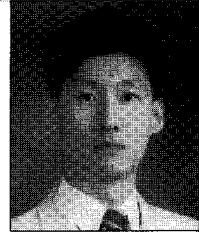


# LCVA의 최적형상

## Optimal Shape of U-Shaped Liquid for LCVA



박지훈\*

\* 인천대학교 도시건축학부 조교수

### 1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 다수의 초고층 건축물이 건설되고 있으며 국내에서도 여러 곳에 초고층 건축물의 건설이 계획되거나 진행중에 있다. 특히 국내에서는 대도시 지역으로의 인구 집중 및 토지의 부족으로 인해 초고층 주거건물이 크게 증가한 실정이다. 이들 초고층 건축물의 구조시스템 및 설계를 좌우하는 것은 주로 풍하중이며 풍동실험기술, 구조재료, 시공기술 등 관련기술의 비약적인 발전으로 인해 충분한 내풍성능을 갖는 초고층 건축물의 건설기술이 일반화되고 있다. 그러나 초고층 건축물은 풍진동에 취약하여 태풍과 같은 강풍에 의한 진동이 거주자의 업무수행이나 안락에 문제가 발생하기 쉽다.

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. 동조액체기둥감쇠기는 단면적이 일정한 U형 관에 채워진 유

체를 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

일반적으로 유체가 아닌 고체를 사용한 동조질량형감쇠기(tuned mass damper, TMD)는 일정한 질량을 가질 때에 고유진동수와 감쇠비에 의해 제진성능이 결정된다. 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.

본 연구에서는 기존 연구와는 달리 LCVA의 동특성과 관련된 설계변수 뿐만 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 설계결과를 수렴시켰다. LCVA 최적설계 예제를

통해 형상 및 질량비에 따른 증가감쇠비 변화를 분석하였다.

## 2. 수치해석모델

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

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

여기서  $M_1^*$ 와  $q_1$ 은 각각 1차모드의 모드질량 및 모드좌표이고,  $w$ 는 LCVA의 수위를 나타내며,  $\omega_1$ 과  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ 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  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ 는 다음과 같다.

$$G_1 = \rho A_V L_c \quad (2)$$

$$G_2 = \rho A_V (b/r_A + 2h) \quad (3)$$

$$G_3 = \rho A_V b \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 각각 물의 밀도이며, 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,  $L_c$ 는 관의 유효길이로서 다음 식과 같다.

$$r_A = A_V/A_H \quad (5)$$

$$L_c = r_A b + 2h \quad (6)$$

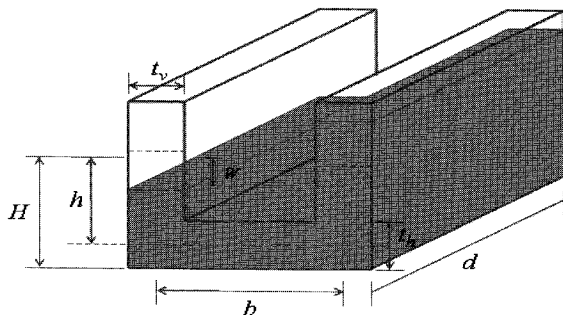


그림 1 LCVA의 치수

## 3. 최적고유진동수 및 감쇠비

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 Chang과 Qu(1998)가 제시한 Davenport의 풍하중스펙트럼에 대한 최적 진동수비 및 감쇠비 공식을 도입하였다.

LCVA의 제진성능은 연계된 시스템 운동방정식의 증가감쇠비의 증가량으로 나타낼 수 있다. 식 (1)의 원구조물의 감쇠비  $\zeta_1$  대비 증가단자유도 시스템의 감쇠비 증가량은 다음 식과 같으며, 기본적으로 LCVA의 질량비, 고유진동수비, 원구조물과 증가선형 LCVA의 감쇠비의 함수이다.

$$\zeta_e = \frac{\gamma \zeta_1 \lambda (\zeta_1 + \zeta_1 \lambda)}{\left[ (1+\mu_2)^2 \zeta_1 \lambda^4 + \zeta_1 4(1+\mu_2) \zeta_1^2 + \gamma \lambda^3 + \zeta_1 4 \zeta_1^2 + 4(1+\mu_2) \zeta_1^2 + \gamma - 2(1+\mu_2) \lambda^2 + 4 \zeta_1^2 \lambda + \zeta_1 \right]} \quad (7)$$

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

$$\lambda = \omega_1/\omega_1; \quad \gamma = \mu_3^2/\mu_1 \quad (8)$$

여기서 상기 증가감쇠비 증가량을 미분하여 LCVA의 최적고유진동수비 및 최적감쇠비를 구할 수 있다(Chang과 Qu, 1998).

## 4. LCVA 최적형상

기존의 연구에서는 LCVA의 최적화가 주로 고유진동수와 감쇠비에 초점이 맞추어져 수행되어 왔다. 그러나, LCVA의 증가선형 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.

$$\omega < \omega_{lim} = h - t_h/2 \tag{9}$$

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

$$t_v < b \tag{10}$$

$$h > t_h/2 \tag{11}$$

LCVA의 운동방정식이 식 (1)과 같이 주어지는 경우에 LCVA의 고유진동수는 다음 식과 같다.

$$\omega_i = \sqrt{2g/L_c} \tag{12}$$

본 연구에서는 LCVA의 총질량  $G_2$  및 관의 폭  $d$ 를 가정하고, 단면적비  $r_A$ 와 수심  $h$ 를 변경해 가면서 최적고유진동수비의 식 (8)을 만족하는 수평관의 길이를 찾았다.

$$b = \frac{2}{r_A} \left( \frac{g}{(\lambda_{opt}\omega_1)^2} - h \right) \tag{13}$$

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

$$A_v = \frac{G_2}{\rho(b/r_A + 2h)} \tag{14}$$

단, 최적고유진동수비 산정을 위해서는 질량비  $\gamma$ 가 필요하므로, 최초에는 최적고유진동수비를 1로 가정하고 LCVA 형상을 결정한 뒤 이를 기초로  $\gamma$ 를 재산정하였으며, 반복 계산을 통해 최적진동수비를 수렴시켰다. 최적진동수비가 수렴해감에 따라 식 (7)의 최적감쇠비 역시 수렴하며, 이로부터 LCVA의 최적수두손실계수를 산정할 수 있다. 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(Chang과 Hsu, 1998).

결과적으로 일정한 총질량을 만족하면서 상이한  $d$ ,  $r_A$ ,  $h$ 를 갖는 다양한 형상의 LCVA가 설계된다. 본 연구에서는 총질량을 주구조물의 1%로 가정하였고, 적용된 관 폭  $d$ , 단면적비, 수심 등에 관한 설계조건을 표 1에 정리하였다.

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

여기서  $h_{max}$ 는 식 (13)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.

### 5. LCVA 설계결과

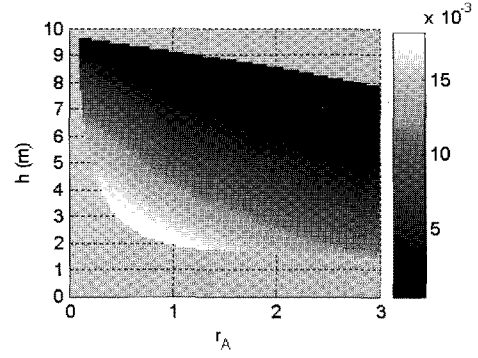
수평/수직관 단면적비 및 수심에 따른 등가감쇠비 변화를 LCVA의 폭  $d = 5, 10, 15, 20m$ 에 대해서 살펴보면 그림 2와 같다. 곡면의 명암이 등가감쇠비 증가량을 나타낸다. 동조가능한 단면적비와 수심의 조합은  $d$ 가 증가할수록 많아진다. 이는  $d$ 가 작아지면 소요 단면적을 만족시키는 관의 두께  $t_v$ ,  $t_h$ 가 증가하여 구속조건 식 (9)~(11)을 만족하지 못하기 때문이다. 또한 각각의  $d$  값 별로 나타난 최대등가감쇠비는 작은 단면적비와 수심을 통해 얻어짐을 알 수 있다. 이는 동조상태를 유지하기 위해 관의 유효길이를 일정하게 하면서  $h$ 와  $r_A$ 를 감소시킨다면  $b$ 가 증가하여 직접적으로 구조물에 관성력을 작용하는 수평관 유체의 질량이 증가하기 때문으로 사료된다.

각각의 LCVA 폭  $d$ 에 대해서, 최적 감쇠비와 유사한 수준의 감쇠비를 획득하는 다양한 수심과 단면적비의 조합이 있으며, 수심의 변동폭은 크지 않은 반면에 상대적으로 단면적비의 변동폭은 상당히 큼을 볼 수 있다. 특히 수심을 살펴보면, 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 10m 이상으로 크게 증가시키는 것은 LCVA의 설치에 필요한 설치 소요공간을 증가시키는데 비

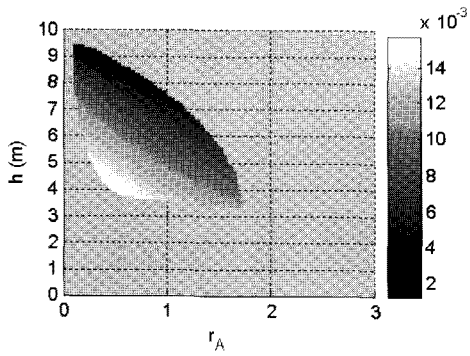
해 제진성능상의 큰 이점은 없다고 할 수 있다.

LCVA의 폭  $d=10\text{m}$ 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 유동하는 유체 질량이므로 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.



(d)  $d = 20\text{m}$

그림 2 수심 및 단면적비에 따른 등가감쇠비 증가량의 변화



(a)  $d = 5\text{m}$

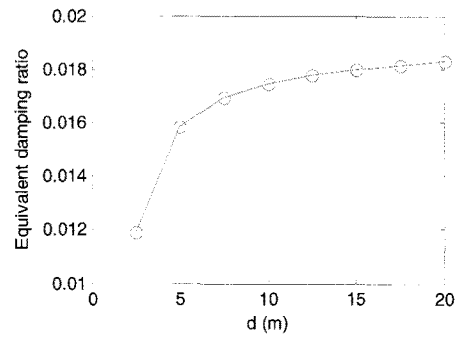
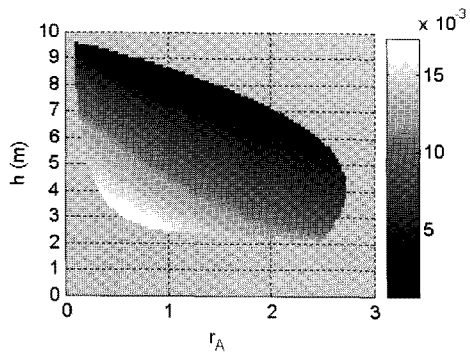
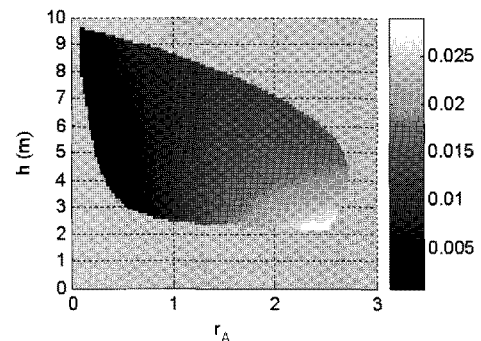


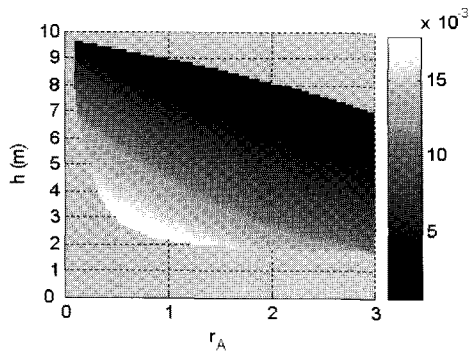
그림 3 최적 등가감쇠비



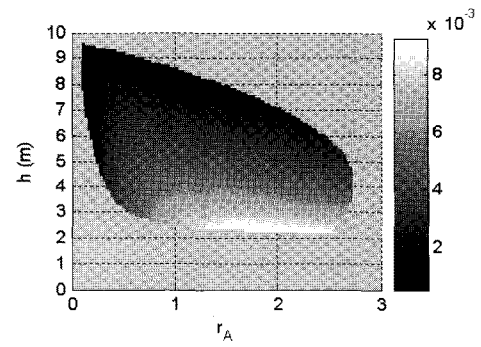
(b)  $d = 10\text{m}$



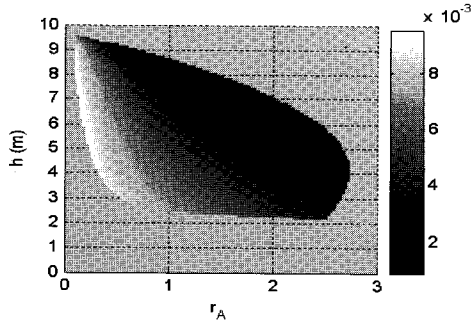
(a)  $\mu_1$



(c)  $d = 15\text{m}$



(b)  $\mu_3$



(c) 수평관 유체 질량비

그림 4 수심 및 단면적비에 따른 질량비의 변화 (d = 10m)

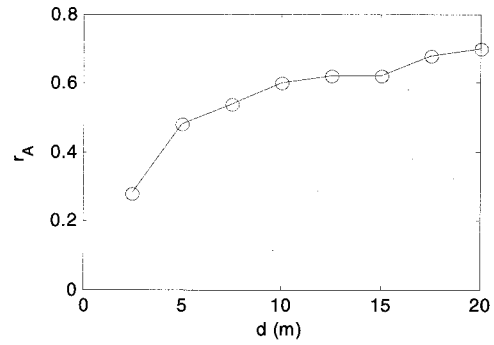
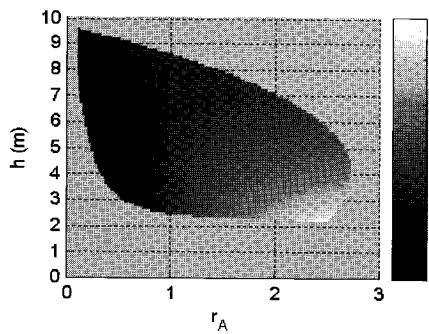
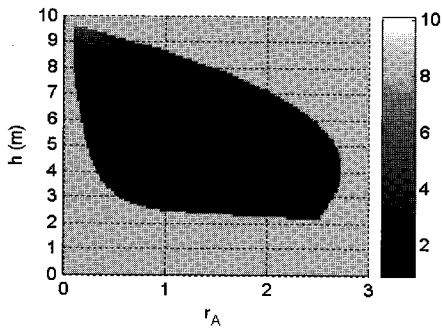


그림 7 최적단면적비



(a)  $t_v = A_V / d$



(b)  $t_h = A_H / d$

그림 5 수심 및 단면적비에 따른 형상 파라미터 변화 (d = 10m)

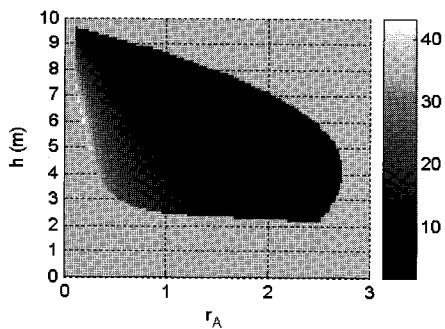
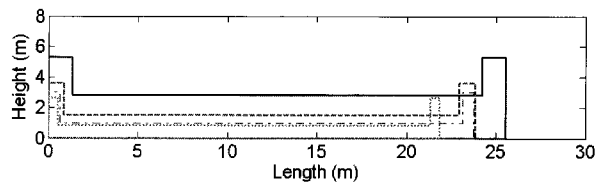
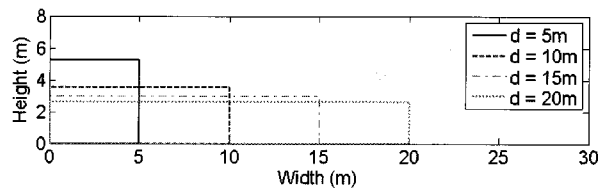


그림 6 수심 및 단면적비에 따른 수평관 길이의 변화 (d = 10m)



(a) 종방향 입면



(b) 횡방향 입면

그림 8 최적 LCVA 형상

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.

최적감쇠비를 획득하는 관의 최적단면적비는 그림 7과 같으며, LCVA 폭이 증가할수록 증가하되 0.6 내외에서 증가폭은 둔화된다. 이는 최적화된 LCVA의 성능이 TLCD에 비해 우수함을 나타내며, 특히 LCVA의 수평 폭  $d$ 가 작을수록 수직관은 수평관에 비해 작아져야 함을 의미한다.

적용된 수평폭  $d$ 의 크기별로 구해진 최적 LCVA의 형상은 그림 8와 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.

## 6. 결 언

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) 이제까지 LCVA의 설계에서 중요하게 다뤄지지 않았으나, LCVA의 수평폭  $d$ 는 최적형상 결정에 매우 중요한 역할을 한다.

## 참 고 문 헌

1. Chang, C.C., Hsu, C.T.(1998) Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 7, pp.580~586.
2. 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.
3. 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*, Vol. 28, pp.187~96.
4. Soong, T.T., Dargush, G.F.(1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley and Sons, USA, pp.356
5. 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.
6. 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
7. Alla S.K., Kareem, A.(2000) Optimum Absorber Parameters for Tuned Liquid Column Dampers, *Journal of Structural Engineering*, pp.906~915

[담당 : 유은중, 편집위원]