레이저진동계를 사용한 동조액체댐퍼의 액체 진동 측정

신 윤 수¹ · 민 경 원¹ · 김 준 희^{1*}

¹단국대학교 건축공학과

Measurement of Liquid Oscillation in Tuned Liquid Dampers using a Laser Doppler Vibrometer

Yoon-Soo Shin¹, Kyung-Won Min¹ and Junhee Kim^{1*}

¹Division of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

Abstract

In this study, dynamic vertical displacement of liquid in the tuned liquid column damper(TLCD) is measured by a laser Doppler vibrometer(LDV) to overcome limitations of existing sensors and to leverage noncontact sensing. Addressing advantages of noncontact measurements, operational principles of the LDV to measure velocity and displacement of a target object in motion is explained. The feasibility of application of the LDV to measurement of liquid motion in the TLCD is experimentally explored. A series of shake table tests with the TLCD are performed to determine requirements of application of the LDV. Based on the experimental results, it is proved that the LDV works under the condition of adding dye to the liquid by increasing the intensity of reflected laser and thus validity is verified by comparison with a conventional wave height meter.

Keywords : fluid measurement, laser doppler vibrometer, tuned liquid column damper, vibration control device

1. 서 론

레이저 계측장비 중 도플러 효과를 이용하여 대상 물체의 속도와 변위를 측정할 수 있게 만든 도플러 레이저 센서(Laser Doppler Vibrometer, LDV; Hani *et al.*, 2005)는 측정할 수 있는 속도와 변위의 범위가 넓어 여러 분야에 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2013; 2015). 이들의 공통점은 고체를 측정 대상으로 하고 있으며 LDV를 액체에 이용한 선행 연구는 문헌상 찾아보기 힘들다. 액체에 LDV 레이저 광선을 주사하면 액체 표면에서 전반사가 발생하지 않고 일정량의 빛이 투과하게 된다. 투과하는 빛은 LDV에 들어오는 광량을 줄어줄게 할뿐만 아니라 투과된 빛들이 액체 안의 각 부분에서 또다시 반사되기 때문에 오차를 발생시킨다.

슬로싱(sloshing)과 같은 액체의 동적 거동을 측정하거나 제어하는 연구는 다양한 공학분야에서 활발히 진행되고 있다. 응용된 금속, 또는 음료를 과도한 출렁임없이 가능한 빨리

이동시키거나(Kenichi *et al.*, 2005), 액체 연료를 실은 비행기, 배 또는 우주선에서 연료가 흔들림으로 인해 생기는 전단력 제어에 관한 연구가 있다(Jan, 2005). 액체의 출렁임은 품질저하, 적하점의 위치 방해를 일으키며 액체가 밖으로 튀어나와 기계를 손상시킬 수 있는 위험이 있다(Kazuhiko *et al.*, 2001). 액체를 담은 포장 용기에서 액체 유동으로 인한 접촉 부분의 포장 불량률 유발할 수 있다(Mattias *et al.*, 2000). 고층건물의 풍하중에 의한 상시 진동을 감소시키기 위하여 설치하는 동조액체댐퍼(Tuned Liquid Damper, TLD)는 액체 진동에 의한 관성력을 활용한다(Lee *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2014). 동조액체댐퍼는 현장설치 전 반드시 동적거동을 측정하여 성능검증 및 고유진동수, 감쇠비를 파악하여 하며, 설치 후 건물의 노후에 따른 동조액체댐퍼의 동적특성을 주기적으로 파악하는 것이 중요하다(Lee *et al.*, 2009; Kenichi *et al.*, 2001).

액체의 거동 계측은 액체의 파고를 측정을 의미할 수 있다.

* Corresponding author:

Tel: +82-031-8005-3734; E-mail: junheekim@dankook.ac.kr

Received August 30 2016; Revised September 29 2016;

Accepted September 30 2016

© 2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

파고 측정 방법으로는 액체에 넣어 사용하는 접촉식 센서로 서보식 파고계, 용량식 파고계, 초음파식 파고계를 이용하고 있으며(Kenichi *et al.*, 2001; Mattias *et al.*, 1999) 비디오카메라를 이용한 파고 측정 방법도 연구되고 있다(Kim *et al.*, 2016; Abellan *et al.*, 2006). 하지만 접촉식 센서는 액체와의 직접접촉으로 인한 측정 물리량 변화, 센서 내구성 문제, 액체 오염문제 등의 단점이 있고, 비디오카메라 측정방법 역시 대상 물체가 반드시 투명한 용기 안에 있어야 한다는 점에서 적용성에 제한이 있다.

본 연구에서는 액체의 동적거동을 측정하는 기존 센서들의 한계점을 극복하며 LDV를 활용한 액체진동 측정의 방법론을 제시하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성으로써 2장에서는 LDV를 사용해야 하는 이유와 LDV로 진동을 측정하는 원리를 명시하였다. 3장에서는 LDV를 이용해 파고를 측정하는 방법과 오차를 줄이기 위한 방법을 실험을 통해 분석하였고 그 결과를 기존에 사용하던 용량식 파고계를 통해 검증하였다. 검증하기 위한 액체의 움직임으로는 고충진물의 풍진동을 제어하기 위한 액체댐퍼 내의 액체를 대상으로 하였다.

2. 레이저진동계(LDV)

2.1 레이저 센서

변위를 측정하는 레이저 센서는 펄스파로 이루어진 레이저를 발사해 펄스파가 돌아오는 시간을 측정하여 절대적인 변위를 측정하는 LIDAR(light detection and ranging; Kazuaki *et al.*, 2005), CCD(charge coupled device)나 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor)소자(Kim *et al.*, 2014)를 이용해 상대적인 변위를 측정하는 광삼각법 레이저 변위계 등이다. LIDAR는 빛이 돌아오는 시간이 매우 짧기 때문에 펄스파를 여러 개 주사하여 평균화하는 작업을 하는데 그 시간동안 대상 물체가 정지상태를 유지하여야 하므로 동적 변위를 측정하는 장비로써 부적합하다. 광삼각법 레이저 변위계는 레이저가 삼각형을 이루어야 해 측정할 수 있는 거리가 1m 안팎으로 매우 짧고 물에 사용할 경우 레이저 광선이 투과, 산란하면서 CCD 혹은 CMOS소자에 맺히는 레이저 광선이 불분명하여 액체를 대상으로 한 변위 측정이 불가능하다. 반면에 LDV는 도플러 효과의 원리를 이용한 장비로써 움직이는 물체의 속도와 변위를 측정하는 용도로 만들어졌고 레이저 광선이 물에 반사될 때 투과, 산란하더라도 일정량만 다시 되돌아 온다면 측정이 가능하다(Kim *et al.*, 2016).

Fig. 1과 같이 LDV에서 나가는 레이저 광선은 일정한

Fig. 1 Working principle of the LDV, Doppler effect

진동수를 갖고 있으며 측정하고 있는 대상 물체가 움직임에 따라 반사되는 레이저 광선의 진동수가 변조된다. 측정 대상이 LDV 쪽으로 이동하면 고진동수로, 멀어지면 저진동수로 변조된다. 변조된 진동수를 분석하면 대상 물체가 움직인 속도와 변위를 알 수 있고 도플러 효과로 인해 주파수 변조는 다음과 같다.

$$f = f_0 \frac{v}{v - v_s} \quad (1)$$

f 는 LDV에 들어오는 빛의 진동수이고 f_0 는 LDV에서 나간 빛의 진동수, v 는 LDV에서 나간 빛의 속도, v_s 는 움직이는 물체의 속도이다.

2.2 LDV 구동원리

본 연구에서는 POLYTEC 사의 PDV-100 레이저진동계를 사용하였다. Fig. 2와 같이 PDV-100은 레이저 발생기, 레이저를 반사하는 고정된 거울(fixed mirror), 측정 대상 물체 및 고정된 거울에서 반사되는 레이저를 측정하는 디텍터(detector)로 구성된다. 추가적으로 주사되는 레이저의 방향을 변경하는 알루미늄으로 코팅된 거울도 필요하다.

PDV-100의 면외방향 동적 변위와 속도데이터를 획득하는 방법은 다음과 같다. 정현파형 레이저빔을 움직이는 대상 물체에 주사하면, 정현파에 도플러 효과로 인해 주파수가 변조되고 변조된 반사파가 변조 전 원래의 레이저빔(reference beam)과 합쳐져 Fig. 3과 같은 맥놀이(beatting)신호가 된다.

Fig. 2 Schematic diagram of the moving light in LDV

Fig. 3 The beating signal generated from detector

$$u_c = u_{DC} + A \cos(\omega_c t + \varphi_m(t)) \quad (2)$$

여기서, $\varphi_m(t)$ 을 추출하면 시간에 따른 물체의 움직임을 알 수 있고 그 방법은 다음과 같다. $u_c(t)$ 에 주파수가 변조되지 않은 원래의 레이저 광선을 곱하고 저역통과필터(lowpass filter)를 통과하면 코사인파형과 사인파형으로 구성된 u_i , u_q 를 얻을 수 있고 그 뒤 아크탄젠트(arctangent)를 이용하여 $\varphi_m(t)$ 를 추출한다.

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{A}{2} \cos \varphi_m(t), \\ u_q &= \frac{A}{2} \sin \varphi_m(t), \\ \varphi_m(t) &= \arctan\left(\frac{u_q(t)}{u_i(t)}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$\varphi_m(t)$ 와 레이저의 파장을 비례식을 이용하면 물체가 움직인 변위가 $\lambda/4\pi\varphi_m(t)$ 인 것을 알 수 있다. 탄젠트함수가 π 마다 불연속인 특징을 아크탄젠트함수도 갖고 있으므로 $\varphi_m(t)$ 역시 불연속이다. 그렇기 때문에 $\varphi_m(t)$ 를 변위 데이터로 사용하려면 불연속적인 부분을 연결하여 연속적으로 바꿔주는 비왜곡처리(unwrapping)를 해주어야 한다. 반면에 속도 데이터는 $\varphi_m(t)$ 를 미분한 값을 사용하므로 불연속적인 부분에 구애받지 않는다. 이러한 방식으로 계산된 동적 변위는 비왜곡 처리로 인한 측정 불안정이 발생하는 두 가지 경우가 있다. (1) 충격으로 인한 갑작스러운 변위의 변화 (2) SNR(signal-

to-noise ratio)값이 작을 때이다. (1)의 경우에는 비왜곡 처리를 할 때 위상 변화가 π 미만이라고 가정하기 때문에 한번에 위상이 π 이상만큼 변했을 때에는 변위를 정확히 재구성 할 수 없다. (2)의 경우는 너무 적은 변화의 변위를 측정하거나 잡음의 크기가 클 때 자주 발생한다. 따라서 물체가 급격히 움직이거나 신호의 SNR값이 작을 경우에는 데이터의 왜곡으로 인해 측정신호가 불안정해진다. 그러나 속도 데이터는 비왜곡처리로 인한 데이터의 왜곡이 없으므로 변위 데이터보다 신뢰성이 높아 속도 데이터가 널리 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2015). 본 연구에서도 계측의 안정성이 높은 속도 계측을 통해 액체진동을 계측하였다.

3 검증 실험

3.1 실험 시스템

Fig. 5와 같이 LDV를 이용하여 면의 방향의 파고를 측정하기 위하여, 고층 건물의 풍진동을 제어하기 위해 사용되는 동조액체기둥감쇠기(tuned liquid column damper, TLCD; Kim *et al.*, 2015)를 이용하였다. 파고를 생성시키기 위해 TLCD에 진동을 주는 진동대를 사용하였다. TLCD의 1차 모드의 진동수인 0.85Hz로 진동대를 가진하여 파고의 모양을

Fig. 5 Experimental set-up of wave height measurement using the LDV

Fig. 4 Principle of displacement and velocity measurement of the LDV

사인파로 뚜렷이 나타나도록 하였다. 면 외 방향인 위아래로 움직이는 파고를 측정하기 위해서는 레이저 광선을 위에서 내보내야 하는데 거울을 이용하여 레이저가 90도 각도로 꺾이게 하여 가능하도록 하였다. 거울은 레이저의 광량 손실을 줄이기 위해 레이저의 파장 633nm의 빛을 반사시키기 적합한 재료인 알루미늄으로 코팅된 거울을 사용했다.

3.2 색깔에 따른 반사량

모든 레이저 장비의 광선은 각각 사용하는 파장에 따른 빛의 특성을 갖고 있다. 본 실험에서 사용한 LDV는 가시광선 영역의 633nm의 파장의 레이저 광선을 이용하여 가시광선의 특성을 갖고 있다. 그렇기 때문에 LDV로 측정하는 대상 물체의 색에 따라 LDV의 레이저 광선이 반사되어 돌아오는

Fig. 6 Light spectrum and Wavelength of the LDV adapted in the study

Fig. 7 Quantity of light reflected from various paint colors

Wave Height Meter
LDV

(a) White

(c) Orange

(e) Green

(g) Navy

(i) Black

(b) Red

(d) Yellow

(f) Blue

(h) Purple

Fig. 8 Comparison of wave heights measured by the LDV and Wave Height Meter for various paint colors

양에 차이가 생긴다.

Fig. 7은 물에 혼합하지 않은 순수한 액체 염료에 약 1m 거리에서 LDV의 레이저 광선을 쏘았을 때 다시 LDV로 반사되는 광량을 비율로 나타낸 것이다. 광량은 LDV화면에 표시되는 최대 광량인 12칸에 대한 비율로 측정했다. Fig. 6은 가시광선 영역의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용한 LDV는 가시광선 영역 중에서 파장이 긴 633nm의 파장의 빛을 사용했기 때문에 실험 결과 역시 파장이 긴 색의 염료에서 반사가 더 잘 되는 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 5와같이 TLCD안에 17L의 물을 채운 뒤 60mL의 빨강, 노랑, 파랑, 초록 등 9종류의 염료를 색깔별로 혼합하여 진동대로 가진하였을 때 파고의 변화를 LDV와 용량식 파고계로 비교 실험한 것이다. 흰색, 빨간색, 주황색, 노란색의 염료를 혼합하여 실험한 경우에는 LDV와 용량식 파고계의 파고 변화가 오차율 4% 미만으로 비교적 일치함을 알 수 있다. 하지만 초록색 이후의 낮은 파장의 색깔에서는 LDV에 되돌아오는 반사량이 부족하여 파고의 높낮이 변화는 판별이 가능하지만 높낮이의 크기는 65%이상의 오차율을 보여 측정되지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 염료의 농도에 따른 파고 측정

측정 대상 물체가 고체일 경우에는 LDV에 되돌아오는 반사량이 적어도 신호에 노이즈가 생길 뿐 데이터의 정확도에는 변화가 없다. 하지만 염료를 혼합한 액체는 광량이 충족되지라도 혼합한 염료의 양이 적으면 표면뿐만이 아니라 레이저광선이 투과하면서 각 부분에서 반사가 연속 발생되어 데이터에 오차가 발생하였다. 따라서 충분한 농도의 염료를 혼합하여 레이저 광선이 투과하는 양을 줄였고 데이터의 오차가 줄어들음을 확인하였다.

Fig. 9는 TLCD안에 17L의 물을 채운 뒤 염료를 혼합하지 않았을 경우, 30mL의 흰색 염료를 혼합하였을 경우, 60mL의 흰색 염료를 혼합하였을 경우에 파고의 변화를 LDV와 용량식 파고계로 비교 실험한 것이다. 투명한 물에 LDV의 레이저 광선을 쏘 경우 레이저 광선이 대부분 물을 투과하므로 물높이 측정이 어려운 것으로 확인되었다. 30mL의 염료를 혼합한 실험은 60mL의 염료를 혼합하였을 때와 반사량이 같음을 확인한 것임에도 불구하고 60mL의 염료를 혼합한 실험과 비교하여 파고의 크기가 정확하지 않다. 반면에 60mL의 염료를 혼합한 실험에서는 염료의 분자들이 레이저 광선이 액체를 투과하는 것을 방지하여 대부분의 레이저 광선이 표면에서 반사되었고 그에 따라 데이터의 정확도가 30mL의 염료를 혼합한 실험에 비해 25%이상 향상된 것을 확인하였다.

Fig. 9 Comparison of wave heights measured by LDV and Wave Height Meter from paint concentration

4. 결 론

본 연구에서는 기존 접촉식 파고측정 센서의 내구성 및 오염문제, 장시간 사용시 측정값의 변동 등 단점을 극복하기 위하여, 고체 진동계측분야에서 광범위하게 사용되고 있는 레이저진동계(LDV)를 활용하여 동조액체기동감쇠기(TLCD) 내의 액체거동 측정방법론을 제안하였다. TLCD 내의 투명한 액체에 LDV 레이저 광선을 주사하였을 때 속도와 변위의 측정이 불가능함을 확인하였으며, 그 원인을 LDV의 원리와 액체의 특성을 통해 분석하였다. LDV를 액체에 사용하기 위한 방법을 실험을 통해 파악하였고, LDV로 측정된 데이터의 정확성을 검증하기 위해 기존 용량식 파고계와의 비교검증을 수행하였다.

투명한 액체의 반사량을 증가시키기 위해 염료를 혼합하였으며, 염료의 색에 따라 광량에 차이가 발생함을 확인하여 LDV에 사용된 레이저 광선의 파장과 연관된 결과를 도출하였다. 염료를 혼합한 후 광량이 충분한 경우에도 발생하는 계속 오차를 낮추기 위해 염료의 농도를 변화시키며 그에 따른 데이터의 정확도를 파악하였다. 결과적으로 모든 가시광선의 빛을 반사시키는 흰색의 염료를 충분한 농도로 혼합하였을 때 LDV를 이용한 TLCD의 파고 측정의 실험적인 결과가 용량식 파고계의 결과와 일치함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산학협동재단의 2016년도 학술연구비 지원사업 및 한국연구재단의 2016년도 기초연구사업(NRF-2015R1C1A1A01054155, NRF-2015R1D1A1A01060643)의 지원으로 수행된 연구임.

References

- Abellán, A., Vilaplana, J.M., Martínezc, J.** (2006) Application of a Long-Range Terrestrial Laser Scanner to a Detailed Rockfall Study at Vall De Núria (Eastern Pyrenees, Spain), *Eng. Geol.*, 88, pp.136~148.
- Hani, H.N., Mayrai, G., Joe, D.** (2005) Comparison of Laser Doppler Vibrometer with Contact Sensors for Monitoring Bridge Deflection and Vibration, *NDT & E Int.*, 38, pp.213~218.
- Jan, P.B.V.** (2005) Spacecraft Maneuvers and Sloss Control, 2005 *IEEE Control Sys.*, 25, pp.12~16
- Jang, S.J., Kim, J.H., Min, K.W.** (2015) Development of Variable Voltage Sensing for Identification of Dynamic Characteristics of TLCDs, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(3), pp.275~282.
- Kazuaki, S., Takahiro, O., Takeshi, H., Hidekuni, T., Makoto, I.** (2005) A Novel Fused Sensor for Photo- and Ion-Sensing, *Sensors & Actuators B: Chemical*, 106, pp.614~618.
- Kazuhiko, T., Kenichi, Y.** (2001) Sloshing Analysis and Suppression Control of Tilting-type Automatic Pouring Machine, *Control Eng. Pract.*, 9, pp.607~620.
- Kenichi, Y., Kazuhiko, T.** (2005) Sloshing Suppression Control of Liquid Transfer Systems Considering a 3-D Transfer Path, *IEEE Trans. Control Sys. Tech.*, 9, pp.483~493.
- Kenichi, Y., Kazuhiko, T.** (2001) Robust Liquid Container Transfer Control for Complete Sloshing Suppression, *IEEE Trans. Control Sys. Tech.*, 9, pp.483~493.
- Kenichi, Y., Shimpei, H., Kazuhiko, T.** (2002) Motion Control of Liquid Container Considering an Inclined Transfer Path, *Control Eng. Pract.*, pp.465~472.
- Kim, J.H., Kim, K.Y., Sohn, H.** (2013) In Situ Measurement of Structural Mass, Stiffness, and Damping using a Reaction Force Actuator and a Laser Doppler Vibrometer, *Smart Mater. & Struct.*, 22, 085004.
- Kim, J.H., Kim, K.Y., Sohn, H.** (2014) Autonomous Dynamic Displacement Estimation from Data Fusion of Acceleration and Intermittent Displacement Measurements, *Mech. Sys. & Signal Proc.*, 42, pp.194~205.
- Kim, J.H., Park, C.S., Min, K.W.** (2015) Easy-to-Tune Reconfigurable Liquid Column Vibration Absorbers with Multiple Cells, *Smart Mater. & Struct.*, 24, 065041.
- Kim, J.H., Park, C.S., Min, K.W.** (2016) Fast Vision-based Wave Height Measurement for Dynamic Characterization of Tuned Liquid Column Dampers, *Measurement*, 89, pp.189~196.
- Kim, K.Y., Kim, J.H.** (2015) Dynamic Displacement Measurement of a Vibratory Object using a Terrestrial Laserscanner, *Measurement Sci. & Tech.*, 045002.
- Kim, K.Y., Kim, J.H., Sohn, H.** (2016) Development and Full-Scale Dynamic Test of a Combined System of Heterogeneous Laser Sensors for Structural Displacement Measurement, *Smart Mater. & Struct.*, 25, pp.65015~65028.
- Lee, S.K., Lee, H.R., Min, K.W.** (2012) Experimental Verification on Nonlinear Dynamic Characteristic of a Tuned Liquid Column Damper Subjected to Various Excitation Amplitudes, *Struct. Design Tall & Special Build.*, 21, pp.374~388.
- Lee, S.K., Min, K.W., Park, J.H.** (2009) Experimental Evaluation of Design Parameters for TLCD and LCVA, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(5), pp.403~410.
- Mattias, G., Bo, B.** (1999) Control of Liquid Slosh in an Industrial Packaging Machine, *IEEE Int. Conf.*, 2 pp.1654~1659.
- Mattias, G., Bo, B.** (2000) Constrained Iterative Learning Control of Liquid Slosh in an Industrial Packaging Machine, *IEEE Decision & Control*, 5, pp.4544~4549.
- Min, K.W., Kim, Y.W., Kim, J.H.** (2015) Analytical and Experimental Investigations on Performance of Tuned Liquid Column Dampers with Various Orifices to Wind-excited Structural Vibration, *J. Wind Eng. & Indus. Aerodyn.*, 139, pp.62~69.

요 지

본 논문에서는 기존 파고 측정 센서의 한계를 극복하기 위하여 레이저 장비 중 LDV를 이용하여 동조액체기둥감쇠기 안의 액체의 파고를 측정하는 방법을 제안하고 검증하였다. 비접촉 센서의 장점과 LDV가 속도와 변위를 측정하는 원리를 기술하였고 대상 물체가 액체인 경우에 요구되는 사항들에 대하여 실험적으로 파악하였다. 투명한 액체는 레이저 광선을 대부분 투과시켜 LDV에 되돌아오는 광량이 부족해 측정이 불가능함을 확인하였고 이를 증가시키기 위해 염료를 혼합하였다. 이때, 염료의 색에 따라 광량에 차이가 발생함을 확인하여 LDV에 사용된 레이저 광선의 파장과 연관된 결과를 도출하였다. 염료를 혼합한 후 광량이 충분한 경우에도 발생하는 데이터의 오차를 제거하기 위해 염료의 농도를 변화시키며 그에 따른 데이터의 정확도를 파악하였다. 결과적으로 모든 가시광선의 빛을 반사시키는 흰색의 염료를 충분한 농도로 혼합하였을 때 LDV를 이용한 TLCD의 파고 측정의 실험적인 결과가 용량식 파고계와 일치함을 확인하였다.

핵심용어 : 액체 진동 측정, 레이저진동계, 동조액체기둥감쇠기, 진동제어장치