

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.4.337>ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

진동하는 평판 위의 액적의 형상 진동 및 제거 조건에 대한 연구

신 영 섭* · 임 희 창**

* 부산대학교 기계공학부

Shape Oscillation and Detachment of Droplet on Vibrating Flat Surface

Young-Sub Shin* and Hee-Chang Lim**

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

(Received November 16, 2013 ; Revised January 22, 2014 ; Accepted January 22, 2014)

Key Words: Contact Angle(접촉각), Contact Line(접촉선), Droplet(액적), Neighbor Frequency(주변부 주파수), Resonance Frequency(공진 주파수), Secondary Droplet(미소 액적), Shape Oscillation (형상 진동), Wagging Motion (좌우 흔들림)

초록: 본 연구는 주기적 강제 진동이 가해지는 표면의 액적 모드 특성과 표면에 놓인 액적의 제거에 대한 조건을 실험적으로 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 액적의 거동을 명확하게 관찰하기 위해 아크릴 표면에 Teflon 코팅을 진행하여 접촉각을 높였고, 히스테리시스는 25도 이내로 진행하여 액적의 거동이 보다 쉽게 진행되도록 하였다. 본 실험은 먼지가 적은 청정실에서 실험이 진행되었다. 제작된 소수성 표면에 놓인 액적의 실제 공진 주파수를 예측하기 위해 이론 및 실험적 해석을 통해 두 접근방법의 타당성을 파악하였으며, 두 개의 초고속카메라를 액적의 상면과 측면에 설치하여 2가지 측면에서 액적의 다양한 형상 변형 특성- 모드 형상, 분리, 미소 액적의 발생, 그리고 좌우 비틀림의 특성을 관찰하였다. 이론 값 비교결과 실제 공진 주파수 값들의 차이가 약 18% 이하로 관찰되었으며, 이러한 차이는 접촉선 마찰, 비선형 벽 고착, 실험의 불확실성 등에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 사용된 스피커에 상대적으로 낮은 전압을 인가할 경우 액적의 접촉선은 고정된 상태에서 좌우 대칭적인 액적 형상진동이 나타났다. 반면, 높은 전압을 인가할 경우 액적의 접촉선은 비고정된 상태가 되면서 더 활발한 형상 진동이 나타났다. 가진 주파수가 모드 주파수와 일치할 경우에는 액적의 로브 크기가 주변부 주파수 일 때 보다 비교적으로 컸으며, 같은 전압을 인가 할 경우, 표면에 놓인 액적의 미소 액적 발생 및 완전한 제거는 2차 모드에서만 진행되는 것을 실험을 통해 규명하였다.

Abstract: This study aimed to understand the mode characteristics of a droplet subject to periodic forced vibration and the detachment of a droplet placed on a plate surface. An surface was coated with Teflon to clearly observe the behavior of a droplet. The contact angle between the droplet and surface and the hysteresis were found to be approximately 115° and within 25°, respectively. The coating process was performed in a clean room that had an environment with a low level of contaminants and impurities such as air dust, detergents, and particles. To predict the resonance frequency of a droplet, theoretical and experimental approaches were applied. Two high-speed cameras were configured to acquire side and top views and thus capture different characteristics of a droplet: the mode shape, the detachment, the separated secondary droplet, and the wagging motion. A comparison of the theoretical and experimental results shows no more than 18 discrepancies when predicting the resonance frequency. These differences seem to be caused by contact line friction, nonlinear wall adhesion, and the uncertainty of the experiment. For lower energy inputs, the contact line of the droplet was pinned and the oscillation pattern was axisymmetric. However, the contact line of the droplet was de-pinned as the oscillation became more vigorous with increased energy input. The size of each lobe at the resonance frequency is somewhat larger than that at the neighboring frequency. A droplet in mode 2, one of the primary mode frequencies, exhibits vertical periodic movement as well as detachment and secondary ejection from the main droplet.

- 기호설명 -

† Corresponding Author, hclim@pusan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

 f_n : n차 모드에서의 공진 주파수

- R : 액적의 반지름
 σ : 표면장력
 ρ : 액적의 밀도
 ϵ : 진동 시 발생하는 액적의 작은 변화량
 P_n : n차 형상 모드
 n : 모드 수($n=2,4,6,8$)

1. 서 론

최근 표면 위에 놓인 액적의 거동에 대한 연구는 미세 유체역학의 기초 및 응용 분야와 관련하여 많은 실험적인 흥미를 가지고 있다. Lord Rayleigh의 강제 진동에 의한 비압축성·비점성 액적의 공진 진동에 대한 연구⁽¹⁾와 선형적인 에너지 안정 분석(Linearized energy stability analysis)을 사용한 미세액적의 모세 현상(The capillary phenomena)에 대한 연구⁽²⁾를 시작으로, 액적의 강제 진동 형태에 대한 이론 및 실험적인 연구가 진행되었고^(3,4) Rodot, Bisch & Lasek⁽⁵⁾에 의한 실험적 연구 역시 강제 진동에 대한 액적의 진동 형태를 규명하고자 하였다. 이 연구에서는 무중력의 조건을 만족시키기 위해 원통형 고체 표면에 부착된 물방울을 섞이지 않은 액체(Immiscible liquid)에 담겨 실험을 했으며 원통형 고체 반지름의 1/3보다 작은 1mm의 진동 범위와 10Hz의 강진 주파수의 조건으로 실험을 진행하였다. 이러한 조건하에 액적의 5가지 공진 모드를 규명하였고 고체에서 물방울이 떨어지는 형태 또한 관찰하였다. 그리고 Wilkes & Basaran⁽³⁾는 유한 요소법(Finite-element method)를 사용하여 액적의 강제 진동에 대한 수치해석을 진행하였다. 그들의 모델에서는 수동형 주위가스에 둘러싸여 수직으로 강제 진동하는 고체 표면 위에 놓인 액적의 조건과 표면의 반지름(5mm)의 20%보다 작은 표면 진동 진폭과 13g보다 작은 가속도로 강제 진동의 조건하에 수치 해석을 진행하였다. 본 연구와 관련 충격해석적인 연구로 국내에서 이루어진 기록은 김현실 등⁽³⁰⁾에 의해 이루어진 바 있다.

그 후로 수직 또는 수평 방향으로 진동하는 액적의 공진 형상 변화에 대한 특성⁽⁶⁻¹⁰⁾와 전기적 에너지가 가해지는 액적의 운동특성에 대한 연구⁽¹¹⁻¹³⁾가 많이 이루어지고 있다. 최근 들어서는 제트 엔진 내부의 연료실,⁽¹⁴⁾ 디지털 미세유체 기술(Digital microfluidics),⁽¹⁵⁾ 전기습윤 디스플레이(Electrowetting display),^(16,17) 냉난방 및 환기장치

(HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning system)와 발전 설비(Power plant)의 응축기를 포함한 산업현장에 응용되고 있다. 전기습윤 디스플레이(EWD) 경우, 소수성 절연막(Hydrophobic insulator)이 덮인 전극 표면(Electrode substrate) 위에 놓인 전극을 띄는 액적에 전압을 가하게 되면 소수성에서 친수성으로 변하게 되는 원리를 이용한 것으로서, 미세 유체역학의 응용 분야의 대표적인 예이다. 또한 응축기의 파이프 관내에 발생된 액적을 효과적으로 제거함으로써 열전달과 관련된 최대의 효율을 증가시키고, 여름철 자동차 에어컨 가동으로 인해 습해진 에바 코어(Evaporator) 표면 위에 발생하는 액적을 제거함으로써 곰팡이 및 먼지 층의 발생을 방지하는 등 액적의 거동 및 제거에 대한 연구는 응용 기술 및 액적 기반의 미세 유체 시스템(Droplet-based microfluidic system)관련 분야에 대한 과학 발전에 크게 기여하고 있다. 이러한 이유로 벽의 상부에 매달려 있는 액적에 대한 연구^(3,18-19) 및 벽의 측면에 붙어 있는 액적에 대한 연구^(10,21) 뿐만 아니라 액적의 표면장력^(3,22)에 대한 측정 그리고 접촉각 측정⁽²³⁾과 관련된 연구도 활발히 진행되었다.

Strani와 Sabetta⁽²⁴⁾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 기초응용 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 않았으며, 표면에 놓인 액적의 제거에 대한 연구 또한 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 수직 방향으로 진동하는 소수성 평판 위에 놓인 액적의 공진을 측면과 상면에서 동시간에 관찰하는 동시에 가진 주파수를 바꾸어 가며 액적의 형상 변화 및 진동 패턴을 관찰하여 이론적 해석결과와 비교 및 분석을 수행하였으며, 표면 위에 놓인 액적이 효과적으로 제거될 수 있는 조건에 대한 실험 또한 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 테프론 표면 처리

주기적인 강제 고유 진동에 의해 발생하는 액적

Table 1 The contact angle(left, right and mean) of $5\mu\text{l}$ droplet on the hydrophobic flat surface

Number	CA (Left)	CA (right)	CA(mean)
1	114.35	114.36	114.36
2	114.47	114.38	114.43
3	114.47	114.40	114.44
4	114.34	114.33	114.34
5	114.41	114.37	114.40
Average	114.41	114.37	114.39

은 고체 표면 위에 놓여있는 액적의 접촉선 고정(Contact-line pinning)과 이력현상(Contact angle hysteresis) 효과를 극복할 수 있기 때문에 액적의 활발한 구동력을 유발시킬 수 있다.^(10,25) 이러한 효과를 극복시키는 동시에 액적과 고체표면의 접촉각을 크게 하여 액적의 활발한 구동 및 모드 진동을 명확히 관찰하기 위해서는 특수한 표면 처리를 해야 한다. 본 실험의 표면 처리과정은 허용 미립자경(μm)이 0.5mm 이하의 클린룸에서 아크릴의 표면 처리가 진행되었다. 아크릴 판 표면에 테프론 박막을 형성을 위해 6wt% 테프론 코팅액(AF-1600, Dupont)을 불화탄소용액(FC-40, 3M)와 섞어 농도가 1wt% 테프론 용액을 제조하였다. 표면 위에 테프론 박막을 형성하기 전, 아크릴 표면 위에 있는 먼지 및 이물질을 제거하기 위해 메탄올과 증류수에 유기 세척을 한 후 아크릴 표면의 물기 제거를 하였다. 표면 세척시, 아크릴 경우 유리와는 달리 쉽게 녹아내릴 수 있으므로 짧은 시간 내로 세척을 해야 한다. 또한 메탄올을 사용한 경우 표면에 상처가 발생하여 표면 코팅면에 영향을 줄 수 있기 때문에 본 실험에서는 메탄올과 증류수만을 사용하여 유기 세척을 하였다. 세척한 아크릴 판 위에 제조된 용액을 사용하여 500rpm에서 5초간 스핀 코팅을 한 후 다시 3000rpm 속도로 30초간 스핀 코팅하였다. 그 결과 $100\mu\text{m}$ 정도의 코팅두께를 가졌다. 본 실험에서 Fig. 1에서와 같이 CAM100 image 프로그램을 사용하여 평형 접촉각(Equilibrium contact angle)을 측정하였고 5번의 반복 실험을 통해 액적과 표면 사이의 평균 접촉각은 114도라는 것을 확인할 수 있었다.(Table 1)

2.2 진동 실험 과정

주기적인 강제진동을 하는 평판에 놓인 액적의

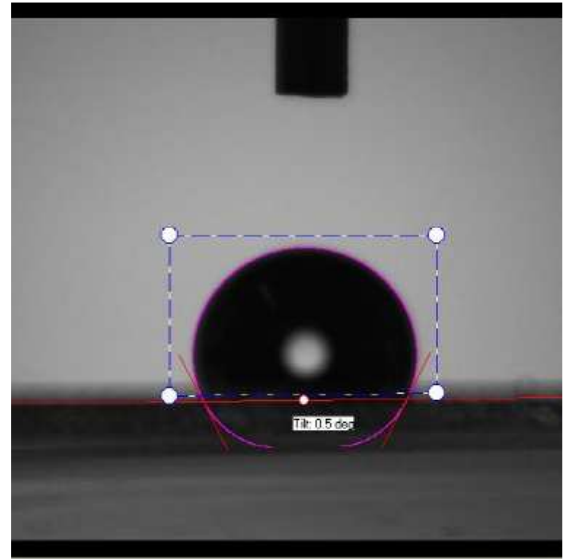


Fig. 1 the droplet on the hydrophobic surface which is manufactured in the cleanroom (CA : 114, contact line : 2.25 mm)

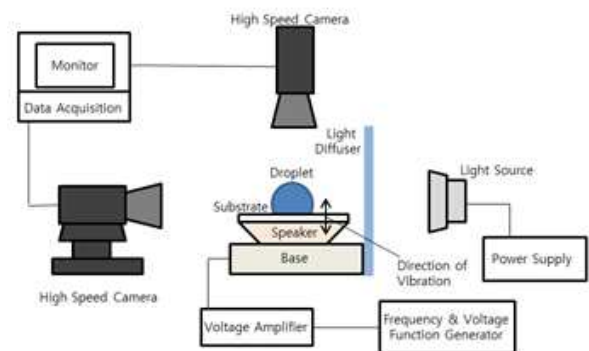


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental setup

수직 진동 특성을 확인하는 실험에 대한 시스템 구성도는 Fig. 2와 같다. 강제 가진을 주는 스피커(HIAX32C20-8, HiWave) 표면에 앞서 표면처리한 아크릴 표면을 아크릴 접착제로 붙인 후 주기적인 진동을 가할 수 있도록 설치하였다. 이번 실험에서 사용된 액적의 종류와 부피는 증류수(Deionized water)이고 $5\mu\text{l}$ 며, 다른 첨가물들은 기초 연구의 차원에서 사용하지 않았다. 가진 주파수와 여러 가지 전압 인가를 위해서 함수 발생기(Function generator, 33522A, Agilent)를 사용하여 일정한 정현파(Sinusoidal wave)와 특정 주파수와 전압을 인가할 수 있도록 설치하였으며 증폭기(EP4000, Behringer)에 연결하여 인가된 전압을 증폭시켜 스피커를 동작하도록 하였다. 본 실험에서, 함수 발생기에서 인가된 전압은 증폭기에서

Table 2 Comparison of resonance frequency of a $5\mu\text{l}$ droplet between theory and experiment (the theory is based upon the Lamb's equation and the experimental data is inferred from the vertical displacement of droplet)

Mode number (N)	Resonance Freq. (Hz) (experiment)	Resonance Freq. (Hz) (theory)	Difference (%)
2	98.9	100	1.1
4	296.77	250	15.7
6	541.83	440	18.8
8	827.66	665	19.6

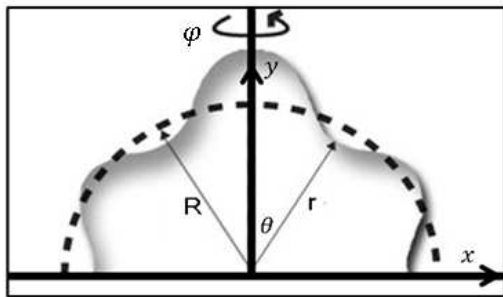


Fig. 3 The theoretical modeling for droplet on the surface when the vertical vibration occurs with small amplitude

스피커로 약 11배 증폭되는 것을 확인하였다. 본 스피커에 인가한 전압은 피크 투 피크 (Peak to peak)값으로 오실로스코프(GDS-2064, Gwinstek)를 통해 1~25V의 범위가 출력되는 것을 확인하였고, 초고속카메라(SA3 120K, Patron)를 고체 표면과 동일선상과 액적의 위에 위치시켜 측면(Side view) 및 상면(Top view)에서 액적의 형상변화 및 특성을 관찰할 수 있도록 하였으며, 시간에 따른 빠른 형상변화를 관찰할 수 있도록 대부분의 실험에서 초당 2,000 프레임의 속도로 액적의 움직임을 관찰하였으며 LED 램프와 확산 시트를 사용하여 액적의 외곽 표면을 더 효과적으로 볼 수 있도록 하였다.

본 연구에서 액적 형상 진동 변화를 관찰하기 위해 다음과 같은 실험 과정으로 실험을 수행하였다. 1) 마이크로 피펫을 사용하여 아크릴 판위에 액적($5\mu\text{l}$)을 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

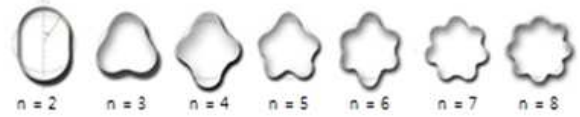


Fig. 4 the shape oscillation of a droplet at each mode

비교하였다. 특히 실험을 수행하는 과정에서 고려되어야 할 부분들 중 하나는 외부 온도 및 습도 차에 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 영향이 없도록 하였다.

2.3 이론적 배경

강제 진동에 의한 액적의 모드 주파수는 이론적 공식에 의해 이론값을 구할 수 있다. 비점성 및 비압축성의 특징을 가지는 자유 액적이 낮은 진폭 영역(Lower amplitude)에서 액적의 표면의 속도 포텐셜(Velocity potential)은 라플라스 공식(Laplace equation)과 경계 조건 공식(The boundary condition equation)을 만족한다.⁽²⁶⁾ Fig. 3과 같이 입체 기하학적으로 진동하는 액적의 표면 위의 임의의 지점을 구 좌표계(r, θ, ϕ)로 나타낼 수 있으며 이는 표면 조화 함수(Surface harmonic function)로써 표현이 된다. 액적의 중심을 원점으로 하여 표면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 R, P_n, C_n 그리고 ε 은 각각 액적의 반지름, n 차 형상 모드, 형상 모드의 진폭 그리고 진동 시 발생하는 미세 변화량을 나타낸다. P_n , 즉 n 차 형상 모드는 둥근 돌출부(Lobe)의 수에 따라 Fig. 4와 같이 표현 될 수 있다.⁽¹²⁾ P_1 은 액적의 중심부가 병진 운동^(27,28)을 하기 때문에 본 실험에서는 확인할 수 없어 생략하였다. 라플라스 공식과 경계 조건 공식에 n 차 표면 함수를 전개하면 공진 주파수($f_n = \omega_n/2\pi$)와 액적의 반지름과의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

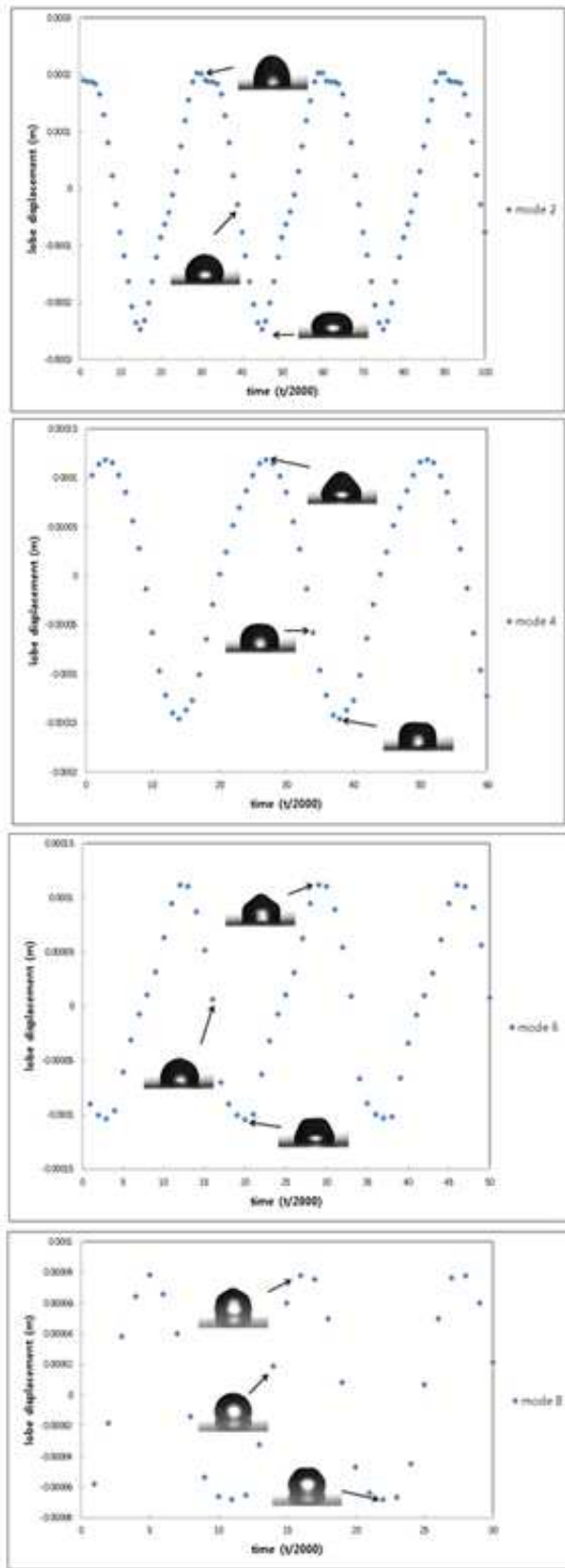


Fig. 5 Vertical displacement of lobe at mode number 2, 4, 6 and 8

여기서 σ, ρ, n 는 각각 액적의 표면 장력, 액적의 밀도 그리고 모드 수를 나타낸다. 본 실험에서 사용된 물의 표면장력, 밀도와 부피는 $0.07N/m$, $1000k/kg/m^3$, $5\mu l$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이론적 및 실험적 해석 비교

본 실험에 앞서 이론적인 접근방법으로 구한 공진 주파수는 실험적으로 관찰하여 서로 비교하였다. 실제 이론 공진 주파수의 값은 실험결과와 비교했을 때 기초 및 검증 자료에 특히 중요하다. 식 (2)를 통해 얻어진 각각의 이론 공진 주파수는 f_2, f_4, f_6, f_8 는 98.9, 296.77, 541.83, 827.66Hz로 계산되었다.

Table 2에서 보듯이 이론 공진 주파수 값과 실제 공진 주파수 값은 1~20%의 오차율을 보였다. 표에서 보듯이 실제 공진 주파수는 모드 2를 제외하고는 이론적 공진 주파수 보다 큰 주파수 값을 가진다는 것을 확인할 수 있고 공진 모드가 커질수록 이론값과 실험값의 오차율이 커진다는 것을 확인할 수 있다. 이론값과 실험값이 오차가 발생하는 이유는 고체표면과 액적 사이에서의 접촉선 마찰, 선형 해석이 고려되지 않은 벽면 고착,⁽¹²⁾ 그리고 실험에 대한 불확실성 때문인 것으로 판단된다. 실제 실험값을 얻기 위해 로브의 진폭 변화의 최대치를 찾는 방법을 이용하였다.

Fig. 5는 전압을 스피커에 인가시켰을 때 4개의 공진 진동 모드 ($n=2, 4, 6, 8$)형태에 따른 액적의 로브의 크기변화량을 나타낸 그래프이다. 10mV에서는 2차와 4차 진동 모드의 로브 크기변화량

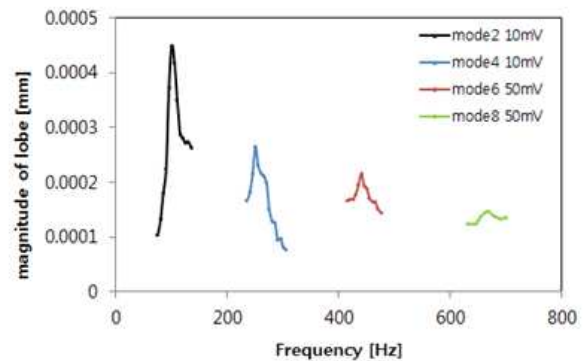


Fig. 6 Vertical displacement of lobe against the excitation frequency

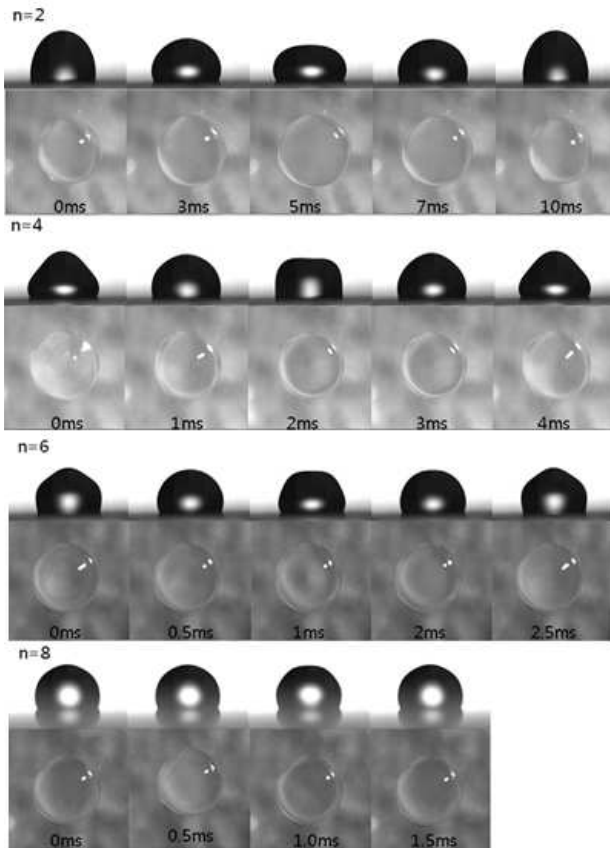


Fig. 7 shape oscillations of a droplet under the input voltage 10mV at the mode numbers

은 약 0.45mm, 0.26mm로 측정되었지만 6차 8차 진동모드에서는 10mV에서는 로브 변화량이 너무 작아 그래프 상에서 크기변화가 없어서 인가전압을 10mV에서 50mV로 증가시켰다. 그 결과, 로브 변화량은 각각 0.21mm, 0.14mm로 측정되었다. 모드 6와 8은 모드 2와 4에 비해 전압을 5배로 인가시켰지만 모드 2의 크기 변화량에 크게 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 방식으로 공진 주파수 뿐만 아니라 주변 주파수에서의 액적의 로브 크기 변화량을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 100, 250, 440, 665Hz 부근에서 로브 크기 변화가 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있었고 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 주파수의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었으며, 100, 250, 440, 665Hz 부근에서 최대 크기 변

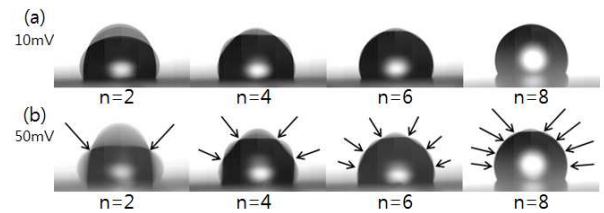


Fig. 8 Shape oscillation patterns that are obtained by superposing 20 images under 10 and 50mV at the mode numbers

형이 발생함에 따라 공진 주파수는 여러 주파수 영역에 존재하는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 공진 주파수 일 때의 로브 크기는 주변부 주파수 일 때의 로브 크기보다 몇 배 더 큰 것을 확인하였다.

3.2 액적의 모드 형상 및 움직임 변화 비교

Fig. 7는 낮은 전압, 10mV의 가진 전압 즉 스피커에 부착된 아크릴판의 변화 진폭이 낮은 조건에서 실험을 통해 얻어진 공진 모드주파수 ($f=100, 250, 440, 665\text{Hz}$)의 액적 진동 형상 모드에 대한 변화를 측면(Side view)과 상면(Top view)에서 관찰한 결과이다. 그림을 통해 각각의 공진 주파수에 따른 액적의 형상 진동 형태는 다르다는 것을 확인할 수 있으며, 액적의 진동 주기는 각각 10, 4, 2.5, 1.5 ms의 일정한 주기를 가지고 진동을 하며 공진 주파수(n)가 커질수록 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 액적의 중심부 상위로브의 범위가 모드 수가 커질수록 작아지는 것을 확인하였다 그리고 6과 8차 공진 모드에서는 2와 4차 공진 모드에 비해 액적의 외부 접촉선(Contact line) 형태가 원에 가까운 것을 확인할 수 있었다. 각 해당 주파수에 대한 로브 변화를 명확히 관찰하기 위해 Fig. 8(a)와 같이 시간 변화에 따라 진동하는 20개의 사진을 서로 합쳐 이미지를 재구성하였다. n차 모드 수가 커질수록 로브의 변화크기는 작아져 10mV에서는 모드 6와 8의 로브의 진폭 변화를 확인하기가 쉽지 않았다. 그래서 Fig. 8(b)에서는 보다 높은 전압, 50mV의 가진 전압을 주어 로브의 진폭을 증가시켰으며 보다 쉽게 모드 4와 6의 로브 개수를 확인할 수 있었다. 로브의 수가 다르다는 것을 확연히 구별하기 쉽도록 그림에 화살표를 표시를 하였다. 모드 2, 4, 6, 8에서 화살표의 개수는 2, 4, 6, 8로 증가하였고 로브 개수 또한 3, 5, 7, 9로

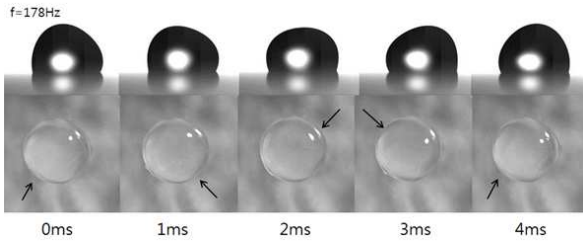


Fig. 9 Waggling motion of droplet under 10mV at 178Hz (the frequency between mode 2 and 4)

증가하였다.

그리고 다른 흥미로운 사실은 가진 주파수가 178Hz일 때 Fig. 9에서 보이는 것과 같이 액적의 진동 형태가 상하 운동(Vertical motion)이 아닌 좌우 비틀림(Waggling motion)이라는 점이다. 다른 주파수 영역에서의 진동 형태는 수직방향으로 액적이 수축 팽창을 반복하는 반면, 주파수 178Hz에서는 액적이 좌우 비대칭적으로 상반되는 비틀림 진동 형태를 가지는 것을 확인하였다. 이러한 움직임을 더 자세히 확인하기 위해 카메라의 위치를 위에 위치시켜 액적의 거동을 확인하였다. 그 결과, 다른 공진모드($n=2, 4, 6, 8$)의 주파수영역에서는 액적 중심부 로브가 수직 방향으로 진동하는 반면, 178Hz에서는 로브가 그림과 같이 표시된 화살표 방향으로 4ms의 주기로 회전하는 것을 확인하였다. 이 실험 결과를 통해 자유 액적의 진동 모드 형상이 실험을 통해 관찰된 여러 형상 진동 모드와 일치하였고 이 밖에도, 2차 공진모드와 4차 공진모드 주파수 사이에 존재하는 특정 주파수($f=178\text{Hz}$)에서의 액적 거동이 좌우 비틀림 운동이라는 점에서 수직방향으로 진동하는 판 위에 놓인 액적의 운동에는 수직적 운동뿐만 아니라 비틀림 운동 형태가 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 표면과 액적의 분리조건

Fig. 10은 200mV에서 공진 주파수(100Hz)와 주변부 주파수(80, 90, 110Hz)에서의 액적의 움직임을 나타낸 그림이다. t^* 는 진동 주기를 기준으로 무차원적 시간을 나타낸다. T는 액적의 진동 주기로써 Fig. 7에 명시되어있으며 t는 각각의 그림에 해당하는 진동 시간을 나타낸 것이며 그림에서 표시된 점선(Dotted line)은 임계선(Critical line)로서 이 점선을 기준으로 이전에는 수직으로 진동하는 운동이 계속 되지만 이후에서는 액적이

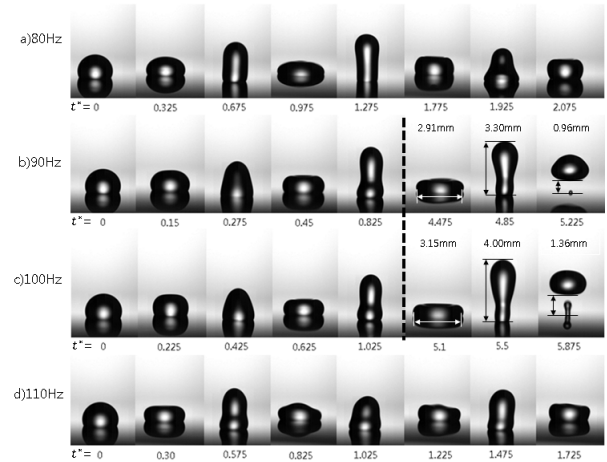


Fig. 10 Temporal shape variation($t^*=t/T$) of droplet under 200mV at a range of frequencies(i.e. resonance frequency : 100Hz and neighbor frequency : 80, 90, 110Hz)

최대로 팽창 및 수축이 일어나 표면에서 액적이 튀어오르는 지점을 표시하고 있다.

그림에서 확인할 수 있듯이, 80Hz에서 t^* 가 0.975일 때 액적은 외력에 의해 바닥에서 최대 퍼진 상태가 된다. 이 때 액적이 가지는 표면에너지가 최대가 되고, 이는 액적이 바닥에서 튀어오르기 위한 운동에너지와 위치에너지로 전환된다. 하지만 축적된 표면에너지가 액적이 표면에서 제거되기 위한 운동에너지 및 위치에너지로 전환되기에는 충분하지가 않아서 t^* 가 1.275에서는 액적이 표면에서 튀어오르지 않고 계속적으로 수축팽창운동을 하였다. 소수성 표면의 테프론 코팅액 입자로 인해 발생하는 접착 에너지(Adhesive energy)를 극복할 수 있는 충분한 에너지가 만들어지지 않았으며, 에너지 전환 과정에서 일부는 액적 내부 유동에서 소실로 인해 액적이 표면에서 떨어질 수 없다는 것을 유추할 수 있다. 하지만 90Hz를 인가시켜줄 경우, 액적이 2.91mm의 팽창과 3.30mm의 수축 운동 후에 액적이 표면에서 0.96mm만큼 튀어오르는 것을 확인할 수 있었고 공진주파수(100Hz)에서는 3.15mm의 팽창과 4.00mm의 수축 운동을 한 후 1.36mm로 도약하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 90Hz보다 더 큰 크기의 팽창수축운동 후 더 높게 표면에서 액적이 튀어오르는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이는 80Hz에서와는 달리 표면에서 액적이 튀어오를 수 있는 운동에너지와 위치에너지를 가졌으며 표면의 접착에너지를 극복하기에 충분한 에

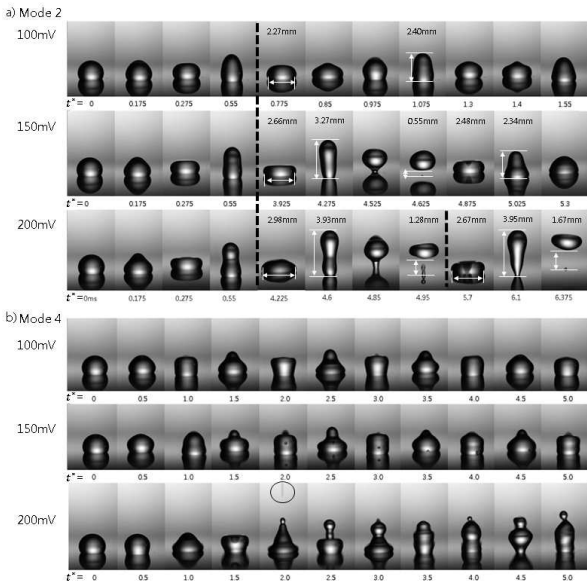


Fig. 11 Temporal shape variation($t^*=t/T$) of droplet under many amplitude at second mode and fourth mode frequency

너지임을 예측할 수 있다. 반면, 110Hz에서는 80Hz에서와 같이 표면에서 액적이 튀어오르지 못하고 접촉선이 비고정(Depinning)된 상태에서 계속적으로 팽창수축운동을 하는 것을 확인할 수 있다. 흥미로운 점은 액적이 표면에서 접촉에너지, 히스테리시스를 극복할 수 있는 최소한의 전압을 인가시켜주는 동시에 공진 주파수(100Hz)에서 액적의 움직임이 더욱 활발한 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 2차와 4차 공진 주파수에서 인가 전압을 증가시키면서 액적의 움직임을 관찰한 그림이다. Fig. 11(a)에서는 임계선(Critical line)을 기준으로 100mV에서는 계속적인 수축팽창운동이 진행되었지만 150mV와 200mV에서는 각각 t^* 가 3.925, 4.225에서 액적이 표면에서 도약하여 t^* 가 4.625, 4.95에서 약 0.55mm와 1.28mm를 뛰어올랐다. 그리고 200mV에서는 액적이 다시 공중에서 바닥으로 떨어진 이후 t^* 가 5.7에서 1.67mm만큼 다시 튀어오르는 것을 관찰하였다. 또한, 첫 번째 점핑현상에서는 4번의 수축팽창운동이 진행되었지만 두 번째 점핑현상에서는 1번의 수축팽창운동 이후 다시 표면에서 튀어오르는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 전압을 증가시킬수록 표면에 놓인 액적의 수축팽창운동이 원활하게 진행되면서 표면에서 도약하기 좋은 조건을 가지게 된다는 점을 확인하였다. 하지만 Fig. 11(b)에서 보듯이, 4

차 공진 주파수에서는 200mV를 인가시켰을 시 t^* 가 2.0에서 미세 액적(Secondary droplet)이 발생한 경우를 제외하고 표면에서 액적이 도약하여 튀어오르는 경우는 관찰할 수 없었고 계속적으로 대칭도 아닌 혼잡한 형상진동을 가지며 운동을 하는 것을 관찰하였다. 본 실험에서는 2차 및 4차 공진 주파수에서의 액적의 운동에 대한 가시화를 통해 표면에 놓인 액적을 제거하기 위해서는 2차 공진 주파수에서 진행되어야 된다는 점을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속카메라를 통해 수직으로 진동하는 소수성 표면에 놓인 액적에 공진 주파수($n=2, 4, 6, 8$) 및 주변부 주파수를 가했을 때 액적 형상 모드 및 액적 거동의 특징을 관찰하고 효과적인 액적 제거 조건에 대한 실험을 진행하였다. 본 실험에서 테프론 코팅액을 사용하여 소수성 표면을 제작하였고 제작된 소수성 표면은 낮은 히스테리시스(12°)와 높은 접촉각(114°)을 가졌으며 외부 힘에 의해 액적의 표면에너지가 운동에너지와 위치에너지로 전환시키는데 매우 효과적이었다. 기존의 이론식을 통해 이론 공진 주파수 값을 구하고 액적이 진동 시 발생하는 로브의 크기를 비교하는 실험을 통해 각 모드에 해당하는 실제 공진 주파수 값을 찾아서 비교 분석였다. 그 차이율이 1~20%라는 사실을 확인하였고 공진주파수에서 액적의 표면 형상크기 변화는 주변부 주파수에서의 크기 변화보다 더욱 활발하게 진동함을 실험을 통해 관찰하였다. 또한, 특정 주파수 영역에서 일정한 주기를 가지고 진동하는 상하 진동모드($f=100, 250, 440, 665\text{Hz}$)와 비틀림 진동모드($f=178\text{Hz}$)가 존재하는 사실을 확인함으로써 수직으로 진동하는 표면에 놓인 액적의 운동이 두 종류가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 4차 공진주파수를 인가 시 액적의 운동 형태는 200mV에서 미세 액적 발생한 것을 제외하고 표면에서 떨어지지 않고 혼잡한 모양의 진동 형태를 가지화하였다. 표면 위에 놓인 액적의 완전한 제거 조건으로는 액적이 표면에서부터 도약할 수 있는 운동에너지를 만들기 위한 최소 전압과 2차 공진 주파수에서 진행되어야 가능하다는 점을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 이는 미세유체역학 분야를 기본으로 하는 관련 산업에서 매우 중요

한 자료가 될 것이며 이를 응용하여 많은 발전이 있기를 기대한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부재원(지역혁신인력양성사업)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었다. 본 연구는 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원, 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다. 또한, 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20114010203080)

참고문헌

(References)

- (1) Lord Rayleigh, 1890, "The Theory of Sound," *Macmillan*.
- (2) Lord Rayleigh, 1879, "The Capillary Phenomena of Jets," *Proc R Soc*, Vol. 29, pp. 71~97.
- (3) Wilkes, E. D. and Basaran, O. A., 1997, "Forced Oscillations of Pendant (Sessile) Drops," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp. 1512~1528.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Noblin, X., Buguin, A. and Brochard-Wyart, F., 2009, "Vibration of Sessile Drops," *Eur. Phys. J. Special Topics*, Vol. 166, pp. 7~10.
- (10) 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.
- (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) 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.
- (14) Sadhal, S. S., Portonovo, S. A. and Jacob, N. C., 1996, "Transport Phenomena with Drops and Bubbles," *Springer*.
- (15) Cho, S. K., Moon, H., and Kim, C. J., 2003, "Creating, Transporting, Cutting, and Merging Liquid Droplet by Electrowetting-Based Actuation for Digital Microfluidic Circuits," *J. Microelectromech. Syst*, Vol. 12, No. 1, pp. 70~80.
- (16) Hayes, R. A. and Feenstra, B. J., 2003, "Video-Speed Electronic Paper Based on Electrowetting," *Nature*, Vol. 425, pp. 383~385.
- (17) Zhou, K., Heikenfeld, J., Dean, K. A., Howard, E. M. and Johnson, M. R., 2009, "A Full Description of a Simple and Scalable Fabrication Process for Electrowetting Displays," *J. Micromech. Microeng*, Vol. 12, No. 6, 065029.
- (18) 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.
- (19) Kim, H. Y., 2004, "Drop Fall-off from the Vibrating Ceiling," *Phys. Fluids*, Vol. 14, No. 2, pp. 474.
- (20) Brunet, P., Eggers, J. and Deegan, R. D., 2007, "Vibration-Induced Climbing of Drops," *Phys. Rev. Lett*, Vol. 99, pp. 144501-1~4.
- (21) 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.
- (23) 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.
- (24) 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.
- (25) Langley, K. R. and Sharp, J. S., 2010, "Microtextured Surfaces with Gradient Wetting Properties," *Langmuir*, Vol. 26, pp. 18349~18356
- (26) Lamb, H., 1932, "Hydrodynamics," *Cambridge Univ. Press*, pp. 461~463.
- (27) Lee, S. M., 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) Kim, H. S., Kim, J. S., Kang, H. J., and Kim, S. R., 1999, "An Analysis of Stress Waves in Coated Elastic Half-Space Due to Water Drop Impact," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 23, No.8, pp.1417~1424.