

슬러지 박막의 건조과정에 대한 건조 특성 해석

이 공 훈*, 김 옥 중

한국기계연구원 에너지기계연구본부

Analysis on the Drying Characteristics for the Drying Process of a Thin Film Layer of Sludge

Kong Hoon Lee, Ook Joong Kim

Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT: Drying process in the thin film layer of sludge with the thickness less than a few millimeters has been investigated using the simple one-dimensional model. Thin film drying is usually used to dry the viscous materials like sewage sludge. The thin film layer of sludge is dried on the metallic surface through which thermal energy is supplied to the layer during drying. In order to solve the equations, the mass transfer rate on the drying surface should be determined. The mass flux of evaporated water vapor on the surface is estimated with the formulation given in the literature. The effect of heating temperature, film thickness, and air velocity on drying has been examined to figure out the drying characteristics of the sludge layer.

Key words: Thin film drying (박막 건조), Sludge(슬러지), Moisture content(함수율), Drying temperature (건조 온도)

기 호 설 명

a_w : 수분 활성도

c : 수분 농도 (m^3/kg)

c_p : 비열 (J/kgK)

D_{AB} : 물질확산계수(m^2/s)

H : 필름 두께 (m)

h_{air} : 대류 열전달계수(W/m^2K)

h_{fg} : 수분 증발 잠열 엔탈피(J/kg)

h_m : 물질전달계수 (m/s)

h_{vap} : 총 증발엔탈피 (J/kg)

h_w : 습윤엔탈피(J/kg)

J_m : 표면의 수분 증발율(kg/m^2s)

k : 열전도율 (W/mK)

M_w : 물의 분자량 ($kg/kmol$)

$P_{v,sat}$: 포화 수증기 분압 (Pa)

R : 기체상수 ($J/kmolK$)

X : 수분 함수율 ($kgH_2O/kgDS$)

X_m : 습량기준 함수율 (%w.b.)

T : 온도 (K)

t : 시간 (s)

z : 좌표 (m)

그리스 문자

δ_{wall} : 벽 두께 (m)

μ : 점성계수 ($Pa \cdot s$)

ϕ : 상대습도 (%)

ρ : 밀도 (kg/m^3)

† Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7291; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

하첨자

air : 공기
 H : 필름의 증발 표면
 l : 액체 상태
 $steam$: 수증기
 v : 증기 상태
 w : 수분
 $wall$: 벽면
 DS : 건 슬러지
 0 : 초기 상태

1. 서론

환경오염과 에너지 소비량의 증가에 따라 산업체 및 도시 슬러지가 지속적으로 증가하고 있고, 따라서 슬러지 관리는 현대 사회의 중요한 현안이 되고 있다.⁽¹⁾ 국내의 하수 슬러지 발생량은 방류수 수질기준 강화 및 하수처리장의 정비에 따라 계속적으로 증가하여 1997년 148 만톤에서 2006년에는 274 만톤으로 계속 증가하고 있다.⁽²⁾ 2003년 7월부터 유기성 슬러지의 직매립이 금지되어 슬러지의 육상 매립은 상당히 감소되었으나, 해양 배출은 계속 증가하고 있다. 1997년 약 30 만톤이던 해양 배출은 2006년에 200만톤으로 증가하였는데, 2001년 이후에 슬러지 발생량의 73~77%의 슬러지가 해양에 배출되고 있다. 그러나, 국제 협약에 따라 해양배출이 금지되므로 환경부에서는 유해물을 함유한 정도에 따라 기준을 정하여 2008년 2월부터 기준을 초과한 하수슬러지의 해양 배출을 금지하고, 2012년 1월부터는 하수슬러지의 해양 배출을 전면 금지할 예정이다. 이에 따라 슬러지는 적절한 처리를 통하여 재이용하기 위한 기술 개발 및 보급이 시급한 실정이고, 슬러지 건조는 슬러지 재이용을 위한 중요한 수단이 된다. 슬러지는 건조를 통하여 농업용 퇴비, 탄화 연료, 골재, 시멘트 재료 등으로 활용이 가능하다. 또한 건조 후 소각을 하는 것도 매립 또는 해양 배출을 줄이기 위한 수단이 된다. 2006년의 경우에 하수 슬러지 발생량의 약 12%가 재이용 되었고, 약 11%가 소각에 의하여 처리되었다.⁽²⁾

현재 건조 전에 배출되는 슬러지는 대부분 탈수 케이크 (함수율 약 80% w.b.)의 형태로 건조에 의하여 함수율, 중량 및 부피가 크게 감소하

면 수송, 저장, 소각 또는 재이용이 용이하게 된다.⁽³⁾ 따라서 슬러지의 재이용을 위해서는 효율적인 건조기술의 개발이 필요하고 디스크, 드럼, 패들, 과열증기 등을 이용하는 다양한 건조 방법에 대한 연구들이 진행되어 왔다.⁽¹⁾

본 연구에서는 건조 효율을 높이고, 건조시간을 단축하는 데 있어서 효과적인 건조 기술을 개발하기 위하여 슬러지를 박막 형태로 건조하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 수 mm 이하의 두께를 가지는 슬러지 박막은 빠른 시간 내에 건조가 이루어지는데, 이러한 건조 현상을 분석하기 위하여 열 및 물질 전달에 관련된 1차원 모델을 수립하고, 건조 온도, 슬러지 박막 두께, 공기 속도 등이 건조에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 모델

건조 과정에서 슬러지에 함유된 수분은 슬러지 박막의 노출된 표면에서 공기 중으로 증발한다. 슬러지 박막의 표면에서 수분의 증발이 먼저 이루어지면 박막 내부의 수분이 표면 근처로 확산되어 이동하게 된다. 수분 증발에 필요한 열은 Fig. 1에 보인 바와 같이 하부에서 공급된다.

슬러지 박막의 건조 해석을 위하여 슬러지 박막은 내부에 공극이 없는 균일한 매질로 가정하였고, 수 mm 이하의 박막에 대하여 1차원 모델을 이용하였다. 박막 내부의 온도와 함수율은 초기에 균일하고, 수분의 증발은 노출된 표면에서만 일어나는 것으로 가정하였다. 편의상 건조 과정에서 박막의 두께 변화는 고려하지 않았다. 초

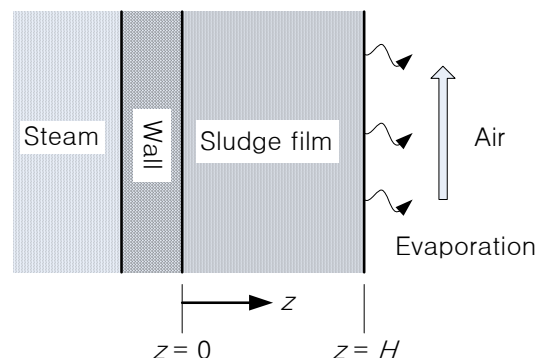


Fig. 1 Schematic of drying model

기에 슬러지 박막 내에 자유수가 존재하지 않는 것으로 가정하면 슬러지 내의 수분의 수증기 분압은 순수한 물의 수증기 분압보다 낮게 된다.⁽⁴⁾

피건조물 내부의 확산에 의한 수분의 이동은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{AB} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

건조 과정에서 피건조물 필름의 수축을 무시하면 수분 농도를 함수율로 나타낼 수 있고 ($c = \rho_{DS}X$), 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{AB} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2)$$

에너지방정식은 슬러지 박막 내의 전도에 의한 열전달을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

슬러지 필름의 밀도 ρ 와 열전도율 k 은 함수율에 따라 달라지고 수분의 확산율은 함수율과 온도의 함수로 표현된다.⁽⁴⁾ 슬러지 필름의 비열은 일반적으로 수분과 건조슬러지의 비열 질량 평균으로 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$c_p = \frac{X}{1+X} c_{p,w} + \frac{1}{1+X} c_{p,DS} \quad (4)$$

건조가 시작되는 초기에 슬러지 필름은 균일한 분포의 온도와 초기 함수율을 가지는 것으로 가정하면 초기 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X(z,0) = X_0, \quad T(z,0) = T_0 \quad (5)$$

건조에 필요한 열에너지는 Fig. 1과 같이 과열 증기에 의하여 공급받는 것으로 가정하여 다음과 같은 경계조건을 사용하였다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{T_{steam} - T(z=0)}{\frac{\delta_{wall}}{k_{wall}} + \frac{1}{h_{steam}}} \quad (6)$$

식 (6)의 우변은 열원으로 열이 공급되는 금속

벽면의 열저항과 공급된 과열 증기의 응축에 따른 응축 필름의 열저항에 의한 열유속을 나타낸다. 과열 증기의 응축에 따른 응축 필름에 대한 열전달 계수는 다음의 식을 이용하여 구한다.⁽⁶⁾

$$h_{steam} = 0.943 \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{steam} - T_{wall})} \right]^{1/4} \quad (7)$$

이 식에서 모든 물성치들은 필름 온도 $T_f = (T_{steam} + T_{wall})/2$ 의 값들을 사용하고, 증발 잠열 h'_{fg} 는 증기의 포화온도 T_{steam} 에서의 값을 사용한다. h'_{fg} 은 응축 필름 내부의 유동을 고려하여 수정된 값으로 다음과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68 c_{p,l} (T_{steam} - T_{wall}) \quad (8)$$

열에너지가 공급되는 금속에 접하는 박막의 경계면은 금속으로 수분 침투가 불가능하므로 수분 이동에 대한 다음의 경계 조건을 사용한다.

$$\frac{\partial X}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (9)$$

수분은 슬러지 필름이 공기 흐름에 노출된 표면 ($z=H$)에서 발생하며, 여기에서 질량 유속은 다음과 같이 표현된다.

$$-D_{AB} \frac{\partial X}{\partial z} \Big|_{z=H} = \frac{J_m}{\rho_{DS}} \quad (10)$$

여기에서 J_m 은 표면의 수분 증발률이다.⁽⁴⁾

$$J_m = h_m \frac{M_w}{R} \left[\frac{a_w P_{v,sat}(T_H)}{T_H} - \frac{\phi P_{v,sat}(T_{air})}{T_{air}} \right]$$

건조 공기의 물질전달계수 h_m 은 실험적 상관식으로 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 수분의 활성도(water activity)는 피건조물 내에 함유된 수분의 자유수에 대한 활동성을 나타내는 값으로 온도와 함수율에 따라 변하나 여기에서는 함수율에 따른 변화만을 고려한 값을 사용하였다.⁽¹⁾

수분 증발은 공기에 의한 대류 열전달 및 증발 잠열이 관련된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = h_{air}(T_H - T_{air}) + J_m h_{vap} \quad (11)$$

공기와 증발 표면 사이의 대류열전달 계수는 실험적 상관식으로 구할 수 있고,⁽⁶⁾ 공기의 물성치들은 습도를 고려한 값을 사용한다.⁽⁷⁾ 수분 증발에 대한 총 엔탈피는 증발 엔탈피와 습윤엔탈피(Enthalpy of wetting) h_w 로 구성된다.

$$h_{vap} = h_{fg}(T_H) + h_w \quad (12)$$

습윤엔탈피는 슬러지 내부에 고착되어 있는 수분을 제거하는데 필요한 엔탈피를 의미하고, 건조가 진행되면서 함수율이 감소할수록 증가하여 증발엔탈피보다 더 커질 수도 있다.⁽⁵⁾

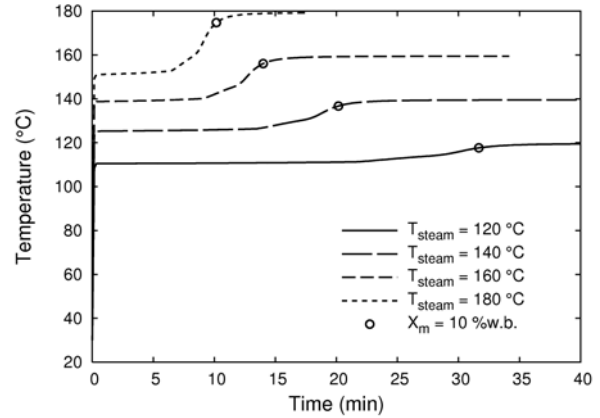
2.2 해석 방법

해석 모델에 주어진 확산 방정식과 에너지방정식을 풀기 위하여 유한체적법으로 반복계산을 통하여 결과를 구하였다. 건조 온도는 120~180°C 범위에 있고, 슬러지 필름의 초기 온도는 30°C, 초기함수율은 습량 기준 80%w.b.에 해당하는 4.0 kgH₂O/kgDS를 사용하였다. 증발 표면에 흐르는 공기의 온도는 30°C를 가정하였고, 상대습도는 50%로 일정한 값을 사용하였다. 공기의 유동은 실제 건조기의 공기 유동 속도를 고려하여 약 29000의 Reynolds 수를 사용하였다. 슬러지 필름의 두께는 1 mm를 기준으로 하여 서로 다른 필름 두께에 따른 건조 과정을 분석하였다.

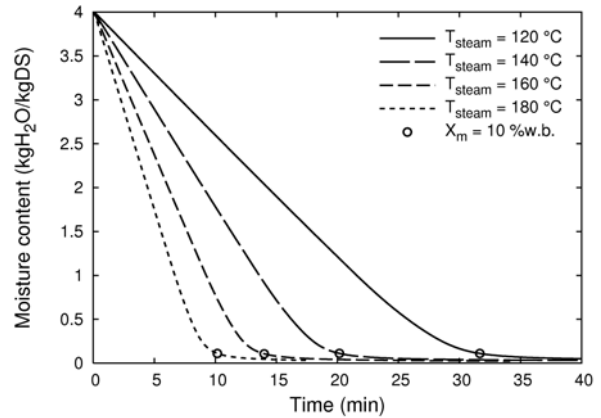
3. 해석결과

건조 과정은 크게 예열기간, 항률건조기간, 감율건조기간으로 나눌 수 있는데, 해석 결과 슬러지 박막의 건조는 Fig. 2와 같이 예열기간은 10 초 이내이고, 항률 건조 기간은 가열 온도의 증가에 따라서 크게 감소한다. Fig. 2(a)는 1 mm 두께의 슬러지 필름에 대하여 가열 온도의 변화에 따른 필름의 온도 변화를 나타낸 것이다. 예측할 수 있듯이 가열 온도가 증가하면 건조 시간이 크게 감소한다. 함수율이 높은 초기에는 가열 온도 보다 10~30°C 정도 낮은 온도에서 건조가 진행되고(항률건조) 함수율이 낮아지면 필름의

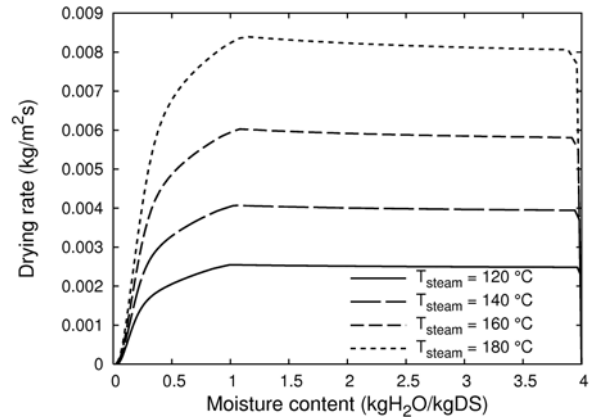
온도가 가열온도에 접근한다(감률건조). 이와 같이 항률 및 감률 건조 현상이 해석 결과에 나타나는 것은 습윤엔탈피와 수분 활성도를 고려한 해석 모델의 영향으로 이러한 값들이 해석 결과의 정확도에 영향을 미치게 된다.



(a) Drying temperature variation



(b) Moisture content variation

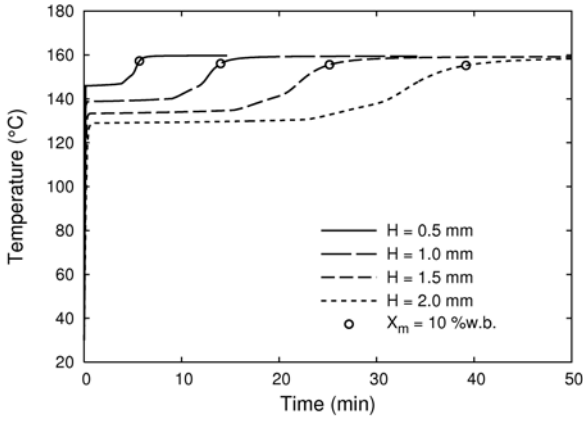


(c) Drying curve

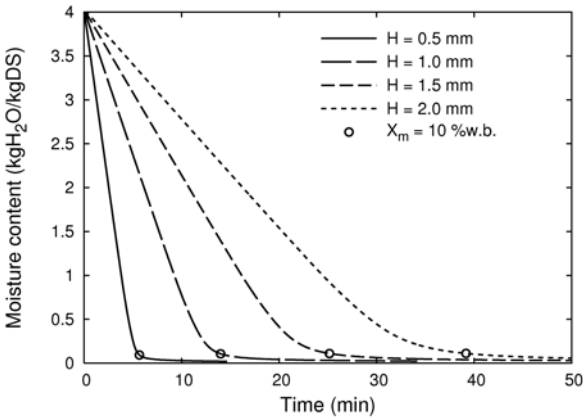
Fig. 2 Drying characteristics with heating temperature

항률건조기간에는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 함수율이 시간에 따라 거의 선형적인 변화를 보인다. 가열 온도가 180°C인 경우에는 120°C인 경우에 비하여 건조 시간이 약 30%로 감소하는 것을 알 수 있고, 고온 건조인 경우에 건조 장치의

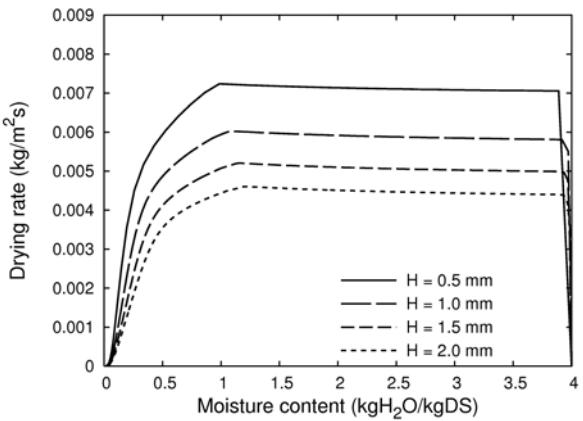
크기를 크게 줄일 수 있음을 의미한다. 항률건조기간은 Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 함수율이 약 1.0 kgH₂O/kgDS 이상인 건조 초기에 나타나며 그 이하의 함수율에서는 감률건조기간으로 건조 속도가 크게 감소한다.



(a) Drying temperature variation

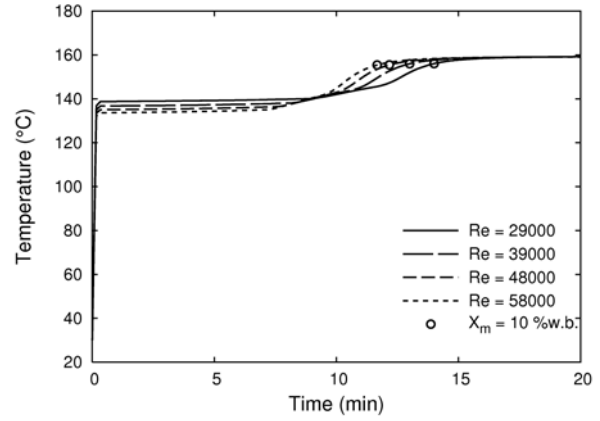


(b) Moisture content variation

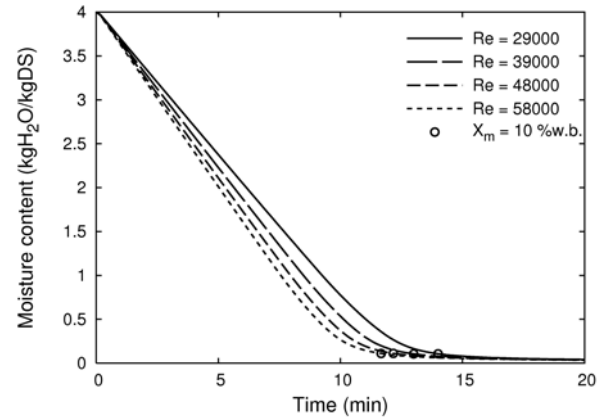


(c) Drying curve

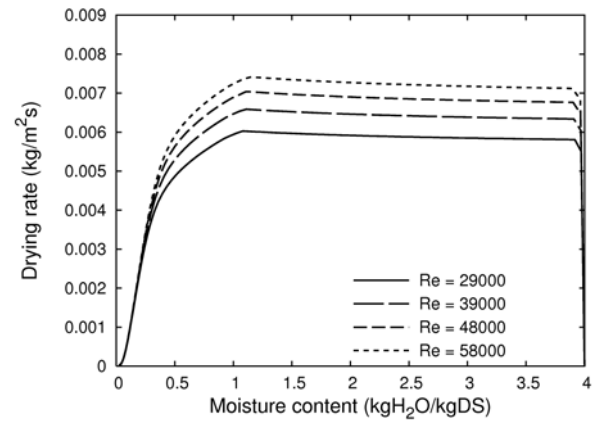
Fig. 3 Drying characteristics with sludge film thickness



(a) Drying temperature variation



(b) Moisture content variation



(c) Drying curve

Fig. 4 Drying characteristics with heating temperature with air velocity

Fig. 3에는 열원 증기의 온도가 160℃일 때 슬러지 박막의 두께에 따른 건조 과정의 해석 결과를 나타내었다. 슬러지 박막의 두께는 건조 온도와 함께 건조 시간을 결정하는 중요한 파라미터로서 필름 두께가 2 mm에서 1 mm로 절반이 감소하면 건조 시간은 그 이상으로 단축되는 것을 볼 수 있다. 슬러지 필름의 두께가 0.5 mm인 경우에는 5분 이내에 건조가 대부분 완료되는 것을 볼 수 있는데, 30분 이상이 소요되는 2 mm 두께의 필름에 비하여 상당히 빠르게 건조된다.

Fig. 4는 열원 증기의 온도가 160℃일 때 슬러지 박막 위를 흐르는 공기의 속도에 따른 건조 과정의 해석 결과를 보여준다. Reynolds 수가 29000인 경우는 공기의 속도가 0.6 m/s인 경우로 해석의 기준으로 사용한 속도이고, 공기의 속도가 약 0.2 m/s씩 증가함에 따른 해석의 결과이다. 공기 속도의 증가에 따라 건조 속도가 증가하고 건조 시간이 단축되는데, 이는 속도의 증가에 따라 박막 표면의 열전달 계수가 증가하여 열전달 및 수분 증발이 활발해지기 때문이다. 그러나 공기 속도의 증가에 비하여 건조 속도의 증가율을 둔화되는 경향을 보인다.

4. 결론

슬러지 필름에 대한 건조과정을 해석하기 위하여 1차원 건조 모델을 수립하고 건조온도, 필름 두께, 공기 속도 등 몇 가지 변수에 대한 해석 결과를 살펴보았다. 해석 결과는 건조 온도 및 필름 두께에 따라 항률건조와 감률건조시간이 다르게 나타나고, 건조 온도의 증가 또는 박막 두께의 감소에 따라 건조 시간이 크게 단축되는 것을 해석의 결과로 확인할 수 있었다. 슬러지 박막 위를 흐르는 공기의 속도에 따라서도 건조 속도가 증가하고 건조시간이 단축된다. 이러한 결과는 건조기 설계를 위한 중요한 기준이 될 수 있다. 건조 온도 180℃일 때는 120℃에 비하여 30% 이하의 짧은 시간(10분 이내)에 건조가 이루어지며 필름 두께가 감소하면 건조시간이 대폭 단축되는 것을 보여준다. 건조 시간이 단축되는

조건을 적용하여 건조기를 설계하면 건조기의 크기를 크게 줄일 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 지원으로 수행중인 에너지 절약기술 개발사업의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Arlabosse, P., Chavez, S., and Prevot, C., 2004, Drying of Municipal Sewage Sludge: from A Laboratory Scale Batch Indirect Dryer to the Paddle Dryer, Proc. of IDS2004, Vol. B, pp. 965-971.
2. http://www.me.go.kr/kor/info/info_10_08.jsp, Statics of Sewerage, Ministry of Environment.
3. Hayashi, N. and Shimada, S., 2006, Study on Drying Organic Sludges by Thermal Jet Dryer - Part 1: Drying Performance of Thermal Jet Dryer, Drying Technology, Vol. 24, pp. 1601-1607.
4. Islam, M. R., Thaker, K. S., and Mujumdar, A. S., 2007, "A Diffusion Model for a Drum Dryer Subjected to Conduction, Convection, and Radiant Heat Input, Drying Technology, Vol. 25, No. 6, pp. 1033-1043.
5. Arlabosse, P. and Chitu, T., 2007, Identification of the Limiting Mechanism in Contact Drying of Agitated Sewage Sludge, Drying Technology, Vol. 25, pp. 557-567.
6. Incropera, F. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
7. Parsons, R. A., ed., 1997, ASHRAE Handbook: 1997 Fundamentals, SI ed., ASHRAE, Atlanta.