

TLD와 MTL D을 이용한 고층건물의 풍응답 진동제어

Vibration Control of Wind Response of Tall Building Using TLD and MTL D

유 기 표*
You, Ki-Pyo

고 낙 호**
Ko, Nag-Ho

김 영 문***
Kim, Young-Moon

Abstract

Serviceability of buildings is affected by excessive acceleration experienced at the top floors in wind storms that may cause discomfort to the occupants. Tuned liquid damper(TLD) and multiple tuned liquid damper(MTL D) are passive control devices that consist of rigid tank filled with liquid to suppress the vibration of structures. This TLD and MTL D are attributable to several potential advantages - low costs; easy to install in existing structures; effective even for small-amplitude vibrations.

In this paper, the behavior of TLD and MTL D are investigated analytically and wind tunnel test of high-frequency force balance.

Keywords : Serviceability, Tuned liquid damper, Passive control device

1. 서 론

고층건물은 바람에 의한 진동에 매우 취약하여 진동응답을 감소시키는 방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 고층건물의 진동응답을 감소시키기 위한 방법으로는 건물의 형태를 변경하는 방법²⁾ 동적 특성을 변화시키는 방법들이 있다. 첫 번째 방법은 건물 주변 기류의 패턴을 변경하는 방법으로 고층건물에 기류가 흘러갈 수 있는 통로를 만들어 건물의 후면에서 발생하는 후류(wake)를 최소화하여 진동응답을 감소시키는 방법과 고층건물의 코너에 적합한 밴스(vanes)를 설치하여 건물의 코너와 밴스의 폭에 의한 측면 박리영역에서 발생하는 부압의 크기를 감소시키는 방법 등이 있다. 두 번째 방법은 고층건물의 동적특성인 질량(m), 강성(k), 감쇠(c)등을 조절하여 원하는 진동응답레벨이 되도록 하는 방법이 있다¹⁾. 그러나 이러한 방법들은 많은 비용부담이 유발되고 평면형태에 많은 제약조건들이 발생하게 된

다. 건물의 형태와 동적특성을 변화시키지 않고 건물 진동을 제어하는 기술에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 건물에 부가질량을 설치하여 건물의 진동응답을 감소시키는 방법중 수동형제진장치인 TLD(tuned liquid damper)와 TMD(tuned mass damper)에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. TLD는 설치공간의 제약을 받지 않고 설치비용이 TMD에 비해서 저비용이며, 고유진동수 조절의 편리성, 낮은 가진에 대한 작동 성능면에서 유리하다는 장점을 가지고 있다^{3),4)}. 이러한 TLD에 대한 연구는 1987년 Modi, Welt은 인공위성과 선박의 제진에 사용하는 동조액체 감쇠기의 적용을 제안하였으며³⁾, 1990년 Kareem²⁾은 TLD를 이용한 고층건물의 풍진동응답 감소 효과에 대해서 1991년 Noji등은 깊은 수심을 갖는 동조액체댐퍼의 실험적 고찰을 Fujino 와 Sun 은 1992년에 건물의 수평운동을 억제하는 TLD의 유체역학적 접근방법을 연구와⁴⁾ 1993년에는 다중동조액체댐퍼의 진동대 해석과⁵⁾ 1995년도 에는 TLD와 TMD 근사이론을 이용한 모형의 특징을 실험적으로 고찰하였다. 본 논문은 TLD에 대한 파라메타해석을

* 정희원, 전북대학교 공업기술연구소 연구원, 공학박사

** 정희원, 한석엔지니어링, 이사

*** 정희원, 전북대학교 건축도시공학부 교수, 공업기술연구소

통한 TLD와 MTLTD의 진동감소효과에 대해서 알아보았다. 그리고 풍동실험에 구한 풍력스펙트럼을 이용한 TLD설치전후의 rms 가속도응답변화에 대해서 알아보려고 한다.

2. 동조액체댐퍼의 특성

구조물과 동조액체댐퍼(TLD)의 질량비, 진동수비, 감쇠율비에 따른 진동수응답(frequency response)을 이용하여 동조액체댐퍼의 효과를 알아보려고 한다.

2.1. 등가 TMD-구조물의 진동수응답

TLD의 제진원리는 기본적으로 TMD의 원리와 같다는 사실로부터 그특징파악이나 모델화를 행하는 경우 TMD의 아날로지를 이용하는것이 가능하다. 이로부터 TLD-구조계의 진동방정식은 등가 TMD-구조계의 진동 방정식의 매트리스 함수로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ m_T & m_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_s \\ \ddot{y}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -c_T \\ 0 & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_s \\ \dot{y}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -k_T \\ 0 & k_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_s \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 M_s, K_s, C_s : 구조물의 동적특성
 m_T, k_T, c_T : TLD의 동적특성
 F_w : 외력

(1)식에서 $F_w = e^{i\omega t}$ 이라고 하면 식(2)와 식(3)과 같다.

$$M_s \ddot{y}_s + C_s \dot{y}_s - c_T \dot{y}_T + K_s y_s - k_T y_T = e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$m_T \ddot{y}_T + c_T \dot{y}_T + k_T y_T = -m_T \ddot{y}_s \quad (3)$$

(2)식에서 $y_s = H(\omega)e^{i\omega t}$ 로 가정하면 식(2)와 식(3)은 식(4), 식(5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} M_s(-\omega^2)H(\omega)e^{i\omega t} + C_s(i\omega)H(\omega)e^{i\omega t} \\ + K_s H(\omega)e^{i\omega t} - c_T \dot{y}_T - k_T y_T = e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m_T \ddot{y}_T + c_T \dot{y}_T + k_T y_T = -m_T(-\omega^2)H(\omega)e^{i\omega t} \\ = m_T \omega^2 H(\omega)e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

만약 식(5)에서 $m_T \omega^2 H(\omega) = A$ 로 가정을 하면 식(6)과 같이 된다.

$$m_T \ddot{y}_T + c_T \dot{y}_T + k_T y_T = A e^{i\omega t} \quad (6)$$

식(6)을 $y_T = \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t}$ 에 대해서 계산을 하면 식(7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} m_T(-\omega^2) \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t} + c_T(i\omega) \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t} \\ + k_T \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t} = A e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)양변에서 $A e^{i\omega t}$ 를 삭제하면 식(8)과 같이 된다.

$$m_T(-\omega^2) \overline{H(\omega)} + c_T(i\omega) \overline{H(\omega)} + k_T \overline{H(\omega)} = 1 \quad (8)$$

식(8)에서 $\overline{H(\omega)}$ 을 구하면 식(9)와 같이 된다.

$$\overline{H(\omega)} = \frac{1}{k_T [1 + 2\zeta_T i \frac{\omega}{\omega_T} - \frac{\omega^2}{\omega_T^2}]} \quad (9)$$

여기서 ζ_T : TLD의 감쇠율

식(9)을 $y_T = \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t}$ 에 대입하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} y_T = \overline{H(\omega)} A e^{i\omega t} \\ = \frac{1}{k_T [1 + 2\zeta_T i (\frac{\omega}{\omega_T}) - (\frac{\omega}{\omega_T})^2]} A e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)을 식(2)식에 대입을 하면 식(11)과 같이 된다.

$$H(\omega) = \frac{1}{M_s \omega_s^2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 + 2\zeta_s i \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \right] - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \frac{m_T}{M_s} \left[\frac{[1 + 2\zeta_T i (\frac{\omega}{\omega_T})]}{1 - (\frac{\omega}{\omega_T})^2 + 2\zeta_T i (\frac{\omega}{\omega_T})} \right]} \quad (11)$$

여러개의 TLD를 사용하였을 경우 식(12)와 같다.

$$H(\omega) = \frac{1}{M_s \omega_s^2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 + 2\zeta_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \right] - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \sum \frac{m_T}{M_s} \left[\frac{[1 + 2\zeta_T \gamma \left(\frac{\omega}{\omega_T} \right)]}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_T} \right)^2 + 2\zeta_T \left(\frac{\omega}{\omega_T} \right)} \right]} \quad (12)$$

구조물질량과 TLD의 질량에 의해서 결정되는 질량비와 구조물의 고유진동수에 대한 TLD의 고유진동수의 비를 동조비라고 정의를 하며 식(13)과 같이 정의를 한다.

$$\text{질량비} : \frac{m_T}{M_s} = \mu \quad (13-1)$$

$$\text{동조비} : \frac{f_T}{f_s} = \gamma \quad (13-2)$$

여기서 물의 고유진동수 $\omega_T = (2\pi f_T)$ 은, 수조의 형태가 직사각형, 원통에 따라 1차 모드에 대응하는 고유진동수는 식(14)와 같다.

· 직사각형 수조의 고유진동수는

$$\omega_T = \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad (14-1)$$

여기서

L : 장변방향의 수조 길이

h : 수조내의 물의 높이

g : 중력가속도(m/sec^2)

· 원형수조의 고유진동수는

$$\omega_T = \sqrt{\varepsilon_{11} \frac{g}{R} \tanh\left(\varepsilon_{11} \frac{h}{R}\right)} \quad (\varepsilon_{11}=1.8411) \quad (14-2)$$

여기서

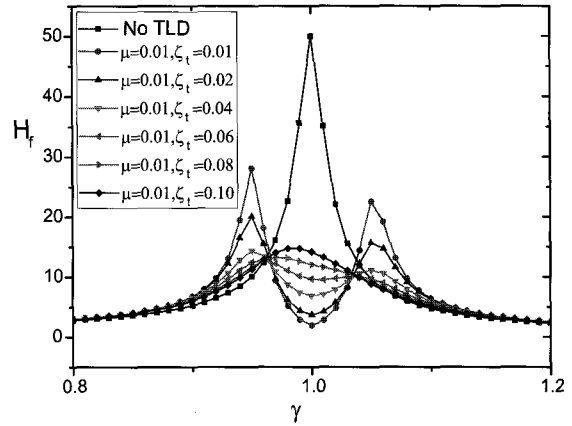
R : 원형수조의 반지름

h : 수조내의 물의 높이

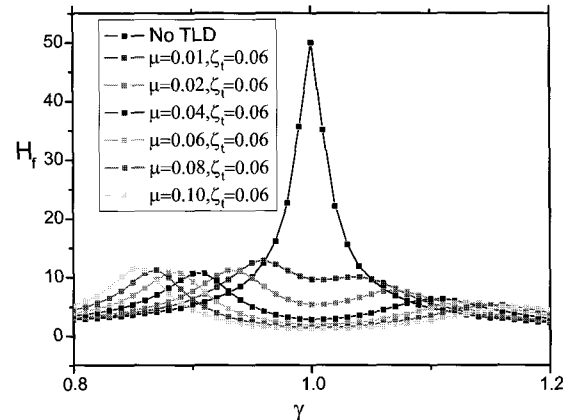
g : 중력가속도(m/sec^2)

2-2. STLD의 진동수응답함수

그림 1은 단독 TLD의 진동수 응답함수인 식(11)을 이용하여 TLD의 감쇠율 변화와 질량비 변화에 따른 특징을 구하였다.



(a) TLD의 감쇠율 변화



(b) TLD의 질량비 변화

<그림 1> STLD의 감쇠율 및 질량비 변화에 따른 진동수 응답함수 ($\zeta_s = 0.01$)

그림 1의 (a)는 질량비는 1%로 고정을 하고 TLD의 감쇠율변화에 따른 진동수 응답함수그래프를 나타내고 있다. TLD의 감쇠율이 증가할수록 진동수 응답함수는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 낮은 감쇠율인 0.04까지는 2개의 피크가 진동수비 0.95와 1.05위치에서 발생하고 있다. TLD감쇠율이 0.06-1.0까지는 1개의 피크가 발생하고 있다. TLD 감쇠율 0.08과 1.0에서는 감쇠율 0.06보다 진동수 응답함수값이 증가하고 있다. 그림(b)는 감쇠율을

0.06으로 일정하게 하고 질량비를 변화시키면서 해석을 하였다. 질량비가 낮을 경우에는 진동수비 1 부근에서 피크가 나타나고 있지만 질량비가 증가할 수록 낮은 진동수비에서 피크가 발생하고 있다.

2-3. MTLTD의 진동수 응답함수

여러개의 TLD를 설치하였을 경우의 진동수 응답함수는 식(9)을 이용하여 구하였다.

MTLTD(multiple tuned liquid damper)는 그림 2와 같이 구조물위에 여러개의 TLD를 올려놓은 것과 같다. 이들 TLD는 각각의 고유진동수를 가지고 작동 하게 되어 있다. MTLTD는 중심진동수(f_0)와 진동수밴드폭(ΔR), 진동수간격(β)등이 식(15)와 같이 정의되어 진다.

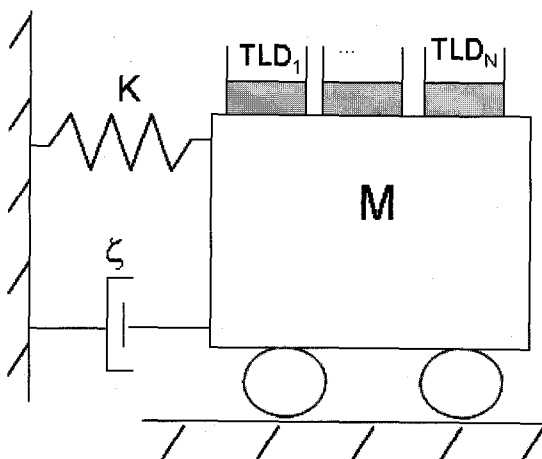
$$f_0 = \frac{f_N + f_1}{2} : \text{중심진동수} \quad (15-1)$$

$$\Delta R = \frac{f_N - f_1}{f_0} : \text{진동수밴드폭} \quad (15-2)$$

$$\beta = (f_N - f_1)/(N-1) : \text{진동수간격} \quad (15-3)$$

여기서 f_N : 큰 수조 진동수
 f_1 : 작은 수조 진동수

이들 MTLTD에 대해서 TLD의 수(N), 진동수 폭(ΔR), 동조율($\Delta\gamma$)에 대한 진동수응답함수의 특징은 다음과 같다. 해석을 위한 구조물의 감쇠율은 1%,

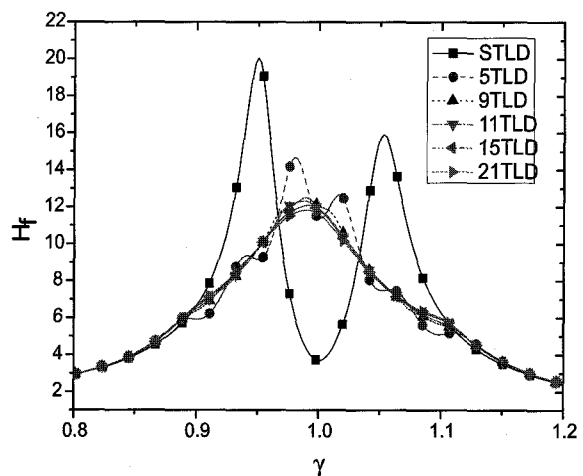


〈그림 2〉 MTLTD

TLD의 감쇠율은 2%로 가정을 하였다. TLD의 질량비는 1%로 가정하였다.

1) TLD의 수(N)

그림 3은 TLD의 다양한 수에 대한 진동수응답함수를 나타나고 있다. MTLTD를 해석하기 위해서 진동수폭 $\Delta R=0.2$, 감쇠비는 1%로 하였다. STLD은 2개의 피크가 나타나고 있었으며, 위치는 진동수비 0.95,와 1.05에서 나타나고 있다. MTLTD의 경우는 1개의 피크가 나타나고 있다. MTLTD가 STLD보다 효과적인 것으로 나타나고 있다. TLD의 개수에 따라 적은 피크들이 만들어 지고 있다. TLD가 5개일 때는 6개의 적은 피크진동수비 0.8-1.2영역에서 나타나고 있지만 TLD가 9개, 11개, 15개, 21개 에서는 1개의 피크만 진동수비 1부근에서 나타나고 있다, MTLTD의 효과는 특정한 TLD수를 넘으면 TLD의 수에 민감하게 반응하지 않은 것으로 나타나고 있다.

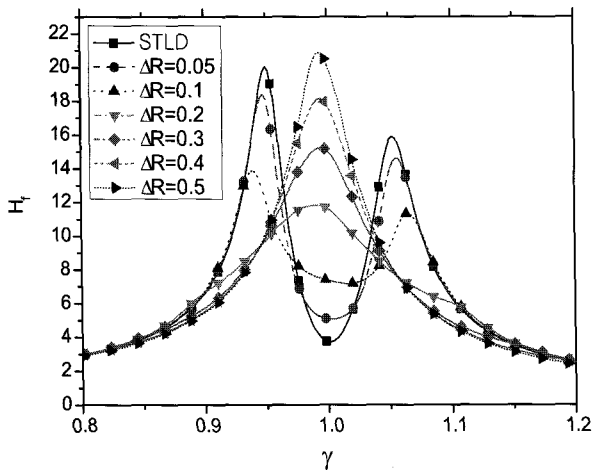


〈그림 3〉 MTLTD의 효과

2) 진동수폭 ΔR

MTLTD에 의한 진동수별 효과는 TLD를 구성하는 수조의 최대진동수와 최소진동수사이에 의한 진동수폭에 따라 다르게 나타날 수 있다. 그림 4는 MTLTD의 개수가 21개일 경우에 TLD의 진동수폭이 $\Delta R=0.05(0.975 < f_i/f_0 < 1.025)$, $\Delta R=0.1(0.95 < f_i/f_0 < 1.05)$, $\Delta R=0.2(0.90 < f_i/f_0 < 1.1)$, $\Delta R=0.4(0.8 < f_i/f_0 < 1.2)$, $\Delta R=0.5(0.75 < f_i/f_0 < 1.25)$, 일때의 진동수전달함수의 특징을 나타내고 있다. 여기서 $\Delta R = (f_N - f_1)/f_0$

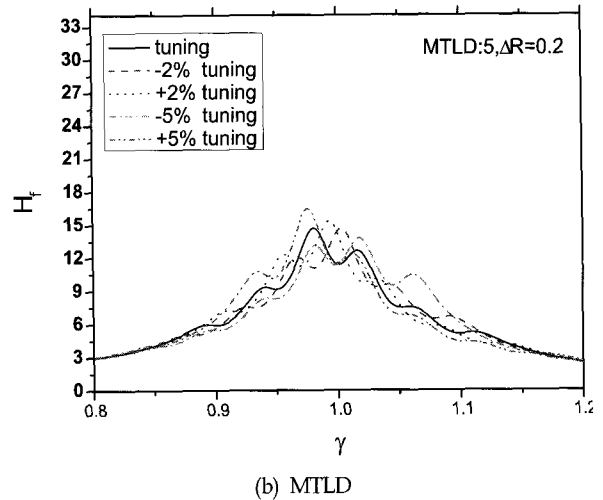
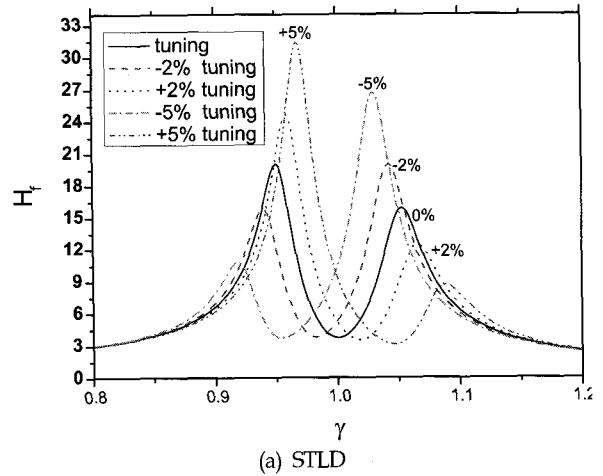
을 의미하다. $\Delta R=0.2$ 을 기준으로 설명을 하면 $f_N = 1.1f_0$, $f_1 = 0.9f_0$ 이다. 여기서 f_0 는 구조물의 진동수가 된다. $\Delta R=0.1$ 의 경우는 STLD와 유사한 진동수비 0.95, 1.05부근에서 피크가 나타나고 있다. $\Delta R=0.2$ 에서는 진동수비 1.0부근에서 1개의 피크가 나타나고 있다. $\Delta R=0.5$ 일때 진동수 전달함수의 피크위치는 진동수비 1.0부근에서 제일 크게 나타나고 STLD보다도 더 크게 나타나고 있다. $\Delta R=0.1$, $\Delta R=0.2$ 의 경우가 $\Delta R=0.5$ 보다 효과가 크게 나타나고 있다. MTLD의 최적 효과는 TLD의 개수보다는 진동수 폭이 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 4〉 진동수폭

3) 비동조율 $\Delta\gamma$

TLD진동수는 구조물의 고유진동수와 동조 되도록 설계를 한다. 다양한 원인으로 인해 비동조가 발생을 하게 된다. 비동조가 발생할 때 MTLD의 효과에 대해서 알아보려고 한다. 동조경우뿐만 아니고 비동조에 대해서도 고려하였다. 그림 5(a)는 동조와 비동조의 조건아래 STLD 구조물의 응답을 나타나고 있다. 비동조율이 2%에서 5%로 증가할수록 진동수응답함수의 크기는 증가를 하고 있다. STLD의 경우에 구조물의 진동수응답함수는 비동조일때 가장 크게 증가하고 있다. 진동수폭 $\Delta R=0.2$ 을 가지는 MTLD의 경우는 그림 5(b)와 같다. MTLD의 진동수응답은 비동조율에 대해서 크기에 큰 변화가 없었고 발생하는 위치에서 약간 변화가 발생하고 있다.



〈그림 5〉 STLD와 MTLD의 비동조율

4) 등가감쇠율

그림 6은 MTLD설치된 구조물의 등가감쇠율변화에 따른 진동수응답함수의 크기 변화를 알아보았다. MTLD의 개수는 21개로 하였다. TLD의 감쇠율 (ξ_T)이 0.005일때에는 작은 피크들이 많이 발생하고 있지만 감쇠율이 0.01부터는 피크의 크기는 감소하면서 0.02부터는 1개의 피크만이 존재하고 있다. TLD의 감쇠율이 증가할수록 진동수비 1에서 발생하는 피크의 크기는 증가를 하고 있다.

3. 풍동실험

본 풍동실험은 전북대학교의 경계층 풍동에서 실시되었고, 풍동의 측정부의 제원은 실험부길이 12m, 폭 1.5m, 높이 1.2m로 가변 풍속의 범위는

0.5~20m/s이다. 실험에서 적용된 경계층은 교외지역에 해당하고 지수 계수 $\alpha=0.15$ (노풍도 C)와 $\alpha=0.33$ (노풍도 A)이다. 그림 7은 풍동내에 상사한 평균풍속과 난류강도의 수직분포 결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 모형은 1:400스케일로 축소 제작되었고 단면적은 100cm², 변장비(side ratio, B/D)는 1이며 종횡비(aspect ratio $H/\sqrt{B \times D}$) 4로 하였다. 표 1은 실험모형의 치수를 나타내고 있다. 본 논문의 풍향각은 0° 방향에 대해서 실험을 실시하였다. 풍력실험을 위한 실험풍속의 결정은 상사법칙에 의한 건물의 설계풍속과 모형의 스케일, 시간스케일 등으로 결정되고 있다. 건물의 설계풍속 결정을 위한 높이 10m에서 측정된 기본풍속은 현재 국내기준에서 제한하고 있는 30m/s에 대해서 실시하였다. 이들 기본풍속을 이용한 건물 최상층에서의 설계풍속은 10분간 측정시간을 중심으로 하여 각 기본풍속에 대한 설계풍속별 풍동내 실험풍속을 구하여 실험을 실시하였다. 표 2는 풍동실험 결과를 이용한 TLD설치이후의 가속도응답을 구하기 위한 건물의 동적특성²⁾을 나타내고 있다.

3.1. 응답해석

일반화 변위의 평균자승응답값은 식 (16) 같다¹⁴⁾.

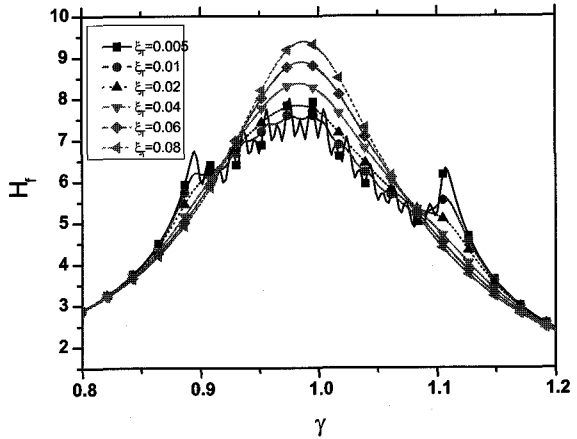
$$\sigma^2 = \int_0^\infty (2\pi f_n)^{2r} |H^2(f)| S_F(f) df \quad (16)$$

여기서 $|H^2(f)| =$ 구조물의 전달함수
 $S_F(f) =$ 풍하중 파워스펙트럼

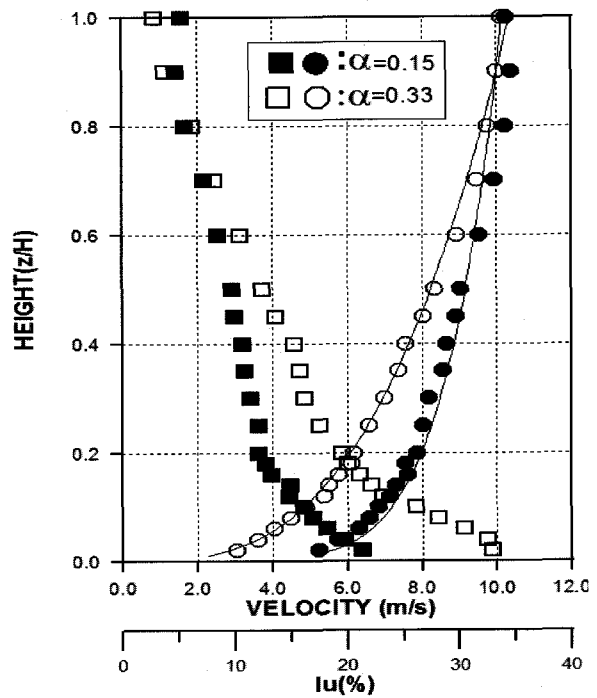
위의 적분식 (17)을 잔류치정리(residue theorem)를 사용하면, 식(12)와 같다.

$$\sigma^2 = \frac{\pi f_n S_F(f_n) (2\pi f_n)^{2r}}{4(2\pi f_n)^4 \zeta_n m_1^2} \quad (17)$$

여기서 $m_1 =$ 기본모우드에 대한 일반화 질량 (전체질량/3)
 $f_n =$ 구조물의 고유진동수
 $r = 1$ (속도), 2 (가속도)



〈그림 6〉 TLD의 감쇠율 변화에 따른 진동수응답함수



〈그림 7〉 조도구분별 평균풍속과 난류강도의 수직분포

〈표 1〉 실험모형의 치수

D/B	B(cm)	D(cm)	H(cm)
1	10	10	40

〈표 2〉 해석대상건물의 동적특성

고유진동수 (Hz)	0.3Hz
감쇠비	0.01
건물의 치수(m) (B×D×H)	40 X 40 X 160
밀도 (kg/m ³)	192

rms 가속도응답은 식 (18)과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi f_n S(f_n)}{4 \zeta_n m_1^2}} \quad (18)$$

여기서 f_n = 구조물의 고유진동수
 ζ_n = 구조물의 감쇠율
 m_1 = 구조물의 일반화 질량

TLD설치된 구조물의 응답 평가방법은 식 (19)와 같다.

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (2\pi f)^4 |H_a^2(f)| S_F(f) df \quad (19)$$

여기서 $|H_a^2(f)|$ = 구조물+TLD의 전달함수
 $S_F(f)$ = 풍하중 파워스펙트럼

(13)식에서 TLD은 구조물의 전달함수의 수정을 통하여 구조물의 추가적인 감쇠율을 부여하고 있다. TLD가 구조물의 진동을 저감시키고 있으므로 구조물의 감쇠율의 증가량을 고려해야한다. (14)식과 수치해석결과와는 식(20)과 같다.

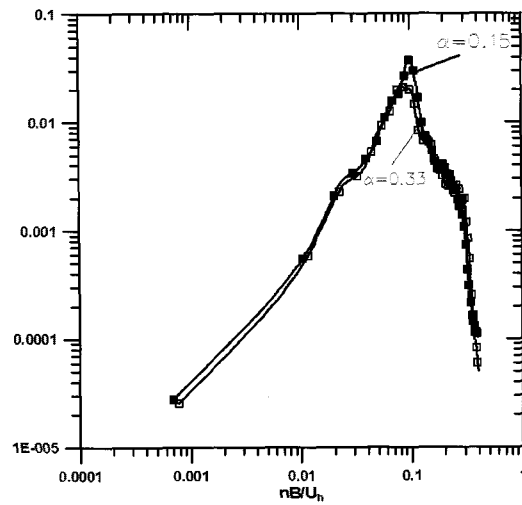
$$\sigma^2 = \frac{\pi f_n S_F(f_n) (2\pi f_n)^{2r}}{4(2\pi f_n)^4 \xi_e m_1^2} \quad (20)$$

여기서 $\xi_e = 0.9 \sqrt{\frac{\mu}{4}} + 0.8 \zeta_n$
 μ = 질량비, ζ_n = 구조물의 감쇠율

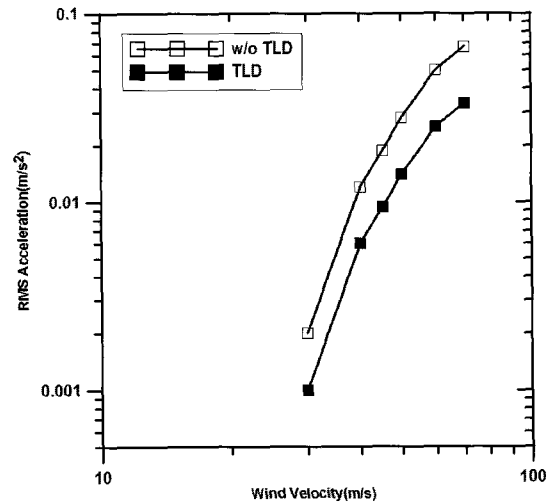
3.2. 해석결과

그림 8은 교외지역($\alpha=0.15$)과 도심지역($\alpha=0.33$)에 해당되는 횡방향의 풍하중스펙트럼을 나타내고 있다.

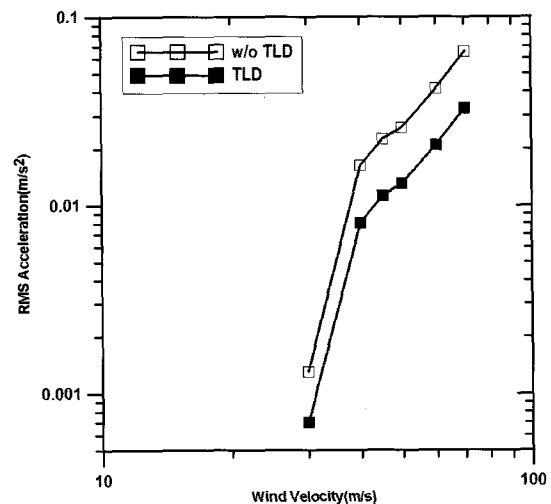
그림 9-그림 10은 TLD의 질량비를 2%로 가정하였을때 TLD유무에 따른 풍속변화와 조도구분별 가속도응답을 나타내고 있다. 풍속이 증가할수록 가속도 응답은 증가를 하고 있었다. TLD가 설치되었을 경우 TLD가 없을때 보다 50%정도 rms가속도응답이 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 조도구분과 큰



<그림 8> 조도구분별 횡방향의 풍하중 스펙트럼



<그림 9> 교외지역에서의 가속도응답



<그림 10> 도심지역에서의 가속도응답

차이가 없이 일정하게 나타나고 있다. 이는 풍하중스펙트럼의 rms 해석영역이 무차원 풍속 0.1-0.4부근이며 거의 일치하기 때문이다.

4. 결 론

TLD와 MTLTD는 구조물의 진동감소 효과에 대한 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

TLD 및 MTLTD 모두가 진동제어 효과는 좋은 것으로 나타나고 있다. 그러나 MTLTD가 TLD보다는 비동조율과 감쇠율등에서 진동효과가 좋은 것으로 나타나고 있다. 여러개의 TLD로 구성된 MTLTD의 경우 적당한 TLD의 갯수와진동수폭을 결정하는것이 최적의 진동제어 효과가 나타내는 것으로 나타나고 있다. 교외지역과 도심지역의 풍동실험에서 구한 풍하중 스펙트럼을 이용한 TLD의 진동감소효과에서는 40%정도의 가속도응답 감소 효과가 있는 것으로 나타나고 있어 TLD에 의한 감소율 증가가 효과적인 가속도응답의 감소를 가져오고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 전북대학교부설공학연구원 공업기술 연구센터지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

1. A. Kareem(1983), "Mitigation of Wind Induced Motion of Tall Building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero dynamics*, 11, pp 273~284.
2. A. Kareem(1990), "Reduction of Wind Induced Motion Utilizing a Tuned Sloshing Damper"*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, pp 725~737.
3. A. Kareem, T. Kijewski, Y.Tamura(1999), "Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications," *Wind and Structures*, 2(3), pp201-251.
4. Y. Fujino, Sun., Pacheco, B. M.(1992), "Tuned

- liquid damper(TLD) for Suppressing horizontal motion of structures.", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 118(10) 1992, 2017-2030
5. Y. Fujino,(1993) "Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers(MTLTDs)", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 123
6. Y.Fujino,M.Abe,(1993) "Design Formulas for Tuned Mass Dampers Based on a Perturbation Technique", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol22, 833-854
7. Y.H.Chen(1995) "Flexibility of TLD to High-Rise Building by Simple Experiment and Comparion", *Computer & structures* Vol.57 No. 5 pp 855-861
8. E. Simiu, "Wind Effect on Structures ", 3rd Ed., John Wiley & Sons.
9. Y.L.Xu,(1991) "Vibratio Control of Wind-Excited Tall/Slender Structures", University of Sydney, Ph.D.
10. C.C.Chang,(1999) "Suppression of Vortex-Excited Vibration of Tall Building Using Tuned Liquid Dampers"*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, pp 225~237.
11. P.Chaiseri,Y.Fujino,B.M.Pacheco,L.M.Sun(1995) "Interaction of Tuned Liquid Damper (TLD) and Structure-Theory, Experimental Verification and Application", *Structural Engineering Earthquake Engineering*. JSCE 6(2) pp. 103-112
12. T.Wakahara,Y.Fujono,(1998)" A Simple Estimation of Across-wind Response of Tall Buildings with Tuned Liquid Damper", *Journal of Wind Engineering*, No76, pp 37-54
13. 김영문 역(1998), "실무자를 위한 건축물 풍동 실험 가이드북", 한국풍공학회
14. 김영문 외 2인(2002), "건축물의 내풍설계", 한림원