

## 풍하중에 의한 타원형 구조물의 진동 제어

황재승\*, 김윤석\*\*, 주석준\*\*\*

### Vibration Control of Tower Structure under Wind Load

Jae-Seung, Hwang\*, Yun-Seok, Kim\*\* and Seok-Jun, Joo\*\*\*

**Key Words** :Serviceability(사용성), Tuned Mass Damper(동조질량감쇠기), Free Vibration Test (자유진동시험), Performance Test (성능시험), Equivalent Damping Ratio(동가감쇠비)

#### Abstract

The present paper outlines the system identification and vibration control performance of air traffic control tower of Yangyang international airport with tuned mass damper(TMD). From the free vibration test, natural frequency, damping ratio and mode shape of tower are obtained and these values are compared with the values from numerical analysis. In the vibration control test to evaluate the vibration control performance, equivalent damping ratio increased by tuned mass damper are obtained in case the TMD is operated as passive mode.

Damping ratio of tower evaluated from free vibration test is about 1.0%. It is very low value than damping ratio recommended in general code. Damping ratio of passive mode is about 5%. These equivalent damping ratio increased by TMD is enough to enhance the serviceability of tower structure under wind load.

#### 1. 서론

강원도 양양군의 양양국제공항은 동쪽으로는 동해와 서쪽으로는 태백산맥에 인접하여, 지리적으로 강한 바람이 예상되는 지역에 자리잡고 있다. 동해상의 태풍을 비롯하여 1~3월 사이 태백산맥 쪽에서 불어오는 계곡풍의 영향이 양양공항에 크게 작용할 것으로 예상된다. 특히, 양양공항의 관제탑은 최상층 높이가 80.1m이며, 세장비가 크고 가분수 형태를 가지고 있어 바람에 취약한 형태적 특성을 가지고 있다. 그림1은 양양공항 관제탑 및 부속건물의 전경을 보여준다. 풍동실험을 통한 관제탑의 사용성 평가에서 관제탑 최고층의 약축방향 가속도가 사용성의 기준을 크게 초과하는 것이 확인되었고[1], 이에 대한 대책으로 1방향 동조질량감쇠장치(tuned mass damper, 이하 TMD)가 도입되었다.

TMD는 풍하중에 의한 구조물의 진동을 저감하기 위한 수동제어장치로, 관제탑의 구조해석결과에 근거하여 설계변수가 설정되었다. 일반적으로 구조해석은 구조해석모델의 불확실성과 시공상의 오차등으로 인하여 실제와 어느 정도 차이를 나타내게 되며, 이것은 TMD의 제진성능의 저하를 초래할 수 있다. 따라서 TMD의 제진성능을 보장하기 위해서는 현장계측을 통하여 구조물의 실제 동적특성치들을 파악하고, 이를 기준으로 TMD의 구성요소에 대한 세심한 조정작업이 수행되어야 한다. 또한 튜닝된

TMD의 제진성능이 설계시의 목표대로 확보되었는지도 확인해야 한다.

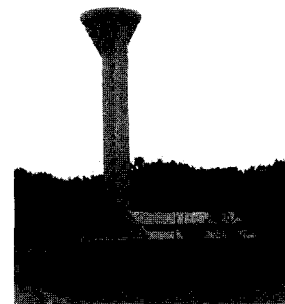


그림1. 양양공항관제탑

본 논문은 TMD의 튜닝작업 이후 수행된 관제탑의 가진실험 결과로부터 관제탑의 동적특성과 TMD의 제진성능을 확인하는 과정을 보여준다. 시스템식별기법을 이용하여 제한된 데이터로부터 관제탑 1차모드의 고유진동수, 감쇠비 및 모드질량을 구하였으며, 이를 구조해석결과 등과 비교하였다. 또한 TMD의 제진성능을 파악하기 위하여 수치적으로 동가감쇠비를 유추한 결과를 정리하였다.

#### 2. TMD 설계

관제탑의 내풍 안전성 및 사용성의 평가를 위하

\* 현대건설기술연구소, 선임연구원, jshwang@hdec.co.kr

\*\* 현대건설기술연구소, 수석연구원, yskim@hdec.co.kr

\*\*\* 타이솔루션, 부장, sjjoo@tesolution.com

여 현대건설기술연구소의 대형풍동을 이용하여 풍력 실험이 수행되었다. 이 때, 설계풍속은 61m/sec(풍하중 설계기준), 풍동풍속은 4.1m/sec, 실험모델의 축소를 1/120이 사용되었다. 그림2는 관제탑에 대한 풍력 실험모습을 나타낸다. 풍력실험으로부터 구한 스펙트럼 해석에 의하면 태백산맥 쪽에서 불어오는 바람에 의하여 관제탑의 응답이 상대적으로 커질 것으로 예측되었으며[1] 관제탑의 응답이 사용성의 기준을 초과하여, 이에 대한 대책의 하나로 TMD가 제안되었으며, 현재 관제탑 14층에 설치되어 운용 중에 있다.

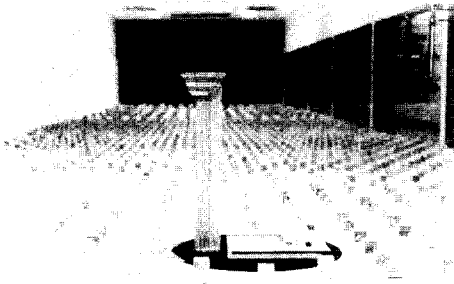


그림 2. 관제탑 풍동실험

TMD의 각 변수들은 Den Hartog(1956)의 연구 결과에 기초하여 설정되었다. TMD의 고유진동수비와 감쇠비, TMD에 의한 등가감쇠비 증가분을 구하였다.[4]. 구조해석으로부터 구해진 관제탑의 동적 특성과 TMD 설계사양을 정리하면 표1과 같다. 여기서 1차모드 일반화질량은 TMD 설치 층에서의 모드변위가 1인 모드형상을 기준으로 산정된 것이다.

< 표 1. TMD의 설계사양 >

관제탑의 동적 특성	TMD 의 사양
높이 : 80.1 m	크기 : 2.5 x 2 x 1.8 m
최대폭 : 21.0 m	총질량 : 18 ton
총질량 : 5200 ton	스트로크 : ± 0.3 m
1차 모드 일반화 질량 : 1626.1 ton	이동질량 : 15 ton
1차 모드 고유진동수 : 0.386 Hz	고유진동수 : 0.381 Hz
1차 모드 감쇠비 : 2 % (가정)	감쇠비 : 6.8%

### 3. 관제탑 가진실험

#### 3.1 관제탑의 가진 및 응답의 측정

관제탑의 동적특성 및 TMD의 제진성능을 파악하기 위해서는 우선적으로 관제탑에 대한 가진실험이 수행되어야 한다. 가진방법으로는 독립된 가진기를 사용하거나, 액츄에이터로 TMD의 질량에 직접 가력하는 등의 방법이 고려될 수 있다. 그러나 양양 공항 관제탑의 현장 여건과 비용 등의 문제로 매우

간단한 가진방법이 사용되었다. 즉, 공진을 이용하여 TMD의 이동질량을 입력으로 가진하고, TMD가 관제탑을 가진하는 간접가진 방식을 사용하였다. 가진 실험에서 관제탑의 가속도, TMD의 가속도와 상대변위를 측정하였다. 그림3은 가진실험에서의 측정의 개요를 나타낸다.

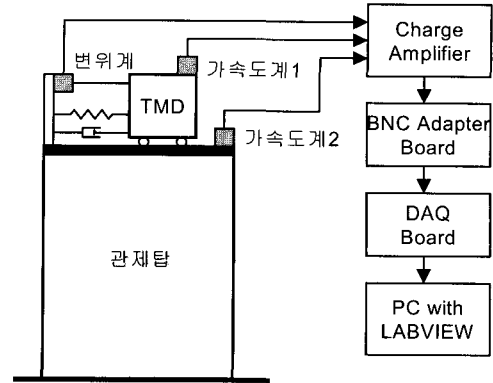


그림3. 측정의 개요

#### 3.2 관제탑의 동적 특성

일반적으로 구조시스템은 여러 가지 재료적인, 기하학적인 비선형성을 포함하고 있다. 그러나 수학적 모델링의 어려움과 실제 적용상의 복잡함 때문에, 흔히 구조시스템을 선형이라 가정하고 모델링한다. 여기서는 관제탑을 선형시스템으로 가정하여 동적특성치인 고유진동수, 감쇠비, 모드질량을 구하게 된다.

##### 3.2.1 고유진동수

그림4는 관제탑의 가진실험에서 측정된 관제탑과 TMD의 가속도응답을 보여준다. TMD는 외부가진력에 의하여 관제탑을 가진하다가, 외부가진력이 제거된 후 제진상태로 전환되고, 관제탑의 가속도가 일정값 이하가 될 때 가이드레일의 마찰력에 의하여 작동을 중지하게 된다. TMD가 정지(상대변위 0)한 이후 관제탑과 TMD의 가속도는 동일한 값을 나타내며, 관제탑은 자유진동을 하게 된다. 그림5는 관제탑의 자유진동가속도의 푸리에 변환을 보여주며, 여기서 관제탑의 약측방향의 고유진동수가 0.3667Hz로 산정되었다.

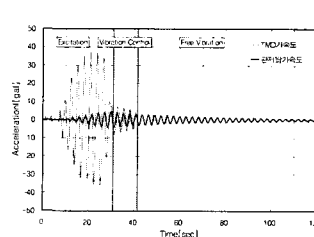


그림4. 가속도 시간이력

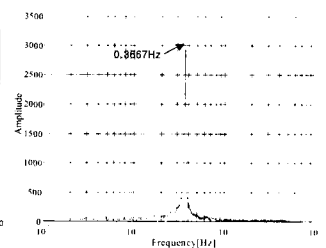


그림5. 관제탑 진동가속도의 주파수분석

### 3.2.2 감쇠비

그림6은 가진실험에서의 관제탑의 가속도응답을 나타내며, 이로부터 관제탑의 감쇠비를 추정하였다. 감쇠비는 관제탑이 자유진동하는 구간의 응답으로부터 대수로그감소법을 적용하여 추정하였다. 일반적으로 구조물의 응답의 크기에 따라 감쇠비의 크기가 달라지기 때문에, 양(+)과 음(-)의 응답에서 각각 충분히 분리된 3지점을 선택하여 사용하였다. 여기서 구해진 평균감쇠비 1.049%를 관제탑의 감쇠비로 설정하였다.

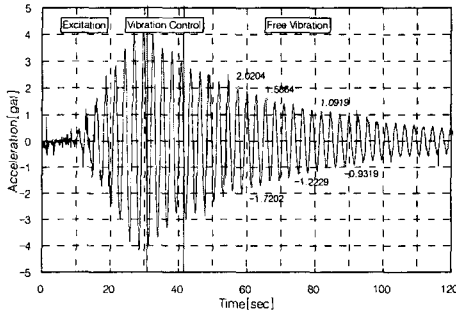


그림 6. 관제탑의 가속도응답

### 3.2.3 모드질량

TMD의 최적변수들이 질량비의 함수로 주어졌기 때문에 모드질량 또는 질량비의 식별은 TMD의 튜닝에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다. 여기서는 무차원의 질량비를 시스템 식별에 의하여 구하고 이로부터 관제탑 1차모드의 모드질량을 추정한다.

시스템식별을 위해서는 관제탑과 TMD의 수학적 모델을 결정하여야 한다. 관제탑의 거동에 1차모드가 지배적이라고 가정하여 관제탑을 1자유도계로 모델링하면 TMD가 설치된 관제탑은 그림7의 2자유도계로 표현할 수 있다.

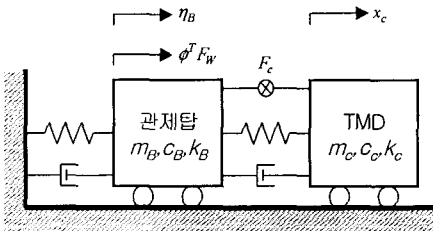


그림 7. 관제탑과 TMD 모델링

여기서는  $m_B, c_B, k_B$  는 1차모드에 대하여 정규화된 관제탑의 일반화질량, 감쇠상수, 강성계수를,  $m_c, c_c, k_c$  는 TMD의 질량, 감쇠상수, 강성계수를 각각 나타낸다.  $\phi^T F_W, F_c$  는 정규화된 풍하중과 TMD에 대한 외부가진력을,  $\eta_B, x_c$  는 지반에 대한 관제탑의 일반화좌표(generalized coordinate)와 TMD의 상대변위를 각각 나타낸다. 이 때는 관제탑의 1차모드형상으로 TMD 설치층에서의 모드변위가 1 ( $\phi_i = 1, i = 13$ )로 표준화된 것이다. 그림7의 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_B \ddot{\eta}_B + c_B \dot{\eta}_B + k_B \eta_B - c_c (\dot{x}_c - \dot{\eta}_B) - k_c (x_c - \eta_B) = \phi^T F_W - F_c \quad (1)$$

$$m_c \ddot{x}_c + c_c (\dot{x}_c - \dot{\eta}_B) + k_c (x_c - \eta_B) = F_c \quad (2)$$

시스템식별 기법을 적용하기 위해서는 시간이력 데이터가 주어진 시스템의 입·출력이 정의되어야 한다. 그러나  $F_W, F_c$  가 주어지지 않았기 때문에 식(1),(2)로 표현되는 관제탑과 TMD의 전체시스템에 대하여 시스템식별을 위한 입력을 정의할 수 없다. 따라서 주어진 측정 데이터로부터 입·출력이 정의될 수 있는 운동방정식으로 전환해야 한다.

먼저 가진실험 시의 풍속이 낮았던 점을 고려하여  $F_W = 0$  이라 가정한다. 그리고 식(2)를 식(1)에 대입하여  $F_c$  를 소거하고, 모드질량으로 나누면 식(3)을 구할 수 있다.

$$\ddot{\eta}_B + 2\xi_B (2\pi f_B) \dot{\eta}_B + (2\pi f_B)^2 \eta_B = -\mu \ddot{x}_c \quad (3)$$

위식에서  $\xi_B, f_B, \mu$  는 각각 관제탑 1차모드의 감쇠비, 고유진동수(Hz) 그리고 TMD의 질량비를 나타낸다. 식(3)에서 TMD의 가속도  $\ddot{x}_c$  를 시스템의 입력  $u$  로, 관제탑의 TMD 설치층의 가속도를 출력으로 정의하면 관제탑에 대한 시스템식별을 수행할 수 있다. 식(3)를 상태방정식으로 전환하면 식(4), (5)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\eta}_B \\ \dot{\eta}_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(2\pi f_B)^2 & -2\xi_B (2\pi f_B) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_B \\ \dot{\eta}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\mu \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} -(2\pi f_B)^2 & -2\xi_B (2\pi f_B) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_B \\ \dot{\eta}_B \end{Bmatrix} + [-\mu] u \quad (5)$$

식(4),(5)에서의 시스템식별 변수는  $\xi_B, f_B, \mu$  로 정의된다. 시스템식별은 PEM(prediction error method)을 적용하였으며, MATLAB TOOLBOX를 이용하여 수행되었다. 시스템식별 결과는 표2와 같다. 질량비  $\mu$  로부터 모드질량을 구하면,  $m_B = 15\text{ton} / \mu = 1746.2\text{ton}$  으로 구조해석결과보다 7.4%정도 무거운 결과를 나타내었다. 이것은 구조해석에 포함되지 않은 각종 설비 및 마감재가 관제탑에 추가되었기 때문인 것으로 파악된다. PEM에 의한 시스템식별 결과를 3.2.1항, 3.2.2항의 결과와 비교하면, 감쇠비와 고유진동수는 매우 근사한 값을 보임을 알 수 있다. 그러나 질량비는 약 7.33%의 차이를 보여, TMD의 초기 설계변수값과 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다.

그림8은 관제탑의 가속도응답에 대하여 측정치와 시스템식별 결과를 이용한 수치해석결과를 비교한 것으로, 두개의 곡선이 거의 일치함을 볼 수 있다. 따라서 PEM에 의한 시스템식별 결과를 수치해석에 사용할 수 있다고 판단된다.

< 표2. 관제탑의 시스템식별 결과 >

시스템식별 변수	방법	변수값	차이 <sup>2)</sup>
질량비	PEM	0.859 %	7.33 %
	구조해석	0.922 %	
감쇠비	PEM	1.011 %	3.76 %
	대수로그감쇠법	1.049 %	
고유진동수	PEM	0.3670 Hz	0.08 %
	FFT 분석	0.3667 Hz	

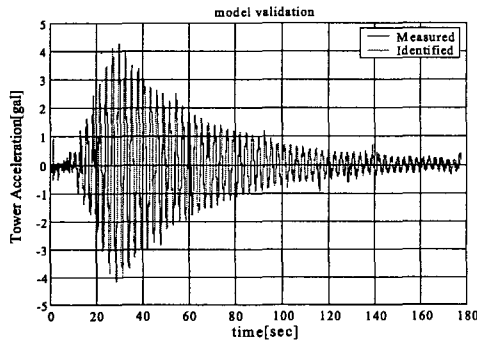


그림 8. 관제탑 가속도 응답의 비교

### 3.3 TMD의 제진성능

가진실험에서 현장여건 등으로 TMD에 대한 외부 가진력이 부족하여, TMD의 제진효과를 확인할 수 있을 정도로 충분한 가진이 이루어지지 못하였다. 따라서 TMD의 제진성능은 수치해석에 의하여 추정된 등가감쇠비를 기준으로 평가되었다. 등가감쇠비는 관제탑과 TMD의 운동방정식 식(1),(2)로부터 상태방정식의 시스템행렬을 구성하고, 이에 대한 고유치해석으로부터 구하였다. 자유진동( $F_W = 0, F_c = 0$ )을 가정했을 때 시스템행렬은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax$$

$$\text{where } A = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -\tilde{K} & -\tilde{C} \end{bmatrix}, \tilde{C} = \begin{bmatrix} 2\xi_B(2\pi f_B) + \mu \cdot 2\xi_c(2\pi f_c) & -\mu \cdot 2\xi_c(2\pi f_c) \\ -2\xi_c(2\pi f_c) & 2\xi_c(2\pi f_c) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} (2\pi f_B)^2 + \mu(2\pi f_c)^2 & -\mu(2\pi f_c)^2 \\ -(2\pi f_c)^2 & (2\pi f_c)^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

표3은 식(6)의 시스템행렬 A에 대한 고유치해석결과 및 등가감쇠비를 보여준다. 여기서 TMD의 동적특성치는 공장성능시험의 결과를 사용하였으며, 등가감쇠비는 고유치로부터 구한 감쇠비의 평균값으로 설정하였다. 이 값은 관제탑 및 TMD가 선형시스템이란 가정하에서 구해졌기 때문에, TMD 가이드레일의 마찰력이 크게 작용하는 낮은 가속도영역에서는 보다 작은 값을 나타낼 것으로 예상된다. 그러나 등가감쇠비를  $\xi_1$ 으로 가정하더라도, 본 TMD는 관제탑의 RMS 가속도응답에 대하여 약 50%가량의 제진효과가 기대된다. 이것은 TMD의 실제 설계변

수값과 최적 설계변수값 사이의 차이에도 불구하고 충분한 제진효과가 발휘될 수 있음을 의미한다.

< 표3. 등가감쇠비의 추정 >

동적 특성	관제탑	$\xi_B=1.011\%, f_B=0.3670\text{Hz}$
	TMD	$\xi_c =10.653\%, f_c = 0.3601\text{Hz}, \mu=0.859\%$
고유치 해석	고유치	$\lambda_{1,2} = -0.0941 \pm 2.3119i$ $\lambda_{3,4} = -0.1723 \pm 2.2482i$
	고유진동수	$f_1 = 0.3683 \text{ Hz}, f_2 = 0.3589 \text{ Hz}$
	감쇠비	$\xi_1 = 4.067\%, \xi_2 = 7.642\%$
등가감쇠비		$\xi_{eq} = 5.855\%$

## 4. 결론

본 논문은 관제탑의 가진실험 결과로부터 관제탑의 동적특성을 구하기 위한 시스템식별의 과정과 그 결과를 보여준다. 시스템식별의 결과 고유진동수는 구조해석결과보다 5%정도 감소된 값을 나타냈으며, 감쇠비는 구조해석시 가정된 값의 1/2정도로 산정되었다. 그리고 TMD의 제진성능을 평가하기 위하여, TMD가 설치된 관제탑의 등가감쇠비를 수치적으로 산정하였다. 등가감쇠비는 입·출력을 정확히 측정할 수 있고, 충분한 가진력을 발휘할 수 있는 가진방법을 사용한다면 보다 정확한 값을 구할 수 있을 것이다. 이것은 제진장치의 튜닝에도 활용될 수 있다. 이상의 결과로부터 양양공항 관제탑의 TMD는 RMS 가속도 응답에 대하여 약 50% 이상의 제진효과를 가질 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 현대건설 기술연구소, 양양국제공항 관제탑 풍동 실험 결과보고서, (1997.12.)
- [2] 현대건설 기술연구소, 양양국제공항 관제탑 제진장치(TMD) 공장성능시험, (2001.8.)
- [3] 현대건설 기술연구소, 양양공항 관제탑 제진장치(TMD) 현장시험 결과보고서, (2001.8.)
- [4] Den Hartog, Mechanical Vibrations, McGrawHill, (1956.)
- [5] Lennart Ljung, System Identification Toolbox User's Guide, The MathWorks, (1995.)