

능동제어기 설계를 위한 고층 건물의 풍응답 추정

박 현 흠¹ · 문 대 호¹ · 이 상 현^{1*}

¹단국대학교 건축공학과

Estimation of Wind-induced Responses of a Tall Building Structure for Designing Active Controller

Hyun-Heum Park¹, Dae-Ho Mun¹ and Sang-Hyun Lee^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, DanKook Univ., Yongin, 16890, Korea

Abstract

The purpose of this study is to accurately estimate the wind-induced responses of a tall building structure for using the estimated responses in the process of calculating the optimal force of an active control device. Kalman filter was used for the estimation process and a 3-storied model structure on a shaking table was tested for the verification of the estimation accuracy. The system matrices of the model were constructed based on the mode parameters obtained by the system identification. The estimated displacement matched up well with the measured one. Finally, the wind-induced responses of a real 39-storied building structure excited by the typhoon MUIFA were estimated.

Keywords : kalman filter, active control system, wind-induced response estimation, system identification

1. 서 론

1.1 연구의 목적

사회가 발전함에 따라 삶의 질을 향상시키고자 하는 요구가 커지면서 구조물의 진동 등 사용성에 대한 관심이 커지고 있으며, 구조물의 진동을 줄이기 위한 다양한 제어장치들이 개발되고 있다. 중력을 받는 구조물은 하부로 내려갈수록 넓어지는 형태가 안정적인 구조이기 때문에 상층부의 공간이 상대적으로 좁아진다. 이에 따라 구조물 상층부에 설치될 제어장치의 허용 스트로크나 질량 등에 제한사항이 발생한다. 능동제어장치를 사용할 경우, 상대적으로 작은 질량과 스트로크만으로도 효과적인 진동제어가 가능해지며 단일 장치로 다중모드를 동시에 제어할 수 있다. 특히 능동제어장치 중 질량형 제어장치인 능동 질량감쇠기(active mass damper, AMD)는 구조물의 속도 응답과 제어장치의 관성력을 곱한 값이 항상 음수가 되기 때문에 전체 구조물의 에너지가 감소하면서 진동을 저감시키는 효과가

있다.

능동제어의 경우 센서로부터 계측된 데이터를 기반으로 피드백 제어를 수행하기 때문에 계측된 데이터의 품질이 매우 중요하다. 능동제어 알고리즘은 보통 변위, 속도, 가속도와 같은 구조물 응답에 대하여 한 가지 이상의 상태변수를 실시간으로 측정하거나 예측하여 제어력을 산정한다. 현실적으로 어느 곳에서든 계측이 가능한 절대가속도만이 우리가 쉽게 알 수 있는 상태변수이며, 변위나 속도는 계측장비의 경제성 문제와 구조물에 대한 기준점을 설정하기 힘들다는 점에서 계측에 어려움이 있다. 가속도 응답을 단순 적분하여 변위나 속도를 산정하는 방법이 있지만, 적분 과정에서 발생하는 적분상수의 불확실성으로 인해 결과가 왜곡될 가능성이 크기 때문에 적합하지 않다. 특히 풍하중의 경우 바람의 변동, 구조물의 형상 및 동적특성 등이 서로 연관되어 복합적으로 작용한다는 점에서 풍하중을 해석적으로 예측하는 것이 매우 어렵다. 풍하중을 직접적으로 실측하기 위해 풍압계측기를 설치할 수 있겠으나, 이 또한 매우 비경제적이라는 문제가 있다. 이에 대한 해결책으로써 칼만

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3735; E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

Received February 2 2017; Revised February 7 2017;

Accepted February 13 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

필터(kalman filter)는 예측할 수 있는 변수로부터 예측이 어려운 미지의 변수를 추정할 수 있으며, 단순적분을 통한 변위 추정보다 높은 신뢰성을 확보할 수 있다.

칼만필터의 식은 시스템 행렬을 포함하고 있으며, 가속도 응답으로부터 변위나 속도응답을 추정하기 위해서는 시스템 행렬이 물리적 의미를 지닌 질량, 감쇠, 강성행렬의 형태가 되어야 한다. 질량은 비교적 정확하게 파악할 수 있으나, 감쇠나 강성은 정확한 모델링이 어렵기 때문에 시스템 식별을 통한 보정이 필요하다.

본 연구에서는 고층 건물의 풍진동 저감을 위한 능동제어기의 설계를 위하여 구조물의 풍응답을 추정하고자 한다. 최적의 설계를 위하여 추정된 응답의 신뢰도가 중요하기 때문에 칼만 필터를 사용하여 응답을 추정할 때 여러 가지 변수에 따른 추정의 정확도를 3층 구조물에 대한 실험 및 수치해석을 통해 비교 검증한다. 최종적으로 풍하중이 작용하는 실제 39층 구조물의 풍응답을 추정하는 것이 본 연구의 목적이다.

1.2 연구의 내용 및 범위

구조물의 풍응답을 산정하기 위하여 비교적 예측이 용이한 가속도 응답으로부터 변위 및 속도 응답을 추정할 수 있는 칼만필터를 사용한다. 그러나 칼만필터를 이용하여 구조물의 응답을 추정하여도 정해를 알 수 없기 때문에 추정 결과에 대한 검증이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 입력과 출력을 모두 파악할 수 있는 축소모형 구조물에 대하여 시스템 식별 및 응답 추정을 수행하여 유효성을 검증하고자 한다. 이 축소모형 실험을 통하여 칼만필터를 사용한 응답 추정의 유효성을 검증하고, 최종적으로 실제 풍하중을 받는 39층 구조물에 대하여 풍응답을 추정한다.

2장에서는 구조물의 응답을 추정하기 위한 시스템 식별 및 칼만필터에 대하여 소개한다. 추정의 정확도를 높이기 위하여 시스템 모델을 정확히 식별하는 것이 중요한데, 2.1절에서는 감쇠비를 추정하는 방법을 소개하고 2.2절에서는 시스템 식별을 통해 얻은 고유진동수, 모드 감쇠비, 모드벡터 등의 모드 정보를 바탕으로 구조물의 감쇠 및 강성행렬을 보정하는 방법을 소개한다. 2.3절에서는 구조물의 풍응답 추정을 위해 사용하는 칼만필터의 특성과 칼만이득의 유도과정을 소개한다.

3장에서는 3층 축소모형 철골구조물을 이용하여 진동대에 의한 바닥가진 및 각 층의 가속도 계측 데이터를 바탕으로 시스템 식별을 수행한다. 변위계로 계측된 변위를 정해로 가정했을 때, 여러 변수에 따른 칼만필터로 추정된 응답의 정확도를 비교 검증한다.

4장에서는 기존 연구에서 식별된 39층 구조물이 주요 3개의

저차모드에 의해 지배된다고 가정하고, 최상층 3개의 자유도에 대한 태풍 시 가속도 응답을 바탕으로 수치해석을 통한 구조물의 풍응답을 추정한다.

2. 구조물의 응답 추정

2.1 감쇠비 추정

계측이 용이한 가속도 응답으로부터 변위 및 속도 응답을 추정하기 위해서는 정확한 구조물 모델을 구성하는 것이 중요하다. 시스템 행렬을 구성하는 구조물의 감쇠 및 강성행렬을 보정하기 위하여 대수감소(logarithmic decrement), 반일률대역폭(half-power bandwidth), 곡선맞춤(curve-fitting)법 및 Li 등(1995)의 식을 사용하여 감쇠비를 추정하였다.

2.1.1 대수감소법

구조물의 감쇠를 점성감쇠로 가정했을 때, 구조물의 자유진동 응답으로부터 피크값의 감소비와 감쇠비 사이의 관계식을 유도할 수 있다. 이 식을 통하여 감쇠비를 추출하는 방법을 대수감소법이라고 한다.

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = \exp\left(\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) = e^\delta \quad (1)$$

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2)$$

구조물은 감쇠비가 매우 작기 때문에 $\sqrt{1-\xi^2} \cong 1$ 이 되며, 다음과 같은 근사식을 구할 수 있다.

$$\delta \cong 2\pi\xi \quad (3)$$

만약 j 사이클 후에 응답이 u_1 에서 u_{j+1} 로 감소한 경우, 그 응답의 비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{u_1}{u_{j+1}} = \frac{u_1}{u_2} \frac{u_2}{u_3} \frac{u_3}{u_4} \dots \frac{u_j}{u_{j+1}} = e^{j\delta} = e^{2\pi j\xi} \quad (4)$$

최종적으로 감쇠비를 산출하기 위하여 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (5)$$

2.1.2 반일률 대역폭법

구조물의 응답을 주파수 분석했을 때, 공진진동수 w_n 의 전후에서 공진시 최대 진폭의 $1/\sqrt{2}$ 배에 해당하는 진폭을 가지는 진동수 ω_a 와 ω_b 에 대하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_n} = 2\xi \quad (6)$$

이 식으로부터 감쇠비를 산출하기 위하여 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_n} \quad (7)$$

2.1.3 곡선맞춤법

구조물의 응답을 주파수 분석한 뒤, 주파수 응답 곡선에 대한 곡선맞춤을 하는 방법이다. 응답에 대한 동적증폭계수를 사용하여 수학적 모델로 임의의 곡선을 생성하고, 이를 계측된 데이터로부터 주파수 분석된 응답 곡선과의 비교를 통해 그 계측 오차가 가장 작은 것을 선택한다. 본 연구에서는 MATLAB의 내장함수인 LSQCURVEFIT을 사용하여 구조물의 감쇠비를 추정하였다.

2.1.4 Li & Reinhorn

Li 등(1995)은 지반가속도에 대한 각 층의 절대가속도 응답의 전달함수를 통해 구조물의 모드 특성을 추정하였다. 각 자유도별 전달함수의 비를 통해 모드벡터를 결정하고 모드 벡터와 공진 시 전달함수의 관계로부터 모드 감쇠비 산출식이 유도되었다.

$$\xi_k = \left(2\sqrt{\left(\frac{T_{ai}(\omega_k)}{\phi_{ik}\Gamma_k}\right)^2 - 1} \right)^{-1} \quad (8)$$

여기서, $T_{ai}(\omega_k) = \phi_{ik}H_k(\omega_k)\Gamma_k$ 는 k 차 모드 공진 시 i 층 절대 가속도 응답의 지반가속도에 대한 전달함수이며, $\Gamma_k = -\phi^T M[1]$ 는 지진하중에 대한 모드기여도를 의미한다.

2.2 감쇠 및 강성행렬 식별

구조물의 질량은 모두 안다고 가정했을 때, 가속도 응답의 전달함수로부터 모드정보를 추출하고 이를 바탕으로 강성 및 감쇠행렬을 보정하는 방법을 소개한다. 지반가속도가 가해지는 다자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad (9)$$

비례감쇠인 경우 위 식을 모드좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\ddot{\eta} + \Lambda\dot{\eta} + \Omega\eta = \Gamma\ddot{x}_g \quad (10)$$

고유치 해석에 의해 다음 특성방정식을 만족시키는 Φ 를 질량에 대하여 정규화시킨다.

$$K\Phi = M\Phi\Omega \quad (10a)$$

$$\Phi^T M\Phi = I \quad (10b)$$

모드의 직교성에 의해 감쇠 및 강성행렬은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Lambda = \Phi^T C\Phi = \text{diag}(2\xi_1\omega_1, 2\xi_2\omega_2, \dots, 2\xi_n\omega_n) \quad (11a)$$

$$\Omega = \Phi^T K\Phi = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2) \quad (11b)$$

이를 바탕으로 강성행렬과 감쇠행렬을 구할 수 있다.

$$K = M\Phi\Omega\Phi^T M \quad (12a)$$

$$C = M\Phi\Lambda\Phi^T M \quad (12b)$$

2.3 칼만필터

칼만필터는 잡음이 섞인 계측 데이터로부터 동적시스템이 미지의 상태변수를 최적으로 추정하는 재귀 필터이다. 칼만 필터는 다음과 같은 기본가정을 두고 있다.

- 1) 시스템 방정식의 선형성
- 2) 시스템 및 계측 잡음의 백색성
- 3) 시스템 및 계측 잡음의 가우시성

$$v \sim N(0, Q), \quad w \sim N(0, R)$$

여기서, v, w 는 각각 시스템 및 계측 잡음을 나타내며, $N(\mu, \sigma^2)$ 는 변수가 평균 μ 와 분산 σ^2 의 정규분포를 따른다는 것을 의미한다.

- 4) 시스템 및 계측 잡음 사이의 상호 독립성

$$N = E[w^T v] = 0$$

칼만필터의 프로세스는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저 모델 정보를 바탕으로 이전 상태에서부터 다음 상태를 예측하는 단계가 있다. 그 다음, 오차공분산으로부터 최적의 칼만이득을 산정하고, 예측된 값과 계측값을 비교하여 그 오차를 보상하는 단계가 있다. 실제 시스템의 상태벡터 z 와 칼만필터로 추정된 상태벡터 \hat{z} 사이의 오차가 최소가 되도록 관측기를 설계하고, 추정값이 참값에 수렴하도록 재귀연산을 수행한다. 또한 칼만 필터는 확률 이론을 기본으로 하여 입력값과 출력값, 또는 모델 정보와 계측값의 불확실성에 따라 가중치를 다르게 적용함으로써 보다 더 높은 신뢰도로 추정한다.

구조물의 풍응답을 추정하기 위하여 풍하중을 고려한 칼만 필터를 설계한다. 먼저 일반적인 풍하중을 받는 구조물의 동적 해석을 위한 운동방정식을 구성한다. 본 연구에서는 실제 구조물에 대하여 시뮬레이션을 수행하기 위하여 시스템 식별을 통해 얻은 모드 정보를 바탕으로 시스템 행렬을 구성하였다.

$$M\ddot{\eta} + C\dot{\eta} + K\eta = \phi^T f \quad (13)$$

여기서 M, C, K 는 각각 구조물의 모드질량, 감쇠, 강성행렬 ($n \times n$), n 은 모드 수를 의미하며, η 는 구조물의 모드상태 벡터($n \times 1$), f 는 모드 풍하중($n \times 1$)을 의미한다. 이 식을 다시 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K - M^{-1}C & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}\phi^T \end{bmatrix} f \quad (14)$$

여기서,

$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K - M^{-1}C & \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}\phi^T \end{bmatrix}$ 라고 정의하면, 다음과 같은 상태-공간시스템으로 표현할 수 있다.

$$\dot{z} = Az + Bf + Gv \quad (15a)$$

$$y = Cz + Hw \quad (15b)$$

여기서, z 는 상태벡터($2n \times 1$), y 는 출력벡터($p \times 1$), p 는 출력의 수, v 는 시스템 잡음, w 는 계측 잡음을 의미하며, C 는 출력에 대한 상태전이행렬($p \times 2n$), G, H 는 각각 시스템 및 계측잡음의 위치행렬($n \times 1$), ($p \times 1$)을 의미한다.

칼만필터는 시스템 상태방정식인 (15)식과 유사한 형태로 구성할 수 있으며, 다음과 같이 칼만이득 K 에 의한 상태 보정 항이 추가된다.

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + Bf + K(y - C\hat{z}) = (A - KC)\hat{z} + K\dot{y} \quad (16a)$$

$$\hat{y} = C\hat{z} \quad (16b)$$

실제 응답 z 와 추정 응답 \hat{z} 의 차를 추정오차 e 로 정의하면, 추정오차의 변화율은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = \dot{z} - \dot{\hat{z}} = (A - KC)e + (B - KD)f \quad (17)$$

추정오차의 공분산행렬 P 로부터 정의된 비용함수(cost function) J 를 최소화함으로써 칼만이득 K 를 구할 수 있다.

$$P = E[e^T e] \quad (18a)$$

$$J = \text{trace}(P) \quad (18b)$$

오차공분산 P 는 다음과 같은 대수 리카치(algebraic riccati) 방정식을 만족한다.

$$A_k P + P A_k^T + B_k Q B_k^T + K R K^T = 0 \quad (19)$$

여기서,

$A_k = A - KC$, $B_k = B - KD$, $Q = E[v^T v]$, $R = E[w^T w]$ 이며, 이 리카치방정식을 풀면 칼만이득 K 를 얻을 수 있다.

$$K = P C^T R^{-1} \quad (20)$$

3. 축소모형 실험

3.1 실험 개요

본 실험에서 사용된 축소모형 구조물은 Fig. 1과 같이 3층 철골 구조물로 전체 높이 155mm, 기둥 60×490×3mm,

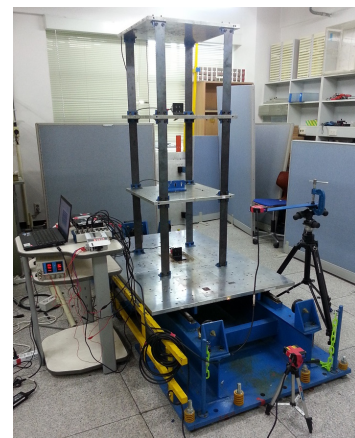


Fig. 1 3-story building

바닥판 600×600×20mm이며, 기둥의 약축 방향과 가진 방향이 동일하게 배치하여 전단거동을 한다. 진동대를 포함하여 각 층 바닥에 가진 방향으로 가속도계를 설치하였으며, 1층 바닥과 진동대에는 변위계를 추가 설치하였다. 각 층별 무게는 1층 250N, 2층 245N, 3층 229N으로 측정되었다.

3.2 상관계수(correlation coefficient)

추정된 응답의 정확성을 정량적으로 판단하기 위하여, 추정된 응답과 실제 응답 사이의 상관계수를 구하여 비교하였다. 상관계수는 두 변수 사이의 선형 의존도를 측정한다. 다음과 같이 두 변수의 공분산을 각 변수의 평균으로 나눈 값이다.

$$\rho(A, B) = \frac{\sum \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right)}{N-1} = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (21)$$

상관계수는 -1에서 1 사이의 값을 가지며, ±1에 가까울수록 두 변수사이의 상관도가 높다는 것을 의미한다. +1에 가까울수록 양의 선형관계가 높으며, -1에 가까울수록 음의 선형관계가 높고, 0에 가까울수록 선형관계가 낮음을 의미한다.

3.3 시스템 식별

2.1절에서 전술한 감쇠비 추정기법에 따라 축소모형 구조물의 감쇠비를 추정해 보았다. 축소모형 구조물에 입력되는 가진파는 백색잡음을 사용하였다. 백색잡음은 모든 진동수 성분을 고르게 가지고 있다는 특성 때문에 단일 가진만으로도 모든 모드의 응답을 추출해낼 수 있다. Table 1에 각 기법에 따른 모드 감쇠비 추정 결과를 정리하였다.

Table 1 Estimation of the damping ratios

Method \ Mode	1st	2nd	3rd
Logarithmic decrement	0.0035	0.0023	0.0020
Half-power bandwidth	0.0107	0.0087	0.0058
Curve-fitting	0.0043	0.0235	0.0637
Li & Reinhorn	0.0082	0.0061	0.0031

추정된 감쇠비를 바탕으로 구조물의 감쇠 및 강성행렬을 보정하였다. 식별된 정보를 바탕으로 수치모형을 구성하고 수치해석을 통하여 구조물의 응답을 산정하였다. 감쇠비의 경우 Table 1에서와 같이 각 방법에 의한 편차가 매우 크기 때문에, 기본적으로 주파수 응답함수의 크기를 최소화하도록 추정된 감쇠비를 초기값으로 설정한 후, 해석값과 실제 계측된 응답을

비교하면서 감쇠비를 보정하였다. 최종적으로 식별된 축소모형 구조물의 모드정보는 Table 2와 같다. 모드 감쇠비는 1차 0.0044, 2차 0.0025, 3차 0.0034로 결정되었으며, 고유진동수는 1차 1.40Hz, 2차 4.05Hz, 3차 5.98Hz로 결정되었다.

Table 2 Identified modal parameters

Parameter \ Mode	1st	2nd	3rd
Damping ratio	0.0044	0.0033	0.0034
Natural frequency, Hz	1.40	4.05	5.98

최종 결정된 모드 감쇠비로 보정된 유한요소모델로부터 수치해석을 통해 산정된 구조물의 응답 그래프는 Fig. 2, 3과 같다.

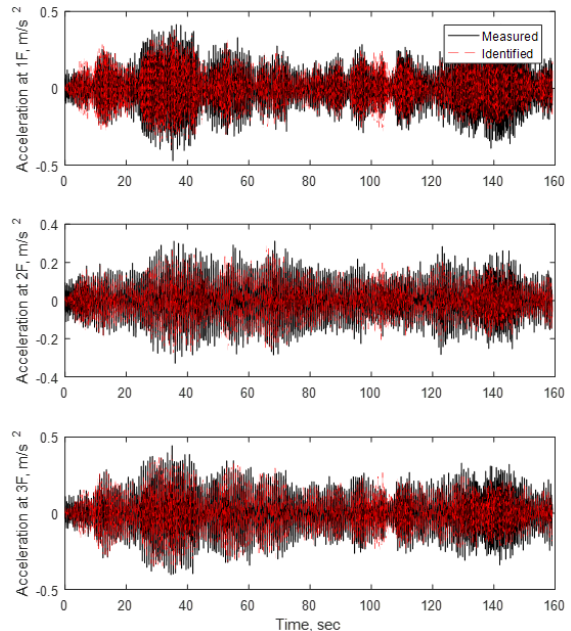


Fig. 2 Measured and estimated accelerations

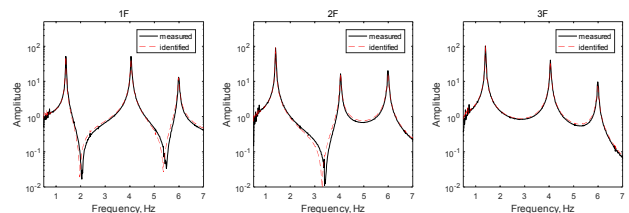


Fig. 3 Frequency responses

Fig. 2는 실제 계측된 가속도 응답과 식별된 시스템의 가속도 응답 시간이력을 비교한 그래프이며, Fig. 3은 계측된 가속도 응답으로 구한 전달함수와 식별된 시스템의 전달함수를 비교한 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 식별된 시스템의 해석 값과 실제 구조물의 계측 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

3.4 계측 데이터의 오염

본 절에서는 계측 데이터의 오염도에 따른 칼만필터 추정 결과를 비교하고자 한다. 계측 데이터에 임의로 가우시안 백색 잡음(gaussian white noise)과 비가우시안 충격잡음(non-gaussian impact noise)을 각각 추가하고, 오염된 데이터를 대역통과필터 적용 여부에 따라 칼만필터에 의한 추정결과를 비교하였다. 이때 적용된 대역통과필터의 차단주파수는 1.09Hz와 6.18Hz이며, 필터차수는 3차를 사용하였다. Fig. 4는 임의로 생성한 충격잡음에 대한 시간이력 및 진동수 응답 그래프이다. 30초, 45초, 65초, 80초에서 임의로 충격신호를 생성하였으며, 특정 진동수 성분을 포함하고 있다.

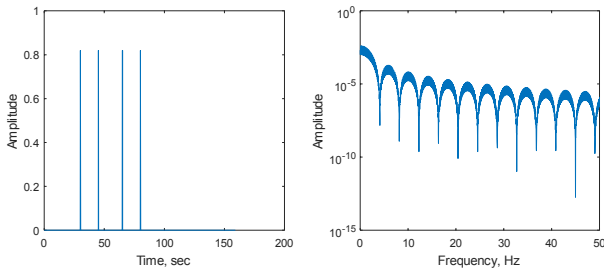


Fig. 4 Time-history and frequency responses of the impact noise

Table 3은 백색잡음으로 가진된 구조물에서 계측된 1~3층 가속도 응답으로 1층 변위를 추정할 때, 계측된 응답의 오염도에 따른 추정 값과 계측 값 사이의 피크오차, RMS(root mean square)오차, 상관계수를 비교한 것이다. 백색잡음으로 오염된 경우 대역통과필터 적용 여부에 상관없이 추정결과에 차이가 거의 없었으며, 칼만필터의 기본 가정에 따라 칼만필터 자체적으로 잡음의 영향을 제거한다. 그러나 충격잡음에 의해 오염된 경우, 추정응답이 충격잡음을 쫓아가는 경향이 있었다. 이 때 피크오차가 약 1mm까지 발생했으며, 이러한 임펄스 신호는 능동제어 시 능동제어기가 구조물을 가진하거나 제어기 자체에 손상을 줄 가능성이 있기 때문에 반드시 제거할 필요가 있다. 대역통과필터가 적용된 경우 특정 진동수 성분을 포함하는

Table 3 Displacement estimation results with regard to the noise type

	Displacement(1F)		
	Peak error (mm)	RMS error (mm)	Corr. Coef.
Raw	0.6182	0.0811	0.9914
White noise	0.6243	0.0823	0.9912
Impact noise	1.0393	0.1551	0.9660
White noise with filter	0.5082	0.0763	0.9913
Impact noise with filter	0.9301	0.1416	0.9694

비가우시안 잡음이 일부 제거되면서 미적용 된 경우에 비해 충격잡음을 따라가는 경향이 줄어들었다. 상관계수는 오염도와 관계없이 모두 0.9 이상으로 산정되었는데, 이는 상관계수가 선형 의존도만을 산정할 뿐, 충격신호처럼 비선형의 관계는 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 능동제어기를 설계할 때에는 이러한 잡음의 영향을 제거하고, 응답 추정의 정확도를 향상시키기 위하여 대역통과필터를 먼저 적용시킨 후에 칼만필터를 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

3.5 계측 데이터의 수

본 절에서는 칼만필터에 입력하는 계측 데이터의 수에 따른 추정결과를 비교하고자 한다. 예를 들어 1층 변위 응답을 추정할 때, 3층 가속도 응답만으로 추정하는 경우와 2층 및 3층 가속도 응답으로 추정하는 경우를 비교하였다.

Table 4는 칼만필터로 각 층의 가속도 응답과 1층의 변위 응답을 추정할 때, 칼만추정을 위해 참조되는 가속도 응답에 따라 추정 값과 계측 값 사이의 상관계수를 비교한 것이다. 계측 값을 여러 개 사용하는 것이 유리하겠으나 본 실험에서와 같이 해석모델이 정확한 경우 한 가지 응답만을 사용하여도 추정에 무리가 없을 것으로 판단된다. 오히려 계측 데이터의 수보다는 정확한 해당 층의 응답을 사용하는 것이 추정 결과에 더 큰 영향을 준다.

Table 4 Correlation coefficient between estimated and measured responses of a 3-storied building

Reference \ Estimation	Displacement (1F)	Acceleration		
		1F	2F	3F
1F	0.9932	1	0.9917	0.9972
2F	0.9884	0.9950	1	0.9942
3F	0.9900	0.9987	0.9970	1
1F & 2F	0.9918	1	1	0.9877
1F & 3F	0.9919	1	0.9932	1
2F & 3F	0.9898	0.9699	1	1
1F & 2F & 3F	0.9920	1	1	1

3.6 시스템 행렬의 모드 수

본 절에서는 칼만필터의 시스템 행렬을 구성할 때, 시스템 행렬을 구성하는 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬의 모드 정복수에 따른 추정결과를 비교하고자 한다. 즉, 1차 모드만으로 구성된 시스템 행렬을 이용한 경우와 1차 및 2차 모드로 구성된 시스템 행렬을 이용한 경우, 1차~3차 모드로 구성된 시스템 행렬을 이용한 경우에 대하여 칼만필터의 응답 추정 결과를 비교하였다. 이 때 칼만필터에 입력하는 계측 값은

Table 5 Correlation coefficient variation with regard to the number of modes

Mode \ Estimation	Displacement (1F)	Acceleration		
		1F	2F	3F
1st	0.9457	0.3205	0.7606	0.6556
1st~2nd	0.9906	0.9576	0.8714	0.9842
1st~3rd	0.9961	0.9997	0.9997	0.9996

1~3층 가속도 응답 모두 사용하였다.

Table 5는 계측된 1~3층 가속도 응답을 바탕으로 각 응답을 추정할 때, 시스템 행렬을 구성하는 모드 수에 따라 추정 값과 계측 값 사이의 상관계수를 비교한 것이다. 그 결과, 1차 모드만으로 구성된 시스템 행렬을 이용하여 추정한 경우 변위는 잘 추정하였지만, 오히려 가속도는 잘 추정하지 못하기 때문에 능동제어기 설계에 사용하기는 힘들 것으로 판단된다. 그러나 1차 및 2차 모드로 구성된 시스템 행렬을 이용하여 추정한 경우 변위와 가속도 모두, 추정 응답과 측정 응답의 상관계수가 0.8 이상으로 산정되며 거의 정확하게 추정할 수 있었다.

4. 39층 건물의 풍응답 추정

4.1 대상 구조물

수치해석 시뮬레이션을 위해 선정한 대상 구조물은 구의동에 위치한 테크노마트21이다. Woo 등(2012)이 연구한 39층 구조물의 식별 정보를 참고하여 수치해석모델을 구성하였다. Table 6은 기존 연구에서 식별된 대상 구조물의 모드정보이다. 각 모드벡터는 AMD의 가진방향과 동일한 Y1 성분에 대하여 정규화 시켰다.

Table 6 Modal parameters

Parameter \ Mode		1st	2nd	3rd
Natural frequency, f (Hz)		0.200	0.213	0.288
Modal mass(ton)		22,500	22,515	9,634
Damping ratio, ξ		0.014	0.016	0.013
Mode Vector	Y1	1	1	1
	Y2	1.041	1.080	0.547
	X1	0.880	-0.726	-0.046

수치해석에는 2011년 태풍 무이파(MUIFA) 발생 시 대상 구조물에서 실측된 가속도 응답 데이터를 사용하였다. 가속도계는 Fig. 5와 같이 AMD의 중심과 동일한 위치에서 X1, Y1 방향으로, 구조물의 비틀림 응답을 파악하기 위해 AMD로부터 장변방향으로 약 10m 떨어진 위치에서 Y2방향으로 1개소

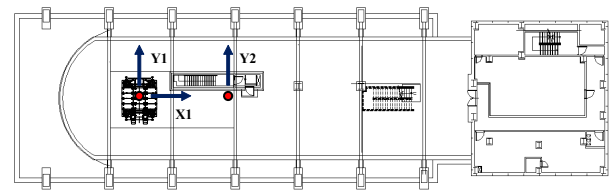


Fig. 5 Measurement Location

설치되었다.

대상 구조물은 Fig. 6과 같이 XY방향으로 병진운동을 하는 1차 및 2차 모드와 XY평면에서 회전에서 3차 비틀림 모드를 갖고 있다.

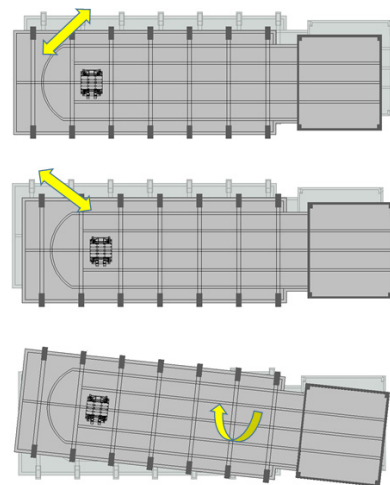


Fig. 6 Mode shapes of the building structure

4.2 시뮬레이션

본 절에서는 4.1에서 소개한 대상 구조물에 대하여 수치해석모델을 생성하고, 계측된 3개의 가속도 응답을 바탕으로 수치해석 시뮬레이션을 통해 변위 및 속도에 대한 구조물의 풍응답을 추정하였다. 3장에서의 축소모형 실험과는 달리, 실제 구조물의 경우 입력되는 풍하중을 파악하는 것이 힘들기 때문에 해석적으로 칼만필터를 통해 추정된 결과를 검증하기 어렵다. 계측 데이터 또한 이미 여러 잡음과 응답이 섞인 상태이기 때문에 정해를 알기 어렵다. 따라서 비교적 계측이 용이하고 신뢰도가 높은 가속도 응답에 대역통과필터를 적용한 값을 정해로 가정하고 다른 자유도의 응답으로부터 칼만필터를 사용하여 추정된 가속도 응답을 비교하는 방식으로 추정과정의 적합성을 검토하였다. 이때 사용된 대역통과필터의 차단주파수는 0.04Hz와 1.1Hz이며, 필터차수는 2차필터를 사용하였다.

Table 7은 계측 데이터의 조합에 따른 가속도 응답 추정 결과에 대하여 추정값과 실제 계측값의 상관계수를 정리한

Table 7 Correlation coefficient between estimated and measured accelerations of a 39 storied building

Reference \ Estimation	Y1	Y2	X1
Y1	1	0.823	0.804
Y2	0.763	1	0.821
X1	0.568	0.536	1
Y1 & Y2	1	1	0.822
Y1 & X1	1	0.820	1
Y2 & X1	0.760	1	1

것이다. Y방향 가속도 응답을 바탕으로 X1 가속도 응답을 추정할 경우, 추정된 응답과 실제 계측된 응답의 상관계수가 0.8 이상으로 산정되며 추정결과가 합당한 것으로 판단된다. 그러나 반대로 X방향 가속도 응답을 바탕으로 Y방향 가속도를 추정할 경우에는 상관계수가 0.5~0.6으로 산정되며 응답을 잘 추정하지 못하는 것으로 나왔다. 이는 X방향 성분이 비틀림 모드인 3차 모드에 대한 기여도가 매우 낮으며, 응답의 크기 또한 매우 작기 때문인 것으로 보인다. Table 6의 모드벡터를 보면, 3차 모드의 경우 X1은 Y1에 비해 5%에도 못 미칠 정도로 매우 작다. 칼만필터를 이용하여 응답을 추정할 때 각 응답의 모드 기여도 또한 중요한 요소로서 고려되어야 한다.

최종적으로 태풍 시 계측된 X1, Y1, Y2방향의 가속도 응답으로부터 구조물의 변위 및 속도에 대한 풍응답을 추정하였다. 추정된 결과는 Fig. 7과 같다. 추정된 변위 및 속도 응답은 정해를 알 수 없기 때문에 그 결과에 대한 정확한 검증은 불가능하다. 그러나 앞에서 가속도 응답 추정 결과가 타당하다는 가정 하에, 3개의 가속도 응답으로부터 추정된 변위와 속도 응답 또한 유효할 것이라고 판단된다.

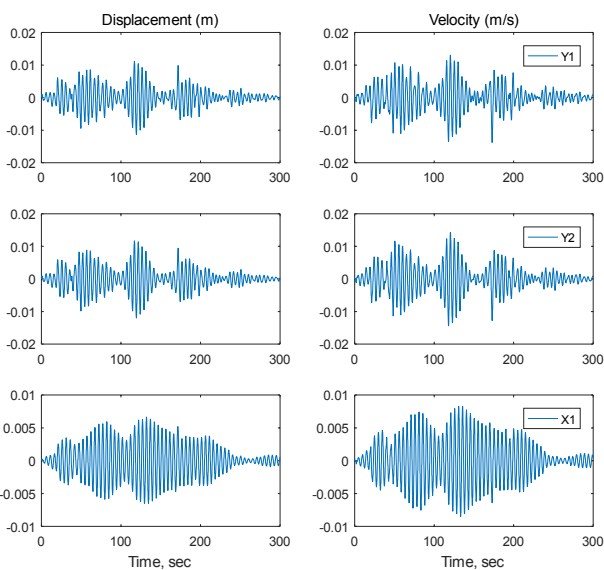


Fig. 7 Estimated displacement and velocity responses of the top floor

6. 결 론

본 논문에서는 능동제어기의 설계에 필요한 고층 구조물의 풍응답을 추정하기 위하여 칼만필터를 사용하였다. 칼만필터의 추정 정확도를 향상시키기 위하여 추정 전에 계측 데이터에 대역통과필터를 적용시켜 잡음의 영향을 최소화하였다. 또한 대수감소법, 반일률대역폭법, 곡선맞춤법을 통하여 감쇠비를 추정하고, 보정된 감쇠 및 강성행렬을 바탕으로 시스템 행렬을 구성하였다.

실제 구조물의 변위 및 속도를 계측하기 어렵기 때문에 추정된 결과를 검증하는데 한계가 있다. 먼저 3층 축소모형 구조물을 이용하여 칼만필터를 이용하여 구조물의 가속도 응답을 바탕으로 변위를 추정하고 계측된 변위와의 비교를 통해 유효성을 검증하였다. 추가적으로 모드의 수, 계측 데이터의 수와 오염도를 변수로 설정했을 때 추정의 정확도를 비교해 보았다. 그 결과, 능동제어기 설계에 적합한 응답 추정을 위해서는 계측데이터에 대역통과필터를 적용함으로써 비가우시안 잡음의 영향을 최소화해야 한다. 계측 데이터의 수는 일반적으로 많을수록 유리하지만, 단순히 그 수보다도 응답의 특성이 더 중요한 것으로 보인다.

최종적으로 기존 연구에서 식별된 39층 구조물에 대하여 태풍 무이파 발생 시 최상층에서 계측된 가속도 응답을 바탕으로 수치해석을 통해 구조물의 풍응답을 추정하였다. 계측된 가속도 응답을 정해로 가정했을 때, 다른 곳에서 계측된 가속도 응답을 바탕으로 해당 가속도 응답을 추정하여 그 결과를 비교 검증하였다. 정해로 가정된 계측값과 추정값의 상관계수가 평균 0.8 수준으로 산정되어 칼만필터를 사용한 응답 추정의 결과는 타당하다고 판단되었다. 이를 바탕으로 태풍 시 계측된 X1, Y1, Y2방향의 가속도 응답을 바탕으로 변위 및 속도에 대한 풍응답 추정의 결과 또한 타당할 것이라고 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 도시건축연구사업(16A UDP-B106327-02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Li, C., Reinhorn, A.M. (1995) Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II-Friction Devices, *National Center for Earthquake Engineering Research*, State University of New

York at Buffalo.

- Hwang, J.S.** (2005) A Estimation Method of Wind Load Using the Acceleration of Building, *J. Wind Eng. Inst. Korea*, 9(2), pp.197~207.
- Hwang, J.S.** (2006) Wind Load Estimation of Building Using the Kalman Filter, *J. Archi. Inst. Korea*, 22(6), pp.3~11.
- Hwang, J.S., Ahsan, K.** (2007) Estimation of External Loads Using Structural Response, *J. Archi. Inst. Korea*, 23(1), pp.51~61.
- Kang, K.S.** (2004) Identification of Stiffness and Damping Matrix of Building Structures using Modal Characteristics, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 8(2), pp.45~53.
- Min, K.W., Kim, D.H., Lee, S.K., Hwang, J.S.** (1998) Vibration Control for Building Structures using Active Mass Driver (I):System Design, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 2(4), pp.87~94.
- Min, K.W., Kim, J.K., Kim, S.C., Chung, L.** (2001) Comparative Study on Active Control Algorithms through Weighting Functions, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 14(2), pp.173~179.
- Woo, S.S., Lee, S.H., Hwang, J.S.** (2012) Identification of Dynamic Characteristics a Techno Mart Building Based on Wind-induced Vibration Measurements, *J. Wind Eng. Inst. Korea*, 16(4), pp.195~203.
- Woo, S.S., Lee, S.H., Chung, L., Han, J.Y.** (2014) System Identification of a 39-Story Building Structure Using an Active Mass Damper, *J. Archi. Inst. Korea*, 18(2), pp.95~101.

요 지

본 연구의 목적은 능동제어기의 최적 제어력을 산정하는 과정에서 추정된 응답을 사용하기 위하여 고층건물의 풍응답을 정확하게 추정하는 것이다. 응답 추정을 위하여 칼만필터를 사용하였으며, 진동대에 설치된 3층 축소모형 구조물을 사용하여 추정 정확도를 검증하였다. 사용된 모델의 시스템 행렬은 시스템 식별에 의해 얻어진 모드 정보를 바탕으로 구성되었다. 가속도 응답으로부터 추정된 변위는 변위계로 계측된 변위와 거의 일치하는 결과를 보였다. 마지막으로 태풍 무이파에 의해 가진된 실제 39층 건축물의 풍응답을 추정하였다.

핵심용어 : 칼만필터, 능동제어, 풍응답 추정, 시스템 식별