

# 난류하에서의 TMD에 의한 현수교 주탑의 진동제어

## Vibration Control for Tower of Suspension Bridge under Turbulence using TMD

김 기 두<sup>1)</sup> · 황 윤 국<sup>2)</sup>

Kim, Ki du      Hwang, Yoon Koog

변 윤 주<sup>3)</sup> · 장 동 일<sup>4)</sup>

Byun, Yun Joo      Chang, Dong Il

요약 : 케이블이 가설되기 전까지 외팔보 형태로 지지되는 현수교의 주탑에 불규칙적인 변동 공기력이 작용할 때 발생하는 버페팅은 구조물의 기본 고유진동수와 일치하는 풍 속이 존재하고 이에 따른 주탑의 공진에 의해 큰 응답을 유발할 수 있다. 버페팅 하중에 의한 동적 응답을 감소시키기 위해서 제진장치의 일종인 TMD(Tuned Mass Damper)를 부착한 주탑의 거동특성에 관한 연구를 유한요소법에 의하여 시간영역에서 수행하였다. 버페팅 하중을 구하기 위하여 주파수 영역의 속도스펙트럼을 시간영역의 무작위변량으로 변환시켰으며, peak factor를 이용하여 일정기간동안 일어날 수 있는 구조물의 최대 변위의 기대치를 구하였다. 최적의 TMD 부착위치와 제원을 변수별 수치해석을 통하여 결정하였으며, 최적의 제원을 갖는 TMD에 의한 풍속별 진동제어 효과를 검토하였다.

ABSTRACT : Before cables are constructed, tower of suspension bridge is behaved as a cantilever type. Buffeting occurred by unsteady loading of the tower due to velocity fluctuation in the oncoming flow has a wind velocity consistent with fundamental frequency of the tower and may give rise to large response by the tower resonance. To reduce the dynamic response by buffeting, the behavior of tower with TMD(Tuned Mass Damper) has studied using finite element method in time domain. The buffeting was obtained by transforming the velocity spectrum in frequency domain to random variable in certain time domain. The most probable maximum displacement which can

1) 정회원, 시설안전기술공단 교량진단본부 부장, 공학박사

2) 한국건설기술연구원 수석연구원

3) 정회원, (주)신성엔지니어링 기술연구소 소장

4) 정회원, 한양대학교 지구환경건설공학부

본 논문에 대한 토의를 1997년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

be occurred during the time interval was obtained using peak factor. The optimum location for TMD installation and TMD specification were decided by parametric study. Also, the effect of vibration control about various wind velocity was studied by the TMD which has optimum specification and location.

핵심용어 : 버페팅, TMD, 현수교 주탑, 진동제어

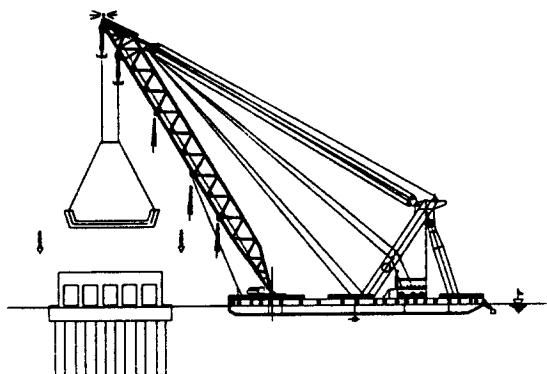
KEYWORDS : buffeting, TMD, tower of suspension bridge, vibration control

## 1. 서 론

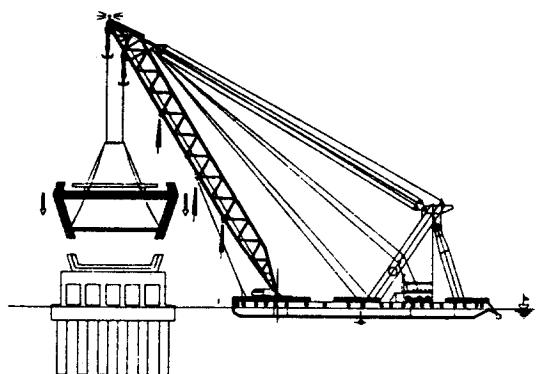
현수교는 케이블로 지지되는 장대교량으로 휨강성과 비틀림 강성이 매우 작아서 풍하중에 대해서 민감하게 거동하고 구조특성이 매우 복잡하여 설계, 제작 및 가설의 각 단계에서 발생하는 각종 오차는 구조물의 형상, 장력, 용력 등에 영향을 주는 요인을 유발한다. 따라서, 이러한 오차를 허용 범위 내로 제한하여 구조물의 안전성 확보와 시공 정밀도의 향상을 위한 대책강구의 필요성이 증대하고 있다. 특히, 현수교의 시공단계에 있어서 풍하중에 의하여 주탑에 발생되는 용력은 때로는 구조물의 완성단계에서 발생되는 용력보다 큰 경우가 발생하여 국부적으로 주탑부재에 손상을 줄 수가 있다. 최근 가설 중인 장대교량의 경우, 시공 중 계측시스템을 구성하여 주기적으로 계측하므로 시공시 안전하고 정밀한 시공이 되도록 함과 동시에 각 부재에 과응력이 유발되지 않도록 하며, 완공후 유지관리 시스템으로의 전환을 계획하고 있다.

본 연구는 신국제공항과 수도 서울을 연결하게 될 연륙교인 영종대교를 대상으로 하였다. 영종대교는 중앙경간 300m, 측경간 125m의 3경간 연속 자정식 현수교이다. 상부 보강형은 해상의 임시 가벤트 위에 설치되므로 시공도중 풍하중에 의한 진동의 영향은 심각하지 않다. 그러나, 3,000ton 해상크레인을 이용하여 3단계의 대블록 가설공법으로 설치될 예정인 높이 100m의 주탑(그림 1 참조)은 케이블이 가설되기 전까지 약 2년 동안 외

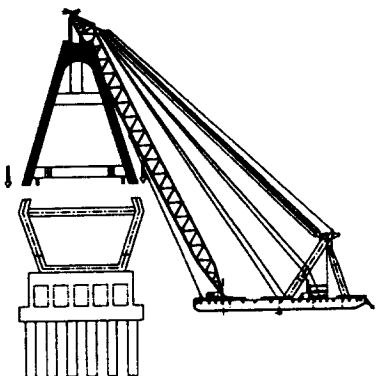
팔보로서 지지되어 있어야 하므로 시공 중 계측시스템을 이용하여 풍하중에 의한 진동을 측정하고 진동제어를 통하여 주탑의 손상을 방지하여야 한다.



(a) 주탑시공 1단계



(b) 주탑시공 2단계



(c) 주탑시공 3단계

그림 1. 주탑의 시공단계

바람에 대한 장대교량의 공기역학적 안정성 문제는 1940년대 말 미국의 Tacoma Narrow교가 풍하중을 정적 하중으로 환산하여 상당히 큰 하중에 대해 안전하게 설계되었음에도 불구하고 그다지 강하지 않은 바람(19m/sec)에 의해 붕괴되는 사고가 발생한 이래 본격적인 연구가 시작되었으며, 최근 컴퓨터 및 구조해석 기술의 급속한 발전으로 장대교량의 설계시 풍하중에 의한 정적 및 동적 영향을 설계 초기 단계부터 반영하고 있다.

바람에 의한 교량의 거동은 정적 거동과 동적 거동으로 나눌 수 있다. 정적 거동에는 6분력으로 분해되는데 기류방향의 항력, 기류직각방향의 양력 및 횡력과, 이 힘의 방향을 회전축으로 하는 rolling, pitching 그리고 yawing 모멘트가 있다. 이러한 공기력에 의해 주탑은 부재의 변형 및 전도 등의 불안정 현상이 발생할 수 있다. 동적 거동에는 와류에 의한 진동(vortex induced oscillation)과 단면비  $B/D$ (폭/높이)가 0.7~2.8인 사각형 단면에서 주로 발생하는 기류직각방향으로 진동하는 갤로핑(galloping), 바람방향에 수직인 교축을 중심으로 발생하는 발산형 진동인 플러터(flutter) 등이 있다. 바람의 난류성에 기인하여 구조물에 불규칙적인 변동 공기력이 작용할 때 발생하는 베페팅(buffeting) 진동현상은 대기류와 같이 난류성

을 포함하는 기류 내에서는 어떠한 구조물에서도 발생할 수 있는 강제진동현상으로 무작위 진동해석을 통해 구조물의 응답특성을 알 수 있다.<sup>(1)</sup>

풍하중에 의해 지속적인 진동이 발생할 경우, 주탑 블록의 용접 연결부에 손상이 발생될 수 있는 가능성이 있을 뿐만 아니라 케이블 가설 작업을 방해할 수 있다. 최근 들어 시공 중 주탑의 진동을 방지하기 위하여 진동 제어에 대한 요구가 증가하고 있다. 영종대교의 경우, 풍하중에 의한 응답폭을 감소시키기 위해서 해상에 가이드 포스트(guide post)를 세워 케이블로 주탑을 연결하여 주탑의 진동을 방지할 수 있으나 기초지반이 연약하여 이 시공방법은 비경제적이므로 주탑의 기본 고유진동수와 동조시킨 제진 장치를 주탑에 설치하여 진동을 제어하는 것이 효과적이다. 제진장치를 이용한 진동제어 시스템 중에서 TMD는 유지 관리비가 적게 들고 넓은 범위의 진동수를 가지는 여러 하중 특성에 저항할 수 있는 장점이 있어서 최근 국내에서도 연구가 진행되고 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 영종대교의 주탑을 대상으로 베페팅 하중에 의한 진동해석을 수행한 후 수동적 감쇠 장치인 TMD를 부착하여 주탑의 거동 특성을 연구하였다. TMD의 최적위치를 결정하기 위해 주탑의 특정부위에 TMD를 설치하였으며, 설치된 TMD의 질량은 전체 구조물 질량의 0.5%, 1%, 2% 그리고 3%로 변화시켜 가며 그 효과를 검토하므로써 최적의 TMD 질량을 결정하였다. TMD를 여러개 설치할 경우 각 부착위치에서의 최적의 TMD 진동수를 구하고 부착 전·후의 주탑의 응답을 구하여 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 실시하였으며, peak factor를 이용하여 주탑의 최대 응답치를 구하였다. 또한 TMD의 최대변위를 제어하기 위한 연구를 수행하였다.

해석을 위하여 기존의 구조해석 프로그램인 pc-feap<sup>(3)</sup>에 TMD의 질량, 강성 및 감쇠를 고려할 수 있는 TMD 요소와 시간이력해석을 위한 직접적분법 중 감쇠진동의 정확도를 효과적으로 유지 할 수 있는  $\alpha$ -method<sup>(4)</sup>를 추가시켰다. 인공적인

풍속을 발생시키기 위해 속도 스펙트럼을 이용한 WSM(Wave Superposition Method) 알고리즘<sup>(5)</sup>을 이용하였다. 주탑은 3차원 보조소를 이용하여 모델링하였으며, 구조물의 질량은 집중질량(lumped mass)으로 구성하였다.

## 2. 주탑에 작용하는 풍하중

### 2.1 난류에 의한 풍속 생성

기본풍속( $U_{10}$ )은 구조물이 설치될 지점의 기상 자료를 바탕으로 구조물의 사용연한이나 전반적인 안정성 등을 고려하여 결정하게 된다. 구조물이 가설될 지점의 지형조건 및 지표면의 조도 등에 의해 풍속은 높이에 따른 분포를 갖게 되며, 지표면에서 일정한 높이( $Z$ )에서 평균풍속( $\bar{U}$ )의 연직 방향 분포는 대수함수로 증가하는 분포를 갖는 식 (1)로 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$\bar{U}(Z) = \frac{1}{K} U^* \ln \left\{ \frac{Z-d}{Z_0} \right\} \quad (1)$$

여기서,  $U^*$ 은 전단속도,  $K$ 는 von Kármán 상수 ( $K=0.4$ ),  $Z_0$ 는 조도길이,  $d$ 는 수평풍속이 0인 높이이다.

난류에서 주기는 속도 스펙트럼( $S_u$ )에 의해 표현되며, 이는 다른 주기를 가진 소용돌이와 연관된 단위시간당 운동에너지를 의미한다. Simiu<sup>(7)</sup>에 의해서 제안된 속도 스펙트럼은 다음과 같다.

$$n \frac{S_u(Z, n)}{U^*} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (2)$$

여기서,  $f = \frac{nZ}{\bar{U}(Z)}$ 이고,  $n$ 은 풍속 변화의 진동수이다.

버페팅 하중의 계산에 필요한 변동풍속의 시간 이력은 PSD(Power Spectrum Density)로 표현되며, WSM을 이용하여 풍속 스펙트럼으로부터 구

하였다. autospectrum으로 표현된 Gaussian 무작위변량, 즉 변동풍속은 불규칙 위상각을 갖는 여현함수의 합으로 표현되어질 수 있다.

$$u(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3)$$

여기서,

$$A_k = [S(\omega_k) \Delta w]^{1/2} \quad (4a)$$

$$\omega_k = \omega_i + (k - \frac{1}{2}) \Delta w \quad (4b)$$

$$\Delta w = \frac{(\omega_u - \omega_l)}{n} \quad (4c)$$

위의 식에서  $A_k$ 는 진폭을 나타내며,  $S(\omega_k)$ 는 일면도 함수(one-sided spectral density function)이다.  $\phi_k$ 는 구간  $[0, 2\pi]$ 사이에서 일정한 분포를 갖는 임의의 위상각이며,  $\omega_k$ 는 스펙트럼 밀도함수가 정의되는 구간( $\omega_u < \omega_k < \omega_l$ )내에서의  $k$ 번째 진동수이다.

그림 2는 WSM을 이용하여 주파수 영역의 풍속스펙트럼으로 부터 재현한 시간이력 중 30m/sec의 풍속파형을 예로서 나타낸 것이다.

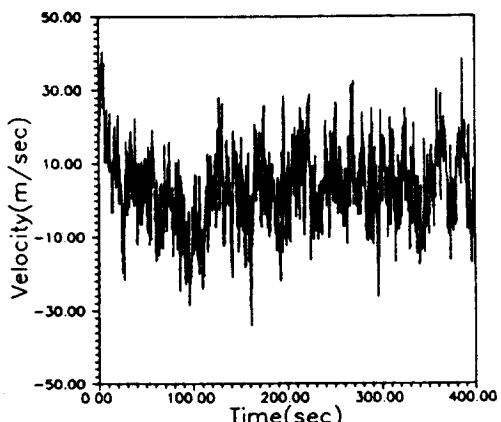


그림 2. 생성된 풍속시간이력의 예

## 2.2 베페팅

풍속( $U(t)$ )은 평균 풍속( $\bar{U}$ )과 난류에 의한 풍속( $u(t)$ )의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 바람방향의 단위 길이당 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_D(t) &= \frac{1}{2} \rho C_D B U^2(t) \\ &= \frac{1}{2} \rho C_D B \bar{U}^2 + \rho C_D B \bar{U} u(t) + \frac{1}{2} \rho C_D B u^2(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기밀도,  $C_D$ 는 항력계수,  $B$ 는 구조물의 폭을 나타낸다.

$\frac{u(t)}{\bar{U}}$ 는 0.2보다 작으므로  $u^2(t)$ 를 무시하면 난류에 의한 풍하중  $f_D'$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$f_D'(t) = \rho C_D B \bar{U} u(t) \quad (7)$$

난류의 불규칙적인 분포를 고려하여 베페팅 하중의 밀도함수는 autocorrelation에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{fD}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_D'(t) f_D'(t+\tau) d\tau \quad (8) \\ &= \rho^2 \bar{U}^2 B^2 C_D^2 \bar{u}(t) \bar{u}(t+\tau) \end{aligned}$$

$R_{fD}$ 를 Fourier 변환시키면 spectral density는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{fD}(n) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{fD}(\tau) \cos 2\pi n \tau d\tau \quad (9) \\ &= \rho^2 \bar{U}^2 B^2 C_D^2 S_u(n) \end{aligned}$$

여기서,  $S_u(n)$ 는 풍속의 밀도함수이다. 그러나 실제 구조물에서 난류흐름의 방향이 왜곡되므로 식(9)를 Vickery<sup>(8)</sup>에 의해 제시된 보정항  $\chi(n)$ 을 사용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$S_{fD}(n) = \rho^2 \bar{U}^2 B^2 C_D^2 S_u(n) \chi^2(n) \quad (10)$$

여기서,

$$\chi(n) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{2n \sqrt{A}}{\bar{U}(Z)} \right]^{4/3}} \quad (11)$$

여기서,  $A$ 는 구조물의 투영면적이다.

## 2.3 평균 최대 응답치

구조물의 응답이 특정값 이상 초과될 확률은 peak factor( $\bar{k}$ )에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\bar{k}(Z) = \sqrt{2 \ln [v_x(Z) T]} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln [v_x(Z) T]}} \quad (12)$$

여기서,  $T$ 는 최대응답이 일어날 때의 주기이며,  $v_x(Z)$ 는 다음과 같다.

$$v_x(Z) = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} n^2 S_x(Z, n) dn}{\int_0^{\infty} S_x(Z, n) dn}} \quad (13)$$

여기서,  $S_x(Z, n)$ 는 변위의 밀도함수이다.

난류에 의한 바람방향의 변위에 대한 제곱 평균값은 다음과 같다.

$$\sigma_x^2(Z) = \int_0^{\infty} S_x(Z, n) dn \quad (14)$$

균일하게 분포하는 정상 무작위파 중 주기 내에서 일어날 수 있는 최대응답의 기대치는 다음과 같다.

$$X_{\max}(Z) = \bar{k} \sigma_x(Z) \quad (15)$$

### 3. TMD가 설치된 주탑의 진동

#### 3.1 TMD 구조

TMD는 주구조물에 붙어 있는 상대적으로 작은 진동 구조시스템으로 TMD의 고유진동수를 구조물의 저차 모드의 진동수에 동조시켜 공진현상 시 구조물의 동적 응답진폭을 감소시켜 주는 장치이다. 그림 3은 1자유도계의 구조물에 TMD를 부착한 경우를 나타낸 것이다.

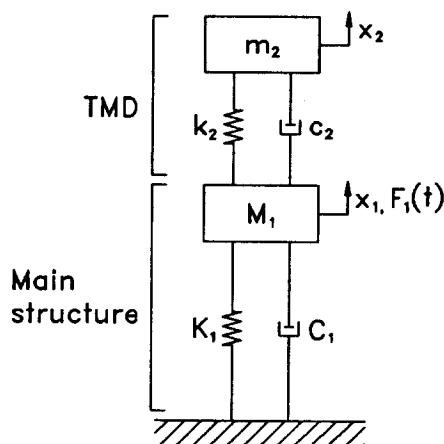


그림 3. TMD를 부착한 1자유도계

TMD는 주구조물보다 큰 진동을 하므로 주구조물의 동적 응답은 구조물 자체의 감쇠보다 TMD의 감쇠에 의해 더 큰 영향을 받는다. 주구조물과 TMD의 진동수는 아주 근사한 값으로 주구조물의 자유진동 부분에서 beating현상이 발생하여 응답이 커지는 경향이 있다.

본 연구에서는 TMD의 감쇠상수를 산정하기 위해 외력이 불규칙하중인 경우에 대해 일반적으로 적용되는 Den Hartog<sup>(10)</sup>가 제안한 식(16)을 사용하였다.

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{1+3\mu/2}} \quad (16)$$

여기서,  $\xi$ 는 TMD의 감쇠상수이며,  $\mu$ 는 주구조물에 대한 TMD 질량의 비이다.

식(16)을 이용하여 해석할 경우 계산과정이 간단하여 해석시간의 절약 및 주구조물의 응답이 최소화되는 장점이 있으나, 이에 따른 과대한 TMD의 변위를 유발하여 실제상황과는 거리가 있는 해석결과를 산출할 우려가 있다. 따라서 이러한 경우에 대해서는 시행착오법에 의한 반복기법을 적용하여 제한된 TMD 변위내에서 주구조물의 응답이 최소가 되는 감쇠상수를 구하였다. 반복기법에 의해 최적의 감쇠상수를 각 단계별로 0.1%씩 변화시키므로서 TMD의 최대변위를 제어하였다.

#### 3.2 운동방정식

다자유도계로 모델링한 주탑의 절점에 1자유도계를 가진 TMD를 부착하는 경우 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M] \begin{Bmatrix} \{ \dot{u}_1 \} \\ \{ \ddot{u}_2 \} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \{ \dot{u}_1 \} \\ \{ \ddot{u}_2 \} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} \{ u_1 \} \\ \{ u_2 \} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

여기서,  $\{u_1\}$ ,  $\{\dot{u}_1\}$ ,  $\{\ddot{u}_1\}$ 는 각각 주탑의 변위, 속도 및 가속도를 나타내고,  $u_2$ ,  $\dot{u}_2$ ,  $\ddot{u}_2$ 는 각각 TMD의 변위, 속도 및 가속도를 나타낸다.  $F_1$ 은 식(10)을 이용하여 구한 공기력이며, 전체구조계의 질량, 감쇠 및 강성행렬은 다음과 같이 구성된다. 식(18)에서  $i$ 는 TMD를 부착한 절점을 의미한다.

$$[M] = [M_1] + \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & m_2 \end{bmatrix}_i \quad (18a)$$

$$[C] = [C_1] + \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & c_2 & -c_2 & \dots \\ \dots & -c_2 & c_2 & \dots \end{bmatrix}_i \quad (18b)$$

$$[K] = [K_1] + \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & k_2 & -k_2 \\ \dots & -k_2 & k_2 \end{bmatrix}_i \quad (18c)$$

감쇠진동을 고려할 경우, 시간영역에서의 Newmark 수치적분법은 정확도가 떨어지므로 Hilber, Hughes 그리고 Taylor(HHT,  $\alpha$ -method)<sup>(4)</sup>에 의해서 제안된 다음과 같은 방법을 이용하여 시간영역에서 해석을 수행하였다.

$$\begin{aligned} M \ddot{u}_{n+1} + (1+\alpha)C \dot{u}_{n+1} - \alpha C \dot{u}_n + (1+\alpha)K u_{n+1} - \alpha K u_n \\ = F_1(t_{n+\alpha}) \end{aligned} \quad (19a)$$

$$t_{n+\alpha} = (1+\alpha)t_{n+1} - \alpha t_n = t_{n+1} + \alpha \Delta t \quad (19b)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1-2\beta) \dot{u}_n + 2\beta \dot{u}_{n+1}] \quad (19c)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t [(1-\gamma) \dot{u}_n + \gamma \dot{u}_{n+1}] \quad (19d)$$

식(19)는 Newmark의 직접적분법을 수정한 것으로 이 식에서 사용된  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 수치해석시 해의 안정성 및 정확성을 확보하기 위한 매개변수이며,  $\alpha=0$ 이면 HHT방법은 일반적인 Newmark 방법과 동일하다. 여기서,

$$\alpha \in [-\frac{1}{3}, 0], \beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2, \gamma = \frac{1}{2} - \alpha$$

이면 계산결과는 무조건 안정(unconditionally stable) 상태이며, 본 연구에서는  $\alpha=-0.05$ 를 적용하였다.

#### 4. 예제해석 결과 및 분석

##### 4.1 해석모형

TMD에 의한 현수교 주탑의 진동제어에 관한 연구를 위하여 높이가 100m인 영종대교의 주탑을 해석대상으로 하였다. 주탑의 해석모형은 그림 4와 같으며, 각 절점당 6개의 자유도를 가진 3차원

뼈대구조로 모델링하였고 TMD는 주탑의 교축방향 변위를 제어하기 위해 1개의 자유도를 가진 시스템으로 모델링하였다. 주구조물의 변위가 주로 저차 모드에 의해 결정되므로 주탑의 내풍 대상모드를 1차 모드로 하고 강성과 질량을 구조물의 1차 모드 고유진동수에 비례시켰다.

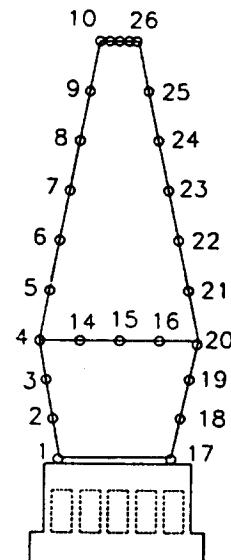


그림 4. 주탑의 해석모형

##### 4.2 TMD의 효과 검증

자유진동하에서 TMD 효과를 검증하기 위해 TMD를 부착하지 않은 경우와 주탑의 최상단에  $\mu=1.0\%$ 의 TMD를 부착한 경우에 발생하는 주탑의 자유진동응답에 대한 해석을 실시하였다. 그림 5는 주탑의 1차 모드 고유진동수에 TMD를 동조시킨 경우 발생하는 자유진동응답의 PSD와 TMD를 부착하지 않은 경우의 PSD를 비교한 것이다. 그림 5에 의하면 TMD를 부착하기 전의 주탑의 기본 고유진동수(0.315Hz)는 주파수가 다른 두개의 성분(0.248Hz와 0.363Hz)으로 분산되어졌으며, 시간이력의 변위진폭의 크기를 반영하는 PSD의 크기도 대폭 감소하여 TMD의 진동제어 효과를 알 수 있다.

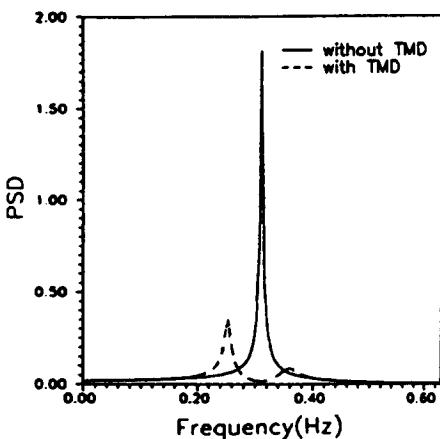


그림 5. TMD 부착 전, 후의 FFT 분석결과 비교

#### 4.3 TMD의 최적위치

풍속  $U_{10} = 30\text{m/sec}$ 에 대해  $\mu=1.0\%$ 의 TMD 최적위치를 구하기 위한 해석을 실시하였다. TMD의 수는 2, 4 및 6개를 대상으로 하였다. 각 경우에 대한 해석결과는 다음 표 1과 같으며, 대표적으로 TMD를 2개 부착한 경우의 주탑의 응답파형을 그림 6에 나타내었다. 또한 TMD 부착 전, 후의 FFT 분석결과를 그림 7에 비교하여 나타내었다. 그림 6을 살펴보면 풍하중에 대한 주탑의 응답특성은 풍하중의 특성이 그대로 반영되고 있는데 이는 풍하중의 주 진동수( $0.05\text{Hz}$ )보다 주탑의 고유진동수가 상대적으로 상당히 높아 주탑이 저차 진동수를 갖는 풍하중에 대해서는 강체진동을 하는 것으로 판단된다. 표 1의 결과에 의하면

표 1. TMD 수량별 최적위치 및 최적 진동수

TMD 수	TMD			TMD 수	TMD		
	부착순서	최적위치	최적진동수		부착순서	최적위치	최적진동수
2	1	10	0.315Hz	6	1	10	0.315Hz
	2	26	0.315Hz		2	26	0.315Hz
4	1	10	0.315Hz	6	3	9	0.304Hz
	2	26	0.315Hz		4	25	0.304Hz
	3	9	0.304Hz		5	8	0.313Hz
	4	25	0.304Hz		6	24	0.313Hz

TMD의 최적 진동수는 주탑의 기본 고유진동수인  $0.315\text{Hz}$  부근에서 결정되며, TMD의 최적위치는 주탑의 최상단에서부터 지점까지 순차적으로 나타남을 알 수 있다.

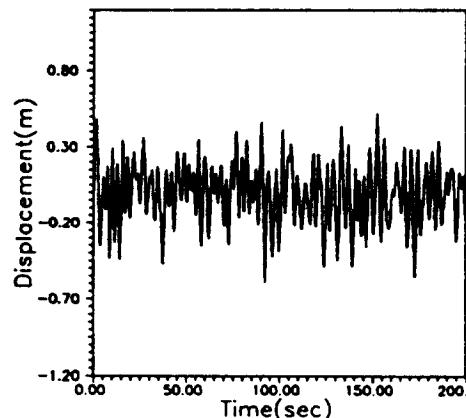


그림 6. 2개의 TMD를 부착한 경우의 주탑의 응답파형 ( $U_{10} = 30\text{m/sec}$ )

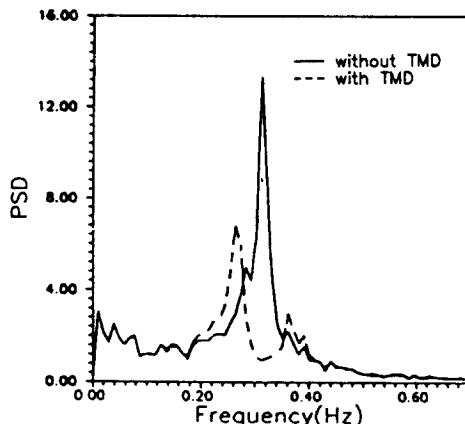


그림 7. TMD 부착 전과 2개의 TMD를 부착한 후의 FFT 분석결과 비교

#### 4.4 TMD의 최적질량 및 분할

TMD의 최적질량을 찾기 위해 풍속  $U_{10} = 30\text{m/sec}$ 에 대해 2개의 TMD를 앞절에서 구한 최적의 위치인 10번과 26번 절점의 위치에 부착시킨 다음 TMD 질량을  $\mu=0.5\%, 1\%, 2\%$  그리고  $3\%$

로 변화시켜 가며, 각 경우의 최대 변위의 기대치를 구했다. TMD의 질량별 최대변위의 기대치를 도시한 그림 8에 의하면  $\mu=0.5\%$ 인 경우의 0.549m부터  $\mu=3\%$ 인 경우의 0.486m로 나타나 TMD의 질량이 증가할수록 주탑의 변위는 감소함을 알 수 있다. 그러나 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이  $\mu=1\%$  이후에는 주탑의 변위감소율의 변화가 미소하며, 과도한 TMD의 질량은 주탑의 정적 변위를 증가시키는 원인이 되므로 주탑의 임의의 위치에서의 TMD 최적질량은 주탑질량의 1%인 것으로 판단된다.

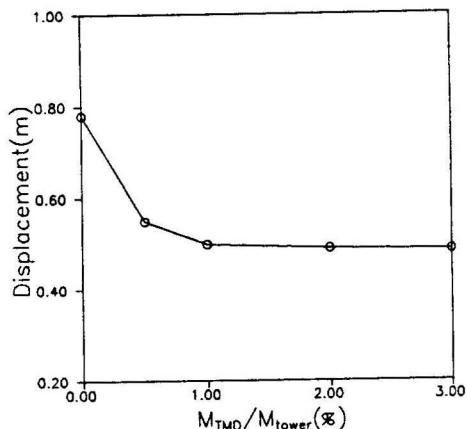


그림 8. TMD 질량변화와 주탑 최대변위 기대치간의 관계

한편, TMD 질량 분할에 따른 효과를 검토하기 위하여 풍속  $U_{10} = 30\text{m/sec}$ 의 경우에 대하여 TMD 분할해석을 실시하였으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. TMD 질량 분할에 따른 주탑 및 TMD의 최대변위

주탑과 TMD의 질량비( $\mu$ )	주탑의 최대변위(m)	TMD의 최대변위(m)
$1.00\% \times 1EA = 1.0\%$	0.580	1.378
$0.50\% \times 2EA = 1.0\%$	0.579	1.377
$0.25\% \times 4EA = 1.0\%$	0.580	1.378

같은 위치에서 질량을 제외한 동일한 제원을 가진 TMD를 부착시킬 경우 질량의 분할 전과 분

할 후의 주탑변위와 TMD의 변위가 거의 변화하지 않음을 알 수 있었다. 이는  $\mu=1\%$ 의 TMD를 설치함에 있어 시공에 유리하다면 TMD의 질량을 분할하여 설치하여도 된다는 것을 의미한다.

#### 4.5 풍속별 TMD 효과 및 TMD 변위제어

풍속별 TMD의 효과를 검토하기 위하여 최대 6개까지의 TMD를 부착시키고 풍속을 20, 30, 40 그리고 50m/sec로 변화시켜가며 주탑의 응답을 구한 후 TMD 설치 전, 후의 최대변위의 기대치를 구하였다. 각 해석경우에 대해 고려한 TMD의 수량, 질량 및 부착위치를 표 3에 정리하였다.

표 3. 해석시 고려한 TMD의 수량, 질량 및 부착위치

TMD 수	주탑과 TMD의 질량비( $\mu$ )		부착위치
	$\mu/EA$	전체 $\mu$	
2	0.5%	1.0%	10, 26번 절점
4	0.5%	2.0%	10, 26, 9, 25번 절점
6	0.5%	3.0%	10, 26, 9, 25, 8, 24번 절점

각 풍속에 대한 TMD의 효과를 검토하기 위해서는 풍속별 최적의 TMD 제원을 찾아야 하나 본 연구의 주대상인 베페팅 하중은 주파수성분이 넓은 광역 밴드(wide band)를 가지며, TMD의 제원은 기본적으로 주탑의 특성에 크게 좌우되므로 주탑의 제원이 변하지 않는다면 풍속이 달라져도 주탑에 대한 TMD의 제원은 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 연구대상인 풍속(20, 30, 40 그리고 50m/sec)중 실제로 주탑에 가장 빈번하게 영향을 미친다고 판단되는 풍속인 30m/sec에 대해 최적의 TMD 제원을 구한뒤 각 풍속에 적용하여 TMD의 주탑변위제어 효과를 검토하였다.

풍속을 20~50m/sec로 변화시켜 TMD에 의한 주탑의 변위 감소량을 구한 결과, 그림 9에 도시한 바와 같이 TMD의 설치에 의해 약 20~40%의 감소를 나타냈으며, TMD의 변위억제력 효과는 고풍속에 대해 크게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 풍속이 증가함에 따라 주탑의 가

진속도가 빨라지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 또한 TMD의 수가 2개 이상인 경우에 대해서는 효과가 완화되었으며, 이는 4.3절의 결과와 일치하는 사실이다. 그러나 풍속별 TMD 변위를 나타낸 그림 10에 의하면 고풍속시의 주탑의 변위 감소는 실제 시공이 불가능할 정도의 과대한 TMD 변위의 증가를 유발하였으며, 실제로 풍속이 50m/sec인 경우에 TMD의 최대변위가 4m를 초과하는 경우가 발생하였다. 이러한 결과는 TMD의 감쇠상수 산정시 Den Hartog가 제시한 무작위 하중 하에서의 감쇠상수를 적용했기 때문에 발생하는 현상으로 판단되며, 이로 부터 Den Hartog의 제안식은 계산과정이 간단한 장점이 있는 반면 고풍속시의 해석에는 적절하지 않은 경우가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

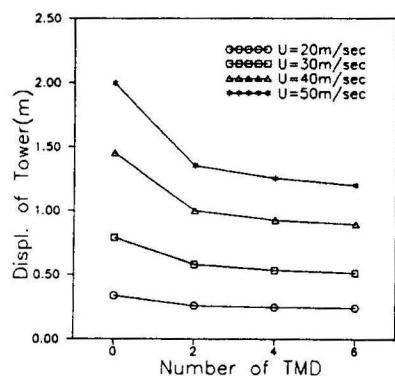


그림 9. 풍속별 TMD수에 따른 주탑의 최대변위의 기대치

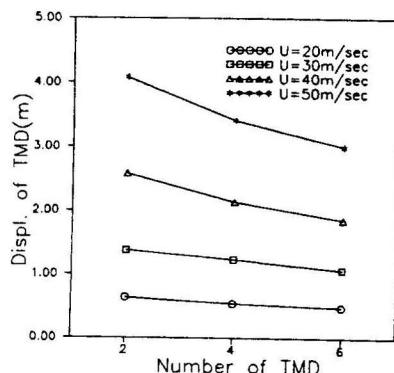


그림 10. 풍속별 TMD수에 따른 TMD의 최대변위의 기대치

따라서 본 연구에서는 Den Hartog에 의한 계산결과 과대한 TMD의 변위가 발생하는 경우에 대해서는 시행착오법에 의한 반복기법을 적용하여 TMD의 변위제어에 관한 해석을 수행하였다. 이 기법은 TMD 제원 변경에 의한 변위제어기법의 일종으로 제한된 TMD의 변위내에서의 주탑의 응답이 최소가 되는 감쇠상수를 반복과정을 통해 결정한다. 그러나 이 방법은 TMD의 부착위치 및 수량에 따라 TMD의 감쇠상수가 변화하기 때문에 최적의 감쇠상수를 찾기 위해서는 많은 해석시간이 요구되는 단점이 있다.

반복기법을 적용한 해석은 풍속 50m/sec의 경우에 대해 4개의 TMD를 9번, 10번, 25번 및 26번 절점에 부착하여 실시하였으며, 그 결과를 Den Hartog의 제안식에 의한 결과와 비교하여 표 4에 나타내었다.

표 4. 반복기법과 Den Hartog의 제안식의 해석결과 비교

감쇠상수 산출방법	주탑의 최대변위 기대치(m)	TMD의 최대변위 기대치(m)
반복기법	1.488	1.166
Den Hartog의 제안식	1.253	3.411

표 4의 결과에 의하면 TMD의 감쇠상수를 반복기법을 통해 결정하므로써 주탑의 최대변위는 Den Hartog의 제안식에 의한 결과보다 약 19% 정도의 증가를 나타내었으나, TMD의 최대변위는 1.166m로 Den Hartog의 제안식에 의한 결과의 약 34% 수준으로 크게 낮아지며 시공에 무리가 없는 값으로 나타났다. 이상의 결과를 종합적으로 고려해 보면 TMD를 이용한 현수교 주탑의 진동제어에 관한 해석은 우선 계산과정이 간단한 Den Hartog의 제안식을 이용한 감쇠상수를 적용하여 주탑 및 TMD의 변위를 검토하고, 검토결과 과다한 TMD의 변위가 유발되는 경우에 한하여 반복기법을 적용한 해석을 수행하는 것이 해석소요시간을 줄이는 바람직한 방법이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 버페팅 하중에 의한 주탑의 거동 특성을 검토하고 주탑의 최대변위를 제어하기 위하여 TMD를 주탑에 설치하여 최적의 TMD에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍하중에 대한 주탑의 응답특성은 풍하중의 특성이 그대로 반영되고 있는데 이는 풍하중의 주 진동수(0.05Hz)보다 주탑의 고유진동수가 상대적으로 상당히 높아 주탑이 저차 진동수를 갖는 풍하중에 대해서는 강체 진동을 하는 것으로 나타났다.
- (2) TMD의 최적 진동수는 주탑의 기본 고유진동수 근처에서 결정되었으며, TMD의 최적 부착위치는 주탑의 최상단에서부터 지점까지 순차적으로 나타났다.
- (3) TMD의 질량이 증가할수록 주탑의 변위는 감소하였으나  $\mu=1\%$  이후에는 주탑의 변위감소율의 변화가 크지 않으며, 과도한 TMD의 질량은 주탑의 정적 변위를 증가시키는 원인이 되므로 TMD 최적질량은 주탑 질량의 1%인 것으로 판단된다.
- (4) 같은 위치상에서 하나의 TMD를 같은 동조 진동수를 갖는 여러개의 질량이 작은 TMD로 분할하여도 거의 같은 진동제어 효과를 얻을 수 있었다.
- (5) TMD를 이용한 현수교 주탑의 진동제어에 관한 해석은 Den Hartog의 감쇠상수 제안식과 반복기법을 병용하는 것이 효율적이다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년도 (주)삼성중공업 조선해양사업본부의 연구비 지원하에 수행되었으며, 연구비를 지원하여 주신 (주)삼성중공업 조선해양사업본부에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 장동일 외, "서해대교의 풍동실험 결과분석 및 풍동시험 요령서", 한국강구조학회, 1992.12.
- (2) 장동일 외, "영종대교 주탑의 시공중 계측 및 진동제어에 관한 연구", 한양대학교 산업과학연구소, 1996.5.
- (3) O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, "The Finite Element Method", McGraw-Hill, 1991.
- (4) H.M. Hilber, T.J.R. Hughes and R.L. Taylor, "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, pp.283-292, 1977.
- (5) N.C. Nigam, "Introduction to Random Vibrations", The MIT Press, 1983.
- (6) T. Balendra, "Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads", Springer-Verlag, 1993.
- (7) E. Simiu, "Wind Spectra and Dynamic along Wind Response", Journal of Structural Division, ASCE, Vol.100, pp.1897-1910, 1974.
- (8) B.J. Vickery, "On the Flow behind a Coarse Grid and its Use as a Model of Atmospheric Turbulence in Studies Related to Wind Loads on Buildings", Nat. Phys. Lab. Aero. Report 1143, 1965.
- (9) A.G. Devenport, "Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading", Proceedings of Institution of Civil Engineers, Vol.28, pp.187- 196, 1964.
- (10) D. Hartog, "Mechanical Vibration", Dover Publication, 1985.

(접수일자 : 1997. 2. 18)