

다양한 수평 수직 단면적비를 가지는 LCVA의 진동특성 평가

Vibration Characteristics of Liquid Column Vibration Absorber with Various Area Ratio

정 란† · 이정우* · 박현진* · 이상현** · 우성식*** · 조승호****

Chung Lan, Lee Joung-Woo, Park Hyun-Chin, Lee Sang-Hyun, Woo Sung-Sik, and Cho Seung-Ho

Key Words : 액체기둥형감쇠장치(Liquid Column Vibration Absorber), 동적 특성(Dynamic Characteristics), 진동대 실험(Shaking Table Test), 단면적비(Area Ratio)

ABSTRACT

LCVA has an advantage that its natural frequency can be easily controlled by changing the area ratio of the vertical column and horizontal part. The previous studies investigated the dynamic characteristics of the LCVA under harmonic load. This study experimentally obtained the first and second mode natural frequencies of the LCVA from shaking table tests using white noise and compared the values with the ones by previous study. Test results show that the measured first mode natural frequency of the LCVA is larger than the calculated one when the area ratio is larger than 1. The second mode frequency increases with the increasing area ratio, which is due to the sloshing motion effect resulting from the large area of the vertical column.

1. 서 론

2007년 8월 15일 페루<리마>에 강력한 지진이 발생해 540명이 숨졌으며, 2007년 9월 7일 대만 타이베이 부근에서는 진도 6.6의 강진이 발생하여 해저 광케이블에 장애가 발생하였다. 또한 인도네시아 수마트라섬 부근에서는 2004년 발생한 진도 9.0과 2007년 9월 12일 진도 8.2의 강진이 발생하여 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 이러한 지진 피해에 대비에 구조물에 내진설계를 적용하여 피해를 예방하기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 이루어지고 있다. 그 중 구조물의 진동을 질량형 감쇠기를 이용하여 저감시키는 장치로 TMD (Tuned Mass Damper)¹⁾, TLD(Tuned Liquid Damper)²⁾, TLCD(Tuned Liquid Column Damper)³⁾ 등이 있다. 또한 최근에는 LCVA (Liquid Column Vibration Absorber)⁴⁾라는 TLCD의 변화된 형태의 감쇠기도 연구 및 개발되고 있다. 이러한 질량형 감쇠기들 중 LCVA는 물높이와 물 길이를 조절함으로써

고유주기를 조절할 수 있고, 액체가 수평을 유지하려는 중력의 힘으로 강성이 작용하기 때문에 초기 구동장치가 필요 없다. 이러한 LCVA에 대한 연구는 Watkins⁵⁾가 수치 해석을 통해 고층건물에 대한 성능을 검토하였고, Gao와 Kwok⁶⁾은 조화하중을 받는 구조물에 대한 최적 LCVA에 대해 검토하였다. 또한 Hitchcock(1997)⁷⁾은 LCVA의 특성에 관한 연구에서 조화하중을 사용하여, 전체길이 산정식에 따른 해석과 측정에서의 오차를 검토하였다. 그러나, 조화하중에 의한 실험결과는 하나의 주파수에 의해 LCVA의 거동이 발생하므로 지진과 같은 하중 형태에 대한 검토는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 실제 지진하중과 같이 진동폭이 다양한 백색잡음을 사용한 진동대 실험을 통해 단면적비에 따른 LCVA의 거동특성을 검토하였다.

2. LCVA 개요

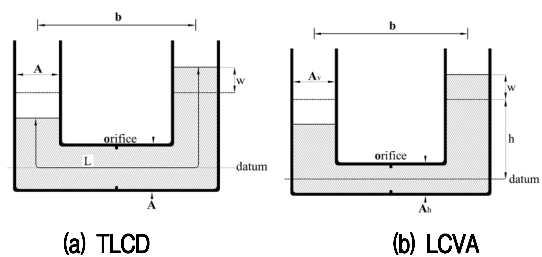


Fig. 1. Geometry of a TLCD and LCVA

† 교신저자; 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수, 공학박사
E-mail : lanchung@dgu.edu

Tel : (031) 8005-3737, Fax : (031) 8005-4038

* 단국대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 단국대학교 건축대학 건축공학과 조교수, 공학박사

*** 단국대학교 대학원 건축공학과 박사과정

**** 단국대학교 건축대학 건축공학과 연구전임강사, 공학박사

그림 1은 TLCD와 LCVA의 형상을 나타낸 것이다. LCVA는 TLCD와 같이, U자형 액체기둥 형태이지만 수평부 단면적(A_h)과 수직부 단면적(A_v)이 다른 것을 알 수 있다. 때문에 식 (1)과 같이 고유진동수 산정 시 액체의 유효길이(L_E)를 산정할 때, 단면적비(r_A)를 고려하여야 한다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_E}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, g 는 중력가속도(m/sec^2)이며, L_E 은 유효길이이다.

식 (1)에서 TLCD의 유효길이(L_E)는 식 (2)와 같으며, LCVA의 유효길이(L_E)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_E = b + 2h \quad \text{식 (2)}$$

$$L_E = r_A b + 2h \quad \text{식 (3)}$$

여기서, r_A 는 수평부 단면적대 수직부 단면적비(A_v/A_h)이고, b 는 수평부 길이, h 는 액체가 정상상태일 때 수평부 중앙부부터 측정한 액체의 높이이다.

3. 단면적비에 따른 LCVA 고유진동수 산정 실험

3.1 예비 실험

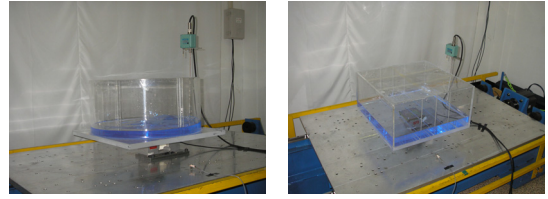
본 실험에 앞서 실험 장비와 해석 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 표 1, 2와 같은 체원을 갖는 TLD와 LCVA 실험체를 제작하여, 진동대 실험을 통해 거동특성을 파악하고 이를 산정식과 비교하였다. 입력하중은 0.1~5Hz의 주파수 범위를 갖는 백색잡음을 0.1~0.6g의 범위로 0.1g씩 증가시켜 진행하였다.

Table 1. Data for TLD

	Rectangular TLD	Circular TLD
Length (L, cm)	50	50
Width (B, cm)	50	50
Height (h, cm)	5.6	4
Natural frequency (Hz)	0.72	0.72

Table 2. Data for LCVA

Length (b, cm)	Width (B, cm)	Cross-section areas of horizontal column (A_h , cm ²)	Cross-section areas of vertical column (A_v , cm ²)
75	30	525	600



(a) Circular (b) Rectangular

Fig. 2. TLD

그림 3, 4는 직사각형 TLD와 원형 TLD의 진동대 바닥판 가속도에 대한 전단력 전달함수를 나타낸 것이다. 고유진동수는 0.73Hz로 산정식에 의한 진동수 0.725Hz와 유사하게 나타났다.

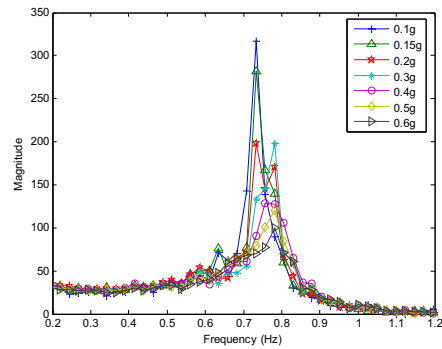


Fig. 3. Transfer function amplitude(Rectangular TLD)

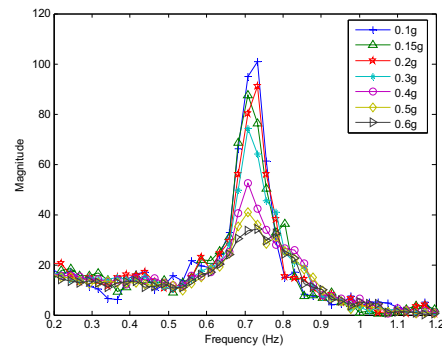


Fig. 4. Transfer function amplitude(Circular TLD)

하지만 동일한 하중을 사용한 LCVA 실험결과는 표 3에서 보는 바와 같이 산정식과 실험에 의한 고유진동수에 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Natural Frequency of LCVA

Length of vertical column (L_v , cm)	Height (h, cm)	Natural frequency (Hz)	
		Calculated	Measured
20	17.75	0.6400	0.6856
	19.75	0.6297	0.6592
	24.75	0.6060	0.6348

이러한 실험결과와의 오차를 재확인하기 위해 선행연구 중 P. A. Hitchcock(1997)의 연구에 사용한 실험체와 같은 실험체를 제작하였고, 최대가속도 0.025g의 백색잡음을 가진 하중으로 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 그림 5는 P. A. Hitchcock의 연구결과 중 단면적비와 수심의 변화에 따른 고유진동수를 산정식과 비교하여 나타낸 것이며, 그림 6은 P. A. Hitchcock의 연구결과와 비교를 위해 제작한 실험체의 실험결과로 선행 연구 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 산정식과 실험에 의한 고유진동수에 오차가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 LCVA 실험결과와 산정식이 일치하지 않는다는 것을 의미하며, 이에 본 연구에서는 LCVA의 단면적비별 고유진동수 오차를 검토하기 위한 실험을 수행하였다.

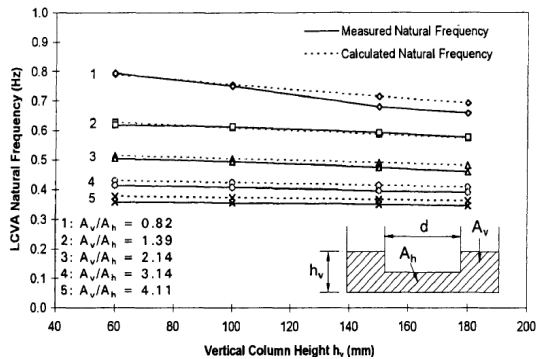


Fig. 5. Variation of LCVA natural frequency with area ratio and vertical column height (by P. A. Hitchcock)

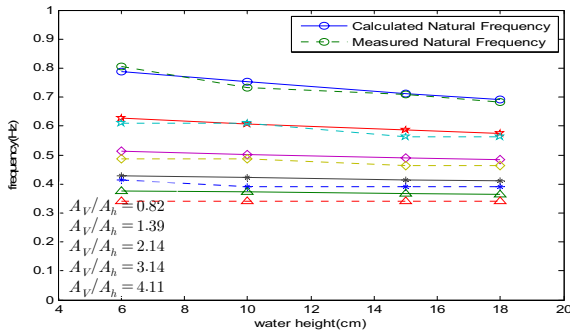


Fig. 6. Variation of LCVA natural frequency with area ratio and vertical column height (by this study)

3.2 실험 개요

그림 7은 LCVA의 진동대 실험을 위한 실험체 설치형상이다. 진동대를 통해 모사된 가속도를 파악하기 위해 진동대 바닥에 가속도계를 설치하였고, LCVA 밑면에 로드셀을 설치하여 밑면전단력을 측정하였다. 또한 파괴계를 수직 기둥에 설치, 파괴를 측정하여 밑면전단력에 의해 계측된 데이터와 비교 실험의 신뢰성을 높였다. 진동대 및 계측센서의 상세제원은 표 4와 같다.

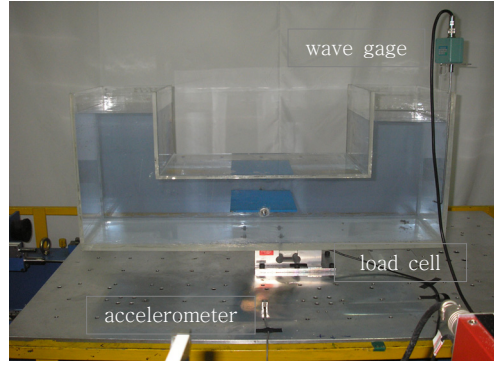


Fig. 7. Test set-up

Table 4. Specification

		Properties
Shaking table	Sub-motor	10V, 33cm/sec
	Motor Driver	20cm, 16.7N·m
Accelerometer		AS-2GB (2g)
Load cell		OBUX-200 (200kg, 2mV/V)
Wave gage		CHT6-30 (300mm)

실험에 사용한 하중은 그림 8과 같이 0.2~15Hz 주파수 범위를 갖는 백색잡음으로 최대가속도는 0.025g이며, 가진 시간은 400초로 하였다. 이렇게 가진된 입력하중은 D/A 보드를 통해 진동대 구동신호로 변환되어 모사되고, 모사된 하중을 통해 LCVA의 전단력과 파고 응답이 계측된다. 계측된 응답은 증폭기를 통해 고유한 값을 갖도록 변환되며, A/D보드를 통해 컴퓨터에 디지털 신호로 저장된다. 이때 사용한 실험체 크기는 표 2와 같다.

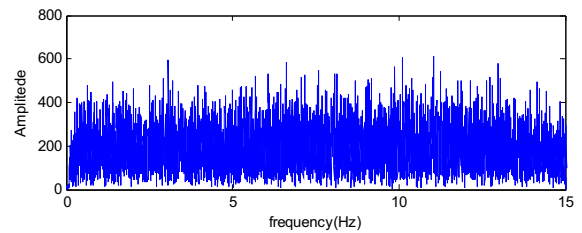


Fig. 8. White noise

Table 5. Test variable

	b (cm)	B (cm)	$r_A(A_v/A_h)$	h (cm)
Lv200Lh175	75	30	1.14	14.75
Lv200Lh165			1.21	
Lv200Lh155			1.29	
Lv200Lh145			1.38	
Lv200Lh135			1.48	
Lv200Lh125			1.60	
Lv200Lh115			1.74	
Lv200Lh105			1.90	
Lv200Lh95			2.11	

실험 변수로는 수평 기둥 단면적을 $525\text{cm}^2 \sim 285\text{cm}^2$ 까지 30cm^2 간격으로 변화시켰으며, 이를 단면적비로 나타내면 표 5와 같다. 이때 수심은 일정하게 유지하였다.

4. 실험 결과 및 분석

실험을 통해 측정된 가속도와 전단력 데이터를 사용하여 전달함수를 구성하였고, 전달함수는 4,096개의 데이터를 가지는 표본들을 데이터 중첩하지 않은 상태로 구성하였다.

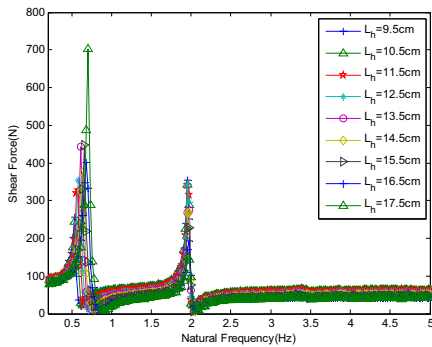


Fig. 9. Transfer function amplitude

그림 9는 전달함수에 의한 진동수에 따른 응답을 나타낸 것으로 1차 모드와 2차 모드가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 백색잡음을 가진함으로써, LCVA 액체의 수직운동과 함께 수직 기둥부에서 액체의 출렁임 거동이 동시에 발생하면서 나타난 현상이며, 각기 다른 액체 거동에 따른 각 모드별 고유진동수의 변화경향은 그림 10, 11과 같다.

그림 10은 액체의 수직운동에 의해 나타나는 LCVA 1차 모드에 고유진동수 대한 실험결과와 산정식에 의한 결과를 나타낸 것으로 실험결과가 산정식보다 큰 고유진동수 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 오차는 단면적비가 작을수록 증가하여 단면적비 1.14에서는 산정식에 의한 결과보다 8% 증가한 0.708Hz의 고유진동수를 나타내었으며, 단면적비가 커질수록 오차는 감소하여, 단면적비 1.90에서는 0.537Hz로 2%의 오차를 나타내었다.

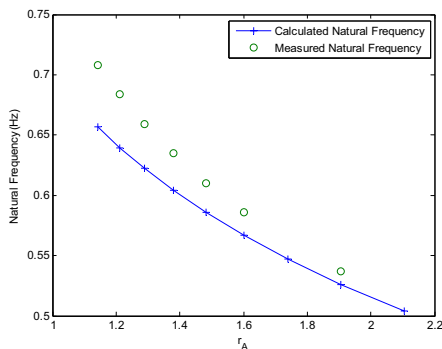


Fig. 10. Natural frequency with area ratio

수직부 기둥의 출렁임 현상에 의해 발생된 2차 모드의 단면적비별 변화 경향은 그림 11과 같이 나타나고 있다. 그림 11에서와 같이, LCVA의 수직부 기둥의 높이, 수심 등을 TLD 산정식⁽²⁾에 대입하여 나타낸 결과와 실험결과에 의한 2차 모드 진동수가 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

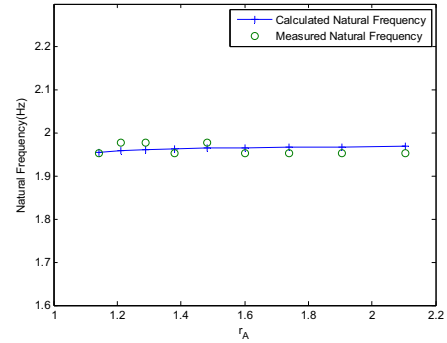


Fig. 11. 2nd mode frequency with area ratio

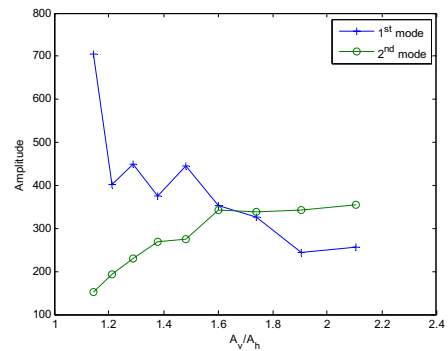


Fig. 12. Compare with first and second mode frequency

그림 12는 1차 모드와 2차 모드의 최대응답을 나타낸 것으로 단면적비가 작을수록 1차 모드가 지배적으로 나타나고 있으나, 단면적비가 커질수록 1차 모드의 최대응답은 감소하고, 2차 모드의 최대응답이 증가하여 단면적비 1.6 이후로는 2차 모드가 1차 모드의 응답보다 커져 전체 액체의 운동을 지배하는 것으로 나타났다.

이러한 2차 모드의 증가는 LCVA 액체의 수직운동을 저하시키고, 제어력이 감소되는 원인이 된다.

5. 결론

본 연구에서는 백색잡음을 사용하여 단면적비(r_A)에 따른 LCVA의 거동특성 파악을 위한 진동대 실험을 수행하였고, 결론은 다음과 같다.

1) 백색잡음을 사용한 실험 결과 LCVA의 고유진동수는 기존 산정식보다 높게 나타났다.

2) 단면적비가 커질수록 1차 모드 응답이 작아지고 2차 모드 응답이 증폭되어 단면적비가 1.6보다 클 때에는 2차 모드가 지배적으로 나타났다.

기존의 산정식과 실험에 의한 고유진동수의 오차를 줄이는 산정식의 보정과 단면적비가 커질수록 2차 모드 응답이 증가하는 것을 방지하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2005년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심-D06)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참 고 문 헌

- (1) J. P. Den Hartog, 1956, Mechanical Vibrations, 4th edn, McGraw-Hill, New York.
- (2) T. T. Soong, and G. F. Dargush, 1997, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons.
- (3) Sakai, F., Takaeda S., and Tamaki T., 1989, "Tuned Liquid Column Damper—New Type Device for Suppression of Building Vibrations", Proc. Int Conf. on High Rise Building, Nanjing, China, pp. 25–27.
- (4) C. C. Chang and C. T. Hsu, 1998, "Control performance of liquid column vibration absorbers", Engineering Structures, Vol. 20, No. 9, pp. 580–586.
- (5) Watkins, R. D., and Hitchcock, P. A., 1992, "Tests on various liquid column vibration absorbers", in Proc. Int Conf. Motion and Vibration Control Yokohama, pp. 1130–1134.
- (6) H. Gao and K. C. S. Kwok, 1997, "Optimization of tuned liquid column dampers", Engineering Structures, Vol. 19, No. 6, 476–486.
- (7) P. A. Hitchcock, K. C. S. Kwok and R. D. Watkins, 1997, "Characteristics of liquid Column vibration absorbers (LCVA)–I", Engineering Structures, Vol. 19, No. 2, pp. 126–134.
- (8) Katsuhiko Ogata, 2004, System Dynamics, Prentice Hall(Forth Edition).
- (9) 김홍진 등, 2006, "LCVA를 이용한 초고층건물의 풍진동 제어성능 실험평가", 추계학술발표대회 논문집, 대한건축학회, Vol. 26, No. 1, pp. 13–16.