

초음파를 이용한 슬러지 감량화와 중금속 용출

오주연¹ · 권혜옥¹ · 이윤세² · 박은정¹ · 김철수² · 손희식² · 예진² · 최성득^{1,2†}

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²울산과학기술대학교 환경분석센터

Reduction of Wastewater Sludge and Leaching of Heavy Metals by Ultrasonic Treatment

Joo-Yeon Oh¹, Hye-Ok Kwon¹, Yun-Se Lee², Eun-Jeong Park¹, Chul-Su Kim²,
Hee-Sik Son², Jin Ye², and Sung-Deuk Choi^{1,2†}

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),
Ulsan 689-798, Korea

²UNIST Environmental Analysis Center (UEAC), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),
Ulsan 689-798, Korea

Received April 13, 2012/Accepted June 27, 2012

In this study, wastewater sludge was collected at a chemical plant in Ulsan, Korea, and the effect of ultrasonic treatment on sludge reduction and heavy metal leaching was investigated. In lab-scale experiments, the amount of sludge decreased with increasing ultrasonic irradiation intensity (100~600 W) and time (0.5~30 min). A pilot-scale ultrasonic reactor made in this study showed the highest performance (i.e., 46.2% of sludge reduction) in a batch mode operation. These results demonstrated that the ultrasonic treatment was useful for the reduction of sludge. On the other hand, the levels of heavy metals (Cd, Pb, Cu, and Zn) in supernatants of the sludge samples after the ultrasonic treatment substantially increased, addressing the need for proper management of toxic chemicals after dehydration of sonicated sludge. The reason for the sludge reduction and heavy metal leaching after the ultrasonic treatment was the disintegration of sludge flocs and cell walls. Therefore, an advanced ultrasonic technology considering both sludge reduction and leaching of toxic chemicals should be developed for practical applications.

Keyword: Sludge, Ultrasonic treatment, Wastewater, Heavy metal, Microorganism floc

1. 서 론

슬러지는 하·폐수처리 과정에서 생긴 침전물로서 85% 이하의 수분과 15% 이상의 고형물로 구성된다.¹⁾ 2010년 기준으로, 전국 470개 하수처리장에서 3,080,043 m³의 슬러지가 발생했으며, 활용(21%), 매립(11%), 소각(18%), 해양배출(43%), 연료화(8%) 등 다양한 방법으로 처리되고 있다.²⁾ 그러나 매년 하수처리장 건설이 증가함에 따라 슬러지 발생량이 증가할 것으로 예상된다.

슬러지 발생량 증가에 의해 환경부하가 가중됨에 따

라 정부차원의 관리대책이 수립되어 시행되고 있다. 2003년 7월부터 폐기물 관리법 시행규칙에 의해, 시설 용량 10,000 m³/day 이상 하·폐수종말처리시설에서 발생한 슬러지의 매립이 금지되었다. 해양배출의 경우, 국제적으로는 런던협약(1972)과 이 협약의 개정의정서(1996)에 의해 규제되고 있다. 현재, 정부에서는 슬러지 매립과 해양배출을 줄이고 활용(복토재, 건축자재, 연료 등)을 증가시킴으로써 슬러지를 친환경적이고 경제적으로 처리하는 방안을 검토 중이다.³⁾ 또한, 2012년부터 하수 슬러지와 가축분뇨의 해양배출을 전면 금지하였다.⁴⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-52-217-2811, Fax: 82-52-217-2809, E-mail: sdchoi@unist.ac.kr

위와 같은 슬러지 문제를 보다 근본적으로 해결하기 위해서는 슬러지 발생량 자체를 감소시켜야 한다. 슬러지 감량화 기술로는 기계적 처리,^{5,6)} 알칼리 처리⁷⁻⁹⁾, 열 처리¹⁰⁻¹²⁾, 오존산화 처리¹³⁻¹⁵⁾, 초음파 처리¹⁶⁻¹⁸⁾ 등이 있다. 이러한 다양한 슬러지 감량화 방법 중에서 초음파 처리가 가장 널리 사용되고 있으며, 감량 효과도 비교적 높은 것으로 알려졌다.^{19,20)} 또한, 여러 기술을 복합적으로 사용하여 슬러지 감량효과를 증대하는 연구들도 수행되었다.²¹⁻²⁵⁾ 예를 들어, 초음파 처리한 슬러지를 생물학적 방법으로 연속처리 할 경우, 슬러지가 감량됨에 따라 화학적 산소요구량이 80% 이상 저감되었으며,²⁶⁾ 혐기소화 시 메탄생성은 64% 증가하였다.¹⁶⁾ 그러나 지금까지 수행된 초음파 처리에 관한 대부분의 선행연구는 실험실 규모(Lab-scale)로 한정되었다.

한편, 초음파 처리과정에서 슬러지로부터 용출된 중금속에 대한 연구도 필요하다. 특히, 폐수 슬러지를 처리할 경우에 다량의 중금속이 용출되어 2차 오염을 유발할 가능성이 높기 때문이다. 슬러지를 안전하게 활용하기 위해 슬러지에 함유된 중금속을 초음파로 용출하는 연구들이 수행되었으나,^{27,28)} 이들 연구에서는 슬러지 감량화를 고려하지 않았다. 이와 같이 초음파를 이용한 슬러지 감량화와 중금속 용출을 통한 친환경적인 슬러지 사용을 동시에 고려한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 초음파 처리에 의한 슬러지 감량효과를 정량적으로 파악하기 위한 기초실험을 수행하고, 반응기를 제작하여 현장적용 가능성을 평가하였다. 또한, 초음파 처리과정에서 슬러지로부터 용출되는 중금속을 분석하여, 초음파 처리 시 발생할 수 있는 미량독성물질 문제를 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

본 연구에서는 화학공장(슬러지 배출량: 150 ton/day)의 가압 부상조와 2차 침전조에서 발생한 폐수 슬러지를 채취하였다. 슬러지 시료는 채취 즉시 실험실로 옮겨 불투명 플라스틱 용기에 넣고 4°C 이하에서 냉장보관하였다. 슬러지 미생물 증식과 부패의 영향을 최소화하기 위하여 시료채취 7일 이내에 모든 실험을 완료하였으며, 시료가 실온에 노출되는 시간을 최소화하였다.

슬러지 고형물의 원소분석을 위해 전기건조로(WOF-105, DAIHAN Scientific, Korea)에 슬러지 시료를 넣고, 120°C에서 1일 이상 완전 건조시켰다. 막사사발을

이용하여 건조시료를 파쇄 후 균질하게 혼합하여 최종 시료를 만들었으며, 원소분석기(Flash 2000, Thermo, USA)로 탄소, 수소, 산소, 질소, 황의 함량을 분석하였다.

2.2. 실험실 규모 초음파 처리

초음파 조사강도와 처리시간이 슬러지 감량화에 미치는 영향을 파악하기 위해, 초음파 파쇄기(Sonosmasher ULH-700S, Sibata, Japan)를 사용하여 20 kHz 초음파를 100~600 W로 0.5~30분간 조사하였다. 초음파 조사 강도와 시간에 따른 42개의 개별 시료(600 mL)를 비커(1,000 mL)에 넣어 초음파 처리하였다. 초음파 처리된 시료(50 mL)를 코니칼 튜브(Palco, bioscience, USA)에 넣고 3,000 rpm으로 30분간 원심분리하여(Combi 514R, Hanil Science Industrial, Korea) 상등액과 침전물로 분리하였다. 이후, 시료별로 침전물의 부피변화를 파악하여 슬러지 감량을 확인하였다.

2.3. 초음파 연속반응기 제작

지금까지 초음파를 이용한 슬러지 처리와 관련된 대부분의 연구들은 실험실 규모에서 소규모로 수행되었다. 본 연구에서는 실제공정과 유사한 조건에서 초음파 처리 효과를 확인하기 위해, 파일럿 규모(Pilot scale)의 반응기를 제작하였다(Fig. 1). 반응기 저장조(a)는 슬러지 1,600 kg을 저장할 수 있으며, 조절밸브를 이용하여 슬러지의 유속을 조절할 수 있다. 반응기 처리수로는 유입구(b), 펌프(c), 처리조(d), 초음파기(e), 유출구(f)로 구성되었으며, 저장조와 처리수로는 구조변경이 용이한 플라스틱(폴리염화비닐수지) 재질로 제작되었다.

반응기 운전조건에 따른 초음파 처리효과를 확인하기 위해, 대조군(유속: 6 cm/s, 유량: 462 cm³/s, 초음파 미처리), 연속형(유속: 6 cm/s, 유량: 462 cm³/s), 배치형(유속: 0 cm/s, 처리량: 12,315 cm³, 15분)으로 구분하여 각각 3회 반복실험하였다. 초음파 조사강도는 600 W였으며, 두 대의 초음파기를 연속으로 배치하였다. 초음파 처리된 슬러지 시료(600 mL)를 원심분리(3,000 rpm, 30분)하여 침전물(50 g)을 채취하였다(1차 탈수). 이후 벨트 프레스 탈수방식을 재현하기 위해 자동차를 이용하여 침전물을 압착하는 2차 탈수를 실시하였다(자동차 무게: 1,230 kg, 자동차 앞바퀴로 40회 압착).

2.4. 중금속 분석

슬러지에서 용출된 중금속을 분석하기 위해, 슬러지

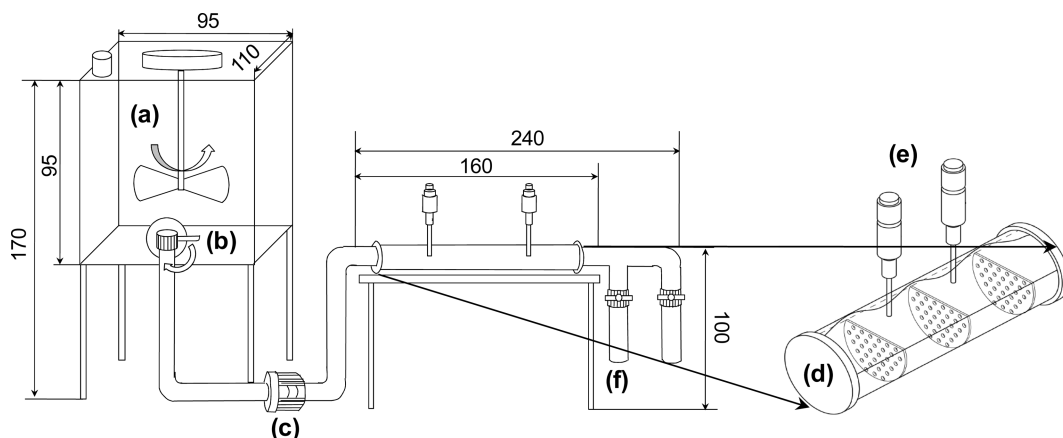


Fig. 1. Structure of the ultrasonic reactor made in this study.

를 원심분리하여 상등액을 채취하였다. 상등액 5 mL와 왕수 12 mL(염산:질산=3:1 부피비)를 흑연블럭 시료분해장치(Graphite digestion system, ODLAB, Korea)의 분해용기(BaekDu™, ODLAB, Korea)에 넣고 200 °C로 120분 동안 가열·분해하였다. 분해 시료를 30분간 방랭시킨 후, 5A 필터(ADVANTEC, Japan)로 여과하고, 충분히 세척하고 여액과 합하여 최종시료 부피가 50 mL가 되게 하였다.

유도결합플라즈마 방출분광기(ICP-OES, 720-ES, Varian, USA)를 이용하여 중금속 4개 항목(Cd, Cu, Pb, Zn)을 분석하였으며 기기분석 조건은 다음과 같았다: 유속(Plasma flow)=15 L/min, 보조기체유속(Auxiliary flow)=1.5 L/min, 분사유속(Nebulizer flow)=0.7 L/min, 라디오파 발생장치 전력(RF power)=1,200 W, 측정시간(Measurement time)=5 sec, 반복측정 횟수(Replicate measurements)=3. 분석대상 물질의 검량선 결정계수(R^2)는 모두 0.999 이상이었으며, 바탕시료를 분석하여 분석값을 보정하였다. 정량한계(Limit of quantification: LOQ)는 바탕시료를 7회 분석하여 이 값들에 대한 표준편차를 구한 후 10을 곱하여 계산하였다. 분석방법의 회수율을 확인하기 위해, 증류수 5.0 mL에 표준물질(1,000 mg/L) 0.1 mL를 첨가하여 회수율 확인시료를 조제하였다. 이 시료를 슬러지 상등액 시료와 동일한 방법으로 분석한 결과, 중금속의 회수율은 99~105%로 나타났다. 실험과정 중 오염을 최소화하기 위해 금속재질의 실험기구와 유리기구류는 사용하지 않았으며, 모든 실험 기구는 5 M 염산용액에 24시간 이상 세척 후 사용하였다. 정밀도를 파악하기 위해 모든 시료는 3회 반복 분석하였으며, 상대표준편차(Relative standard

deviation: RSD)는 모두 30% 이하로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 특성

원소분석기를 이용하여 분석한 슬러지 원소비는 탄소 38.8%, 수소 5.9%, 질소 5.5%, 황 0.8%, 산소 29.9%, 기타 19.1%였다. 이 값들은 선행연구에서 보고된 하수 슬러지 성분비와 유사하였다.²⁹⁾ 슬러지의 평균 pH는 6.8 (n=3)로서 슬러지의 일반적인 pH 범위(5.0~8.0)에 속하였다.³⁰⁾

광학현미경(Axio Scope, Carl Zeiss, Germany)을 이용하여 슬러지를 400배(10×40)로 관찰한 결과, 2 μm 이상의 미생물들이 다수 관찰되었다(Fig. 2). 이러한 미생물들의 크기, 색상, 형태적 특징으로 판단할 때, 다양한 조류(Anacystis, Gomphospaeria, Anabaena



Fig. 2. Microorganisms in the wastewater sludge used in this study (10×40).

등)와 운동성이 있는 원생동물들로 추정된다. 일반적인 슬러지 미생물의 구성을 고려하면, 이 외에도 다양한 세균과 균류들도 포함되어 있을 것으로 판단된다.

3.2. 초음파에 의한 미생물 변화

초음파 강도에 따른 미생물 변화를 살펴보기 위해, 초음파 강도를 100~600 W로 증가시켜 슬러지에 조사하고 광학현미경으로 관찰하였다(Fig. 3a). 현미경 배율은 100배(10×10)였으며, 초음파 처리시간은 30분으로 동일하게 적용하였다. 이전 연구와 마찬가지로 초음파 조사강도가 증가함에 따라 미생물 응집체(floc)가 분산되고 미생물 세포벽이 파괴되는 것을 확인하였다.^{17, 31)}

또한, 초음파 처리시간이 미생물에 미치는 영향을 파악하기 위해, 조사강도를 600 W로 동일하게 적용하고 처리시간을 0.5, 1, 5, 10, 15, 30분으로 변경하며 관찰하였다(Fig. 3b). 처리시간이 경과함에 따라 미생물

응집체가 사라졌으며, 5~10분 사이에서 뚜렷한 변화가 나타났다. 초음파를 600 W에서 30분간 조사한 경우에는 Fig. 2에서 관찰한 조류와 원생동물의 형태적인 특징을 전혀 관찰할 수 없었다. 이러한 결과들을 고려할 때, 초음파 처리조건을 최적화하면 미생물 세포벽을 매우 효과적으로 파괴하여 슬러지를 감량하고 탈수효과도 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 초음파에 의한 슬러지 감량

개별 조건으로 초음파 처리된 슬러지 시료를 코니칼 튜브에 넣어 원심분리(3,000 rpm, 30분)하고, 상등액을 제외한 침전물의 부피를 측정하였다. 초음파 처리를 하지 않은 슬러지 시료의 침전물은 6 mL였으며, 초음파 강도와 처리시간이 증가함에 따라 원심분리에 의한 침전물의 부피가 감소하였다(Fig. 4).

상등액 색상은 400 W 이상으로 처리했을 때 투명에

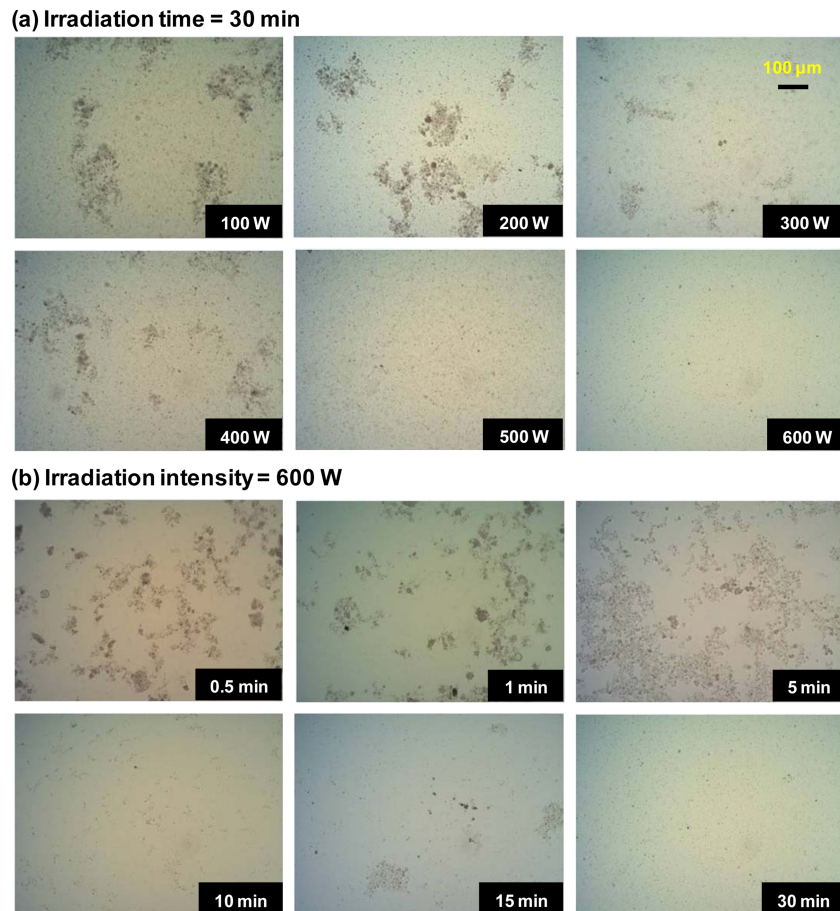


Fig. 3. Change of microorganism flocs in the sludge samples according to (a) ultrasonic intensities and (b) irradiation times.

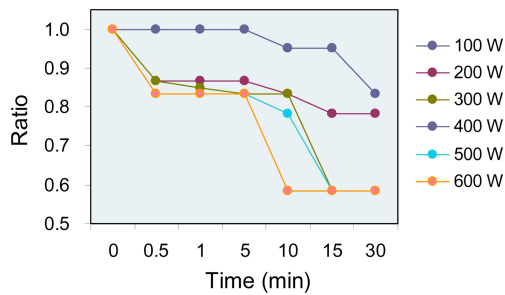


Fig. 4. Temporal change of the volume of sludge sediment with different ultrasonic intensities. The volume ratios of 400 W and 500 W experiments were the same.

서 갈색으로 급격히 변했고 점성이 약해졌다. 이는 초음파에 의해 미생물 세포벽이 파괴되어 미생물 세포 내부물질들이 상등액으로 유출되었기 때문이다. 슬러지를 600 W에서 10분 이상 초음파 처리했을 때 침전물의 양이 가장 많이 감소하였다(42%). 대부분의 시료에서 초음파 처리 5분까지는 침전물의 양이 크게 감소하지 않다가, 300 W 이상에서 10분 이상 처리할 경우 급격히 감소하였다. 향후, 경제적인 처리를 위해서 초음파 강도와 처리시간의 최적조건(미생물 세포벽 파괴에 대한 임계치)을 파악할 필요가 있다.

3.4. 초음파에 의한 중금속 용출

초음파 처리시간에 따른 슬러지 상등액 중 중금속 (Cd, Pb, Cu, Zn) 농도변화는 Fig. 5와 같다. 초음파

처리 전에는(0 min) 슬러지 상등액에서 중금속이 검출되지 않았거나, 30분 처리 후 농도의 5% 미만으로 검출되었다. 초음파 처리시간이 길어질수록 중금속 농도가 높아졌으므로, 초음파에 의해 미생물 응집체와 세포벽이 파괴되면서 미생물과 결합되었던 중금속이 상등액으로 이동한 것으로 해석할 수 있다.²⁷⁾ 30분 동안 초음파 처리한 결과, 아연(2,190 µg/L)이 고농도로 검출되었으며, 카드뮴(0.78 µg/L)이 가장 낮은 농도로 검출되었다. 구리(156 µg/L)와 납(52 µg/L)은 중간 수준으로 검출되었다. 이러한 농도수준과 『수질 및 수생태계 보전에 관한 법률』에서 정한 청정지역 배출허용기준(카드뮴: 20 µg/L, 납: 100 µg/L, 아연: 1,000 µg/L, 구리: 1,000 µg/L)을 비교하면, 아연 농도가 기준을 초과하였으나 기타지역(가, 나, 특례) 기준(5,000 µg/L)에는 미치지 못했다.

아연 농도(2,190 µg/L)와 연구대상 폐수처리장의 슬러지 처리용량(150 ton/day)을 이용하여 배출량을 계산하면, 아연 330 g/day가 슬러지 탈수액으로 용출될 것으로 예상된다. 실제 폐수처리공정에서는 고출력의 초음파 장치를 사용하고 다량의 슬러지를 처리해야 하므로, 슬러지 탈수액으로 용출되는 중금속 총량은 예상값보다 클 것으로 보인다. 만약 슬러지 탈수액이 적절하게 처리되지 않고 특정수역에 장기간 배출된다면 주변 생태계에 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 이에 대한 대응이 요구된다.

한편, 슬러지에 함유된 중금속을 추출하여 독성이 감

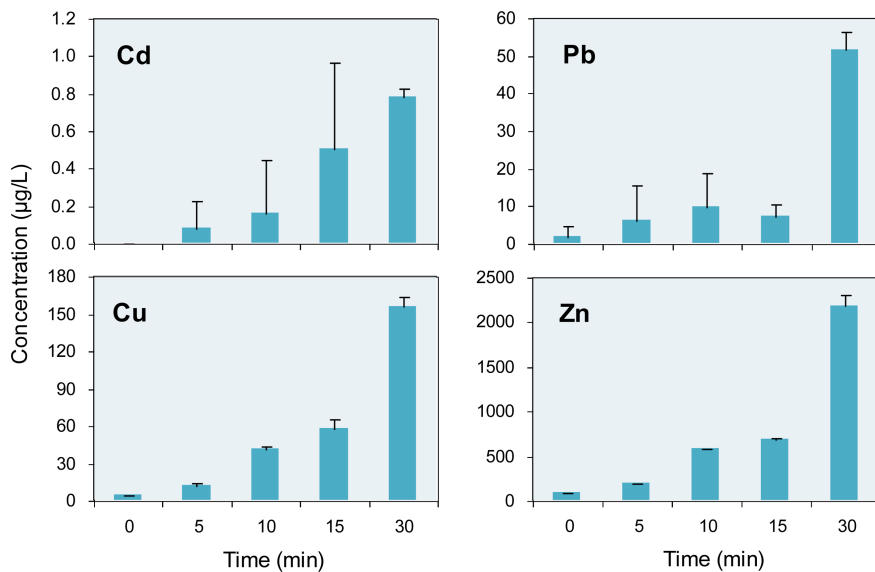


Fig. 5. Time trends of heavy metals in sludge supernatants after the ultrasonic treatment (Irradiation intensity = 600 W).

Table 1. Experimental conditions and results of the ultrasonic reactor (n=3)

Operation type	Ultrasonic power (W)	Flow rate (cm/s)	First reduction (%)	Second reduction (%)	Total reduction (%)	Water content reduction (%)
Control	0	6	-	-	-	
Continuous	600	6	-	9.7	-	1.6
Batch	600	0	33.3	19.4	46.2	2.2

소한 슬러지를 퇴비와 건설재료 등으로 활용할 수 있다. 슬러지에서 중금속을 추출하는 방법으로는 화학처리, 열처리, 생물학적 처리, 이온교환 등이 있으며, 초음파를 사용하여 추출효율을 향상시킨 사례들도 보고되었다.²⁷⁾ 즉, 초음파 처리를 이용하면 슬러지 발생량을 저감하여 처리비용을 절감하고 환경부하를 줄일 수 있으며, 활용도를 높일 수 있는 장점이 있다. 그러나 국내에서는 슬러지 활용에 소극적이며, 일부 연구를 통해 슬러지에 함유된 중금속과 다환방향족탄화수소와 같은 미량독성물질의 농도수준을 파악하였다.³²⁾

3.5. 연속 반응기 실험결과

반응기 운전조건에 따른 초음파 처리결과는 Table 1과 같다. 1차 감량은 초음파 처리에 의한 직접적인 슬러지 감량을 의미한다. 배치형으로 처리한 시료의 감량률은 33.3%였으며, 대조군과 연속형 시료는 처리특성상 1차 감량을 산정하지 않았다. 2차 감량률은 초음파 처리 후 자동차를 이용한 탈수까지 거친 시료(연속형/배치형)와 대조군을 비교하여 계산하였다. 이 결과는 초음파 처리에 의한 직접적인 슬러지 감량(1차 감량)이 아니라, 초음파 처리 후 벨트 프레스 방식과 같이 강한 압력을 이용한 탈수과정에서 슬러지 미생물 성분과 수분이 제거되는 2차 감량을 의미한다. 연속형의 경우에는 슬러지 감량률이 9.7%였으며, 배치형에서는 19.4%로 나타났다. 수분 함량의 경우에는 이미 1차 탈수(원심분리)를 거쳤기 때문에 높은 감량률을 보이지 않았으며(<3%), 배치형에서 수분 함량이 더 많이 감소하였다.

배치형 처리에 의한 슬러지 감량률이 연속형에 의한 감량률보다 두 배 높으므로, 향후 연구에서는 연속형 처리수료에 슬러지 반응조를 장착한 연속-배치형 장치를 제작하여 연속형과 배치형 처리의 장점을 함께 반영하고자 한다. 특히, 배치형 처리의 경우에는 슬러지 전체 감량률이 46.2%이므로, 슬러지 공급과 처리방법을 적절히 조합하면 충분히 경제적인 감량효과를 나타낼 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파를 이용하여 폐수 슬러지를 감량하기 위한 기초 실험조건을 파악하고, 연속 반응기를 제작하여 실제 공정에 적용하기 위한 선행연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 슬러지의 특성(원소구성비, pH, 미생물 중구성)은 기존 연구에서 보고된 슬러지 특성과 유사하였다. 초음파 조사강도와 처리시간이 증가함에 따라 슬러지에 서식하는 미생물의 세포벽이 파괴되어 슬러지 고형물이 감량되었다. 연속 반응기를 사용한 경우에도 슬러지 감량화와 탈수효과를 확인하였으며, 연속형 처리수료와 배치형 반응조를 조합하고 초음파 출력을 증가시키면 실제 공정에서도 충분한 처리효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 초음파 처리에 의해 미생물에 흡착된 중금속이 용출되어 슬러지 탈수액에서의 농도가 증가했으므로, 초음파 처리 후 탈수액에 대한 적절한 처리를 고려해야 한다. 반면에 슬러지에 함유된 중금속을 초음파 추출함으로써 슬러지를 보다 안전하게 활용하는 효과도 거둘 수 있다. 그러므로 슬러지 감량화와 안전한 활용을 동시에 고려한 초음파 처리기술을 개발할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 울산과학기술대학교(UNIST) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 수도권매립지관리공사, 2005. 유기성오니 처리체계 개선에 관한 연구.
2. 환경부, 2011. 2010 하수도통계.
3. 환경부, 2011. 2010 폐자원 에너지 통계·자료집.
4. 국토해양부, 2006. 육상폐기물 해양투기 종합대책.
5. 장광언, 황선진, 장현섭, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회논문집, 2005, 687-690.

6. J. Kopp, J. Müller, N. Dichtl, and J. Schwedes, *Water Science and Technology*, **1997**, 36, 129-136.
7. P.-C. Hsiau and S.-L. Lo, *Resources, Conservation and Recycling*, **1997**, 21, 185-197.
8. 황응주, *대한환경공학회지*, **2008**, 30, 90-96.
9. 남주연, 김상현, 김동훈, 신항식, *대한환경공학회 추계 학술연구발표논문집*, **2005**, 451-455.
10. Y.-Y. Li and T. Noike, *Water Science and Technology*, **1992**, 26, 857-866.
11. 서선근, 오영기, 김홍상, 이상도, 장덕진, *한국물환경학회·대한상수도학회 공동추계학술발표회논문집*, **2008**, 235-236.
12. 박현진, 이춘식, 이홍재, 하태명, *한국폐기물학회 춘계 학술연구발표논문집*, **2002**, 377-380.
13. T. Kamiya and J. Hirotsuji, *Water Science and Technology*, **1998**, 38, 145-153.
14. H. Yasui and M. Shibata, *Water Science and Technology*, **1995**, 30, 11-20.
15. 맹승규, 이석현, 이재우, 송경근, 황종혁, 임병란, 안규홍, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, **2002**, 43-44.
16. Q. Wang, M. Kuninobu, K. Kakimoto, H. I-Ogawa, and Y. Kato, *Bioresource Technology*, **1999**, 68, 309-313.
17. C. P. Chu, B.-V. Chang, G. S. Liao, D. S. Jean, and D. J. Lee, *Water Research*, **2001**, 35, 1038-1046.
18. 이병호, 윤성진, 백선재, 이종윤, *대한상수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집*, **2003**, 67-70.
19. 나승민, 박지호, 김영욱, 김지형, *한국폐기물학회지*, **2005**, 22, 637-644.
20. 김희준, D. X. Nguyen, 이은영, 허안희, 배재호, *대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집*, **2006**, 583-588.
21. 김명숙, 김형석, 이순정, 김은호, 김규화, *한국폐기물학회 추계학술연구발표논문집*, **2004**, 267-270.
22. 김홍석, 김병근, 이영기, 서인석, 문용택, 김연권, 김지연, *대한상수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, **2009**, 733-734.
23. 이상률, 남윤구, 김탁현, 이면주, *환경공동학술대회초록집*, **2007**, 2593-2595.
24. 윤상원, 장현섭, 이명주, 황선진, *환경연구센터논문집*, **2005**, 14, 59-63.
25. 이용두, 조은일, 홍성민, 고인범, *한국수처리학회지*, **2006**, 14, 19-26.
26. G. Zhang, P. Zhang, J. Yang, and Y. Chen, *Journal of Hazardous Materials*, **2007**, 145, 515-519.
27. J. Deng, X. Feng, and X. Qiu, *Chemical Engineering Journal*, **2009**, 152, 177-182.
28. T. G. Kazi, M. K. Jamali, A. Siddiqui, G. H. Kazi, M. B. Arain, and H. I. Afridi, *Chemosphere*, **2006**, 63, 411-420.
29. 홍성준, 2011. 도시하수슬러지의 연료화를 위한 물리, 화학적 성상분석에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문.
30. 박철휘, 서정원, 박종윤, 박종환, **2009**. *하수처리설계 동화기술*.
31. P. Zhang, G. Zhang, and W. Wang, *Bioresource Technology*, **2007**, 98, 207-210.
32. 박정민, 김민정, 김진필, 이상보, 권오상, 이상학, *한국환경분석학회지*, **2008**, 11, 275-281.