

## 초음파 진동판의 표면조도에 따른 분무특성에 관한 연구

이준백\* · 전인곤\* · 전흥신\*\*

### Characterization of Sprays used Ultrasonic Vibrant Plate with the Surface roughness

Jun-Baek Lee, In-kon Jeon, Heung-Shin Jeon

**Key Words:** Ultrasonic(초음파), Vibration(진동), Surface roughness(표면조도), Liquid film thickness(액막두께), Cavitation(공동현상), Sprays(분무)

#### Abstract

The purpose of this study is to compare the SMD(Sauter mean diameter) with different vibrant plates. Each vibrant plates have different surface roughness. Also liquid film thickness are measured for explanation how to concern atomization.

Ultrasonic waves is used for vibration. Immersion liquid method is used for the measure of SMD and also liquid film thickness is measured using of point needle method. Distilled water and gasoline fuel are used to liquids. Supplied liquid flow rates are 18~296cc/min. Centerline average roughness of vibrant plates are 0.5, 2.0, 4.7, 9.5  $\mu\text{m}$  and diameter of vibrant plate is 60mm.

In result, good atomization of liquid is obtained in widen flow rates. The mean droplet size is increased in orders of 4.7, 2.0, 9.5, 0.5  $\mu\text{m}$  surface roughness. Distilled water has a big mean droplet size than gasoline fuel in low flow rate. Above the 78cc/min flow rates, distilled water has a small mean droplet size than gasoline fuel. Liquid films changes are measured with ultrasonic power. Also, cavitation effect on sprays is observed.

#### 1. 서론

원전연소를 위한 방법으로는 첫째, 연료의 무화성을 개선하여 연료를 미립화 시키는 방법. 둘째, 연료 분무의 관통력 및 분산성을 개선하는 방법. 셋째, 와류에 분무를 실어 강제적으로 분무를 회전시켜 공기와 연료의 혼합을 촉진시키는 방법. 넷째, 초음파 에너지를 이용하여 연료입자를 미립화 시켜 공기와의 혼합을 활성화 시키는

방법 등의 여러 가지가 있다.<sup>(1)</sup>

초음파(고주파)를 이용한 초음파 분무는 다른 미립화 방법에 비하여 비교적 분열이 용이하고 무화량이나 입경의 제어가 용이하며 최근에 이르러서 낮은 유속과 낮은 공급유량에서 사용될 수 있다는 장점 때문에 반도체 공정기기, 가습장치, 그리고 의약품 제조에서 도포 공정 등에 이용되는 등 그 응용 범위가 넓어지고 있다.<sup>(2)</sup>

액체연료에 초음파 에너지를 부가할 경우에는, 초음파 에너지의 출력 및 주파수, 초음파 에너지를 발생시키는 초음파 진동자, 그리고 이에 의해 발생된 진동의 폭을 확대시켜주는 진폭확대자(Horn)의 형상 및 면적 등이 분무된 연료입자의 미립화에 큰 영향을 미친다.<sup>(3), (4), (5), (6)</sup>

지금까지 조사된 연구의 대부분은 공기중에서

\* 경희대학교 대학원 기계공학과

\*\* 경희대학교 기계·산업시스템 공학부

비교적 비율이 작은 진동면의 경우이다. 작은 진동면에서 양호한 분부를 얻는다고 하면 유리한 점이 되나 진동에 의한 미립화 현상을 조사하기 어렵고 진동면을 크게하면 음의 강도는 낮게되지만 작은 진동면에 비하여 독립주파수에 대하여 작은 미립이 얻어지고 액적의 분열형태 및 입경 변화를 명료하게 파악할 수 있으리라 기대된다. 또한 공업적으로 사용 가능한 초음파 미립화 장치의 개발을 위해 좀더 효율적으로 양호한 미립화를 얻기 위한 연구가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 이러한 점들을 충분히 고려하여 원판형 진동면판의 중앙고정축에 28kHz의 초음파 종진동이 주어지는 경우 진동면판에 다단을 주는 개념으로 표면조도를 다르게하여 평균입경을 측정하여 비교 하고자 한다. 또한 초음파 출력에 따라 액막 두께를 측정하여 미립화하는 과정에서 액막이 어떻게 관여하는지 실험을 행하여 그 일부에 대해서도 보고하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 초음파 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도를 나타내며 크게 네 부분으로 나눌 수 있다.

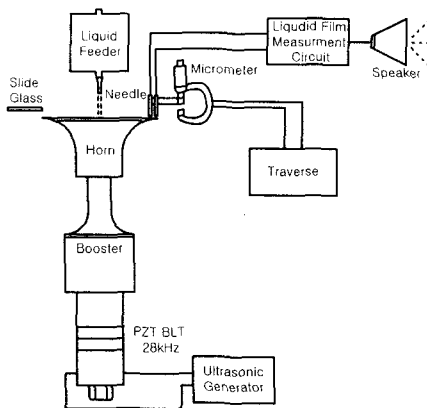


Fig. 1 Schematic view of a ultrasonic atomization

- 첫째, 초음파를 발생시키는 발진부
- 둘째, 발진된 초음파를 이용하여 진동을 발생시키는 진동장치부
- 셋째, 액체 공급부 및 액막 측정 장치부
- 넷째, 분무입경 측정 장치부

초음파 발진장치는 28kHz의 주파수를 발진하여 전왜진동자로 가해주는 역할을 한다. 전왜진동자에는 부스터 및 혼을 부착하여 전왜진동자에서 일어난 진동이 혼의 표면에서 최대가 되도록 하였다.

초음파 연료 공급장치부에 사용되는 진동자는 28.4kHz의 진동 특성을 갖는 볼트 체결형 Langevin 진동자를 택하였다. 이는 전기 음향 변환 효율이 높고 진동 속도가 빠르면서 발열이 적고 성능과 내구성이 우수하다. 실험에서 사용된 BLT의 특성을 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Specification of Bolted Langevin type Transducer(IBL3028-2PL)

Resonant Frequency (kHz)	28.4
Admittance(M Ω)	20
Static Capacitance(pF)	2912
Rated Vibration (m/sec)	0.5
Maximum Input Power(W)	200
Die.&Thickness(mm)	30, 5.3

혼 및 부스터의 재질은 Al 7075-T6을 사용하였다. 혼은 그 형식에 따라 Stepped, Exponential, Forurier형 등으로 나눌수 있는데 본 실험에서는 혼의 직경이 60mm로 크기 때문에 BLT의 기계적 에너지를 효율적으로 전달할 수 있고 진폭확대율이 좋도록 부스터를 단면비 2.5:1로 Step형 식으로 제작하였으며 또한 원판형의 혼을 자체 설계 제작하여 사용하였다.

### 2.2 입경측정장치

액적 입경의 측정 기법은 크게 나누어 기계적 포집법과 광학적인 방식으로 나눌수 있는데 본 연구에서는 기계적 포집법 방법 중의 하나인 액침법<sup>(7)</sup>을 사용하였다.

액침법은 물, 글리세린, 글리세린 수용액 등의 표면장력이 큰 액입은 표면장력이 작은 어떤 기름속에 빠뜨려 그 현미경 사진으로 측정하므로 제법 정확한 입경의 크기를 구할 수 있다.

본 연구에서는 슬라이드 글라스위에 실리콘오일(KF-96)을 도포한후 분무된 액적을 채취하여 광학현미경(Metallugical Microscope SL8M-2) 및 현미경 사진기(Olympus PM-6)를 사용하여 입경을

측정하였다.

### 2.3 액체공급부 및 액막두께 측정장치

액체는 수증펌프, 니들밸브 등의 장치를 사용하여 공급부 입구로 들어가게 되며 공급부 출구에는 가공한 니들(Needle)을 장착하여 진동면판 위에 액체가 공급되도록 하였다. 니들과 진동면판 사이의 거리는 5cm이며 낙하 유량은 18, 38, 78, 100, 136, 196, 264, 294cc/min으로 하였다. Table. 2에 본 실험에서 사용한 증류수와 경유의 물성치를 나타내었다.

Table. 2 Properties of supply liquids

Properties	Liquids	
	Distilled water	Disel fuel
Specific gravity(20°C / 4°C)	1	0.8398
Kinematic viscosity(20°C, cSt)	1	4.113
Surface tension(dyne/cm)	72.0	29.3

액막두께의 측정은 마이크로미터에 두개의 니들을 장착한후 제작한 회로에서 나온 전류를 흐르게 하여 액막에 닿았을 경우 즉 두개의 니들이 접지된 상태가 되면 스피커에서 신호음이 발생하도록 하는 측정법식 측정원리를 사용하였다. 니들의 위치는 트래버스(Traverse)를 사용하여 진동면판의 중심에서 3mm씩 반경방향으로 이송되도록 하였다. Fig. 2는 측정법식 측정원리 Fig. 3은 액막두께 측정회로를 나타낸 것이다.

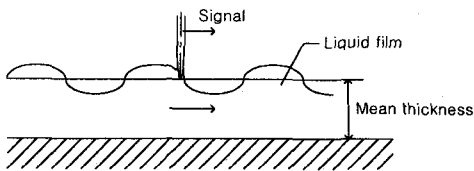


Fig. 2 Principle of a Point Needle Method

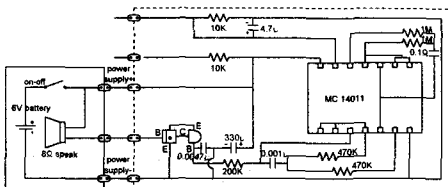


Fig. 3 Liquid Film Measurement Circuit

## 2. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 분무입경 측정

Fig. 4에 진동면판의 거칠기에 따른 평균입경을 나타내었다. 초음파 출력은 43.5W이고 진동원판의 직경은 60, 70, 80mm이다. 액체로는 증류수를 사용하였다.

표면이 매끄러운(D=60, Ra=0.5um) 혼이 입경이 제일 크게 나타났으며 중심선 평균조도가 9.5, 2.0, 4.7um 순으로 입경이 작아지고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 진동면판의 조도에 따라 입경이 다르게 나타나는 이유는 진동에 의해 혼의 내부 온도가 상승하여 혼이 팽창하므로 최대변위(진폭)가 진동면판의 표면에서 약간 아래쪽에 일어날 수 있는데 이를 표면조도가 보완해 주는 역할을 하는 것으로 해석된다. 또한 진동면판의 표면 조도를 주기 때문에 액체가 닿는부분의 표면적이 증가하여 매끄러운 혼보다 양호한 미립화를 얻을 수 있는 것으로 해석된다. 그러나 위의 그림에서 볼 수 있듯이 표면조도가 너무 커도 미립화율이 떨어지며 미립화 할 수 있는 유량도 적어짐을 볼 수 있다. 본 실험장치에서는 혼의 표면조도가 4.7um인 상태에서 가장 양호한 분무입경을 얻을 수 있었다.

액체를 미립화 할 수 있는 혼의 직경 크기의 실용적인 한계를 보기 위해 직경 70, 80mm의 혼을 사용하여 유량에 따른 평균 입경을 측정하여 Fig. 4에 함께 나타내었다. 직경 70, 80mm 혼의 경우는 진폭이 진동면판에서 골고루 일어나지 않고 끝부분에서만 부분적으로 일어나므로 미립화 할 수 있는 유량이 적음을 볼 수 있다. 70mm 혼의 경우는 직경 80mm 혼에 비해서 평균입경은 작으나 미립화 시킬 수 있는 한계 유량이 적고 직경 80mm의 혼은 이와는 반대의 경향을 보이는데 이는 진동면판의 진폭과 표면적이 상호 영향을 미치는 것으로 해석된다. 그러나 진폭과 표면적 중에서 정확히 어떤 영향에 의해 반대의 경향을 보이는지 알 수는 없었다.

초음파를 이용한 액체 미립화에 대한 다른 연구 결과와의<sup>(3), (5)</sup> 비교를 위해 A, B, C, D 네 개의 곡선을 함께 나타내었다.

Fig. 5는 38cc/min의 공급유량에서 혼의 표면 조도에 따른 무화된 분무입경을 액침법을 이용해 현미경 사진기로 촬영한 사진이다.

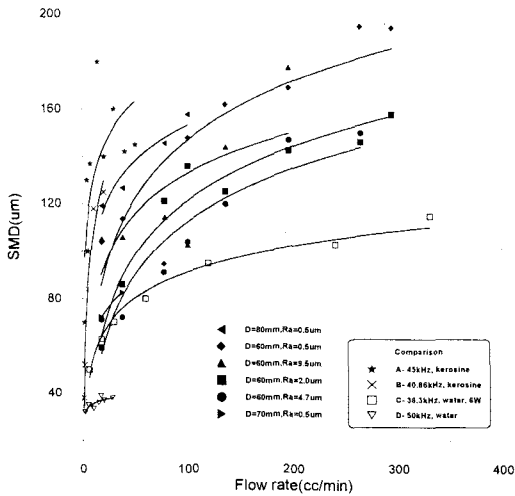


Fig. 4 Mean diameter according to surface roughness

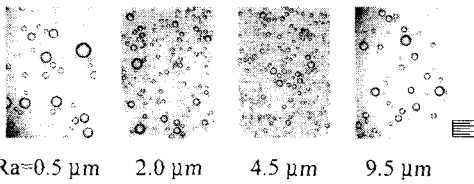


Fig. 5 Photographs of droplets according to surface roughness

액적 평균입경의 크기가 0.5, 9.5, 2.0, 4.5  $\mu\text{m}$  순으로 작아지고 있음을 사진을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 6은  $Ra=0.5 \mu\text{m}$ 의 진동원판에 공급되는 액체를 경유를 사용하여 증류수와 비교한 것이다.

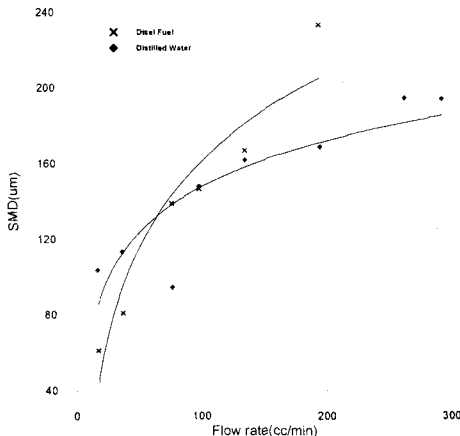


Fig. 6 Comparison of droplet sizes of liquids

작은 공급 유량에서는 경유가 액적입경이 작을 때 이는 경유가 증류수보다 기화친화성이 높고 표면장력이 작기 때문으로 해석되며 공급유량이 78cc/min 이상에서는 점성이 증류수보다 높기 때문에 공급유량이 많아 질수록 입경이 큰 차이로 커짐을 볼 수 있다. 즉 어느 한계이상의 유량에서는 표면장력보다 점성이 미립화에 더 큰 영향을 주는 것으로 해석된다.

### 3.2 분무 입경 분포도

분무액적들이 SMD를 중심으로 얼마나 밀집되어 있는가를 표시하기 위해 38cc/min의 공급유량에서 각 진동면판의 거칠기에 따른 입경분포를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 총 액적 수( $N$ )에 대한 각 입경 구간( $d \sim d + \Delta d$ ) 당의 액적수( $\Delta N$ )의 비를  $\Delta n (= \Delta N / N)$ 이라고 하고, 이를 다시 단위 입경 구간당의 개수비 ( $\Delta n / \Delta d$ )로 표시하여 입경 분포를 히스토그램으로 나타내었다.

모든 진동원판의 경우에 있어 평균입경이 40  $\mu\text{m}$ 인 부근에서 입경 분포율이 가장 크며 밀집해 있는데 이는 초음파의 장점인 비교적 균일한 입경 분포율이 높음을 보여 주고 있다. 또한, 진동원판의 조도가 가장 낮은 0.5  $\mu\text{m}$ 부터 9.5, 2.0, 4.7  $\mu\text{m}$  순으로 큰 분무입경을 가진 분포가 적어지고 있음을 볼 수 있다.

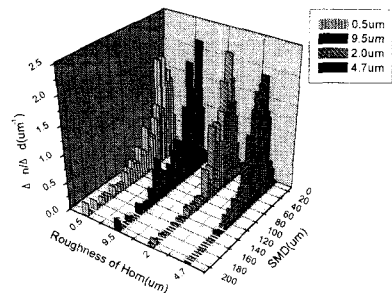


Fig. 7 Droplet size distribution (atomization of water at 38cc/min)

### 3.3 액막두께 측정

18cc/min의 공급유량(증류수)에서 초음파의 출력력을 0, 7.7W, 9.6W, 14W, 20.4W, 43.5W로 각각 나누어 측정법으로 혼( $D=60\text{mm}$ ,  $Ra=0.5$ )의 중심

에서 반경 방향으로 3mm씩 이동해가며 액막두께를 측정하였으며 Fig. 8에 나타내었다.

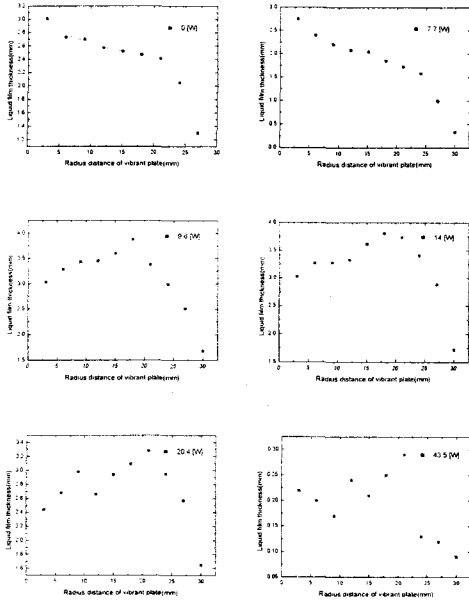


Fig. 8 Liquidfilm thickness according to the ultrasonic power

초음파 무발진시에는 혼의 중심에서 멀어질수록 액막의 두께가 감소하는 경향을 보인다. 7.7W 출력에서도 초음파 무발진시와 마찬가지로 혼의 중심에서 멀어질수록 액막두께가 감소하나 무발진시 보다 표면의 약한 진동에 의해 전체적으로 액막두께가 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있다. 9.6W의 경우에는 7.7W와는 다르게 18mm의 지점까지는 액막두께가 증가하는데 이는 미립화하기 위해서 액체를 밖으로 밀어내려는 현상 또는 표면진동의 한계에 의해서 중심에서 멀어질수록 액막이 쌓이기 때문으로 해석되며 21mm지점부터는 혼끝단에서 액체가 흘러내리므로 액막두께가 감소하는 경향을 보인다. 14W의 경우는 9.6W의 경우와 동일한 경향을 보인다. 20.4W에서는 액막 두께가 높아졌다 낮아졌다 하는데 이는 캐비테이션 현상에 의해 액막이 불안정하여 요동을 하기 때문으로 해석된다. 43.5W의 경우에는 미립화가 일어나기 때문에 전체적으로 액막의 두께가 낮음을 볼 수 있다. 또한 액막의 두께가 증가와 감소를 반복하는 이유는 미립화가 안된

액체가 쌓였다가 미립화되고 다시 쌓였다가 미립화 되기 때문으로 해석된다. 100, 294cc/min의 유량에서도 유사한 경향을 보인다.

미립화되는 액막두께의 한계를 알기 위해 18cc/min의 공급유량에서 직경 60mm의 혼(Ra=0.5  $\mu$ m)을 10° 경사지게 하여 액막두께를 측정 하였다. 36.4W 이상의 초음파 출력에서는 공급유량이 모두 미립화 되었으나 32.5W에서는 7cc/min, 27.6W에서는 13cc/min의 공급유량이 미립화 되지 못하였다. 27.6W에서는 모든 공급유량이 미립화 되지 못하였다. 36.4W, 32.5W에서의 측정된 혼 표면 전체의 평균 액막두께는 0.36mm, 0.52mm였다. 그러므로 18cc/min의 유량에서 미립화 될 수 있는 혼 표면 위의 평균 액막두께의 한계는 0.36~0.52mm 사이임을 확인할 수 있었다.

초음파 출력이 높아질수록 진동면판의 표면에서 캐비테이션(Cavitation) 현상이 활발해 지는데 이는 초음파에 의한 액체의 미립화가 주로 캐비테이션(공동) 현상에 의한 것으로 해석되며 Fig. 9에 20.4W의 혼 표면에서 일어나는 캐비테이션 현상을 카메라로 촬영한 사진을 나타내었다.



Fig. 9 Photograph of cavitation phenomenon

#### 4. 결론

초음파를 사용하여 표면조도가 다른 큰 진동원판에 진동을 주어 액체의 분무미립화를 위한 초음파 응용에 관한 실험을 행한 주요 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 직경이 60mm인 혼을 사용하여 18~294cc/min의 넓은 공급유량에 걸쳐 양호한 미립화를 얻을 수 있었다.

(2) 진동원판의 중심선평균조도가 4.7 $\mu$ m인 혼이 가장 분무입경이 작았으며 2.0, 9.5, 0.5 $\mu$ m 순으로 분무입경이 크게 나타났다.

(3) 경유를 시료로 사용하는 경우, 초기유량에서는 증류수보다 분무입경이 작지만 78cc/min 이

상의 공급유량에서는 점성의 영향으로 큰 분무입경을 나타내었다.

(4) 초음파의 출력에 따른 혼표면의 진동이 액막 두께의 변화에 영향을 주었으며, 18cc/min의 공급 유량에서 미립화 될 수 있는 최대 평균 액막두께는 0.36~0.52mm 사이임을 확인할 수 있었다.

(5) 초음파를 사용하여 액체를 미립화하는 경우 캐비테이션 현상이 일어남을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Co., New York, 1989
- (2) 이상용, "액체의 미립화", 1996, (주)민음사
- (3) 第1回~第14回 液体の微粒化に關する  
講演會講演論文, 1971~1986
- (4) J. Cousin, C. Dumouchel and D. Sindayihebura, Characterization of Sprays Produced by Low Frequency Ultrasonic Atomization, ICLASS-'97, August 19-22, 1997, Seoul
- (5) D. Sindayihebura, L. Boll, Theoretical and experimental study of the behaviour of liquid film free surfaces driven by transverse ultrasonic vibrations, Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems III, Beld-Slovenia, 66-74
- (6) Lorenzo Rodriguez, Nadia Passerini, Cristina Cavallari, Maurizio Cini, Pietro Sancin, Adamo Fini, Description and Preliminary evaluation of a new ultrasonic atomizer for spray-congealing processes, International Journal of Pharmaceutic 183 (1999) 133-143
- (7) Tate, R.W., 1961, "Immersion Sampling of Spray Droplet," AICHE J., Vol. 7, NO. 4, pp. 574~577