

# 고유진동수 조절이 가능한 새로운 형태의 액체댐퍼

## A new type liquid damper with adjustable natural frequencies

이혜리\* · 민경원\*\* · 박지훈\*\*\*

Lee, Hye-Ri · Min, Kyung-Won · Park, Ji-Hun

### 요약

본 논문에서는 고유진동수 조절이 가능한 새로운 형태의 액체댐퍼를 개발하였다. 동조댐퍼는 구조물의 설계단계에서 응답평가를 통해 필요성이 요구된다. 건물은 설계단계에서 고유진동수와 시공 후 고유진동수가 상이하다. 액체댐퍼의 형태는 설계단계에서 건물의 고유진동수를 동조시킬 수 있도록 설계되기 때문에 고유진동수가 고정이 될 수 있다.

본 연구에서는 제안한 댐퍼의 전체적인 형태는 기존의 Liquid Column Vibration Absorber(LCVA)와 같다. 기존의 LCVA는 시공 후 건물의 고유진동수에 동조시키기 위해 물높이를 조절하나 층고 때문에 제한이 있다. 우리가 제안한 새로운 형태의 액체댐퍼는 물높이 조절 뿐 아니라 수직관의 면적을 조절하여 고유진동수를 조절 할 수 있도록 개발하였다. LCVA의 수직관을 일정한 면적의 독립된 셀로 나누었으며 이 셀을 각각 밀폐시킬 수 있도록 하였다. 밀폐된 셀 안으로는 공기압력에 의해 물이 차지 않고 차 있는 물도 움직이지 않게 된다. 밀폐된 셀의 개수를 조정하여 수직관의 면적이 조절하여 고유진동수를 변화시킬 수 있다. 제작된 액체댐퍼의 밀폐된 셀 개수를 조절하여 진동대 실험을 통해 댐퍼의 고유진동수를 파악하였다. 실험으로 나온 고유진동수와 이론적으로 산정한 고유진동수를 비교하여 댐퍼의 사용성을 평가하였다. 개발된 액체 댐퍼의 수직관의 면적 조절을 통해 고유진동수 조절이 용이하여 실제로 사용이 가능함을 확인할 수 있었다.

**keywords** : liquid damper, natural frequencies, shaking table test, cell, vertical column

### 1. 서론

최근 들어 고층건물의 풍진동 제어를 하기위한 동조 액체 댐퍼의 사용이 증가하고 있다. 액체를 사용하는 경우에 제작, 설치 및 유지관리가 용이하다. 액체댐퍼로는 단순한 육면체 또는 원통형 형태로 액체의 출렁임을 이용한 TSD(Tuned Sloshing Damper)와 유체의 복원력을 이용하기 위한 TLCD(Tuned Liquid Column Damper)가 있다(Soong 등 1997). LCVA(Liquid Column Vibration Absorber)는 TLCD와 달리 수평관과 수직관의 단면적을 달리하여 다양한 설계가 가능하다. 이러한 동조댐퍼는 건물의 고유진동수와 댐퍼의 고유진동수를 동조시키는 것이 중요한 핵심이 된다. TSD는 댐퍼의 폭과 액체의 깊이로 고유진동수가 결정이 된다(Fujino 등 1990). TLCD와 LCVA는 물이 움직이는 액체의 길이에 의해 고유진동수가 결정된다(Chang and Hsu 1998). 건물은 설계단계에서의 고유진동수와 시공 후의 고유진동수가 상이하다. 설계단계에서 고려하지

\* 단국대학교 건축공학과 석사과정 Hyeri0403@gmail.com

\*\* 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수 kwmin@dankook.ac.kr

\*\*\* 정희원 · 인천대학교 건축공학과 교수 jhpark606@incheon.ac.kr

얇은 비구조체에 의한 건물의 강성 증가 등의 이유로 고유진동수가 상이하(Amanat 2006). 설계단계에서 제작된 액체댐퍼는 물높이 조절을 통해 시공 후 건물의 고유진동수와 동조시킨다. 본 연구에서 개발된 액체댐퍼의 전체적인 형태는 기존의 LCVA와 동일하나 댐퍼의 고유진동수를 액체의 높이 뿐만 아니라 수직관의 면적을 변경하여 고유진동수를 조절 할 수 있도록 하였다. 진동대 실험을 통해 실험적 고유진동수와 이론적 고유진동수 비교를 통해 개발된 액체댐퍼의 성능을 평가하였다.

## 2. 액체댐퍼

본 연구에서 고유진동수 조절이 가능한 액체 댐퍼를 고안하였다. 액체댐퍼의 형태와 사이즈는 그림1과 표 1에서 나타내었다. 일반적인 LCVA의 수직 기둥을 각각 9개의 셀로 나누었다. 셀은 각각 밀폐시킬 수 있도록 제작하였다. 밀폐된 셀은 공기압력에 의해 물이 움직일 수 없게 된다. 밀폐시키는 셀의 개수에 의해서 LCVA의 수직관의 면적을 산정할 수 있다.

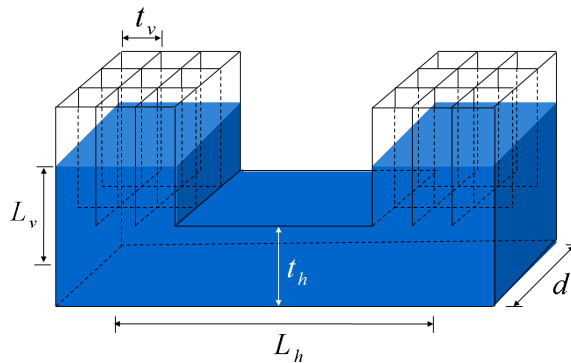


그림 1 액체댐퍼 형상

표 1 액체댐퍼 치수 (단위: mm)

	$L_h$	$L_v$	$t_h$	$t_v$	$d$
치수	590	144	112	52	112

$A_V$  및  $A_H$ 는 각각 수직관의 단면적 및 수평관의 단면적으로서 수직관 하나의 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.

$$r_A = A_V / A_H \quad (1)$$

$$L_e = r_A L_h + 2L_v \quad (2)$$

액체댐퍼의 고유진동수 식은 다음과 같다.

$$\omega_x = \sqrt{2g / L_e} \quad (3)$$

본 연구에서 개발된 액체댐퍼는 액체의 물높이에 의한  $L_V$  뿐만 아니라 수직관의 면적  $t_v$ 로 고유진동수 조절이 가능하다.

### 3. 진동대 실험

그림2는 실험 시스템을 나타낸다. 그림2와 같이 액체댐퍼는 투명 아크릴로 제작하였다. 각각의 셀은 고무 마개를 이용하여 밀폐시켰다.

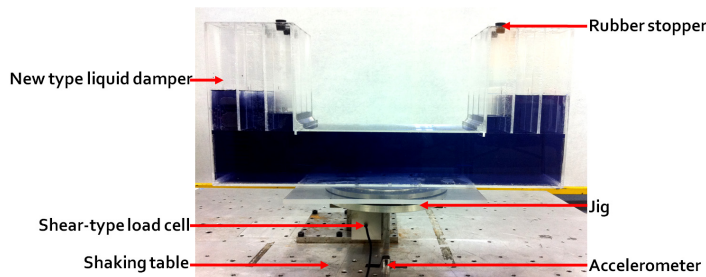


그림 2 진동대 실험 시스템 그림

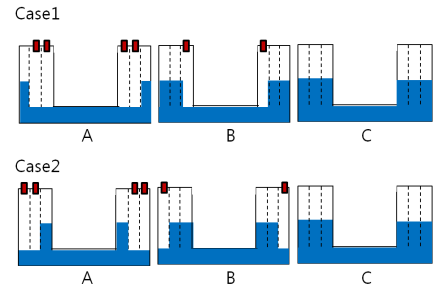


그림 3 실험 종류

제작된 댐퍼의 밀폐된 셀 안에 물이 외부 가진에 의해서도 공기에 압력에 의해 움직이지 않는지를 확인하고 고유진동수 변화를 측정하기 위해 진동대 실험을 실시하였다. 실험은 그림3의 Case1처럼 실험체의 셀을 바깥쪽부터 개방한 일반적인 형태의 LCVA와 Case2처럼 안쪽부터 개방한 특수한 형태 LCVA로 진행하였다. 액체댐퍼의 고유진동수는 진동대 가진 실험을 통해 입력 대 출력의 비인 전달함수를 구하여 파악하였다. 액체댐퍼를 지그위에 고정하고 진동대 테이블과 지그사이에 전단형 로드셀을 설치하여 밀면전단력을 측정하였다. 진동대위에 설치된 가속도계를 통해 입력 가속도를 측정하였다. 입력 가진은 0 Hz 부터 15Hz까지의 대역을 가지는 백색잡음이다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호처리 (DSP)를 통해 수행되었다. 데이터 수집보드는 측정된 가속도 및 밀면전단력을 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 25Hz 저주파수를 통과 필터를 통한 AD/DA보드인 NI PCI-6025E로 수집되는 시스템이다. 모든 계측 및 가진은 Matlab Simulink 의 Real-Time Windows Target 으로 수행되었다(The Mathworks 2007).

### 4. 실험결과

진동대 실험을 통해 우리가 개발한 액체댐퍼가 밀폐된 셀로 인해 고유진동수 조절이 가능한지 확인하고 이론적인 고유진동수와의 비교를 통해 실제 사용이 가능한지에 대해 평가하였다.

#### 4.1. Case 1

진동대 실험을 통해 외부 가진에도 액체댐퍼의 밀폐된 셀의 물은 움직이지 않음을 확인할 수 있었다. Case1은 그림3에서와 같이 바깥쪽 셀을 순차적으로 개방하여 실시하였다. 이 형태 U형인 일반적인 LCVA의 형태이다. 그림4는 Case1의 실험 결과를 나타내는 진동대가속도를 입력으로 하고 전단형 로드셀에서 계측한

힘을 출력으로 하는 전달함수이다.

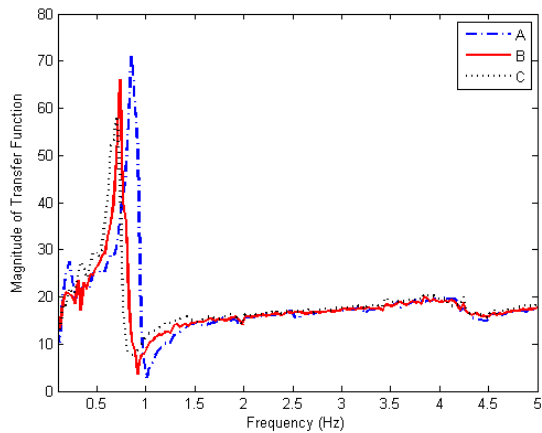


그림 4 Case1 전달함수

표 2 Case1 고유진동수와 오차율

	A	B	C
이론 고유진동수	0.91Hz	0.76Hz	0.68Hz
실험 고유진동수	0.85Hz	0.73Hz	0.70Hz
오차율	5%	3%	4%

전달함수를 통해 액체댐퍼의 고유진동수를 파악하였고 Case1의 A,B,C 형태의 제어력도 파악 할 수 있었다. 댐퍼의 제어력은 A가 가장 크며 B, C 순서임을 알 수 있다. 이는 LCVA의 제어력은 유효질량으로 작용하는 수평부 질량에 의해 결정되는 기존의 이론과 일치함을 보여준다(Chang and Hsu 1998). 표2는 이론적으로 산정된 고유진동수와 실험으로 나타난 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 오차율은 5%이하로 나타났으며 셀을 전혀 막지 않은 C의 경우의 오차율도 4%이기에 이 오차는 실험으로 인한 오차로 간주된다. Case1의 형태로 셀을 개방시키면서 수직관의 단면적 조절을 통해 고유진동수를 조절할 수 있음을 확인 할 수 있었으며 오차율을 통해 실제 사용이 가능함을 알 수 있었다.

#### 4.2. Case 2

Case2는 그림3에서와 같이 안쪽 셀을 순차적으로 개방하여 실시하였다. 이 형태는 수직기둥 바깥쪽으로 수평부의 물이 존재하여 완전한 U형이 아닌 특수한 형태의 LCVA이다. 그림5는 Case2의 실험 결과를 나타내는 전달함수를 통해 액체댐퍼의 고유진동수와 제어력을 파악하였다.

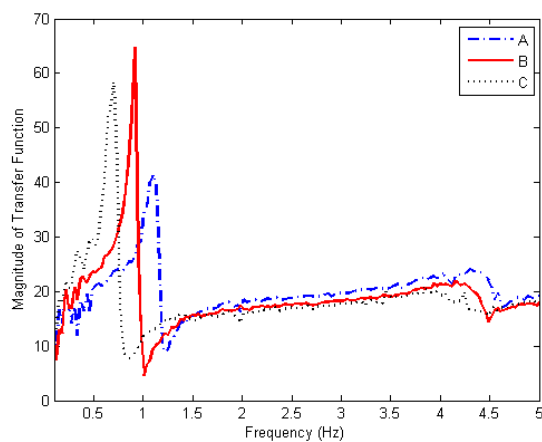


그림 5 Case2 전달함수

표 2 Case2 고유진동수와 오차율

	A	B	C
이론 고유진동수	1Hz	0.81Hz	0.68Hz
실험 고유진동수	1.08Hz	0.92Hz	0.70Hz
오차율	9%	13%	4%

표3는 이론적으로 산정된 고유진동수와 실험으로 나타난 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 오차율은 9~13%로 Case1에 비해 컸다. 이는 Case2는 완벽한 U형이 아닌 수직기둥 바깥쪽에 물로 인한 강성 증가로 인해 이론고유진동수 보다 고주파로 나타난 것으로 생각된다. 제어력도 이론적으로 수평부의 질량을 비교하였을 때  $C > B > A$ 순으로 나타나야 하는데 B가 가장 크게 나타났다. 이는 형태가 완전한 U형이 아니기 때문에 나타난 현상이라 생각된다. 개발된 LCVA를 사용하려면 Case1의 형태로 조절하여 사용하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다.

## 5. 결론

LCVA의 수직기둥부분의 일정한 면적의 셀로 나누어 그 셀을 밀폐시켜 수직기둥의 면적을 조절하여 고유진동수를 조절할 수 있는 댐퍼를 개발하였다. 밀폐된 셀 안에 물이 외부 가진에 의해서 움직이지 않아 수직관의 면적을 조절할 수 있음을 진동대 실험을 통해 증명하였다. 로드셀로 측정된 제어력을 출력으로 하고 진동대가속도를 입력으로 하는 전달함수를 사용하여 댐퍼의 고유진동수와 제어력을 측정하였다. 개발한 댐퍼는 수직관의 면적의 변화에 따라 고유진동수가 변화하였으며 이론식으로 계산한 고유진동수와의 오차율도 작아 실제로 사용가능함을 확인하였다. 개발된 액체댐퍼는 물높이를 조절하지 않고 밀폐시키는 셀의 개수를 조절하여 고유진동수를 쉽게 조절할 수 있어 실제 사용성 측면에서도 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 현대건설(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Amanat, K.M., Hoque, E.**(2006) A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 7, pp.495-502.
- Chang, C.C., Hsu, C.T.**(1998) Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers, *Engineering Structures*, Vol. 20, pp.580-586.
- Fujino, Y., Pacheco, B.M., Chaiseri, P., Sun, L.M. and Koga, K.**(1990) Understanding of TLD properties based on TMD analogy, *JSCEJ. Structures Engineering*, 36A.
- Soong, T.T., Dargush, G.F.**(1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, *John Wiley and Sons*, USA, pp.356.
- Lee, S.K., Min, K.W. and Lee, H.R.**(2011) Parameter identification of new bidirectional tuned liquid column and sloshing dampers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, pp.1312-1327
- The MathWorks Inc.**(2007) Simulink Reference, *MATLAB SIMULINK*