

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.7.579>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

수직 진동하는 소수성 표면 위 액적의 내부유동 및 증발특성 연구

김 훈* · 임 희 창**

* 부산대학교 기계공학부

Internal Flow and Evaporation Characteristic inside a Water Droplet on a Vertical Vibrating Hydrophobic Surface

Hun Kim* and Hee-Chang Lim**

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

(Received February 12, 2015 ; Revised April 27, 2015 ; Accepted May 19, 2015)

Key Words: Hydrophobic Surface(소수성 표면), Contact Radius(접촉 반지름), Equilibrium Contact Angle(평형 접촉각), Flow Visualization(유동가시화), Natural Frequency(고유 진동수), Resonance Frequency(공진 주파수), Lobe(둥근 돌출부)

초록: 본 연구의 목적은 수직으로 강제 진동하는 소수성 표면 위에 놓인 액적의 유동 및 증발 특성을 이해하는 것이다. 액적의 공진주파수를 예측하기 위해서 Lamb과 Strani and Sabetta의 이론적 고유진동수 식을 이용하였고, 실험값과 비교하여 보다 근접한 고유진동수 식에 대해 타당성을 검증하였다. 액적의 형상 및 내부 유동을 가시화하기 위해 초고속카메라, 초접사렌즈 그리고 연속광을 사용하여 진동하는 소수성 표면 위 액적의 유동 및 증발 특성을 확인하였다. 그 결과 각각의 모드에서 액적은 다양한 형상을 가졌으며, 각각의 액적 내부에서 복잡한 와류가 관찰되었다. 일반적으로, 유동흐름이 대칭축을 따라 위로 상승하여 액적상단에서 표면을 따라 접촉선부근으로 이동하였고, 2차, 4차 모드는 분기형, 6차, 8차 모드는 큰 타원형의 유동패턴을 갖는 것을 확인하였다. 여러 가지 모드 중 4차 모드에서 가장 빠른 유동속도를 가졌으며, 다음은 8, 6, 2차 모드 순서였다. 네 가지 진동 모드에서의 증발률은 4, 8, 6, 2차 모드 순서로 빨랐으며, 각각의 공진에서는 그 주위 주파수 영역보다 빠른 증발률을 보였다. 마지막으로 진동을 이용한 액적의 증발은 4차 모드에서 진행되어야 보다 효율적인 진동 증발을 유도할 수 있다.

Abstract: This study aims to understand the internal flow and the evaporation characteristics of a deionized water droplet subjected to vertical forced vibrations. To predict and evaluate its resonance frequency, the theories of Lamb, Strani, and Sabetta have been applied. To visualize the precise mode, shape, and internal flow inside a droplet, the experiment utilizes a combination of a high-speed camera, macro lens, and continuous laser. As a result, a water droplet on a hydrophobic surface has its typical shape at each mode, and complicated vortices are observed inside the droplet. In particular, large symmetrical flow streams are generated along the vertical axis at each mode, with a large circulating movement from the bottom to the top and then to the triple contact line along the droplet surface. In addition, a bifurcation-shaped flow pattern is formed at modes 2 and 4, whereas a large ellipsoid-shape flow pattern forms at modes 6 and 8. Mode 4 has the fastest internal flow speed and evaporation rate, followed by modes 8 then 6, with 2 having the slowest of these properties. Each mode has the fastest evaporation rate amongst its neighboring frequencies. Finally, the droplet evaporation under vertical vibration would lead to more rapid evaporation, particularly for mode 4.

- 기호설명 -

f_n : n차 모드에서의 고유 진동수

R : 액적의 반지름

γ : 표면장력

ρ : 액적의 밀도

r_0 : 접촉원의 반지름

† Corresponding Author, hclim@pusan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

액적의 움직임에 대한 연구는 오래 전부터 많은 연구자들에게 흥미로운 문제로 다루어져 왔다. 특히, 액적의 진동과 증발은 기초/응용 및 화학/기계공학적으로 많은 관심과 연구가 이루어져 왔고, 현재에도 많은 연구자들에 의해 연구가 진행 중이다.

이중 유체에 둘러싸여 진동하는 액적의 운동에 관한 초기연구로는 Kelvin⁽¹⁾과 Lord Rayleigh⁽²⁾의 강제진동(forced vibration)에 의한 액적거동 연구로 시작된 바 있다. 이는 액적을 비점성으로 가정된 자유액적(free drop)에 관한 연구로 이후 Lamb⁽³⁾에 의해 미소 진폭 진동에서의 이론적 고유 진동수(Natural frequency) 유도식이 정립되었다. 그리고 Strani와 Sabetta⁽⁴⁾는 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하는 비점성 액적에 대한 연구를 진행하였으며, 이는 Lamb의 선행연구와 달리 액적이 접촉선이 고정된 상태에서의 진동으로 기존의 이론적 접근과는 다른 실질적 접근방법이라 할 수 있다. 그들의 연구에서는 고체면과 접촉한 액적의 경우 1차 모드의 형상이 자유액적의 2차 모드 형상과 유사한 형상을 가진다는 것을 밝히고, n 차 형상 진동의 무차원 고유진동수(w_n^*)가 접촉원의 반지름 r_0 와 액적의 반지름 R 비의 함수만으로 표현됨을 보였다.

기존의 선행 연구들 이후 많은 파생된 연구들이 보고되어왔으며, 대표적으로 Daniel 등^(5,6)의 경사진 표면에서 한쪽방향으로 움직이는 액적운동에 관한 연구, 수평 또는 수직 방향으로 진동하는 액적의 운동특성에 대한 연구,⁽⁷⁻⁹⁾ 공중 부양된

자유액적의 공진에 대한 연구⁽¹⁰⁾와 근래에 들어서는 전기적 에너지가 가해지는 전기습윤(electro wetting) 현상^(11,12)을 이용한 연구 등의 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 특히 전기습윤 현상은 빠른 응답속도와 낮은 소비전력 때문에 랩온어칩(lab-on-a-Chip), 전자표시기(electro display), 액체 렌즈(liquid lens) 등 마이크로 시스템에 적용 및 활용되고 있다.

액적 진동을 통한 여러 가지 응용분야 중에는 공기조화 시스템(HVAC)의 응축기와 열전달과 관련하여 최대의 효율을 증가시킬 수 있는 다양한 산업현장에 적용이 가능하다. 주기적인 강제진동에 의해 발생하는 액적 진동은 고체 표면 위에 놓여있는 액적의 접촉선 고정현상을 극복할 수 있고 실제 액적과 관련된 산업현장에서도 액적의 활발한 구동력을 유발시켜 제거하는 등의 응용 및 적용이 가능하다. 이는 액적의 가열 벽면 충돌 시 열전달 연구,⁽¹³⁾ 벽의 상부에 매달려있는 액적에 대한 연구,⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 경사진 면에 놓여있는 액적 운동에 대한 연구^(9,17) 뿐만 아니라, 액적의 표면장력측정⁽¹⁸⁾ 그리고 접촉각측정⁽¹⁹⁾과 관련된 연구 등에도 적용 가능하다고 할 수 있다.

단순한 공진에서의 액적의 거동뿐만 아니라 음향공진에서의 매달려 있는 액적의 증발에 관한 실험과 가열된 평판위에 놓인 액적의 거동⁽²⁰⁾ 등에 관한 실험이 이루어져왔다. 일반적으로 가열 표면 위에 놓인 액적내부를 보면 유동의 발생을 관찰할 수 있는데 이는 열 마랑고니 유동(Marangoni flow)이라 한다.⁽²¹⁻²³⁾ 이 유동은 침전물 패턴^(24,25)에 중요한 영향을 미치고 이러한 현상은 스프레이 페인팅(spray painting), 코팅(coating), 박막 증착(thin film deposition), 세척 등 많은 기계 산업에서의 적용에 연구가 진행되고 있다. 이러한 미소 액적의 증발 관련 실험은 Wachters and Westerling⁽¹³⁾에 의하여 이루어진 바 있으며, 가열된 금속 평판에 다양한 속도로 낙하하는 액적의 증발형태를 관찰하고 열전달과 관련하여 이론적 추정치와 비교하였다. 또한 Makino and Michiyoshi⁽²⁰⁾는 다양한 금속표면 위에 놓인 액적의 증발형태를 관찰하였고, 그 결과 액적이 증발하는 동안 접촉각이 급속하게 줄어드는 시기에는 액적의 반지름은 상대적으로 일정함을 보였다.

기존의 연구들을 살펴본 바에 따르면 최근까지

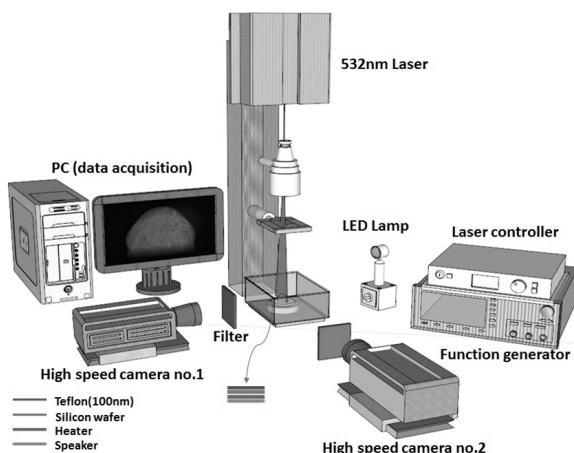


Fig. 1 Experimental setup for visualization

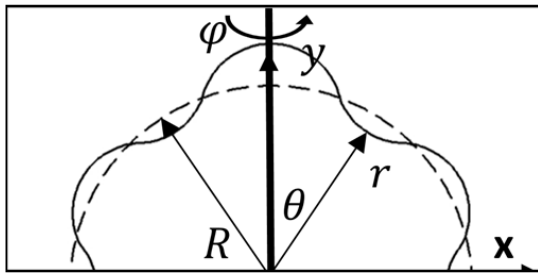


Fig. 2 Descriptive diagram of a droplet in a fluid medium on a wetted substrate

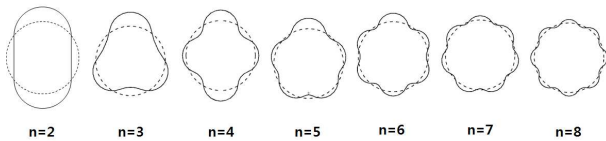


Fig. 3 Shape characteristics of a droplet at modes 2-8

도 액적의 내부유동에 관한 연구는 자연증발과 가열을 이용한 열 마라곤니 유동에 관한 연구로 진동하는 액적내부유동에 관한 연구는 수치해석⁽²⁶⁾ 연구만 있을 뿐 실험적인 접근은 거의 미미한 수준이며 심도있는 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 액적의 구 형상 및 자유롭게 움직일 수 있도록 표면을 소수성 표면(hydrophobic surface)과 낮은 접촉각이력(hysteresis) 상태로 만들고, 액적에 수직진동을 가하여 공진 모드에 따른 유동 및 증발 특성을 파악하였다. 그리고 액적을 이용하는 다양한 분야에서의 응용 가능성과 적용성을 위해 자연 증발과 비교하여 공진에서의 액적이 증발에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

본 실험에서는 친수성 표면인 실리콘 웨이퍼를 소수성 표면으로 만들기 위해 Teflon AF (601S2-100-6, Dupont)을 불화탄소 용매(FC-40, 3M)에 희석하여 농도 1wt% 테프론 용액을 제조하였다. 이후 실리콘 웨이퍼 표면을 2000rpm, 3acc로 30초간 스프인코팅하였고, Teflon 박막의 접착력(adhesion)을 강화하기 위해 165°C 핫플레이트에서 60분 간 베이킹(baking)하였다.

순수한 물방울은 3차 탈이온수(deionized water)를 사용하였으며 액적의 크기는 5 μl이고, 액적의 평형 접촉각(equilibrium contact angle)은 115°±1° 이었다. 또한, 온·습도 조절장치와 아크릴 챔버를 사용하여 실험조건을 각각 25°C±1°C,

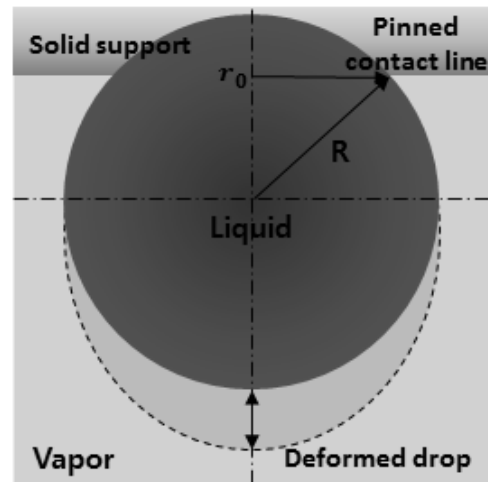


Fig. 4 Liquid drop vibrating on a spherical bowl as analyzed by Strani and Sabetta

30%±5% 로 가능한 일정하게 유지 및 외부영향을 최소화 하였다.

액적 내부 유동 가시화 및 유속 측정을 위하여 Fig. 1과 같이 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 가시화 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 레이저는 CW laser(Excel 532-2000)이며 파장은 532nm이다. 레이저의 강한 빛이 카메라의 CCD 센서의 인식한계 값을 넘는 자극을 주지 않도록 600nm의 cut-off wavelength를 가지는 low pass filter를 초점사 렌즈 앞에 설치하였다. 레이저 빔 익스팬더(beam expander)로 레이저에서 발생된 빛을 확장시킨 뒤 원형 초점 렌즈(cylindrical focus lens)를 이용하여 얇은 레이저시트(laser sheet)를 만들어 액적의 중앙을 관통시켜 내부 유동을 관찰하였다. 레이저시트의 두께는 약 0.2 mm 이며, 가시화를 위하여 직경 2.0 μm, 밀도 1.05 g/cm³ 의 폴리스티렌(polystyrene) 형광입자(Nile Red F8825, Molecular Probes)를 사용하였다. 그리고 유동의 속도 측정을 위해 2대의 초고속카메라(FASTCAM SA3, Photron)를 사용하여 시간에 따른 액적 최상단 로브의 변위와 기판의 변위를 초당 2,000~5,000 프레임으로 동시에 촬영한 후 MATLAB®과 Insight 4G를 이용하여 속도장을 측정하였다. 또한, 액적 내부 유선을 파악하기 위해 디지털 카메라를 이용하여 1.6~2 초간 노출된 사진을 촬영하였다. 카메라 렌즈로는 접사렌즈인 Canon MP-E 65mm f/2.8 와 Canon Macro 100mm 를 사용하였다.

주기적으로 수직 진동하는 액적의 형상을 관찰하기 위해 강제진동을 주는 스피커(HIAX32C20-8,

HiWave)표면 위에 기관의 온도를 일정하게 유지하기 위해 Heater와 앞서 스펀 코팅 처리한 실리콘 웨이퍼를 설치하여 강제 가진 할 수 있도록 설치하였다. 그리고 액적의 접촉각은 접촉각 분석기(CAM 100, KSV)를 이용하여 총 5회 측정 후 평균값을 얻었다.

2.2 이론적 배경

본 연구에서 사용된 이론적 고유진동수 식은 앞에서 언급한 Lamb의 미소 진폭 진동영역 및 비점성 자유액적의 경우와 Strani and Sabetta의 접촉선이 고정되었을 경우에서의 고유진동수식을 이용하여 실험값과 비교하였다.

강제 진동에 의한 액적의 이론적 고유진동수는 비점성 및 비압축성 자유 액적이 낮은 진폭 영역에서 액적 표면의 속도 포텐셜(ϕ , Velocity potential)은 라플라스 방정식과 운동학적 경계 조건을 만족한다. Fig. 2와 같이 입체 기하학적으로 진동하는 액적 표면 위 임의의 지점을 구 좌표계(r, θ, φ)로 나타낼 수 있으며 이는 표면 조화 함수(Surface harmonic function)로써 표현이 된다. 액적 중심을 원점으로 하여 표면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(\theta, t) = R + \varepsilon \sum_{n=2}^{\infty} C_n(t) P_n(\cos\theta) \quad (1)$$

여기서 R, P_n, C_n 그리고 ε 은 각각 액적의 반지름, n 차 모드 형상, 모드 형상의 진폭 그리고 진동 시 발생하는 미세 변화량을 나타낸다. P_n , 즉 n 차 모드 형상은 로브의 수에 따라 Fig. 3과 같이 표현 될 수 있다.⁽¹²⁾ 자유액적의 운동에 있어 P_1 은 병진운동^(27,28)에 해당하기 때문에 본 실험의 관심영역 밖에 있기 때문에 생략하였다. 라플라스 방정식과 경계 조건에 n 차 표면 함수를 전개하면 식 (2)과 같은 자유 액적의 이론적 고유진동수식을 구할 수 있다. 그런데 Strani and Sabetta는 Fig. 4과 같이 오목한 구형 고체면의 일부와 접촉하는 비점성 액적의 미소 진폭의 진동을 해석하였고, 식 (3)과 같은 r_0 와 R 비의 함수만으로 표현됨을 보였다.

$$w_n^2 = n(n-1)(n+2)\gamma/\rho R^3 \quad (2)$$

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

식 (2)과 (3)에서 w_n^2 은 n 차 모드(mode)에서의 형상진동(shape oscillation)에 해당하는 고유진동수, w_n^* 은 무차원 고유진동수, γ 은 표면장력, R 은 액적의 반지름, r_0 은 접촉원의 반지름 그리고 ρ 은 액적의 밀도를 의미한다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 액적의 네 가지 공진모드(즉, 2, 4, 6, 8)에 따른 액적 내부 유동패턴, 내부 속도 그리고 증발률을 파악하여 공진에서의 액적이 증발에 미치는 영향에 대하여 분석하고자 다음과 같은 실험 과정을 수행하였다.

(1) 실린지 펌프를 사용하여 실리콘 웨이퍼표면 위에 5 μ l의 액적을 생성시킨다.

(2) 주위와 기관의 온도차에 의한 증발을 최대한 줄이기 위해 아크릴 챔버를 설치하고 Heater를 이용하여 25°C \pm 1°C, 30% \pm 5%로 유지하였다.

(3) 함수 발생기(function generator, 33522A, Agilent)와 증폭기(EP4000, Behringer)를 사용하여 약 8배 증폭시킨 50mV_{rms}의 전압을 인가시킨 후, 이론식을 통해 구한 각 모드의 고유진동수 값에 맞춘다.

(4) 주파수를 조절하면서 초고속 카메라로 액적의 진동형상을 관찰하여 액적의 실제 공진주파수를 찾는다.

(5) 초고속카메라 2 대를 사용하여 액적 최상단 로브 및 기관의 수직변화를 동시에 촬영한 후 진동주기를 비교한다.

(6) 공진에서의 증발과정을 초고속 카메라로 60초 단위로 촬영하고, DSLR로 내부유동의 유선을 1.6 ~ 2초간 촬영하였다.

(7) 반복실험을 통해 얻은 이미지를 상용프로그램 MATLAB®, Insight 4G 그리고 Image J 를 이용하여 액적의 로브크기, 내부 속도 그리고 증발률을 구한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이론 및 실험 공진주파수 비교

본 연구에서 사용된 이론적 고유진동수식은 자유액적의 Lamb 식과 접촉선이 고정된 오목한 고체면에서의 Strani and Sabetta 식을 사용하였다. 두 가지 고유진동수 이론식을 사용한 이유는 실험한 네 가지 공진모드 중 특정 모드에서 접촉선

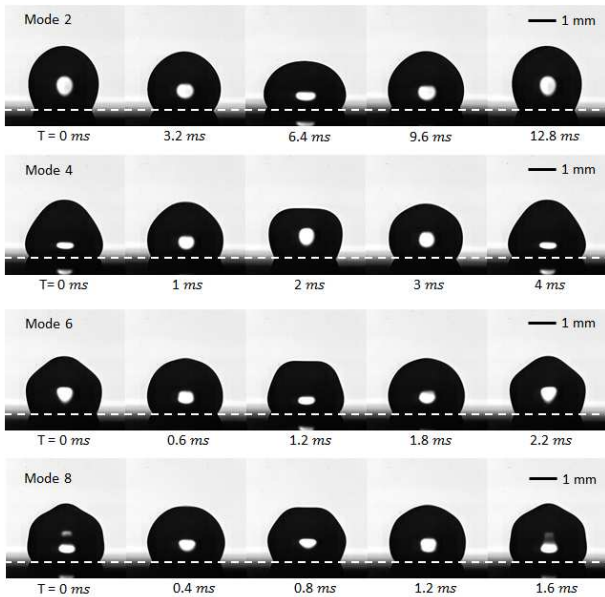


Fig. 5 Instantaneous shapes of droplets during one period of oscillation at modes 2, 4, 6 and 8

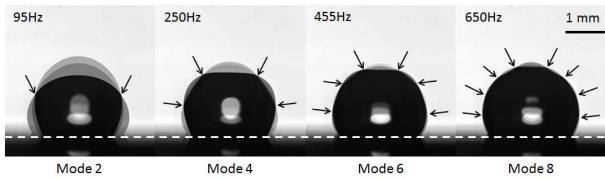


Fig. 6 Pattern of drop oscillation that are obtained by superposing 5 images at 50 mV for resonance frequencies, f , of 95, 250, 455, and 650 Hz

이 고정 또는 비고정 되는 현상이 나타나므로 보다 정확한 비교를 위해 위의 식들을 사용하였다.

Table 1은 모드별 고유진동수 이론값과 실제 공진주파수 값 비교이다. 표에서 볼 수 있듯이 오차율이 -0.2~20.1%이고, 네 가지 공진 모드에서의 실험적 공진주파수 값은 이론값보다 낮은 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 상대적으로 Strani and Sabetta의 이론값이 Lamb의 이론값보다 실험값과 가까운 것을 알 수 있는데, 이는 고체면과 접촉하는 액적의 실험조건이 Strani and Sabetta의 실험과 비슷한 조건을 가지며 특히 8차 모드의 경우에는 접촉선이 고정되므로 이러한 차이는 액적의 진동 시 가질 수 있는 형상에 큰 변화를 주므로 보다 정확한 비교를 위해서 위의 두 가지 이론식을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 그리고 이론적 고유진동수 값과 실험적 공진주파수 값의 오차가 발생하는 원인으로서 액적과 고체면 그리고 기체의 3상

Table 1 Comparison of Predicted Frequencies with Experiments

n	Resonance frequency (Hz)			Difference (%)	
	Theory		Experiment	Lamb	Strani& Sabetta
	Lamb	Strani& Sabetta			
2	98.3	94.8	95	3.4	-0.2
4	294.8	284.5	250	15.2	12.1
6	538.3	519.3	455	15.5	12.4
8	822.3	793.3	650	20.1	18.1

(three phase)이 동시에 만나는 접촉선의 운동 여부로 인한 액적의 동적특성 영향, 액적 주위 환경(온·습도 차이 등), 표면의 불균일성과 거칠기에 따른 접촉선의 국부적인 고정현상, 실린지 바늘의 탈착 시 액적 부피의 감소에 의한 부피변화 등으로 인해 차이를 보인다고 판단된다.

각각의 진동 모드에서의 공진주파수 값은 이론 고유진동수식의 주변부 주파수영역대에서 로브의 진폭이 가장 큰 지점을 측정된 값이다. 2, 4, 6 그리고 8차 진동 모드의 로브 크기변화량은 약 0.28mm, 0.24mm, 0.2mm, 0.13mm로 측정됐고, 각각의 공진을 제외한 주변부 주파수영역대에서는 액적로브의 크기변화량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 액적의 로브 크기는 주파수에 영향을 받고 특히 공진에서 가장 큰 로브 변화량을 나타냄을 알 수 있었다.

3.2 액적의 모드별 형상 및 내부유동특성

본 연구에서의 모든 실험은 50 mV의 전위차를 스피커에 인가하여 진행하였고, 유동가시화 실험을 통해 진동하는 소수성 표면에 놓인 액적의 모드별 형상 및 내부유동패턴 변화를 확인하였다.

Fig. 5는 네 가지 공진 모드에서의 액적 형상 변화를 주기에 따라 나타낸 것이며, 각각의 모드별 이미지를 확인해보면 형상이 다름을 확인할 수 있다. 진동주기는 12.8, 4, 2.2, 1.6 ms로 진동하며 모드 수가 증가할수록 주기가 급격히 빨라짐을 알 수 있었다. 그리고 네 가지 진동 모드에서의 로브 변화를 보다 자세히 관찰하기 위해 한 주기에 해당하는 이미지들을 중복하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 모드 수가 증가할수록 로브 크기가 줄어들지만 반대로 개수가 증가하였고 이로 인해 네 가지 모드가 각

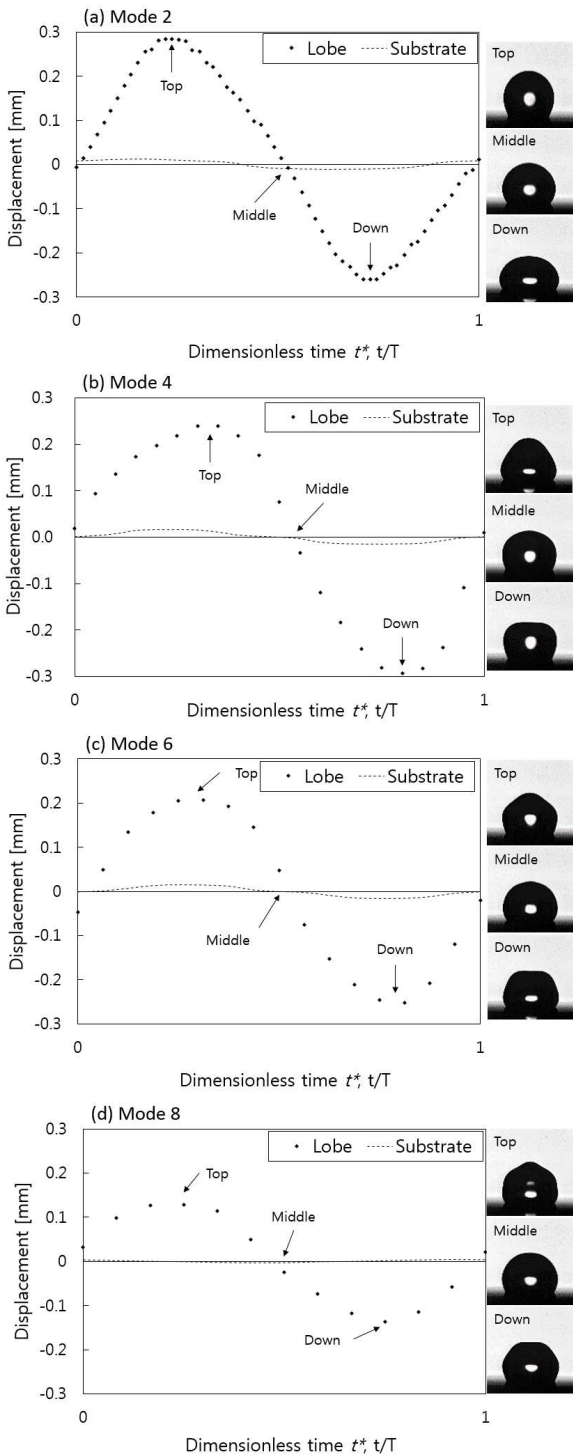
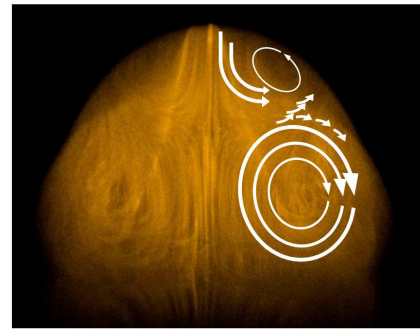


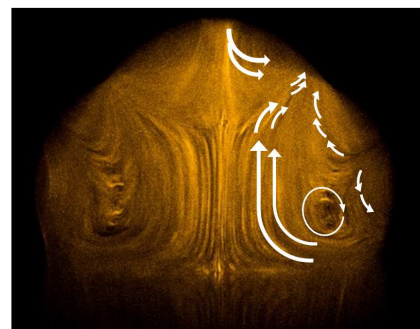
Fig. 7 Displacement of the lobe and substrate at modes 2(a), 4(b), 6(c), and 8(d), respectively

기 다른 형상을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 화살표로 노드(node)점을 표시하여 모드의 구별을 쉽도록 하였고, 노드개수 또한 2, 4, 6, 8 개 순으로 증가하였다.

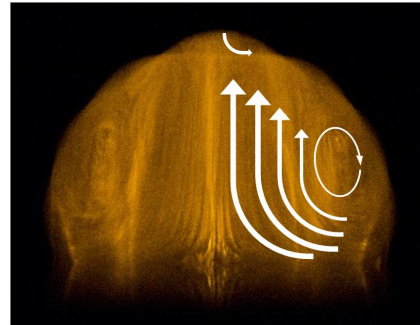
Fig. 7은 액적이 놓인 실리콘 웨이퍼를 강제



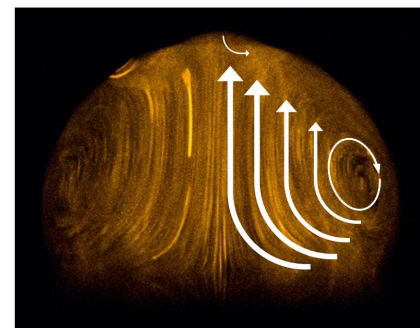
(a) Mode 2



(b) Mode 4



(c) Mode 6



(d) Mode 8

Fig. 8 Frequency dependence of flow pattern for 50 mV. The exposure time is 1.6 ~ 2 s

진 하였을 때 액적의 최상단 로브 및 웨이퍼 표면의 수직변위를 측정하였다. x축은 시간, y축

은 로브와 웨이퍼의 진동변위를 나타내는데 그래프에서 볼 수 있듯이 모든 공진 모드에서 일정한 주기성을 띄는 것을 알 수 있다. 특히 액적과 실리콘 웨이퍼의 수직 진동주기가 일정하다는 것은 이후 액적 내부 특정지점에서의 PIV 계산시 정당성을 부여할 수 있다. 예를 들어 2차 모드, 첫 번째 주기의 첫 이미지와 다음 주기의 같은 첫 이미지는 위상이 같고, 기관의 위치 또한 동일하기 때문에 액적 내 형광 입자의 이동을 추적함으로써 액적 내 속도를 계산할 수 있다.

Fig. 7에서 실리콘 웨이퍼의 변위를 나타낸 사인곡선을 보면 기관의 진동변위는 각각의 공진에서 로브크기와 비례하지 않지만, 뒤에서 언급할 액적 내부 속도와 관련하여 기관의 진동변위가 액적 내부유동 속도에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었고 이에 대한 자세한 설명은 Table 2와 함께 뒤에서 기술할 예정이다.

액적 내부 유동패턴 이미지인 Fig. 8을 보면 각각의 모드에서 공통적으로 액적 중심축을 기준으로 와류(vortex)와 함께 좌우 대칭인 유동패턴이 나타나지만, 모드 수가 증가할수록 액적 하단에서 거의 최상단의 위치까지 상승하는 유동흐름을 확인할 수 있다. 그리고 2차, 4차 모드에서는 양측 노드점으로 흐르는 분기형 유동패턴, 6차, 8차 모드에서는 큰 타원형 와류가 발생했다. 여기서 좌우 대칭으로 나타나는 유동패턴은 액적의 형상을 결정짓는 로브의 크기 및 개수가 액적 중심축을 기준으로 좌우에 동일하게 발생하기 때문인 것으로 짐작할 수 있다. 또한, 각각의 모드에서 생성되는 유동패턴을 살펴보면 4차 모드의 진동형상이 다른 유동패턴들과 비교해 보았을 때, 가장 복잡하면서도 생성된 로브들이 진폭이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 이 후 진동증발실험에서 증발률이 가장 빠른 4차 모드의 근거 중 하나로, 주위 공기와의 접촉이 가장 활발하며 차후 명확한 이론적인 접근이 필요한 부분이다.

Table 2는 2, 4, 6, 8차 모드의 평균 및 섭동속도를 측정된 값으로 앞서 언급한 것과 같이 위상이 같은 두 개의 이미지와 초고속 카메라를 이용하여 이미지 간의 시간을 계산하여 액적 내 형광 입자의 이동변위를 상용프로그램인 Insight 4G와 Tecplot 소프트웨어를 사용하여 값을 구하였다. 그러나 액적 자체 굴절률과 진동으로 인해 초고속 카메라로 얻은 액적 형상은 상당한 왜곡을 포

함하고 있다. 이러한 형상 왜곡의 보정은 보다 정확한 속도 측정에 중요한 요소이고, Kang 등⁽²⁹⁾ 등이 개발한 렌즈효과보정 방법과 같이 실제적인 형광입자의 위치를 파악하는 것이 가장 중요하다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 반구형상 액적의 가장자리를 이용한 렌즈효과보정방법을 적용하기 위해 각각의 진동 모드에서 액적의 형상이 최대한 반구에 가까운 이미지를 선택하였고, 보정된 이미지는 액적 내부 전체가 아닌 액적 하단 특정영역(0.2h~0.4h)을 액적의 정중앙에서 수직축을 중심으로 수직상승 특정 영역에 국한하여 필요한 속도성분들을 측정하였다. PIV 측정결과는 4회 실험을 평균한 값으로 4차 공진모드에서의 속도가 0.47 mm/s로 가장 빠르고 2, 6, 8차 모드는 0.11, 0.25, 0.35 mm/s로 측정되었다. 유동속도가 최대는 4배 이상 최소 2배 정도 차이가 나타나는데, 액적의 진동주기와 기관의 변위크기에 따라 유동속도에 영향을 미치고 또한 진동 시 발생하는 로브들이 각 위치에서 진동하면서 내부 유동흐름을 방해하기 때문이라고 유추해 볼 수 있다. 특히 로브가 클수록 그 영향을 클 것이며 모드 수가 증가할수록 로브크기가 작아지기 때문에 6, 8차 모드에서는 주기에 의한 영향이 크다고 볼 수 있다.

3.3 액적의 진동 모드별 증발률 비교

Fig. 9는 4차 진동 모드와 자연 증발 과정을 시간에 따라 액적 단면을 가시화한 것이다. 그리고 정확한 증발률 측정을 위해 네 가지 진동 모드에서는 약 0.5s 간 가진을 멈추었고, 초고속 카메라의 저속도 촬영(time-lapse) 기능을 이용하여 이미지들을 촬영하였다. 또한, 모드별 증발 비교실험에서는 액적내 가시화가 불필요하여 형광입자를 섞지 않았다. Fig 9에서 알 수 있듯이 시간이 흐름에 따라 액적의 부피가 자연 증발보다 4차 진동모드에서 급격히 변화하고, 접촉 반지름 역시

Table 2 Frequency dependence of the average internal flow speed at specific position

	Mode 2	Mode 4	Mode 6	Mode 8
Speed (\bar{u} , mm/s)	0.11	0.47	0.25	0.35
u_{rms}/\bar{u}	0.073	0.055	0.084	0.08

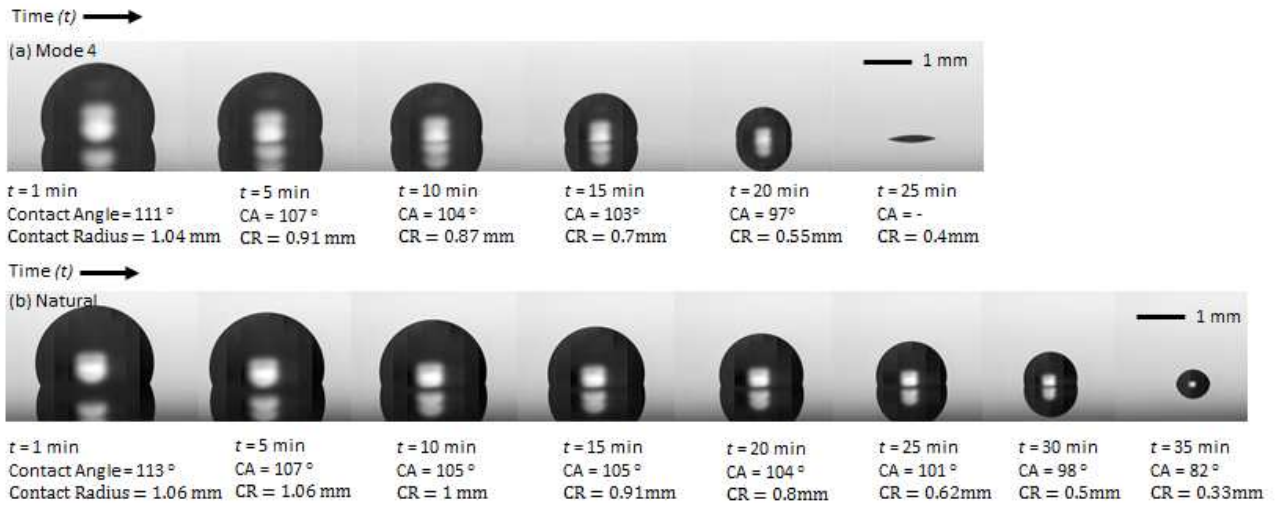


Fig. 9 The images of evaporating droplet from time-dependent. (a) Mode 4, (b) Natural

빠르게 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 4차 진동모드의 경우 약 25 min, 자연증발은 약 35 min이 지난 후에는 반구 형상의 액적을 관찰할 수 없었다.

Fig. 10은 시간에 따른 액적의 부피 변화 그래프이다. Fig 10(a)는 자연 증발, 4차 진동 모드 그리고 주위 주파수 영역을 비교한 것으로 눈에 띄게 4차 모드에서 부피가 급격히 줄어들고, 주위 주파수 영역(230, 240, 260, 270 Hz)의 부피는 비슷하게 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig 10(b)는 네 가지 진동 모드와 자연 증발을 비교한 그래프로 6, 8차 모드는 상당히 비슷한 부피변화를 가지며 2차 모드는 네 가지 모드 중에서 가장 느리게 부피가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 공진 주파수와 주위 주파수에서의 액적의 초기 접촉 반지름(r_0)을 기준으로 무차원 높이 (h^*)와 무차원 접촉 반지름 (r^*)을 나타낸 그래프이다. 먼저 액적의 무차원 높이는 로그 스케일로 표현하였고, Fig 13(b)에서 볼 수 있듯이 주위 주파수 영역보다 공진에서 빠르게 높이가 줄어들고, 2, 6, 8차 모드 또한 확연히 구분할 수 있다. 그리고 무차원 접촉 반지름 그래프에서 자연 증발 과정을 보면 Picknett and Bexan⁽³⁰⁾이 정의한 증발 3단계 중 1단계 즉, 액적의 접촉선이 고정된 상태에서 접촉각만 변화하는 단계를 확인할 수 있었다. 그러나 대부분의 진동 증발 과정에서는 1, 2단계가 복합적으로 이루어지는 것을 알 수 있다. 액적이 진동하면서 팽창 및 수축하는 슬립스틱(slip-stick)현상이 나타나는데, 보통 공

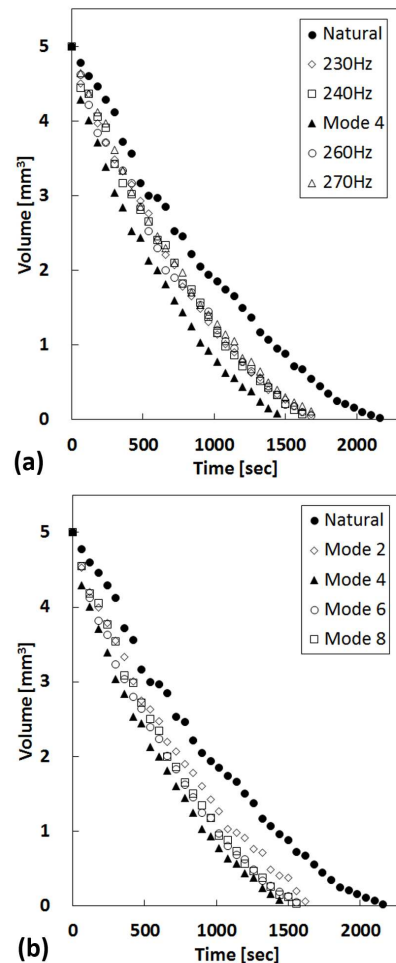


Fig. 10 The variation of volume of a sessile droplet by time with the ranges (a) of 230-270 Hz, and (b) from resonance frequencies

진에서는 현상 발생 시 접촉선이 활발하게 움직이고 공진과 멀리 떨어진 주파수에서는 상하로의

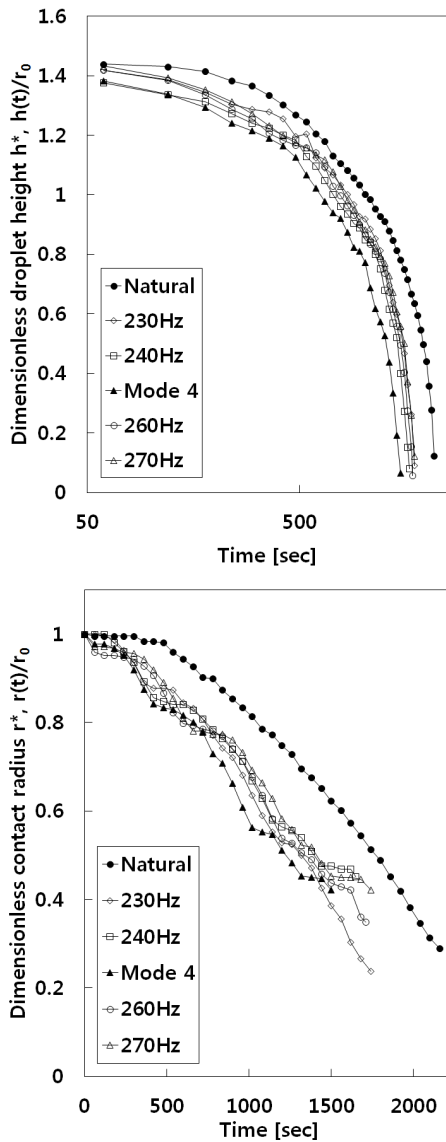


Fig. 11 Dimensionless height and contact radius of evaporating droplet on hydrophobic surface at Mode 4. The initial contact radius of droplet is 2.12 mm

진동만 있을 뿐 접촉선이 고정되기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다.

Fig. 12 는 2, 4, 6, 8차 모드와 그 주위 주파수 영역에서의 증발률을 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 각각의 진동 모드에서 주위 주파수 영역에서보다 증발이 급격히 빠른 것을 알 수 있고, 특히 4차 진동모드에서 증발률이 가장 빠른 것을 확인할 수 있었다. 4차 진동 모드의 증발률이 빠른 이유는 액적 내부에서 발생하는 빠른 유동속도, 로브 진동으로 인한 복잡한 유동패턴, 접촉선 운동 등에 의해 주위 공기와의 열 및 물질

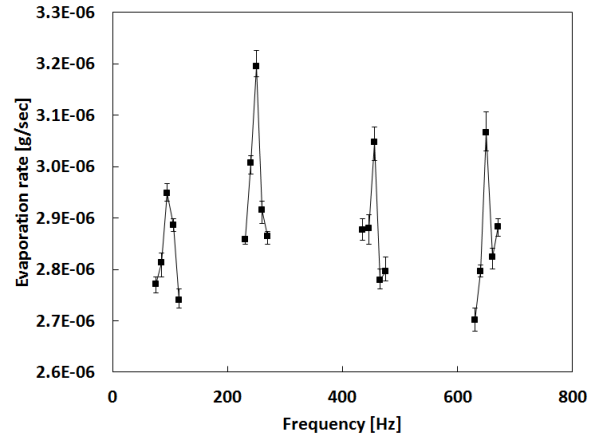


Fig. 12 Variation of evaporation rates at mode and neighboring frequency

전달이 활발히 일어나는 것으로 짐작할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 소수성 표면에 진동을 가할 때 탈이온수 액적의 모드(2, 4, 6, 8)별 내부유동 및 증발 특성을 파악하고, 공진을 통한 액적의 증발을 유도하고 자연 증발과 비교함으로써 효율적인 열 및 물질전달에 대한 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 Lamb와 Strani and Sabetta의 이론적 고유 진동수식을 사용하여 실제 실험적 공진주파수 값과 비교하였고, Strani and Sabetta의 고유 진동수식이 실험값과 보다 근사하다는 것을 확인하였다. 그리고 오차율은 -0.2~20.1%로 나타났고, 공진에서의 액적 형상변화는 주위 영역대보다 활발하게 변화함을 관찰하였다. 그리고 진동 모드가 변함에 따라 2차, 4차 모드에서는 양측 노드점으로 흐르는 분기형 유동패턴과 6차, 8차 모드에서는 미소한 크기차이의 큰 타원형의 와류가 나타났다. 또한 액적의 중심축을 기준으로 좌우 동일한 유동패턴 나타는 것을 확인하였다. 모드별 액적 하단 특정영역에서의 속도장은 4차 모드가 가장 빠른 유동흐름을 가졌는데, 이는 액적의 진동주기, 기관의 진동변위 그리고 로브들이 진동하면서 액적 내부에 미치는 이러한 요인들로 인해 위와 같은 결과를 보인다는 것을 유추할 수 있었다.

네 가지 진동 모드에서의 증발률은 4차, 8차, 6차, 2차 모드 순서로 빨랐으며, 각각의 공진은 그 주위 주파수 영역에서보다 빠른 증발률을 보였다. 그 이유는 3상이 만나는 지점에서의 Slip-Stick 현상으로

인한 표면마찰, 보다 큰 진동형상 그리고 액적 내부의 복잡한 유동패턴과 속도로 인한 것으로 보인다. 그래서 액적의 진동을 이용한 증발은 공진에서 이루어져야 하며, 특히 4차 공진에서 진행되어야 가장 빠르게 증발이 가능하다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 공진에서의 액적 내부 유동과 증발에 관한 결과는 향후 액적 기반의 미세유체 시스템 분야에서 기초적인 자료가 될 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2013R1A1A2005347). 또한, 본 연구는 "산업통상자원부," "한국산업기술진흥원," "동남지역사업평가원"의 "광역경제권 선도산업 육성사업"으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kelvin, 1890, *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 3, Clay, pp. 384.
- (2) Rayleigh, L., 1894, *The Theory of Sound*, Macmillan, New York.
- (3) Lamb, H., 1932, *Hydrodynamics*, Cambridge Univ. Press, New York, pp. 475.
- (4) 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.
- (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) McHale, G., Elliott, S. J., Newton, M. I., Herbertson, D. L. and Esmer, K., 2009, "Levitation-Free Vibrated Droplets: Resonant Oscillations of Liquid Marbles," *Langmuir*, Vol. 25, pp. 529~533.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Wachters L. and Westerling N., 1966, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," *Chem. Eng. Sci.* Vol. 21, pp. 1181.
- (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) Wilkes, E. D. and Basaran, O. A., 1997, "Forced Oscillations of Pendant (Sessile) Drops," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp. 1512~1528.
- (16) Kim, H. Y., 2004, "Drop Fall-off from the Vibrating Ceiling," *Phys. Fluids*, Vol. 14, pp. 474.
- (17) Brunet, P., Eggers, J. and Deegan, R. D., 2007, "Vibration-Induced Climbing of Drops," *Phys. Rev. Lett*, Vol. 99, pp. 144501-1~4.
- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) Makino, K. and Michiyosi, I., "The Behavior of a Water Droplet on Heated Surfaces," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 27, pp. 781~791.
- (21) Scriven, L. E. and Sternling, C. V., 1960, "The

- Marangoni Effects" *Nature*, Vol. 187, pp. 186~188.
- (22) Hu, H. and Larson, R.G., 2006, "Marangoni Effect Reverses Coffee-Ring Depositions," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, pp. 7090~7094.
- (23) Xu, X. F. and Luo, J. b., 2007, "Marangoni Flow in an Evaporating Water Droplet," *Appl. Phys. Letter*, Vol. 91, pp. 124102.
- (24) Wang, H. T., Wang, Zh. B., Huang, L. M., Mitra, A. and Yan, Y. S., 2001, "Surface Patterned Porous Films by Convection-Assisted Dynamic Self-Assembly of Zeolite Nanoparticles," *Langmuir*, Vol. 17, pp. 2572~2574.
- (25) Truskett, V. and Stebe, K. j., 2003, "Influence of Surfactants on an Evaporating Drop: Fluorescence Images and Particle Deposition Patterns," *Langmuir*, Vol. 19, pp. 8271~8279.
- (26) Oh, J. M., Legendre, D. and Mugele, F., 2012, "Shaken not Stirred - On Internal Flow Patterns in Oscillating Sessile Drops," *Europhysics Letters*, Vol. 98, pp. 34003.
- (27) Lee, S. M. and Kang, I. S., 1999, "Three-dimensional Analysis of the Steady-state Shape and Small-amplitude Oscillation of a Bubble in Uniform and Non-uniform Electric Fields," *J. Fluid. Mech*, Vol. 384, pp. 59~91.
- (28) Oh, J. M., Kim, P. J. and Kang, I. S., 2001, "Chaotic Oscillation of a Bubble in a Weakly Viscous Dielectric Fluid under Electric Fields," *Phys. Fluids*, Vol. 13, No. 10, pp. 2820~2830.
- (29) Kang, K. H., Lee, S. J., Lee, C. M. and Kang, I. S., 2004, "Quantitative Visualization of Flow Inside an Evaporating Droplet using the Ray Tracing Method," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 1104~1112.
- (30) Picknett, R. G. and Bexon, R., 1976, "The Evaporation of Sessile or Pendant Drops in Still Air," *Journal of colloid and Interface Science*, Vol. 61, No. 2, pp. 336~350.