

음파가 가해진 액적의 진동에 관한 동적 특성

문종훈* · 김호영** · 강병하†

Hydrodynamic characteristics of a pendant drop by acoustic wave

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

Abstract

Dynamic oscillation motion of a pendant drop has been investigated experimentally when acoustic wave is applied. This problem is of particular interest in the understanding of transport phenomena, accompanied by liquid drop. In this experiment, pendant drop was made to oscillate by inducing the acoustic wave and the subsequent drop motion was recorded by a high-speed camera. The results obtained indicate that liquid drop hanging on the flat surface has resonant frequencies on each shape oscillation modes. It is also found that exists the swing mode of oscillation on the pendant drop.

Key Words : Resonant frequency(공진주파수), Acoustic wave(음향파), Pendant drop(액적), Oscillation(진동)

1. 서론

액적은 자연 생태계뿐만 아니라 인간이 만들어 놓은 다양한 시스템 내부에서 중요한 역할로서 존재하고 있다. 예를 들어, 화학반응 원자로 내부에서의 액적은 반응물과 생성물질의 운반체 역할을 수행한다. 내부연소 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 전달이다. 그러므로 액적의 거동에 대한 연구는 응용 기술 및 과학의 미래에 대한 중요한 단서들을 제공한다.⁽¹⁾

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

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

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

Strani와 Sabetta⁽⁵⁾는 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하는 비점성 액적의 미소 진폭의 진동을 해석하였다. 이들은 자유액적의 경우 1차 진동 모드에 해당하는 형상 진동이 존재하지 않으나, 고체면과 접촉한 액적의 경우

† 책임저자, 국민대학교 기계·자동차 공학부
E-mail : bhkang@kookmin.ac.kr

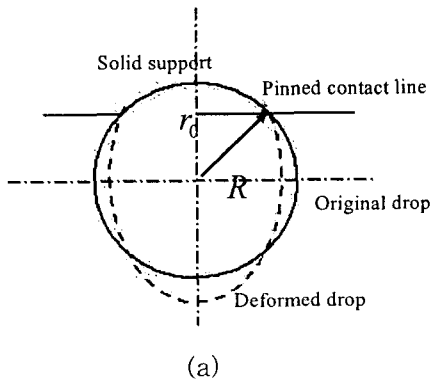
* 국민대학교 대학원

** 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

1차 모드의 형상 진동이 존재하며 이때의 진동은 자유액적의 2차 모드 진동과 유사한 형상을 가진다는 것을 밝혔다. 또한 다음과 같이 정의된 n차 형상 진동의 무차원 고유진동수(w_n^*)가 그림 Fig. 1(a)에 도시된 r_0 와 R의 비의 함수만으로 표현됨을 보였다.

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

그러나 본 연구의 대상인 Fig. 1(b)와 같은 평판에 매달린 액적의 진동은 선행 연구의 대상이 된 액적과 달리 접촉선(contact line)이 자유롭게 움직일 수 있는 경계조건을 가지고 있다. 이는 실제 응용에 대한 적용에 있어 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 경계조건을 가진 액적에 대한 연구는 수학적 어려움과 접촉선에서의 경계조건 설정의 모호함 등으로 이론적 해석이 시도된 바가 없을 뿐만 아니라 실험적 연구 성과 또한 전무한 실정이다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 주파수 영역 마다 형상 진동 모드에 따른 각기 다른 공진주파수가 존재하는 특징이 접촉선이 움직일 수 있는 조건의 액적 진동에서도 존재하는지를 실험에 의해 규명하고자 하였다.



2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 2에 도시되어 있다. 액적에 일정한 주파수의 음향파를 수평방향으로 가하기 위하여 중력 방향과 수직하게 스피커를 위치시켰다. 이를 구동하기 위하여 임의 파형 발생기(Tektronix AFG-310)와 증폭기(Inkel AX-5090G)를 사용하였다. 이 때 스피커에 입력되는 전압은 7 V 로 고정시켰다. 외장은 각

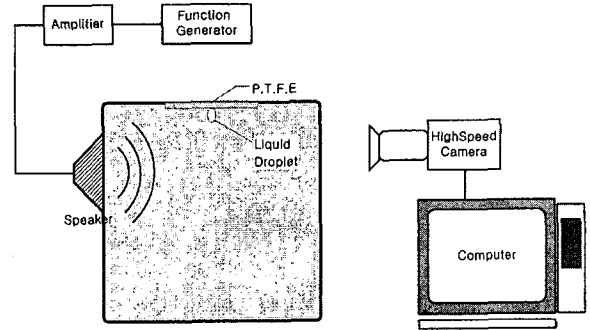


FIG. 2. Schematic diagram of experimental setup

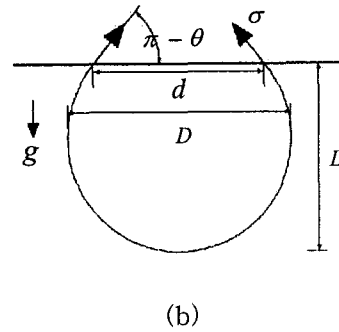
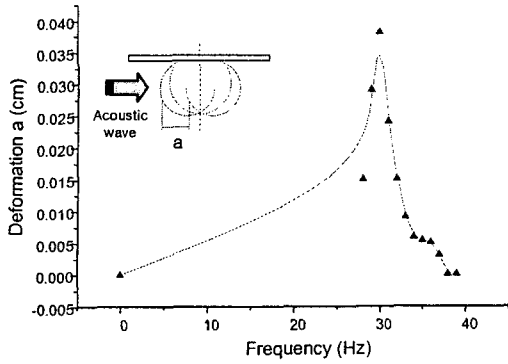


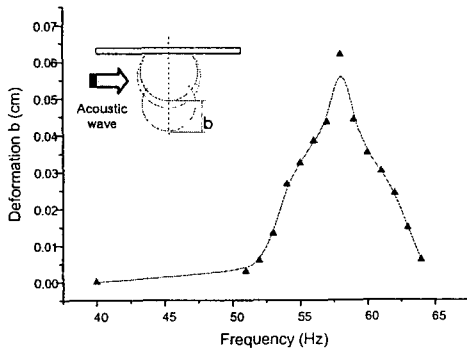
FIG. 1. Configurations of a liquid drop from (a) a spherical bowl and (b) a flat surface
모서리의 길이가 300 mm 인 정육면체의 투명 아크릴판으로 제작 하였다. 액적이 매달릴 천장 부분에는 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)를 붙여서 액적과 평면과의 접촉각을 높게 설계하였다. 실험용 액체로는 증류수를 사용하였으며, 원하는 부피의 액적을 생성시키기 위하여 마이크로 시린지를 사용하였다.

실험에 사용된 액적의 부피는 $7 \mu\text{l}$ 이며, 증류수 액적과 PTFE사이의 평형 접촉각 (equilibrium contact angle)은 115° 로 측정되었다. 액적의 진동 형상을 분석하기 위하여 고속 카메라(Photron FASTCAM super 1K)를 사용하여 초당 1000프레임의 속도로 이미지를 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 7V로 고정시키고, 정현파 신호의 주파수를 0 Hz에 맞추어 놓는다. (3) 주파수를 높여가면서 액적의 진동 형상을 고속 카메라로 녹화하여 액적의 진동을 분석한다.



(a)

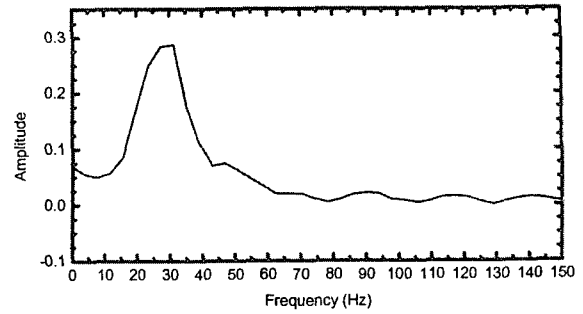


(b)

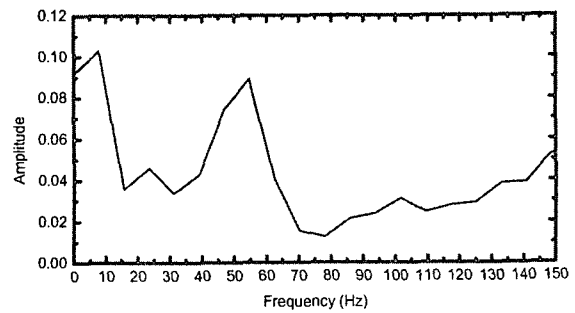
FIG. 3. Deformation of pendant drop according to the variation of the frequency

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 고체 면에 매달려 있는 액적의 주파수 변화에 따른 액적의 수평방향 변형 정도(a), 수직방향 변형 정도(b)를 나타낸 것이다. 액적은 두 개의 주파수 영역에서 서로 다른 진동 형태를 보여주고 있으며, 상대적으로 낮은 주파수 영역에서는 Fig. 3(a)와 같이 좌우 스윙, 상대적으로 높은 주파수 영역인 Fig. 3(b)에서는 상하 진동을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 고체면에 매달린 액적은 100 Hz 이하의 범위에서 확연히 다른 두 가지 진동 모드가 존재함을 알 수 있다. 또한 상대적으로 낮은 영역(0~40 Hz)에서는 30 Hz, 높은 주파수 영역(40~70 Hz)에서는 58 Hz에서 가장 큰 변위를 가지는 변형이 일어나고 있다. 이러한 현상은 동적 시스템에 외부에서 가진 힘을 주었을 때, 시스템의 고유진동수와 가진주파수가 일치할 경우 시스템의 반응이 급격히 증가하는 공진(resonance) 현상과 밀접한 관련이 있다. 그리고 기존의 액적에 관한 실험이나 수치해석은 액적의 진동 형태를 선형대칭 구조라는 전제 조



(a)



(b)

FIG. 4. FFT result for drop oscillation due to impulsive force. (a) horizontal direction (b) vertical direction

건을 가지고 연구를 수행하였기에 지금과 같은 액적이 좌우로 스윙하는 형태의 형상 진동 모드를 찾아 내지 못했다. 그러므로 본 연구에서는 액적의 좌우 스윙 진동을 임의로 스윙모드라 지칭하였다.

고체면에 매달린 액적의 기초적인 진동 특성을 자세히 고찰하기 위하여 순간적으로 충격(impulse)을 주고 그에 따른 액적의 거동을 고속 카메라로 관찰하였다. 실험은 좌우 스윙을 위한 측면 충격과 상하 진동을 위한 중력 방향 충격 실험으로 나뉘어 수행되었다. 이 때 액적의 변위를 시간에 따라 측정하고 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform:FFT)을 수행하여 진동에 내재되어 있는 주파수를 찾았다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 측면 충격에서는 약 30 Hz, 중력방향 충격에서는 약 58 Hz의 주파수를 가진 성분이 지배적임을 알 수 있고 이 주파수대는 Fig. 3의 최대점 영역과 비슷함을 알 수 있다.

본 실험을 통하여 고체면에 매달린 액적의 공진주파수가 스윙 모드 진동에 대해서는 약 30 Hz 그리고 일차 진동 모드에 대해서는 약 58 Hz

임을 확인할 수 있었다. 이렇게 구한 주파수를 같은 크기를 가진 비점성 액적의 단순한 진동에 대해 예측된 고유주파수들과 비교해 보았다. 먼저 기체에 둘러싸인 자유액적의 진동의 경우 식 (1)에 의하여 이차 진동 모드의 고유진동수는 80.16 Hz, 삼차 진동 모드의 경우 155.23 Hz 임을 알 수 있다. 여기서 주의할 것은, 자유 액적의 이(삼)차 진동 모드와, 고체면과 접촉한 액적의 일(이)차 진동 모드는 매우 유사한 형태를 가지고 있다. Strani와 Sabetta⁽⁵⁾는 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하여 진동하는 액적의 모드(mode) 수에 따른 고유진동수를 r_0/R 의 함수로 나타내었다. 형상에 대하여 r_0 와 R 에 해당하는 값을 구하여 이에 해당하는 고유진동수를 구하여 보았다. 그 결과 일차 진동 모드의 고유진동수는 52 Hz, 이차 진동 모드의 고유진동수는 127 Hz로 구해졌다. 본 실험에서 구한 일차 공진주파수와 비교하면 Strani와 Sabetta의 연구결과가 더 낮은 주파수를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 액적이 접촉하는 고체면에서 이들이 매우 다른 경계조건을 가지기 때문이며, 또한 실제 액적의 운동에서 점선의 영향을 무시할 수 없기 때문으로 보여진다.⁽⁶⁾

위에서 볼 수 있듯이 Strani와 Sabetta의 해석으로서 본 연구에서 행한 실험과 같은 조건의 액적 진동의 공진주파수를 정확히 예측하기는 매우 힘들다. 그러나 자유액적의 진동주파수와 비교해 볼때 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 Strani와 Sabetta의 해석결과를 이용함은 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 주었을때, 액적의 동적특성을 관찰 하였다. 이러한 실험을 통하여 고체면에 매달려 있는 액적은 주파수 영역 마다 형상 진동 모드에 따른 각기 다른 공진주파수가 존재하며 더욱이 기존 연구에서는 찾아 볼 수 없었던 액적의 새로운 형상 진동 모드를 찾았다. 그러나 액적의 고유진동수는 액적의 크기, 고체면과의 접촉각, 밀도, 그리고 표면장력에 따라 달라질 것으로 예상된다. 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 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) S. S. Sathal, 1996, "Transport Phenomena with Drops and Bubbles", Springer, New York, pp. 1~4.
- 2) Kelvin, Lord, 1890, "Mathematical and Physical Papers", Vol. 3, Clay, p. 384.
- 3) Rayleigh, Lord, 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 vibrations of a drop in partial contact with a solid support", *J. Fluid Mech.*, Vol. 141, pp. 233~247.
- 6) Kim, H.Y., 2003, "Drop fall-off from the vibrating ceiling", *J. Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 2, pp. 474~477.