

회전체를 부착한 수평형 로타리킬른 건조로의 설계 및 최적 운전조건 연구

정동현 · 전영남[†]

조선대학교 환경공학부 · BK21 수소생산 사업팀
(2007년 7월 10일 접수, 2007년 10월 16일 채택)

Study on the Design of Attached Revolution Body Horizontal Rotary Kiln Dryer and the Optimum Operational Conditions

Dong Hyun Jung and Young Nam Chun[†]

Department of Environmental Engineering · BK21 Team for Hydrogen Production, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
(Received July 10, 2007; accepted October 16, 2007)

하수슬러지의 처리문제가 대두되어지면서 많은 연구자들에 의해 슬러지 처리 기술이 연구되어지고 있다. 대표적으로 소각, 탄화, 열분해, 매립, 비료화 등의 방법이 있지만 이러한 모든 공정에는 80% 이상의 높은 함수율의 하수슬러지를 원재료로 사용하기에 어려움이 있어 건조공정이 요구되어진다. 본 연구는 선행 연구인 수치해석적 연구로 설계된 로타리 킬른형 건조로를 이용하여 운전변수로 킬른 체류시간, 건조로 부하, 건조로 온도를 각각 변화시켜 최적의 운전조건과 기술을 확립하는데 그 목적을 두고 있다. 변수별 연구에 의한 결과로 킬른 체류시간, 건조로 부하, 건조로 온도는 각각 62.5 kg/m³ · hr, 26.2 min, 330 °C로 결정되었다. 이때 함수율 10 ± 2%, 건조효율 88%, 무게감량 80%, 부피감량 60% 정도로 나타났고, 슬러지의 입경은 10 mm 이하로 배출되었다.

Sludge disposal technology has been studied with many researchers since disposal of sewage sludge has been a social problem. The current technologies include incineration, carbonization, pyrolysis, landfilling and fertilization. However, all of these processes require a dry process, because sewage sludge with more than 80% high water content is difficult to be used as a raw material. This study has the purpose to establish the optimal operation conditions and the technology as changing the variables: kiln residence time, sludge load, dryer temperature, by using the previous study that is rotary kiln type dryer designed as a numerical simulation study. As the results, optimum conditions are determined as follows: kiln residence time, sludge load, dryer temperature are 62.5 kg/m³ · hr, 26.2 min, 330 °C, respectively. Content of water, drying efficiency, weight loss, volume loss show that the results are 10 ± 2, 88, 80, 60%, and the dried sludge is released by a dryer below 10 mm.

Keywords: sludge disposal technology, sewage sludge, dry process, rotary kiln, dried sludge

1. 서 론

현재 하수슬러지는 해양투기가 71%, 재활용 15%, 소각 13%, 육상 매립 1%순으로 대부분 해양투기에 의존해 처리되어지고 있다. 하지만 런던협약 '96의정서' 발효에 따라 제 1기준은 2008년 2월부터, 제 2기준은 2011년 2월부터 해양투기가 원칙적으로 금지되어진다[1].

이에 각 지자체들은 하수슬러지의 처리 대책에 관심이 커지고, 많은 연구자들에 의해 소각, 열분해, 탄화, 복토용제, 비료화 등의 방법이 슬러지 처리 기술로 연구되어 활용되고 있다[2,3]. 이러한 모든 공정에 80% 이상의 함수율을 가지는 하수슬러지를 처리하기 위해 건조공정을 거치게 된다. 예를 들면, 소각공정의 경우 80% 이상의 함수율은 공해문제와 에너지 효율이라는 측면에서 방해인자로 작용하기 때문에 함수율을 45% 이하로 하는 것이 바람직하다는 연구결과가 있다[4].

또한 하수슬러지 건조를 통해 부피와 무게의 감소로 취급이 용이해

지고, 운반비용의 절감효과도 기대되어지며 악취 및 침출수 등의 2차 오염 문제도 해결 가능하다. 이에 고효율 슬러지 건조기술에 관심이 높아지고 건조장치의 연구개발의 필요성이 증가되고 있다.

하수슬러지의 건조에 있어 중요한 인자로 열풍유입방식, 건조물 비표면적, 이송과 교반 등이 있다. 또한 하수슬러지의 경우 고분자 응집체가 첨가되어 있어 고열이 가해지면 크게 덩어리져 뭉치는 현상이 발생한다. 이는 슬러지의 비표면적을 감소시키고, 접착성이 강해져 이송에서도 문제를 야기시킨다. 이러한 슬러지의 특성을 고려하여 건조효율이 향상되도록 건조로를 선정하고 설계하여야 한다.

본 연구는 기존의 실규모 건조로보다 국내 하수슬러지의 조건에 맞는 건조로를 설계하고 최적 운전조건을 파악하고자 하였다. 이를 위해, 선행연구인 수치해석적 연구를 통해서 건조로 내 열유동 특성을 파악함으로써 최적 건조로 형상 및 운전 조건을 확립하였다[5]. 이는 열풍의 유동과 속도가 건조효율에 영향을 준다고 선행 연구들에 의해 알려져 있다[6]. 또한 운전변수로 건조로 부하, 킬른 체류시간, 건조로 온도를 각각 변화시켜 최적 운전조건을 파악함으로써 고효율 하수슬러지 건조와 운전비용이 절감되는 건조로 설계기술 및 운전기술의 기초

[†] 교신저자 (e-mail: ynchun@chosun.ac.kr)

자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 실험장치

Figure 1은 본 연구에 의해 설계된 실험실 규모의 회전체를 부착한 건조로이다. 이는 수평형 로타리킬른 방식의 건조로로 슬러지 공급부, 슬러지 건조부, 열풍 주입부, 건조로 제어부, 측정 및 분석부로 구성되어 있다.

슬러지 공급부는 슬러지 주입장치와 이송스크류 피더로 구성되어 있다. 슬러지 주입장치는 슬러지가 멎쳐 막히는 현상과 이송스크류 피더 위로 터널링 현상을 방지하기 위해 주입호퍼 내 하단부에 두 개의 판이 서로 반대방향으로 회전하게 하여 슬러지를 밀어 연속적으로 주입하게 하였다.

슬러지 건조부는 벽면에 스크류와 베인이 부착된 킬른, 날개가 달린 회전체(이하 회전체)와 열풍 분배판으로 구성되어 있다. 킬른은 원통(재질: stainless steel)으로 직경 216 mm, 길이 500 mm이다. 킬른 벽면의 스크류는 킬른이 수평상태에서 슬러지를 진행시킬 수 있도록 50 mm간격으로 설치되어 있다. 베인은 스크류와 교차하게 입구부터 출구까지 90°간격으로 설치하여 슬러지의 교반과 열풍과의 접촉이 원활하도록 하는 역할을 한다. 회전체는 날개를 스크류 간격과 동일하게 배치하였고, 슬러지와 맞닿는 부분은 날카롭게 하여 잘리기 용이하게 하였다. 이는 최대 점성을 가져 덩어리지는 40~60% 함수율의 점착성 구간을 효과적으로 진행시키고, 입자를 작게 잘라 슬러지의 표면적을 증가시켜 건조효율을 향상시키는 효과를 갖게 한다[7]. 열풍 분배판은 직경 46 mm, 길이 500 mm의 판으로 킬른 입구부터 출구까지 90°간격으로 일정간격마다 홀을 뚫어 킬른 전반적으로 열풍이 공급되도록 하였다.

열풍 주입부는 열풍을 공급하는 가스버너와 열풍라인으로 구성되어 있다. 가스버너는 컴프레서로부터 공급되는 공기와 LPG를 예혼합하여 공급하도록 하였고 역화방지 및 안전된 화염을 위해 버너 하단에 허니컴을 두 단으로 설치하였다.

건조로 제어부는 건조로의 운전 시 슬러지 주입호퍼의 회전판, 이송스크류와 킬른의 작동을 제어하고 이송스크류와 킬른은 인버터 방식으로 회전속도를 제어할 수 있도록 하였다.

측정 및 분석부는 온도 측정 장치와 배기가스 분석 장치로 구성되어 있는데 온도 측정 장치는 K-type 열전대와 데이터 분석 장치(fluke hydra logger)로 구성되어 있다. 열전대는 버너 상단, 열풍주입구, 킬른 내부에 각각 설치하여 연속적으로 온도를 확인할 수 있도록 하였다. 배기가스 분석은 샘플링 라인과 가스크로마토그래프(SHIMADZU-14B)로 구성되어 있다. 분석 컬럼은 Molecular Sieve 5A, Molecular Sieve 13X 그리고 HayeSep R을 사용하였다.

2.2. 실험방법

본 실험은 건조과정에서 킬른 내의 슬러지와 열풍이 접촉함으로써 입자를 최대한 작게 분쇄하여 표면적을 증가시키는 것이 중요하다. 이에 킬른 벽면에 베인을 90°간격으로 수평방향으로 설치하였고, 회전체를 킬른 중심에서 슬러지가 베인에서 낙하하는 방향에 장착하였다.

슬러지의 건조공정에 앞서 킬른 내부 온도를 330~340 °C로 유지시키기 위해 수분에 의한 증발잠열을 고려하여 400 °C까지 승온하여 예열시킨다. 이때 건조로의 시동특성은 Figure 2와 같이 나타난다.

킬른 내의 온도가 안정화 되면 회전체와 주입호퍼를 작동시키고 이

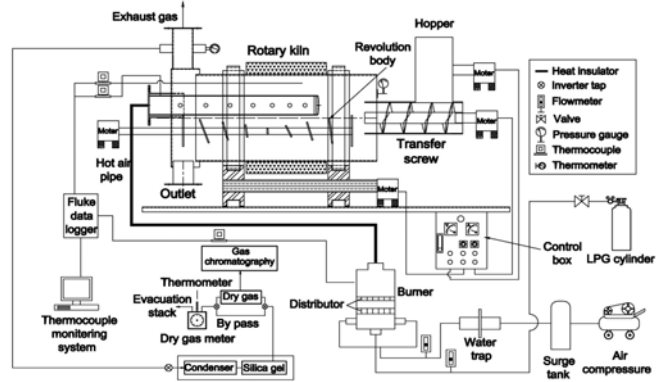


Figure 1. Schematic of the experimental set up.

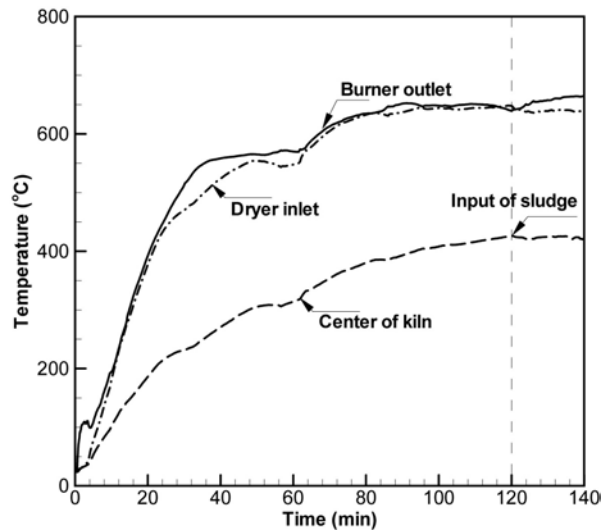


Figure 2. A initial characteristic of dryer.

송스크류와 킬른의 회전속도는 각각 건조로 부하(D_R) 62.5 kg/m³ · hr, 슬러지 체류시간(RT) 26.2 min이 되도록 조절하여 건조로를 운전하였다. 건조로 부하와 킬른 체류시간은 식 (1), (2)와 같이 나타난다.

$$D_R = \frac{S_r}{V} \tag{1}$$

여기서 D_R 은 건조로 부하(kg/m³ · hr)를 나타내며, S_r 은 시간당 슬러지 주입량(kg/hr), V 는 건조로 체적(m³)을 나타낸다.

$$RT = \frac{L}{P \times R} \tag{2}$$

여기서 RT 는 킬른 체류시간(min)을 나타내며, L (mm)은 킬른의 길이, P (mm/Rev)는 1회전당 피치간격, R (Rev/min)은 킬른의 회전속도를 나타낸다.

각각의 조건이 안정화되면 주입호퍼에 저장된 슬러지가 이송스크류에 의해 킬른 내로 주입되고 회전체에 의해 분쇄되면서 건조공정이 진행된다. 탈수슬러지가 건조되어 나온 결과물(이하 건조슬러지)의 함수율이 일정하게 되는 40 min의 안정화 시간을 준다. 이러한 과정을 통해 건조슬러지를 제조하였다. 본 건조로의 최적 운전조건을 결정하

Table 1. Physicochemical Characteristics of Dewatered Sludge

Item	Water		Ignition loss		Ash
Value (wt%)	82		90.9		9.00
Item	C	H	O	N	S
Value (%)	14.1	10.8	2.70	25.7	2.68
Heating value					
LHV (kcal/kg)				3710.6	

Table 2. Results of Experiment for Standard Conditions

Standard conditions	Sludge load (kg/m ³ · hr)	Residence time (min)	Temperature (°C)		
Value	62.5	26.2	330		
Experiment data	Content of water (%)	Efficiency (%)	Reduced weight (%)	Decreased volume (%)	Size (mm)
Value	10±2	88	80	60	> 10

기 위해 운전변수인 킬른 체류시간, 건조로 부하, 건조로 온도를 각각 14.3~33.3 min, 38.1~92.5 kg/m³ · hr, 230~360 °C로 변화시켜 실험을 진행하였다.

2.3. 분석방법

본 건조로의 최적 운전 조건을 결정하기 위한 지표로 폐기물공정시험방법에 따라 함수율을 측정하였고[8], 건조슬러지의 건조특성을 파악하기 위해 건조효율 및 부피감량을 계산하였다. 유기화합물의 성분 C, H, O, N, S의 정량 및 정성 분석을 위해 원소분석기(EA 1110, CE INSTRUMENTS)를 사용하였고, 하수슬러지의 건조된 상태에서 증류속 용출을 파악하기 위해 폐기물공정시험법[8]에 의해 정성 및 정량을 분석하였고, 배기가스 측정은 가스 가스크로마토그래프로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탈수슬러지

본 실험에 사용된 하수슬러지는 광주하수처리장에서 발생한 것으로 표준 활성슬러지법으로 처리하여 탈수한 탈수슬러지를 사용하였다. 탈수슬러지의 화학적 성상 및 함량, 발열량은 Table 1과 같다. 발열량은 Dulong식에 의해 고위발열량을 계산하였고, 증발잠열을 고려하여 저위발열량으로 환산하였다[9]. 실험에 사용한 슬러지의 함수율은 평균 82.0%로 나타났다.

3.2. 기준조건

본 실험은 설계 제작된 건조로의 최적 운전조건을 확보하기 위해 운전변수별 반복실험을 통해 건조슬러지의 함수율을 기준으로 기준

조건을 선정하였으며, 이때 결과는 Table 2와 같다.

기준조건에서 변수별 조건은 건조로 부하 62.5 kg/m³ · hr, 킬른 체류시간 26.2 min, 건조로 온도 330 °C로 각각 결정되었으며, 이때 건조슬러지의 함수율은 10 ± 2%이고, 건조효율은 88%, 무게감량은 80%, 부피감량은 60%로 나타났다. 또한 건조슬러지 입경은 주로 10 mm 이하로 배출되었다.

Table 3은 실제 현장에서 하수슬러지의 건조를 위해 운전되고 있는 H사와 S사의 로타리 킬른 건조로와 본 건조로를 비교한 것으로 건조로 부하로 환산하여 비교했을 때 건조효율, 건조로 온도, 체류시간에서 더 좋은 결과를 보였다. 각각의 건조로는 수평형 로타리 킬른으로 킬른 내부에 바스켓 날개가 설치되어 슬러지를 이송, 교반하고 슬러지를 낙하시키며 열풍과 접촉하여 건조를 원활히 진행되게 하였으며, 내부 편심축은 안테나 모양의 회전체를 정속 회전시켜 슬러지를 분쇄하며 건조효율이 향상되도록 하였다. 이때 열풍공급은 기존 병류식(parallel flow)과 향류식(counter flow)보다 효율적인 열풍공급을 위해 본 건조로는 내부에 열풍이 균일하게 공급되는 분배식(distribution flow) 형태를 적용하였다.

Figure 3은 탈수슬러지와 건조슬러지의 물리적 상태를 비교한 것이다. Figure 3(b)는 건조슬러지로 입경이 Figure 3(a)의 탈수슬러지에 비해 매우 작아졌고, 슬러지의 무게와 부피도 상당히 감소하였음을 육안으로도 확인할 수 있다. 탈수슬러지의 경우 집착성이 강하여 큰 덩어리 상태이지만 본 건조로에 의해 건조 공정을 진행시킨 후 건조슬러지의 입경은 10 mm 이하로 배출됨을 확인하였다.

Table 4는 탈수슬러지와 건조슬러지에 포함된 중금속의 용출특성을 파악하기 위한 것으로 폐기물공정시험법에 의해 정성 및 정량적으로 나타낸 것이다. 이를 각각 매립 복토제 및 부숙토 원료의 중금속 함량 기준[1]과 비교하였을 때 모든 기준에서 만족함을 확인하였다.

또한 건조공정으로 인하여 배출되는 가스성분의 파악을 위하여 가스 크로마토그래프로 분석한 결과 CO₂, O₂, N₂가 배출되었으며, 각각 6.99, 9.47, 74.99%로 나타났다.

3.3. 변수별 연구

3.3.1. 킬른 체류시간 변화

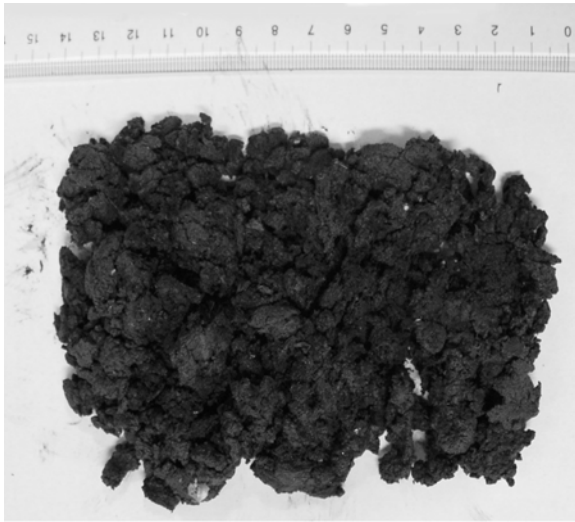
Figure 4는 건조로 부하 38.1 kg/m³ · hr, 건조로 온도 330 °C로 고정된 조건에서 킬른 체류시간 변화에 따른 하수슬러지의 함수율과 건조효율을 파악한 것으로 14.3~33.3 min으로 변화시켜 실험을 진행하였다.

킬른 체류시간에 따른 최적 건조조건은 14.3 min으로 함수율과 건조효율은 13.3%와 84.4%로 나타났고, 이때 건조슬러지의 입경은 10 mm 이하였다. 또한 건조슬러지는 시간당 129 g이 배출되었다. 체류시간이 길어질수록 함수율은 감소하고 효율은 증가하였지만, 건조로 부하 38.1 kg/m³ · hr에서는 체류시간이 짧아도 82%의 높은 함수율의 슬러지가 15% 이하로 건조되어 배출되었다. 하지만 출구를 통해 배출되는 건조슬러지의 양이 너무 적어 건조로 부하량 38.1 kg/m³ · hr은

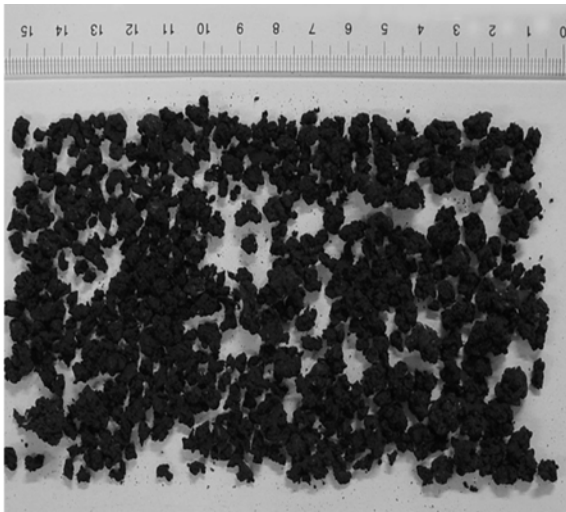
Table 3. Comparison of This Dryer and Industrial-scale Rotary Kiln Dryers

Item	D × L (m)	Sludge load (kg/m ³ · hr)	Dryer efficiency (%)	Residence time (min)	Thermostat supply	Dry temperature (°C)
A	0.22 × 0.5	62.5	88	26.2	Direct heating (distribution flow)	330
B	3 × 7	60.6	86.2	20~40	Direct heating (parallel-flow)	400~450
C	1.7 × 17	104	75	60	Direct heating (Counter flow)	800

A: Experimental dryer, B: H. Co. dryer, C: S. Co. dryer



(a) Dewatered sludge



(b) Dried sludge

Figure 3. Comparison of dewatered sludge and dried sludge.

운전조건으로 부적합함을 확인하였다.

3.3.2. 건조로 부하 변화

Figure 5는 건조로 온도는 330 °C로 고정된 상태에서 건조로 부하를 38.1~92.5 kg/m³·hr로 변화시키고 Figure 4의 건조슬러지 배출량이 너무 적어 체류시간도 14.3~33.3 min으로 함께 변화시켜 실험을 수행한 것이다. 그 결과 슬러지 부하에 따른 최적 건조조건은 체류시간 26.2 min과 건조로부하 62.5 kg/m³·hr로 선정하였으며, 함수율과 건조효율은 11.8과 86.1%로 나타났다. 이때 건조로 부하는 낮을수록 건조효율이 높아지지만 38.1 kg/m³·hr의 경우 62.5 kg/m³·hr에 비하여 배출되는 건조슬러지의 양이 현저히 적고, 62.5 kg/m³·hr 이상의 경우 함수율의 차이는 크지 않았지만 배출되는 건조슬러지의 입경의 분포가 고르지 않으며 입경이 10 mm 이상으로 건조되지 않은 덩어리가 상당히 포함되는 문제점이 확인되었다.

3.3.3. 건조로 온도 변화

Figure 6은 건조로 온도에 따른 함수율 및 건조효율을 파악하고자

Table 4. Comparison of Heavy Metal Contents of Dewatered Sludge and Dried Sludge

Heavy metal (mg/L)	Pb	Cu	As	Cr	Cd	Hg
Regulation for compost	150	500	50	300	5	2
Dewatered sludge	0.1	0.13	ND	ND	0.02	ND
Dried sludge	0.04	0.141	ND	ND	ND	ND

ND: No detection

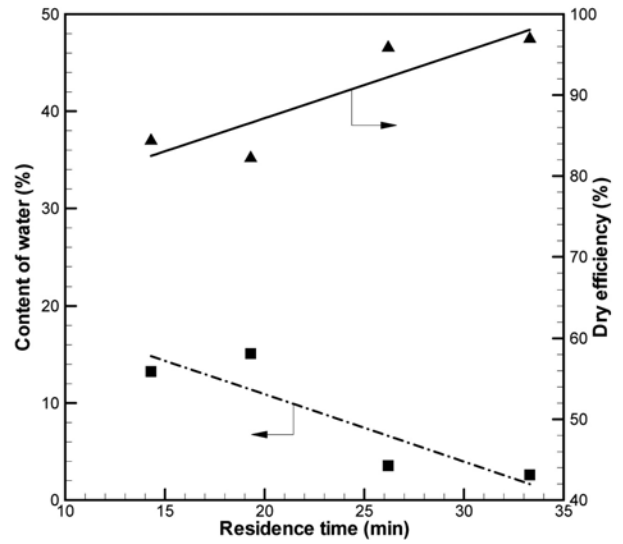


Figure 4. Effect of variations of kiln residence time.

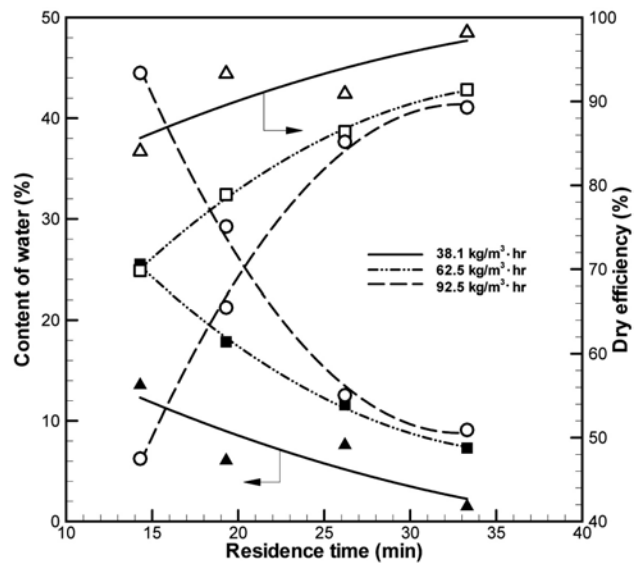


Figure 5. Effect of variations of sludge load.

230~360 °C로 변화시켜 실험을 수행한 것으로 Figure 5에서의 최적 조건으로 선정된 킬른 체류시간 26.2 min과 건조로 부하 62.5 kg/m³·hr의 조건을 고정하였다. 그 결과 함수율과 건조효율은 11.6과 86.4%로 나타났고, 입경이 주로 10 mm 이하로 시간당 706.8 g 배출되었다. 또한 무게 및 부피의 감량은 각각 80과 60%로 슬러지를 건조하므로 슬러지의 무게와 부피 모두 상당히 감소한 것을 확인하였다. 이때 함수율은 온도가 증가할수록 감소하고, 건조효율은 증가하지만 건조효

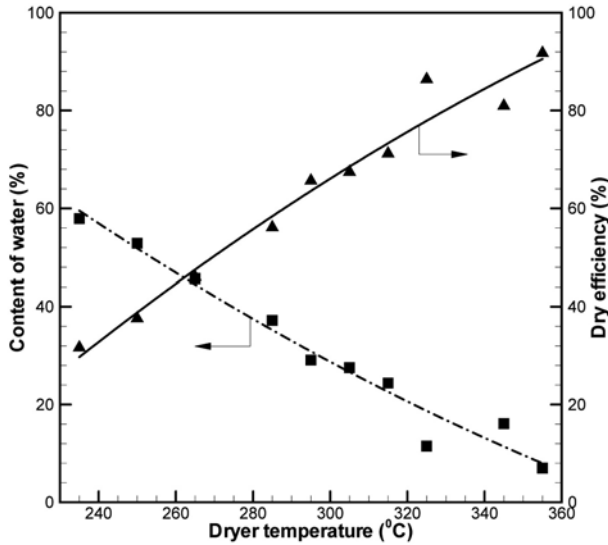


Figure 6. Effect of variables of dryer temperature.

율, 건조슬러지 배출량 등의 조건을 고려하여 건조슬러지 함수율이 10% 정도인 330 °C로 선정하였다. 또한 선행 연구인 슬러지 탄화실험에서 슬러지 탄화를 통한 흡착제 제조를 목적으로 슬러지를 건조한 경우 건조된 슬러지의 함수율이 10% 이하로 낮아지면 오히려 탄화과정으로 제조된 탄화물의 흡착능이 감소하고 세공이 손상되어 흡착특성을 저하된다는 연구결과가 있다[10].

4. 결 론

선행 연구인 수치해석적 연구를 통해 건조로의 형상 및 내부의 열흐름을 파악하여 제작된 건조로를 이용하여 킬른 체류시간, 건조로 부하, 건조로 온도를 영향변수로 선정하여 반복실험을 통해 건조로의 최적 운전조건을 확보하였다. 이때 최적 운전조건은 킬른 체류시간 26.2 min, 건조로 부하 $62.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hr}$, 건조로 온도 330 °C로 확인되었으며, 함수율과 건조효율은 13.3과 84.4%로 나타났고, 건조슬러지

의 입경은 10 mm 이하 배출되었다. 변수별 연구를 통한 함수율의 건조특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

1) 건조로의 체류시간은 길어질수록 함수율은 감소하고 건조효율은 증가하였으며, 건조로 부하 $38.1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hr}$ 에서는 체류시간이 짧아져도 15% 정도의 건조슬러지가 배출되어졌다. 하지만 건조슬러지 배출량이 시간당 129 g으로 너무 적게 배출되었다.

2) 건조로 부하는 부하량이 적을수록 함수율이 낮아지고, 건조효율이 증가하였다. 하지만 $62.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이하의 경우 건조슬러지 배출량이 너무 미비하고, 이상일 경우 건조슬러지 배출량에 비해 함수율의 증가가 급격함을 확인하였다.

3) 건조로 온도는 증가할수록 함수율이 감소하였다. 건조온도 선정은 후속공정의 상황에 맞는 슬러지의 함수율을 위해 적절한 온도제어가 필요하다.

참 고 문 헌

1. <http://www.me.go.kr/DEPTDATA/200705/15101615/12.hwp>.
2. J. G. Kho, A. Y. Jeong, Y. T. Moon, and D. P. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **11**, 1 (2000).
3. J. A. Menéndez, A. Domínguez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **74**, 406 (2005).
4. J. W. Hwang, C. G. Phae, H. B. Ko, and B. S. Ko, *J. Korea Society of Waste Management*, **19**, 283 (2002).
5. Y. N. Chun, H. W. Song, S. C. Kim, and M. S. Lim, *Proceedings of the 2006 Autumn Conference, J. Korea Society of Waste Management*, 397 (2006).
6. A. Mulet, A. Berna, M. Borrás, and F. Pinaga, *Drying Technology*, **5**, 245 (1987).
7. M. S. Shin, H. S. Kim, E. Y. Jung, D. S. Jang, and E. S. Na, *J. Korea Society of Waste Management*, **22**, 381 (2005).
8. <http://www.konetic.or.kr/attfile/board/moe292.hwp>.
9. C. G. Phae, *Waste Treatment Engineering*, 78, Goomibook, Seoul (2005).
10. D. H. Jung, J. S. Song, J. H. Lee, and Y. N. Chun, *J. Korea Society of Waste Management*, **24**, 448 (2007).