

전달함수를 이용한 LCVA의 설계변수 분석

Design Parameter Identification Using Transfer Function of Liquid Column Vibration Absorber (LCVA)

이성경¹⁾ · 민경원²⁾ · 정희산³⁾

Lee, Sung-Kyung · Min, Kyung-Won · Chung, Hee-San

국문 요약 >> 본 연구의 목적은 첫째, 비선형성을 포함하는 액체기둥진동흡진기(LCVA)의 감쇠항에 대한 등가선형화된 운동방정식을 바탕으로하여 가진입력인 진동대 가속도와 출력인 제어력의 관계인 전달함수를 해석적인 식으로 규명하는 것이다. 둘째, LCVA의 주요설계변수인 수직기둥과 수평기둥의 단면적비의 변화에 따른 진동특성분석이다. 셋째, 동조의 수단으로 이용되는 수직기둥 액체의 높이를 변화시켜 진동특성을 분석하는 것이다. LCVA를 진동대 위에 설치하고 가진하여 제어력을 측정하여 실험 전달함수를 구하였다. 이것을 해석적인 전달함수와 비교 및 최적화작업을 수행하여 LCVA의 진동특성변수에 영향을 미치는 고유진동수, 감쇠비 및 질량비 등을 파악하였다. 실험결과, 액체 수위 및 단면적비의 변화에 따라 감쇠비 및 참여질량비의 특성이 변화하였다. 수직기둥과 수평기둥이 교차하는 엘보우에서 액체의 흐름 변화로 인하여, LCVA 실험체의 수직기둥 단면적이 작아질수록 감쇠비와 참여질량비가 증가하였다.

주요어 동조액체기둥감쇠기, 동적특성, 시스템 식별, 고유 진동수, 감쇠비, 질량비, 진동대 실험

ABSTRACT >> The purpose of this study is to verify the transfer function of input acceleration and output control force by linearizing a velocity-dependent damping term of Liquid Column Vibration Absorber (LCVA). Analytical and experimental research is conducted to identify natural frequency, damping ratio and participated mass ratio of LCVA with various section ratios of vertical and horizontal areas. Findings obtained experimentally by the shaking table test are compared with analytical findings using optimization technique with constraints. The results indicate that the level of liquid and section ratio of LCVA affect the characteristics of damping ratio and mass ratio. Damping and mass ratio increase as the section of vertical column of LCVA decreases, due to turbulence in the elbow of LCVA.

Key words Liquid column vibration absorber, Dynamic characteristics, System identification, Natural frequency, Damping ratio, Mass ratio, Shaking table test

1. 서론

최근 건축물들이 고층화 및 유연화 됨에 따라 풍하중 및 지진하중과 같은 동적하중에 대한 구조물의 응답을 저감시키기 위한 방안이 요구되고 있다. 동조형 감쇠기는 자체의 고유진동수를 구조물의 고유진동수와 동조시켜 구조물의 동적응답을 감소시키는 것으로서 구조물의 안전성과 사용성 확보 차원에서 사용되고 있다.

대표적인 동조형 감쇠기로서 질량형 감쇠기와 액체형 감쇠기가 고층건물의 동적응답제어에 주로 이용되고 있다.⁽¹⁾ 액체형 감쇠기는 질량형 감쇠기에 비해 제작, 설치 및 유지관리 측면에서 유리하다. 액체형 감쇠기로는 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD), 동조액체기둥감쇠기(Tuned Liquid Column Damper, TLCD) 및 액체기둥진동흡진기(Liquid Column Vibration Absorber, LCVA)가 있다. TLD는 액체의 출렁임을 이용하여 건물의 에너지를 액체의 유동 에너지로 흡수하는 방식으로 액체의 출렁임 진동수를 건물의 진동수와 일치시켜 에너지를 흡수한다. 출렁임에 참여하는 액체의 질량을 효율적으로 증가시키기 위해 U관 모양의 변형된 TLD를 적용하였는데 이를 TLCD라 한다. TLCD의 동조진동수는 수조 안의 액체 수위와 왕복운

¹⁾ 정희원·단국대학교 건축공학과, 연구교수

²⁾ 정희원·단국대학교 건축공학과, 교수

(교신저자: kwmin@dankook.ac.kr)

³⁾ 단국대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 5. 26 / 수정일 : 2009. 7. 15. / 게재확정일 : 2009. 7. 17)

동을 하는 수평기둥 액체 길이에 따라 달라진다. TLCD는 Sakai et al.⁽²⁾에 의해 소개된 이후 많은 연구자들에 의해 해석적 및 실험적인 연구가 수행되어 왔다.⁽³⁻⁵⁾ 실제 적용사례로서, One Wall Centre(캐나다, 밴쿠버) 및 Random House(미국, 뉴욕)등에 TLCD가 설치되어 있으며, 국내에서는 송도에 위치한 더샵퍼스트월드아파트(64층, 265m)에 TLCD가 적용되었다. Watkins⁽⁶⁾에 의해 처음 소개된 LCVA는 수직기둥과 수평기둥의 단면적이 다른 것으로서, TLCD는 수직과 수평기둥의 단면적이 동일한 LCVA의 특수한 경우이다. 이후 모델링과 제어성능에 관한 해석적 및 실험적 연구가 진행되어 오고 있다.⁽⁷⁻¹²⁾

LCVA는 수조 내부의 액체가 비선형으로 거동하기 때문에 선형화 과정을 통한 이론적인 연구가 기존 연구의 핵심이었다. 실험으로는 LCVA 모형을 만들어 주어진 입력에 따른 고유진동수와 수두손실계수 등을 파악하는 것이다. 근본적으로 수조내 액체의 응답에 의존하여 감쇠특성이 나타나는 비선형이기 때문에 수두손실계수와 감쇠비는 입력가진과 LCVA의 형태에 따라 변화한다. 비선형성을 연구하기 위해서는 특정 LCVA 모델에 관하여 입력가진 크기 및 진동수를 무수히 변화시켜 가면서 위의 변수들을 구하여 특성을 분석하여야 한다. 유기표 등은 가진진폭과 고유진동수 변화에 따른 LCVA의 수조내부 액체의 진폭 및 수두손실계수를 분석하였다.⁽¹³⁾ 우성식 등은 수심 및 단면적비 변화에 따른 LCVA의 유효길이를 조정하여 백색잡음 가진에 실험을 수행하고, LCVA 고유진동수의 경험식을 제안하였다.⁽¹⁴⁾ 그러나, 이러한 작업 또한 모델이 바뀌면 달라지는 값으로 다시 실험을 수행하여야 하는 번거로움이 있다.

본 연구의 목적은 첫째, 비선형성을 포함하는 LCVA의 감쇠항을 등가점성감쇠로 치환한 운동방정식을 바탕으로 가진입력인 진동대 가속도와 출력인 제어력인 전달함수를 해석적인 식으로 규명하여 파악하는 것이다. 둘째, LCVA의 주요설계변수인 수직기둥과 수평기둥의 단면적비의 변화에 따른 진동특성분석이다. 셋째는 동조의 수단으로 이용되는 수직기둥 액체의 높이를 변화시켜 LCVA의 진동특성을 분석하는 것이다. 본 연구에서는 고유진동수, 감쇠비와 및 질량비 등을 진동특성분석 대상으로 한다. 분석방법으로는 LCVA를 진동대 위에 설치하고 가진하여 제어력을 측정하여 실험 전달함수를 구한다. 이것을 해석적인 전달함수와 비교하여 최적화작업을 수행하여 위의 진동특성변수를 구한다. 분석과정을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 첫째, 응답속도의존인 LCVA의 감쇠력을 응답이 조화운동이라는 가정하에 한 주기하에 소산되는 감쇠

에너지가 점성감쇠력으로 소산되는 에너지와 동일하다. 둘째, LCVA는 중앙부에 액체가 없는 U자형이므로 액체의 비선형성이 실제 크게 나타나지 않는다. 따라서 전달함수가 선형이라는 전제가 성립될 수 있다.

2. 선형화된 TLCD 운동방정식

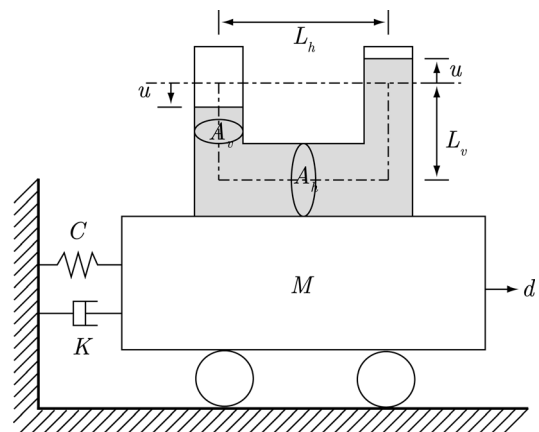
LCVA가 설치된 단자유도 건물은 그림 1과 같다. 본 연구는 수직 및 수평 기둥의 면적비가 서로 다른 LCVA 자체의 동적특성 규명에 초점을 두고 있기 때문에 외력이 작용하지 않는 LCVA-단자유도 건물의 상호작용 시스템을 고려하였다. 그림 1과 같은 건물과 LCVA의 전체 시스템의 운동방정식은 각각 식 (1)과 (2)로 표현된다.

$$M\ddot{d}(t) + \rho(A_h L_h + 2A_v L_v)\ddot{d}(t) + \rho A_h L_h \ddot{v}u(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = 0 \quad (1)$$

$$\rho A_h L_v \ddot{v}u(t) + \rho A_h L_h \ddot{v}d(t) + (1/2)\rho A_h \eta \nu^2 |\dot{u}(t)| \dot{u}(t) + 2\rho A_h g \nu u(t) = 0 \quad (2)$$

여기서, $d(t)$ 와 $u(t)$ 는 각각 건물과 LCVA 수직기둥 내부의 액체표면 변위이다. M , C 및 K 는 각각 단자유도 건물의 질량, 감쇠 및 강성 계수를 나타낸다. L_h 와 L_v 는 각각 수평 및 수직기둥의 길이를 나타내고, A_h 와 A_v 는 각각 수평 및 수직기둥의 단면적을 나타낸다. ρ 는 액체의 밀도, g 는 중력가속도, η 는 LCVA의 수두손실계수를 나타낸다. $\nu = A_v/A_h$ 는 수직기둥과 수평기둥의 단면적 비이다.

식 (3)은 LCVA 수조 내부 액체의 유효길이를 나타내며, 고유진동수는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.⁽⁹⁾



〈그림 1〉 LCVA가 설치된 단자유도 건물 모델

$$L_e = \nu L_h + 2L_v \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (4)$$

식 (2)의 셋째 항과 같이 비선형 감쇠력을 포함하는 운동 방정식을 수치 해석적으로 계산하기 위해서는 시간이 오래 걸린다. 비선형 감쇠력은 수조내부 액체가 $\psi \sin \omega t$ 인 조화 운동 한다는 가정 하에 비선형감쇠에너지와 점성감쇠 에너지가 한 주기에 서로 동일하다고 가정하여 다음 식 (5)와 같이 등가선형감쇠 c_{eq} 를 구할 수 있다.^{(9), (10)}

$$c_{eq} = \frac{4}{3\pi} \rho A_h \eta \nu^2 \omega \psi \quad (5)$$

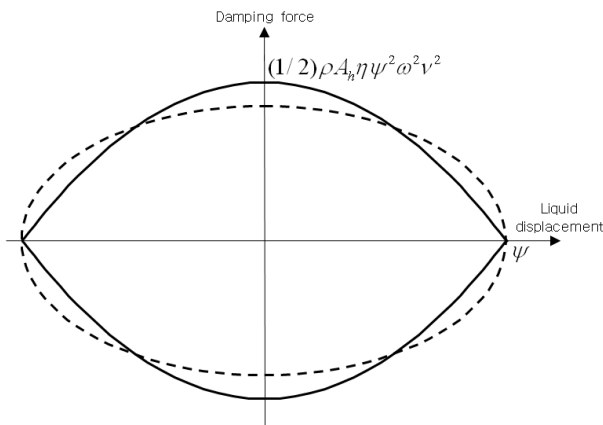
그림 2는 감쇠력과 수조내의 액체의 이력곡선을 나타내는 것으로 실선으로 표현된 비선형 감쇠 이력과 점선으로 표현된 등가 점성선형감쇠 이력을 비교하였다.

식 (5)의 등가선형 점성감쇠를 이용하여 식 (1)과 (2)를 다시 나타내면 각각 다음 식 (6), (7)과 같다.

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = -[m_t\ddot{d}(t) + m_h\nu\ddot{u}(t)] \quad (6)$$

$$m_t\ddot{u}(t) + c_{eq}\dot{u}(t) + m_t\omega_l^2 u(t) = -\nu m_h\ddot{d}(t) \quad (7)$$

여기서, m_t, m_l 및 m_h 는 각각 수조 내부 액체의 전체 질량, 수조 내부 액체의 관성력을 발생시키는 유효질량 및 수평기동 부분의 액체질량이며 각각 $m_t = \rho(A_h L_h + 2A_v L_v)$, $m_l = \rho A_h L_e \nu$, $m_h = \rho A_h L_h$ 으로 표현된다.



<그림 2> 비선형 및 등가 선형 감쇠의 이력거동

식 (7)의 c_{eq} 에 $2m_l\omega_l\xi_l$ 를 대입한 후, 양변을 m_l 로 나누면 다음 식 (8)과 같다.

$$\ddot{u}(t) + 2\omega_l\xi_l\dot{u}(t) + \omega_l^2 u(t) = -\alpha\nu\ddot{d}(t) \quad (8)$$

여기서, α 는 액체의 유효질량 m_l 에 대한 수평기동의 액체질량 m_h 의 비 즉, m_h/m_l 이다. ω_l 은 LCVA의 고유 각속도이다.

3. 전달함수 유도

본 연구에서는 진동대로 상부에 설치되어 있는 LCVA를 가진하기 때문에, 진동대 자체가 건물모델에 해당되어 식 (7)의 우변에 나타난 $\ddot{d}(t)$ 는 진동대에 의해 발생하는 가속도가 된다. 식 (6)의 우변은 LCVA가 건물에 영향을 주는 제어력을 나타낸다. 이러한 제어력은 진동대와 LCVA 사이에 설치된 로드셀을 통해 계측된다. 실제 진동대 실험에서는 액체의 질량 외에 수조자체의 질량, 로드셀 및 지그의 질량 등에 의한 추가질량 m_a 가 고정질량으로 작용하여 관성력이 발생한다. 따라서, 로드셀에 의해 계측되는 LCVA에 의한 제어력은 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$f_c(t) = (m_t + m_a)\ddot{d}(t) + \nu m_h\ddot{u}(t) \quad (9)$$

진동대 가속도와 제어력 사이의 전달함수를 구하기 위하여 식 (9)를 푸리에 변환하면 다음 식 (10)과 같다.

$$F_c(i\omega) = (m_t + m_a)\ddot{D}(i\omega) - \nu m_h\omega^2 U(i\omega) \quad (10)$$

여기서, i 와 ω 는 각각 허수 및 진동대의 가진진동수를 나타낸다. $D(i\omega)$ 와 $U(i\omega)$ 는 각각 $d(t)$ 와 $u(t)$ 의 푸리에 변환을 나타낸다. 식 (10)로부터의 입력 가속도 $\ddot{D}(i\omega)$ 와 로드셀에서 계측된 힘의 전달함수는 다음 식 (11)과 같다.

$$\frac{F_c(i\omega)}{\ddot{D}(i\omega)} = (m_t + m_a) - \nu m_h\omega^2 \frac{U(i\omega)}{\ddot{D}(i\omega)} \quad (11)$$

식 (8)을 푸리에 변환하여 $\ddot{D}(i\omega)$ 에 대해서 정리하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\ddot{D}(i\omega) = -\frac{\omega_l^2 - \omega^2 + 2\xi_l\omega\omega_l i}{\alpha\nu} U(i\omega) \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)의 우변에 대입해서 $U(i\omega)$ 를 제거하면 다음 식(13)과 같이 진동대 입력가속도에 대한 제어력의 비인 전달함수의 해석적인 식이 유도된다.

$$\frac{F_c(i\omega)}{\ddot{D}(i\omega)} = (m_t + m_a) + \frac{\alpha\nu^2 m_h \omega^2}{\omega_l^2 - \omega^2 + 2\xi_l \omega \omega_l} \quad (13)$$

식 (13)에서 ω 에 0을 대입하면 $(m_t + m_a)$ 가 된다. 이것은 물리적으로 LCVA 수조내부의 액체가 움직이지 않는 경우 즉, 정적질량이 로드셀에 계측되는 것을 의미한다. 액체의 전체질량과 부가질량만이 전달함수에 나타나는 것으로 상수항 $(m_t + m_a)$ 로 LCVA 실험 시스템 전체질량을 나타낸다. 가진 진동수가 낮을 때, 전달함수가 저진동수로 갈수록 $(m_t + m_a)$ 으로 수렴되어 가는 것을 알 수 있다. 또한, 고진동수로 갈수록, 즉, 액체의 왕복운동이 빨라질수록 $m_t + m_a - \alpha\nu^2 m_h$ 로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이것은 식 (13)에서 $\omega \rightarrow \infty$ 에서의 극한값은 나타낸다. $\omega = \omega_l$ 일 때, 즉, 진동대 가진진동수가 LCVA의 고유진동수와 일치할 경우, 식 (13)의 전달함수 크기는 다음 식 (14)와 같다.

$$\sqrt{(m_t + m_a)^2 + \left(\frac{\alpha\nu^2 m_h}{2\xi_l}\right)^2} \quad (14)$$

식 (14)와 같이 LCVA의 공진진동수에서는 본 연구의 진동특성 분석 대상인 질량비 및 감쇠비의 영향이 전달함수에 나타나는 것을 알 수 있다.

식 (13)의 양변을 $(m_t + m_a)$ 로 나누어 무차원화된 전달함수로 표현하면 다음 식 (15)와 같다.

$$T(i\gamma) = \frac{F_c(i\gamma)}{(m_t + m_a)\ddot{D}(i\gamma)} = 1 + \frac{\alpha\nu^2 m_h \gamma^2}{(m_t + m_a)(1 - \gamma^2 + 2\xi_l \gamma)} \quad (15)$$

여기서, $\gamma = \omega/\omega_l$ 이다.

4. LCVA 실험

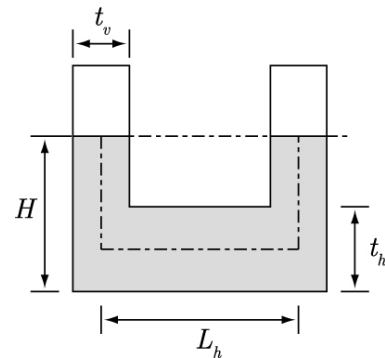
4.1 LCVA 실험체

LCVA의 수직기둥과 수평기둥의 단면적 비 ν 가 0.4에서 1.0으로 변함에 따른 동적특성을 파악하기 위해서 표 1에 표현되어 있는 파라미터로 4가지 형태의 실험체를 제작

하였다. 각각의 LCVA의 수평기둥 길이 L_h , 수평기둥의 두께 t_h , 수조의 폭 L_w 의 치수는 모두 같다. 따라서, 각각의 LCVA는 수직기둥의 폭 t_v 에 따라 수평기둥부분에 대한 수직기둥부분의 단면적 비 ν 가 결정되게 된다.

단면적 비 ν 와 수조 내부의 액체 높이 H 변화에 따른 LCVA의 동적 특성을 파악하기 위해 각각의 LCVA 실험체에 대해 실험을 수행하였다. LCVA 실험체에서 액체 수위가 높아지는 것은 유효길이 L_e 의 증가를 의미한다.

본 연구에서 LCVA 수조 내부의 액체는 물을 이용하였으며 밀도 값은 $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$ 이 사용되었다. 표 2와 3은 각각 LCVA의 4가지 실험체와 액체의 수위 100mm에서 170mm까지 5가지 변화에 따른 유효길이와 고유진동수를



〈그림 3〉 LCVA 실험체 형상

〈표 1〉 LCVA 실험체 (unit : mm)

| 실험체 | ν | t_v | t_h | L_h |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| Type1 | 0.4 | 18 | 44 | 144 |
| Type2 | 0.6 | 27 | 44 | 144 |
| Type3 | 0.8 | 35 | 44 | 144 |
| Type4 | 1.0 | 44 | 44 | 144 |

〈표 2〉 LCVA의 유효길이 (unit : mm)

| 실험체 | 수조내부의 액체 수위 (mm) | | | | |
|-------|------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 114 | 128 | 150 | 170 |
| Type1 | 214 | 242 | 270 | 314 | 354 |
| Type2 | 242 | 270 | 298 | 342 | 382 |
| Type3 | 271 | 299 | 327 | 371 | 411 |
| Type4 | 300 | 328 | 356 | 400 | 440 |

〈표 3〉 LCVA의 수조내부 액체의 고유진동수 (unit : Hz)

| 실험체 | 수조내부의 액체 수위 (mm) | | | | |
|-------|------------------|------|------|------|------|
| | 100 | 114 | 128 | 150 | 170 |
| Type1 | 1.52 | 1.43 | 1.36 | 1.26 | 1.18 |
| Type2 | 1.43 | 1.36 | 1.29 | 1.20 | 1.14 |
| Type3 | 1.36 | 1.29 | 1.23 | 1.16 | 1.10 |
| Type4 | 1.29 | 1.23 | 1.18 | 1.11 | 1.06 |

〈표 4〉 수조 내부의 액체 및 수조의 질량 (unit : kg)

| 실험체 | | 수조내부의 액체 수위(mm) | | | | | |
|-------|-------|-----------------|------|------|------|------|------|
| | | 100 | 114 | 128 | 150 | 170 | |
| Type1 | 액체질량 | 수평기둥 | 2.05 | | | | |
| | | 수직기둥 | 0.91 | 1.07 | 1.23 | 1.49 | 1.72 |
| | 총 | 2.96 | 3.12 | 3.28 | 3.54 | 3.77 | |
| | 수조 질량 | 8.20 | | | | | |
| Type2 | 액체질량 | 수평기둥 | 2.21 | | | | |
| | | 수직기둥 | 1.41 | 1.67 | 1.92 | 2.32 | 2.68 |
| | 총 | 3.62 | 3.87 | 4.13 | 4.53 | 4.89 | |
| | 수조 질량 | 8.10 | | | | | |
| Type3 | 액체질량 | 수평기둥 | 2.36 | | | | |
| | | 수직기둥 | 2.03 | 2.40 | 2.76 | 3.34 | 3.86 |
| | 총 | 4.39 | 4.76 | 5.12 | 5.70 | 6.22 | |
| | 수조 질량 | 8.65 | | | | | |
| Type4 | 액체질량 | 수평기둥 | 2.50 | | | | |
| | | 수직기둥 | 2.71 | 3.20 | 3.69 | 4.45 | 5.15 |
| | 총 | 5.22 | 5.70 | 6.19 | 6.96 | 7.65 | |
| | 수조 질량 | 9.15 | | | | | |

보여주고, 각각 식 (3)과 (4)에 의해 계산되었다.

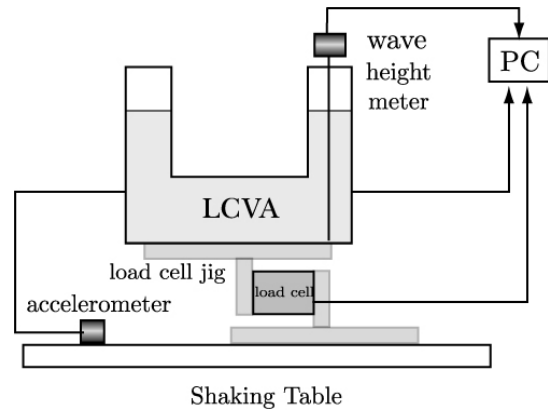
표 4는 수조 내부의 액체 및 수조의 질량을 나타낸 것이다. 각 Type과 수조액체의 수위에 따라 미리 예측할 수 있는 수평기둥 및 수직기둥에 있는 액체의 질량과 총질량을 표시하였으며 수조질량도 나타내었다. m_t 는 수조 내부 액체질량으로 각각 실험체에 따른 액체 총 질량이다. 부가 질량인 m_a 는 수조 질량에 지그와 로드셀의 질량인 10.1kg이다.

수조내 액체의 흐름을 이용한 LCVA는 액체 유효질량의 일부분이 제어력으로 참여한다. 참여율이 높으면 제어의 효과가 크다고 할 수 있다. 액체 유효질량의 몇 %가 참여하느냐를 판단하는 것이 중요하다. 표 4와 같이 상세하게 각 Type과 수위에 따라 자세하게 질량을 명기하였다.

4.2 실험 시스템

LCVA 자체의 동적특성은 백색잡음과 같은 불규칙 가진 및 조화하중과 같은 정현파가진의 입력에 대한 출력의 비로 표현되는 전달함수를 구하여 파악할 수 있다. 진동대는 이와 같은 하중들을 용이하게 구현할 수 있다. 그림 4는 LCVA의 진동대 실험시스템을 나타낸다. 전달함수의 입력으로서 진동대에서 계측된 가속도를 그리고, 출력으로서 로드셀에서 계측된 힘을 이용하였다.

LCVA의 동적 특성을 파악하기 위하여 지그 상부에 설치된 실험체를 일축 진동대에 의해 가진하였다. 진동대 테이블과 LCVA 사이에 설치한 전단형 로드셀로부터 전단력



〈그림 4〉 LCVA 진동대 실험 시스템

이 계측되고, 진동대 테이블에 부착된 가속도 센서와 LCVA에 부착된 파고계를 통해 동적특성을 측정하였다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호 처리기 (DSP)를 통해 수행되었다. 데이터 수집 보드는 측정된 가속도 및 로드셀 데이터를 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 25Hz 저주파수 통과 필터를 통한 AD/DA 보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로 이루어졌다. 모든 계측 및 가진은 Matlab Simulink의 Real-Time Windows Target으로 수행되었다.⁽¹⁵⁾

4.3 조화하중 실험

지진하중 자체는 일정한 대역폭의 진동수를 포함하는 광대역(broad-band) 특성이지만, 건물의 전달함수는 고유진동수에서 피크가 나타나는 협대역(narrow-band) 특성을 나타낸다. 이들 두 함수의 곱으로 표현되는 건물의 응답은 고유진동수 성분이 지배적인 협대역 특성이라고 할 수 있다.⁽¹⁶⁾ 그러므로, 본 연구에서는 조화하중 가진실험에 의해 LCVA의 동적특성을 분석하였다.

LCVA의 동적특성 파악을 위해서는 진동수를 변화시키면서 조화하중 실험을 수행하여야 하는데 시간이 많이 소요된다. 따라서, 백색잡음 실험을 통해 LCVA의 동적특성이 현저히 나타나는 진동수 영역을 추출하여 조화하중 실험을 수행하였다. LCVA 실험체 ‘Type 4’는 0.9 - 1.5 Hz 영역에서, 나머지 3가지 실험체 ‘Type1, 2, 3’은 0.5 - 2.3Hz 진동수 대역에서 입력인 진동대 가속도를 일정하게 하여 0.01Hz 간격으로 진동수를 변화시키면서 조화하중 실험을 실시하였다.

조화하중 가진 실험에 의해 동적특성을 파악하기 위해서는 대상 실험체의 정상상태응답을 파악할 수 있도록 충분한 시간으로 가진 해야 하기 때문에 각각의 진동수에 대해서

100초간의 조화하중을 가진하였다. 측정된 데이터의 처리도 정상상태응답만을 대상으로 해야 양질의 동적특성을 구할 수 있기 때문에, 전체 100초 동안의 데이터 중에서 후반부 60초 동안에 측정된 시간영역 데이터를 이용하여 LCVA의 동적특성을 구하였다.

그림 5에서 점선으로 표현된 곡선은 진동대에서 측정된 가속도를 입력으로 하고 전단형 로드셀로부터 측정된 전단력을 출력으로 하는 전달함수를 나타낸 것이다. 식 (13)과 같이 계측된 힘을 입력가속도로 나눈 전달함수이기 때문에, 최초에 계측된 전달함수는 동적 및 정적 성분을 나타내는 질량의 단위를 갖는다. LCVA의 액체가 거동하지 않는다고 가정하면 즉, 수직변위가 0이 되면 전체질량과 부가질량인 $m_t + m_a$ 만 전달함수에 남게 된다. 이것은 고유진동수가 저진동수로 떨어졌을 때의 y축 값인 정적 질량을 의미한다. 그림 5의 점선은 이러한 전달함수를 $m_t + m_a$ 로 나누어 무차원화한 것으로서, 저진동수로 갈수록 무차원화된 정적질량 값인 1로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, x축 값은 각각의 실험체에 대해서 표 3에서 계산된 수조내부의 액체수위가 100 mm일 경우의 LCVA의 고유진동수 값으로 정규화하여 표현하였다. 액체의 수위가 높아짐에 따라 액체의 유효길이

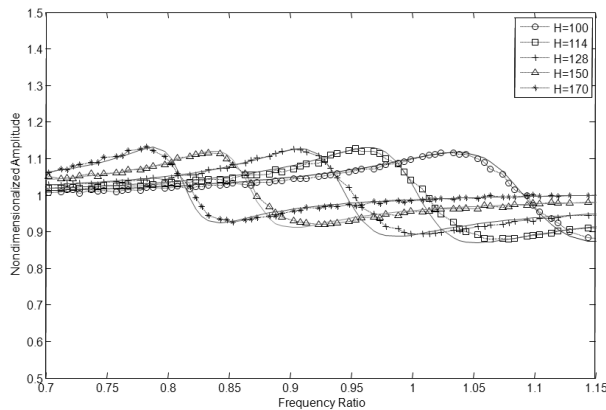
는 길어져, 수조내부에서 왕복운동하는 액체의 진동수가 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 최적화 수행

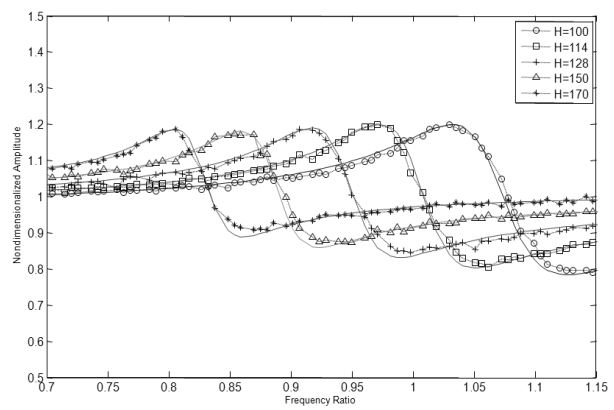
5.1 최적화

본 연구에서는 식 (15)와 같은 해석적인 전달함수를 이용하여 실험 전달함수에서 동적특성을 구하였다. 시스템 식별을 수행하기 위해서, 수조 내부 액체의 전체질량 m_t 와 추가적인 질량 m_a 는 측정을 통하여 미리 구하였으며, ω_l 은 실험적인 전달함수로부터 구한 피크점에서의 진동수를 사용하였다. 이와 같은 변수 외에 나머지 변수들인 액체의 유효질량 m_l 에 대한 수평기둥의 액체질량 m_h 의 비인 α , 감쇠비 ξ , m_h 를 식별할 파라미터 $F = [\alpha, \xi, m_h]$ 로 설정하여 시스템 식별을 수행하였다. 시스템 식별을 수행하기 위해서 먼저, 다음 식 (16)과 같이 계측한 전달함수와 해석적인 전달함수 사이의 오차제곱을 시스템식별의 정확성을 판단하는 기준이 되는 성능지수로서 정의하여 최적화를 수행하였다.

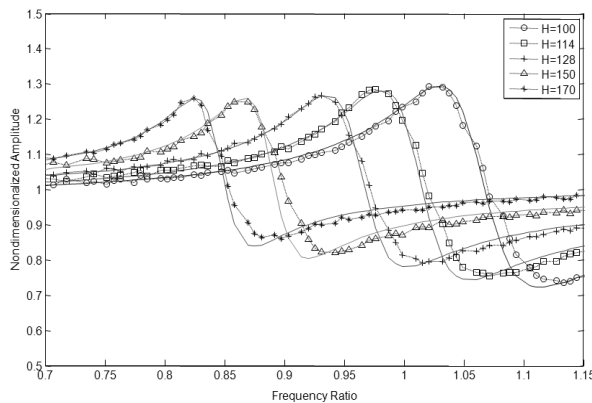
$$J(F) = \sum_{\gamma=\gamma_1}^{\gamma_2} [\tilde{T}(i\gamma) - T(F, i\gamma)]^2 \quad (16)$$



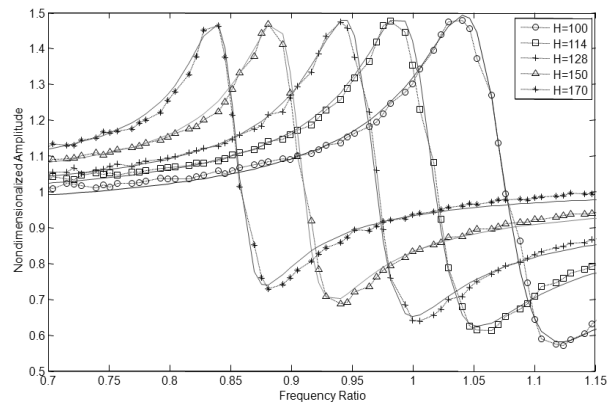
(a) Type1 LCVA($\nu=0.4$)



(b) Type2 LCVA($\nu=0.6$)



(c) Type3 LCVA($\nu=0.8$)



(d) Type4 LCVA($\nu=1.0$)

〈그림 5〉 LCVA 실험체의 전달함수

여기서, $\tilde{T}(i\gamma)$ 는 그림 5에서 점선으로 표시된 실험적인 전달함수를 나타내며, $T(Ii\gamma)$ 는 식 (15)와 같은 해석적인 전달함수를 나타낸다. γ_1 과 γ_2 는 시스템 식별 구간으로서 LCVA의 동적특성이 탁월한 대역을 구분하여 4가지 실험체에 따라 두 가지로 나누었다. 'Type 1, 2, 3'은 각각 0.3과 1.7의 진동수비를 γ_1 과 γ_2 로 하였으며, 'Type 4'는 0.7과 1.2의 진동수비를 설정하였다.

오차함수 이외에 다음 식과 같이 실제 실험 시스템으로부터 유추할 수 있는 제한 조건을 설정하였다. 제한조건은 유효질량인 m_t 과 수평기둥의 액체질량 m_h 가 전체질량인 m_i 보다 작다는 것으로 식 (17)과 같이 표현하였다.

$$m_t > m_i \quad \text{와} \quad m_t > m_h \quad (17)$$

결과적으로, 시스템 식별은 식 (17)과 같은 제한조건을 만족시키는 식 (16)과 같은 오차함수를 최소화하는 최적화 문제로 귀결된다. 이러한 최적화 문제는 최소자승법(least square method)에 기반한 Matlab의 내장함수 'fmincon'을 사용하여 구성할 수 있으며, 식별 결과를 그림 5에 실선으로 나타내어 계측한 전달함수와 비교하였다.

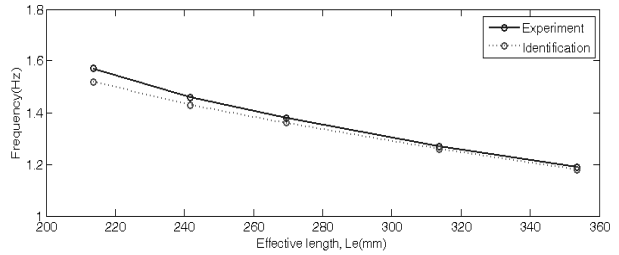
5.2 전달함수 비교

그림 5는 실험으로 통해 얻은 전달함수와 식 (15)에 의해 계산된 전달함수와의 비교를 나타낸다. 그림 5에서 액체 수위 변화에 따른 4개의 TLCD의 두 전달함수 결과는 서로 잘 일치하는 것으로부터, 식 (15)와 같이 본 연구에서 제안된 해석적인 전달함수를 이용한 최적화 수행이 타당하다는 것을 알 수 있다. 식 (15)는 전달함수는 출력인 제어력을 가진 입력인 진동대 가속도로 나누어서 무차원화한 것이기 때문에, LCVA수조 내부액체의 진동정도에 따른 동적질량을 개념을 포함한다. Type4로 갈수록 질량이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 Type4의 수조가 제일 큰 것을 의미하며 단면적비가 동일하여 수직기둥 및 수평기둥부분에서의 액체 흐름이 원활한 진동에 의한 것이기도 하다. 저진동수 가진으로 될수록, 즉 그림에서는 왼편으로 갈수록 정적질량의 무차원 성분인 1에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

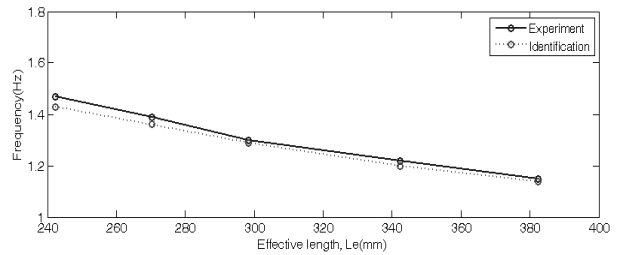
6. 진동 특성 비교

6.1 고유진동수

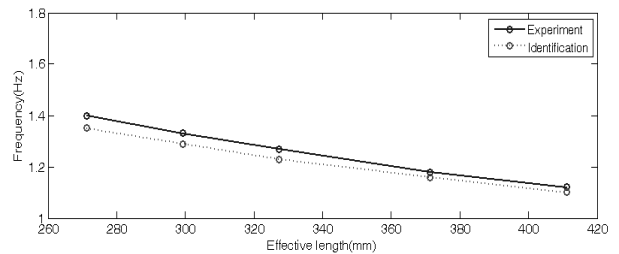
실험적인 LCVA의 고유진동수는 전달함수의 피크로부터



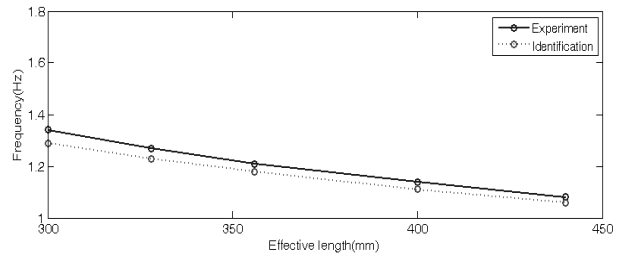
(a) Type1 LCVA($\nu = 0.4$)



(b) Type2 LCVA($\nu = 0.6$)



(c) Type3 LCVA($\nu = 0.8$)



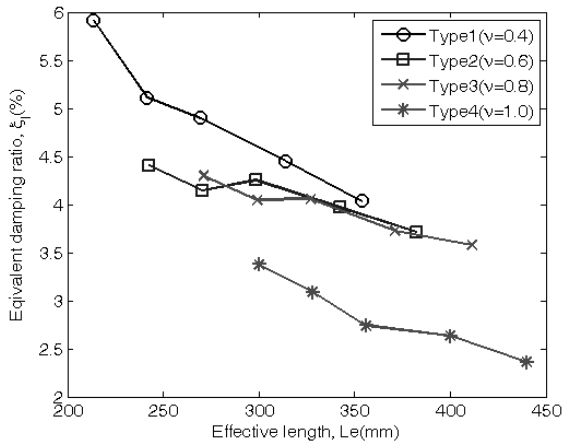
(d) Type4 LCVA($\nu = 1.0$)

〈그림 6〉 고유진동수의 이론값과 실험값의 비교

관측하였다. 유효길이 L_e 의 증가 할수록 저진동수로 떨어지는 현상을 관찰 할 수 있다. 그림 6은 LCVA의 실험으로부터 측정된 고유진동수와 이론적인 계산식으로부터 표 3과 같이 계산된 고유진동수와의 비교를 나타낸다. 전체적으로 4가지 LCVA 실험체에서 이론값과 실험값의 고유진동수가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 수직기둥과 수평기둥의 단면적 비의 차이에 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있다.

6.2 감쇠비

그림 7은 4가지 LCVA 실험체의 최적화 기법으로 식별된 동적특성으로부터 얻은 감쇠비의 특성을 보여준다. 특정 LCVA의 감쇠비는 유효길이가 증가하면 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 유효길이의 증가는 액체의 고유주기를 크게 하



〈그림 7〉 LCVA 실험체의 감쇠비

〈표 5〉 LCVA 실험체의 이론적 및 실험적 참여질량비

| 실험체 | | 수조내부의 액체 수위(mm) | | | | |
|-------|-----|-----------------|------|------|------|------|
| | | 100 | 114 | 128 | 150 | 170 |
| Type1 | 이론값 | 0.69 | 0.66 | 0.62 | 0.58 | 0.54 |
| | 실험값 | 0.67 | 0.63 | 0.60 | 0.55 | 0.51 |
| Type2 | 이론값 | 0.61 | 0.57 | 0.53 | 0.49 | 0.45 |
| | 실험값 | 0.62 | 0.58 | 0.54 | 0.48 | 0.43 |
| Type3 | 이론값 | 0.54 | 0.49 | 0.46 | 0.41 | 0.38 |
| | 실험값 | 0.57 | 0.53 | 0.48 | 0.42 | 0.38 |
| Type4 | 이론값 | 0.48 | 0.44 | 0.40 | 0.36 | 0.33 |
| | 실험값 | 0.55 | 0.49 | 0.44 | 0.39 | 0.34 |

며 액체 질량의 증가로 액체속도의 감소를 유발시킨다. 따라서, 감쇠계수는 액체속도에 의해 감소한다. 또한 동일한 유효길이에 대해 LCVA의 수직기둥의 단면적이 작아질수록 감쇠비가 단면적이 동일한 LCVA의 경우에 비해 크게 증가한다. 수직기둥과 수평기둥이 꺾이는 엘보우(elbow)에서 단면적비가 다를수록 물의 교란이 더욱 커진 것으로 판단된다.

6.3 참여질량비

LCVA의 수조와 액체의 전체질량은 건물의 고정하중을 증가시키는 경향이 있다. LCVA 설계에서 전체질량은 줄이면서 제어에 실제 참여하는 액체의 참여질량은 증가시키는 것이 중요하다. 표 5는 유효길이 L_e 증가 즉, 수조내부 액체 수위가 높아짐에 따른 참여질량비 α 인 수평질량 대 유효질량을 최적화 기법을 이용하여 식별한 것을 나눈다. 또한, 이론적 식을 통해 구한 수평질량 대 유효질량의 비를 이론값으로 표현하였다. 유효질량의 이론값은 $m_l = \rho A_h L_e \nu$ 로서, L_e 는 식 (3)에 의해 계산된다. 수평질량의 이론값은 $m_h = \rho A_h L_h$ 로서, 표 1과 같은 LCVA 실험체의 형태로부

터 계산된다. 이론값은 예상한 바와 같이 유효질량의 전체가 참여하지 않아 1이하 인 것을 알 수 있다. 액체 수위가 높아지는 것은 액체 전체질량 증가를 의미하는 것으로, 그에 따라 고유진동수가 증가하여 액체의 수평운동 속도가 줄어들어 제어에 참여하는 참여질량비가 감소하는 것을 판단된다. 실험값과 이론값이 유사하나 몇몇 예에서는 이론값과의 오차가 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 단면적 비($\nu=0.4,0.6,0.8,1.0$)와 수조내부의 액체 수위의 변화에 따른 LCVA의 진동대 실험을 수행하였다. 비선형 특성을 의미하는 LCVA의 감쇠력을 선형화하여 등가 선형점성감쇠를 이용하여 해석적인 전달함수식을 유도하였다. 이 식을 관찰하여 액체의 진동에 따른 정적 및 동적 질량의 역할을 확인할 수 있었다. 실험으로 전달함수를 구하였으며 최적화 수행을 통하여 동조 진동수와 감쇠비 및 제어력을 발휘하는 액체의 참여질량비를 구하였다. 동조진동수는 이론식과 유사한 것을 알 수 있었다. 액체 수위 및 단면적비의 변화에 따라 감쇠비 특성이 달리 나타났다. 식별된 감쇠비는 LCVA 실험체 수직기둥의 단면적이 작아질수록 즉, ν 가 0.4로 갈수록 크게 나타났다. 각각은 수직기둥과 수평기둥이 꺾이는 엘보우에서 액체의 흐름 변화가 크고 전체 총 질량이 작기 때문인 것으로 파악된다. 시스템 식별에 의해 구한 참여질량비에 대한 실험값과 이론값은 전체적으로 유사하나 몇몇 예에서는 이론값과의 오차가 나타나는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 제안한 전달함수는 LCVA의 감쇠비 및 참여질량비의 정량적평가에 유용하다. 서론에서 기술한 바와 같이, 입력가진 크기에 따라 LCVA의 설계변수들은 변화한다. 따라서, 본 연구의 결과를 LCVA의 설계에 반영하기 위해서는 다음과 같은 추후연구 들이 필요하다. 입력가진의 크기에 따른 LCVA의 설계변수들에 대한 정량적 평가 및 경험식을 제시할 필요가 있다. 또한, LCVA 수조크기에 대한 상사성 연구를 수행하여 수조크기와 입력가진의 크기를 고려한 3차원적인 설계변수의 경험식을 제시할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0) 및 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(No. R01- 2008-000- 20796-0)

의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Soong, T.T., and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, JOHN WILEY & SONS, New York, 1997.
2. Sakai, F., Takaeda, S., and Tamaki, T., "Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibration," *Proc. international conference on high-rise building*, Nanjing, China, 926-931, 1989.
3. Battista, R. C., Carvalho, E.M.L., and de Almeida Souza, R., "Hybrid fluid-dynamic control devices to attenuate slender structures oscillations," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, 3513-3522, 2008.
4. Shum, K.M., Xu, Y.L., and Guo, W.H., "Wind-induced vibration control of long span cable-stayed bridges using multiple pressurized tuned liquid column dampers," *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 96, No. 2, 166-192, 2008.
5. Yalla, S.K., and Kareem, A., "Optimum absorber parameters for tuned liquid column dampers," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 8, 906-915, 2000.
6. Watkins, R.D., "Tests on a liquid column vibration absorber for tall structures," *Proc. Int. Conf on Steel and Aluminium Structures*, Singapore, 1991.
7. Chang, C.C., and Hsu, C.T., "Control performance of liquid column vibration absorbers," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 7, 580-586, 1998.
8. Chang, C.C., and Qu, W. L., "Unified dynamic absorber design formulas for wind-induced vibration control of tall buildings," *Struct. Design Tall Build*, Vol. 7, No. 2, 149-166, 1998.
9. Gao, H., Kwok, K.C.S., and Samali, B., "Optimization of tuned liquid column dampers," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 6, 476-486, 1997.
10. Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D., and Samali, B., "Characteristic of liquid column vibrations absorbers (LCVA)-I," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 2, 126-134, 1997.
11. Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D., and Samali, B., "Characteristic of liquid column vibrations absorbers (LCVA)-II," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 2, 135-144, 1997.
12. Wu, J.C., Shin, M.H., Lin, Y.Y., and Shen, Y. C., "Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind," *Engineering Structures*, Vol.27, No. 13, 1893-1905, 2005.
13. 유기표, 유장열, 송창현, 김영문, "동조액주관댐퍼의 가진진폭별 오르피스감쇠특성에 대한 연구," 대한건축학회논문집 구조계, 제25권, 제6호, 41-48, 2009.
14. 우성식, 정 란, 이정우, "수직-수평부 단면적비에 따른 동조액 체기동형 감쇠장치의 고유진동수 산정식 제안," 한국소음진동 공학회, 제19권, 제2호, 119-126, 2009.
15. The MathWorks, Inc., *Real-Time Windows Target 3 User's Guide*, MATLABSIMULINK, 2007.
16. Soong, T.T., and Grigoriu, M., *Random vibration of mechanical and structural systems*, Englewood Cliffs, N.J., 1993.