

교반기를 부착한 회전건조기의 건조특성

전원표* · 이기우* · 박기호* · 이계중* · 김동국* · 김형수**

Drying Characteristics of Rotary Dryer with Disintegrator

W. P. Chun, K. W. Lee, K. H. Park, K. J. Lee, D. K. Kim and H. S. Kim

Key Words: Sludge Drying(슬러지 건조) Rotary Dryer(회전형 건조기), Drying Velocity(건조 속도), Disintegration Device(분쇄·교반기), Particle size(입자크기)

Abstract

In this paper, we have investigated the drying characteristics of waste sludge in a rotary dryer equipped with disintegration device. The sludge samples(moisture contents : 70~85%W.B.) used in the experiment were mainly a soybean and an alcohol fermentation sludges in food industry, or sewage sludge. It was studied by measuring the change of moisture contents that the shaft speed(operating range : 100~250rpm) affected on the drying rate and the particle size distribution of the dried solid. The dried granular products of the diameter of 1 to 5mm are obtained from sludge materials. In the results, as the increased of shaft speed, the particle size and the moisture contents of dried solid was decreased, and the retention time was increased.

기호설명

1. 서론

- R_c : 항울건조기간의 수분증발속도(kg/m²·h)
- h : 경막전열계수(kcal/m²·h·°C)
- t : 열풍온도(°C)
- t_w : 열풍습도 H 에서의 습구온도(°C)
- λ_w : t_w 에서의 증발잠열(kcal/kg)
- H : 열풍습도(kg-water/kg-dry air)
- H_w : t_w 에서의 포화습도(kg-water/kg-dry air)
- k_m : 물질이동계수(kg/m²·h·Δh)
- T : 체류시간(min)
- U : 열풍속도(m/sec)
- d : 입자의 직경(mm)
- ρ_p : 입자의 용적밀도(kg/m³)
- η : 공기밀도(kg/m³)

슬러지는 하·폐수처리 과정 및 제품 생산공정 등에서 발생하는 유기/무기성 폐기물로서 성상이 다양하며, 발생량도 급증하는 추세에 있다. 이러한 폐기물은 함수율(70~85%W.B.)이 높기 때문에 매립 또는 소각처리에 부적당함에도 불구하고 대부분 매립 처리되고 있다. 이들 폐기물에 함유된 유효성분의 손실, 악취 및 침출수 등에 의한 자연환경의 악영향, 대량 발생하는 폐기물의 매립 부지난 등 환경문제에 대한 대책이 시급하다.

최근 환경보전문제에 따른 폐기물의 이용과 그 처리에 대한 규제가 강화되면서 도시하수와 산업 폐수 슬러지의 안정화, 무해화, 감량화 및 재자원화가 중요한 과제로 부각되고 있다. 특히 슬러지 처리비용의 절감과 효율적인 재활용을 위해서는 슬러지 자체에 함유되어 있는 수분을 최소화 시키는 감량화 과정이 선행되어야 하며, 기계적 탈수 후에 반드시 건조시켜야 한다. 그러나 기계적 탈수는 물리적인 한계가 있으므로 슬러지의 감량

* 한국에너지기술연구원
** (주)가이아

화 및 재활용을 위해서는 열건조가 필수적이다.

일반적으로 도시하수 및 산업폐수 슬러지는 함수율이 높고 성상이 매우 다양하며, 건조과정에서 약 50~60%DS에서 점액상(sticky phase)을 형성한다. 이는 덩어리로 고형화(lump formation)하거나 건조된 입자들이 표면에 달라붙어 건조속도를 저하시키게 되므로 슬러지의 건조처리 과정에서 많은 문제점에 직면하게 된다. 외국의 경우 함수율이 높은 슬러지를 효과적으로 처리하기 위한 열건조장치 및 조합공정에 대한 다양한 연구가 수행되었다.^(1~2)

본 연구에서는 식품산업 공정의 유기성 슬러지 및 하수슬러지를 대상으로 분쇄·교반기를 부착한 회전형 건조기의 건조특성 실험을 수행하였다. 특히 주정박슬러지, 대두박슬러지 및 하수슬러지를 실험시료로 사용하여 분쇄·교반기의 회전수에 따른 입자크기, 체류시간 및 함수율 변화 등을 통하여 건조속도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 슬러지의 건조특성

2.1 슬러지의 건조원리

고형물의 건조는 결정체가 뚜렷한 물질의 건조에 적용되며 재료예열기간, 항울건조기간 및 감울건조기간의 3부분으로 구분된다. 재료예열기간은 투입된 피건조물이 습구온도까지 상승하는 구간으로 시간이 비교적 짧고 수분변화는 작다. 항울건조기간에는 유입열량은 모두 수분증발에 사용되며, 주위로부터의 전열속도와 피건조물 표면으로부터의 증발속도가 조화된 동적 평형에 있기 때문에 이 기간중의 건조속도는 일정하다. 또한 감울건조기간에는 피건조물의 표면에 마른 곳이 생겨 피건조물의 온도가 상승하기 시작하여 유입열량이 감소하게 되고 이 열량은 수분증발과 재료가열의 현열에 소비되므로 건조속도는 점차 감소하게 되며, 건조조건과 평형을 이루는 한계함수율에 도달하여 건조가 완료된다.

그러나 하수슬러지와 같은 무정형 물질에는 유리수(free water)와 결합수(bind water) 간의 명확한 구별이 불가능하기 때문에 일반적인 고형물의 건조원리가 적용될 수 없다. 즉, 슬러지에 함유된 수분은 화학적 및 물리적 결합수, 기계적으로 고정된 수분(immobilized water) 및 유리수

등으로 구성되어 있어 슬러지 내부로부터 표면으로의 수분이동 현상은 일반적인 결정체내에서의 수분이동 현상에 비해 매우 복잡하다.⁽³⁾ 이러한 슬러지의 건조는 입자로의 열전달, 입자내부에서 외부표면으로 이동하는 수분의 물질전달 및 입자 표면에서 증기의 탈리 등 물리적 과정이 동시에 진행되며, 높은 가열온도, 열전달 계수, 큰 부분압력차, 열전도 면적, 얇은 막두께 등의 변수들이 서로 연관되어 있다.

Fig. 1은 전형적인 슬러지의 건조특성 곡선을 나타낸 것으로서 A-B구간은 초기 예열구간이며, 점차 건조가 진행되면서 임계점 C에 도달할 때까지 직선(또는 직선에 가까운 곡선)을 나타내며, B-C구간은 항울건조기간으로 증발율이 일정하다. C점을 지나 D점까지의 C-D구간은 감울건조기간으로 증발율이 일정하지 않으며, D점을 지나서는 더 이상 증발이 일어나지 않는다. 따라서 슬러지 건조는 일반적인 결정체의 건조에 비하여 초기 예열기간중 슬러지 표면으로부터의 수분증발은 이론적인 최대치에 비해 낮으며 항울건조기간이 짧다. 또한 감울건조기간이 길며 임계함수율 지점이 불분명하다. 특히 항울건조기간에는 슬러지층 내부의 수분이동 등에 영향을 받지 않기 때문에 열풍건조에서의 수분증발속도는 일반적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_c = \frac{h \times (t - t_w)}{\lambda_w} = k_m (H_w - H) \quad (1)$$

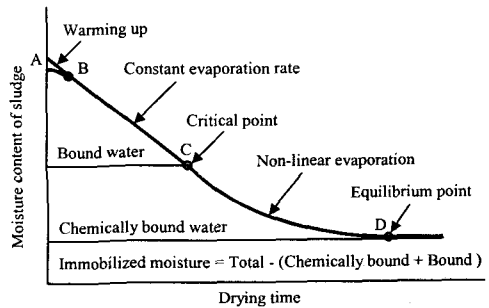


Fig. 1 Drying characteristic curve for sludge

2.2 슬러지건조기의 적용

기계적으로 탈수된 슬러지의 수분을 더욱 감소시키기 위한 가장 일반적인 건조방법은 접촉건조(contact drying)와 대류건조(convection drying)

방식이다. Fig. 2는 슬러지 처리에 적용되는 건조기의 형식별 운전범위를 나타낸 것으로서 함수율이 높은 슬러지 건조는 대부분이 스팀 또는 thermal oil 등을 열매체로 이용하는 접촉건조 방식을 많이 이용하고 있으며 스크류 건조기, 디스크형 건조기, 패들형 건조기 및 박막 건조기 등이 사용되고 있다. 열풍을 이용하는 대류건조에서는 회전형 건조기, 유동층 건조기 및 기류건조기 등이 일부 사용되고 있으며, 슬러지의 점액상에 대한 문제를 해결하기 위해 건조슬러지를 일부 순환시켜 다시 섞어 투입함으로써 역혼합 건조슬러지(back-mixed sludge)의 증가에 따른 건조기 용량 및 에너지 비용의 증가를 초래할 수 있다. 최근에는 슬러지 덩어리 물질의 미립화를 위해 회전형 건조기내에 파쇄기를 장착한 건조시스템, 접촉건조방식 과 대류건조방식 또는 원심탈수기와 회전형 건조기를 조합한 복합건조 시스템 등이 개발되었다.⁽⁴⁻⁵⁾

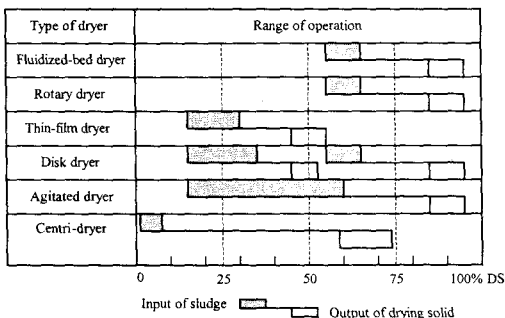


Fig. 2 Operating range of sludge dryer

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

분쇄·교반기를 부착한 회전형 건조기의 실험장치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 열풍발생부, 슬러지 투입부, 교반부, 건조부, 포집부, 배기부 등으로 구성하였다. 슬러지 처리용 성능실험장치는 초기투입량 100kg/hr, 초기함수율 70~85%WB에서 최종 건조품 함수율 40~50%WB, 열풍 입구 온도 500~600℃를 기준으로 열 및 물질수지를 계산하여 회전형 건조기를 설계하였다.

열풍발생기의 버너용량은 30,000kcal/hr, 회전형

드럼의 크기는 $\phi 800 \times 2000\text{mm}$, 재질은 스테인레스로 제작하였으며, 드럼의 회전수를 2~10rpm까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 슬러지의 건조과정에서 덩어리 물질의 분쇄 및 교반작용이 동시에 진행될 수 있도록 교반축에 10개의 분쇄날개를 15°의 비틀림각으로 부착하고 교반축의 회전수를 300rpm까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 슬러지 투입구에는 정량공급이 가능하도록 스크류 피더(screw feeder)를 제작, 설치하였다.

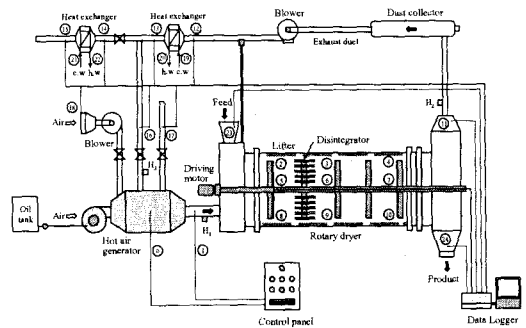


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

3.2 실험방법

슬러지 건조용 실험장치의 건조특성 실험을 위해 실험조건을 Table I과 같이 선정하였다. 성능 실험은 열풍발생기의 열풍입구온도를 500℃까지 예열하여 드럼내부의 온도가 정상상태에 도달하였을 때, 분쇄·교반기를 작동시키고 슬러지를 투입하여 실험을 수행하였다. 실험은 주정박슬러지, 대두박슬러지 및 하수슬러지를 사용하여 열풍입구 온도 500~550℃에 대하여 분쇄·교반기의 회전수를 100~250rpm까지 조절하고, 슬러지의 공급량을 80~100kg/hr로 변화시켜 건조 후의 함수율과 입자크기를 측정하였다.

실험장치의 열풍입구 온도, 드럼내부 온도, 배기가스 온도, 피건조물 및 건조품의 온도 등을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 24개소의 k-type 열전대를 설치하였으며, data logger에 의해 온도를 기록하였다. 열풍입구 및 배기가스의 습도를 측정하기 위해 질대습도 측정기(Vaisala HMP235)를 사용하였다. 피건조물 및 건조품의 함수율 측정은 digital balance를 이용하였으며, 최종 건조

품의 입자크기는 표준체(standard mesh)를 이용하였다.

Table 1 Experimental condition

Parameters	Unit	Operation condition
Drying materials	-	Organic sludge Sewage sludge
Moisture content	%WB	75~85
Feed rate	kg/hr	80~100
Inlet temperature	℃	500~550
Drum speed	rpm	2.5
Shaft speed	rpm	100~250

4. 실험결과 및 고찰

4.1 교반기 회전속도에 따른 입자크기 분포

본 실험에서는 주정공장의 증류공정에서 배출되는 주정폐액(고형물 농도 4~7Wt%)의 탈수 주정박 슬러지(74%WB), 두유공장의 정제공정에서 배출되는 대두박 슬러지(85%WB) 및 도시하수 슬러지(78%WB)를 직접 수거하여 실험을 수행하였다.

주정박 슬러지의 경우 실험장치의 드럼내부 평균온도를 220~230℃로 유지되도록 열풍입구온도를 조절하였다. 드럼내부의 평균온도는 약 226℃로서 시간이 경과함에 따라 약 10℃정도 과열되었다. 건조드럼의 회전속도의 조절은 드럼의 길이(2000mm)를 고려하여 2.5rpm으로 고정 운전하였다. 투입슬러지의 평균온도는 13.6℃, 최종건조품의 평균온도는 47.3℃로 측정되었다. 교반축의 회전수를 100rpm, 150rpm, 200rpm으로 조절하여 실험한 결과, 교반축의 회전수에 따른 입자의 크기분포는 Fig. 4와 같이 나타났으며, 평균입자의 크기는 회전수 100rpm에서 3.39mm ϕ , 150rpm에서 2.19mm ϕ , 200rpm에서 1.93mm ϕ 로 측정되었다. 교반축의 회전수가 증가할수록 입자의 크기는 줄어드는 것으로 나타났으며, 입자의 크기에 따른 체류시간은 100rpm에서 12분, 150rpm에서 13분, 200rpm에서 15분 정도 소요되었다. 일반적으로 회전형 건조기 드럼내의 피건조물의 이동속도는 피건조물의 물성 및 크기, 기체의 질량속도, 드럼의 직경 및 경사도, 리프터 수 및 비틀림 각 등에 따라서 변화하며, Schofield⁽⁶⁾ 등의 이동속도식 (2)에 의해서 체류시간을 예측할 수 있다.

$$T = \frac{L}{2ND \left(\tan \alpha - \frac{18\eta U}{\rho_p d^2} \right)} \quad (2)$$

그러나 본 실험장치의 경우 교반축의 고속회전에 의해 투입 슬러지가 덩어리 상태에서 파쇄되어 중간크기로 되며 다시 입자상태로 변화되면서 이동되고 열풍의 흐름은 강력한 난류유동을 하기 때문에 이동속도는 드럼의 직경에 큰 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 따라서 기존의 이론적인 이동속도식을 직접 적용하기는 어렵지만 동일한 운전조건에서 입자의 크기와 겉보기밀도에 영향을 받으므로 교반축의 회전속도의 변화에 따라 입자의 크기가 작은 경우 체류시간이 길어지는 것으로 나타났으며, 실험 결과는 이론 식들에 비해 체류시간이 길게 나타났다.

대두박 슬러지의 실험방법도 주정박 슬러지의 실험조건과 동일한 방법으로 수행하였으며, 투입슬러지의 평균온도 13.9℃, 건조품의 평균온도 48.2℃로서 주정박 슬러지와 유사하게 나타났다. 교반축의 회전수를 주정박 슬러지와 동일한 방법으로 조절하여 실험한 결과, 교반축의 회전수에 따른 입자의 크기분포는 Fig. 5와 같이 나타났으며, 평균입자의 크기는 교반축의 회전수 100rpm에서 3.23mm ϕ , 150rpm에서 2.09mm ϕ , 200rpm에서 1.86mm ϕ 로 측정되었다. 대두박 슬러지의 입자크기 분포는 주정박 슬러지에 비해 약간 작아지는 것으로 나타났으며, 이는 재료의 물성에 영향이 있는 것으로 생각할 수 있다. 교반축의 회전수 150rpm과 200rpm의 경우 평균입자의 크기는 200rpm에서 약간 작아지나 입자크기 2mm ϕ 에서의 분포가 거의 동일하며, 전체의 50%이상을 차지하고 있어 대두박 슬러지의 경우 교반축의 회전수를 200rpm보다 150rpm으로 가동하는 것이 유리할 것으로 판단되었다. 입자의 크기에 따른 체류시간은 100rpm에서 19분, 150rpm에서 20분, 200rpm에서 23분 정도 소요되었다. 이 결과는 비교적 함수율이 높은 투입슬러지의 덩어리 일부가 반죽같은 상태로 투입되어 점착력에 의해 드럼내에 달라붙어 이동속도에 장애를 받으며, 드럼의 끝단으로 갈수록 주정박 슬러지에 비해 입자가 작아지기 때문에 체류시간이 길어지는 것으로 관찰되었다. 대두박 슬러지와 같이 함수율이 85%WB이상의 경우에는 투입부에 별도의 분산장치가 필요하였다.

하수슬러지의 경우도 주정박 슬러지와 동일한

실험조건에서 실험하였으며, 유기/무기성 폐기물이 혼합된 하수슬러지의 특성상 유기성슬러지에 비해 덩어리의 분쇄효과가 떨어지고 건조속도가 낮아질 것으로 예측되어 교반축의 회전수를 상향 조절하여 150rpm, 200rpm, 250rpm에서 실험하였다. 투입슬러지의 평균온도는 18.7℃, 최종 건조품의 출구온도는 51.5℃로 측정되었다. 교반축의 회전수에 따른 입자크기의 분포는 Fig. 6과 같이 나타났으며, 평균입자의 크기는 회전수 150rpm에서 3.64mm ϕ , 200rpm에서 3.02mm ϕ , 250rpm에서 2.75mm ϕ 로 측정되었다.

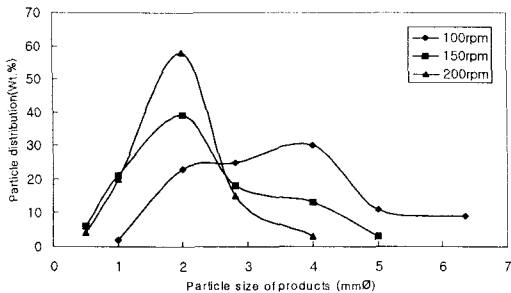


Fig. 4 Particle size distribution of alcohol sludge

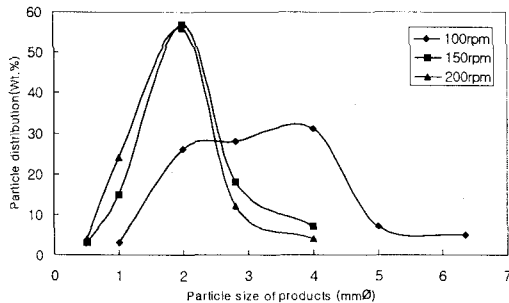


Fig. 5 Particle size distribution of soybean sludge

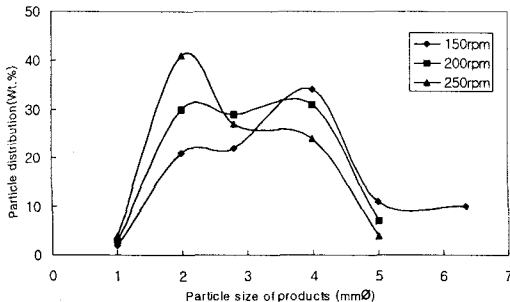


Fig. 6 Particle size distribution of sewage sludge

한편 하수슬러지의 입자크기에 따른 체류시간은 150rpm에서 7분, 200rpm에서 8분, 250rpm에서 10분 정도 소요되었다.

4.2 건조특성 분석

교반축의 회전수 변화에 따른 주정박 슬러지의 최종 건조품의 함수율 변화는 Fig. 7과 같이 나타났으며, 건조품의 평균함수율은 100rpm에서 58.2%WB, 150rpm에서 48.6%WB, 200rpm에서 38.6%WB로 크게 낮아지는 것으로 나타났다. 교반축의 회전수 100rpm에 비해 200rpm의 경우 건조율(단위시간당 증발율)이 약 51.8% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 교반축의 회전수가 증가할수록 입자의 크기가 작아져서 입자의 표면적이 커져 열전달 효과가 증가하는 것으로 판단된다.

대두박 슬러지에 대한 실험결과 최종 건조품의 함수율 변화는 Fig. 8과 같이 나타났으며, 최종 건조품의 평균함수율은 100rpm에서 64.4%WB, 150rpm에서 51.3%WB, 200rpm에서 43.1%WB로 크게 낮아지는 것으로 나타났다. 교반축의 회전수 100rpm에 비해 200rpm의 경우 건조율이 약 27.6% 증가하는 것으로 나타났다. 교반축의 회전수 150rpm의 동일조건에서 주정박 슬러지와 대두박 슬러지의 최종 건조품의 함수율을 비교하면 대두박 슬러지의 건조율이 주정박 슬러지에 비해 약 40%정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대두박 슬러지의 경우가 주정박 슬러지의 체류시간에 비해 길기 때문에 건조속도에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 주정의 원료(감자, 고구마, 옥수수, 쌀보리, 타피오카 등)가 대두의 원료(콩)에 비해 성상이 복잡하여 건조속도에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

하수슬러지의 건조품의 함수율 변화는 Fig. 9와 같이 나타났으며, 최종건조품의 평균함수율은 150rpm에서 65.7%WB, 200rpm에서 60.2%WB, 250rpm에서 54.6%WB로서 건조속도가 유기성 슬러지에 비해 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 하수슬러지의 경우 유기/무기성 혼합 폐기물로서 처리과정에서 고분자 응집제가 다량 투입되어 입자의 결합에 의해 분쇄효과가 떨어지고 유기성 슬러지에 비해 항울건조기간이 비교적 짧고 감율 건조기간이 길어져서 건조효율이 떨어지는 것으로 생각된다. 교반축의 회전수 150rpm에 비해

250rpm의 경우 건조율이 약 43.3% 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 피건조물의 입자크기가 건조속도에 미치는 영향은 대두박 슬러지에 비해 주정박 슬러지 또는 하수슬러지의 경우가 큰 것으로 분석되었으며, 건조가 어려운 물질일수록 입자의 크기를 작게 하는 것이 건조효율 향상에 유리하다고 판단된다.

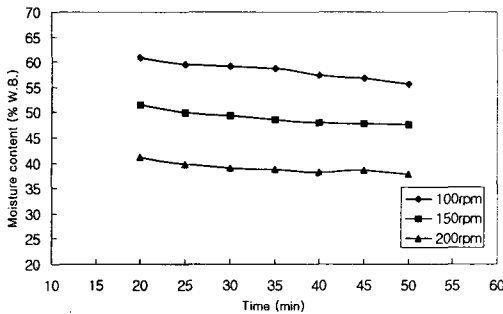


Fig. 7 Moisture content of products (sample of alcohol sludge)

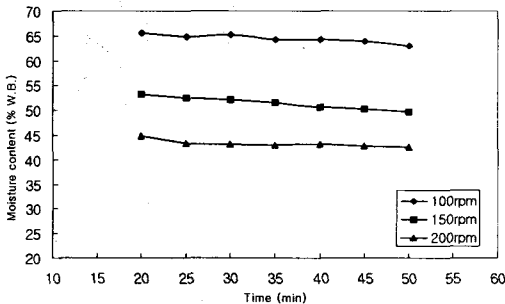


Fig. 8 Moisture content of products (sample of soybean sludge)

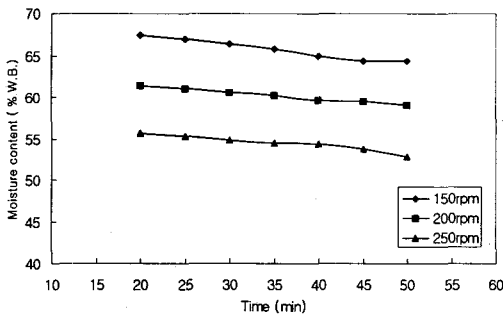


Fig. 9 Moisture content of products (sample of sewage sludge)

5. 결론

본 연구에서는 함수율이 높은 유기성 슬러지 및 하수슬러지를 대상으로 분쇄·교반기를 부착한 회전형 건조기의 건조특성 실험을 통해 교반축의 회전수를 100~250rpm까지 변화시켰을 때, 대상 슬러지의 입자크기는 대략 1~5mm ϕ 로 측정되었으며, 회전수가 증가할수록 입자는 작아지고 최종 건조품의 함수율도 낮아지는 것으로 나타났다.

피건조물의 입자크기에 따른 건조율의 증가는 주정박 슬러지의 경우 51.8%, 대두박 슬러지의 경우 27.6%, 하수슬러지의 경우 43.1%로 나타났으며, 입자크기가 건조속도에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 특히 건조가 어려운 물질일수록 피건조물의 입자크기를 작게 하는 것이 건조효율 향상에 유리하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) H. Gruter, M. Mater, K. H. Oehlmann and M. D. Hicks, 1990, "Drying of Sewage Sludge an Important Step in Waste Disposal", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 22, No. 12, pp. 57-63.
- (2) H. Shibata and A. S. Mujumdar, 1994, "Steam Drying Technologies", *Drying Technology*, Vol 12, No. 6, pp. 1485-1524.
- (3) M. Smollen, 1990, "Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 22, No. 12, pp. 153-161.
- (4) S. Kawai and A. Kubota, 1982, "Drying and Granulation of Sludge materials in Rotary Dryer Equipped with Disintegration Device for Conglomerate materials", *Proceeding of the 3rd Int. Drying Symp.*, Vol. 1, pp. 413-416.
- (5) R. Schilp and W. Epper, 1994, "One-stage Process for Combined Dewatering and Drying of Sewage and Industrial Sludges", Presented at VDI-Symposium-BW 43-36-11 Sewage Sludge Disposal I, May. 1994, Munich
- (6) F. R. Schofield, B. Sc. and P. G. Glikin, 1962, "Rotary Driers and Coolers for Granular Fertilizers", *Trans. Instn Chem. Engrs*, Vol 40, pp. 183-190.