한국소음진동공학회지 제 3 권 제 4 호, pp. 293~299, 1993.

바람에 의한 장대 Tower 구조물의 진동 제어 방법

— 감쇠장치를 이용한 —

변윤주 · 윤태양 · 송재준
(삼우건설기술연구원)

1. 머 리 말

최근 토목, 건축재료 및 시공기술의 발전과 더불어 컴퓨터를 이용한 해석기법의 개발, 경제규모의 확대, 주변환경과의 조화 및 미적 감각의 끊임없는 추구는 구조물의 장대화, 연성화, 다양화는 물론 구조감쇠율의 감소 등을 가져옴으로서 바람에 의한 동적 거동의 영향이 증대되어 이에 대한 검토의 중요성이 크게 부각되기 시작하였다. 특히, 최근들어 활발히 계획, 공사중인 여러 현수교, 사장교 구조물 중 시공단계로서의 독립 tower, 발전소의 장대 굴뚝, 고층건물, 전망 tower, 공항 관제탑 등이 좋은 예이다. 따라서 이들 구조물의 설계과정에서 제안된 여러형태의 진동제어 방법중 수동 감쇠장치에 대하여 소개하기로 한다. 감쇠장치는 직접 외부에 부착하는 강제 감쇠장치와 소량의 질량, 스프링과 감쇠장치들을 조합하여 부착하는 수동 감쇠장치가 있다. 수동감쇠장치는 소규모로서 유지보수가 거의 필요없으며 외관의 변화가 거의 없고 저렴하다는 장점이 있다.

2. Tuned Mass Damper (TMD)

TMD란 스프링과 감쇠장치로 이루어진 부가질량을 주 구조물에 부착하여 주 구조물의 진동변위를 제어하는 장치이다. 즉, 그림 1에서와 같이 tuned absober가 부착되어 있는 시스템의 경우 2차 자유도에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_s\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s - c_T(\dot{x}_T - \dot{x}_s) + k_s x_s - k_T(x_T - x_s) = F_o e^{i\omega t}$$

$$m_T\ddot{x}_T + c_T(\dot{x}_T - \dot{X}_s) + k_T(x_T - x_s) = 0$$

여기서 아래첨자 s는 주 구조물을, T는 tuned vibration absorber를 나타내며 x는 변위, c는 구조감쇠, k는 강성을 그리고 F_o는 외력을 나타낸다. 위식으로부터 최

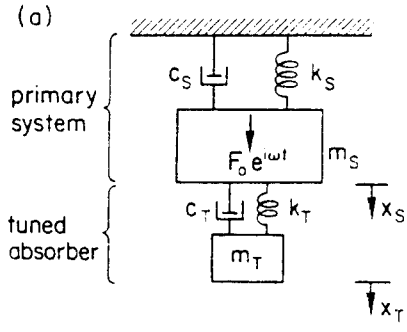


그림 1 Tuned absorber의 동적시스템

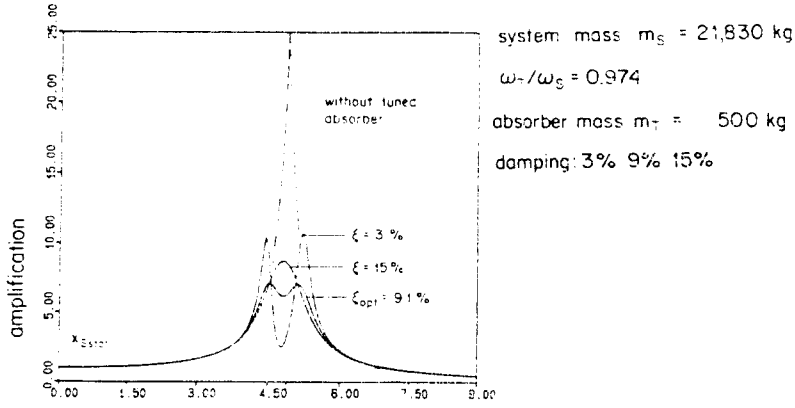


그림 2 감쇠율에 따른 주 구조물 진동변위

적 absorber에 대한 조건식이 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{k_T \cdot m_s}{m_T \cdot k_s}=\left[\frac{1}{1+m_T/m_s}\right]$$

여기서 m_s=구조물의 질량, m_T=tuned absorber의 질량이다. 따라서 최적 absorber의 주기는

$$f_T=\frac{f_s}{1+m_T/m_s}$$

여기서 f_s=주 구조물의 주기이다. 또한 최적 감쇠율은

$$\zeta_{opt}=\sqrt{\frac{3(m_T/m_s)}{8(1+m_T/m_s)}}$$

과 같다. Absorber 감쇠율(3%, 9%, 15%)에 따른 주 구조물이 변위량 변화[1]를 그림 2에 소개하였다. 주 구조물의 질량 m_s=21,830 kg, 주기비 ω_T/ω_s=0.974, absorber 질량 m_T=500 kg의 경우이다. Absorber의 질량은 크면 클수록 효과적이지만 주 구조물 질량이 약 1/20 정도가 적당하다.

2.1. Rama IX 사장교 Tower 적용 예[2]

Rama IX 사장교의 주 탑은 4각형 단면으로 풍동실험 결과 cable의 직각 방향에서 그림 3과 같은 진동이 발생하였다. Pendulum 형태의 TMD를 그림 4와 같이 사용하였다. Tower 자체의 구조감쇠가 δ=0.01로 작아 풍속 약 10m/s에서 galloping 현상이 발생하였으며 구조감쇠를 0.06으로 증가시켜 실험한 경우, galloping은 약 60 m/s로 증가되었다. TMD를 설치한 후의 실측 구조감쇠는 0.09로 galloping 발생풍속은 100 s/m에 달해 안정한 것으로 판단 되었다. 이 경우 m_T/m_s=1.5%, TMD의 중량은 4.5 ton$_f$(4.4×10^4N), 주기는 0.425 Hz, 그리고 구조감쇠는 0.452이었다.

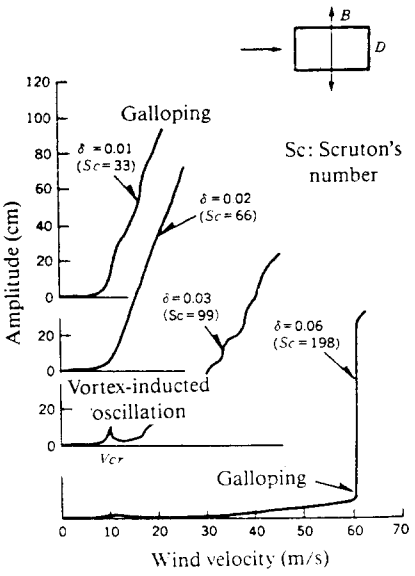


그림 3 Rama IX교 tower의 공기역학적 거동

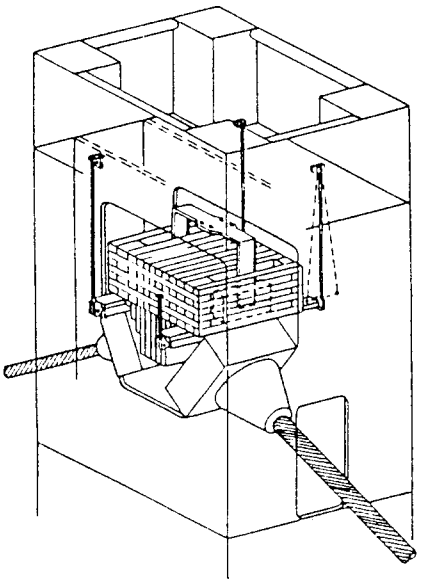


그림 4 Rama IX교 tower 상부의 TMD 사용 예

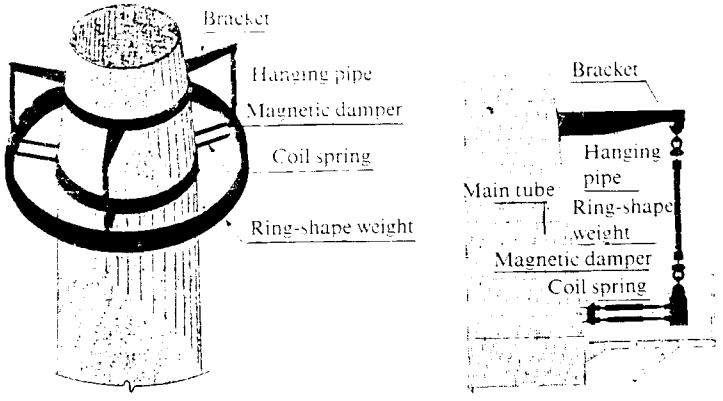
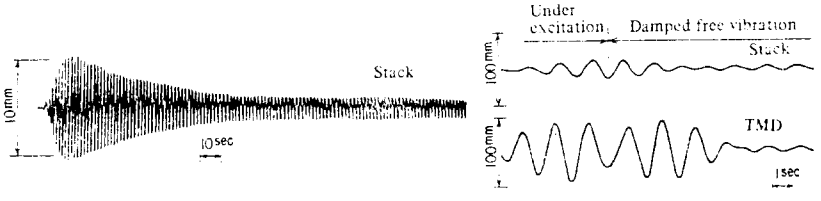


그림 5 Pendulum 형식의 TMD



(a) Without TMD (b) With TMD

그림 6 굴뚝의 감쇠진동

2.2 Kimitsu시 강재 굴뚝의 적용예[3]

원형단면의 경우 vortex shedding 진동현상의 발생은 흔한 일이다. 특히 근접해 있는 굴뚝의 경우 더욱 심하다. 높이 120 m의 2개의 굴뚝이 200 m 떨어져 위치해 있었으나 풍속 16 m/s에서 최대 29 cm

의 변위를 보여 용접부위에서 피로 균열이 발생되었다. 따라서 이 문제를 해결키 위해 그림 5에서와 같은 pendulum 형식의 TMD를 설치하였다. 굴뚝의 전체 중량은 760 ton$_f$(745×10^6 N) 및 100.6 ton$_f$ (9.86×10^5N)이었으며 TMD의 중량은 5 ton$_f$(4.9×10^4N), 주기는 0.62 Hz, 구조감쇠는 0.4로 하였다. 중량 비율은 5%로 정하여 최대 변위를 5 cm로 제한 하였다. 이와 같은 감쇠장치를 사용한 굴뚝에 대한 변위 측정결과를 그림 6에 소개하였다. 10 mm 이하의 작은 변위에서는 굴뚝과 TMD의 거동은 동일 하였으며 굴뚝이 10 mm 이상의 변위를 보이면서 TMD가 작동하기 시작하였다. 전방향의 바람에 대한 진동변위는 그림 7과 같았다.

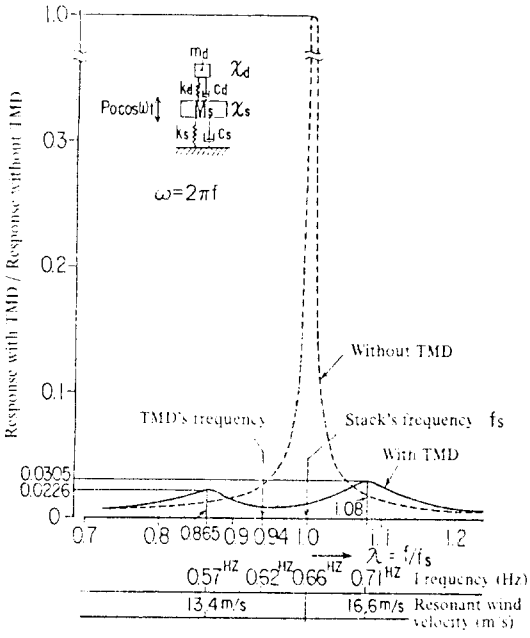


그림 7 TMD를 사용한 거동 예

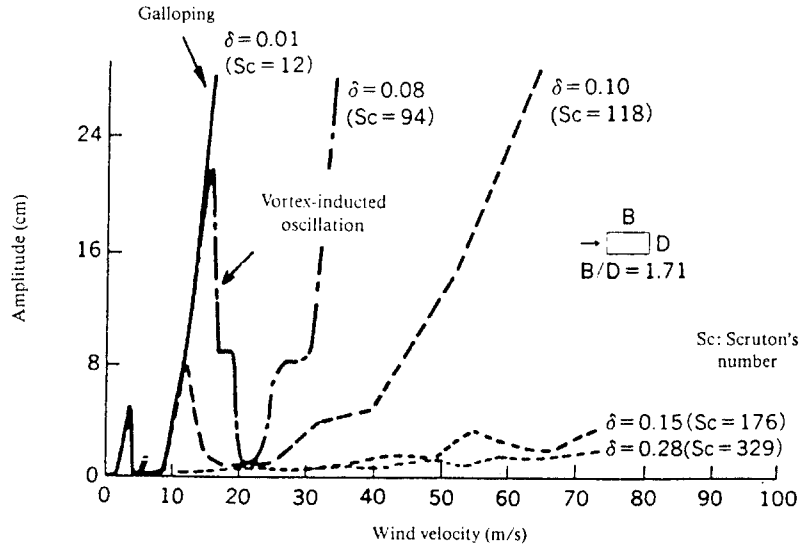


그림 8 Funade 교 tower의 공기역학적 거동

2.3 Funade 사장교 Tower 적용 예[4]

보도교 사장교인 funade교의 tower는 4각형 단면으로 풍동실험 결과 풍속 10 m/s에서 galloping 현상이 발생되었고 구조 감쇠는 0.15로 증가시킬 경우 galloping과 vortex shadding 진동현상이 제거되었다. (그림 8) 따라서 구조감쇠를 0.25가 넘도록 공기 감쇠 형태의 TMD를 그림 9와 같이 설계하였다. TMD는 원형 실린더와 디스트 형태의 weight, 코일, 스프링으로 형성되었고 실린더와 weight 사이에는 작은 공간을 두어 weight가 수평운동시 그 공간으로 통과하는 공기의 점성저항에 의해 감쇠효과를 얻도록 하였다. 그 경우 감쇠계수 C_a는

$$C_a=\sigma\mu lA^2/\Pi Rh^3$$

여기서 μ : 공기의 점성계수
l : 디스크 weight의 길이
R : 디스크 weight의 반경
h : 틈새 간격
A : ΠR^2이다.

Tower의 총중량은 8.09 ton$_f$ (745×10^6 N), 그 주기는 0.835 Hz였고 디스크 weight 중량 (TMD)은 97.4 kg$_f$(955N), 주기는 0.824 Hz였다. TMD의 구조감쇠

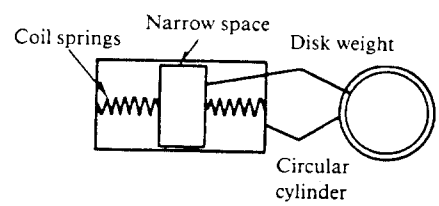


그림 9 Funade 교 TMD의 개요

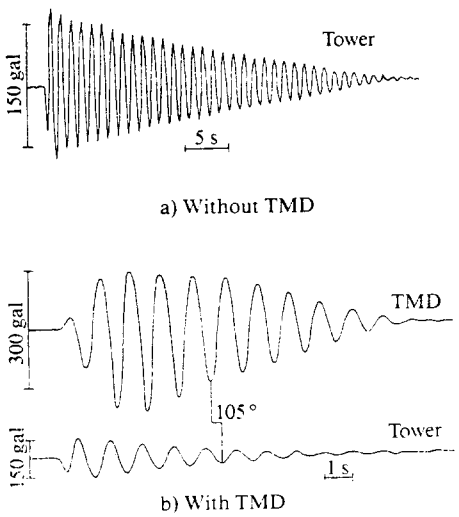


그림 10 Funade 교 교량 감쇠진동

는 0.47로 하였으며 감쇠기의 설치 이전, 이후의 실험결과를 그림 10에 보였다.

3. Impact Mass Damper (IMD)[5]

IMD는 그림 11의 Impact Damper(ID)와 유사한 형태로 IMD는 block, cable, frame과 cushion으로 이루어진다(그림 12). Block의 주기는 cable의 길이를 조종하여 tower의 약 1/2로 하였고, tower의 한 면과 충돌하도록 하게하여 frame에 부착된 cushion에서 흡수되도록 하였다. IMD시스템의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{v}' - \dot{x}' = -e(\dot{v} - \dot{x})$$

$$m_u\dot{v}' + m_x\dot{x}' = m_u\dot{x} + m_x\dot{x}$$

여기서 $\dot{v}$와 $\dot{x}$는 tower와 block이 충돌전 속도, $\dot{v}'$와 $\dot{x}'$는 tower와 block의 충돌후 속도이며 m_u와 m_x는 tower와 block의 질량, e는 복원계수(restitution coefficient)이다.

Block의 주기를 Tower의 1/2로

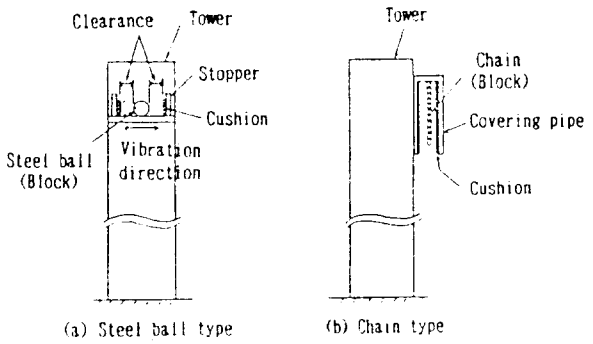


그림 11 Impact damper(ID)

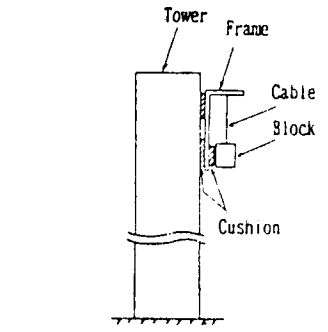


그림 12 Impact mass damper(IMD)

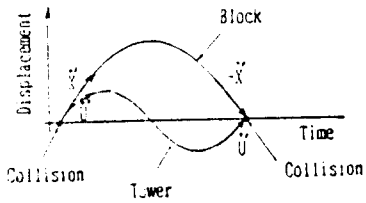


그림 13 Tower와 block의 거동

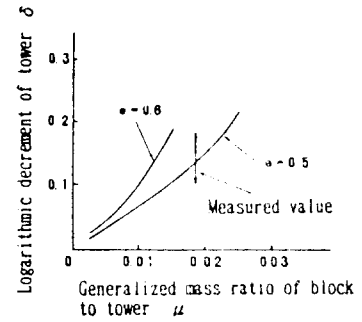


그림 14 Tower와 IMD의 구조감쇠

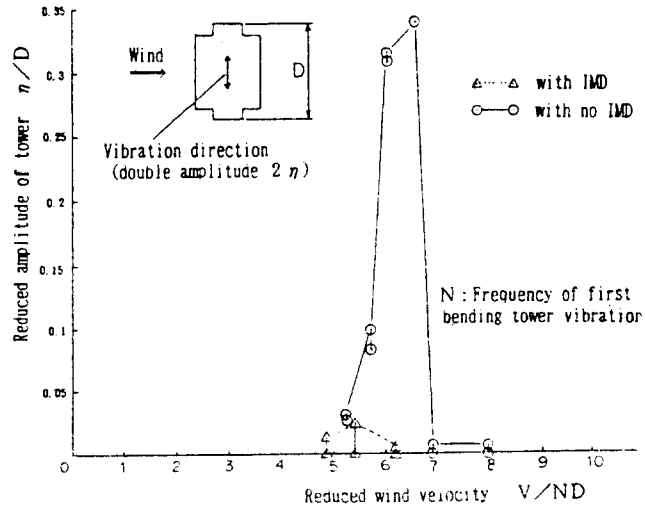


그림 15 Tower 상부의 진동변위

조종한 결과를 그림 13에 소개하였으며 질량비(m_x/m_u)에 따른 구조감쇠 $\delta=\ln(\dot{v}/\dot{v}')$를 그림 14에 보였다. 또, 풍동실험으로부터 구한 진동변위도 그림 15에 소개하였다.

4. Tuned Sloshing Damper (TSD)

TSD는 Tuned Liquid Damper(TLD)라고도 부르며 얕은 깊이의 유체가 강체 탱크에 부딪치면서 수평방향의 구조 진동을 약화시키는 장치이다. 그림 16과 같은 단자유도 계를 가정하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x}_s+2\omega_s\zeta_s\dot{x}_s+\omega_s^2x_s=\frac{1}{m_s}(F+F_e)$$

여기서, $\omega_s=\sqrt{k_s/m_s}$=고유진동수와 $\zeta_s=c_s/(2m_s\omega_s)$=구조감쇠율

F_e=외력

F=TLD의 저면 전단력이다.

선형 천해파 이론(Linear Shallow Water Wave Theory)에 의한 sloshing 주기[6] f_m은

$$f_m=\frac{1}{2\pi}\sqrt{g\alpha\tan h\alpha h}$$

여기서

$\alpha=m\pi/a$ ($m=2n-1$; $m=1,2\cdots$)

g=중력가속도

a=4각 탱크의 길이

h=수심이다.

또, 이동유체 질량 M_m은

$$M_m=\rho abh(8/\pi^2h)\sigma\tan h\alpha h/m^2$$

여기서 b=4각 탱크의 폭이다.

실험으로부터 얻은 TSD 주기비에 따른 변위량은 그림 17과 같다.

4.1 Ikuchi 사장교 Tower 적용예[6]

풍동실험결과 독립 tower 상태

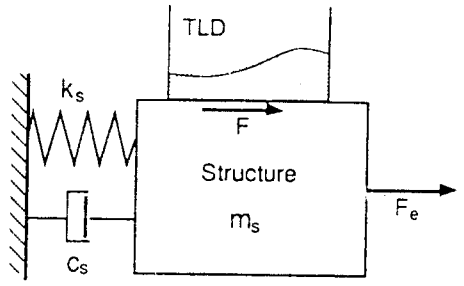


그림 16 TLD의 동적 시스템 모델

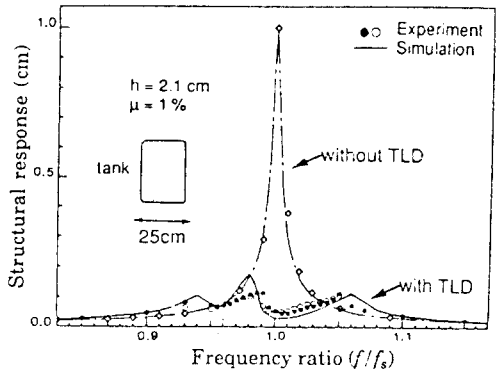


그림 17 TLD 사용 구조물의 거동 예

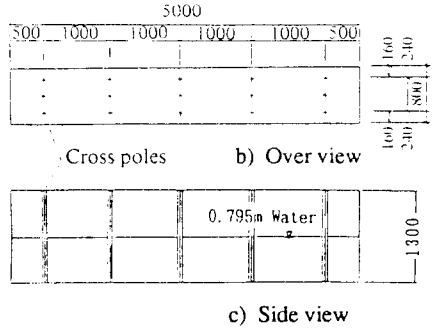


그림 18 Ikuchi교의 TSD 개요

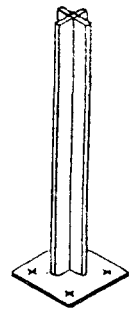


그림 19 Cross pole

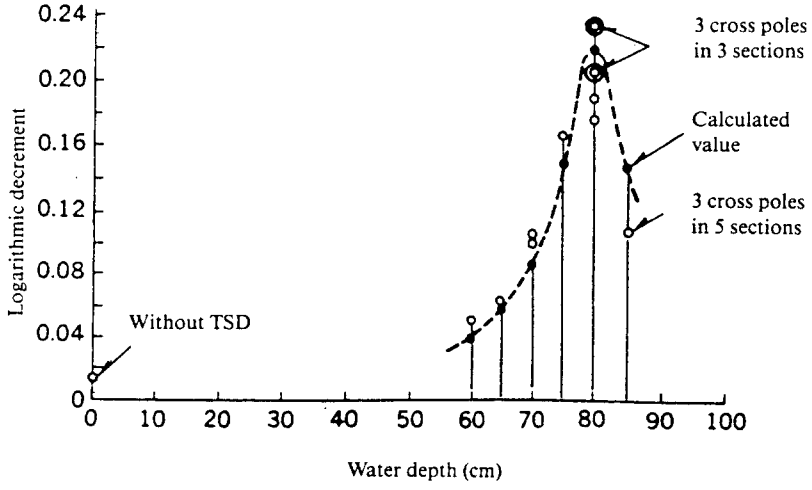


그림 20 수심과 구조감쇠의 관계

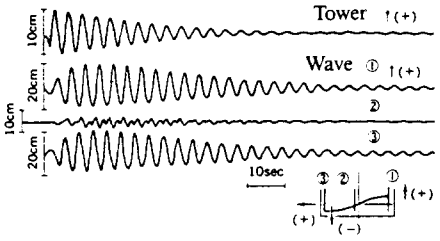


그림 21 Tower와 유체의 관계

에서 풍속 9 m/sec 바람에 약 400 mm의 변위를 보임으로서 콘크리트에 유해한 것으로 판단되어 TSD를 사용키로 하였다(그림 18). 구조감쇠 0.2를 유지하기 위하여 5 구역에서 각각 3개씩의 pole(그림 19)을 설치하였다. 이동유체 총중량(TSD)는 4.77 ton$_f$ (4.67×10^4N)였고 Tower 총중량에 대한 중량비는 0.95%였다. 수심에 따른 구조감쇠 관계를 그림 20에 보였고 그림 21에는 tower wave의 변위를 보였다.

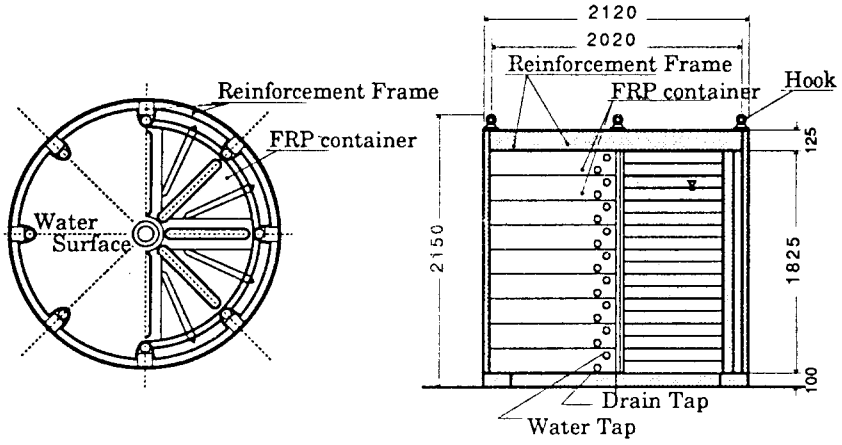


그림 22 SYP tower의 TLD 설치도

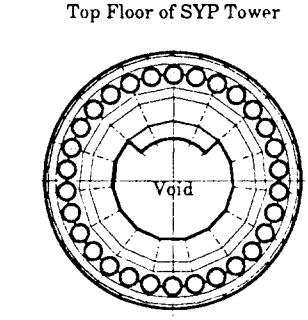


그림 23 TLD 장치

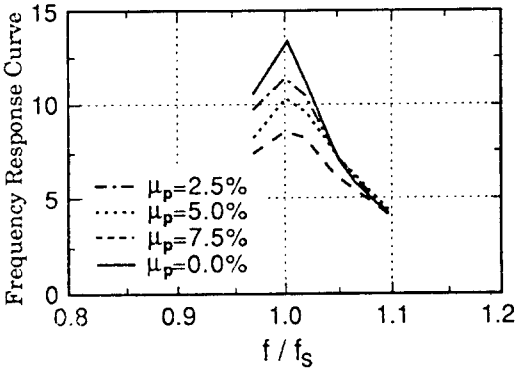


그림 24 TLD의 부유 물질의 효과

표 1 TLD 부유물질의 성질

Equivalent damping constant			
Particles mass ratio μp(%)	Equivalent damping constant ζ		
	A_0=1 cm/s^2 (A_0 : Excitation amplitude)	A_0=5 cm/s^2	A_0=20 cm/s^2*
0	0.032	0.058	0.135
2.5	0.042	0.062	0.136
5.0	0.049	0.065	0.132
7.5	0.056	0.067	0.137

*A_0=20 cm/s^2 : Wave breaking occurs.

4.2 Shin Yokohama Prince (SYP) 호텔 적용 예[7]

SYP 호텔은 높이가 149.4m, 반경 38.2m의 원형 건물이다. 최적설계를 위하여 $\mu(=m_L/m_G=$ TLD 질량에 대한 구조물 질량비)를 1%로 정하였고 이를 위하여 반경 2m, 높이 22cm의 용기를 사용하여 TLD를 설계하였다(그림 22) μ_{opt}=1% 값을 유지하기 위하여는 이와 같은 용기 30개를 옥상부위에 그림 23과 같이 설치하였다. 최적 tuning을 위하여 필요한 유체 깊이는 12.4 cm 였으며 최적 구조감쇠 5%를 위하여 폴리프로필렌의 부유물질을 첨가하였다. 부유물질의 질량비에 따른 변위 및 구조감쇠를 그림 24와 표 1에 소개하였다.

5. 맺 음 말

여러종류의 수동감쇠장치, 즉, TMD, IMD 그리고 TSD에 대한 개략적인 이론과 그 사용예에 대하여 설명하였다. 실험적 검증 및 실측결과 각 장치가 바람에 의해 야기되는 진동현상을 억제하는 데 매우 유효한 것으로 판정되었고 또한 크기가 소규모일 뿐 아니라 유지보수가 거의 없으며 비용도 저렴하여 국내 건설 또는 건설예정인 유사구조물에도 많은 적용이 예상된다.

참 고 문 헌

(1) Bachmann, H. and Ammann, W, Vibration in Structures induced by Man and Machines,

International Assiciation for Bridge and Structural Engineering, 1987.

(2) Brown, C. W, Freeman, R. A. and Huffman, G., Dao Kanong Cable-Stayed Bridge Tuned Mass Damper in Deck and Pylon, International Conference on Cable-Stay Bridges, Bang Kok, 1987.

(3) Tutumi, M., Ueda, T. et al., Suppression Effect of TMD of Vortex-Induced Oscillation in a Tall Stack, Proceedings of 10th National Symposium on Wind Engineering, Japan, 1989.

(4) Hatano, K., Ueda, T., et al, Effect of TMD for Pylon of Cable-Stayed Bridge, Journalrnal of Wind Engineering, Vol. 41, Japan 1989.

(5) Ogawa, K., Sakai, Y. and Sakai, F., Control of Wind-Induced Vibration Using an Impact Mass Damper, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44(1992), Elsevier

(6) Ueda, T., Nakagaki, R. and Koshida, K., Suppression of Wind-Induced Vibration of Tower-Shaped Structures by Dynamic Dampers, Structural Engineering International, Vol. 3, No. 1, February 1993.

(7) Wakahara, T., Ohyama, T. and Fujii, K., Suppression of Wind-Induced Vibration of a Tall Building Using Tuned Liquid Damper, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44(1992), Elsevier.