

진동 평판 위 액적의 형상 진동 변화 및 모드 특성

신 영 섭* · 임 희 창*†

* 부산대학교 기계공학부

Shape Oscillation and Mode Characteristic of Droplet on Vibrating Flat Surface

Young-Sub Shin* and Hee-Chang Lim*†

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received November 2, 2012 ; Revised December 10, 2012 ; Accepted December 11, 2012)

Key Words: Droplet(액적), Lobe(둥근 돌출부), Resonance Frequency(공진 주파수), Secondary Droplet(미소 액적), Shape Oscillation(형상 진동)

초록: 본 연구는 주기적인 강제 진동이 가해지는 액적의 모드 특성을 실험적으로 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 액적의 공진 주파수 예측을 수행하여 이론 및 실험적 해석을 통해 두 접근방법의 타당성을 파악하였으며, 초고속카메라를 사용하여 액적의 다양한 변형 특성- 모드 형상, 분리, 미소 액적의 발생, 그리고 비틀림의 특성을 관찰하였다. 이론 해석 및 실험결과와의 비교에 있어 공진 주파수 값의 차이가 약 15% 이하라는 것이 도출되었으며 이러한 차이의 발생 원인으로 접촉선 마찰, 비선형 벽 고착, 실험의 불확실성 등에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 접촉선이 고정되어있을 경우와 작은 진폭 조건 하에서 액적의 모양은 대칭형상을 가졌으며, 공진 주파수에서의 로브의 크기는 주변부 주파수에서의 로브 크기보다 더 크게 된다는 점을 확인하였다.

Abstract: This study aims to understand the mode characteristics of a droplet under a periodic forced vibration. To predict the resonance frequency of a droplet, theoretical and experimental approaches were employed. A high-speed camera was used to capture the various deformation characteristics of a droplet—mode shape, detachment, separated secondary droplet, and skewed deformation. The comparison between the theoretical and the experimental approaches shows a ~10% discrepancy in the prediction of the resonance frequency, which appears to be caused by the effect of contact line friction, nonlinear wall adhesion, and experimental uncertainty. Owing to contact-line pinning and smaller amplitude, the droplet shape becomes symmetric and the size of each lobe at the resonance frequency exceeds that at the neighbor, which is out of resonance.

- 기호설명 -

- f_n : n차 모드에서의 공진 주파수
- R : 액적의 반지름
- γ : 표면 장력
- ρ : 액적의 밀도

1. 서론

최근 액적의 거동에 대한 연구는 미세 유체역학의 기초 및 응용부분과 관련해서 많은 과학적

인 흥미를 가지고 있다. Rayleigh⁽¹⁾의 공진에 의한 액적거동에 대한 연구를 시작으로, 무중력 조건 하에서 고순도 결정체 위에서의 강제 진동에 대한 액적거동을 이론적 그리고 실험적인 해석들이 이루어졌다.⁽²⁻⁴⁾ 최근 들어 수직 또는 수평 방향으로 진동하는 액적의 진동 및 운동특성에 대한 변화⁽⁵⁻⁹⁾와 전기적 에너지가 가해지는 액적의 운동 특성에 대한 연구⁽¹⁰⁻¹²⁾가 많이 이루어지고 있다. 실제적으로 주기적인 강제진동에 의해 발생하는 공진 주파수에서의 액적 진동은 고체 표면 위에 놓여있는 액적의 접촉선 고정(contact-line pinning)과 이력현상(contact angle hysteresis) 효과를 극복할 수 있기 때문에 액적의 활발한 구동력을 유발

† Corresponding Author, hclim@pusan.ac.kr

시킬 수 있다.^(9,13) 즉, 적은 에너지를 가하더라도 액적의 형상 변화가 쉬워진다고 할 수 있다. 또한, 여러 가지 응용분야 중 액적 진동을 파악함으로써 냉난방 및 환기장치(HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning)와 발전설비(power plant)의 응축기를 포함한 산업현장에 열전달과 관련 최대의 효율을 증가시킬 수 있는 분야에 적용이 가능하며, 그 외 액적 기반의 미세유체 시스템(droplet-based microfluidic system)의 효율 최적화에도 적용할 수 있는 분야가 될 수 있다. 이러한 이유로 벽의 상부에 매달려있는 액적에 대한 연구^(2,14,15) 및 벽의 측면에 붙어있는 액적에 대한 연구^(9,16) 뿐만 아니라 액적의 표면장력 측정^(2,17) 그리고 접촉각 측정⁽¹⁸⁾과 관련된 연구에서도 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 Strani와 Sabetta⁽¹⁹⁾는 오목한 원형 고체 면에 부착되어 있는 액적의 진동을 해석한 것과는 달리 본 연구에서는 평탄한 고체 면에 놓여 있는 액적을 외부의 주기적인 강제 진동으로 액적의 접촉선이 자유롭게 움직일 수 있는 경계 조건에서 실험이 진행되었다. 이는 현재 응용 기술 및 과학적으로 매우 중요한 부분을 차지하지만 자유로운 경계조건을 가진 액적에 대한 수치해석 및 실험은 경계조건 설정의 모호함으로 이론적 해석 및 실험적 연구가 거의 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 수직 방향으로 진동하는 평탄한 고체면 위에 놓인 액적의 공진을 관찰하였고 가진 주파수를 바꾸어 가면서 액적의 형상 변화 및 진동 패턴을 관찰하여 이론적 해석결과와 비교 및 분석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 평판의 표면 처리

액적과 고체표면의 접촉각은 주기적인 강제진동에 의한 액적의 활발한 구동 및 모드 진동을 명확히 관찰하기 위해 가능하면 크게 하는 것이 효율적이다. 따라서, 평판에서 액적의 접촉각을 키우기 위해 평판에 특수한 표면처리를 해야 하는데, 허용 미립자경(um)이 $0.5um$ 이하인 클린룸에서 아크릴의 표면 처리가 이루어졌다. 아크릴 판 표면에 테프론 박막 형성을 위해 6wt% 테프론 코팅액(AF-1600, Dupont)을 불화탄소용액(FC-40, 3M)와 섞어 농도가 1wt% 테프론 용액을 제조하였다. 아세톤으로 세척한 아크릴 판의 물

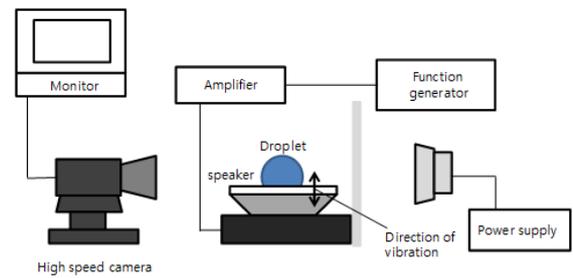


Fig. 1 Experimental setup for vibrating a droplet placed on the flat plate

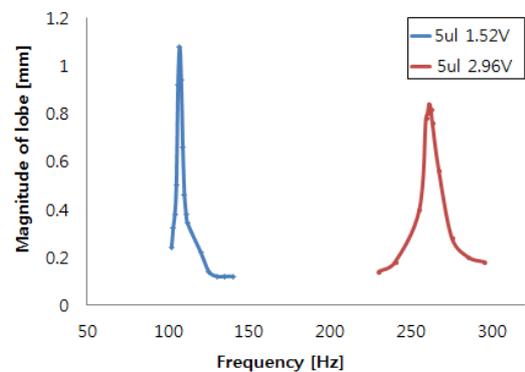


Fig. 2 Magnitude of lobe against the excitation frequency

기를 제거한 후 아크릴 판 위에 제조된 용액을 사용하여 500rpm에서 5초간 스핀 코팅을 한 후 다시 3000rpm 속도로 30초간 스핀코팅하였다. 그 결과 100um 정도의 코팅두께를 가졌고 테프론표면에 놓인 물방울의 평형 접촉각(equilibrium contact angle)은 115도 이상으로 측정되었다.

2.2 진동 실험 방법

주기적인 강제진동을 하는 평판에 놓인 액적의 수직 진동 특성을 확인하는 실험을 위해 Fig. 1과 같이 강제가진을 주는 스피커(HIAX32C20-8, HiWave) 표면에 앞서 표면처리한 아크릴 표면을 아크릴 접착제로 붙인 후 그 표면 위에 일정한 용량($5\mu l$)의 액적을 놓고 수직으로 주기적인 진동을 가할 수 있도록 설치하였다. 이번 실험에서 사용된 액적의 종류는 증류수(deionized water)이며, 다른 첨가물들은 기초 연구의 차원에서 사용하지 않았다. 가진 주파수와 여러 가지 전압 인가를 위해서 함수 발생기(function generator, 33522A, Agilent)를 증폭기(EP4000, Behringer)에 연결하여 보다 증폭되고 일정한 정현파(sinusoidal

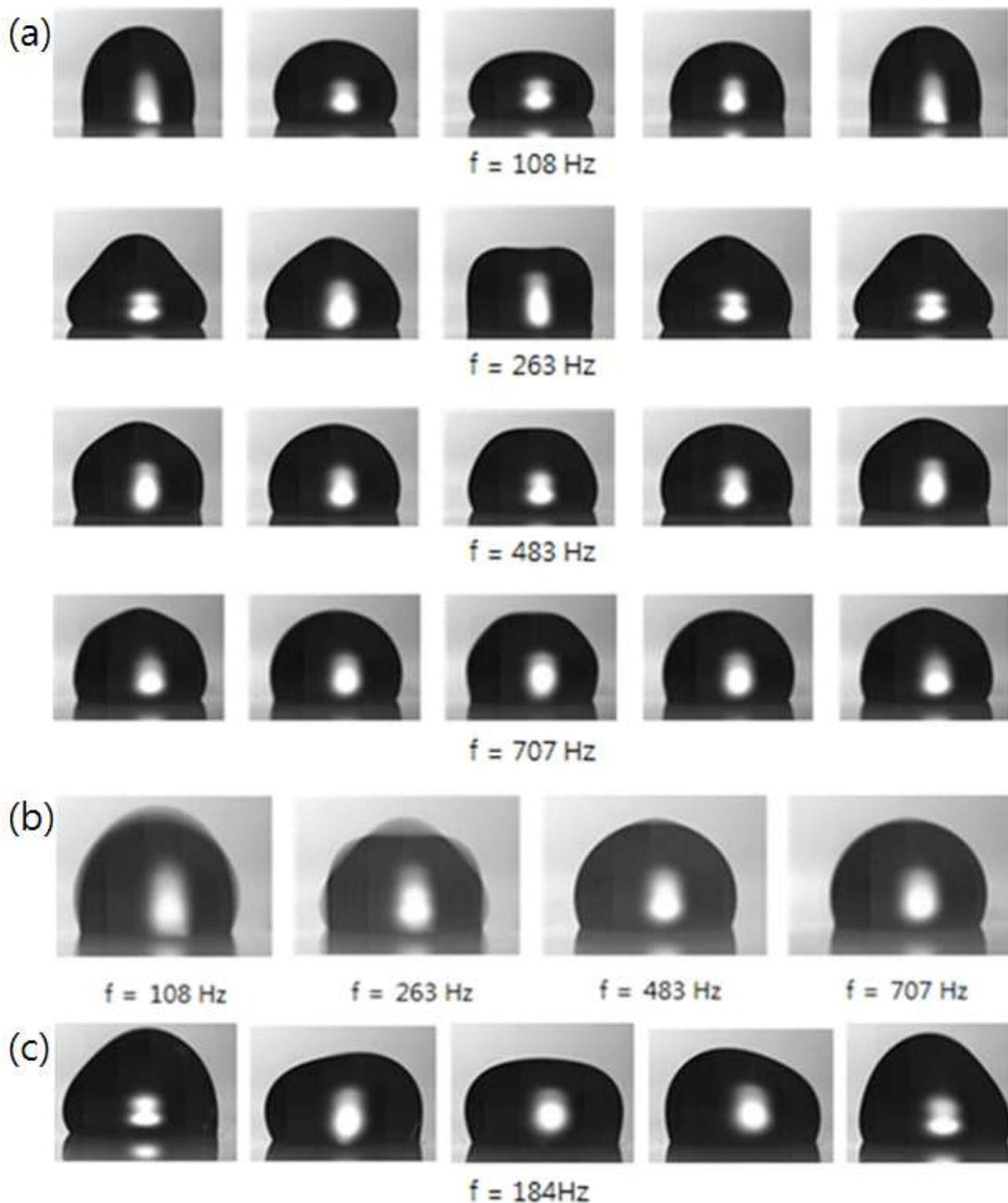


Fig. 3 (a) Temporal variation of a droplet deformation at 2.2V (a) with the changing mode frequency (i.e., 2, 4, 6 and 8), (b) with the changing mode frequency, but with the superimposing 20 images for identifying the pattern of mode shape (c) at the neighbor frequency (i.e., between mode 2 and 4) showing the example of skewed shape

wave)를 생성시켜 스피커를 동작하도록 하였다. 스피커에 부착된 평판은 일정하게 진동할 수 있도록 설계하였다. 본 스피커에 인가한 전압은 피크 투 피크 (peak to peak)값으로 오실로스코프 (GDS-2064, Gwinstek)를 통해 1~20V의 범위가 출력되는 것을 확인하였고, 초고속카메라(SA3120K, Patron)를 고체 표면과 동일선상에 위치시켜 액적

의 정확한 형상변화 및 변형량을 관찰할 수 있도록 하였다. 시간에 따른 빠른 형상변화를 관찰할 수 있도록 대부분의 실험에서 초당 2,000 프레임의 속도로 액적의 움직임을 관찰하였다. 본 연구에서 액적 형상 진동 변화를 관찰하기 위해 다음과 같은 실험 과정을 이용하여 수행하였다. 1) 마이크로 피펫을 사용하여 아크릴 판위에 액적을

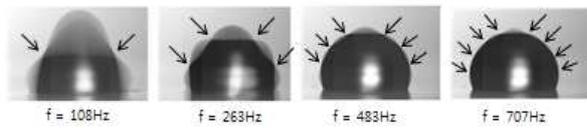


Fig. 4 Pattern of droplet oscillation that are obtained by superposing 20 images at 6.8V for resonance frequencies

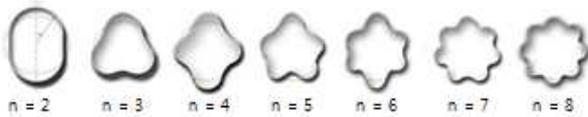


Fig. 5 The shape of a droplet at each shape oscillation modes

생성시킨다. 2) 함수 증폭기에 각 형상 모드에 해당하는 주파수를 인가한 상태에서 초고속 카메라를 이용하여 액적의 표면 형상 변화를 관찰한다. 3) 전압을 높여가면서 액적의 진동 형상 변화의 크기와 각 모드 진동의 상태를 비교하였다. 특히 실험을 수행하는 과정에서 고려되어야 할 부분들 중 하나는 외부 온도 및 습도차에 의한 액적의 증발이다. 시간에 따른 증발로 인해 액적의 부피가 점차 감소하게 되며 이로 인한 액적의 공진주파수가 증가하게 되는 현상이 발생할 수 있는데, 이를 위해 본 실험에서는 반복적인 실험을 통해 최대한 증발에 대한 영향을 받지 않도록 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이론적 및 실험적 해석 비교

본 실험에 앞서 이론적인 접근방법으로 구한 공진주파수는 실험적으로 관찰하여 서로 비교하였다. 실제 이론 공진주파수의 값은 실험결과와 비교했을 때 기초 및 검증 자료에 특히 중요하며 본 연구에서 사용된 이론식은 다음과 같이 정의된다.⁽¹¹⁾

$$f_n = \frac{\sqrt{n(n-1)(n+2)\gamma/R^3\rho}}{2\pi} \quad (1)$$

식 (1)에서 f_n 은 n 차 모드에서의 고유주파수, γ 은 표면장력, R 은 액적의 반지름, ρ 은 액적의 밀도를 의미한다. 식 (1)을 통해 얻어진 각각의 이론 공진 주파수 f_2, f_4, f_6, f_8 는 99.5, 298.6,

545.2, 832.8 Hz로 계산되었다. 그러나 이론식을 통해 얻어진 주파수 값과 실제 실험 값과는 여러 가지 원인에 따라 차이가 발생되는데 그 원인은 고체표면과 액적 사이에서의 접촉선 마찰, 선형 해석이 고려되지 않은 벽면 고착,⁽¹¹⁾ 그리고 실험에 대한 불확실성으로 인해 발생되어진다고 판단된다. 실제 실험 값을 얻기 위해 로브의 진폭 변화의 최대치를 찾는 방법을 이용하였다. Figure 2는 액적의 로브 표면 위 임의의 점을 기준으로 2차와 4차 공진 진동모드 형태에 따른 액적의 로브의 변형량을 주파수 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 108Hz와 263Hz 부근에서 로브 크기 변화가 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 그리고 그 범위에서 벗어날수록 점차 그 변형의 정도가 줄어들었으며 최대 변위가 발생한 주파수 지점에서 크게 벗어난 부분에서는 큰 변위 변화가 없다는 점을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 액적의 로브 크기는 주파수에 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며, 108 Hz와 263 Hz에서 최대 크기 변형이 발생함에 따라 여러 위치에서 공진 주파수가 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 공진주파수 일 때의 로브 크기는 주변부 주파수 일 때의 로브 크기보다 몇 배 더 큰 것을 확인하였다.

3.2 액적의 모드 형상 변화 비교

Figure 3은 여러 주파수에 따른 액적의 형상모드변화를 나타내는 그림이다. Fig. 3(a)은 보다 낮은 전압, 2.2V의 가진 전압, 즉 스피커에 부착된 아크릴판의 변화 진폭이 낮은 곳에서 실험을 통해 얻어진 공진 주파수 값(즉, 108, 263, 483, 707Hz)의 액적 진동 형상 모드에 대한 변화를 관찰한 결과이다. 각 해당 주파수에 대한 로브의 변화를 명확히 관찰하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 시간변화에 따라 진동하는 20개의 사진을 서로 합쳐 이미지를 재구성하여 공진 주파수에 대한 액적 거동 변화를 확인하였다. 그림에서 공진 주파수의 n 차 모드수가 커질수록 로브의 크기는 작아져 2.2V에서는 모드 4와 6의 로브의 진폭 변화를 확인하기가 쉽지 않았다. 그래서 Fig. 4에서는 보다 높은 전압, 6.8V의 가진 전압을 주어 로브의 진폭을 증가시켰으며 보다 쉽게 모드 4와 6의 로브 개수를 확인할 수 있었다. 흥미로운 사실은 액적 진동 패턴이 각각의 공진 주파수에 따라 다

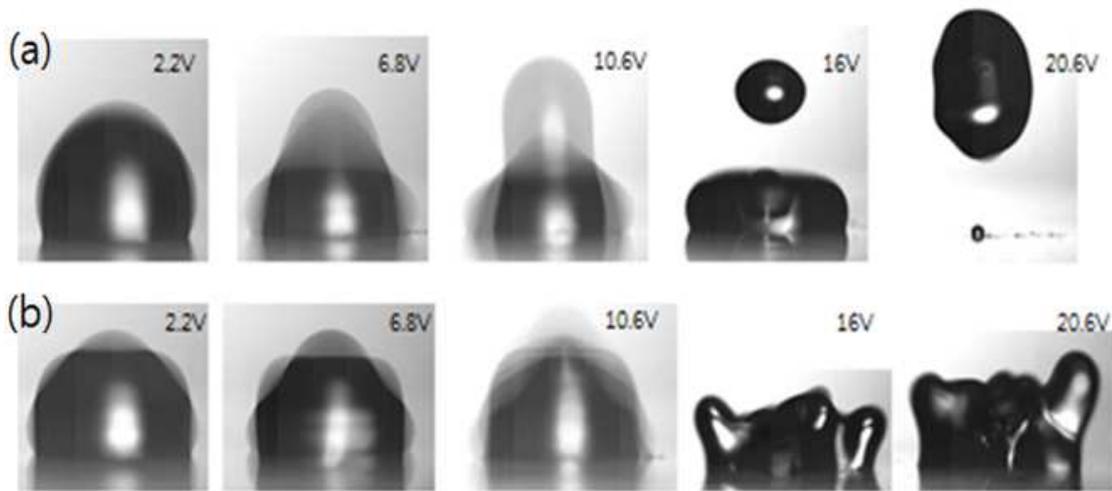


Fig 6 Shape pattern of droplet oscillation against the energy input at resonance frequencies of (a) 108 and (b) 263 Hz

르다는 점이다. 즉, 로브의 수가 다르다는 것을 나타내는 것이며 쉽게 확인하기 위해 화살표로 표시를 하였다. 모드 2, 4, 6, 8에서 화살표의 개수는 2, 4, 6, 8로 증가하였고 로브 개수 또한 3, 5, 7, 9로 증가하였다. 그리고 또 다른 흥미로운 사실은 가진 주파수가 108Hz일 때 Fig. 3(c)에서 보이는 것과 같이 액적의 진동 형태가 상하 운동이 아닌 좌우 비틀림 운동(skewed movement)이라는 점이다. 다른 주파수에서의 진동 형태는 수직 방향으로 액적이 수축 팽창을 반복하는 형태인 반면, 가진 주파수 108Hz에서는 좌우로 움직이면서 좌우 비대칭적으로 상반되는 비틀림 진동 형태를 가진다. 따라서, 자유 액적의 형상 진동 모드에 따른 액적 진동 모양을 나타낸 Fig. 5에 따르면,⁽¹¹⁾ Fig. 4에서 보인 여러 형상 진동 모드와 일치하였고 이 밖에도 두 공진주파수 사이에 존재하는 한 특정 주파수($f=108\text{Hz}$)에서는 비틀림 운동이 있다는 사실을 확인하였다. 이 실험 결과를 통해서 어느 특정 주파수 범위에서 상하운동 또는 비틀림운동, 두 종류의 운동형태가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 표면과 액적의 분리조건

Figure 6은 모드 2, 4에서 전압을 점차 증가시켰을 때의 액적 거동에 대한 변화를 나타낸 그림이다. 16V와 20.6V에서의 액적 거동 변화 이미지는 2.2V, 6.8V와 10.6V와는 달리 단일 이미지이다. 그 이유는 전압이 높아짐에 따라 고체 평판의 진동이 커져 액적의 진동 자체가 안정적인지

못하여 이미지를 합쳐서 분석할 수 없었다. 낮은 진폭에서는 액적과 접촉 표면 사이의 접촉선이 고정된 상태(contact line pinning)에서 각각의 모드에 대한 액적 형상 변화를 볼 수 있었지만 점점 진폭이 커질수록 접촉선이 고정되지 않은 상태(contact line unpinning)가 되어 액적 형상 변화 크기 또한 매우 커지게 된다는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 모드 4에서 16V 이상 인가하였을 때 액적의 형상이 매우 복잡해졌던 반면, 모드 2에서는 16V를 인가하였을 때 표면에 놓인 액적에서 미소 액적(secondary droplet)이 떨어져 나가는 것을 관찰하였고 20.8V에서는 판에서 완전히 액적이 떨어져 나가는 것을 관찰하였다. 즉, 표면 위의 액적을 제거하기 위한 가장 중요한 조건으로 모드 2에 해당하는 주파수에서 진행되어야 된다는 점을 실험을 통해 확인을 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고체 표면에 놓인 액적에 공진 주파수 및 주변부 주파수를 가했을 때 액적 형상 모드 및 액적 거동의 특징을 관찰하였다. 기존의 이론식을 통해 이론값을 구하고 실험을 통해 각 모드에 해당하는 실험 주파수를 찾아서 이를 비교하여 그 차이율이 5~15%라는 사실을 확인하였고 특정 주파수 영역에서 상하 진동모드 ($N=2, 4, 6, 8$)와 비틀림 진동모드가 존재함을 확인하였으며 공진주파수에서 액적의 표면 형상크기 변화는 주변부 주파수에서의 크기 변화보다 더욱 활발하

게 진동함을 실험을 통해 관찰하였다. 또한 표면 위에 놓인 액적의 완전한 제거 조건으로는 모드 2에 해당하는 공진주파수를 가진 해주어야지만 가능하다는 점을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 이는 미세유체역학분야를 기본으로 하는 관련 산업에서 매우 중요한 자료가 될 것이며 이를 응용하여 많은 발전이 있기를 기대한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부재원(지역혁신인력양성사업)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었으며, 또한 지식경제부의 에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20114010203080)

참고문헌

- (1) Rayleigh, L., 1890, "The Theory of Sound," Macmillan
- (2) Wilkes, E. D. and Basaran, O. A., 1997, "Forced Oscillations of Pendant (Sessile) Drops," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp. 1512~1528.
- (3) Lundgren, T. S. and Mansour, N. N., 1988, "Oscillation of Drops in Zero Gravity with Weak Viscous Effects," *J. Fluid*, Vol. 194, pp. 479~510.
- (4) Rodot, H., Bisch, C. and Lasek, A., 1979, "Zero Gravity Simulation of Liquids in Contact with a Solid Surface," *Acta Astronaut*, Vol. 6, pp. 1083~1092.
- (5) Daniel, S., Sircar, S., Gliem, J. and Chaudhury, M. K., 2004, "Ratcheting Motion of Liquid Drops on Gradient Surfaces," *Langmuir*, Vol. 20, pp. 4085~4098.
- (6) Daniel, S., Chaudhury, M. K. and De Gennes, P. G., 2005, "Vibration-Actuated Drop Motion on Surfaces for Batch Microfluidic Processes," *Langmuir*, Vol. 21, pp. 4240~4248.
- (7) Dong, L., Chaudhury, A. and Chaudhury, M. K., 2006, "Lateral Vibration of a Water Drop and Its Motion on a Vibrating Surface ." *Eur. Phys. J. E*, Vol. 21, pp. 231~242.
- (8) Noblin, X., Buguin, A. and Brochard-Wyart, F., 2009, "Vibration of Sessile Drops," *Eur. Phys. J. Special Topics*, Vol. 166, pp. 7~10.
- (9) Brunet, P., Eggers, J. and Deegan, R. D., 2009, "Motion of a Drop Driven by Substrate Vibrations," *Eur. Phys. J. Special Topics*, Vol. 166, pp. 11~14.
- (10) Hong, F. J., Jiang, D. D. and Cheng, P., 2012, "Frequency-Dependent Resonance and Asymmetric Droplet Oscillation Under AC Electrowetting on Coplanar Electrodes," *J. Micromech. Microeng*, Vol. 22, pp. 1~9.
- (11) Oh, J. M., Ko, S. H. and Kang, K. H., 2008, "Shape Oscillation of a Drop in AC Electrowetting," *Langmuir*, Vol. 24, pp. 8379~8386.
- (12) McHale, G., Elliott, S. J., Newton, M. I., Herbertson, D. L. and Esmer, K., 2009, "Evitation-Free Vibrated Droplets: Resonant Oscillations of Liquid Marbles," *Langmuir*, Vol. 25, pp. 529~533.
- (13) Langley, K. R. and Sharp, J. S., 2010, "Microtextured Surfaces With Gradient Wetting Properties," *Langmuir*, Vol. 26, pp. 18349~18356
- (14) Depaoli, D. W., Feng, J. Q., Basaran, O. A. and Scott, T. C., 1995, "Hysteresis in Forced Oscillations of Pendant Drops," *Phys. Fluids*, Vol. 7, pp. 1181~1183.
- (15) Kim, H. Y., 2004, "Drop Fall-Off from the Vibrating Ceiling," *Phys. Fluids*, Vol. 14, p. 474.
- (16) Brunet, P., Eggers, J. and Deegan, R. D., 2007, "Vibration-Induced Climbing of Drops," *Phys. Rev. Lett*, Vol. 99, pp. 144501-1~4.
- (17) Matsumoto, T., Fujii, H., Ueda, T., Kamai, M. and Nogi, K., 2005, "Measurement of Surface Tension of Molten Copper Using the Free-Fall Oscillating Drop Method," *Meas. Sci. Technol*, Vol. 16, pp. 432~437.
- (18) Yamakita, S., Matsui, Y. and Shiokawa, S., 1999, "New Method for Measurement of Contact Angle (Droplet Free Vibration Frequency Method)," *Jpn. J. Appl. Phys*, Vol. 38, pp. 3127~3130.
- (19) 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.