

모드 특성을 이용한 건축 구조물의 강성 및 감쇠 행렬 식별

Identification of Stiffness and Damping Matrix of Building Structures using Modal Characteristics

강 경 수
Kang, Kyung Soo

국문요약

본 연구에서는 자유진동, 조화하중, 그리고 백색잡음실험을 통해 얻어지는 진동수, 감쇠비, 모드 벡터와 같은 구조물의 모드정보를 이용하여 강성행렬과 감쇠행렬을 구성하였다. 입력신호로는 지진하중을 모사하는 바닥판 가속도를 이용하였고, 출력신호는 각종 절대가속도를 사용하였다. 각각의 실험에서 얻어지는 구조물 모드정보의 제한조건과 그에 따른 시스템 식별 모델들의 특성을 비교하였다. 본 연구의 결과는 진동대 실험을 위한 기초적인 동적실험 및 분석에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 시스템식별, 강성 및 감쇠행렬, 모드 정보, 진동대실험

ABSTRACT

In this paper, the stiffness and damping matrix are experimentally constructed using the structural modal information on frequencies, damping ratio and modal vectors, which are obtained by shaking table tests. Free vibration, harmonic and white noise vibration tests are performed. The acceleration of the shaking table was used as the input signal, and the corresponding accelerations of each floor were measured as output signals. The characteristics and limitations of modal information from each test are compared. The results of this study would be a basic resource of the analytical and experimental studies on the system identification of structures.

Key words : system identification, stiffness and damping matrix, modal information, shaking table test

1. 서 론

지진 및 바람하중을 받는 구조물의 동적 거동을 정확히 모사할 수 있는 수학적 모델을 구성하는 것, 즉 시스템 식별은 많은 연구자들에 의해 수행된 중요한 연구 주제이다.⁽¹⁾ 특히, 최근에 많은 이론적이고 실험적인 연구가 수행된 진동 제어분야 및 헬스 모니터링(health monitoring) 분야에서는 정확한 구조물의 모델을 구성하는 것이 가장 중요하다. 시스템식별은 실제 측정된 입출력관계를 정확히 구성할 수 있는 시스템 행렬을 구하는 것으로, 식별될 구조물의 주요 모드를 가진 할 수 있는 입력신호를 발생시키는 것, 그리고 구조물에 대한 정보를 담도록 출력 신호를 설정한 후 이를 정확히 측정하는 것이 중요하다.^{(2),(3)}

진동제어분야에서는 제어장치로 사용되는 능동 혹은 복합형질량감쇠장치를 이용하여 입력신호를 발생하거나, 지진을 모사하는 진동대 신호를 입력신호로 사용한다. 특히, 인위적인 가진이 불가능한 건축 및 토목 구조물과 같은 대형 구조물의 식별을 위해 보행하중, 바람하중, 그리고 차량하중과 같은 하중을 이용하는 자연 가진(natural excitation)을 이용한 시스템식별이 수행되기도 한다.⁽⁴⁾ 출력신호로는 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답을 이용하는데 일반적으로 계측의 편이 및 경제적인 이유로 가속도 자료가 가장 많이 이용된다.

Dyke 등은 3층 소형 벤치마크 구조물에 대한 시스템식별

을 수행하였다.⁽⁵⁾ 국내에서는 주석준 등이 관측기/Kalman 필터를 이용한 시스템식별기법을 사용하여 3층 건물실험을 수행하였고⁽⁶⁾, 민경원 등은 점탄성 감쇠기가 설치된 5층 실험물구조물에 대하여 시스템 식별을 수행하였다.⁽⁷⁾ 이러한 연구들은 수학적 모델에 기초한 것으로 시스템 행렬의 고유값이 의미하는 진동수 및 감쇠비에 대한 정보는 가지고 있으나, 구체적인 질량, 강성, 그리고 점성 행렬과 같은 유한요소모델에 대한 정보는 제공해 주지 않는다. 이는 얻어진 시스템 모델이 입출력 관계를 그대로 재현하기만 하면 되는 진동제어에는 큰 문제가 되지 않으나 강성행렬식별을 통해 손상도를 추정하는 헬스 모니터링 분야는 얻어진 시스템행렬로부터 유한요소모델을 추출하기 위한 기법을 요구한다.

Berman 등은 해석을 통해 주어진 유한요소모델이 상당히 정확하다는 가정 하에, 유한요소모델의 수정을 최소화하는 해를 찾도록 함으로써 실험자료로부터 얻은 모드 정보를 만족하는 무수한 수의 가능한 해로부터 최적 해를 선택하는 방법을 사용하였다.⁽⁸⁾ Farhat 등은 민감도에 근거한 부재 단위모델 수정방법으로서 유한요소모델의 요소들 사이의 연결성을 유지하면서 모델의 수정이 가능한 방법을 제안하였다.⁽⁹⁾ 강경수 등은 시간영역에서 식별된 모델로부터 Alvin 등이 제안한 CBSI 기법을 이용하여 유한요소모델을 추출하였다.⁽¹⁰⁾ 황계승 등은 TMD 설계 시 요구되는 구조물의 1차 모드 질량을 TMD를 가진 장치로 사용함으로써 추출하는 방법을 제안하였다.⁽¹¹⁾

유한요소모델 중, 일반적으로 구조물의 질량행렬은 비교적 정확히 예측할 수 있는 반면, 강성과 점성행렬은 실제 구조

* 정회원 · 동명정보대학교 건축공학과, 조교수(대표저자 : koosin@tmc.tit.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 2. 10 / 심사종료일 : 2004. 3. 30)

물과 많은 오차를 가지고 있다. 따라서, 질량행렬은 정확하다고 가정할 수 있다면 측정된 자료를 이용하여 강성과 감쇠행렬만을 수정할 수 있으며, 이 경우 단순한 자유진동 및 조화 가진과 같은 실험을 통해 얻어지는 진동수, 감쇠비 그리고 모드형상과 같은 모드 정보만으로도 강성과 감쇠행렬을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 질량행렬이 주어지거나, 혹은 전체적인 질량의 크기가 주어진다 가정 하에, 자유진동, 조화하중, 그리고 백색잡음실험을 통해 얻어지는 각각의 구조물의 모드정보를 이용하여 강성행렬과 감쇠행렬을 구성한 후 이를 비교 검토함으로써, 각각의 실험이 주는 정보의 제한조건과 그에 따라 얻어지는 구조물 모델의 특성을 분석하였다. 대상 구조물은 전단거동을 하도록 설계된 3층 구조물로, 조화하중과 백색잡음은 지진하중을 모사하는 바닥판 가속도를 이용하였으며, 측정신호는 각 층의 절대가속도 신호로 제한하였다.

2. 실험장치의 구성

실험은 동명정보대학교 건축공학실험동의 진동실험실에서 수행하였다. 실험 축소모델은 1경간을 갖는 3층의 철골조로 제작되었다(그림 1). 실험체의 크기는 높이 120cm, 너비 60cm이다. 진동대의 일반적인 특성상 1축방향의 동적 신호를 측정하기 위하여 가진방향으로 기둥의 약축방향을 위치하였다. 구조물의 질량행렬은 바닥 판에 집중된 것으로 가정하였으며, 측정된 1, 2, 3층 질량은 각각 18.62kg, 18.62kg, 35.04kg이다. 진동대는 AC 서보모터를 사용하였고 진동대의 움직임은 내셔널 인스트루먼트사의(NI) PCI-6024 D/A 보드로 조정하였다. 1층 바닥판을 포함한 4개 바닥판에 가속도계를 설치하여 가속도를 측정하였다. 신호의 취합은 실시간 디지털 신호 처리기(Real-Time Digital Signal Processor: DSP)을 사용하였다. 사용된 데이터 취합 보드의 역할은 아날로그 신호를 디지털로 디지털신호를 아날로그 신호로 전환해 주는 것이다. 데이터 처리를 위해(NI) BNC-2090보드와 Kyowa사의 multi conditioner MCD-8A를 사용하였다. 전체적인 실험과 데이터 처리과정을 그림 2와 같이 도식화하였다.⁽⁶⁾

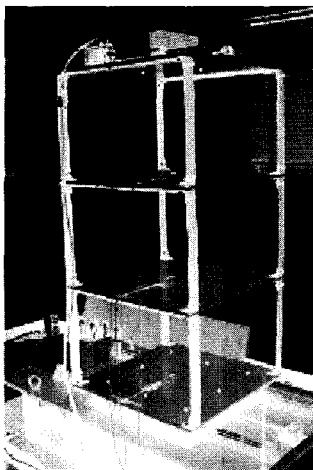


그림 1 구조물형상사진

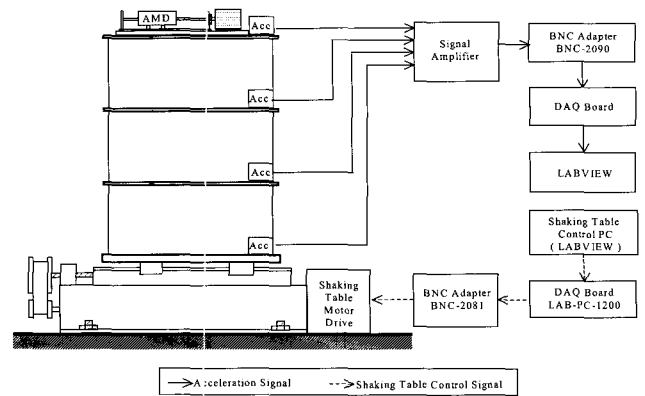


그림 2 신호처리과정

3. 시스템 식별 기법

3.1 일반 사항

시스템식별에서 가장 중요한 것은 잡음의 크기가 최소화된 양질의 데이터를 취득하는 것이다. 여기서, 잡음이란 식별하고자 하는 시스템의 정보를 표현하지 못하는 모든 정보를 의미하며, 잡음의 특성은 시스템에 따라 그리고 계측시스템의 특성에 따라 달라지기 때문에 엔지니어에 의한 판단이 매우 중요하다.

잡음이 제거된 자료를 계측하기 위해 가장 먼저 결정할 것은 자료를 취득하는 시간간격의 크기이다. 자료를 취득하는 시간간격은 식별할 수 있는 주파수 영역의 크기를 결정한다. 즉, 시간간격의 역수의 절반으로 정의되는 Nyquist 주파수까지의 신호만이 계측 가능하다. 만일 이 주파수보다 큰 주파수 성분을 구조물이 가지고 있다면, 그 신호는 저주파수 대역의 성분인 것처럼 잘못 인식되며, 이를 얼리어이징(aliasing) 현상이라 한다. 따라서, 시간간격은 Nyquist 주파수가 관심영역의 주파수대역보다 크도록 충분히 작게 설정되어야 한다. 대상 구조물은 저주파수 중심의 유연한 구조물이기 때문에 고차모드도 모두 약 20Hz 이내의 성분을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 시간간격을 관심되는 주파수대역인 20Hz의 2.5배인 50Hz까지의 신호를 계측하도록 0.01 초로 설정하였다.

시간간격의 결정과 함께 사용될 것은 원하는 주파수 대역의 신호만을 계측하는 대역전달 필터(band-pass filter)의 사용이다. 일반적으로 0Hz에 가까운 신호는 평균성분이나 혹은 진동성분이 아닌 단조증가 혹은 단조 감소하는 성분을 의미한다. 이러한 신호들은 일반적인 동적 신호에는 존재하지 않기 때문에 잡음으로 규정되어 제거되어야 한다. 또한, 조화하중실험의 가진 신호의 경우 대상 주파수 성분 이외의 성분은 모두 잡음이므로 이를 제거할 수 있는 대역전달 필터를 사용해야 한다. 본 연구에서는 각각의 실험에 알맞은 5차의 버터워스(butterworth) 필터를 사용하여 잡음을 제거하였다.

3.2 질량행렬의 모든 정보가 주어지는 경우

본 절에서는 Reinhorn 등이 사용한 지반가속도에 대한 각종 가속도 응답의 전달함수로부터 모드 정보를 추출하고, 강성 및 감쇠행렬을 구성하는 방법을 소개하기로 한다.⁽¹²⁾ 본 절은 질량행렬에 대한 모든 정보가 주어진 것으로 가정한다. 지진하중을 받는 n 자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, \mathbf{M} , \mathbf{C} , 그리고 \mathbf{K} 는 각각 질량, 감쇠, 그리고 강성 행렬을 나타낸다. \mathbf{x} 는 크기 $n \times 1$ 인 변위 벡터이고, \mathbf{I} 는 지진영향 벡터이다. 비례감쇠인 경우 식 (1)은 다음과 같은 모드방정식의 형태로 표현된다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\Lambda}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\Gamma}\ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{\Gamma} = -\boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{M}\mathbf{I}$ 이고, $\boldsymbol{\Phi}$ 는 다음 특성방정식을 만족시키는 고유벡터로 질량에 대하여 정규화되었다.

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Omega} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{M}\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I} \quad (4)$$

그리고, $\boldsymbol{\Lambda}$ 와 $\boldsymbol{\Omega}$ 는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\Lambda} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{C}\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(2\xi_i\omega_{ni}, i=1, \dots, n) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(\omega_{ni}^2, i=1, \dots, n) \quad (6)$$

여기서, ω_{ni} 와 ξ_i 는 각각 i 차 모드의 고유진동수와 감쇠비이다. i 층 절대가속도 응답의 지반가속도에 대한 전달함수는 다음과 같다.

$$T_{ai}(\omega) = \ddot{X}_i(\omega) / \ddot{X}_g(\omega) = \left(\sum_{j=1}^n \phi_{ij} H_j(\omega) \Gamma_j \right) \quad (7)$$

여기서, ϕ_{ij} 는 $\boldsymbol{\Phi}$ 의 (i,j) 성분을 말하며, $\ddot{X}_i(\omega)$, $\ddot{X}_g(\omega)$ 는 각각 i 층 절대가속도 응답과 지반가속도의 푸리에 변환이다. $H_j(\omega)$ 는 복소 주파수 응답함수로 다음과 같다.

$$H_j(\omega) = \frac{(\omega / \omega_j)^2 + 2\xi_j(\omega / \omega_j)i}{(1 - (\omega / \omega_j)^2) + 2\xi_j(\omega / \omega_j)i} \quad (8)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$

Reinhorn 등은 각 모드의 주파수가 근접하지 않고, 떨어져 있는 경우 각 모드의 공진응답은 서로 영향을 주지 않는다고 가정한 후, 공진 시 전달함수를 다음과 같이 구하였다.

$$T_{ai}(\omega_k) = \phi_{ik} H_k(\omega_k) \Gamma_k \quad (9)$$

각 k 차 모드 벡터의 j 층에 대한 i 층의 비는 각종 절대가속도 전달함수의 비를 이용하여 계산될 수 있다. 각 모드 벡터의 비가 주어진다면, 주어진 질량행렬을 정규화하는 모드 벡터가 결정된다.

$$\phi_{ik} / \phi_{jk} = T_{ai}(\omega_k) / T_{aj}(\omega_k) \quad (10)$$

주파수 ω_k 에서의 $H_k(\omega_k)$ 의 절대값은 다음과 같다.

$$|H_k(\omega_k)| = \frac{\sqrt{1 + 4\xi_k^2}}{2\xi_k} \quad (11)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터, 각 모드의 감쇠비를 계산할 수 있다.

$$\xi_k = \left(2 \sqrt{\left(\frac{T_{ai}(\omega_k)}{\phi_{ik} \Gamma_k} \right)^2 - 1} \right) \quad (12)$$

얻어진 모드 진동수, 모드 감쇠비, 그리고 모드 벡터와 주어진 질량행렬을 이용하여 강성행렬과 감쇠행렬을 구할 수 있다.

$$\mathbf{K} = \mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{M} \quad (13)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{M} \quad (14)$$

3.3 질량행렬의 2-norm정보만 주어지는 경우

일반적인 시스템식별기법은 다음과 같은 상태방정식을 제공한다. 본 연구에서는 관측기/Kalman 필터 시스템식별기법을 사용하여, 다음과 같은 상태방정식을 구하였다.⁽¹³⁾ 출력은 각종 가속도 응답이다. 질량행렬은 2-norm의 크기가 주어진다고 가정한다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_c\mathbf{z} + \mathbf{B}_c\mathbf{u} \quad (15)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_c\mathbf{z} + \mathbf{D}_c\mathbf{u} \quad (16)$$

식 (15), 식 (16)의 상태방정식은 다음과 같은 복소 모드 좌표계로 표현될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}_q\mathbf{q} + \mathbf{B}_q\mathbf{u} \quad (17)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_q\mathbf{q} + \mathbf{D}_c\mathbf{u} \quad (18)$$

여기서, $\mathbf{z} = \boldsymbol{\Psi}\mathbf{q}$, $\mathbf{B}_q = \boldsymbol{\Psi}^{-1}\mathbf{B}_c$, $\mathbf{C}_q = \mathbf{C}_c\boldsymbol{\Psi}$ 이고, $\boldsymbol{\Psi}$ 는 다음 조건을 만족시키는 복소 모드 고유 벡터이다.

$$\mathbf{A}_c\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Psi}\mathbf{A}_q \quad (19)$$

행렬 \mathbf{A}_q , \mathbf{B}_q , \mathbf{C}_q 와 벡터 \mathbf{q} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \bar{\lambda}_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \\ & & & & \bar{\lambda}_n \end{bmatrix}, \mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} b_{q1} \\ \bar{b}_{q1} \\ \vdots \\ b_{qn} \\ \bar{b}_{qn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_q^T = \begin{bmatrix} c_{q1}^T \\ \bar{c}_{q1}^T \\ \vdots \\ c_{qn}^T \\ \bar{c}_{qn}^T \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \bar{q}_1 \\ \vdots \\ q_n \\ \bar{q}_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서, $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ 이고, $\bar{\lambda}_i$ 는 λ_i 의 켈레 복소수이다. Alvin 등이 제안한 CBSI(Common Based-normalized System Identification)를 적용하여 물리적 의미를 가지고 있지 않은 벡터인 \mathbf{q} 는 모드 변위-속도 좌표계로 변환된다.⁽¹⁴⁾ 다음 식은 i 차 모드의 변환을 보여준다.

$$\begin{bmatrix} q_i \\ \bar{q}_i \end{bmatrix} = \mathbf{V}_i \begin{bmatrix} \eta_i \\ \dot{\eta}_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서, 변환 행렬 \mathbf{V}_i 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$\mathbf{V}_i = d_i \frac{j}{2\omega_i} \begin{bmatrix} \sigma_i - j\omega_i & -1 \\ -\sigma_i - j\omega_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sigma_i - r_i\omega_i & 1 \\ -\sigma_i^2 - \omega_i^2 & \sigma_i - r_i \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서, $r_i = \text{Im}(b_i) / \text{Re}(b_i)$. d_i 의 크기는 임의로 선택될 수 있으나, 만일 가력기와 동일한 위치에 설치된 센서가 존재한다면, 즉, 입력영향행렬과 같은 동일한 형태를 가지는 출력행렬을 정의할 수 있다면 다음과 같이 설정함으로써 질량 정규화된 모드 벡터를 얻을 수 있다.

$$d_i = \omega_{ni} \sqrt{\frac{2 \text{Re}(b_i)}{(\sigma_i + r_i\omega_i) \text{Re}(c_i) - (r_i\sigma_i - \omega_i) \text{Im}(c_i)}} \quad (23)$$

지반 가속도가 입력신호이고, 각 층 가속도가 출력인 경우, 동일한 형태의 입력영향행렬과 출력행렬은 존재하지 않으며, 질량 정규화된 d_i 를 얻을 수 없다. 그러나, 구조물의 질량에 대한 정보 중 질량행렬의 전체적인 크기를 말해주는 2-norm을 아는 경우, 주어진 2-norm을 가지도록 d_i 를 설정할 수 있다.

출력변환 행렬 \mathbf{V}_i 를 사용하여 식 (18)을 좌표 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\eta} + \mathbf{H}_2 \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{D}_c \mathbf{u} \quad (24)$$

식 (2)를 절대가속도로 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{x}} + [\mathbf{1}]_{n \times 1} \ddot{x}_g = -\Phi \Omega \boldsymbol{\eta} - \Phi \Lambda \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (25)$$

식 (24)와 식 (25)를 비교함으로써, 모드 벡터를 얻을 수 있다.

$$\Phi = -\mathbf{H}_1 \Omega^{-1} \quad (26)$$

질량행렬은 다음 식에 의해 주어진다. 이 질량행렬은 전술한 바와 같이 2-norm으로 정의되는 주어진 전체 질량의 대략적인 크기와 동일한 2-norm을 가진다.

$$\mathbf{M} = (\Phi \Phi^T)^{-1} \quad (27)$$

4. 실험 결과

4.1 자유진동 실험 (Free Vibration Test)

자유진동 실험은 기본적으로 입력신호가 존재하지 않기 때문에 전달함수를 구할 수 없다. 그러나, 구조물의 응답이 충격응답(impulse response)과 유사한 거동을 보이기 때문에, 계측된 출력신호의 푸리에 변환이 전달함수에 해당하는 구조물의 특성을 보여준다. 그림 3은 3층 구조물의 자유진동 시 계측된 각 층 절대 가속도의 시간이력을 보여준다. 3층 구조물의 최상층에 초기 변위를 줌으로써 자유진동을 유발시켰다. 그림 3으로부터, 시간이 경과함에 따라 진동의 최대값이 점근적으로 줄어드는 전형적인 자유진동 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 각 층 가속도를 푸리에 변환한 주파수 응답함수의 크기를 보여준다. 그림 4는 자유진동이 대부분 1차 모드의 거동만을 보였음을 확인해 준다. 이는 3층에 초기변위를 가하는 것이 1차 모드의 형상과 유사한 각층 초기 변위를 유발하여 1차 모드가 지배적인 거동

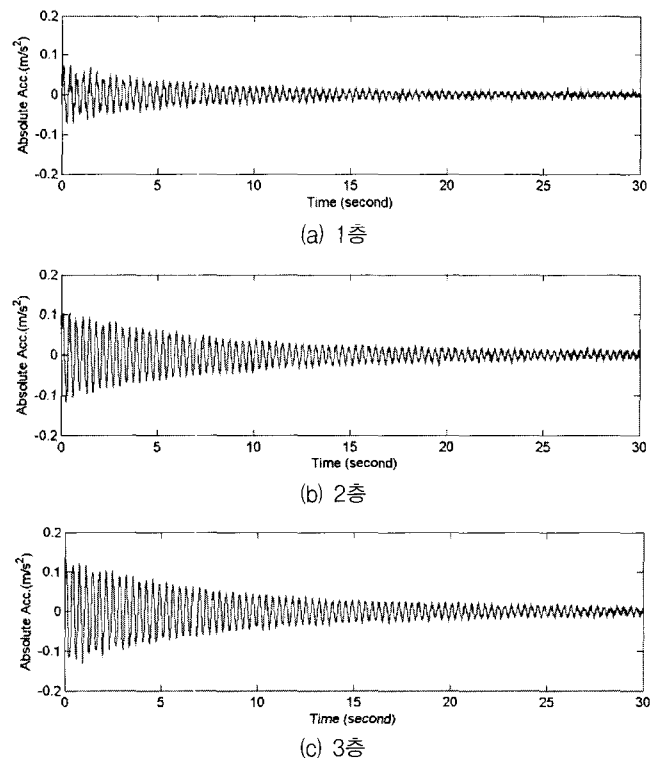


그림 3 자유진동시 절대가속도 시간이력

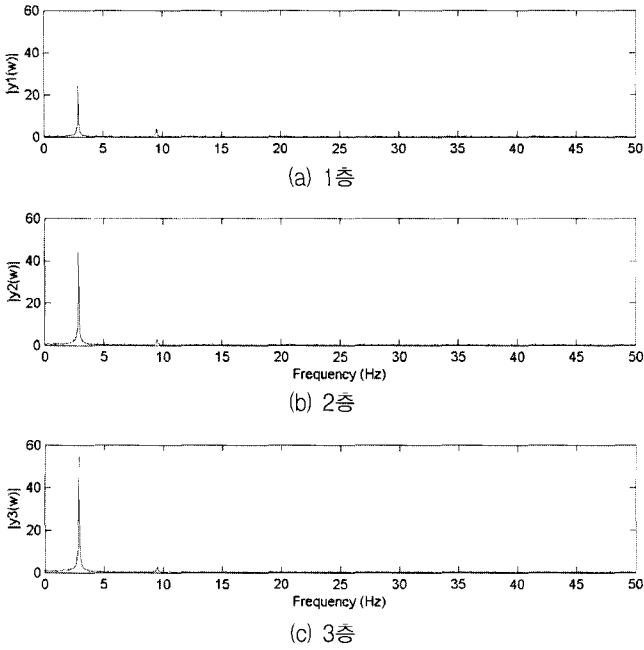


그림 4 자유진동시 주파수 응답함수

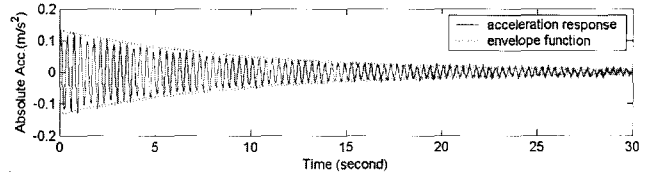


그림 5 3층 절대가속도 시간이력과 포장함수

도록 하는 강성행렬은 무한히 존재한다. 그러나, 대상구조물은 각 층의 기둥의 크기가 동일하도록 제작되었으며 횡방향의 자유도만을 가지는 전단거동을 한다. 만일 각 층의 횡강성의 크기가 동일하다고 가정하면 주어진 1차 모드 진동수만을 가지고도 층 강성을 결정할 수 있다. 즉, 각 층의 강성의 관계가 하나의 변수로 표현가능하다면 실험을 통해 1차 모드 진동수만을 만족하는 강성행렬을 결정할 수 있다.

2장에서 주어진 질량에 대하여, 2.90Hz의 1차 모드 진동수와 0.55%의 1차 모드 감쇠비를 가지는 구조물의 강성행렬과 감쇠행렬은 다음과 같다. 층 강성과 층 점성은 각각 46.67kN/m과 28.0N·s/m으로 모든 층이 동일한 특성을 가지는 것으로 가정하였다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 93.33 & -46.67 & 0 \\ -46.67 & 93.33 & -46.67 \\ 0 & -46.67 & 46.67 \end{bmatrix} \text{ kN/m},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 56.0 & -28.0 & 0 \\ -28.0 & 56.0 & -28.0 \\ 0 & -28.0 & 28.0 \end{bmatrix} \text{ N}\cdot\text{s/m} \quad (29)$$

식 (29)의 강성행렬에 의해 주어지는 구조물의 1차 고유 벡타는 $\phi^T = [0.4020 \ 0.7507 \ 1]$ 으로 계측에 의해 얻어진 값과 다소의 오차를 가진다. 일반적으로 고유진동수보다는 고유 벡타의 계측에 많은 오차가 있다. 또한, 대상구조물과 같은 저감쇠 시스템의 경우, 작은 감쇠의 변화에도 전달함수의 최대값이 크게 변하기 때문에 고유 벡타를 측정하기가 더욱 어려워진다. 1, 2, 3차 고유진동수는 각각 2.90Hz, 9.05Hz, 14.05Hz이고, 고유 감쇠비는 0.55%, 1.71%, 2.65%이다. 고차로 갈수록 감쇠비가 증가한 것은 감쇠행렬이 강성행렬에 비례한 형태를 가지기 때문이다.⁽¹⁵⁾

4.2 조화 가진 실험(Sine Swept Test)

조화 가진 실험은 전달함수를 구하기 위해 많은 시간노력을 요구한다. 이는 한번의 실험이 하나의 전달함수 중 가진 주파수에 해당하는 정보만을 제공하기 때문이다. 따라서, 식별하고자 하는 대상 구조물의 주파수 대역 내에서 주파수의 크기를 변화시켜 가며, 많은 수의 실험을 반복하여야 한다. 또한, 전달함수는 정상상태의 응답 비를 의미하기 때문에 조화응답이 정상상태에 도달한 시점 이후의 자료를 사용해야 하며, 이 점이 더욱 많은 시간노력을 요구하게 되는 또 하나의 원인이 된다. 특히, 대상 구조물과 같이 작은 감쇠를 가

이 되기 때문이다. 2차 모드는 매우 작은 크기가 존재하며, 3차 모드는 계측되지 못하였다. 자유진동응답으로부터 얻어진 1차, 2차 고유진동수는 각각 2.90Hz, 9.53Hz이다. 모드감쇠비와 모드벡타는 2차 모드가 충분히 가진 되지 못하였기 때문에 1차 모드 정보만을 추출하였다. 1차 모드 감쇠비는 식 (28)에 의해 결정되었으며⁽¹⁵⁾, 식 (10)을 사용하여 얻어진 1차 모드 벡타는 $\phi^T = [0.4436 \ 0.8028 \ 1]$ 이다. 고유 벡타는 3층에 대하여 정규화 하였다. 만일 자유진동 실험을 통해 2차 모드와 3차 모드를 식별하고 싶은 경우, 초기 변위 형상을 2차 모드 혹은 3차 모드와 유사한 형태로 주면 가능하지만, 실물 구조물의 경우 2차 모드 이상의 변형 형상을 초기 변위로 가하는 것이 매우 어렵기 때문에, 본 소형구조물의 경우에도 자유진동 실험의 경우에는 1차 모드만을 식별하는 것으로 제한하였다.

$$\xi_i = \frac{1}{2\pi\eta} \ln \frac{\ddot{x}_i}{\ddot{x}_{i+1}} \quad (28)$$

식 (28)은 하나의 모드만을 가지는 단자유도 구조물에 적용 가능하나, 대상 신호가 1차 모드가 지배적인 구조물이므로 근사적으로 적용 가능하다. 2차 모드에 비해 1차 모드의 상대적인 크기가 가장 큰 3층 절대가속도 응답을 이용하였으며, 1초시 응답과 80회 싸이클을 반복한 후 감소된 응답의 크기의 비를 사용하였다. 이로부터 얻어진 구조물의 1차 모드 감쇠비는 0.55%이다. 그림 5는 3층 가속도 응답과, 얻어진 모드 진동수와 감쇠비를 이용하여 구한 포장함수(envelope function)를 보여준다. 그림 5로부터, 포장함수가 싸이클을 반복함에 따라 점진적으로 줄어드는 시간이력의 최대크기를 근사하게 표현했음을 알 수 있다.

질량행렬이 주어지는 경우, 대상 구조물이 다자유도 구조물이기 때문에 얻어진 1차 고유 진동수와 동일한 값을 가지

지는 시스템은 정상상태에 도달하기 위해 많은 시간이 필요하며, 가진 주파수가 공진주파수와 아주 작은 크기로 다른 경우에도 공진응답과 큰 차이를 보이기 때문에, 고유진동수와 감쇠비를 식별하기가 어렵다. 요구되는 시간노력을 줄이기 위해, 자유진동실험을 통해 식별된 모델을 이용하여, 고유진동수에 해당하는 구간에서는 주파수 간격을 촘촘히 하여 실험을 수행하였다.

그림 6과 그림 7은 각각 2.6Hz의 정현파(sine wave)로 입력신호를 준 경우의 바닥판과 각 층 가속도 시간이력과 시간이력의 푸리에변환의 절대값을 보여준다. 그림 6, 7로부터, 필터를 사용하지 않은 원래의 자료에는 많은 고주파성분의 잡음이 존재하며, 필터를 사용함으로써 고주파수 성분의 잡음이 제거됨을 알 수 있다. 5차의 2Hz-4Hz 대역통과 버터워스 필터를 사용하였다. 특히, 바닥판 가속도 자료에 많은 잡음이 존재하며, 층 가속도에는 비교적 잡음의 크기가 작음을 알 수 있다. 이는 구조물이 하나의 필터로 작용하여 고주파수 성분이 응답에는 나타나지 않은 결과이다. 또한, 바닥판 가속도는 2.6Hz 성분만 존재하나, 층 가속도에는 구조물의 1차 모드 성분도 존재함을 확인할 수 있다. 그림 8은 조화하중을 통해 얻어진 구조물의 전달함수의 크기를 보여준다. 예상한 바와 같이 3개의 모드가 존재하며, 1, 2, 3차 모드 진동수는 2.9Hz, 9.4Hz, 15.3Hz이다.

식 (10)을 사용하여 얻어진 구조물의 모드 벡터와, 식 (12)로부터 구한 모드 감쇠비는 다음과 같다. 모드벡터는 질량행렬에 대하여 정규화되었으며, 모드 감쇠비는 각 층 응답으로부터 얻어진 값들의 평균을 취하여 구하였다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.0599 & 0.1474 & 0.1525 \\ 0.1124 & 0.1008 & -0.1678 \\ 0.1411 & -0.1076 & 0.0349 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.49 \\ 0.19 \\ 0.40 \end{bmatrix} \% \quad (30)$$

식 (13)과 식 (14)를 이용하여 구한 강성행렬과 감쇠행렬은 다음과 같다.

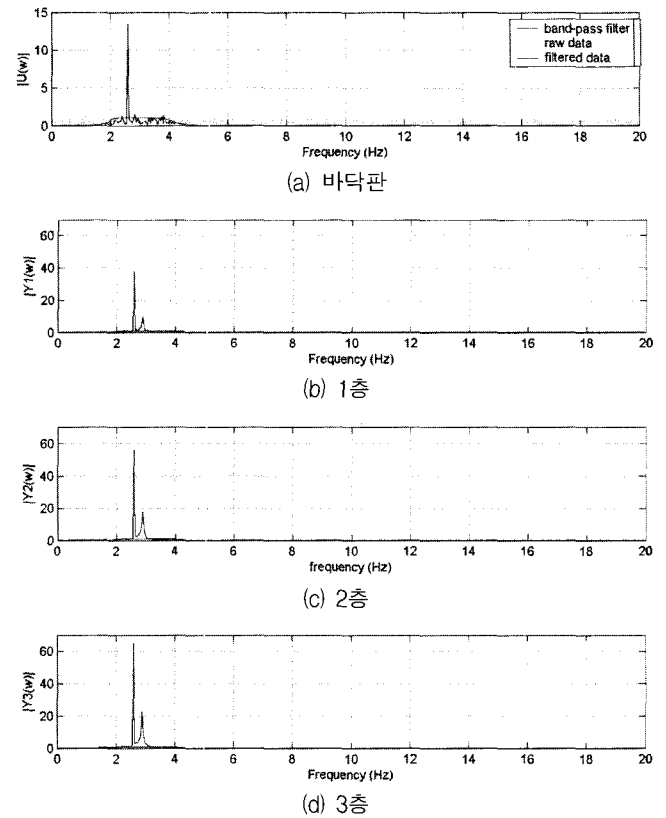


그림 7 2.6Hz 정현파 가진시 주파수 응답함수

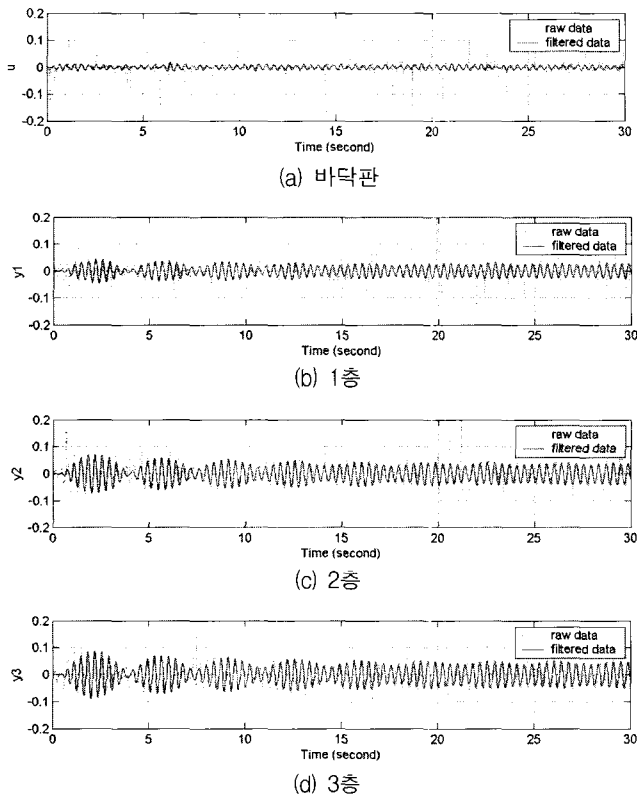


그림 6 2.6Hz의 정현파 가진시 가속도 시간이력

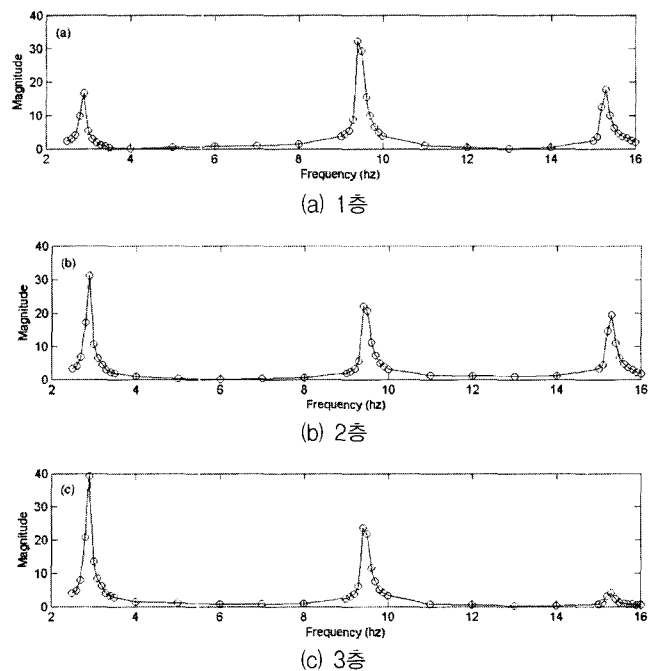


그림 8 조화하중 실험시 지반가속도에 대한 각 층 가속도 전달함수

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 101.18 & -63.23 & -2.17 \\ -63.23 & 103.98 & -56.61 \\ -2.17 & -56.61 & 71.59 \end{bmatrix} \text{ kN/m,}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 8.65 & -4.43 & 3.32 \\ -4.43 & 10.76 & -1.03 \\ 3.32 & -1.03 & 17.70 \end{bmatrix} \text{ N}\cdot\text{s/m} \quad (31)$$

4.3 백색잡음 실험(White-noise Test)

백색잡음 실험은 많은 실험을 요하는 조화 가진의 경우와 달리, 단 한번의 실험으로 전달함수를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 9는 백색잡음 실험을 통해 구한 전달함수의 크기를 보여준다. 전달함수는 250초간 0.01초 간격으로 측정된 전체 자료 중 6250개의 샘플들의 평균으로 구했으며 해닝 윈도우(hanning window)를 사용하였다. 1, 2, 3차 모드 진동수는 2.9Hz, 9.5Hz, 15.3Hz이다. 전 절에서와 동일한 방법으로 계산된 모드 벡터, 모드 감쇠비, 강성행렬, 감쇠행렬은 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.0632 & 0.1626 & 0.1509 \\ 0.1139 & 0.1104 & -0.1692 \\ 0.1397 & -0.0896 & 0.0350 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.64 \\ 0.56 \\ 0.35 \end{bmatrix} \% \quad (32)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 106.36 & -59.35 & -0.14 \\ -59.35 & 108.79 & -55.44 \\ -0.14 & -55.44 & 56.82 \end{bmatrix} \text{ kN/m,}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 12.20 & -0.35 & -0.55 \\ -0.35 & 12.15 & -0.70 \\ -0.55 & -0.70 & 21.77 \end{bmatrix} \text{ N}\cdot\text{s/m} \quad (33)$$

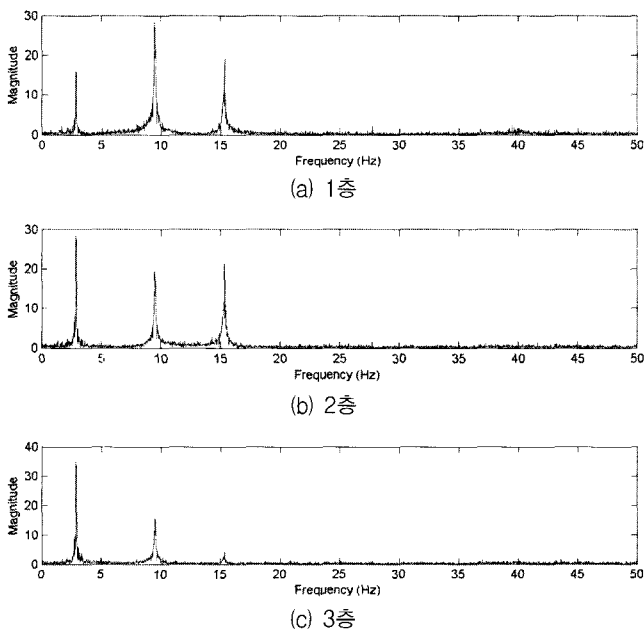


그림 9 백색잡음 실험시 지반가속도에 대한 각 층 가속도 전달함수

백색잡음 실험을 통해서는 일반적인 시스템 식별기법을 이용하여, 상태방정식 형태의 시스템 행렬을 구할 수 있으며, 시스템 행렬이 주어지는 경우 CBSI기법을 이용하여 질량, 강성, 감쇠행렬을 구할 수 있다. 본 연구에서는 관측기/Kalman 필터 기법을 이용하여 시스템 행렬을 구하였다. 얻어진 시스템 행렬로부터 CBSI기법을 사용하여 얻어진 모드 벡터와 모드 감쇠비는 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.0612 & 0.1634 & 0.1475 \\ 0.1129 & 0.1137 & -0.1678 \\ 0.1397 & -0.0888 & 0.0342 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.56 \\ 0.38 \\ 0.42 \end{bmatrix} \% \quad (32)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 111.52 & -61.38 & 3.66 \\ -61.38 & 109.19 & -56.42 \\ 3.66 & -56.42 & 55.65 \end{bmatrix} \text{ kN/m,}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 11.40 & -4.01 & 0.03 \\ -4.01 & 10.95 & -4.07 \\ 0.03 & -4.07 & 10.41 \end{bmatrix} \text{ N}\cdot\text{s/m} \quad (33)$$

4.4 각 모델들의 비교

그림 10, 11, 12는 각각 1층, 2층, 3층 가속도의 지반가속도에 대한 전달함수를, 각각의 실험을 통해 얻어진 모델들을 이용하여 구한 결과를 보여준다. Nyquist 주파수는 50Hz이나, 저 주파수 대역에서의 자세한 비교를 위해 25Hz까지만 표시하였다.

자유진동의 경우는 1차 모드만 일치하고, 2차와 3차 모드는 실험결과와 크게 다르다. 이는 자유진동에 의해 1차 모드 특성만이 식별되었고, 2차와 3차 모드는 층 강성이 동일하다

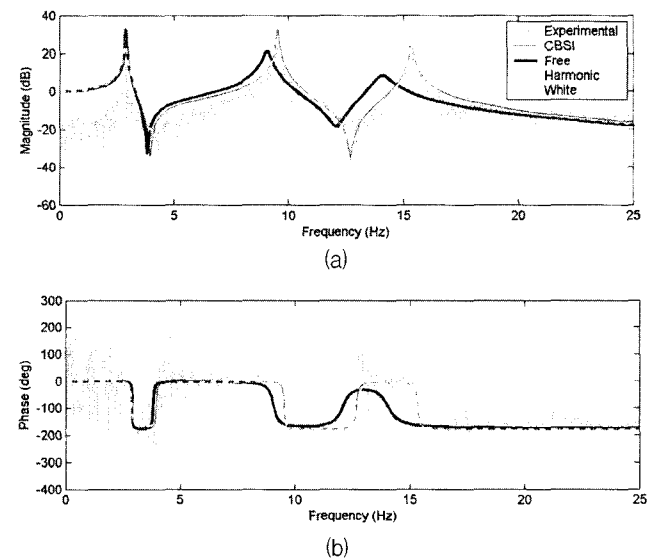


그림 10 바닥관 가속도에 대한 1층 가속도의 전달함수

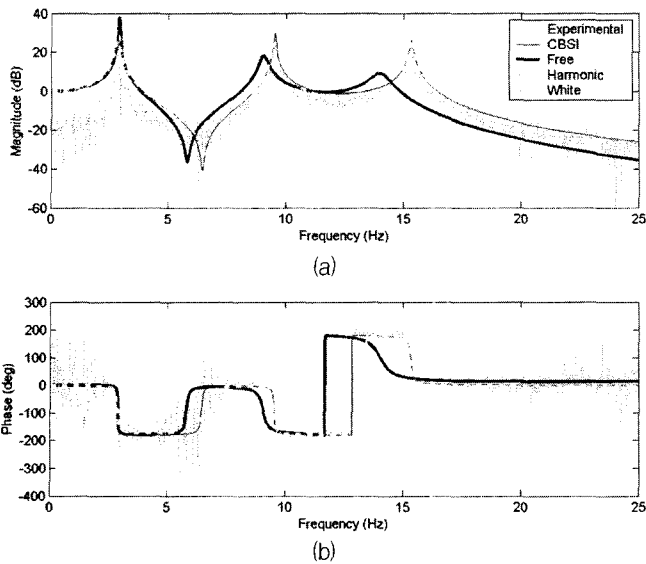


그림 11 바닥판 가속도에 대한 2층 가속도의 전달함수

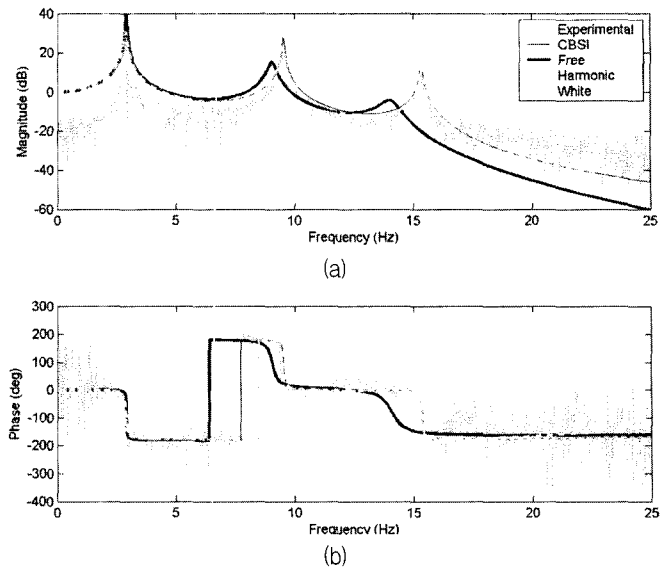


그림 12 바닥판 가속도에 대한 3층 가속도의 전달함수

는 가정하에 1차 모드만을 맞추도록 강성행렬을 구성하여 구한 값이기 때문에 큰 오차가 발생한 것으로 보인다. 그러나, 자유진동은 실험도 간단하고 특별한 가진 장치를 요구하지 않기 때문에 1차 모드가 지배적인 구조물의 시스템 식별에는 유효하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 조화하중실험을 통해 구성된 모델은 고유 주파수는 일치하나 고유주파수 이외의 부분에서는 실험결과와 맞지 않는다. 이는 조화하중 실험은 실험의 제약상 모든 주파수에서의 실험이 불가능하며, 이산 주파수 간격으로 실시될 수밖에 없으며, 그 간격이 클수록 오차가 크게 발생한다. 백색잡음에 의한 결과는 단순히 전달함수로부터 계산된 값과 관측기/Kalman 필터 기법과 CBSI 기법을 적용하여 구한 값이 거의 전 주파수 대역에서 일치함을 확인할 수 있다. 그러나, CBSI 기법의 경우 질량행렬의 2-norm에 대한 정보만을 요구하기 때문에 구조물의 전체질량에 대한 대략적인 정보와 실험을 통해 얻어진 고유벡터로 질량행렬을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조물의 특성 중 비교적 쉽고 정확히 구할 수 있는 질량행렬에 대한 정보가 모두 주어지거나 전체크기를 말해주는 2-norm에 대한 정보가 주어진다 가정 하에, 자유진동, 조화하중, 그리고 백색잡음실험을 통해 얻어지는 각각의 구조물의 모드정보를 이용하여 강성행렬과 감쇠행렬을 구성한 후 이를 비교 검토함으로써, 각각의 실험이 주는 정보의 제한조건과 그에 따른 모델의 특성을 분석하였다. 자유진동의 경우는 주어진 초기변위조건이 1차 모드형상과 유사하였기 때문에 1차 모드 특성만이 정확히 식별되었고, 2차와 3차 모드는 큰 오차가 발생하였다. 그러나, 자유진동실험은 특별한 가진 장치를 요구하지 않고 간단하기 때문에 1차 모드가 지배적인 구조물의 시스템 식별에는 유효하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 조화하중실험을 통해 구성된

모델은 실험에 사용한 주파수 간격에 따라 정확도가 좌우되나, 주파수 간격이 작을수록 시간적 노력을 크게 요하는 단점을 가지고 있다. 백색잡음에 의한 결과는 단순히 전달함수로부터 계산된 값과 관측기/Kalman 필터 기법과 CBSI 기법을 적용하여 구한 값이 거의 전 주파수 대역에서 일치함을 확인할 수 있다. 그러나, CBSI 기법의 경우 질량행렬의 2-norm에 대한 정보만을 요구하기 때문에 구조물의 전체질량에 대한 대략적인 정보와 실험을 통해 얻어진 고유벡터로 질량행렬을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 지진신호를 입력신호로 이용하는 조건은 실제 지진이 빈번하지 않고, 지진이 오는 경우 대부분의 구조물의 경우 탄성영역을 벗어나 시스템 특성이 변화된다는 점을 고려할 때 비현실적일 수 있으나, 연구를 위해 매우 많이 이용되는 진동대 실험을 위한 모델 구축에 유용히 사용될 수 있는 장점을 가지고 있으며, 본 연구는 진동대 실험을 위한 기초적인 동적실험 및 분석에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 동명정보대학교 2002년도 교내학술연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987. 2.
2. Friswell, M.L., and Mottershead, J. E., *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, London, 1995.
3. Herman V. A. and Bart P., "Sensors and Systems for Structural Health Monitoring," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, 2003, pp. 117-125.

4. F.T.K. Au, R.J. Jiang, and Y.K. Cheung., "Parameter identification of vehicles moving on continuous bridges," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 269, 2004, pp. 91-111.
5. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Quast, P., Sain, M.K., Kaspari Jr., D.C., and Soong, T.T., "Experimental Verification of Acceleration Feedback Control Strategies for an Active Tendon System," *Technical Report NCEER-94-0024*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY., 1994.
6. 주석준, 박지훈, 민경원, 홍성목, "건축구조물의 지진응답 제어를 위한 시스템 식별의 실험적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제4호, 1999, pp. 47-59.
7. 민경원, 이상현, 김진구, 이영철, 이승준, 최현훈, "점탄성 감쇠기 적용을 위한 실험크기 5층 건물의 가진 및 시스템 식별", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제3호, 2003, pp. 1-7.
8. Berman, A. and Nagy, E.J., "Improvement of Large Analytical Model Using Test Data," *AIAA Journal*, Vol. 21, 1983, pp. 1168-1173.
9. Farhat, C. and Hemez, F.M., "Updating Finite Element Dynamic Models Using an Element-by-Element Sensitivity Methodology," *AIAA Journal*, Vol. 31, 1993, pp. 1702-1711.
10. 강경수, 이상현, 주석준, 민경원, "유한요소모델에 기초한 3층 건물모델의 시스템 식별", 03추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp. 72~77.
11. 황재승, 주석준, "구조물의 모드질량추정", 02추계학술대회논문집, 한국구조물진단학회, pp. 115-122.
12. Li C. and Reinhorn J.C., "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II-Friction Devices," *Technical Report NCEER-95-0009*, National Centre for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY., 1995.
13. Juang, J.N., *Applied System Identification*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1994.
14. Alvin, K.F., and Park, K.C., "Second-Order Structural Identification Procedure via State-Space-Based System Identification," *AIAA Journal*, Vol.32, 1994, pp.397-406.
15. Chopra A.K, *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2000.