

전산유체역학을 이용한 분무건조계산

박가람 · 박균영[†] · 주지선* · 박준택**

공주대학교 화학공학부

*고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

**한국에너지기술연구원 에너지시스템연구부

(2002년 3월 23일 접수, 2002년 5월 8일 채택)

Calculation of Spray Drying Using Computational Fluid Dynamics

Ka-Ram Park, Kyun Young Park[†], Ji-Sun Ju* and Jun Taek Park**

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

*Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 449-860, Korea

**Department of Energy Systems, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received 23 March 2002; accepted 8 May 2002)

요 약

전산유체 계산 프로그램 중 하나인 CFX4를 이용하여 직경 140 cm, 높이 170 cm의 회전원반 분무건조기에서 우유를 대상으로 하여 분무실 내 유체흐름 분포, 액적의 거동, 건조 현상 등을 예측해 보았다. 분무실 내의 유체는 아래쪽이 좁아지는 구조로 인하여 중심에서 내려와서 벽 쪽으로 올라가는 커다란 재 순환 영역을 형성하였다. 기체장 내에 액적이 분무됨으로써 유체의 흐름에 상당한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 액적이 재 순환 영역으로 들어가지 않을 만큼 가벼운 경우는 중심에서 크게 벗어나지 않고 아래로 떨어졌고 조금 더 무거운 것은 재 순환 영역을 따라 움직였다. 이 보다 더 질량이 클 경우 유체 흐름에 큰 영향을 받지 않고 아래쪽으로 이동하였다. 선회를 주기 위해 공기분산기의 베인 각도를 0°, 30°, 45°로 변화시킴에 따라 유체의 재 순환 영역이 위쪽으로 이동하였다. 베인 각도가 커지면 선회 강도가 증가하여 액적이 상부에서 원을 크게 그리며 아래로 떨어지기 때문에 체류시간이 길어지는 효과가 있으나, 재 순환 영역이 상부로 이동함에 따라 건조되지 못한 액적이 벽에 부딪힐 위험성이 증가하였다.

Abstract – Using CFX4, a computational fluid dynamics program, the gas flow pattern, the droplet trajectory and the extent of drying were calculated for spray drying of a milk with a rotary disk in a spray chamber of 140 cm in diameter and 170 cm in height. Due to the cone of the chamber, whose cross sectional area became smaller toward the outlet, a recirculation flow was formed in the chamber pointing downward in the center and upward near the wall. The gas flow pattern was significantly affected by the droplets ejected from the rotating disk. The smaller droplets descended downward not far from the axis, medium sized droplets were swept into the recirculation flow, and even larger ones were little affected by the recirculation flow, travelling downward near the wall. The center of recirculation flow moved upward and toward the wall as the vane angle of the air disperser was increased from 0 to 30 and 45°. An increase of the vane angle increased the swirling intensity and consequently the droplets flew in a larger circle resulting in an increase of the residence time. On the other hand, the droplets became more likely to hit the wall with the vane angle increase.

Key words: Spray Drying, Computational Fluid Dynamics, Milk Powder

1. 서 론

분무건조는 액상의 슬러리를 작은 액적으로 미립화한 후 고온의 열풍과 접촉시켜 순간적으로 건조하여 분말제품을 만드는 건조법이다. 다른 건조방식에 비해 용해성, 유동성이 좋은 구상 분말 제품을 제조할 수 있으며 식품, 의약품, 합성세제, 염료, 안료, 세라믹 등 매우 광범위한 산

업분야에 이용되고 있다.

슬러리의 분무는 노즐이나 회전원반을 통해 이루어진다. 분무 방식은 건조실의 치수와 모양을 결정하는 중요한 요인이 되는데, 노즐의 경우는 분무액적의 축방향 속도가 크기 때문에 건조실이 길어야 하며 회전원반의 경우는 액적의 반경방향 속도가 크기 때문에 건조실 직경이 넓어야 한다. 회전원반을 사용할 경우 분무 액적이 기체의 흐름을 따라 천장을 치거나 건조실 벽에 달라붙는 문제가 발생하기도 한다. 액적의 건조실 내 체류시간을 증가시키기 위해 건조용 가스 유입 시 선회(swirling)를 주기 때문에 건조실 내 액적 및 유체의 거동은 매우 복잡한 양상을

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kypark@kongju.ac.kr

나타낸다.

분무건조 계산은 복잡한 유동현상과 함께 분무 액적의 궤적, 온도변화, 건조 등을 동시에 고려하여야 하므로 매우 어려운 문제의 하나이다. Dickinson과 Marshall[1]은 공기가 플러그 흐름임을 가정하고 액적의 속도가 열 전달 속도에 영향을 주지 않을 만큼 작은 경우와 매우 큰 경우에 대해 증발 속도를 계산하였으며, Parti와 Paláncz[2]는 액적의 속도가 건조실의 축방향으로 평행하고 입자의 직경이 모두 같다는 가정 하에 건조에 의한 액적의 크기 변화를 계산하였다. Chow와 Chung[3]은 공기와 수증기의 흐름이 층류(laminar flow)라는 가정 하에 물방울의 증발 속도를 계산하였다. Crowe 등[4]은 PSIC(particle source in cell) 모델을 제시하여 기-액 2상 간의 물질, 운동량, 에너지 전달의 상호 관계를 설명하였고, 이를 이용하여 분무건조 계산을 한층 개선시킬 수 있음을 보여 주었다.

위에 열거된 모델들에 도입된 가정들은 실제 분무건조실내의 유체흐름 현상과는 거리가 멀고, 계산 편의상 지나치게 단순화시켜 사실성이 많이 결여되어 있다고 볼 수 있다. Launder와 Spalding[5]은 건조실 내 유체흐름의 난류현상을 현실적으로 예측할 수 있는 κ - ϵ 모델을 제시하였다. Sano[6]는 유체흐름 계산에 κ - ϵ 모델, 기-액 간의 열, 운동량, 물질전달 계산에 PSIC 모델을 도입하여 병류형 분무건조기를 계산하고 다른 연구자의 실험 결과와 비교하였다. Kim[7] 또한 κ - ϵ 모델, PSIC 모델을 이용하여 공기 주입구의 배인(vane) 각도를 변화시키면서 분무건조실 내 유체 흐름의 변화와 입자의 궤적을 계산하였다. Sano[6]와 Kim[7]은 건조실 상부에서 건조용 가스 도입부분의 실제 기하학적 구조를 고려하지 않았고, 계산 편의상 건조실의 하부에서도 실제의 기하학적 구조와 차이가 있는 형태의 격자(grid)를 사용하였다. 한편 Oakley 등 [8]은 분무건조실의 실제 기하학적 구조를 반영하여 2가지 대표적 난류모델인 κ - ϵ 모델과 Reynolds stress 모델을 비교하였는데, Reynolds stress 모델이 실제에 보다 근사하게 예측할 수 있으나 수렴이 어렵다고 보고하였다. Livesley 등[9]은 FLOW3D를 사용하여 분무건조기의 직경과 높이 변화, 분무기구의 변화, 고히분 함량 변화에 따른 건조율을 계산한 결과 실제 값과 비교적 잘 일치한다고 보고하였다.

본 연구에서는 상용 유체계산 프로그램의 하나인 CFX4를 이용하여 회전원반을 분무도구로 사용하는 파이롯트 규모의 분무건조실 내에서 기체장의 유속, 온도분포와 액적의 궤적, 건조율 등을 계산하였다. 건조대상물질은 우유이며, 건조에 사용된 가스는 공기이다. 분무 건조실의 모양, 치수는 Fig. 1에 건조 공기 분산기 및 회전원반의 모양, 치수는

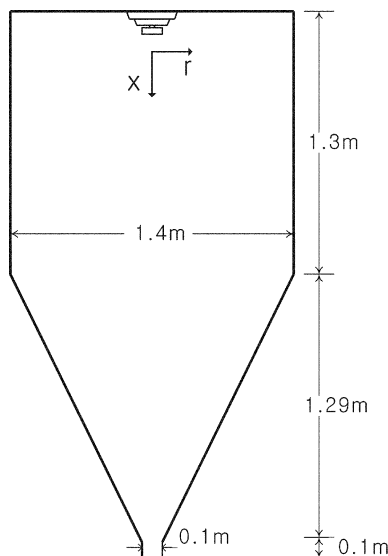


Fig. 1. Schematic drawing of drying chamber.

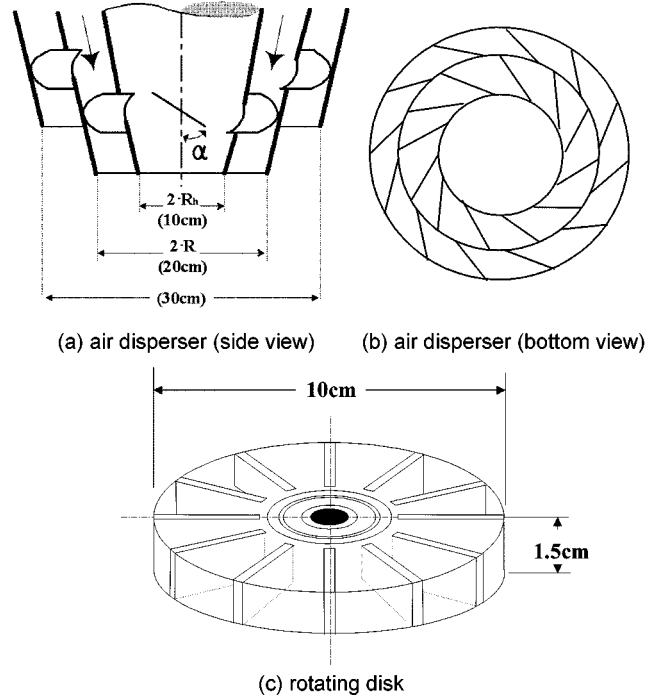


Fig. 2. Sketch of air disperser and rotating disk.

Fig. 2에 나타내었다. 열풍은 2개의 공기 분산기를 통해 분무기로 주입되며 공기 분산기에 달려있는 배인에 의해 선회류가 형성된다. 배인의 각도가 달라지면 선회강도가 달라지게 된다. 슬러리는 12개의 날개가 달려 있는 원반(disk)을 통해 분무실 내로 분무되며 원반의 직경은 10cm, 높이는 1.5cm이다. 분무건조기로 주입된 공기와 입자는 모두 건조실 하단의 출구로 배출된다. 건조용 공기 분산기에 설치된 배인의 각도, 회전원반의 회전속도, 슬러리 공급량의 변화가 분무실내 유체 흐름, 액적의 궤적에 미치는 영향을 조사하였다. 이는 Livesley 등[9]의 이전 연구에서는 다루어지지 않았던 부분이며, 비록 제한적이기는 하나 본 연구의 계산결과를 삼영화학기계와 한국에너지기술연구소에서 수행된 파이롯트 분무건조 실험결과[10]와 비교해 보았다.

2. 모 델

분무 건조실 내 유체, 액적의 거동은 중심축에 대하여 대칭을 이룰 것이므로 2 차원 원통 좌표계를 채택하였으며, 각각에 대한 지배방정식과 2 상(유체와 액적) 간의 물질, 운동량, 에너지 전달식을 다음과 같이 표시하였다.

2-1. 유체 지배방정식

2-1-1. 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r U_r) = S_p \quad (1)$$

ρ 는 유체의 밀도, U_x 는 축방향, U_r 는 반경방향 속도성분, S_p 는 액적으로부터 용매(물)의 증발에 의한 유체의 질량 생성항이다.

2-1-2. 운동량 방정식

$$[\nabla \cdot \rho \vec{U}\vec{U}] + [\nabla \cdot \tau] = -\nabla P + \rho \vec{g} + S_p \quad (2)$$

$[\nabla \cdot \rho \vec{U}\vec{U}]$ 는 대류에 의한 항으로 x (축방향), r (반경방향), w (접선방향) 성분은 다음과 같이 표시된다.

$$[\nabla \cdot \rho \vec{U}\vec{U}]_x = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho U_x U_r) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_x) \quad (3)$$

$$[\nabla \cdot \rho \vec{U}\vec{U}]_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho U_r U_r) - \frac{1}{r} \rho U_w^2 + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_r U_x) \quad (4)$$

$$[\nabla \cdot \rho \vec{U}\vec{U}]_w = \frac{\partial}{\partial r} (\rho U_r U_w) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho U_r U_w) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_w) \quad (5)$$

U_w 는 접선방향 속도를 각각 나타낸다. 식 (2)의 $[\nabla \cdot \tau]$ 는 확산에 의한 항으로서 τ 는 stress tensor를 나타내며 세 방향의 성분은 다음과 같이 표시된다.

$$(\nabla \cdot \tau)_x = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rx}) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \quad (6)$$

$$(\nabla \cdot \tau)_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rr}) + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} \quad (7)$$

$$(\nabla \cdot \tau)_w = \frac{\partial \tau_{rw}}{\partial r} + \frac{2}{r} \tau_{rw} + \frac{\partial \tau_{wx}}{\partial x} \quad (8)$$

$$\tau_{rr} = -\mu_{eff} \left[2 \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{U}) \right] \quad (9)$$

$$\tau_{rx} = -\mu_{eff} \left[\frac{\partial U_w}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial x} \right] \quad (10)$$

$$\tau_{xx} = -\mu_{eff} \left[2 \frac{\partial U_w}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{U}) \right] \quad (11)$$

$$\tau_{rw} = -\mu_{eff} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{U_w}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial w} \right] \quad (12)$$

μ_{eff} 는 난류의 영향을 고려한 유효 점도(effective viscosity)로서 에디 점도(eddy viscosity) μ_t 와 층류 점도(laminar viscosity) μ_l 의 합으로 계산된다.

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu_l \quad (13)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

에디 점도를 계산하는 식 (14)는 κ - ε 모델로 알려져 있으며 κ , ε 값은 다음의 미분 방정식으로부터 구한다[5].

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho U_r \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + G_\varepsilon - \rho \varepsilon \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho U_r \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (16)$$

$$G_k = \mu_t \left[2 \left(\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{U_r}{r} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial U_w}{\partial x} \right)^2 + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{U_w}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (17)$$

위 식들에 포함된 상수 C_μ , C_1 , C_2 , σ_k , σ_ε 는 난류에 대한 실험에 의해 구한 값으로 Table 1에 나타내었다.

2-1-3. 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x H) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho U_r H) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_H} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_t}{\sigma_H} \frac{\partial H}{\partial r} \right) \quad (18)$$

여기에서, σ_H 는 난류모델 상수로 0.9이고[5], 총 엔탈피 H 는 다음 식에 의해 계산된다.

$$H = \sum Y_i H_i \quad (19)$$

H_i 는 i 성분의 엔탈피이고 Y_i 는 기체 장에 포함된 i 성분의 몰분율이다.

Table 1. Values for coefficients in κ - ε model

Constant	C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
Value	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

2-2. 액적 지배방정식

액적의 모양은 완전한 구형이고 건조되는 동안 구형의 모양을 유지하며 기상내 액적의 부피분율이 작아서 액적들 상호간의 충돌 합체는 없는 것으로 가정하였다. 액적의 속도는 항력과 중력에 의해 영향을 받으며 다음과 같은 식에 의해 결정된다[11].

$$m_d \frac{dv_x}{dt} = C_D \rho (U_x - v_x) \left| \vec{U} - \vec{v} \right| \frac{A_d}{2} + m_d g \quad (20)$$

$$m_d \frac{dv_w}{dt} = C_D \rho (U_w - v_w) \left| \vec{U} - \vec{v} \right| \frac{A_d}{2} - m_d \frac{v_r v_w}{r} \quad (21)$$

$$m_d \frac{dv_r}{dt} = C_D \rho (U_r - v_r) \left| \vec{U} - \vec{v} \right| \frac{A_d}{2} + m_d \frac{v_w^2}{r} \quad (22)$$

$$\left| \vec{U} - \vec{v} \right| = \sqrt{(U_x - v_x)^2 + (U_r - v_r)^2 + (U_w - v_w)^2} \quad (23)$$

m_d 는 액적의 질량, ρ 는 기체의 밀도, v_x , v_r , v_w 는 액적의 축방향, 반경방향, 접선방향 속도를 나타내며 C_D 는 항력계수, A_d 는 건조실 단위 부피당 액적의 표면적으로서, 액적의 직경(d_p)과 건조실내 액적이 차지하는 부피분율(β)로 나타낼 수 있다.

$$A_d = \frac{6r\beta}{d_p} \quad (24)$$

항력계수 C_D 는 다음과 같은 식에 의해 계산한다[4].

$$C_D = \frac{C_{D_0}}{1+B} \quad (25)$$

$$B = C_v \frac{T_g - T_d}{L} \quad (26)$$

B 는 Spalding number, C_v 는 수증기의 비열, T_g 와 T_d 는 각각 기체와 액적의 온도이며, L 은 증발잠열이다. 식 (25)의 C_{D_0} 는 다음 식으로부터 구한다.

$$C_{D_0} = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (27)$$

레이놀즈수 Re 는 기체와 액적의 상대속도를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Re = \rho \frac{\left| \vec{U} - \vec{v} \right| d_p}{\mu} \quad (28)$$

시간 Δt 가 경과한 후 액적의 위치는 다음과 같이 계산된다.

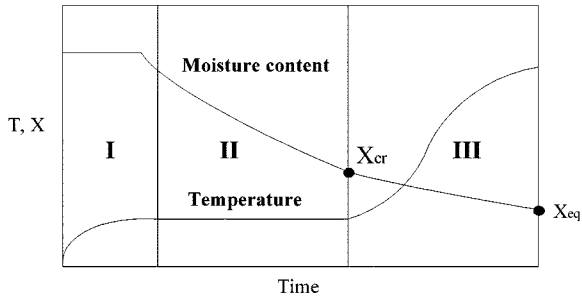
$$\vec{x}_d = \vec{x}_{d,0} + (\vec{v} + \vec{v}_0) \frac{\Delta t}{2} \quad (29)$$

$\vec{x}_{d,0}$ 는 시간 t_0 에서 액적의 위치, \vec{x}_d 는 시간 $t+t_0$ 에서 액적의 위치를 나타내며, Δt 동안 액적의 이동속도는 t_0 에서의 속도 \vec{v}_0 와 $t+t_0$ 에서의 속도 \vec{v} 의 평균값으로 하였다.

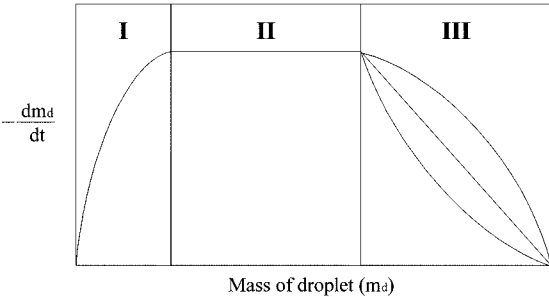
2-3. 2상 사이의 물질, 운동량, 열 전달

2-3-1. 물질 전달

분무 건조실 내에서는 액적으로부터 기상 쪽으로 물의 증발이 일어난다. 액적으로부터 물의 증발은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 3단계로 일어난다: (1) 예열 구간, (2) 항률(constant rate) 건조구간, (3) 감률(falling rate) 건조구간.



(a) Moisture content and temperature of droplets vs. time (X_{cr} : critical moisture content, X_{eq} : equilibrium moisture content)



(b) Drying rate vs. moisture content

Fig. 3. Drying characteristics of droplets during spray drying.

2-3-1-1. 예열 구간

액적이 분무되면 뜨거운 건조용 공기와 만나 온도가 상승하는 예열 구간을 거치게 되며, 이 구간에서의 건조 속도는 다음과 같이 계산한다[12].

$$\frac{dm_d}{dt} = Sh(\rho D)\pi d \frac{W_C}{W_G} \log\left(\frac{1-X_V}{1-X_G}\right) \quad (30)$$

$$Sh = 2 + 0.6Re^{0.5} \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} \quad (31)$$

D는 수증기의 확산계수이며 W_C 와 W_G 는 수증기의 분자량과 연속상에서 혼합물(건조용 공기+수증기)의 분자량이고, X_V 와 X_G 는 각각 액적 표면과 기상에서 수증기의 몰분율을 나타낸다. 액적 표면에서 수증기의 몰분율은 다음과 같이 계산한다.

$$X_V = \frac{W_G P_{vap}}{W_G P - (W_G - W_C) P_{vap}} \quad (32)$$

P는 기체장의 압력이고 P_{vap} 는 수증기의 부분 압력으로서 다음의 Antoine 식으로부터 구한다.

$$P_{vap} = \exp\left(A - \frac{B}{T_d + C}\right) \quad (33)$$

A=23.196

B=3816.4

C=-46.13

2-3-1-2. 항률 건조 구간

액적으로의 열 전달량과 건조에 따른 증발잠열량이 같아지면 액적의 온도는 일정해지고(습구온도) 이 구간에서 건조속도는 거의 일정한 값을 가지게 되며, 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{Nu\pi k(T_g - T_d)}{L} \quad (34)$$

k는 기체의 열전도도, Nu는 Nusselt number, L은 증발잠열을 나타낸

다. Nusselt number는

$$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5} \left(\frac{C_p}{\mu k}\right)^{1/3} \quad (35)$$

μ 와 C_p 는 각각 기체의 점도와 비열이다.

2-3-1-3. 감률 건조 구간

항률 건조구간이 끝날 때 썩으면 상당량의 수분이 증발하여 액적이 고체입자의 형상으로 변화되며, 임계점에 도달한 이후부터는 건조가 진행됨에 따라 건조속도가 점점 줄어드는 감률 건조구간에 도달한다. 이 구간에서의 건조속도 변화는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 건조 대상물질의 특성에 따라 다양한 형태를 나타내게 되는데, 본 연구에서는 건조속도가 1 차적으로 감소하는 것으로 가정하여 다음과 같은 식에 의해 건조속도($-\frac{dm_d}{dt}$)를 결정하였다.

$$-\frac{dm_d}{dt} = \left(\frac{dm_d}{dt}\right)_{cr} \left(\frac{m_d - m_{d,eq}}{m_{d,cr} - m_{d,eq}}\right) \quad (36)$$

$\left(\frac{dm_d}{dt}\right)_{cr}$ 는 임계점에서의 건조속도, m_d 는 입자의 질량, $m_{d,cr}$ $m_{d,eq}$ 는 각각 임계함수율, 평형함수율에 도달했을 때 입자의 질량이다.

2-3-2. 운동량 전달

식 (2)의 유체 운동량 지배방정식의 오른쪽에 있는 운동량 생성항(S_p)은 분무 액적의 운동량이 유체 쪽으로 전달되는 양으로서 액적의 운동량 감소량이다. 뒤에 설명하겠지만 식 (2)의 수치해석 과정에서 분무 건조실 내를 여러 개의 셀(cell)로 나누게 되는데 주어진 셀에서 액적으로부터 유체로의 운동량 전달량은 다음과 같이 계산된다.

주어진 셀을 지나는 입자를 몇 개의 크기집단으로 분류하고 i번째 크기집단의 입자가 셀을 통과하면서 잃어버리는 운동량은

$$\Delta \vec{M}_{d,i} = \pi \rho_p \dot{\eta}_i \frac{\vec{v}_{i,out} d_{i,out}^3 - \vec{v}_{i,in} d_{i,in}^3}{6} \quad (37)$$

ρ_p 는 입자의 밀도, $\dot{\eta}_i$ 는 단위시간당 지나가는 크기집단 i의 입자개수, $\vec{v}_{i,out}$ 와 $d_{i,out}$ 는 셀을 빠져 나오는 크기집단 i의 속도와 입자직경, $\vec{v}_{i,in}$ 과 $d_{i,in}$ 은 셀로 들어가는 속도와 입자직경을 나타낸다. 주어진 셀에 대하여 총괄 운동량 전달량은

$$\Delta \vec{M}_d = \sum_i \Delta \vec{M}_{d,i} \quad (38)$$

2-3-3. 열 전달

액적의 온도는 기체로부터 액적으로의 열 전달량과 수분 증발잠열의 함수로서 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$m_d c_d \frac{dT_d}{dt} = Q_C + Q_M \quad (39)$$

여기에서, m_d 는 액적의 질량, c_d 는 액적의 비열, T_d 는 액적의 온도, Q_C 는 고온의 기체에서 액적으로 전달되는 열이고, Q_M 은 액적으로부터 수분이 증발될 때 필요로 하는 증발잠열이며 (-)값을 가진다.

$$Q_C = Nu\pi k(T_g - T_d) \quad (40)$$

$$Q_M = L \frac{dm_d}{dt} \quad (41)$$

증발의 첫 번째 구간에서는 액적이 예열되고, 항률 건조구간에서는 건조용 공기로부터 액적으로의 열전달 속도가 물의 증발에 필요한 열량과 같아져, 다시 말하면 Q_C 과 Q_M 의 합은 0이 되어 액적의 온도는 더 이상 변하지 않게 되며, 감률 건조구간에서는 고체입자 온도가 상승하게 된다.

3. 수치해석

위의 유체, 액적 지배방정식들을 연립하여 풀기 위해 상용 전산유체 역학 프로그램의 하나인 CFX4를 이용하였다. 본 프로그램은 미분 방정식의 이산화(discretization) 방법으로 유한체적법(finite volume method)을 사용하고, 수렴방식으로는 PSIC 모델을 채택하고 있다. 계산방식은 우선 액적이 없다고 가정하고 유체장의 지배방정식을 풀 다음, 그 계산 결과를 이용하여 액적의 궤적, 증발량, 온도를 계산한다. 주어진 셀을 통과하면서 발생하는 질량변화, 액적 속도변화, 온도변화로부터 유체의 운동량방정식, 연속방정식, 에너지방정식의 생성 항을 결정 대입하고 유체 장을 다시 푼다. 이러한 유체 장, 액적 계산과정을 수렴기준(모든 셀의 유체 방정식 질량 잔류 값(residual)의 합을 건조실에 도입되는 유체의 총 질량으로 나눈 값이 10^{-3} 보다 작아야함)이 만족될 때까지 계속한다. 본 연구에 사용된 격자는 축 방향으로 76 개, 반지름방향으로 47개다(Fig. 4). 격자 수의 증가는 계산의 정확도를 향상시키지만, 계산시간을 증가시킨다. 예비 테스트 결과, 이 정도의 격자 수 이상으로 하여도 계산결과에 큰 차이가 없었다. Kim[7]은 유사한 계산에서 축 방향으로 30개, 반지름 방향으로 19개의 격자를 사용하였는데, 이 정도의 격자 수에서는 본 연구에서 설정된 수렴기준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 원유의 수분함량은 87 wt%이며 기타 원유의 물성 및 공기의 물성을 Table 2에 나타내었다. 계산에 필요한 액적의 초기 입경분포, 액적의 초기속도, 베인 각도에 따른 유입 공기의 속도성분은 다음과 같이 추정하여 사용하였다.

3-1. 액적의 초기입경 분포

슬러리의 공급량, 슬러리의 물성, 회전원반의 제원으로부터 분무되는 액적의 입도를 다음과 같은 실험식 [13]에 의해 $d_{p,50\%}$, $d_{p,95\%}$ 를 추정하였다.

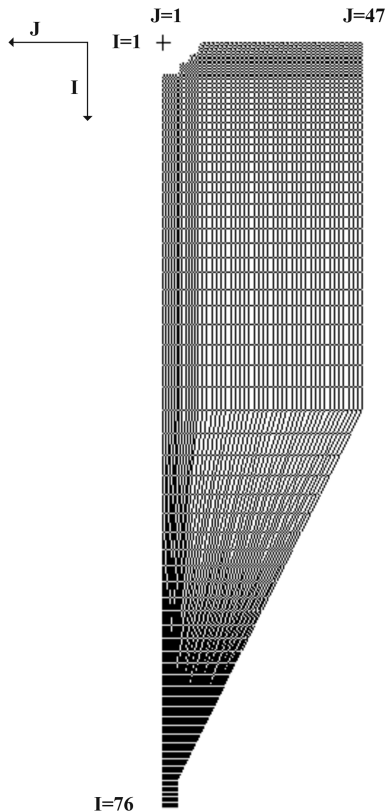


Fig. 4. Computational grid for spray chamber.

Table 2. Physical properties used for calculation

Item	Properties	Value	
continuous phase	air	Specific heat [J/kg K]	1,006
		Thermal conductivity [W/m K]	0.0224
		Humidity [kg H ₂ O/kg dry air]	0.02
	water vapor	Specific heat [J/kg K]	2,000
		Diffusivity [m ² /s]	0.00025
dispersed phase	water	Specific heat [J/kg K]	4,200
		Latent heat for vaporization[J/kg]	2,501,000
	dry milk	Density [kg/m ³]	1,000
Average moisture content [kg H ₂ O/kg dry solid]		0.03	
Density [kg/m ³]		400	

$$d_{p,50\%} = \frac{K(M)^a}{(N^b)(d^c)(nh)^d} \times 10^4 \quad (42)$$

$$d_{p,95\%} = 2 \times d_{p,50\%} (d_{p,50\%} < 60 \mu m) \quad (43)$$

$$d_{p,95\%} = 2.5 \times d_{p,50\%} (60 < d_{p,50\%} < 120 \mu m) \quad (44)$$

$d_{p,50\%}$ 은 기하평균입경이며, M은 슬러리의 유량(kg/h), N은 원반의 회전속도(rpm), d는 디스크의 직경(m), n은 베인의 개수, h는 베인의 높이(m)이다. K 값과 a, b, c, d는 원반의 회전속도와 베인의 액부하(liquid loading)에 따라 달라지는데 본 연구의 운전조건 범위에서는 a=0.24, b=0.82, c=0.6, d=0.24, K=1.4이다.

액적의 크기분포가 대수정규분포를 나타낸다고 가정하면, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\phi}{d \log d_p} = \frac{1}{\log \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(z - \bar{z})^2}{2(\log \sigma_g)^2} \right] \quad (45)$$

ϕ 는 입경 d_p 와 $d_p + \Delta d_p$ 사이의 크기를 같은 입자의 개수분율, $\bar{z} = \log d_{p,50\%}$, $z = \log d_p$, σ_g 는 기하표준편차를 나타낸다. 기하표준편차는 $d_{p,50\%}$, $d_{p,95\%}$ 로부터 쉽게 구할 수 있다. 실제 프로그램에서는 식 (45)의 연속적 크기분포 대신, 13개의 크기집단으로 분할하여 사용하였다.

3-2. 액적의 초기 속도

회전 원반으로부터 분무되는 액적의 직경방향 초기속도(v_r)와 접선방향 초기속도(v_w)는 각각 다음과 같이 추정하였다[13].

$$v_r = 0.0024 \left(\frac{\rho_L \pi^2 N^2 d Q^2}{\mu h^2 n^2} \right)^{1/3} \quad (m/s) \quad (46)$$

$$v_w = \pi d N \quad (m/s) \quad (47)$$

ρ_L 은 슬러리의 밀도(kg/m³), d는 원반 직경(m), Q는 슬러리유량(m³/h), N은 회전속도(rpm), μ 는 점도(cP), n는 베인의 개수, h는 베인의 높이이다.

3-3. 공기의 초기 속도

Fig. 2에 나타난 바와 같이 공기 분산기에는 베인이 설치되어 있어 공기가 선회하면서 건조실로 유입된다. 축방향 속도는 공급되는 공기의 유량을 공기 분산기 단면적으로 나누어 구하고, 선회에 따른 각속도(angular velocity)는 식 (48)로부터 결정하였다[14].

$$\omega \int_{R_i}^R r^3 dr = U_x \tan \alpha \frac{R^3 - R_i^3}{3} \quad (48)$$

ω 는 각속도, R_i 는 도넛 형태 공기분산기의 안쪽 반지름, R은 바깥 반지름, U_x 는 축 방향 속도, α 는 베인의 각도이다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 분무실내 유체흐름 분포

공기 유량 5 m³/min, 공기 유입온도 453.15 K, 공기 분산기 배인 각도

30°의 조건에서 액적이 존재하지 않을 경우 건조실 내 유체의 흐름분포를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 우측의 화살표로 표시된 부분은 유체의 흐름 방향을, 좌측은 축방향 속도분포를 보여준다. 분무실 하부의 유로가 좁아지는 부분에서 일부의 유체가 위쪽으로 재순환하는 것을 볼 수 있다.

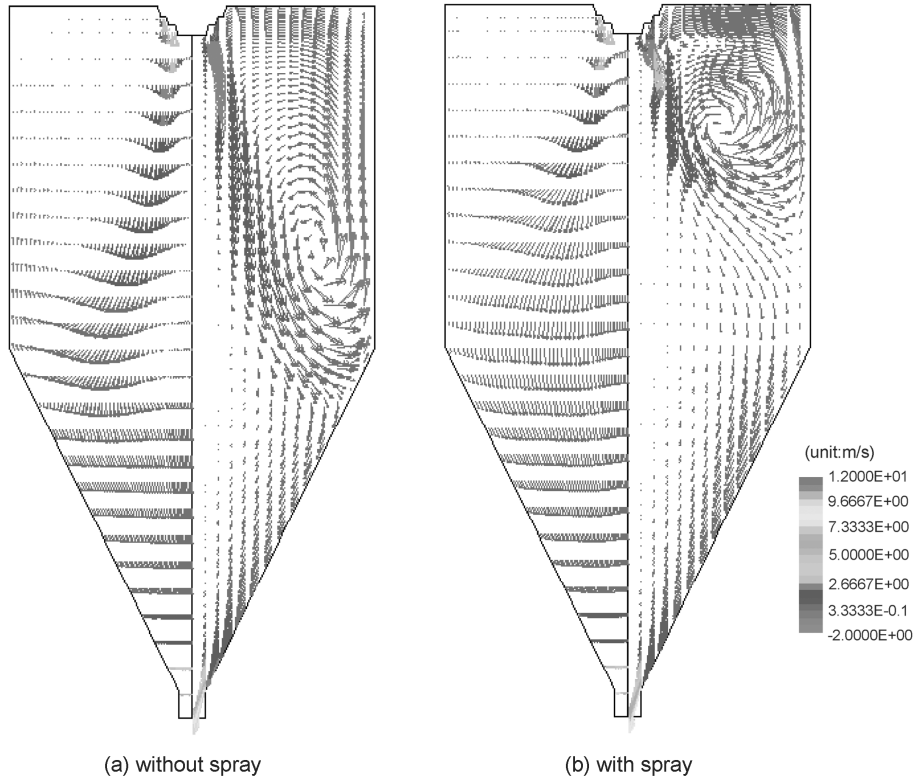


Fig. 5. Effect of spraying on gas flow distribution. (air velocity: 5 m³/min, air temperature: 453.15 K, vane angle: 30°)

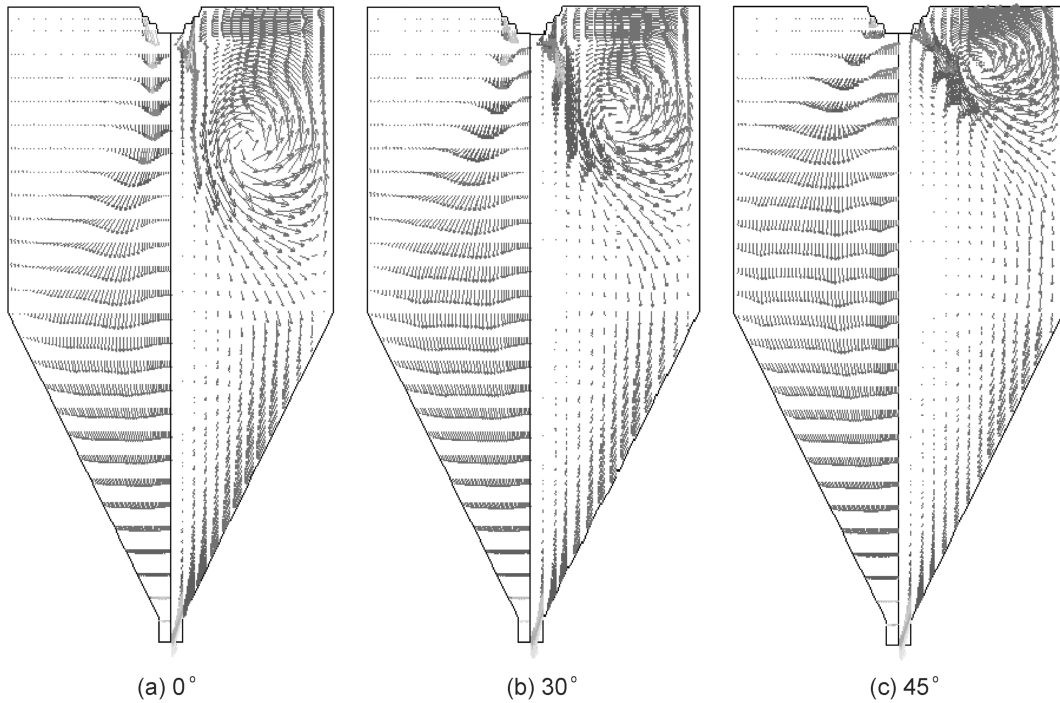


Fig. 6. Effect of vane angle on gas flow pattern. (air velocity: 5 m³/min, air temperature: 453.15 K, rotating velocity of disk: 21,000 rpm).

이러한 유체의 재순환 현상은 타 연구자들에 의해서도 보고 된 바 있다. 위의 조건에 부가하여 슬러리를 13.2 L/hr로 공급할 경우 유체흐름 분포에 미치는 영향을 알아보았다. 슬러리 내 수분함량은 87 wt%, 회전원반 회전속도 21,000 rpm으로 하였다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 유체의 재순환 영역이 건조실 상부 쪽으로 이동하였다. 그 이유는 액적이 회전원반으로부터 건조실 중심에서 벽 쪽으로 수평방향으로 빠른 속도로 회전하면서 분출됨으로써 액적이 가지는 수평방향의 운동량이 유체에 전달되었기 때문으로 생각된다(상기 조건에서 액적의 분출속도는 110 m/s임).

유입되는 건조용 공기의 선회전도가 유체흐름 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 기타 실험조건은 일정하게 유지한 채 공기분산기의 배인 각도를 0, 30, 45°로 변화시켰다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 배인 각도가 증가할수록 재순환 영역이 분무 건조실 천장 쪽으로 그리고 벽 쪽으로 이동하였다. 또한, 배인 각도가 증가할수록 건조실 상부 중심부분에서 유체의 흐름방향이 위쪽으로 나타나고 그 강도가 증가함을 알 수 있다. 배인의 각도가 증가하면 공기의 선회전도가 늘어나 액적의 분무 건조실 내 체류시간이 늘어나는 장점이 있지만, 유체의 흐름을 따라 액적이 움직일 경우 건조가 채 되기도 전에 액적이 건조실 벽이나 천장에 달라붙는 문제가 생길 수도 있음을 시사해 주고 있다.

4-2. 분무실내 액적의 거동

배인 각도 30°(기타 운전조건은 위와 동일)에서 37.5 μm, 97.5 μm, 187.5 μm 등 3가지 입경을 가진 액적의 분무 건조실내 거동을 조사하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 37.5 μm와 187.5 μm 액적은 서로 다른 궤적을 그리며 건조실 하부로 떨어진다. 그러나, 중간크기의 97.5 μm 액적은 위 아래로 돌며 30초가 지난 후에도 아직 건조실 내에 머물러 있는 것을 볼 수 있다. 37.5 μm 액적은 질량이 작아 회전원반에서 분출된 후 곧 운동량을 잃어버려 수평방향으로 멀리 날아가지 못하고 유체 흐름을 따라 아래로 하강한다. 이에 비해 97.5 μm 액적은 수평방향으로 더 멀리 날아가게 되어 재 순환 유체흐름에 휩쓸리게 되는 것으로 생각된다. 그 액적의 궤적이 Fig. 6의 유체흐름 재 순환과 모양을 같이하고 있는 점이 이 것을 뒷받침한다. 187.5 μm 액적은 질량이 커서 유체흐름 재 순환 영역에 들어가더라도 유체흐름에 휩쓸리지 않고 중력에 의해 낙하하는 것으로 생각된다. 이 전의 연구에서는 이와 같은 액적의 분무

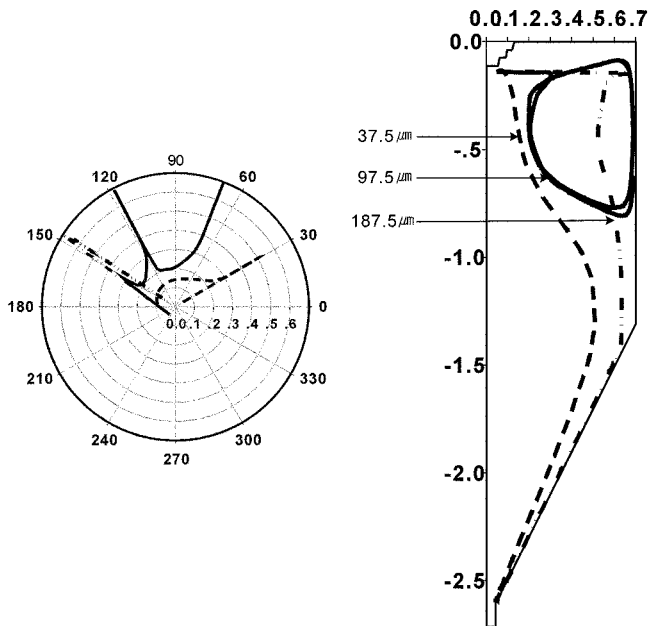


Fig. 7. Behaviors of droplets depending on sizes.

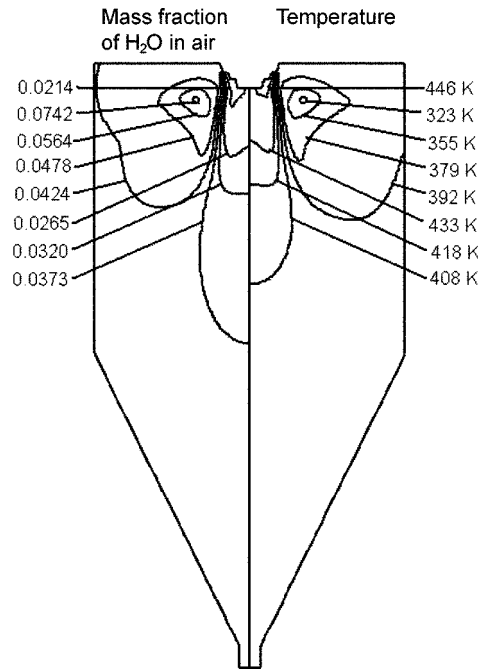


Fig. 8. Contours of temperature and moisture content in drying chamber.

실내 재 순환 현상에 대해 보고 된 바가 없다. 유체를 따라 재 순환되는 액적은 그 수가 늘어남에 따라 서로 충돌 합체되어 재 순환영역을 빠져 나올 것으로 생각되는데 본 연구에서는 이 점을 고려하지 못했다.

4-3. 건조특성

Fig. 8은 슬러리 공급유량 13.2 L/h, 공기 유량 5 m³/min, 공기 유입온도 433.15 K, 유입 공기내 수분의 몰분율 0.02, 배인 각도 30°의 조건에서 분무실 내 온도와 유체 내 수분 함량을 등고선으로 표시하고 있다. 온도 등고선 중 323 K는 습구온도에 해당하는 온도로서 그 지역은 이미 앞에서 언급된 바와 같이 액적으로서의 열 전달과 건조에 따른 증발잠열이 갈게 되는 항률 건조구간이며 건조 속도가 높은 지역이다. Hayashi [15]의 실험결과에 의하면 비슷한 위치에서 유체의 온도가 최소가 되는 것으로 나타난다. 유체 내 수분 몰분율을 나타내는 등고선도 그 지역에서 0.0742로 최고점으로 나타났는데 이 것 또한 건조가 왕성하게 일어나고 있음을 반증하는 것이다. 분무 건조실의 중심 부분은 온도가 상대적으로 높는데 그 이유는 건조실 중심부분에 존재하는 액적의 수가 많지 않고 있다 하더라도 액적의 크기가 작기 때문에 수분 증발 절대량이 상대적으로 작기 때문일 것으로 생각된다.

Fig. 9는 액적 크기별 시간에 따른 수분함량의 변화를 나타내고 있다. 37.5 μm 크기 액적의 경우 거의 순간적으로 건조가 완료되며, 97.5 μm 크기 액적은 평형습수율까지 건조되는데 약 2초의 시간이 걸리며, 187.5 μm 일 경우에는 약 6초의 건조시간이 필요한 것으로 계산되었다. Fig. 10은 건조시간에 따른 액적크기별 액적의 온도변화를 보여주고 있다. 37.5 μm 액적은 건조가 순식간에 일어난 후 곧 바로 입자(액적은 건조에 의해 입자로 바뀜)의 온도가 유체 온도까지 상승하였고, 97.5 μm 액적의 온도는 약 2초 동안 습구온도를 유지하다가 임계습수율에 도달한 이후 온도가 상승하였으며, 187.5 μm 액적은 보다 오랜 시간동안 습구 온도를 유지한 후 유체의 온도까지 상승하였다. 각 크기 별로 입자의 최종 온도가 다른 것은 입자의 위치가 같지 않고 건조실 내 위치별 유체 온도에 차이가 있기 때문이다.

동일한 조건 하에서 삼영화학기계와 한국에너지기술연구원 공동으로 수행된 실험결과와 비교해 보았다. 실험데이터는 회전원반 60 cm 밑에

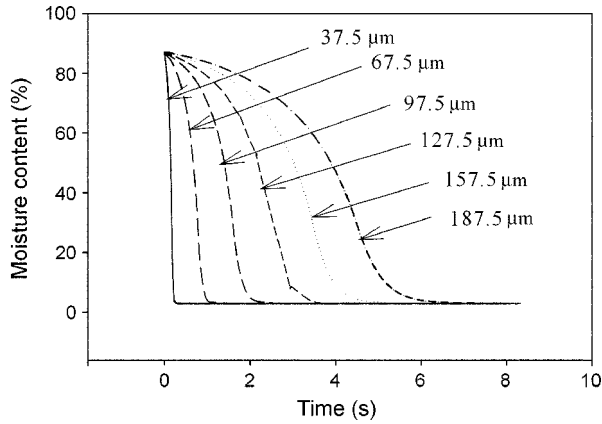


Fig. 9. Variation of moisture content with time for varying droplet sizes.

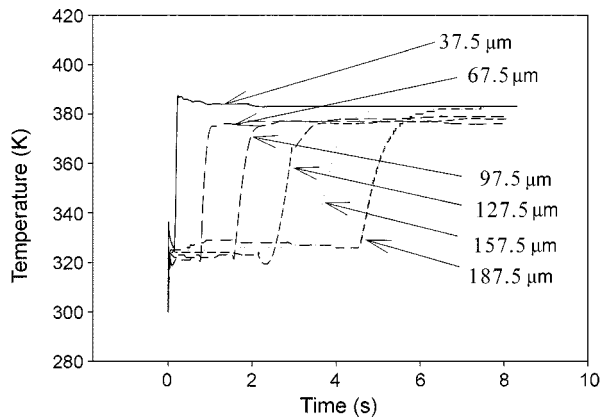


Fig. 10. Variation of droplet temperature with time.

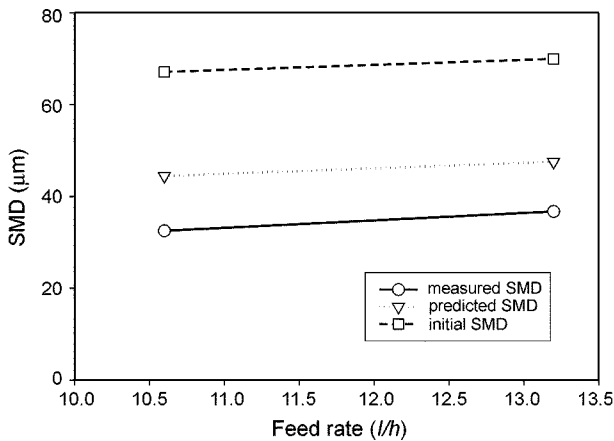


Fig. 11. Comparison in particle size between model prediction and experimental data.

서 채취한 입자의 SMD(sauter mean diameter)로서 슬러리 공급량이 10.6 L/h 일 때 30.1 μm , 13.2 L/h 일 때 32.5 μm (Fig. 11에 실선으로 표시)이었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 계산된 입자의 크기(점선으로 표시)는 약 15 μm 정도 더 크게 나왔으며, 슬러리 유량 증가에 따른 입경 변화 추세는 실험 결과와 비슷하였다. 참고로 식에 의해 추정하여 계산에 사용된 액적의 초기직경을 Fig. 11에 함께 표시하였다. 액적 초기직경에 대한 실험데이터는 구할 수 없었다. 실험값과 계산된 건조입자 크기의 차이는 초기 액적 크기의 차이에 기인한다고 생각된다. 계산에 의하면, 회전원반 하부 60 cm 지점에서 입자의 건조율은 거의 평형함수율에 도달하였는데, 실험데이터는 함수율 10% 미만으로 보고 되었다. 건

조율 비교를 위해 보다 구체적인 실험데이터가 필요하다고 생각된다. 실험데이터의 부족으로 인하여 계산결과와의 비교 분석이 깊이 이루어지지 못한 점이 아쉬우며, 앞으로 실측 데이터와의 비교 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

전산유체 계산 프로그램 중 하나인 CFX4를 이용하여 분무건조기의 분무실내 유체흐름 분포, 액적의 거동, 건조 현상 등을 살펴보았다. 분무실내의 유체는 아래쪽이 좁아지는 구조로 인하여 중심에서 내려와서 벽 쪽으로 올라가는 커다란 재 순환 영역을 형성하였다. 기체장 내에 액적이 존재하게 됨으로써 유체의 흐름에도 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 액적이 재 순환 영역으로 들어가지 않을 만큼 가벼운 경우는 중심에서 크게 벗어나지 않고 아래로 떨어졌고 조금 더 무거운 것은 재 순환 영역을 따라 움직였다. 이 보다 더 질량이 클 경우 유체 흐름에 큰 영향을 받지 않고 아래쪽으로 이동하였다. 선회를 주기 위해 공기분산기의 vane의 각도를 0°, 30°, 45°로 변화시켰을 때 유체의 재 순환 영역이 위쪽으로 이동하였으며 분무된 액적도 재 순환 영역을 따라 움직였다. 또한 선회가 큰 경우 분무되는 액적은 상부에서 크게 원을 그리며 아래로 떨어져 체류시간이 길어지는 효과가 있었다. 베인 각도가 너무 커지면 재 순환 영역이 상부에 형성되기 때문에 건조되지 못한 액적이 벽에 부딪힐 우려가 있다. 따라서 베인 각도를 적절하게 유지시킬 필요가 있다고 생각된다. 건조실 상부에서 가장 낮은 온도가 형성되는 것으로 보아 액적이 이 부근을 지날 때 습구 온도에 도달하여 많은 양의 수분이 증발되는 것으로 보인다. 슬러리의 유량 10.6, 13.2 l/h, 원반 회전 속도 21,000 rpm, 베인 각도 30°일 때 회전원반 하부 60 cm에서 계산된 액적의 평균 입경은 실험 값 보다 큰 값을 보였는데, 이는 초기 액적입경 예측과정에서 발생한 오차에 기인하는 것으로 추측된다. 본 분무건조계산의 정확성을 검증하기 위해서는 보다 많은 실험결과와의 비교분석이 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

감 사

본 논문은 에너지관리공단 지원 연구 결과의 일부분으로서 연구비 지원기관에 감사드립니다.

사용기호

- A_d : surface area of droplets per unit volume of drying chamber [1/m]
- B : Spalding number
- C_p : specific heat of air [J/kg $^{\circ}\text{C}$]
- C_D : drag coefficient
- C_1 : coefficient in Eq. (16)
- C_2 : coefficient in Eq. (16)
- C_{μ} : coefficient in Eq. (14)
- C_v : specific heat of water vapor [J/kg $^{\circ}\text{C}$]
- c_d : specific heat of droplet [J/kg $^{\circ}\text{C}$]
- D : diffusivity [m 2 /s]
- d : diameter [m]
- g : gravitational acceleration [m/s 2]
- H : enthalpy of gas [J]
- H_i : enthalpy of i^{th} component
- h : vane height [m]
- k : thermal conductivity [W/K/m]
- K : coefficient in Eq. (42)

L : latent heat of water vaporization [J/kg]
 M : slurry mass flowrate [kg/hr]
 m : mass [kg]
 $\Delta \vec{M}_d$: loss of momentum of droplets per cell [kg m/s]
 n : number of vanes
 N : rotation speed of disk [1/min]
 Nu : Nusselt number
 P : pressure, pascal
 Q : volumetric flow rate of slurry [m³/hr]
 Q_C : flux of heat transfer from gas to droplet [J/s]
 Q_M : rate of heat consumed by vaporization of water [J/s]
 r_β : volume of droplets per unit volume of drying chamber
 R : outer diameter of vane of air disperser [m]
 R_h : inner diameter of vane of air disperser [m]
 Re : Reynolds number
 S_P : source term in Eq. (1) and (2)
 Sh : Sherwood number
 t : time [s]
 T : temperature [K]
 \vec{U} : gas velocity [m/s]
 \vec{v} : droplet velocity [m/s]
 W_C : molecular weight of water [kg/kmol]
 W_G : average molecular weight of gas phase [kg/kmol]
 X_v : mole fraction of water vapor at the surface of droplet
 X_G : mole fraction of water vapor in the gas phase
 X : weight fraction of water in droplet
 X_i : mole fraction of ith component in the liquid phase
 Y_i : mole fraction of ith component in the gas phase

그리스 문자

α : vane angle
 σ_g : geometric standard deviation
 k : turbulent kinetic energy [m²/s²]
 μ : viscosity [kg/m/s]
 $\dot{\eta}_i$: number of particles of ith size group passing through a cell per unit time [1/s]
 ρ : density [kg/m³]
 τ : shear stress [kg/m/s²]
 ε : turbulent energy dissipation rate [m²/s³]
 ω : angular velocity [rad/s]

하첨자

cr : critical point
 d : droplet

eq : equilibrium point
 eff : effective
 g : gas
 l : laminar
 p : particle
 r : in radial direction
 t : turbulent
 vap : vapor
 w : in tangential direction
 x : in axial direction

참고문헌

1. Dickinson, D. R. and Marshall, W. R.: *AIChE J.*, **14**, 541(1968).
2. Parti, M. and Paláncz, B.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 355(1974).
3. Chow, L. C. and Chung, J. N.: *Int. J. Heat & Mass Transfer*, **26**, 373 (1983).
4. Crowe, C. T., Sharma M. P. and Stock, D. E.: *J. Fluids Eng.*, **99**, 325 (1997).
5. Launder, B. E. and Spalding, D. B.: *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, **3**, 269(1974).
6. Sano, Y.: *Drying Tech.*, **11**, 697(1993).
7. Kim, H. J.: Master Thesis, KAIST, Daejeon(1991).
8. Oakley, D. E. and Bahu, R. E.: Computational Modeling of Spray Dryers, European Symposium on Computer Aided Process Engineering-2, 493 (1992).
9. Livesley, D. M., Oakley, D. E. and Yeoman, M. L.: "Development and Validation of a Computational Model for Spray-Gas Mixing in Spray Dryers," AEA Report, AEA-InTec-0759(1991).
10. Ministry of Commerce, Industry and Energy: "The Study of the Derelopment of a High Efficiency Dise Type Spray Dryer," 1997-E-ID01-49(2000).
11. Katta, S. and Gauvin, W. H.: *AIChE J.*, **21**, 143(1975).
12. CFX4 Solver Manual, AEA Technology(1997).
13. Master, K.: "Spray Drying Handbook," 4th ed., George Godwin, London (1985).
14. Beer, J. M. and Chigier, N. A.: "Combustion Aerodynamics," Halsted Press Division, Wily, New York(1972).
15. Hayashi, H.: "Studies on Spray Drying Mechanism of Milk Powders," Rep Res Lab Snow Brand Products, Japan, 66(1962).