

# 가열된 평판위에 매달려 있는 액적의 음향공진에 의한 열 및 물질 전달 촉진에 관한 연구

문 중 훈, 강 병 하<sup>\*†</sup>

국민대학교 대학원,<sup>\*†</sup> 국민대학교 기계·자동차공학부

## Heat and Mass Transfer Enhancement of a pendant droplet on heated horizontal surface by acoustic resonance

Jong Hoon Moon, Byung Ha Kang<sup>\*†</sup>

**ABSTRACT:** 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. The evaporation was observed at atmosphere pressure. The droplet was recorded throughout the entire evaporation process and transient variations of the volume was measured. The evaporation process of oscillating droplet with thermofoil has been also observed to investigate analyzing the resonance effect on the thermal characteristics of droplet. It is found that a pendant droplet shows the resonant behaviors at each mode similar to the theoretical analysis. During imposing the acoustic wave, the pendant droplet makes a rotating motion in its longitudinal axis which is a new shape oscillation mode. The evaporation rate of a pendant droplet at resonant frequency is significantly enhanced.

**Key words:** Pendant droplet(평판에 매달려 있는 액적), Oscillation(진동), Evaporation(증발), Resonance(공진), Frequency(주파수)

기 호 설 명

$\omega$	: 고유진동수	[rad/s]
$n$	: 형상고유진동수	
$\sigma$	: 표면장력	[N/mm]
$R$	: 액적의 최대반지름	[mm]
$r$	: 접촉원의 반지름	[mm]
$\theta$	: 접촉각	[°]

$\rho$  : 밀도 [Kg/mm]

1. 서 론

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 여러 연구진에 의해 진행 중에 있다. 이러한 시점에서 마이크로 액적에 관한 연구는 그 응용영역과 과학적인 중요도 면에서 가장

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

기초적인 초석에 해당되지만, 아직까지도 마이크로 액적에 대해 명확히 정형화된 기술이 정립되지 못한 상태이다. 그러므로 마이크로 액적에 대한 연구는 특히 전자장비의 소형화 및 다기능화로 내부 발열문제 해결을 위한 새로운 냉각 기술의 필요, 액적 분사 제어 기술의 통한 새로운 연소시스템의 개발의 목적을 실현시켜줌으로써 많은 관심을 불러일으키고 있다. 이러한 시스템의 내부에서 가장 중요한 물리적 현상은 유체의 유동에 동반되는 열과 물질 전달 형태이다.<sup>(1)</sup> 우리는 이번 연구를 통하여 진동 모드에 따른 액적의 거동을 관찰하고, 진동 현상에서의 열 및 물질 전달 형태를 관찰하고자 한다.

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

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

여기서  $w_n$ [rad/s]은  $n$ 차 모드의 정상진동에 해당하는 고유진동수,  $R$ 은 액적의 반지름,  $\sigma$ 는 두 유체 사이의 표면 장력,  $\rho$ 는 액적의 밀도를 의미한다.

Strani and Sabetta<sup>(5)</sup>는 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  $n$ 차 정상 진동의 무차원 고유진동수( $w_n^*$ )가 접촉원의 반지름  $r_0$ 와 액적의 반지름  $R$ 의 비의 함수만으로 표현됨을 보였다.

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

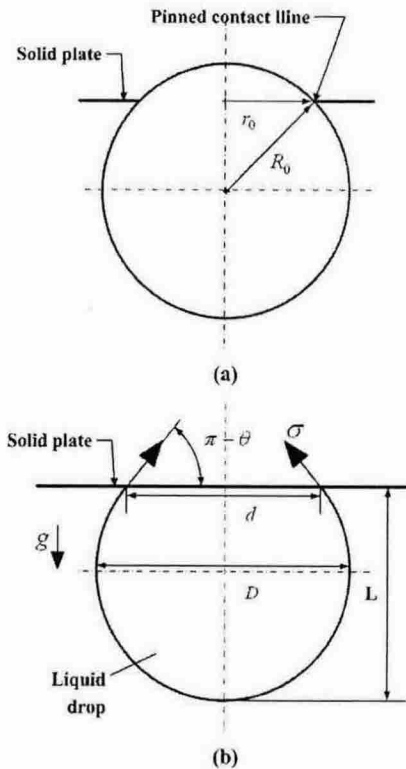


Fig. 1 Configuration of a liquid droplet placed on (a) a spherical bowl and (b) a flat surface.

또한, 작은 크기의 액적의 증발과 관련된 실험은 Wachters and Westerling<sup>(6)</sup>에 의하여 전개되었다. 그들의 실험은 가열된 금속 평판에 다양한 속도로 낙하하는 액적의 증발형태를 관찰하였다. Makino and Michiyoshi<sup>(7)</sup>는 다양한 금속표면위에서 놓여진 액적의 증발형태를 관찰하였다. 그 결과, 액적이 증발하는 동안 접촉각이 급속하게 줄어드는 시기에는 액적의 반지름은 상대적으로 일정함을 보였다.

본 연구의 대상인 Fig. 1 와 같은 평판에 매달린 액적의 진동은 선행 연구의 대상이 된 Fig. (a) 와 같은 액적과 달리 접촉선(contact line)이 자유롭게 움직일 수 있는 접촉상태를 갖고 있는 Fig. (b) 와 같은 형태를 갖는다. 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

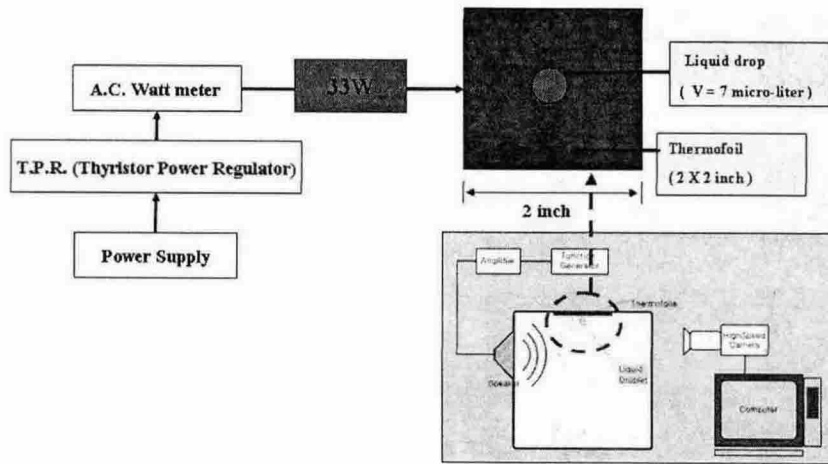


Fig. 2 Experimental apparatus for set-up

해석이 시도된 바가 없을 뿐만 아니라 실험적 연구 성과 또한 전무한 실정이다. 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. 그리고 액적의 진동이 액적의 열 및 물질 전달에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 2에 도시되어 있다. 먼저, 액적의 공진 주파수를 찾기 위한 실험으로 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 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. 액적의 증발을 유발하기 위하여 평판과 PTFE사이에 가열판 (Thermofoil 2×2 inch)을 부착하였다. 이를 구동시키기 위하여 Power Supply, T.P.R.(Thyristor Power

Regulator)와 A.C. Watt Meter를 연결한다.

실험에 사용된 액적의 부피는 7  $\mu$ l 이며, 증류수 액적과 PTFE사이의 평형 접촉각 (equilibrium contact angle)은 115° 로 측정되었다. 액적의 진동 형상과 액적의 증발과정을 분석하기 위하여 고속 카메라(Photron FASTCAM super 1K)를 사용하여 초당 1000 프레임의 속도로 이미지를 녹화하였다.

본 연구에서는 주파수 변화에 따른 액적의 진동 형상 변화를 관찰하고 이를 액적의 증발에 응용하기 위하여 다음과 같은 실험과정을 수행하였다. (1) 마이크로 시린지를 이용하여 아크릴 상자 내부의 천장에 액적을 생성시킨다. (2) 임의 파형 발생기의 전압은 7 V로 고정시키고, 정현파 신호의 주파수를 0 Hz에 맞추어 놓는다. (3) 주파수를 높여가면서 액적의 진동 형상을 고속 카메라로 녹화하여 액적의 진동을 분석한다. (4) 액적의 고유진동수를 분석한다. (5) 액적의 증발실험을 위한 파워시스템을 구축한다. (6) 가열판을 PTFE와 평판 사이에 부착하고, 액적을 생성시킨다. (6) 초기온도(20° C)까지 가열된 가열판을 가지고, 주파수를 바꿔가면서 액적의 증발 과정을 관찰한다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 음향파를 가했을 때에 고체 면에 매달려 있는 액적의 진동 형태를 찍은 사진이다. Fig. 3 (a) 는 상대적으로 낮은 주파수 대역 0

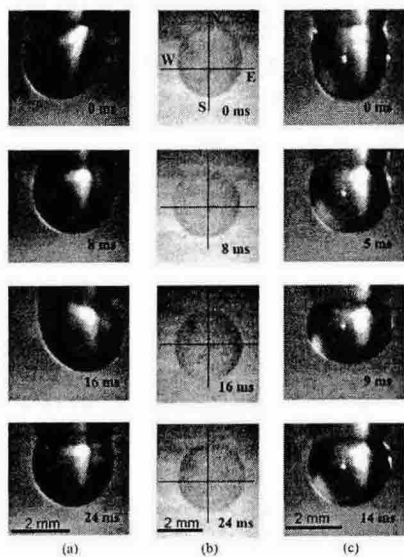


Fig. 3 Images of the resonant oscillations of a pendant droplet (a) and (b): the rotational-mode oscillation, under the acoustic forcing of 30 Hz, viewed along the r-axis and z-axis, respectively (c): Longitudinal oscillation under the acoustic forcing of 58 Hz

Hz 에서 40 Hz 중 가장 큰 변위를 보인 액적의 사진이다. (b)는 그 때 카메라의 위치를 아래에 위치시켜 위로 바라보며 찍은 사진이다. 보이는 바와 같이 액적은 z 축을 중심으로 회전을 하고 있는 것을 알 수 있다. (c)는 상대적으로 높은 영역 50 Hz 에서 80 Hz 중에서 가장 큰 변위를 보인 주파수에서의 액적의 거동이다. 이 때, 액적은 위 아래로 수축 팽창을 반복하는 진동 형태를 보여주고 있다. 고속카메라를 이용한 변위의 측정값을 통하여 액적의 변형 정도를 좀더 세밀하게 분석하여 보았다. 주파수 대역마다 그 변형 형태가 다르므로, 임의의 기준을 설정하여 분석을 진행하였다. 상대적으로 낮은 영역 주파수에서 액적의 좌우 최대 이동거리를, 상대적으로 높은 영역에서 액적의 상하 최대 이동거리를 기준으로 삼았다. Fig. 4 에서 보여지는 것처럼 각각의 영역마다 최대 변형을 일으키는 특정 주파수가 존재함을 확인 할 수 있었다. (a)는 상대적으로 낮은 주파수에서의 액적의 변형정도를 나타내고 있다. 30 Hz 근처에서 급격한 액적의 변형이 일어나다가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그리고 임

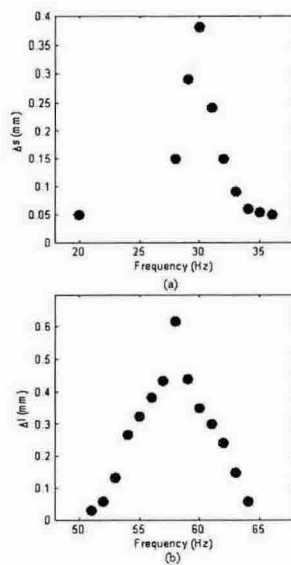


Fig. 4 Oscillation amplitude of a pendant droplet under acoustic forcing. (a) The rotational amplitude vs. frequency. (b) The longitudinal amplitude vs. frequency

계점을 많이 벗어난 부근에서는 큰 변형을 볼 수 없다. (b)에서는 50 Hz에서 최대 변형을 나타내고 다시 급격한 변형을 보이고 58 Hz에서 변형이 줄어들고 있다. 이를 통해 우리는 음향가진을 가했을 시에 액적의 변형이 주파수에 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있고, 30 Hz 와 58 Hz 에서 최대 변형을 나타내었다. 최대 변형이 나타난 주파수가 액적의 고유 진동수 인지를 규명하기 위하여 화이트 노이즈 실험을 실시하였다. 그 결과 화이트 노이즈 방법을 통해 얻은 액적의 고유 진동수는 각각 32 Hz 와 55 Hz 임을 알아냈고, 이 수치는 음향가진 실험을 통해 얻은 주파수와 비슷함을 확인했다. 그러므로 이번 실험의 조건하에서 액적의 공진 주파수는 약 10 Hz, 약 30 Hz 와 58 Hz 임을 알 수 있다.

이를 토대로 액적의 증발 과정 시에 주파수 변화에 따른 액적의 증발과정을 관찰하였다. 먼저 기본적인 액적의 증발과정을 관찰해 보았다. Fig. 5 은 액적의 증발과정을 나타낸 사진이다. Fig. 6 은 액적의 증발 과정을 관찰하고 주파수 변화에 따른 액적의 반지름 변화를 보여주고 있다. 증발의 초기 단계에는 거의 일정한 형태로 액적의 반지름이 줄어들고 있으며, 어느 지점 이후부터는

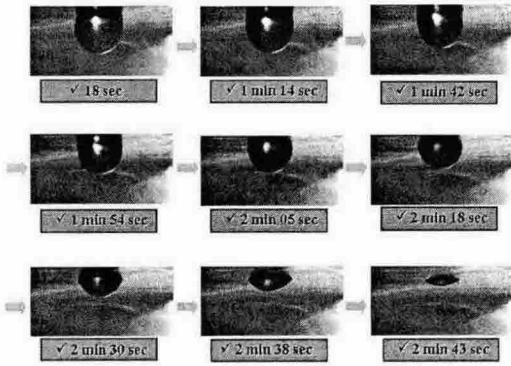


Fig. 5 The images of evaporating droplet

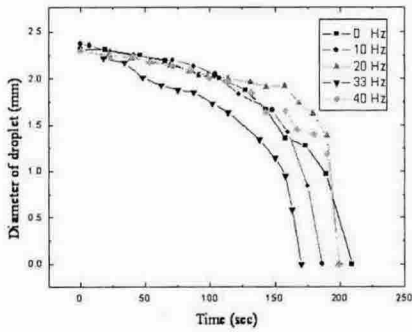
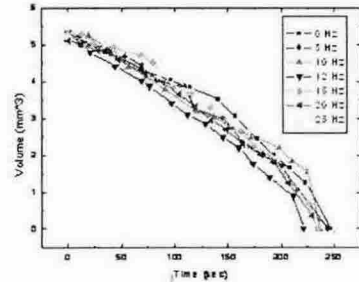
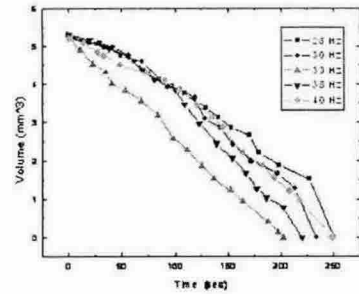


Fig. 6 The variation of diameter of a pendant droplet

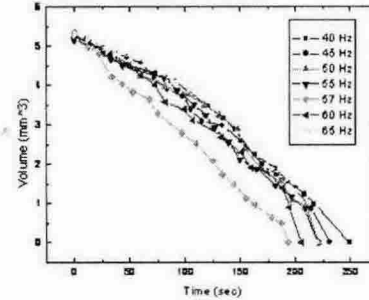
급속히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 형태가 보여 지는 이유는 증발하는 과정동안 평판과 액적 사이에 모세관 현상이 작용하는 것으로 추측된다. 좀더 세밀한 분석을 위하여 주파수의 변화를 좀더 세분화 하고 음향가진 실험의 데이터를 기본으로 세부분으로 나누고 액적의 증발을 관찰하였다. Fig. 7 은 여러 주파수에서의 시간에 따른 액적의 부피 변화를 나타낸 그래프이다. 보시는 바와 같이 음향공진 실험에서 나누어진 진동 모드가 액적의 증발에서도 나뉘어 질 수 있으며, 각각 최대의 변형 기울기를 보여주는 주파수가 존재하고 있다. 그러나 음향공진에서 볼 수 없었던 더 낮은 영역 10 Hz 근처에서도 빠른 증발형태를 보여주고 있다. 고속카메라를 통한 측정값들을 가지고 액적의 증발률을 계산한 결과를 Fig 8에 나타내었다. 그래프에서 와 같이 액적의



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 The variation of volume of a pendant droplet by time. (a) The range from 0~25 Hz, (b) the range from 25~40 Hz, (c) the range from 40~65 Hz.

증발률은 각각의 공진현상이 발생할 때 가장 높은 수치의 증발률을 보여주고 있다. 또한 공진현상이 발생하지 않는 경우보다 최대 약 15% 정도 증가하는 것으로 보이고 있다. 이러한 액적의 공진현상을 토대로 외부 이중유체와의 물질전달을 분석해보고자 한다. 물질전달률의 신빙성을 높이기 위하여 주파수의 범위를 좁혔고, 상온(20 °C)의 조건을 가지고 계산을 수행하였다. 액적의 진동 속도와 이동거리를 수조 위를 지나는 공기의

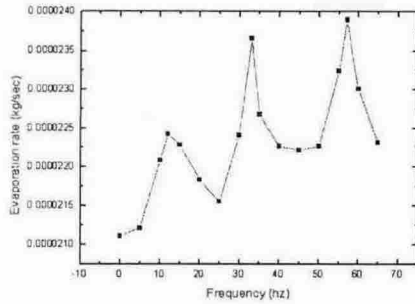


Fig. 8 The evaporation rates versus frequency

속도와 물질 전달이 발생하는 영역의 거리로 대체시켜 계산하였다. Fig. 9는 액적의 물질 전달량을 계산한 값을 보여 주고 있다. 약 33 Hz와 58 Hz에서 최대 물질 전달량을 보여주고 있다. 이는 음향을 가진을 통해 얻은 공진주파수와 일치하고 있다. 이로써, 액적의 고유 주파수를 이용한다면, 열 및 물질 전달에 있어서 높은 효율을 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 매달려 있는 액적에 다양한 주파수의 음향 가진을 주었을 때, 액적의 동적특성을 관찰 하였다. 이러한 실험을 통하여 고체면에 매달려 있는 액적은 주파수 영역마다 형상진동 모드에 따른 각기 다른 공진주파수가 존재한다. 이에 따른 액적의 공진현상을 이용했을 시에 액적의 증발이 활발히 일어나며 이를 응용하여 효과적인 열 및 물질 전달 효과를 얻을 수 있다. 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.

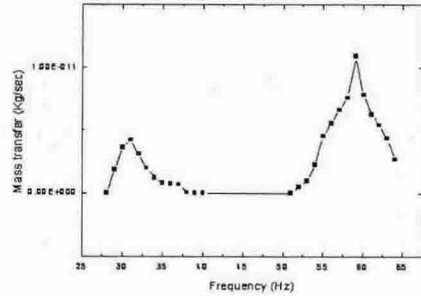


Fig. 9 The assumption for calculating the mass transfer coefficient

#### 후기

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. Wachters L. and Westerling N., The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state, *Chem. Eng. Sci.* 21, p. 1047-1056.
7. Makino K. and Michiyoshi I., The behavior of a water droplet on heated surfaces, *Int. J. Heat Transfer*, Vol 27, p. 781-791.