

## 회전건조기에서의 고습도 열풍건조 특성

전원표, 이기우, 박기호, 이제중, 황휘우, 김 흥\*  
한국에너지기술연구원, 호서대학교\*

### Characteristics of high humid air drying in rotary dryer

W. P. Chun, K. W. Lee, K. H. Park, K. G. Lee, H. W. Hwang, H. Kim\*  
Korea Institute of Energy Research, \*Hoseo University,

#### 1. 서론

통기식 건조장치나 입자부양식 건조장치에 사용되는 열풍건조는 가열공기와 피건조물이 접촉하여 수분을 증발시키는 대류전열 방식으로서 식품, 요업 및 화학공업분야 등에 널리 사용되고 있다. 과열증기 또는 고습도 공기를 역전점 온도이상에서 가열열풍으로 사용하는 경우 가열공기와 연소가스에 고습도 배기가스를 직접순환 재이용함으로써 기존시스템에 비해 에너지절약 효과가 크다. 특히 기존시스템에 비해 증발속도가 빠르기 때문에 장치의 소형화가 가능하고, 열효율이 향상되며, 배기가스의 일부를 순환 이용함으로써 배기가스 처리 장치가 소형으로 되는 장점이 있다.

이러한 과열증기 또는 고습도 공기를 이용한 건조의 전열특성에 대한 이론 및 실험적 연구가 다양하게 추진되었다<sup>(1-4)</sup>. 최근에는 과열증기 또는 고습도 열풍의 전열과 대류뿐만 아니라 복사의 영향을 고려한 복합열전달 특성에 대한 연구가 추진되었다<sup>(5-7)</sup>. 그러나 대부분의 연구가 이론 및 실험적 연구로 수행되었으며, 일부 기류건조기 등에 적용된 사례가 있지만 실 플랜트에 적용된 사례는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 고온열풍을 이용하는 슬러지 건조용 직화식 회전건조기에 배기가스 순환이 용 시스템을 적용하였으며, 고습도 열풍건조 실험을 통하여 열풍의 습도가 건조속도에 미치는 영향을 분석하였다.

#### 2. 고습도 건조특성

일반적으로 열풍건조에서의 필요 수분증발량의 대부분이 항울건조기간(constant drying period)에 발생되며, 이 때의 건조속도는 주로 외부 건조조건(열풍 입구온도, 배기온도, 열풍 속도 및 습도)에 의해 결정된다. 항울건조기간에서의 수분 증발속도는 다음 (1)식으로 표현할 수 있다.

$$W_c = \frac{h_c}{r_w} (t - t_w) = k_m (H_w - H) \quad (1)$$

여기서  $W_c$ 는 항울건조기간의 증발속도(kg/m<sup>2</sup>·hr),  $h_c$ 는 경막전열계수(kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C),  $t$ 는 열풍온도(°C),  $t_w$ 는  $t$ 에 대한 수분표면온도(°C),  $r_w$ 는  $t_w$ 에서의 잠열(kcal/kg),  $k_m$ 은 물질이동계수(kg/m<sup>2</sup>·hr·Δh),  $H$ 는 열풍습도(kg water/kg dryair),  $H_w$ 는  $t_w$ 에서의 포화습도이다.

(1)식에서  $h_c/r_w$ 는 다양한 온도조건에 대하여 매우 작은 값으로서 항을건조기간의 증발속도  $W_c$ 는 유효온도차 ( $t-t_w$ ) 또는 ( $H_w-H$ )에 의해서 크게 좌우된다. 특히 건조의 유효온도차 측면에서 보면 항을건조기간에 투입된 재료는 일정온도에 머무르게 되고 이 온도는 근사적으로 열풍의 습구온도이므로 동일 열풍온도에서는 공기의 습도가 높아지게 되면 습구온도도 높아지게 되므로 열풍과 재료의 유효온도차가 감소되어 건조속도가 감소하게 된다. 그러나 과열증기 또는 고습도 공기를 고온(역전점 온도이상)에서 사용하는 경우에는 습도가 증가되어 유효온도차가 감소하는 것 이상으로 경막전열계수( $300\sim 500\text{kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ )의 값이 크게 증가하기 때문에 건조속도가 증가하게 된다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 공기의 경우 수분표면온도  $t_w$ 는 근사적으로 습구온도와 같으며, 수분증발 곡선은 열풍의 입구온도에 따라서 습구온도가 변하기 때문에 각 온도에 대한 기울기가 변화한다. 수분증발 곡선은 저온에서는 아주 작게 증가하며, 고온에서는 거의 직선에 가깝게 증가한다. 과열증기의 경우 증발표면온도가  $100^\circ\text{C}$ 에서 평형을 이루며, 습구온도는 대기압  $100^\circ\text{C}$ 로서 증기온도에 따라 변화하지 않는다. 따라서 경막전열계수 ( $h_c$ )가 일정하게 되고 증발잠열 ( $r_w$ )도 크게 변화하지 않으므로 과열증기중에서의 증발속도는 대기압  $100^\circ\text{C}$ 에서 0으로되며 이점을 기점으로 증발속도 곡선은 거의 직선으로 증가된다. 또한 습공기 또는 건공기와 수증기의 혼합기체의 경우 증발속도 곡선은 노점온도를 기점으로 거의 직선에 가까운 곡선으로 증가한다. Fig. 1에서 열풍의 온도가 역전점 온도( $170\sim 190^\circ\text{C}$ )이상으로 증가하게 되면 과열증기 또는 고습도공기 중에서의 증발속도가 건공기 중에서의 증발속도보다 크게 증가함을 알 수 있다<sup>(1, 4)</sup>. 따라서 역전점 온도이상의 고온을 사용하는 열풍건조시스템에 있어서 고습도 배기가스의 일부를 직접순환 이용하는 방식이 에너지절약 측면에서 유리하며, 고온 열풍을 이용하는 회전건조기, 기류건조기 및 유동층건조기 등에 적용할 수 있다.

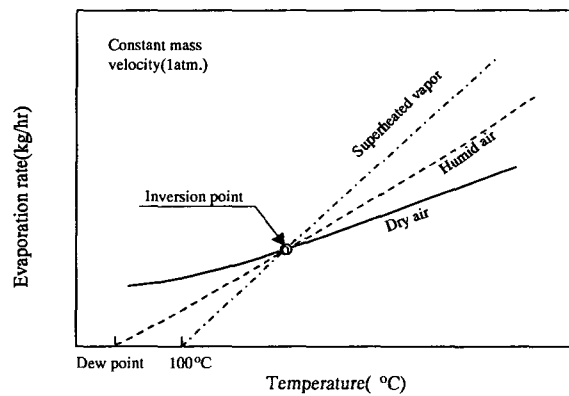


Fig. 1 Curves of evaporation rate in air, humid air and superheated vapor

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에 사용된 슬러지 건조용 회전건조기의 실험장치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 열풍발생부, 슬러지 투입부, 파쇄부, 건조부, 포집부, 배기부 및 배열회수부 등으로 구성하였다.

슬러지 투입량 60~80kg/hr, 초기함수율 70~85%.WB에서 최종 함수율 40~50%.WB를 설계조건으로 회전건조기를 설계하였으며, 시스템의 열 및 물질수지를 계산하여 배기가스 순환이용 고습도 열풍건조시스템을 적용하였다. 열풍발생기의 버너용량은 30,000kcal/hr로서 열풍의 입구온도를 400~600℃까지 조절할 수 있도록 디지털 온도조절기를 부착하였다. 드럼의 크기는  $\phi 800 \times 2000$ mm, 재질은 스테인레스로 제작하였으며, 드럼의 회전수를 3~10rpm까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 슬러지의 건조과정에서 덩어리 물질의 파쇄 및 교반작용이 동시에 진행될 수 있도록 교반축에 10개의 분쇄날개를 15°의 비틀림각으로 부착하였다. 교반축 회전용 모터는 10hp이며, 축의 회전수를 최대 300rpm까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 슬러지 투입구에는 케이크 상태의 슬러지를 작은 덩어리로 분쇄하여 정량 공급이 가능하도록 스크린 공급기(rotating screen feeder)를 설치하였다.

배기가스중의 분진을 제거하기 위해 cyclone을 설치하였으며, 고습도의 배기가스를 순환 이용하기 위해 배기가스의 일부를 열풍발생기로 재순환하도록 설치하였다. 또한 배기가스의 송풍량을 조절하기 위해 배기덕트에 volume damper를 설치하였다.

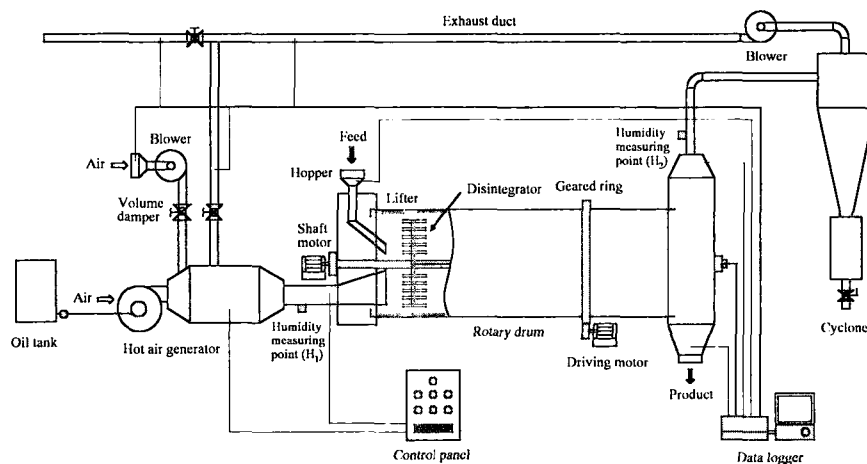


Fig. 2 Test apparatus of rotary dryer

### 3.2 실험방법

슬러지 건조용 실험장치의 건조특성 실험을 위해 실험조건을 Table 1과 같이 선정하였다. 성능실험은 열풍발생기의 입구온도를 500℃까지 예열하여 드럼내부의 온도가 정상상태에 도달하였을 때, 교반·파쇄기를 작동시키고 슬러지를 투입하여 실험을 수행하였다. 실험시료는 주정박슬러지와 대두박슬러지를 사용하였으며, 회전건조기의 성능실험을 위해 드럼내부의 온도 200~230℃에서 교반·파쇄기의 회전수를 100~250rpm까지 조절하고, 슬러지의 공급량을 60~80kg/hr로 변화시켜 건조 후의 함수율과 입자크기를 측정하였다. 또한 고습도 열풍 건조 특성실험을 위해 동일 운전조건에서 배기가스를 순환 이용하는 경우와 순환하지 않는 경우에 대하여 비교 실험을 수행하였다.

실험장치의 열풍 입구온도, 드럼 내부온도, 배기가스온도, 피건조물 및 건조품 온도 등을 측정하기 위해 20개소의 k-type 열전대를 설치하였으며, data logger에 의해 온도를 기록하였다. 열풍입구 및 배기가스의 습도를 측정하기 위해 절대습도 측정기를 사용하였다. 피건조물 및 건조품의 함수율 측정은 digital balance를 이용하였으며, 최종 건조품의 입자크기는 표준체(standard mesh)를 사용하였다.

Table 1 Experimental condition

Parameters	Unit	Operation condition
Drying materials	-	Organic sludge
Initial moisture content	%.WB	75~85
Feed rate	kg/hr	60~80
Inlet temperature	℃	500~550
Exhaust temperature	℃	105~120
Recycling rate of exhaust gas	%	50~60
Drum speed	rpm	2.5
Shaft speed	rpm	100~250

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 슬러지 건조특성

실험시료는 현장에서부터 수거한 주정박슬러지와 대두박슬러지를 사용하였으며, 슬러지의 건조특성을 파악하기 위해 moisture balance에 슬러지시료 10g을 넣고 105℃에서 30초 간격으로 시료의 건조시간에 따른 무게변화를 측정하였다. 주정박슬러지 시료의 경우 초기 함수율은 73.8%.WB, 대두박슬러지의 경우 85%.WB이다. Fig 3은 각 시료의 건조시간에 따른 무게변화를 측정한 결과이다. 주정박슬러지의 경우 항윤건조기간과 감윤건조기간의 임계점이 약 52%.WB로 나타났으며, 평형함수율 지점은 약 3~4%.WB로 추정되었다. 대두박슬러지의 경우 임계함수율 지점이 약 75%.WB, 평형함수율 지점은 2~3%.WB로 추정되었다.

슬러지의 건조특성은 일반적인 고형물 건조에 비해 항윤건조기간이 짧으며, 감윤건조기간이 긴 특성을 지니고 있다. 본 실험에 사용된 유기성슬러지도 하수슬러지와 비슷한 양상을 보이고 있으나 대두박슬러지의 경우 슬러지내의 수분분포가 표면수, 모관수 및 접촉수 등의 양이 많아서 감윤건조기간 동안에 상대적으로 수분증발량이 증가하는 것으로 판단되었다.

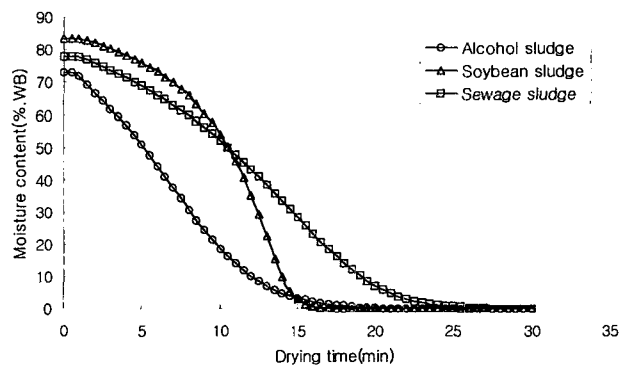


Fig. 3 Drying curves of soybean sludge, alcohol sludge and sewage sludge

대두박슬러지(초기함수율 80%.WB)와 주정박슬러지(74%.WB)의 실험시료를 대상으로 건조실험을 수행하였으며, 슬러지공급량 60kg/hr, 드럼의 회전수 2.5rpm, 내부 평균온도 220℃에서 교반축의 회전수를 200rpm으로 회전한 경우의 실험결과 교반축의 회전수에 따른 최종

건조품의 평균 입자크기는 대두박슬러지의 경우 1.86mm $\phi$ , 주정박슬러지의 경우 1.93mm $\phi$ 로서 평균 입자크기가 비슷한 크기로 나타났다. 최종 건조품의 단위시간당 수분증발속도는 대두박슬러지의 경우 35.1kg/hr, 주정박슬러지의 경우 25.6kg/hr으로 나타났으며, 입자크기가 작아질수록 건조속도가 증가되며, 체류시간은 길어지는 것으로 나타났다.

#### 4.2 고습도 열풍건조 특성

본 실험에서는 고습도 배기가스의 직접순환 이용방식과 배기가스를 순환하지 않는 방식에 대하여 실험을 수행하였다. 각 시료에 대하여 회전드럼내의 온도를 역전점 온도이상으로 유지시키기 위해 평균온도 220 $^{\circ}$ C에 도달하였을 때, 교반기의 회전수를 200rpm으로 조절하고, 실험시료를 60kg/hr로 정량 공급하여 정상운전이 진행되는 동안 배기가스를 순환하는 경우와 순환하지 않는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 실험을 진행하는 동안 외기공기의 송풍량은 14m<sup>3</sup>/min, 열풍의 입구온도는 시간이 경과됨에 따라 510~525 $^{\circ}$ C까지 변화되었으며, 배기가스의 온도는 103~108 $^{\circ}$ C, 절대습도는 0.286~0.302kg w/kg d.a로 측정되었다.

배기가스를 순환 이용하는 경우와 이용하지 않는 경우에 대한 건조품의 함수를 분포를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 배기가스의 순환율을 50%로 운전한 결과 순환 이용하지 않은 경우에 비해 대두박슬러지의 경우 건조품의 평균함수율이 51.8%에서 35.6%.WB로 낮아졌으며, 주정박슬러지의 경우 평균함수율이 54.5%.WB에서 42.5%.WB로 낮아졌다. 따라서 배기가스를 직접 순환하여 고온 고습도의 열풍을 건조열원으로 이용하는 경우 단위 시간당의 증발속도는 Table 2에 나타낸 바와 같이 대두박슬러지의 경우 약 18%정도 향상되었으며, 주정박슬러지의 경우 약 28%정도 향상되었다.

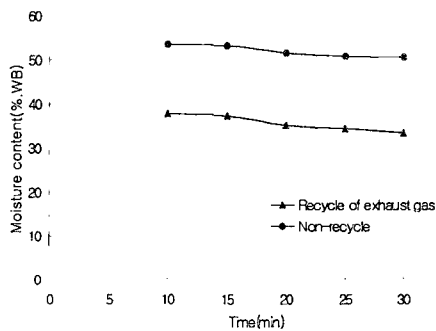


Fig. 4 Moisture content profiles of soybean sludge

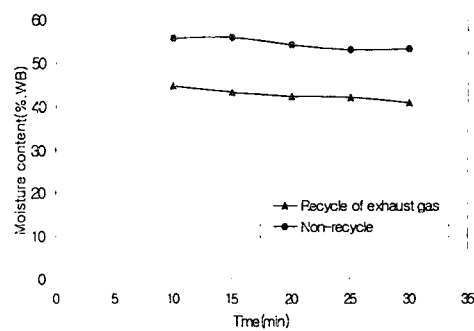


Fig. 5 Moisture content profiles of alcohol sludge

Table 2. Comparison data of test results

Parameters		Unit	Soybean sludge	Alcohol sludge
Feed rate		kg/hr	60	60
Initial moisture content		%.WB	80	74
Particle size(200rpm)		mm $\phi$	0.186	0.193
Average moisture content of product	Non-recycle	%.WB	51.8	54.5
	Recycle	%.WB	35.6	42.5
Evaporation rate	Non-recycle	kg/hr	35.1	25.7
	Recycle	kg/hr	41.4	32.9

## 5. 결 론

일반적으로 열풍건조공정에서 배출되는 배기가스는 가열공기와 피건조물에서 발생된 증기의 체적의 합으로 구성되며, 배기가스의 방출량이 많고 배기가 갖고 나가는 열량이 크기때문에 에너지 손실도 크다. 그러나 대부분의 열풍건조공정에서 배기가스의 습도가 높다는 이유로 효과적으로 회수 이용되지 못하고 있다.

본 연구에서는 고온 고습도의 배기가스를 효과적으로 회수 이용하기 위한 고습도 열풍 건조 특성에 대한 실험적 연구를 통하여 역전점 온도(170~190℃)이상의 고온열풍을 이용하는 건조공정에 있어서 고습도 배기가스를 직접순환 이용하는 경우 약 20~30%정도의 건조속도를 향상시킬 수 있는 것으로 확인하였다.

특히 직화식 회전건조기에서 주정박슬러지(초기함수율 74%.WB)에 대하여 고습도 열풍을 이용하는 경우 기존시스템에 비해 약 28%정도의 건조속도가 향상되었으며, 대두박슬러지(초기함수율 80%.WB)의 경우 약 18%정도의 건조속도가 향상되었다.

따라서 고온의 열풍을 이용하는 건조공정의 배기가스를 효과적으로 회수 이용하기 위한 기술로서 고습도 열풍건조시스템의 적용이 효과적인 방법으로 판단되며, 열효율 향상뿐만 아니라 배기가스 처리량이 감소되어 대기오염저감도 기여할 수 있다.

## 참고문헌

1. Chu, J. C., Lane, A. M., Conklin, D., Evaporation of Liquids into Their Superheated Vapors, Industrial Engineering Chemistry Vol.45, No.7, pp.1586-1591, (1953)
2. Wenzel, L. and White R., Drying Granular Solids in Superheated Steam, Industrial Engineering Chemistry, Vol.43, No.8, pp.1829-1837, (1951)
3. Yoshida, T. and Hyodo T., Evaporation of Water in Air, Humid Air, and Superheated Steam, Ind. Engineering Chem. Process Des. Dev., Vol.9, No.2, pp.207-214, (1970)
4. Chow, L. C., and Chung J. N., Water Evaporation into a Turbulent Stream of Air, Humid Air or Superheated Steam, Int. J. Heat Mass Transf., Vol.26, No.3 pp.373-380, (1983)
5. Nomura T., and Hyodo, T., Behavior of Inversion Temperature and Applications of Superheated Vapor Drying, Drying '85, pp.517-522, (1985)
6. Nomura T., Nishimura N., Hyodo T., Kashiwagi T., Characteristics of Evaporation of Water in Superheated Steam and Air, Trans. of the JAR, Vol.15 No.1, pp.33-41 (1988)
7. 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘, 過熱水蒸氣乾燥における 複合熱傳達特性, 日本機械學會論文集(B編), 64卷, 619号 pp.173-180. (1998)