

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

내부 경량 삽입체를 적용한 동조액체기둥감쇠기의 감쇠 성능 평가

An Evaluation of Damping Performance for Tuned Liquid Column Damper with Internal Lightweight Solids (TLCDILS)

○정 재 근*
Jeong, Jae Geun

배 태 영**
Bae, Tae Young

배 한 준**
Bae, Han Jun

박 민 재***
Park, Min Jae

Abstract*

A tuned liquid column damper (TLCD) is a device that controls vibration by utilizing liquid sloshing inside a U-shaped tank. In this study, we experimentally investigated the damping performance of a tuned liquid column damper with internal lightweight solids (TLCDILS) of various geometries, such as spheres, tetrahedrons, tetrapods, and core-loks. TLCDILS characteristic experiment was conducted to examine the natural frequency and estimate the damping ratio. Furthermore, the free vibration test was performed to compare the damping ratio under different depending on the presence of water and internal lightweight solids.

키워드 : 동조액체기둥감쇠기, 감쇠비, 3D 프린팅

Keywords : Tuned Liquid Column Damper, Damping Ratio, 3D Printing

1. 서론

25년 4월 발생한 미얀마 지진에서 방콕의 고층 호텔 최상층 수영장온 흔들리면서 댐퍼로써 구조물이 받는 피해를 줄이는데 기여했다. 수영장은 본래 이용자에게 편의를 제공하기 위한 목적으로 설치됐지만 동시에 구조적인 역할을 제공한 셈이다. 이러한 사례를 통해 고층부 수영장의 액체가 단순한 미적 요소가 아닌 건축물의 안전성과 사용성을 개선할 수 있는 장치로 사용될 수 있는 점을 보여준다. 본 연구에서 다루는 TLCDILS는 양쪽 수직 기둥을 수영장으로 활용하고 하부 수평 물기둥에 삽입체를 활용하여 감쇠 성능을 극대화할 수 있다.

건축물 상부에 액체를 이용한 제진장치 중 하나인 동조액체기둥감쇠기(TLCD)는 U자 수조를 이용한 감쇠기로 Sakai(1997)에 의해 제안되었다. 이는 유체의 요동(sloshing)을 활용하는 동조액체감쇠기(TLD)의 요동에 참여하는 액체의 질량을 늘려 향상된 성능을 나타낸다. TLCD의 감쇠 성능을 높이기 위해 내부 격막(orifice) 설치, 점성이 높은 액체 사용 등이 제안되었

고, Al-Saif(2011)는 내부에 구(ball)를 추가하여 움직이는 격막의 역할을 하도록 만든 TLCBD에 대해 연구하였다.

본 연구는 TLCD에 구, 정사면체, 테트라포드, 코어록 형상의 내부 경량 삽입체를 추가한 TLCDILS가 유체 흐름의 교란과 에너지 소산 증가에 의한 감쇠 성능을 평가하고자 한다.

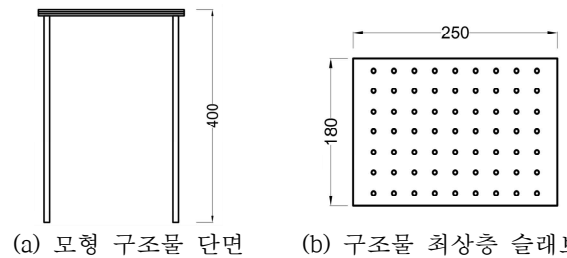


그림 1 모형 구조물 도면

2. 실험 방법

모형 구조물 및 수조를 제작하여 내부 경량 삽입체를 적용한 동조액체기둥감쇠기의 감쇠 성능을 평가하였다. 전체 질량 11kg가 되도록 250mm x 180mm의 철판 슬래브 5장과 직경 5mm 전산볼트를 결합하여 높이 400mm가 되도록 모형 구조물을 제작하였다. 그림 1과 같이 제작된 구조물의 고유진동수는 1.545Hz, 고유주기는 0.647초로 측정되었다.

건축물에 TLCD를 적용하는 경우, 건축물의 1차 고유진동수와 동조할 수 있도록 설계된다. Sakai(1997)에 따르면 TLCD의 고유진동수(f_n)는 물기둥의 전체 길이(L)에 따라 달라지며 이는 식 1과 같다.

* 국립부경대 건축소방공학부 석사과정

** 국립부경대 건축공학과 학사과정

*** 국립부경대 건축공학과 조교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, mjp@pknu.ac.kr)

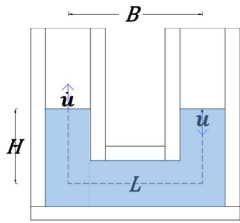
본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00416604, RS-2025-00558843)에 의해 수행되었습니다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (1)$$

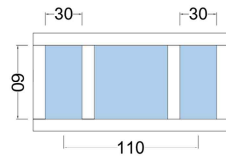
여기서 g 는 중력가속도이다.

표 1 3D 프린팅 정보

3D 프린터	LUGO PRO XL (LUGOLABS)
재료	PLA 필라멘트 (밀도=1.25g/cm ³)
해상도	0.09mm
채움 밀도	100%



(a) TLCD 단면



(a) TLCD 평면 치수

그림 2 TLCD 수조 형상

모형 구조물과 TLCD 수조의 고유진동수를 맞추기 위해 수조의 물길이를 210mm로 산정하였다. 수조는 구조물의 크기와 전체 구조물과의 질량비를 고려하여 그림 2와 같이 두께 10mm의 아크릴을 이용하여 수조 내부 폭 30mm x 60mm, 수평 길이(B) 110mm, 수직 길이(H) 50mm가 되도록 제작하였다. 내부 물의 무게는 378g으로 구조물과의 질량비는 약 3.4%였다. 내부 물체는 구(Ball), 정사면체(Tetrahedron), 테트라포드(Tetrapod), 코어록(Core-loc)으로 형상에 따라 감쇠 성능을 알아보려고 하였다. 기존 TLCBD에서 내부 구가 움직이는 격막 역할을 하여 감쇠 성능을 향상시킨 점을 통해 내부 공 개수가 늘어났을 때의 효과를 얻고자 실험을 진행하였다. 정사면체는 구와 비교해 평면과 모서리를 가져 더 뛰어난 감쇠 성능이 기대되어 사용하였다. 테트라포드는 해안에서 쓰이는 소파블록으로 파랑에너지의 소산 역할을 하기에 이를 기대하여 선택하였다. 코어록 또한 소파블록의 한 종류로, 크기 대비 뛰어난 저항성을 보여주어 선정하였다.

내부 경량 삼입체는 복잡한 형상을 틀이나 추가 가공 없이 도면을 통해 정밀하게 구현할 수 있도록 3D 프린팅을 이용하여 제작하였다. 3D 프린터의 제원 및 필라멘트 정보는 표 1에 나타내었다. 내부 경량 삼입체의 크기는 Al-Saif(2011)을 참고하여 내부 물체 높이와 수조 내부 높이의 비가 0.8이 되도록 설정하였다.

2.1 수조 특성 실험

TLCD 및 TLCDILS의 고유진동수 검토 및 감쇠비 비교를 위해 일방향 진동대를 이용하여 수조 특성실험을 진행하였다. 가진 고유진동수(f)를 수조 고유진동수(f_0)로 나눈 비인 고유진동수비(f / f_0)가 0.8~1.2가 되도록 실험을 진행하였다. 식 2와 같이 TLCD의 감쇠계수에 물기둥 수면 변위($\dot{u}$)의 절댓값이 포함되어 이를 측정하여 식 3의 하프파 위법을 통해 감쇠비를 평가하였다.

진동대를 통한 내부 삼입체별 실험 동영상을 통해 수면

변위를 측정하였다. 눈금자 부착을 통해 영상 내 pixel을 mm 단위로 변환하고 수조가 좌우로 움직이며 측정 수면의 위치가 변하기에 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 설정하였다. 이진화로 수면을 측정하는 경우, 배경과 수면을 혼동하는 경우가 있어, Sobel filter를 사용하여 그림 3과 같이 수면 변위를 측정하도록 했다.

$$c_d = \frac{\rho A}{2} \delta |\dot{u}| \quad (2)$$

$$\xi = \frac{f_b - f_a}{2f_n} \quad (3)$$

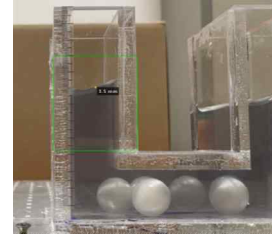


그림 3. 영상 분석 과정

2.2 구조물 자유진동실험

구조물만 있는 경우, 수조 내부 물이 채워져 있는 경우, 내부 경량 삼입체 4가지가 들어간 경우의 감쇠비를 측정하기 위해 자유진동실험을 진행하였다. 진동대 바닥에 30mm 강제 변위를 주어 구조물 상부 슬래브에서의 응답 가속도를 측정하였다. 식 4의 대수감소법을 이용해 변수에 따른 감쇠비를 도출하였다.

$$\xi = \frac{1}{2} \times \frac{1}{j} \ln \frac{a_i}{a_{i+j}} \quad (4)$$

3. 결론

TLCD의 감쇠성능을 향상시키기 위하여 내부 경량 삼입체를 추가하여 실험을 통해 감쇠 성능은 분석하였다. 수조 특성 실험을 진행하여 수조의 고유진동수 검토와 수면 변위를 측정하여 감쇠비를 비교하였다. 수조를 결합한 구조물의 자유진동실험을 진행하여 액체 유무와 삼입체 여부에 따른 구조물의 감쇠비를 측정하였다. 본 연구를 통해 TLCDILS를 활용한 고층 건물 상부의 수영장이 편의시설과 동시에 진동 저감 시스템으로 활용될 수 있고, 향후 연구를 통해 실제 건축물에 적용을 도모할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Sakai F, Takaeda S, Tamaki T. (1989) Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibrations, Proc Int Conf High rise Buildings, Nanjing, China 1989;926-31.
2. Al-Saif, K. A., Aldakkan, K. A., & Foda, M. A. (2011). Modified liquid column damper for vibration control of structures. International Journal of Mechanical Sciences, 53(7), 505-512.