

타격기류 건조장치에 의한 하수슬러지의 건조 실증실험에 관한 연구

안준수^{1*}, 김병태¹, 조정호²
¹대진대학교 환경공학과, ²공주대학교 화학공학부

A study of on site Pilot plant test of drying sewage sludge using Chain crusher flash dryer

June-shu Ahn^{1*}, Byung-tae Kim¹ and Jung-ho Cho²

¹Department of Environmental Engineering, Daejin University

²Department of Chemical Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 하수슬러지를 효율적으로 건조시킬 수 있는 방법을 연구하고자 하였다. 슬러지 건조를 위해서는 슬러지 내 대부분의 함수율을 차지하고 있는 세포 내 함유수분을 제거시키는 것이 필요한데, 이에 대한 제거 장치로서 타격기류 건조장치를 적용하였으며, 직접 하수처리장에 파일럿 플랜트를 설치하여 실증실험을 실시하여, 이에 대한 운전특성과 적용가능성을 확인하고자 하였다.

주요 운전제어 변수는 슬러지 투입속도, 체인 회전속도, 공정온도 및 투입슬러지 함수율 변화 등이다. 체인의 회전속도가 증가할수록 생성슬러지 생성수율 증가 등 장치성능이 향상되었고, 공정온도가 상승함에 따라 건조효율이 증가하는 경향을 나타내었다. 투입슬러지 함수율은 60%일 때 생성슬러지 생성수율이 최대이고 함수율도 10% 내외를 나타내어 최적 조건임을 알 수 있었다. 슬러지 투입속도는 적정 투입속도 이상으로 투입 시, 생성슬러지 생산량은 증가하지 않는 반면, 오히려 잔류량만 증가하는 현상을 초래하였다. 위와 같은 실험결과로부터 장치의 최적 운전조건은 체인 회전수 1600rpm(최대속도), 최종 배출온도 80℃, 투입슬러지 함수율 60%, 슬러지 투입속도 60kg/h이며, 이때 장치성능은 생성슬러지 생성수율 85.5%, 함수율 11.0%, 건조효율 81.7% 으로 양호한 결과를 나타내었다.

Abstract Effective drying method of sewage sludge is researched in this study. To dry the sludge, chain crusher flash dryer was adopted to remove moisture content in the cell which is mostly responsible for the sludge moisture content. And Pilot plant experiment was conducted in real life sewage treatment plant to study effect and characteristics of operating conditions.

Operating variables include sludge feeding rate, rotational speed of chain, process temperature and feed moisture content. As rotational speed of chain increased, product yield of sludge increased, and the performance of the testing system increased. And, as process temperature increased, the sludge drying efficiency increased. It is found that optimum feed moisture content is at 60% which shows the maximum sludge product yield and about 10 moisture content(%) of sludge product. Sludge feed rate showed optimal value, and when the sludge feed rate is exceeded, sludge product yield did not increased but the amount of residue increased. Pilot plant experiment results are as follow. The optimal condition for the rotational speed of chain 1600rpm(max. speed), final sludge discharge temperature 80℃, feed moisture content 60%, and feed rate 60kg/h. When the plant was operated at the optimal conditions, the final product showed fairly good results such as sludge product yield 85.5%, moisture content 11.0% and sludge drying efficiency 81.7%.

Key Words : Drying of sewage sludge, Chain crusher flash dryer

본 논문은 2012학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

*Corresponding Author : June-shu Ahn

Tel: +82-16-246-1952 email: jsahn@daejin.ac.kr

접수일 12년 08월 08일

수정일 (1차 12년 09월 03일, 2차 12년 09월 07일)

게재확정일 12년 11월 08일

1. 서론

하수슬러지는 하수처리과정 중, 주로 1차침전지와 2차 침전지에서 침강되어 발생된 고형물로서, 일반적으로 농축조에서 농축되고 탈수시설에서 탈수되어 최종 처리 및 처분되어진다. 슬러지 최종 처리 및 처분 방법으로는 매립, 해양투기, 재활용, 소각 및 연료화 방법 등이 적용되고 있다.

한편, 우리나라의 하수슬러지 발생량은 2010년 말 기준으로 총 3,080,043m³/년이며, 이들 슬러지에 대한 최종 처리 및 처분 방법과 양을 아래 표 1에 수록하였다.

[표 1] 우리나라 하수슬러지 최종 처리 및 처분 현황
[Table 1] Present status of final treatment and disposal of sewage sludge in Korea

(2010. 12. 31 기준)

구분	재활용	소각	매립
처리량 (m ³ /년)	635,318	544,592	337,966
구분	해양투기	연료화	기타
처리량 (m ³ /년)	1,314,087	238,697	9,382

표 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 슬러지의 최종 처리 및 처분 방법 중, 해양투기가 약 42.7%를 나타내어 가장 큰 비율을 차지하고 있었으나, 국토해양부 “해양환경관리법 시행규칙(2011. 11. 29 제정)”에 의하여 2012년 1월 1일부터 해양투기가 전면 금지되게 되었다. 또한 매립에 의해 최종 처분하고자 할 경우에도 과다한 수분으로 인하여 매립지 내의 복수량이 많아져 침출수량이 증가할 뿐 아니라 매립지 관리에 큰 문제점으로 대두되어, 수도권 매립지를 위시하여 전국 대다수의 매립지에서 반입을 엄격히 규제하고 있는 실정이다[1].

이와 같은 현실에서 슬러지의 안정적인 경제적 최종 처리 및 처분에 부심하고 있으며, 이에 대한 적절한 처리방법을 찾는 데 많은 관심을 가지고 있다.

한편, 하수슬러지의 처리공법을 대별하면, 퇴비화, 사료화, 유기 비료화, 건조 및 소각 등으로 구분할 수 있다. 이들 처리공법 중, 건조공정은 최종 처리·처분 공정으로서 매립, 소각, 사료화, 유기 비료화 및 연료화 공법을 적용코자 할 때, 대상 슬러지의 최적 상태를 조성하기 위한 처리방법으로 적용될 수 있다[2-4].

기류건조 방식은 열풍의 흐름 속에 재료를 분산공급하고, 열풍에 동반되면서 건조가 이루어지는 방식으로, 건

조된 제품은 사이클론 등의 집진장치로 분리·포집된다. 건조시간은 1~2초로 매우 단시간이며, 입경이 작은 재료로 항울건조기간의 건조처리에 적합하다[5,6].

본 연구에서는 하수슬러지를 효율적으로 건조시킬 수 있는 방법을 연구하고자 하였으며, 슬러지 건조를 위해서는 슬러지 내 대부분의 함수율을 차지하고 있는 세포내 함유수분을 제거시키는 것이 필요한데, 이에 대한 제거 장치로서 타격기류 건조장치를 적용하고자 하였다. 이 장치의 특징은 원통형 드럼 내부에 체인을 여러 단 장착한 수직축을 설치하여 회전시키면서 대상 건조물을 타격·분쇄시킴과 동시에 열풍을 가하여 기류 건조시킬 수 있도록 하였으며, 이와 같은 타격기류 건조장치를 직접 하수처리장에 적용하여 실증실험을 실시함으로써, 이에 대한 운전특성과 적용가능성을 도출하고자 하였다.

2. 이론적 배경

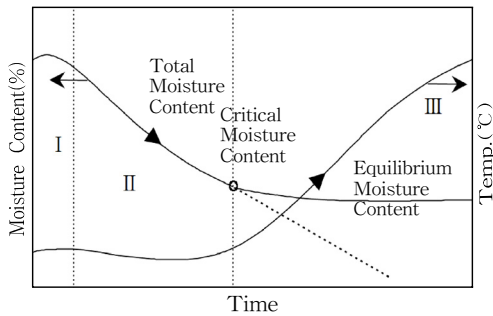
충분히 습윤한 재료에 대한 건조공정에서 초기에 충분히 습윤한 재료는 표면이 수막으로 덮힌 상태에 있으며, 이때 임의의 온도에 재료를 정상 건조조건하에 놓아두면 그 온도가 건조조건과 평형이 되는 온도에 도달한다. 뒤 이어 수분이 증발하기 시작하고 표면에 수막이 존재하는 한 재료온도는 일정하게 유지되며 유입열량은 모두 수분 증발에 사용된다. 그 다음에는 내부로부터 수분의 이동이 증발속도를 따르지 못하게 되면서 재료표면이 수막으로 덮이지 않게 된다. 재료표면에 건조한 부분이 생기며 재료의 온도는 상승하기 시작하여 수분증발과 재료가열이 동시에 일어나고 건조조건과 평형을 이루는 함수율에 도달하면 건조가 끝난다.

재료에 함유되는 수분량에 대해서는 습량기준의 수분 W_w 와 건량기준의 함수율 W_d 로 표기될 수 있다. W_d 와 W_w 와의 사이에는 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} W_d &= W_w / (1 - W_w), \\ W_w &= W_d / (1 + W_d) \end{aligned} \quad (1)$$

보통 W_d 를 함수율, W_w 를 수분이라고 구별하여 명명하며, 백분율(%)로 표시될 때가 많다.

충분히 습윤한 재료를 일정한 건조조건에서, 건조되는 재료에 관해 그 질량감소와 온도변화를 시간에 대해 측정하고 함수율의 형태로 계산하면 그림 1과 같다.

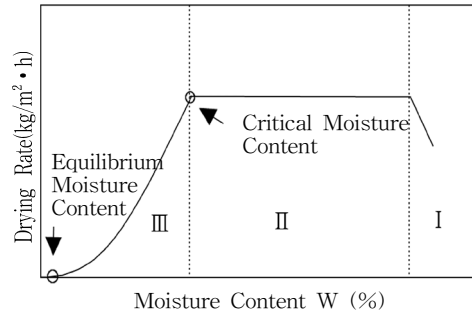


[그림 1] 건조시간에 따른 총 수분함량 및 건조물 온도변화
[Fig. 1] Variation of total moisture contents & temp. change of dried components according to the variation of drying time

윗 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 건조는 다음의 3기간으로 구별된다. I은 재료예열기간, II는 항울건조기간 및 III은 감율건조기간이다. 임의의 온도에 습윤한 재료를 정상 건조조건하에 놓아두면, 그 온도가 건조조건과 평형이 되는 온도에 도달한다. 열풍에서만 열을 받을 때는 이 온도는 근사적으로 그 열풍의 습구온도로 되며, 이 온도에 도달할 때까지의 기간이 I의 기간이다. 뒤이어서 표면에 수막이 존재하는 한 재료온도는 거의 일정하며, 유입열량은 모두 수분증발에 사용된다. 따라서 이 기간에서는 그림 1과 같이 함수율은 시간에 비례하여 감소하게 되며, 건조속도는 이 경사로 표시되므로 일정한 값 즉 항울건조속도가 된다. 재료표면이 수막으로 덮히지 않게 될 때, 즉, 내부로부터의 수분의 이동이 증발속도를 따르지 못하게 되면 재료표면에 건조한 부분이 생겨 재료의 온도는 상승을 개시한다. 따라서 유입열량이 감소하게 되고, 이 열량은 수분증발과 재료가열의 습열에 소비되므로 건조속도는 점차 감소하여 건조조건과 평형을 이루는 함수율에 도달하면 건조가 끝난다. 이 기간이 III의 감율건조기간이다. 임의의 함수율에서 II의 평형함수율을 뺀 것을 자유함수율이라고 명명하며, 이것이 건조할 때에 제거되는 수분이다. II 및 III이 길게 연속되는 재료에 대해서는 I을 무시할 수 있으며, 습윤도가 낮은 경우, 혹은 재료의 특성에 따라 II가 없는 경우도 있다.

건조조건으로서의 재료에 접촉하여 건조를 일으키게 하는 외부조건과 재료자체가 지닌 내부조건의 둘로 나눌 수 있다. 외부조건은 열의 유입에 관한 것이며, ① 대류수열, ② 전도수열 및 ③ 방사수열로 나뉘고, 이것들은 하나 또는 조합된 형태로 이루어진다. ①에 대해서는 열풍의 온도, 습도 및 풍속의 조건이 되고, ②, ③에 대해서는 그 열원 온도 및 수증기를 제거하는 상태(열풍이나 진공)가 조건이 된다. 내부요소로서는 재료, 그 자체의 성분,

형태, 함유 수분량이 있고, 동일한 재료일지라도 그 건조할 때의 형상에 따라 크게 그 상태가 달라진다.



[그림 2] 건조 특성 곡선
[Fig. 2] Characteristics of drying curve

정상적인 건조조건하에서 건조했을 때의 건조속도를 나타내기 위해서 $R(\text{kg-H}_2\text{O/hr} \cdot \text{m}^2\text{-건조면적})$ 이나 $R_w(\text{kg-H}_2\text{O/hr} \cdot \text{kg-건조질량})$ 가 사용될 수 있다. 이 건조속도와 재료의 평균함수율을 도표로 그린 것을 건조 특성 곡선이라고 부른다.

그림 1의 함수율 곡선에 대한 시간의 경사를 취하면 R_w 가 되며, 이것과 함수율을 도식하면 그림 2와 같이 되어, 앞서 기술한 I, II, III의 각각의 기간에 대응한 특성을 명확하게 표시할 수가 있다. 즉 그림을 보면 항울건조속도, 감율건조속도 및 평형함수율을 한 도표에 의해 알 수 있고, 건조의 외부 및 내부조건을 나타내는 것이다. R 와 R_w 의 환산에 대해서는, 무수 재료 질량을 $W(\text{kg})$, 그것이 지닌 건조면적이 $A(\text{m}^2)$ 일 때, $R=R_w(W/A)$ 로 구할 수가 있다[7-9].

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

본 타격기류 건조장치의 흐름도가 그림 3에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 장치는 슬러지 공급장치, 건조장치, 열풍 발생 설비, 분진방지시설 등으로 구성되어 있다.

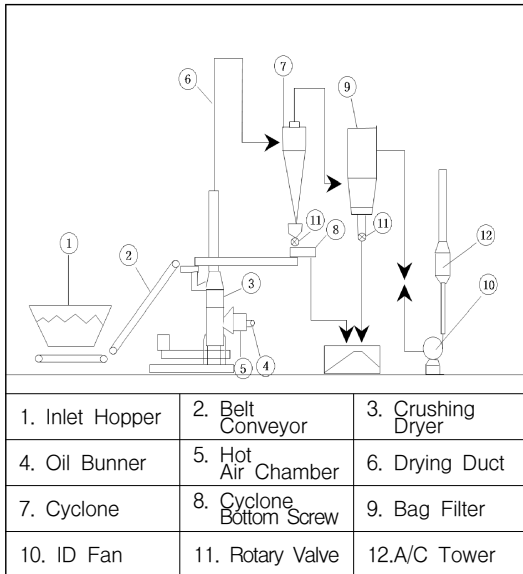
슬러지 공급장치는 슬러지 이송장비와 건조기내부로 슬러지를 균일하게 투입할 수 있도록 스크류(screw)가 장착되어 있고, 스크류의 회전수를 조절하여 슬러지 투입량을 변화시킬 수 있다.

건조장치는 체인(chain)이 내장된 원통형 건조기와 기류 건조시킬 수 있는 덕트(duct) 및 최종 생성슬러지를 생

성하는 사이클론으로 구성되어 있다. 체인은 1000~1600rpm 범위에서 고속 회전시킬 수 있다.

열풍 발생 설비는 연료 저장탱크와 버너 및 열풍로로 구성되어 있으며, 최종 배출온도의 설정온도에 따라 자동 점화 시스템으로 작동하여 열풍온도를 제어한다. 또한 열풍유량은 장치 후단의 팬에 의해 조절할 수 있다.

분진 및 악취 방지 시설은 본 실험장치에서는 악취 제거 시설은 설치하지 않았고, 분진 제거용 백필터를 설치하여 사이클론에서 낙하되지 않은 미세분진을 제거시킬 수 있도록 하였다.



[그림 3] 타격기류 건조장치 흐름도
[Fig. 3] Schematic flow diagram of chain crusher flash dryer

3.2 장치운전 및 분석방법

기계의 청소상태를 확인하고, 원료슬러지와 건조슬러지를 혼합하여 실험하고자 하는 슬러지 함수율로 조절하였다.

연료(등유) 주입 또는 용량을 확인한 후, 공기버튼을 가동시키고 전원을 올린다. 팬을 가동시킨 후, 10~15분 동안 덕트 내 잔류 슬러지를 배출구로 빼낸다. 압력(ΔP), 유량(Q)을 설정하고 버너를 켜다(실험조건 온도 설정). 버너 온도가 설정(Set) 온도보다 10℃ 높게 예열 후 다시 온도를 내려 설정 온도에 도달하면 회전로 체인을 가동(rpm 조절)한다. 투입 스크류를 가동시키고, 15분 동안 기류형성을 위해 슬러지를 조금씩 투입하다가, 이후로 실험조건에 의한 슬러지 투입속도에 맞추어 슬러지 투입량을 균일하게 투입한다. 5분 간격으로 회전로 입구, 회전

로 출구, 덕트 및 최종 배출온도를 점검하여 온도 변화 및 추이를 관찰한다. 일정 간격으로 생성 슬러지와 잔류 물을 채취하여 무게를 측정한다.

슬러지 수분함량 측정 시, 온도에 따라 함수율이 변하므로, 설정온도가 정상상태를 유지하는 시점에서 처리된 슬러지를 채취한다. 함수율 측정은 밀폐된 용기에 슬러지를 담아 실험실에서 수분함량측정기를 이용해 시료의 양을 동일하게 하여 105±2℃에서 180분 동안 건조시킨 후 처리전·후의 질량을 측정하여 함수율 값을 구하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 파일럿 플랜트 실증실험에서 처리성능을 파악하기 위한 주요 운전제어 요소는 슬러지 투입속도, 체인 회전속도, 각 단위공정의 온도 및 투입슬러지 함수율 등으로서, 이들 변수들을 변화시키면서 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

4.1 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 처리특성

일정한 체인 회전속도(rpm) 및 온도조건에서 슬러지 투입속도를 변화시키면서 실험을 실시하여 최적 처리조건을 도출하고, 다음으로 다른 운전제어 요소는 고정된 상태에서 체인 회전속도를 변화시켜 실험을 실시하였으며, 이들 운전결과를 표 2와 그림 4, 5에 나타내었다.

[표 2] 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 처리특성

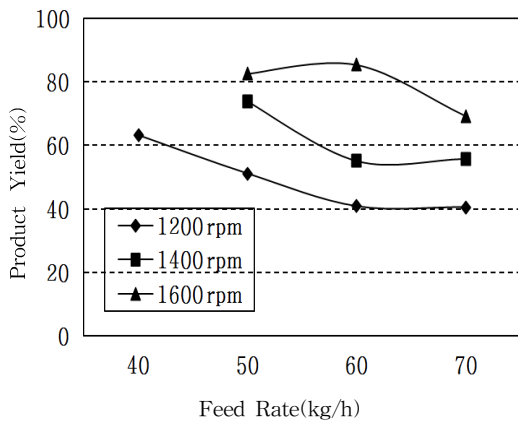
[Table 2] Characteristics of sludge treatment according to the variation of feed rate of sludge and rotational speed of chain

Items rpm	Feed rate (kg/h)	Product rate (kg/h)	Residue rate (kg/h)	Feed moisture content (%)	Product moisture content (%)
1200	40	11	6	60.5	9.1
	50	11	9	61.0	9.4
	60	11	13	60.3	11.8
	70	13	16	60.1	13.1
1400	50	16	3	60.8	9.5
	60	15	10	60.0	11.8
	70	18	13	60.0	13.2
1600	50	17	2	60.5	9.2
	60	23	3	60.1	11.0
	70	22	9	60.4	12.8

슬러지 투입속도 변화에 따른 처리특성은, 다른 운전 제어 변수는 고정시킨 상태(즉, 최종 배출온도 80℃, 체인 회전속도 1200rpm)에서, 슬러지 투입속도가 40, 50, 60kg/h로 증가시켰을 때, 생성속도는 11kg/h로 변동이 없는 반면, 잔류속도는 각각 6, 9, 13kg/h로 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 생성슬러지의 함수율은 슬러지 투입속도가 40, 50, 60, 70kg/h로 증가할 때, 9.1, 9.4, 11.8, 13.1% 등으로 서서히 증가하는 경향을 나타내었다.

체인 회전속도 1400rpm 조건에서는, 슬러지 투입속도가 50, 60, 70kg/h로 증가하였을 때, 생성속도는 각각 16, 15, 18kg/h로 비슷하였으나, 잔류속도는 3, 10, 13kg/h로 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 1600rpm인 실험조건에서는, 슬러지 투입속도가 50, 60, 70kg/h로 증가 시, 생성속도는 각각 17, 23, 22kg/h로 나타났고, 잔류속도는 2, 3, 9kg/h로 변화하였다. 즉 투입속도가 50kg/h에서 60kg/h로 증가 시, 생성속도는 급격히 증가한 반면, 잔류속도는 비슷한 경향을 나타내었다.

이와 같은 실험결과로부터, 체인 회전속도가 1200, 1400, 1600rpm으로 증가함에 따라, 최적 슬러지 투입속도와 생성슬러지 생성속도 모두 증가되는 결과를 나타내었다. 이와 같은 현상은 체인 회전속도가 증가함에 따라 슬러지 구성 세포의 파쇄가 효과적으로 이루어짐에 기인한 것으로 판단된다. 본 타격기류 건조장치는 체인 회전속도 1600rpm(최대속도), 슬러지 투입속도 60kg/h일 때 최적 운전조건으로 도출되었다.

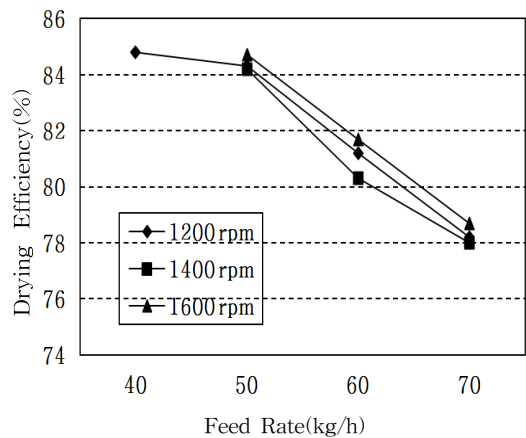


[그림 4] 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 생성슬러지 생성수율의 변화특성

[Fig. 4] Characteristics of product yield of sludge according to the variation of input rate and rotational speed of chain

그림 4에서는 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 생성슬러지 생성수율 변화 추이를 도식하였는바, 체인 회전속도 1200rpm에서, 슬러지 투입속도가 40, 50, 60, 70kg/h로 증가할 때, 생성수율은 각각 63.2, 51.1, 40.8, 40.5% 등으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 1400rpm 실험 조건에서는, 슬러지 투입속도 50, 60, 70kg/h 일 때, 생성수율은 각각 73.9, 55.1, 55.8%를 나타내었다. 1600rpm 실험 조건에서는, 슬러지 투입속도 50, 60, 70kg/h 증가할 때, 생성수율은 82.7, 85.5, 69.2%을 나타내어, 슬러지 투입속도 60kg/h일 때 최대의 생성수율을 얻을 수 있었다.

본 결과로부터, 체인 회전속도 변화에 따른 생성슬러지 생성수율은, 슬러지 투입속도 60kg/h 기준일 때, 체인 회전속도가 1200, 1400, 1600 rpm으로 증가하면서 생성수율은 각각 40.8, 55.1, 85.5%로 급격한 증가를 나타내어, 생성수율 면에서 체인 회전속도의 변화가 장치성능에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다[10].



[그림 5] 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 건조효율 변화특성

[Fig. 5] Characteristics of drying efficiency according to the variation of feed rate of sludge and rotational speed of chain

그림 5에서는 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 건조효율 변화특성을 나타낸 것으로서, 투입슬러지 함수율은 60%이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 슬러지 투입속도가 증가함에 따라 건조효율은 감소하는 경향을 나타내었으나, 체인 회전속도 변화의 영향은 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 슬러지 투입속도가 60kg/h일 때, 모든 체인 회전속도에서 건조효율은 80% 이상을 나타내었다.

이와 같은 슬러지 투입속도와 체인 회전속도 변화에 따른 실험결과로부터, 체인 회전수(rpm)가 증가함에 따

라 최적 슬러지 투입속도와 생성슬러지 생성수율이 모두 증가하는 결과를 나타내어, 효율적 장치 설계 및 운영을 위해서는 rpm 조건이 상당히 중요하며, 가능한 한 rpm을 증가시킬 수 있도록 장치를 설계·제작하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. 한편, 슬러지 투입속도는 적정량을 초과할 경우, 생성슬러지 생성량보다는 잔류량이 증가하는 현상을 나타내어 적절한 투입속도를 유지하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

4.2 최종 배출온도 변화에 따른 처리특성

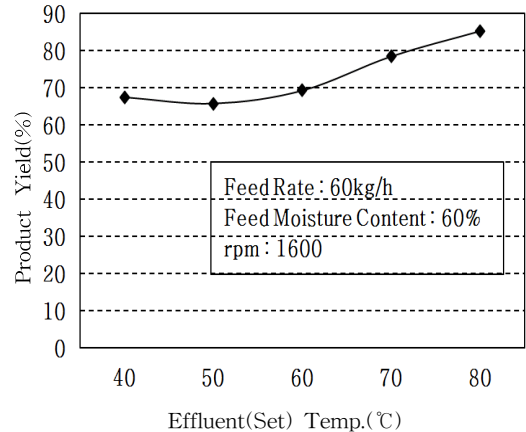
본 실험장치는 각 단위장치에 온도계를 설치하여 운전 기간동안 온도변화를 측정하였다. 장치에 대한 설정온도는 최종 배출온도이며, 운전 시 제어판넬에서 설정온도를 지정하였다. 이때, 열풍로로부터 공급된 열에너지가 슬러지 건조 시 필요한 열에너지와 그 밖의 열손실 등으로 각 단위공정별 온도변화가 발생하게 된다. 장치의 온도변화에 따른 장치성능을 파악하기 위해, 최종 배출온도를 변화시키면서 실험을 실시하였으며, 그 결과를 표 3과 그림 6, 7, 8에 나타내었다.

표 2와 그림 4, 5의 결과로부터, 최적 슬러지 투입속도와 체인 회전속도는 각각 60kg/h, 1600rpm으로 나타났으므로, 이들 두 제어변수는 고정시켰으며, 본 장치가 최종 배출온도를 조작할 수 있도록 구성되어 있으므로, 이 온도를 기준으로 40℃부터 10℃ 간격으로 80℃까지 증가시키면서 실험을 실시하였다.

[표 3] 최종 배출온도 변화에 따른 처리 특성
[Table 3] Characteristics of treatment according to the variation of effluent temperature

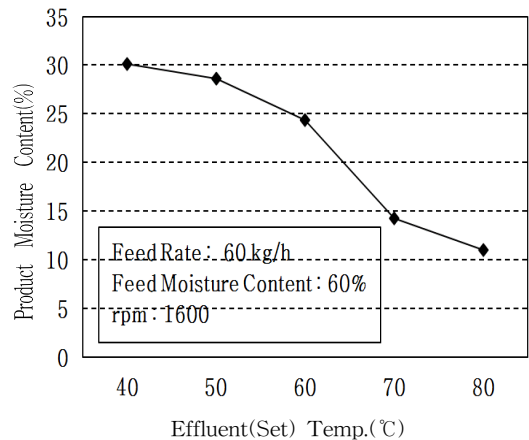
Effluent temp. (°C)	40	50	60	70	80
Item					
Feed rate(kg/h)	60	60	60	60	60
Residue rate(kg/h)	12	10	7	5	3
Product rate(kg/h)	23	22	22	22	23
Residue moisture content (%)	45.5	42.8	37.9	33.2	30.5
Product moisture content (%)	30.1	28.6	24.4	14.3	11.0
Drying efficiency (%)	50.0	52.5	59.3	76.2	81.7
Feed moisture content (%)	60.3	60.2	60.0	60.0	60.0

그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 생성수율은 최종 배출온도가 40℃일 때 67.5%에서 온도증가에 따라 향상되어 80℃에서는 85.3%에 이르렀으며, 이와 같은 수율 향상은 회전로 내부 온도가 높을수록 슬러지의 증발이 촉진되고, 기류형성이 향상됨에 기인한 것으로 판단되었다.



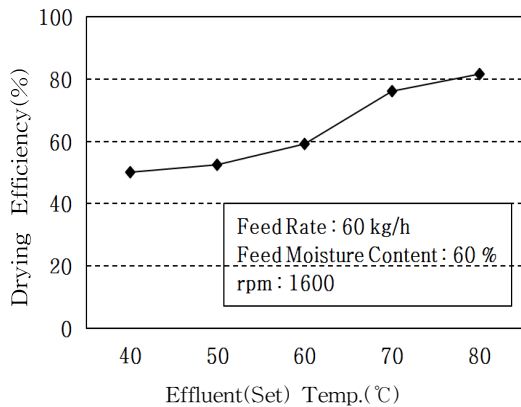
[그림 6] 최종 배출온도 변화에 따른 생성슬러지 생성수율의 변화특성

[Fig. 6] Characteristics of the sludge product yield according to the variation of effluent temperature



[그림 7] 최종 배출온도 변화에 따른 생성슬러지 함수율 변화특성

[Fig. 7] Characteristics of the sludge product moisture content according to the variation of effluent temperature



[그림 8] 최종 배출온도 변화에 따른 건조효율 특성
 [Fig. 8] Characteristics of the sludge drying efficiency according to the variation of effluent temperature

그림 7에서는 최종 배출온도 변화에 따른 생성슬러지의 함수율을 나타내었는바, 최종 배출온도 40℃일 때 함수율 30.1%에서, 80℃일 때 11%로, 생성슬러지 함수율이 감소함을 알 수 있었다. 즉, 생성슬러지 함수율은 체인 회전속도에는 별 영향을 받지 않고, 슬러지 투입속도에는 약간의 영향을 받는 반면(표 2 참조), 장치온도가 가장 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 그러므로, 생산하고 자하는 생성슬러지의 함수율에 따라 장치온도를 설정할 수 있으며, 10% 내외의 생성슬러지 함수율을 얻고자 할 때에는 최종 배출온도를 80℃ 이상으로 설정하여야 할 것이다.

한편, 그림 8에서는 최종 배출온도 변화에 따른 건조 효율 특성을 나타내었는바, 최종 배출온도가 40℃일 때 건조효율 50%에서, 80℃일 때 81.7%로 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같은 장치의 온도변화에 따른 처리특성은 장치온도 변화가 생성슬러지의 함수율과 건조효율에 큰 영향을 미치므로, 원하는 생성슬러지 함수율을 얻고자 할 때 주요 제어변수이며, 또한 생성슬러지 생성수율을 향상시키는 결과를 나타내었다. 장치성능만을 고려하였을 때, 최종 배출온도가 80℃일 때, 회전로 배출온도는 정상운전 시 약 85℃이고, 생성슬러지 함수율은 10% 내외, 생성슬러지 생성수율은 최대를 나타내어 장치온도 증가가 장치성능을 향상시키는 결과를 나타내고 있으나, 소비에너지 비용에 따른 운전비용의 상승 등, 경제성을 고려하여 적절한 운전조건이 결정되어야 할 것이다.

4.3 투입슬러지의 함수율 변화에 따른 처리특성

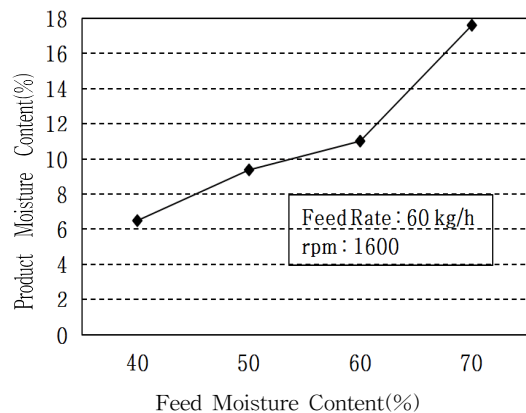
장치성능에 영향을 끼치는 제어변수인 슬러지 투입속

도, 체인 회전속도 및 장치온도 변화는 이전의 실험결과로부터 최적조건이 결정되었으므로, 이들 변수들은 고정시킨 상태에서 투입슬러지(feed)의 함수율 변화에 따른 처리특성에 관한 실험을 실시하여 그 결과를 표 4와 그림 9, 10에 나타내었다.

실험에 사용한 투입슬러지의 함수율은, 하수처리장의 탈수계익으로 배출되는 슬러지의 함수율이 75~83% 범위이었으므로, 이와 같은 원료슬러지를 생성슬러지와 일정비율로 혼합시켜 원하는 함수율로 조제하여 실험을 실시하였다.

[표 4] 투입슬러지의 함수율 변화에 따른 처리특성
 [Table 4] Characteristics of sludge treatment according to the variation of feed moisture content

Item \ Feed moisture content (%)	40	50	60	70
Feed rate (kg/h)	60	60	60	60
Residue rate (kg/h)	13	12	3	7
Product rate (kg/h)	24	22	23	16
Residue moisture content (%)	18.7	26.0	30.5	34.1
Product moisture content (%)	6.5	9.4	11.0	17.6
Drying efficiency (%)	84.3	81.6	81.7	75.7
rpm	1600	1600	1600	1600

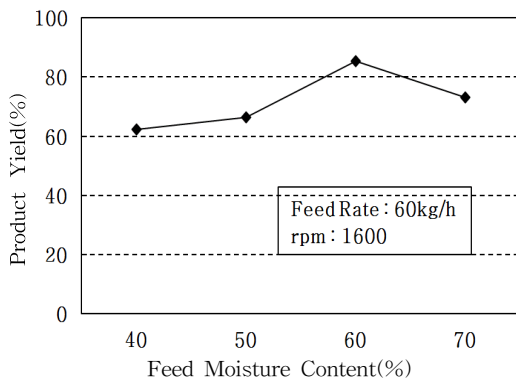


[그림 9] 투입슬러지 함수율 변화에 따른 생성슬러지 함수율 변화특성

[Fig. 9] Characteristics of the moisture content of sludge product according to the variation of feed moisture content

표 4와 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이, 투입슬러지 함수율이 40%일 때 생성슬러지 함수율은 6.5%, 건조효율은 84.3%에서, 투입슬러지 함수율 70%일 때는 각각 17.6, 75.7%로, 생성슬러지 함수율은 10% 이상 증가하고, 건조효율은 10%정도 감소하는 경향을 나타내어, 투입슬러지 함수율이 낮아질수록 장치성능은 향상되는 것으로 나타났다[11].

그렇지만 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이, 생성슬러지 생성수율은 투입슬러지 함수율이 낮거나 높을 때 보다도 60%일 때 가장 좋은 결과를 나타내었다. 한편, 투입슬러지 함수율이 70% 이상일 때에는 슬러지의 균일한 투입이 어려웠으며, 특히 80% 이상인 경우, 슬러지의 자유수와 표면수에 의해 투입 스크류에 부착되거나 못치게 되어 스크류가 공회전하거나 투입구를 막아 회전로 내로 슬러지 투입이 잘 이루어지지 않는 현상이 종종 발생하였다.



[그림 10] 투입슬러지 함수율 변화에 따른 생성 슬러지 생성수율의 변화특성

[Fig. 10] Characteristics of the sludge product yield according to the variation of feed moisture content

이와 같은 투입슬러지의 함수율 변화에 따른 처리특성은, 투입슬러지의 함수율이 낮아질 경우 생성슬러지 함수율은 낮고(10% 이하), 건조효율은 높은 반면, 잔류량이 많아지며, 생성슬러지 일부를 투입슬러지로 재사용함으로 인하여 최종 생성슬러지 생산량이 감소하는 결과를 초래하게 되었다. 반면에, 원료슬러지(함수율 80% 정도)를 그대로 사용할 경우 운전이 원활치 못하는 현상이 발생하였다.

그러므로 본 실험결과로부터 투입슬러지 함수율이 60%일 때, 생성슬러지 함수율 11%, 건조효율 82%, 생성슬러지 생성수율은 85.5%로 양호한 결과를 나타내었으며, 이와 같은 운전조건이 최적 조건으로 도출되었다.

5. 결론

본 파일럿 플랜트 실증실험을 통하여 주요 운전제어 변수들을 변화시키면서 최적 운전조건을 도출하고, 건조처리 성능을 파악코자 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

주요 운전제어 변수는 슬러지 투입속도, 체인 회전속도, 공정온도 및 투입슬러지 함수율 변화 등이며, 이들 각각에 대한 최적 조건을 얻기 위하여 다른 변수들을 고정시킨 상태(일정조건)에서, 한 제어변수만 변화시켜 실험을 실시하였고, 이들 결과들을 종합하여 최적 조건과 처리성능을 도출하였다.

체인 회전속도가 증가할수록 생성슬러지 생성수율 증가 등 장치성능이 향상되었고, 공정온도가 상승함에 따라 건조효율이 증가하는 경향을 나타내었다. 투입슬러지 함수율은 함수율이 50% 이하로 낮은 경우, 생성슬러지 생성수율이 감소하고, 70% 이상으로 높을 경우, 스크류에 슬러지 부착 등 운전상의 이상을 초래하였으며, 60%일 때, 생성슬러지 생성수율도 최대이고, 함수율도 10% 내외를 나타내어 최적 조건임을 알 수 있었다. 슬러지 투입속도는 적정 투입속도 이상으로 투입 시, 생성슬러지 생산량은 증가하지 않는 반면, 오히려 잔류량만 증가하는 현상을 초래하였다.

위와 같은 실험결과로부터 장치의 최적 운전조건은 체인 회전수 1600rpm(최대속도), 최종 배출온도 80℃, 투입슬러지 함수율 60%, 슬러지 투입속도 60 kg/h이며, 이때 장치성능은 생성슬러지 생성수율 85.5%, 함수율 11.0%, 건조효율 81.7%로 양호한 결과를 나타내었다.

기 호 설 명

- A : 건조면적(m²)
- R : 건조속도(kg-H₂O/h · m²-건조면적)
- R_w : 건조속도(kg-H₂O/h · kg-건조질량)
- W : 무수재료 또는 슬러지 고형물질량(kg)
- W_d : 함수율(%)
- W_w : 수분(%)

References

- [1] 2010 Environmental Statistics, Ministry of Environment, 2011.
- [2] K. B. Lee, J. Hwang and W. J. Kang, "A Study on the

Parameter Analysis for Sewage Sludge Drying Process Using Taguchi Method", J. KSWES, Vol 22, No. 4, pp. 339-346, 2005.

- [3] B. Heinz, E. Hartmut, "Improved Efficiency of Sewage Sludge Incineration by Preceding Sludge Drying", Wat. Sci. Tech., Vol 22, No. 12, pp.269-276, 1990.
- [4] P. Daniela, R. Victor and P. T. Osvaldir, "Drying of Sewage Sludge through Immersion Frying", 14th IDS Symposium, pp. 1005-1012, 2004.
- [5] A. Mulet, M. Borrás and F. Pinaga, "Effect of Air Flow Rate on Carrot Drying", Drying Tech., Vol 5, No. 2, pp. 245-258, 1987.
- [6] H. S. Kim, et al., "Study on the Development of an Gas-Agitated Double-Screw Type Dryer for Dehydrated Sewage Sludge Treatment", J. KSEE, Vol 26, No. 2, pp. 233-238, 2004.
- [7] P. Lowe, "Development in the Thermal Drying of Sewage Sludge", J. CWEM, pp. 306-316, 1995.
- [8] W. L. McCabe, J. C. Smith and P. Harriott, "Unit Operation of Chemical Engineering", 7th Edition, pp. 669-698, 2005.
- [9] M. S. Shin, et al., "A Study for Drying of Sewage Sludge though Immersion Frying Using Used Oil", J. KSEE, Vol 30, No. 7, pp. 694-699, 2008.
- [10] W. P. Jeon, G. J. Lee, "A Study on the Characteristics of Drying Sewage Sludge by Screw Fluidized Dryer", J. KSWES, Vol 2003, pp. 509-512, 2003.
- [11] J. H. Koo, S. Y. Hwang, "Characteristics of Drying Sewage Sludge by Venturi-eject Type Sludge Dry System", J. KSWES, Vol 2008, pp. 509-511, 2008.

안 준 수(June-Shu Ahn)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
- 1986년 8월 : 연세대학교 본대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1994년 8월 : 연세대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 대진대학교 공과대학 환경공학과 교수
- 1998년 3월 ~ 2001년 2월 : 대진대학교 환경연구소 소장
- 2002년 2월 ~ 2004년 12월 : 대진대학교 산학협력원 원장
- 2005년 1월 ~ 2008년 4월 : 경기대진테크노파크 원장

<관심분야>

정수 및 하폐수 처리

김 병 태(Byung-Tae Kim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 고려대학교 농화학과 (학사)
- 1984년 2월 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과(석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 환경계획학과(박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 대진대학교 공과대학 환경공학과 교수
- 2009년 5월 ~ 2011년 5월 : 한국유기성자원학회 회장

<관심분야>

유기성폐기물처리

조 정 호(Jungho Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한양대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 화학공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 공과대학 화학공학과 (공학박사)
- 1991년 1월 ~ 1997년 2월 : 대림산업(주) 공정부 과장
- 1997년 3월 ~ 2000년 2월 : 경인여자대학 산업환경공학부 전임강사
- 2000년 3월 ~ 2008년 2월 : 동양대학교 공과대학 생명화학공학과 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 화학공학부 부교수

<관심분야>

열역학, 공정 Simulation