

회전형 Atomizers 분무건조기에 대한 Masters' Model을 적용한 모의 실험

김영호 · 이승주
동국대학교 식품공학과

Simulation for Spray Drying with Rotary Atomizers using Masters' Model

Young Ho Kim and Seung Ju Lee

Department of Food Science and Technology, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

Abstract

To analyze the complex behaviour of fluid/air flows during spray drying, Masters' model was adopted as a suitable mathematical means, and numerically solved to simulate the effect of two different types of rotary atomizers - vane type and kestner type. The simulation program was built on GUI(graphic user interface) basis in MS visual basic 6.0 language. Modeling of spray drying process was completed in terms of heat transfer, heat energy balance, mass transfer, and flow of drop. As a consequence of the simulation, the initial drop sizes of vane type were much smaller than those of kestner type at the same condition of the other process variables. The wheel or disc rpm and diameter, and feed rate for both types of rotary atomizers were determined as the most dominant variables to change the spray drying conditions as a whole.

Key words: spray drying, simulation, vane type atomizer, kestner type atomizer, Masters' model

서 론

분무건조는 순간적으로 다량의 수분을 제거할 수 있고 건조 중 피건조물의 온도가 비교적 낮게 유지되는 장점으로 인하여 생산 효율 및 품질 열화의 최소화 면에서 매우 효과적인 건조방법으로 인식되고 있다(남궁식 등, 1976). 그러나 분무건조 장치의 설계, 피건조물에 적합한 운전 조건의 최적화 등이 매우 복잡하여 실제 장치의 제작 및 운영에 있어서 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다(Mujumdar, 1995).

이러한 어려움을 해결하기 위하여 건조실 내의 복잡한 현상을 수학적으로 모델링하여 시뮬레이션(simulation)하는 여러 시도가 있었다. 초기에 발표되었던 연구 결과에서는 모델링에서 공기의 흐름을

플러그흐름(plug flow), 완전혼합흐름(mixed flow)으로 가정하거나 또는 이미 실험적으로 밝혀진 유속 분포를 사용하였다(Dickinson과 Marshall, 1968; Parti와 Palancz, 1974). 하지만 이러한 연구들은 건조실 내 공기의 흐름이 단지 플러그흐름이고, 액적이 순수한 액체로만 구성되며, 액적의 낙하방향을 축과 평행하다는 등을 가정하여 회전식 분무기(rotary atomizer)의 공기와 액적의 흐름 면에서 실제 현상과 다소 괴리된 점을 내포하였다. 또한 건조실 내 공기의 흐름을 실험결과를 토대로 여러 수식으로 나타낸 후, 액적의 삼차원적 거동을 풀이한 모델링(Katta와 Gauvin, 1975)도 있었으나 건조실 내의 유체흐름은 공기의 투입속도, 공기 공급기의 상태, 공기의 유속, 공급액의 물성, 공급액의 투입속도 등의 조건에 따라 매우 다양하게 변화하므로 실용성이 있는 모델은 아니다.

그 후 최근에 와서는 계산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)의 발달에 의해 복잡한 기하학적 구조물 내에서의 유체흐름의 계산이 가능하게

Corresponding author: Seung Ju Lee, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, 3Ga 26, Pildong, Junggu, Seoul 100-715, Korea
Phone: +82-2-2260-3372, Fax: +82-2-2260-3372
E-mail: Lseungju@dongguk.edu

되었는데 이를 적용하여 분무건조공정을 분석한 바 있다(김상수, 2000). 계산유체역학을 수치해석할 수 있는 상용프로그램들은 그 가격이 매우 비싸고, 본래 순수 유체역학에 사용되고자 개발된 프로그램이므로 분무건조에 적용하는데 있어서 가격 및 성능 대비 면에서 발생 편차의 수준이 만족스럽지 않다는 평이 있다(삼영화학기계(주), 1999).

결과적으로 산업적인 적용을 위해서는 분무건조 공정 해석프로그램 성능의 극대화를 지향하기보다는 가격 및 운영환경, 프로그램 확보의 가능성 등에 있어서 실용화가 관건인 듯하다. 따라서 본 연구에서는 프로그램 성능은 최고보다는 인정될 수 있는 한도에서 경제성과 사용자의 편리함을 주요 관점으로 하여 분무건조 해석프로그램을 개발하였다. 모델링은 Masters(1991)가 보고한 분무건조 알고리즘과 함께 공기의 소용돌이(swirl) 현상과 회전식 분무기의 대표적인 vane type과 kestner type의 모델식을 각각 적용하여 완성하였다. 시뮬레이션 결과로서 회전식 분무기 종류에 따른 성능을 비교 분석하였다.

분무건조의 모델링

모델링의 전 과정을 요약하면 먼저 분무기 형태에 따른 액적의 분사 및 크기를 모델링하고, 분사된 액적이 건조기에 공급되는 열풍과 함께 건조실에서 유동하는 현상을 모델링하였다. 유동에 따라 액적의 위치 분석이 가능할 뿐만 아니라 액적과 열풍과의 열 및 물질 전달이 영향을 받아 건조속도가 결정된다. 따라서 역시 액적과 열풍과의 물질 및 에너지 수지 관계를 모델링하였다. 종합적으로 모델링을 조합하였고 관련된 여러 액적 및 열풍의 물성치는 실제 실험값이 아닌 이미 알려진 계산식으로 사용하였다. 상기의 구체적인 과정은 다음과 같다.

분무기에 따른 액적의 크기 및 분사속도

Vane type

분사되면서 초기에 액적의 수평방향(radial)속도 V_1 과 회전방향(tangential)속도 V_2 와 그 합 vector인 액적의 유속 V_m 은 다음과 같이 계산된다.

$$V_1 = 0.0024 \{ \rho \times 3.14^2 \times E^2 \times D \times (f/\rho \times 3600)^2 / M \times (H \times N)^2 \}^{1/3} \quad (1)$$

$$V_2 = 3.14 \times D \times E / 60 \quad (2)$$

$$V_{ro} = (V_1^2 + V_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

분사직후 초기 액적의 직경 D_{po} 는 다음과 같다. 이 경우 분무기 회전수와 공급액 투입속도의 정도에 따라 120~160%의 safety factor κ 를 고려하기도 한다(Masters, 1991).

$$D_{po} = 0.014(3600 \times f)^{0.24} / \{ (E \times D)^{0.83} \times (N \times H)^{0.12} \} \quad (4)$$

Kestner type

Vane type과는 달리 kestner type은 bowl 형태를 이루고 있으므로(삼영화학기계(주), 2000) 미립화되는 순간 회전방향의 유동은 수평방향과 비교할 때 상대적으로 작다고 가정하여 그 항을 무시하였다 ($V_2=0 \rightarrow V_m=V_1$).

$$V_{ro} = 0.0024 \times \{ \rho \times 3.14^3 \times E^2 \times D \times (f/\rho \times 3600)^2 / (M \times L^2) \}^{1/3} \quad (5)$$

액적의 초기직경 D_{po} 는 다음과 같다.

$$D_{po} = 0.014 (3600 \times f)^{0.24} / \{ (E \times D)^{0.83} \times L^{0.12} \} \quad (6)$$

액적의 유동과 stock의 법칙

공급액이 미립화되어 액적으로 투입되면 건조실 내에서 수평운동, 수직운동, 회전운동을 동시에 하며 움직인다. 공급되는 열풍은 건조실 내 회전운동과 수직운동을 하며 소용돌이친다(swirl).

열풍의 유동

열풍의 수직방향속도 V_{za} 와 회전방향속도 V_{ta} 는 다음 식에 의하여 구해진다.

$$V_{za} = G/S_f / (3.14 \times C_R \times C_R^{1/2}) \times (E_f / (G/S_f \times 60)) \quad (7)$$

$$V_{ta} = V_{aw} \times (R_d/C_R)^{1/2} \quad (8)$$

액적의 유동

액적의 유동은 열풍에 의하여 drag되는데 여기에 추가적으로 수평운동에는 회전에 의한 원심력, 수직운동에는 중력이 작용하여 식의 개념에는 stock 법칙이 적용된다.

$$(dV_r/d\theta) = -V_r \times V_r/R_d + 0.75(C_D/D_{po})(\rho_a/\rho_p) |V|(V_{ta}-V_r) \quad (9)$$

$$(dV_r/d\theta) = [(V_r/R_d)^2 \times (1 - (\rho_a \times V_{ta}^2 / \rho_p \times V_r^2))] - 0.75(C_D/D_{po})(\rho_a/\rho_p) |V|V_r \quad (10)$$

$$(dV_z/d\theta) = -0.75(C_D/D_{po})(\rho_a/\rho_p) |V|(V_{za}-V_z) + g(\rho_p - \rho_a)/\rho_p \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)의 수평방향, 수직방향, 회전방향 유속의 합 vector가 액적의 유동 vector가 된다. 그러나 다음 부분에서 다루게 될 물질 및 열 전달의 전달계수들은 액적의 유동 vector가 아닌 slip 유속 V이므로 다음 식 (12)에서와 같이 각 방향 성분에 대하여 열풍과 액적의 상대 유속인 slip 속도로 대치하여 계산한다.

$$V = \{V_r^2 + (V_z - V_{za})^2 + (V_t - V_{ta})^2\}^{0.5} \quad (12)$$

분무건조기 내에서 액적의 수평방향운동은 결국 건조기 벽에 도달하며 수직방향운동은 건조기 바닥에 도달한다. 따라서 유속으로부터 액적의 수평방향위치 R_d와 수직방향위치 Z_d를 아는 것이 중요하다. 속도로부터 위치를 산출하는 해법으로 식 (13)과 (14)와 같이 numerical 방법을 적용할 수 있다.

$$\Delta(R_{d,n}) = 0.5\{(V_r)_{n-1} + (V_r)_n\} \Delta\theta_n \quad (13)$$

$$\Delta(Z_{d,n}) = 0.5\{(V_z)_{n-1} + (V_z)_n\} \Delta\theta_n \quad (14)$$

한편, 식 (9), (10), (11)에서 drag 상수 C_D는 액적의 slip 유속 V에 따른 열풍의 저항으로 결정되는데 Table 1과 식 (15)를 함께 사용하여 계산하였다.

$$C_D = A/(N_{RE})^n \quad (15)$$

물질 및 열 전달

액적의 온도 T_a와 평균수분함량 X의 변화율은 다

음과 같이 물질 및 열 전달의 개념이 포함된 식 (13)과 (14)로 풀이된다.

$$(dX/d\theta) = -\pi(D_p)^2/4 \times K_Y(Y_s - Y)/M_d \quad (16)$$

$$(dT/d\theta) = \pi D_p^2/4 \times \{h(t-T) - K_Y(Y_s - Y)\lambda_d\}/(M_d C_p) \quad (17)$$

여기서 [M_d = πρ_{po}(D_{po})³/6/(1 + X_o)]이다. C_p의 계산은 액적의 고형분 비열을 대략 1.42 kJ/kg K, 수분의 비열을 4.18 kJ/kg K로 가정하여 단순화시킨 식인 [C_p = 1.42 + 4.18X]를 사용하였다.

또한 식 (16), (17)을 풀기 위해서는 열전달계수 h와 물질전달계수 KY를 알아야 한다. 다음 식 (18), (19), (20)은 무차원수인 N_{RE}, Nu, Sh, Pr 과 Sc의 측면에서 그 값을 구하기 위해 사용될 수 있다. N_{RE}, Nu, Sh, Sc, Pr를 구하는데 쓰인 공기의 물성은 (t+T)/2에서 구한다.

$$N_{RE} = D_p \rho_a V / \mu \quad (18)$$

$$Nu = hD_p/k_f = 2.0 + 0.6(N_{RE})^{0.5}(Pr)^{1/3} \quad (19)$$

$$Sh = k_y(v_n)(P_a)_{lm} D_p/D_w P = 2.0 + 0.6(N_{RE})^{0.5}(Sc)^{1/3} \quad (20)$$

$$Sc = \mu/(\rho_a D_w) \quad (21)$$

여기서 본 연구에서는 계산을 단순화시키기 위하여 (P_a)_{lm}을 1.0로 가정하였다. 그러나 분무건조조건에서 (P_a)_{lm}의 상온 조건인 1.0이라는 가정은 오차를 발생시킬 수 있을 것이다.

물질 및 에너지 수지

상기의 물질 및 열 전달에서와 같이 액적은 열풍과 접촉하면서 수분과 에너지를 교환한다.

$$G(Y - Y_o) = F(X_o - X) \quad (22)$$

$$(C_{pa} + Y C_{pw})t + (2500.6)Y + (F/G)C_p T = (C_{pa} + Y_o C_{pw})t_o + (2500.6)Y_o + (F/G)C_{po} T_o \quad (23)$$

본 연구에서는 식 (22)와 (23)을 적용하였는데 사실은 그 바탕에는 액적과 열풍의 흐름이 평행되는 plug-like flow이며 균일해야 한다는 가정이 필요하다. 만약 흐름의 모든 지점에서 열풍과 액적 사이의 접촉이 균일하지 않고 공기가 잘 섞이지 않는다면 상기와 같은 수지 관계를 적용하는데 문제가 수반될 수 있다. 아마도 건조의 중반과 후반부에 들어서야 이와 같이 열풍이 균일하고 액적과 접촉이

Table 1. Appropriate values of A and n for different N_{RE} ranges in Eq. (15)

N _{RE} * range	A	n
1,000~ 5,000	0.865	0.095
300~1,000	2.77	0.26
18~300	10.95	0.50
0.6~18	26.5	0.81
< 0.6	24.0	1.00

*N_{RE} = D_pρ_aV/μ.

균일하게되지, 건조 초반에는 분무의 거동이 매우 불안정하고 균일하지 않을 것이다. 따라서 차후에 이 문제를 해결하기 위해서는 공기 흐름을 두 구역으로 나누어 하나는 액적과 열풍의 접촉이 균일한 지역과 다른 하나는 그렇지 않은 지역으로 구분하여 모델링해야 할 것이다.

공기/액적 물성치의 계산

공기에 대한 다음 물성의 함수식들을 사용하여 상기의 식들을 효과적으로 풀이할 수 있었다.

$$v_h = (2.83 + 4.56Y) / (1000 P) \quad (24)$$

$$\rho_a = (1 + Y) / v_h \quad (25)$$

$$\mu = (0.622\mu_a + Y\mu_w) / (0.622 + Y) \quad (28)$$

$$\mu_a = 1.478 \times 10^{-6} (t)^{1.5} / (115.6 + t) \quad (29)$$

$$\mu_w = 1.674 \times 10^{-6} (t)^{1.5} / (544 + t) \quad (30)$$

$$k_f = (0.622k_a + Yk_w) / (0.622 + Y) \quad (31)$$

$$k_a = 1.864 \times 10^{-4} (t)^{0.867} \quad (32)$$

$$k_w = 1.111 \times 10^{-5} (t)^{1.304} \quad (33)$$

$$P^*_w = \exp[11.294 - 3578.1 / (T + 216.8)] \quad (34)$$

$$Y_s = 0.622 a_w (P^*_w) / [P - a_w (P^*_w)] \quad (35)$$

P는 보통 대기압인 1기압으로 대치된다. 수분활성도 a_w 는 액적 표면의 수분함량과 온도에서 계산되어야 하나 본 연구에서는 국지적이 아닌 평균적인 수분함량 X의 함수(water sorption isotherm)로서 결정된 후 식 (36)으로부터 평균적인 온도 T의 함수로서 a_w 를 결정하였다.

$$\ln(a_w/a_{w0})X = 18.02(\lambda_v/R)(1/T_r - 1/T) \quad (36)$$

건조 중 액적 크기의 변화

건조 동안 액적의 직경 D_p 는 변화한다. 초기에 수분의 손실로 액적은 수축된다. 건조되어 생성된 입자는 보통 최종 직경이 처음 액적 직경의 약 90% 정도이다. 그 변화 과정에 관한 많은 연구가 있었으나 이에도 불구하고 D_p 를 예측하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 다음 식은 그 중 일부로서 분무건조가 진행되는 동안 액적의 X에 따라 변화하는 D_p 를 나타낸 것이다.

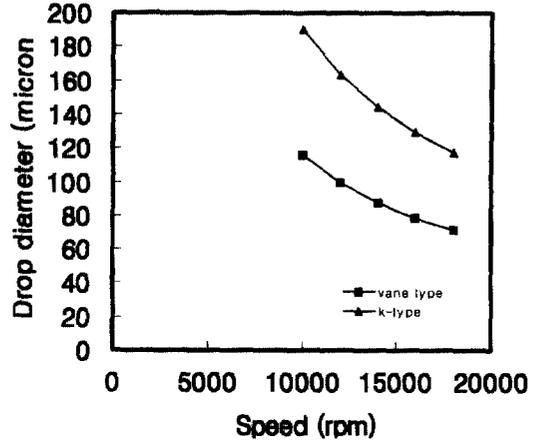


Fig. 1. Initial drop diameter vs. speed of wheel of vane type atomizer (vane height: 0.015 m, vane number: 16, wheel diameter: 0.15 m) and disc of kestner type atomizer (disc diameter: 0.15 m).

$X > 1.0$ 일 때:

$$D_p/D_{p0} = [(v_s + Xv_w) / (v_s + X_0v_w)]^{1/3} \quad (37)$$

$0.25 < X < 1.0$ 일 때:

$$D_p = 0.765 D_{p0} + (0.180 D_{p0}) (1.0 - X) \quad (38)$$

$X < 0.25$ 일 때:

$$D_p = 0.9 D_{p0} \quad (39)$$

시뮬레이션 프로그램

모델링 결과를 적용하여 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 프로그램을 MS visual basic 6.0 언어로 작성하였다. 수치해석 기법은 단순히 식 (13)과 같은 수준의 변화율의 표현에 기반을 두었다. 본문에 제시하지 않았지만 프로그램 창은 graphic 위주로 구성되어 사용자가 쉽게 시뮬레이션할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션은 대표적인 분무기 종류인 kestner type과 vane type에 대하여 건조공정조건에 따른 건조 결과를 알 수 있도록 아래 도표와 같은 흐름으로 구성하였다.

분무기 type에 따른 미립화 성능

분무건조에 가장 중요한 성능은 분무기에 의한 미립화 과정이라 할 수 있다. 초기 액적의 크기에 따라 건조시간, 최종 수분함량, 건조실의 규격 등의

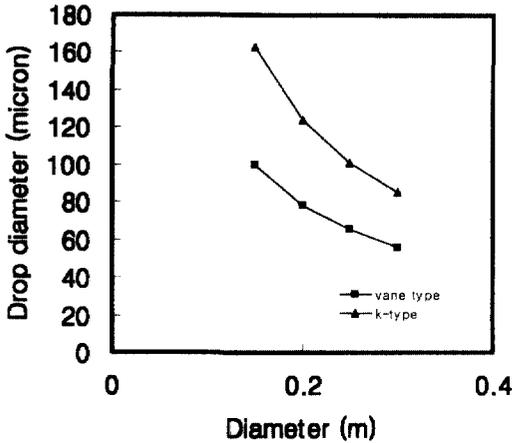


Fig. 2. Initial drop diameter vs. diameter of wheel of vane type atomizer (vane height: 0.015 m, vane number: 16, rpm: 12000) and disc of kestner type atomizer (rpm : 12000).

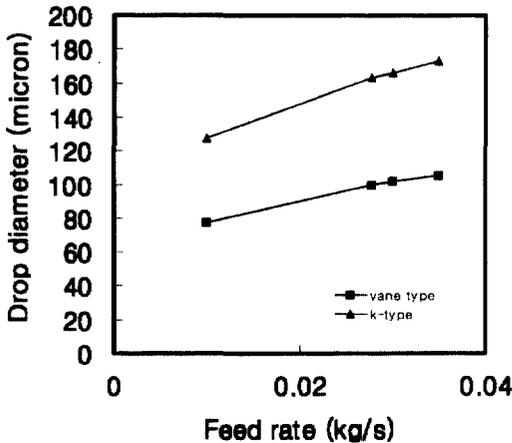


Fig. 3. Initial drop diameter vs. feed rate for vane type (vane height: 0.015 m, vane number: 16, rpm: 12000, wheel diameter: 0.15 m) and kestner type (rpm: 12000, disc diameter: 0.15 m) atomizers.

조건이 좌우되기 때문이다. Vane type과 kestner type의 미립화 성능 비교하기 위해 액적의 초기 직경의 변화를 분석하였다.

분무기 회전속도와 직경, 공급액의 투입속도의 변화에 따른 vane type과 kestner type의 액적의 초기 직경의 변화에서 살펴보면 두가지 type 모두 회전속도와 직경이 증가할 때 액적의 크기는 작아졌고, 공급액의 투입속도가 증가할 때는 그 크기가 증가하였다(Fig. 1, 2, 3). 그런데 vane type의 액적 크기가 kestner type보다 Fig의 각 경우에 64%, 51~63%, 64% 더 작게 산출되었다. 상기의 식 (4) 부근에서 전술했던 바와 같이 vane type의 초기 액적직

경을 구하는데 20~60%의 safety factor κ 를 고려하여 더 크게 평가해야 하므로 safety factor κ 를 고려한다면 두가지 type 간의 차이는 더 작아질 것이다 (Masters, 1991). 또한 기존의 연구 결과((삼영화학기계(주), 2000)에 따르면 vane type의 경우 kestner type보다 액적직경이 약 15% 작게 측정되었고, 액적의 크기를 측정하는 실험과정에서 분무기 회전속도, 공급액 투입속도 외에도 공기의 공급방법, 분무실의 형상 및 크기 등에 많은 영향을 받는다고 하였다. 본 연구에서는 이러한 변수는 동일하다고 가정하였고 공기 투입구의 구조 등을 고려하지 않아서 두가지 type 간에 액적 크기의 차이가 더 크게 계산된 것으로 생각된다.

한편 vane type의 경우 vane의 개수 또한 미립화에 영향을 미치는 것으로 알려져 이에 관하여 시뮬레이션한 결과는 Fig. 4와 같았다. Vane의 개수가 늘어남에 따라서 액적의 크기가 조금씩 감소하였고 vane의 높이가 증가할 때 역시 액적의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 그런데 vane의 높이의 효과가 더 큰 것으로 보아 vane를 설계할 때 경제성을 고려한다면 vane의 수보다는 높이의 변화를 주는 것이 더 효과적인 것으로 보인다.

분무기 type에 따른 건조 성능

시뮬레이션의 입력 조건을 바꾸어 요인별 경향을 분석한 결과 vane type과 kestner type의 종류에 상관없이 모든 출력치에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 분무기의 회전속도와 직경, 공급액의 투입속

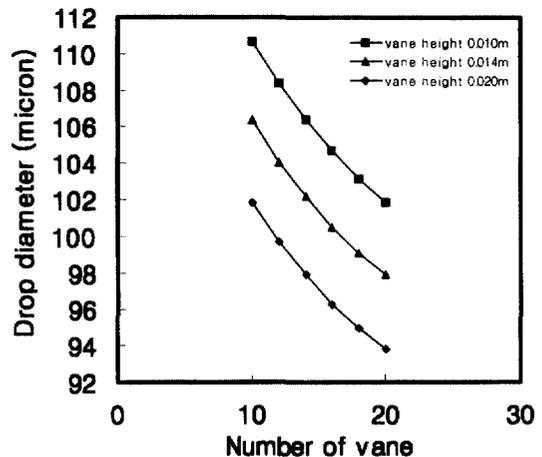
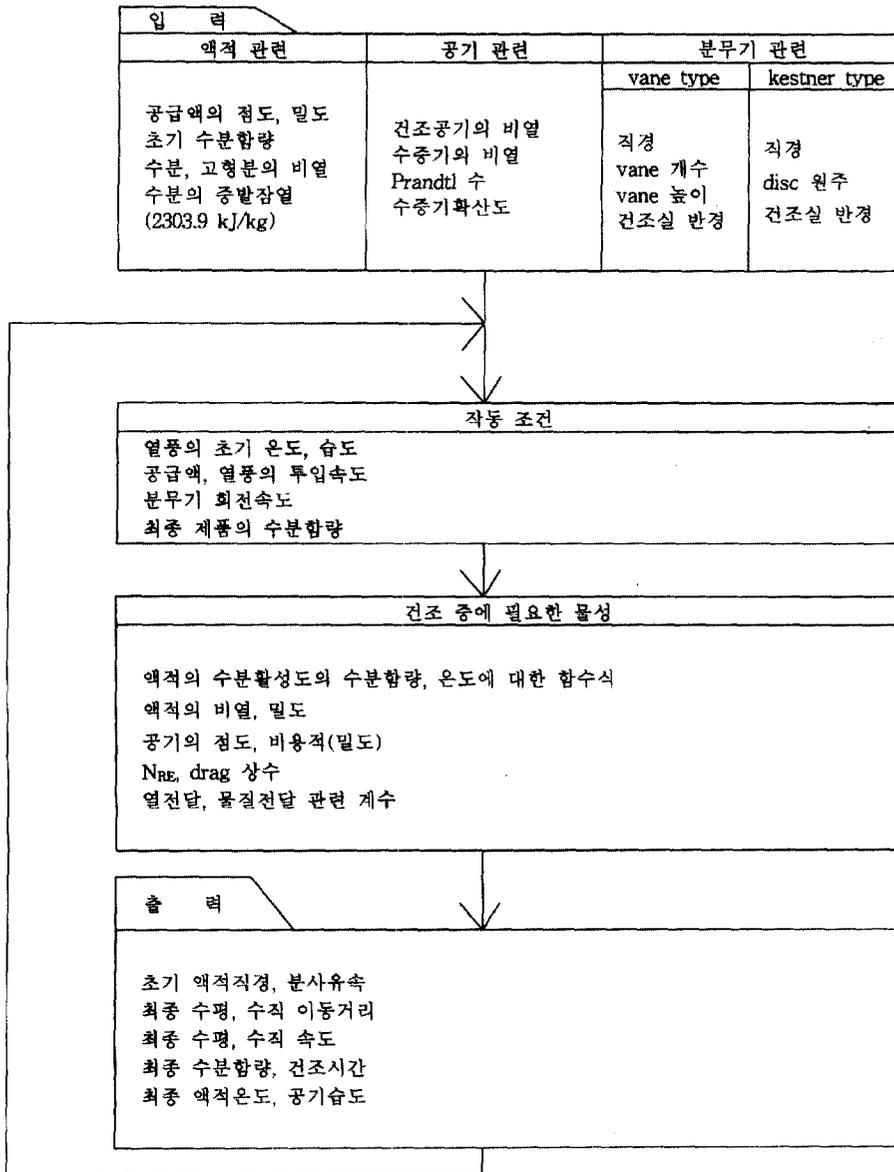


Fig. 4. Initial drop diameter vs. vane number of wheel of vane type atomizer (rpm: 12,000, disc diameter: 0.15 m) with different vane heights.



도가 가장 큰 영향을 미치는 변수로 판명되었다 (Table 2, 3).

Vane type의 경우 분무기의 회전속도와 직경을 증가시킬 때 최종공기온도와 최종제품온도, 최종공기습도에는 아무런 영향을 미치지 않았으나, 초기액적직경, 최종건조시간, 최종수직거리(위치), 최종수평거리는 크게 감소하였고, 초기수평속도는 크게 증가하였다. 반대로 감소시킬수록 초기액적직경, 최종건조시간, 최종수직속도, 최종수평속도는 크게 증가하였고 초기 수평속도는 크게 감소한 것으로 나타

났다. 또한 공급액의 투입속도를 증가시킬 때 최종건조시간과 최종수직거리는 크게 증가하였고 최종수평거리, 최종제품온도, 최종공기습도, 최종수직속도, 초기액적직경은 증가하였으며, 최종공기온도는 크게 감소하였고 최종수평속도는 감소하였다. 반면 감소시킬수록 최종건조시간과 최종수직거리, 최종수평거리, 최종수직속도는 크게 감소하였고 최종제품온도, 최종공기습도는 감소하였으며 최종공기온도는 크게 증가하였고 최종수평속도는 증가하였다. 그러나 초기수평속도에는 아무런 영향을 미치지 못하였

Table 2. Change in process variables of spray drying with vane type atomizer

		Drying time	Final horizontal distance	Final vertical distance	Final air temperature	Final drop temperature	Final air humidity	Final vertical velocity	Final horizontal velocity	Initial horizontal velocity	Initial drop diameter
Disc speed	Inc*	↓↓***	↓	↓	-	-	-	↓	↓	↑	↓
	Dec**	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↓	↑
Disc diameter	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	↓	↓	↑	↓
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↓	↑
Vane height	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	↓	↓	-	↓
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	-	↑
No. of vane	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	↓	↓	-	↓
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	-	↑
Chamber radius	Inc	↑	↓	↑	-	-	-	-	↓	-	-
	Dec	↓	↑	↓	-	-	-	-	↑	-	-
Spray point	Inc	↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-
	Dec	-	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-
Feed rate	Inc	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	-	↑
	Dec	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	-	↓
Air rate	Inc	↓	↓	↓	↑	-	↓	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	↑	-	↓	-	-
Air swirl velocity	Inc	↓	↑	↓	-	-	-	↓	↑	-	-
	Dec	↑	↓	↑	-	-	-	-	↓	-	-
Air temperature	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Initial air humidity	Inc	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	-	-
	Dec	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	-	-
Feed density	Inc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feed viscosity	Inc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Initial moisture content	Inc	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	-	-
	Dec	↓	↑	-	↑	↓	↓	↑	↑	-	-
Feed temperature	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Final moisture content	Inc	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	↓	-	-
Heat of desorption of water	Inc	↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-
	Dec	↓	↓	↓	-	↑	-	-	↑	-	-
Heat capacity of dry air	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Heat capacity of water vapor	Inc	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
	Dec	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
Prandtl No.	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-
Diffusivity of water in air	Inc	↓	↓	↓	-	↓	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	-	↑	-	-	↓	-	-

*Inc: increase.

**Dec: decrease.

***↑: greatly increase, ↓: greatly decrease, ↑: increase, ↓: decrease, -: no change.

Table 3. Change in process variables of spray drying with kestner type atomizer

		Drying time	Final horizontal distance	Final vertical distance	Final air temperature	Final drop temperature	Final air humidity	Final vertical velocity	Final horizontal velocity	Initial horizontal velocity	Initial drop diameter
Disc speed	Inc*	↓***	↓	↓	-	-	-	↓	↓	↑	↓
	Dec**	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↓	↑
Disc diameter	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	↓	↓	↑	↓
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↓	↑
Feed rate	Inc	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	-	↑
	Dec	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	-	↓
Air rate	Inc	↓	↓	↓	↑	-	↓	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	↑	-	↓	-	-
Air temperature	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Initial air humidity	Inc	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	-	-
	Dec	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	-	-
Feed density	Inc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feed viscosity	Inc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Initial moisture content	Inc	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	-	-
	Dec	↓	↑	-	↑	↓	↓	↑	↑	-	-
Feed temperature	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Final moisture content	Inc	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	↓	-	-
Heat of desorption of water	Inc	↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-
	Dec	↓	↓	↓	-	↑	-	-	↑	-	-
Heat capacity of dry air	Inc	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
Heat capacity of water vapor	Inc	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↓	-	-
	Dec	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	-	-
Prandtl No.	Inc	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-
Diffusivity of water in air	Inc	↓	↓	↓	-	↓	-	-	↑	-	-
	Dec	↑	↑	↑	-	↑	-	-	↓	-	-

* Inc: increase.

** Dec: decrease.

*** ↑: greatly increase, ↓: greatly decrease, ↑: increase, ↓: decrease, -: no change.

다. 다른 입력치의 변화에 따른 각 결과치의 변화는 Table 2와 같다.

Kestner type의 경우도 회전속도와 분무기의 직경, 공급액 투입속도를 변화시킬 때 각 결과치의 변화 양상이 vane type와 동일하게 나타났다. 또한 나머지 다른 변수들도 vane type의 결과와 같이 여러 결과에 크게 영향을 미치지 못하였다.

특히 kestner type과 vane type 모두의 경우에 회전속도가 증가할수록 초기 액적직경이 작아지고, 공급액의 투입속도가 증가할수록 초기액적직경이 미

약하게나마 증가한다는 시뮬레이션 결과는 실제 실험에 의한 결과와 일치함을 보였다(삼영화학기계(주), 2000).

결과적으로 초기 액적크기나 다른 출력 결과를 시뮬레이션하는 것은 실제 분무건조의 실험이나 분무건조기의 제작에 앞서 타당한 비교 분석치를 사전에 제공할 수 있으리라 판단되며 앞으로 더 많은 변수를 고려하여 모델링에 첨가하여 시뮬레이션한다면 실제 분무건조기의 설계 및 개발이나 보완에 매우 효과적으로 적용할 수 있으리라 예상된다.

요 약

분무건조공정의 여러 복잡한 유동 현상을 분석하는데 있어서 여러가지 수치계산에 적합한 수학적 모델을 제시하여 회전식 분무기의 대표적인 k(kestner) type과 vane type에 관하여 모델링하여 시뮬레이션하였다. 이 수학적 모델은 Masters의 방법에 근거하였으며 컴퓨터 프로그램은 MS visual basic 6.0 언어로 GUI(graphic user interface) 환경으로 작성하였다. 모델링은 관련 열전달, 열에너지 수지, 물질수지, 액적의 유동의 관점에서 완성하였다. 시뮬레이션 결과, vane type이 초기 액적의 크기가 kestner type에 비해 더 작게 나타났고 두가지 type 모두의 경우에 분무건조 성능에 가장 영향을 미치는 인자는 분무기의 회전수와 직경, 공급액의 투입 속도로 분석되었다.

기 호

- a_w, a_{wr} : 수분활성도, 기준 수분활성도
- C_D : drag 상수
- C_p, C_{po} : 액적의 비열, 초기비열(kJ/kg · K)
- C_{pa}, C_{pw} : 건조공기, 수증기의 비열(kJ/kg · K)
- C_R : 건조실의 반경(m)
- D, D_p, D_{po} : 분무기 직경, 액적직경, 액적초기직경(m)
- D_w : 수증기 확산도(m²/s)
- E : 분무기 회전속도(rpm)
- E_f : Exhaust fan의 공기유속(m³/s)
- F : 공급액의 고형분 투입속도(kg/s)
- f : 공급액의 투입속도(kg/h)
- G : 열풍의 투입속도(kg/s)
- g : 중력가속도 (9.806 m/s²)
- H : vane의 높이(m)
- h : 열전달계수(kJ/m² K s)
- K_V : 물질전달계수 (kg dry air/m² · s)
- k_p, k_s, k_w : 공기, 건조공기, 수증기의 열전도도(W/m · K)
- L : 분무기의 원주(m)
- M : 공급액의 점도(cP)
- M_d : 액적의 고형분 양 (kg)
- N : vane의 개수
- N_{RE} : Reynolds 수
- Nu : Nusselt 수
- P : 공기압(atm)
- Pr : Prandtl 수
- $(P_a)_{lm}$: 액적 경계면에서 대수평균 공기압(atm)
- P_w^* : 액적온도 T에서의 수증기압(atm)

- R_d : 액적의 수평방향 이동거리(m)
- S_c : Schmidt 수
- S_f : Supply fan의 공기유속(m³/s)
- T, T_o : 액적의 온도, 초기온도(K)
- T_r : 임의의 기준 온도(K)
- t, t_o : 열풍의 온도, 초기온도(K)
- V : 액적의 slip유속(m/s)
- V_1, V_2, V_{ro} : 분무직후 액적의 수평방향, 회전방향, 총 유속 (m/s)
- V_{aw} : 건조실 벽에서 열풍의 회전방향유속(m/s)
- V_r, V_t, V_z : 액적의 수평방향, 회전방향, 수직방향 유속(m/s)
- V_{ra}, V_{za} : 열풍의 회전방향, 수직방향 유속(m/s)
- V_h : 공기의 비용적(m³ moist air/kg moist air)
- v_s, v_w : 액적의 고형분, 수분 비용적(m³/kg)
- X, X_o, X_s : 액적의 수분함량, 초기수분함량, 표면수분함량 (% dry base)
- Y, Y_o : 공기의 습도, 초기습도(kg water/kg dry air)
- Y_s : 액적 표면의 포화습도(단위: kg water/kg dry air)
- Z_d : 액적의 수직방향 이동거리(m)
- ρ_a : 공기밀도(kg moist air/m³ moist air)
- ρ_p, ρ_{po} : 액적의 밀도, 초기밀도(kg/m³)
- λ_w, λ_c : 증발잠열, 과(excess)증발잠열(kJ/kg water)
- μ : 공기의 점도(kg/m · s)
- θ : 시간(s)

문 헌

김상수. 2000. 반건식 세정기에서 산성가스 제거효율에 대한 슬러리 분무특성의 영향. 한국과학기술원 박사학위논문

남궁식, 김두영. 1976. 분무건조 장치의 기본설계. 화학공학 14(3): 157-168

삼영화학기계(주). 1999. 분무건조실 내의 유동특성 및 건조 현상 연구. 산업자원부 에너지관리공단지원 연구프로젝트 보고서

삼영화학기계(주). 2000. 회전원반형 분무건조기의 설계 개선 연구. 산업자원부 에너지관리공단지원 연구프로젝트 보고서

Mujumdar, A.S. 1995. *Handbook of Industrial Drying* (vol. 1, 2). Marcel Dekker, NY, USA

Dickinson, D.R. and W.R. Marshall, Jr. 1968. Rates of evaporation of sprays. *AIChE J.* 14(4): 541-522

Katta, S. and W.H. Gauvin. 1975. Some fundamental aspects of spray drying. *AIChE J.* 21(1): 143-152

Masters, K. 1991. *Spray Drying Handbook*. Longman Scientific & Technical, London, UK

Parti, M. and B. Palancz. 1974. Mathematical model for spray drying. *Chem. Eng. Sci.* 29: 355-362