

분무건조를 위한 회전원판의 미립화 특성에 관한 연구 Atomization Characteristics of Spinning Disk for Spray Dry

오재건*, 박기호**, 박준택***, 임상근****

Jae-Geon Oh, Ki-Ho Park, Jun-Taek Park, Sang-Gun Lim

〈Abstract〉

The purpose of this research is to find the fundamental data for the design and optimum operation condition for the disk atomization comparing the atomization characteristics of the modified straight vane type disk atomizer and the cup type atomizer widely used in the field of spray dry. First, the experimental comparison of the characteristics of Na₂SO₄ atomization has been carried out using the cup type disk atomizer and the three kinds of vane type atomization designed specially for the experiment. After the comparison of the experimental data of the Na₂SO₄ and raw milk have been conducted using vane type atomizer.

Key words : *Spinning disk atomizer, Pin-type disk, Spray dry, Dryer, Vane-type disk, Atomization Characteristics*

1. 서 론

분무건조란, Solution, Slurry, Emulsion, Colloidal Suspension 등의 액상원료를 미립화하여 표면적을 증가시키고 수열면적을 크게하여 열풍과 접촉케 함으로써 순간적으로 건조를 행하고 액상원료로부터 바로 분립상의 제품을

얻는 건조법이다. 그 결과 얻어진 건조물은 분말, 그레놀, 덩어리 등이며, 이것은 피건조물의 물리적, 화학적 성질과 건조기의 설계 및 운전 조건에 따라 생성물의 특성이 달라진다.

액상원료로는, 분유를 비롯하여 Instant 식품, 합성세제, 염료, 안료, Ceramic, 공해 폐액의 처리에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다.

* 정희원, 두원공과대학, 동력기계과 부교수, 工博
토호쿠대학 정밀공학과 졸업, jaegeon@doowon.ac.kr
** 한국에너지기술연구소, 공학석사
부산대학교 기계공학부 졸업
*** 한국에너지기술연구소, 工博
계명대학교 화학공학과 졸업
**** 삼영화학기계(주)
영남대학교 기계공학과 졸업

Associate Professor, Dept. of Mechanical Eng. for Power
Ph.D, Graduated from Tohoku University in Japan
Korea Energy Reaserch Institute, M.S.
Graduated from Pusan National University
Korea Energy Reaserch Institute, Ph.D.
Graduated from Kemyung University
Samyoung Chemical Machinery
Graduated from Yeongnam University



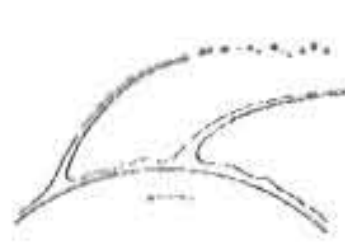
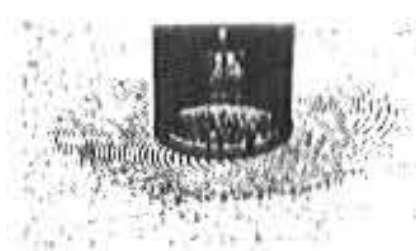
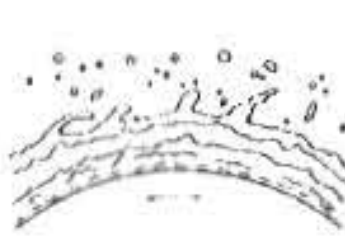

	Model figure	Spinning disk
Direct drop formation (or Rim disintegration)		
Ligament drop formation (or Thread disintegration)		
Liquid sheet formation (or sheet disintegration)		

Table 1 Break-up Mechanisms of Spinning Disc Atomizer

또한 분무건조기는 통기, 회전, 기류 건조기 등 다른 건조기에 비하여 고도의 설계 및 제작 기술을 요하며, 설계에 있어서는 일부 이론적인 취급이 행해지고 있는 것은 사실이나 아직은 밝혀지지 않은 점들이 많아 대개 경험에 의존하고 있는 것이 현실이다.

국내의 경우 약 20여년전부터 분무건조기의 제작 실적이 있으나, 국내의 기반이 매우 취약하여 주로 외국제품의 모방설계에 그치고 있는 실정이며, 국내의 기술수준은 일본의 약 30% 정도인 것으로 보고되고 있다. 따라서 국내에서 사용되고 있는 분무건조기의 92%는 덴마크, 일본 등에서 수입된 것이 대부분이다.

앞으로 세라믹, 염료, 안료 등 고부가가치 산업의 수요증가에 따라 분무건조기의 수요도 급증할 것으로 예상되며, 국산 건조기의 보급촉진을 도모하기 위하여 고효율화를 위한 설계 및 제작기술의 확보가 시급히 요청되고 있는 실정이다.

분무건조기의 고효율화를 위한 핵심 요소기술로는 원액의 미립화 기술, 건조실 설계기술, 분말포집기술, 폐열회수기술 등이며, 이 중에서 특히 원액 미립화 기술과 건조실 설계기술의 국내기반이 취약하며 외국으로부터의 기술도입도 어렵다.

원액의 미립화는 노즐과 회전 원판을 이용한

	Classification	Usage
Disc Type	Flat disk	Humidifier
	Bowl	Spray Dryer
	Cup	Oil Burner
Impeller Type	Vane Type	
	Radial Channel	Dairy industry
	Reaction Blade	Paint industry
	Pin Type	Ceramic industry
	Perforated Rim	Pharmaceutist
	Porous	
Twin-Fluid Type	Air-blast Cup	

Table 2 Classification of Spinning Disk Atomizer

방식으로 나눌 수 있으나, 점도가 높은 액체의 분무건조에는 노즐 방식보다 회전원판식을 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 건조대상물로서 많은 수요가 예상되는 화학제품 중 염료의 베이스가 되는 망초(Na_2SO_4)를 1차 대상물로 하고, 2차 대상물로 우유를 선정하여 실험을 하였다.

또한 실험에는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 cup-type disk 와 개량 설계된 3종의 straight vane-type disk를 사용하여 미립화특성을 조사하고 서로의 data를 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 회전식 atomizer의 설계

회전식 atomizer는 회전체에 액체를 저속으로 공급하여, 액체에 마찰에 의한 원심력을 주어 회전판 원주에서 분무상으로 미립화시키는 방식으로서, 회전원판에서 방출하는 액체의 속도는 회전체의 원주속도에 따라 미립화특성은 공급유량과 회전 원판에서의 액체방출 속도에 의해 좌우된다. 그러나 공급유량과 회전체의 회전속도가 적절한 조건이 아니면 액체와 회전체 사이에 미끄럼(slip)이 일어나 액체에 충분한 가속력을 줄 수 없어, 액체 방출속도가 회전체 원주속도보다 훨씬 낮아 미립화특성이 나쁘게 된다.

액체 분열기구에는 염료의 공급유량과 회전체의

회전속도에 따라 달라지며, 크게 3가지로 나눌 수 있다. 따라서 동일한 회전식 atomizer 일지라도 이들 미립화 기구에 따라 당연히 분무특성이 다르게 되는데, 산업분야에서는 목적에 따라 회전체의 크기, 공급유량 및 회전속도를 선택하여 이들 각 형태의 액체 분열기구 중 어느 한가지를 선택하여 사용하고 있다.

액체 분열기구는 연료의 공급유량과 회전체의 회전속도에 따라 direct drop formation, ligament drop formation 및 liquid sheet formation으로 나눌 수 있으며, Table 1에 3가지 분열기구에 대한 mode, Table 2에 spinning disk의 예를 나타내었다.

① Direct drop formation : 이 영역에서는 액체의 공급유량과 회전속도가 매우 낮아, 액체가 회전원반 위에서 먼저 액주(ligament)상의 흐름으로 분열하고, 원반 원주상에 불균일하게 ligament를 형성하여 원반 원주의 고체면이 액주를 잡으려는 표면장력이 원심력보다 작아지면 그 자신이 원심력에 의해 1개의 주액적과 주액적의 직경보다 2.5배정도 작은 직경의 1~2개의 여적으로 분열한다. 이 과정은 근본적으로 불연속적이며, 회전체의 원주에서 임의대로 발생한다. 이와 같은 분열을 림 분열(Rim disintegration)이라고도 한다.

② Ligament drop formation : 액체의 공급유량과 회전속도를 증가시켜가면, 액체의 분열형태는 회전체 원주상에 규칙적으로 가늘고 긴 액주(ligament)가 생성하고 이 액주가 액적으로 분열하는 ligament drop formation 으로 변하게 된다.

이 모드에서 액주의 수는 유량이 증가할 수록 최대 값까지 증가하지만, 최대 값을 넘으면 공급유량과 관계없이 일정하게 되고 액주의 굵기가 증가하게 된다.

이 영역의 미립화특성은 입경이 보다 균일 분무특성을 얻지만, 액체의 점성, 표면장력이 클수록 평균입경이 커지고, 액체의 점성이 증가하면 분무에서 여적의 비율이 증가한다.

③ Liquid sheet formation : 공급유량을 더욱 증가시키면, 액주는 최대 수와 최대 굵기를 더 이상 유지하지 못하고, 이웃 액주와 서로 합쳐져서 두꺼운 액막을 회전원반위에 생성하게 된

다. 두꺼운 액막은 액막을 유지하려는 표면장력과 액막을 퍼져나가려는 원심력 및 운동에너지와의 힘의 평형조건이 유지될 때까지 형성되어 퍼져 나가게 된다. 이후 액막의 원심력과 운동에너지가 커지면, 액막은 ligament로 변환된 후 액적으로 분열하거나 혹은 직접 액적으로 분열하는 Liquid sheet formation(or film formation, sheet disintegration)형태로 된다.

이 모드에서 미립화 특성은 액막이 분열시의 액막 테두리(rim)가 이미 원반에서 벗어난 상태로 공중에 있으므로, 액막에서 생성된 액주는 불규칙하게 형성되어, 그 결과 액적 크기의 불균일도는 ligament drop formation보다 크게 된다.

2.2 Cup-type Disk Atomizer

회전원반식 atomizer는 Table 2에서 정리한 바와 같이 다양한 종류가 있기 때문에 최적의 것을 선택하여야 한다.

연료를 대상으로한 기존의 atomizer는 주로 bowl 형식의 atomizer가 사용되어 왔다. bowl 형식은 액체인 연료와 회전체 표면사이의 미끄럼(slip)을 줄이기 위하여 회전체를 cone 이나 cup 의 형태로 가공하여 원심력에 의한 원판 표면 위에 액체압력을 증가시켜 액체와 표면체 사이의 slip 현상을 줄이는 방법으로 개발된 것이다.

이것은 Fig.1에 나타낸 바와 같이 둥근 사발을 뒤집은 형태로 액체는 파이프에 의해 상부 중앙의 액실로 들어가고, 거기에는 12개의 구멍을 통하여 하부의 분무실로 들어가게 되어 있다. 본 연구에서는 개량된 vane type atomizer의 미립화 특성을 평가하기 위하여 이러한 bowl 형식의 atomizer 중에서도 pin type를 선정하여 미립화실험을 행한 뒤, data를 서로 비교하였다.

atomizer의 직경은 100mm로 하였다.

회전체인 cup 의 회전으로 인하여 액체는 원심력에 의하여 분무실인 cup의 내면의 벽면을 따라 원주 방향으로 흘러 원주 끝에서 분열하도록 되어 있다.

실제 이 형식의 atomizer에서 분출하는 분무상태를 관찰한 결과에 의하면, 원판의 테두리에

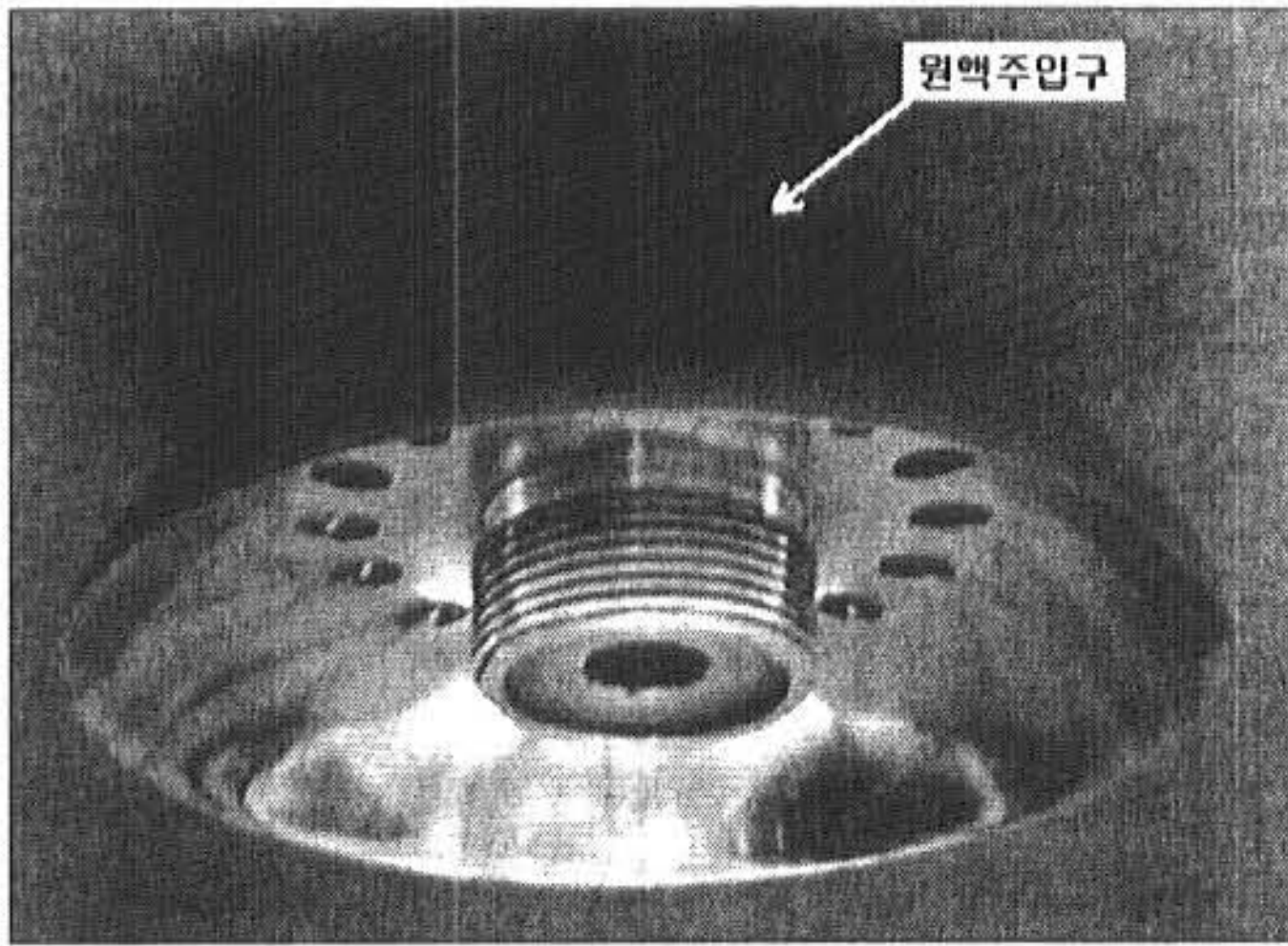


Fig. 1 Cup-type Disk Atomizer

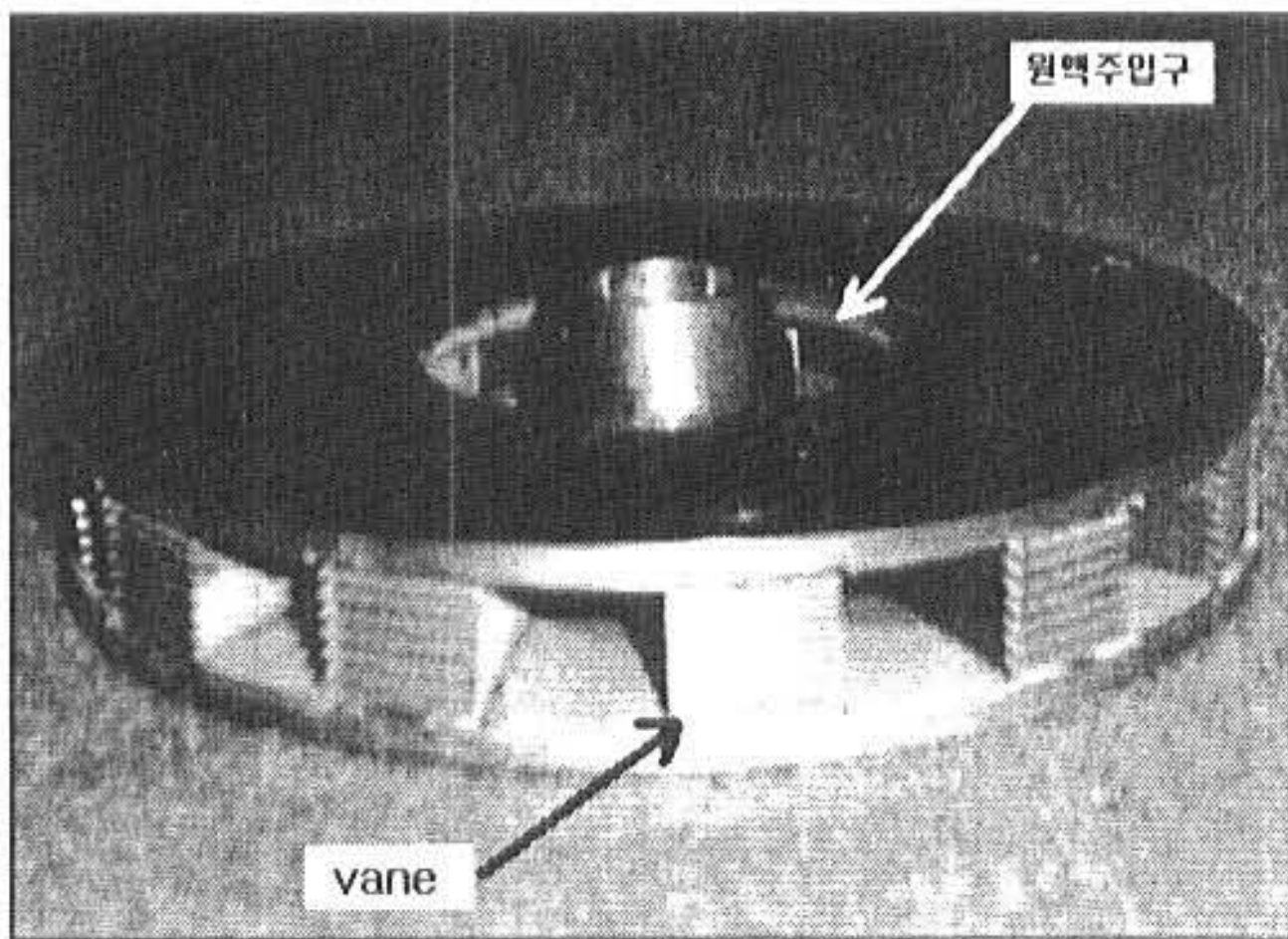


Fig. 2 Improved Vane-type Disk Atomizer

서 전면적에 걸쳐 균일한 액막을 형성하지 못하고, 액주상의 분열을 보이고 있다. 액주 사이의 폭은 회전수가 작을수록, 액체유량이 클수록 크게 되어, 균일한 분포의 미립화특성을 가져오지 못하고 있다고 지적하고 있다. 이것은 cup의 회전체 액실에서 구멍으로 액체를 공급하기 때문에 이 영향이 원판의 테두리까지 남아 있다고 사료되었다.

2.3 개량 Vane-type Disk Atomizer

본 연구에서는 염료용 회전원반 atomizer로 가장 적합하다고 판단되는 형식인 straight vane-type disk atomizer의 vane 부를 개량한 개량 vane-type disk atomizer(Fig.2)를 액체공급유량 10kg/h를 목표로 설계 및 제작하여 미립화 실험을 행하였다.

disk에 공급된 액체는 원심력에 의해 회전체 표면을 가로질러 흐르게 되며, 이 때 vane은

액체의 흐름을 가로막은 위치에 설치된 형상이므로 액체는 vane에 도달 후 vane표면 위를 얇은 액막상으로 흘러 원주 방향으로 흐르게 된다고 액체의 유동을 가정하였다.

Vane atomizer는 피건조물을 분산염료(비중 약 1.1, 점도 약 20 cp)로 하고, 제품 평균입경을 $80\mu\text{m}$, 공급유량 10kg/h, disk의 회전수 20,000rpm의 조건으로 설계하였다.

설계 순서는, ① vane Atomizer의 각부 치수 결정(즉 원판 직경, vane 수, vane 높이), ② 설계 값의 타당성을 검토, ③ 평균입경의 평가 순으로 하였다.

각부 치수의 결정 및 타당성 검토, 평균입경의 추정은 Herring과 Friedman의 vane atomizer의 크기 및 실험조건, 평균입경의 실험식의 결과를 참고하였다.

위와 같은 방법으로, 높이 10mm, 15mm, 각각의 높이에 따라 vane 수 12, 20개의 3종의 vane-type atomizer를 설계 제작하여 미립화 실험을 통하여 기존의 cup-type atomizer와 data를 서로 비교 검토하였다. 이때, atomizer의 직경은 100mm로 하였다.

또한 vane의 표면에 산과 골(피치1.2mm)을 만들어 액체의 흐름을 제어하였으며, 산의 끝부분에는 쉘기모양의 돌기를 부착하여 균일한 ligament의 형성이 용이하게 하였다.

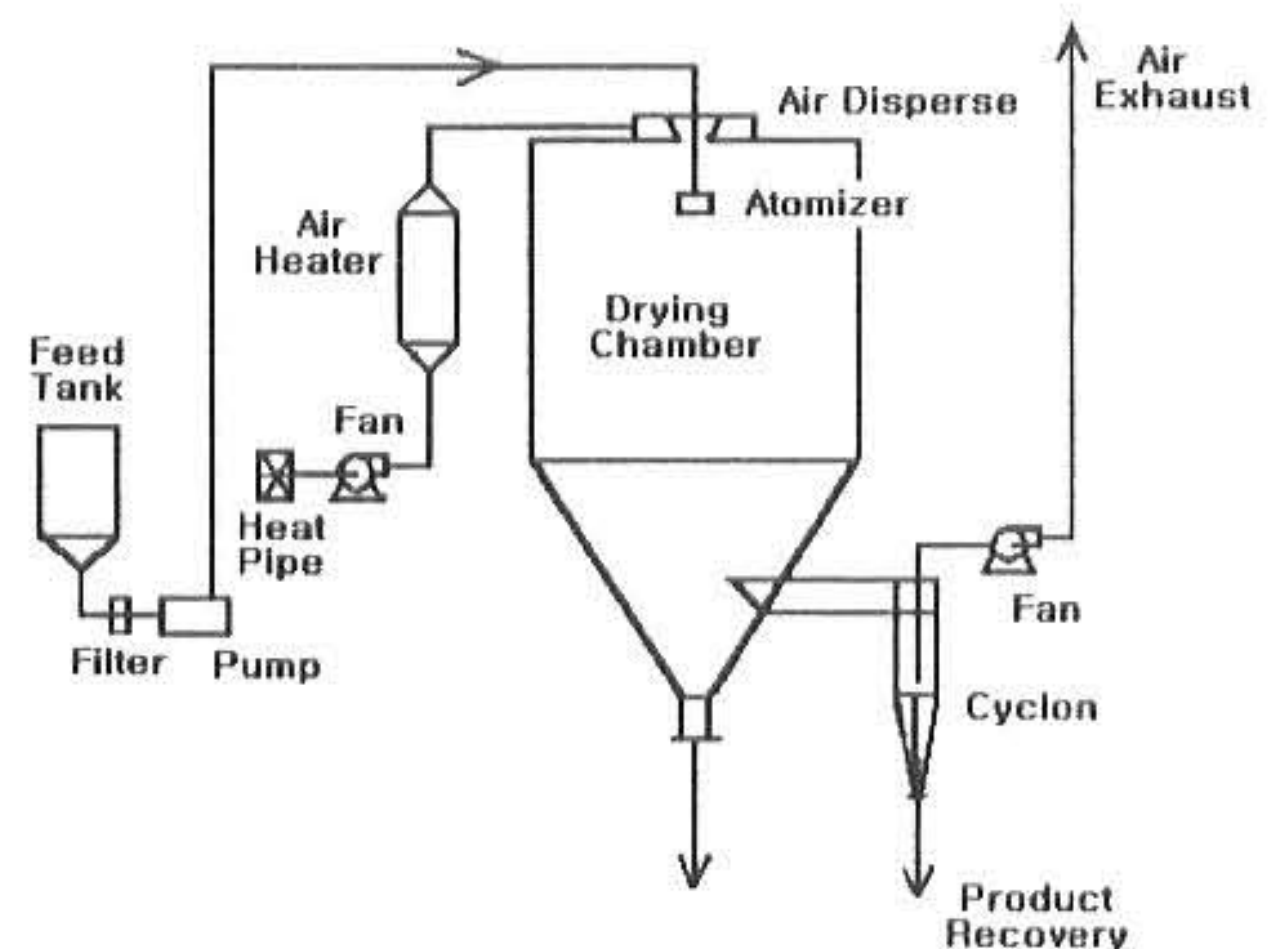


Fig. 3 Schematic Diagram of Spray Dryer

2.4 Pilot Spray Drier

Fig.3에 pilot spray drier의 개요를 나타내었다. 실험에 사용된 pilot spray drier는 제품의 희망 입도, 겉보기밀도, 재료의 특성, 미립화 방식 등을 고려하여 병류형으로 하였으며, 액체의 공급유량, disk의 회전수, 열풍온도 등을 고려하여 탑경 및 건조기 용적 등을 결정하여 설계 제작하였다.

피건조물 액체는 feed pump, filter를 통하여 atomizer 상부로 공급되고, 열풍은 air heater에서 배풍온도 90℃를 유지하도록 180℃ 정도로 가열되어 atomizer의 원주로 swirl류로 공급된다. 이때 열풍의 공급 fan의 토출량은 5m³/min이며, 배풍 fan의 토출량은 7m³/min으로서 항상 챔버내의 부압(약 -5mmAq)과 사이클론의 차압(약 -80mmAq)을 유지하도록 하였다. 또한 배풍은 heat pipe 열교환기를 통과시켜 에너지 손실을 최소화하였다.



Fig.4 Atomizer and Hot-air Outlet

Fig.4에 atomizer 및 열풍 출구의 사진을 나타내었다.

액적 및 분말의 채집은 액침법을 사용하였다. 1000c.p. 와 10000c.p.의 실리콘오일을 적당한 비율로 혼합한 뒤, 슬라이드 글라스 위에 도포하여 서터에 장착하였다. 서터는 직경 1.4m의 챔버내에 있어서 중심으로부터 반경방향의 거리에 따른 평균입径의 공간분포를 파악하기 위하여 1.8m(측정부 1.4m)의 길이의 것을 챔버를 가로질러 장착하였으며, 챔버의 중심부와, 중심부로부터 25cm 간격으로 각각 2개소, 총 5개소에 슬라이드 글라스를 장착하였다.

서터는 atomizer 하방 100mm 및 600mm에 설치하여 액적을 채집하였다. 하방 100mm에서는

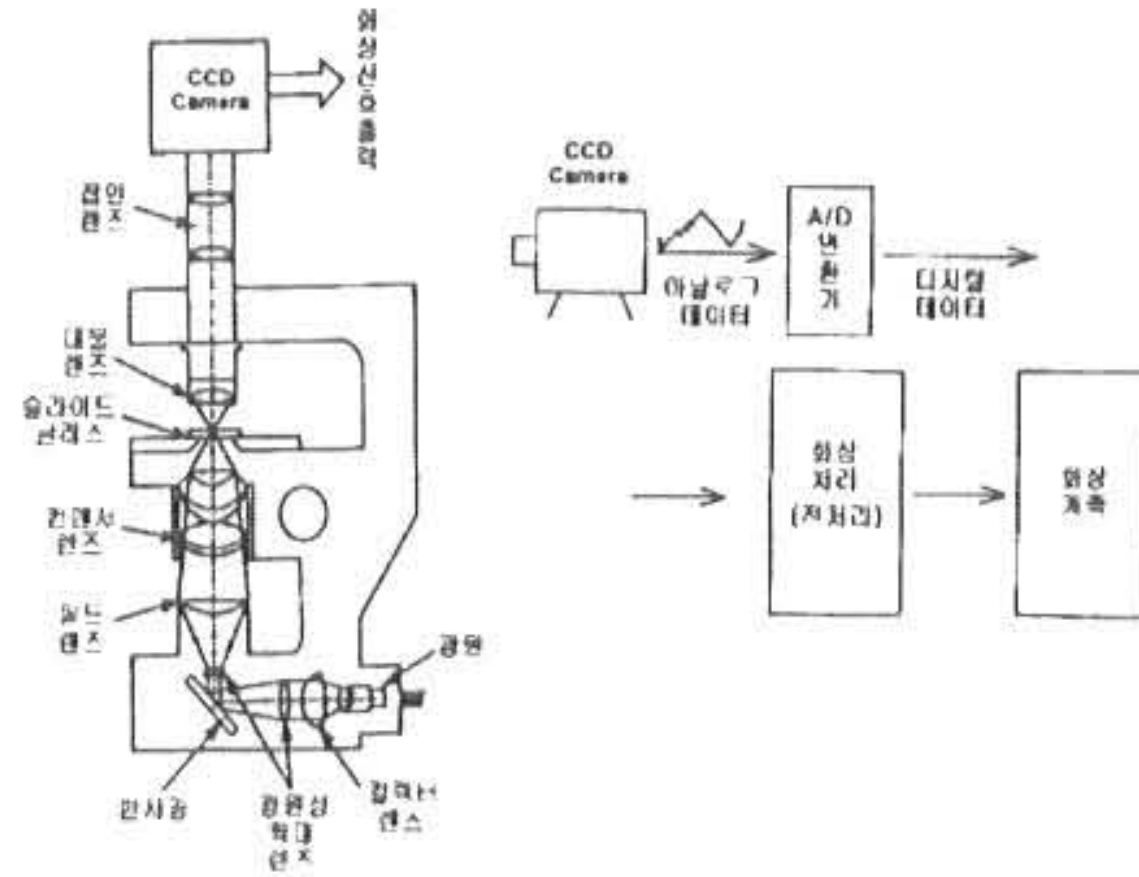


Fig. 5 Droplet Diameter Reader

거의 건조되지 않은 액상으로 채집되었으며, 하방 600mm에서는 거의 건조된(함수율 10% 이하) 분말로 채집되었다.

Fig.5와 같이 채집된 액적을 CCD카메라로 촬영하여 PMAS (V-Tek Ltd.) software 로 화상 처리 및 액적의 크기를 측정하였다.

실험에 쓰여진 피건조물로서는, 염료의 베이스로 많이 사용되는 망초(Na₂SO₄)와 우유를 사용하였다. 망초는 분말을 물에 일정비율(중량비 70%, 90%)로 용해한 뒤 사용하였으며, 우유는 신선한 원유를 사용하였다.

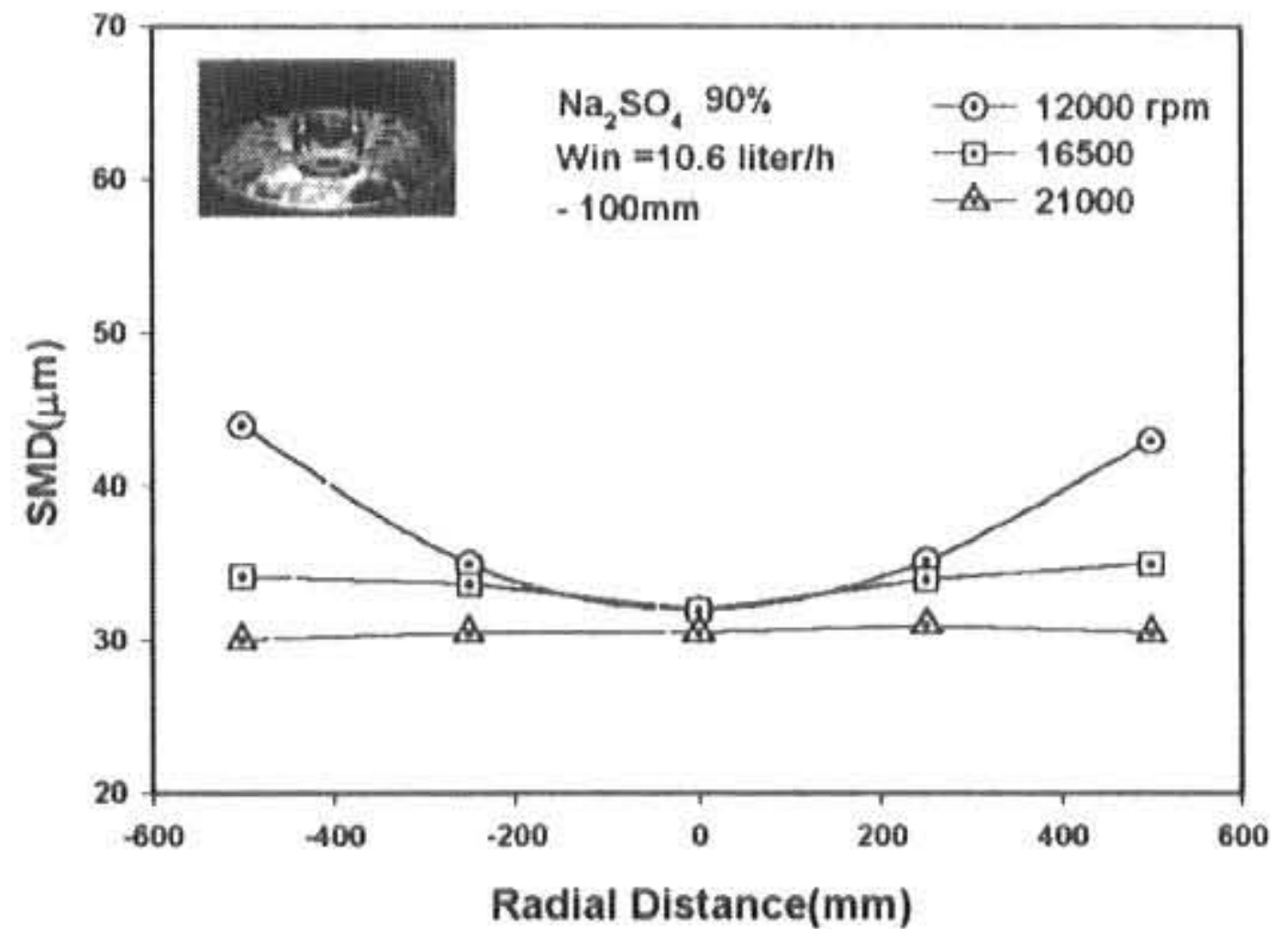


Fig. 6 Particle Size Distribution on the Radial Distance

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Cup-type Disk Atomizer

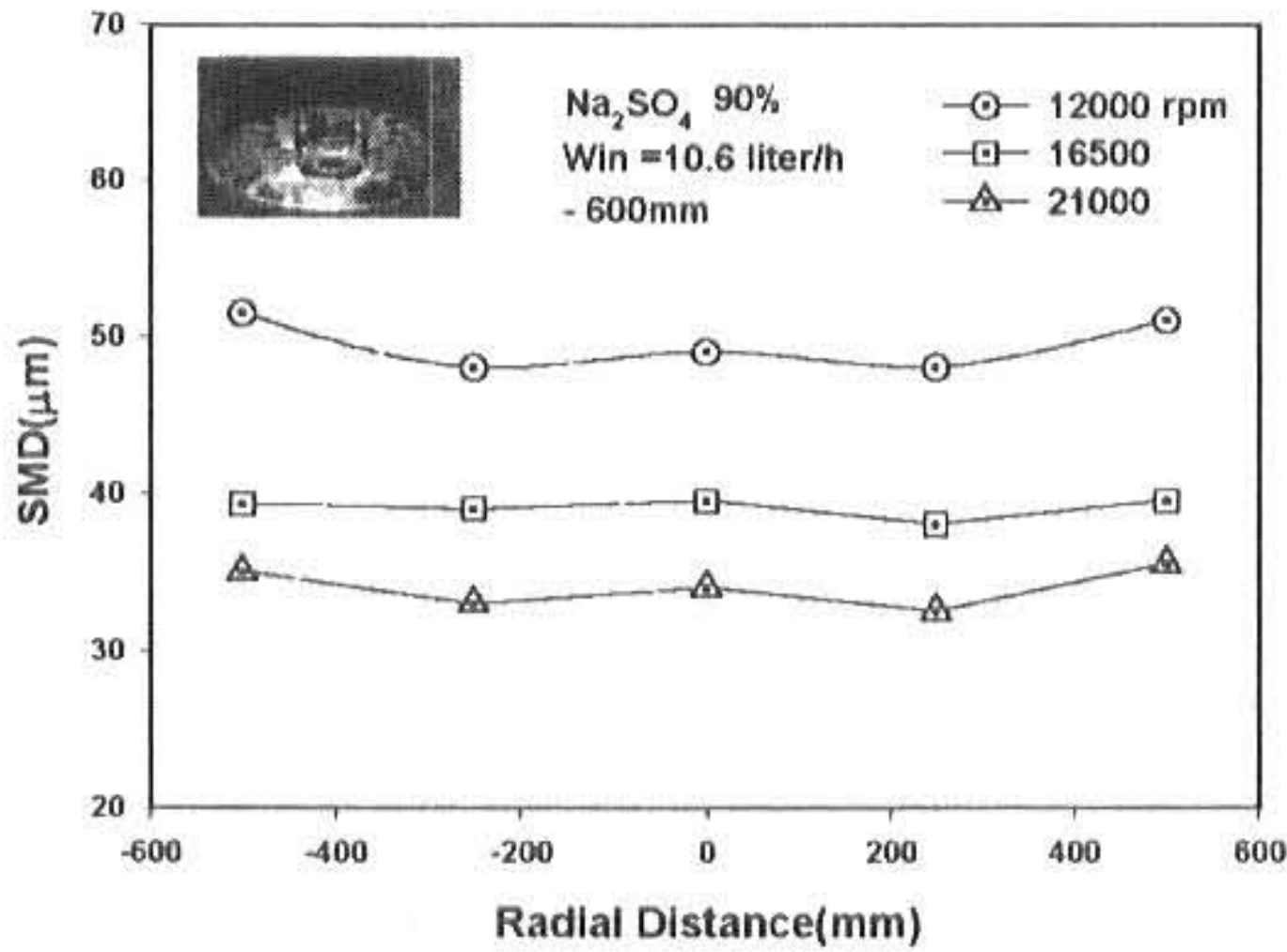


Fig. 7 Particle Size Distribution on the Radial Distance

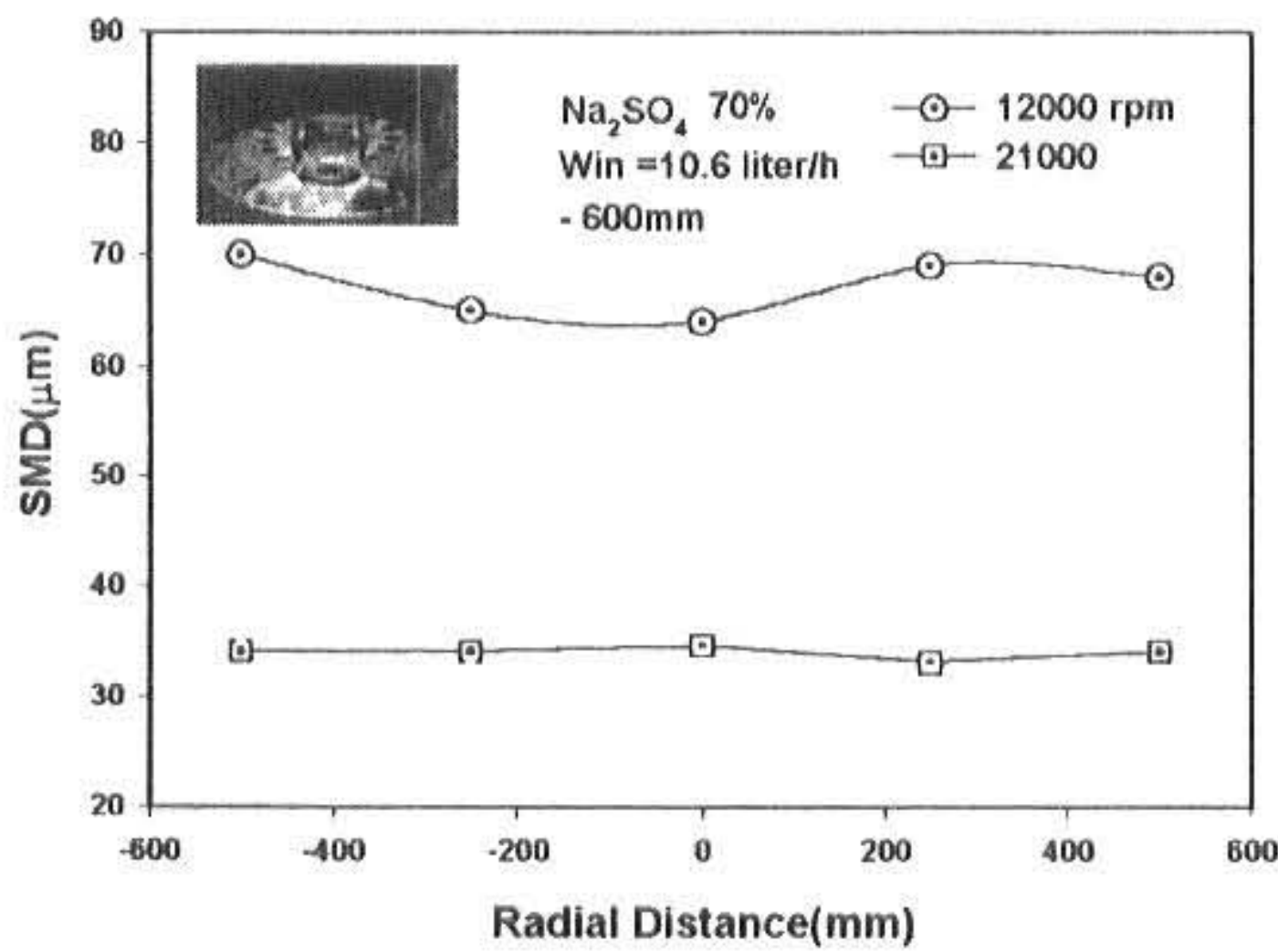


Fig. 8 Particle Size Distribution on the Radial Distance

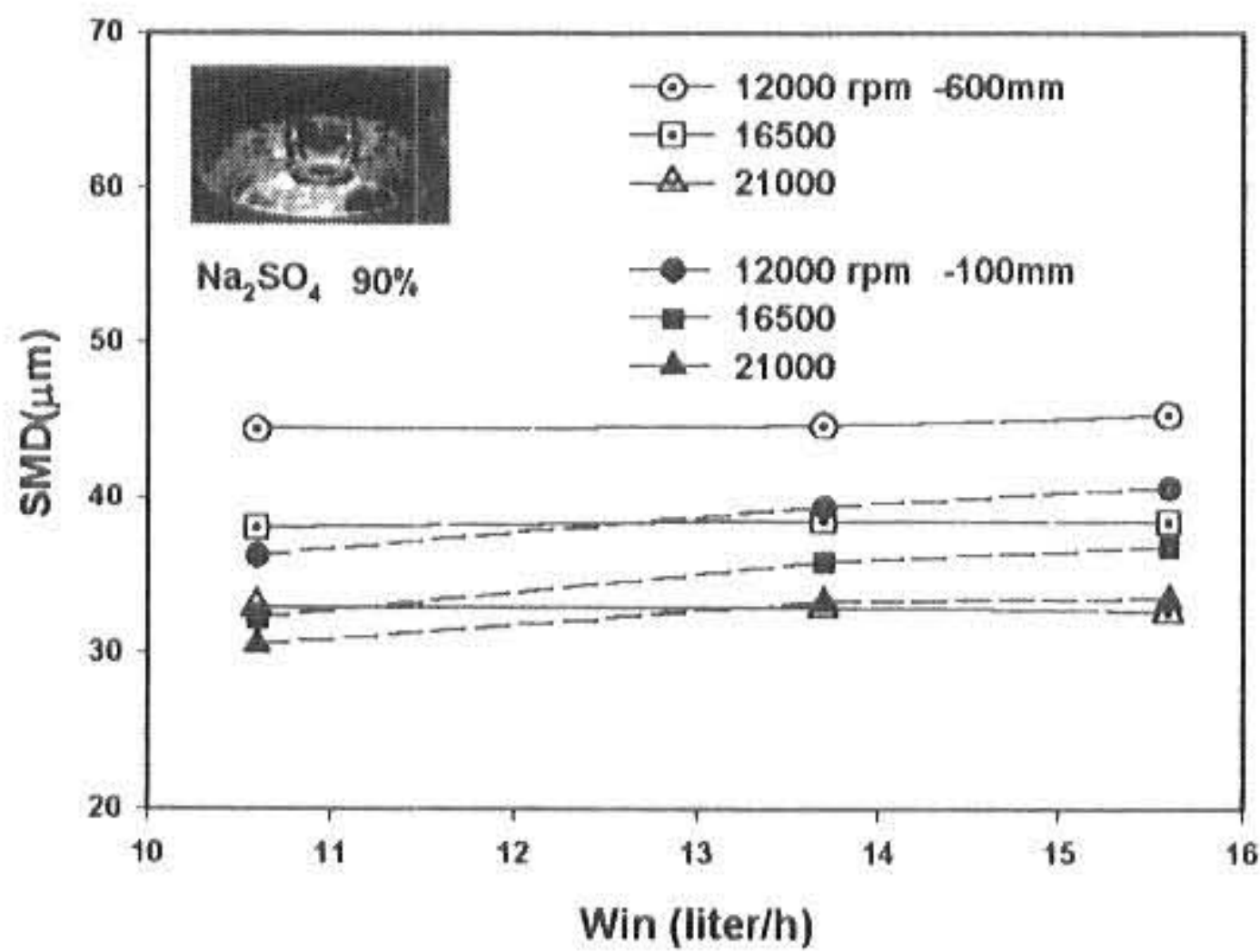


Fig. 9 Relation between SMD and Flow Rate, RPM

Fig.6에 cup-type atomizer 하방 100mm에서 채집된 Na₂SO₄ 90% 수용액의 액적들의 Sauter's

평균입경 SMD를 중심에서의 거리에 따라 나타내었다. atomizer의 회전수가 빠른 경우는 반경방향으로 SMD의 차이가 거의 없지만, 12,000rpm으로 atomizer의 회전수가 낮은 경우는, 반경 방향의 SMD의 차이가 크다. 이것은, 미립화가 나빠져서 입도분포가 좋지못하게 되면 큰 액적들이 많이 생성되고, 큰 액적들은 열풍의 swirl flow에 실려서 바깥방향으로 튀어나가고, 작은 액적들은 swirl flow에서 중심부로 이탈하기 때문이라고 생각한다.

Fig.7에 cup-type atomizer 하방 600mm에서 채집된 Na₂SO₄ 90% 수용액의 액적들의 SMD를 중심에서의 거리에 따라 나타내었다. 하방 100mm에서 채집된 액적과 비교하면, SMD가 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 액적들이 건조기 내를 비행하면서 서로 부딪혀 합체가 되었기 때문이라고 생각한다. 또한 반경방향의 SMD는 건조기내의 유동에 의해 액적들이 서로 고르게 잘 혼합되었기 때문에 큰 차이를 볼 수 없다.

Fig.8에 cup-type atomizer 하방 600mm에서 채집된 Na₂SO₄ 70% 수용액의 액적들의 SMD를 중심에서의 거리에 따라 나타내었다. 수용액의 농도가 짙은 경우는 미립화가 좋지 못하다는 것을 알 수 있다.

Fig.9에 cup-type atomizer에서 미립화 된 Na₂SO₄ 90% 수용액의 액적들의 SMD와 atomizer의 회전수, 원액의 공급 유량과의 관계를 나타내었다.

평균입경은 atomizer의 회전이 빨라질수록 작아진다. 또한 원액의 공급유량이 많아질수록 SMD는 커지지만 그 변화는 거의 없다.

액적이 채집된 위치에 따라서는, atomizer 하방 600mm에서 채집된 액적의 SMD가 하방 100mm에서 채집된 액적의 평균입경보다 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 액적이 건조기 내를 비행중 서로 부딪쳐서 합체가 되었기 때문이라고 생각한다. 즉, 하방 600mm의 경우는, atomizer 자체의 미립화에 관한 인자보다 건조기내의 유동이 더욱 영향을 미쳤다고 생각된다. 이 합체를 없애기 위해서 건조기의 크기, 열풍의 속도, 열풍출구의 vane 각도 등 건조기 내의 유동에 관한 설계가 중요하다고 생각한다.

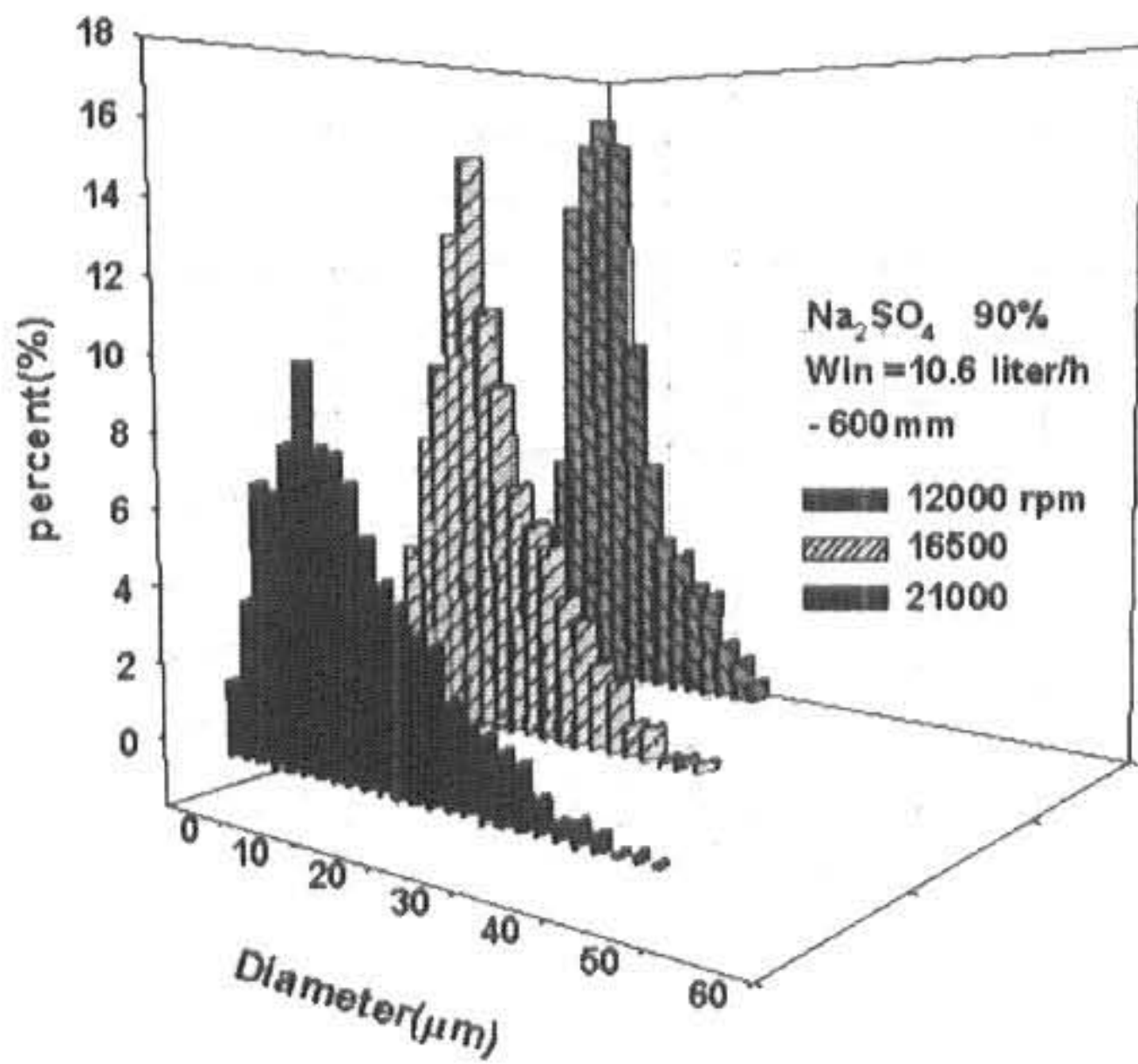


Fig. 10 Droplet Size Distribution

Fig.10에 cup-type atomizer에서 미립화되고 하방 600mm의 위치에서 채집된 Na₂SO₄ 90% 수용액의 액적들의 입도분포를 나타내었다. atomizer의 회전속도가 빨라질수록 최대입경의 크기는 작아지며, 전체 입수에 대한 최대입수의 비율이 증가하고 SMD 또한 작아진다. 따라서 유량이 일정할 경우, 회전수가 높은 쪽이 최대 입경이 작고 입경의 편차도 작아져서 건조에 있어서 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.2 Vane-type Atomizer

Fig.11에 개량된 vane-type atomizer 중에서 vane수 20개, 높이 15mm의 atomizer에서 미립

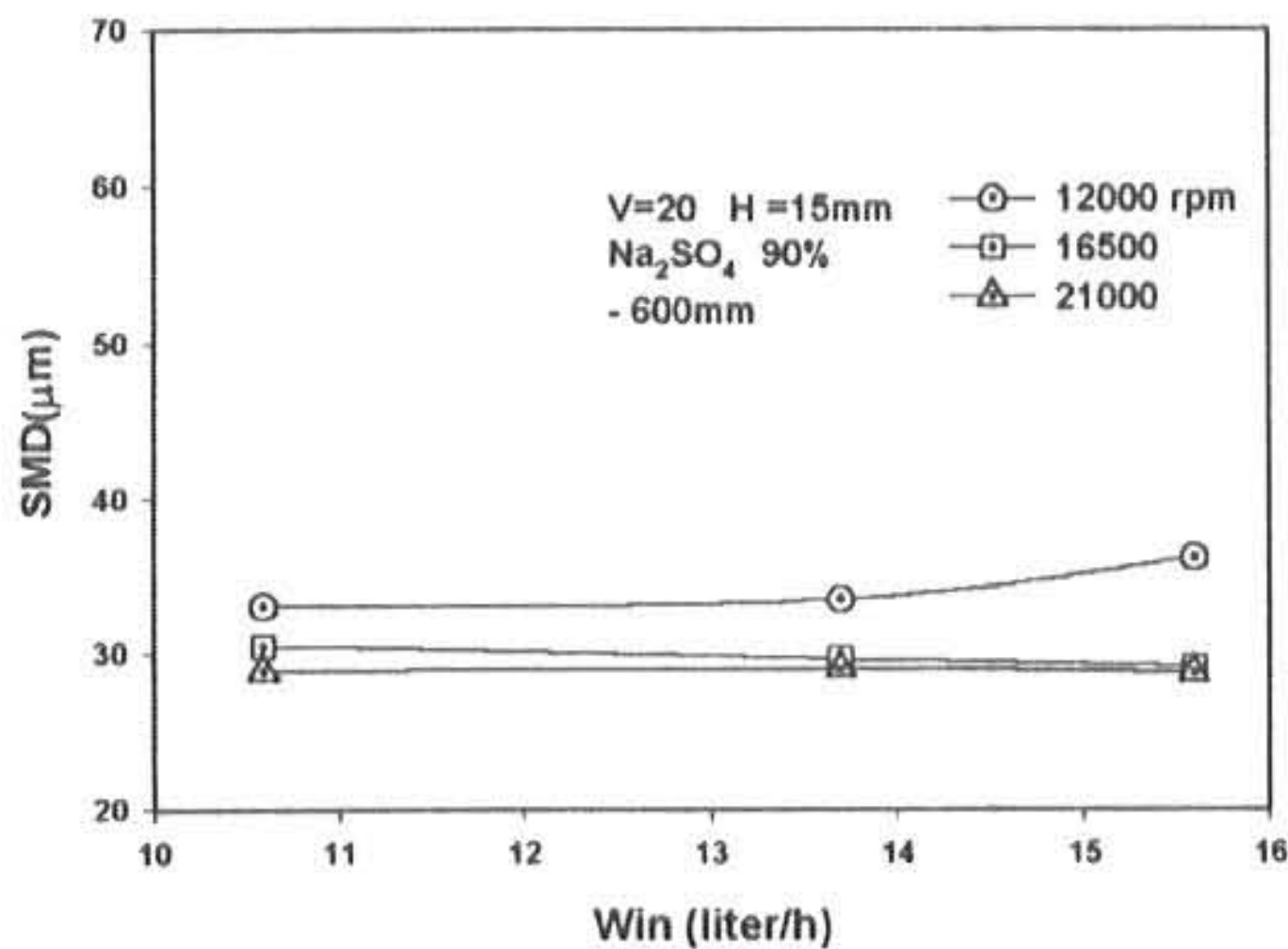


Fig. 11 Relation between SMD and Flow Rate, RPM

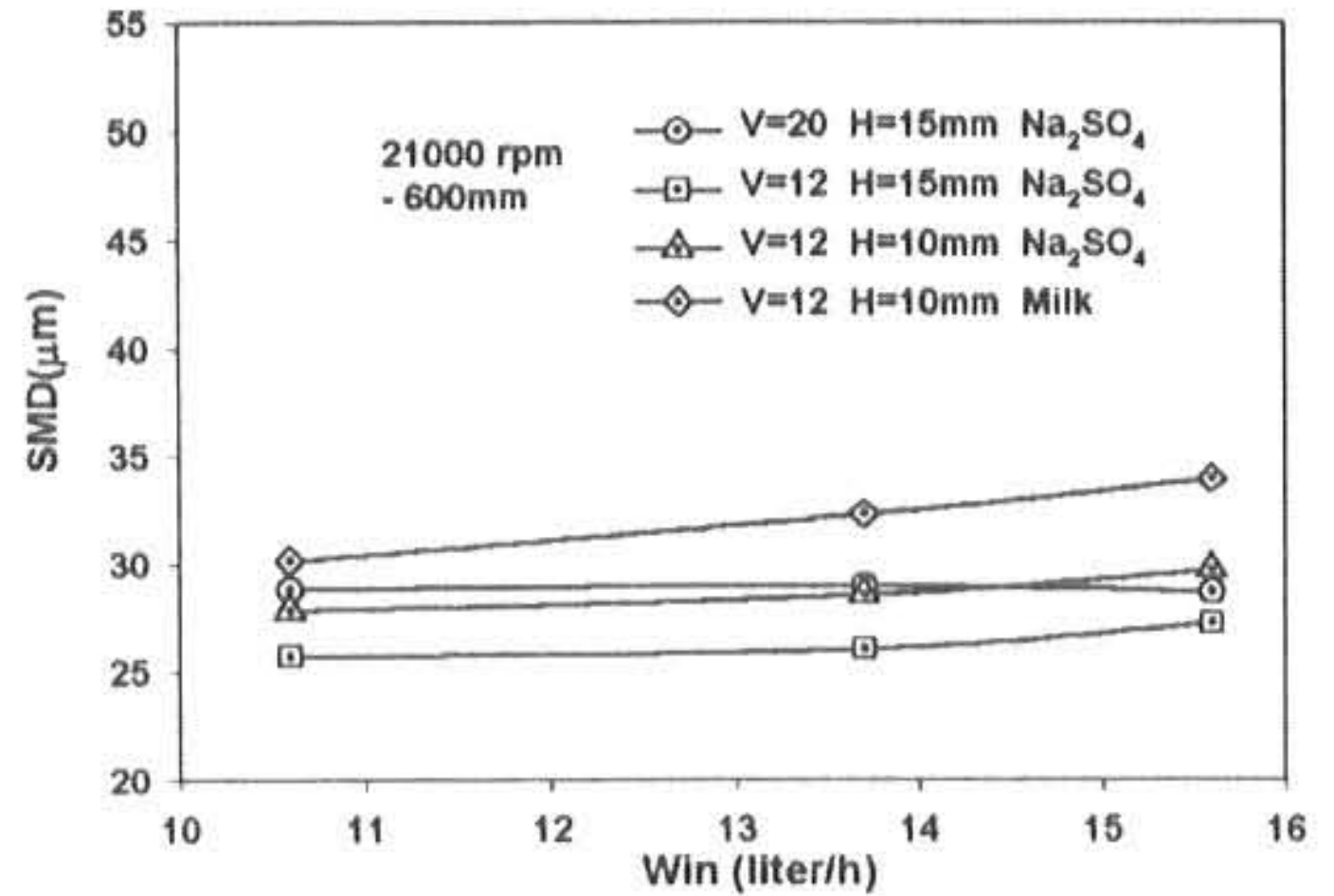


Fig. 12 Relation between SMD and Flow Rate, RPM

화 된 Na₂SO₄ 90% 수용액의 액적들의 SMD와 atomizer의 회전수, 원액의 공급 유량과의 관계를 나타내었다. cup-type atomizer보다 미립화가 좋아져서 SMD가 약 40% 작아진 것을 알 수 있다. 따라서 SMD 80μm를 요구하는 염료의 미립화에는 부적합하며, SMD가 작을수록 유리한 세라믹 등의 미립화에 적합한 atomizer라고 생각한다.

Fig.12에 개량된 3종의 vane-type atomizer에 의해 미립화 된 Na₂SO₄ 90% 수용액과 우유의 SMD와 atomizer의 회전수, 원액의 공급 유량과의 관계를 나타내었다.

vane의 수가 많을수록, atomizer의 높이가 높을수록 SMD는 커지고 미립화는 나쁘게 된다는 것을 알 수 있다.

또한 Na₂SO₄ 90% 수용액과 우유의 SMD를 비교해보면, 우유의 SMD가 더 큰 것을 알 수 있다. Na₂SO₄ 90% 수용액보다 우유가 점성이 더욱 크기 때문이라고 생각한다.

4. 결론

기존의 cup-type atomizer와 개량 vane-type atomizer의 파일럿 건조기 내에서의 미립화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. cup-type 및 vane-type atomizer의 회전이 빨라질수록 SMD는 작아진다.
2. 공급유량이 많아질수록 SMD는 커지지만, 변화는 거의 없다.

3. 개량된 vane-type atomizer는 cup-type 보다 SMD가 작아서 목표로 설정한 SMD 80 μ m 정도의 염료의 미립화에는 부적합하며, 세라믹 분말제조 등의 더욱 미세한 분말을 요구하는 분야에 응용 가능하다.

4. 파일로트 건조기 내에서 건조 현상에 따른 영향이 포함된 결과이므로 atomizer 자체의 미립화 특성을 파악하기에 부적절하며, 앞으로 미립화 실험과 건조 실험을 따로 행하여 각각의 특성을 파악할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) Oyama, Y. and Endou, K., 1953, "On the Centrifugal disk Atomization and Studies on the Atomization of Water Drops," Kagaku Kogaku, Vol.19, pp.256-260, 269-275 (cited by Lefebvre (1989)).
- 2) Dombrowski, N. and Fraser, R. P., 1954, "A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets," Phil. Trans., A, Vol. 247, pp.101-130.
- 3) Taylor, G. I., "The Dynamics of Thin Sheets of Fluid II: Waves on Fluid Sheets," Proc. Roy. Soc. London. Ser. A, Vol.253. pp.296-312.
- 4) Fraser, R. P., Eisenklam, P., Dombrowski, N. and Hasson, D., 1962, "Drop Formation from Rapidly Moving Liquid Sheets," AIChE J. Vol.8, No.5, pp.672-680.
- 5) Tanawawa, Y., Miyasaka, Y. and Umehara, M., 1978, "Effect of Shape of Rotating disks and Cups on Liquid Atomization," Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Sprays (ICLAS-78), pp.165-172.
- 6) Mastumoto, S., Belchor, D. W, and Crosby, E., 1985 "Rotary Atomizers: Understanding and Prediction," Proc. 3rd International Conference on liquid Atomization and Spray System (ICLASS - 85), pp.1A/1/1-A21.
- 7) Marshall, W. R., 1986, "Atomization and Spray Drying," Johansen Crosby and Assoc.