

〈 논문 〉

음향 가진을 이용한 매달려 있는 액적의 형상 진동 모드에 관한 실험적 연구

강병하[†] · 문종훈* · 김호영**

(2005년 12월 19일 접수, 2006년 4월 25일 심사완료)

An Experimental Study on Shape Oscillation Mode of a Pendant Droplet by an Acoustic Wave

Byung Ha Kang, Jong Hoon Moon and Ho-Young Kim

Key Words: Acoustic Resonance(음향공진), Oscillation(진동), Pendant Droplet(액적), Shape Oscillation Mode(형상진동모드)

Abstract

One of the fascinating prospects is the possibility of new hydrodynamics technology on micro-scale system since oscillations of micro-droplets are of practical and scientific importance. It has been widely conceived that the lowest oscillation mode of a pendant droplet is the longitudinal vibration, i.e. periodic elongation and contraction along the longitudinal direction. Nonlinear and forced oscillations of supported viscous droplet were focused in the present study. The droplet has a free contact line with solid plate and inviscid fluid. Natural frequencies of a pendant droplet have been investigated experimentally by imposing the acoustic wave while the frequency is being increased at a fixed amplitude. It is found that a pendant droplet shows the resonant behaviors at each mode similar to the theoretical analysis. The rotation of the droplet about the longitudinal axis is the oscillation mode of the lowest resonance frequency. This rotational mode can be invoked by periodic acoustic forcing and is analogous to the pendulum rotation. It is also found that the natural frequency of a pendant droplet is independent of the drop density and surface tension but inversely proportional to the square root of the droplet size.

기호설명

<p>d : 평판과의 접촉원 지름[mm]</p> <p>D : 평판접촉시 액적의 최대지름[mm]</p> <p>g : 중력가속도[m/s²]</p> <p>n : 형상고유진동수[N/mm]</p>	<p>r : 접촉원의 반지름[mm]</p> <p>R : 액적의 최대반지름[mm]</p> <p>V : 전압</p> <p>ω : 고유진동수[rad/s]</p> <p>θ : 접촉각[°]</p> <p>ρ : 밀도[kg/mm]</p> <p>σ : 표면장력[N/mm]</p>
---	--

† 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : bhkang@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4681 Fax : (02)910-4839

* 국민대학교 대학원

** 회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

1. 서론

현대 과학 기술의 초점은 더 이상 매크로적인

관점이 아닌 마이크로, 더 나아가 나노의 영역으로의 발전을 모색하고 있다. 특히, 바이오, 에너지, 그리고 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 같은 차세대 응용기술 분야에서는 더욱 그런 시도가 전 세계의 여러 연구진에 의해 진행 중에 있다. 이러한 시점에서 마이크로 액적에 관한 연구는 그 응용영역과 과학적인 중요도 면에서 가장 기초적인 초석에 해당되지만, 아직까지도 마이크로 액적에 대해 명확히 정형화된 기술이 정립되지 못한 상태이다.

마이크로 액적에 대한 연구는 특히 전자장비의 소형화 및 다기능화로 내부 발열 문제 해결을 위한 새로운 냉각 기술의 필요, 액적 분사 제어 기술을 통한 새로운 연소시스템의 개발을 실현시켜 줌으로써 많은 관심을 불러일으키고 있다. 그리고 화학 반응 원자로 내부에서의 액적은 반응물과 생성물질의 운반체 역할을 수행한다. 내부 연소 제트 엔진은 연료 분사 시에 미립화된 액화 탄화수소를 스프레이 방식을 사용하여 연소실에 공급한다. 이러한 시스템의 내부에서 가장 중요한 물리적 현상은 유체의 유동에 동반되는 열과 물질 전달 형태이다.⁽¹⁾

이중 유체(예를 들어 공기)에 둘러싸여 진동하는 액적의 운동에 관한 연구는 Kelvin⁽²⁾과 Rayleigh⁽³⁾에 의하여 시작되었다. 그 이후, Lamb⁽⁴⁾은 Rayleigh⁽³⁾의 연구를 더욱 전개시켜 낮은 진폭 영역에서의 고유진동수 방정식을 다음과 같이 수립하였다.

$$w_n^2 = n(n-1)(n+2) \frac{\sigma}{\rho R^3} \quad (1)$$

여기서 w_n [rad/s]은 n차 모드의 정상진동에 해당하는 고유진동수, R은 액적의 반지름, σ 는 두 유체 사이의 표면 장력, ρ 는 액적의 밀도를 의미한다.

Strani and Sabetta⁽⁵⁾는 Fig. 1(a)와 같은 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하는 비점성 액적의 미소 진폭의 진동을 해석하였다. 이들은 자유액적의 경우 1차 진동 모드에 해당하는 정상 진동이 존재하지 않으나, 고체면과 접촉한 액적의 경우 1차 모드의 정상 진동이 존재하며 이때의 진동은 자유액적의 2차 모드 진동과 유사한 형상을 가진다는 것을 밝혔다. 또한 다음과 같이 정의된

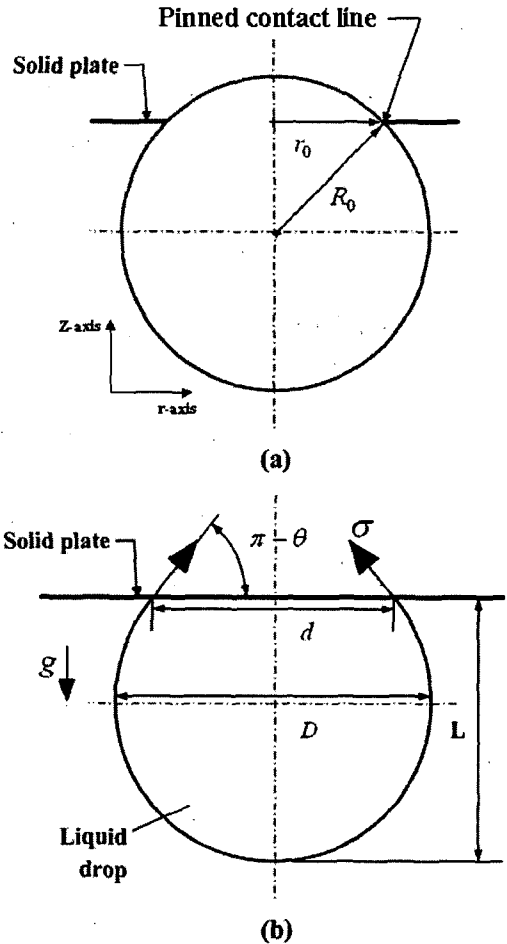


Fig. 1 Configuration of a liquid droplet placed on (a) a spherical bowl and (b) a flat surface

n차 정상 진동의 무차원 고유진동수 (w_n^*)가 접촉원의 반지름 r_0 와 액적의 반지름 R의 비의 함수만으로 표현됨을 보였다.

$$w_n^* = \frac{w_n}{(\sigma/\rho R^3)^{1/2}} = f\left(\frac{r_0}{R}\right) \quad (2)$$

본 연구의 대상인 Fig. 1(b)와 같은 평판에 매달린 비선형 액적의 진동은 선행 연구의 대상이 된 Fig. 1(a)와 같은 액적과 달리 접촉선(contact line)이 자유롭게 움직일 수 있는 접촉상태를 갖고 있다.^(6,7) 이는 실제 시스템의 응용 및 적용에

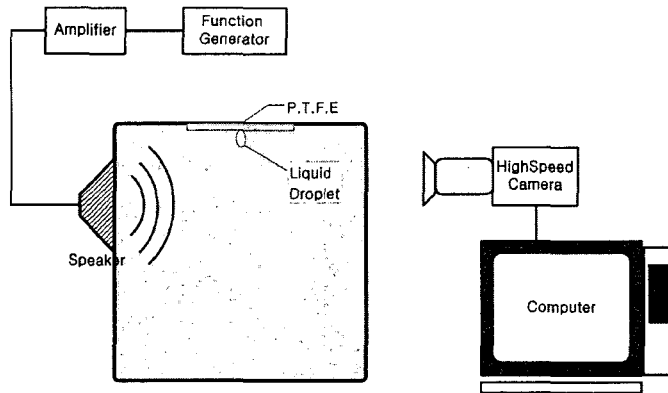


Fig. 2 Experimental apparatus for test set-up

서 매우 중요한 부분이다. 그럼에도 불구하고 이러한 경계조건을 가진 비선형 액적에 대한 연구는 수학적 어려움과 접촉선에서의 경계조건 설정의 모호함 등으로 이론적 해석이 시도된 바가 없을 뿐만 아니라 실험적 연구 성과 또한 전무한 실정이다. 본 연구에서는 액적과 평판의 접촉선이 움직이는 조건으로 액적이 매달려 있는 상태에서 형상진동모드를 규명하고, 각각의 형상진동 모드에서 고유주파수가 존재함을 규명하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 2에 도시되어 있다. 본 실험은 음향파를 이용한 액적의 진동 실험과 충격파를 이용한 액적의 거동 분석 실험으로 나뉘어 수행되어졌다. 음향파를 이용한 액적의 진동 실험은 액적의 공진 주파수를 찾기 위한 목적을 가지고 있다. 액적 시험 부는 투명 아크릴 상자를 이용하여 밀폐 공간을 채택하였다. 외장은 각 모서리의 길이가 300 mm인 정육면체의 투명 아크릴판으로 제작 하였다.

Fig. 2에서 같이 아크릴 상자 내부의 천장에 매달려 있는 액적에 일정한 주파수의 음향파를 수평방향으로 가하기 위하여 증력 방향과 수직하게 스피커를 위치시켰다. 이를 구동하기 위하여 임의 파형 발생기(Tektronix AFG-310)와 증폭기(Inkel AX-5090G)를 사용하였다. 이 때 스피커에 입력되는 전압과 주파수는 임의 파형 발생기에서

제어 한다. 액적이 매달릴 천장 부분에는 PTFE (Poly Tetra Fluoro Ethylene) 필름을 붙여서 액적과 고체 평면과의 접촉각을 높게 설계하였다. 이는 활발한 액적의 진동을 관찰하기 위함이다. 원하는 부피의 액적을 생성시키기 위하여 마이크로 시린지를 사용하였다. 액적의 움직임을 세밀히 관찰하기 위하여 고속 카메라 시스템(Photron FASTCAM super 1K)을 채택하였다. 실험 시에 스피커를 통하여 발생하는 진동은 순수하게 음향만을 전달하기 위하여 실험 장치들 체결 사이에는 제진 재료를 사용하여 진동이 전달되지 않도록 하였다.

실험에 사용된 용액은 증류수이며 부피는 7 μ l이다. 임의 파형 발생기에서 발생하는 신호는 7 V의 전압으로 고정시켰으며, 주파수 범위는 0 Hz에서 100 Hz의 대역폭 내에서 조절되어졌다. 액적과 PTFE사이의 평형 접촉각 (equilibrium contact angle)은 115°로 측정되었다. 액적과 스피커 사이의 거리는 5 cm이다. 액적의 진동 형상을 통하여 공진 주파수를 찾아내기 위하여 고속 카메라를 사용하고 초당 1000 프레임의 속도로 액적의 움직임을 녹화하였다.

본 연구에서는 주파수 변화에 따른 액적의 진동 형상 변화를 관찰하기 위하여 다음과 같은 실험과정을 수행하였다. (1) 마이크로 시린지를 이용하여 아크릴 상자 내부의 천장에 액적을 생성시킨다. (2) 임의 파형발생기의 전압은 7 V로 고정시키고, 정현파 신호의 주파수를 0 Hz에 맞추어 놓는다. (3) 주파수를 높여가면서 액적의 진동 형상을 고속 카메라로 녹화하여 액적의 진동을

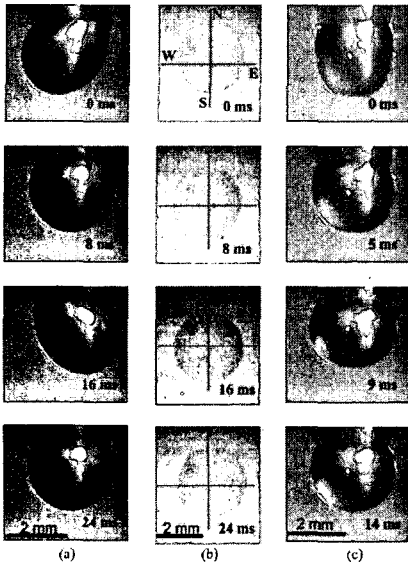


Fig. 3 Images of the resonant oscillations of a pendant droplet (a) and (b): the rotational-mode oscillation, under the acoustic forcing of 30 Hz, viewed along the r-axis and z-axis, respectively (c): Longitudinal oscillation under the acoustic forcing of 58 Hz

분석한다. (4) 액적의 공진 주파수를 분석한다. (5) 액적에 임펄스를 가하여 액적의 거동을 관찰하고 그 움직임을 고속 카메라를 이용하여 녹화한다. (6) 임펄스에 의한 움직임을 관찰하고 FFT를 이용하여 액적의 고유 진동수를 찾아낸다. (7) 실험 데이터를 기존의 이론식을 통하여 구한 값들과 비교 분석한다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 액적의 기본적인 진동 형상 모드에서 각각의 공진 주파수가 존재함을 확인하고 이를 기존의 연구 결과와 비교 분석하기 위해 수행되어 졌다.

Fig. 3은 고체 면에 매달려 있는 액적에 수평 방향으로 음향파를 가했을 때, 액적의 진동 형태를 시간 순서로 편집한 사진이다. Fig. 3(a)는 상대적으로 낮은 주파수 대역 0 Hz에서 40 Hz 중

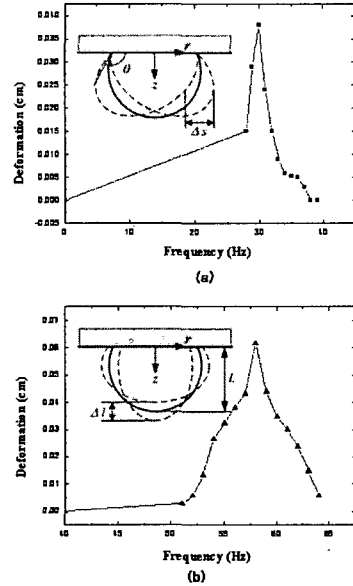


Fig. 4 Oscillation deformation of a pendant droplet under acoustic forcing. (a) The rotational amplitude vs. frequency. (b) The longitudinal amplitude vs. frequency

카메라를 측면에 두고 관찰하였을 때, 가장 큰 진폭 변위를 보인 액적의 사진이다. Fig. 3(b)는 그 때 카메라의 위치를 아크릴 상자의 아래 부분에 위치시켜 천장을 바라보며 찍은 사진이다. 보이는 바와 같이 액적은 z축을 중심으로 회전을 하고 있는 것을 알 수 있다. (c)는 상대적으로 높은 영역 50 Hz에서 80 Hz 중에서 가장 큰 변위를 보인 주파수에서의 액적의 거동이다. 이 때, 액적은 위 아래로 수축 팽창을 반복하는 진동 형태를 보여주고 있다.

자유 액적의 형상 진동 모드에 따른 액적의 진동 모양을 나타낸 참고 그림에 따르면,⁽⁵⁾ Fig. 3(c)에 보인 50 Hz에서 80 Hz 범위에서 발생한 액적의 상하 진동 형태는 2차 모드의 형상과 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 액적의 회전 진동 형태는 자유 액적의 진동 모드의 그림과 일치하는 것을 찾아 볼 수는 없었다.

고체 평판에 매달려 있는 액적의 진동 과정을 좀더 세밀히 분석하고자 고속카메라를 이용하여 얻은 변위 측정값을 통하여 액적의 변형 정도를

분석하여 보았다. 주파수 대역마다 액적의 진동 형태가 다르므로, 임의의 기준을 설정하여 분석을 진행하였다. 상대적으로 낮은 영역 주파수에서는 액적의 좌우 최대 이동거리를, 상대적으로

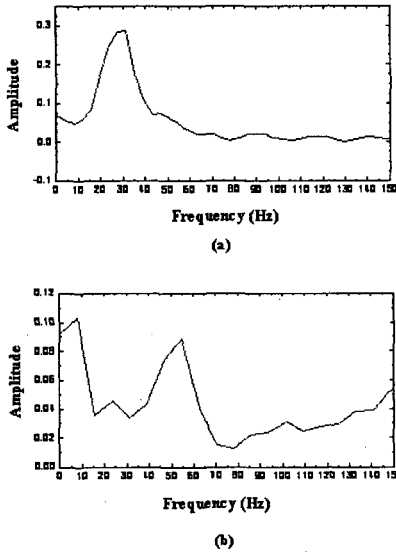


Fig. 5 Oscillation amplitude of a pendant droplet under impulsive force. (a) Horizontal direction. (b) Vertical direction

높은 영역에서는 액적의 상하 최대 이동거리를 기준으로 삼았다. Fig. 4에는 임의의 기준을 가지고 분석한 각각의 진동 형태에 따른 액적의 변형 진폭을 주파수 변화에 따라 도시하였다. Fig. 4(a)는 상대적으로 낮은 주파수에서의 액적의 변형 정도를 나타내고 있다. 최대의 변형 진폭을 보인 30 Hz 근처에서 급격한 액적의 변형이 일어나다가 그 범위를 넘어서는 점차 그 변형 정도가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그리고 임계점을 많이 벗어난 부근에서는 큰 변형이 일어나지 않고 있다. Fig. 4(b)에서는 50 Hz에서 변형을 나타나기 시작하며, 다시 급격한 변형을 보이고 있다. 최대 변형을 보인 56 Hz 이후에서는 변형이 줄어들고 있다.

음향가진 실험을 통하여 액적의 변형이 주파수에 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있고, 이번 실험이 수행되어진 조건 하에서 고체와 접촉하고 있는 액적은 두가지 형태의 형상 진동모드를 가지고 있다. 각각의 모드에서는 30 Hz와 56 Hz에서 최대 변형을 일으키는 주파수가 존재하였다. 또한 기존의 연구 결과에서는 소개되지 않았던 액적의 회전 진동 모드가 존재함을 음향 가진 실험을 통하여 발견하였다.

최대 변형이 일어난 주파수가 액적의 고유 주파수 인지를 규명하기 위하여 충격파 실험을 실

Table 1 Resonance frequency of a liquid droplet from experimental and theoretical analysis

	Rotation mode	n=2	n=3
Frequency at Max. deformation of droplet by acoustic wave	30 Hz	56 Hz	
Frequency of droplet by impulse	32 Hz	55 Hz	
Constrained droplet (Strani and Sabetta) ⁽⁵⁾		52 Hz	127 Hz
Free droplet (Lamb) ⁽⁴⁾		80 Hz	155 Hz

시하였다. 이 실험은 기존의 연구에서 소개되어진 화이트 노이즈 방법을 채택하였다.⁽⁷⁾ 화이트 노이즈 방법은 액적에 순간적인 충격을 가함으로써 발생하는 액적의 움직임을 분석하여 그 거동을 지배하는 주파수를 찾아내는 고유 주파수 분석법이다. 그러나 액적의 회전 모드에 해당하는 임펄스를 구현하지 못하므로 2차원적으로 좌우 스윙의 형태로 가정하여 측면 충격파를 주었다. 축방향 진동 모드는 수직 방향으로 충격파를 주는 경우와 비교하였다.

각각의 충격파 방향에 따른 액적의 순간 거동을 고속 카메라를 이용하여 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 본 그림은 액적의 순간 거동 변위값들을 FFT(Fast Fourier Transform)분석법을 통하여 액적 움직임에 대한 지배 주파수 값들을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 보면, 다른 주파수에 비해 약 30 Hz 주위의 주파수들이 액적의 움직임을 지배하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서는 두 부분에서 최대 진폭을 보여주고 있지만, 음향 공진 주파수 값과 비교하기 위하여 두 번째 최대 점을 보면, 약 55 Hz 근처의 주파수들이 액적의 상하 움직임을 지배하고 있음을 알 수 있다. 그 결과 화이트 노이즈 방법을 통해 얻은 액적의 고유 진동수는 각각 32 Hz와 55 Hz 임을 알아냈고, 이 수치는 음향가진 실험을 통해 최대 변형이 일어난 주파수와 거의 같음을 알 수 있다. 따라서, 음파를 이용하여 액적의 고유 주파수에 해당하는 영역에서 가진하면 액적의 진동 모드 변위가 최대로 일어나며, 이는 공진 현상의 결과임을 알 수 있다.

기존의 연구 결과^(4,5)에서 얻어진 식 (1)과 식

(2)에 본 실험의 조건들을 대입하여 그 값들을 실험 결과 값과 비교해 보았다. 식 (1)과 식 (2)는 비점성 액적의 단순 진동에 대한 고유 주파수 예측식이다. Table 1은 본 연구에서 얻은 고체 면과 접하고 있는 액적의 공진 주파수 값, 화이트 노이즈 방법에 의한 액적의 고유 주파수, 그리고 이론식에 의한 액적의 고유 주파수 값을 보여주고 있다. 먼저 기체에 둘러싸인 자유액적의 진동의 경우 식 (1)에 의하여 2차 진동 모드의 고유진동수는 80.16 Hz, 3차 진동 모드의 경우 155.23 Hz 임을 알 수 있다. 여기서 주의할 것은, 자유액적의 2(3)차 진동 모드와, 고체면과 접촉한 액적의 1(2)차 진동 모드는 매우 유사한 형태를 가지고 있다. Strani and Sabetta⁽⁵⁾는 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하여 진동하는 액적의 모드(mode) 수에 따른 고유 진동수를 r_0/R 의 함수로 나타내었다. 형상에 대하여 r_0 와 R 에 해당하는 값을 구하여 이에 해당하는 고유진동수를 구하여 보았다. 그 결과 1차 진동 모드의 고유진동수는 52 Hz, 2차 진동 모드의 고유진동수는 127 Hz로 구해졌다. 2차 모드에 해당하는 경우는 Lamb⁽⁴⁾의 자유 액적의 고유 주파수 식의 값을 제외하고는 비슷한 값들임을 확인 할 수 있다.

그러나 본 연구에서 새롭게 발견한 가장 낮은 영역에서의 회전 진동 모드는 기존의 이론식에는 적용할 수 없는 조건의 형태이므로 이론값과 비교 할 수 없었다. 본 실험에서 구한 일차 공진주파수와 비교하면 Strani and Sabetta⁽⁵⁾의 연구결과가 더 낮은 주파수를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 액적이 접촉하는 고체 면에서 이들이 매우 다른 경계조건을 가지기 때문이며, 또한 실

Table 2 Physics properties of three liquids at 20 °C

	Density (kg/m ³)	Surface Tension (N/m)	Viscosity (mPa · s)
Water	998	0.073	0.890
Water 95% + Methanol 5%	997	0.063	0.941
Water 90% + Methanol 10%	995	0.059	1.051

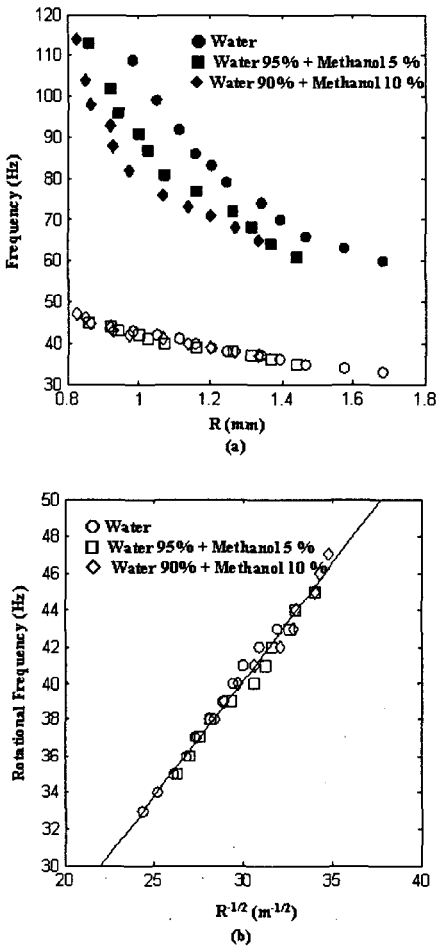


Fig. 6 Resonance frequency of a pedant droplet by a variation of radius. (a) Different sizes of droplets of the three different liquids. (b) Rotational resonance frequency by $R^{1/2}$; Solid symbol is longitudinal oscillation and Blank symbol is rotational oscillation

제 액적의 운동에서 점성의 영향을 무시 할 수 없기 때문에 보인다.⁽⁶⁾ 이론식의 값들이 본 실험을 통해 얻은 값들과 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 이번 실험의 조건하에서 액적의 공진 주파수는 약 30 Hz 와 56 Hz 임을 알 수 있다.

회전 모드의 물리적 분석을 위하여 다른 세가지 물질의 부피 변화에 따른 공진 주파수를 측정하였다. 세가지 물질에 대한 물성치는 Table 2에

나타내었다. Fig. 6은 R로 표현되는 액적의 크기에 따른 측정된 공진 주파수 변화를 보여 주고 있다. 평형 반지름 $R = L/(1 - \cos\theta)$ 로 구해 질 수 있으며, L은 액적의 축방향 길이, θ 는 접촉각을 의미한다.

Fig. 6에서 실험 데이터 중 검정색 표시는 축방향 진동모드, 흰색 표시는 회전진동모드의 결과를 나타낸다. 여러 유체들을 사용하여 얻은 공진 주파수를 분석해 보면, 축방향 진동모드의 공진 주파수는 액적의 형태에 상당히 크게 좌우되는데 반해, 회전 진동모드에서의 공진 주파수는 식별하기 어렵다. 실험 데이터를 분석해보면, 매달려 있는 액적의 회전 진동 모드 공진 주파수는 자유 액적의 경우에 해당하는 $R^{-3/2}$ 보다 $R^{-1/2}$ 에 비례한다. 반면에, 축방향 공진 주파수는 Fig. 6(a)에서 보듯이, $R^{-3/2}$ 에 비례하는 것처럼 보인다. Fig. 6 (b)는 가장 낮은 영역의 진동 모드(회전모드)의 경향을 보여주고 있다. 이러한 실험 결과의 관찰은 회전 진동모드는 액적의 물성치에 독립적인 경향을 보여 주고 있다. 각 주파수 ω 는 관성력 ($\sim \rho R^2 \omega^2$)과 모세관 힘($\sim \sigma/R$)의 균형에 의하여 주어진다. 여기서 ρ 와 σ 는 각각 액적의 밀도와 표면 장력을 의미한다. ($\omega \sim (\sigma/\rho R^3)^{1/2}$). Fig. 3(b) 액적의 사진은 회전하는 동안 액적의 표면적이 변화하고 있으며 이는 표면장력의 역할이 미미함을 알 수 있다. 구심력($\sim \rho R^4 \omega^2$)과 중력에 의하여 작용하는 힘($\sim \rho R^3 g$)의 균형에 의하여 $\omega \sim (g/R)^{1/2}$ 임을 알 수 있고, 이는 실험값과 일치하고 있다.

ω 와 R 사이의 실험적으로 발견된 관계는 회전하는 진자의 경우, 구심력 $mr\omega^2$ 이다. 중력 $mg \tan\phi$, m은 진자의 질량. 작은 ϕ 의 경우, $\tan\phi \approx r/R$, 우리는 $\omega = (g/R)^{1/2}$ 를 얻는다. 이것은 액적의 회전 공진 주파수와 일치함을 보여주는 흥미로운 결과이다.

위에서 볼 수 있듯이 Strani and Sabetta⁽⁵⁾의 해석으로서는 본 연구에서 행한 실험과 같은 조건의 액적 진동의 공진주파수를 정확히 예측하기는 매우 힘들다. 그러나 자유액적의 진동주파수와 비교해 볼 때 이들의 해석이 실험값에 훨씬 더 근접하는 결과를 예측함을 볼 수 있다. 그러므로

본 실험의 액적 진동과 같은 복잡한 운동을 예측할 수 있는 해석적 방법이 아직 시도되지 않은 시점에서, 향후 다양한 액적의 크기, 물성치 등을 이용한 실험에 대해 유용한 근사치를 얻기 위해서는 Strani and Sabetta⁽⁵⁾의 해석결과를 이용할 수 있다. 물론 액적의 운동 조건을 더욱 자유롭게 함으로써 다양한 형태의 형상 진동을 관찰하여 액적에 관한 연구에 무한한 가능성을 부여하는 것이 좋을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 매달려 있는 액적에 다양한 주파수의 음향 가진을 주었을 때, 액적의 동적특성을 관찰 하였다. 상대적으로 낮은 주파수 영역에서는 회전 진동 모드, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 축방향 상하 진동 모드가 존재함을 확인하였다. 또한 기존의 연구 결과에서는 찾아볼 수 없었던 가장 낮은 영역의 진동모드로 회전 진동이 존재함을 발견하였다. 상대적으로 낮은 주파수 영역에서는 30 Hz에서 액적의 회전 진동을 통한 공진 현상이 발생하였고, 상대적으로 높은 영역에서는 55 Hz에서 상하 축방향 진동을 통한 공진 현상이 발생하였다. 각각의 진동모두에서 액적의 최대 진폭이 나타난 공진주파수는 화이트 노이즈 방법에 의하여 구한 액적의 고유 진동수와 일치 하였다. 그리고 실험을 통하여 얻은 액적의 고유 진동수는 기존의 이론식을 통하여 얻은 액적의 고유 진동수 값과 거의 일치하였다.

혼합물을 가지고 액적의 크기에 따른 고유 진동수 변화를 분석해 본 결과, 비점성 회전 모드

에 대한 공진 주파수는 액체의 물성치에 영향을 받지 않음에 반해, 액적 반지름의 제곱근에 반비례하였다. 액적의 접촉선이 고체면 위에서 자유롭게 운동하는 현상에 대한 이론적 해석은 아직 수행된 바 없으며, 본 실험이 이러한 현상을 규명하기 위한 시도를 위해 유용한 초기 결과를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초연구 (과제번호 R01-2003-000-10132-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Sadhal, S. S., 1996, *Transport Phenomena with Drops and Bubbles*, Springer, New York, pp. 1~4.
- (2) Kelvin, 1890, *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 3, Clay, p. 384.
- (3) Rayleigh, 1894, *The Theory of Sound*, Macmillan.
- (4) Lamb, H., 1932, *Hydrodynamics*, Cambridge Univ. Press, New York, p. 475.
- (5) Strani, M. and Sabetta, F., 1984, "Free Vibration of a Drop in Partial Contact with a Solid Support," *Int. J. Fluid Mech.*, Vol. 141, p. 1181.
- (6) DePaoli, D. W., Feng, J. Q., Basaran, O. A. and Scott, T. C., "Hysteresis in Forced Oscillations of Pendant Droplet," *Phys. Fluids*, Vol, 7, p. 1181.
- (7) Kim, H.-Y., "Drop Fall-off from the Vibrating Ceiling," *Phys. Fluids*, Vol, 16, p. 474.