

열건조기내에서 슬러지 입자의 증발현상에 관한 수치해석 연구

구 본 기* · 김 상 수**

(1997년 10월 1일 접수)

A Numerical Study on Evaporation of Sludge Particles in a Sludge Dryer

Bon-Ki Ku and Sang-Soo Kim

Key Words : Moisture Content(함수율), Spray Dryer Model(액적 증발 모델), Sludge(슬러지), Residence Time(체류시간)

Abstract

The evaporation of sludge particles in a sludge dryer has been numerically investigated with commercial CFX4.1 code. Gas flow field, gas temperature field, sludge particle trajectories, and the moisture content variation of sludge particles are calculated for various influencing factors, i. e., gas swirl velocity, initial particle distribution, gas temperature. Evaporation of sludge particles increases with gas swirl velocity, several supplying positions, and gas temperature, respectively due to increased residence time, increased contacting surface area, and increased temperature difference between gas and particle.

1. 서 론

대량의 슬러지를 원하는 함수율을 갖는 슬러지로 신속하게 건조시킬 수 있는 열건조기를 설계하기 위해서, 슬러지 종류 및 특성과 기체의 초기조건에 따른 건조기의 최적 운전조건의 확립이 특히 중요하다. 슬러지의 함수율은 소각시 공급되는 에너지의 양을 줄이고 보다 경제적으로 슬러지를 소각시키는데 있어서 가장 중요한 변수이다. 일반적으로 슬러지의 함수율을 줄이는데 이용되는 방법으로는 중력침강에 의한 탈수법(3~9% 고체함유), 기계적인 탈수법(25~35% 고체함유) 등이 있으나, 소각이 활발히 일어날 수 있는 함수율이나 20~30% 함수율(70~80% 고체함유)로 낮추기 위해서는 슬러지 열건조는 필수적이다.^(1~3)

새로운 열건조 시스템을 설계하기 위하여 수치적

으로 해석할 경우, 경제적으로 시간과 비용을 크게 줄일 뿐만 아니라 기초적인 실험데이터와의 비교를 통하여 다양한 열건조 시스템에서의 피건조물의 이동, 온도, 건조속도 등을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 슬러지 열건조기 내부에서의 고온의 열풍과 슬러지 입자간의 열 및 물질전달 현상을 규명하고, 기체의 온도 및 선회속도에 따른 슬러지 함수율의 변화, 온도 등을 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 슬러지 열건조기 구조 및 작동

슬러지 열건조기는 호퍼로부터 케이크 형태로 공급되는 슬러지 폐기물을 건조기내의 파쇄기로 입자상으로 잘게 쪼개면서 외부로부터 건조기내로 고온의 열풍을 불어 주어 젖은 슬러지 입자를 건조시키는 장치이다. 다양한 열건조기 중에서 수평형 드럼식 건조기는 케이크상의 슬러지가 입자상으로 잘게

*한국과학기술원 대학원 기계공학과

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

분쇄되고 650~700°C의 열풍과 직접적으로 접촉하기 때문에 건조속도가 매우 빨라 많이 이용된다.⁽⁴⁾ 또한 기계적인 탈수와 간접적인 열교환 방식을 사용하는 건조기보다 함수율과 건조속도에 제한을 적게 받기 때문에 실제적으로 많이 사용되고 있으며 열원으로 사용되는 고온의 기체를 소각시 나오는 폐열로 사용할 수 있어 에너지 효율면에서도 큰 잇점이 있다.

2.2 수학적 모델

2.2.1 순수 기체의 지배방정식

입자와 열교환을 하는 기체의 지배방정식을 살펴보면 다음과 같다. 기체는 고온의 공기로서 열건조기 입구로 수평으로 유입되어 우측의 출구를 통해 방출된다. 주어진 시스템이 축대칭이 아니지만 건조기 본체만을 볼 때 파이프 유동으로 취급될 수 있으므로 2차원 축대칭 유동으로 간주하고 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- ① 비압축성 정상상태의 유동이다.
- ② Newtonian 유체이다.
- ③ 벽면은 단열 조건을 만족하고 유동은 벽면에서 비미끄럼 조건을 만족한다.

이에 따른 기체 유동의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{연속 방정식: } \nabla \cdot \rho \vec{U} = \dot{m}_{in} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{운동 방정식: } \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) \\ = -\nabla p'' + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U} - \rho \overline{\vec{u} \otimes \vec{u}}) \\ + \rho \vec{g} + \dot{m}_{in} \vec{U}_p \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 방정식: } \nabla \cdot (\rho \vec{U} H) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_T}{\sigma_H} + \frac{\lambda}{C_p} \right) \nabla H \right) \\ = \frac{\partial p}{\partial t} - q_c + q_M \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \otimes 는 텐서곱(tensor product) 연산자로서 텐서곱 $(\vec{U} \otimes \vec{U})_{ij} = U_i U_j$ 로 정의되고, \dot{m}_{in} 은 입자상에서 기체상으로의 단위부피당 질량유량이고, q_c 는 기체상에서 입자상으로의 단위부피당 대류열 전달량, q_M 은 입자로부터의 단위부피당 증발잠열, \vec{U}_p 는 입자의 속도이다. 그리고, \vec{U} 는 기체의 평균 속도, \vec{u} 는 요동 속도, H 는 엔탈피, λ 은 열전도 계수, C_p 는 정압 비열, σ_H 은 엔탈피의 난류 프란틀수, p'' 은 변형된 압력으로 다음과 같이 표현된다.

$$p'' = p - \rho_0 \phi \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 $\nabla \phi = \vec{g}$ 를 만족하는 값이다.

열건조기 내에서의 기체 유동은 난류유동이므로 난류계산을 위해 사용된 표준 $k-\epsilon$ 모델은 다음과 같다.

표준 $k-\epsilon$ 모델:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) - \nabla \cdot \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} \\ = P + G - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \vec{U} \epsilon) - \nabla \cdot \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right\} \\ = C_1 \frac{\epsilon}{k} \{ P + C_3 \max(G, 0) \} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_T \quad (7)$$

$$P = \mu_{eff} \nabla \vec{U} \cdot \{ \nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \} \quad (8)$$

$$G = -\frac{\mu_{eff}}{\rho \sigma_T} \vec{g} \cdot \nabla \rho \quad (9)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k - \rho_0 \phi \quad (10)$$

여기서 P 와 G 는 각각 전단응력에 의한 생성항(shear production)과 부력에 의한 생성항(buoyancy production)이고 p' 과 p 는 각각 변형된 압력과 실제 압력이다.

2.2.2 액적 증발 모델 (spray dryer model)

액적 증발 모델이란 질량 변화와 열전달이 동시에 일어나는 성분을 포함하는 입자의 열 및 물질전달을 계산하기 위한 모델이다. 열건조기에서 고온, 건조한 공기와 열교환을 하는 젖은 슬러지 입자의 증발현상을 모델링하기 위하여 액적 증발 모델을 사용한다. 이 모델을 슬러지 입자에 적용할 때 사용된 가정은 다음과 같다.

- ① 슬러지 입자는 구형이며 균일한 크기를 갖는다.
- ② 수분을 함유한 슬러지 입자의 내부온도는 균일하다.
- ③ 슬러지 입자의 표면은 충분히 젖어 있고 내부에 있는 수분이 표면으로 이동할 때의 저항은 무시한다.
- ④ 증발에 의해 질량이 감소한 슬러지 입자는 또한 구형이다.

젖은 슬러지 입자의 질량변화율은 Antoine(5)식에 의해 지배되며, Antoine 식은 다음과 같다.

$$p_{vap} = \exp\left(A - \frac{B}{T+C}\right) \quad (11)$$

여기서 A , B , C 는 증발이 일어나는 물질에 따라 결정되는 상수값이고 T 는 입자의 온도이다. Antoine 식으로 계산한 수증기압이 주위기체내의 수증기압보다 크면 입자표면에서 수분이 증발되며 주위기체내의 수증기압과 평형을 이룰 때까지 증발이 일어난다. 그리고 슬러지 입자의 온도와 수분의 끓는점과의 상대적인 크기에 따라 입자의 증발이 다른 메카니즘에 의해 일어나는데 입자의 온도가 끓는점보다 높을 때 질량변화율은 비등에 의해 일어나고 그 반대의 경우에는 확산에 의해 일어난다. 이 두가지 경우에 대한 질량변화율은 다음과 같다. 입자의 온도가 끓는점보다 높을 때 :

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{Q_c}{V} \quad (12)$$

입자의 온도가 끓는점보다 낮을 때 :

$$\frac{dm}{dt} = \pi d S h \frac{W_c}{W_c} \log\left(\frac{1-X}{1-X_c}\right) \quad (13)$$

여기서 Q_c 는 대류 열전달량, V 는 증발 잠열, W_c 와 W_o 는 각각 수증기와 기체의 분자량이고 X 와 X_c 는 각각 입자와 기체내의 수분의 몰분율(molar fraction)이다. 젖은 슬러지 입자가 열전조기내에서 이동하면서 입자내의 수분이 증발하고 그 결과 입자의 수분 몰분율은 감소하고 기체내의 수분의 몰분율이 증가하는데, 수치해석시 이 효과가 고려되었다. 그리고 Sh 는 셔우드수(Sherwood number)로서 Ranz와 Marshall(6)에 의해 $2.0 + 0.6Re_a^{0.5}Sc^{0.33}$ 로 주어지고 이 관계식이 적용되는 Re_a 범위는 $0 \leq Re_a \leq 200$ 이고 Sc 범위에는 제한이 없다. d 는 슬러지 입자의 지름이고 D 는 증발되는 물질의 질량 확산계수(mass diffusion coefficient)이다. 수치계산에 사용한 입자는 지름이 $1E-3$ m인 입자로 Re_a 가 약 4.0에 해당되고 확산계수는 입자의 온도가 물의 비등점(373K)이하일 때의 경우에 사용되므로 입자의 온도가 300K일 때의 값인 $2.60E-5$ m^2/s 을 근사값으로 사용하였다.

2.2.3 입자/기체 혼합 모형

전조기내로 유입되는 젖은 슬러지 입자는 운동량, 열 및 물질전달을 통해 고온의 기체의 유동장, 온도장 그리고 습도에 중대한 영향을 준다. 입자와 고온의 기체는 입자의 궤적을 따라 계속해서 운동

량 및 에너지를 교환하는데 본 연구에서는 PSI-Cell(Particle Source In-Cell) 모델을 이용, 입자와 고온의 기체가 상호 영향을 주는 two-way coupling 방식으로 계산하여 입자의 거동과 기체의 열/유동을 해석하였다. PSI-Cell 모델에서는 액적이 지나는 각 격자에서 액적이 주위기체에 미치는 운동량, 열 및 물질전달을 생성항(source term)으로 포함시켜 기체 유동장 및 온도장을 계산한다. 이 기체의 유동장 및 온도장을 이용한 액적의 궤적으로부터 다시 생성항이 재계산되며 이 과정이 수렴될 때까지 반복된다. 한편, 입자가 포함되지 않은 순수 기체의 유동장 및 온도장을 입자방정식과는 독립적으로 먼저 계산한 후, 그 결과를 가지고 입자의 궤적 및 온도를 계산하는 one-way coupling 방식에서는 입자가 기체의 유동장에 미치는 영향을 무시하는데, 이는 증발을 수반하는 입자가 존재할 경우, 기체의 유동장 계산시 큰 오차를 가져올 수 있다. 이에 반해서 two-way coupling 방식에서는 입자의 운동량, 열 및 물질전달을 기체의 유동장에 생성항으로 포함시킴으로써 기체와 입자간의 상호작용을 고려해 주기 때문에 입자가 기체의 유동장 및 온도장에 주는 효과를 좀더 실제 현상에 가깝게 계산할 수 있다. 생성된 입자와 기체의 운동을 해석하는데 사용된 가정은 다음과 같다.

① 입자간의 상호작용이 무시가 가능한 희박 농도분포이다.

② 슬러지 호퍼와 열풍 주입 부분을 무시한다.

③ 슬러지 입자는 균일한 크기와 질량유속을 가진 원형입자로 유입된다.

④ 입자의 운동방정식은 점성력(viscous drag)만을 포함하며 그외의 다른 힘들은 무시한다.

입자와 주위 가스와의 열전달 및 물질전달, 그리고 입자의 온도 변화를 나타내는 방정식은 다음과 같다.

$$\text{대류 열전달 : } Q_c = \pi d \lambda Nu (T_c - T) \quad (14)$$

$$\text{증발 잠열 : } Q_M = \frac{dm_c}{dt} V \quad (15)$$

$$\text{열전달 방정식 : } \sum (m_c C_p) \frac{dT}{dt} = Q_c + Q_M \quad (16)$$

여기서 T_c 와 T 는 각각 기체와 입자의 온도이고 V 는 증발 잠열이고 m_c 는 입자를 구성하는 성분의 질량이다. 그리고 Nu 는 누셀트수로서 $2.0 + 0.6Re_a^{0.5}Pr^{0.33}$ 으로 주어진다(6). 식(16)을 사용하여 슬러지 입자의 온도를 계산할 때 입자를 구

성하는 모든 성분들의 열용량을 고려하여 계산한다.

젖은 슬러지 입자가 기체유동이 존재하는 영역을 통과할 때 슬러지 입자의 거동을 지배하는 방정식은 라그랑지안 기술방법에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$m_p \frac{d\vec{v}}{dt} = C_D \rho (\vec{u} - \vec{v}) |(\vec{u} - \vec{v})| \frac{A_p}{2} + m_p \vec{g} \quad (17)$$

여기서 위식의 우변의 첫번째항은 기체유동이 입자에 가하는 점성력(viscous drag)이고 두번째항은 중력이다. 그리고 C_D 는 항력계수, \vec{v} 는 입자 속도, \vec{u} 는 기체의 속도, m_p 는 입자의 질량, A_p 는 입자의 단면적, \vec{g} 는 중력 가속도이다. 수치계산시 중력은 무시하였다.

항력계수 C_D 는 기체와 입자의 상대속도로 정의되는 레이놀즈수 Re_d 에 따라 변화하는데 수치계산에 사용된 항력계수는 Ihme 등(7)이 제안한 식을 사용하였다.

$$C_D = \frac{24}{Re_d} + \frac{5.48}{Re_d^{0.573}} + 0.36, \quad Re_d \leq 2 \times 10^5 \quad (18)$$

여기서 레이놀즈수 Re_d 는 $\frac{\rho |\vec{u} - \vec{v}| d}{\mu}$ 로 정의되고 d 는 입자의 직경이고 ρ 와 μ 는 각각 기체의 밀도와 점성계수이다.

2.3 슬러지 건조기의 해석

2.3.1 슬러지 건조기의 형태 및 해석변수

본 수치해석시 사용된 슬러지 건조기는 Fig. 1에 나타나 있다. 수평형 드럼식 건조기의 입구와 출구

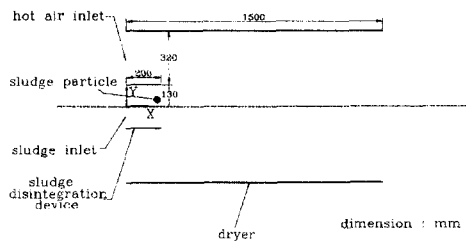


Fig. 1 Physical model of a sludge dryer.

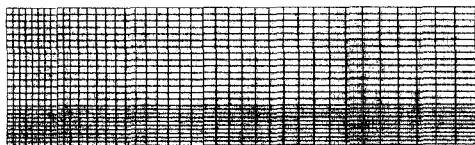


Fig. 2 Grid system.

부분을 단순화시켜 원통형 건조기 본체만을 고려하였다. 고려된 건조기에는 입구부분에 슬러지 파쇄기가 있어 케이크상의 슬러지를 입자상의 슬러지로 만들어 준다. 따라서 수치해석시 슬러지 입자는 파쇄기 출구부분에서 입자의 형태로 주입된다고 보고 슬러지 입자를 파쇄기 출구부분에서 띄워주었다. 고온의 열풍(973K)은 건조기 입구로 축방향과 접선방향 속도성분을 가지고 들어오고 슬러지 입자(293K)는 축방향과 축의 수직방향 속도성분을 가지고 유입되어 건조기내에서 슬러지 입자가 고온의 열풍과 열교환을 하면서 출구로 방출된다.

수치 해석영역의 격자는 축대칭의 2차원 경계적응(body-fitted) 격자를 사용하였다. 이에 대한 격자시스템이 Fig. 2에 나타나 있다. 수평형 드럼식 건조기를 해석하는 데 있어서, 입구에서의 열풍과 입자의 공급(feeder)조건이 건조기 내에서의 반응조건보다 슬러지 입자의 건조에 미치는 영향이 상대적으로 작으므로 슬러지 입자의 feeder부분과 고온의 열풍이 들어오는 부분을 무시하였고 또한 원통형 건조기내 슬러지 입자를 파쇄하는 블레이드와 벽면의 리프트를 무시하여 균일간격으로 격자를 구성하였다.

슬러지 열건조기에서의 기체 유동과 슬러지 입자의 거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 FDM 방식의 열유동 해석 코드인 AEA Technology사의 CFD5-FLOW3D(CFX4.1) (8, 9)를 사용하였다.

본 수치해석에 사용된 기체와 슬러지 입자의 물성치 및 초기값은 표 1에 나타나 있다.

2.3.2 입자와 순수기체의 혼합 및 입자의 건조

본 연구에서 사용한 FLOW3D는 먼저 입자가 포함되지 않은 순수 기체의 유동장을 계산하고 이 결과와 액적 증발 모델을 이용하여 유입된 슬러지 입자의 증발 과정을 해석하게 된다. 이 때 슬러지 입자의 거동은 PSI-Cell 모델(10) (Particle Source In-Cell Model)을 이용하여 해석한다. PSI-Cell 모델에서는 입자가 지나가는 각 격자에서 입자가 주위기체에 미치는 운동량, 열 및 물질의 전달량을 기체 유동 방정식의 생성항으로 포함시키고 기체 유동을 재계산하게 된다. 이 새로운 기체유동 해석결과를 이용하여 얻은 입자의 궤적으로부터 다시 생성항이 재계산되며 이 과정이 수렴될 때까지 반복계산하여 입자의 궤적과 기체의 유동장 및 온도, 습도 등을 해석하게 된다.

Table 1 Initial conditions and properties of gas and particle. (Unit : MKS)

Particle properties	Base material	density		2.30E+03
		specific heat		9.05E+02
	Mass fraction (water)	density		1.00E+03
		specific heat		4.20E+03
		latent heat		2500.8E+03
Antoine equation coefficient	A		23.196	
	B		3816.4	
	C		-46.130	
Fluid properties	viscosity		4.173E-05	
	density		3.581E-01	
	thermal conductivity		6.54E-02	
	specific heat		1.1356E+03	
Mass transfer parameters	diffusivity		2.600E-05	
	molecular weight		1.800E+01	
	specific heat		2.000E+03	
Initial conditions	particle	diameter		1.00E-03
		mass flow rate		1.00E-03
		velocities	u_p	0.1
			v_p	0.1
		moisture content		70 %
	temperature		2.93E+02	
	fluid	velocities	u	0.5
			w	0.5
		temperature		9.73E+02

본 연구에서는 70% 함수율을 가진 슬러지 입자가 건조기내로 유입된다고 가정하여 입자의 궤적을 계산하였다. 입구로 유입되는 슬러지 입자는 균일 크기의 원형입자로 가정하였고, 일정한 질량유량(1 E-3 kg/s)으로 입자를 공급해 주면서 입자의 건조를 조사하였다.

주요 계산변수로는 기체의 선회(swirl)속도, 슬러지 입자의 분포와 기체의 온도이다. 먼저 기체의 선회유동에 대해서는 기체의 선회속도가 각각 0.0 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s, 0.7 m/s, 1.0 m/s일 때 기체의 속도장 및 온도장과 입자의 함수율 및 온도 변화를 계산하였다.

다음으로 입자의 크기를 고정시킨(1 E-3 m) 상태에서 슬러지 입자를 띄워 주는 위치가 각각 한곳과

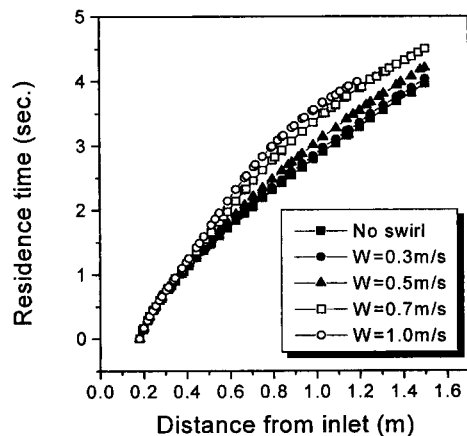


Fig. 3 Variation of residence time of particle with distance for various gas swirl velocities.

세곳일 때 입자의 궤적, 온도 및 함수율의 변화와 기체의 속도장, 온도장을 구하였다.

셋째로는 고온의 기체의 온도를 573K, 773K, 973K으로 변화시키면서 입자의 함수율의 변화 및 기체의 속도장의 변화를 조사하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 기체 유동 및 입자 조건에 따른 입자의 건조

3.1.1 기체 유동의 선회속도에 따른 결과

기체 유동의 선회속도(swirl)를 0, 0.3, 0.5, 0.7,

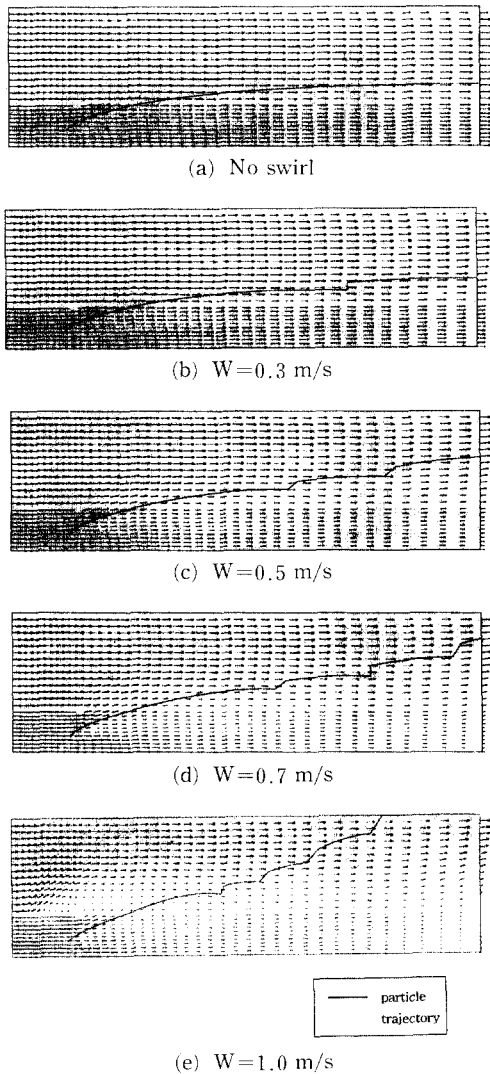


Fig. 4 Vector plot of gas flow with particle for various swirl velocities.

1.0 m/s로 변화시키면서 건조기내 기체의 유동 및 온도 분포와 입자의 함수율 및 온도 변화를 조사하였다. 이에 대한 결과가 Fig. 3~7에 나타나 있다. 기체의 선회속도가 증가할수록 슬러지 입자가 건조기내에 머무는 체류시간이 증가하고 입자의 궤적이 건조기 벽면쪽으로 더 치우치는 현상이 나타나는데, 이는 선회유동에 의한 기체의 저항력이 증가하여 입자가 축방향으로 진행하지 못하고 건조기 벽면쪽으로 밀려나면서 선회유동이 없을 때보다 입자가 건조기내에 더 오래 머무를 수 있기 때문이다. 또한 선회유동이 증가할수록 입자를 띄워 주는 입구에서 기체 속도장의 변화가 심하고 이로 인해 입자가 더 건조기 벽면쪽으로 밀려 나며 선회속도

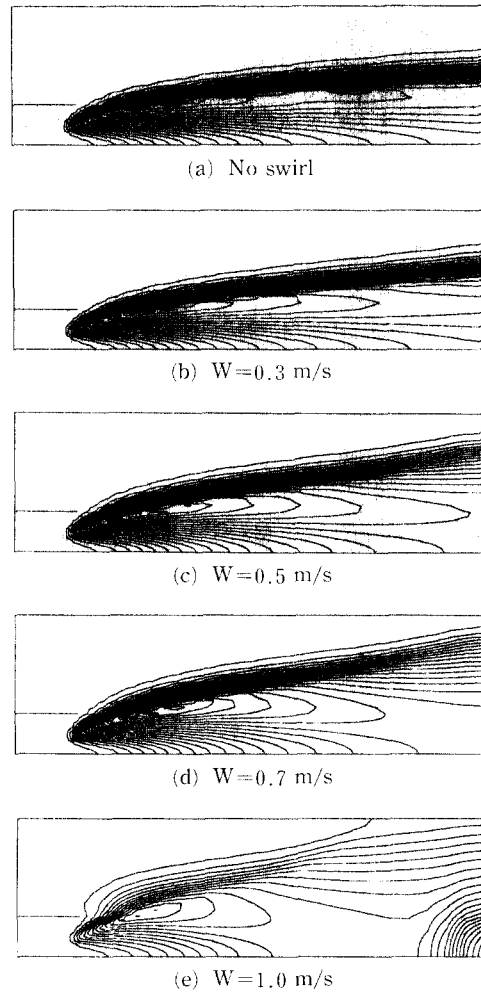


Fig. 5 Temperature contour of gas flow with particles for various swirl velocities.

가 너무 큰 경우($W=1.0$ m/s) 입자가 출구로 빠져나가기 전에 벽면에 붙게 된다. 이는 오히려 입자의 체류시간을 줄이는 것이므로 최적의 선회속도를 주는 것이 필요하다. 한편, Fig. 3~4에서 입자의 궤적이 급격하게 변하는 것은 수치결과 표기방법에 기인한다. 수치계산시 3차원 원통형상의 건조기를 실린더 좌표계로 계산할 때 z방향(Azimuthal direction)으로는 수치해가 주기적이므로 z방향 앞, 뒤 두면에 주기조건(periodic condition)을 부여해 주었다. 이로 인해 선회유동에 의해 입자가 z방향 뒷면에 부딪히면 다음 계산시에는 z방향 앞면에서 입자가 나오는 것으로 계산이 되고 실린더 좌표계로 계산한 결과를 2차원(xy평면)단면에서 그 결과를 보고자 할 때, z방향 앞, 뒤 두면을 투영해서 xy평면에 보여 주기 때문에 입자의 궤적이 급격한 변화를 보이는 것처럼 나타나게 된다. 다음으

로 선회속도가 건조기내 기체의 온도 분포에 미치는 효과를 살펴 보면, 선회속도가 증가할수록 기체와 입자간의 혼합 및 열교환이 훨씬 잘 되어 선회유동이 없는 경우와 비교할 때 선회가 존재할 때가 기체의 온도분포가 보다 균일해져서 기체의 등온선이 열건조기 전체에 퍼져 있음을 알 수 있다. 이와 관련해서 기체의 온도분포와 밀접한 관계가 있는 입자의 함수율 및 온도를 살펴보면, 5가지 선회속도 중 0.7 m/s 일때에 출구에서 가장 적은 함수율을 나타내고 있다. 이것은 기체의 선회속도로 인해 슬러지 입자의 건조기내 체류시간이 증가되고, 체류시간의 증가는 고온의 기체와 슬러지 입자간의 열교환을 할 수 있는 시간의 증가를 가져와 슬러지 입자의 함수율을 더욱 감소시키기 때문이다. 입자의 온도는 출구에서 입자가 완전히 증발하지 못함으로 인해 거의 360K를 갖는다.

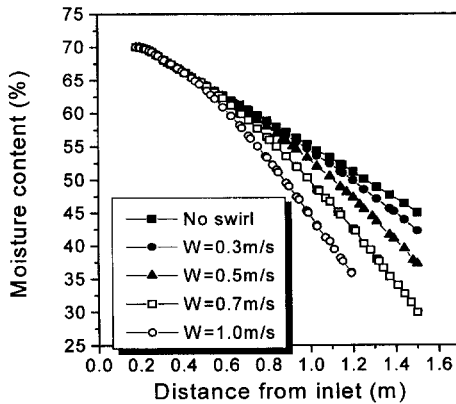


Fig. 6 Variation of particle moisture content with distance for various gas swirl velocities.

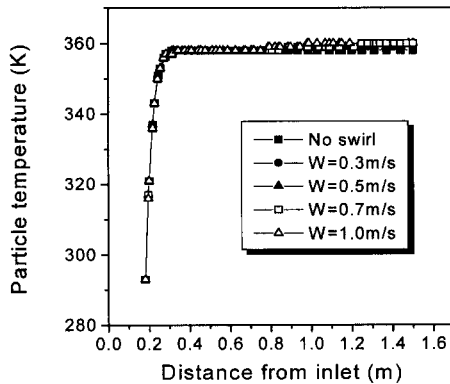
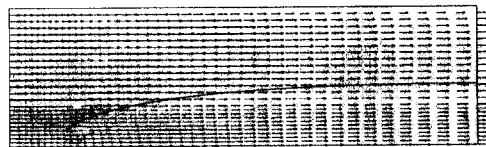
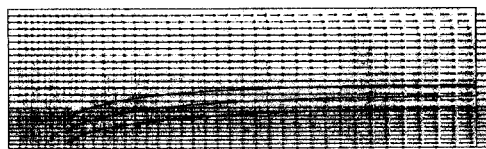


Fig. 7 Variation of particle temperature with distance for various gas swirl velocities.

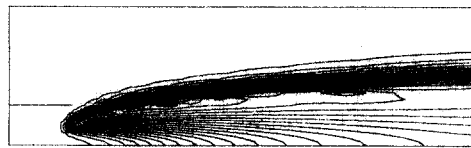


(a) One fixed position



(b) Three fixed positions

Fig. 8 Vector plot of gas flow with particle for various feeding positions.



(a) One fixed position



(b) Three fixed positions

Fig. 9 Temperature contour of gas flow with particles for various feeding positions.

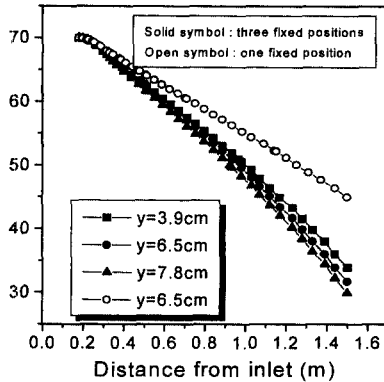


Fig. 10 Variation of particle moisture content with distance for various gas swirl velocities.

3.1.2 입자의 분포에 따른 결과

같은 슬러지 질량유량(mass flow rate)에 대해, 건조기 입구의 한 위치에서 입자를 주입했을 경우와 입구의 세 곳에서 입자를 주입했을 경우에 대해서 기체의 유동장 및 온도장과 슬러지 입자의 함수율의 변화를 조사하였다. 이에 대한 결과가 Fig. 8~10에 나타나 있다. 중력을 무시했을 때의 입자의 궤적을 보면, 한 곳에 띄운 입자는 건조기 중심부분(core region)을 따라 움직이는 반면, 세 곳에 띄운 입자는 중심부분 및 건조기 벽면쪽 이동한다. 이와 같은 현상으로 말미암아 건조기 벽면쪽의 고온의 기체와의 열교환이 활발이 일어나서, 입자로부터의 수분 증발을 촉진시킨다. 수분 증발량을 정량적으로 비교해 보면, 세 곳에 입자를 띄웠을 경우는 $5.595E-4$ kg인데 한곳에 입자를 띄웠을 경우는 $4.546E-4$ kg으로 입자가 입구 단면에 분포되어 들어올 경우가 훨씬 증발이 잘 일어난다. 세 곳에서 나온 입자들의 위치에 따라 각각의 함수율이 다르게 나타난다. 건조기 벽면에 가깝게 위치한 입자가 출구에서 함수율이 가장 낮음을 볼 수 있다. 이것은 입자를 띄운 초기에는 중심부분에 있는 고온의 기체와 입자와의 열교환이 일어나서 중심부를 흐르는 기체는 순식간에 온도가 낮아진다. 이에 반해서 벽면쪽을 흐르는 기체는 출구를 빠져 나갈때 까지 고온을 유지하기 때문에 입자의 증발을 계속해서 유지시킬 수 있다.

3.1.3 기체의 온도에 따른 결과

기체의 온도를 573K, 773K, 973K로 변화시키면서 기체의 유동장과 슬러지 입자의 함수율의 변화

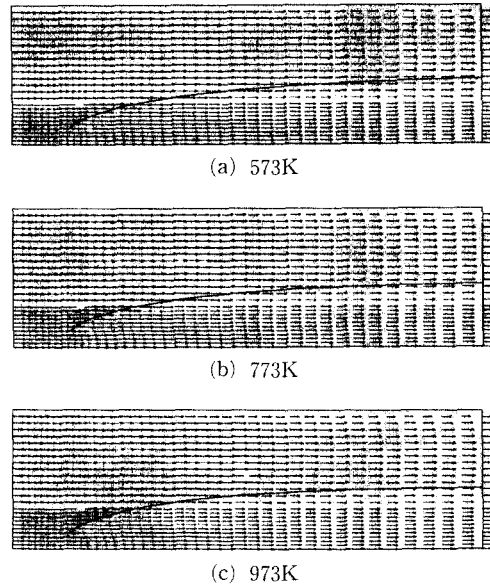


Fig. 11 Vector plot of gas flow with particles for various gas temperatures.

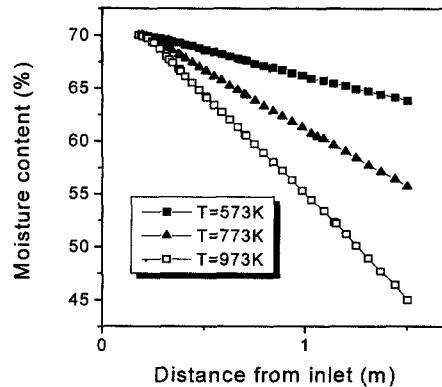


Fig. 12 Variation of particle moisture content with distance for various gas temperatures.

를 조사하였다. 이에 대한 결과가 Fig. 11~12에 나타나 있다. 먼저 기체의 유동장을 살펴 보면, 기체의 온도가 증가할수록 입자 주입구부근에서 입자 주위의 기체가 건조기 벽면쪽으로 더 밀려나는 현상이 발생하는데, 이는 기체의 온도가 증가할수록 입자로부터 수분증발량이 증가하여 입자주위의 기체를 더욱 팽창시키기 때문이다. 즉, 입자로부터의 수분증발량이 많을수록 입자가 기체유동에 미치는 운동량은 그만큼 증가하기 때문이다. 다음으로 입자의 함수율을 살펴 보면, 기체의 온도가 높아질수록 건조기 출구에서의 함수율이 상당히 작아진다.

특히 주목할만한 사항은 기체의 온도가 573K일 때는 입자의 건조가 거의 이루어지지 않아 입자의 건조에 적합하지 못하다는 점이다. 실제 슬러지 열건조기 작동온도가 거의 973K인 점을 감안할 때 Fig. 12의 결과는 어느정도 타당성을 지닌다고 볼 수 있다. 수치계산 결과, 기체의 온도가 573K, 773K, 973K일 때 건조기 출구에서 입자의 함수율은 각각 대략 65%, 57%, 45%로 나타났다.

4. 결 론

지금까지 실제의 슬러지 건조기에 가깝게 건조기 형상을 모델링하고 입자의 건조현상을 액적 증발모형을 사용하여 건조기내 입자와 기체와의 열 및 물질전달을 수치적으로 해석하였다. 본 수치계산에서는 PSI-Cell 모델을 이용하여 입자의 건조를 해석하였고 FLOW3D(CFX 4.1) 코드를 이용하여, 기체의 선회속도, 입자의 분포와 기체의 온도를 변화시키면서 기체의 유동장 및 온도장과 입자의 함수율 및 온도 변화를 조사하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 유도할 수 있다.

(1) 기체의 선회유동은 입자와 고운의 기체와의 혼합을 증가시키고 입자의 체류시간을 크게 하여 슬러지 입자의 건조를 촉진시킨다.

(2) 같은 질량유량을 공급할 경우, 슬러지 입자를 건조기 입구의 여러 곳에서 공급함으로써 건조기내의 고운의 기체와 많은 접촉을 하게 하여 슬러지 입자의 건조를 촉진시킬 수 있다.

(3) 기체의 온도가 높아질수록 입자와 기체와의 열전달량이 증가함으로 입자의 건조를 촉진시킨다.

(4) 슬러지 입자의 건조에 지대한 영향을 미치는 인자는 건조기내의 체류시간, 입자와 기체와의 혼합정도, 기체의 온도이다.

후 기

본 연구는 선도기술개발사업(G-7 프로젝트) 중 한국기계연구원 위탁과제의 지원으로 수행되었음을

알려 드립니다.

참고 문헌

- (1) Lowe, P., 1995, "Developments in the Thermal Drying of Sewage Sludge," *J. CIWEM*, No. 9, pp. 306~316.
- (2) Smollen, M., 1990, "Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction," *Wat. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 12, pp. 153~161.
- (3) Gruter, H., Matter, M. and Oehlmann, K. H., 1990, "Drying of Sewage Sludge - An Important Step in Waste Disposal," *Wat. Sci. Technol.*, Vol. 22, No. 12, pp. 57~63.
- (4) 志壇 政信, 1994, *廢棄物の焼却技術*, オーム社, pp. 159~163.
- (5) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. K., 1977, *The Properties of Gases and Liquids*, 3rd ed., McGraw-Hill.
- (6) Ranz, W. E. and Marshall, W. R., 1952, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, No. 3, p. 141
- (7) Ihme, F., Schmidt-Traub, H. and Brauer, H., 1972, *Chemie-Ing. -Tech.*, Vol. 44, No. 5, p. 306.
- (8) Computational Fluid Dynamics Services, 1994, *CFDS- FLOW3D USER GUIDE*.
- (9) Computational Fluid Dynamics Services, 1994, *Fluid Flow and Boundary Conditions*.
- (10) Crowe, C. T., Sharma, M. P. and Stock, D. E., 1977, "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows," *J. Fluids Eng.*, Vol. 99, pp. 325~332.
- (11) Kawai, S. and Kubota, A., 1982, "Drying and Granulation of Sludge Materials in Rotary Dryer Equipped with Disintegration device for Conglomerate Materials," *Proceedings of the 3rd International Drying Symposium*, Vol. 1, p. 413.