

2-유체 분무에서 액체미립화에 대한 초음파의 영향에 관한 연구

A Study on Ultrasonic Effects for the Atomization in a Twin-Fluid Spray

주은선*, 정진도**, 송민근***

E.S.Ju, J.D.Chung, M.G.Song

ABSTRACT

The utilization of resonance should be considered to get the maximum effect of ultrasonic to atomize liquid. The ultrasonic generator, transducer, horn, and all attached parts are used to produce the resonance, and specially the characteristics of liquids such as liquid load, property, and etc., for the liquid atomization affinity are considered. In this study, the variable device of liquid load was made and distilled water and city water selected as experimental liquids were sprayed by a twin-fluid spray method and their diameters, distributions, and spray quantum of spray droplets were measured by the light scattering system. And all data were observed, compared and considered relatively.

In results, a lot of phenomena of liquid atomization affinity by ultrasonic appeared in accordance with liquid loads, namely head h.

주요기술용어 : Atomization(미립화), Ultrasonic(초음파), PZT BLT(PZT 체결형 램지방 변환기)
Twin-Fluid Spray(2유체 분무), Resonance(공진), Affinity(친화성)

1. 서론

액체 분무미립화는 에너지 공급의 주류를 이루는 분무 연소에서부터 자동차등 모든 장비의 외장을 위한 먼도포 및 약제 살포 등에 이르기 까지 산업전반에 걸쳐 광범위하게 응용되고 있는 공업적 핵심기술이다.

액체 분무미립화 방법으로는 2-유체분무형, 유압분무형, 회전형, 진동형, 정전기형 등이 있으며, 그 중 진동형의 하나인 초음파진동에 의한 미립화는 균일입경분포가 다른 분무에 비해 현저하다는 특성 등으로 양질의 균일입경액적을 얻을 수 있는 미립화 기구로 기대되고 있다.¹⁾

전형적인 초음파 분무 미립화 노즐로서 Berger²⁾ 와 Mochida³⁾ 등에 의한 것이 소개되면서 많은 연구들이 이어져, 초음파 분무는 낮은 유속과 낮은 공급유량에서 사용될 수 있다는 장점 등으로 반도체 공정 기기, 가습장치등에서 의약품제조의 도포공정등에 이르기까지 그 응용이 확산되고 있다⁴⁾.

초음파가 액체에 가해지면 액체분자의 분산작용, 공동현상, 점도 및 비중저하⁵⁾, 분자구조변화⁶⁾, 분자량의 저하 및 산화작용등 물리적 화학적 물성변화를 가져오며, 이들은 액체 미립화 친화성을 높이는 것으로 알려지고 있다.

류⁷⁾와 조⁸⁾ 등은 가솔린 기관에서, 양⁹⁾과 윤¹⁰⁾ 등은 디젤기관에서 기관의 성능향상이나 오염가스의 저감등을 통한 초음파 효과 등을

* 정희원, 경상대학교 항공기계공학부

** 정희원, 호서대학교 환경공학과

*** 경상대학교 대학원

보고한 바 있으며, 그 외 많은 거시적 관찰들이 활발하게 발표되어졌다.

초음파를 가장 효율적으로 사용하기 위해서는 공진을 이용해야 하는데 여기에는 발진자, 진동자는 물론 horn 등 모든 부착 부품은 다 포함되며, 특히 초음파에 의한 액체미립화 친화성 규명에는 액체 물성 및 부하등 물리적 조건 등이 중요한 인자로 포함되는데, 여기에 관한 미시적 관찰보고는 미미한 상태이다.

본 연구에서는 이 부분의 기초연구 단계로 진동자 두면상(頭面上)에 위치하는 액체 부하 등의 가변성을 가지기 위해 진동자를 아크릴 원통 가운데 유연하게 부착한 피스톤형 상하 이동부와 진동자 두면상의 액체가 누설되지 않게 잘 맞는 아크릴 원통 실린더를 구비하여 액체부하를 조절할 수 있도록 하고, 실험액체로 선택된 증류수와 수도수를 2-유체분무에 의해 분무시키고, 액체부하 즉 수두 h 에 따른 분무 액적의 크기와 분무량을 측정하여, 초음파를 액체에 가하기 전·후의 측정값들을 상대적으로 비교 관찰함으로써 더 근원적이고 미시적인 초음파 미립화 친화성에 관한 기초 자료를 얻고자 했다.

2. 실험장치 및 방법

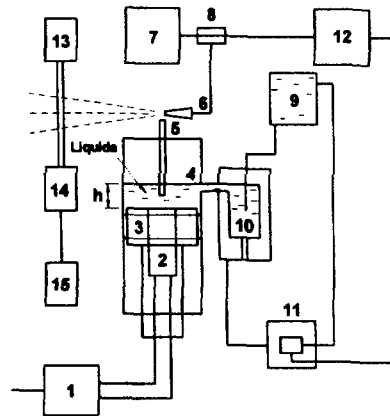
2-1. 2-유체분무 장치

2-유체분무는 공기의 작은 운동 에너지에 의해 좋은 분무를 얻을 수 있고 주위 공기와의 혼합이 쉽게 이루어지는 장점 등으로 분무의 공업적 산업에 많이 응용되고 있다. 이 분무는 내·외 2가지의 혼합 방법에 의해 분무액의 액적, 액주, 액막등 3가지 유형에 따라 미립화가 이루어진다.

본 연구에서는 초음파에 의한 액체의 미립화 친화성에 대한 더 근원적이고 미시적인 자료들을 얻기 위해 초음파의 액체 부하에 대한 특성 관찰이 가능하도록 가장 간단한 수직 2-유체 분무형을 선택하고, Fig.1과 같이 실험장치를 구성하였다. 수평노즐에서 분무되는 압축공기가 수직노즐 정점을 지나면서 유속에 의한 주위의 압력감소를 일으키고, 그로 인해 수직노

즐을 통해 상승하는 액체와 충돌함으로써 상기의 3가지 유형에 따른 2-유체분무미립화가 이루어진다.

수직 노즐을 담고 있는 액체들이 원통은 내경 8cm, 길이 40cm되는 아크릴 원통으로 실린더 역할을 하도록 하고, 초음파 진동자는 내경 4cm, 길이 50cm되는 아크릴 원통 속에 유연하게 장착하고, 윗부분 주위에 테를 붙이고 고무링을 끼워 피스톤형으로 만들어, 진동자 상부에 주어지는 액체가 누설되지 않으면서 실린더 상부에 정해진 수면과 진동자 상부 사이(h)가 가변 가능하도록 즉 상하 움직일 수 있게 만들었다.



- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. Ultrasonic generator | 9. Water tank |
| 2. Ultrasonic transducer | 10. Horizontal water instrument |
| 3. Piston | 11. Pump motor |
| 4. Cylinder | 12. Electronic circuit |
| 5. Vertical nozzle | 13. He-Ne laser |
| 6. Horizontal nozzle | 14. Detector |
| 7. Air compressor | 15. Computer |
| 8. Solenoid valve | |

Fig. 1 Experimental equipment

Fig. 2는 실린더 상부에 일정하게 유지되도록 만들어진 수면과 진동자 두면상과의 가변 간격에 의한 액체부하(수두: h)를 나타내고있다. 공기압축기는 2.5kg/cm²의 압력을 유지하도록 정밀한 슬레노이드 밸브를 장착하고 분무량등을 상대적으로 측정 비교하기 위해 간헐적으로 분무되게 하는 전자장치와 타이머를 부착하였다.

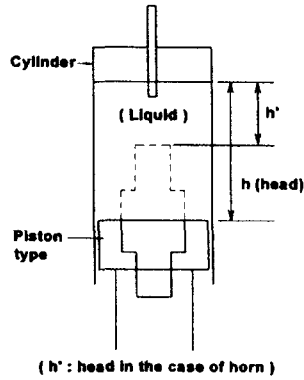


Fig. 2 Theoretical diagram of liquid load

2-2. 초음파 장치

본 연구에 사용된 진동자는 28kHz의 공진 주파수를 가진 PZT볼트 체결형 랑지방 transducer로서 Table 1에서 그 사양을 볼 수 있다.

Table 1. Specification of 28kHz PZT BLT

Frequency (kHz)	Admittance (mΩ)	Thermal Quality (Qm)	Capacity (pF)
28±0.4	35±7	1,000	3000±15%
Maximum Velocity (cm/s)	Maximum Altitude (μm)	Dia. & Thickness (mm)	Parts (ea)
60	9.6	∅29.5, 5	2

Fig. 3은 진동자를 중앙에 유연하게 장착한 피스톤형 장치 구성도 이다.

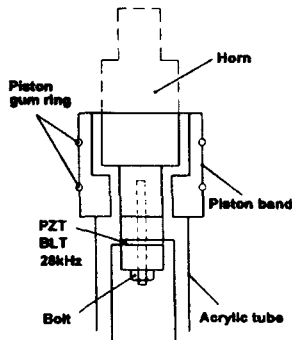


Fig. 3 Constitution diagram of ultrasonic PZT BLT as a piston type

2-3. 입경 측정장치

분무입경은 광산란측정법으로서 Fraunhofer의 회절원리를 이용한 Malvern system을 사용하여 측정하였다.

Fraunhofer 회절원리는 Fig. 4에서 그 원리를 볼 수 있다.

회절 산란 광의 광도 분포는

$$I(\omega) = I_0 \left\{ \frac{2 J_1(kd\omega)}{kd\omega} \right\}^2$$

으로 주어지며, 여기서

$$I_0 = \frac{EA}{\lambda^2}, \omega = \frac{r}{f}, k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ 이고 } J_1 \text{은}$$

1종1차 베셀함수, λ는 레이저 광의 파장, A는 입자의 단면적이다.

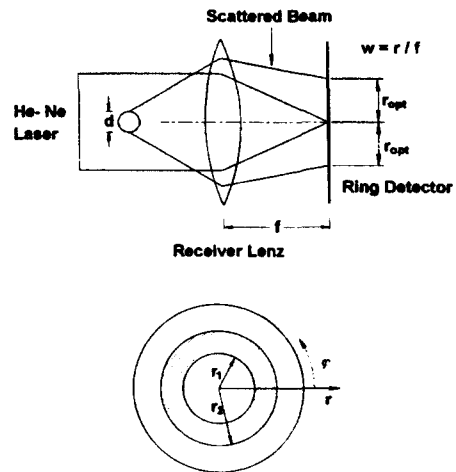


Fig. 4 Principle of the light scattering method for particle size analyzer

초점면상에서 $r = r_0$ 까지 (즉 $\omega = \omega_0$ 까지)의 누적 광량분포의 분포는 베셀함수의 특성을 이용하고 정리하면

$$L(\omega_0) = 1 - J_0^2(kd\omega_0) - J_1^2(kd\omega_0)$$

로 되고 ω_0 에 관하여 미분하므로 입자입경에 대한 식

$$d = \frac{1.375\lambda f}{2\pi r_{opt}}$$

를 얻을 수 있다.

여기서 r_{opt} 는 최적 반경이다. 이 원리에 의해

Malvern 입경 측정 장치가 구성되었다.

분무입경 측정에 사용된 광원은 He-Ne 레이저 (2mW, λ=633nm)를 사용하였고, 빔 확장기는 9mm이다. 푸리에 변환 렌즈의 초점 거리는 300mm이고, 렌즈와 분무노즐 중심까지의 거리를 350mm로 하였으며, 사용렌즈의 분무입경 측정범위는 1.2~188μm로 하였다. 분무입경의 측정값은 한번 측정에 있어서 2000data를 sampling하여 5회 측정하여 평균한 SMD값이다.

SMD를 기본이론에서 살펴보면 평균직경에 대한 적분형의 식은

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_s}^{D_m} D^a \left(\frac{dN}{dD}\right) dD}{\int_{D_s}^{D_m} D^b \left(\frac{dN}{dD}\right) dD}$$

로 주어지는데, 여기서 a=3, b=2 즉 order 5일 때 액적범위, 질량전환, 열전달 등에 응용되는 SMD(Sauter mean diameter)는 다음과 같이 정해진다.

$$D_{32} = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$$

여기서 N_i 는 임의의 입경의 개수이고 D_i 는 임의의 입경이다.

초음파에 의한 액적입경의 감소율은 초음파를 가하기전 상용분무일때의 액적 직경에 대해 다음 식으로 주어진다.

$$\text{감소율 } \Delta(\%) = \frac{\frac{\sum D_c}{n_c} - \frac{\sum D_u}{n_u}}{\frac{\sum D_c}{n_c}} \times 100$$

여기서 D_c 는 상용분무 때의 측정 액적 입경, n_c 는 측정회수, D_u 는 초음파를 가했을 때의 측정 액적 입경, n_u 는 그 측정회수이다.

축방향 또는 반경방향의 거리에 따른 SMD의 변화를 고려해야하나 본 논문에 있어서는 많은 실험 데이터의 처리 관계상 초음파 효과에 대한 상대적 비교 고찰에 사용 가능한 full cone type 분무단면의 중심 축으로 평균한 값을 대표적 값으로 취했다.

2-4. 분무량 측정장치

2-유체 분무에서 초음파에 의한 액적 분무량

을 상용분무와 상대적으로 비교 검토하기 위해 2-유체 분무장치에 solenoid valve, speed valve 및 전자 타이머를 장착하여 오실로스코프와 computer control에 의해 간헐적 분무를 가능케 하도록 하였다.

최대 압축공기로 출발하여서 정해진 회수 간격에서 3번 분무한 것을 획득장치에 의해 얇은 비닐봉지에 수집하여 공기를 뺀 액적의 분무증량을 1×10⁻⁴g 감도를 가진 초감도전자저울에 매 회 3번씩 측정하여 평균하였다.

이때 초음파를 가하기 전의 분무 즉 상용분무 액적량에 대한 초음파를 가했을 때의 분무 액적량의 증가율은 상기의 입경감소율 공식에서 분자항의 자리를 바꾸고 입경 대신에 분무량을 대입하여 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1 입경 분포도

Fig.5는 초음파 진동자 두면 상의 액체 부하 즉 액체 수두 h=5cm, 측정거리 s=15cm일 때 증류수에 초음파 진동을 부가하기 전 즉 상용분무 (conventional spray : con)일 때와 초음파를 증류수에 부가한 초음파 분무 (ultrasonic spray : ult)일 때의 분무 액적의 입경 분포도를 비교하고 있다. 2000data의 sample을 5번 측정한 평균값 중에서 상용분무와 초음파 분무량이 비교적으로 대표적인 histogram을 선택하였다.

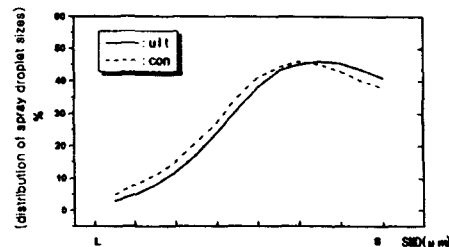


Fig. 5 Comparison of the distribution of spray droplet sizes between conventional and ultrasonic sprays in the case of distilled water as experimental liquid

상용 분무에서보다 초음파 분무의 입경분포도가 입경이 작은쪽(우편)으로 치우쳐 나타남을 볼 수 있다. 이는 초음파 분무의 상용분무에 대한 미립화 친화성을 보이고 있다.

3-2 입경 측정

Fig.6은 실험액체로서 증류수를 사용했을 때, 측정거리에 따른 상용분무와 초음파 분무에 의한 액적입경의 크기를 비교한 것으로, 측정거리가 15cm에서는 상용분무 액적입경보다 초음파 분무액적입경이 뚜렷이 작아졌음을 볼 수 있다. 이는 초음파가 액적의 분무미립화에 영향을 끼쳤음을 보이고 있다. 측정거리 15cm보다 먼 25cm에서는 상용분무 액적과 초음파 분무액적의 크기간에 큰 차이가 나타나지 않고, 15cm때보다 전반적으로 액적의 크기가 크게 나타났다. 이는 작은 액적들은 큰 액적에 비해 관통력이 약해서 먼 거리까지 도달하지 못하고 도달 전에 자연 낙하한 것으로 사료된다.

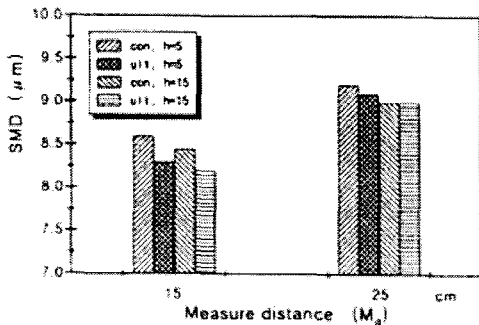


Fig. 6 Comparison of spray droplet sizes between conventional and ultrasonic sprays in accordance with measure distance M_a

Fig.7은 액체의 부하 즉 수두(h)에 따른 상용 분무와 초음파 분무액적의 입경을 비교하여 나타낸 히스토그램이다. 액체수두 h가 5, 10, 15cm 모두에서 측정거리 15cm일 때는 상용분무때보다 초음파 분무 때의 분무액적 평균직경이 작게 나타나고 측정거리 25cm때에는 상용분무와 초음파분무 모두 액적 입경이 커지면서 두 분무간의 입경 크기의 차이는 미미하게 나

타나고 있다. 상용분무시의 액적 평균직경에 대한 초음파 분무에 의한 액적 직경감소율은 측정된 data들을 상기 주어진 공식에 의해 대입해서 계산되어지는데, 측정거리 15cm에서는 h=5cm일 때 $\Delta=4.598\%$, h=10cm일 때 $\Delta=3.984\%$, h=15cm일 때 $\Delta=3.454\%$ 로 나타나므로 수두 h값이 커짐에 따라 초음파의 미립화 영향이 작아짐을 볼 수 있다.

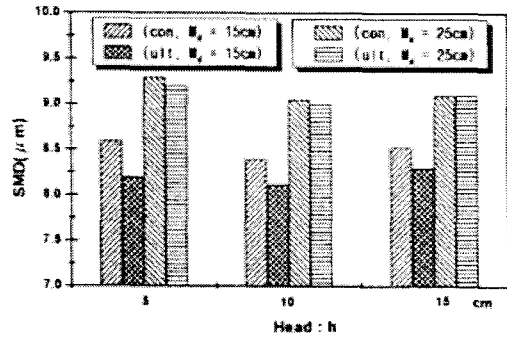


Fig. 7 Comparison of spray droplet sizes between conventional and ultrasonic sprays in accordance with head h

측정거리 25cm에서는 h=5cm일 때 $\Delta=2.0\%$ 로 감소율이 줄어들면서, h= 10, 15cm일 때는 거의 무시할 정도로 나타났다. 이는 진동자 두면상의 액체 부하가 클수록 초음파의 힘이 묻혀진 결과로 보이며, 거리가 멀 때 입경이 커졌음은 초음파의 영향 등으로 작아진 입자들은 관통력이 약해져 도중에서 자연낙하하고 관통력이 큰 입자들은 뒤쪽으로 많이 올 수 있는 것으로 사료됨은 상술한바와 같다.

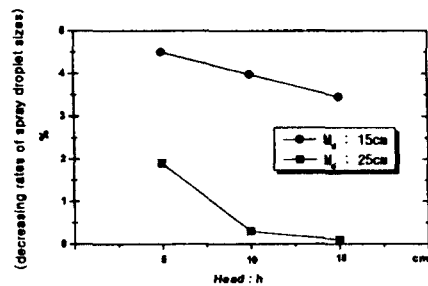


Fig. 8 Comparison of decreasing rates of spray droplet sizes by ultrasonic in accordance with increasing h

Fig.8은 h에 따른 측정거리 15cm, 25cm때의 상용분무액적 평균입경에 대한 초음파의 분무 평균 입경의 감소율을 비교하고있다.

측정거리 15cm일때는 h의 증가에 따른 입경 감소율은 h전반에 걸쳐 뚜렷한 값을 가지며 거의 선형적으로 좀 완만하게 감소하고, 측정거리 25cm때는 h=5cm일때 감소율이 조금 보일 뿐 h=10, 15cm에서는 무시할 정도임을 보이고 있다.

Fig. 9는 실험액체로서 수도수일때, 측정거리 15cm에서 h에 따른 상용분무와 초음파분무액적의 입경을 비교하고 있다. 액체부하 즉 수도 h가 커질수록 상용분무 평균입경에 대한 초음파 분무 평균입경의 크기 차이가 값은 다르지만, 작아지는 경향은 증류수 경우와 같다.

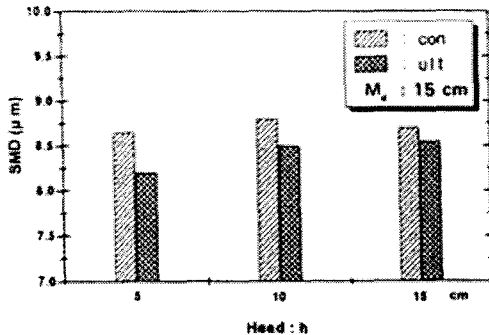


Fig. 9 Comparison of spray droplet sizes between conventional and ultrasonic sprays in accordance with head h

초음파에 의한 초음파 분무 액적의 상용분무 액적에 대한 평균 입경의 감소율은 h=5cm일때 4.767%, h=10cm일때 3.034%, h=15cm일때 1.68%로 나타나고 있으며 이는 h=5cm일때는 증류수에 비해서 수도수가 조금 높으나 h=10, 15cm일때는 조금 낮게 나타나고 있다.

Fig. 10은 horn이 진동자에 부착되어 있을 때 거리 15, 20cm, 수도 h=5, 10, 15cm에 따른 상용·초음파 분무액적의 크기를 비교하고있다.

측정거리 15cm에서 h=5cm일때가 h=10cm일때 보다 입경이 뚜렷이 적게 나타나므로 부하가 적을 때 초음파의 영향이 크게 나타남은 앞에서 살핀바와 같다. h=5cm일때 감소율은 5.807%로 상

기의 horn이 없을때의 4.767%보다 조금 높게 나타났다. 이는 horn의 단면적이 진동자의 단면적에 비해 작아진 만큼 초음파에너지가 수직노즐의 하단 주위면에 집중 투여된 것으로 해석된다.

h=10cm일때는 2.544%로 증류수 때의 3.034%에 비해 조금 낮게 나타나고 있다. 측정거리 20cm에서는 h=5cm일때 감소율은 1.937%로 조금 차이를 나타내었으나 h=10cm에서는 감소율이 무시할 정도로 적어 상용·초음파 액적입경이 거의 비슷한 크기로 나타나고 있다.

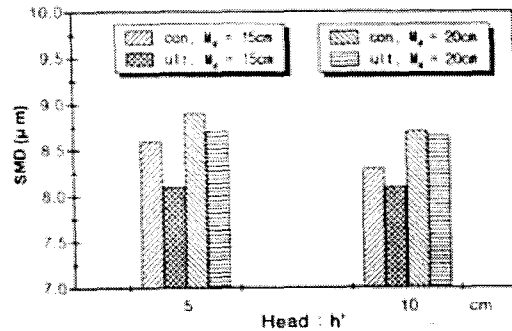


Fig. 10 Comparison of spray droplet sizes between conventional and ultrasonic sprays in accordance with h' in the case of horn

Fig. 11은 측정거리 15cm일때 증류수와 수도수의 상용분무 액적의 평균 입경에 대한 초음파 분무 액적의 평균 입경의 감소율을 액체 부하에 따라 비교하고 있다.

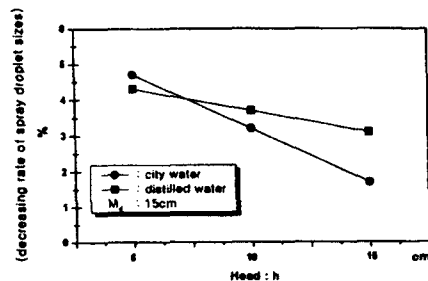
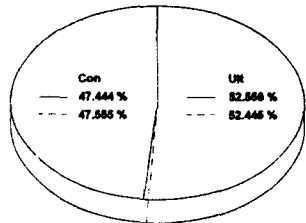


Fig. 11 Comparison of the decreasing rate Δ of spray droplet sizes by ultrasonic energy between distilled water and city water

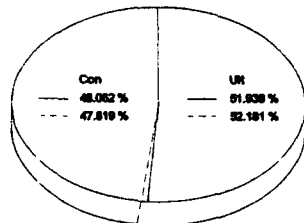
h=5cm일때는 수도수의 초음파에 의한 입경 감소율이 증류수에 비해 조금 높았으나 h=10, 15cm일때는 증류수의 상용분무 평균입경에 대한 초음파 분무 평균입경의 감소율이 수도수에 비해 조금 높게 나타났다.

3-3 분무량 측정

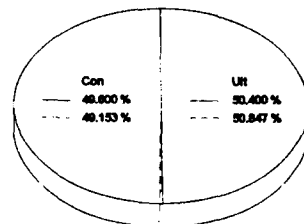
Fig. 12는 증류수와 수도수의 상용분무와 초음파 분무에 의한 분무액적량을 상용·초음파 분무량을 합친것에 대한 백분율로 나타낸 원그래프이다.



(a) h = 5 cm



(b) h = 10 cm



(c) h = 15 cm

— distilled water
 city water

Fig. 12 Comparison of quantum of spray droplet between distilled water and city water by conventional and ultrasonic sprays

액체 부하 즉 수두 h가 5cm, 10cm일때는 초음파 분무량이 상용 분무량보다 조금 크게 나타났으나 h=15cm일때는 거의 비슷하게 나타났다. 또한 h=5cm일때는 증류수의 분무액적량이 수도수 분무 액적량보다 조금 많게 나왔으나 h=10, 15cm에서는 수도수의 분무 액적량이 증류수의 분무액적량보다 조금 많게 나타났다.

초음파에 의한 초음파 분무액적량 증가율은 상용분무액적량에 대해 h=5cm일때는 증류수가 10.77%, 수도수가 10.28%, h=10cm일때는 증류수가 8.368%, 수도수가 9.12%, h=15cm 일때는 증류수가 1.643%, 수도수가 3.448%로 나타났으며, Fig.13에서 도표로 비교하고 있다. h=5cm에서 증류수의 분무액적 증가율이 수도수보다 조금 많은 듯하나 비슷하게 나타났으며 h=10, 15cm에서 수도수의 초음파에 의한 분무액적 증가율이 증류수때 보다 조금 두드러지게 나타난 것은 증류수보다 더 많은 용존 기체를 포함하고있는 수도수에 더 많이 나타나는 캐비테이션 친화현상 때문인 것으로 사료된다.

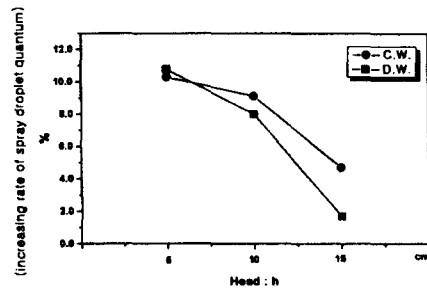


Fig. 13 Comparison of the increasing rate of spray droplet quantum between distilled water and city water by conventional and ultrasonic sprays

4. 결론

증류수와 수도수를 실험액체로 하여 2-유체 분무에 의한 상용분무와 초음파 분무액적의 입경분포, 입경, 분무량등을 공진에 관련되는 액체부하 수두 h에 따라서 상대적으로 비교 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 입경 분포도에서 초음파 분무가 전반적으로 입경이 적은 쪽으로 치우쳐 나타남은 초음파에 의한 미립화 친화성을 보여준다.
2. 입경측정에서 초음파에 의한 액적 입경 감소율은 액체부하 즉 수도수 h가 작을 때 우세하다. h=5cm 일 때는 수도수의 초음파에 의한 감소율이 증류수보다 조금 우세했으며 h=10, 15cm 일 때는 증류수가 우세하게 나타났다.
3. 분무량 측정에서 초음파에 의한 분무량 증가율은 증류수와 수도수 모두에서 다 뚜렷하게 나타났다. 수도수가 증류수보다 다소 우세하게 나타난 것은 수도수의 다량의 용존기체에 의한 캐비테이션 친화성 때문인 것으로 사료된다.
4. Horn을 부착했을 때 상용분무입경에 대한 초음파분무입경의 감소율이 다소 커진 것은 단면적이 작아진 horn의 초음파 에너지 집중효율성을 나타내고 있다.
5. 측정거리가 멀 때 분무입경이 크게 나타남은 기존 이론에 부합되며, 두 분무간에 입경의 크기 차이가 크게없는것은 초음파에 의해 작아진 액적들은 관통력이 작아져 멀리 도달하지 못하고 중간에서 자연 낙하한 것으로 사료된다.
6. 2-유체 분무의 세기를 측정가능범위안에서 최대로 감소 시켜 가면서 실험하므로써 초음파에 의한 미립화 영향을 더욱 뚜렷하게 나타낼 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국 학술진흥재단의 공모과제(과제번호:1997-001-E00017)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상진, 정진도, 최태민, "PDA를 이용한 초음파 미립화에 관한 연구", 대한 기계학회 '91년도 춘계학술대회 논문집(II), pp. 249-252, 1991.
2. Berger, H. L., "Characterization of a Class of Widely Applicable Ultrasonic Nozzles", Proc. 3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems(ICLASS-85), pp. 1A/2/1-1A/2/13, 1985.
3. Mochida T., "Ultrasonic Atomization of Liquids", Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Sprays (ICLASS-78), pp. 193-200, 1978.
4. 이상용, "액체의 미립화" (주)민음사, 1996.
5. 류정인, 정명진, "디젤기관에 있어서 저질유 연소를 위한 기초 연구", 충남대학교 공업연구소 논문집, 14(1), pp. 69-78, 1991.
6. Laljt Dixit, "Hydrocarbon Type Distribution and Structural Parameters of Gasolines by HNMR and IR Spectroscopy", Indian Journal of Technology, Vol. 23, pp. 315-317, 1985.
7. 류정인, "초음파를 이용한 흡인 연료의 미립화 성능에 관한 연구", 충남대 산업기술연구소 논문집 제2권 제1호, pp. 46-54, 1987.
8. 조규상, 이성래, 최두석, 류정인, "가솔린 기관용 초음파 미립화 장치의 타당성에 관한 연구 (I)", 자동차 공학회지, Vol.9, NO.4, pp.41-49, 1987.
9. 양정규, 최두석, 윤진한, 류정인, "초음파 연료 공급장치를 이용한 디젤기관의 성능향상에 관한 연구(II)", 한국자동차공학회 1993년도 춘계학술대회 논문 8-4, pp. 583-588, 1993.
10. 윤면근, 류정인, "초음파 연료 분사장치의 분무특성에 관한 연구", 한국액체 미립화학회지 1(1), pp. 85-91, 1996.