

회전컵 무화기의 미립화 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Atomization Characteristics
of the Rotary Cup Atomizer

진 승 범*, 조 대 진*, 윤 석 주**

S. B. Jin, D. J. Cho, S. J. Yoon

Abstract

Rotary atomizer is widely used in practical application ranging from combustion, cooling, spray drying, agriculture, chemical system. Rotary cup atomizer has some advantages such as extreme versatility and liquid atomization successfully varying widely in viscosity. In rotary atomization, the feed liquid is centrifugally accelerated to high velocity and the liquid extends over the rotating surface as a thin film before being discharged into an atmosphere. The degree of rotary atomization depends upon peripheral speed, feed rate, liquid properties and atomizer design. An important asset is that thickness and uniformity of the liquid sheet can readily be controlled by regulating the liquid flow rate and the rotational speed.

LDPA(Laser Diffraction Particle Analyser) and image acquisition system are used to measure drop size distribution and spray pattern. The atomization characteristics of the rotary cup atomizer is investigated experimentally by varying the liquid feed rate, rotary cup speed and air velocity for atomization. As a results, the effect of air velocity on the atomization characteristics such as drop size and spray uniformity is considerably greater than variation of those with liquid feed rate.

주요기술용어 : Rotary Cup Atomizer(회전컵 무화기), SMD(Sauter 평균 직경), LDPA(Laser Diffraction Particle Analyser), Atomization(미립화)

1. 서 론

일정 체적의 액체가 수많은 미소 액적으로 분열되는 현상을 미립화라고 하는데 이 현상을 이용한 분무장치는 그 효율성으로 인해 연료분사, 분무건조, 분무도장등의 실생활과 밀접한 전반적인 산업현장에 폭넓게 사용되고 있다. 액체가 미립화되어 액적들로 분열되면 표

면적의 증대로 인해 열 및 물질전달이 촉진되는데 이러한 미립화 현상의 규명은 응용기술적 측면에서 중요한 요소가 된다. 미립화 수단으로 에너지 공급 방법에 따른 분무장치를 구분하면 압력형, 2유체형, 회전형 및 기타 특수형으로 대별할 수 있는데, 이러한 분무장치의 개발이나 효율향상 또는 이에 관련된 시스템의 성능개선을 위한 많은 이론적, 실험적 연구들이 진행되어 왔다. 이 중에서 회전형 분무장치는 회전하는 원판 또는 컵에 의해서 원심력

* 전북대학교 대학원

** 정회원, 전북대학교 기계공학과

을 받은 액체가 큰 속도를 가지고 반경방향으로 기체내에 뿌려지는 원리로 작동하는데 와류 분무노즐이나 단공노즐 등 압력형에 비해 높은 분사압력이 필요하지 않고, 원판 또는 컵 표면에서 분무액체의 자유표면이 기체에 노출되며 분출량이 회전속도와는 별개로 조절이 가능하므로 회전속도 및 액체공급량을 조절하므로써 액막의 두께를 자유로이 조절할 수 있고, 넓은 유량 범위에서 작동이 가능하다. Fraser⁽¹⁾는 고속으로 회전하는 원판에 액체를 공급하였을 때 발생하는 액체와 원판사이의 미끄러짐을 액체의 질량유동율과 점성, 원판 직경과의 관계식을 통해 미끄러짐이 발생하는 영역을 수치적으로 밝혔으며, 선단에서 액주나 액막의 분열이 이루어지기 위한 원판에서의 유동조건 함수식을 제시하였다. Seltzer 등⁽²⁾은 회전하는 원판에 공급된 액체가 원판의 선단까지 진행하는 시간에 대해 수치적으로 연구하였으며 원판의 회전수와 액체가 유동하는 변위를 통한 계산식을 제시하였다.

회전원판이나 컵에서 형성된 액체의 분출에 대하여 Hinze 등⁽³⁾은 회전컵 내부에서 액체의 거동에 대한 유동을 해석하고 액적, 액주, 액막의 세단계에서 각각의 액적크기 예측에 관한 이론식을 제시하였고, Tanasawa 등⁽⁴⁾은 회전형 분무장치에서 미립화 현상에 대한 분석을 시도하고 공급액체의 유량 범위에 따른 미립화기구를 구분하여 경험적 기준을 제시하였다. Dombrowski 등⁽⁵⁾은 생성된 액주의 길이와 특성이 유량과 회전속도에 크게 영향을 받음을 제시하였다. 분출된 액막과 주위기체와의 공기역학적 상호작용에 대해 Dombrowski 등⁽⁶⁾은 회전컵에서 분출되는 액막을 직각으로 공기와 충돌시켰을 때 액막표면의 파의 불안정성의 성장에 의한 액막 분열을 고찰하고, 컵의 회전수나 액체유량보다 미립화용 공기속도가 미립화에 미치는 영향이 현저함을 밝혔다. 회전원판이나 컵으로부터 분출된 액체가 분열되어 액적이 형성되는 과정과 액적의 크기에 대해서 Karim 과 Kumar⁽⁷⁾는 가솔린을 연료로 사용하여 컵 내부반각과 직경이 증가할수록 액적크기가 증가함을 밝히고, 액적크기는 공급

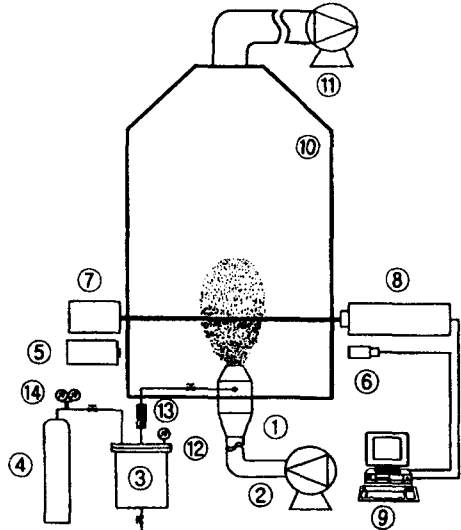
유량에 비례하며 컵의 회전수와 미립화용 공기속도에는 반비례함을 실험을 수행하여 제시하였다.

이와같이 회전형 분무장치는 그 용도가 다양하므로 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 분무형상에 대한 거시적이며 정성적인 분석이 대부분이며 산업현장에 적용할 수 있는 정량적인 분석은 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 무화컵의 회전속도와 액체유량 변화에 따라 컵 선단에서 생성되는 액적의 크기와 크기분포를 레이저 회절원리를 이용한 계측기를 사용하여 측정 분석하고, 화상분석장치를 사용하여 분무형상을 가시화함으로써 분열현상과 같은 분무의 미시적 특성을 분석하여 회전형 분무장치의 성능향상과 새로운 기술개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 도시하였다. 실험장치는 연료공급장치, 공기공급장치, 계측장치로 대별할 수 있는데, 고압 질소가스를 사용하여 액체를 가압 송출하도록 하였으며, 유량측정을 위해 유량계를 설치하였다. 공급액체의 유량범위는 일반적인 상용범위인 0.5 ~ 3.5 l/min 까지 변화시켰다. 무화컵의 회전 및 미립화용 공기의 공급을 위하여 송풍기를 사용하였으며, 분무기 출구에서의 풍량과 풍속 그리고 컵의 회전수를 각각 측정하였다. 송풍기는 2마력의 원심형을 사용하였으며, 공급되는 공기속도는 40~80 m/s 의 범위에서 실험을 수행하였다. 회전형 분무장치는 3축 이송장치에 설치하였으며, 부유하는 액체입자의 영향을 배제하기 위하여 배풍기를 사용하여 배출하였다. 분무형상을 분석하기 위하여 CCD 카메라와 광원틀 이용하여 액체의 유량변화와 송풍기의 공급 풍량변화에 따라 분무사진을 촬영하였으며, 렌즈는 105mm를 사용하였다.

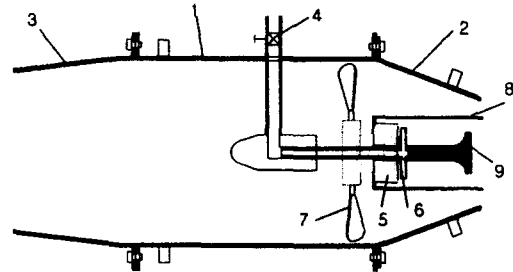


1.Rotary atomizer 2.Blower 3.Accumulator
4.Pressure tank 5.Stroboscope 6.CCD camera
7.Particle sizer 8.Receiving lens 9. Computer
10.Chamber 11.Exhaust fan 12.Pressure gauge
13.Flowmeter 14.Regulator

Fig.1 Experimental Setup

2.2 회전형 분무장치

Fig.2는 회전형 분무장치의 내부구조를 나타낸다. 축과 베어링에 의해 컵이 고정되며 축은 연료 공급관의 역할을 하여 액체를 컵의 내부로 분사 시킨다. 컵 뒷면에는 베인이 부착되어 송풍기에서 공급되는 공기에 의해 컵을 회전 시키며 컵을 통과한 공기는 연료의 미립화를 촉진한다. 컵이 회전하고 액체가 공급되면 원심력에 의해 컵의 내벽면을 따라 액막이 형성되는데 이 형성된 액막은 얇은 막의 형태로 컵 선단 쪽으로 흐른다. 컵 끝으로 갈수록 액체는 확산되어 액막의 두께는 점차 얇아지며 컵 선단에서는 더욱 외측으로 확장되면서 액막은 파열되고 미세한 입자로 분열된다. 동시에 컵 주위에 고속의 공기가 분사되어 컵이 회전에 의해 분열된 입자의 크기를 더욱 작게 미립화시킨다. 이때 에어노즐에서 분출되는 공기는 컵선단에서의 액체와 직각으로 충돌하게 된다. 컵의 직경은 65mm이며, 컵 뒷면의 베인의 각도와 베인의 직경은 18° 와 122mm로 하였다. 또한 에어노즐 출구의 직경은 88mm이다.



1.Body 2.Air nozzle 3.Guide 4.Valve 5.Bearing
6.Liquid nozzle 7.Vane 8.Spining cup 9.Shaft
Fig.2 Rotary cup atomizer

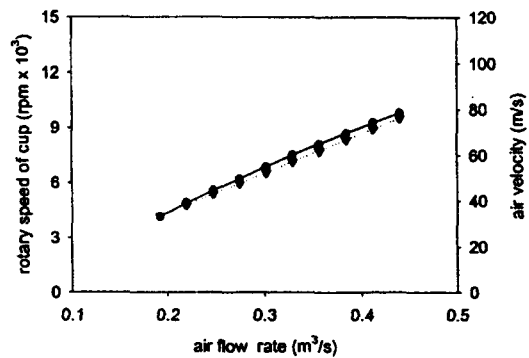


Fig.3 Variation of rotary speed of cup and air velocity with air flow rate

Fig.3은 송풍기에서 공급되는 풍량에 따른 컵의 회전수와 미립화용 공기속도의 변화를 나타낸다. 컵의 회전수는 송풍기의 풍량변화에 따라 증가하며, 4,000~10,000rpm의 회전수에서 공기속도는 40~80m/s이다.

2.3 액적크기 측정

본 실험에서는 Fraunhofer 회절원리를 이용한 LDPA (Laser Diffraction Particle Analyser)를 사용하여 액적 직경을 측정하였다. 광원은 He-Ne 레이저(파장 : 632.8nm)를 사용하였으며, 광원부, 수광부 그리고 광학대(optical bed)로 구성되어 있다.

Fig.4(a)와 같이 레이저 빔은 빔 확대기 (beam expander)와 시준기(collimator)의 조합에 의해 일정한 직경을 갖는 단파장의 빔이 되며, 빔의 직경은 빔 확대기를 교체함으로써

13mm와 26mm로 바꿀 수 있다.

입자에 의해 산란된 빛과 산란되지 않은 빛은 수광부에 입사를 하게 되는데, 이 렌즈가 푸리에 변환렌즈로서 작동을 하게 된다. 따라서 Fig.4(b)에 나타낸 바와 같이 동일 직경의 입자가 측정 체적에 존재하게 되면 산란 신호가 동일한 위치에서 감지되며 푸리에 변환의 선형적 특성으로 인해 그 빈도수를 알 수 있게 된다.

본 연구에 사용된 LDPA장치(Sympatec KF-Vario)는 Fig.5와 같이 초점거리는 566mm, 최대 측정 가능 액적직경 1750 μ m인 렌즈를 사용하였으며, 레이저 빔의 직경은 26mm 이었다. 측방향 측정위치는 200mm로 하였고 비그네팅(vignetting)을 방지하기 위해 측정영역을 600mm 이내로 하였다.

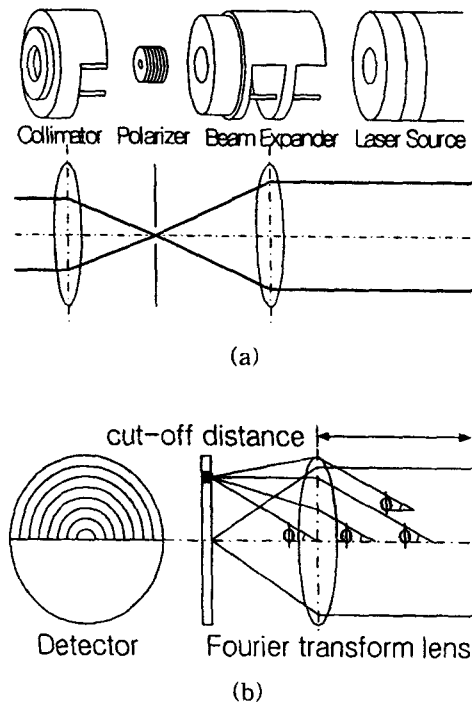


Fig.4 Optical system of LDPA

3. 결과 및 고찰

3.1 분무형상

Fig.6은 회전컵 무화기에서 생성된 공급액체의 유량 변화에 따른 분무의 사진을 보여준다.

유량의 증가에 따라 액막의 운동량이 공기의 운동량보다 상대적으로 증가하므로 컵의 원주 방향으로의 액막의 진행속도가 커지게 된다. 따라서 분무각은 커지며 액체의 유량이 증가하면서 컵 내벽면을 따라 유동하는 액막의 두께가 두꺼워지므로 분열길이가 증가하고 분열된 액체의 액적직경도 커지게 된다.

Fig.7은 송풍기에서 공급되는 공기량의 증가에 따른 분무의 변화를 보여준다. 송풍기에서 공급되는 풍량의 증가에 따라 컵의 회전속도와 공기의 속도는 선형적으로 증가한다. Fig.7(a)과 같이 컵의 회전속도가 낮은 상태에서는 액막의 두께가 커지게 되고 공기속도 또한 감소하므로 컵 내부에서 생성된 액막이 컵의 반경방향으로 확산되어 분열하게 되며 그 분열길이 또한 길어짐을 알 수 있다. Fig.7(c)와 같이 컵의 회전속도가 증가하면서 액막이 얇아지게 되고 또한 액막과 충돌하는 공기의 속도도 커지게 되므로 미립화 정도 또한 양호해짐을 알 수 있다.

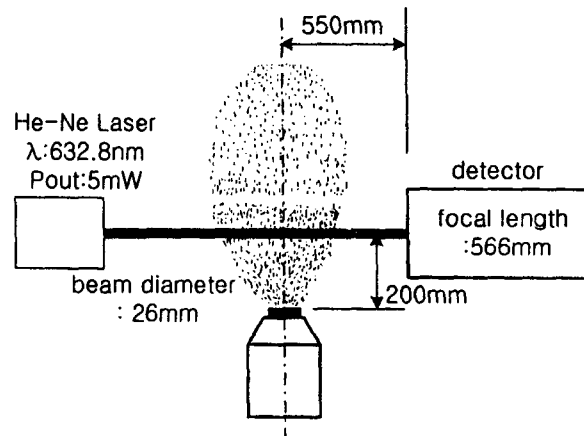


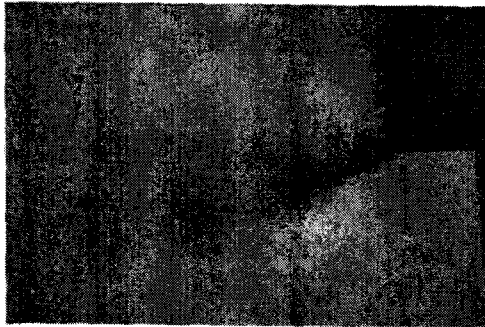
Fig.5 Schematic diagram of LDPA setting

3.2 평균액적직경

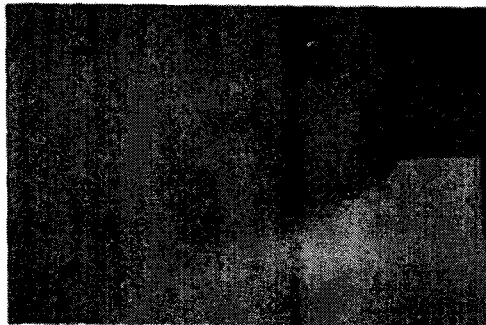
SMD는 분사된 액체가 주위 기체와 표면을 통해 접촉하기 위한 미립화 정도를 보여주는 유용한 척도가 되며 연소 시스템에서 연소반응과 효율에 관계가 있다. Fig.8은 무화컵의 회전수와 공기속도 변화에 대한 공급액체의 유량변화에 따른 평균 액적직경을 나타낸 것이다. 액체유량을 0.5~3.0 l/min로 변화시켰을



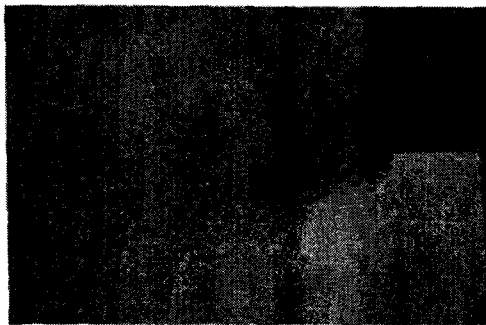
(a) liquid feed rate : 0.5 l/min



(b) liquid feed rate : 1.5 l/min

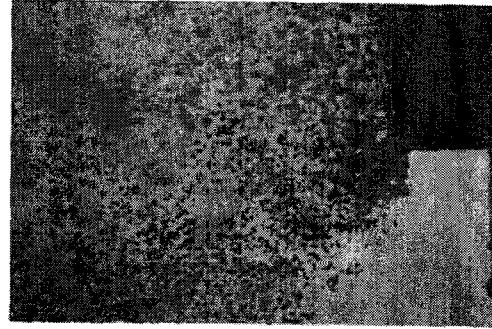


(c) liquid feed rate : 2.5 l/min

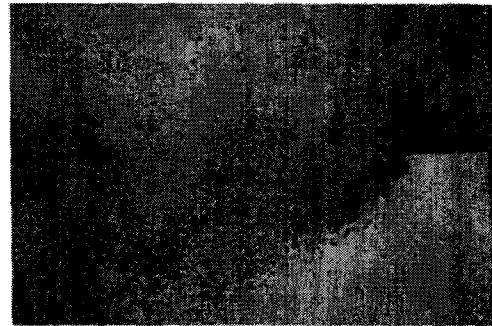


(d) liquid feed rate : 3.5 l/min

Fig.6 Spray patterns at various liquid feed rate. (air velocity, 76.3m/s)



(a) air velocity 33.4m/s



(b) air velocity 57.2m/s



(c) air velocity 76.3m/s

Fig.7 Spray patterns at various air velocity and rotary speed. liquid feed rate, 3.5 l/min

때의 평균액적직경의 변화는 각각의 공기속도와 무화킵의 회전수에 대하여 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 일반적인 회전형 무화기의 경우는 유량이 증가할수록 평균액적직경은 증가하며 미립화용 공기 속도가 클 수록 그 편차는 작아진다. 본 연구에 사용된 회전킵 무화

기는 컵이 고속으로 회전할수록 미립화용 공기속도 또한 증가하므로 큰 액적의 수가 증가하는 반면에 작은 액적의 수도 역시 증가하므로 유량에 따른 평균액적직경은 거의 변화가 없다고 판단된다.

Fig.9는 1~3 l/min에서 공급풍량 즉, 미립화용 공기속도와 컵의 회전수 변화에 따른 평균액적직경을 보여준다. 공급풍량이 증가하면서 평균액적직경은 140~50 μm로 현저히 감소하며, 공급 액체 유량 변화에 대해서는 경향이 비슷하다. 평균액적직경은 액체의 유량 변화에 비해 미립화용 공기속도와 컵의 회전수에 대해 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

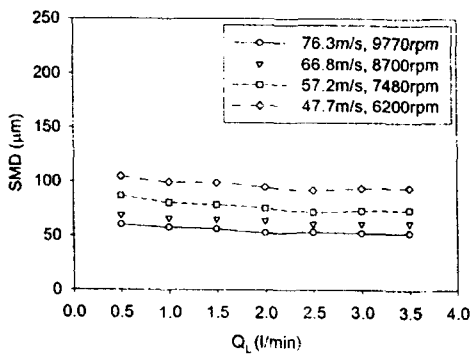


Fig.8 Variation of SMD with liquid feed rate

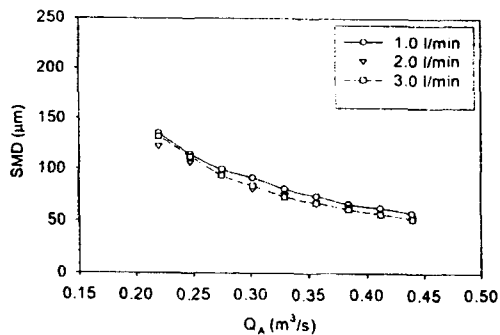


Fig.9 Variation of SMD with air flow rate

3.3 최대 입경

최대 입경의 관찰은 분무된 연료 액적의 연소시간과 불완전연소의 특성을 파악하는데 중

요한 인자이다. Fig.10은 공급된 액체의 유량이 최대 입경에 미치는 영향을 보여준다. 액체 유량이 0.5~2.5 l/min 범위에서는 최대 입경이 일정한 경향을 보이다가 약 2.5 l/min 이상의 유량에서는 최대입경이 급격히 증가하게 되며 미립화용 공기의 속도와 컵의 회전수의 변화에 따라서도 유사한 경향을 나타낸다.

Fig.11은 공급풍량, 즉 미립화용 공기속도와 컵의 회전수 변화에 따른 최대입경의 영향을 보여준다. 본 연구에 사용된 회전컵 무화기의 경우 액체유량 1~3 l/min 범위에서 최대 입경은 200~700 μm 사이에 존재하였으며 액체유량의 영향보다는 공기풍량의 변화에 따른 최대입경의 변화 폭이 큼을 알 수 있다. 이것은 무화컵의 회전속도가 커짐으로서 원심력에 의해 컵 내부의 액막분포가 균일해지고 액막의 두께가 얇아지며, 또한 공기의 속도가 증가할수록 액막과 충돌하는 공기의 운동량이 커지게 되므로 액적크기가 작아지기 때문이다. 따라서 최대 액적크기는 공기속도와 컵의 회전수 증가에 따라 감소하며, 공급액체 유량의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.

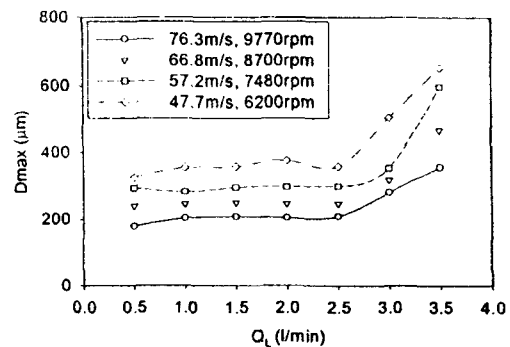


Fig.10 Variation of D_{max} with liquid feed rate

3.4 액적크기분포

Fig.12는 액체의 유량변화에 따른 액적크기의 빈도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유량이 증가하더라도 피크 점의 위치는 거의 일정하나 유량이 증가할수록 분무의 액적 크기분포 폭이 커짐을 알 수 있다. 즉, 유량이 클 때보다 유량이 적어질 때 균일한

액적크기 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig.13은 공기속도 변화에 따른 액적크기 분포 곡선을 나타낸다. 공기속도가 증가할수록 분포곡선이 액적크기가 작은 쪽으로 이동하며 분포곡선의 폭도 줄어들고 액적크기 분포도 균일해진다. 따라서 공기속도가 증가할수록 균일한 액적크기 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

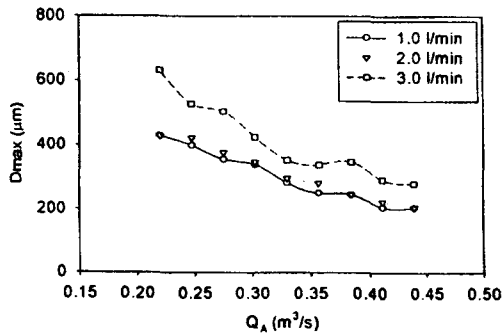


Fig.11 Variation of D_{max} with air flow rate

5. 결론

본 연구에서는 회전컵 분무장치를 제작하고 무화컵의 회전수, 액체공급유량, 공기풍량 변화에 따라 회전컵으로부터 형성되는 분무의 미립화 특성을 규명하기 위해 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

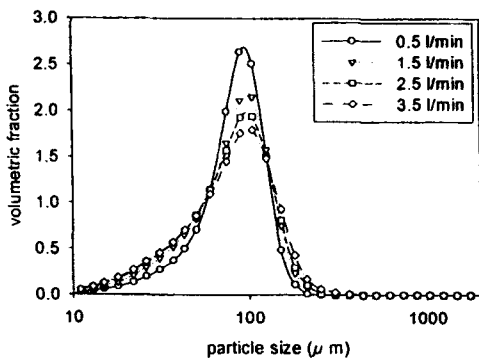


Fig. 12 Various drop size distribution with liquid feed rate. (air velocity 76.3m/s)

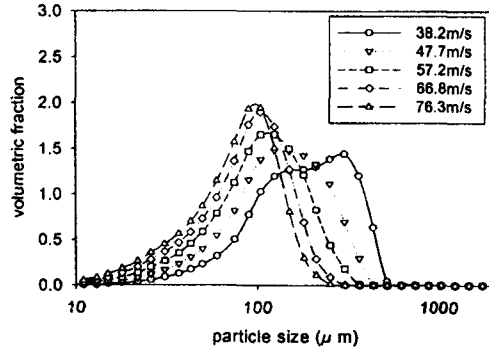


Fig. 13 Various drop size distribution with air velocity. (liquid feed rate 2.5 l/min)

분무의 최대입경은 액체의 유량 증가와 함께 증가하고, 공기속도가 증가할 때는 감소한다. 액체의 유량변화 보다는 무화컵의 회전수와 공기속도의 변화가 분무의 최대입경과 SMD에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 회전컵 무화기에서 생성된 분무의 액적크기를 작게 하려면 주어진 액체유량에서 미립화용 공기속도를 가능한 한 최대로 하는 것이 필요하다. 또한 공기속도가 크고 액체유량이 적을수록 액적크기 분포가 균일해진다.

후기

본 연구는 산업기반기술 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R.P. Fraser, et. al., "The Filming of Liquids by Spinning Cups", Chem. Eng. Sci., Vol.18, 1963
2. R. Seltzer and W. R. Marshall, Chem. Eng. Prog., Vol.46, No.10, 1950, p.501.
3. J.O. Hinze and H. Milborn, "Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup", J. Appl. Mech., Vol. 17, No. 2, 1950, pp. 145-153.
4. Y. Tanasawa, Y. Miyasaka and M. Umehara, "Effect of Shape of Rotating Disks and Cups on Liquid Atomization", Proc. 1st International Conference on

- Liquid Atomization and Sprays (ICLASS-78), 1978, pp. 165-172.
5. N. Dombrowski and G. Munday, "Biochemical and Biological Engineering Science", Academic Press, 1968.
 6. R.P. Fraser, N. Dombrowski and J.H. Routley, "The Atomization of a liquid sheet by an impinging air stream", Chemical Eng. Sci., Vol. 18, 1963, pp. 339-353.
 7. G.A. Karim and R. Kumar, "The Atomization of Liquids at Low Ambient Pressure Conditions", Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Sprays (ICLASS-78), 1978, pp. 151-155.
 8. A.H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
 9. K. Masters, "Spray Drying", Leonard Hill Books, 1972.