

# 수위의 구속조건을 고려한 LCVA의 최적형상

## Optimal Shape of LCVA considering Constraints on Liquid Level

박지훈† 김기면\* 이성경\*\* 민경원\*\*\*

Park, Ji-Hun Kim, Gi-Myun Lee, Sung-Kyung Min, Kyung-Won

(논문접수일 : 2009년 6월 1일 ; 심사종료일 : 2009년 8월 27일)

### 요지

본 연구에서는 수평관과 수직관의 단면이 다른 액체기둥흡진기(LCVA)의 제진효과를 극대화하기 위한 최적형상을 수치 해석에 의한 변수연구를 통해 찾았다. 특정 진동수에 동조되고, 동일한 총질량을 가지면서 치수 및 수위와 관련된 구속조건을 만족하는 다양한 형상의 LCVA를 설계하고, 이 가운데 가장 큰 등가감쇠비를 획득하는 형상을 찾았다. 그 결과 LCVA 형상의 설계에서 수위변동폭이 최적형상을 결정하는 중요한 구속조건 역할을 한다는 것을 확인하였다. 유체가 운동하는 평면과 직교하는 방향의 LCVA 수평폭을 증가시킬수록 등가감쇠비가 증가하였으며, 증가율은 점차 둔화되는 것으로 나타나 적정 수평폭의 결정이 중요한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 액체기둥흡진기, 최적설계, 진동제어, 등가감쇠비

### Abstract

This study addresses the optimal shape of a LCVA maximizing its vibration control effect through numerical parametric study. Various LCVAs having the same total mass and tuning frequency are designed with constraints on the dimensions and water level, and one obtaining the highest equivalent damping ratio of the controlled system is chosen as an optimal solution. As a result, it was found that the limit on the variation of the water level in the vertical liquid column plays an important role constraining the shape of the LCVA. As the LCVA width perpendicular to the plane of liquid motion increases, the equivalent damping ratio rises with slowdown so that determination of the proper width is important in design of the LCVA shape.

**Keywords** : liquid column vibration absorber, optimal design, vibration control, equivalent damping ratio

## 1. 서론

최근 들어 고층건물의 풍진동 제어를 목적으로 유체를 이용한 동조형 감쇠기의 사용이 점차 증가하고 있다. 유체를 사용하는 경우에 제작, 설치 및 유지관리가 용이하다는 장점이 있으며, 다양한 종류의 감쇠기가 개발되어 적용되고 있다. 초기에는 단순하게 육면체 또는 원통형의 용기에 담긴 유체의 출렁임을 이용한 동조액체감쇠기(tuned liquid damper, TLD)가 적용되었으며, 이후에 중력에 의한 유체의 복원력을 이용하기 위한 다른 방식으로서 동조액체기둥감쇠기(tuned liquid column damper, TLCD)가 개발되었다(Soong 등,

1997). 동조액체기둥감쇠기는 단면적이 일정한 U형 관에 채워진 유체를 이용하며, 유동하는 유체의 비중을 높일 수 있다. 반면에 액체기둥흡진기(liquid column vibration absorber, LCVA)는 TLCD와는 달리 수평관과 수직관의 단면적을 달리할 수 있어 보다 다양한 설계가 가능하며, 이와 같은 이유로 실제 건물에 적용하기에 보다 용이하다. LCVA는 Watkins(1991)에 의해 연구가 시작되었으며, Hitchcock 등(1997a, 1997b)은 LCVA의 수치해석 모델을 제안하고 단일 LCVA와 직교하는 양방향 LCVA에 대한 자유진동실험을 통해 제진성능과 수치해석모델의 검증을 실시하였다. Chang 등(1998)도 LCVA의 수치해석모델을 제

† 책임저자, 종신회원 · 인천대학교 건축공학과 조교수

Tel: 032-835-8474 ; Fax: 032-835-0776

E-mail: jhpark606@incheon.ac.kr

\* 인천대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원 · 단국대학교 건축공학과 연구교수

\*\*\* 종신회원 · 단국대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

시하였으며, 다양한 설계변수에 대한 LCVA의 제진성능을 수치해석적으로 분석하였다.

국내에서도 김홍진 등(2006)이 실제 64층 건물에 설치된 LCVA의 에너지소산성능을 검토하기 위해 축소모델을 이용한 진동대 시험을 수행하였다. 유기표(2005)는 진동대 실험을 통해 TLD와 TLCD의 특성을 비교·분석하였으며, 유기표 등(2009)은 TLCD의 수위 진폭에 따른 설치된 오리피스(orifice)의 감쇠특성을 실험적으로 연구하였다. 이성경 등(2006)은 LCVA의 등가선형화된 운동방정식에 대한 시스템 식별을 통해 운동방정식의 유효성을 검증하였으며, 수위와 단면적비에 따른 제진성능의 차이를 규명하였다.

일반적으로 유체가 아닌 고체를 사용한 동조질량형감쇠기(tuned mass damper, TMD)는 일정한 질량을 가질 때에 고유진동수와 감쇠비에 의해 제진성능이 결정된다(Soong 등, 1997). 반면에 LCVA는 주구조물과 연계된 운동방정식의 형태가 전형적인 2자유도 진동계의 형태와는 차이가 있고, 실제 제어력에 참여하는 유체는 전체 질량의 일부분이며, LCVA의 용기 형태를 결정하는 파라미터가 여럿이기 때문에, TMD와는 달리 동일한 질량의 유체에 동일한 동조식을 적용하더라도 상이한 제진효과를 갖는 설계안이 산출된다. Chang 등(1998)은 LCVA를 포함한 다양한 동조형 제진장치 최적설계를 위한 최적진동수비 및 최적감쇠비의 공식을 제안하였으나, 이를 구현하는 구체적인 LCVA 치수의 선정 기준을 제시하고 있지 않다. 반면에 Gao 등(1997)은 LCVA의 대표 치수를 변경해 가며 최적의 고유진동수비 및 수두손실계수를 찾는 연구를 수행하였으나, 엄밀한 의미에서 형상에 관한 최적화라고 할 수 없다. 또한 유체의 진폭을 관의 전체길이의 5%로 제한하는 구속조건을 부여하고 있으나 가진입력 및 제진효과에 따른 수위변동폭을 고려하고 있지 않다. Min 등(2005)은 76층 벤치마크 건물을 대상으로 단일 TLCD 및 다중 TLCD의 최적설계에 관한 연구를 수행하였으며, 고유진동수비, 감쇠비, 수평관과 수직관의 길이비의 최적값을 찾았다. 그러나 수직관과 수평관의 단면적비는 1로 고정되고, 유체의 진폭에 관한 구속조건이 설계에 반영되지 않았다.

본 연구에서는 기존 연구와는 달리 LCVA의 동특성과 관련된 설계변수뿐만 아니라 다양한 형상관련 설계변수를 종합적으로 고려하여 제진효과를 극대화하는 LCVA의 최적형상을 찾았다. 최적형상을 찾는 과정에서 LCVA의 운동방정식의 등가선형시스템으로 치환하였으며, 유체의 수위변동 및 관의 치수에 관련된 보다 구체적인 구속조건을 고려하였다. 최대 수위변동폭을 산정하기 위해 불규칙진동이론에 입각하여 유체의 최대진폭을 산정하였으며, 반복계산을 통해 설계

결과를 수렴시켰다. LCVA 최적설계 예제를 통해 형상 및 질량비에 따른 등가감쇠비 변화를 분석하였다.

## 2. 수치해석모델

LCVA의 이론적인 운동방정식은 Chang과 Hsu에 의해 제시된 바 있으며, 다자유도 구조물과 LCVA가 연계된 운동방정식은 Chang 등(1998)의 연구에서 제시된 식을 인용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F - H(G_3\ddot{w} + G_2H^T\ddot{X}) \quad (1)$$

$$G_1\ddot{w} + C_t\dot{w} + K_t w = -G_3H^T\ddot{X} \quad (2)$$

여기서,  $M$ ,  $C$ ,  $K$ 는 각각 주구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며,  $H$ 는 LCVA의 위치를 나타내는 행렬,  $X$ 와  $F$ 는 각각 주구조물의 변위, 외력 벡터이다.  $w$ 는 LCVA의 수위를 나타내며,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $C_t$ ,  $K_t$ 는 다음과 같다.

$$G_1 = \rho A_V L_e \quad (3)$$

$$G_2 = \rho A_V (b/r_A + 2h) \quad (4)$$

$$G_3 = \rho A_V b \quad (5)$$

$$C_t = 0.5\rho A_V r_A \delta |\dot{w}| \quad (6)$$

$$K_t = 2\rho A_V g \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ 와  $\delta$ 는 각각 물의 밀도와 수두손실계수이며,  $g$ 는 중력가속도이다. 또한 LCVA의 치수와 관계된  $b$ ,  $h$ 는 수평관의 길이, 수직관의 길이로서 그림 1에 도시하였으며,  $A_V$  및  $A_H$ 는 각각 수직관의 단면적 및 수평관의 단면적으로서 그림 1에 도시된 수직관 두께  $t_v$ , 수평관 두께  $t_h$  및 수평폭  $d$ 로부터 산정할 수 있다.  $r_A$ 는 수직관과 수평관의 단면적비,  $L_e$ 는 관의 유효길이로서 다음 식과 같다.

$$r_A = A_V/A_H \quad (8)$$

$$L_e = r_A b + 2h \quad (9)$$

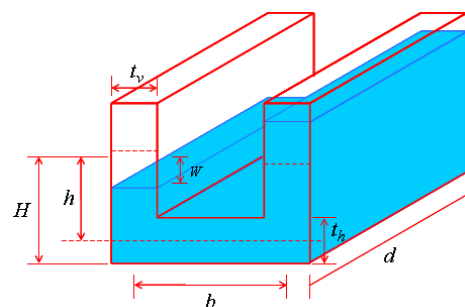


그림 1 LCVA의 치수

상기 운동방정식을 모드좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1+\mu_2 & \mu_3 \\ \mu_3 & \mu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & 0 \\ 0 & 2\mu_1\zeta_t\omega_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \mu_1\omega_t^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1^*/M_1^* \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $M_1^*$ 와  $q_1$ 은 각각 1차모드의 모드질량 및 모드좌표이며,  $\omega_1$ 과  $\zeta_1$ ,  $\zeta_t$ 는 각각 주구조물의 1차 모드 고유진동수, 감쇠비 및 LCVA운동방정식의 감쇠비이고,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  및  $\mu_3$ 는 각각 질량  $G_1$ ,  $G_2$  및  $G_3$ 에 해당되는 질량비로서 LCVA 설치 층의 모드형상을 1로 정규화하면 다음과 같다.

$$\mu_1 = G_1/M_1^*; \mu_2 = G_2/M_2^*; \mu_3 = G_3/M_3^* \quad (11)$$

### 3. 풍하중 모델

LCVA의 설계는 TMD와 마찬가지로 기본적으로는 질량비를 가정한 상태에서 최적의 고유진동수와 감쇠비를 찾게 된다. 본 연구는 특정 질량비를 갖는 LCVA의 제진효과를 극대화하기 위한 형상의 설계에 초점을 맞추고 있으며, 최적의 고유진동수와 감쇠비를 결정하는데 있어서는 기존에 Chang 등(1998)가 제시한 식을 그대로 도입하였다. Chang 등(1998)는 주구조물에 작용하는 하중을 풍하중으로 가정하고, 그에 따른 연계운동방정식 식 (10)의 등가감쇠비를 최대화하는 최적고유진동수와 최적감쇠비의 공식을 제시하였다. 풍하중의 파워스펙트럼밀도(power spectral density)는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$S_F = A_1 S_f(\omega) = A_1 \frac{2s^2}{3\omega(1+s^2)^{4/3}} \quad (12)$$

여기서,

$$s = 600\omega / (\pi \bar{\nu}_{10}) \quad (13)$$

$\omega$ 는 자신의 원진동수(circular frequency)이며,  $\bar{\nu}_{10}$ 은 지상 10m에서의 평균풍속이다. 또한,  $A_1$ 은 구조물의 1차모드에 작용하는 풍하중의 강도를 나타내며, 다음과 같다.

$$A_1 = (\phi_1^T S_P \phi_1) / (M_1^*)^2 \quad (14)$$

여기서,  $\phi_1$ 은 1차 모드의 모드형상이며  $S_P$ 는 각 층에 작용하는 풍하중 사이의 교차상관계수(cross-correlation coefficient) 행렬로서 행렬의 원소는 다음 식과 같이 정의된다(Chang 등, 1998).

$$S_{P_{ij}} = \bar{P}_i \bar{P}_j \exp\left(-\frac{|z_i - z_j|}{60}\right) \quad i, j = 1, \dots, N \quad (15)$$

여기서,  $z_i$  및  $\bar{P}_i$ 는 각각  $i$ 번째 층의 높이 및 해당 층의 풍력계수(wind force coefficient)이며,  $N$ 은 건물의 층수를 나타낸다.

### 4. 추계학적 응답산정

파워스펙트럼밀도 식 (12)에 대한 주구조물의 모드좌표  $q_1$ 의 비제어 시 분산, 제어 시 분산, LCVA 수위의 분산, LCVA 수위 변화속도의 분산은 각각 다음 식과 같다.

$$\sigma_{q_1}^2 = A_1 \int_0^\infty |H_{q_1}(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (16)$$

$$(\sigma_{q_1}^c)^2 = A_1 \int_0^\infty |H_{q_1}^c(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (17)$$

$$\sigma_w^2 = A_1 \int_0^\infty |H_w(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (18)$$

$$\sigma_w^2 = A_1 \int_0^\infty \omega^2 |H_w(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (19)$$

여기서,  $H_{q_1}(i\omega)$  및  $H_{q_1}^c(i\omega)$ 는 각각 비제어 및 제어 시의 주구조물 1차 모드좌표의 전달함수이며,  $H_w(i\omega)$ 는 LCVA 수위의 전달함수이다.

각 응답의 최대값은 최대값의 확률적 분포를 고려하여 최대치의 평균과 최대치의 표준편차의 합으로 정의하였다. 최대치의 평균과 최대치의 표준편차는 각각에 해당되는 최대응답계수  $p$  및  $q$ 를 응답의 표준편차에 곱하여 산정하였으며 최대응답계수는 Davenport가 제안한 다음 식을 적용하였다(Davenport, 1964).

$$p = \sqrt{2 \log v t_s} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \log v t_s}} \quad (20)$$

$$q = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{0.5772}{\sqrt{2 \log v t_s}} \quad (21)$$

여기서,

$$v = \sigma_w / (\pi \sigma_w) \approx \omega_1 / \pi \quad (22)$$

$t_s$ 는 자신의 지속시간으로서 300초로 가정하였다.

### 5. 최적고유진동수 및 감쇠비

LCVA의 제진성능은 연계된 시스템 운동방정식의 등가감쇠비의 증가량으로 나타낼 수 있다. 식 (10)의 원구조물의 감쇠비  $\zeta_1$  대비 등가단자유도 시스템의 감쇠비 증가량은 다

음 식과 같으며, 기본적으로 LCVA의 질량비, 고유진동수비, 원구조물과 등가선형 LCVA의 감쇠비의 함수이다.

$$\zeta_e = \frac{\gamma \zeta_1 \lambda (\zeta_t + \zeta_1 \lambda)}{\left[ \begin{aligned} &(1 + \mu_2)^2 \zeta_t \lambda^4 + \zeta_1 4(1 + \mu_2) \zeta_t^2 + \gamma \lambda^3 + \\ &\zeta_1 4 \zeta_t^2 + 4(1 + \mu_2) \zeta_t^2 + \gamma - 2(1 + \mu_2) \lambda^2 \\ &+ 4 \zeta_1 \zeta_t^2 \lambda + \zeta_t \end{aligned} \right]} \quad (23)$$

여기서,  $\lambda$  및  $\gamma$ 는 각각 LCVA와 주구조물의 고유진동수비 및 질량비로서 다음 식과 같다.

$$\lambda = \omega_t / \omega_1; \quad \gamma = \mu_3^2 / \mu_1 \quad (24)$$

여기서, 상기 등가감쇠비 증가량을 최대화하는 LCVA의 최적고유진동수비 및 최적감쇠비는 다음 식과 같다(Chang 등, 1998).

$$\lambda_{opt} = \left( \frac{\omega_t}{\omega_1} \right)_{opt} = \frac{(1 + \mu_2 - \gamma/2)^{0.5}}{1 + \mu_2} \quad (25)$$

$$\zeta_{t, opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma(1 + \mu_2 - \gamma/4)}{(1 + \mu_2)(1 + \mu_2 - \gamma/2)}} \quad (26)$$

### 6. LCVA 최적형상

기존의 연구에서는 LCVA의 최적화가 주로 고유진동수와 감쇠비에 초점이 맞추어져 수행되어왔다. 그러나, 앞서 식 (3)~(9)에서도 알 수 있듯이 LCVA의 등가선형 시스템이 갖는 다양한 파라미터들이 LCVA의 형상과 복잡한 관계를 이루고 있기 때문에 같은 고유진동수와 감쇠비를 갖는 LCVA가 다양한 형상을 가질 수 있다.

LCVA는 U자형 관의 형태를 가정하기 때문에 수위의 변화폭이 증가하면 낮은 쪽의 수위가 수평관 상부 높이보다 낮아져서 액체가 U자 형태를 유지할 수 없게 되기 때문에 운동방정식이 더 이상 유지될 수 없으며 동조에 실패하게 된다. 따라서 수위의 진폭을 다음과 같이 평형상태의 수위에서 수평관 상부까지의 거리로 제한할 필요가 있다.

$$\omega < \omega_{lim} = h - t_h/2 \quad (27)$$

그 밖에도 LCVA의 형상이 실제 구현 가능하도록 다음과 같은 제한조건이 추가된다.

$$t_v < b \quad (28)$$

$$h > t_h/2 \quad (29)$$

LCVA의 운동방정식이 식 (2)와 같이 주어지는 경우 LCVA의 고유진동수는 다음 식과 같다.

$$\omega_t = \sqrt{2g/L_c} \quad (30)$$

본 연구에서는 LCVA의 총질량  $G_2$  및 관의 폭  $d$ 를 가정하고, 단면적비  $r_A$ 와 수심  $h$ 를 변경해 가면서 최적고유진동수비의 식 (25)를 만족하는 수평관의 길이를 찾았다.

$$b = \frac{2}{r_A} \left( \frac{g}{(\lambda_{opt} \omega_t)^2} - h \right) \quad (31)$$

다음으로는 가정한 총질량을 만족하는 관의 단면적을 산정하였으며, 수직관의 단면적은 다음식과 같이 계산되며 수평관의 단면적은 가정한 단면적비를 통해 계산된다.

$$A_V = \frac{G_2}{\rho(b/r_A + 2h)} \quad (32)$$

단, 최적고유진동수비 산정을 위해서는 질량비  $\gamma$ 가 필요하므로, 최초에는 최적고유진동수비를 1로 가정하고 LCVA 형상을 결정한 뒤 이를 기초로  $\gamma$ 를 재산정하였으며, 반복계산을 통해 최적진동수비를 수렴시켰다. 최적진동수비가 수렴해감에 따라 식 (26)의 최적감쇠비 역시 수렴하며, 이로부터 LCVA의 최적수두손실계수를 산정할 수 있다. 식 (6)으로 표현되는 LCVA 감쇠계수에는 수위의 변화속도가 포함되어 있으며, 비선형성이 크지 않아 수위 변화가 정상상태의 Gauss 확률과정(stationary Gaussian process)임을 가정하면, 비선형 감쇠력과 등가선형화된 감쇠력의 제곱평균(mean square) 오차를 최소화하는 등가선형 감쇠계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Chang 등, 1998).

$$C_t = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A_V r_A \delta \sigma_w \quad (33)$$

LCVA의 속도의 표준편차를 식 (19)에서 계산할 수 있으며 등가선형 LCVA의 감쇠계수와 감쇠비 사이의 다음 관계식 (34)를 식 (33)과 연립하여 수두손실계수 식 (35)를 얻을 수 있다.

$$C_t = 2\zeta_t \omega_t G_1 \quad (34)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{2\pi} \zeta_t \omega_t G_1}{\rho A_V \gamma A \sigma_w} \quad (35)$$

결과적으로 일정한 총질량을 만족하면서 상이한  $d$ ,  $r_A$ ,  $h$ 를 갖는 다양한 형상의 LCVA가 설계된다. 본 연구에서는

표 1 LCVA 설계조건

주구조물	주기	6.25sec
	감쇠비	0.01
가진	지속시간	300sec
최대응답 계수	$p$	3.2809
	$q$	0.2392
LCVA 치수	$d$	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20m
	$h/h_{max}$	0.025~0.975@0.025
	$r_A$	0.1~3.0@0.02

총질량을 주구조물의 1%로 가정하였고, 적용된 관 폭  $d$ , 단면적비, 수심 등에 관한 설계조건을 표 1에 정리하였다. 여기서  $h_{max}$ 는 식 (31)에서  $b \geq 0$ 인  $h$ 의 최대값이다.

단자유도 주구조물의 특성은 Yang 등(2004)이 제시한 76층 벤치마크 건물을 참조하였으며, 고유주기가 6.25초, 감쇠비는 0.01, 질량은 LCVA가 설치될 최상층의 모드형상을 1로 정규화하는 경우의 1차 모드질량으로서 전체질량의 25.7%인 39,321ton으로 가정하였다. 벤치마크 건물에서는 실제 풍동실험결과를 가진입력으로 사용하였으나, 본 연구에서는 최적진동수비 및 최적감쇠비의 식 (25) 및 (26)이 풍하중의 스펙트럼밀도 식 (12)에 기초한 것이기 때문에 벤치마크 건물의 가진입력을 그대로 도입할 수 없었다. 따라서 가진입력의 진동수 성분은 스펙트럼밀도 식 (12)를 따르고, 크기를 의미하는  $A_1$ 은 수압면적, 풍속의 고도분포, 모드형상 등에 따라 달라질 수 있으나, 편의상 식 (16)의 비제어 시 1차 모드좌표의 분산  $\sigma_{q_1}$ 을 벤치마크 건물과 동일한 0.1m로 가정하여 다음과 같이 역산하여 결정하였다.

$$A_1 = \frac{\sigma_{q_1}^2}{\int_0^\infty |H_{q_1}(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega} \quad (36)$$

### 7. LCVA 설계결과

수평/수직관 단면적비 및 수심에 따른 등가감쇠비 변화를 LCVA의 폭  $d=5, 10, 15, 20$ m에 대해서 살펴보면 그림 2와 같다.

곡면의 명암이 등가감쇠비 증가량을 나타낸다. 동조가능한 단면적비와 수심의 조합은  $d$ 가 증가할수록 많아진다. 이는  $d$ 가 작아지면 소요 단면적을 만족시키는 관의 두께  $t_v, t_h$ 가 증가하여 구속조건 식 (27)~(29)를 만족하지 못하기 때문이다. 또한 각각의  $d$  값 별로 나타난 최대등가감쇠비는 작은 단면적비와 수심을 통해 얻어짐을 알 수 있다. 이는 동조상태를 유지하기 위해 관의 유효길이를 일정하게 하면서  $h$ 와  $r_A$ 를 감소시킨다면  $b$ 가 증가하여 직접적으로 구조물에 관성력을 작

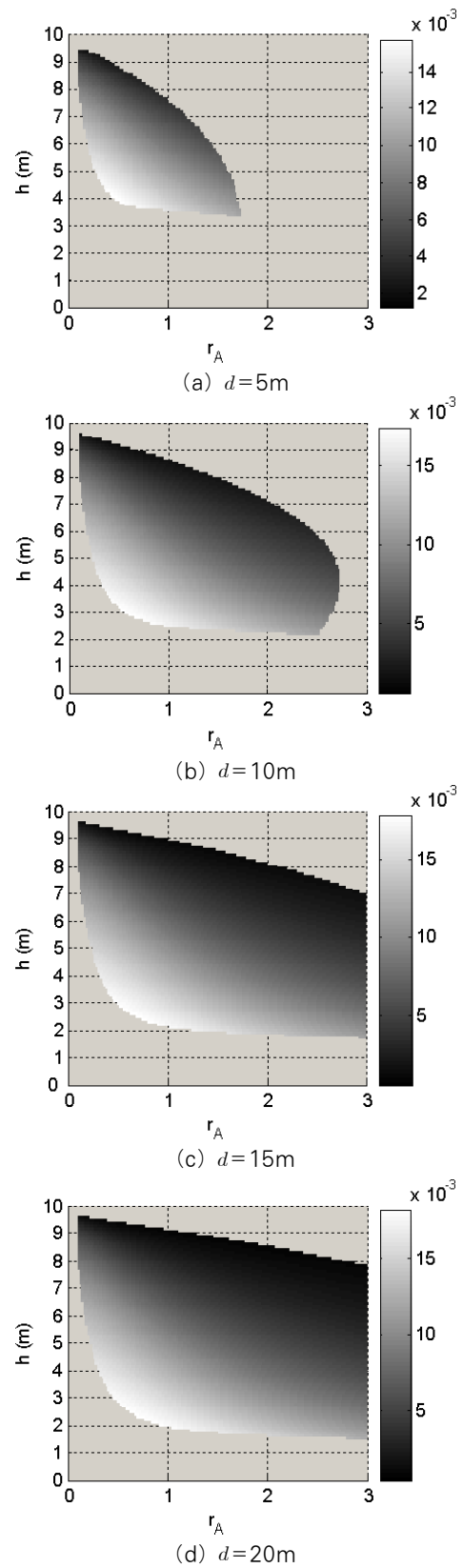


그림 2 수심 및 단면적비에 따른 등가감쇠비 증가량의 변화

용하는 수평관 유체의 질량이 증가하기 때문으로 사료된다. 각각의 LCVA 폭  $d$ 에 대해서, 최적 감쇠비와 유사한 수

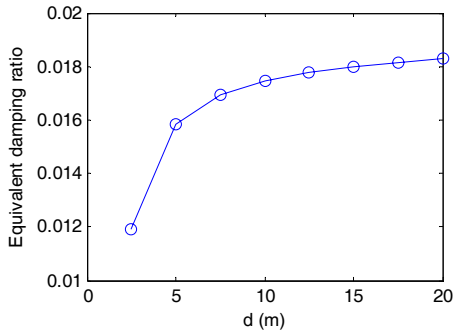
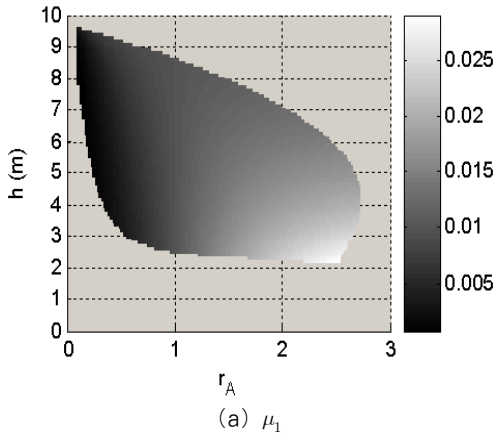
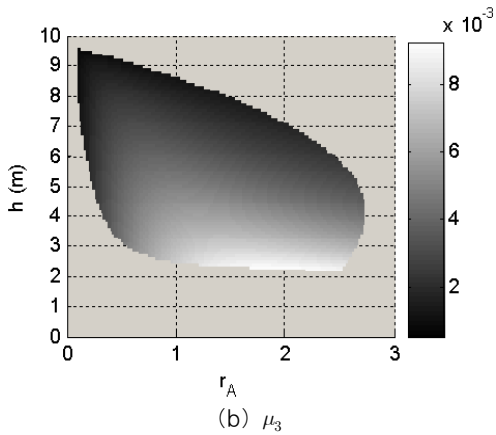


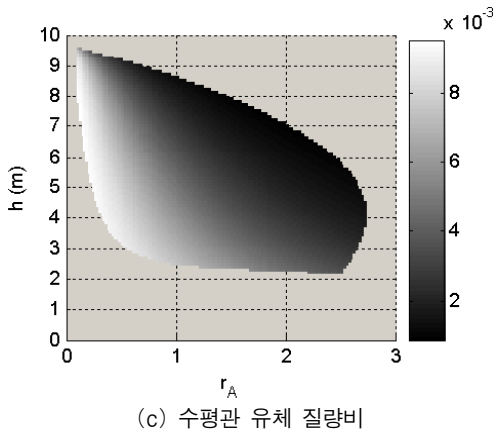
그림 3 최적 등가감쇠비



(a)  $\mu_1$



(b)  $\mu_3$



(c) 수평관 유체 질량비

그림 4 수심 및 단면적비에 따른 질량비의 변화( $d=10m$ )

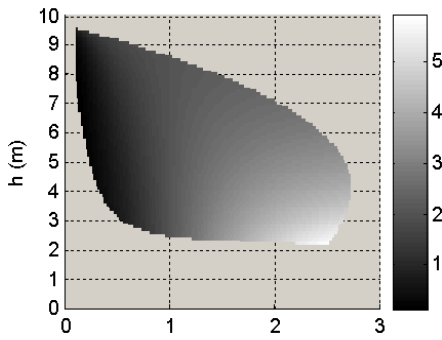
준의 감쇠비를 획득하는 다양한 수심과 단면적비의 조합이 있으며, 수심의 변동폭은 크지 않은 반면에 상대적으로 단면적비의 변동폭은 상당히 큼을 볼 수 있다. 특히 수심을 살펴 보면, 폭  $d$ 가 증가하면 최적 감쇠비에 해당되는 수심이 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 따라서 수심을 낮추려면 LCVA 폭  $d$ 를 증가시켜야 하며, 수심과 폭 사이에는 트레이드오프(trade-off) 관계가 있다.

LCVA의 폭  $d$ 의 크기별로 구한 최적감쇠비는 그림 3과 같다. LCVA의 폭이 증가할수록 최적 등가감쇠비는 약 0.012에서 0.018까지 지속적으로 증가한다. 그러나 증가율은 점차 둔화되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 예제 LCVA의 경우에  $d$ 를 10m이상으로 크게 증가시키는 것은 LCVA의 설치에 필요한 설치 소요공간을 증가시키는데 비해 제진 성능상의 큰 이점은 없다고 할 수 있다.

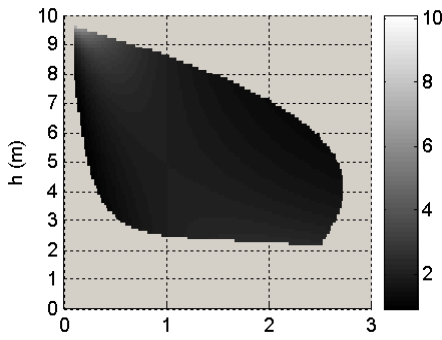
LCVA의 폭  $d=10m$ 인 경우의 질량비  $\mu_1$ ,  $\mu_3$ 의 변화를 살펴보면 그림 4(a), (b)와 같다. 질량비  $\mu_2$ 는 LCVA 총질량과 주구조물 질량의 비율로서 0.01로 고정하였으므로 변화가 없다.  $\mu_1$ 과  $\mu_3$ 를 최대화하는 수심은 유효감쇠비를 최대화하는 값과 유사하나, 단면적비는 상이한 값을 가지며, 두 질량비 모두 단면적비가 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 주구조물에 직접적으로 관성력을 작용하는 것은 수평방향으로 이동하는 유체 질량이며 수평관 유체 질량을 산정하여 주구조물에 대한 질량비로 환산하면 그림 4(c)와 같다. 단면적비가 작을수록 수평관의 질량이 증가하며, 이를 최대화하는 수심은 약 8m로서 유효감쇠비를 최대화하는 파라미터와 상당한 차이를 갖는다. 이 같은 결과는 주구조물의 운동방정식에 나타나는 제어력이 단순히 질량  $G_3$ 에만 비례하는 것이 아니고 수심의 가속도  $\ddot{w}$ 에도 영향을 받기 때문이다.

수심 및 단면적비에 따른 수직관 및 수평관 두께의 변화를 살펴보면 그림 5와 같고, 수평관 길이의 변화는 그림 6과 같다. 앞서 그림 4(c)에서 수평관 질량이 최대화되는 수심과 단면적비의 영역에 대해서 그림 5(a) 및 (b)에 나타난 수직, 수평관의 두께는 모두 상대적으로 작은 값을 가지며, 반대로 그림 6의 수평관 길이는 가장 크게 증가되어 전반적으로 관이 가늘고 길어짐을 알 수 있다. 그러나 질량비에 대해서 앞서 지적한 바와 마찬가지로 수평관의 질량비가 최대화될 때 등가감쇠비가 최대화되는 것은 아니므로, 관이 가늘고 길어질수록 우수한 성능을 가진다고 할 수는 없다.

LCVA의 폭  $d$ 별로 최적감쇠비가 얻어지는 설계파라미터에 대해 식 (35)를 통해 최적수두손실계수를 산정하였으며 그림 7에 나타내었다. LCVA의 폭이 증가할수록 최적수두손실계수도 증가하나 증가폭은 크지 않고 점차 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 따라서, 수두손실계수 획득을 위해 오리피스



(a)  $t_v = A_V / d$



(b)  $t_h = A_H / d$

그림 5 수심 및 단면적비에 따른 형상 파라미터 변화(d=10m)

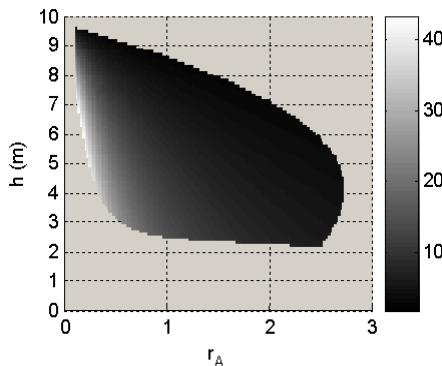


그림 6 수심 및 단면적비에 따른 수평관 길이의 변화(d=10m)

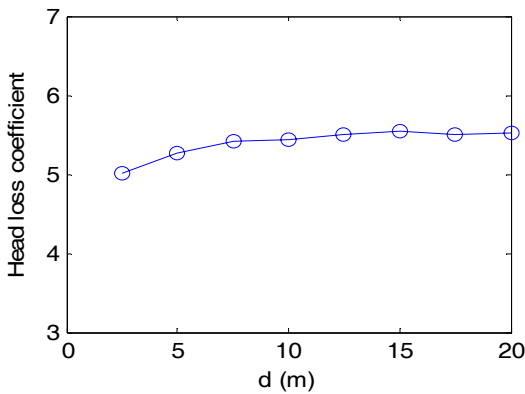


그림 7 최적수두손실계수

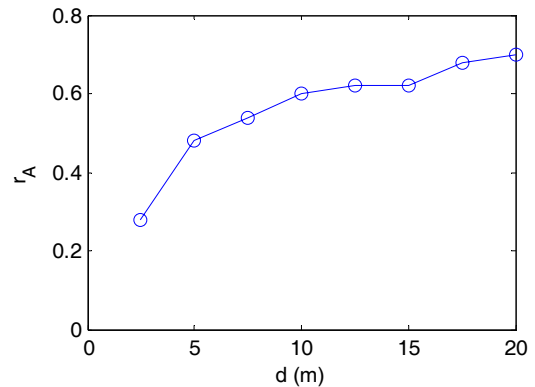


그림 8 최적단면적비

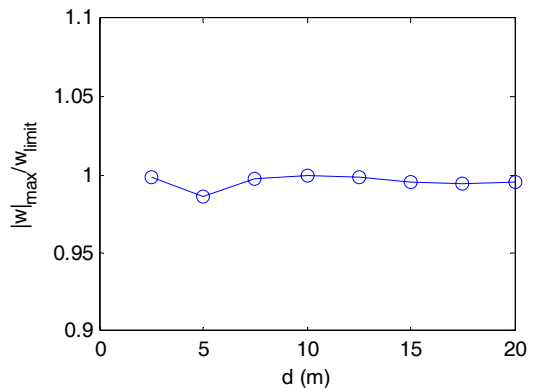
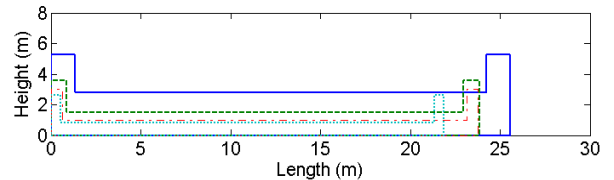
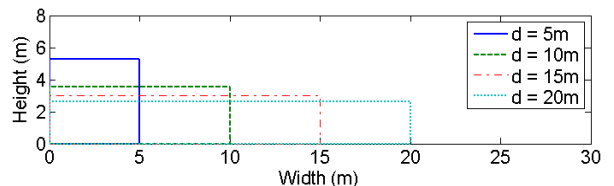


그림 9 변동폭 한계치로 정규화된 최대수위변동폭



(a) 종방향 입면



(b) 횡방향 입면

그림 10 최적 LCVA 형상

(orifice) 등의 장치를 설치하는데 드는 비용은 LCVA의 폭과는 무관한 고정비용에 가까워져서 형상결정의 중요 인자가 되지 않는 것으로 볼 수 있다.

최적감쇠비를 획득하는 관의 최적단면적비는 그림 8과 같으며, LCVA 폭이 증가할수록 증가하되 0.6 내외에서 증가폭은 둔화된다. 이는 최적화된 LCVA의 성능이 TLCVD에 비해 우수함을 나타내며, 특히 LCVA의 수평 폭  $d$ 가 작을수록 수직관은 수평관에 비해 작아져야 함을 의미한다.

최대수위변동폭은 수평관 천정에서 평형 시 수위까지의 거리를 초과해서는 안되며, 이 구속조건의 활성화 여부를 검토하기 위해 최적파라미터에 대해 최대수위변동폭을 변동폭 한계치로 정규화하여 그림 9에 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대수위변동폭의 구속조건은 대부분의 최적해에서 활성화되고 있다. 즉, 수위변동폭이 클수록 우수한 제진성능을 획득할 수 있으나 수위변동폭의 제한조건에 의해서 LCVA의 최적형상이 결정되는 가장 중요한 구속조건임을 알 수 있다.

적용된 수평폭  $d$ 의 크기별로 구해진 최적 LCVA의 형상은 그림 10와 같다. 폭  $d$ 의 변화에 비해 수평관 길이의 변화는 크지 않으며, 폭이 클수록 관이 점차 가늘어짐을 확인할 수 있다. 또한 관의 수평폭  $d$ 가 작을수록 수평관과 수직관의 단면적 차이가 커짐을 확인할 수 있다.

## 8. 결 론

일반적인 LCVA 설계과정에서는 최적진동수비로 튜닝하기 위해 요구되는 U형 단면의 형상비를 결정하고 수평폭  $d$ 의 크기를 통해 질량비를 맞추게 된다. 그러나 LCVA는 특정한 진동수비를 만족시키는 형상비가 다양하기 때문에 형상비를 결정하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 풍하중 스펙트럼에 대한 최적진동수비 및 최적감쇠비 공식을 이용하여, 동일한 총질량을 가지면서 치수 및 수위와 관련된 구속조건을 만족하는 다양한 형상의 LCVA를 설계하고, 이 가운데 가장 큰 등가감쇠비를 갖는 최적형상을 찾는 설계방법을 제시하였으며, 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 총질량이 고정된 상태에서 LCVA는 TMD와는 다르게 최적진동수비 및 최적감쇠비의 식만으로 설계가 결정되지 않는다. 최적형상의 설계에서 수위변동폭이 중요한 구속조건 역할을 하며, 이를 고려한 최적화의 필요성을 확인할 수 있었다.
- 2) LCVA의 최적형상은 관성력을 유발하는 부가질량체 역할을 하는 수평관 유체 질량을 최대화하지는 않으며, 수평관 유체의 질량과 가속도가 복합적으로 영향을 준다.
- 3) LCVA의 수평폭  $d$ 를 증가시키면 최적형상의 수직관 길이가 감소하나 수평관 길이 변화는 상대적으로 작다.
- 4) LCVA의 수평폭  $d$ 를 증가시킬수록 큰 등가감쇠비가 얻어지며, 이 때 요구되는 수두손실계수는 큰 차이가 없다.
- 5) 이제까지 LCVA의 설계에서 중요하게 다뤄지지 않았으나, LCVA의 수평폭  $d$ 는 최적형상 결정에 매우 중요한 역할을 한다.

- 6) 본 연구에서는 풍방향 진동과 관련된 풍하중의 스펙트럼 밀도를 이용하였으나 추후 풍직각방향 진동을 포함한 보다 일반적인 하중을 대상으로 한 후속 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2008-000-20796-0)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김홍진, 김현배, 조지성, 이상현, 우성식, 최기영 (2006) LCVA를 이용한 초고층건물의 풍진동 제어성능 실험평가, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 26(1), pp.13~16.
- 유기표 (2005) TLD와 TLCD의 진동성능실험, 대한건축학회 논문집 구조계, 21(5), pp.19~26.
- 유기표, 유장열, 송창현, 김영문 (2009), 동조액주관댐퍼의 가진진폭별 오리피스감쇠특성에 대한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 25(6), pp.41~48.
- 이성경, 민경원, 정희산 (2009), 전달함수를 이용한 LCVA의 설계변수 분석, 한국지진공학회 논문집, 13(4), pp.47~55.
- Chang, C.C., Hsu, C.T. (1998) Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers, *Engineering Structures*, 20(7), pp.580~586.
- Chang, C.C., Qu, W.L. (1998) Unified Dynamic Absorber Design Formulas for Wind-induced Vibration Control of Tall Buildings, *Struct. Design Tall Building*, 7, pp.147~166.
- Davenport, A.G. (1964) Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers London*, 28, pp.187~96.
- Gao, H., Kwok, K.C.S., Samali, B. (1997) Optimization of Tuned Liquid Column Dampers, *Engineering Structures*, 19(6), pp.476~486.
- Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D., Samali, B. (1997) Characteristics of liquid column vibration absorbers(LCVA) - I, *Engineering Structures*, 19(2), pp.156~134.
- Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D., Samali, B. (1997) Characteristics of liquid column vibration absorbers(LCVA) - II, *Engineering Structures*, 19(2), pp.135~144.



- Min, K.W., Kim, H.S., Lee, S.H., Kim, H., Ahn, A.K.** (2005) Performance Evaluation of Tuned Liquid Column Dampers for Response Control of a 76-story Benchmark Building, *Engineering Structures*, 27, pp.1101~1112.
- Soong, T.T., Dargush, G.F.** (1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley and Sons, USA, pp.356
- Watkins, R.D.** (1991) Test on Various Arrangements of Liquid Column Vibration Absorbers, Research Report R639, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney.
- Xu, Y.L., Shum, K.M.** (2003) Multiple-tuned Liquid Column Dampers for Torsional Vibration Control of Structures : Theoretical Investigation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, pp.309~328.
- Yang, J.N., Agrawal, A.K., Samali, B., Wu, J.C.** (2004) Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings, *Journal of Mechanics*, pp.437~446.
- Yalla S.K., Kareem, A.** (2000) Optimum Absorber Parameters for Tuned Liquid Column Dampers, *Journal of Structural Engineering*, pp.906~915.