

응답 기반 수동형 동조질량 감쇠기 제어성능평가

Response-based Tuned Mass Damper Control Performance Evaluation



강 경 수*



김 흥 진**

* 동명대학교 건축공학과 교수
** 경북대학교 건축토목공학부 교수

1. 서 론

경제발전과 산업고도화에 힘입어 좁은 지역에서 극도의 효율성을 달성하기 위한 경향이 건설산업에도 확산되어 국내에 초고층 건물이 급속도로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 초고층 건물의 증가는 일반 수요자들에게 첨단 건축기술에 대해 다양한 관심을 불러 일으키고 있으며, 특히 초고층 건물이 기본적으로 가져야 할 안정성과 더불어 생활수준 향상에 따른 거주성에 대한 관심도 크게 증가하고 있다.

또한 최근들어 향상된 경량 및 고강도의 구조재료의 사용에 기인한 구조물량 감소 등의 효율적인 설계는 오히려 구조물의 낮은 강성 및 감쇠성능으로 인해 풍진동에 대한 안정성 및 사용성 문제에 노출될 위험을 점점 증가시키고 있다.

이러한 초고층 건물의 안정성과 거주성 향상을 위하여 풍진동 제어기술의 요구성이 점차 증가하고 있으며, 특히 국내에서는 동조질량감쇠기(TMD, Tuned Mass Damper)의 설치를 통한 풍진동제어가 늘고 있다. TMD는 건축물의 상부층에 설치된 이동질량체의 관성력에 의하여 건물이 특정 방향으로 운동할 때 이동질량체가 반대편으로 이동하여 건물의 운동에너지를 이동질량체가 흡수하는 장치이다. 이동질량체는 철재나 콘크리트 등으로 만들어지며, 크게 진자

(Pendulum) 형식과 가이드레일(Guide rail) 형식으로 구분할 수 있다.

진자형 질량감쇠기는 질량체를 진자형식으로 매단 형태로 매다는 줄의 길이를 조절함으로써 주기를 조절한다. 이때 주기가 길어질수록 매다는 줄의 길이가 늘어나야 하기 때문에 필요 길이만큼의 높이와 진자의 좌우거동을 위한 공간이 필요한 단점을 가지고 있다. 가이드레일형 질량감쇠기는 가이드레일 위를 질량체가 왕복운동 함으로써 구조물을 제어하는 제진장치로 진자형 질량감쇠기에 비해 공간 제약이 적고 양방향 제어가 가능함에 따라 국내에서는 주로 가이드레일형 질량감쇠기가 적용되고 있다.

국내에 처음으로 설치된 TMD는 2000년 양양국제공항관제탑에 설치되었으며¹⁾, 2006년 부산 센텀파크아파트에 설치된 국내 최초로 주거용 건축물에 TMD가 설치되었다.²⁾ 센텀파크아파트는 51층 아파트 12개동과 43층 아파트 8개동으로 이루어져 있으며, 바다와 인접하여 바람의 영향을 강하게 받을 수 있는 지역에 위치하여 풍동실험 결과 가장 자리 고층동에 의한 와류의 영향으로 단지내부의 저층동의 일부에서 진동가속도가 일정한 사용성의 기준을 초과할 수 있는 것으로 나타났었다.

이 후, 2009년 강원도 평창의 알펜시아 스키점프타워에 스키점프 경기의 안정성과 전망대의 사용성 개선을 위하여

TMD가 설치되었으며, 2010년 인천 송도에 위치한 P건설 사옥에 양방향 TMD를 설치하여 구조물의 안정성과 사용성을 높이고자 하였다.³⁾ P건설 사옥은 사옥동과 임대동으로 구성되어 있으며, 철골구조로 높이는 184.6m, 총 질량은 50,354톤이다. 바다와 인접하여 바람의 영향을 강하게 받을 수 있는 지역에 위치하고 임대동과 사옥동의 상호작용으로 인하여 풍하중 및 가속도 값이 증가할 것으로 예상되었으며, 또한 향후 주변에 건설되는 구조물에 의해 발생하는 와류로 인하여 풍하중이 증가할 것으로 예상되었다. 이에 적층고무를 사용한 양방향 TMD를 사용하여 구조물 최대가속도를 기준 이하로 낮추는 것을 목표로 하였다.

이렇게 풍진동 제어를 위한 TMD의 설치가 증가하고 있는 상황에도 불구하고, 아직 국내에서 건물의 완공 후 TMD의 설치로 인한 풍진동 제어성능 평가는 제대로 이루어지지 않고 있다. 이는 비록 가속도계 등을 이용한 현장계측을 통해 태풍 등으로 인한 건물과 TMD의 거동을 알 수 는 있으나, 풍하중을 직접 계측하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문이다. 즉, 풍하중을 계측하지 못하기 때문에 동일한 풍하중 상황에서 TMD가 작동을 할 때와 작동을 하지 않을 때의 비교분석이 불가능하고 나아가 TMD의 풍진동 제어성능 분석 또한 매우 어려운 상황이다.

본 논문에서는 계측된 건물과 TMD의 가속도 응답으로부터 풍하중을 역추정하여 TMD의 풍진동 제어성능을 분석하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 TMD와 구조물 응답으로부터 하중을 역추정하는 방법으로 연속시간 영역에서 칼만 필터링을 이용하는 기법을 제시하고자 한다. 최종적으로 역추정으로 구한 하중을 이용하여 수치해석을 통해 TMD가 설치되지 않은 구조물의 응답을 구하여 TMD의 설치로 인한 풍진동 제어성능을 분석하고자 한다.

2. 풍하중 역추정

2.1 칼만 필터를 이용한 풍하중 산정기법

일반적으로 TMD는 구조물의 1차모드에 동조하도록 설치하기 때문에 풍하중을 받는 TMD가 설치된 구조물의 운동방정식은 그림 1의 단자유도-TMD의 연계운동방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_t - c_t & \\ -c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_t - k_t & \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

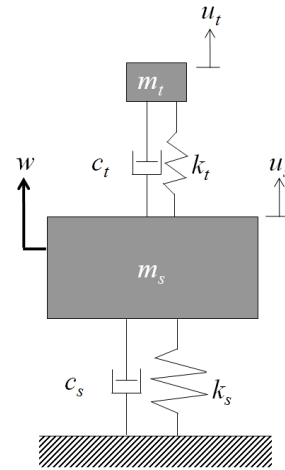


그림 1 TMD가 설치된 단자유도

여기서 m_s, c_s, k_s 는 각각 구조물의 1차모드의 질량, 감쇠, 강성, m_t, c_t, k_t 는 각각 TMD의 질량, 감쇠, 강성, u_s 와 u_t 는 각각 구조물과 TMD의 절대변위, w 는 풍하중을 나타낸다. 이를 간단히 행렬식으로 나타내면 아래와 같다.

$$M\ddot{u} + C_o\dot{u} + Ku = Ew \quad (2)$$

여기서 M, C_o, K 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며, $u = [u_s \ u_t]^T$, $E = [1 \ 0]^T$ 이다.

만일 구조물과 TMD의 변위, 속도, 가속도의 모든 응답을 계측할 수 있다면 풍하중은 식 (2)의 좌, 우변을 바꾸어 나타냄으로서 간단하게 구할 수 있다.

$$W = M\ddot{u} + C_o\dot{u} + Ku \quad (3)$$

하지만, 구조물과의 TMD의 모든 응답을 계측하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 일반적으로는 구조물과 TMD의 가속도응답만을 계측하게 된다. 만일, 모든 응답이 아닌 제한된 계측응답을 이용하여 풍하중을 산정하고자 하는 경우, 제한된 계측응답으로부터 구조물과 TMD의 모든 응답을 구할 수 있다면 식 (3)을 이용하여 외력을 산정할 수 있을 것이다.

제한된 계측응답으로부터 모든 응답을 방법으로 가장 간단한 방법은 적분과 미분을 이용하는 방법으로, 예를 들어, 가속도응답을 계측하는 경우 수치적분을 통하여 속도와 변위응답을 구할 수 있다. 하지만 이 경우 계측노이즈 등으로 인한 적분과정에 포함된 불확실성에 의하여 산정된 풍하중 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 보다

신뢰성있는 응답을 예측하기 위해 칼만필터(Kalman Filter)를 사용하였다.^{6,7)}

칼만 필터를 사용하여 구조물의 응답을 예측하기 위해서는 운동방정식을 상태방정식으로 변환하여 사용하는 것이 유리하다. 가속도만을 계측하는 경우, 식 (2)의 운동방정식을 상태방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bw \tag{4.a}$$

$$y = Cz + Dw + \eta \tag{4.b}$$

여기서 $z(= [u_s \ u_t \ \dot{u}_s \ \dot{u}_t]^T)$ 는 상태변수, $y(= [\ddot{u}_s \ \ddot{u}_t]^T)$ 는 계측된 구조물과 TMD의 가속도응답, $\eta(= [\eta_s \ \eta_t]^T)$ 는 구조물 응답계측에 첨가되는 노이즈(η_s)와 TMD응답 계측에 첨가되는 노이즈(η_t)로 이루어진 벡터이며, A, B, C, D 는 각각 $2 \times 2, 2 \times 1, 1 \times 2, 1 \times 1$ 차원의 시스템 행렬로 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} O_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_o \end{bmatrix} \tag{5.a}$$

$$B = M^{-1} [O_{1 \times 2} \ E^T]^T \tag{5.b}$$

$$C = [-M^{-1}K \ -M^{-1}C_o] \tag{5.c}$$

$$D = M^{-1}E \tag{5.d}$$

계측된 구조물과 TMD의 가속도응답 y 로부터 칼만필터를 이용하여 예측된 전체 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\hat{z}} = (A - GC)\hat{z} + Gy \tag{6}$$

여기서 $\hat{z}(= [\hat{u}_s \ \hat{u}_t \ \hat{\dot{u}}_s \ \hat{\dot{u}}_t]^T)$ 는 추정된 변위와 속도응답으로 실제 변위와 속도응답과 구분하기 위하여 달리 표현하였으며, G 는 칼만필터 이득행렬(gain matrix)로 다음 식 (7.a)의 리카티(Riccati) 방정식의 해로부터 식 (7.b)와 같이 구한다.

$$AP + PA^T - (CP + DQ_1B^T)^T(DQ_1D^T + Q_2)^{-1} \cdot (CP + DQ_1B^T) + B^TQ_1B = 0 \tag{7.a}$$

$$G = (BQ_1D^T + PC^T)(DQ_1D^T + Q_2)^{-1} \tag{7.b}$$

여기서 P 는 리카티방정식의 해이고, Q_1 은 풍하중의 공분산, Q_2 는 노이즈의 공분산으로 다음과 같이 가정한다.

$$Q_1 = E[ww^T] = 1 \tag{8.a}$$

$$Q_2 = E[\eta\eta^T] = \begin{bmatrix} \gamma_s & 0 \\ 0 & \gamma_t \end{bmatrix} \tag{8.b}$$

여기서 γ_s 와 γ_t 는 노이즈 보정계수로 1보다 작은 값의 상수이다.

만약 칼만 필터에 의해 추정된 변수가 상태변수로 수렴되었다고 가정하면 식 (4.a)의 상태변수를 추정된 변수로 변경함으로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + Bw \tag{9}$$

식 (9)로부터 식 (3)에서와 같이 식의 좌, 우변을 바꾸고 B 의 역행렬을 곱하면 풍하중을 구할 수 있음을 알 수 있다. 다만, 식 (5.b)에서 B 의 역행렬이 존재하지 않기 때문에 일반화 역행렬(generalized inverse matrix, 또는 의사역행렬, pseudo-inverse matrix) B^+ 을 이용하면 식 (9)를 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$w = B^+(\hat{z} - A\hat{z}) \tag{10}$$

최종적으로, 식 (6)에서 추정된 전체응답과 계측된 응답과의 관계를 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$w = B^+G(y - C\hat{z}) \tag{11}$$

식 (11)로 부터 풍하중은 계측된 구조물과 TMD의 가속도응답 y , 칼만필터로부터 추정된 변위와 속도응답 \hat{z} , 행렬 C 와 칼만필터 이득행렬 G 에 의해 곧바로 계산이 가능한 것을 알 수 있다.

3. 수치해석 예제

본 장에서는 2장에서 기술한 풍하중 역추정 방법을 예제 구조물에 적용하여 TMD의 풍진동 저감성능을 분석하였다. TMD가 설치된 예제 구조물의 폭(B_o)은 38m, 깊이(D_o)는 37m, 높이(H)는 185m이고, 1차모드의 일반화질량(generalized mass)는 13,453톤으로 가정하였다.

구조물 1차모드의 고유진동수는 0.244Hz, 감쇠비는 1%로 가정하였고, 설치된 TMD의 질량은 구조물 질량의 1%, 고유진동수는 구조물 고유진동수의 99%, 감쇠비는 6%로 가정하였다.

3.1 풍하중 스펙트럼

수치해석을 위해 풍하중을 수치적으로 산정하였으며, 사용한 풍하중 스펙트럼은 하영철 등⁸⁾에 의해 고층건축물의 풍직각방향 변동풍력 평가를 위한 경험식으로 제안된 풍하중 스펙트럼을 사용하였다. 풍직각방향 스펙트럼을 이용한 것은 일반적으로 건물의 형상비($H/\sqrt{B_o D_o}$)가 3보다 클 경우 풍직각방향 응답이 풍방향 응답보다 크게 되며⁹⁾, TMD가 설치되는 건물의 경우 형상비가 3보다 큰 경우가 일반적이기 때문이다.

풍하중 산정을 위해 사용된 풍직각방향 진동의 풍력스펙트럼계수 F_L 은 다음과 같다.⁸⁾

$$F_L(n) = \frac{4(1+0.6\beta_1)\beta_1}{\pi} \frac{(n/n_p)^2}{[1-(n/n_p)^2]^2 + 4\beta_1^2(n/n_p)^2} \quad (12)$$

여기서, n 은 진동수(Hz)이고 β_1 은 대역폭 정수로 다음과 같이 구해지며

$$\beta_1 = \frac{(D_o/B_o)^4}{[1.16(D_o/B_o)^4 - 1.6(D_o/B_o)^2 + 19]} + \frac{0.125}{(D_o/B_o)} \quad (13)$$

n_p 는 스펙트럼 피크진동수(Hz)로 다음 식으로 구해진다.

$$n_p = \frac{0.115}{[1+0.36(D_o/B_o)^2]^{0.87}} \frac{V_H}{B_o} \quad (14)$$

여기서, V_H 는 기본설계풍속(m/s)이다.

풍직각방향 전도모멘트의 RMS(N·m) σ_{ML} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_{ML} = C_{ML}' q_H B_o H^2 \quad (15)$$

여기서, q_H 는 설계속도압(N/m²)이고, C_{ML}' 은 변동전도모멘트계수로 건물깊이와 건물폭의 비(D_o/B_o)에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$C_{ML}' = -0.0355(D_o/B_o)^2 + 0.1449(D_o/B_o) - 0.0173 \quad [0 < (D_o/B_o) \leq 2] \quad (16.a)$$

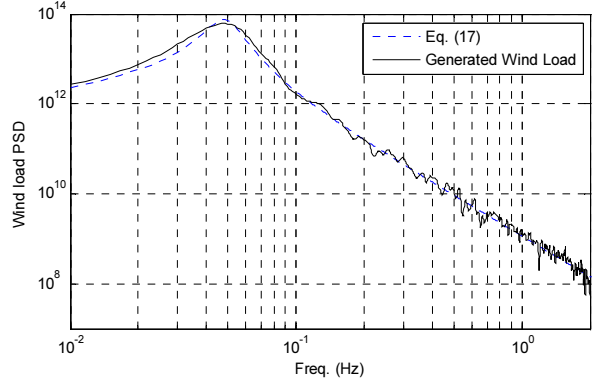


그림 2 풍하중 스펙트럼밀도

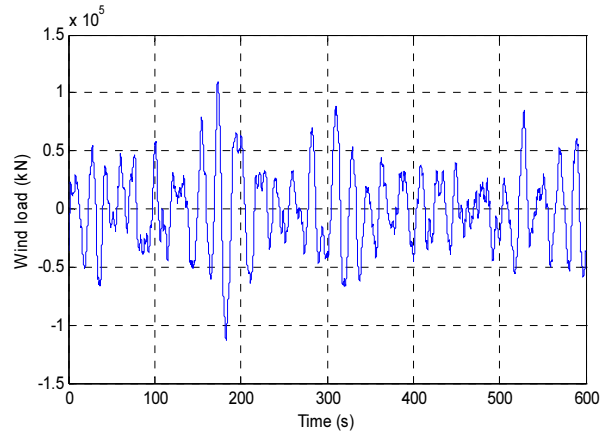


그림 3 풍하중 시간이력

$$C_{ML}' = 0.0046(D/B)^2 - 0.0103(D/B) + 0.1327 \quad [2 < (D/B) \leq 5] \quad (16.b)$$

최종적으로, 풍직각방향 진동의 풍력스펙트럼계수 F_L 과 풍직각방향 전도모멘트의 RMS σ_{ML} 을 바탕으로 구한 풍직각방향 풍하중 스펙트럼밀도(PSD, Power Spectral Density)는 다음과 같이 산정한다.⁹⁾

$$S_M(n) = \frac{\sigma_{ML}^2 F_L(n)}{n} \quad (17)$$

그림 2는 수치해석에 사용된 예제구조물의 풍하중 스펙트럼밀도이다. 그림에서 점선은 식 (17)의 스펙트럼밀도이고 실선은 식 (17)을 역푸리에분석을 통해 시간하중으로 구한 풍하중의 스펙트럼밀도이다. 스펙트럼밀도를 구하기 위해 사용된 기본설계풍속은 15m/s이다.

그림 2의 점선으로 나타난 풍하중 스펙트럼밀도를 역푸리에분석을 통해 산정한 풍하중의 시간이력은 그림 3에 나

타내었다. 이 때 사용된 시간간격은 1/100초이고, 10분간의 풍하중을 산정하여 예제구조물에 적용하였다.

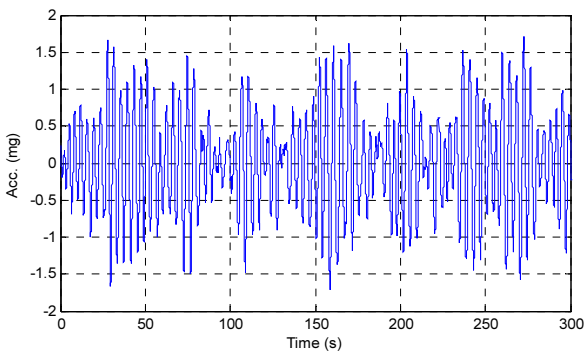
3.2 구조물과 TMD의 가속도응답

본 예제에서는 현실적인 문제를 고려하여 가속도계를 이용한 구조물과 TMD의 가속도응답만이 계측가능한 것으로 가정하였고 속도와 변위이력은 식 (6)의 칼만필터를 이용하여 예측하고자 한다.

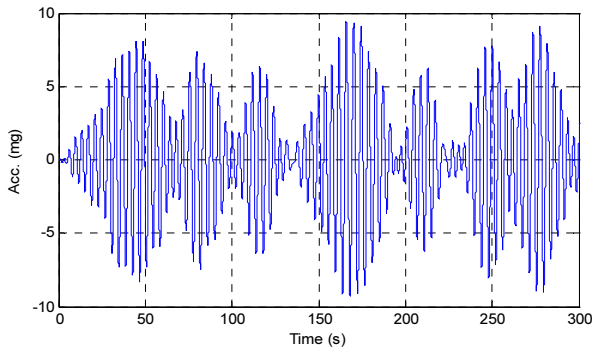
그림 3의 풍하중 시간이력을 적용하여 구한 구조물과 TMD의 가속도 시간이력을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 풍하중에 의한 TMD의 최대 가속도응답은 구조물 최대 가속도 응답의 약 6.13배이다

그림 5와 그림 6에는 각각 계측되지 않는 구조물과 TMD의 변위와 속도응답을 식 (6)을 이용하여 예측한 결과를 나타내었다. 이 때 사용된 식 (8.b)의 노이즈 보정계수 γ_s 의 값은 1.0×10^{-7} , γ_t 는 6.13×10^{-7} 으로, 이는 TMD 가속도응답의 최대값이 구조물 가속도응답 최대값의 6.13배임을 고려하여 γ_t 의 값을 γ_s 값의 6.13배를 사용하였다.

그림 5와 그림 6에서 점선은 수치해석으로 구한 구조물과 TMD의 응답이고, 실선은 식 (6)으로부터 예측된 응답을

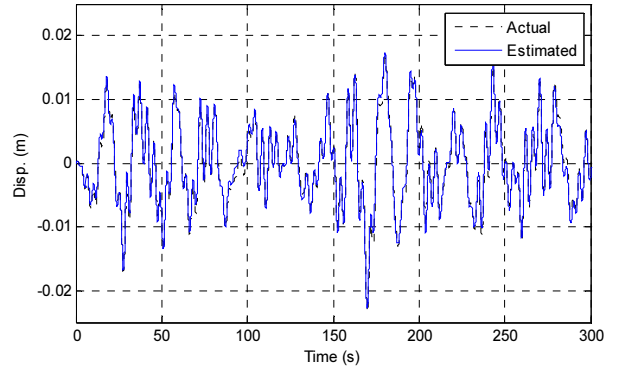


(a) 구조물 가속도

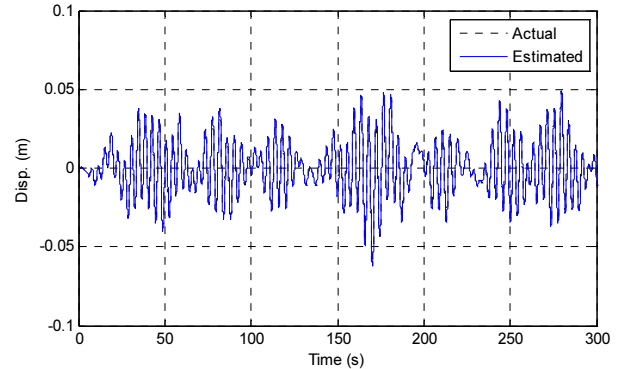


(b) TMD 가속도

그림 4 계측된 구조물과 TMD 가속도 시간이력

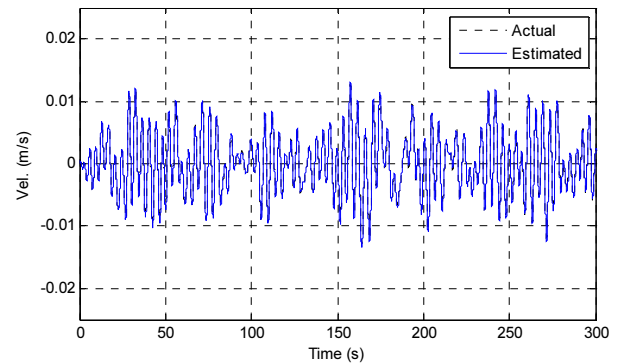


(a) 구조물 변위

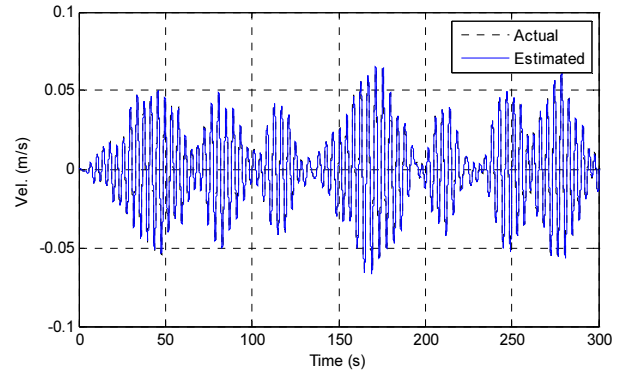


(b) TMD 변위

그림 5 구조물과 TMD의 변위응답 예측



(a) 구조물 속도



(b) TMD 속도

그림 6 구조물과 TMD의 속도응답 예측

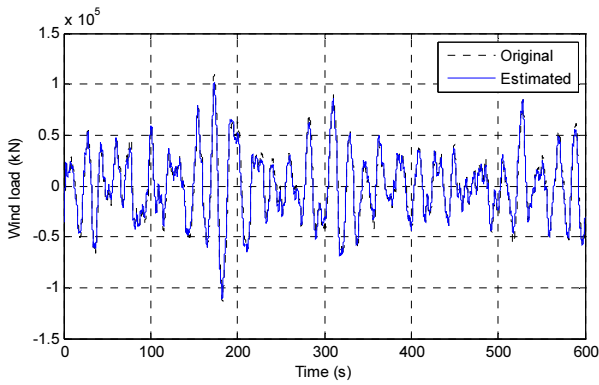


그림 7 풍하중 역추정 결과

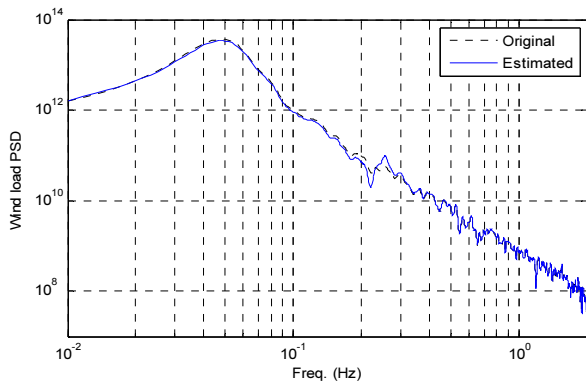


그림 8 실제 풍하중과 역추정 풍하중의 스펙트럼밀도

나타낸다. 그림 5와 그림 6으로부터 식 (6)의 칼만필터를 이용한 계측되지 않은 응답, 즉 변위와 속도응답의 예측이 매우 정확함을 알 수 있다.

구조물과 TMD의 변위와 속도응답이 정확히 예측되었다면, 식 (11)을 이용하여 풍하중을 역추정할 수 있다. 그림 7에는 식 (11)을 이용하여 역추정한 풍하중을 최초로 적용한 그림 3의 풍하중과 비교하였다. 그림 7에서 칼만필터를 이용하여 계측된 구조물과 TMD의 가속도응답만을 기반으로 한 풍하중의 역추정이 상당히 정확한 결과를 가져옴을 알 수 있다.

그림 8에는 실제 풍하중과 역추정 풍하중의 스펙트럼밀도를 비교하였다. 그림 8의 점선이 그림 2의 실선에 표시한 풍직각방향 스펙트럼으로부터 산정한 풍하중의 스펙트럼밀도임을 고려할 때, 역추정된 풍하중의 스펙트럼밀도가 실제 풍하중 뿐만 아니라 식 (17)에서 제시된 스펙트럼밀도와 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 9에는 실제 풍하중과 역추정 풍하중의 상관도를 나타내었으며, 그림 10에는 역추정된 풍하중을 사용하여 수치적으로 구한 구조물의 가속도응답과 계측된 가속도응답의 상관도를 나타내었다. 그림 9의 상관계수(correlation coefficient)값이 0.988이고, 그림 10의 상관계수가 0.963임을 볼 때, 역추

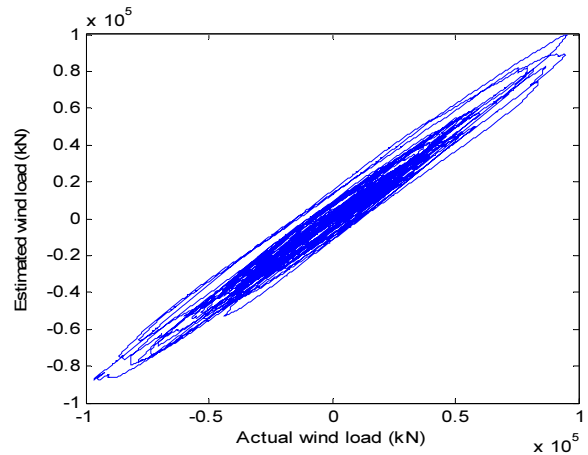


그림 9 실제 풍하중과 역추정 풍하중의 상관도 (상관계수=0.988)

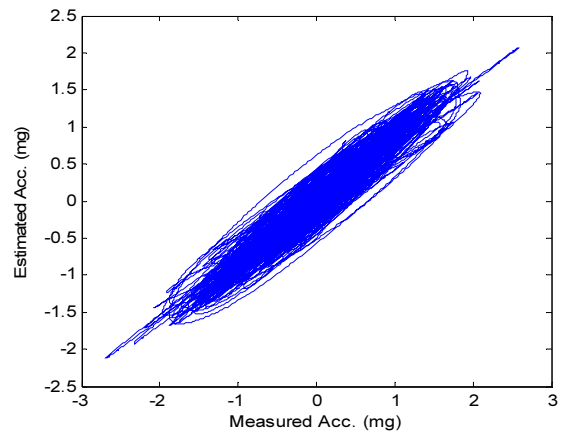


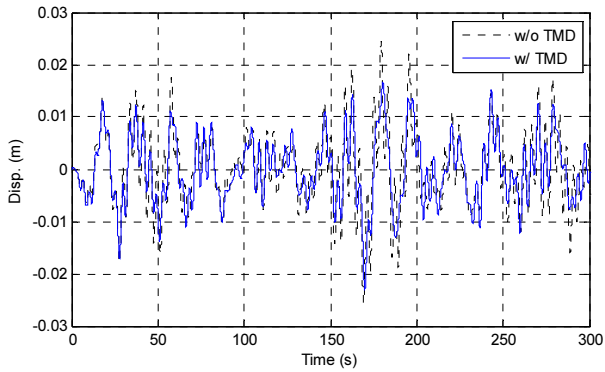
그림 10 계측된 구조물 가속도와 예측된 구조물 가속도의 상관도 (상관계수=0.969)

정된 풍하중이 실제 풍하중에 거의 일치하며, 역추정 풍하중에 의한 구조물의 가속도응답 또한 계측된 가속도응답에 거의 일치함을 알 수 있다.

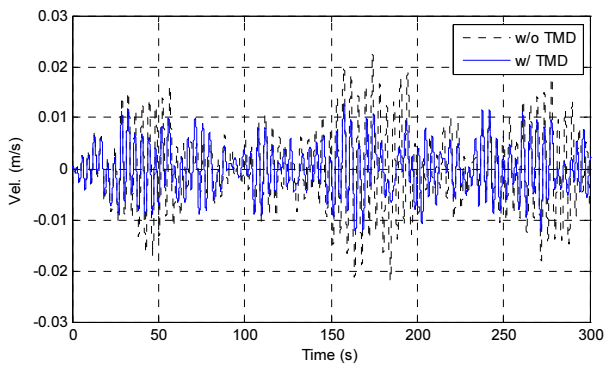
3.3 TMD의 풍응답 제어성능 분석

앞 절의 예제를 통하여 구조물과 TMD의 가속도응답만을 계측하는 경우에 칼만필터를 이용하여 풍하중의 역추정이 가능함을 보였다. 본 절에서는 역추정 풍하중을 바탕으로 TMD가 설치되지 않은 구조물의 응답을 구하여 TMD의 풍응답 제어성능을 분석하고자 한다.

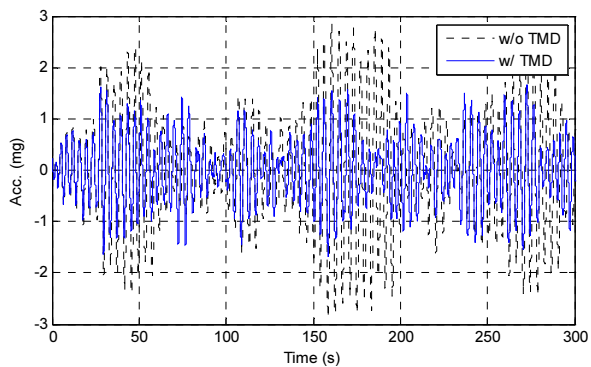
TMD가 설치되지 않은 구조물의 응답은 예제 구조물의 동적특성을 바탕으로 그림 7에서 추정된 풍하중을 이용하여 수치적으로 구하였으며, 그림 4에서 그림 6의 TMD가 설치된 구조물의 응답과 비교하였다. 비록 현실적으로 변위와 속도응답의 계측이 어려워 실질적인 비교는 어려우나



(a) 구조물 변위



(b) 구조물 속도



(c) 구조물 가속도

그림 11 TMD 설치에 따른 구조물 응답비교

수치적으로 구하는 것은 가능하여 변위응답과 속도응답도 비교하였다.

그림 11에는 TMD의 설치유무에 따른 구조물의 변위응답, 속도응답, 가속도응답을 비교하였다. 그림 11에서 TMD가 설치된 구조물(w/ TMD)의 응답은 그림 4에서 그림 6에 나타낸 계측된 응답과 그림 3의 실제 풍하중을 이용하여 구한 응답이고, TMD가 설치되지 않은 구조물(w/o TMD)의 응답은 그림 7의 역추정 풍하중을 이용하여 구한 응답이다. 그림 11로부터 TMD 설치에 따른 풍진동 저감성능 효과를 확인할 수 있다.

표 1 TMD의 최대 풍응답 제어성능

| | 최대값 | | |
|-----------|---------|--------|-------|
| | w/o TMD | w/ TMD | 제어율 |
| 변위 (cm) | 3.11 | 2.31 | 25.9% |
| 속도 (cm/s) | 3.54 | 1.79 | 48.3% |
| 가속도 (mg) | 3.45 | 1.78 | 48.3% |

표 2 TMD의 RMS 풍응답 제어성능

| | 최대값 | | |
|-----------|---------|--------|-------|
| | w/o TMD | w/ TMD | 제어율 |
| 변위 (cm) | 3.11 | 2.31 | 25.9% |
| 속도 (cm/s) | 3.54 | 1.79 | 48.3% |
| 가속도 (mg) | 1.57 | 0.70 | 44.3% |


표 1과 표 2에는 각각 그림 11에서 구한 변위응답, 속도응답, 가속도응답의 최대값과 RMS값을 비교하였다. 참고로 그림 11의 경우 300초간의 시간이력만 비교하였으나, 표 1과 표 2에서는 전체 10분간의 시간이력을 비교하여 정리하였다. 표 1과 표 2로부터 TMD의 설치로 인하여 최대응답의 경우 25.9%에서 48.3%, RMS 응답의 경우 25.9%에서 44.3%의 풍응답이 저감됨을 확인할 수 있다. 특히 풍진동에 의한 사용성 판단에 중요한 가속도응답이 최대 48.3%, RMS 44.3% 감소함을 확인할 수 있다.

4. 결론

풍하중을 직접 계측하는 것이 현실적으로 불가능하여 동일한 풍하중 상황에서 TMD가 설치되었을 때와 설치되지 않았을 때의 TMD의 풍진동 제어성능 분석이 어려운 경우를 위해, 계측된 건물과 TMD의 가속도 응답으로부터 풍하중을 역추정하여 TMD의 풍진동 제어성능을 분석하는 방법을 소개하였다. 이를 위해 TMD와 구조물 응답으로부터 하중을 역추정하는 방법으로 연속시간 영역에서 칼만 필터링을 이용하는 기법을 제시하였으며, 풍직각방향 변동풍력 평가를 위한 경험식으로 제안된 풍하중 스펙트럼을 사용하여 풍하중을 산정하였다.

계측된 가속도응답만을 이용하여 풍하중을 산정하여 풍하중 역추정 기법의 유효성을 검증하였으며, 최종적으로 4 추정된 풍하중을 이용하여 수치해석을 통해 TMD가 설치되지 않은 구조물의 응답을 구하여 TMD의 설치로 인한 풍진동 제어성능을 분석하였다. 해석결과 본 원고에서 제시한 풍하중 역추정 기법을 사용하는 경우, 비록 직접적인 풍하중의 계측이 어려운 경우에도 TMD의 풍진동 제어성능의 분석이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. 황재승, “구조물의 사용성 개선을 위한 제진장치 및 적용사례”, 대한건축학회지, 제48권, 제7호, pp.56-61, 2004.
2. 김홍진, “국내 풍진동 제진장치 설치 현황”, 한국풍공학회지, 제15권, 제3호, 2011.
3. 이지훈, 주석준, 조지성, 김홍진, “적층고무를 이용한 최소마찰형 TMD의 현장 성능실험”, 대한건축학회논문집, 제27권, 제3호. pp.47-54, 2011. 

[담당 : 황재승 편집위원]