

외팔보 구조진동 특성을 이용한 유체의 점도와 밀도 동시 측정장비개발 Simultaneous Liquid Viscosity and Density Measurement using Structural Vibration of Cantilever Beam

박준홍† · 정성빈*

Junhong Park, Seongbin Jeong

1. 서론

유체의 유변물성에는 변형율의 시간에 따른 변화의 빠르기(주파수)에 따라 달라지는 유체의 탄성 및 점성, 그리고 이에 따른 점도 등이 있다. 이러한 유체의 유변물성을 측정하기 위한 기술들은 이전부터 진행되었고, 나아가 하나의 유변물성 측정이 아닌 동시에 여러 유변물성 측정 기술에 대한 필요성과 연구 당위성이 지속적으로 제기되었다. 그리하여 현재 복합적 유체 유변물성 측정 기술들의 연구가 진행되고 있으며 이미 상용화 되어 현장에서 사용되고 있는 기술들도 있다. 그 중 정확성이 높은 기술에는 유체의 유변물성에 의해 변화되는 구조물의 공진주파수 변화를 이용하여 유체의 점도와 밀도를 동시 측정하는 것이 있다. 하지만 이 기술의 경우 주파수에 따라 달라지는 유체의 유변물성 측정이 아닌 특정 주파수에서의 유변물성을 측정한 기술이다.

그래서 이러한 단점을 극복하고 넓은 주파수 영역에 걸쳐 유체의 유변물성을 측정하는 기술들이 제안되고 있으며 그 중 주목할만한 기술은 Stokes formula 을 적용하여 구조물과 유체간의 상호 작용력을 이용한 유체의 유변물성 측정기술이다. 하지만 유체의 항력계수 측정에 어려움이 있어, 장치자체가 정밀해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 위와 영향을 없애고자 단순한 막대 구조물을 센서로 사용하고, 이를 Park 에 의해 제안된 보 전달함수법을 이용하여 구조물의 파동전파특성을 해석하였다. 그리고 이를 통해 구조물과 유체간의 상호 작용력을 측정하여 주파수에 따라 달라지는 유체의 유변물성(점도, 밀도)를 도출하였다.

2. 본론

2.1 구조-유동 상호 작용을 이용한 센서 설계

(1) 보 전달함수

그림 1 을 보면, 가진기에서 발생하는 진동이 구조물에 전달되어 외팔보가 진동하게 되고 이를 가속도계와 레이저 바이브로미터를 이용하여 측정하게 된다.

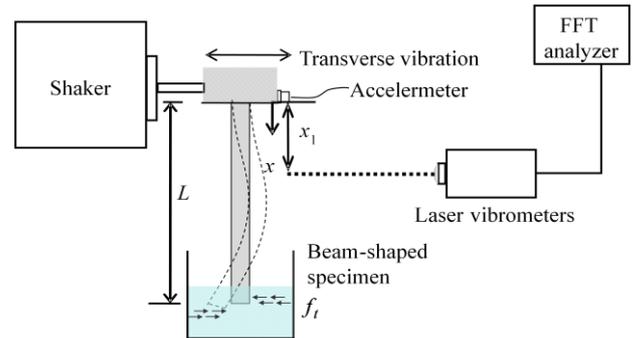


그림 1. 유체 유변물성 측정장치

식 (1)은 classical 보 이론을 적용한 4 계 편미분 방정식으로 이를 통해 외팔보의 강성을 모델링 할 수 있다.

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 D 는 빔의 굽힘 강성, m 는 빔의 길이당 질량이다. 또한 식 (1)을 만족시키는 보 방정식은 식 (2)과 같다.

$$\hat{w}(x) = \hat{A}_1 \sin \hat{k}_b x + \hat{A}_2 \cos \hat{k}_b x + \hat{A}_3 e^{\hat{k}_b(x-L)} + \hat{A}_4 e^{-\hat{k}_b x} \quad (2)$$

여기서 \hat{k}_b 는 각주파수와 관련된 복소 파동수이다. 그리고 그림 1 에 나타난 바와 같이 고정-자유의 경계조건은 다음 식으로 나타낸다.

$$\hat{w}(0) = w_0, \frac{\partial \hat{w}(0)}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 \hat{w}(L)}{\partial x^2} = 0, D \frac{\partial^2 \hat{w}(L)}{\partial x^2} = f_t \cdot w(L) \quad (3)$$

이러한 경계조건을 적용함으로써 고정-자유 경계

† 교신저자; 한양대학교 기계공학과 음향진동연구실

E-mail : parkj@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0424

* 한양대학교 기계공학과

조건 보 전달함수를 구할 수 있다. 그리고 이 전달함수로 Newton-Raphson 법을 사용해 복소 파동수를 얻을 수 있으며 이를 통해 복소 굽힘 강성을 구할 수 있다.

(2) 구조-유동 상호 작용

식 (4)은 Stokes formula 를 이용하여 구조물에 작용하는 유체의 유동력을 나타낸 것이다.

$$f_i = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho \left(1 + \frac{9}{2R} \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \right) + 6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\sqrt{2\eta/\rho\omega}} \right) \frac{i}{\omega} \quad (4)$$

여기서 η 는 유체의 점도, ρ 는 유체의 밀도, R 은 외팔보 자유단에서 유체와 접촉하는 면적과 관련된 항력계수이다.

3. 측정 결과 및 고찰

제안된 측정알고리즘을 검증하기 위해 상용화된 점도계와 저울을 사용하여 몇 가지 유체의 밀도와 점도를 측정하고, 개발한 측정장치를 통해 유체의 밀도와 점도를 동시 측정하여 비교하였다. 아래의 그림 2, 3 는 물, 글리세린, 아세톤, 점도표준액(50cp)의 점도와 밀도를 측정한 결과를 나타낸 것이다.

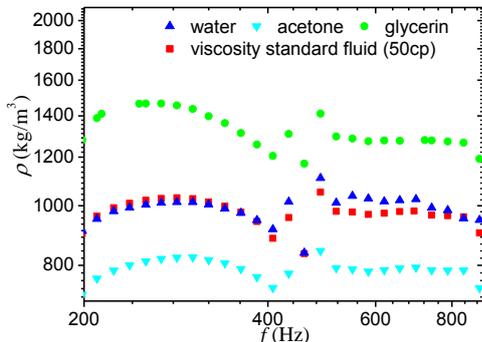


그림 2. 유체 밀도 측정결과

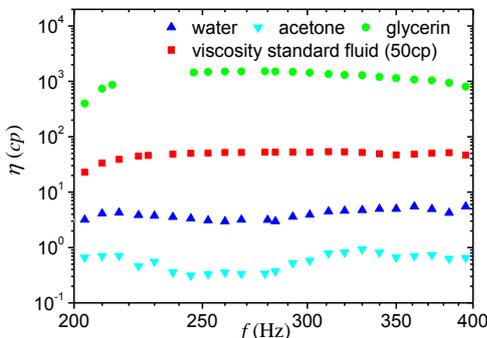


그림 3. 유체 점도 측정결과

그림 4 는 제작한 측정장치를 통해 각 주파수 별로 측정된 유체의 밀도와 점도를 평균을 구해 상용화된 저울과 점도계를 통해 측정된 값과 비

교한 것으로 기울기가 일정할수록 측정 알고리즘의 정확도가 검증되는 것이다.

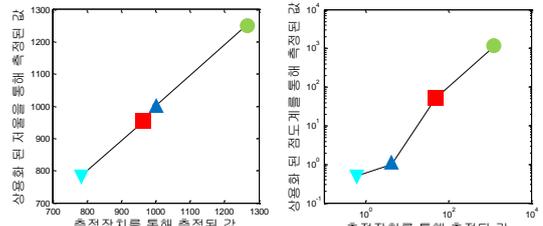


그림 4. 유체 측정된 밀도(좌), 점도(우)의 비교

4. 결론

본 연구에서는 막대 구조물을 이용한 유체의 유변물성(점도, 밀도)의 실시간 동시 측정알고리즘을 제안하였다.

유체에 담겨있는 외팔포에 진동이 발생할 경우, 구조물과 유체간에 상호작용을 하게 되는데, 이를 통해 유체의 점도와 밀도를 측정하는 것이 가능하다.

이 측정장치는 실시간으로 점도와 밀도의 동시 측정이 가능하며, 시중에서 쉽게 구할 수 있는 막대구조물을 센서로 사용하기 때문에 교체가 용이하여 접촉력이 강한 유체의 유변물성 측정 및 수용성 유체의 유변물성 측정도 가능함을 보였다.

후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) J. Park, "Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures", *Journal of Sound and Vibration* **288**, 57-79 (2005).
- (2) Wan Y. Shih, "Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers", *Journal of Applied Physics* **89**, 1497-1505 (2001)
- (3) L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics* (Pergamon, London, 1959), p.96.
- (4) R. Patois, "Near-field acoustic densimeter and viscosimeter", *Review of Scientific Instruments* **71**, 3860-3863 (2000)
- (5) Isabelle Etchart, "Mems sensors for density-viscosity sensing in a low-flow microfluidic environment", *Sensors and Actuators A* **141**, 266-275 (2008)