 와 \mathbf{x}_{k+1} 는 시간 k 및 k+1에서의 상태벡터, \mathbf{u}_k 와 \mathbf{y}_k 는 시간 k에서 동기화 계측된 입력과 출력이다. 입력과 출력의 계측과에 수반되는 잡음(noise)은 각각 \mathbf{w}_k 와 \mathbf{v}_k 로 고려된다. 계측된 데이터에서 시스템 모델을 추정하는 방법은 수치적 안정성이 매우 뛰어난 최소자승법(least squares method)을 이용해 다음과 같이 계측 데이터의 시퀀스와 추정 상태벡터 시퀀스의 준역행렬(pseudo-inverse)로 구한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}} & \hat{\mathbf{B}} \\ \hat{\mathbf{C}} & \hat{\mathbf{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \hat{\mathbf{Y}}_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i \\ \hat{\mathbf{U}}_{ij} \end{bmatrix}^\dagger \quad (3)$$

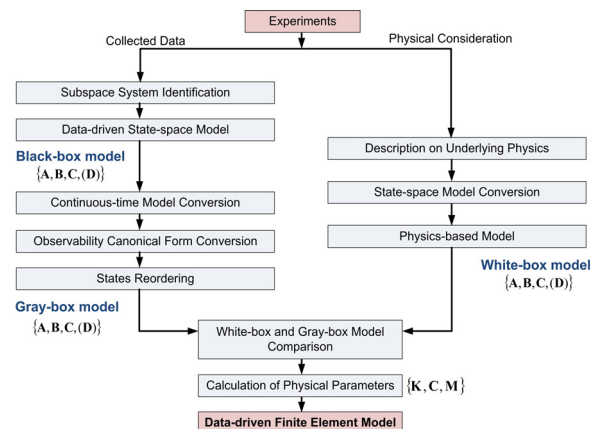
기술기사인 본고에는 N4SID의 최종해인 식 (3)만을 소개하는 것으로 한정한다. 좀 더 자세한 내용은 구조공학자들의 이해를 돕기 위해 종래의 구조동역학 이론과 연관지어 부공간 시스템 식별법의 이론

을 소개한 참고문헌(Kim and Lynch 2012 a)을 참조하기 바란다.

3.2. 구조 물리량 추정 기법

제어계측공학분야에서의 시스템 식별 목표는 제어기 설계에 필요한 입출력 관계를 나타내는 시스템 모델의 추정이다. 근래에 개발된 부공간 시스템 규명법은 시스템 모델의 추정 방법론을 제시하고, 추정된 시스템 모델의 형태가 상태공간 모델로써 현대 제어공학과의 접목이 매우 용이하므로, 제어공학의 목표인 제어기 설계에 더욱 충실한 연구 방향으로 시스템 규명이 활용 되고 있다. 따라서, 제어계측공학분야에서는 연구 활용 목표가 달라 시스템 모델의 구조적 해석에 관한 연구 개발 없이 부공간 시스템 규명법은 구조적 해석이 불가능한 black-box 접근법으로 남아 있었다.

구조공학분야에서 부공간 시스템 규명법의 활발한 활용을 위해, black-box모델의 구조적 해석이 가능한 gray-box 해석법의 수학적 이론이 구조공학분야에서 개발되었다(Fig. 5). 본 gray-box 해석법을 바탕으로, 실험을 통해 계측된 진동 데이터로부터 대상 구조물의 유한요소모델(이산화된 M,C,K 행렬)이 바로 구성될 수 있다. 이와 같은 실험 데이터에서 추정된 물리적 모델을 데이터기반 유한요소모델(data-driven finite element model)이라 명명한다.



<Fig. 5> Data-driven finite element method (Kim and Lynch 2012 b, Kim et al. 2013 a)

부공간 시스템 규명법의 결과인 이산시간 상태공간 모델의 연속시간(continuous time) 모델 변환은 다음과 같다.

$$\mathbf{A}_c = \frac{1}{\Delta t} \ln(\mathbf{A}_d) \tag{4}$$

$$\mathbf{B}_c = \left(\int_0^{\Delta t} \exp(\mathbf{A}_c \tau) d\tau \right)^{-1} \mathbf{B}_d \tag{5}$$

관측가능정규형(observability canonical form) 상태공간 모델로의 변환을 위한 유사변환(similarity transform)의 변환행렬은 다음과 같다(Kim et al. 2013 b).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_c \\ \mathbf{C}_c \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

물리적 해석이 가능한 최종적인 시스템 모델 행렬이 다음과 같이 구성된다.

$$\mathbf{A}'_c = \mathbf{T} \mathbf{A}_c \mathbf{T}^{-1} \tag{7}$$

$$\mathbf{B}'_c = \mathbf{T} \mathbf{B}_c \tag{8}$$

$$\mathbf{C}'_c = \mathbf{C}_c \mathbf{T}^{-1} \tag{9}$$

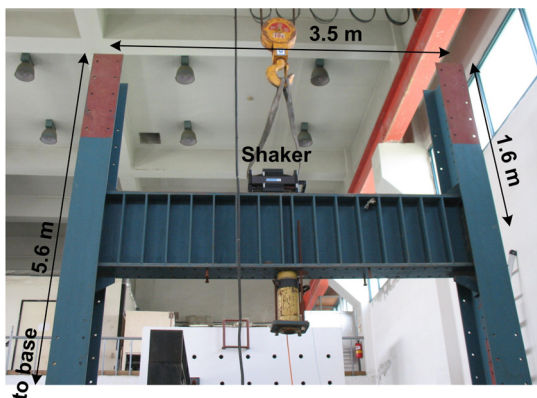
상기의 관측가능정규형 상태공간 모델의 물리적 해석을 통해 물리변수 형태의 모델이 획득될 수 있다. 특히 입력 행렬의 비교(식 (9))를 통해, 구조물의 질량이 추정될 수 있어, 입력행렬의 물리적 해석이 구조변수 추정의 기본이 된다. 추정된 질량 행렬을 이용하여 식 (7)을 통해 구조물의 강성 및 감쇠가 추정된다. 질량행렬 추정은 구조물의 계측 물리량이 변위응답으로 한정된다는 이론적 조건에 따른다(Kim and Lynch 2012 b, Kim et al. 2013 b). 이는 구조동역학분야에서 광범위하게 사용된 접촉식 가속도계를 활용한 가속도측정 대비 동적 변위 측정의 필요성을 시사한다.

4. 구조 물리량 추정 사례

본 기술기사에서 소개된 원격 레이저 변위계측과 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법의 실험적 검증에 관한 문헌상의 두가지 예를 간략히 소개한다. 먼저 <Fig. 6>과 같은 높이 5.6m의 대형 철골 프레임에 대한 시스템 식별이 수행되었다(Kim et al. 2013b). 두 철골 기둥을 연결하는 가로보에 설치된 모달 가진기(APS400, APS Dynamics)에 의한 가진실험이 수행됐으며, 레이저 진동계를 사용하여 각층의 응답변위가 계측되었다. 계측된 모달 가진기의 진동 가속도와 동적 변위 및 사전 정보인 모달 가진기의 가진질량(20.3kg)을 이용해 해당 구조물의 질량(2724 kg), 강성(5.09 MN/m), 감쇠값(1.34 kN s/m)이 추정되었다. 본 실험검증에

대한 자세한 내용 및 추정된 데이터기반 유한요소 모델 정보는 참고문헌을 통해 확인할 수 있다.

실제 구조물에 대한 구조변수 추정 실험을 통해 본 기법의 현장 적용성을 검증하였다(Kim and Lynch 2012 c). 대상 구조물은 미국 미시간대학교(University of Michigan) 소재 Hill auditorium의 Mezzanine 발코니(<Fig. 7>)이다. 대형 콘크리트 발코니 구조물(폭 42m, 길이 11m)로써 캔틸레버 구조의 특성상 구조 안전성에는 무관한 진동이 발생하기 쉬운 형태로, 20.7kg 가진질량 모달 가진기를 사용해 수직진동을 발생시켜 가진실험을 수행하였다. 모달 가진계의 입력운동 계측은 무선센서를 사용하여 가속도 계측이 수행되었으며, 이를 바탕으로 해당 발코니구조의 시스템 식별이 수행되었다.

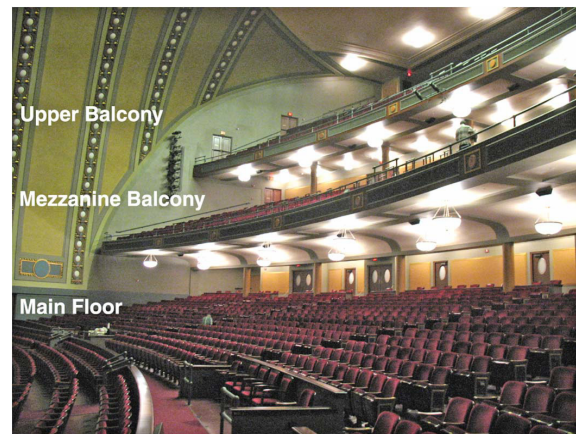


(a)

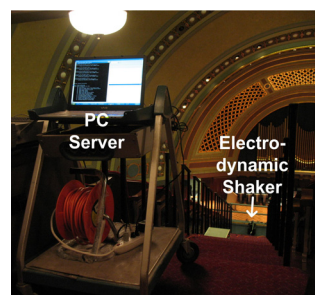


(b)

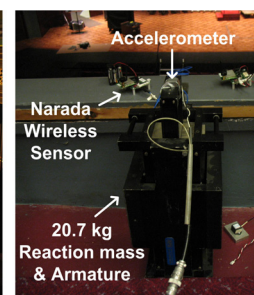
<Fig. 6> Vibration testing for a steel frame structure (height:5.6m, width:4m): (a) excitation, (b) noncontact laser displacement sensing (Kim et al. 2013 b)



(a)



(b)



(c)

<Fig. 7> (a) Balconies at Hill auditorium, University of Michigan, (b) vibration test controller, (c) modal shaker and accelerometer

5. 결 언

컴퓨터의 개발과 함께 1960년대에 전산구조해석 분야가 태동된 이후, 전산구조해석 기술은 실용화가 이루어져 기계, 항공, 건축/토목 등의 구조공학 분야에서 원천기술이 되었다. 유한요소해석 프로그램을 활용하여 구조물을 설계하고, 실제 구조물에 대한 가상의 전산구조모델을 활용하여, 향후 실제 구조물의 거동을 예측하고 발생할 수 있는 문제점 등을 사전에 파악하고 있다. 이와 같은 순해석(forward analysis) 기법과 더불어 구조공학에서 중요한 공학문제로 대두되었던 기술은 실제 존재하는 구조물을 대변할 수 있는 전산모델을 역으로 추정하는 역해석(inverse analysis) 기법이다. 이는 실제 존재하는 대상 구조물을 대변하는 전산모델을 다시 컴퓨터 안으로 되돌리는 기법으로, 물리적 해석이 가능한 전산구조모델 형태로 추정하는 기법이다.

본 기술기사에서는 원격 레이저 변위계측과 부공간시스템 식별법을 활용한 구조물의 물리량 추정 기법을 소개하였다. 실험적으로는, 모달쉐이커를 사용하여 구조물을 가진하고 비접촉 레이저 계측기 및 스캐닝기법을 이용하여 다점의 구조물 출력 변위응답을 계측하여 입출력 데이터를 획득한 후, 부공간 시스템 규명법을 사용하여 획득된 입출력 데이터 처리를 통해 상태공간모델을 추정한다. 추정된 상태공간모델의 물리적 해석을 통해 이산화된 질량, 강성, 감쇠 행렬과 같은 구조변수를 결정한다. 실제 구조물에 대한 동적 실험과 시스템 식별을 통해 추정된 구조변수는 대상 구조물을 정확히 대변하는 전산모델로써, 구조물의 상태 파악이 가능하게 하며 구조물의 유지관리를 위한 전산모델로 활용된다.

References

1. Maia NMM, Silva JMM, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, England (1997)
2. Ewins DJ, Modal Testing: Theory, Practice and Application, Wiley, West Sussex, England (2000)
3. Mottershead JE, Friswell MI (1993) Model updating in structural dynamics: A survey, *Journal of Sound and Vibration*, 167, 347-75
4. Yu E, Taciroglu E, Wallace JW (2007) Parameter identification of framed structures using an improved finite element model-updating method – Part I: Formulation and verification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 619-39
5. Chung TT, Cho S, Yun CB, Sohn H (2012) Finite Element Model Updating of Canton Tower Using Regularization Technique, *Smart Structures and Systems*, 10, 443-58
6. Kurata M, Kim J, Lynch JP, Van Der Linden GW, Hipley, Sheng LH (2013) Internet-enabled wireless structural monitoring systems: development and permanent deployment at the New Carquinez suspension bridge, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 139, 1688- 702
7. Kim J, Kim K, Sohn H (2013 a) Data-driven physical parameter estimation for lumped mass structures from a single point actuation test, *Journal of Sound and Vibration*, 132, 4390-402
8. Kang JS, Park SK, Shin S, Lee HS (2005) Structural system identification in time domain using measured acceleration, *Journal of Sound and Vibration*, 288 215-34
9. Kim J, Lynch JP (2012 a) Subspace System Identification of Support Excited Structures – Part I: Theory and Black-box System Identification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 2235-51
10. Kim J, Lynch JP (2012 b) Subspace System

- Identification of Support Excited Structures
 – Part II: Gray–box Interpretations and
 Damage Detection, *Earthquake Engineering
 and Structural Dynamics*, 41, 2253–71
11. Kim J, Kim K, Sohn H (2013 b) In situ
 measurement of structural mass, stiffness,
 and damping using a reaction force actuator
 and a laser Doppler vibrometer, *Smart
 Materials and Structures*, 22, 085004
 12. Kim J, Kim K, Sohn H (2014) Autonomous
 dynamic displacement estimation from data
 fusion of acceleration and intermittent
 displacement measurements, *Mechanical
 Systems and Signal Processing*, 42, 194–205
 13. Gevers M (2006) A Personal View on the
 Development of System Identification: A
 30–Year Journey through An Exciting Field,
IEEE Control Systems Magazine, 26, 93–105
 14. Viberg M (1995) Subspace–based Methods for
 the Identification of Linear Time–invariant
 Systems, *Automatica*, 31, 1835–51
 15. Van Overschee P, De Moor B (1994) N4SID:
 Subspace Algorithms for the Identification of
 Combined Deterministic–Stochastic Systems,
Automatica, 30, 75–93
 16. Verhaegen M (1994) Identification of the
 Deterministic Part of MIMO State Space
 Models Given in Innovations form from
 Input–output Data, *Automatica*, 30 61–74
 17. Ljung L, *System identification toolbox 7: The
 Mathworks* (2009)
 18. Peeters B, Roeck GD (1999) Reference–based
 Stochastic Subspace Identification for
 Output–only Modal Analysis, *Mechanical
 Systems and Signal Processing*, 13, 855–78
 19. Kim J, Lynch JP (2012 c) Autonomous
 Decentralized System Identification by Markov
 Parameter Estimation using Distributed
 Smart Wireless Sensor Networks, *Journal of
 Engineering Mechanics ASCE*, 138, 478–90