

## 농업용 액체 분무용 초음파 분사효과에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on The Effect of Ultrasonic Atomization in Agricultural Twin-fluid Nozzle

정진도\*, 임영재\*\*

J. D. Chung, Y. J. Lim

#### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate experimentally 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 tested by applied with ultrasonic energy .

In this investigation, the measurement and calculation of spray droplet are to analyze the effects of ultrasonic energy on the agricultural atomization system.

Through the measurement of spray angle, spray column using , high speed camera and PDA, it is found that nozzle type is highest efficiency than that of tube type and conventional type.

It was found that the ultrasonic energy increased the atomization efficiency of spray droplets about 9% respectively and spray angle was wide spray.

주요기술단어: Twin-fluid Nozzle(2-유체 노즐), High speed camera(고속도 카메라), Atomization (미립화), Ultrasonic(초음파)

#### 1. 서론

일반적으로 분무의 미립화 조건은 공기와 유량비, 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 분사조건의 변화에 따라 평균직경, 분무각, 집중도, 관통도, 액적의 속도 및 크기분포 등의 미립화 특성에 영향을 끼치게 된다.

초음파 분무는 액체에 초음파 진동 에너지를 부가하는 것으로 다른 미립화 방법에 비해서 비교적 분열이 잘 되고 분무량이나 입경의 제어가 용이하며, 장치가 간단하고 조용한 무화가 얻어지는 장점을 가지고 있다.<sup>1)</sup>

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.

분무 입경 측정 방법은 크게 기계적인 포집법과 광학적인 방법으로 나뉜다. 기계적 포집법

\* 정회원, 호서대학교 환경공학과

\*\* 호서대학교 대학원 환경공학과

은 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 방법으로 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 프린지 패턴을 지나는 액체에 의해 산란된 빛의 주파수와 강도를 측정하여 액체의 입경분포와 속도분포를 측정하는 방법이다.<sup>1,2)</sup>

초음파를 이용한 액체 미립화 연구는 1759년 Lagrange에 의하여 음의 전파에 대한 수학적 연구가 발표된 이래 1972년 千葉, 1980년 中山 등에 의해 초음파를 이용한 액체 미립화 실험을 통하여 주파수와 평균입경 및 입경분포 등에 관한 실험결과를 발표하였다.<sup>3)</sup> 현재 가장 지배적인 의견은 초음파를 이용한 미립화 기구로 공동현상을 들고 있다. 즉, 진동자의 급격한 속도변화에 의해 액체내의 기포가 생성되고 이것이 액면에 적용되어 미립화를 촉진시킨다는 것이다. 이 이론은 1978년 C.Chiba<sup>3)</sup>에 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>4,5)</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 분무기인 비료나 농약의 분사시 미립화

율이 낮아서 액적의 낭비가 높고 효율성이 떨어지고있는 실정으므로 현재 분무시 낭비되고있는 농약과 비료의 효율성을 높이고자 분무각, 분무주의 크기 등을 구명코려한다

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 초음파 혼 설계<sup>4)</sup>

진동자를 진동시킨 후의 진폭은 진동자의 강도에 따라 한계가 있으며 20kHz 부근의 진동자에서는 수  $\mu\text{m}$  이하로 억압해야 하나 실제 이용에 있어서는 15~40 $\mu\text{m}$  정도의 진폭을 필요로 한다.

그러므로 진동자의 작은 진폭으로부터, 이용할 수 있는 큰 진폭을 얻기 위해서는 강도가 강한 재료로 끝이 가는 혼(Horn)을 만들어 진동자에 부착하고, 진동에너지를 작은 면적으로 집중시켜야 한다. 혼은 일반적으로 대단히 큰 용력을 전달해야 하므로 합부로 이음매를 만들면 특성이 변하거나 이음매가 떨어지는 경우가 생긴다.

혼은 진폭 확대율이 가장 큰 계단(step) 형 혼을 사용하였는데 이 혼은 단면적의 비가 증가할수록 진폭도는 증가하지만 용력분포가 커지는 단점이 있다. 본 실험에 사용된 혼의 재질은 Al 7075-T651이고, 그 주요특성은 Table 1과 같다.

본 실험에 사용된 혼은 두 가지 형태로서 효율을 비교하기 위해서 Fig. 1과 Fig. 2가 본 실험에 사용된 혼의 설계도면이다.

Table 1 Specification of horn

Name of alloy	Al 7075 T651
Tensile strength	58 Kg/mm <sup>2</sup>
Hardness	150 Bhn
Shear steel	34 Kg/mm <sup>2</sup>
Fatigue limit	16 Kg/mm <sup>2</sup>

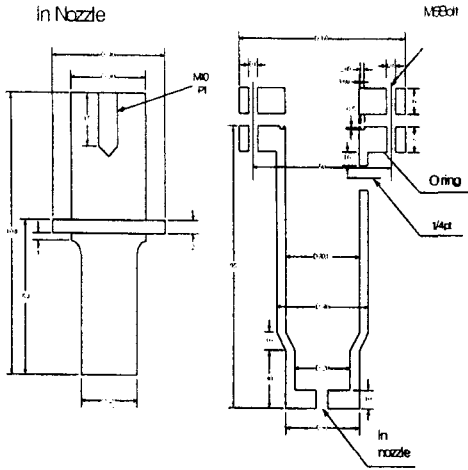


Fig. 1 Design of horn mounted in nozzle.

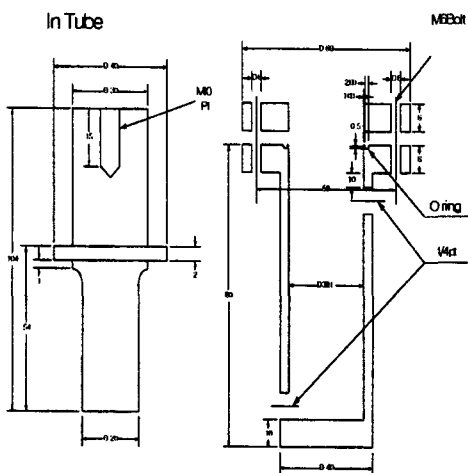


Fig. 2 Design of horn mounted in tube.

Fig. 1은 노즐 직접 설치용으로 노즐의 분무 방향에 대하여 직각으로 노즐에 부착하여 사용할 수 있도록 제작하였다.

다른 변화를 위하여 Fig. 2는 관로 설치용으로 물탱크와 노즐의 중간의 튜브에 설치할 수 있도록 제작하였으며, 노즐에서 가까운 위치에 부착하였다.

Fig. 3은 노즐에 직접 부착하는 혼의 분해사진이며, Fig. 4는 관로상에 부착하는 혼의 분해사진이다.

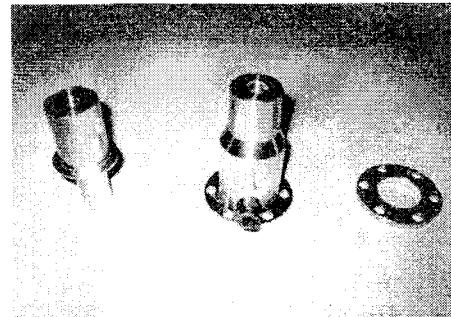


Fig. 3 Photograph of decomposed horn mounted in nozzle.

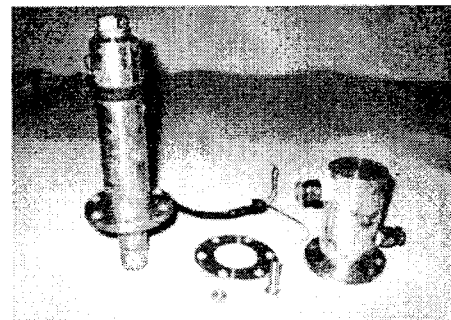


Fig. 4 Photograph of decomposed horn mounted in tube.

## 2.2 진동자

자연계에서 발생된 초음파를 직접 이용하기에는 여러 가지 어려움이 있으므로 필요한 주파수와 강도를 얻기 위해서는 인공적으로 초음파를 발생시킬 수 있는 장치를 만들어야 한다.

이러한 장치가 바로 초음파 발생장치이며, 매질에 따라 또는, 원하는 주파수에 따라 여러 종류의 진동자(Transducer)가 있으며 Inner bolted Langevin 진동자는 두 개의 다른 금속판(탄성판)사이 에 수정판을 모자이크 상으로 모아 접착 또는 볼트 체결하여 저주파수의 강한 초음파를 얻을 수 있는 진동자이며, 볼트 죄임 방식이므로 두 금속판의 열팽창계수가 달라도 떨어지는 일이 없으며 효율이 높다. 실험에 사용한 초음파 진동자는 전기음향 변환효율이 높고 진동속도가 빠르면서 발열이 적고 가

Table 2 Specification of bolted Langevin transducer

Model Name	2328PC
Working voltage(V)	AC 220
Frequency extent(kHz)	25~31
Out PutMax (W)	600
Type	BLT
Capacitance(pf)	3150
Electricity input (W)	200

격도 저림하며, 성능과 내구성이 우수한 볼트 체결 랑게빈 진동자이며, 그 주요특성은 Table.2와 같다.

2.3 실험용 2-유체 노즐

농약 분무에는 액적이 고르고 미세하게 미립화 되면서 멀리까지 분사됨이 요구된다. 이를 위해 2-유체 분무방식이 이용되며 공기보조 미립화 방법과 공기충돌미립화 방법의 장점을 따서 농약분무 노즐로서 적합하도록 설계되어야 한다.

Fig. 5는 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. 6은 노즐의 분해도이다.

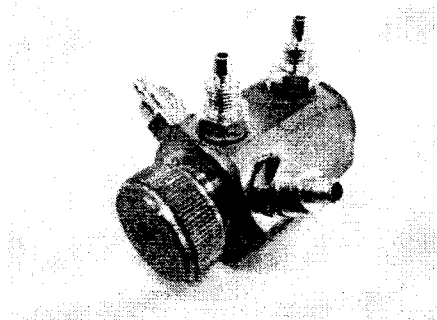


Fig. 5 Photograph of injection nozzle and connection part.

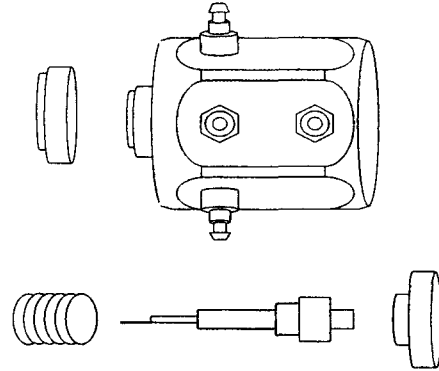
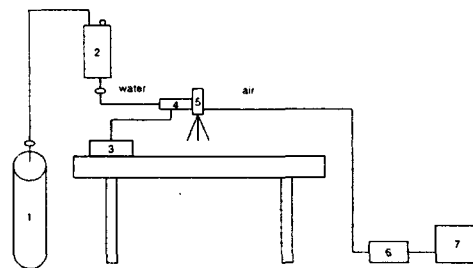


Fig. 6 Detail drawing of nozzle part.

2.4 실험 장치

2.4.1 실험 장치

Fig. 7은 분무 실험장치의 개략도이다. 노즐은 이류체 노즐을 사용했으며, 초음파 공급장치는 초음파 발전장치와 초음파 에너지를 부가하는 장치로 구성되어 있다. 초음파 에너지는 관로상에 부가하는 방법과 노즐과 진동자를 직각으로 부착시켜 노즐 자체에 에너지를 부가하는 두 가지 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 액체는 수돗물을 사용하였고, Photo.8은 예비실험시의 장치이고, Photo.9는 오사카 대학에서의 분무 유동 측정시 장치이다.



- 1. N<sub>2</sub> gas
- 2. Water tank
- 3. Ultrasonic
- 4. Ultrasonic(PZT BLT)
- 5. Spray Nozzle
- 6. Regulator
- 7. Compressor

Fig 7 Schematic diagram of the experimental apparatus.

2.4.2 고속도 사진 촬영

Fig. 8에 본 연구에 사용된 액적 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 반사판의 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 프레임릿은 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.

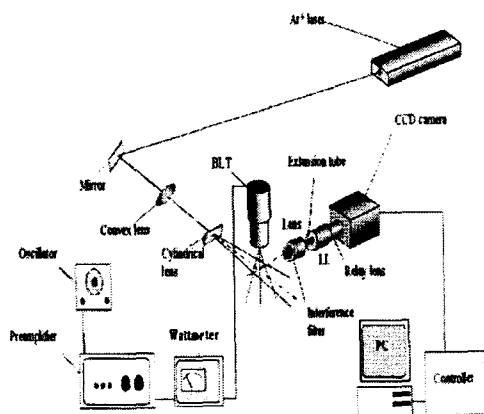


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus for droplet clusters measurement.

2.4.3 PDA

액적의 직경과 축방향 속도의 동시측정에는, 레이저도플러 유속계를 이용하여 측정한다.

PDA 광학계가 Fig. 9이다.

광원은 Ar<sup>+</sup>(Spectra Physics, Stable 2016, 발진 파장  $\lambda = 514.5\text{ nm}$ )를 이용하였고, Optical fiber를 통해 송광계에 유도된 레이저광은, 송광계의 beam seperater에 의해 2개의 빔으로 나누어져, 빔 간격 32mm의 평행광으로 만들어지며, 렌즈경 75mm의 렌즈에 의해 전방 310mm의 위치에 교차하여, 분무류 중에 측정 체적을 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 58N10형의 신호처리기를 이용한다.

사용한 신호처리기는 DANTEC사 58N10형, 주파수쉬프트 양이 40 MHz로서, 주파수대는 이하의 6종류의 설정이 가능하며 수광방향은 광축전방으로부터 73.7°의 방향으로 정한다.

이 각도는 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.

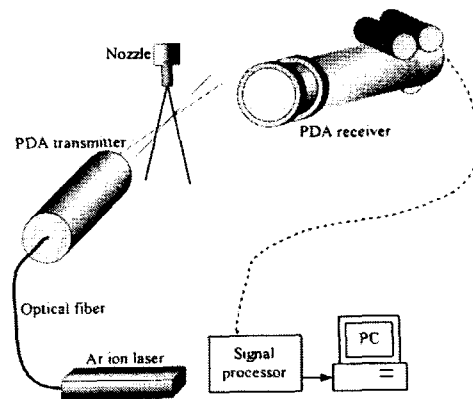


Fig. 9 Schematic diagram of PDA.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기초실험

노즐의 특성을 파악하기 위해 분사되는 물의 압력과 공기의 압력을 변화시키며 분무 정도를 파악하였다. 노즐팁의 변화에 따라 분무 액적에 많은 영향을 주었으며, 공기압력 변화도 중요한 인자로 작용한다.

Fig. 10은 질소 가스로 물탱크에 압력을 일정하게 주고, 공기의 압력과 질소가스의 압력을 변화시키면서 측정된 유량값이다.

공기압력이 증가할수록 유량이 감소하였다. 1.5bar에서는 유량이 1.6 l/min이나 압력을 가한 조건인 3.5bar에서는 0.4 l/min을 사용하였다. 이 결과를 해석하면 비닐하우스 내에서 농약, 비료등을 사용시 압력을 가한 경우가 더욱 경제적인을 알 수 있었다

Fig. 11은 분사 압력을 변화시켰을 때 분사 각도의 변화를 실험한 것이다. 동일한 압력조건에서도 공기분사 압력이 증가할 수록 분무각

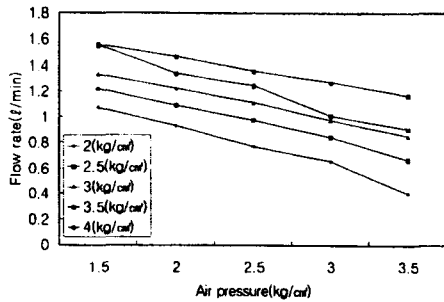


Fig. 10 Change of flow rate for variations of pressure of air.

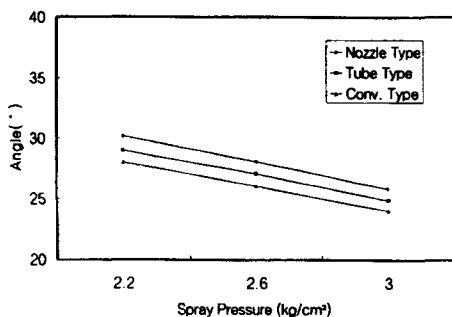


Fig. 11 Comparison of spray angles.

도는 줄어들고 분무주의 크기는 증가하는 경향을 볼 수 있다.

이 현상은 분무의 운동량의 원리와 일치하며 전체실험에서 동일한 결과를 얻었으며, 최적조건은 2.6 kg/cm<sup>2</sup>이었다. 관로형보다 노즐에 직접 초음파에너지를 가한 조건이 8~10% 분무각의 확산 효율이 증가되었다. 최적 노즐 조건은 노즐에 직접 초음파를 가한 것이다.

#### 3.2 분무실험

관로상에 초음파 에너지를 부가했을 때와 노즐에 직접 혼과 진동자를 부착하여 초음파 에너지를 부가했을 때 노즐에서의 분무각 사진이 Fig. 12와 13이다.

초음파에너지 부가하였을 때와 부가하지 않았을 때의 분무각의 변화를 볼 수 있었다. 관로상에 부가한 방법보다 노즐에 직접 부가하였을 때 분무각이 더 늘어남을 관찰할 수 있었다.

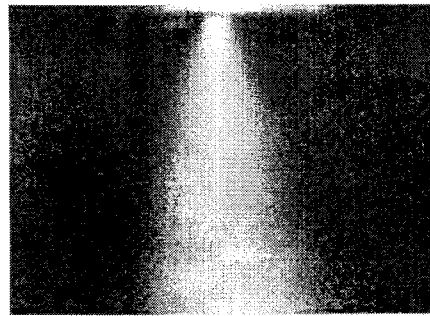


Fig. 12 Atomization phenomenon with ultrasonic waves in tube.

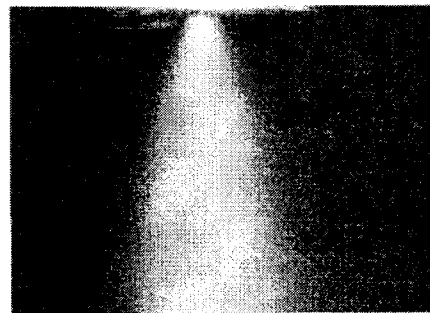


Fig. 13 Atomization phenomenon with ultrasonic waves in nozzle.

Fig. 14와 Fig. 16은 관로상에 초음파 에너지를 부가할때의 사진이고, Fig. 15와 Fig. 17은 노즐자체에 초음파에너지를 부가할때의 사진이다. 사진상에서 흰색부분의 면적이 분무주로서 압력이 증가할수록 분무주가 늘어남을 확인할 수 있었다. Fig. 18은 분사압력을 변화시켰을 때 실험 조건인 2.2~3kg/cm<sup>2</sup>의 분사압력 변화시 분무주의 크기를 측정한 실험 결과이다. 최대 분무주는 46mm~37mm 범위이며, 관로형보다는 노즐에 직접 초음파에너지를 부착한 것이 분무주의 길이가 8~11% 정도 길게 나타났다. 초음파 노즐에서 분무주는 약 50mm 정도 떨어진 지점에서 미립화 효율이 최대가 됨을 알 수 있었다. 또한 압력이 클수록 분무주가 커지는 이론과도 일치한다

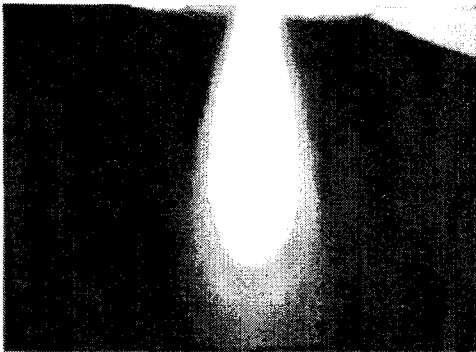


Fig. 14 Photograph of atomization column phenomenon with ultrasonic waves in tube.

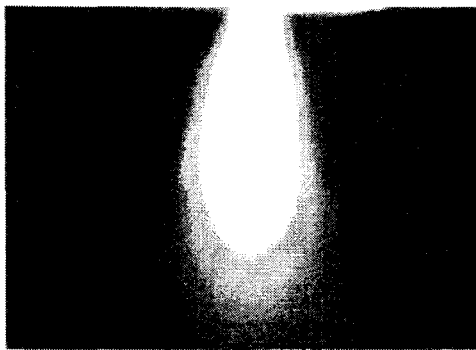


Fig. 15 Photograph of atomization column phenomenon with ultrasonic waves in nozzle.

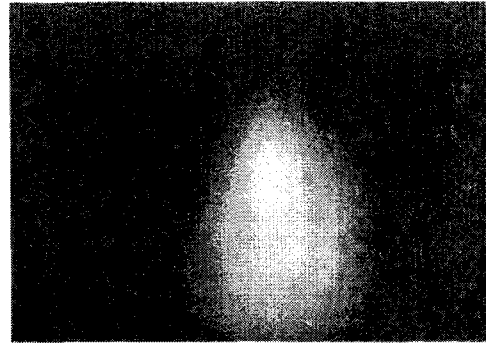


Fig. 16 Shape of droplet clusters with ultrasonic waves in tube.

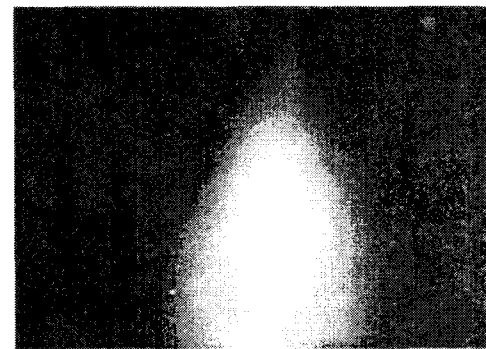


Fig. 17 Shape of droplet clusters with ultrasonic waves in nozzle.

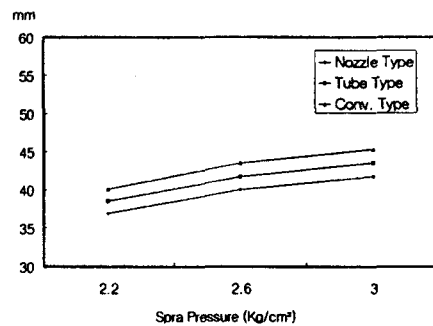


Fig. 18 Comparison of spray columns.

#### 4. 결론

1. 노즐에서 노즐팁의 변화와 주입 공기량의 변화가 분무의 미립화와 유량에 많은 영향

- 을 미침을 확인하였으며, 제시된 실험조건에서 최적 유량과 공기 압력을 측정하였다.
2. 관로상에 초음파에너지를 부가한 방법과 노즐 자체에 부가한 방법 모두 미립화 효율이 향상됨을 관찰할 수 있었다.
  3. 분사된 분무각을 비교하였을 때 초음파 비가진시보다 초음파 가진시인 두 가지 경우, 관로상과 노즐 자체에 초음파를 가하여 분무하였을 때를 비교하면 비가진시, 관로상, 노즐자체의 순으로 분무각이 증가함을 볼 수 있었다.
  5. 초음파 에너지를 관로상에 가하였을 때보다 노즐에 직접 작용시켰을 때 그 효율이 더 상승됨을 레이저 이용 가시화와 분무주 크기 등에서 확인할 수 있었다.

사학위논문, 2001

8. 주은선, 정진도, 송민근, "2-유체 분무에서 액체미립화에 대한 초음파의 영향에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, Vol. 3, No. 4, 1998, pp.50-57
9. H.H. Chiu, and C.L. Lin, "Anomalous Group Combustion of Premixed Clusters", Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust., 1996, pp. 1653-1661

## 참고문헌

1. 정진도, 유병구, "유해배기가스 저감을 위한 Hole형 노즐의 미립화 특성실험", 한국액체미립화학회, Vol. 2, No. 3, 1997, pp.17-24
2. 주은선, 나우정, 이경열, "초음파 가진을 이용한 2-유체 노즐의 효율 향상", 한국농업기계학회지, Vol. 27, No. 4, 2002, pp. 317-326
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. 윤면근, 류정인, "초음파 연료 분사장치의 분무특성에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, Vol. 1, No. 1, 1996, pp.85-91
5. 나우정 외 4인, "농업시설 분무 냉방을 위한 분사노즐의 분무특성", 한국농업기계학회, 하계 학술대회논문집, 1997, pp.74-79
6. K . Namiyama, "Development for ultrasonic atomizer and its application to S.I.Engine", SAE paper, No.890430, 1989
7. 김승모, "초음파를 이용한 부상유적군의 연소 기구에 관한 기초 연구", 호서대학교 석