

수직-수평부 단면적비에 따른 동조액체기둥형 감쇠장치의 고유진동수 산정식 제안

Proposition to Natural Frequency of Liquid Column Vibration Absorber with Vertical-horizontal Area Ratio

우 성 식*·정 란†·이 정 우*

Sung-Sik Woo, Lan Chung and Joung-Woo Lee

(2008년 3월 10일 접수 ; 2009년 1월 19일 심사완료)

Key Words : Liquid Column Vibration Absorber(액체기둥형 감쇠장치), Shaking Table Test(진동대 실험), Natural Frequency(고유진동수), Regression Analysis(회귀분석)

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 has a different value compared with calculated one. The effective length(L_e) was revised using by power equation. In the case01 to 19, the standard deviation(s_r) is 4.7292 and the coefficient of correlation(r) is 0.9856. In the case21 to 61, the standard deviation(s_r) is 14.2143 and the coefficient of correlation(r) is 0.9935. 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

구조물에 발생하는 풍하중 및 지진하중을 제어하기 위한 방법으로 구조물 자체의 내풍, 내진성능을 향상시키는 방안과 추가적인 감쇠장치를 이용하는 방법이 있다⁽¹⁾. 여러 감쇠장치 중 액체를 이용한 감쇠장치인 동조액체기둥감쇠기(tuned liquid column damper, TLCD)는 Fig. 1과 같이 U자 관형으로 이루어져 있으며, 관내 액체의 유효길이를 조절하여 제어대상 구조물의 1차 모드 고유진동수와 동조시켜

응답을 제어하는 감쇠장치이다^(2,3). 이러한 TLCD와 같은 동조액체기둥형 감쇠장치는 선행연구를 통해 풍하중은 물론 지진하중에서도 20% 이상의 제어성을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다⁽⁴⁾. 하지만 기존 TLCD는 설계되는 구조물에 큰 공간을 필요로 하며, 설계 대상 구조물에 대한 설계 고유진동수와 실제 고유진동수의 차이가 발생할 경우, 관내 액체의 길이만으로는 동조가 어려워지는 문제점이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 제안된 LCVA(liquid column vibration absorber)는 TLCD와 동일한 U자 형태를 갖고 있으나, 수직-수평부의 폭을 달리하여 고유진동수를 조절 할 수 있다는 장점이 있다(Fig. 1참조). 이러한 LCVA는 Watkins⁽⁵⁾에 의해 처음 제안되었으며, Gao와 Kwok 등⁽⁶⁾은 조화하중을 받는

† 교신저자; 정희원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : lanchung@dgu.edu
Tel : (031)8005-3737, Fax : (031)8005-4038
* 정희원, 단국대학교 건축공학과

구조물에 최적 LCVA를 제안하였다. 이 후 Hitchcock⁽⁷⁾은 수치해석 및 실험을 통해 액체의 유효길이(L_e) 산정식을 제안하였다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (1)$$

여기서, f_d 는 TLCD와 LCVA의 고유진동수를 나타내며, g 는 중력가속도이고, L_e 는 액체의 유효길이를 나타낸다.

액체의 유효길이(L_e)는 TLCD와 LCVA에 따라 식 (2), (3)과 같이 산정한다.

$$\text{TLCD} : L_e = b + 2h \quad (2)$$

$$\text{LCVA} : L_e = r_A(b + 2h) \quad (3)$$

여기서, r_A 는 수평부 단면적에 대한 수직부 단면적비(A_v/A_h)이고, b 는 수평부 길이, h 는 액체가 정상상태일 때 수평부 기둥의 중앙부부터 측정된 액체의 높이이다.

하지만 식 (1)의 고유진동수 산정식은 선행연구를 통해 고유진동수 간에 오차가 발생하는 것으로 확인

되었다⁽⁹⁾. 이러한 오차는 고유진동수 산정에 따라 제대로 설계된 경우에도 대상구조물의 고유진동수와 동조가 되지 않는 문제점을 발생시킬 수 있으며, 이는 LCVA가 제어장치로서 기능을 수행할 수 없다는 문제점을 야기할 수 있다. 또한 수직부 폭의 넓이에 따라 출렁임에 의해 발생하는 2차 모드 응답의 발생 및 증가현상은^(8,9) 1차 모드 유효질량을 감소시키거나, 비동조 모드를 가진할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 백색잡음을 사용한 진동대 실험을 통해 수심의 변화와 수직·수평부의 단면적비의 변화에 따른 LCVA의 거동특성을 파악하여 기존 산정식과 비교 후, 실험을 바탕으로 한 고유진동수 보정식을 제안하였다.

2. 실험 개요

Fig. 2는 LCVA의 진동대 실험을 위한 설치형상을 나타낸 것이다. 바닥판에 설치된 가속도계는 입력신호를 통해 진동대에서 구현된 가속도의 특성이 정확하게 모사되었는지에 대한 판단과 전달함수 구성을 위해 설치하였고, LCVA 밑면에 설치한 로드셀은 외력에 의해 발생한 밑면전단력을 측정하였다. 또한 LCVA 수직부 기둥에 설치한 파고계를 통해

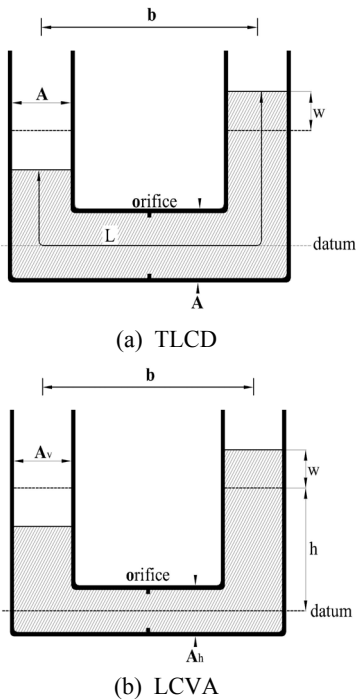


Fig. 1 A schematic of the U-type liquid damper

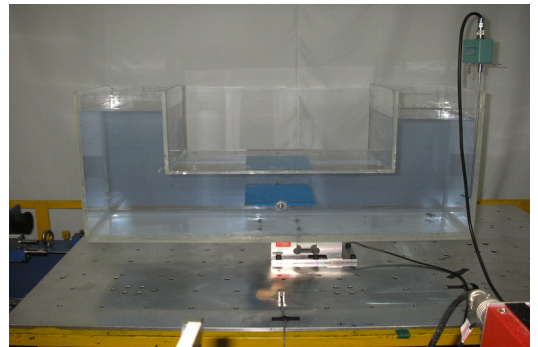


Fig. 2 Experiment set-up of LCVA

Table 1 Specification

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

밀면전단력과 비교를 하여 측정 데이터의 신뢰성을 검증하였다. 실험에 사용한 진동대 및 계측센서의 상세제원은 Table 1과 같다.

이 실험에 사용한 입력하중은 Fig. 3과 같이 0.2~15 Hz 주파수 범위를 갖고 최대가속도가 0.025 g인 백색잡음을 사용하였으며, 전달함수 구성시 많은 데이터 구간을 얻기 위하여 가진시간을 400초로 설정하였다. 이렇게 가진된 입력하중은 D/A(digital/analog) 보드를 통해 진동대 구동신호로 변환되어 모사되고, 모사된 하중을 통해 LCVA의 전단력과

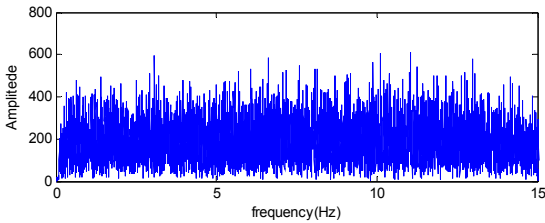


Fig. 3 White noise Fourier spectra

Table 2 Experiment case and specification

Case	B (cm)	D (cm)	L_v (cm)	L_h (cm)	r_A (A_v/A_h)	h_v (cm)	
01	30	95	10	9.5	1.05	9.75~18.75	
02				10.5	0.95	10.25~19.25	
03				11.5	0.87	10.75~19.75	
04				12.5	0.80	11.25~20.25	
05				13.5	0.74	11.75~20.75	
06				14.5	0.69	12.25~21.25	
07				15.5	0.65	12.75~21.75	
08				16.5	0.61	13.25~22.25	
09				17.5	0.57	13.75~22.75	
11			20	95	9.5	2.11	9.75~18.75
12					10.5	1.90	10.25~19.25
13					11.5	1.74	10.75~19.75
14					12.5	1.60	11.25~20.25
15					13.5	1.48	11.75~20.75
16					14.5	1.38	12.25~21.25
17					15.5	1.29	12.75~21.75
18					16.5	1.21	13.25~22.25
19					17.5	1.14	13.75~22.75
21					32	86.6	2.3
31	1.39						
41	2.14						
51	3.14						
61	4.11						

파고 응답이 예측된다. 예측된 응답은 증폭기를 통해 고유한 값을 갖도록 변환되며, A/D(analog/digital)보드를 통해 컴퓨터에 저장된다. 실험을 통해 예측된 가속도와 전단력 데이터를 사용하여 전달함수를 구성하였고, 전달함수는 4,096개의 데이터를 가지는 표본들을 데이터 중첩하지 않은 상태로 구성하였다.

이 연구를 위한 실험체 계획을 Table 2에 나타내었다. Case01~09와 11~19는 폭(D)이 95 cm, 높이(B)가 30 cm 실험체로 기둥의 수직부폭(L_v)을 각각 10, 20 cm로 고정시키고, 수평부 높이(L_h)를 변화시켜 수직-수평 단면적비(r_A)를 변화시켰으며, 각각의 단면적비에 따른 수심(h_v)변화에 따른 경향 파악을 위해 수심을 1 cm 씩 증가시켰다. Case21~61은 실험체의 높이(B)와 수평부 높이(L_h)를 고정시키고, 수직부 폭(L_v)을 5가지로 구분하여 3 cm 간격(Δh_v)으로 수심(h_v)을 증가시켰다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 수심 변화에 따른 LCVA 거동특성

Table 2와 같이 실험체 별로 수심을 달리하여 진동대 실험을 수행하였으며, 수심 변화에 따라 발생하는 동적특성을 파악하였다.

Fig. 4는 수평부 높이를 2.8 cm로 고정한 case21~61의 실험을 통해 파악된 밀면전단력 전달함수를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이, LCVA의 수직부 기동폭이 증가함에 따라 2차 모드가 발생하고 있으며, 계속 증폭되는 것을 알 수 있다. 이는 선행연구에서 파악한 것과 동일한 현상으로 기동내 액체의 수직운동을 방해하는 요소로 작용한다.

Fig. 5는 실험을 통해 파악된 밀면전단력 전달함수의 1, 2차 모드의 최대값을 바탕으로 case01~61의 1차 모드 응답과 2차 모드 응답을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)~(d)에서 수심이 증가하는 경우 2차 모드 응답은 증가하며, $L_v=10$ cm인 Fig. 5(a), (b)에 비해 $L_v=20$ cm인 Fig. 5(c), (d)가 2차 모드 응답의 변화가 크음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 5(e), (f)와 같이 수평부 높이가 일정한 상태에서 수직부 폭이 넓어지는 경우, 더욱 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다.

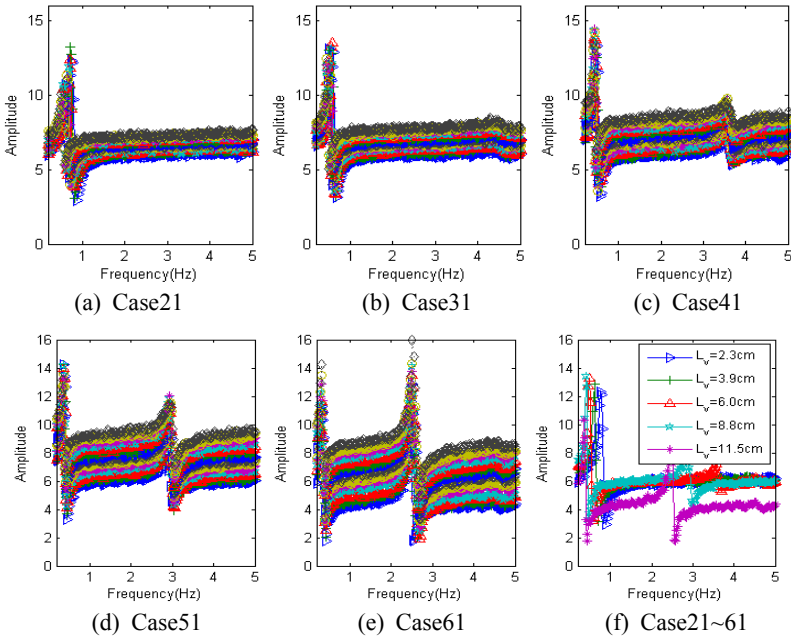


Fig. 4 Base shear force responses by white noise excitation

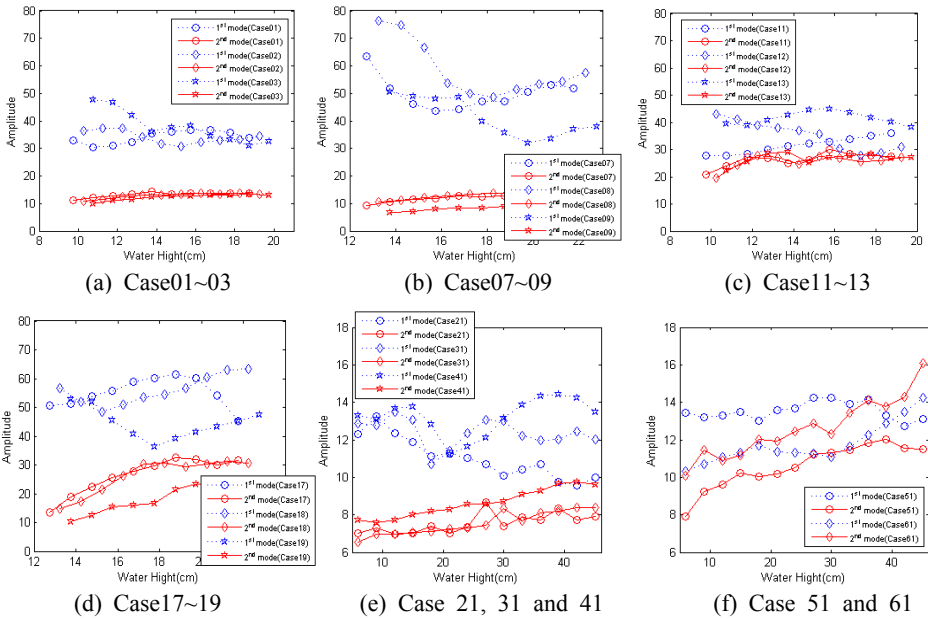


Fig. 5 1st and 2nd modal response

Fig. 6은 전체 응답에 대한 1차 모드 응답의 비율을 나타낸 것으로 각 case별 수심변화에 따른 1차 모드 응답 비율의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a)~(c)와 같이 L_v 가 10 cm인 경우에는 h_v 가 증가하여도 1차 모드 응답 비율이 70%로 높게 분포

를 하지만, (d)~(f)와 같이 L_v 가 20 cm인 경우에는 h_v 가 증가할수록 1차 모드 응답 비율이 60% 이하로 분포하는 것을 알 수 있다. 하지만 단면적비 (r_d)가 작은 (c), (f)는 1차 모드의 응답 비율이 큰 것을 알 수 있다.

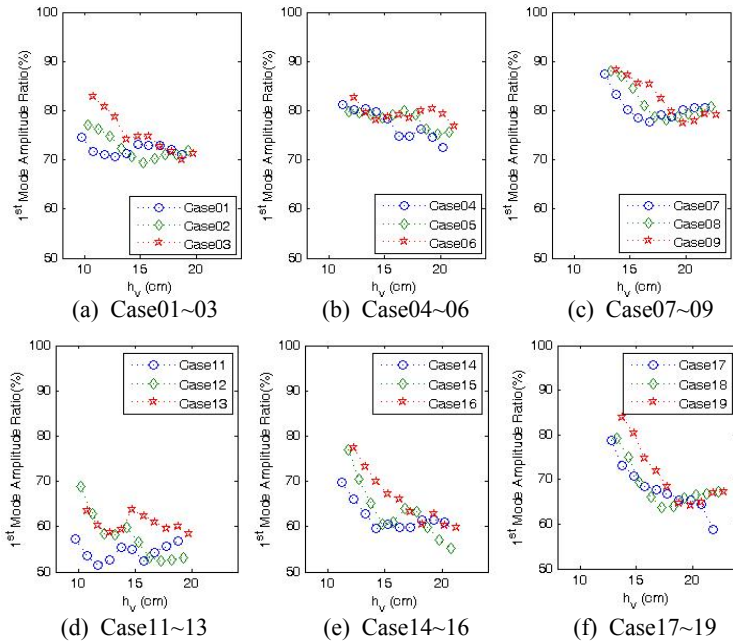


Fig. 6 1st modal response ratio (%)

3.2 단면적비에 따른 LCVA 거동특성

Fig. 7은 기존 제안된 산정식과 실험을 통해 파악된 1차모드 고유진동수를 비교한 것이다. Table 2와 Fig. 7에서 나타나듯, 단면적비 1 이하에서는 계산된 고유진동수 분포보다 낮은 분포를 나타내고 있으며, 단면적비가 1 이상인 경우, 실험결과가 계산결과 보다 높게 분포되는 것으로 나타났다. 하지만 case21~61의 경우, 대체로 식(1)과 일치하는 것을 알 수 있다.

$$f_{TLD} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad (4)$$

수직부 기동에 발생한 2차 모드 진동수성분의 현상을 파악하기 위하여 식(4)와 같은 동조액체감쇠기(tuned liquid damper, TLD)의 고유진동수 산정식을 사용하여, LCVA의 액체기동 수직부 폭(L_v)을 L 로 산정하고, 액체기동의 수직부에 물높이(수심)를 h 로 산정하여 해석하였고, 이를 실험을 통해 파악한 2차 모드와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8에서 나타나듯, 해석 및 실험결과가 모든 실험체에서 거의 동일한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 실험체에서 발생한 2차 모드는 백색잡음에 의해 수직부 기동부가 깊은 수심을 갖는 동조액체감쇠기와 같이 표

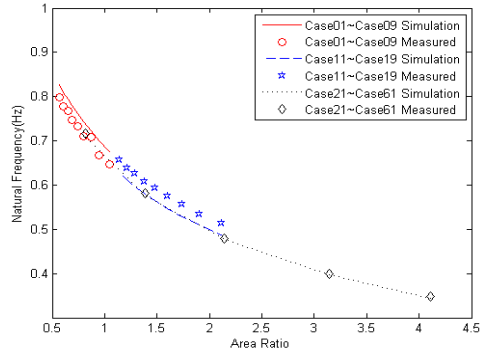


Fig. 7 1st modal frequency by area ratio(water depth-15 cm)

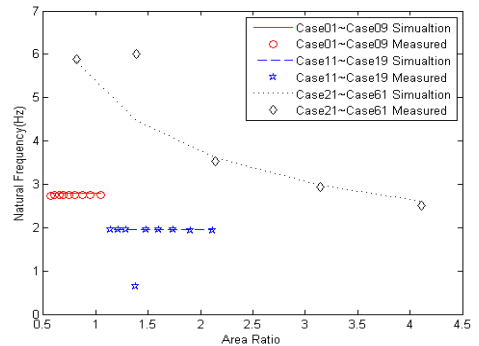


Fig. 8 2nd modal frequency by area ratio(water depth-15 cm)

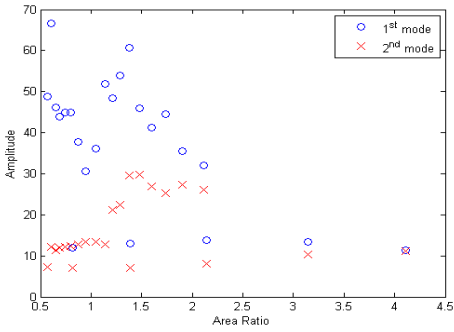


Fig. 9 1st, 2nd modal response (water depth-15 cm)

면의 출렁임에 따른 것으로 판단된다.

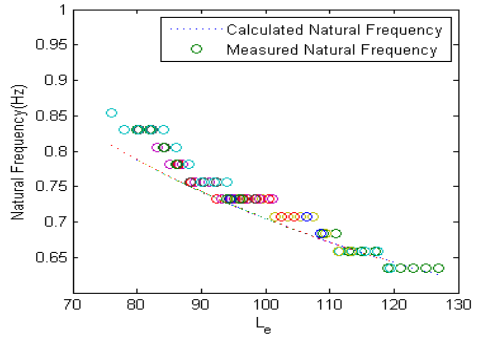
이러한 단면적비별 2차 모드의 경향에 따른 1차 모드의 변화경향을 파악하기 위하여 Fig. 9와 같이, LCVA의 수심(h_v)이 15 cm인 경우의 1차 모드와 2차 모드의 최대응답으로 나타내었다. Fig. 8과 같이 단면적비가 작을수록 1차 모드가 지배적으로 나타나고 있으나, 단면적비가 커질수록 1차 모드의 최대응답은 감소하고, 2차 모드의 최대응답이 증가하였다. 이러한 2차 모드의 증가는 LCVA 액체의 수직운동을 저하시키고, 제어력을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 LCVA의 성능 저하를 방지하기 위해서는 수평부 단면적에 대한 수직부 단면적비(r_A)가 1이 되도록 칸막이를 설치하여 액체의 출렁임을 억제하면, 2차 모드 응답을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 기존 산정식의 보정

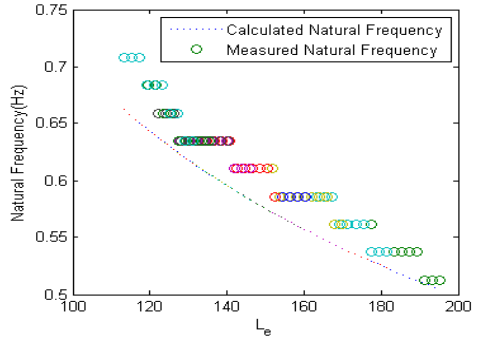
LCVA의 동적특성을 검토하기 위한 실험변수를 유효길이라고 하여 실험결과를 정리하면 Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 10에서와 같이 case01~19에서는 실험에 의한 고유진동수가 산정식에 의한 고유진동수보다 높게 나타났으며, case21~61에서는 산정식에 의한 고유진동수보다 낮게 나타났다. 따라서 이 연구에서는 case01~19의 경우와 case21~61의 경우에 대한 실험결과를 회귀분석을 통해 보정하고 산정식을 제안하고자 한다.

산정식의 보정은 유효길이(L_e)를 변수로 하였으며, 회귀분석은 비선형 자료에 대한 선형보간법 중 멱함수(식 (5))를 사용하여 수행하였다.

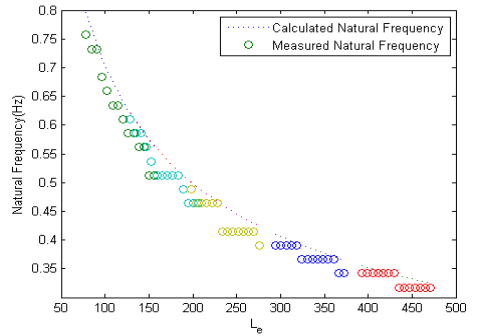
$$y = \alpha x^\beta \tag{5}$$



(a) Case01~09



(b) Case11~19



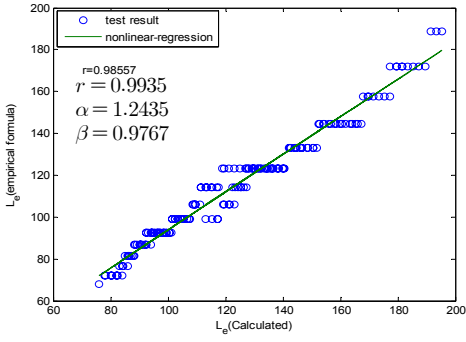
(c) Case21~61

Fig. 10 1st modal frequency by effective length

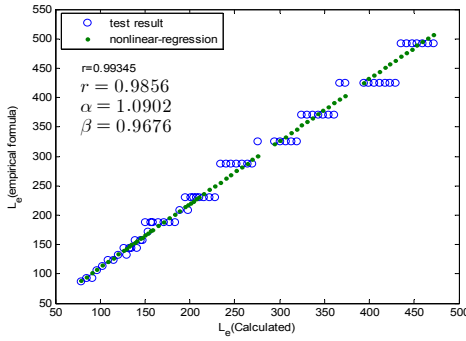
여기서, x 는 유효길이(식 (3))이며, y 는 실험에 의한 고유진동수(f_M)를 유효길이(L_e)에 대하여 정리한 값으로 식 (6)과 같다.

$$y = \frac{2g}{4\pi^2(f_M)^2} \tag{6}$$

Fig. 11은 기존 유효길이 산정식에 대한 멱함수(식 (4))를 사용하여 구한 유효길이라고, case01~19의 경우 α 는 1.0902이고, β 는 0.9676으로 보정된 유효



(a) Case01~19



(b) Case21~61

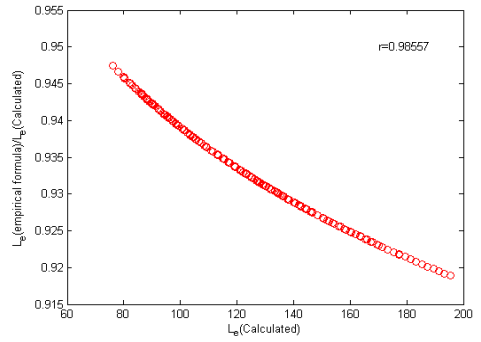
Fig. 11 A compensation of effective length by experiment

길이(L_{e1-emp}) 산정식은 $1.0902 \times (L_e)^{0.9676}$ 으로 나타낼 수 있다. 또한 case21~61의 경우 α 는 1.2435이고, β 는 0.9767이며 보정된 유효길이(L_{e2-emp}) 산정식은 $1.2435 \times (L_e)^{0.9767}$ 으로 나타낼 수 있다.

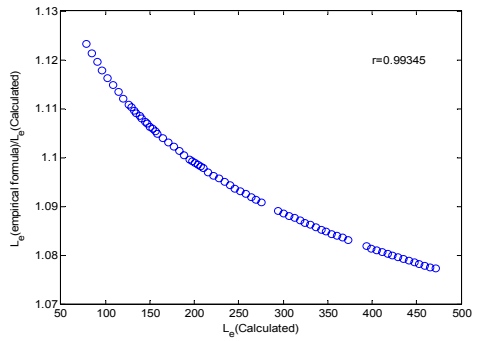
Fig. 12는 유효길이에 따른 고유진동수를 기존 산정식과 실험값의 비로 나타낸 것이다. Fig. 12에서와 같이 유효길이가 길어질수록 기존 산정식과의 오차가 증가하는 것을 알 수 있으며, case01~19의 경우 표준편차(s_r)는 4.7292, 상관계수(r)는 0.9856이며, case21~61의 경우 표준편차(s_r)는 14.2143, 상관계수(r)는 0.9935이다.

따라서 실험에 의한 LCVA의 고유진동수 보정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Case01~19} : f_{emp1} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{1.0902 \times (L_e)^{0.9676}}} \\ \text{Case21~61} : f_{emp2} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{1.2435 \times (L_e)^{0.9767}}} \end{aligned} \quad (7)$$

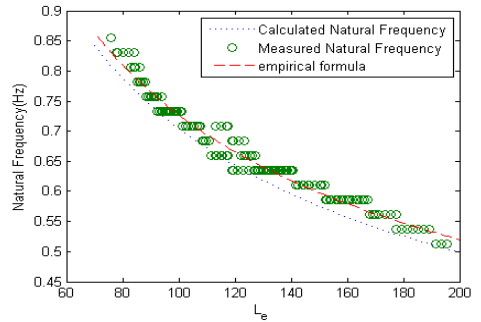


(a) Case01~19

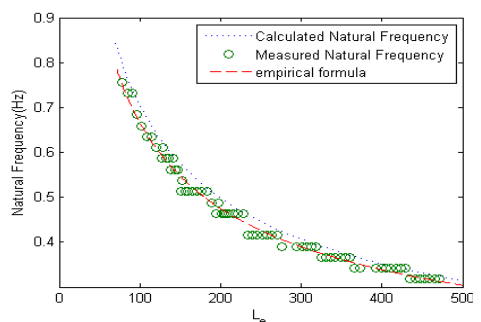


(b) Case21~61

Fig. 12 Effective length ratio of analysis and experiment



(a) Case01~19



(b) Case21~61

Fig. 13 LCVA Natural frequency by regression analysis

기존 산정식에 의한 고유진동수와 보정식에 의한 고유진동수, 그리고 실험에 의한 고유진동수를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12에서와 같이 보정한 고유진동수 산정식은 모든 경우에서 기존의 산정식보다 실험값과 유사한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 백색잡음을 사용한 진동대 실험을 바탕으로 LCVA의 수심 변화와 단면적비(r_A)에 따른 거동특성을 파악하였으며, 그에 따른 결론은 다음과 같다.

(1) 수직부 폭(L_v)과 수심이 증가할수록 2차 모드 응답이 증가하였으며, 수직/수평부 단면적비(r_A)가 커질수록 LCVA의 1차 모드 응답이 작아지고 2차 모드 응답이 증가하였다. 이러한 2차모드 응답의 발생 및 증가 현상은 LCVA의 수직부 기둥이 TLD와 같은 거동을 함에 따라 발생하는 것으로 판단되며, 액체 표면의 출렁임 현상을 방지할 수 있는 칸막이 등의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

(2) 실험을 통해 파악된 LCVA의 고유진동수는 기존 산정식과는 오차가 있는 것으로 나타났으며, 이는 산정식을 바탕으로 정확한 설계가 된 경우에도 LCVA가 제어대상 구조물과 동조되지 못함을 의미한다. 따라서 이 연구에서 수행한 수직부 폭, 수평부 높이를 변화시킨 실험을 통해 파악된 결과를 바탕으로 먹급수를 사용한 회귀분석을 통해 유효길이(L_e)에 대해 보정하였으며, 이를 바탕으로 기존 고유진동수 산정식에 대한 보정식을 제안하였다.

(3) 기존 산정식과 이 연구를 통해 도출된 산정식을 사용하여, 구조물에 대한 제어실험을 통해 타당성 검토를 수행할 예정이며, 이 연구를 통해 나타난 2차 모드 응답의 증가를 방지할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2007학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Den Hartog J. P., 1956, "Mechanical Vibrations," 4th edition, McGraw-Hill, New York.
- (2) Soong T. T. and Dargush G. F., 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) Sadek Fahim, Mohraz Bijan and Lew, H. S., 1998, "Single and Multiple Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 27, No. 5, pp. 439~463.
- (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) Gao, H. and Kwok, K. C. S., 1997, "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers," Engineering Structures, Vol. 19, No. 6, pp. 476~486.
- (7) Hitchcock, P. A., Kwok K. C. S. and Watkins, R. D., 1997, "Characteristics of Liquid Column Vibration Absorbers (LCVA)-I," Engineering Structures, Vol. 19, No. 2, pp. 126~134.
- (8) Kim, H.-J., Kim, H.-B., Cho, J.-S., Lee, S.-H., Woo, S.-S., Choi, K.-Y., 2006, "Experimental Evaluation of LCVA for Mitigation of Wind-induced Motion of High Rise Building," Proceedings of 2006 Autumn Conference, Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 13~16.
- (9) Chung, L., Lee, J.-W., Park, H.-J., Lee, S.-H., Woo, S.-S. and Cho, S.-H., 2007, "Vibration Characteristics of Liquid Column Vibration Absorber with Various Area Ratio," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, KSNVE07A-08-02.
- (10) Katsuhiko, Ogata, 2004, "System Dynamics," Prentice Hall(4th Edition).