

초기교란이 액주의 분열기구에 미치는 영향

An effect of initial disturbance on the breakup mechanism of liquid jet

석지권* 박용국** 이충원***

J. K. Seok Y. K. Park C. W. Lee

Abstract

The present experimental study investigates the effect of an initial disturbance on the breakup mechanism of a liquid column.

With varying the magnitude of the initial disturbance, we measure the surface wave of liquid column with adopting laser shadow method and analyze the growth rate of liquid column and breakup frequency. The experimental results show that the breakup characteristics of liquid column is significantly influenced by the frequency of the initial disturbance. We concluded that the most uniform droplet occurs when the frequency of initial disturbance coincides with the natural frequency of the liquid column.

1. 서론

액체의 미립화 과정은 정지 공기 중에 분사된 액체가 액주형태로 노즐을 떠나서 이후 기액의 상대속도에 의하여 기액계면에 표면파가 형성되고 이 표면파가 하류로 진행할수록 증폭되어 결국에는 분열에 이르게 된다. 따라서 액체가 가지는 전 에너지 중에서 분열과정에 유효하게 작용되는 에너지의 크기나 비율이 미립화의 성능을 좌우하게 된다.

액체의 미립화 방법으로는 액체에 주어지는 에너지의 종류에 따라 여러 가지가 있으나 그 중 액체에 진동 에너지를 가한 진동에 의한 미립화가 있다. 진동에 의한 미립화는 균일성이

양호한 액적을 얻을 수 있기 때문에 액체의 미립화 현상과 미립화 기구의 조사에 이용된

다. 또 분무연소 연구분야에 관련된 단일 액적의 연소, 균일 액적군의 연소 등과 같은 기초 연소 기구를 밝히는데 사용된다.

미립화 기구에 관한 연구를 살펴보면 1878년 Rayleigh¹⁾는 비점성 액주분열의 경우 교란의 파장(λ)이 초기 액주반경(d_0)의 약 4.5배가 될 때 분열이 일어난다고 하였다. 1931년 Weber²⁾는 액체의 점성을 고려한 연구에서 액주의 분열은 액주면에 생성된 교란이 지수 함수적으로 성장하여 결국 성장된 교란의 진폭과 액주반경이 같아질 때 분열이 일어난다고 하였다. 1980년 Nagai³⁾는 단공노즐로부터 분사되는 액주에 주파수 23Hz에서 20kHz사이의 진동을 가한 실험을 통하여 균일 액적 생성영역을 구하였다. 이때 균일액적 생성현상은 노즐 진동수, 노즐 진폭, 분류직경, 분류속도 그리고 액체의 물성에 관계된다고 하였다. 액체의 분열은 액체표면에 형성된 불안정한 파가 기액계면에서의 기체 역학적 상호작용에 의하여 성장함으로써 이루어진다고 Castleman⁴⁾은 주장하였다. 그리고

* 정희원, 안동과학대학

** 경북대 대학원

***정희원, 경북대학교

Levich⁵⁾도 Castleman의 모델을 액주에 적용하여 액주표면에 형성된 파의 성장에 미치는 기류의효과를 정리하였다. 액체의 미립화 과정에 대하여 수많은 연구가 진행되고 있지만 현재까지 액체의 분열기구를 완전히 파악하고 있지 못하다. 특히 액주의 분열은 액주 표면에 발생하는 표면파가 주된 요인임에도 불구하고 액주 표면의 교란에 대한 연구가 많이 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 초기교란의 크기를 변화시키면서 액주의 분열과정을 파악하는 것에 초점을 두고 유체의 물리적 상태량의 변화에 따른 미립화 현상을 파악하였다. 측정방법은 CCD 카메라에 의한 화상처리 방법으로 현상적인 액주의 분열기구를 파악하고 레이저 빔 센서를 이용하여 교란의 진폭 및 주파수를 측정하였다. 이와 같은 실험결과를 바탕으로 지금까지 불확실했던 액주의 불안정성에 대하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 유체 공급부(① ~ ④), 노즐(⑤), 측정부(⑥ ~ ⑭)로 구성되어 있다. 실험에 사용된 액체는 상온의 수돗물로서 필터로 여과한 후 사용 하였다. 실험액체의 물리적 성질을 파악하기 위하여 Ostwald점도계, 비중계, 표면장력계(Fisher Model 20)를 사용하여 점도, 비중, 표면장력을 측정하였다. Table 1은 측정된 물성치를 나타낸 것이다.

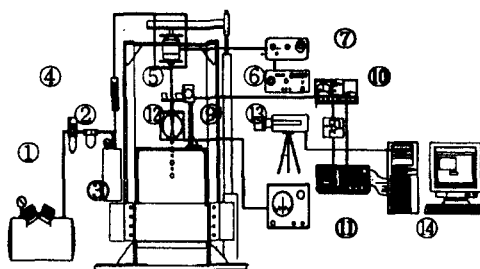
실험액체는 압축기①에 의해 고압탱크③에서 가압된다.

액체의 압력은 고압탱크에 부착된 정압기②로 조절, 유지시킨다. 가압된 액체는 투명한 8mm 폴리우레탄 튜브를 거쳐 필터로 여과된 후 유량계 ④를 거쳐 노즐⑤로 유입된다.

분사되는 유량의 측정은 고압탱크 이후에 유량계④를 설치하여 측정하였다. 노즐로 부터 분사된 단위시간당의 유량은 매스실린더와 초시계를 사용하여 측정하였다. 이 값은 유량계

를 통해 보정되었다.

분사유량은 노즐전단에 니들 밸브를 설치하



- ① Compressor ②Regulator ③ Pressuretank
- ④ Flowmeter ⑤Nozzle ⑥Function generator
- ⑦ Amplifier ⑧ Shaker ⑨ Laser sensor
- ⑩ Signal amplifier ⑪ Oscilloscope
- ⑫ Stroboscope ⑬ CCD camera
- ⑭ Image processor

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

여 조절하였고, 분사속도는 분사유량을 노즐 오리피스 출구 단면적으로 나눈 값을 택하였다. 유량계는 도쿄후로메타(東京フロメタ)연구소에서 제작한 것으로 최대유량은 100ml/min이다.

실험에서 사용된 노즐은 암하엔지니어링(岩下 Engineering) 회사의 제품을 사용했다. 이 노즐은 주사기용 노즐을 선단부분만 정밀하게 가공한 제품으로 유체 정량 토출용으로 제작된 제품이다. 노즐 선단부분의 정밀한 가공은 매끄러운 액주의 생성에 중요한 요인이 되므로 이 노즐을 사용하게 되었다. 노즐의 재질은 스테인레스이고 노즐의 길이는 모든 종류의 노즐이 13mm이며 내경의 크기에 따라 구분된다. 모든 노즐은 가진기(Shaker)의 진동판에 부착된 노즐 홀더에 끼울 수 있도록 되어 있으며 총 16개의 노즐이 있으나 실험범위에 맞게 사용된 노즐은 총 6가지이다.

노즐에 중진동을 가하기 위한 진동원으로는 진동발생기⑧(Mini-Shaker 4810)를 사용하였으며 파형발생기⑥(function generator)에서 출력된 사인파 형태의 신호를 증폭기⑦로 증폭시켜

진동발생기로 입력시켰다.

파형발생기는 0Hz~2MHz 까지 5가지 형태의 파형을 발생시킬 수 있는 것으로 본 실험에 사용한 파형은 사인파이프고 가진기에 인가한 주파수 대역은 0Hz~5kHz의 범위이다.

가진기에 입력되는 펄스신호의 입력전압과 입력주파수는 오실로스코프(oscilloscope)로 측정하였다. 노즐을 가진기에 부착하기 위해서 가진기 진동자의 중심에 일치하고 진동자와 수직이 되도록 아크릴 원판을 부착하였다.

Table 1 Physical properties of experimental liquid

used liquid	clean water
temperature (°C)	22
density (kg/m ³)	997.862
viscosity (kg/m · sec)	1.002 × 10 ⁻³
surface tension (N/m)	73.58 × 10 ⁻³

이 아크릴 원판의 중심에 노즐을 끼울 수 있는 노즐 홀더를 제작, 부착하였다. 노즐부착 부분이 무거울 경우 스피커 진동에 영향을 줄 수 있으므로 부착부는 아크릴과 플라스틱으로 최대한 가볍게 제작하였다.

노즐선단에서부터 하류방향으로 분사되는 액주의 직경을 측정하기 위해 레이저 빔 센서의 발광부와 수광부를 아크릴로 고정시키고 이것을 미투토요(Mitutoyo)사의 높이 게이지에 부착시켰다. 액주의 진폭, 파장, 분열길이 등은 높이 게이지를 수직방향으로 이동하며 측정할 수 있도록 하였다. 레이저 센서의 작동원리는 발광부의 반도체 레이저에서 발광한 레이저광은 투영렌즈 유니트에 의해 시트(sheet)광으로 된다. 이 시트광은 측정부를 통과한 후 수광소자에 모아진다. 만약 액주가 시트광에 대해 수직방향으로 통과해서 이동하면 시트광에서 액주 직경만큼의 빛이 차단된다.

이때 나머지 차단되지 않은 빛이 수광소자를

통해 전압 값으로 출력된다. 출력전압은 비교 출력과 아날로그 출력의 두 종류가 있으며 본 실험에서는 아날로그 출력전압을 사용했다. 사용된 레이저 시트광의 크기는 폭 5mm, 두께 1mm로 모든 노즐의 측정범위를 포함하고 있다. 광학적 실험장치는 CCD 카메라로 구성된 화상처리 장치와 레이저 빔 센서에 의한 액주 표면파 측정장치로 구성되어 있다.

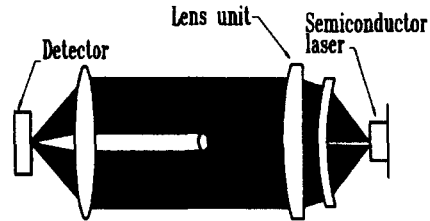


Fig. 2 Details of liquid column measured by laser sensor

CCD 카메라 및 비디오 카메라에 의한 화상처리 장치는 액주의 분열현상을 현상적으로 파악하기 위하여 사용하였고 레이저 빔 센서에 의한 측정장치는 액주의 표면에 생성되는 교란의 진폭 및 주파수를 측정하는데 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 초기교란이 액주의 분열기구에

미치는 영향

그림 3은 노즐내경 1.25mm, 노즐 출구유속 $U_0=1.63m/s$ 일 경우 주파수 변화에 따른 액주분열현상을 CCD로 촬영한 그림이다. 균일 액적이 생성되는 영역은 그림에서 보는 바와 같이 대략200Hz에서 400Hz영역으로 나타난다. 이는 저속영역의 액적생성이 초기교란 주파수에 영향을 받으며 결과적으로 비가진시에 노즐 출구에서 생성되는 교란이 액주의 액적생성에 영향을 미치게 된다고 생각할 수 있다. 그림 4는 액주의 균일액적 생성 영역에서 노즐과 초기 유속변화에 따른 교란파의 성장 과정을 거리에 따라서 나타낸 그림이다. 그림 4의 가진 주파수대는 각 조건에서 균일 액적 생성영역이

며 그림3의 균일액적 생성영역인 200Hz가진 주파수대 그림과 비교할 수 있다. 이러한 표면파의 성장은 Rayleigh¹⁾와 Weber²⁾의 해석에 의하면 교란의 크기는 지수 함수적으로 성장한다고 하였다. 따라서 교란의 성장은 다음과 같이 나타난다.

$$\delta = \delta_0 e^{at} \quad (1)$$

식 (1)에서 δ_0 는 최초교란의 크기 a 는 성장율을 나타내며 그림 3의 가진시에 보여지는 액주거동 형태와 비교 고찰 될수 있다. 특히 200Hz 균일액적 생성영역과 그림4에서 액적의 거리에 따른 표면교란파의 성장과정이 지수함수적으로 성장되는 현상을 비교할수 있다. 액적이 분열 되기 직전까지 교란파의 성장은 비교적 완만하며 그 이후 액주교란파는 급속하게 성장, 분열하게 된다 그림에서 실선으로 나타내는 영역에서 교란파가 급속하게 변화됨을 알 수 있다. 이는 분열지점에서 중방향 교란 유속의 감소로 인하여 표면파의 성장을 촉진시키는 것으로 생각된다. 액체의 표면에 생성되는 미소교란은 액주 가장자리의 표면장력과 관성력, 공기역학적인 힘으로 인하여 점차로 성장하게 되며 결국 분열을 일으킨다.

액주분열을 일으키는 교란의 형태는 액주의 유속이나 주위공기와와의 상대속도차이 등 여러 물리적 조건들에 의하여 변화한다.액체의 유속이 증가함에 따라 액주분열직전에 나타나는 액주표면파의 형태를 그림 5에 나타내었다. 주위공기의 유속은 0m/s이며 내경이 0.52mm인 노즐을 사용하였다.

액주교란파의 초기교란 주파수를 해석하기 위한 방법으로 레이저센서로 부터 검출한 시간영역의 진폭값을 주파수영역으로 FFT하여 나타내었다. FFT(Fast Fourier Transform)를 통해서 액주에 생성되는 주파수 성분에 대한 진폭값의 변화를 고찰함으로써 액주 분열과 관계된 주된 주파수를 검출 할 수 있다.

(a)의 경우 초기교란의 주파수를 점차 증가시켜 나감에 따라 인가한 초기교란 주파수와 비례하여 FFT주파수 최대값이 400~800Hz에서 나타났다. 이 대역을 벗어난 저주파수 영역

과 고주파수 영역에서는 400Hz 대역의 주파수 성분과 여러 형태의 주파수가 조합된 형태가 나타났다. 초기교란의 주파수와 FFT 주파수 최대값이 비례하여 나타나는 구역은 액주분열을 일으키는 교란의 주파수가 균일하게 나타나는 지점이므로 교란파가 액주분열에 미치는 영향을 알아내는 중요한 구간이다. 또한 초기교란이 액주분열에 지배적인 영향을 미치는 구간이기도 하다.

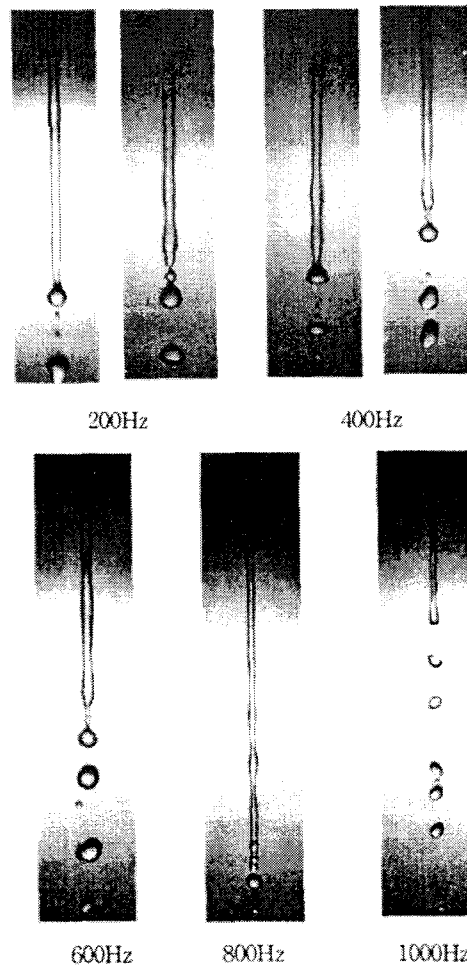


Fig. 3 Comparison of surface wave of liquid jet for several initial disturbance frequency ($U_0 = 1.63m/s$ ID = 1.25mm)

(a), (b), (c)로 액체의 유속이 증가함에 따라 초기교란의 영향이 지배적으로 나타나는 구간이 점차로 증가하고 있다. 초기 레이놀즈수가

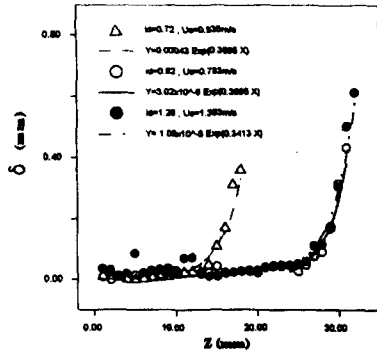


Fig. 4 Variation of Disturbance wave against distance at uniform drop region

609 일때는 비례구간의 최대값이 800Hz였으나 레이놀즈수가 1014로 증가했을 때는 그 최대값이 1.5kHz까지 증가하였다.

따라서 액주표면에 생성되는 교란파의 주파수는 액체유속이 증가함에 따라 커지며 초기교란의 영향이 지배적인 구간도 동일하게 증가함을 알 수 있었다.

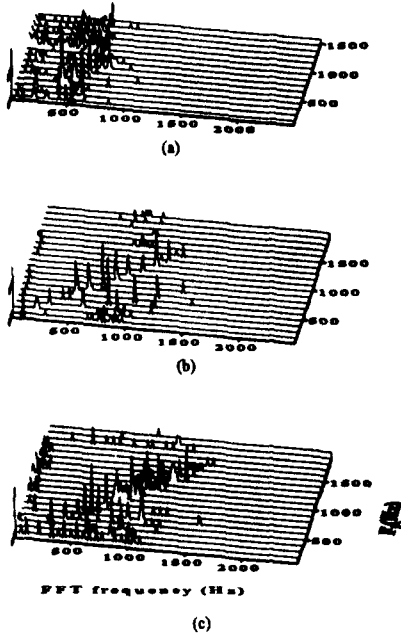


Fig. 5 Frequency spectrums at various liquid velocities
(a) Re = 609, (b) 812, (c) 1014)

인위적으로 인가 해주는 초기교란의 크기를

변화시켰을 경우 액체유속이 증가함에 따라 초기교란이 영향을 미치는 구간도 동일하게 증가하였다.

그림 6에서는 동일 490Hz 가진주파수 조건하에서 함수발생기의 출력전압이 0.76V에서 1.76V로 증가함에 따라서 가진기의 진동 에너지 증가에 의한, 액주표면파의 최초의 성장점의 위치가 노즐로 접근하며, 성장 주파수대의 영역이 가진에너지의 증가에 따라서 490Hz쪽으로 접근하고 있음을 보여준다. 1kHz부근에서 생성되는 주파수대는 FFT특성에 의해서 생성된 왜곡(Distortion)현상이다. 그림 6에서 액주에 생성된 표면파의 최초 생성 주파수는 300Hz 부근이며, 이와 비교하여 가진에 의한 성장 주파수 또한 그림 6에서 볼 수 있듯이 482Hz의 가진주파수에서 성장하는 것이 아니라 비가진 주파수에 의존함을 확인 할 수 있다.

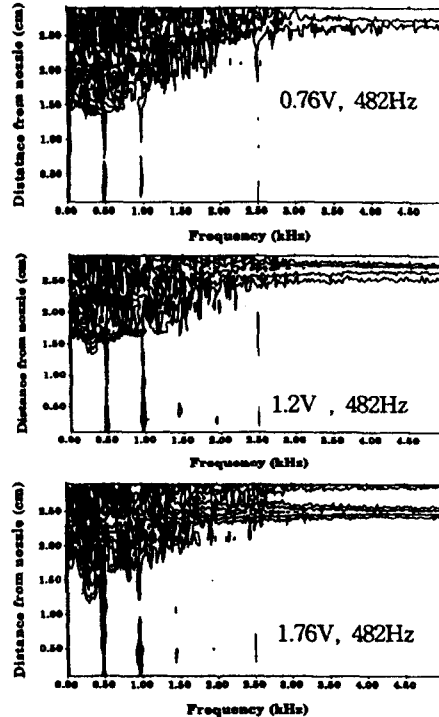


Fig. 6 Comparison of FFT Contours of surface wave for various initial disturbance

따라서 초기 가진에 의한 액주표면파의 성장 원인은 비가진에 의한 표면파 성장 주파수대에 의존하게 되며, 저주파대와 고주파대 중 분열에 관계된 주파수대는 고주파 영역임을 확인할 수 있다.

3.2 비가진시 액주표면파 거동

본 실험에서 사용한 무차원수인 레이놀즈수 (Re number)와 웨버수(We number)는 다음과 같이 정의된다.

$$We = \frac{\rho U_0^2 D}{\sigma}, \quad Re = \frac{U_0 D}{\nu} \quad (2)$$

식(2)에서 각각 ρ 밀도, σ 표면장력, ν 동점성계수이며 액주의 물성치이다.

그림 7은 노즐내경 0.42mm, 액체의 초기속도 $U_0 = 1.21m/s$, 레이놀즈수 502, 웨버수 8.2인 경우로서 노즐로부터 하류로 레이저 센서를 이동해가며 측정된 신호중 반경방향 표면파 교란 신호값을 나타낸다. 그림의 세로축은 노즐로부터의 거리, 가로축은 레이저 센서의 통과 시간을 나타내며 노즐로부터 거리 8mm까지는 액주표면의 교란이 매우 작으며, 거리 10mm 정도에서 액주표면의 작은 교란이 성장하여 하류로 갈수록 그 진폭이 성장한다. 거리 12mm와 14mm에서 고주파 성분 및 저주파 성분이 각각 생성, 성장하며 20mm 지점 까지 성장하는 것을 볼 수 있다. 12mm 지점에서 간헐적으로 불규칙적인 신호가 발생되기 시작하며, 14mm 지점에서 분열 신호가 최초로 발생하였다.

14mm 이후 22mm 지점 까지 저주파 성분의 분열 신호와 고주파 성분의 액주 표면파 신호가 함께 나타난다. 이는 액주분열시의 종진동에 의한 경향으로 판단된다.

신호의 경향은 광역신호(wide-band signal)의 경향을 나타내고 있으며, 하류로 갈수록 액주 표면파의 신호가 더욱 불규칙 해짐을 알 수 있다. 이것은 액주표면에 생성되는 진폭의 성장이 거리에 따라서 성장하며 진폭의 크기 또한 다양하게 변화하는 것을 나타낸다.

그림 8은 노즐내경 0.42mm, 유속 1.21m/s 레

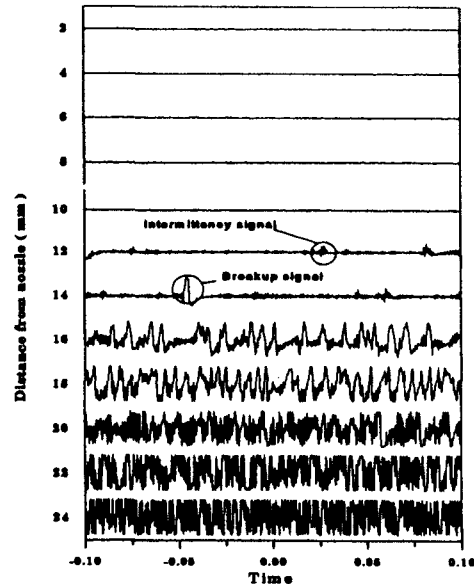


Fig. 7 Output signal of liquid column (ID=0.42mm, $U_0=1.21m/s$)

이놀즈수 502, 웨버수 8.22 일 때 노즐로부터의 거리에 따라서 측정된 주파수 스펙트럼과 식(3)에서 구한 주파수와 비교하여 나타낸 그림이다.

Sakai, T.⁷⁾ 등의 진동에 의한 균일액적 생성 영역의 주파수 f 는 오네소지수 $4.4 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-2}$ 의 범위에서 상한 주파수 영역과 하한주파수 영역으로 나누어 지며 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{상한주파수 } \frac{f_d}{U} &= 0.18 Re^{0.031} We^{0.12} \\ \text{하한주파수 } \frac{f_d}{U} &= 0.11 Re^{0.016} We^{0.17} \end{aligned} \quad (3)$$

각각의 균일액적생성 주파수 500Hz, 810Hz는 비가진 고주파영역의 하한, 상한 경계와 잘 일치가 된다. 그림 9는 노즐내경 0.72mm 초기유속 $U_0 = 0.81m/s$ 경우 거리에 따른 FFT 해석을 한 그림으로서 a)는 Amplitude에 대해서 그리고 (b)는 위상(phase)에 대해서 각각 표현한 그림이다

주된 주파수 영역인 약 200Hz에서 600Hz 영

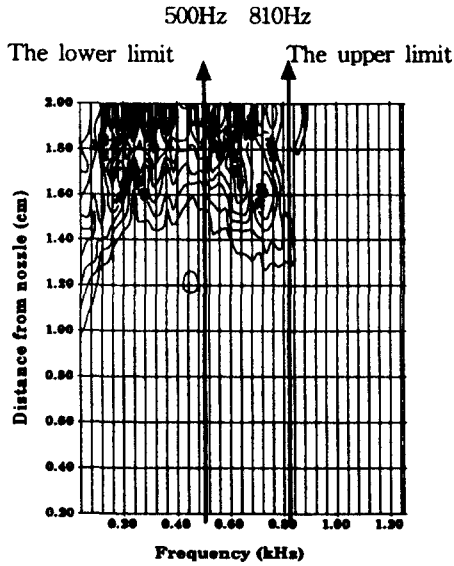


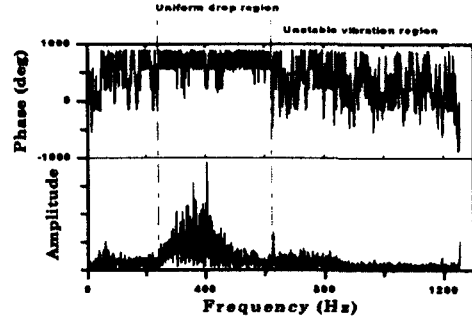
Fig. 8 Range of generation of uniform water drops

역이 존재하며 그림 (a)에서 볼 수 있듯이 위상 또한 600 에서 900도 영역의 규칙적인 범위를 가지는 영역이 나타나 난다. 이것은 Sagai, T등의 가진에 의한 균일 액적 생성 영역과 잘 일치가 된다.

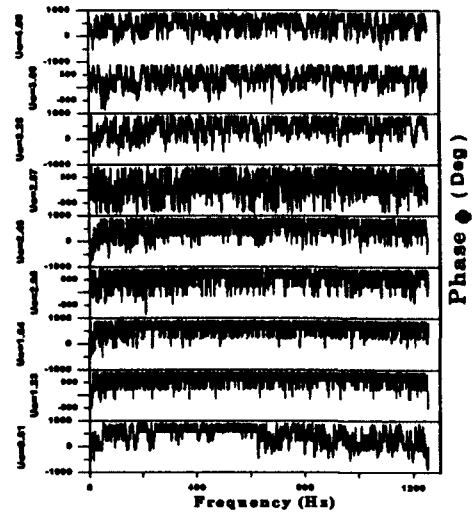
가진 에너지를 $F_0(t) = F_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0)$ 로 가정 할 경우 액주의 표면장력, 점성력 그리고 관성력에 의한 액주 종방향 진동관계로 부터 얻어지는 주파수 ω_1 , phase ϕ_1 와 가진 주파수 ω_0 , ϕ_0 가 일치 될 때 균일 액적이 생성 된다고 생각할 수 있다.

그림 (b)에서는 액주유속이 증가 함에 따라서 일정한 phase 영역을 가지는 주파수대가 일정한 영역까지 확대후 없어지며 불규칙적인

phase가 나타나게 된다. 유속이 2.87m/s, Reynolds number 2055의 영역에서는 노즐 바로 직후 부터 교란이 발생하며, phase 또한 그림 9에서 알 수 있 듯이 일정한 영역이 없어지는 영역으로서 난류의 시발점이라고 생각이 된다.



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of phase spectrum of surface wave for various velocity

4. 결론

본실험에서는 레일리 불안정 현상이 미립화를 지배하는 영역인 Reynolds number 2000이하, Ohnesorge number $3.40 \times 10^{-3} - 5.52 \times 10^{-3}$ 의 영역에서 정지하고 있는 대기 중에 평활류를 분사시킬 때 노즐에 진동 교란을 가함으로써 액주의 분열형태가 어떻게 변화하는가를 고찰하였다. 가진 교란의 강도변화, 분사액체의 유속변화 등에 따른 분열현상을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 액주표면에 생성되는 교란파의 주파수는

액체유속이 증가함에 따라 커지며 초기교란의 영향이 지배적인 구간도 동일하게 증가함을 알 수 있었다.

2. 균일 액적을 형성하는 가장 주된 원인은 액주표면파이며 비가진시 액주표면파의 주된 주파수대 성장 영역은 초기가진에 의한 균일액 적 생성영역의 범위와 일치된다.

후기

본 연구는 97년 교육부지원과제로 수행이 되었으며, 이에 관계자 제위에 감사드립니다.

참고문헌

1. Rayleigh, L. 1878, " On the instability of Jets ", Proc. Lond. Math. Soc., Vol. 10, pp. 4~13
2. Weber, C. 1931, " Zum Zerfall Eines Flüssigkeitsstrahles", Ztschr.f angew. Math. und Mech., Band 11, Heft 2, pp. 136~154
3. 吉田照彦, 永井伸樹. " 振動による均一粒徑滴群の生成に関する研究 ", 日本機械學會論文集, 1980, pp. 171~179
4. Castleman, R. A. 1932, "The Mechanism of Atomization Accompanying Solid Injection ", Report National Advisory Committee for Aeronautics, No. 440, pp. 735~746
5. Levich, V. G. 1962, " Physico-chemical Hydrodynamics ", Prentice-Hall, pp. 639
6. Dombrowski, N. & Frozer, R. P. 1953, " A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets ", Phil. Trans. A247, pp. 101~ 130
7. Matsushita, K., Sadakata, M. and Sakai, T. " Lower Limit of Vibration Frequency, Effect of Viscosity and Gravity on Uniform Droplet Region by Vibration Method ", Proceedings of ICLASS, 1988 pp. 109~116
8. Lee, H. C. 1974, " Drop formation in a liquid jet ", IBM J.Res.Dev. 18, pp. 364
9. Lafrance, P. (1975), " Nonlinear breakup of a laminar liquid jet ", Phys. Fluids 18, pp. 428.
10. Rayleigh, L. 1899, " Investigation in Capillarity", Phil. Mag. & 5. Vol. 48, No. 293, pp. 321~337 61~67