

# SMIT를 활용한 지진하중을 받는 전단 구조물의 응답모드 특성에 관한 연구

## Application Studies on Structural Modal Identification Toolsuite for Seismic Response of Shear Frame Structure

장민우<sup>1)\*</sup>Chang, Minwoo<sup>1)\*</sup><sup>1</sup>철도기술연구원 신교통혁신연구소<sup>1</sup>New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

## / A B S T R A C T /

The improvement in computing systems and sensor technologies devotes to conduct data-driven structural health monitoring algorithms for existing civil infrastructures. Despite of the development of techniques, the uncertainty oriented from the measurement results in the discrepancy to the actual structural parameters and let engineers or decision makers hesitate to adopt such techniques. Many studies have shown that the modal identification results can be affected by the uncertainties due to the applied methods and the types of loading. This paper aims to compare the performance of modal identification methods using Structural Modal Identification Toolsuite (SMIT) which has been developed to facilitate multiple identification methods with a user-friendly designed platform. The data fed into SMIT processes three stages for the comprehensive identification including preprocessing, eigenvalue estimation, and post-processing. The seismic and white noise response for shear frame model was obtained from numerical simulation. The identified modal parameters is compared to the actual modal parameters. In order to improve the quality of coherence in identified modal parameters, several hurdles including modal phase collinearity and extended modal amplitude coherence were introduced. Numerical simulation conducted on the 5 dof shear frame model were used to validate the effectiveness of using these parameters.

**Key words:** Structural health monitoring, Seismic response, Structural modal identification toolsuite, Modal phase collinearity, Extended modal amplitude coherence

### 1. 서론

최근 안전에 대한 대중적인 관심의 증가하고 있고, 토목 구조물의 기능 수행을 효율적으로 수행하기 위해서 구조물의 유지 관리에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 구조물의 상태를 파악하고, 진단 및 평가하는 기술은 크게 구조물 건전성 모니터링 (Structural Health Monitoring, SHM) 로 총칭되고 있으며, 국부적으로 손상을 탐지하는 로컬 SHM과 전체 구조

물의 거동현상을 파악하는 글로벌 SHM으로 나뉜다 [1-3].

시스템 식별 (System Identification)은 글로벌 SHM의 대표적인 기법으로서 구조물의 응답 및 입력 신호 등으로부터 모드 특성을 추출하는 방법이다. 시스템 식별 기법들은 일반적으로 조합된 응답으로부터 고유치 해석을 수행하고, 이로부터 구조물의 물리량과 동등한 정보를 가지고 있는 상태 행렬 (State Matrix)을 유도하는 과정을 거친다. 선구적인 연구로 Juang and Pappa [4]는 임펄스 응답을 이용하는 Eigenvalue Realization Algorithm (ERA) 기법을 제시하였고, 이후 ERA 기법의 변종으로 Kalman 필터를 적용한 Observer Kalman filter Identification (OKID) [5, 6], 응답 신호의 상관 관계 (correlation)을 이용한 기법 (Natural Excitation Technique, NExT) 등의 연구가 수행되었다 [7, 8]. 이외에도 통계적 회귀 분석법에 기반한 Autoregressive Moving Average (ARMA) [9-11], 미래의 응답을 이전의 응답에

\*Corresponding author: Chang, Minwoo

E-mail: cmw321@krri.re.kr

(Received February 21, 2018; Revised April 10, 2018; Accepted April 25, 2018)

투영하는 Stochastic Subspace Identification (SSI) [12, 13] 등 많은 기법들이 개발되었다.

이처럼 다양한 시스템 식별 기법들을 편리하게 사용하고, 응답 모드 특성 결과를 가지적으로 도출하기 위해서 통합된 소프트웨어의 개발이 이루어졌다 [14, 15]. Chang et al. [16]은 시스템 식별을 효율적으로 수행하기 위하여 Structural Modal Identification Toolsuite (SMIT)를 개발하였으며, 현재 ver. 1.1을 무료 소프트웨어로 배포하고 있다. SMIT는 기존에 다른 시스템 식별 소프트웨어들이 가지고 있던, 고비용, 제한적이 식별 기법 등의 문제점을 개선하고, Graphic User Interface (GUI) 등 사용자 편의성을 강화하도록 제작되었다. 또한, 데이터를 처리하는 과정에서 여러 가지 선택사항을 부여하고 있으며, 교량 등 다양한 토목 구조물의 식별에 최적화된 플랫폼을 제공한다.

각각의 시스템 식별 기법들은 개발된 알고리즘에 따라서 입출력 응답에 관한 제한 조건이 있다. 예를 들어, ERA-NExT는 구조물에 가해지는 입력 응답을 백색 소음인 것으로 가정하고 있고, ERA-OKID는 불확실성에 기반한 응답이 구조물의 거동현상에 지배적인 것으로 간주한다. 또한, 시스템 식별은 입출력 응답이 모두 주어지는 경우 강력한 성능을 발휘하지만, 출력 응답만을 가진 경우 사용한 방법, 신호의 불확실성 등에 의해 식별의 정확도가 저하되는 성향을 가진다 [6, 17].

시스템 식별 기법은 초과 매개 변수화를 통해서 구조물의 실제 모드를 이끌어내기 때문에 일반적으로 충분한 시간동안 계속된 응답을 사용한다. 따라서 지진하중과 같이 짧은 시간에 작용한 응답을 대상으로 식별을 수행한 연구는 많지 않다 [18, 19]. 그러나 포항지진에서 나타난 사례와 같이 짧은 강진이 지나고 난 뒤, 지속적인 여진이 반복될 경우 구조물의 동특성이 변화하고 항구적 손상이 발생할 수 있기 때문에, 변화하는 모드의 양상을 추적하고 손상을 탐지하는 것이 매우 중요하다. 이전의 연구에서 지진 응답으로부터 구조물의 식별을 위해 수치 모델로부터 얻은 응답의 유사성을 이용하는 방법 [20], 지진응답의 길이를 달리하여 비모수적 방법 의해 교량의 모드를 식별한 연구 [18] 등이 수행된 바 있다. 그러나 기존의 연구에서는 구조물의 응답 모드 특성에 대한 정보가 주어진 환경에서 수행하였기 때문에 출력 응답만을 사용한 경우, 식별의 누락에 관한 논의와 식별의 정확도에 대한 분석이 미흡하게 수행되었다.

이 연구에서는 지진응답을 활용하여 시스템 식별을 수행하고, 식별 방법과 응답의 길이에 따른 성능을 비교하는 연구를 수행하였다. 사용된 기법은 ERA-NExT, OKID와 SSI 기법으로 분류되는 Numerical Algorithms for State Space Subspace System Identification (N4SID)으로 한정하였다. 시스템 식별은 SMIT를 통해 수행하였으며, 주파수, 감쇠비, 모드 형상으로 대표되는 구조물의 모드 특성 이외에 추가적으로 Modal Phase Collinearity (MPC), Extended Modal Amplitude Coherence (EMAC) 등이 활용하여 더미 모드를 제거하고 실제 응답 모드를 식별하는데 주력하였다. 식별의 성능을 평가하기 위하여 실제 응답 모드와의 오차비교를 수행하였고, 소요시간을 분석하여 적용된 기법들의 효율성을 평가하였다.

## 2. Eigenvalue Realization Algorithm (ERA)

구조물의 거동현상은 상태 공간 표현식에 따라 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i + w_i \tag{1}$$

$$y_{i+1} = Cx_i + Du_i + e_i \tag{2}$$

식(1)과(2)에서  $[x_i, y_i, u_i]$ 는 각각 변위와 속도 응답을 포함한[상태 벡터, 출력 벡터, 입력 벡터]이고,  $[A, B, C, D]$ 는 각각[상태 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬, feedthrough 행렬]을 나타낸다.  $[w_i, e_i]$ 는 각각 상태와 출력에 관련한 오차이다. Juang and Pappa [4]에 따르면, 구조물이 충격에 따른 자유진동 시 출력 벡터는  $y_i = CA^{i-1}B$ 로 표현할 수 있고 이를 마코브 변수(Markov Parameters)로 명명하였다. 시간 이력에 따른 마코브 변수의 조합을 통해 Hankel 행렬을 아래와 같이 조합할 수 있다.

$$H_{i-1} = \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+q-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i+p-1} & y_{i+p} & \cdots & y_{i+p+q-2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서, 인덱스  $[p, q]$ 는 각각 Hankel 행렬을 구성하는데 사용되는 출력, 입력의 숫자이다. Hankel 행렬은 특이값 분해 (Singular Value Decomposition)를 통해서  $H_0 = R\Sigma S^T$ 로 전개될 수 있다. 일반적으로 구조물의 응답으로부터 구성된 Hankel 행렬은 초과 매개 변수화 되어있기 때문에, 유효한 특이값  $\Sigma_i$  과 이와 대응하는 더미 행렬인  $[R_i, S_i]$ 를 이용하여 구조물의 물성치와 동등한 등가행렬  $A$ 를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$A = P_p^{-1} H_i Q_q^{-1} \tag{4}$$

여기서, 두 블록 행렬은  $P_p = R_i \Sigma_i^{1/2}$ ,  $Q_q = \Sigma_i^{1/2} S_i^T$ 로 정의하며, 각각 Observability 행렬, Controllability 행렬로 정의한다.

### 2.1 ERA-NExT

ERA-NExT는 구조물에 백색 소음이 입력으로 작용하고 있는 경우, 출력 응답의 상관관계(Correlation)가 충격 응답의 선형 조합인 것을 이용한다 [7]. 시간지연  $k$ 에 해당하는 상관관계  $R_{i,j,k}$ 은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R_{i,j,k} = \sum_{r=1}^N \left[ \frac{\phi_i^r G_j^r}{m^r \omega_d^r} \exp(-\zeta^r \omega_n^r k) \sin(\omega_d^r k + \theta^r) \right] \tag{5}$$

여기서, 위첨자  $r$ 은 전체 모드 숫자  $N$  중 임의의 모드이고,  $\phi_i^r$ 는  $i$ 번째 모드 형상,  $m^r$ 은 모달질량,  $G_j^r$ 은  $j$ 노드에서의 응답과 관련한 상수,  $\theta^r$ 은 위상차이다. 이로부터 정의한 블록 행렬  $R_k$ 은 마코브 변수로써 Hankel 행렬의 요소가 되며 이후 기존의 ERA와 동일한 과정을 통하여 응답모드 식별을 수행한다.

### 2.2 ERA-OKID-OO

ERA-OKID-OO에서는 observer/Kalman 필터를 사용하여 마코브 변

수를 추출한다. 구조물의 응답이 결정론적 시스템 (Deterministic Subsystem)과 불확실성에 기반한 확률론적 시스템 (Stochastic Subsystem) 중 후자에 의한 것이 지배적일 때 적합한 방법이다. 임의의 옵저버 이득 (Observer Gain)  $M_{y_i}$ 를 식 (1)에 도입하였을 때, 출력 응답은 다음과 같은 식에 의해서 정의할 수 있다.

$$y_i = \bar{C}\bar{A}^i x_0 + \sum_{\tau=0}^{i-1} \hat{Y}_\tau y_{i-\tau-1} \quad (6)$$

여기서,  $\hat{Y}_\tau = -\bar{C}\bar{A}^\tau M = -C(A+MC)^\tau M$ 이고,  $\bar{A}$ 의 거듭제곱항은 영향렬로 수렴한다. 마코브 변수는  $Y_\tau = \bar{C}\bar{A}^\tau M$ 로 정의할 수 있으며, 이로부터 Hankel 행렬을 구성하여 기존의 ERA와 동일한 과정을 통하여 응답모드 식별을 수행한다.

### 2.3 N4SID-OO

N4SID-OO는 미래의 구조물의 응답을 과거에 응답에 연속적으로 투영하여 QR 분해와 계수 행렬들의 상관관계를 통해 상태 행렬을 도출하는 방법이다. 블록 행렬  $X$ 를  $Y$ 에 투영하는 과정은  $X/Y = XY^T(YY^T)^{-1}Y$ 로 정의한다. 입력응답의 영향이 없는 것으로 간주했을 때, 투영의 결과  $z_i$ 는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$z_i = L_i Y_{0|i-1} \quad (7)$$

여기서  $Y_{0|i-1}$ 는 과거의 출력 응답의 조합이며, 이를 QR 분해하고 역변환하는 과정을 거쳐서 블록 행렬  $L_i$ 를 유도할 수 있다. 연속되는 투영과 최소 오차자승법에 의하여 지배방정식을 재구성함으로써 구조물의 시스템과 등가행렬을 유도하고 이로부터 식별을 수행한다.

## 3. MPC와 EMAC를 활용한 식별된 응답모드의 정확도 평가

시스템 식별에 사용되는 상태 행렬은 일반적으로 초과 매개 변수화 되어 있기 때문에, 분석된 정보로부터 실제 구조물의 모드 특성을 걸러내는 것이 필요하다. 안정성 도표 (Stabilization Diagram)를 활용하는 것은 가장 널리 사용되는 방법이다. 여기에서는 우선 특정 모델 차수에서 고유치 분석을 수행하고 모드를 식별한다. 다음 차수에서 같은 분석을 수행한 결과, 이전의 결과와 비교하여 응답 모드 특성의 유사성이 발견될 경우, 이 응답 모드를 구조물의 실제 작용하는 응답 모드로 선정하고, 그렇지 않은 경우 더미로 판단하게 된다. 이 연구에서는 식별을 통해 얻어지는 구조물의 응답 모드와 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상의 기하학적 상관관계를 이용한 Modal Assurance Criteria (MAC) 이외에 Modal Phase Collinearity (MPC)와 Extended Modal Amplitude Coherence (EMAC)를 도입하여 안정성 도표로부터 식별되는 응답모드의 정확도를 향상시키고자 한다.

### 3.1 Modal Phase Collinearity

MPC는 식별된 모드 형상의 기하학적 일관성을 정량화하는 지표이다. 일반적으로 낮은 감쇠비를 가지는 토목 구조물의 응답 모드 형상은 동위상 또는 역위상의 형태로 표현되어야 한다. 그러나 실제 시스템 식별을 통한 모드 형상은 각 지점에서 위상차를 가지며, 이는 계측되는 신호에 포함된 노이즈, 계산 과정에서의 오차 등에 의해 발생한다 [17, 21]. 즉, MPC는 위상차를 정량화 한 지표로서, 아래의 과정을 통해서 도출할 수 있다.

$$S_{rr} = \text{Re}(\Phi_i^T) \text{Re}(\Phi_i) \quad (8)$$

$$S_{ri} = \text{Re}(\Phi_i^T) \text{Im}(\Phi_i) \quad (9)$$

$$S_{ii} = \text{Im}(\Phi_i^T) \text{Im}(\Phi_i) \quad (10)$$

식 (8)-(10)에서  $[\text{Re}(\Phi_i), \text{Im}(\Phi_i)]$ 는  $i$ 번째 응답 모드의 실수, 허수 값이다. 분산-공분산 행렬의 고유치는 아래의 식으로부터 구해진다.

$$\lambda_1 = S_{rr} + \frac{S_{ri} [2(\mu^2 + 1)\sin^2\tau - 1]}{\mu} \quad (11)$$

$$\lambda_2 = S_{ii} + \frac{S_{ri} [2(\mu^2 + 1)\sin^2\tau - 1]}{\mu} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)에서  $\mu = (S_{ii} - S_{rr}) / (2S_{ri})$ ,  $\beta = \mu + \text{sgn}(S_{ri})\sqrt{\mu^2 + 1}$ ,  $\tau = \tan^{-1}\beta$ 로 정의되며, 이를 통해 MPC는 아래의 식으로 구한다.

$$MPC_i = \left[ 2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \times 100(\%) \quad (13)$$

MPC의 값은 0과 1의 범위에서 결정되며 0에 가까울수록 식별된 모드의 위상차의 상관관계가 낮으며 1에 가까울수록 동위상의 모드 형상에 근접함을 나타낸다. 일반적으로 낮은 감쇠비를 가지는 토목구조물의 경우 응답의 정확도가 높은 경우 MPC의 값은 1에 가까운 값을 가지게 된다.

### 3.2 Extended Modal Amplitude Coherence

EMAC는 식별된 모드 형상과 시간 이력에 따른 보간법으로 결정된 모드 형상과의 일관성을 정량화하는 지표이다 [21, 22]. ERA기법에 의한 경우 초과 변수화된 상태 행렬의 고유치 해석으로부터 고유진동수 ( $A$ )를 얻을 수 있다.

Hankel 행렬에서 각 요소들은 자유진동 시 응답으로 구성되어 있기 때문에, 임의의 시간  $T_a$ 에서의 모드형상은 초기 시간에 해당하는  $T_0$ 에서의 자유진동 응답으로부터 감쇠한 형태로 나타나게 된다.  $\bar{R}_a$ 을 Hankel 행렬의 마지막 열에 해당하는 블록 행렬이라고 하면  $T_a$ 에서의 응답모드는 아래와 같이 계산된다.

$$\Phi(T_a) = \bar{R}_n \Sigma_n^{1/2} \Psi \tag{14}$$

여기서  $\Psi$ 는 상태 행렬의 고유벡터이다. 한편, Observability 행렬을 통해서 보간법을 통해  $T_a$ 에서의 모드 형상을 예측할 수 있다.

$$\bar{\Phi}(T_a) = C\Psi A^{p+a-2} \tag{15}$$

여기서  $a$ 는 Hankel 행렬상에서 이동이 이루어지는 마코브 변수의 개수이다. 이 연구에서는 기초값으로 10을 사용하였으며, 따라서 모델 차수가 이 값보다 클 경우 EMAC을 구하는 것이 가능하다. 실제와 보간법에 의해 예측된 모드형상의 비율을 아래 식을 통해서 계산하였다.

$$Z_{ij} = \begin{cases} \frac{|\Phi_{ij}(T_a)|}{|\bar{\Phi}_{ij}(T_a)|} & \text{for } |\Phi_{ij}(T_a)| \leq |\bar{\Phi}_{ij}(T_a)| \\ \frac{|\bar{\Phi}_{ij}(T_a)|}{|\Phi_{ij}(T_a)|} & \text{for } |\bar{\Phi}_{ij}(T_a)| \leq |\Phi_{ij}(T_a)| \end{cases} \tag{16}$$

위상차를 가중치로 하여 그 값이  $\pi/4$ 보다 작은 구간에서만 유효한 값을 가지도록 아래와 같이 결정하였다.

$$w_{ij} = \begin{cases} 1.0 - (|\theta_{ij}|/(\pi/4)) & \text{for } |\theta_{ij}| \leq \pi/4 \\ 0.0 & \text{for otherwise} \end{cases} \tag{17}$$

하나의 모드 형상에 대하여 일관성 있는 지표(EMAC)를 산정하기 위하여 아래와 같이 가중치 평균을 도입하였다.

$$EMAC_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_{ij} \tag{18}$$

여기서  $n$ 은 노드의 개수이다. EMAC의 값은 MPC와 같이 0과 1의 범위에서 결정되며 0에 가까울수록 보간법에 의한 결과와 계산된 모드 형상이 동일하지 않은 것을 나타낸다. 한편, EMAC이 1에 가까울수록 식별된 모드형상이 실제 시스템을 정확하게 반영한 것으로 판단할 수 있다.

### 4. SMIT를 이용한 응답모드 식별

이 연구에서는 5자유도의 전단 구조물을 대상으로 응답모드 식별을 수행하였다 (Fig. 1). MPC와 EMAC 지표를 사용하였을 때, 더미모드가 효과적으로 제거되는지 확인하기 위해서 백색 소음이 하중으로 작용할 때의 응답을 통해서 식별 성능을 평가하였다. 또한 동일한 지속시간을 가지는 지진응답에 대한 모드 식별을 수행함으로써 적용된 기법들의 성능을 평가하였다.

SMIT는 구조물 식별에 최적화된 프로그램으로써, 입출력 신호 또는 출력신호만을 이용하여 교량 및 전단 구조물 등의 토목 구조물에 대해서 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상을 추출하는 역할을 수행한다. 현재 온라인상에서 ver 1.1 [16]이 배포 중이며, 이 연구에서는 ERA-NExT, ERA-OKID-OO, N4SID-OO를 이용하여 모드 식별을 수행하였다.

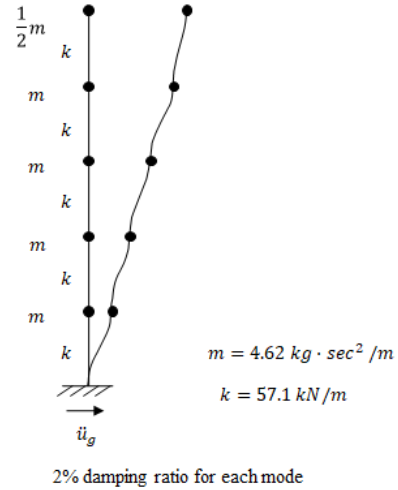


Fig. 1. Simulated 5 DOF shear frame model

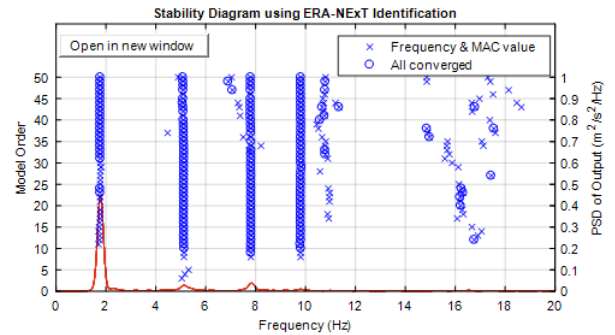


Fig. 2. Stabilization diagram on the postprocessing windows in SMIT without considering MPC and EMAC

#### 4.1 백색 소음을 이용한 응답 모드 식별

무작위로 작성된 30초 분량 (100 Hz 샘플링)의 가속도 입력이 지반을 통해 가해지고 있을 때, 구조물의 응답을 구하였다. MPC와 EMAC를 고려하지 않고 ERA-NExT를 이용하여 응답 모드 식별을 수행한 결과를 안정성도표로 표현하였다 (Fig. 2). 하단에 위치한 실선은 pwelch 방법 [23]에 따른 구조물 응답의 스펙트럼으로 육안으로는 4차 모드까지 식별이 가능하다. 고유진동수와 MAC이 설정된 기준 이내에 있는 경우 ‘x’로 나타내고, 추가적으로 감쇠비 기준이 만족될 경우 ‘o’ 기호로 표현하며 이때, 응답모드가 식별된 것으로 판단한다. 이 때, 응답 형상  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 의 유사성을 나타내는 MAC은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$MAC = \frac{|\phi_1^T \phi_2|}{\sqrt{(\phi_1^T \phi_1)(\phi_2^T \phi_2)}} \tag{19}$$

Fig. 2에서 1-4차 모드는 양호한 수준으로 식별이 가능한 것으로 판단되지만, 5차 모드의 경우 식별되는 빈도가 상대적으로 낮고 고유진동수도 모델 차수에 따라 유동적이다. 가장 높은 모델 차수에서 식별된 응답 모드의 형상을 Fig. 3에 고유진동수, 감쇠비, 모델 차수와 함께 표현하였다. 이를 통해 전단구조물의 응답모드 식별이 성공적으로 수행되었음을 확인할 수 있다.

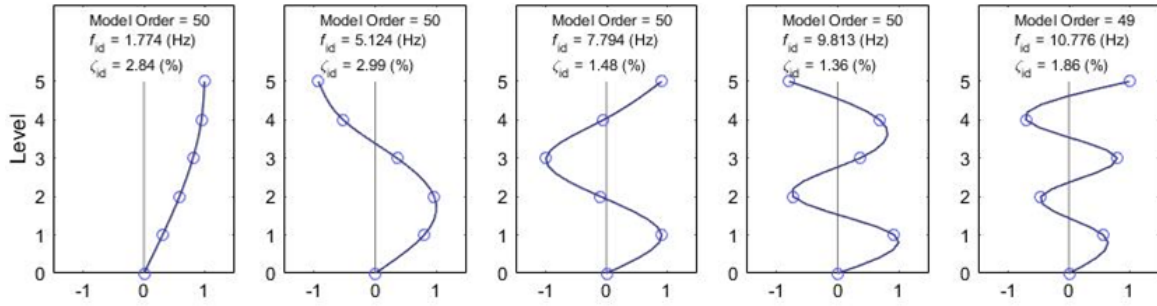


Fig. 3. Identified modal parameters for 5DOF shear building model using ERA-NExT

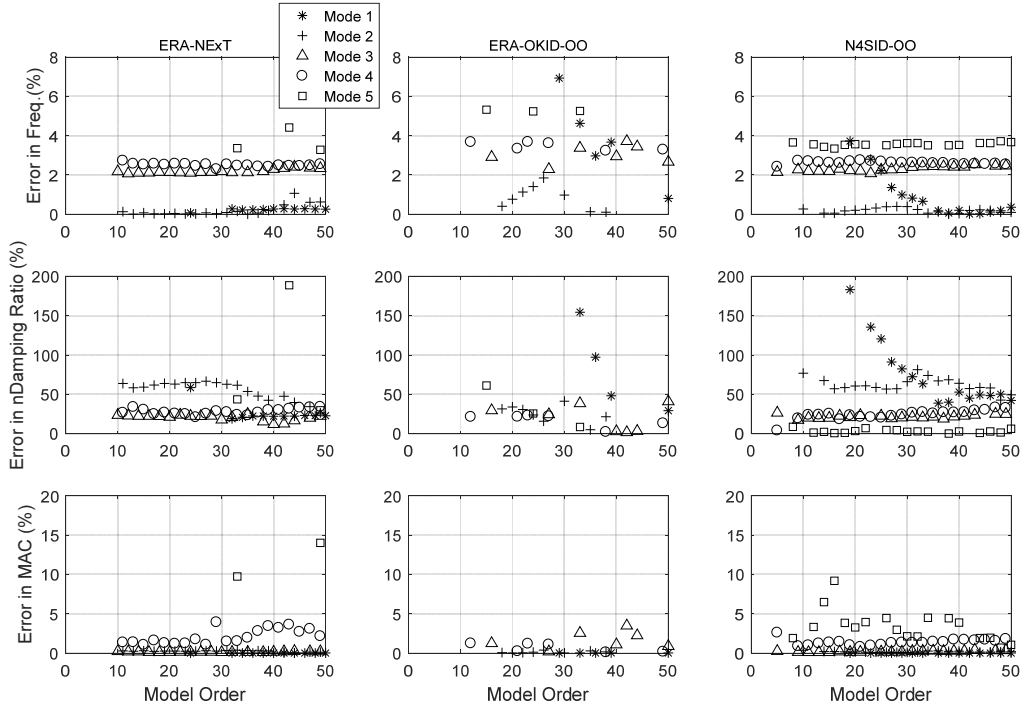


Fig. 4. Error comparison in identified modal parameters using white noise response

사용된 시스템 식별 기법의 성능 비교를 위해 각각의 모델 차수에서의 오차율(%)을 실제 구조물의 고유진동수, 감쇠비, MAC 비교를 통해 확인해보았다(Fig. 4). ERA-NExT의 경우는 일반적으로 4차 모드까지 만족할 만한 식별을 수행하며 5차 모드는 식별이 잘 이루어지지 않는다. ERA-OKID-OO는 식별이 이루어지는 횟수가 상대적으로 적고 실제 구조물의 모드 특성에 비해 오차가 크다. 이전의 연구[6, 24]에서 출력기반의 OKID 기법이 만족할만한 시스템 식별을 수행했던 비하여 저하된 성능이며, 이를 통해 주어진 30초 분량의 데이터가 충분하지 못하다는 것을 알 수 있다. 5차 유도의 낮은 rank로 인한 특이값 분석의 어려움 때문에, 이러한 경우에는 차수를 증가시켜 Hankel 행렬을 더 크게 하는 것도 해결방안이 될 수 없다. N4SID-OO는 전반적으로 만족할만한 성과를 나타내며 ERA-NExT 기법과 달리 5차 모드의 식별도 상당한 수준으로 이루어진다. 1차 모드는 고유진동수와 감쇠비가 점진적으로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서는 각각 0.9의 MPC와 EMAC가 사용되었을 때, ERA-NExT 기법에 의한 식별결과를 안정성 지표로 나타낸 것이다. 5차 모드는 식별이 이루어지지 않았지만, 전반적으로 응답모드의 식별이 균일하게 나타나며,

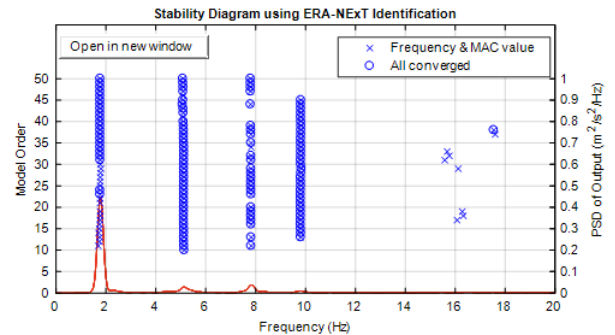


Fig. 5. Stabilization diagram on the postprocessing windows in SMIT with 0.9 of MPC and EMAC criteria

초과 변수 해석으로 인해 발생하는 모드들도 쉽게 걸러지는 것을 확인할 수 있다. 이후의 검증과정에서는 MPC와 EMAC의 값을 0.9로 통일하여 더미 모드를 삭제하는데 활용하였다.



### 4.2 지진 하중을 이용한 응답 모드 식별

2017년 11월 15일 대한민국 경상북도 포항시 흥해읍 남송리에서 발생한 포항지진 시 관측소에서 계측된 데이터를 이용하였다. 구조물에 가해지는 지진파는 Fig. 6과 같다. 이 연구에서 사용하는 본진의 경우 규모는 리히터 규모 5.4에 해당하는 지진으로서 2016년에 발생했던 경주지진보다 규모는 작지만, 중저주파수 진동이 발달하여 구조물의 파손 및 균열 등 많은 피해를 발생하였다. 2018년 4월 1일을 기준으로 발생한 여진은 총 100여회에 달하며, 규모가 3.0 이상인 것은 8회인 것으로 집계되었다. 이처럼 지진하중이 반복적으로 작용할 경우 구조물에 손상이 지속적으로 누적되고, 응답 모드에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지속적인 모니터링이 필요하고, 주어진 하중 조건에 관계없이 일정한 수준의 식별된 응답모드는 정확한 결과를 도출할 수 있어야 한다.

이 연구에서는 지진 기록을 두 영역으로 나누어 강진이 시작하는 시점으로부터 30초간의 데이터 (Case 1)와 강진으로부터 2분 이후, 불규칙한 진동을 보이는 응답 (Case 2)을 이용하여 모드 식별을 하고 성능을 비교하였다. Fig. 7의 입력 응답의 스펙트럼에서 나타난 바와 같이 초기의 강진은 저주파 영역에서 차지하는 에너지가 많은 반면, 후기의 진동은 상대적으로 고른 분포의 스펙트럼을 가지게 된다.

SMIT를 통해 사용하여 시스템 식별을 수행한 결과, Case 1의 경우 ERA-NExT는 1, 2차 모드 식별에 성공하였고, 나머지는 식별에 실패하였다 (Fig. 8). 상관관계를 이용하는 경우, 상대적으로 저주파 입력 지진하중에 의해 구

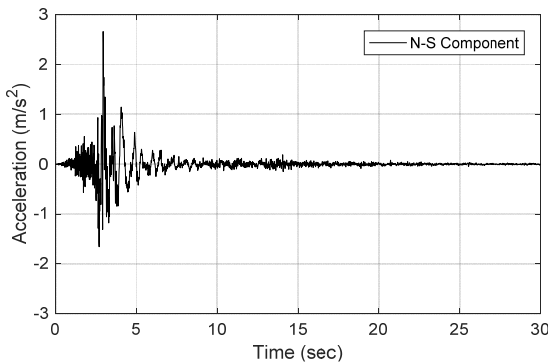


Fig. 6. Pohang earthquake N-S component measured from PHA2 station

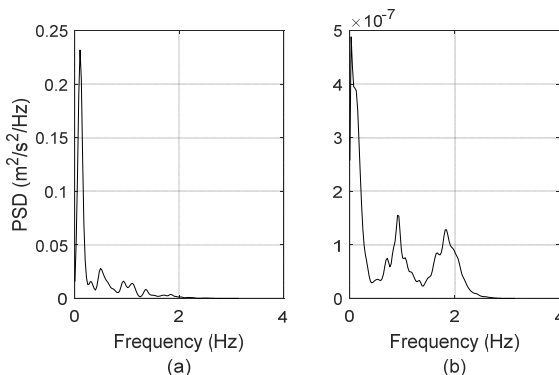


Fig. 7. Power spectrum of Pohang earthquake N-S component (a) Case 1: Main shock and (b) Case 2: 2 min. after main shock

조물의 응답 중, 저차 모드의 기여도가 더욱 높게 나타난다. 실제 스펙트럼 분석도 이를 반영하여 응답신호를 통해서는 1차 모드만 식별이 가능하다. 상관관계 분석은 고차 모드의 기여도를 더욱 낮추게 되어 시스템 식별의 성능을 제한하게 된다.

ERA-OKID-OO의 경우 응답모드 식별에 실패하였다. 백색 소음을 이용한 결과에서 확인할 수 있듯이, 식별에 사용한 데이터의 절대적인 양이 부족한 것뿐만 아니라 입력응답과 관련한 전제조건에 위배된 것이 큰 요인으로 판단된다. ERA-OKID-OO의 경우 확실성에 기반한 확률론적 시스템을 대상으로 수행하여야 하지만, 구조물의 응답은 지진하중이 전체 거동현상을 지배하는 결정론적 시스템에 가깝기 때문이다. 응답의 길이가 큰 경우 회귀론적 모형에 기반한 식별이 가능하지만, 지진 응답과 같은 수 초, 수십 초 이내의 정보로는 성능이 필연적으로 저하될 수밖에 없다.

N4SID-OO를 사용한 경우에는 3차 모드까지 식별이 가능하였고, 일부 4, 5차 모드도 식별이 가능하였다. 1, 2차 모드의 식별 패턴은 ERA-NExT의 것과 유사하게 나타났으며, 이후 고차모드에서는 식별된 고유진동수가 다소 동요하는 경향이 나타났다. N4SID-OO에서는 미래의 응답을 투영하는 과정에서 입력에 의한 영향을 고려하지 않았을 뿐이기 때문에 전체 알고리

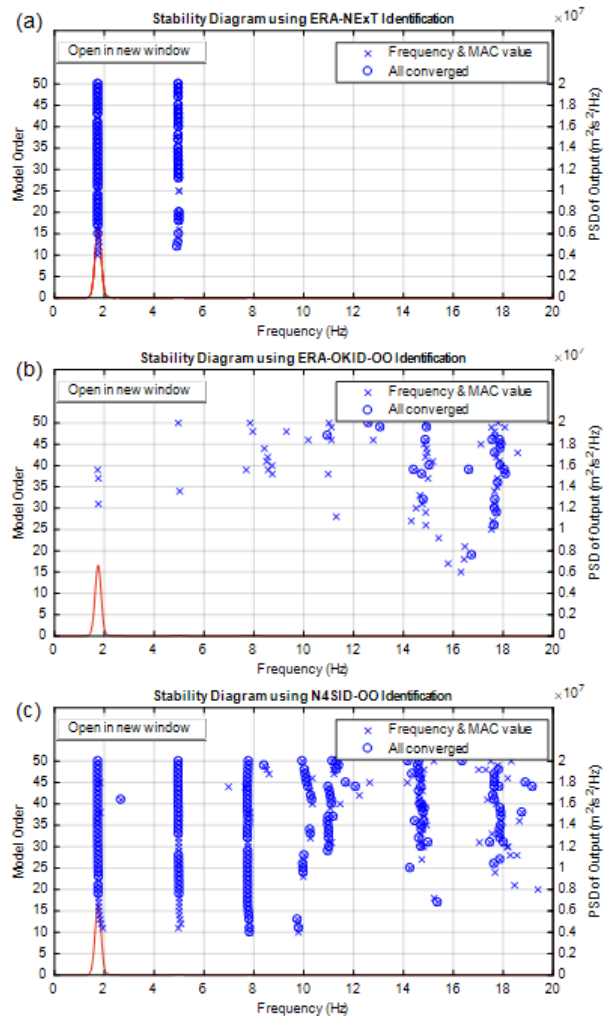


Fig. 8. Stabilization diagram for Case 1 (main shock) with 0.9 of MPC and EMAC criteria (a) ERA-OKID-OO, (b) ERA-NExT, and (c) N4SID-OO

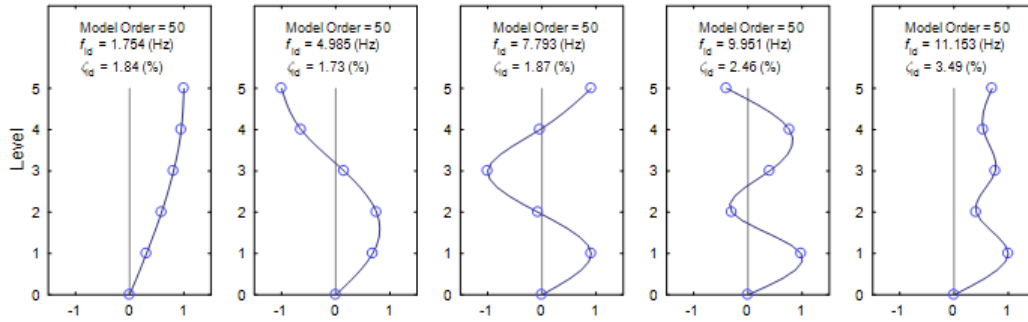


Fig. 9. Identified modal parameters for 5DOF shear building model using N4SID-OO

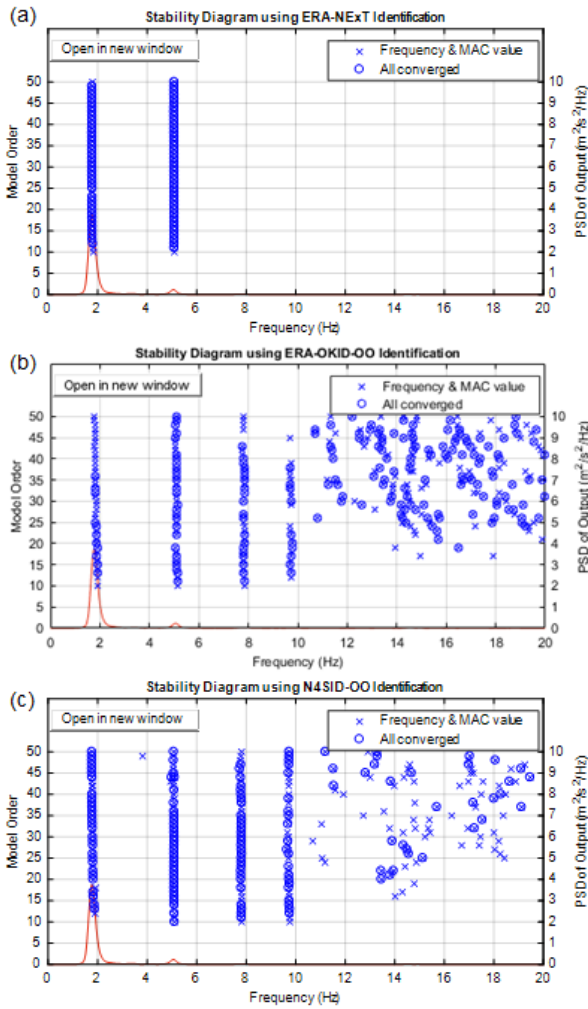


Fig. 10. Stabilization diagram for Case 2 (two minutes after main shock) with 0.9 of MPC and EMAC criteria (a) ERA-OKID-OO, (b) ERA-NExT, and (c) N4SID-OO

즘의 전제조건이 바뀌지 않는다. 따라서, 적은 양의 데이터만을 이용한 경우에도 식별의 성능이 상대적으로 높게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

추가로 N4SID-OO를 사용한 경우 안정성 지표로부터 응답 모드 특성을 추출하여 Fig. 9에 나타내었다. 모델 차수는 식별된 정보 중 가장 높은 값을 사용하였다. 전체적인 모드 형상은 유지가 되고 있지만, 4, 5차 모드는 불안정한 형상임을 확인할 수 있다.

Case 2의 지반응답을 이용하여 구조물의 식별을 수행한 결과를 Fig. 10

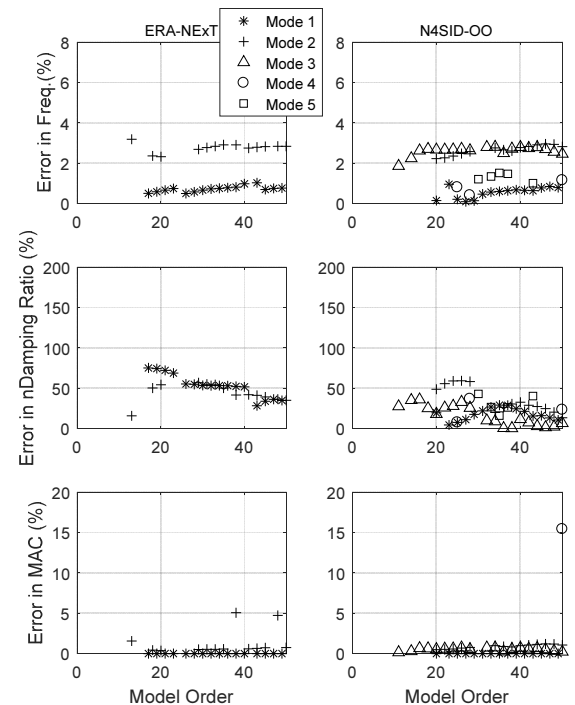


Fig. 11. Error comparison in identified modal parameters for case 1

에 나타내었다. ERA-NExT는 강진이 작용할 때와 거의 유사한 결과를 나타내어 1, 2차 모드 식별만 가능하였다.

ERA-OKID-OO의 경우 Case 1의 경우와 비교하여 가장 큰 차이를 나타내었다. 이 경우 측정, 계산 오차 등으로부터 기인한 확률론적 응답의 기여도가 전체 응답에서 차지하는 비중이 늘어남에 따라 입력응답에 관한 전제조건을 만족하게 되고, 주어진 전단 구조물의 1-4차 모드 식별이 가능함을 확인할 수 있다.

N4SID-OO의 경우, 1-3차 모드의 식별은 Case 1과 유사하게 이루어졌고, 4차 모드의 식별이 다소 일관되게 나타났다. 반면, 5차 모드는 거의 식별이 이루어지지 않았다.

보다 정밀한 비교를 위해서 백색 소음에서와 수행한 것과 동일한 방법으로 오차를 분석하였다. Case 1에서의 오차 비교는 ERA-NExT와 N4SID-OO의 결과를 대상으로 수행하였었다(Fig. 11). 고유진동수는 저차모드에서 낮은 오차를 가지는 것으로 평가되었으며, N4SID-OO는 1차 모드는 백색 소음의 경우와 달리, 모델 차수에 관계없이 고유진동수가 일정한 수준의 오차를 가진다. 감쇠비의 경우, 1, 2차 모드의 경우에 있어서 N4SID-OO가 ERA-

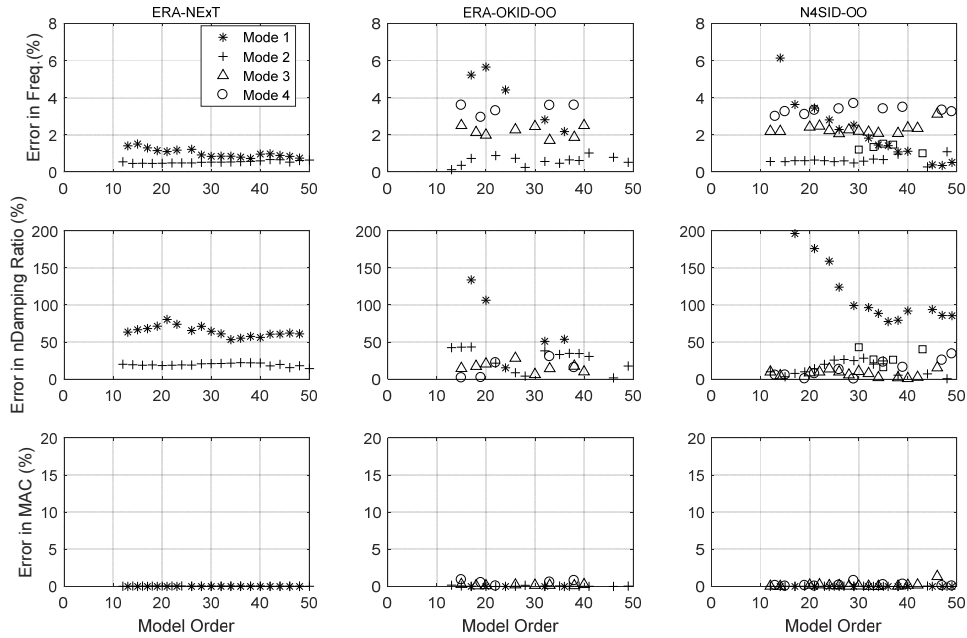


Fig. 12. Error comparison in identified modal parameters for case 2

Table 1. CPU time comparison to complete eigenvalue estimation for model order from unity to 50

unit: sec

Number of samples	ERA-NExT			ERA-OKID-OO			N4SID-OO		
	5DOF	10DOF	15DOF	5DOF	10DOF	15DOF	5DOF	10DOF	15DOF
5,000	2.88	3.87	6.58	4.41	6.51	11.53	9.69	24.89	114.97
10,000	3.51	4.63	8.43	5.28	8.97	18.25	15.90	69.19	177.63
15,000	4.41	4.63	14.79	6.46	14.39	24.52	21.23	112.71	238.57

NExT에 비하여 다소 우수한 성능을 보이며 차수가 높아질수록 정확도가 증가한다. MAC의 오차는 사용된 모든 기법에서 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

Case 2로부터 식별된 모드의 오차 비교를 Fig. 12에 나타내었다. ERA-NExT는 Case 1보다 다소 우수하거나 비슷한 성능을 보인다. 확률론적 기여의 상대적 증가로 인해 성능이 향상하였지만, 고차모드의 식별에는 취약하다. ERA-OKID-OO와 N4SID-OO의 오차는 경향이 매우 유사한 것으로 나타났다. 모델 차수에 따른 식별의 빈도수는 N4SID-OO가 우수한 것으로 평가할 수 있다.

### 4.3 소요 시간 비교를 통한 성능 검증

시스템 식별은 막대한 응답 정보를 한꺼번에 처리하기 때문에, 컴퓨터의 하드웨어가 상당한 수준으로 발전했음에도 불구하고 소요되는 물리적 시간이 상당하다. 지진과 같은 응급상황 발생 시 요구되는 구조물 건전성 모니터링을 수행하기 위해서는 구조물의 상태 진단이 조속히 수행되어야 한다. 정량적인 분석을 위해 각 시스템 식별 기법에 따른 소요 시간을 비교 분석하였다.

소요시간에 영향을 미치는 인자는 크게 모델 차수, 노드의 개수, 샘플의 숫자로 나눌 수 있다. 편의상 모델 차수는 1-50까지로 가정하고, 노드의 개수는 5개, 샘플의 숫자를 변경하여 시스템 식별에 소요되는 시간을 분석하

였다. 정밀한 시간을 측정하기 위해 Matlab에 내재된 함수를 사용하여 식별의 시작과 끝을 계속하였다.

Table 1에서 사용된 시스템 식별 기법에 따라 각각 노드가 [5 / 10 / 15], 사용된 샘플의 숫자가 [5,000 / 10,000 / 15,000]인 경우로 구분하여 고유치 문제를 풀어내는데 걸린 CPU 시간을 기록하였다. 일반적으로 N4SID-OO가 많은 계산을 필요로 하며, 상대적으로 ERA-NExT는 빠른 식별이 가능하다. ERA-NExT의 경우 한번 상관관계를 도출하면 추가적으로 마코브 변수를 생성하기 위한 추가적인 계산이 없다. 모든 식별 기법에서 계산량은 노드의 3승에 비례하고, 샘플수에는 선형 비례하는 특성을 보이기 때문에, 노드의 숫자가 늘어날수록 계산에 필요한 시간도 기하급수적으로 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 특히, N4SID-OO의 CPU 처리 시간의 증가 속도가 가장 빠르며, 다 지점에서 많은 샘플을 사용한 식별을 수행할 경우 즉각적인 시스템 식별이 어렵다.

## 5. 결론

이 연구에서는 SMIT를 활용하여 지진응답을 대상으로 ERA-NExT, ERA-OKID-OO, N4SID-OO의 식별 성능을 비교하였다. GUI를 기반으로 제작된 SMIT는 다양한 식별 기법을 제공하며 응답 모드 특성을 추출까지 통합된 플랫폼을 제공한다. 안정성 지표로부터 터미 모드를 효과적으로 제거하기 위해서 MPC와 EMAC를 추가적인 지표로 선정하였고, 백색 소음을



입력으로 한 5자유도 전단 구조물의 식별을 통해 이 두 지표의 효용성을 검증하고 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 안정성 도표를 작성하는데 있어서 기존의 기준인 고유진동수, 감쇠비, MAC의 연속성은 모델 차수간의 비교인 반면, MPC와EMAC의 기준은 하나의 모델 차수에서 식별된 모드의 형상이 가지고 있는 특징이다. 이러한 기준을 도입함으로써 더미 모드와 신뢰도가 떨어지는 모드를 효율적으로 제거할 수 있다.
- 2) 사용되는 응답의 길이가 짧은 경우, 모델 차수에 따른 식별 가능 빈도가 줄어든다. 이러한 현상은 이 연구에 사용된 기법 중 ERA-OKID-OO에서 가장 두드러지게 나타난다.
- 3) 포항 지진 데이터에서 강진이 포함된 지진에 대한 구조물의 응답은 결정론적 시스템에 지배를 받게 된다. 따라서, 확률론적 시스템을 전제로 한 ERA-OKID-OO는 지진응답을 대상으로 한 식별에 적합하지 않다. 상대적으로 고주파의 입력의 기여도가 높은 지진 가속도를 이용할 경우, 확률론적 시스템의 기여가 높아지고 대체로 만족할만한 수준의 식별을 수행할 수 있다.
- 4) ERA-NExT는 백색소음이 입력으로 주어진 경우 우수한 성능을 발휘하지만, 이외의 경우에는 고차모드의 식별에 취약하다. 상관관계분석을 통해서 저차모드의 기여도가 높아지기 때문이며, 일반적으로 저차 모드의 식별에 적합하다.
- 5) 사용한 기법 중, subspace 기법으로 대표되는 N4SID-OO의 성능이 지진응답을 대상으로 식별을 수행하는데 가장 적합한 것으로 나타났다. 지진응답의 스펙트럼에 관계없이 식별된 모드는 유사한 수준의 오차를 가지는 것으로 판단되었다. 하지만, N4SID-OO는 CPU 처리 시간이 압도적으로 많이 요구되기 때문에 식별의 효율성에서는 가장 취약한 것으로 나타났다.

이와 같은 연구 결과를 바탕으로 향후 실제 구조물의 상태 진단을 수행하기 위해, 목적에 부합한 적합한 식별기법을 선정하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(18SCIP-B065985-06)에 의해 수행되었습니다. 논문 작성에 아낌없이 조언을 해주신 Lehigh 대학교의 Shamim N. Pakzad 교수에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

## / REFERENCES /

1. Chang PC, Flatau A, Liu SC. Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*. 2003 Sep;2(3):257–267.
2. Carden EP, Fanning P. Vibration Based Condition Monitoring : A Review. *Structural Health Monitoring*. 2004 Dec;3(4):355–377.
3. Farrar CR, Worden K. An Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007 Feb 15;365(1851):303–315.
4. Juang JN, Pappa RS. An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1985 Sep;8(5):620–627.
5. Juang JN. *Applied system identification*. Englewood Cliff's, NJ, USA: Prentice Hall; c1994. 394 p.
6. Chang M, Pakzad SN. Observer Kalman Filter Identification for Output-only Systems using Interactive Structural Modal Identification Toolsuite. *Journal of Bridge Engineering*. 2013 Jul 4;19(5):04014002.
7. Juang JN, Cooper JE, Wright JR. An Eigensystem Realization Algorithm using Data Correlations (ERA/DC) for Modal Parameter Identification. *Control Theory and Advanced Technology*. 1988 Mar;4(1):5–14.
8. James GH, Carne TG, Lauffer JP. The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Structures. *Modal Analysis—the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*. 1995 Oct 1;10(4):260.
9. Naganuma T, Deodatis G, Shinozuka M. ARMA Model for Two-dimensional Processes. *Journal of Engineering Mechanics*. 1987 Feb;113(2):234–251.
10. Chen CW, Huang JK, Phan M, Juang JN. Integrated System Identification and State Estimation for Control Offlexible Space Structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1992 Jan;15(1):88–95.
11. Pandit SM. *Modal and Spectrum Analysis: Data Dependent Systems in State Space*. Wiley-Interscience; c1991 Apr 25.
12. Van Overschee P, De Moor B. N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic–stochastic Systems. *Automatica*. 1994 Jan 1;30(1):75–93.
13. Peeters B, De Roeck G. Reference-based Stochastic Subspace Identification for Output-only Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1999 Nov 1;13(6):855–878.
14. Flynn EB, Kpotufe S, Harvey D, Figueiredo E, Taylor S, Dondi D, Mollo T, Todd MD, Rosing TS, Park G, Farrar C. SHMTools: A New Mbed-dable Software Package for SHM Applications. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. International Society for Optics and Photonics. 2010 Apr 1;7647:764717.
15. Reynders E, Schevenels M, De Roeck G. MACEC 3,2: A Matlab Toolbox for Experimental and Operational Modal Analysis. *Leuven University, Belgium Google Scholar*. c2011 Feb.
16. Chang M, Leonard RL, Pakzad SN. Structural Modal Identification Toolsuite (SMIT). *Lehigh University*. c2012.
17. Dorvash S, Pakzad SN. Effects of Measurement Noise on Modal Parameter Identification. *Smart Materials and Structures*. 2012 May 18;21(6):065008.
18. Chaudhary MT, Abe M, Fujino Y, Yoshida J. System Identification of Two Base-isolated Bridges using Seismic Records. *Journal of Structural Engineering*. 2000 Oct;126(10):1187–1195.
19. Smyth AW, Pei JS, Masri SF. System Identification of the Vincent

- Thomas Suspension Bridge using Earthquake Records, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003 Mar 1;32(3):339-367.
20. Beck JL, Jennings PC, Structural Identification using Linear Models and Earthquake Records, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1980 Jan 1;8(2):145-160.
21. Pappa RS, Elliott KB, Schenk A, Consistent-mode Indicator for the Eigensystem Realization Algorithm, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993 Sep;16(5):852-858.
22. Yun GJ, Lee SG, Shang S, An Improved Mode Accuracy Indicator for Eigensystem Realization Analysis (ERA) Techniques, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012 Mar 1;16(3):377-387.
23. Stoica P, Introduction to spectral analysis, Prentice hall; c1997.
24. Vicario F, Phan MQ, Betti R, Longman RW, Output-only Observer/Kalman Filter Identification (O3KID), *Structural Control and Health Monitoring*, 2015 May 1;22(5):847-872.