

## 양양국제공항 관제탑 제진장치

황재승\*

### 1. 서론

바람에 의한 구조물의 진동은 고층화 경량화 되고 있는 현대구조물의 경향에 의하여 더욱 큰 관심의 대상이 되고 있다. 구조물의 생애 중에 한번 올지 모르는 정도의 극한 상황의 바람에 대하여 안전성을 보장하기 위한 구조물의 내풍설계의 개념이 점차 구조물의 내용연수동안 수차례 또는 수십차례 일어날 수 있는 바람에 대하여 구조물의 진동에 대한 사용성을 검토하는 단계까지 고려하는 더욱 큰 범위의 내풍설계로 확대되고 있는 것은 이를 반영하는 것이라 볼 수 있다. 이것은 바람에 의한 진동에 대하여 더욱 쾌적한 주거환경을 추구하고자하는 현대인의 욕구를 충족시키기 위한 것이기도 하지만 또한 이것은 그 만큼 우리 사회가 사회적, 경제적으로 이를 포용할 만큼 성숙한 단계에 이르고 있음을 의미하기도 한다.

지진에 의한 구조물의 파괴나 안정성에 문제를 일으키는 과도한 진동과 달리 바람에 의한 진동은 건축 구조물 자체의 안전보다는 거주자의 주거환경이나 작업환경을 크게 손상시켜 어지러움증을 호소한다던가, 지속시간이 길어지게 되면 작업능률

이 저하되어 정상적인 업무를 할 수가 없는 지경에 이르게 하는 진동으로 구분하고 있다. 바람에 의한 진동에 대한 거주자들의 심리적인 변화는 진동가속도의 크기에 따라 변한다. 이러한 점을 감안하여 국제 표준화 기구(ISO6897)<sup>1)</sup>나 각국의 건축규준에서는 가속도의 크기를 정량적으로 구분하여 가속도의 크기와 사람이 느끼는 감지능력에 따라 구조물의 진동을 어느 한계이하로 제한하고 있다.

본 양양공항 관제탑의 경우, 풍하중에 의한 안정성과 진동의 크기를 검토하는 과정에서, 안전성보다는 진동의 크기가 관제사에게 지장을 줄 수 있을 정도로 크게 되어 이 진동을 억제할 필요성이 제기되었다. 진동을 제어하는 방법에는 구조물의 크기나 단면 형상을 변경하는 구조적인 방법과 인위적인 제진장치를 사용하여 진동을 억제하는 기계적인 방법이 있다. 구조적인 방법은 설계변경, 이에따른 재설계(재 실험), 진동제어 효과에 대한 정확한 예측이 어려운 반면, 기계적인 방법은 사용되는 제어장치와 구조물의 특성만으로도 진동제어 효과의 정확한 예측과 확실한 제어효과를 보장하기 때문에 최근들어 일반적으로 적용되는 제어방법이다.

\* 정희원 · 전남대학교 건축학부 전임강사

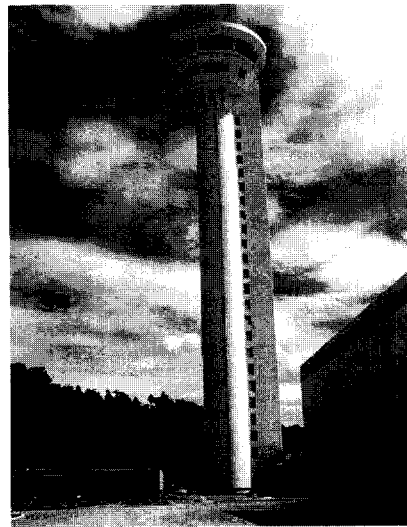
바람에 의한 건물의 진동을 억제하는 제진기술에 대한 연구가 국내에서도 활발히 전개되고 있다. 현대산업사회가 요구하는 고부가가치 기술이 건설 산업에 접목되면서 실 구조물에 제진기술을 적용하는 단계에 이르렀다. 이미 보편화되고 있는 초고층 건물이나 초고층 아파트와 이에 작용하는 동적하중의 예측기술 및 해석기술의 발달, 외부하중에 취약한 재반 구조물의 진동문제가 거주자의 생활환경문제로 대두되면서 이를 해결하고, 보다 쾌적한 주거환경을 제공하는 것을 하나의 건축상품으로 건설사들이 경쟁적으로 내세우면서 그 적용 분야가 더욱 확대되고 있다.

본 논문에서는 양양국제공항 관제탑에 설치된 수동형 타입의 제진장치인 동조질량감쇠기(TMD)의 설치배경과 제진장치의 특성 및 제어효과에 대하여 다룬다. 본 제진장치는 설계(Design), 제작(Fabrication), 설치(Installation) 및 성능시험(Commissioning)의 모든 과정이 국내의 기술로 이루어졌으며, 2000년 4월에 시작하여 2000년 11월에 설치공사가 완료되었고 관제탑 골조공사가 완료된 후 시스템 튜닝과 성능시험이 2001년 5월에 이루어졌다.

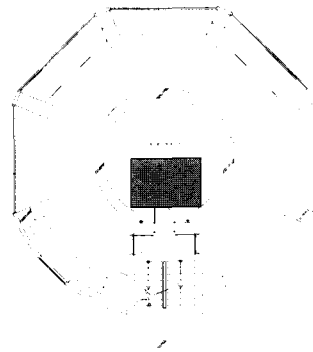
## 2. 관제탑의 특성

### 2.1 관제탑의 사양

양양공항의 관제탑은 높이가 국내에서 2번째로 높은 80.1m이며 shaft의 지름이 매우 작은 반면 관제실(VCR)의 폭은 최대 20m 가량으로 바람에 매우 취약한 형상을 가지고 있으며(그림 1(a)) 관제탑이 설치된 장소 또한 동쪽으로 동해에 서쪽으로는 태백산맥에 인접해 있어 지리, 지형적인 영향으로 바람이 매우 크게 작용할 것으로 예상되고 있다. 이러한 관제탑 형상과 지리적여건이 바람에 매우 취약하므로 관제탑의 안정성 및 사용성평가를 위하여 풍동실험이 수행되었다. 그림 2는 풍동실험의 전경을 나타내며 그림 3은 풍력실험 결과인 풍하중 스펙트럼을 나타낸다. 풍하중 스펙트럼에 의한 해석 결과 계단실의 영향을 받은 강축(Y방향)에 비하여 약축(X축)의 변위 및 가속도가 크게 나타나 1방향 제진장치를 설치하는 방안을 검토하게



(a) 관제탑 전경



(b) 관제탑 설치 위치

그림 1 관제탑의 전경 및 설치 위치

되었다.

제진장치는 VCR 바로 아래층인 14층에 설치되었으며 설치 평면이 그림 1(b)에 나타나 있다.

사용성 평가를 위한 풍속은 1년, 5년 재현주기 풍속을 사용하였으며, 해석결과 각 재현주기에서 X 방향의 가속도가 일본 건축학회 기준, ISO 6897 기준을 약 2배 이상 초과하는 것으로 나타났으며, 이것은 감쇠비를 2%로 가정한 결과이므로 그 이하의 감쇠비인 경우 가속도의 크기는 더욱 커질 것으로 예상된다.

다음 <표 1>은 수치해석에 사용된 관제탑의 동적특성을 나타낸다. 사용성에 문제가 있는 X방향만을 나타낸다.

표 1 관제탑의 사양

항목	사양	비고
관제탑의 일반화 질량	X방향 1782ton	15층의 모드값을 1로 정규화한 1차 모드 질량
관제탑의 1차 고유진동수	X방향 0.386Hz	Y방향 : 0.628Hz
관제탑의 1차 감쇠비	X방향 2%	예상치
관제탑의 높이	80.1m	15층 상당
관제탑의 최대폭	21m	shaft 폭 : 6m
TMD 설치 층	14층	약 72m

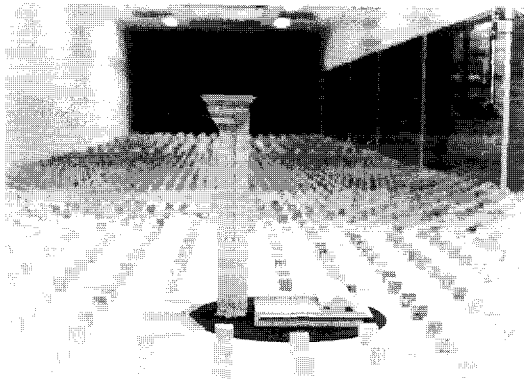
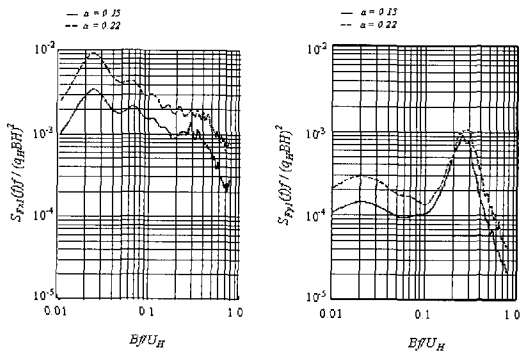


그림 2 관제탑의 풍력실험



### 3. 제진장치의 특성

#### 3.1 TMD의 설계 파라미터 산정

TMD에 의한 최적의 제어효과를 구현하기 위해

서는 설계파라미터인 TMD의 질량비에 따른 진동수, 감쇠비가 최적인 값으로 결정되어야 한다. TMD의 최적 설계파라미터를 구하기 위한 많은 연구가 이루어졌으며 외부하중의 특성 및 성능평가함수에 따라 최적파라미터 달라진다. 다음은 Den Hotdog에 의하여 제안된 최적파라미터값으로 질량비( $\mu$ )에 따른 진동수비( $\gamma$ )와 최적감쇠비( $\xi_{opt}$ )를 나타낸다.<sup>2)</sup>

$$\gamma = \frac{1}{1 + \mu}, \quad \xi_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu/2}{1 + 3\mu/2}} \quad (1)$$

이와 같은 최적의 파라미터가 주어진 경우 제진장치에 의한 구조물의 등가감쇠비 증가량은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta \xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2 + \mu}} \quad (2)$$

양양 관제탑에 설치된 TMD의 설계파라미터는 이상과 같은 방법에 의하여 구해진 파라미터와 함께 3.2절에서 기술하는 등가감쇠비 산정방법에 의한 파라미터를 보조적으로 사용하였다.<sup>3)</sup>

#### 3.2 제진장치에 의한 모드 등가 감쇠비

제진장치가 설치된 구조물의 운동방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) + B_2 u(t) \quad (3)$$

여기서  $B_2$ 는 감쇠장치에 의한 제어력의 위치를 나타내는 위치 행렬로 감쇠장치의 타입에 따라 달라지며 제어력  $u(t)$  또한 감쇠장치의 특성에 따라 달리 표현된다. 감쇠장치가 설치된 시스템의 각 모드의 일반에너지함수의 미분방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{e}_i = -a_i e_i + U_i(t) + F_i(t) \quad (4)$$

여기서  $e_i$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$e = z^T Q_i z, \quad Q_i = \begin{bmatrix} w_i^2 & \xi_i w_i \\ \xi_i w_i & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = 2\xi_i w_i$$

$\xi_i, w_i$ 는 각각  $i$  번째 모드의 감쇠비와 각속도를 나타내며,  $F_i(t)$ 는 풍하중이  $U_i(t)$ 는 제진장치의 제어력이  $i$  번째 모드의 일반 에너지함수에 미치는 영향을 나타내는 등가 제어에너지로 다음과 같이 일반화 에너지의 상수배로 나타낼 수 있다.

$$U_i(t) = -\beta_i e_i(t) \quad (5)$$

등가 제어에너지와  $e_i(t)$ 가 정상확률과정(stationary random process)이라는 가정을 만족한다면 식(5)의 양변을 평균화한 후 다음과 같이  $\beta_i$ 를 구할 수 있다.

$$\beta_i = -\frac{E[U_i(t)]}{E} [e(t)] \quad (6)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 평균화 기호이다. 식(6)을 이용하여 제진장치에 의해 증가된 구조물의 등가 감쇠비는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\xi_{i_{eq}} = \frac{\beta_i}{2w_i} \quad (7)$$

여기서  $\xi_{i_{eq}}$ 는  $i$  번째 모드의 제진장치에 의한 등가 감쇠비를 나타낸다.

TMD에 의한 감쇠비의 증가량은 구조물의 동조된 모드와 결합되어 2자유도계 시스템을 이룬다. 1차 모드와 TMD가 연계된 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{M} & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_i \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C} + c_t \varphi_{fi}^2 & -\varphi_{fi} c_t \\ -\varphi_{fi} c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_i \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K} + \varphi_{fi}^2 k_t & -\varphi_{fi} k_t \\ -\varphi_{fi} k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{f} \quad (8)$$

여기서  $\bar{M}, \bar{C}, \bar{K}$ 는 각각 예제구조물의 1차 모

드의 일반화 질량, 감쇠, 강성으로 최상층의 모드 형상이 '1' 이 되도록 정규화하여 구한 값이다.  $m_t, c_t, k_t$ 는 각각 제진장치의 질량, 감쇠, 강성을 나타내며 이때 질량  $m_t$ 는 질량비와 일반화질량의 곱 ( $\mu \bar{M}$ )으로 나타난다.  $\bar{f}, \varphi_{fi}$ 는 각각 일반화하중,  $i$ 차 모드의  $f$  층에서의 모드 값이다.

구조물을 TMD와 독립된 것으로 보고 TMD에 의한 제어력이 구조물에 작용한다는 관점에서 보면 식(8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta}_1 + 2\xi_1 w_1 \dot{\eta}_1 + w_1^2 \eta_1 = -\mu \dot{y} + \bar{f} \quad (9)$$

여기서  $\mu$ 는 질량비를 나타내며, 1차 모드에 동조된 TMD이다. 식(9)로부터 등가 제어에너지를 구하고 식(6)과 (7)을 이용하여 TMD에 의한 구조물의 등가감쇠비증가량을 closed form 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta \xi_{eq} = \frac{\sqrt{\mu}}{4} \quad (10)$$

이때 구조물과 TMD의 진동수비, 최적감쇠비는 다음과 같다.

$$\gamma = 1, \quad \xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu}}{2} \quad (11)$$

양양공항 관제탑에 설치될 TMD의 파라미터는 식(1)을 사용하였으며 시스템튜닝과 TMD의 최적 감쇠비 구현이 어려워 준최적감쇠비를 사용하여야 하는 경우에는 등가감쇠비 산정방법에 의한 식(11)을 참고적으로 사용하였다. 표 2는 이와 같은 방법에 의하여 구한 TMD의 동적특성을 나타낸다.

이상과 같은 제진장치의 동적특성 고려하여 제작한 TMD의 공장조립완료된 형상이 그림 4에 나타나 있다.

본 제진장치는 관제탑의 엘리베이터 실의 일부를 사용하며 유지관리를 위하여 제진장치 둘레에 최소 50cm의 통로를 만들어야 하기 때문에 작은 크기가 되었다. 그러나 제어효과를 만족하기 위하여 허용하는 제진장치의 크기내에서 최대한 질량을

표 2 TMD의 사양

항목	사양	비고
TMD 질량	이동질량 : 15ton	총질량 : 18ton
크기	2.5×2×1.8m	
스트로크	±0.3m	
범퍼 스트로크	0.05m	
고유 진동수	X 방향 : 0.381z	스프링의 개수 변화
고유 감쇠비	X 방향 : 약 6% (가이드레일의 마찰고려)	준최적 감쇠비

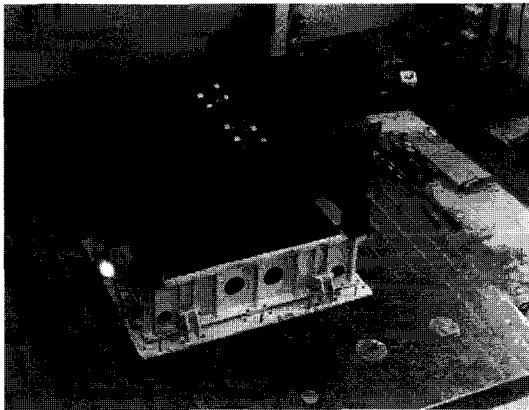


그림 4 제작 완료된 제진장치 형상

크게하여 만든 질량체의 무게가 15ton 이다. 이것은 1차 모드질량의 1%가 안되지만 한정된 제진장치 크기에서 가능한 크게 산정된 것이다.

본 제진장치는 질량체 외에도 기초 플레이트, 하부 프레임, 가이드레일, 상부프레임, 스프링 및 댐퍼로 구성되어 있다. 그 외에도 각종 브라켓 및 버퍼등이 제진장치의 기능 및 안정성을 위하여 구성된다. 보통 이동질량을 제외한 제진장치 구성기기의 질량은 총질량의 20%내외로 설계되며, 본 제진장치의 경우 약 84%가 이동질량이 차지한다. 제진장치와 구조물의 동조(tuning)는 스프링의 개수로 한다. 스프링은 상부프레임과 이동질량사이에 설치되면 상부프레임 한번에 8개 총 16개의 스프링 설치 단이 있다. 스프링이 모두 설치된 경우의 진동수는 수치해석적으로 구해진 1차 고유진동수의 약 20% 초과되도록 스프링 한 개의 강성을 결정하

였다. 그러나 스프링의 개수로 시스템 튜닝을 하기 때문에 수치적으로 요구되는 진동수비를 충족시키지 못하는 경우가 있으므로 스프링의 강성을 약간 달리하여 제작하기도 한다.

TMD의 최적감쇠비 또한 기존의 오일점성댐퍼를 이용하기 때문에 요구되는 정확한 감쇠비를 구현할 수 없다. 이러한 한계 때문에 TMD의 감쇠비는 준최적감쇠비로 결정되며, 가이드레일의 마찰력에 의하여 최적감쇠비의 구현은 현실적으로 불가능한 경우가 대부분이다. 가이드 레일의 마찰력은 TMD의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 가능한 작게 하여야 한다. 그러나 가이드레일에서 마찰력을 없애는 것은 불가능하기 때문에 일정량이하의 값이 유지되도록 하여야 한다. 본 제진장치에 사용된 가이드레일의 마찰계수는 0.3%로 이것은 관제탑이 약 3gal 이하로 진동하는 경우에는 TMD는 작동하지 않는 것을 의미하기 때문에 본 제진장치의 trigger 가속도는 3gal 이된다.

제작이 완료된 후 공장시험을 통하여 장치의 성능을 평가한다. 공장시험에는 치수 형상 및 도색 검사등과 같은 일반적인 검수와 조립과정을 확인하는 가조립, 제진장치의 성능에 필요한 이동질량과 가이드레일의 마찰계수를 측정하는 마찰력 시험, 스프링의 균일성과 선형성을 평가하는 복원력시험, 장치의 동적특성을 평가하기 위한 자유진동시험 및 강제진동시험 수행하여 진동수 및 감쇠비를 추정한다. 공장시험은 검수 및 각각의 성능시험 및 공개시험을 포함하여 약 1개월 정도 소요되었다.

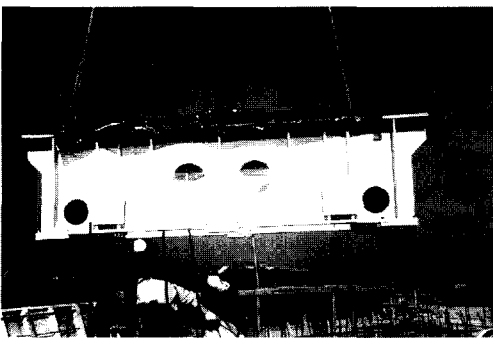
#### 4. 제진장치 설치

제진장치가 설치될 층의 골조공사가 완료되고 충분한 슬라브 보강과 양생이 되면 설치작업이 수행된다. 설치작업은 관제탑의 골조공사 공정에 영향을 미치지 않도록 가능한한 조속히 이루어져야 한다. 특히 인양과정에는 제진장치 소요공간 이상의 작업공간이 필요하기 때문에 관제탑 다른 공정이 시작하기 전 신속히 처리되어야 한다.

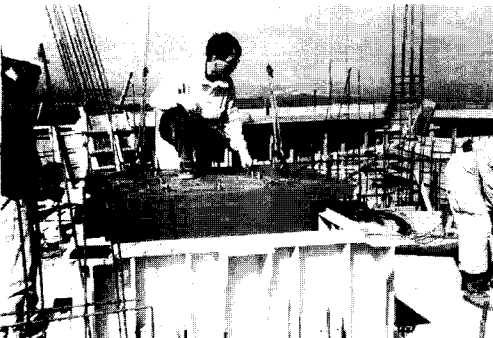
설치공정은 크게 기초플레이트 설치공사, 인양



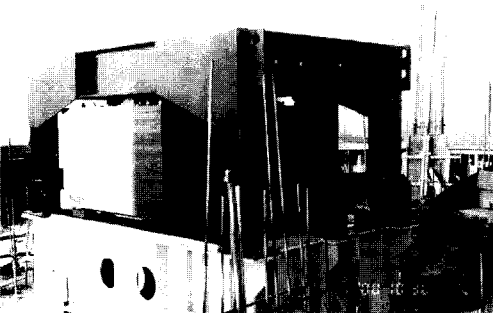
그림 5 기초플레이트 공사



(a) 기초프레임 인양



(b) 질량체 조립



(c) 상부프레임 조립

그림 6 제진장치 인양 및 조립

및 조립, 후속공사로부터 제진장치를 보호하기위한 보양으로 이루어진다.

기초 플레이트 설치공사는 제진장치와 설치위치의 슬라브사이를 완전 고착시키기 위한 작업으로 25mm 두께의 철판을 제진장치가 설치된 위치에서 슬라브에 앵커볼트로 연결한 후 그 사이를 그라우팅 처리하는 공사이다.(그림 5) 제진장치의 제어력이 슬라브에 전달되는 곳이므로 비상시 충격이나 지진에 의한 전도모멘트등 충분히 견딜수 있도록 설계 시공되어야 한다.

다음은 제진장치의 인양과 조립과정을 나타낸다. 조립과정은 시공요령서에 따라 수행되며 공장 시험단계의 가조립하는 과정에서 발생할수 있는 모든 문제점을 사전에 파악하는 것이 중요하다.

그림 7은 현장조립 완성된 제진장치의 형상을 나타낸다.

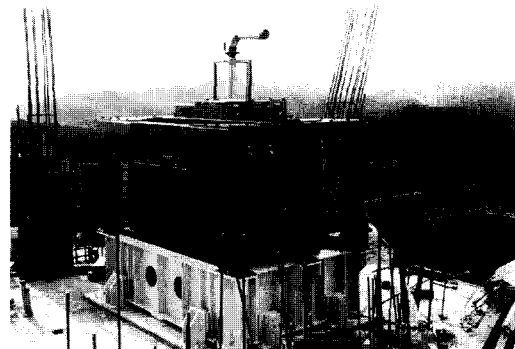


그림 7 현장조립 완료된 제진장치

## 5. 현장 성능시험

관제탑 전체의 골조공사가 완료되고 내부 마감공사가 진척된 후에 관제탑의 동적특성과 제진장치의 성능을 평가한다. 제진장치 동적특성은 수치해석으로부터 구한 관제탑의 동적특성에 기인하여 제작된 것이기 때문에 관제탑의 실제 동적특성값이 변경되면 제진장치의 동적특성또한 조정되어야 한다. 관제탑의 동적특성을 나타내는 진동수와 감쇠비는 수치해석의 과정의 단순화, 시공과정에서 얼마든지 변경될수 있으므로 실험을 통하여 실제 값을 구해야 한다.

관제탑의 동적특성을 구하기 위하여 이미 설치되어 있는 TMD를 가진하는 방법을 고려하였다. 관제탑을 직접적으로 가진하는 가진기 대신에 그보다 더 작은 힘으로 TMD를 가진하고 TMD가 간접적으로 관제탑을 가진하는 방법을 사용하였다. TMD를 가진하는 것은 인력을 이용하여 수행하였다.<sup>4)</sup> TMD 양변에 2-3사람 조를 지어 TMD의 진동수에 맞게 점차적으로 공진을 시킴으로써 관제탑을 가진하였다. 이와 같은 과정을 설명하기 위하여 식(9)를 다시 나타낸다.

$$\ddot{\eta}_1 + 2\xi_1 w_1 \dot{\eta}_1 + w_1^2 \eta = -\mu \ddot{y} + \bar{f} \quad (9)$$

식(9)에서 외부하중은 인력이 관제탑과 제진장치 사이에서 상쇄되므로 TMD의 절대가속도와 관제탑의 가속도를 계측한후 시스템 식별을 통하여 관제탑의 동적 특성을 구할수 있다. 다음 그림 8은 시스템 식별을 위한 계측과정을 나타낸다.

그림 9는 현장에서 응답을 계측하는 모습이다.

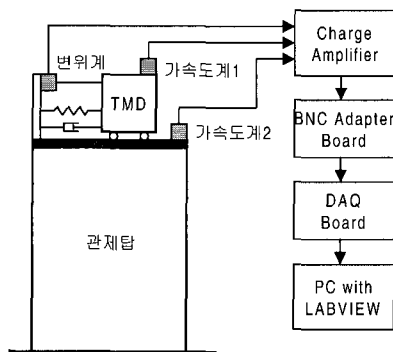


그림 8 시스템 식별을 위한 응답계측 과정



그림 9 현장 계측

이와 같은 방법을 통하여 구한 관제탑의 동적 특성과 이를 기준으로 시스템 튜닝과정을 통하여 구한 관제탑의 동적 특성이 표 3에 나타나 있다.

표 3 시스템 튜닝후 관제탑과 제진장치의 동적특성

구분	항목	값
관제탑	모드질량	1746ton
	진동수	0.3667Hz
	감쇠비	1%
제진장치	질량	15ton
	진동수	0.36Hz
	감쇠비	7%

표 3과 같이 제진장치가 튜닝이 되었을 때 성능을 평가하기 위하여 수치해석을 수행한 결과가 그림 10에 나타나 있다. 외부하중은 재현주기 1년의 풍하중을 사용하였으며 제어효과는 비제어시 8.34gal에서 4.6gal로 제진효과를 가지는 것으로 나타났으며 식(6), (7)을 이용하여 구한 제진장치에 의한 구조물의 등가감쇠비는 1%에서 3.5%로 증가하는 것으로 나타나 제어효과가 약 45% 정도임을 알 수 있다.

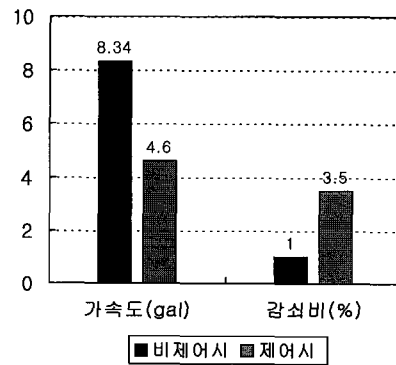


그림 10 제진장치의 성능

## 6. 결 론

본 연구에서는 양양국제공항 관제탑의 제진장치 특성 및 현장성능시험을 통한 제진 효과에 대하여 고찰하였다.

설계, 제작에서부터 현장 성능시험의 전 과정이 국내의 기술로 이루어졌으며 제진장치의 성능 또

한 수치해석에 의존한 것이지만 제어효과 45%로 나타나 제작, 설치과정의 오차가 작게 나타난 것은 큰 의의라고 사료된다.

그러나 지속적인 유지관리를 통하여 제진장치를 상태를 점검하고, 제진장치의 성능또한 강풍시 관제탑과 제진장치의 응답을 계측하여 실제 풍하중에 대한 제어효과가 유지되는 지를 고찰할 필요가 있다.

바람에 의한 구조물의 사용성은 점차 확대되어 가고 있는 추세이다. 그러나 국내의 경우 바람에 대한 사용성 기준이 아직 정립되어 있지 않은 상태이며, 적용하는 외국의 사용성 평가의 기준이 달라 같은 해석결과라 하더라도 평가결과가 달라 그 정비가 시급한 상황이다. 사용성 평가기준의 정립과 병행하여 진동제어장치에 대한 국내의 고유기술로 개발, 완성해야할 단계라도 사료된다. 본 관제탑의 제진장치 설치를 계기로 제진장치에 대한 다각적인 접근과 개발, 제진장치의 설계 및 제작에

대한 통합적인 연구와 지속적인 관심과 투자가 있어야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion, ISO 6897, 1984
2. Den Hartog. J., Mechanical vibrations, 4th ed., McGraw-Hill, NewYork, fi56
3. 황재승, 황종국, 이상현 (2001), “제진장치가 설치된 구조물의 등가감쇠비 산정에 관한연구”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제17권 제5호(통권 151), 2001. 5, pp.19~26
4. 주석준, 황재승, 김윤석, “양양국제공항관제탑의 동조질량감쇠장치의 제진성능” 한국풍공학회, 춘계학술발표대회 논문집, 2002, pp.183~189 