

회전원판 분무기의 액체미립화 특성에 관한 실험적 연구

임종한* · 윤준규†

(원고접수일 : 2007년 3월 26일, 심사완료일 : 2007년 8월 29일)

An Experimental Study on the Characteristics of Liquid Atomization in a Rotating Disk Atomizer

Jong-Han Lim* · Jun-Kyu Yoon†

Abstract : Apparatus of rotating disk and cup are widely used spray paintings and industrial boilers. This study was conducted experimentally to investigate the characteristics of liquid atomization in a rotating disk atomizer by means of viscous liquid mixed water and glycerin. The purpose of this study are to observe breakup mechanism according to the variation of supplied flow rate $0.4\sim30 \text{ cm}^3/\text{s}$ and rotating speed $200\sim4000 \text{ rpm}$, and to investigate three kinds of breakup pattern such as drop, ligament and film formation by comparing the transition flow rate, ligament number and ligament length to those of Tanasawa and Matsumoto's empirical formula. The results are as follows : The higher it makes use of viscous liquid, the better it get the characteristics of breakup mechanism. Also, When I compared practical value with experiential value at similar test conditions, it was shown similar tendency though were a little variation.

Key words : Breakup mechanism(분열기구), Ligament start point(액주시작점), Film start point(액막시작점), Transition flow rate(천이유량), Ligament number(액주수), Ligament length (액주길이)

기호설명

D	: 원판의 직경 [cm]	Q	: 액체의 공급유량 [cm^3/s]
L	: 액주길이 [mm]	Q_c	: 액체의 한계유량 [cm^3/s]
K	: 액주수, $0.574Re^{1/3}We^{1/4}$	Q^+	: 무차원 천이유량 [-]
N	: 원판 회전수 [rpm]	R	: 원판의 반경 [cm]
		Re	: Reynolds 수, $(\rho R^2 \omega)/\mu$
		We	: Weber 수, $(\rho R^3 \omega^2)/\sigma$

* 교신저자(경원대학교 기계·자동차공학과), E-mail:jkyoon@kyungwon.ac.kr, Tel: 031)750-5651
† 경원대학교 기계·자동차공학과

그리스 문자

- μ : 액체의 점성계수 [poise]
 ρ : 액체의 밀도 [g/cm^3]
 σ : 액체의 표면장력 [dyn/cm]
 ν : 액체의 동점성계수 [cm^2/s]
 ω : 원판의 회전각속도 [rad/s]

1. 서 론

최근 대두되고 있는 환경오염문제와 고유가 추세로 유류를 사용하는 벼너에서는 고성능 및 저연비 향상을 위하여 다양한 액체 미립화방법을 모색하여 지속적으로 발전시키고 있다. 액체미립화는 주로 액적의 크기, 입도분포, 분무각, 분열길이 등의 분무특성에 따라 연소현상이 크게 변함으로 보다 심도있는 최적화 연구가 필요하다. 일반적으로 액체 미립화방법은 가압노즐법, 이유체노즐법, 회전원판법 등이 있다. 그 중에서 회전원판 또는 회전컵 등에 의한 회전분무장치는 원심력을 받는 액체가 큰 속도로 반경방향으로 기체 내에 뿌려지는 원리를 이용함으로 비교적 구조가 간단하며, 액체에 대해 양호한 분무특성이 얻어지는 분무건조, 분무도장 및 산업용보일러 등의 공업용장치에서 널리 이용되고 있다. 이 장치에서는 일정한 회전수에서 유량을 점차로 증가시키면 적상분열, 액주상분열, 막상분열의 3가지 미립화 분열기구가 관찰된다.^[1]

이러한 연구는 Dombrowski 등^[2]에 의해 정립되어, 액체의 점성에 따라 분열기구 및 미립화 특성이 얼마나 영향을 미치는 가를 Tanasawa, Matsumoto 등^{[3]-[8]}에 의해 이론 및 실험적으로 규명하였고, Abrahamson 등^[9]은 회전원판에 대하여 물을 작동유체로 하여 염료 주입에 의한 유동가시화와 함께 PIV(Particle Image Velocimeter)를 이용한 다양한 형상의 허브 냉각홀과 냉각류의 유입유량의 변화에 따른 내부유동구조의 변화를 연구하였다. 공대위 등^[10]은 단일회전원판에 슈라우드를 부착하여 슈라우드 벽면과 원판면 사이의 중심부에서 반경방향으로 원주속도와 교란주파수를 측정하여 유동장의 와류거동을 조사하였고, Kobayashi^[11]은 회전원판과 회전원뿔 그리고 회

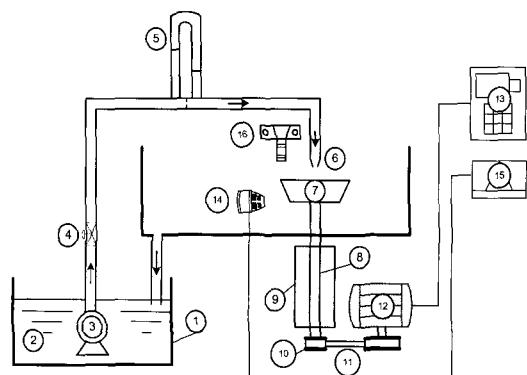
전구의 각 표면에서의 유동 천이현상을 실험하여 한계 및 천이 레이놀즈수를 제시하여 유동의 불안정성에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 회전원판 상에 점성이 다른 물과 글리세린수용액을 사용하여 공급유량 및 회전수의 변화에 따라 일어나는 3가지의 미립화 분열기구를 관찰하고, 기존 연구자의 경험식을 검증하기 위해 한계유량 및 천이유량의 영향을 조사하여 액체미립화 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내고 있다. 정압 탱크 ①내에 있는 실험액체 ②를 기어펌프 ③에 의해 노즐 ⑥을 통하여 회전원판 ⑦의 중앙에 공급한다. 노즐 ⑥은 회전원판 위로 4 cm정도 떨어져 있다. 이 때, 액체유량은 바이패스밸브 ④로 조절하여 오리피스유량계 ⑤에 의해 측정된다.



① Tank ② Test liquid ③ Pump
 ④ By-pass valve ⑤ Manometer ⑥ Nozzle
 ⑦ Rotating disk ⑧ Shaft ⑨ Housing
 ⑩ Pulley ⑪ Belt ⑫ Motor ⑬ Inverter
 ⑭ Stroboscope ⑮ Retarder ⑯ Camera

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

회전원판은 축 ⑧과 벨트 ⑪로 연결되어 있는 모터 ⑫의 동력에 의해 회전시키며, 원판의 회전수는 인버터 ⑬에 의해 조절된다. 카메라 ⑯은 촬영이 용이한 회전원판 ⑦ 위로 약 50 cm정도로 이격시

켜 고정하였다. 일회 펄스발생기 ⑮는 스트로보스 코프 ⑯에 신호를 보내어 발광시킨다. 스트로보스 코프는 사진촬영을 도모하기 위해서 원판 하단부에 설치하였다.

Fig. 2는 회전원판의 구조도를 나타낸 것으로 회전원판의 재질은 주강이며, 그 표면은 니켈로 도금하였다.

노즐에서 액체가 공급되는 회전원판의 중앙부는 그림에서와 같이 직경 40 mm, 깊이 4 mm로 움푹 들어가게 45° 로 가공하여, 액체가 회전원판에서 반경방향을 편심되어 흘러가는 것을 방지하였다. 회전원판의 직경은 100 mm이고, 원주단은 60° 로 가공하였다.

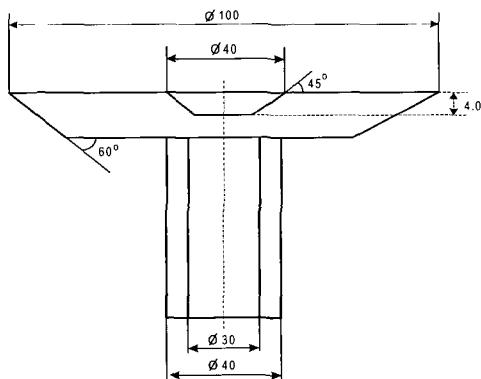


Fig. 2 Geometry of rotating disk atomizer

Table 1 The property of test liquid

Solution	Density ρ (g/cm ³)	Viscosity μ (poise)	Surface Tension σ (dyn/cm)	Dynamic viscosity ν (cm ² /s)	T (°C)
Water	1.0	0.0114	73.0	0.0114	25
55wt% Glycerin	1.143	0.0953	57.0	0.0834	25
84wt% Glycerin	1.263	0.840	60.5	0.6651	25

2.2 실험방법

실험은 주위의 온도조건(20~25°C)에서 Ø25인 노즐경을 사용하여 공급유량을 0.4~30 cm³/s 범위로 회전원판의 회전수를 200~4000 rpm으로 변화시키면서 순간사진촬영법으로 액체의 미립화 분

열기구를 관찰하였다. 사진촬영은 실내의 암흑상황에서 안정된 분열모양을 줌렌즈가 장착된 카메라를 B셔터로 놓고, 일회 펄스발생기에 의해 스트로보스코프를 5 μs로 순간발광시켜 촬영하였다. 이 때 필름은 ASA 400을 사용하였으며, 실험액체는 Table 1과 같은 물성치를 이용하여 점성에 따른 분열기구의 특성을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분열기구의 특성

회전원판에 액체의 공급유량을 회전수의 변화에 따라 조금씩 증가시켰을 때, 액체는 회전수와 유량의 변화에 따라 적상분열, 액주상분열 및 막상분열의 3가지 분열기구가 발생한다.

3.1.1 회전수 및 유량의 영향

일반적으로 물이나 점성이 낮은 액체의 경우에서도 적상, 액주상, 막상의 분열모양을 나타날 수 있지만, 그 모양은 점성이 높은 경우와 상당히 다르다^[3].

Fig. 3과 Fig. 4는 공급액체를 물로 한 경우, 회전수 및 유량을 변화시킨 조건에서 미립화 분열 과정을 관찰한 결과를 보여준 그림으로서, Fig. 3에서는 회전수 700 rpm에서 유량을 증가시키면 낮은 회전수로 인해 막상분열이 관찰되지만, Fig. 4에서는 유량 17 cm³/s에서 회전수를 증가시키면 액주상분열에서 거의 액막이 형성되지 않고 비산되는 것을 알 수 있다. 이는 점성이 아주 낮은 물의 물리적 특성이라 볼 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 물보다 점성이 높은 55wt% 글리세린수용액을 공급액체로 한 경우로서, 물의 경우보다 미립화현상이 다소 차이는 있지만 낮은 점성으로 인하여 저속영역에서는 유량변화에 따라 뚜렷한 막상분열이 관찰되지만, 저유량 조건에서 회전수를 증가시킬 때는 좁은 범위로 막상분열이 관찰되어 3가지의 미립화 분열모양을 확인할 수 있었다.

Fig. 7에는 84wt% 글리세린수용액을 공급액체로 한 경우, 회전수 700 rpm으로 일정하게 유지하고

공급유량을 증가시켰을 때 분열모양을 나타내었다. 유량이 적으면 Fig. 7-(1)과 같이 꼬리부가 길게 되지만, 주적과 꼬리부분은 더욱 확실히 구별된다.

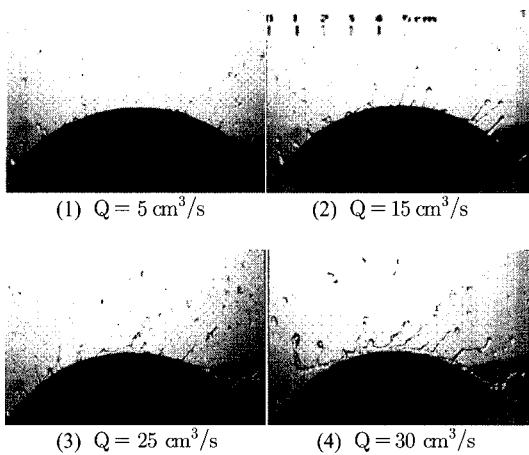


Fig. 3 Atomization of water as a function of flow rate(at N=700 rpm)

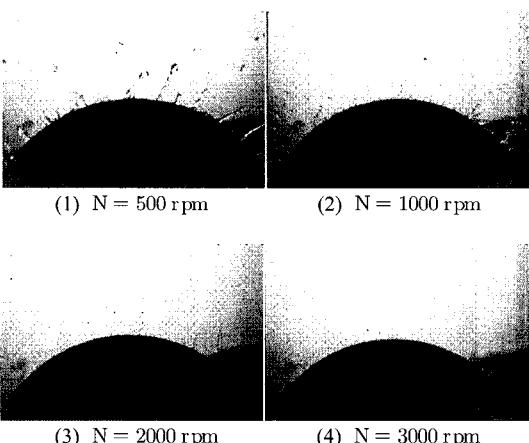


Fig. 4 Atomization of water as a function of rotating speed(at $Q = 17 \text{ cm}^3/\text{s}$)

이와 같이 주적과 꼬리부분을 구별할 수 있는 상태를 적상분열이라 하고, 좀 더 유량을 증가하여 Fig. 7-(2)로 되면, 거의 꼬리부분으로 되어 꼬리선단에서 입자로 분열하며, 이 때 분열후의 입자의 크기는 적상분열의 주적보다 적으며 피치도 가늘게 된다. 다시 유량을 더욱더 증가시키면 Fig. 7-(3)으로 되어 반대로 피치는 거칠고 섬유는 굽게 되면

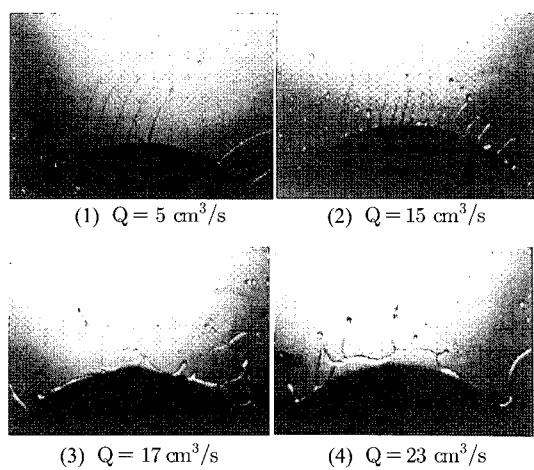


Fig. 5 Atomization of 55wt% glycerin as a function of flow rate(at N=700 rpm)

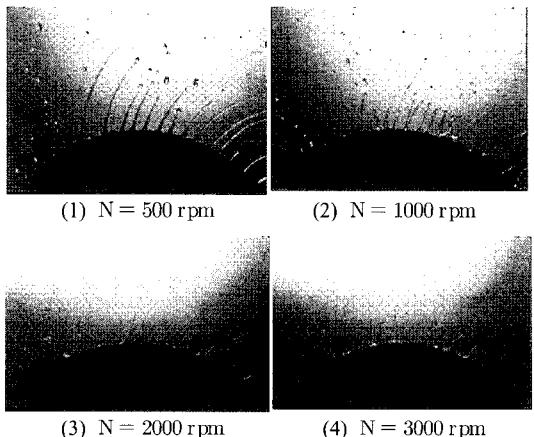


Fig. 6 Atomization of 55wt% glycerin as a function of rotating speed(at $Q = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$)

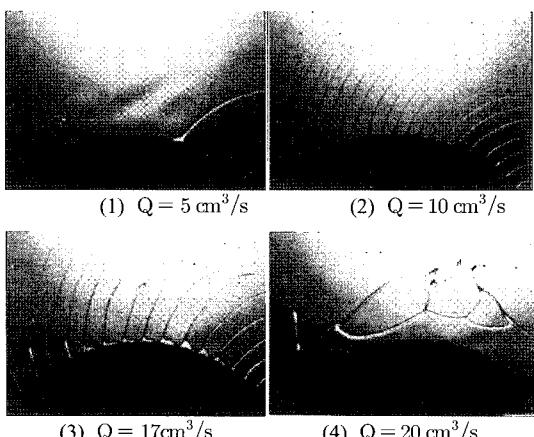


Fig. 7 Atomization of 84wt% glycerin as a function of flow rate (at N=700 rpm)

서 Fig. 7-(4)와 같이 물갈퀴상의 액막을 형성한다. 이보다 공급유량을 더욱 더 증가시키면 액막은 유동이 불안정하여 급격히 발달되면서 큰 원반상의 액막으로 되어 결국 회전원판 위로 넘치게 된다.

3.1.2 한계유량의 영향

적상, 액주상, 막상분열의 3가지영역을 구분하는 한계유량에 대한 경험식은 Tanasawa 등의 연구^{[3],[5]}에 의해 다음과 같이 적용하였다.

① 액적상이 생기는 최대 한계유량은

$$Q_1 \leq 2.8 \left(\frac{D}{N} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) / \left[1 + 10 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} \right)^{1/3} \right] \quad (1)$$

② 액주상이 극소피치로 되고, 균일한 섬유상으로 되는 한계유량은

$$Q_2 = 8.0 \left(\frac{D}{N} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) / \left[1 + 10 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} \right)^{1/3} \right] \quad (2)$$

③ 액막상이 생기는 최소 한계유량은

$$D\rho/\mu < 30 \text{ s/cm 일 때.}$$

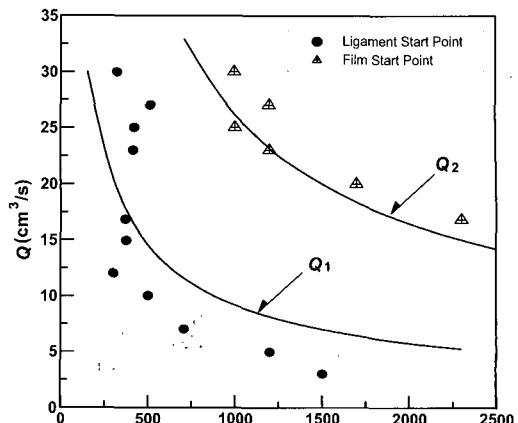
$$Q_3 \geq 5.3 \left(\frac{D}{N} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$D\rho/\mu > 30 \text{ s/cm 일 때.}$$

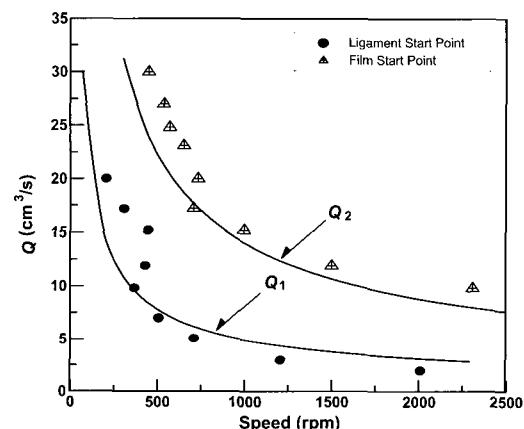
$$Q_3 \geq 20(D)^{1/2} \left(\frac{1}{N} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{5/6} \quad (4)$$

이다. 여기서 D 는 원판의 직경, N 은 원판의 회전수이고, ρ , μ , σ 는 밀도, 점성계수, 표면장력이다.

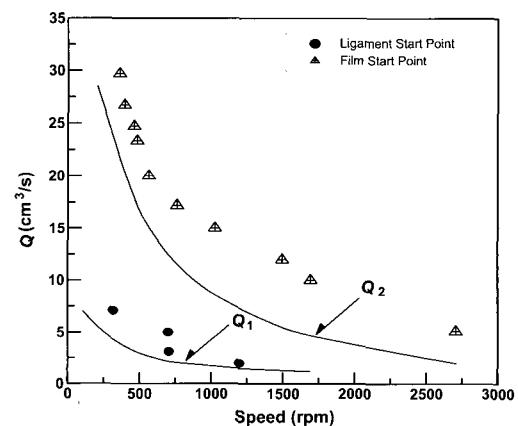
위 식의 계산결과와 비교하기 위해 실제의 실험결과를 점성에 따라 관찰 및 계측한 액체의 한계유량을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 도시한 한계유량 Q_1 과 Q_2 의 곡선은 식 (1)과 식 (2)에서 계산된 값을 나타낸다. 그 결과로서, 경험식에서 얻어진 계산값과 미립화 분열모양을 사진관찰로 실제측정한 실험값을 비교할 때 다소 차이는 크지만 비슷한 경향을 보여주어 제안된 경험식에 대한 적합성을 검증할 수 있었고, 점성이 높은 액체일수록 분열거동은 뚜렷하게 나타나고, 한계유량의 범위는 더 낮아지는 특성을 알 수 있었다.



(1) Water ($\mu = 0.0114$ poise)



(2) 55wt% Glycerin ($\mu = 0.0953$ poise)



(3) 84wt% Glycerin ($\mu = 0.840$ poise)

Fig. 8 Change of the critical point of flow rate by change of test liquid

또한 점성계수에 대한 한계유량이 어느 정도 영향을 미치는 가를 알아보기 위해서 원판의 회전수 1000 rpm에서 점성이 다른 액체들에 관하여 계측한 동점성계수 ν 를 가로축으로, 한계유량 Q_c 를 동표면장력(σ/ρ)으로 나눈 값을 세로축으로 해서 Fig. 9에 나타내었다.

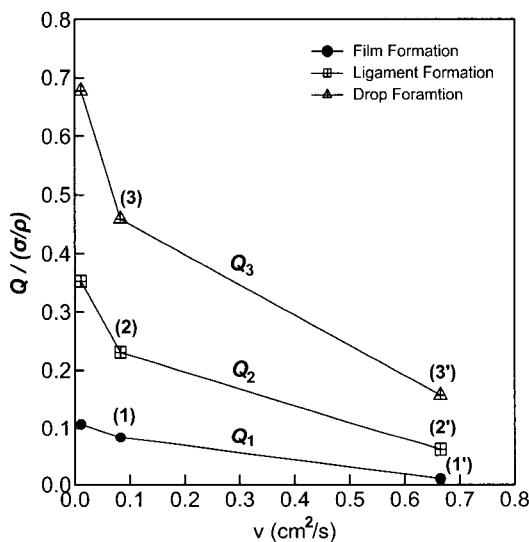


Fig. 9 Change of critical flow rate with kinematic viscosity(at N=1000 rpm)

그 결과로서, 액체의 점성에 따라 액주상에서 막상으로 변하는 한계유량 Q_3 은 점(3)에서 점(3')로 감소하고, 액주상이 극소피치가 되는 한계유량 Q_2 은 점(2)에서 점(2')로 감소하며, 적상분열에서 액주상분열로 변하는 한계유량 Q_1 은 점(1)에서 (1')로 감소한다. 이런 경향은 점성에 따라 3가지 미립화 분열기구는 크게 다르지만 비례적인 감소특성을 보인다.

그 결과로 동점성계수 ν 가 낮은 경우는 회전원판 위에서 파동이 발생하고 각 분열기구에서 한계유량의 폭이 크며 액주가 순차적으로 비산되는 현상을 나타나므로 점성의 영향은 적으나, 동점성계수 ν 가 큰 경우에는 한계유량의 폭은 적어져 파동은 거의 발생하지 않고 액주가 안정된 섬유상으로 나타나므로 점성의 영향은 크다고 볼 수 있다.

3.2 천이유량의 특성

3.2.1 천이유량의 영향

회전원판에 의한 액체의 미립화현상은 운전조건에 따라 적상분열에서 액주상분열, 액주상분열에서 막상분열로 천이한다. 점성유체의 경우에는 각각의 천이유량에 대하여 Matsumoto 등^{(6),(7)}은 Reynolds 수와 Weber 수를 무차원 천이유량 Q^+ 의 함수관계로 나타내어 다음과 같이 적용하였다.

① 적상분열→액주상분열

$$Q_1^+ = 0.096 \frac{Re^{0.95}}{We^{1.15}} \quad (5)$$

② 액주상분열→적상분열

$$Q_2^+ = 0.073 \frac{Re^{0.95}}{We^{1.15}} \quad (6)$$

③ 액주상분열→막상분열

$$Q_3^+ = 0.340 \frac{Re^{2/3}}{We^{0.883}} \quad (7)$$

여기서

$$Q^+ = \frac{Q}{2\pi R \sqrt{\nu \omega}}, Re = \frac{\rho R^2 \omega}{\mu}, We = \frac{\rho R^3 \omega^2}{\sigma} \quad \text{이고},$$

R 은 원판의 반경, ω 는 각속도, ν 는 동점성계수이다.

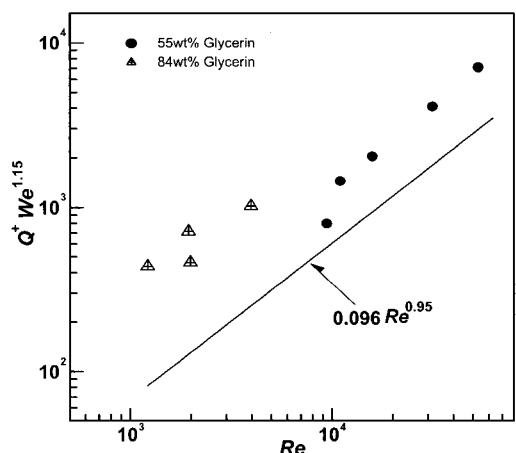


Fig. 10 Transition from direct drop to ligament formation on viscous liquid

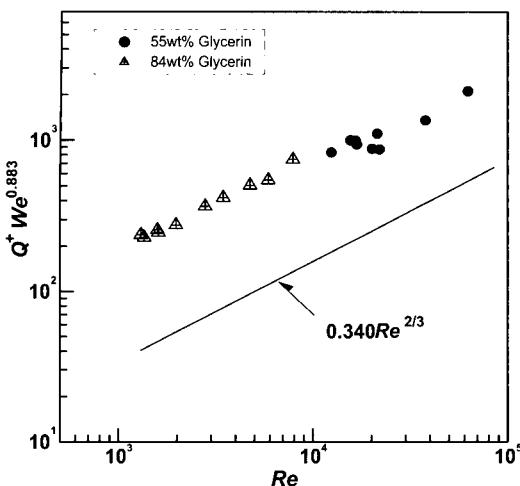


Fig. 11 Transition from ligament to film formation on viscous liquid

Fig. 10과 Fig. 11에는 55wt% 글리세린수용액과 84wt% 글리세린수용액을 공급액체로 하여 적상분열에서 액주상분열로, 액주상분열에서 막상분열로 천이할 때, Re 의 증가에 따른 무차원 천이유량 $Q^+ We^{1.15}$ 와 $Q^+ We^{0.883}$ 의 관계를 식 (5), (7)과 비교한 결과를 나타내었다. 그 결과로서, 적상분열에서 액주상분열로 천이하는 경우와 액주상분열에서 막상분열로 천이하는 경우를 고찰하였을 때, Re 가 증가함에 따라 무차원 천이유량도 증가하는 특성을 보이나, 점성이 낮은 55wt% 글리세린수용액이 점성이 높은 84wt% 글리세린수용액보다 더 높은 천이유량의 증가특성을 보인다. 이는 액체의 점성, 밀도 및 표면장력 등에 따른 물리적 성질이 다르기 때문에 분열특성에 의한 천이유량의 영향도 각각 다르다는 점을 알 수 있었다. 결과적으로 Matsumoto 등^{[6], [7]}이 제시한 경험식과 비교할 때, 천이유량의 산포는 크지만 대체로 비슷한 경향을 보여 실험의 적합성을 검증할 수 있었다.

3.2.2 액주수의 영향

회전원판의 원주 끝단에서 생기는 액체의 돌기 또는 액주상의 액주수 및 직경은 미립화특성과 밀접한 관계를 가지고 있다.

Kurihara와 Matsumoto 등^[8]은 액막 선단에 생기는 돌기에 가해지는 외력과, 액주를 형성하는

내부압력과 표면장력과의 평형을 고려했을 때, Reynolds 수와 Weber 수의 함수관계로 나타낸 액주수 K 를 구하는 식을 다음과 같이 적용하였다.

$$K = 0.574 Re^{1/3} We^{1/4} \quad (8)$$

Fig. 12와 Fig. 13에는 사진관찰에 의해 얻어진 액주수 K 를 식 (8)식에서 얻어진 계산값과 비교 및 검토하기 위하여 무차원 천이유량 $Q^+ We^{1.15} Re^{-0.95}$ 와 원심가속도 $R\omega^2$ 와의 관계를 나타내었다.

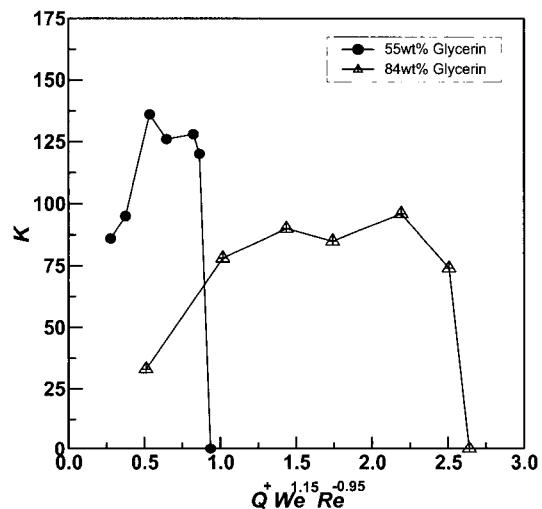


Fig. 12 Correlation between non-dimensional flow rate and ligament number(at N=700 rpm)

Fig. 12에서 84wt% 글리세린수용액인 경우에는, 유량을 증가시키면 액주수는 증가하고, 액주상분열의 천이영역에서 액주수는 감소하며, 더욱더 유량을 증가시키면 액주수는 잠시 증가하다가 액주와 액주끼리 합체되어 다시 감소하여 막상분열이 되면 0이 된다. 또한 55wt% 글리세린수용액인 경우에는, 유량을 증가시키면 액주수는 증가하다가 천이영역에서 급감소하면서 막상분열이 되면 0이 된다. 이런 결과는 점성에 따른 미립화 분열특성의 차이라고 생각할 수 있다.

Fig. 13에는 액주상분열에서 원판의 회전수를 증가시켰을 때, 원심가속도 $R\omega^2$ 에 따른 액주수의 관계를 나타내었다. 그 결과로서 경험식과 비슷한 경향을 보이며 산포는 다소 크게 나타나 보인다.

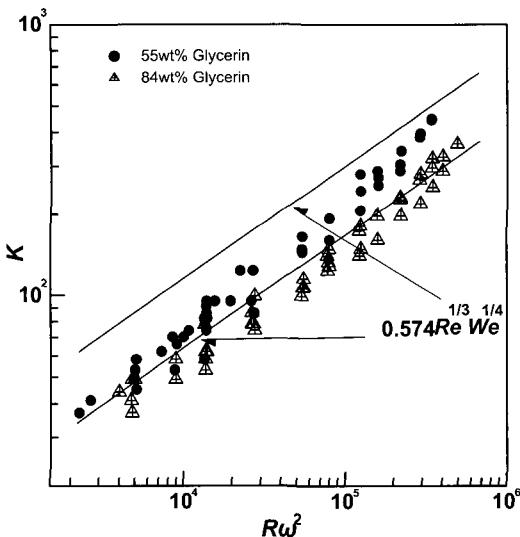


Fig. 13 Correlation between centrifugal acceleration and ligament number

Fig. 14는 각 운전조건에서 액주수를 식 (8)과 비교한 결과를 나타낸 그림으로서, 역시 액주수도 Re 가 증가됨으로써 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 액주길이는 반드시 회전수에 영향을 받지 않는다. 이것을 구체적으로 살펴보기 위하여 Fig. 15에서 공급유량 $7 \text{ cm}^3/\text{s}$ 에서 55wt% 글리세린수용액과 85wt% 글리세린수용액을 사용하여 원심가속도와 액주길이와의 관계를 나타내었다.

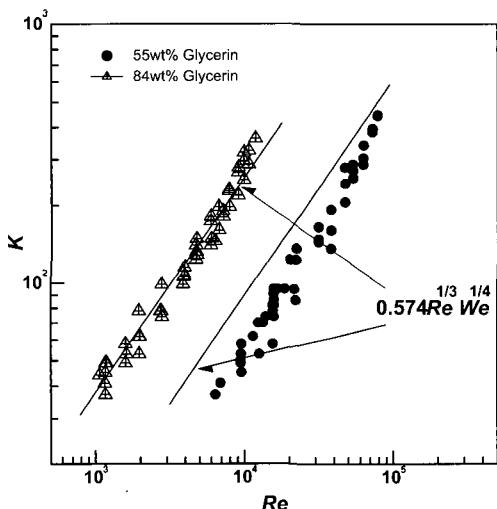


Fig. 14 Correlation between Reynolds number and ligament number

그 결과로서, 원심가속도가 증가할수록 지속영역에서는 액주길이가 길어지다가 중속영역에서는 변곡점이 생겨 다시 짧아지는데 그 경향은 점성이 낮거나 회전수가 높을 때에 더 짧아지는 특성을 보인다. 이는 점성에 따른 물리적인 영향이라 사료된다.

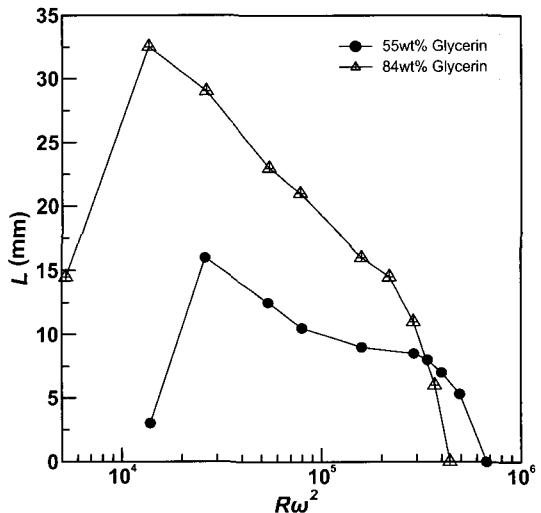


Fig. 15 Correlation between centrifugal acceleration and ligament length(at $Q = 7 \text{ cm}^3/\text{s}$)

4. 결 론

회전원판 분무기에 의한 액체미립화 특성에 관한 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 원판의 회전수가 증가할수록 액체의 원심력이 증가하여 미립화는 양호해진다. 그러나 일정한 회전수 이상이 되면 막상분열이 회전원판상에서 발생한다.

(2) 액체의 점성 및 유량의 변화에 따른 미립화 특성은 점성이 높은 액체일수록 분열거동은 뚜렷하게 나타나고, 한계유량의 범위는 더 좁아진다.

(3) 액주수는 유량, 원심가속도 및 레이놀즈 수의 증가에 따라 비교적 비례하는 특성을 보이나, 특히 점성이 높으면 유량의 증가에 따라 액주수는 증가하게 되지만 액주상분열의 천이영역에서는 다시 감소하다가 유량의 증가로 막상분열이 되어 액주수는 0이 된다.

(4) 액주길이는 원심가속도가 증가할수록 짧아

지고, 동일한 유량조건에서는 액체의 점성이 낮거나 회전수가 높을 때에 더 짧아지는 특성을 보인다.

참고문헌

- [1] 佐藤 豪, 福井 直靜, “液體の微粒化の基礎と應用”, 日本經營開發センタ-經營教育部, pp. 33 ~34, 1974.
- [2] N. Dombrowski and R. P. Fraser, "A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets", Phil. Trans., A, Vol. 247, pp. 101~130, 1954.
- [3] Y. Tanasawa, Y. Miyasaka and M. Umebara, "Effects of Shape of Rotating Disks and Cups on Liquid Atomization", ICLASS 78, pp. 165~172, 1978.
- [4] S. Matsumoto, D. W. Belcher and E. J. Crosby, "Rotary Atomizers : Performance Understanding and Prediction", Proc. 3rd ICLASS 85, Vol.1A, pp. 11~21, 1985.
- [5] Y. Tanasawa, Y. Miyasaka and M. Umebara, "On the Filamentation of Liquid by means of Rotating Discs", JSME, Vol. 25, No. 456, pp. 879~905, 1959.
- [6] 松本史朗, 前田太志, 高島洋一, “回轉圓板に指數法則モデル流體の微粒化現象の遷移條件”, 第4回液體微粒化に関する講演會講演論文, pp. 33~36, 1976.
- [7] 松本史朗, 川島弘史, 高島洋一, “回轉圓板による液體の微粒化現象の遷移條件(指數法則流體の場合)”, 第6回液體微粒化に関する講演會講演論文, pp. 21~24, 1978.
- [8] K. Kurihara, S. Matsumoto and Y. Takashima, "Effect on Wettability of Atomizer Characterization of Spinning", Proc. 13th ILASS-Japan, pp. 107~112, 1986.
- [9] S. D. Abrahamson, D. J. Koga and J. K. Eaton, "Flow Visualization and Spectral Measurements in a Simulated Rigid Disk Drive", IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 576~584, 1988.
- [10] 공대위, 주원구, “단일회전원판을 포함하는 밀폐된 내부 유동장 특성”, 대한기계학회춘계학술대회논문집 E, pp. 179~184, 2001.
- [11] R. Kobayashi, "Laminar-to-Turbulent Transition of Three-Dimensional Boundary Layers on Rotating Bodies", Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 494~498, 1994.

저자 소개

임종한(林宗漢)



1957년생, 1981년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업, 1985년 경희대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1992년 경희대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2007. 3~현재 경원대학교 기계·자동차공학과 부교수

윤준규(尹俊圭)



1957년생, 1981년 조선대학교 기계공학과 졸업, 1987년 경희대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2001년 명지대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2007. 3~현재 경원대학교 기계·자동차공학과 부교수