

遠心式 噴霧乾燥裝置의 作動條件에 따른 噴霧粒子의 粒度豫測 모델*

A Prediction Model of Droplet Size of Rotary Spray Dryer at Various Operating Conditions

노상하* * 김기복* * 이종환* * 이상조* * *
S. H. Noh K. B. Kim J. W. Lee S. J. Lee

Summary

In an effort to localize the spray-dryer which is markedly used for drying food materials, a experiment was carried out with a wheel type atomizer locally designed and manufactured to evaluate the effect of rotational speed, feed rate and physical properties of liquid food material on the droplet size, and to develop a model to predict the droplet size sprayed at various operational conditions. The result are summarized as follows.

1. The frequency of droplet size sprayed from the atomizer at every treatment were similar to normal distributions.
2. Under the test conditions adopted in this study, that is, rotational speed of the atomizer ranging from 15,000 to 20,000 rpm (55.0 m/sec - 73.3 m/sec), feed rate from 14 to 37 kg/hr and viscosity of the material from 1.14 to 350 cP, the mean volume-surface dia. of droplets was decreased as increase in rotational speed and was not affected significantly by the feed rate and viscosity.
3. Through the dimensional analysis, a prediction model was developed as follows :

$$\frac{D_{vs}}{r} = K \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^a \left[\frac{rN^2}{g} \right]^b \left[\frac{\rho^2 r^3 g}{\mu^2} \right]^c \left[\frac{L}{r} \right]^d$$

and it was proved that the above model was better in degree of fitness than other models reported.

4. A prediction equation for the droplet size sprayed from the atomizer under the test was expressed as follows :

$$\frac{D_{vs}}{r} = 0.0215 \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^{0.06} \left[\frac{rN^2}{g} \right]^{0.314} \left[\frac{\mu^2}{\rho^2 r^3 g} \right]^{0.0158}$$

* 본 연구는 산학협동재단과 (주)제우기계의 공동연구비지원에 의하여 이루어진 것임.
** 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과
*** (주)제우기계

1. 서론

噴霧乾燥法은 高溫의 氣流中에 액체를 微粒化하여 分散시키면 액체의 비표면적이 증가하여 수분의 증발이 순간적으로 이루어지므로 액체상태의 원료를 신속하고도 연속적으로 분립체 상태로 건조시키는 방법이다.

대부분 비뉴우튼(Non-Newtonian) 유체인 식품의 액체 원료로부터 균일한 건조 분말제품을 얻기 위해서는 분무입자의 크기가 균일해야 하기 때문에 아토마이저(atomizer)의 역할은 대단히 중요하다.

아토마이저 및 분무건조장치의 설계와 제작은 매우 높은 기술 수준을 요구한다. 그러나 현재 국내의 분무건조기의 제작기술은 매우 未治한 단계이며, 거의 대부분의 분무건조장치가 외국으로부터 수입되고 있는 실정이다. 특히 핵심 부분이라 할 수 있는 아토마이저는 設計와 加工技術의 면에서 아주 높은 기술 수준이 요구되므로 全量 수입되고 있는 실정이다.

아토마이저의 성능은 디스크의 형상, 반경등과 같은 設計因子와 원료의 종류 및 물성, 디스크의 회전속도 등과 같은 作動因子와 관계되며 이미 선진국의 많은 학자들은 이들 인자가 미립자의 크기, 입도분포 및 분무상태 등에 미치는 영향을 구명하였다. 그런데, 디스크의 설계 및 작동인자에 따른 분무입자의 입도예측모델이 몇가지 제시되고 있으나 연구자에 따라 상당한 차이가 있다. 따라서 현재 국내에서 개발된 원심식 아토마이저에 이들 모델들을 적용하는 데에는 다소 무리가 있을 것으로 사료된다.

분무입자의 粒度 및 그 分布를 예측하는 것은 噴霧乾燥工程에서 투입되는 원액, 열풍량, 열풍 온도 뿐만아니라 적절한 건조실의 크기를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 또한 건조현상 및 건조시간의 예측이 용이하게 되어 전체적인 건조공정의 시뮬레이션에 필요한 기초자료가 된다. 또한 아토마이저로부터 분무되는 입자의 입도 및 입도분포 특성은 아토마이저의 성능을 평가하는 좋은 자료가 될 수 있다.

따라서 본 研究는 국내에서 시작기로 개발된

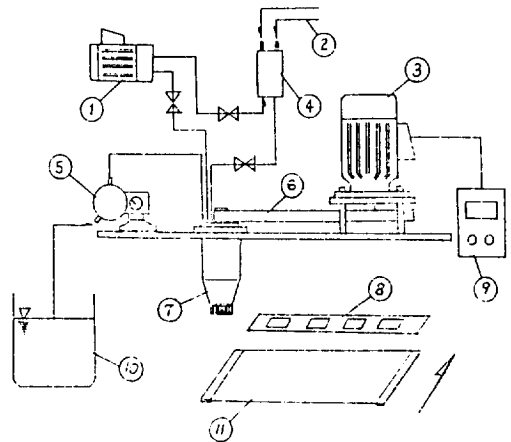
遠心式 噴霧乾燥裝置에서

1. 아토마이저의 회전 속도, 원액의 공급률과 원액의 물성등에 따른 분무 입자의 입도 분포 특성을 실험적으로 관찰하고,
2. 최종적으로 분무 입자의 입도를 예측할 수 있는 실험적 모델을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료 및 장치

실험장치는 크게 원심식 아토마이저(vaned wheel type), 아토마이저 구동장치, 냉각장치, 원액공급장치로 이루어져 있으며, 분무되는 순간의 입자를 채취하기 위하여 입자채취용 시편을 준비하였다. 그림 1은 실험장치를 나타낸다.



- 1) oil circulation pump
- 2) cooling hoses
- 3) atomizer driving motor
- 4) oil tank
- 5) feed pump
- 6) driving belt (flat-belt)
- 7) atomizer
- 8) droplet sampling slide glass
- 9) velocity control inverter
- 10) fluid tank
- 11) shutter

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

아토마이저의 처리용량은 시간당 10kg-35kg이며, 디스크 직경은 70mm이고 베인(vane, φ9mm×8mm)의 갯수는 16개이다. 아토마이저는 전동기와 펄벳트를 이용하여 구동되며, 아토마이저의 회전속도는 속도 조절용 인버터(inverter)를 이용하여 조절하였다. 고속회전으로 인한 아토마이저 축과 베어링 연결부분의 과열을 방지하기 위하여 아토마이저축의 상·하부 베어링에 냉각용 오일을 순환시키는 오일 펌프를 장착하였으며 순환되어 나오는 오일은 냉각수를 이용하여 냉각시켰다. 일정량의 원액을 공급하기 위한 원액 공급장치로서는 용적식 펌프(10ℓhr-66 ℓ/hr, (주)천세)를 이용하였다.

한편, 아토마이저로부터 분무되는 미세 입자

를 채취하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 아토마이저의 디스크 반경방향으로 입자 채취용 시편을 설치하였다. 이때 분무입자의 흡착성을 높이기 위하여 시편의 표면을 마그네슘 미립자로 코팅하였으며, 중복 채취되지 않도록 셔터(shutter)를 설치하였다.

나. 공시재료

材料는 噴霧乾燥에 많이 이용되는 전지분유와 커피를 이용하였고, 비교실험을 위하여 물을 이용하였다. 전지분유는 실제 분무건조에 이용되는 고형분농도가 되도록 물과 혼합하였으며 커피는 분무건조에 많이 사용되는 농축액이다. 표 1은 공시재료의 각종 물성값을 나타낸다.

Table 1. Physical property of materials.

Material	Density	Viscosity	Solid content	Temp.
Coffee	1228.9 kg/m ³	350 cP	35 %	16 °C
Whole-Milk	1198.9 kg/m ³	120 cP	45 %	32 °C
Water	999.1 kg/m ³	1.14 cP	0 %	15 °C

다. 실험방법

이 연구에서는 제한된 실험여건을 고려하여 분무원액의 종류 및 공급속도, 아토마이저의 회전속도가 분무입자의 입도에 미치는 영향 등을 분석하기 위하여 실험수준을 표 2에서와 같이

설정하였다.

아토마이저에서 분무되는 입자의 입도분석을 위한 시료는 아토마이저가 일정한 회전수에서 정상상태에 도달한 다음 닫혀 있던 셔터를 열어 약 1~2 초간 채취하였다.

Table 2. Experimental design

Material	Feed Rate (kg/hr)	Rotational speed of atomizer	repeat
Coffee	17.5, 26.7, 37.0	15000, 18000, 20000 (rpm)	2
Whole-milk	17.5, 26.7, 36.1	"	2
Water	14.2, 21.7, 30.1	"	1

라. 입도측정

분무입자의 직경은 광학현미경(80배 또는 100배)을 이용하여 육안측정하였다. 이때 1개의 시편에서 약 60~100 개의 입자를 측정하였으며 중복 측정되지 않도록 임의적으로 입자를 선택하였다. 각 실험조건에서 반경방향으로 설치된 4개의 슬라이드글라스로 부터 약 250~400개의 입자의 직경을 측정하여 입도 분석에 사용하였다.

3. 분무입자의 입도예측 모델

가. 입도 정의

크기와 형상이 다른 입자의 크기를 나타내는 방법이 여러가지가 있지만 吸着法을 이용하여 포집된 분무입자의 입도를 나타내기 위하여 이 研究에서는 분무입자를 球라고 가정하고 다음식과 같이 정의되는 부피-표면적 입도를 입도에

측 모델 개발에 이용하였다.

$$Dvs = \frac{Di^3 f_n(Di) \Delta D}{Di^2 f_n(Di) \Delta D} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,

Dvs = Volume - surface mean dia. or Sauter mean dia.

f_n (Di) = Frequency of every given size class

ΔD = Size class increment

나. 차원해석을 이용한 입도예측모델

1) 기존의 예측모델

Friedman & Mashall은 분무입자의 평균입도 (Dvs)에 영향을 미치는 요인으로 디스크의 반경 (r), 원액의 공급률 (Q), 원판의 회전속도(N), 원액의 점도(μ), 밀도(ρ), 표면장력(σ), 그리고 디스크의 젖은 길이(L)을 고려하였다. 즉, 그들은 차원해석을 통하여 다음과 같은 모델을 유도하였으며, 원액의 공급률을 M_p×L로 대체한

$$\frac{Dvs}{r} = K \left[\frac{Q}{r\mu} \right]^a \left[\frac{Q}{\rho N r^3} \right]^b \left[\frac{Q^2}{\rho \sigma r^3} \right]^c \left[\frac{L}{r} \right]^d \dots(2)$$

다음 최종적으로 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$\frac{Dvs}{r} = 0.4 \left[\frac{\mu}{M_p} \right]^{0.2} \left[\frac{M_p}{\sigma N r^2} \right]^{0.6} \left[\frac{\sigma L}{M_p^2} \right]^{0.1} \dots(3)$$

그러나, 위 모델은 원료의 미립화에 큰 영향을 미치는 공급률을 反復變數로 사용하였기 때문에 각 무차원항의 물리적 의미가 분명하지 않을 뿐만 아니라 각각의 무차원항이 분무입자의 입도에 미치는 영향을 분석하기 어려운 점이 있는 것으로 判斷된다.

한편, Master & Moiler는 여러 예측 모델을 정리하여 다음과 같은 3개의 입도 예측방정식을 提示하였다.

$$Dvs = 14 \times 10^4 (N)^{-0.6} (\rho)^{-0.5} \left[\frac{\mu Q}{d} \right]^{0.2} \left[\frac{\rho}{nh} \right]^{0.1} \dots\dots\dots(4)$$

$$Dvs = 1.14 r \times 10^5 \left[\frac{M_p}{\rho N r^2} \right]^{0.2} \left[\frac{\mu}{M_p} \right]^{0.2} \left[\frac{\sigma \rho n h}{M_p^2} \right]^{0.1} \dots\dots\dots(5)$$

$$Dvs = \frac{1.4 \times 10^4 (Q)^{0.24}}{(Nd)^{0.83} (nh)^{0.12}} \dots\dots\dots(6)$$

여기서,

d = Atomizer wheel diameter(m)

h = Atomizer wheel vane height(m)

N = Atomizer wheel speed(r.p.m)

M_p = Vane liquid loading(kg/hr · m)

n = No. of vanes

Master & Moiler는 이들 3가지 예측식을 이용하여 아토마이저의 여러가지 설계 및 작동조건하에서 분무입자의 입도를 예측하고 그 결과를 실측값과 비교하였는데, 예측식 (4)와 (5)는 실측값에서 크게 벗어나며 예측식 (6)은 공급률이 낮은 水準에서는 큰 차이가 없으나 공급률이 증가함에 따라 많은 차이가 남을 볼 수 있었다. 그러므로 분무입자의 입도를 가장 정확하게 예측할 수 있는 수정된 모델을 구성할 필요가 있다고 판단된다.

2) 새로운 예측모델의 개발

Friedman & Marshall에 의해 提案된 예측식 (3)과 Master & Moiler에 의해 제안된 예측식 (4)와 (5)는 표면장력을 要因으로 포함하고 있으나 많은 연구 결과에 의하면 표면장력의 영향은 거의 微微한 것으로 보고 되고 있다. 그러므로 이 연구에서는 표면장력대신 분무입자의 운동에 영향을 미치는 重力加速度(g)가 중요하다고 보고 분무입자의 평균직경이 식 (7)과 같이 표현된다고 假定하였다.

$$Dvs = f(Q, N, \mu, \rho, r, g, L) \dots\dots\dots(7)$$

반복변수로 원액의 物性を 대표하는 점도, 디스크의 형상 및 크기를 나타내는 디스크의 반지름, 분무입자의 運動을 표시하기 위한 重力加速度를 선택한 다음 Buckingham의 定理를 이용하여 다음과 같은 분무입자의 입도예측 모델을 얻었다.

$$\frac{Dvs}{r} = K \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^a \left[\frac{r N^2}{g} \right]^b \left[\frac{\rho^2 r^3 g}{\mu^2} \right]^c \left[\frac{L}{r} \right]^d \dots\dots\dots(8)$$

이 연구에서 제시한 모델의 妥當性を 檢討하기 위하여 표면장력을 要因으로 포함하는 Frie-

dman & Mashall의 모델식(2)와 비교분석하였다. 표 3은 Friedman & Mashall이 제시한 실험 데이터를 이용하여 구한 두 모델식에 포함된 무차원항의 係數와 決定係數를 나타낸다. 모델식 (8)이 모델식 (2) 보다 決定係數값이 높음을 알 수 있다.

또한 각각의 디스크에 따른 모델식(2)와 (8)의 有效性을 比較하기 위하여 디스크의 형상과 관계되는 (L/r)項을 상수로 하고 Friedman &

Marshall의 실험 데이터를 적용시켰다. 그 결과, 표 4에서 알 수 있는 바와 같이, 주어진 디스크에서 사용된 원액의 종류가 한 가지일 경우 모델식 (2)의 세번째 무차원항이 다른 무차원항들과 獨立的이지 못한 것으로 判明되었다. 이상의 分析結果를 비추어 볼 때 이 연구에서 제시한 모델이 Friedman & Marshall이 제시한 모델보다 유효한 것으로 判斷된다.

Table 3. Coefficients of involved in Models (2) and (8), and degree of fitness

MODEL	K	a	b	c	d	R-square
(2)	0.1151	-0.1321	0.5583	-0.2538	-0.1152	0.7759
(8)	0.3140	0.3247	-0.2976	-0.2766	0.0277	0.8487

Table 4. Coefficients involved in modified Models (2) and (8), and degree of fitness with three different types of disk

Disk type*	Model	K'	a	b	c	R ²	Material *
Disk4	(2)	166.0	-0.923	0.792	N.I	0.960	D
	(8)	0.058	-0.131	-0.396	-	0.961	D
Disk6	(2)	31.2	-0.706	0.740	N.I	0.949	D
	(8)	0.023	-0.034	-0.369	-	0.949	D
Disk10	(2)	0.682	-0.166	0.405	-0.048	0.896	D,B,C
	(8)	0.002	-0.191	0.238	-0.179	0.911	D,B,C

*) refer to reference³⁾.

note) N.I stands for not-independent.

4. 결과 및 고찰

가. 입도 및 입도분포 특성

그림 2에서 보는 바와같이 주어진 시편내에서의 입도는 대체적으로 正規分布를 보였으며, 입자의 형태는 대부분 구형이었다.

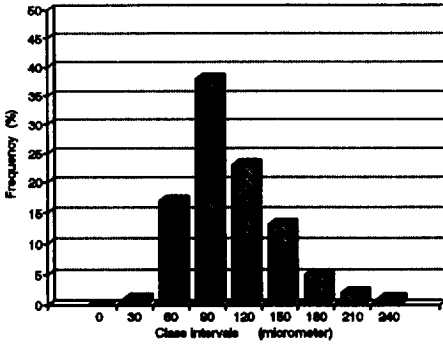
원액 공급률을 증가시키면서 분무입자의 부피 표면적 粒徑을 分析한 결과 일정한 경향은 보이지 않았으며, 공급률이 증가할수록 입도가 증가할 것이라는 예상과 상이하였다. 그러나 물의 경

우는 대체적으로 공급률이 증가함에 따라 입자 크기가 증가함을 볼 수 있었다.

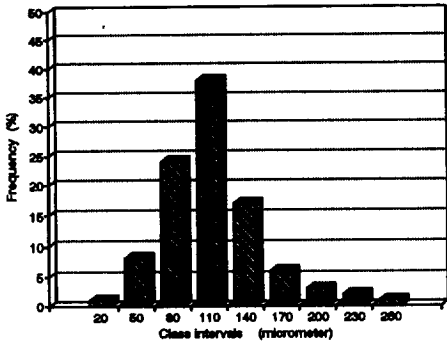
회전 속도가 증가함에 따라 대체적으로 입도 분포에 대한 표준편차는 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 보다 균일한 입도를 얻기 위해서는 원액의 공급률을 감소시키는 것 보다 원판의 회전속도를 증가시키는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

원액의 점도와 입도간에는 相關關係가 없는 것으로 나타났다. 점도와 공급률이 입도에 미치는 영향이 일정한 경향을 보이지 않는 것은, 이

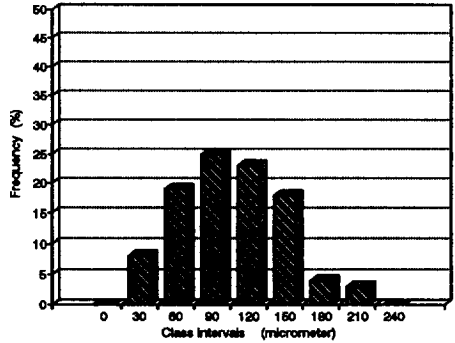
연구에서 채택된 아토마이저의 회전속도의 실험 수준 및 범위가 원액의 공급률 및 점도의 그것에 비해 분무입자의 입도에 미치는 영향이 상대적으로 지배적이었기 때문인 것으로 사료된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Histogram of percentage size frequency.

- (a) Whole-milk at feed rate = 26 kg/hr, rpm = 15,000
- (b) Coffee at feed rate = 376 kg/hr, rpm = 18,000
- (c) Water at feed rate = 14.2 kg/hr, rpm = 15,000

나. 분무입자의 입도예측 모델

1) 개발된 입도예측식

次元解析을 통하여 유도된 입도예측 모델식 (8)은 이 연구의 실험에 사용된 디스크가 1개이므로 무차원항 (L/r)을 무시하면 다음과 같은 모델식(8a)으로 표시된다.

$$\frac{D_{vs}}{r} = K \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^a \left[\frac{rN^2}{g} \right]^b \left[\frac{\rho^2 r^3 g}{\mu^2} \right]^c \dots\dots(8a)$$

Table 5. Estimation of parameters in Model (8a) and degree of fitness.

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for HO : Parameter = 0	Prob > T
INTERCEPT	1	-1.66841	0.283349	-5.888	0.0001
π_2 - term	1	0.06005	0.073581	0.816	0.4228
π_3 - term	1	-0.33137	0.095117	-3.484	0.0020
π_4 - term	1	-0.01584	0.037098	-0.427	0.6733

이 모델식에서 실험상수 K', a, b, c 를 결정하기 위하여, 통계 패키지인 PC-SAS를 이용하여 실험에서 얻은 데이터에 대한 로그 變換 회귀식을 구하였다. 그리고 다음과 같은 입도 豫測式을 얻었다.

$$\frac{Dvs}{r} = 0.0215 \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^{0.06} \left[\frac{g}{rN^2} \right]^{0.3314} \left[\frac{\mu^2}{\rho^2 r^3 g} \right]^{0.0158} \dots\dots\dots(9)$$

그림 3은 이 실험에서 얻은 분무입자의 실측치와 개발된 입자 예측식(9)에서 예측한 예측값을 비교한 것으로, 예측치가 실측치와 차이를 보이는 원인은 이미 기술하였듯이 제한된 실험수준의 설정, 육안에 의한 입도측정상의 오차 등에 기인하는 것으로 사료된다.

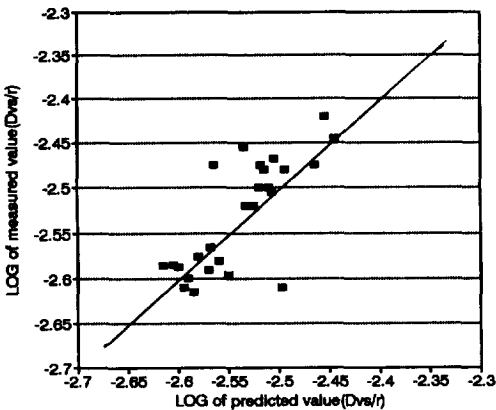


Fig. 3. General correlation of droplet size.

2) 기존 모델과의 比較

개발된 모델식의 유효성을 검토하기 위하여, 표면장력이 포함되어 있지 않으며 기존의 다른 예측식에 비해 입도예측이 양호한 것으로 분석된 Master & Moiler의 모델식(6)과 비교하였다.

예측식(10)은 Master & Moiler의 모델식(6)에서 (nh)항을 상수로 간주하고 이 연구의 측정 데이터를 이용하여 PC-SAS에 의해 3개의 실험상수 K, a, b를 다시 구한 식이다.

$$Dvs = \frac{9.272 \times 10^4 (Q)^{-0.0071}}{(Nd)^{0.6628} (nh)^{0.12}} \dots\dots\dots(10)$$

표 6에서 보는 바와 같이 개발된 예측식(9)의 殘差 값이 예측식(10) 보다 낮은 것으로 나타났다. 따라서, 이 연구에서 제시된 분무입자의 입도예측 모델이 보다 유용한 것으로 판단된다.

Table 6. Comparison of prediction Eqn. (9) and (10)

(unit : μm)

Material	Measured	Equation(9)	Equation(10)
Coffee	105.02	103.17	112.89
	86.41	91.43	100.04
	91.05	85.27	93.30
	111.25	105.82	112.55
	89.97	93.78	99.74
	91.40	87.19	92.80
	110.53	107.92	112.29
	117.14	95.63	89.51
Whole-milk	85.81	89.19	92.80
	117.13	106.25	112.29
	95.93	94.16	100.06
	91.08	87.81	93.32
	108.89	109.00	112.57
	91.16	96.59	99.76
	88.19	90.08	93.03
	85.96	111.17	112.31
Water	88.29	98.51	99.52
	92.76	91.88	92.82
	117.62	120.66	113.05
	114.72	106.93	100.18
	71.20	99.73	93.43
	135.02	123.76	112.71
	119.50	109.67	99.88
	112.23	102.28	93.15
Residual	124.17	126.22	112.71
	115.11	111.85	99.65
	105.02	104.31	92.94
		3028.31	4662.83

5. 요약 및 결론

食品 乾燥에 많이 이용되는 噴霧乾燥裝置를 國産化하기 위한 노력의 일환으로, 시작기로 개발된 원심식 아토마이저를 이용하여 원액의 공급률, 아토마이저의 회전수 및 원액의 물성이 분무입자의 粒度에 미치는 영향을 조사하고, 이들 作動條件에 따른 분무입자의 粒度 豫測式을 제시하고자 本研究를 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 實驗條件에 따른 噴霧粒子의 平均 粒徑 分布는 대체로 正規分布에 近似하는 分布를 보였다.
2. 本研究에서 채택된 실험조건 즉, 디스크의 회전속도, 15000~20000 rpm, 원액의 공급률, 14~37 kg/hr, 원액의 점도, 1.14~350 cP의 범위에서 분무입자의 평균입도는 회전속도가 증가함에 따라 감소하였으며, 공급률 및 점도에는 뚜렷한 영향을 받지않았다.
3. 次元解析을 통하여 다음과 같은 粒度豫測 모델을 開發하였으며,

$$\frac{D_{vs}}{r} = K \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^a \left[\frac{rN^2}{g} \right]^b \left[\frac{\rho^2 r^3 g}{\mu^2} \right]^c \left[\frac{L}{r} \right]^d$$

既存의 여러 예측 모델과 比較檢討한 결과 상기 모델이 기존 모델보다 豫測性이 優秀한 것으로 分析되었다.

4. 本研究에서 시작기로 개발된 아토마이저의 분무입자의 粒度豫測式은 다음과 같이 나타났다($R^2=0.49$).

$$\frac{D_{vs}}{r} = 0.0215 \left[\frac{Q}{\mu r} \right]^{0.06} \left[\frac{rN^2}{g} \right]^{0.3314} \left[\frac{\mu^2}{\rho^2 r^3 g} \right]^{0.0158}$$

6. 참고문헌

1. 신호일. 1981. 건조장치, 대광서림.

2. Adler, C.R. and W.R. Marshall. 1951. Chem. Eng. Progress, 47, No. 10, 515. A.I.Ch.E. U.S. A.

3. Croowe, C.T. 1986. Modeling spray-air contact in spray drying system. advanced drying. Vol.3 pp64-99. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

4. Friedman, S.J., F.A. Gluckert and W.R. Marshall. 1953. Centrifugal disk atomization, Chem. Eng. Prog. Vol.48. No.4.

5. Judson, C.K.T., G. Kieckbusch and C.G. Greenwald. 1985. Food quality factors in spray drying. Advanced drying Vol.2 pp71-120. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

6. Langhar, H.I. 1951. Dimensional analysis and theory of models, John Wiley & Sons, Inc., New York.

7. Master, K. 1979. Spray drying handbook, John Wiley & Sons, New York.

8. Master, K. and A. Moiler. 1978. Particle size from industrial spray dryers with rotary atomizers: prediction and effect of operating variables. ICLAS '78 pp157-63, Journal of Fuel society of Japan.

9. Snoeren, T.H.M., A.J. Damman, H.J. Klok and D.J.J.M. Van Mil. 1984. Effect of droplet size and the properties of spray-dried whole milk, drying 1984, pp215-220, NIZO, Netherlands.

10. Zhan Zeng-yan. 1985. The experimental study of technical parameters in centrifugal spray drying. Drying 1985, pp291-296 Hemisphere Publishing Corporation, New York.

11. 大川原正男. 1987. 食品の噴霧乾燥, 食品工業 Vol.30.No.4. pp1-6, Japan.