

정수 슬러지의 유동층 건조

Drying of the Water Treatment Process Sludge
in a Fluidized Bed

1999. 6. .

경성대학교 건설환경공학부

신 용 섭

- 목 차 -

▷ 연구내용	3
가. 연구결과 요약문(국문)	3
나. 서론	5
다. 연구방법 및 이론	6
라. 결과 및 고찰	14
마. 결론	31
바. 인용문헌	32

연구 결과 요약 문

중심어	정수장 슬러지, 유동층, 건조속도, 건조효율
연구과제명	정수장 슬러지의 유동층 건조

현재 국내 정수장에서는 주로 슬러지를 농축-탈수 후 처분하는 방식을 택하고 있다. 그러나 belt press와 같은 기계적 탈수 장치를 사용하면 슬러지의 함수율을 70% - 80%까지 감소시킬 수 있으며, 슬러지내 수분분포에 의하여 탈수장치의 처리속도를 증진시키는 동시에 슬러지의 함수율을 저감시키는 것은 어렵고 기계적인 방법으로 얻을 수 있는 슬러지의 함수율에는 한계가 있다. 따라서 슬러지의 수분을 효과적으로 제거하기 위해서는 건조공정이 필요하다. 정수장 슬러지의 건조는 소각에 버금가는 매우 큰 부피 감량효과가 있고, 건조공정중 악취제거에 의한 안정화 효과가 있으며, 저장, 수송등 취급이 용이해지는 장점이 있다. 또한 정수장 슬러지의 건조공정은 소각공정에 비하여 시설이 단순하여 부지가 적게 소요되고, 비용이 저렴하여 경제적이고 무엇보다도 환경적으로 안전한 공정이다. 그러므로 정수장 슬러지의 감량화 및 안정화 기술로는 건조법이 가장 적합한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 건조속도가 빠르고 건조 효율이 높은 정수장 슬러지의 유동층 건조공정을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 연구개발 1차년도에는 정수장 슬러지의 TG/DTA 분석을 통하여 조업온도를 결정하였고, 건조공기와 정수장 슬러지 입자간의 건조평형 실험으로 슬러지 입자의 수분평형특성을 관찰하였다. 그리고 회분식 유동층 건조로에서는 공탑속도와 조업온도에 대한 정수장 슬러지의 건조속도를 연구하였다. 그리고 연구개발 2차년도에는 연속식 유동층 건조로에서 공탑속도와 조업온도에 대한 정수장 슬러지의 건조효율을 연구하였다. 연구결과에 의하면, 정수장 슬러지의 건조시 휘발분의 방출을 방지하기 위해서는 최대 240 °C이하에서 건조가 이루어져야함을 알 수 있었다. 슬러지의 평형함수비는 건조공기의 상대습도 증가에 따라 증가하였으며, 건조공기의 온도증가에 따라 증가하였다. 또한 슬러지의 건조속도는 층내 슬러지의 함수비가 감소함에 따라 감소하였다. 최대건조속도는 공탑속도와 건조온도에 대해 $Dr = 2.772 (u/u_{mr})^{0.56} (T/T_a)^{0.79} - 4.792$ 의 상관관계식으로 나타낼 수 있었다. 연속식 유동층 조업시 슬러지의 건조율은 건조공기의 온도증가에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 공탑속도의 증가에는 별다른 영향을 받지 않았다. 건조효율은 층온도 증가에 따라 감소하였으며, 공탑속도의 변화에는 별다른 영향을 받지 않았다. 또한 슬러지의 주입속도에 따라 건조효율이 증가하는 경향을 보였다.

1. 서 론

소득증대에 따른 생활수준의 향상으로 물 소비량은 지속적으로 증가하여 2011년에는 1996년의 1.7배로 증가될 전망이다. 1997년 12월말 현재 국내정수장은 630개소로 연간 상수도 생산량은 $6,039 \times 10^6$ 톤에 달하며, 2011년까지 $8,199 \times 10^6$ 톤으로 증가될 계획이다.⁽¹⁾ 따라서 정수장의 각 공정에서 발생하는 정수장 슬러지의 발생량도 증가할 것으로 예상된다. 일반적으로 정수장 슬러지의 함수율은 98% 이상으로 매우 높으며 수분을 효과적으로 제거하면 슬러지 부피를 크게 감량시킬 수 있을 것이다. 현재 정수장 슬러지의 함수율을 저감하는 방법으로 농축 후 탈수하는 방법을 많이 사용한다. 탈수법에는 자연건조식(함수율 80~90%), 기계식(함수율 70~80%)이 있으며, 탈수 후에도 높은 함수율을 함유하고 있어 더욱 많은 수분제거가 필요하다. 슬러지내의 수분은 결합방식과 위치에 따른 분포를 이루고 있어 belt press와 같은 기계적 탈수 장치에 의한 수분 제거에는 한계가 있다. 그리고 정수장의 슬러지는 탈수케이크로 매립이나 해양투기에 의해 처분되고 있으며, 이로 인한 해양오염, 침출수 발생, 매립지 부족, 악취, 중금속 오염등 2차 환경오염이 사회적 문제로 대두되고 있는 실정이다. 이와 같이 많은 문제점을 내포하고 있음에도 슬러지의 감량화를 적극적으로 추진하지 못하는 이유는 처리 소요비용이 막대하고, 처리기술개발의 부족, 처리에 따른 안전성여부 등의 어려움이 있기 때문이다. 따라서 정수장 슬러지를 안전하면서도 저렴하게 처분할 수 있는 감량화 및 안정화 기술 개발이 필요하다.⁽²⁾

최근에는 정수장 슬러지의 안정화 및 감량화를 위해 소각처리(건조-유동층 소각 등), 건조-건류처리, 건조-용융처리, 콤포스트화, 쓰레기와 혼합소각처리 등의 공정이 검토되고 있는데, 이들 처리 공정에서 건조기를 이용하는 것은 공정전체의 에너지 절약과 효율화에 있어 매우 중요한 위치를 차지하고 있으며 앞으로 건조조작은 각 공정을 고려하면 필수적인 공정이 될 것으로 사료된다. 일본의 경우에는 슬러지 함수율이 70% 이상이 되면 건조 후 소각시키는 것이 직접 소각하는 것보다 유리하다는 연구결과도 보고되고 있다.⁽³⁾

슬러지 건조장치에는 단형 건조기, 나선형 및 망-콘베이어형 건조기, 회전식 건조기, 유동층건조기와 같은 고체건조기, 분무건조기, 박막건조기, 드럼건조기 등의 액체 건조기등 여러 유형의 건조장치가 있다. 이들중 유동층 건조기는 타 건조기에 비해 건조속도가 빠르고, 대규모 처리에 적합한 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 부산 인근 D정수장에서 발생하는 농축슬러지와 탈수케이크를 사용하였으며, 먼저 건조에 있어서 중요한 인자인 공기와 슬러지 입자간의 건조평형관계와 유동층 반응기의 중요인자인 유동화 공기의 온도변화에 따른 최소유동화속도변화 그리고 슬러지에 대한 TG/DTA 분석결과로부터 조업공압속도와 건조온도를 각각 결정하였다. 이를 바탕으로 유동층 건조로 조업조건인 건조속도, 건조율, 건조효율에 대한 영향을 검토함으로써 유동층 건조로의 건조특성을 연구하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1 건조평형⁽⁴⁾

일반적으로 공기중의 수분함량은 습도로써 표시되며 다음과 같이 정의된다.

$$H = \frac{g \text{ H}_2\text{O}}{g \text{ dry air}} \quad (1)$$

위 식에 나타난 바와 같이 습도는 건조 공기 무게당 수분의 무게로써 정의되며, 일정한 온도, 압력에서 건조공기가 함유할 수 있는 수분의 양은 최대 평형치가 존재하며, 이것을 포화습도라고 한다.

$$H_S = \frac{M_H P_H^*}{M_{\text{air}}(1 - P_H^*)} \quad (2)$$

여기서 P_H^* 는 공기의 포화수증기압이며, 온도에 의존한다.

상대습도는 측정온도에서 공기의 수증기압과 포화수증기압의 비로써 나타낸다..

$$H_R = 100 \times \frac{P_H}{P_H^*} \quad (3)$$

따라서, 습도미터에서 측정된 습도는 상대습도이므로 측정된 상대습도로부터 습도는 다음과 같은 상관관계식을 이용하여 계산된다.

$$H = H_S \times \frac{P_H}{P_H^*} \times \frac{(1 - P_H^*)}{(1 - P_H)} = H_S \times H_R \times \frac{(1 - P_H^*)}{(100 - H_R P_H^*)} \quad (4)$$

위 식에서 둘째, 셋째 항은 습도와 포화습도의 비를 나타낸다.

공기를 이용하여 고형물을 건조할 경우, 고형물의 수분함량과 건조공기의 습도 사이에는 탈착평형과 같은 일정한 평형관계가 존재하며 고형물의 종류에 따라 이러한 평형관계는 다르게 나타난다. 이는 보통 기체의 상대습도와 고체의 액체함량간의 관계식으로 주어지는데, 건조평형관계의 대표적인 예를 <그림 1>에 나타내었다.

이러한 건조평형으로 인하여 고형물의 최종적인 함수율이 제약을 받게되며, 목표로 하는 고형물의 최종함수율을 얻기 위해서는 건조평형을 만족하는 건조온도와 건조공기의 습도를 조절하여야 한다.

2.2 슬러지의 건조속도⁽⁶⁾

건조될 물질을 일정온도, 습도의 가열매체와 접촉시킬 경우 물질과 가열 매체와의 상호 평형조건이 수립될 때까지 건조가 계속된다. 이때 건조기간 동안의 건조속도는 건조조건, 물질의 종류 및 물

질에 포함되어 있는 수분의 함유 상태에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 건조가 진행됨에 따라 물질의 건조속도는 그 물질의 함수율에 의존하여 변화하며, <그림 2>은 대표적인 건조속도 곡선을 나타낸 그림이다. 건조초기에 물질의 표면에서 포화수면을 형성하고 있는 수분이 제거되는 동안에는 함수율 변화에 따라 건조속도가 일정한 정속건조구간이 나타난다. 이때 물질의 온도는 일정하게 유지되며, 물질 표면에서 수분과 평형상태에 있는 건조공기의 온도 역시 단열포화온도로 일정하게 유지된다. 더욱 건조가 진행되면, 물질의 함수율 감소에 따라 건조속도가 감소하는 감속 건조구간이 나타난다. 이때 물질의 온도와 건조공기의 온도는 상승하게 된다. 최종적으로 물질의 함수율이 평형함수율에 도달하게 되면, 건조가 더 이상 진행되지 않고 정지하게 된다. 정속건조구간에서의 건조속도와 정속건조구간의 크기는 물질의 초기 함수율, 건조조건에 따라 결정되며, 건조조건에 따라 정속구간이 명확하게 측정되지 않는 경우도 있다. 정속구간에서 증발되는 수분은 고형물표면에서 포화수면을 형성하고 있는 수분이다. 또한, 감속구간에서 증발되는 수분은 입자내부에 존재하는 수분이다.

건조속도가 일정한 정속건조구간에서 증발되는 수분은 입자표면에서 포화수면을 이루고 있으므로 수분의 증발속도는 입자표면으로의 열전달속도에 의하여 결정되며, 입자에 전달된 열량은 모두 수분증발에 사용된다. 여기에 입자내부의 온도구배와 물질전달 속도를 무시하면 건조속도는 다음 식 (5)와 같이 간략하게 표시될 수 있다.

$$N_H = -\frac{dX}{dt} \frac{W}{A} = \frac{h}{\Delta H_v} (T_B - T_p) \quad (5)$$

감속건조구간에서 증발하는 수분은 입자내부에 존재하는 수분이므로 수분의 건조속도는 입자내부에서의 물질전달속도 혹은 열전달속도에 의하여 결정된다. 확산에 의한 물질전달속도에 건조속도가 지배되는 경우, 구형입자 내부에 대한 물질수지를 세우면 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial X_r}{\partial t} = D_m \left(\partial^2 \frac{X_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X_r}{\partial r} \right) \quad (6)$$

여기서 경계조건들은 다음과 같다.

$$t = 0 \quad \text{임의의 } r \quad X_r = X_0$$

$$t = t \quad r = 0 \quad \frac{\partial X_r}{\partial r} = 0$$

$$r = R \quad X_r = X^*$$

X^* 는 입자표면에서 건조공기의 온도와 습도에 대응되는 입자의 평형함수율이다. 따라서 입자내 평균 함수율은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{3}{4\pi R^3} \int_0^R 4\pi^2 X_r dr \quad (7)$$

위와 같은 경계조건들을 이용하여 물질수지식의 해를 구하면 다음 식 (8)과 같다.

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[- (n\pi)^2 \frac{D_m t}{R^2} \right] \quad (8)$$

따라서 식 (8)로부터 첫째항만을 취한 다음 건조속도는 아래 식 (9)와 같이 정의 될 수 있다.

$$-\frac{W}{A} \frac{dX}{dt} = k \left(\frac{X - X^*}{X_0} \right), \quad X^* \leq X \leq X_{cr} \quad (9)$$

$$\left(\because k = \frac{\pi^2 W D_m X_0}{A R^2} \right)$$

윗식에서 건조속도는 입자의 함수비 X, 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 여기서, 감속건조 구간에서 건조속도는 정속건조구간의 경계 함수비 X_{cr}에서 수평선인 정속건조속도선과 교차하므로 정속건조속도 즉, 최대건조속도는 아래 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{maximum drying rate} = \left(-\frac{W}{A} \frac{dX}{dt} \right)_{X_{cr}} = k \left(\frac{X_{cr} - X^*}{X_0} \right) \quad (10)$$

입자의 함수율에서 입자의 건조속도를 최대 건조속도를 이용하여 무차원 변수로 나타내면, 다음 식 (11)과 같다.

$$\text{dimensionless drying rate} = \frac{X - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (11a)$$

$$= \left(\frac{X_0}{X_{cr} - X^*} \right) \left(\frac{X - X^*}{X_0} \right) \quad (11b)$$

2.3 슬러지의 건조효율

일반적으로 젖은 입자를 건조할 때, 건조율과 건조효율은 아래 식 (12)와 (13)과 같이 정의될 수 있다.

$$\left(\text{Degree of Drying} \right) = \left(\frac{\text{Dried water weight}}{\text{Inlet water weight}} \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left(\text{Drying efficiency} \right) &= \left(\frac{\text{Used heat quantity in Drying}}{\text{Supplied heat quantity}} \right) \\ &= \left(\frac{\text{Consumed heat rate to evaporation of water}}{\text{Supplied heat rate}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

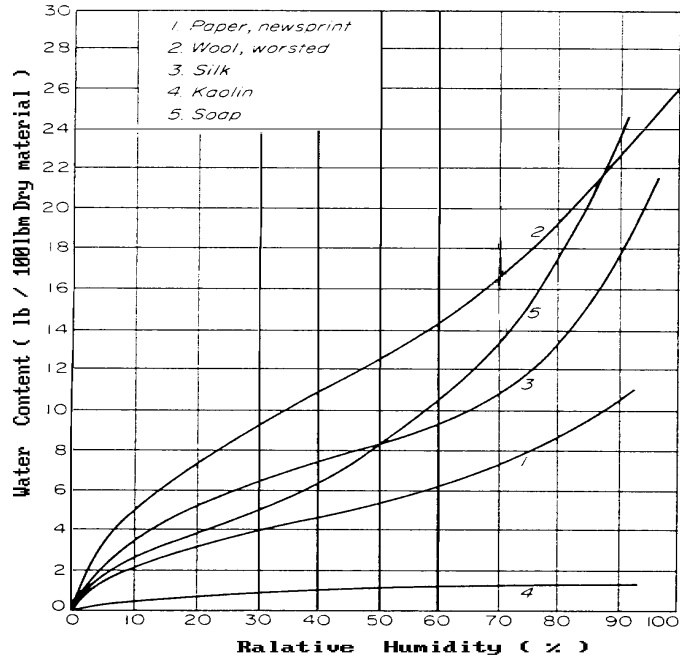


Fig. 1. Equilibrium curves of moisture desorption for several solid materials at 25°C.⁽⁴⁾

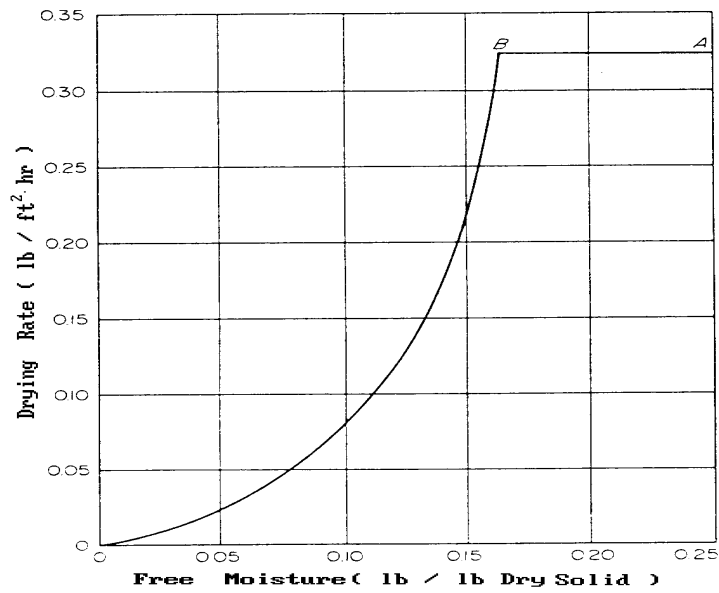


Fig. 2. Typical relationship between drying rate and free moisture ratio to total moisture in solid.⁽⁴⁾

따라서, 식 (12)로부터 건조율을 구하기 위해서 주입되는 수분과 건조된 수분량을 계산하였다. 그리고, 유동층으로 실제 주입되는 슬러지 시료와 건조 후 배출되는 슬러지 시료에 대한 물질수지를 세우면 다음 식 (14)과 같다.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Actual} \\ \text{feed amount} \\ \text{of sludge} \end{array} \right) \left(1 - \begin{array}{c} \text{Water} \\ \text{fraction of} \\ \text{feed sludge} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Bottom} \\ \text{drain} \\ \text{weight} \end{array} \right) \left(1 - \begin{array}{c} \text{Water} \\ \text{fraction of} \\ \text{bottom drain} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Elutriated} \\ \text{particle} \\ \text{weight} \end{array} \right) \left(1 - \begin{array}{c} \text{Water fraction} \\ \text{of elutriated} \\ \text{particle} \end{array} \right) \quad (14)$$

에너지수지에 의해 정의된 건조효율은 아래 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$\eta_d = \frac{\overline{G}_{12} \overline{C}_{H12} (T_{d1} - T_{d2})}{\overline{G}_{1w} \overline{C}_{H1w} (T_{d1} - T_{w1})} \quad (15)$$

또한, 유동층 출구공기의 온도와 습도로부터 건조공기의 건조능력을 정의하여 건조효율을 계산할 수 있는데 다음 식 (16)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_d = \frac{H_2 - H_1}{H_w - H_1} \quad (16)$$

건조효율은 건조장치에 공급된 열량 q_s (kcal/hr)에 대한 건조필요열량을 백분율로 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽³⁾

$$\eta_d = \left(\frac{q}{q_s} \right) \times 100 \quad (17)$$

여기서 공급열량 q_s 의 산출방법은 열원에 따라 다르다. 연료의 연소에 의한 경우는 연료사용량과 발열량에서, 증기의 경우는 증기량과 응축잠열에서, 전기입력의 경우는 전기사용량에서 산출한다. 열풍건조에서는 배출가스가 지니고 방출되는 열량과 장치의 열손실이 건조효율에 영향을 미친다.

건조효율은 온도의 향으로도 정의할 수 있다.⁽⁸⁾

$$\eta_d = \frac{T''_{in} - T''_{out}}{T''_{in} - T_0} = \frac{\Delta T''}{\Delta T_h} \quad (18)$$

그리고 식 (14)로부터 실제 주입슬러지량과 실제 주입수분량의 계산치와 조업 후 배출되는 슬러지의 수분량을 측정된 결과를 사용하여 건조율을 구할 수 있다. 또한, 유동층 유입공기온도, 출구공기온도와 상대습도로부터 얻어진 비엔탈피로 건조공기의 건조능력을 정의하여 건조효율을 계산할 수 있는데 다음 식 (19)와 같이 정의하였다.

$$\eta_d = \frac{W_i \times \lambda_{T_B}}{(H_B - H_i) \times \frac{1}{\rho_i} \times Q_{air}} \quad (19)$$

본 연구에서는 식(19)로 정의되는 건조효율을 이용하여 유동층 건조시 건조효율을 계산하였다.

2.4 정수장 슬러지의 건조평형 측정방법

<그림 3>는 슬러지의 건조평형 측정장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이

이 장치는 크게 압축공기 공급계통과 공기습도 및 온도조절계 그리고 건조실 무게측정장치로 구성되어 있다.

건조공기량을 일정 값으로 조절 후 온도조절기와 가습기로 설정온도와 습도에 맞추고, 약 1시간 정도의 조업 후 IBM PC에 나타나는 습도와 온도의 변화추이로서 정상상태를 판단한다. 정상상태에 도달한 후 시료의 무게감소율이 0일 때를 그 조건에서의 평형으로 본다. 다음 가습기와 공기량을 조절한 후 더 낮은 상대습도 조건에서 실험을 해 나간다. 이 때 설정된 건조공기의 온도는 30, 50, 70, 90 °C이다.

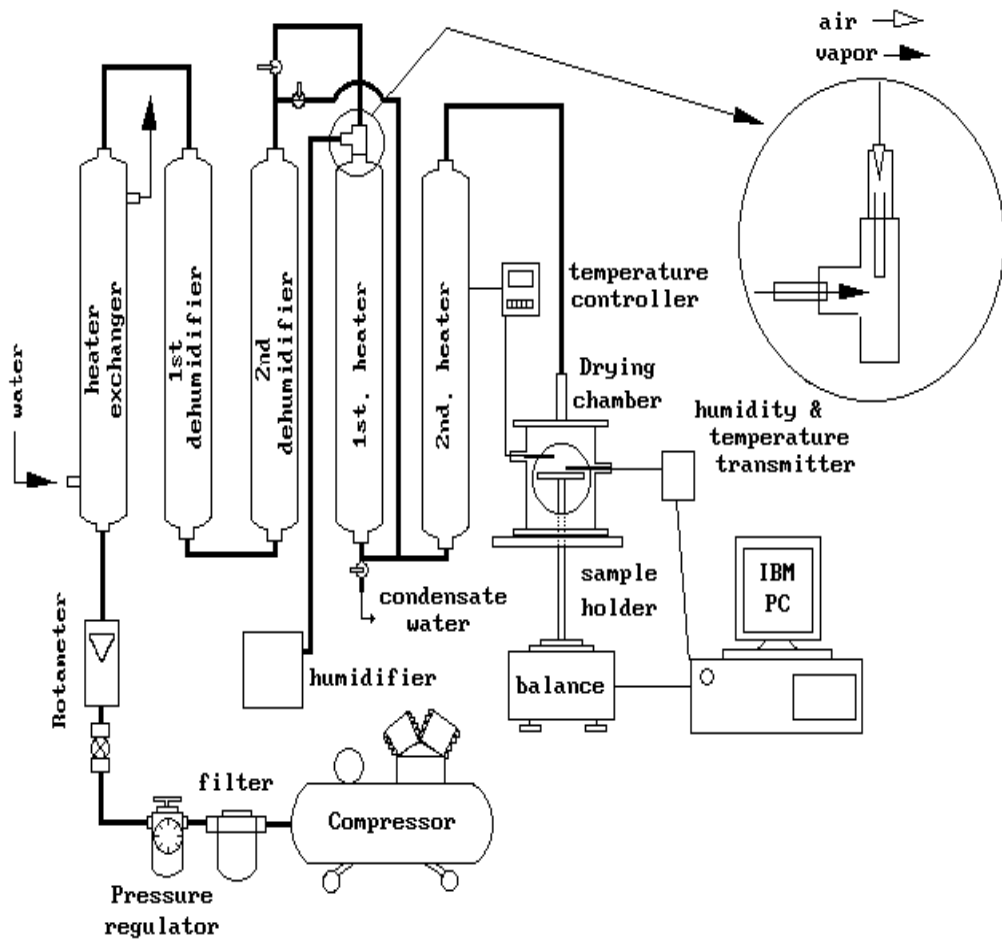


Fig. 3. Schematic diagram of the moisture desorption equilibrium measurement.

2.5 정수장 슬러지의 건조속도, 건조율, 건조효율측정

<그림 4>는 본 연구에 사용된 유동층 건조로 및 실험장치의 개략적인 계통도를 나타내었다. 구성장치는 크게 유동층 건조로, 압축공기 공급장치, 유입공기 온도조절계통, 슬러지 주입계통, 집진장치로 구성되어있다.

먼저 유동층의 조업에 있어서 조업 공탑속도 범위를 결정하는 매우 중요한 인자인 최소유동화속도를 측정하였다. 최소유동화속도 측정방법에는 공탑속도를 0에서부터 증가시키면서 층의 압력강하 변화를 측정하는 방법과 높은 공탑속도로 유동화시킨 상태에서 공탑속도를 0까지 줄이면서 층의 압력강하 변화를 측정하는 방법이 있다. 일반적으로 후자의 방법을 많이 사용하므로 본 연구에서는 후자의 방법을 선택하여 온도 변화에 따른 최소유동화 속도를 측정하였다.

정수장슬러지의 건조속도 측정은 다음과 같이 회분식으로 이루어졌다. 일정 유량의 건조공기를 미리 층온도와 함께 설정된 공기에열기로 가열시켜 유동층 건조로로 주입시키고, 층 부분은 부착된 온도조절기를 이용하여 설정된 조업온도에 맞추어 층온도를 일정하게 유지하였다. 이 때 유입공기의 온도와 습도, 유동층내 온도분포 그리고 배출공기의 온도와 습도를 각각 기록계와 습도 트랜스미터를 이용하여 기록하고 측정값들의 변화를 관찰한다. 그리고 일정 시간이 흐른 후 층내 온도분포가 정상상태에 도달하면 시료주입구를 통하여 20 ml의 정수장 농축슬러지를 순간적으로 주입하였다. 주입 후 건조로내 온도분포와 배출공기의 상대습도와 온도를 2초 간격으로 측정 기록하였으며, PC에 나타난 배출공기의 상대습도가 더 이상 변화지 않을 때 건조가 종결된 것으로 판단하였다. 이 때 사용된 정수장 슬러지는 농축슬러지로 함수율은 약 98%이다.

유동층에서 정수장슬러지의 건조효율실험은 다음과 같이 연속식으로 이루어졌다. 앞의 회분식과 같은 방법으로 층내온도 분포가 정상상태에 도달했을 때, 시료주입구를 통하여 함수율을 조정된 슬러지를 층으로 정량적으로 연속 주입하였다. 시료를 건조로내로 일정량 계속적으로 주입하여 건조로 내 온도분포와 배출공기의 상대습도와 온도를 10분 간격으로 측정하였으며 유입공기의 온도 및 상대습도와 배출되는 슬러지의 수분함량을 측정하였다.

본 연구에 사용된 시료는 함수율 65~75%내외의 탈수 케이크에 건조슬러지를 일정 비율로 첨가하여 함수율을 조정된 슬러지를 사용하였다. 이렇게 함수율을 조정된 슬러지의 함수율은 약 45% 정도이다. 그리고 층으로 주입되는 젖은 슬러지의 공급속도는 18 g/min과 45 g/min이다.

본 연구에서는 유동층 건조로의 조업공탑속도와 조업온도, 시료주입량을 변화시켰으며, 설정된 공탑속도는 최소유동화속도의 4배에서 7배 범위에서 변화되었다. 유동층 조업온도는 50, 70, 90, 110 °C로 설정하여 조업조건에 따른 건조특성을 관찰하였다.

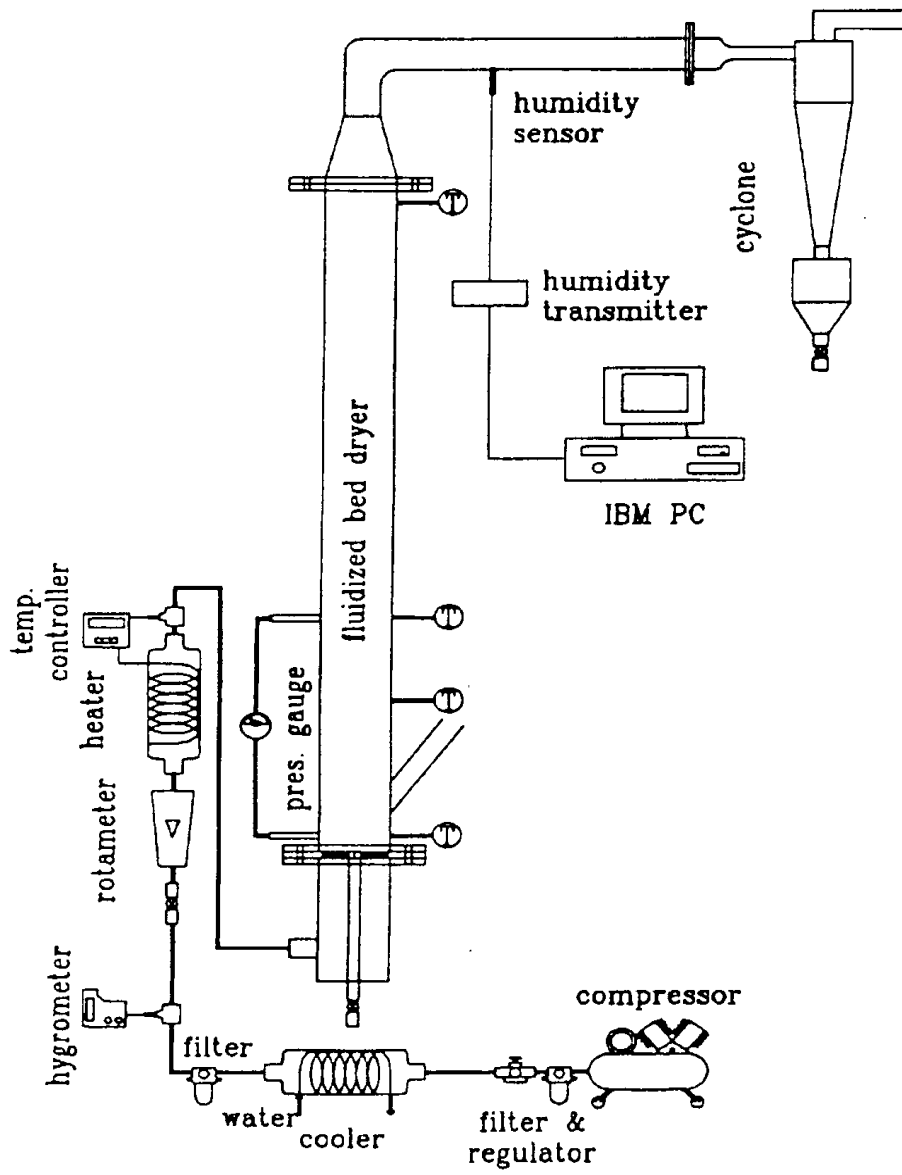


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental apparatus.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지의 TG/DTA 분석

정수장 슬러지의 건조시에는 건조온도에 따라 휘발분이 다량 배출될 것으로 예상되며 이러한 휘발분은 악취의 원인이 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 건조공기의 온도와 습도에 따른 정수장 슬러지의 건조평형을 측정하기에 앞서 정수장 슬러지의 탈수케이크에 대하여 TG/DTA 분석을 시행하였다.

<그림 5>은 정수장 슬러지 탈수케이크의 TG/DTA 분석 결과를 나타낸 그림이다. TG 곡선에서 약 40 °C ~ 160 °C에서 슬러지의 무게가 급격히 감소하였고, DTA 곡선에서는 TG 곡선이 감소영역에서 매우 큰 흡열 peak가 나타남을 볼 수 있다. 이는 160 °C 이전까지 슬러지중의 수분이 빠르게 증발된 것으로 보인다. 그러므로 슬러지의 건조시 수분의 건조만을 고려한다면 최대 건조온도는 160 °C 이하로 하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 TG 곡선에서 약 240 °C 이후부터 무게 감소율이 약간 증가됨을 볼 수 있고, DTA 곡선에서는 미약하나마 작은 발열 peak가 나타남을 볼 수 있다. 이는 약 240 °C부터 나타나는 발열 peak는 슬러지내 휘발분이 증발하여 발생된 가연성 가스의 산화반응에 의한 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 슬러지의 건조시 수분의 건조만을 고려한다면 최대 건조온도는 160 °C이하가 적절하나 이러한 온도영역에서 슬러지의 건조속도가 원하는 정도의 값을 갖지 못한다면 수분의 건조속도를 증진시키기 위하여 건조온도를 증가시켜야만 한다. 그러나 건조속도 증진을 위하여 건조온도를 증가시키더라도 휘발분의 증발에 의한 악취 발생을 방지하기 위해서는 최대 240 °C 이하의 온도에서 조업하여야 할 것으로 판단되며, 240 °C 이상의 온도에서 건조가 진행될 때에는 악취저감에 대한 적절한 방안이 강구되어야만 할 것으로 생각된다.

3.2 건조평형

<그림 6>는 건조공기의 상대습도와 온도변화에 따른 정수장 슬러지의 평형수분함량의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 상대습도 증가에 따라 정수장 슬러지의 평형수분함량은 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 건조공기의 상대습도가 30% 이상으로 증가하면, 건조공기의 온도에 관계없이 정수장 슬러지의 평형함수율은 급격히 증가함을 볼 수 있으나, 30% 이하의 영역에서는 상대습도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 갖는다. 또한, 일정한 상대습도하에서 건조공기의 온도가 증가함에 따라 슬러지의 평형 함수율은 다소 감소하는 경향을 볼 수 있다. 실제 건조기에 들어가는 공기는 완전히 건조되어 있는 경우가 없고, 약간의 수분을 함유하고 있어서 일정한 상대습도를 지니고 있다. 따라서 고형물 건조에 있어 일정한 습도를 갖는 건조공기를 사용하는 경우 건조기에서 건조되어 배출되는 고형물의 수분함량은 유입되는 건조공기의 온도와 습도에 대응하는 평형 수분함량보다 적을 수가 없을 것이다.

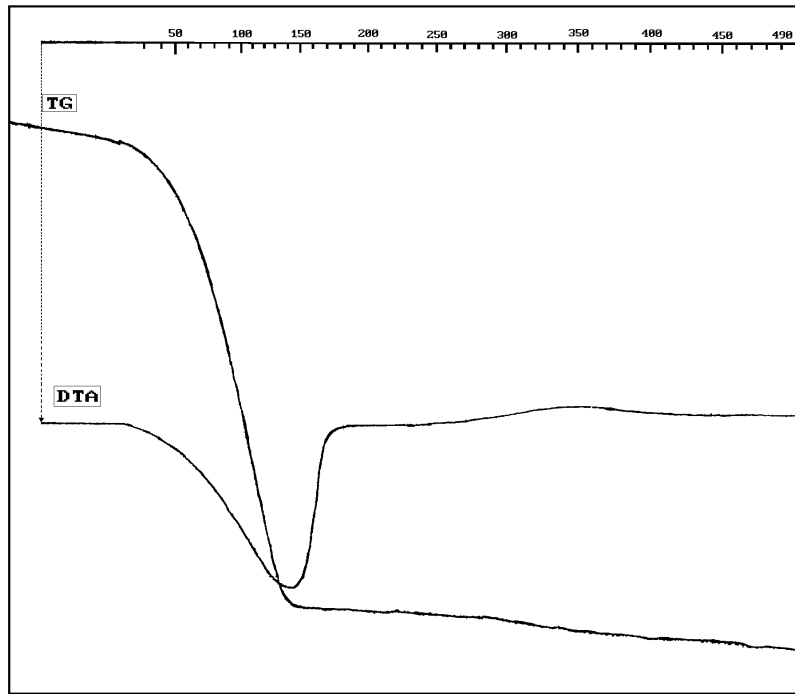


Fig. 5. TG/DTA curve of water treatment sludge.

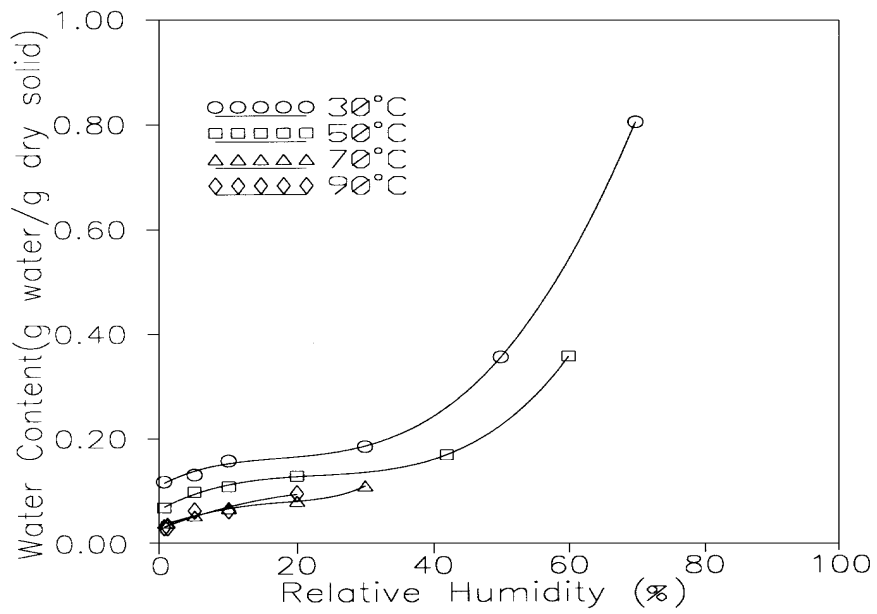


Fig .6. Variation of the equilibrium water contents with relative humidity of drying air.

정수장 슬러지를 완전 건조하는데 필요한 건조온도는 정수장 슬러지내 수분분포에 의하여 결정될 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 얻어진 정수장 슬러지의 건조평형 측정결과에 의하면, 건조공기의 온도가 100 °C 미만인 경우에는 정수장 슬러지를 완전 건조시킬 수 없다. 또한, 정수장 슬러지의 완전건조를 위해서는 최소한 100 °C 이상의 온도에서 건조가 진행되어야 하며, TG/DTA 측정결과를 참조한다면, 160 °C 이내의 온도에서 완전 건조될 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 슬러지의 회분식 측정

3.3.1 최소유동화 속도

유동층 건조로의 조업공탑속도를 측정하기 위해서는 유동층의 최소유동화속도의 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 층물질로 사용한 건조 정수장 슬러지에 대한 최소유동화속도를 측정하였다. 본 연구에서는 유동층 건조로의 조업온도 범위 50 °C ~ 110°C에 대하여 유동층 온도변화에 따른 최소유동화속도의 변화를 측정하였다. <그림 7>에 나타난 바와 같이 최소유동화속도는 유동층의 조업온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

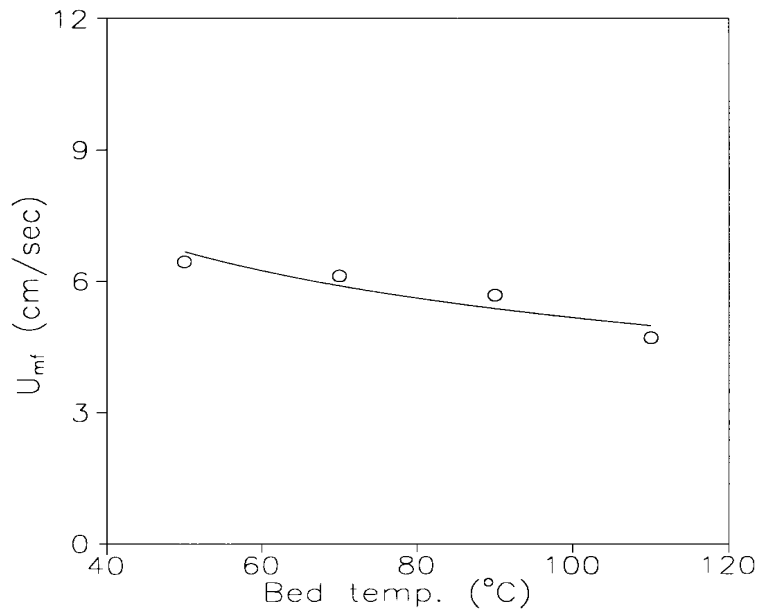


Fig. 7. Variation of u_{mf} as a function of bed temperature.

3.3.2 건조속도에 대한 층온도 및 공탑속도의 영향

본 연구에서와 같이 회분식으로 조업되고 있는 유동층 건조로에서 슬러지의 건조속도는 다음과 같은 건조로에 대한 수분의 비정상상태 물질수지를 통하여 구할 수 있다.

$$-\frac{W}{A} \frac{dX}{dt} = \rho_{air} u_o (H_o - H_i) \quad (20)$$

식 (20)에 나타난 바와 같이 회분식 유동층 건조로에서 슬러지의 건조속도는 유동화 공기의 질량 플럭스에 유출공기와 유입공기의 절대습도의 차를 곱하여서 계산될 수 있다. 그러나, 유동층내에서 슬러지가 입경분포를 이루면서 분산되어 있고 건조가 진행됨에 따라 입경이 변화하기 때문에 위와 같은 식에 의하여 계산된 슬러지의 건조속도는 유동층내에서 슬러지의 평균적인 건조속도이다. 본 연구에서 정수장 슬러지의 건조속도 측정 시에는 유동층에 슬러지가 투입되기 전과 투입된 후 배출공기의 온도와 상대습도 변화를 일정 시간간격으로 측정 기록하였다. 측정된 배출공기의 온도와 상대습도를 식 (20)을 이용하여 건조속도로 환산하였다.

<그림 8>와<그림 9>는 층온도와 유량변화에 따른 정수장 슬러지의 건조속도와 층내 슬러지의 함수비와의 관계를 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 정수장 슬러지의 건조속도는 슬러지의 함수비가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 건조속도 곡선의 기울기를 기준으로 크게 두개의 영역으로 구분될 수 있다. 건조 초기에 슬러지의 함수비가 큰 경우에 슬러지의 건조속도는 최대값을 가지며, 수평구간 즉, 정속건조구간이 명확하게 나타나지는 않는다. 그러나, 건조속도의 감소 기울기가 매우 완만한 구간이 존재함을 볼 수 있다. 건조속도가 매우 완만하게 감소하는 구간 이후에는 슬러지의 건조속도가 함수비 감소에 따라 거의 선형적으로 감소하는 감속 건조구간이 나타남을 볼 수 있다.

일반적으로 슬러지내의 수분은 결합력과 존재장소가 다른 몇 가지 유형의 수분으로 분류될 수 있다.⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾ 신용섭등⁽⁵⁾의 연구결과에 의하면, 슬러지의 수분분포를 결정하기 위하여 건조곡선을 측정하는 경우, 자유수분은 건조곡선상에 수평구간인 정속건조구간으로 나타나며, 간극수는 직선 혹은 곡선형태의 감속건조구간으로 나타난다. 그러나, 상온보다 높은 온도에서 건조되는 경우, 온도증가로 인한 수분의 부피팽창으로 상온에서와는 다른 건조곡선 즉, 수분분포 형태를 보인다. 상온보다 높은 온도에서 건조될 때에는 간극수중의 일부가 부피팽창으로 인하여 모세관 밖으로 밀려나와 자유수와 같은 유형으로 전환된다.

Kasakura등⁽¹²⁾은 스팀건조기에서의 무기성탈수케이크와 유기성탈수케이크의 건조시 건조곡선에 차이가 존재함을 발견하였다. 무기성케이크의 경우에는 일반적으로 다공성 물질의 건조시 나타나는 특징인 정속건조구간과 감속건조구간이 보였으나, 유기성 케이크의 경우에는 정속건조구간을 가지지 않은 완만한 건조속도 곡선이 나타남을 보고하였다. 또한, 유동층 건조로를 사용하여 다공성 물질을 건조하는 경우, 건조대상물질의 물성, 초기함수율과 건조조건에 따라 정속건조구간이 측정되는 경우도 있으며, 측정되지 않는 경우도 있다.

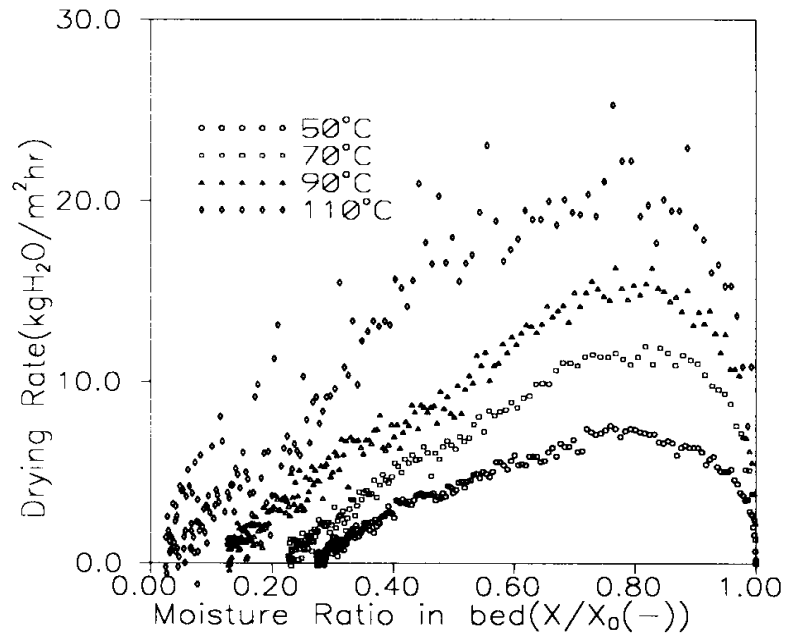


Fig. 8. Variations of drying rates with moisture ratio of sludge in bed at $6 u_{mf}$

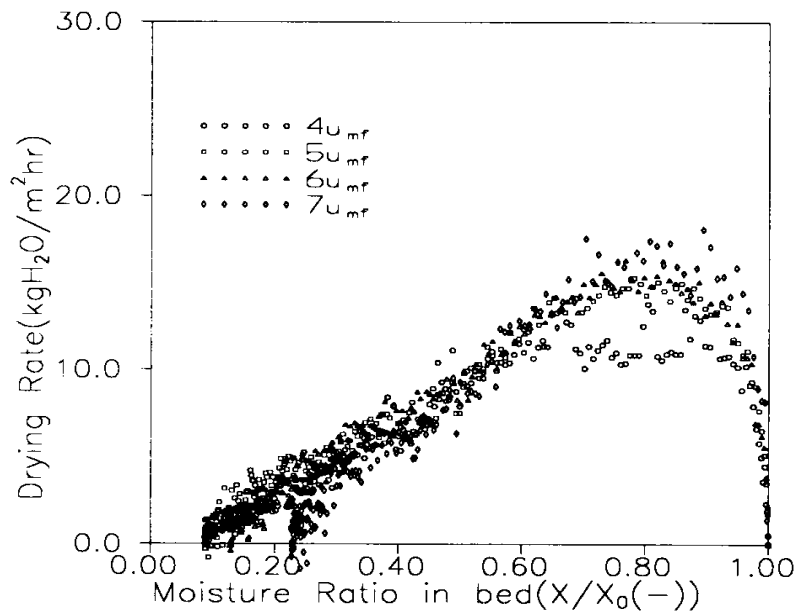


Fig. 9. Variations of drying rates with moisture ratio of sludge in bed at 90°C

본 연구에 사용된 정수장 슬러지는 유기성 슬러지로 분류될 수 있으며, 앞의 그림에 나타난 바와 같이 명백한 수평구간 즉, 정속건조구간이 나타나지는 않았으나, 건조속도의 감소 기울기가 매우 완만한 구간이 측정되었다. 이와 같은 영역에서 증발되는 수분은 슬러지내 수분분포중 자유수에 해당되는 것으로 생각되며, 명백한 수평구간으로서 정속건조구간이 측정되지 않은 것은 슬러지 자체가 가지는 물리적 특성과 층내로 투입된 슬러지 중의 수분이 유동층물질로 혼합, 분산되기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 슬러지의 건조속도가 매우 완만한 구간 내에서 최대건조속도가 나타났으며, 최대건조속도는 건조온도와 공탑속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 슬러지의 건조가 슬러지 입자외부의 물리적 조건 즉, 외부 열전달속도에 의하여 지배되었기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같이 최대건조속도가 슬러지 입자외부의 외부 열전달속도에 지배를 받는 것은 이 구간내에서 증발되는 수분이 포화수면을 형성하는 자유수에 해당되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1. Variation of critical moisture ratio with bed temperature

Temperature	50℃	70℃	90℃	110℃
$(X/X_0)_{cr}$	0.747	0.708	0.661	0.622
$1-(X/X_0)_{cr}$	0.253	0.292	0.339	0.378
X_{cr}	32.9	31.2	29.1	27.4
Moisture content	97.1	96.9	96.7	96.5

또한, 슬러지의 건조속도가 매우 완만한 구간과 건조속도가 함수비에 따라 거의 선형적으로 감소하는 구간 사이에는 임계함수비(X_{cr})가 존재함을 볼 수 있다. <Table 1>은 건조온도 변화에 따른 임계함수비의 변화를 나타낸 것이다. <Table 1>에서 $1-(X/X_0)_{cr}$ 은 슬러지내 수분중 자유수의 분율을 나타내는 것으로 생각되며, 건조온도 증가에 따라 임계함수비는 감소하나 자유수의 분율은 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 결과는 앞에서 논의된 바와 같이 건조온도가 증가함에 따라 간극수중의 일부가 부피팽창으로 인하여 모세관 밖으로 밀려나와 자유수로 전환되었기 때문인 것으로 생각된다. 슬러지의 함수비가 임계함수비 보다 작은 값으로 감소하면, 슬러지의 건조속도가 함수비에 따라 거

의 선형적인 감소하는 경향을 보이는 감속 건조구간이 나타난다. 이러한 경향은 슬러지의 건조속도가 슬러지 입자내 수분의 확산속도 혹은 슬러지 입자내 전도에 의한 열전달속도에 의하여 지배되기 때문이다. 그러나, 층물질의 입경이 2 mm이하로 작고 슬러지 입자의 크기는 이보다 훨씬 작으므로 슬러지 입자 내부에서 전도에 의한 열전달 저항의 크기와 슬러지 입자 기공내 확산에 의한 수분확산 저항의 크기를 비교한다면, 수분확산의 저항이 훨씬 클 것으로 판단된다. 따라서, 이론적 고찰에서 고찰한 바와 같이 임계함수비 이하에서 슬러지의 건조속도가 함수비에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보이는 것은 슬러지 입자 기공내 수분의 확산속도에 의하여 슬러지의 건조속도가 결정되기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 이와 같은 감속 건조구간에서 건조속도선의 기울기가 건조온도와 공탑속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보이는데 이러한 경향은 건조온도와 공탑속도 증가에 따라 최대 건조속도가 증가되기 때문인 것으로 생각된다.

<그림 10>은 건조온도 증가에 따른 최대 건조속도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 건조온도가 증가할수록 최대 건조속도는 증가하는 경향을 보인다. 최대 건조속도는 슬러지의 건조초기에 나타나는 값으로 자유수의 증발로 인한 것으로 생각된다. 슬러지가 유동층으로 투입된 후 슬러지내의 자유수는 유동층 내의 격렬한 입자혼합에 의하여 슬러지 입자 주변의 층물질 표면으로 분산된다. 분산된 자유수는 층물질 입자표면에서 증발하기 때문에 자유수의 증발속도는 입자외부에서의 물질전달 혹은 열전달속도에 의하여 지배될 것이다. 그러나, 수분의 증발은 궁극적으로 증발잠열이 공급되어야만 이루어질 수 있고 수분의 증발잠열이 매우 크기 때문에 입자외부에서의 열전달속도에 의하여 자유수의 증발속도는 결정될 것으로 생각된다. 따라서 건조온도 증가에 따라 외부 열전달계수가 증가하고, 입자와 층온도간의 온도차가 증가하기 때문에 최대 건조속도는 증가하는 경향을 보이는 것으로 생각된다. <그림 11>은 공탑속도 증가에 따른 최대 건조속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대건조속도는 공탑속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 슬러지의 건조속도가 슬러지 입자 외부의 열전달속도에 의하여 지배됨을 증명하는 결과이다. 만일 슬러지 입자의 건조속도가 입자내부의 물질전달 혹은 열전달에 의하여 지배받는다면, 슬러지 입자내부의 물질전달 혹은 열전달속도는 공탑속도에 영향을 받지 않기 때문에 슬러지의 건조속도는 공탑속도에 무관한 거동을 보일 것이다. 그러나, 입자외부에서의 열전달속도에 의하여 슬러지 입자의 건조속도가 결정되는 경우, 공탑속도 증가에 따라 자유수의 유동층 물질 입자로의 분산속도가 증진되어 열전달 면적을 증가시키는 결과를 초래하기 때문에 최대건조속도가 공탑속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 생각된다.

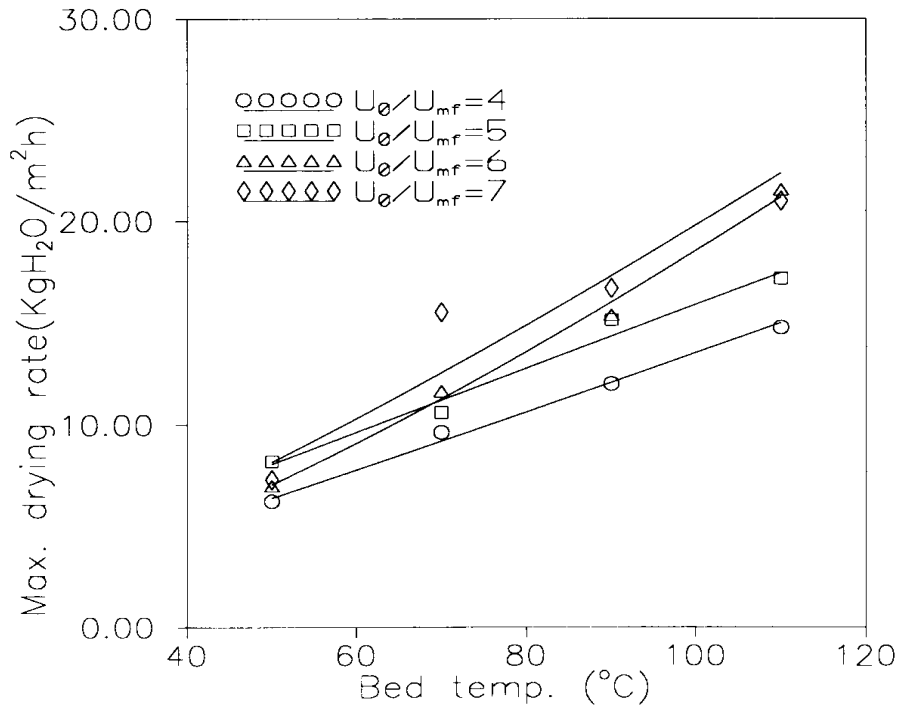


Fig. 10. Variation of maximum drying rates with bed temperature.

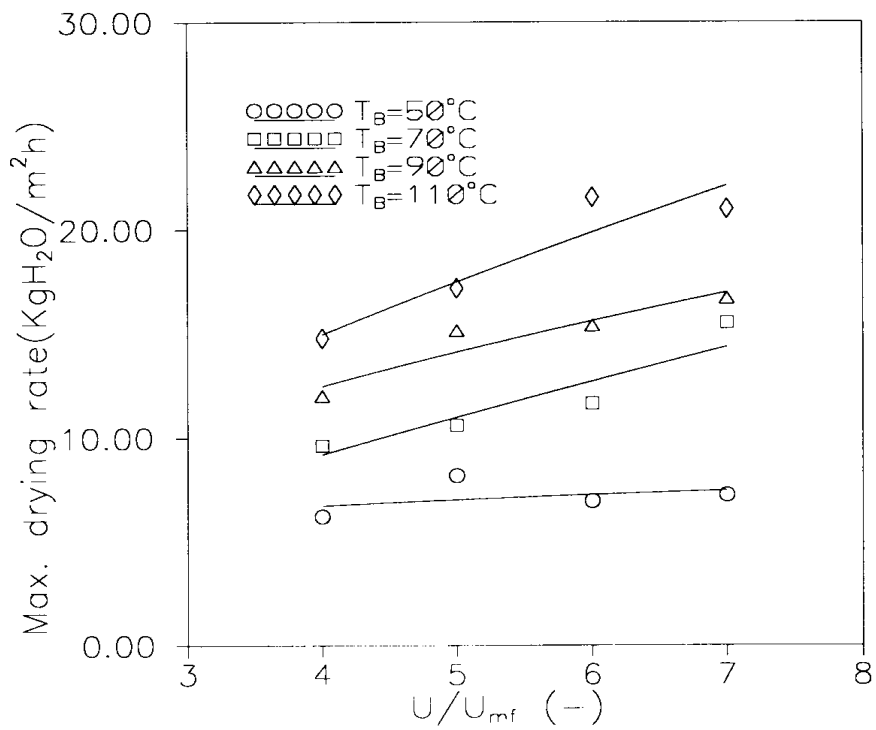


Fig. 11. Variation of maximum drying rates with ratio of u/u_{mf} .

또한, <그림 10>과 <그림 11>의 결과를 비교하여 보면 최대건조속도는 공탑속도보다 건조공기 온도에 더욱 민감하게 의존함을 볼 수 있다.

Lee등⁽¹³⁾의 연구 결과에 의하면, 유동층 건조시 최대건조속도는 무차원 공탑속도와 무차원 건조온도의 함수(power function)로 상관되어질 수 있다. <그림 12>은 최대건조속도와 실험변수간의 상관관계를 구한 결과를 나타내는 그림이다. 최대건조속도와 실험변수간의 상관관계식은 아래 식 (21)와 같으며, 이 식은 결정계수가 0.94이고 $18.79 \leq u_o \leq 42.02$ cm/s, 층온도 $50 \leq T_B \leq 110^\circ\text{C}$ 의 범위에 적용된다.

$$Dr = 2.772 (u/u_{mf})^{0.56} (T/T_a)^{0.79} - 4.792 \quad (21)$$

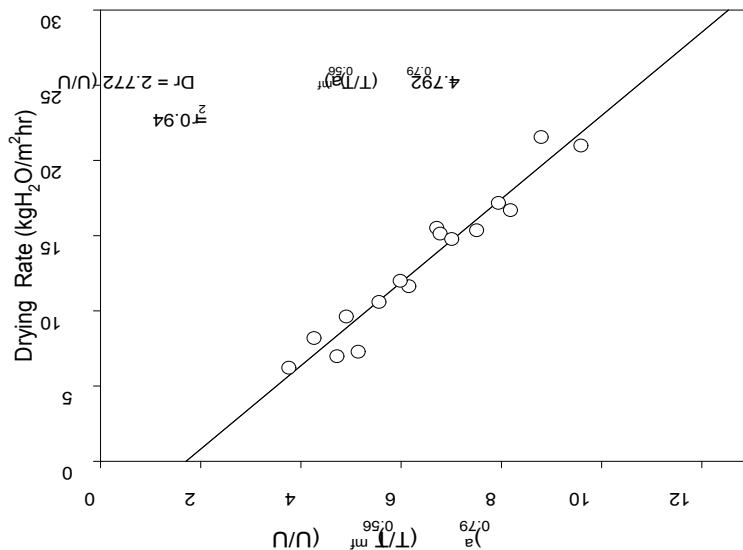


Fig. 12. Relationship between maximum drying rate and operating parameters.

3.4 정수장 슬러지의 연속식 건조

일반적으로 비산유출된 슬러지들의 함수율은 층물질의 함수율보다 큰 값을 가지며, 건조효율 저하의 주된 요인이 되는 것으로 알려져 있다. 그래서 비산유출되는 슬러지의 양과 이것이 갖는 수분량을 파악하는 것은 유동층 건조효율 조절의 측면에서 중요하며, 집진장치의 용량설계에 있어서도 매우 중요하다.

본 연구에서는 유동층 건조로를 사용하여 연속식 건조실험을 통하여 슬러지의 건조율과 건조효율을 구하였다. 층으로 주입되는 시료의 총량과 함수율, 그리고 1시간의 조업시간 동안 유동층 하부로 배출된 슬러지와 비산유출된 슬러지의 총배출량과 함수율을 측정하여 건조율을 계산하였다. 또

한 유동층 출구온도와 습도로부터 구한 비엔탈피로써 건조효율을 계산하였다.

3.4.1 슬러지의 건조율

스크류 공급기로 층으로 주입되는 시료의 실제주입총량을 계산하기 위하여 1시간 조업 기간동안의 유동층 하부로 배출된 슬러지와 비산유출된 슬러지의 배출량을 합산하여 식 (14)을 사용하여 실제 주입되는 총량을 계산하였다. 층으로 주입되는 실제 수분량은 주입 슬러지의 함수율과 실제 주입량에 의해 계산하였다. 또한 층에서 잔존하는 수분량은 실제주입 수분량에서 유동층 하부로 배출된 슬러지와 비산유출된 슬러지의 수분량을 합산한 값을 차감하여 계산하였다. 이렇게 계산된 주입 수분량과 잔존수분량과 식 (12)를 사용하여 건조율을 계산하였다.

<그림 13>은 공탑속도 변화에 따른 1시간 조업 동안 유동층 하부로 배출된 슬러지의 배출총량을 주입슬러지 총량으로 나누어 비율로 도시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 유동층 하부로 배출된 슬러지의 비율은 공탑속도 증가에 따라서 감소하는 경향을 볼 수 있다. 공탑속도의 증가에 따른 배출율의 감소는 층으로 주입되는 시료 중 미세슬러지입자의 비산유출속도가 증가하게 되어 층 밖으로 비산유출되기 때문에 층내의 유동층 하부로 배출된 슬러지의 양이 줄어든 것으로 생각된다. 또한 공탑속도의 증가에 따라 가열건조공기와 슬러지입자와의 혼합도가 증가하게 되는데, 이로 인해 입자 사이의 마찰에 의한 슬러지입자의 파쇄가 증가하여 미세슬러지입자의 생성이 증가하게 되어 비산유출되는 슬러지입자의 양이 증가하게 되고 유동층 하부로 배출된 슬러지의 배출량이 감소하는 것으로 생각된다.

<그림 14>는 층온도 증가에 따른 유동층 하부로 배출된 슬러지의 함수율 변화를 공탑속도별로 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 층온도 증가에 따라 유동층 하부로 배출된 슬러지의 함수율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 공탑속도 증가는 그림에서 나타난 바와 같이 유동층 하부로 배출된 슬러지 함수율 변화에 큰 영향을 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 공탑속도 증가에 따라 건조속도가 증가하여 슬러지 내부의 수분이 감소하여 유동층 하부로 배출된 슬러지의 함수율이 점차적으로 감소할 것이라 생각되지만, 본 실험에서는 모든 조건에서 비교적 높은 공탑속도를 사용하였고, 조업조건간의 공탑속도 차가 크지 않았기 때문에 공탑속도 변화는 함수율 변화에 별 영향을 미치지 못했으리라 생각된다.

<그림 15>는 공탑속도 변화에 따른 비산유출된 슬러지의 배출총량을 주입슬러지의 총량으로 나누어 비율로 도시한 것이다.

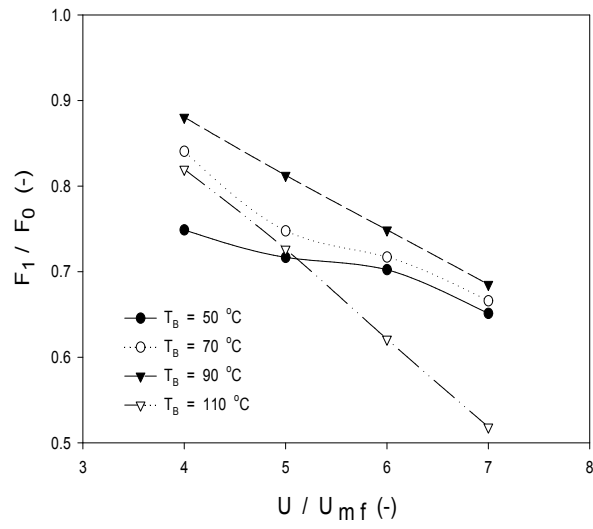


Fig. 13. Variation of bottom drain rate with u/u_{mf}

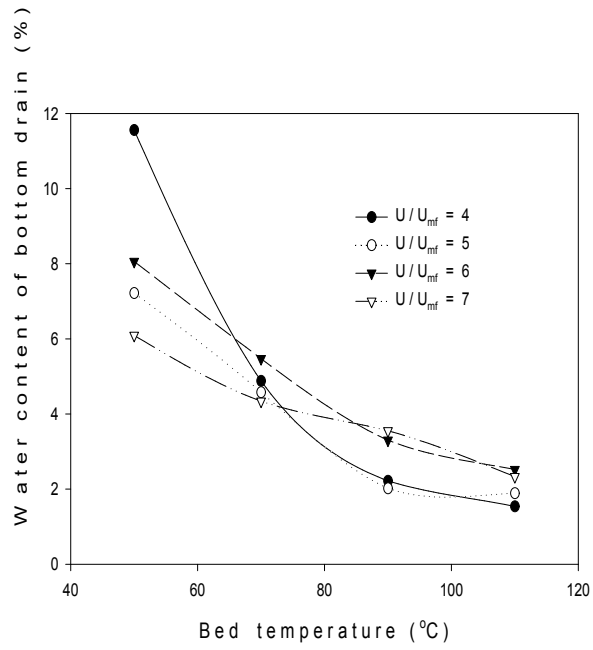


Fig. 14. Variation of water content of bottom drain dried solid with bed temperature.

그림에서 나타난 바와 같이 공탐속도가 감소함으로써 배출율이 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이는 공탐속도가 감소함으로써 가열공기와 슬러지 입자와의 혼합도 감소에 따른 마찰 및 파쇄빈도가 감소하고 미세슬러지입자의 비산유출속도가 감소한 것으로 생각된다.

<그림 16>는 층온도 증가에 따른 비산유출된 슬러지의 함수율변화를 도시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 층온도 증가에 따라 점차적으로 비산유출된 슬러지의 함수율이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 층온도 증가에 따른 외부 열 및 물질전달계수의 증가에 의한 유동층내 건조속도의 증진과 freeboard내 온도증가에 따른 freeboard내 건조증진으로 인해 비산유출된 입자의 함수율은 TA증가에 따라 감소한다. 그러나, 공탐속도의 증가에 따른 비산유출된 슬러지의 함수율 변화는 앞에서 상기한 바와 같이 별 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 유동층 건조로에서 건조슬러지의 배출은 층 하부에 설치된 배출관을 통하여 이루어지며 비산유출된 슬러지입자들은 사이클론에서 포집된다. 따라서, 주입된 슬러지가 건조된 양을 제외하고 건조물으로써 배출되는 것은 유동층 하부로 배출된 슬러지와 사이클론에서 포집된 비산유출된 슬러지를 모두 합한 것과 같다. 유동층 하부로 배출된 슬러지는 비산유출된 슬러지를 제외한 나머지 양의 슬러지가 층물질 배출관을 통하여 배출된 것이므로, 유동층 하부로 배출된 슬러지의 배출량의 공탐속도와 층온도에 대한 의존성이 비산유출된 슬러지의 경우와 대칭이 되는 경향을 보인다. 따라서 <그림 13>의 유동층 하부로 배출된 슬러지의 배출율의 경향은 <그림 15>에 나타난 비산유출된 슬러지의 양과 대칭이 되는 경향이다.

<그림 17>은 식 (12)를 사용하여 주입되는 슬러지입자의 조업 후 함수율변화에 의해 계산된 건조율을 층온도 증가에 따라 그림으로 도시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 층온도 증가에 따라서 건조율이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있는데, 층온도 증가에 따라서 슬러지입자와 가열된 건조공기와의 상호 열 및 물질전달계수가 증가하게 되어 층내 슬러지입자에서 건조되어 배출되는 수분량이 증가하게 되며, 이러한 배출 수분량의 증가에 따라 유동층 하부로 배출된 슬러지와 비산유출된 슬러지의 함수율이 점차 감소하여 건조율이 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 공탐속도의 변화는 건조율에도 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 공탐속도의 증가에 따라 유동층 하부로 배출된 슬러지와 비산유출된 슬러지의 배출총량과 함수율의 감소로 인하여 건조율이 증가할 것으로 생각되지만, 비교적 높은 공탐속도의 이용과 온도에 따른 공탐속도의 차가 그다지 크지 않은 이유로 공탐속도의 변화는 배출슬러지의 함수율과 건조율에 상관관계를 보이지 않았다.

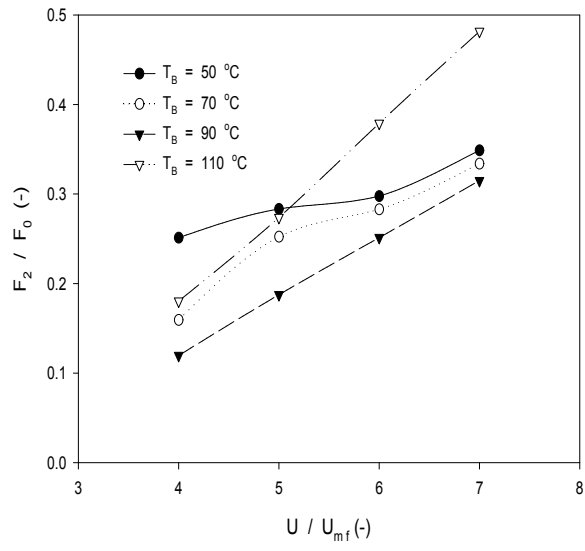


Fig. 15. Variation of elutriation rate with u/u_{mf} .

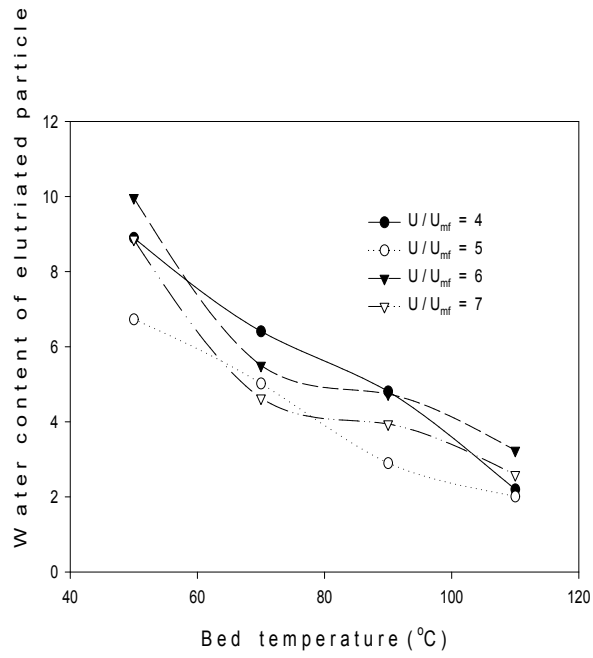


Fig. 16. Variation of water content of elutriated particles with bed temperature.

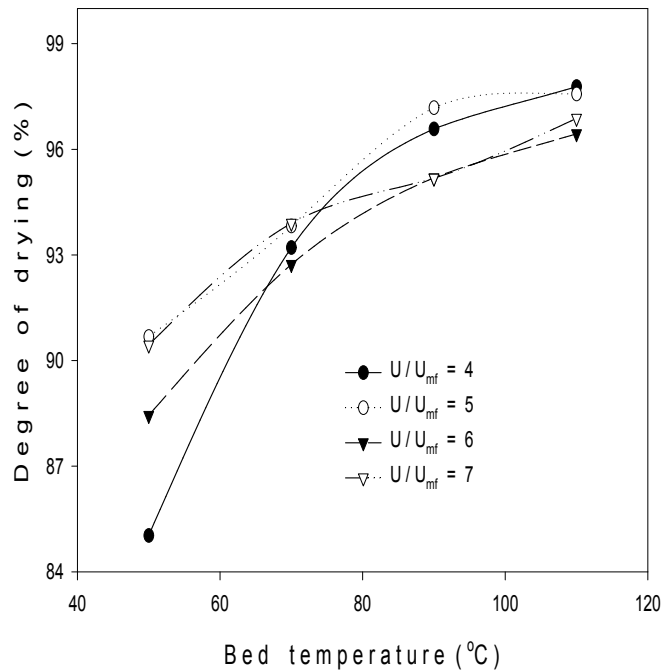


Fig. 17. Effect of bed temperature on the degree of drying.

3.4.2 슬러지 건조효율

정수장 슬러지의 유동층 건조시 건조효율은 건조로의 에너지효율을 결정하는 요인이 될 뿐만 아니라 슬러지의 감량효과와 원하는 생성물을 얻는데 직접적인 영향을 미친다. 이러한 슬러지 건조시 건조효율은 주어진 유동층 건조로 구조와 슬러지의 특성하에서 층온도, 공탑속도와 시료주입량에 의하여 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 층온도와 공탑속도 변화에 따른 슬러지의 건조시 슬러지 배출특성을 측정하였으며, 측정된 배출특성과 습도도표로부터 얻어진 비엔탈피로써 건조효율을 계산하였다.

<그림 18>은 조업온도에 따른 배출공기의 절대습도 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 배출공기의 절대습도는 온도증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 온도가 증가하면 공기의 단열포화습도가 증가하여 유입공기가 제거할 수 있는 최대수분량이 증가하므로 실제 수분제거율은 감소한다.

<그림 19>는 층온도에 따른 배출공기 비엔탈피의 변화량이다. 여기서 배출공기 비엔탈피는 배출공기와 동일한 절대습도를 갖는 공기의 층온도에서의 비엔탈피를 말한다. 배출공기의 비엔탈피에서 유입공기의 비엔탈피를 뺀 값은 유동층 건조로 벽에 설치된 히터에 의하여 단위 공기무게당 공급된 열량이다.

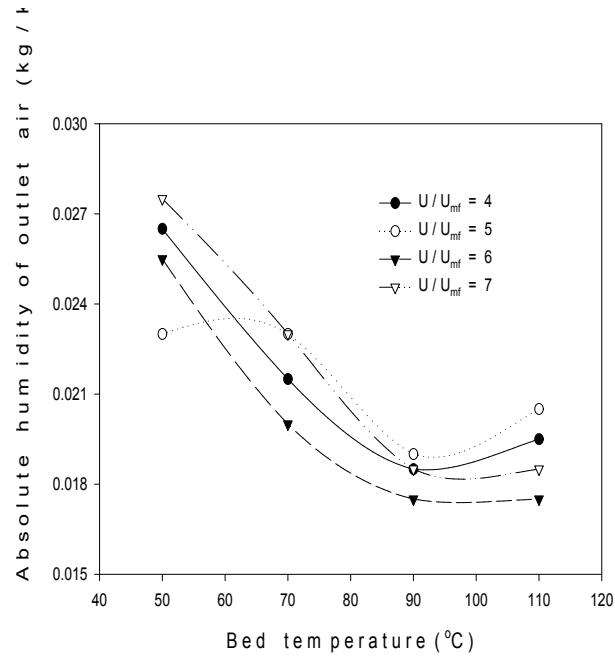


Fig. 18. Variation of absolute humidity in outlet air with bed temperature.

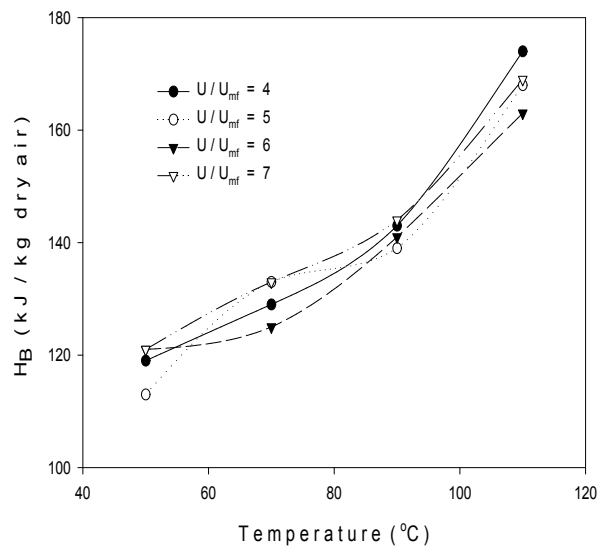


Fig. 19. Variation of H_B with bed temperature

그림에 나타난 바와 같이 비엔탈피는 증온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 증온도가 증가할수록 유동층 건조로에 설치된 히터로부터 공급되는 열량이 증가하기 때문에 배출공기의 비엔탈피는 증온도 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다.

<그림 20>은 식 (19)으로 정의한 건조효율을 사용하여 온도변화가 건조효율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 건조효율은 전반적으로 증온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 주입되는 수분량은 일정한데 비해 유입되는 건조공기의 온도가 증가함에 따라 수분을 건조하는데 사용된 열 소비율이 감소하므로 건조효율이 감소하는 경향을 보이는 것으로 생각된다.

증온도 70 °C에서 시료주입량 변화에 따른 결과를 <Table 2>에 나타내었다. 시료주입량의 증가에 따라서는 건조효율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 시료주입량이 증가하면 건조되어야 할 수분량의 증가에 따른 배출공기의 상대습도와 잉여열의 소비가 증가하므로 건조효율이 증가하는 경향을 보이는 것으로 생각된다.

Table 2. Variation of drying efficiency with feeding rate($T_B=70\text{ }^\circ\text{C}$)

U/ U_{mf} Feeding rate (g/min)	4	5	6	7
18	68.55%	55.49%	78.88%	86.49%
45	99.59%	84.74%	88.49%	91.31%

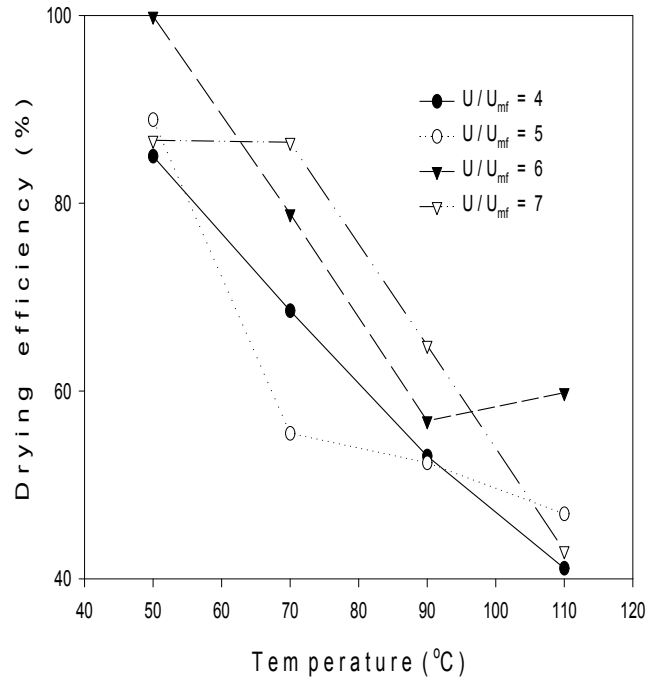


Fig. 20. Variation of drying efficiency with bed temperature.

4. 결 론

정수장 슬러지의 유동층 건조로에서의 건조결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 정수장 슬러지의 TG/DTA 분석 결과 정수장 슬러지의 건조시 수분만의 제거를 위해서는 최대 160 °C 이하에서 건조가 이루어져야 하며, 휘발분의 방출을 방지하기 위해서는 최대 240 °C 이하에서 건조가 이루어져야함을 알 수 있었다.
2. 정수장 슬러지와 건조공기의 온도, 상대습도간에는 탈착평형과 동일한 평형 관계가 존재하였다. 또한, 건조공기의 상대습도 30% 이하에서는 건조온도에 관계없이 슬러지의 평형함수비가 거의 일정한 값을 가졌으며, 건조슬러지의 최종함수율을 20% 이하로 낮추기 위해서는 건조공기의 온도를 조절한 것보다 건조공기의 상대습도를 30% 이하로 조절하는 것이 더욱 중요함을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서 사용한 층물질의 최소유동화속도는 건조공기의 온도상승에 따른 유입공기의 물성 변화로 인하여 50 °C에서는 6.44 cm/s 이었으나 110 °C에서는 4.7 cm/s로 감소하였다.
4. 정수장 슬러지의 건조속도와 함수비와의 관계에서 슬러지의 건조속도는 함수비 감소에 따라 감소하였으며, 건조속도의 감소 기울기가 다른 두 개의 영역으로 구분될 수 있었다. 또한, 최대 건조속도는 건조온도와 공탐속도의 증가에 따라 증가하였으나, 최대 건조속도는 건조온도에 더욱 민감하게 의존하였다.
5. 정수장 슬러지의 최대건조속도는 공탐속도와 건조온도에 대하여 다음과 같은 상관관계식으로 표현될 수 있었다.

$$Dr = 2.772 (u/u_{mf})^{0.56} (T/T_a)^{0.79} - 4.792$$

6. 유동층 건조로에서의 건조율은 건조공기의 온도증가에 따라서는 건조속도의 증가로 인하여 증가하는 경향을 보였으나, 공탐속도의 증가는 별다른 영향을 미치지 못하였다.
7. 유동층 건조로에서 건조효율은 층온도 증가에 따라 열공급량은 증가하나 수분증발에 의한 열 소비율이 감소하기 때문에 층온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 공탐속도의 변화는 건조효율에 영향을 미치지 못하였다.
8. 유동층 건조로에서 시료주입량이 증가하면 배출공기의 상대습도가 증가함에 따라 건조효율은 증가하는 경향을 보였다.

5. 인용문헌

1. 환경부, “1997년 상수도통계”(1998).
2. 배석문, “낙동강 수계 정수 슬러지의 성분분석 및 처분방안 연구”, 석사학위논문, 경성대학교(1996).
3. 김용진, “슬러지 건조 및 건조로 설계기술”, '97산학협동강좌(1997).
4. 이화영, 전해수, 조영일, “단위조작”, 회중당, pp. 572~621(1992).
5. 신용섭, 이제근, 이호태, 진경태, 전해수, “건조곡선을 이용한 도시하수 슬러지내 수분분포 측정”, J. of KSEE, 18(9), pp. 1061~1072(1996).
6. Kunii, D. and Levenspiel, O., “Fluidization Engineering”, John Willy and Sons Inc., New York, (1969).
7. Nakagawa, N., Ohsawa, K., Takarada, T., Kato, K., “Continuous Drying of a Fine Particle - Water Slurry in a Powder-Particle Fluidized Bed”, J. of Chem. Eng. Japan, 25, pp. 495~501(1992).
8. Ormos , Z., Szentmarjay, T., “Economic Considerations in Fluidized Bed Drying of Pastes Using Inert Particles”, Drying Tech., 5(4), pp. 577~591(1987).
9. Smollen, M., “Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction”, Wat. Sci. Tech., 22(12), pp. 153~161(1990).
10. Vesilind, P. A., “Treatment and Disposal of Wastewater Sludges” , Ann Arbor Science(1979).
11. Tsang, K. R. and Vesilind, P. A., “Moisture Distribution in Sludges”, Wat. Sci. Tech., 22(12), pp. 135~142(1990).
12. Kasakura, T., Imoto, Y., Mori, T., “Overview and System Analysis of Various Sewage Sludge Drying Processes”, Drying Tech., 11(5), pp. 871~900(1993).
13. Lee, D. H. and Kim, S. D., “Drying Characteristics of Starch in a Fluidized Bed”, Proc. of the 3th ASCON FBR Fluidized-Bed & Three-Phase Reactors, Kyongju Korea, pp. 533~539(1992).