

## 농업용 액체 분무용 초음파 분사 시스템 해석

### An Analysis Results of Agricultural Ultrasonic Twin-fluid Nozzle

정진도\*

Jin. Do. Chung

#### Abstract

The objective of this study is to compare atomization characteristics for differently made an ultrasonic twin-fluid nozzle.

A spray system, an ultrasonic system, and three different type(Nozzle type, Tube type, Conventional type)are made and compared experimental and numerical results.

In this investigation, the measurement and numerical analysis of spray droplet are to analyze the effects of ultrasonic energy on the agricultural atomization spray system in order to protection of dispersion droplets.

It is clarified that ultrasonic energy forcing into a nozzle is valid to obtain atomization enchancement.

As the result of comparing the experimental and numerical result, it is confirmed that nozzle type is highest efficiency than that of tube type and conventional type, also well fit, respectively.

주요기술용어: Atomization(미립화),Ultrasonic(초음파),Numerical analysis(수치해석),Nozzle(노즐)  
가 얻어지는 장점을 가지고 있다.

#### 1. 서론

일반적으로 분무의 미립화 조건은 공기와 유량 비, 유속 그리고 노즐의 형태이며, 무화, 관통력, 분포 등을 들수 있다. 이 각각의 특성들은 분사압력, 압축압력, 분사노즐의 종류, 연료의 특성 등에 서로 밀접하게 관계되어 있다. 이 분사조건에 따라 평균직경, 분무각, 집중도, 관통도, 액적의 속도 및 크기분포 등의 미립화 특성에 영향을 끼치게 된다.<sup>1)</sup>

초음파 분무는 액체에 초음파 진동 에너지를 부가하는 것으로 다른 미립화 방법에 비해서 비교적 분열이 잘 되고 분무량이나 입경의 제어가 용이하며, 장치가 간단하고 조용한 무화

분무된 입경을 측정하기 위해서는 많은 액적들을 조사해야 하고 특히, 입경의 상한과 하한의 범위가 충분히 넓어야 하며 액적이 주위의 기체와 함께 계속적으로 운동하는 것을 고려하고, 증발 및 응축 등의 물질전달의 수반에 대한 고찰이 함께 이루어져야 한다.<sup>1,2)</sup>

분무 입경 측정 방법은 크게 기계적인 포집법과 광학적인 방법으로 나뉜다. 기계적 포집법은 혼적법, 액침법, 고화법 등이 있다.

광학적 방법에는 분무에 광원을 비추면 광원의 산란이 일어나는데 이 원리를 이용하여 측정하는 방법으로 High speed photography, Laser diffraction method, Laser doppler velocimeter 등의 방법이 있다. High speed photography는 짧은 섬광 광원이나 빠른 셔터 속도로 분무의 사진을 촬영하여 분무 입경분포를 측정하는 방

\* 정회원, 호서대학교 환경공학과

법으로 기계적 포집법에 비해 분무나 유동장에 영향을 주지 않는 장점이 있으나, 피사체의 심도, 측정에 따른 오차가 발생할 수 있다. Laser diffraction method는 분무 입자가 레이저빔을 통과할 때 빛이 산란되는 현상을 이용한 측정 방법으로 액체 분무의 경우에는 전방 산란인 회절의 형태를 측정하여 입경분포를 측정하는 방법이다. Laser doppler velocimeter는 LDV에서 프렌지 패턴을 지나는 액체에 의해 산란된 빛의 주파수와 강도를 측정하여 액체의 입경분포와 속도분포를 측정하는 방법이다.<sup>23)</sup>

초음파를 이용한 액체 미립화 연구는 1972년 千葉, 1980년 中山등에 의해 초음파를 이용한 액체 미립화 실험을 통하여 주파수와 평균입경 및 입경분포 등에 관한 실험결과를 발표하였다. 현재 가장 지배적인 의견은 초음파를 이용한 미립화 기구로 공동현상을 들고 있다.<sup>2)</sup> 즉, 진동자의 급격한 속도변화에 의해 액체내의 기포가 생성되고 이것이 액면에 적용되어 미립화를 촉진시킨다는 것이다. 이 이론은 1978년 C.Chiba에 의해 이루어졌으며, 그는 공동현상이 초음파 진동에 의한 액체의 미립화 기구라고 주장하였다. 초음파 분무 미립화는 낮은 유속과 낮은 공급 유량에서 사용될 수 있다는 장점으로 반도체 공정 기기, 가습장치, 의약품 제조에서 도포공정에 이용되는 등 응용범위가 넓어지고 있다.<sup>24)</sup>

본 연구에서는 초음파 분무 미립화에 관해 기존의 연구 경험과 이론 정립을 토대로 하여 농업용 액체 분무시스템에 초음파 기술을 적용하여 비닐하우스 내부에서나 그 외에 사용되는 농업용 분무기는 비료나 농약의 분사시 미립화율이 낮아서 액적의 낭비가 높고 효율성이 떨어지고있는 실정이므로 현재 분무시 낭비되고 있는 농약과 비료의 효율성을 높이고져 실험과 수치해석을 통해 분무의 비산 방지를 위한 기초 자료를 얻고져 한다.

## 2. 이론적인 해석 및 방법

### 2.1 지배방정식<sup>4)</sup>

노즐의 형상이 원형이므로, 좌표는 축대칭이며 비압축성의 분무액적의 유동해석을 위한 지배방정식으로 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

-연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m$$

여기서,  $i = 1(\gamma), 2(\theta), 3(\zeta)$

-운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

- $k-\epsilon$  난류모델

: 난류 모델은 난류점성계수를 구하는 가장 일반적인 방법인 난류 운동에너지( $k$ )와 소산율( $\epsilon$ )의 관계로부터  $k-\epsilon$  모델을 도입하였다.

이것은 난류에너지  $k$ 로부터 특성속도를, 점성 소산율의 크기  $\epsilon$ 를 이용하여 간접적으로 특성 길이를 구하는 모델이다.

난류점성계수는  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$  로 주어지며

여기서  $C_\mu$ 는 실험결과로부터 산출되는 값이다.  $k-\epsilon$  난류모델은 대류항, 난류확산항, 생성항, 분자확산항과 소산항으로 구성되어 있다.

여기서 난류확산항은  $k$ 의 구배확산(*gradient diffusion*)으로 표현되며, 생성항은 레이놀즈 응력을 평균속도의 변형률로 표현한다. 분자 확산항은 난류확산항 등 다른 항에 비해 작으므로 무시 가능하다. 소산항은  $\epsilon$ 의 수송방정식으로 구해질 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$k-\epsilon$  모델로 이용되는  $k$ 의 수송방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

소산항은 엄밀하게 대류항, 주류에 의한 생성항, 와섬유의 신장에 의한 생성항, 확산항, 점소산항과 분자확산항 등 여러 가지 성분에 의해 만들어진다.

k-ε 모델에 이용되는 ε의 수송방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{m_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right)$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

## 2.2 해석모델

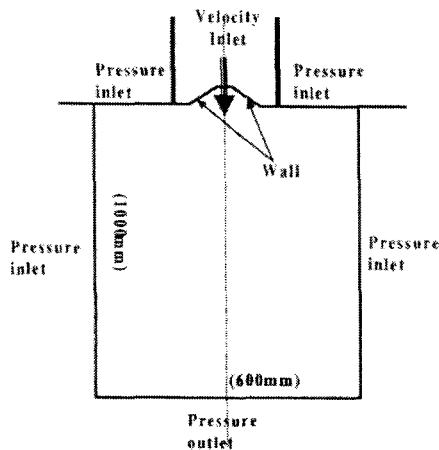


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain.

Fig.1은 계산 영역을 나타낸 것으로 중심축을 중심으로 축대칭이며, 실제분무 영역과 유사한 검사체적이다. 이 계산 영역 안에서 노즐팁에서 고압으로 분사된 물이 공기와 함께 대기압이 작용하는 공간으로 확산되는 현상을 초음파

를 가했을 때와 가하지 않았을 때로 나누어 계산하였다

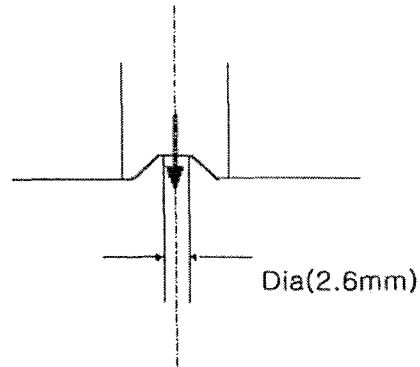


Fig. 2 Tip of injection nozzle.

Fig. 2는 위 부분에 설치된 노즐의 팁 주위의 상세도로써 공기와 함께 액적이 직경 2.6mm의 노즐 출구를 통해 아래 방향으로 분사되어 분무가 형성되는 것을 나타낸 것이다

## 2.3 경계조건

노즐의 형상은 원형이며, 액적은 위에서 아래 방향으로 분사하여 분무되어진다.

사용 좌표계로는 실린더 좌표계를 사용하였으며, 좌표축의 원점은 노즐의 끝부분 가운데 위치한다.

축방향을 z축으로 하였으며, 반경방향을 r 축으로 하였다. 전체 해석(계산) 영역은 노즐 유동의 특성을 고려하여, r 방향 길이 300mm, z 방향 길이 1000mm로 하였다.

기타 유동 및 분무 관련 조건들은 다음과 같다.

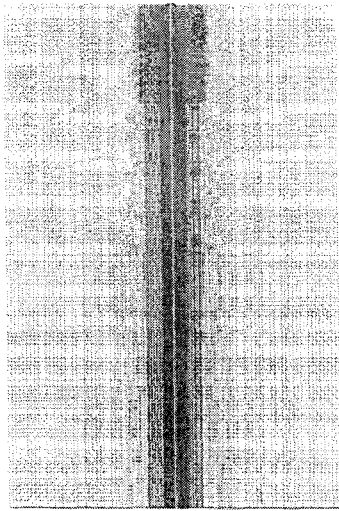
노즐직경은 2.6 mm 이며 분무 유량은 Water 유량이 0.16 liter/min 이고 Air유량은 70 liter/min로 고정하였다. 분무 액적의 평균 입경은 초음파비가진시가 55 micron 이며, 초음파가진시가 50 micron 이며, 이 수치는 PDA에 의해 측정된 값이다.

유속 (Inlet Velocity)은 219.9 m/sec 물성치

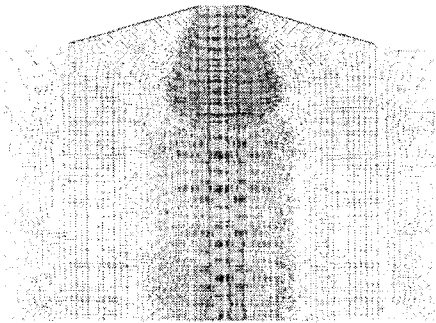
(Density)는 공기가 1.225 kg/m<sup>3</sup> 물이 998.2 kg/m<sup>3</sup> 이다.

## 2.4 수치해석 방법

### 2.4.1 격자형태



Whole lattice form.



Nozzle region lattice form.

Fig. 3 Lattice form.

Fig. 3은 계산에 사용된 계산 격자를 나타내며 총 격자수는 34181개이다. 그리고, 사용격자의 형태는 Quad unstructured mesh이다. 유동장의 변화가 클 것으로 예측되는 노즐 주위와 중심축 주위에 격자를 밀집시킨 축대칭 격자형태이다.

아래 그림은 노즐 주위의 격자를 확대한 것으

로 초음파 에너지 비가전시와 가전시의 분무각의 차이를 정확히 계산하기 위해 격자수를 증가시켰다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험용 2-유체노즐

Fig. 4는 본 실험에 사용한 노즐로서, 분무출구를 분사축 방향으로 전진 또는 후퇴시킬 수 있게 제작되어 있다. 따라서 상기의 2가지 분무방식인 외부혼합형과 내부혼합형을 겸용할 수 있다. 이는 분무출구를 노즐 출구면을 중심으로 후퇴 또는 전진하므로 분무상태와 분무액적의 크기를 조절할 수 있다.

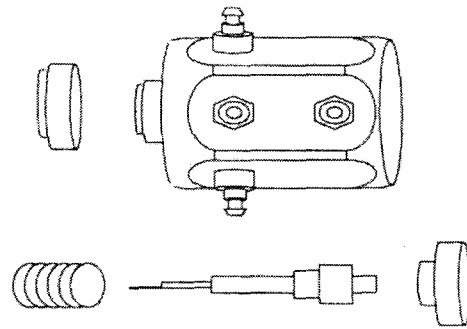


Fig. 4 Detail drawing of nozzle part.

### 3.2 실험장치

#### 3.2.1 실험장치

Fig. 5는 분무 실험장치의 개략도이다. 노즐은 이유체 노즐을 사용했으며, 초음파 공급장치는 초음파 발전장치와 초음파 에너지를 추가하는 장치로 구성되어 있다. 초음파 에너지는 관로 상에 추가하는 방법과 노즐과 진동자를 직각으로 부착시켜 노즐 자체에 에너지를 추가하는 두 가지 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 액체는 수돗물을 사용하였다.

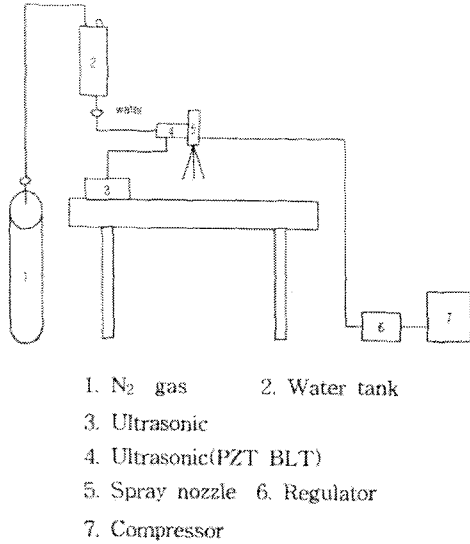


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus.

### 3.2.2 고속도 사진 촬영

Fig. 6에 본 연구에 사용된 부상 유적군 촬영용 광학계측장치의 개략도를 나타내었다. 레이저시트의 광원으로는 파장 514.5nm의 아르곤 이온 레이저(Spectra physics社, satbilite 2017)를 사용하였다. 레이저광은 평볼록렌즈( $f=500\text{mm}$ )를 거쳐, 원통형렌즈( $f=58\text{mm}$ )에 의해서 진동자와 반사관의 중심축을 포함한 두께 약 1mm의 시트를 형성하였다. 이 레이저광을 이용하여 분무의 모양과 거동을 보다 선명하게 가시화 하였다.

레이저 시트에 의해 조사(照射)된 미산관광은 아르곤 이온 광간섭 필터(중심파장 514.5nm)를 통해 레이저 시트와 수직방향으로 배치된 고속도 CCD 카메라(KODAK社, Ektapro HS Motion Analyzer Model 4540)에 의해 촬영되었다. 촬영용 렌즈(Nikon社, Nikkor 초점거리 50mm,  $f:1.2$ )의 조리개는 완전히 개방하였다. 촬영 프레임레이트는 4500매/초이고, 촬영매수는 1024매(촬영시간 약 0.23초)로 실험을 실시하였다. 또 얻어진 화상은  $256 \times 256\text{pixel}^2$

로, 퍼스널 컴퓨터(NEC社, PC-9801ES)에 삽입하여 8bit(256계조)의 농담(濃淡)으로 디지털 되어 기록된다.

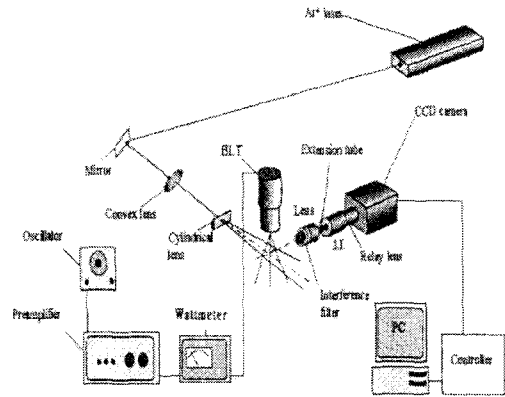


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus for droplet clusters measurement.

### 3.2.3 PDA

액적의 직경과 축방향 속도의 동시측정에는, 레이저도플러 유속계를 이용하여 측정한다.

PDA광학계가 Fig. 7이다.

광원은 Ar<sup>+</sup>(Spectra Physics, Stable 2016, 발진 파장  $\lambda = 514.5\text{ nm}$ )를 이용한다.

Optical fiber를 통해 송광계에 유도된 레이저광은, 송광계의 beam seperater에 의해 2개의 힘으로 나누어져, 빔 간격 32mm의 평행광으로 만들어지며, 렌즈경 75mm의 렌즈에 의해 전방 310mm의 위치에 교차하여, 분무류 중에 측정체적을 형성한다.

이때, 한쪽의 빔에는 측정되는 속도의 방향을 알수 있도록, AOM(음향광학소자)에 의해 주파수 쉬프트(40MHz)된다.

수광계에는 DANTEC사의 57×10형 (수광렌즈경 75mm, 초점거리 310mm)를 이용하였으며, 신호처리에는 동사제품인 58N10 형의 신호처리기를 이용한다.

사용한 신호처리기는 DANTEC사 58N10 형, 주파수쉬프트 양이 40 MHz로서, 주파수대는

이하의 6종류의 설정이 가능하며 수광방향은 광축진방향으로부터 73.7°의 방향으로 정한다. 이것은 실험에 사용하는 액적에 대해서, 액적에 의한 1차 굴절광이 지배적이어서, 반사광의 영향을 받지 않고, 또한 온도에 대해서도 변화하는 액적의 굴절율이, 도플러 신호의 위상화와 입경을 관련시키는 교정곡선에 미치는 영향을 거의 무시할 수 있는 각도에 상당한다.

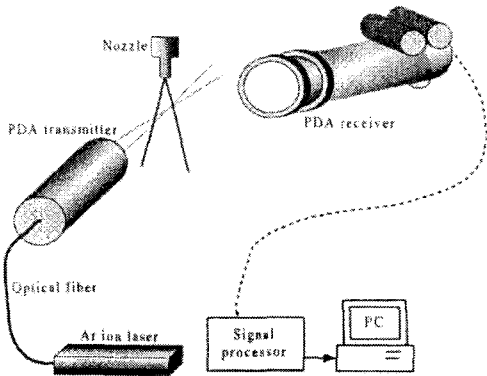


Fig. 7 Schematic diagram of PDA.

4. 결과 및 고찰

4.1 분무실험

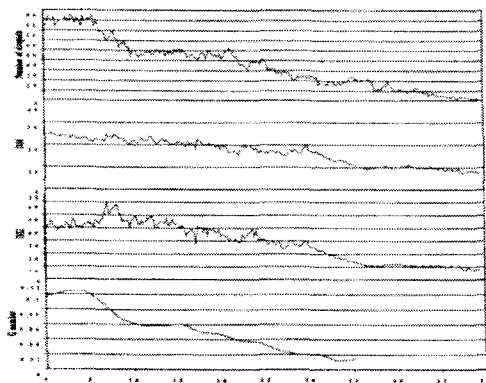


Fig. 8 Group spray data of ultrasonic.

Fig. 8을 살펴보면 액적의 밀집도의 차이가 나타나는데 시간이 지날수록 분무의 농도가 희박하여 총액적수가 일정한 값을 유지하다가 축방향으로 지날수록 단조 감소하는 형태가 나타난다. 이러한 현상은 중심에서 측정분무 액적의

농도가 높아지고, 분무주 주위에서 그룹군(Group droplets)현상이 발생함을 의미한다. 이와 같은 형태로 보아 분무각의 축소와 함께 총액적수도 단조 감소함을 알 수 있고 분무 농도의 밀집도가 낮다는 것을 알 수 있다. 또한 시간이 진행되어 갈에 따라 증발현상과 함께 분무의 희박에 의한 현상이라고 판단된다.

분무 액적의 형태를 고속도 카메라로 촬영하였으며, 초음파 비가진시, 관로상에 초음파 에너지를 가하였을 때, 노즐에 직접 부가하였을 때의 분무의 사진이다. 분무속도가 매우 빠르기 때문에 개개의 입자를 정확하게 관찰할 수는 없었지만 분사되는 액적의 형태를 정성적으로 파악 할 수 있었다.

초음파 비가진시 직경이 큰 입자가 많이 보이고 있으며, 초음파 에너지를 부가하였을 때 점점 액적이 미세해지고, 균일해지는 형상을 볼 수 있다.

Fig. 9는 초음파 비가진시의 레이저 이용 고속도 사진이고, Fig. 10은 관로상에 초음파 에너지를 가하였을 때의 고속도 사진이다.

Fig. 11은 노즐에 초음파 에너지를 직접 가하였을 때의 고속도 사진이다.

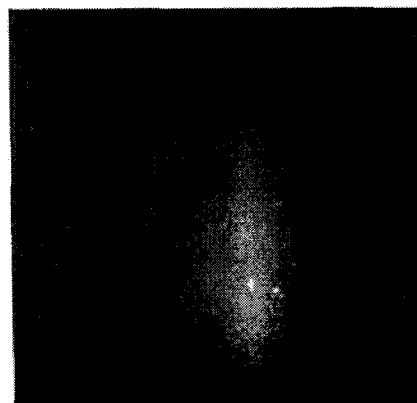


Fig. 9 Shape of droplet clusters without ultrasonic waves.

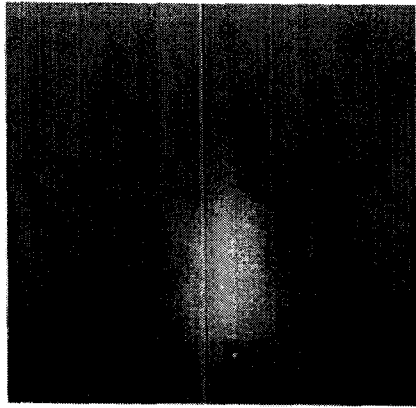


Fig. 10 Shape of droplet clusters with ultrasonic waves in tube.

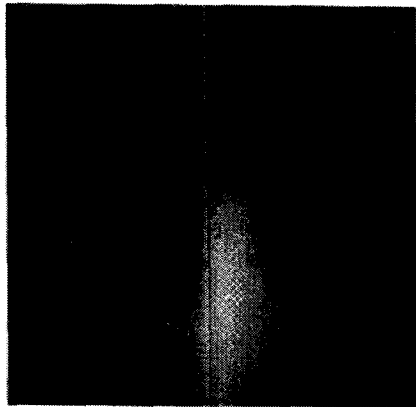


Fig. 11 Shape of droplet clusters with ultrasonic waves in nozzle.

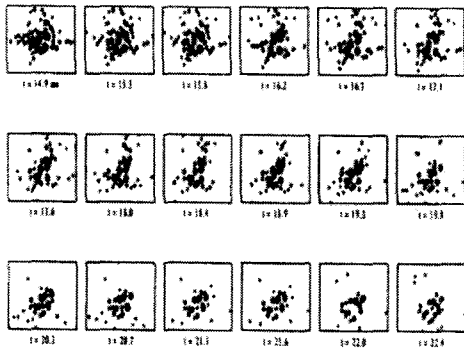


Fig. 12 Spatial distribution of droplet clusters.

Fig. 12는 초음파분무의 형태를 공간 분포로

그래픽하여 시간의 변화에 따른 공간 분포를 나타낸 것이다. 초기 분사된 분무가 초기군(Group) 밀집도에서 보면 분무 농도가 중앙에서 진하게 형성되다가 시간이 지남에 따라 분무주가 희박하게 형성된다. 이 경향을 Fig. 8의 측정 현상과도 매우 잘 일치하는 경향이며,  $t=22.4\text{ms}$  후에는 분무주의 밀집도에서 보면 초기 형성된 분무의 밀집도와 비교하면 62% 감소된 경향이며 분무의 크기도 시간의 변화와 함께 액적이 증발하여 감소하는 경향을 나타내고 있다.

#### 4.2 수치해석 결과

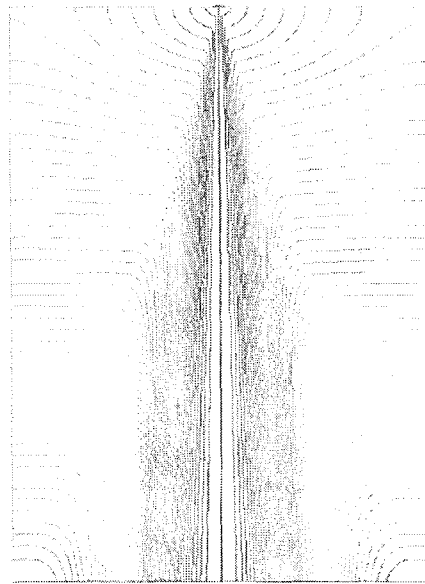


Fig. 13 Flow pattern of total area.

Fig. 13은 유동장의 하부로 갈수록 노즐에서 분사된 공기 에너지가 감소하여 압력에너지가 상승하게 되며, 저압부에서 주위공기에 의해서 동반류가 형성됨을 파악할 수 있었다. 노즐에서 분사된 공기는 강한 속도로 축방향으로 제트(jet)유동을 형성하며 분사되어지는 것을 나타낸다. 이 영향으로 Fig. 14에 나타난 것과 같이 노즐팁의 주변 공기가 가까운 곳에서는 중심 방향으로 편승(entrained)되는 현상을 보인다.

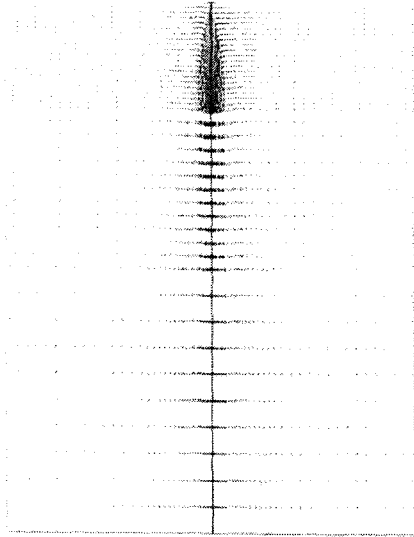


Fig. 14 Velocity vector of total area.

Fig. 14는 노즐 주변에서 분사류에 의해 큰 속도를 갖는 유동장이 형성됨을 볼 수 있다. 그러나 넓은 영역으로 갈수록 분출된 속도가 주변 공기의 영향으로 확산되기 때문에 유속의 크기가 감소하는 형상을 보여주고 있으며, 이런 현상은 중심축 근처의 중앙부보다 외측에서 먼저 발생하며 그 현상이 하부로 갈수록 중앙부에도 발생함을 보여주고 있다. 그리고, 이러한 현상은 노즐팁 주위의 확대도인 Fig. 15에서 분명히 나타나고 있다. 또한 중심축 주위의 속도가 하부로 갈수록 작아짐을 분명하게 확인할 수 있다.

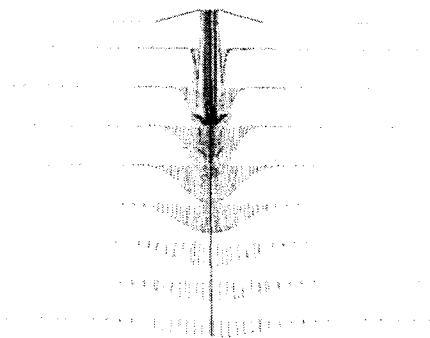


Fig. 15 Velocity vector near nozzle.

#### 4.3 비산방지 효과

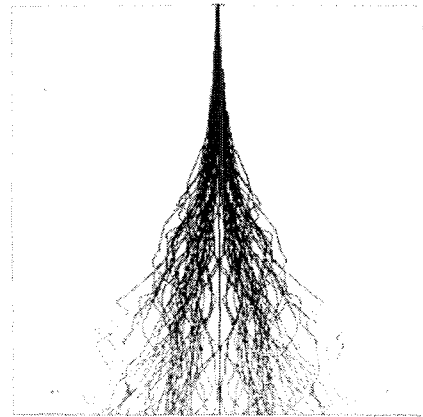


Fig. 16 Atomizing form at ultrasonic waves unused.

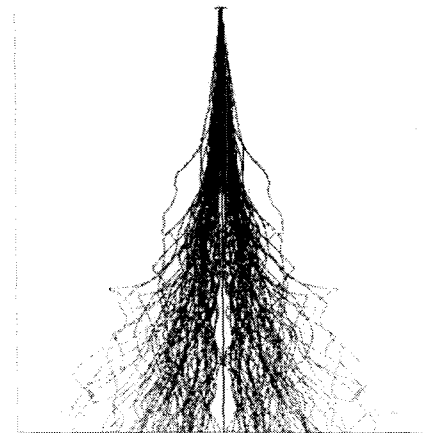


Fig. 17 Atomizing form at ultrasonic waves energy used

입구에서 공기와 함께 분출된 분무된 액적은 난류 유동의 영향에 의하여 넓은 영역으로 확산되어지는 모습을 보여주고 있다.

초음파 에너지 가진시의 액적 크기(평균입경 약 50 micron)가 비가진시 액적 크기(평균입경 약 55 micron) 보다 적은 관계로 더 크게 확산되어짐을 볼 수 있다.

노즐에서 분사되는 분무각에 있어서도 초음파 가진시에서 분무각이 넓어짐을 알 수 있으며 실험과 동일한 결과를 얻었다.



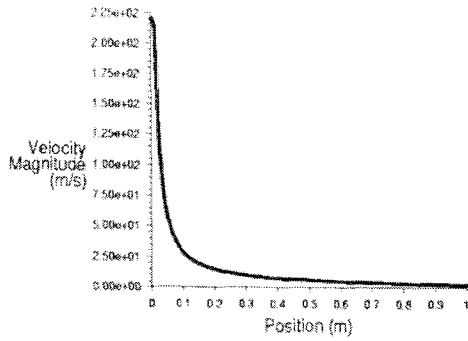


Fig. 18 Velocity distribution of central axis direction.

Fig. 18은 속도 벡터에서 관찰된 바와 같이 중심축에서 속도의 크기가 넓은 지역으로 갈수록 비교적 급하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 현상을 분무주의 경계 밖의 미세 입자는 속도가 저감하며, 중심축을 향해 빠른 속도 영역을 형성하고 있다.

5. 결론

1. 고속도 카메라로 분무형상을 촬영하였을 때 비가진시, 관로상, 노즐자계의 순으로 액적이 균일하고 미세하게 분사되는 결과가 나왔는데 이는 초음파에너지를 부가하였을 때 분무 미립화 효율의 향상을 알 수 있었다.
2. 전산유동해석을 통한 액적의 분사모습을 볼 때 초음파가진시가 분무가 미치는 영역이 넓고, 분무각이 크며, 분무액적의 미세화가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다.
3. 전산유동해석과 실험을 통한 결과에서 초음파 가진시가 비가진시보다 미립화 효율이 상승됨을 알 수 있었으며, 전산유동해석과 실험에서 모두 동일한 경향과 분사각과 분무주, 미립화 효율이 상승되는 것을 확인하였다.

참고 문헌

1. 정진도, 유병구, "유해배기가스 저감을 위한 Hole형 노즐의 미립화 특성실험", 한국액체미립화학회, Vol. 2, No. 3, 1997, pp.17-24
2. 윤면근, 류정인, "초음파 연료 분사장치의 분무특성에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, 제1권, 제1호, pp.85-91, 1996
- 3.千葉 近, "超音波による液體微粒化の研究", 内熱機關, Vol. 11, No. 2, 1972, pp.11-22
4. Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, 2000
5. K. Namiyama, "Development fo ultrasonic atomizer and its application to S.I.Engine", SAE paper, No.890430, 1989
6. 김승모, "초음파를 이용한 부상유적군의 연소 기구에 관한 기초 연구", 호서대학교 석사 학위논문, 2001
7. 주은선, 정진도, 송민근, "2-유체 분무에서 액체미립화에 대한 초음파의 영향에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, 제3권, 제4호, pp.50-57, 1998
8. H.H. Chiu, and C.L. Lin, "Anomalous Group Combustion of Premixed Clusters", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., pp. 1653-1661, 1996
9. B.E. Noltin하 & E. A. Neppiras, "Caviation produced by ultrasonics: thoretical conditions for the onset of cavitation", Proc. Phys.Soc., 1952, 64B 1032
10. 주은선, 정진도, "초음파가 가진된 유체유동의 PIV계측에 의한 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 25, No. 6, 2001, pp.1281-1290