



탈수슬러지의 마이크로웨이브와 증기 건조공정의 성능비교

Comparison of microwave and steam-type drying processes for dehydrated sludge in a wastewater treatment plant

정상홍¹ · 최윤성² · 이승환^{3,*}

Sang-hong Jeong¹ · Yun-seong Choi² · Seung-Hwan Lee^{3,*}

¹에코비트워터 김천사업소

²에코비트워터 예천하수슬러지사업소

³금오공과대학교 환경공학과

¹*Gimcheon Works Environment Team, Ecorbit Water*

²*Yecheon Sewage Sludge Treatment Plant, Ecorbit Water*

³*Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of University*

pp. 141-153

pp. 155-164

pp. 165-175

ABSTRACT

There are two primary sludge drying methods such as the direct heating microwave method and the indirect heating steam one. In this study, the drying treatment facility at sewage treatment plant A applied both of these drying methods. The research aimed to investigate the optimal operation approach for the drying facility, considering the input sludge and the moisture content data after the drying process. Moisture content and removal rate data were executed at the research facility from January 2016 to December 2018. First, the microwave, a direct heating drying method, performed intensive drying only on the outer surface of the sludge by directly applying heat to the sludge using far infrared rays, so effective sludge drying was not achieved. On the other hand, the steam method of the indirect heating method used steam from a gas boiler to maximize the utilization of the heat transfer area and reduce energy of the dryer, resulting in an effective sludge drying efficiency. The sludge moisture content brought into the sludge drying facility

Received 26 February 2024, revised 1 May 2024, accepted 8 May 2024.

*Corresponding author: Seung-Hwan Lee (E-mail: dLee@kumoh.ac.kr; Fax: 82-54-478-7859, Tel. 82-54-478-7632)

1 정상홍 (사원) / Sang-hong Jeong (Staff)

경상북도 김천시 공단로 58, 39559
58, Gongdan-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do 39559, Republic of Korea

2 최윤성 (소장) / Yun-seong Choi (Chief)

경상북도 예천군 예천읍 상동길 49-50, 36830
49-50, Sangdong-gil, Yecheon-eup, Yecheon-gun, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

3 이승환 (정교수) / Seung-Hwan Lee (Professor)

경상북도 구미시 대학로 61, 39177
61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do 39177, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

was about 80%, but the moisture content of the sludge that went through the drying facility was less than 10% of the design standard. Therefore, the steam method of the indirect heating method is more effective than the microwave method of the previous direct heating method and is more effective for maintenance. It has proven that it is an efficient method of operating construction facilities.

Key words: Sludge, Microwave, Steam, Maintenance, Efficiency

주제어: 슬러지, 마이크로웨이브, 증기, 유지관리, 효율성

1. 서론

생활수준이 높아짐에 따라 과거 소비중심의 문화에서 벗어나 개선 및 관리 측면에 대한 인식이 높아졌고, 이는 자연스럽게 환경개선에 대한 요구 및 방법론에 대한 연구로 이어졌다. 생활 및 산업에서 발생되는 슬러지는 에너지원과 같은 다른 용도의 사용으로 인식되어 지기 전에는 없어져야 할 요소로만 여겨져 왔고, 이러한 상황에서 제일 먼저 수행된 해결책이 해양투기였다. 하지만 해양투기로 인한 2차 오염의 우려가 생겼고, 이런 문제를 없애기 위해 2016년 런던협약을 이행해 우리나라를 포함한 세계의 모든 나라는 폐기물의 해양투기를 전면 금지하게 되었다 (Kim, 2011). 해양투기가 금지되면서 차선책으로 비용이 저렴하고 처리방식이 간단한 소각과 매립 그리고 퇴비화가 대안으로 사용되었다.

하지만, 소각을 위한 사용부지의 적절성 및 2차 대기오염, 매립을 통해 발생되는 침출수에 의한 토양오염 그리고 퇴비화를 하는 과정에서 슬러지 본연의 중금속에 의한 토양오염의 문제점으로 지속적인 사용은 불가능한 상황이 발생하였다 (Kim, 1999).

단순히 처리하는 문제에서 벗어나 슬러지의 자원화 과정에서 필수적인 부분이 바로 슬러지 건조과정이다. 80% 이상의 수분을 포함하고 있는 슬러지를 건조하기 위해서는 우선적으로 건조가 필요하다. 2005년의 자료를 살펴보면 전국에 분포된 하수처리장에서 일평균 5,689 ton/day으로 하수 1톤당 평균 0.032%의 슬러지가 발생했고 현재까지도 꾸준히 증가추세로 이어지고 있다. 결국 매립에 의존했던 기존 슬러지 처리방식에서 벗어난 새로운 슬러지 처리방식의 필요성이 문제의 중심에 서게 되었다 (Kim, 1999).

모든 문제가 경제적 요소를 벗어나 해결하기 어렵듯 단순 처리의 문제의 범위에서 더 나아가 비용 절감과 건조효율의 극대화를 이끌어 내는 것이 무엇보다

다도 중요한 요점이 되었다. 또한 슬러지 처리의 가장 큰 목적은 감량 및 안정화 그리고 무해화가 원칙이다 (Kim, 2011).

본 연구에서는 최근 가장 일반적으로 쓰이는 공법인 마이크로웨이브(Microwave)와 증기(Steam) 건조방식을 이용한 슬러지 함수율 및 제거율 분석을 통해 보다 나은 슬러지 건조 운전방식을 알아내고자 한다. 더불어 이는 최근 세계적으로 주목하고 있는 기후변화 대응과 신에너지 확보를 위한 저탄소 녹색성장에 많은 도움이 될 것이라고 본다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 슬러지 건조의 종류

일반적으로 슬러지 건조에는 열을 이용하는 방법에 따라 직접적으로 이용하는 직접건조방식과 연소열로 증기를 배출시켜 건조하는 간접건조방식이 있다. 여기에 포함된 공법이 유증건조, 약액세정건조, 마이크로웨이브 그리고 증기 건조방식이다 (Park, 2018).

2.2 직접건조공법

직접 건조는 열을 직접적으로 슬러지에 접촉시켜 건조하는 방식으로 소각, 열분해, 탄화방식이 있다. 직접건조방식을 사용하면 열을 효율적으로 사용하고 추가적인 증기 발생장치가 필요하지 않아 경제적이고 효율적인 부대시설로 사용 가능하다. 하지만 슬러지 내 발화되기 쉬운 물질들의 연소로 악취가 발생하고 슬러지에서 빠진 수분이 방지시설로 모여 방지시설의 크기가 커지는 단점이 있다 (Park, 2018).

2.3 간접건조공법

대표적인 간접건조공법에는 열풍건조와 유증건조



가 있다. 열을 발생시키는 매체를 가열한 후 열전달면을 가열, 슬러지에 간접적으로 건조하는 방식이다. 이 방식은 수분함량의 조절이 용이해 앞서 설명한 직접건조방식의 단점을 보완한다. 그리고 가스의 배출통로가 분리되어 있어 악취처리에 용이하다. 다만 열을 전달하는 면에 슬러지가 부착되어 화재를 일으키거나, 가열하기 위한 추가적 설비가 필요하다는 단점이 있다 (Park, 2018).

2.4 연구처리시설 슬러지 특성 및 운전

본 연구에서 연구처리시설의 슬러지는 하수와 공단 하수 그리고 분뇨처리시설, 축산폐수, 자원화 처리시설 등 다양한 조건의 성격을 갖춘 슬러지의 데이터를 사용하였다. 기본적으로 탈수슬러지의 함수율은 80% 이상으로 매우 높은 함수율을 갖고 있으며, 건조과정을 통해 10% 이하의 함수율을 목적으로 처리되고 있다. 슬러지는 건조 후 화력발전소의 보조연료로 재이용되는 처리방식을 거치거나 개선된 함수율을 갖춘 상태로 반출되기도 한다.

건조시설은 2016년 이전까지 직접건조공법 중 하나인 마이크로웨이브를 이용했으며, 슬러지 건조 함수율 개선과 운영비 절감의 목적으로 2017년 개선공사를 통해 간접건조공법인 증기공법 변경공사를 진행해 지금까지 이용하고 있다. 연구대상의 일 처리용량 50 ton의 슬러지 처리시설을 이용, 탈수설비로부터 반입된 슬러지를 건조한다 (TSK water Cop., 2017).

Table 1은 연구처리시설의 건조시설 설계기준 탈수 슬러지 및 건조슬러지 일간 및 연간 처리량에 관한 내용을 나타내고 있다. 탈수슬러지 일간 처리용량은 50 ton이며, 연간 16,500 ton을 처리하고 있다. 그리고 건조슬러지 처리량은 일간 9.4 ton, 연간 3,102 ton을 처리하고 있다. 건조된 슬러지의 함수율은 10%를 목표로 하는 설계기준을 나타내고 있다.

Table 1. Sludge treatment volume

Sortation	Throughput		Water Content
	Daily Throughput	Annual Throughput	
Dehydrated Sludge	50.0 ton	16,500 ton	83%
Dry Sludge	9.4 ton	3,102 ton	10%

2.5 마이크로웨이브 공법 개요

건조공법 중 마이크로웨이브는 직접건조방식의 대표적인 공법이다. 마이크로웨이브는 선택적 가열, 내부 부피 가열, 신속한 가열 등이 가능해 에너지 절약 및 공정 단축의 측면에서 매우 효과적이다. 이런 점을 이용해 식료품의 제조, 광석 및 펄프의 건조 등 다양한 상업적 분야로 이용되고 있다 (Park, 2005, 2013).

그리고 물질의 종류와 온도에 따라 주파와 흡수 그리고 반사가 일어나는 정도가 달라 재래식 가열과는 달리 선택적 가열, 내부 부피 가열, 신속가열이 가능하다. 그리고 에너지 절약과 공정시간의 단축을 이용해 식료품 제조, 펄프의 건조, 고무의 가황 공정 등에 상업적으로 이용되어왔다. 더불어 최근까지 폐기물의 처리 및 무기물의 분해에 관한 연구 더 넓은 영역에 유기금속, 중간화합물, 다양한 무기물질, 나노물질 합성 등에 응용되고 있다 (Park, 2005).

그리고 마이크로웨이브 항울 건조 기간 중 건조속도는 주위 조건과 해당되는 물질(슬러지) 표면적에 의존하게 되어있다. 정상상태(Steady-State)에서 외부로 전달된 열은 물의 잠열에 의해 정확히 균형을 이룬다. 그리고 마이크로웨이브 가열건조는 높은 함수율을 가진 슬러지 건조에는 보다 경제적이지 못해 함수율이 낮은 슬러지의 건조에 적합하다. Standish는 마이크로웨이브 가열에 의한 건조는 함수율이 높을수록 loss factor가 커져 건조속도가 높다고 밝혔다. 그리고 Tuner는 다공성 물질 건조에 수분함량이 critical moisture 이하일 경우 에너지의 흡수가 낮고 유전성질은 더욱더 높아져 건조효율은 더욱 감소한다고 보고했다 (Park, 2005).

2.6 마이크로웨이브(Microwave)공정도

Fig. 1은 연구대상시설의 건조처리시설에서 사용했던 마이크로웨이브 슬러지 시설의 공정도를 상세히 나타내고 있다.

연구대상시설의 하수와 폐수 그리고 각 관리동(분뇨, 축산폐수, 음식물)에서 발생된 슬러지는 탈수슬러지 이송컨베이어를 통해 슬러지 저장호퍼로 모이게 된다. 그리고 외부처리장에서 반입된 슬러지는 반입호퍼에 저장되어, 앞서 슬러지 저장호퍼에 있던 슬러지와 같이 탈수슬러지 저장조로 슬러지가 모인다. 이후, 마이크로웨이브 건조기 A와 B를 통해 건조된 슬러지는 건조슬러지 저장조로 저장되며, 건조슬러지 호퍼로 이동, 성형컨디셔너와 압출기를 거쳐 외부로 반출된다.

마이크로웨이브 건조과정에서 생성된 가스는 황산을 이용한 배기가스 응축기를 통해 습식세정탑으로 이동한다. 이 과정에서 가스 중 일부 미립자는 성형미립자 이송 송풍기를 통해 건조슬러지 저장조로 이동 앞서 언급한 외부반출의 과정을 거친다.

앞서 발생한 배기가스 즉, CO, DUST, H2S, 악취는 습식세정탑에서 차아염소산과 가성소다를 이용한 물질을 거쳐 악취제거탑을 이용, 외부 대기로 방출된다.

2.7 증기(Steam)건조 공법 개요

Fig. 2는 연구대상시설에서 사용하는 증기 건조설비의 공정단계별 기기의 구성요소를 자세히 나타내고

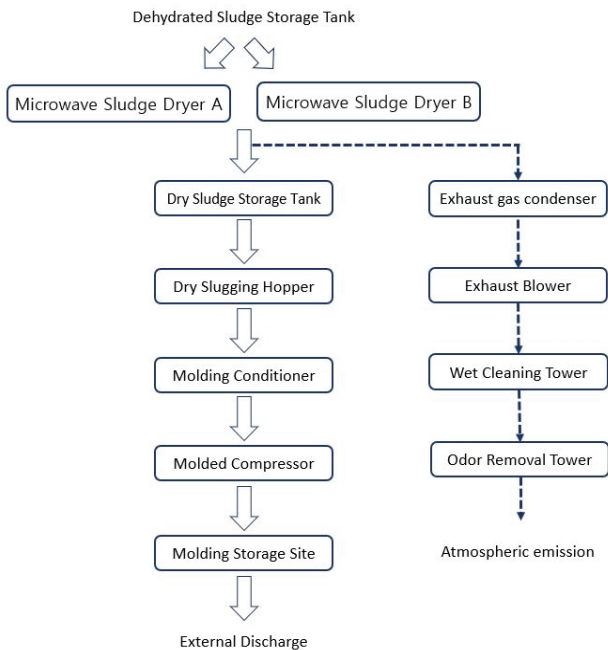


Fig. 1. Schematic diagram of microwave sludge dry.

있다.

건조장치의 열 도입방법에는 열풍수열, 전도수열, 복사수열, 고주파 수열 등의 방식이 있다. 여기서 슬러지를 목적으로 하는 방식은 열풍수열식, 전도수열식이 대표적인 방식이며, 열풍수열식은 열풍과 슬러지를 직접 접촉시켜 행하는 방식으로 기름과 가스를 열풍발생로에서 직접 연소시켜 공급된다 (Kim. 2011).

반면, 전도 수열식은 금속벽을 통해 열원에서 슬러지에 열을 간접적으로 전달하는 방식으로 열원으로 보일러를 통한 증기를 이용한다. 2017년부터 연구대상시설에서 사용되는 방식은 앞서 언급한 전도수열식을 사용하는 방식으로 간접적으로 가열되는 열매체가 열풍인 경우를 열풍식, 증기를 이용한 경우를 증기식이라 부르며 해당 자료를 참고하는 곳은 증기식을 사용한다. 이 방식은 관내의 수증기를 보내 건조하는 방식으로 배기습도가 높고, 따라서 동반 유출되는 비산먼지도 적지만 부착성이 강한 슬러지에는 부적절한 방식이다. 사용조건에 적절하게 연구대상시설은 부착성이 강한 슬러지보다는 단순 함유율이 높은 정도의 탈수 슬러지가 반입되고 있는 상황이다.

2.8 증기(Steam)건조 공정도

공정의 초기단계에 슬러지가 수집되는 과정과 일련의 이동 부분은 앞서 언급한 마이크로웨이브 공정과 동일하나, 스팀형식은 내부의 보일러를 이용해 고온의 스팀을 간접고열형식으로 슬러지를 건조하는 방식이다. 슬러지 건조설비는 탈수슬러지에 함유되어 있는 수분을 건조시켜 탈수슬러지를 함유율 83%에서 10% 이하로 건조시킬 수 있는 능력을 보유하여야 하며, 주요 설비구성은 슬러지 건조기, 보일러, 응축수 탱크, 연수설비, 혼합기, 순환컨베이어, 건조배기가스 집진기로 구성되어 있다. 슬러지는 탈수슬러지공급 펌프를 통해 슬러지 혼합기로 공급되고 여기에 순환된 건조슬러지(함수율 10%)가 슬러지혼합기에 혼합되어 건조기로 공급된다.

이후, 혼합된 슬러지(함수율 25%)는 건조기에 의해 수분이 감소된 후 건조슬러지 투입컨베이어와 수직 이송컨베이어를 통해 건조슬러지 저장조로 이송된다. 그리고 건조기 열원은 가스보일러(LNG GAS)의 스팀을 이용하여 건조하며 건조기 열효율 증가 및 에너지 절감을 위해 전열면적 활용을 극대화 한다. 아래보이



건조설비로 반입되는 탈수슬러지는 2기의 압력탱크에 컨베이어벨트에 의해 일정량 모이게 되고 Air Compressor를 이용, 건조설비가 있는 건물로 압송되어 진다.



압송된 슬러지는 슬러지 저장 호퍼에 모이고, 혼합기를 거쳐 모노펌프가 가동되는 힘을 이용, 슬러지 이송용 스크류 컨베이어를 통해 스팀 건조기로 이동한다.



혼합기에서 보낸 슬러지는 스팀건조기를 통해 건조 되는데, 이때 기존에 건조되었던 슬러지 중 일부를 반송해 새롭게 유입된 슬러지와 함께 건조하게 된다. 단순히, 슬러지만 80% 이상을 투입하면 건조기 벽에 달라붙어 효율이 떨어지기 때문에 이 과정을 거친다.



스팀건조기 내부의 온도는 섭씨 200°C까지 운전 가능하며, 슬러지가 유입되는 건조기 입구부위는 섭씨 90도, 건조기 중·후반부는 섭씨 140도 정도에서 건조가 진행된다. 참고로, 온도는 성능에 따라 ±10°C정도이다.



건조과정을 끝낸 슬러지는 외부반출을 위해 저장조로 이동하게 되는데 수직 이송 컨베이어를 통해 사일로로 이동하여 외부 반출을 하게 된다.



시멘트의 원료 등 이외의 목적으로 반출되는 슬러지는 앞서 수직 이송컨베이어를 통해 이송되어 사진에 보이는 사일로(Silo)로 모여 2일 1회 반출되고 있다.

pp. 141-153

pp. 155-164

pp. 165-175

Fig. 2. Components of equipment by process stage of steam drying facilities.

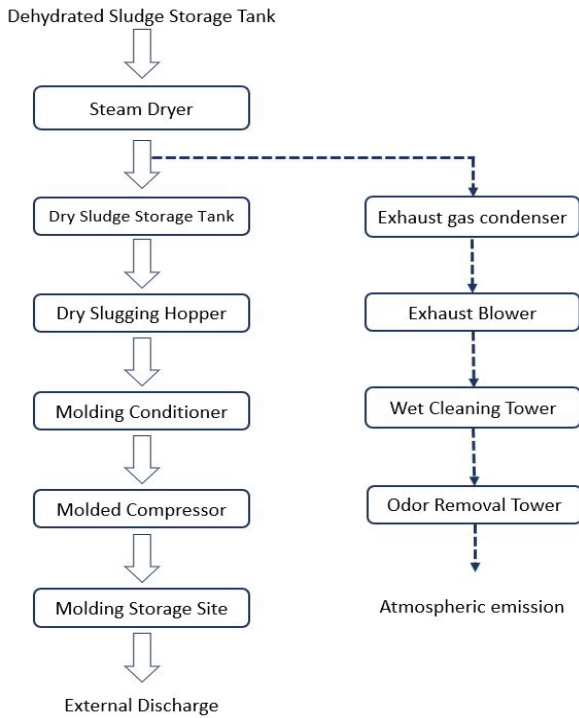


Fig. 3. Schematic diagram of steam sludge dry.

는 Fig. 3은 연구대상시설 건조처리시설에서 현재 사용하고 있는 증기건조 시설의 공정도를 상세히 나타내고 있다 (TSK water Cop., 2017).

증기건조공법을 사용하게 되면서 추가적으로 건조

배가스 집진기가 설치되었고, 앞서 외부로 반출되던 슬러지가 일부 A하수처리장 생물반응조로 투입되는 과정도 추가되었다.

2.9 공정시험법 적용 및 분석기간

슬러지의 함수율 분석은 공정시험법 폐기물 공정시험기준 ES. 06303. 1 수분 및 고형물-중량법과 ES. 06301. 1b 강열감량 및 유기물함량-중량법을 이용해 건조시설의 투입슬러지 및 건조 후의 슬러지 함수율과 제거율을 비교 분석했다. 분석에 사용된 데이터는 연구대상시설에서 마이크로웨이브와 증기건조 거친 슬러지를 분석하였다. 분석기간은 마이크로웨이브에서 증기건조 공법으로 변환 시점인 2015~2018년까지의 슬러지 함수율 분석 데이터를 이용했다. 시험을 진행하는 동안 슬러지를 수집·운반하는 시료보관함은 항상 건조한 상태를 유지했으며, 공정시험법에 따라 시험을 실시하여 정확도를 높였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마이크로웨이브(Microwave)사용 시 투입/건조 슬러지 함수율 비교

Fig. 4는 마이크로웨이브 건조공법을 사용한 기간

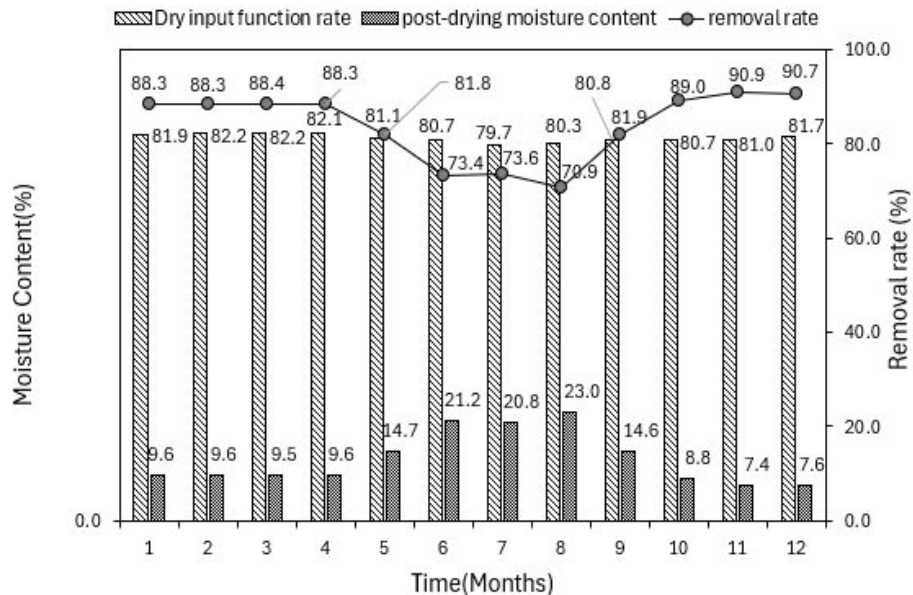


Fig. 4. Dry input and export of moisture content and removal rate in 2015~2016.



중 2015년에서 2016년까지 슬러지 함수율, 건조 전·후 슬러지 함수율과 제거율을 월평균 산정하여 그래프로 나타냈다.

건조설비로 투입되는 슬러지 평균 함수율은 최소 81.0%에서 최대 82.2%로 표준편차 ±0.83%로 함수율은 큰 변화 없이 투입되었다. 그리고 마이크로웨이브 건조 공정을 거친 슬러지 함수율은 최소 7.4%에서 최대 23.0%로 표준편차는 ±5.71%로 큰 편차를 보였다.

건조공정을 거친 슬러지의 함수율 값은 1월에서 4월, 그리고 10월에서 12월은 10%에 가까운 건조효율의 결과를 얻었지만, 5월 14.7%, 8월 최대 23.0%로 건조효율이 낮아졌다.

슬러지 분석을 통해 효과적인 건조효율을 이루지 못한 부분에서 마이크로웨이브가 가지는 공정의 단점을 확인할 수 있다. 마이크로웨이브는 설비 내 근적외선 전구를 이용해 슬러지 외부표면에 직접적인 가열을 통한 건조방식이기 때문에 근적외선 전구의 성능이 함수율 값에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 소모품인 근적외선 전구의 성능에 따른 슬러지 값의 차이가 발생하고 슬러지에 직접적으로 열을 가하기 때문에 슬러지 내부까지 골고루 건조하지 못한다는 점에서 효과적인 건조를 할 수 없었다. 슬러지 내부보다는 외부표면에 집중적인 가열을 함으로써 전반적으로 슬러지 표면적 건조에 효과적이지 못하다는

점에서 아쉬운 결과를 나타내었다.

3.2 증기(Steam)건조 공법 사용 시 투입/건조 슬러지 함수율 비교

Fig. 5는 증기건조공법을 사용한 기간 중 2017~2018년까지 슬러지 함수율, 건조 전·후 슬러지 함수율과 제거율을 월평균 산정하여 그래프로 나타냈다. 마이크로웨이브의 투입함수율과 큰 차이 없이 평균 80.0% 이상의 함수율이 건조시설로 투입되었다. 하지만 건조 후 함수율은 평균 6.1%로 설계인자 건조도 10%와 큰 차이를 보여주고 있어 효과적인 함수율 결과 값을 나타내었다.

건조설비로 투입되는 슬러지 평균 함수율은 최소 75.2%에서 최대 84.0%로 표준편차 ±2.45%로 함수율이 큰 편차 없이 투입되었다. 증기건조 공법을 거친 슬러지 함수율은 최소 4.6%에서 최대 6.6%로 표준편차는 ±0.61%의 결과 값을 나타내었다. 마이크로웨이브 건조방법에 비해 매우 균일한 상태의 함수율을 나타내었다.

증기건조 공법을 사용 후 제거율은 평균 93.0%로 높은 제거율을 나타내었다. 이러한 요소의 주요 이유는 건조방식의 차이가 함수율 및 제거율의 차이라고 할 수 있다. 마이크로웨이브는 직접적으로 슬러지 외부

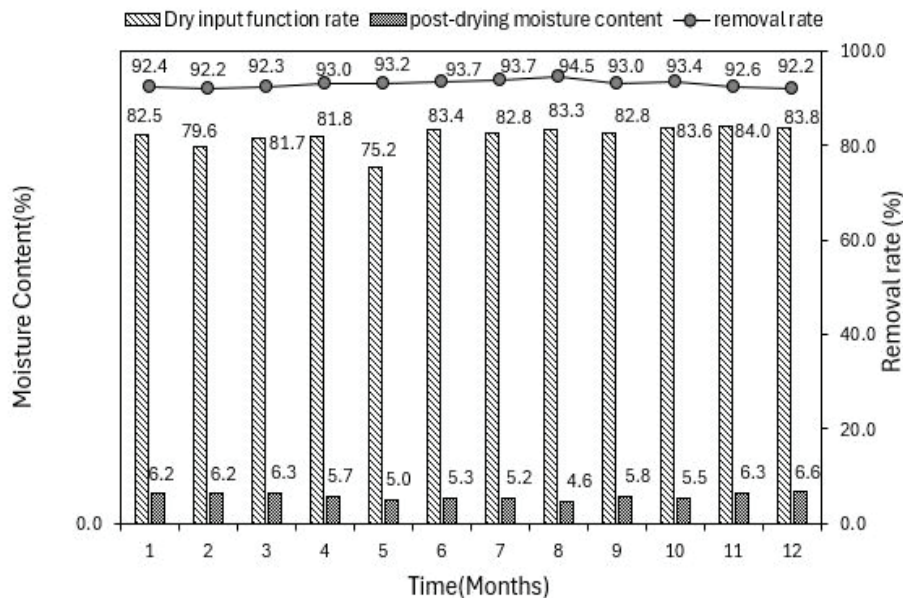


Fig. 5. Dry input and export of moisture content and removal rate in 2017~2018.

표면에 집중적으로 열을 가함으로써, 슬러지 내부까지 전반적인 건조가 이루어지지 않는다. 반대로 건조가 아닌 집열판을 통해 슬러지 전면에 열을 가하는 증기공법 보다 더욱 좋은 건조효율을 기대하기 어렵다. 2017년 개선공사 이후 증기건조공정이 안정화되면서 2018년 슬러지 투입 대비 건조 후 슬러지 함수율이 더욱 좋아졌다. 이러한 증기건조 공정이 효과적이고 효율적으로 진행되면서 설계 당시 목표로 했던 설계용량 50ton/day를 충족하기도 했다. 그리고 2017년에 비해 건조 후 함수율이 5.4%까지 개선되면서 당초 설계 건조도 10%를 크게 만족하는 효율을 나타내었다. 또한 제거율도 93.6%까지 향상되는 결과를 나타내었다.

3.3 슬러지 처리량 관련 마이크로웨이브와 증기건조 공법의 성능비교

Table 2는 마이크로웨이브를 이용한 건조공법 기간 중 2015~2016년 건조처리시설로 반입된 슬러지와 처리된 슬러지를 월 평균으로 나타냈다. 슬러지 반입량 23.0~24.0 ton, 처리량은 약 22.0 ton정도이다. 슬러지 건조시설 설계에 계획된 슬러지 처리량 50 ton보다 부족한 반입량 및 처리량이다. 일 슬러지 처리량이 설계된 용량보다 적게 반입되는 비효율적인 운전현상이

발생하였다. 슬러지 반입량에 비해 처리량이 더욱 많은 경우는 기존에 반입되었던 슬러지가 전량 처리되지 못하고 체류한 경우에 새롭게 반입된 슬러지와 함께 처리되는 과정에서 반출되어 발생하는 현상이다. 마이크로웨이브를 이용한 건조공법은 건조기 내벽에 슬러지가 부착되는 경우 및 근적외선 전구의 내구성 문제와 같은 건조설비의 문제 그리고 슬러지 내부까지 골고루 건조하지 못하는 공정상의 문제가 복합적으로 만들어낸 결과라고 볼 수 있다.

Table 3는 증기건조 공법을 이용한 건조공법 기간 중 2017~2018년에 건조처리시설로 반입된 슬러지와 처리된 슬러지를 월 평균으로 나타냈다. 슬러지 반입량 43.0~45.0ton, 처리량은 약 42.0~44.0 ton이다. 마이크로웨이브보다 약 50% 정도 증가된 반입량과 처리량으로 초기 건조시설 설계에 계획된 처리량으로 효율적인 운전결과를 나타내었다. 증기건조 공법은 유지관리 측면에서 지속적인 소모품의 교체문제가 발생하지 않고 건조도 10% 이하를 만족하는 결과를 알 수 있었다.

슬러지 반입량과 처리량의 관계를 운영관리 측면에서 살펴보면, 소모되는 전력과 연료가 가동시간 대비 설계용량을 처리하는 것이 중요하다. 증기건조공법이 마이크로웨이브보다 더 효율성과 경제성에서 효과적이라는 결론을 도출할 수 있었다.

Table 2. Average monthly sludge carry-in and throughput from 2015 to 2016

Parameters	Units	Average monthly sludge carry-in and throughput			
		Amount of sludge brought		Sludge treatment amount	
		2015	2016	2015	2016
January	ton	25.0	22.0	26.8	21.5
February	ton	27.8	19.6	25.0	19.1
March	ton	19.2	19.5	19.1	20.5
April	ton	19.2	27.2	26.5	26.8
May	ton	25.4	23.4	26.4	23.5
June	ton	21.2	26.2	20.7	26.0
July	ton	26.2	21.5	25.4	21.3
August	ton	25.2	19.1	25.5	22.4
September	ton	20.7	19.9	20.5	22.0
October	ton	28.8	26.3	26.7	22.0
November	ton	23.7	15.2	26.0	16.5
December	ton	23.2	29.4	23.2	25.4
Average	ton	23.8	22.4	24.3	22.3

**Table 3.** Average monthly sludge carry-in and throughput from 2017 to 2018

Parameters	Units	Average monthly sludge carry-in and throughput			
		Amount of sludge brought		Sludge treatment amount	
		2017	2018	2017	2018
January	ton	48.0	45.6	45.6	44.1
February	ton	43.4	43.1	43.6	41.5
March	ton	43.0	40.1	40.1	39.9
April	ton	41.0	39.1	47.1	45.1
May	ton	45.7	43.3	43.3	42.8
June	ton	46.0	45.7	45.7	43.5
July	ton	45.0	43.1	43.1	43.0
August	ton	46.9	45.4	45.4	39.2
September	ton	45.4	44.9	44.9	43.0
October	ton	44.8	43.4	46.4	43.4
November	ton	42.3	41.7	43.7	39.7
December	ton	48.1	46.7	46.7	44.1
Average	ton	45.0	43.5	44.6	42.4

3.4 공정에 따른 유지관리에 대한 평가

2016년까지 사용해왔던 마이크로웨이브는 내부에 근적외선 열을 가하는 전구를 이용해, 탈수설비로부터 투입된 슬러지를 직접적으로 열을 가하는 방식으로 근적외선 전구의 내구성이 떨어지거나 성상에 따라 슬러지가 건조기 내부 벽면에 부착하는 경우가 잦아 함수율이 좋지 않은 상태로 건조되어 효과적인 건조가 이루어지기 힘든 환경이었다. 그리고 근적외선을 이용하는 경우 화재의 위험성이 크다는 불안정성을 갖기도 한다. 슬러지를 일부 파쇄시키는 론(Roan)을 통해 슬러지의 단면적이 더욱 많이 열에 노출될 수 있도록 하는 작용을 하는 부분은 마이크로웨이브 단점을 보완하는데 큰 효과를 거두지 못한 것으로 드러났다. 2016년 이후, 증기건조 공법으로 변환 후 기본 조건인 투입 슬러지의 함수율은 동일하지만 건조 후 슬러지 함수율은 크게 개선되어 제거율이 매우 높게 나타나게 되었다. 그리고 유지관리에 추가적인 자재가 필요하지 않은 증기건조 공법은 경제적인 측면에서도 운영비 감소의 효과를 볼 수 있다. 주기적인 자재교체 및 고장으로 인한 수리가 많은 마이크로웨이브 건조공정보다 운영관리의 효율성과 경제적인 측면 모두 고려한다면 증기건조공법을 이용하는 것이 더 효과적이다.

4. 결 론

본 연구에서는 탈수설비로부터 투입되는 슬러지 함수율과 건조설비를 마이크로웨이브와 증기 건조공법의 특징 및 함수율 데이터 분석을 통해서 좀 더 효과적인 건조공법을 찾고자 하는데 목적이 있다. 주요 인자는 함수율과 제거율 그리고 유지관리 평가를 통해 최적의 운영방식을 연구하였다. 근거자료는 2015~2018년까지의 슬러지 함수율 데이터를 분석했고 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 2016년까지 사용한 직접가열방식의 마이크로웨이브 건조공법보다 2017년부터 사용한 간접가열형식의 증기 건조공법 슬러지 함수율의 효율이 높은 것으로 나타났다. 마이크로웨이브와 같이 근적외선을 동반한 직접가열은 탈수설비로부터 반입되는 80% 이상의 함수율을 가진 슬러지에 효과적으로 모든 단면에 열을 가하지 못하고 근적외선이 닿는 외부표면과 상부에 집중적인 가열을 가해 전체적인 건조에 효과적이지 못했다. 반면 증기 건조공법은 슬러지가 닿는 외부 표면부터 열을 간접적으로 가해 서서히 내부까지 열이 전달되어 건조되는 방식으로 효과적인 슬러

지 건조를 할 수 있었으며, 설계 건조도 10%보다 더 좋은 함수율과 제거율을 나타내었다.

2. 마이크로웨이브와 증기 건조공법과의 처리효율 차이를 명확히 확인할 수 있었다. 2015년 88.3%의 제거율을 나타내다가 2016년에는 76.9%만큼 감소된 제거율을 나타내었다. 이는 마이크로웨이브 공정을 사용하는 동안 설계처리용량 50 ton/day를 처리하지 못하는 부분에서 더 큰 단점으로 작용했다. 반대로 2017년부터 사용 중인 증기공법은 최적의 함수율과 제거율을 보이는 만큼 처리용량 50ton/day을 충분히 처리하고 지속적인 처리효율성을 나타내었다.
3. 마이크로웨이브는 직접가열의 형태로 근적외선을 슬러지에 가하는 램프의 내구성이 좋지 않아 교체 시기가 잦아졌고 건조 효율도 낮아졌다. 또한 램프의 근적외선은 설비 내 화재의 위험성 높고 유지관리에 효율적이지 못했다. 이와 반대로 증기 건조는 열을 전달하는 디스크의 내구성이 뛰어나고 유지관리가 용이했다. 또한 효과적인 슬러지 건조효과로 효율적인 운영이 가능하였다.

본 연구를 통해 탈수설비로부터 반입된 슬러지의 건조를 최적으로 이끌어 낼 수 있는 건조공정 공법은 증기 건조라는 점에 대해 알 수 있었으며, 그에 따른 제거율 및 효과적인 운영조건에 대해서도 알 수 있었다. 이번 연구의 결과를 바탕으로 건조설비 최적의 공정운영을 통해 효과적인 처리용량 달성과 효율적인 운영관리에 도움이 될 것이라고 사료된다.

사 사

본 연구는 국립금오공과대학교 교수 연구년 기간 중 수행되었습니다(2024년).

References

- Choi, G.Y. (2016). A Basic Study on the Effective Dehydrate Treatment Technology for the Sludge, Master's Thesis, Hoseo uni, Chungcheongnam-do, Korea.
- Ha, S.A. and Kho, H.W. (2003). A study on the pyrolysis characteristics of sewage sludge by the temperature conditions, J. Korea Org. Waste Resour. Recycl. Assoc., 11(3), 43.
- Kim, J.S. (1999). The Drying Characteristics of the Impeller type Thermal sludge Dryer, Master's Thesis, Chungnam National Uni, Daejeon, Korea.
- Lee, S.M. and Lee, Y.S. (2009). Analysis of the drying characteristic of wastewater sludge by microwave to make energy resources, J. Korean GEO Environ. Soc., 10(7), 125-133.
- Lee, J.E., Cho, E.M., and Kim, B.H. (2006). Air drying technology for dewatered cake from wastewater and waterworks sludge, J. Korean Soc. Environ. Eng., 28(11), 1154-1155.
- Park, J.S. (2013). Drying Characteristics of Sludge by Microwave Heating under Various Coagulants, Master's Thesis, Ajou Uni, Suwon, Korea.
- Park, S.Y. (2018). A Study on the RDF making Process of Heat-dried Sewage Sludge by using Oil-drying Method, Master's Thesis, Chungcheongnam-do, Korea.
- TSK water Cop. (2017). Gimcheon Improvement of sludge treatment facilities Complementary construction result report, 15-12, 1-14.
- Yoon, T.I., Kim, N.J., and Kim, C.G. (1992). Study on the determination of optimum conditions for the pretreatment of sludge dewatering, J. Korean Soc. Environ. Eng., 14(4), 309-316.