

# 음향 부양장(acoustic levitation field)에서 초음파 주파수 (ultrasonic frequency)에 따른 단일 액적의 미립화 특성

서 현 규<sup>†</sup>

## Effect of Ultrasonic Frequency on the Atomization Characteristics of Single Water Droplet in an Acoustic Levitation Field

Hyun Kyu Suh

Key Words: Acoustic levitation field(음향 부양장), Atomization(미립화), Droplet diameter(액적 직경), Droplet volume(액적 체적), Ultrasonic frequency(초음파 주파수), Ultrasonic levitation(초음파 부양)

### Abstract

This paper describes the effect of ultrasonic frequency( $f$ ) on the atomization and deformation characteristics of single water droplet in an acoustic levitation field. To achieve this, the ultrasonic levitator that can control sound pressure and velocity amplitude by changing frequency was installed, and visualization of single water droplet was conducted with high resolution ICCD and CCD camera. At the same time, atomization and deformation characteristics of single water droplet was studied in terms of normalized droplet diameter( $d/d_0$ ), droplet diameter( $d$ ) variation and droplet volume( $V$ ) variation under different ultrasonic frequency( $f$ ) conditions. It was revealed that increase of ultrasonic frequency reduces the droplet diameter. Therefore, it is able to levitate with low sound pressure level. It also induces the wide oscillation range, large diameter and volume variation of water droplet. In conclusion, the increase of ultrasonic frequency( $f$ ) can enhance the atomization performance of single water droplet.

### 1. 서 론

연료의 열 및 물질 전달 연구에서 단일 액적(single droplet)에 관한 이론<sup>(1,2)</sup>은 연구에 고려해야 하는 여러 조건들의 단순화가 가능하다. 따라서, 다양한 액적 크기(droplet size), 분위기 압력(ambient pressure) 등과 같은 연구 조건에서의 two phase fluid의 확산을 포함한 물리적인 현상의 규명은 물론 액적의 질량(mass)과 열전달(heat transfer)에 관한 기초 연구를 가능하게 하고<sup>(3-5)</sup>, 관련 연구의 기초 자료 및 전체 거동에 관한 많은 정보

를 제공하는 장점이 있다. 하지만, 단순화된 여러 조건들 중 주변 유체와의 혼합 및 접촉과 같은 영향을 포함한 분위기 조건의 잘못된 선정 및 적용은 전체 연구 결과에 큰 영향을 미친다. 이러한 측면에서 ultrasonic levitator는 단일 입자나 액적에 관한 다양한 연구를 가능하게 하는 매우 유용한 도구이다. Ultrasonic levitator는 연구 과정에서 단일 입자나 액적이 표면과 접촉하면서 생기는 영향이 전혀 없어 액적의 직접적인 변화에 영향을 주는 여러 조건 인자들의 영향을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 따라서, ultrasonic levitator를 이용하여 음향 부양장(acoustic levitating field)을 형성한 후, 다양한 실험 조건에 따른 액적의 열 및 물질 전달 특성에 관한 많은 연구들이 수행되었다. 기본적인 액적 부양(droplet levitation) 특성에 관한 연구들<sup>(6,7)</sup>을 비롯하여 부양장(levitating field)에서 액적의 제어를 통한 열 및

(2013년 7월 10일 접수 ~ 2013년 9월 9일 심사완료, 2013년 9월 12일 게재확정)

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 국립공주대학교 기계자동차공학부

E-mail : hksuh@kongju.ac.kr

TEL : (041)521-9264 FAX : (041)521-9123

물질 전달의 실험적·해석적인 연구들<sup>(8-11)</sup>이 수행되었다. 또한, standing sound wave에서의 액적의 연소 특성<sup>(12,13)</sup>, 입자 및 연료 액적의 연소에 관한 연구<sup>(14-17)</sup>, 전기장(electric field)에서의 액적 연소에 관한 연구<sup>(18)</sup>가 수행되었고, 다중 성분 액적(multi-component liquid droplet)<sup>(19)</sup>과 이상 유체 혼합기(binary liquid mixture)<sup>(20)</sup>의 증발에 관한 연구도 수행되었다.

이와 같이 음향 부양장에 관한 많은 기초 및 응용 연구 결과들이 보고되었으나, non-linear acoustic 이론에 관한 내용을 포함하여, 액적의 변형과 연소 특성 연구에 선행하여 반드시 연구되어야 하는 단일 액적의 미립화에 관한 연구는 현재 미흡한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 분무 연료 액적의 미립화에 대한 정성적·정량적인 연구를 위하여 정적이고 균일한 분위기 조건인 음향 부양장(acoustic levitation field)에서 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )에 따른 단일 액적의 변형 및 미립화 특성을 관찰하여 실험적으로 분석하고자 하였다. 또한, 이와 같은 기초적/이론적인 고찰 및 규명과 함께 non-linear acoustic 관련 연구 분야에 기초 참고 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 Ultrasonic levitator의 작동원리

Ultrasonic levitator에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 piezoelectric transducer와 reflector 사이의 multiple reflection의 결과로, 동일한 간격의 sound pressure와 velocity amplitude의 node와 antinode를 가진 standing

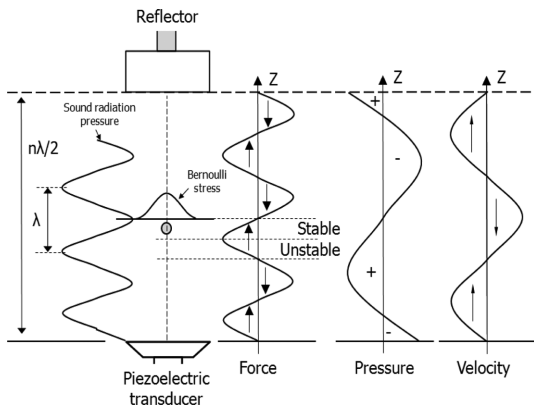


Fig. 1 Schematics of levitation force, acoustic pressure, and velocity in an ultrasonic standing wave<sup>(21)</sup>

Table 1 Specifications of experimental apparatus

|                      |   |         |
|----------------------|---|---------|
| Ultrasonic levitator | Operating frequency (kHz)                 | 20~100  |
|                      | Wavelength of standing acoustic wave (mm) | 5.71    |
|                      | Modulation frequency (kHz)                | 0.01~2  |
|                      | Modulation amplitude (Vpp)                | 0~2     |
|                      | Operation temperature range (°C)          | 0~70    |
|                      | Process chamber diameter (mm)             | 100±1   |
| ICCD camera          | Shutter speed (sec)                       | 1/1,000 |
|                      | Frame speed (sec)                         | 1/250   |

wave가 생성된다. 따라서, 축 방향으로로는 radiation pressure와 반경 방향으로로는 Bernoulli stress의 결과로 pressure node 아래 부분에 단일 액적이 어떠한 접촉도 없이 위치하게 된다. Acoustic standing wave 사이의 기본 압력, 속도 및 힘의 분포를 Fig. 1에 자세히 나타내었다. 기본적인 ultrasonic levitator에서는 piezoelectric transducer와 reflector 사이의 거리에 따라 액적의 거동 및 미립화 특성의 가시화가 가능한 약 4~5개의 pressure node가 생성된다. 하지만, 본 연구에서는 두 개의 외각 pressure node를 제외하고, 안정적인 실험 분석이 가능한 중앙 3개의 pressure node에서 가시화 및 연구 분석을 수행하였다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

초음파 주파수( $f$ )의 변화에 따른 단일 액적의 미립화 특성을 연구하기 위하여 Fig. 2과 같은 실험 장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 실험 장치에 대한 자세한 제원은 Table 1과 같다.

단일 액적의 초기 직경 및 미립화 과정을 가시화하기 위하여 고해상도 ICCD 및 CCD 카메라를 광원과 함께 설치하였다. 또한, ultrasonic frequency controller를 이용하여 standing wave frequency를 20, 30, 45, 58, 100 kHz로 조절하고, 각 실험 조건에서의 단일 액적의 직경( $d$ ) 및 체적( $V$ )의 변화를 측정 비교하였다.

## 3. 연구 결과 및 고찰

본 연구에서는 음향 부양장(acoustic levitating field)에서 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )의 변화에 따른

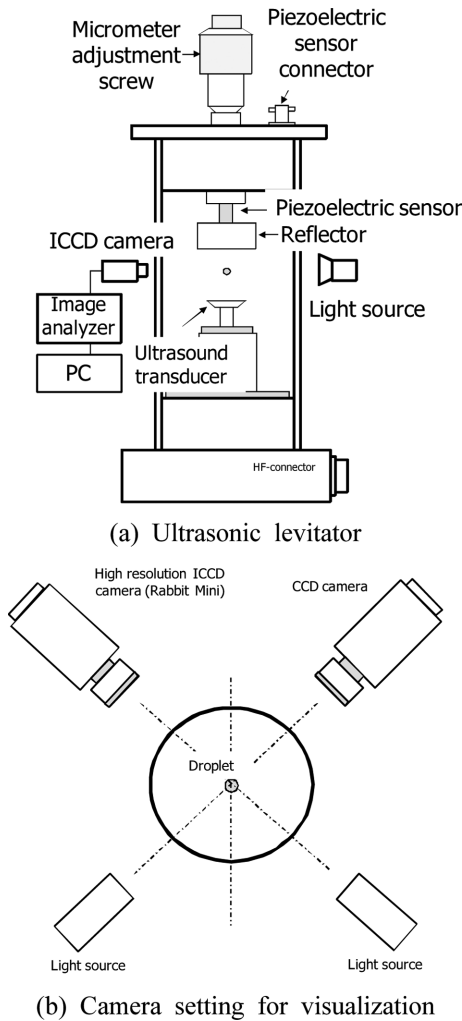


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus for water droplet levitation

단일 액적의 직경( $d$ ) 및 체적( $V$ )의 변화를 실험적으로 비교 연구하였다.

초음파 주파수(Ultrasonic frequency,  $f$ )의 변화에 따른 액적의 부양 실험을 위해서는 각 주파수에서 액적의 부양을 위한 sound pressure level( $P$ )을 결정할 필요가 있다. 따라서, 각 주파수에 따른 최적의 sound pressure level을 여러 번의 실험을 통하여 결정하였다. Fig. 3에 각 주파수 및 sound pressure level에서의 부양 가능한 액적의 최대 직경(maximum droplet diameter)을 나타내었다. 실험 결과, 초음파 주파수가 높아질수록, 액적의 부양을 위한 sound pressure level은 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 초음파 주파수가 점차 높아질수록,

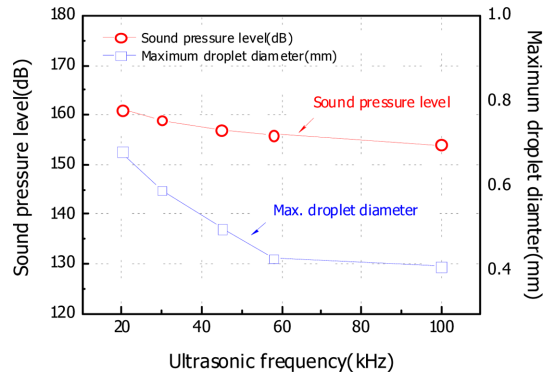


Fig. 3 Effect of ultrasonic frequency( $f$ ) on the sound pressure level and maximum droplet diameter

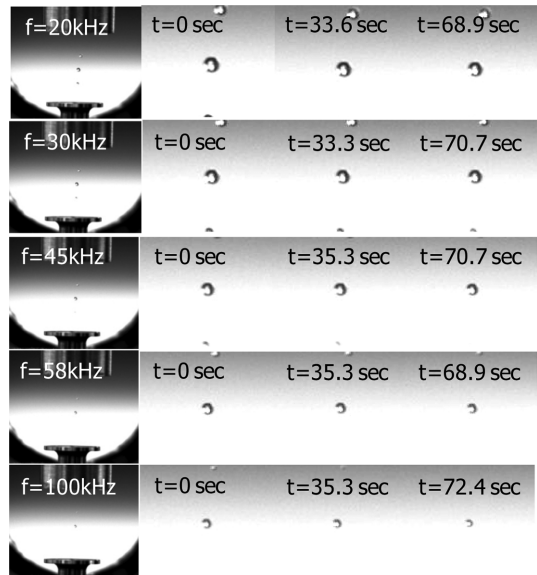


Fig. 4 Visualization of levitated water droplet in an acoustic levitation field

부양이 가능한 액적의 직경은 작아지게 되므로, 차후 주파수의 변화에 따른 단일 액적의 미립화 특성인 직경( $d$ )의 변화를 비교하는데 객관적인 지표의 선정이 필요함을 의미한다.

Fig. 4는 음향 부양장에서 초음파 주파수에 따른 액적의 직경 변화를 가시화한 결과이다. Fig. 3에서 예상하였듯이 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )가 낮은 조건에서 더 큰 직경의 부양 액적 생성이 가능하였으며, 부양장에 액적이 생성된 이후에 시간의 경과함에 따라 점차 액적 직경이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초음파 주파수에 따른 액적의 진동(oscillation)으로

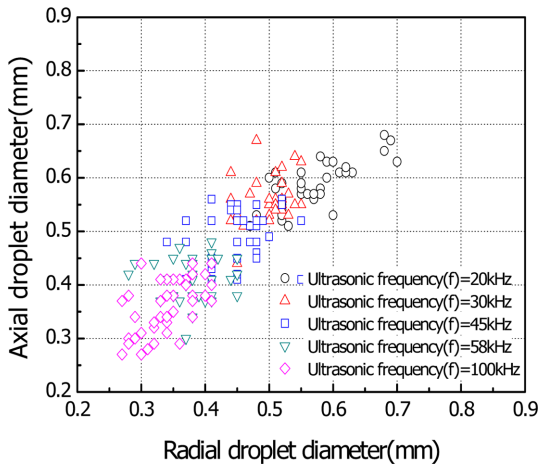


Fig. 5 Effect of ultrasonic frequency( $f$ ) on the axial and radial diameter of droplet

인하여 액적의 분열(breakup)이 진행되는 것으로 판단되며<sup>(7,11,21)</sup>, 주파수가 높을수록 분열이 빨리 진행되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 초음파 주파수 변화에 따른 액적의 축 방향 직경(axial diameter) 및 반경 방향 직경(radial diameter)을 나타낸 것이다. 주파수가 높아질수록 액적의 축 방향 및 반경 방향 직경은 점차 작아지는 것을 확인할 수 있었고, 각 주파수의 경우에 액적은 주어진 일정한 범위 내에서 진동하는 것을 확인할 수 있었다. Table 2는 초음파 주파수( $f$ )에 따른 축 방향 및 반경 방향 직경의 최대 변화율 값을 나타낸 것이다.

Fig. 3과 4에서 확인한 바와 같이 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )가 증가할수록 부양이 가능한 단일 액적의 초기 직경은 점차 감소하는 것으로 나타났고, 이러한 결과로 인하여 주파수에 따른 미립화 특성 파악에 객관적인 지표의 선정이 필요하였다. 따라서, 본 연구에

Table 2. Maximum variation of axial and radial droplet diameter with respect to ultrasonic frequency( $f$ )

| Ultrasonic frequency (kHz) | Max. axial $d$ (mm) | Max. radial $d$ (mm) |
|----------------------------|---------------------|----------------------|
| 20                         | 0.082               | 0.074                |
| 30                         | 0.089               | 0.037                |
| 45                         | 0.096               | 0.026                |
| 58                         | 0.081               | 0.030                |
| 100                        | 0.08                | 0.062                |

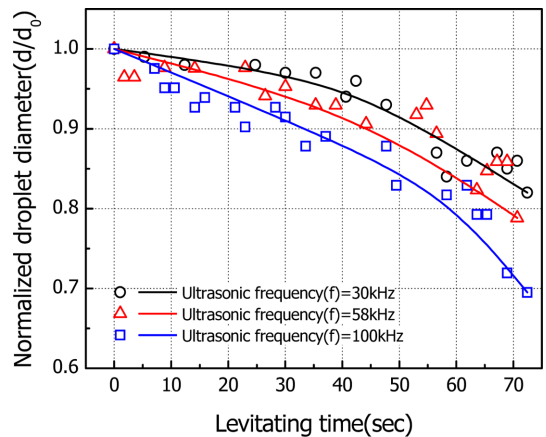


Fig. 6 Effect of ultrasonic frequency( $f$ ) on the normalized droplet diameter( $d/d_0$ )

서는 초기 액적의 직경( $d_0$ )의 영향을 제거하고, 실시간 액적의 직경( $d$ ) 변화율로 정의되는 normalized droplet diameter( $d/d_0$ )를 적용하여 주파수 변화에 따른 단일 액적의 미립화 특성을 Fig. 6과 같이 비교하였다.

비교 결과, 동일한 부양 시간 동안 초음파 주파수( $f$ )가 증가하면 단일 액적의 미립화가 더 빨리 진행되는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4에 언급한 바와 같이 주파수 증가에 따른 액적 진동의 증가로 인해 breakup이 활발해져 미립화 특성이 개선되는 것으로 판단된다.<sup>(7,11,21)</sup>

음향 부양장에서 초음파 주파수( $f$ )의 변화에 따른 단일 액적의 미립화 특성을 명확하게 비교하기 위하여 액적의 직경( $d$ )과 체적( $V$ )의 변화율을 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서 액적의 직경 및 체적 변화는 각 실험 조건에서의 초기값( $d_0, V_0$ )과 최종값( $d_f, V_f$ )의 차이를 초

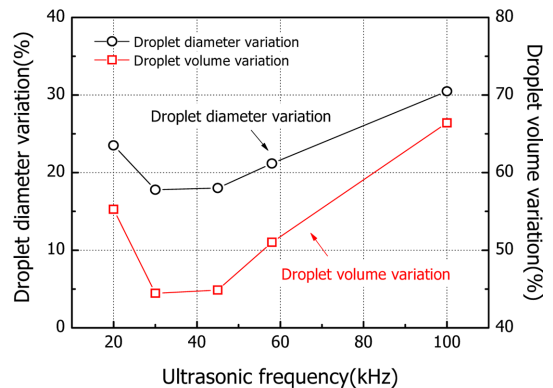


Fig. 7 Effect of ultrasonic frequency( $f$ ) on the droplet diameter( $d$ ) and volume( $V$ ) variation

기값으로 나눈 결과로 정의하였다. 먼저, 초음파 주파수가 20 kHz인 경우에는 Fig. 3과 4에서 확인한 바와 같이 높은 sound pressure level로 인하여 단일 액적의 초기 부양 직경이 매우 큰 것으로 나타났고, 이로 인하여 액적 직경의 변화율이 다른 조건들과 다른 변화 특성을 보였다. 하지만,  $f=20$  kHz인 경우를 제외하고는 초음파 주파수가 증가할수록, 시간에 따른 액적의 직경 변화율은 점차 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 액적 체적(V)의 변화율 비교 결과는 액적 직경(d)의 세제곱에 비례하는 체적의 특성상 주파수 변화에 따른 액적의 변화와 동일한 경향을 보였다. 이러한 결과로부터, 음향 부양장에서 초음파 주파수( $f$ )의 증가는 전체적인 액적의 미립화 특성을 개선하고, 같은 실험 조건에서 우수한 미립화 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 음향 부양장(acoustic levitation field)에서 초음파 주파수 (ultrasonic frequency)의 변화에 따른 단일 액적의 미립화 및 변형 특성을 실험적으로 연구 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )가 점차 증가할수록, 액적 부양을 위한 sound pressure level(P)은 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 부양이 가능한 액적 직경( $d$ )은 작아지는 결과를 나타내었다.

2) 음향 부양장(acoustic levitation field)에 액적이 생성된 이후에 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )가 증가할수록 액적의 분열(breakup)이 빨리 진행되었으며, 액적의 축 방향 (axial) 및 반경 방향 (radial) 직경은 점차 작아지고, 주어진 일정한 범위 내에서 진동하였다.

3) 음향 부양장(Acoustic levitating field)에서 초음파 주파수(ultrasonic frequency,  $f$ )의 증가는 전체적인 단일 액적의 미립화 특성을 개선하고, 같은 실험 조건에서 우수한 미립화 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) T. I. Farouk and F. L. Dryer, "On the extinction characteristics of alcohol droplet combustion under microgravity conditions - A numerical study", *Combustion and Flame*, Vol. 159, 2012, pp. 3208-3223.
- (2) G. M. Faeth, "Current status of droplet and liquid combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 3, 1977, pp. 191-224.
- (3) N. Kaji, Y. H. Mori and Y. Tochtani, "Heat transfer enhancement due to electrically induced resonant oscillations of drops", *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 107, 1985, pp. 788-793.
- (4) T. C. Scott and R. M. Wham, "An electrically driven multistage countercurrent solvent extraction device: the emulsion phase contractor", *I. & It. C. Reseamh*, Vol. 28, 1989, pp. 94-101.
- (5) G. K. Raina, R. K. Wanchoo and P. D. Grover, "Direct contact heat transfer with change of phase: motion of evaporating droplet", *AICHE J. Vol.* 11, 1984, pp. 835-837.
- (6) J. P. Reid, "Particle levitation and laboratory scattering", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110, 2009, pp. 1293-1306.
- (7) A. Omrane, S. Santesson, M. Aldén and S. Nilsson, "Laser techniques in acoustically levitated micro droplets", *Lab on a Chip*, Vol. 4, 2004, pp. 287-291.
- (8) R. T. Hilger, M. S. Westphall and L. M. Smith, "Controlling Charge on Levitating Drops", *Analytical Chemistry*, Vol. 79, No. 15, 2007, pp. 6027-6030.
- (9) A. V. A. Kumar and S. K. Bhatia, "Mechanisms influencing levitation and the scaling laws in nanopores: oscillator model theory", *J. Phys. Chem. B* Vol. 110, 2006, pp. 3109-3113.
- (10) Y. Tian and R. E. Apfel, "A novel multiple drop levitator for the study of drop arrays", *J. Aerosol Sci.* Vol. 27, No. 5, 1996, pp. 721-737.
- (11) R. E. Apfel, Y. Zheng and Y. Tian, "Studies of acoustoelectrically levitated drop and particle clusters and arrays", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 105, No. 5, 1999, 4966(99)50005-2.
- (12) M. Tanabe, T. Kuwahara, K. Satoh, T. Fujimori, J. Sato and M. Kono, "Droplet combustion in standing sound waves", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 1957-1964.
- (13) M. Tanabe, T. Morita, K. Aoki, K. Satoh, T. Fujimori and J. Sato, "Influence of standing sound waves on droplet combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 28, 2000, pp. 1007-1013.
- (14) E. Shafirovich, S. K. Teoh and A. Varma, "Combustion of levitated titanium particles in air", *Combustion and Flame*, Vol. 152, 2008, pp. 262-271.

- (15) T. Suekane, K. Yasutomi and S. Hirai, "Experimental observations of effects of convection on flame shape and extinction on n-heptane single droplets", *Combustion and flame*, Vol. 126, 2001, pp. 1599~1601.
- (16) G. Xu, M. Ikegami, S. Honma, K. Ikeda, D. L. Dietrich and P. M. Struk, "Interactive influences of convective flow and initial droplet diameter on isolated droplet burning rate", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 2029~2035.
- (17) G. Xu, M. Ikegami, S. Honma, M. Sasaki, K. Ikeda, H. Nagaishi and Y. Takeshita, "Combustion characteristics of droplets composed of light cycle oil and diesel light oil in a hot-air chamber", *Fuel*, Vol. 82, 2003, pp. 319~330.
- (18) O. Imamura, Y. Kubo, J. Osaka, J. Sato, M. Tsue and M. Kono, "A study on single fuel droplets combustion in vertical direct current electric fields", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, 2005, pp. 1949~1956.
- (19) G. Brenn, L. J. Deviprasath, F. Durst and C. Fink, "Evaporation of acoustically levitated multi-component liquid droplets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2007, pp. 5073~5086.
- (20) A. L. Yarin, G. Brenn and D. Rensink, "Evaporation of acoustically levitated droplets of binary liquid mixtures", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, 2002, pp. 471~486.
- (21) F. P. Capote and L. Castro, "Ultrasound-assisted levitation: Lab-on-a-drop", *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 25, No. 9, 2006, pp. 856~861.