

초음파 처리한 하수 슬러지의 가용화와 탈수 특성 연구

윤유식 · 김동진 · 유익근* · 안대희**

한림대학교 환경생명공학과 및 에너지·환경연구소,
*울산대학교 생명화학공학과, **명지대학교 환경생명공학과
(2009년 4월 6일 접수; 2009년 4월 28일 수정; 2009년 5월 20일 채택)

A Study on the Solubilization and Dewaterability of Ultrasonically Treated Wastewater Sludge

Yousik Youn, Dong-Jin Kim, Ik-Keun Yoo* and Dae Hee Ahn**

Department of Environmental Sciences & Biotechnology and Institute of Energy & Environment,
Hallym University, Kangwon 200-702, Korea

*School of Chemical Engineering and Bioengineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

**Department of Environmental Engineering and Biotechnology, Myongji University, Kyunggi 449-728, Korea

(Manuscript received 6 April, 2009; revised 28 April, 2009; accepted 20 May, 2009)

Abstract

Sludge minimization from wastewater treatment plant is becoming more important to save disposal costs and to contribute to sustainable development. For the reduction of sludge production, solubilization and dewaterability of sludge are important factors in sludge processing. Ultrasonic treatment has been used to enhance sludge solubility and dewaterability with anaerobic digestion sludge, primary sludge, and activated sludge. At the ultrasonic power of 0.2 kW/L for 1 hour, anaerobic sludge and activated sludge showed higher solubilization efficiency than the primary sludge in terms of COD, proteins, and suspended solids. Ultrasonic treatment decreased sludge dewaterability and sludge settling characteristics up to 720 kJ/L of ultrasonic energy. In conclusion, ultrasonic treatment was effective for sludge solubilization but it deteriorate dewaterability (specific resistance) and settling characteristics (SVI) of sludge at the experimental conditions.

Key Words : Dewaterability, Hydrolysis, Sludge, Solubilization, Ultrasonic treatment

1. 서 론

슬러지 처리는 엄격해진 기준 외에도 경제적인 면에서 하폐수처리장에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 슬러지 처리의 경제성 측면에서의 가장 중요한 것은 탈수 효율을 높이는 것과 더불어 최근에

는 슬러지의 재활용이나 에너지원으로서의 활용 등에 대해 관심을 기울이고 있다. 슬러지 탈수 효율을 높이는 목적은 슬러지 내의 수분을 제거시켜 처분해야 할 슬러지의 양을 감소시키기 위한 것이다. 폐수처리 시 발생하는 슬러지의 탈수는 건조나 소각과 같은 처리 공정에서의 에너지 절감을 위한 중요한 조작이다. 슬러지의 탈수를 통해 농축된 슬러지가 보유한 과잉의 수분을 분리하고 제거하여 슬러지의 총용량을 감소시킬 수 있다¹⁾.

구체적으로 슬러지 탈수의 목적을 살펴보면 다음

Corresponding Author : Dong-Jin Kim, Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Kangwon 200-702, Korea
Phone: +82-33-248-2154
E-mail: dongjin@hallym.ac.kr

과 같다. 첫째, 탈수 후 슬러지를 최종 처분하기 위해 트럭에 적재할 때, 그 양을 감소시킴으로서 수송비용을 절감할 수 있다. 둘째, 탈수된 슬러지는 액상 또는 농축 슬러지보다 취급이 용이하다. 즉, 대부분의 탈수 슬러지는 트랙터에 적재하여 운반하거나 벨트 컨베이어로 이송하기가 용이하다. 셋째, 탈수를 통하여 소각 전에 잉여 수분을 제거함으로써 에너지 함량을 증가시킬 수 있으며, 넷째, 퇴비화 전에 개량제의 소모량을 감소시킬 수 있다. 다섯째, 탈수 시 어떤 경우에는 수분의 제거에 의해 슬러지의 냄새가 적게 나며, 부패성이 감소하고, 마지막으로 매립 시 침출수의 양을 줄일 수 있다.

슬러지의 탈수를 돕기 위해 고분자 전해물질을 슬러지에 주입하기도 하고 최근에는 고분자 전해물질과 초음파를 같이 주사한 경우 초음파가 고분자 전해액의 내부 구조를 변경하고 이것이 슬러지의 비저항계수와 수분 함량이 감소하였다는 결과가 보고된 것이 있다²⁾. 초음파를 이용한 탈수에는 초음파 주사 시간, 고분자 전해액의 종류와 구조 그리고 주입 농도에 따라 영향을 받는다. 초음파의 강도도 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데 0.11 W/mL의 강도에서는 슬러지의 탈수성이 오히려 감소했고 0.33 W/mL에서는 탈수성이 증가했다는 보고가 있다³⁾.

또한 슬러지에서 혐기소화 등을 통한 에너지를 회수하는 방법으로 초음파를 이용하는 전처리 방법을 사용하기도 한다. 슬러지의 느린 혐기 소화 속도는 슬러지 가수분해 단계가 유속단계로 작용하기 때문으로 알려져 있어 이를 해결하기 위해 활성 슬러지에 대해서는 혐기소화를 촉진하기 위한 전처리로 초음파 처리가 이용되기도 했다⁴⁾. 이 경우 고분자 전해물질을 주입하지 않고 초음파 주입 강도도 다소 낮아지며 슬러지의 용해도가 높아져 혐기소화는 증진되지만 슬러지 탈수성은 확인되지 않고 있다.

슬러지의 탈수성을 평가하는 방법으로 가장 많이 이용하는 비저항계수의 측정은 Büchner funnel을 이용하는 방법으로서, 슬러지 진공 펌프를 이용한 여과식 탈수시 시간에 따른 탈리액의 부피 증감과 탈수 전 슬러지 및 탈수된 케익의 함수율을 측정하여 이러한 값들을 주어진 공식에 대입하여 도출하는 방법이다. 비저항계수가 작을수록 탈수능이 더 양호하다고 볼 수 있으며, 이 인자를 통해 슬러지 탈수 성능

을 간접적으로 평가할 수 있다.

본 연구의 목적은 슬러지의 처리 목적(가용화, 탈수)에 따라 초음파를 이용할 때 이의 최적 처리 조건을 도출하는 것이다. 이를 위하여 하수처리 공정에서 발생하는 다양한 슬러지를 초음파 처리했을 때의 가용화 및 탈수성을 측정 비교하였다.

2. 슬러지 탈수 이론

슬러지 탈수의 기본식은 Poiseuille와 Darcy의 법칙에서부터 슬러지의 체적 변화율인 dV/dt 는 다음과 같이 나타낸다^{5,6)}.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{pA^2}{\mu(rWV + R_m A)} \quad (1)$$

여기서, V = 여과액의 부피 (m³)

t = 여과 시간 (sec)

p = 압력 손실 (N/m²)

A = 여과 면적 (m²)

μ = 탈수 여액의 점성 계수 (N·sec/m²)

r = 비저항계수 (m/kg)

W = 여액 단위량당 슬러지 케이크의 건조 질량 (kg/m³)

R_m = 여과포의 초기 저항 (m/kg)

탈수기간 동안 적용되는 압력이 일정하다고 가정하고 이 식을 적분하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu r W}{2pA^2} V + \frac{\mu R_m}{pA} \quad (2)$$

식에서 좌변의 t/V를 수직축, 우변의 V를 수평축으로 보면 이 식은 일차함수의 형태로 볼 수 있다. 따라서 수직축의 절편은 $\mu R_m/pA$ 이며, 직선의 기울기 b (= $\mu r W/(2pA^2)$)는 실험에 의해 구할 수 있다. 일반적으로 여재의 초기저항 R_m 값은 매우 작은 값으로서 무시할 수 있으므로 얻어진 일차식의 기울기 b를 비저항계수 r에 대해 정리하면 다음과 같다⁵⁾.

$$r = \frac{2bpA^2}{\mu W} \quad (3)$$

위 식에서 W는 물질수지식으로부터 유도할 수 있다.

$$Q_o = Q_f + Q_k$$

위의 물질수지는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$Q_o C_o = Q_f C_f + Q_k C_k$$

탈리액의 단위 체적당 형성되는 슬러지 케익의 단위 중량은 아래의 식과 같다.

$$W = \frac{Q_k C_k}{Q_f} = \frac{C_k(C_f - C_o)}{C_o - C_k} \quad (4)$$

위 식에서 탈수액의 고형물 농도(C_f)를 무시한다면

$$W = \frac{C_k C_o}{C_k - C_o} \quad (5)$$

- 여기서, Q_o = 탈수 전 슬러지량
- Q_k = 탈수 후 슬러지 케이크의 부피
- Q_f = 탈수 여액의 부피
- C_k = 슬러지 케익의 고형물 농도
- C_o = 유입 슬러지의 고형물 농도
- C_f = 탈수여액의 고형물 농도

그 밖에 모세흡입시간(Capillary Suction Time : CST)을 이용하는 방법이 있는데 이는 주어진 슬러지의 탈수성을 쉽고 빠르게 경제적으로 측정할 수 있는 방법이다⁷⁾. CST는 슬러지의 여액이 모세관 흡입 현상으로 흘러나와 일정 거리를 이동하는 데 걸리는 시간으로서 그 값이 작을수록 탈수성이 양호하다고 할 수 있다. CST는 슬러지의 탈수성을 나타내는 지표인 비저항계수와 그 상관관계가 높으며 이는 실험을 통해 확인할 수 있다.

3. 재료 및 방법

3.1. 슬러지 초음파 처리 방법

표준 활성슬러지 공정의 하수처리장에서 혐기 소화 슬러지와 생 슬러지, 잉여 슬러지를 채취하여 초음파 처리에 따른 슬러지의 가용화와 탈수성 변화를 측정하였다. 슬러지 시료는 채취 후 눈금 2.0 mm의 체를 이용하여 헝겊물을 제거한 뒤 실험 이전까지 4℃에서 냉장 보관하였으며 각 슬러지의 성상은 Table 1과 같다. 본 실험에서 사용된 초음파 장치는 Sonics & Materials 社의 VC-750을 사용하였다. 초음파 강도는 100 watts, 슬러지 부피 0.5 L로 0.2 kW/L의 동력 밀도로 처리하였으며 슬러지에 초음파 강도를

Table 1. Physical characteristics of the sludge used for ultrasonic treatment

Parameter	Anaerobic digestion sludge	Primary sludge	Secondary sludge
pH	7.0	6.50	6.39
TSS (mg/L)	21,150	14,500	8,040
VSS (mg/L)	11,500	6,842	5,240
VSS/TSS (%)	54.37	47.19	65.17
TS (g/L)	23,824	15,420	8,160
SVI	48.6	66.9	118.2
Total COD _{Cr} (mg/L)	17,812	9,719	6,746
Soluble COD _{Cr} (mg/L)	368	279	503
T-protein (mg/L)	9,672	3,488	3,788
Soluble Protein (mg/L)	189	12	22

고르게 하기 위해 초음파 처리 시 슬러지액을 마그네틱 교반기로 혼합하였다. 각각의 슬러지는 10, 20, 30, 60 분 동안 처리 하였다.

3.2. 슬러지 가용화율 계산

슬러지 가용화율은 각각 용존 COD와 용존 단백질로 계산할 수 있는데, 각 기준에 따른 가용화율은 다음의 식과 같다.

COD 기준 슬러지 가용화율:

$$\text{가용화율(\%)} = \frac{(\text{SCOD} - \text{SCOD}_o)}{(\text{TCOD}_o - \text{SCOD}_o)} \times 100 \quad (6)$$

단백질 기준 슬러지 가용화율:

$$\text{가용화율(\%)} = \frac{(\text{S-Protein} - \text{S-Protein}_o)}{(\text{T-Protein}_o - \text{S-Protein}_o)} \times 100 \quad (7)$$

여기서, SCOD = 초음파 처리 후 용존 COD (mg/L)

SCOD_o = 초음파 처리 이전 용존 COD (mg/L)

TCOD_o = 초음파 처리 이전 총 COD (mg/L)

S-Protein = 초음파 처리 후 용존 단백질 (mg/L)

S-Protein_o = 초음파 처리 이전 용존 단백질 (mg/L)

T-Protein_o = 초음파 처리 이전 총 단백질 (mg/L)

Table 2. Parameters used for the measurement of specific resistance factor

Parameter	Unit	Data
Filter area	m ²	6.362×10 ⁻³
Pressure	N/m ²	8.00×10 ⁴
Viscosity	N·sec/m ²	0.01

3.3. 슬러지 탈수성 실험

슬러지의 탈수성 측정을 위해서 초음파 처리된 생 (1차) 슬러지, 잉여(2차) 슬러지, 혐기성 소화 슬러지 시료를 TTF(Time to filter)법에 따라 Büchner funnel 을 이용한 진공 여과 방법으로서 비저항계수를 측정 하였다⁵⁾. 여과지는 GF/C를 사용하였으며, 진공 펌프 (모델: DPV 101-786)를 이용하였다. 비저항계수를 도출하는 인자들로는, 부피는 100 mL로 하여 여과지 면적(A), 여과시간/탈리액 부피(t/V)와 탈리액 부피 (V)과의 관계를 나타내는 직선의 기울기(b), 진공흡 입력(p), 점성계수(μ), 슬러지 내 단위 체적당 고형물질의 무게(W)가 이용되었다. Table 2는 비저항계수 측정 시 사용된 인자들의 대표값이다. 나머지 인자들은 각각의 주어진 조건에서 측정되며 이 값들을 식(3)에 대입하여 비저항계수를 결정하였다. 직선의 기울기는 최소 10개의 측정치를 그래프에 나타내고 이 값들의 회귀식을 구하여 도출하고, 슬러지 단위 체적 당 고형 물질의 농도는 식(4)에 각각의 무게를 대입하여 구하였다.

3.4. 시료분석방법

COD 등 시료의 분석은 Standard Methods에 의거 하여 수행하였다⁸⁾. TSS(total suspended solids)는 10 5°C 오븐에서 2시간 이상 건조중량이 변하지 않을 때까지 건조하여 측정하였고 VSS(volatil suspended solids)는 550°C에서 15분간 강열하여 휘발된 질량으로 측정하였다. 단백질 함량은 Bradford 방법을 이용하여 측정하였다⁹⁾. 슬러지 가용화를 확인하기 위한 용존성(soluble) 성분의 분석은 시료를 10,000 rpm으로 원심분리 후 GF/C로 여과한 후 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 초음파 처리에 따른 슬러지의 pH 및 온도 변화

초음파 처리된 혐기소화 슬러지, 생 슬러지, 활성

슬러지를 광학현미경을 통하여 확인하였을 때 처리 시간이 경과함에 따라 슬러지 플록의 크기가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 슬러지는 20분까지는 그 크기가 크게 감소하지는 않았으나, 30분 이후부터는 플록의 크기가 눈에 띄게 감소하였고 60분이 지나면서는 플록이 아주 작은 크기로 분포함을 확인할 수 있었다 (data not shown).

초음파가 슬러지에 주사되면 초음파에 의한 공동화 기포가 소멸되면서 최종적으로 열로 전환되어 매질의 온도가 상승하게 된다. 초음파 공동화 기포는 단일 압축과 팽창을 빠르게 반복하면서 열로 바뀌고 초음파 처리 시간이 증가하게 되면 매질 내에 열이 축적되어 온도가 상승하게 된다. 본 실험에서는 초기 10°C에서 실험을 시작하여 각 슬러지들이 모두 75°C까지 온도가 상승하였다(Fig. 1). 약 400 kJ/L 이상부터 온도는 더 이상 큰 증가를 보이지 않게 되는데 이는 초음파 처리조 내에서의 열 발생속도와 외부로의 열손실이 평형에 이르렀기 때문이다. 슬러지 종류에 따라 온도 상승하는 양상이 서로 비슷한데 이는 같은 초음파 주사 조건과 각 슬러지의 열용량이 비슷한 때문이다. pH의 경우 혐기 소화 슬러지는 초음파 처리로 pH가 다소 상승하는 결과를 나타냈으나 증가 폭은 크지 않다. 활성 슬러지와 생 슬러지는 pH가 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

4.2. 초음파 에너지 투입량에 따른 슬러지 가용화

초음파 처리가 진행되면서 초음파에 의한 가용화율이 증가하고 일정 시간 이후에는 더 이상 증가하

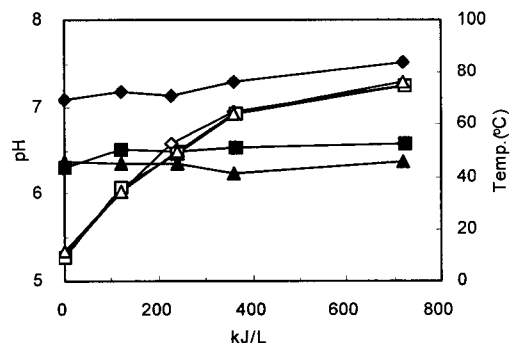


Fig. 1. Changes of pH (closed) and temperature (open) of sludge during ultrasonic treatment. (◆, ◇ : anaerobic sludge, ■, □: primary sludge, ▲, △: activated sludge)

지 않는다고 알려져 있다. 본 연구에서 초음파를 1시간, 720 kJ/L까지 주사하였으며, 생 슬러지와 활성 슬러지의 경우 약 400 kJ/L 이후부터 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 최종 720 kJ/L에서 각각의 가용화율은 COD 기준으로 혐기소화 슬러지는 36.6%, 생 슬러지는 16.9%, 활성 슬러지는 40.2%이다(Fig. 2). 혐기소화 슬러지는 720 kJ/L까지 계속 상승하는 결과를 얻었으며, 혐기성 소화 슬러지에 대하여 이후 더 많은 에너지를 공급하여 확인을 수행하여야 한다.

초음파 처리를 하였을 때 단백질 용존 비율 변화 양상은 COD 용존 비율 변화와 비슷한 경향을 보일 것으로 예상된다. 용존 단백질을 기준으로 초음파에 의한 슬러지 가용화율을 계산한 경우 활성 슬러지가 다른 슬러지에 비하여 높은 값을 나타내었으나 전체

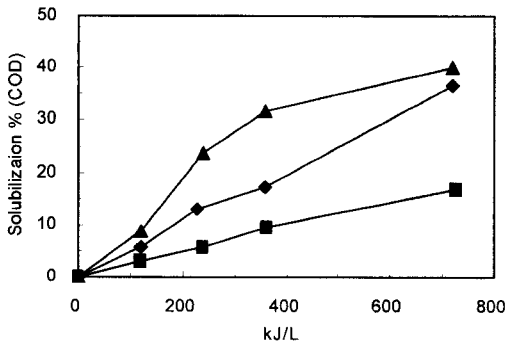


Fig. 2. Solubilization efficiency of sludge during ultrasonic treatment based on soluble COD. (◆: anaerobic sludge, ■: primary sludge, ▲: activated sludge)

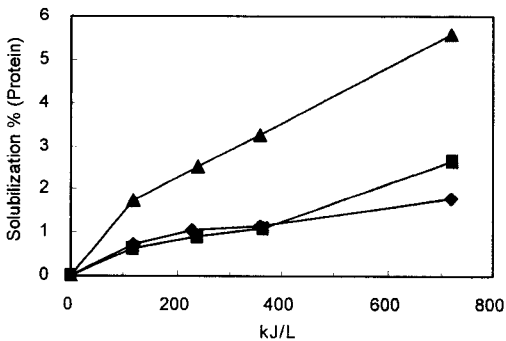


Fig. 3. Solubilization efficiency of sludge during ultrasonic treatment based on soluble protein. (◆: anaerobic sludge, ■: primary sludge, ▲: activated sludge)

적인 가용화율은 COD 기준의 그것에 비해 현저히 낮은 값을 나타내었다(Fig. 3). 또한 초음파 에너지 주사량이 720 kJ/L 이후에도 상승하는 결과를 보이고 있다. Wang 등¹⁰⁾에 따르면 단백질의 용존량은 탈수성과 관계가 있다고 하며, 이는 즉, 플러를 형성하는데 중요한 다리 역할을 하는 체외고분자물질을 구성하는데 단백질이 관여하기 때문이다. 장시간 강한 초음파로 슬러지를 처리하면, 체외고분자물질이 파괴되어 배출된다. 때문에 최종적으로 단백질의 용존량은 본 실험에서 정한 범위 이상에서도 계속 증가될 것으로 보여진다. 한편 용존 단백질량에 기준한 슬러지 가용화율이 COD 기준에 비해 낮은 이유는 크게 2가지로 생각해볼 수 있다. 우선 대부분의 단백질은 세포막에 박혀 있는 구조라서 초음파로 세포막이 깨진다 하더라도 바로 용존되지 않는 특성이 있고, 둘째로는 본 실험에서 사용한 용존물의 기준이 원심분리 후 GF/C로 여과한 것을 사용하기 때문에 단백질의 분자량이 수백만에 이르는 것을 고려하면 상당량의 단백질은 세포막이 파괴되었다 하더라도 여과지를 통과할 만큼 작은 크기로 분해되거나 용해되지 못했을 가능성이 있다¹¹⁾.

초음파에 의한 슬러지 가용화율을 확인하는 방법으로 유용한 것의 하나가 부유 고형물(suspended solids)의 감소를 측정하는 것이다. VSS는 일반적으로 휘발성 유기성 입자들의 양으로 볼 수 있고 그중 대부분은 하폐수에 포함된 입자성 유기물과 미생물로 볼 수 있다. 총 부유고형물(TSS)은 VSS에 다른 비휘발성 부유고형물을 합한 것이다. 아래의 Table 3에는 초음파로 처리한 여러 슬러지의 휘발성 부유고형물(VSS)과 총 부유고형물(TSS) 변화량을 보여주고 있다. 부유고형물의 가용화율을 보면 생 슬러지의 경우 다른 혐기소화 슬러지나 활성 슬러지에 비해 낮은 효율을 보여주었다. VSS의 경우 초음파로 1시간 처리한 생 슬러지의 가용화율은 19.6%로 혐기소화 슬러지(52.2%)와 활성 슬러지(49.6%)에 비하여 매우 낮고, TSS 역시 생 슬러지의 가용화율이 20.7%로 혐기소화 슬러지(43.3%)와 활성 슬러지(46.3%)에 비하여 매우 낮았다.

슬러지의 초기 VSS/TSS 값은 생 슬러지가 가장 작은 값(0.472)을 보이고 활성 슬러지가 가장 큰 값(0.652)을 보인다. 이 비율은 하수 슬러지에 포함된

Table 3. Changes of suspended solids of the sludge during the ultrasonic treatment

US time (min)	Anaerobic digestion sludge			Primary sludge			Activated sludge		
	TSS (g/L)	VSS (g/L)	VSS/TSS	TSS (g/L)	VSS (g/L)	VSS/TSS	TSS (g/L)	VSS (g/L)	VSS/TSS
0	21.15	11.50	0.544	14.50	6.84	0.472	8.04	5.24	0.652
10	19.75	10.30	0.522	13.85	6.54	0.472	7.77	5.01	0.645
20	17.85	8.80	0.493	13.60	6.45	0.474	7.07	4.27	0.604
30	17.00	8.00	0.471	12.10	5.75	0.475	6.42	3.87	0.603
60	12.00	5.50	0.458	11.50	5.50	0.478	4.32	2.64	0.611

유기성 고형물의 함량을 표시하는 지표로 이용되며 일반적으로 하수관거 정비가 잘된 지역의 하수 슬러지는 외부로부터 무기성 고형물의 유입이 적어 정비가 안된 지역의 하수 슬러지에 비하여 VSS/TSS 비율이 높으며 VSS/TSS가 상대적으로 낮은 하수처리장은 스크린과 침사지 등의 고형물 제거 단위 공정에서 제거되지 않은 작은 무기성 입자들을 많이 포함하고 있음을 의미하고 하수관거가 제대로 정비되지 못해 관거로 토사의 유입을 막지 못한 것도 원인이 된다.

미생물이 주 성분인 활성 슬러지나 혐기소화 슬러지는 초음파 처리시에 휘발성 부유물질(VSS)이 총 부유물질(TSS) 보다 우선적으로 가용화된다고 볼 수 있어서 VSS/TSS 비율은 초음파 처리가 진행됨에 따라 감소하리라 예상이 되며 다음의 Table 3에서도 같은 결과를 확인할 수 있다. 그러나 생 슬러지의 경우는 이와는 달리 VSS/TSS 비율이 거의 일정하거나 오히려 0.472에서 0.478로 약간 상승하고 있어 앞의 활성 슬러지나 혐기소화 슬러지와는 다른 결과를 보여주고 있다. 또한 혐기 소화 슬러지와 활성 슬러지의 경우 TSS의 감소량이 생 슬러지에 비하여 커서 이들 슬러지가 더 쉽게 가용화 되는 물질들이 주를 이루고 있는 것으로 생각된다. 각 슬러지의 TS(총고형물) 값에 대한 TSS 비율은 혐기성 소화 슬러지, 생 슬러지, 잉여 슬러지가 각각 초기 0.888, 0.940, 0.985에서 60 분 초음파 처리하고 난 후 0.525, 0.819, 0.611로 감소하였다. TS에 대한 TSS의 감소 역시 혐기 소화 슬러지와 활성 슬러지에서 감소폭이 컸으며 생 슬러지는 상대적으로 감소폭이 작았다. 따라서 초음파를 이용한 가용화에 혐기소화 슬러지나 활성 슬러지가 생 슬러지 보다 더 효과적인 것으로 판단된다. 여기서 초음파에 의해 감소된 TSS는 가용화되

어 용존 고형물로 전환되었다.

4.3. 슬러지의 초음파 처리에 따른 여과 비저항 계수 변화

각각의 슬러지에 대한 비저항계수 값은 (3)식에 여과 면적과 여과 압력 등 앞의 Table 1에 명시된 값을 대입하여 얻어졌다. 탈수 시간에 따른 여과액의 증감은 여과액의 부피를 수평축, 여과 시간/여과액 부피를 수직축으로 하여 측정된 점들의 회귀식을 통하여 그 기울기를 도출하였다. 실험은 60 분 동안 슬러지 시료들이 탈수되는 가운데 시간에 따라 최소 10회 이상 여과액의 부피를 측정하였다. R^2 값은 0.911 값 이상을 보여 비교적 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 이는 여과 시간이 길어지면 여과액이 감소하기 때문이다.

초음파 처리에 투입된 에너지에 따른 슬러지의 비저항계수를 다음의 Fig. 4에 나타내었다. 모든 슬러지가 초음파 처리 시간에 따라 비저항계수가 증가함을 확인할 수 있다. 초음파 처리하지 않은 슬러지의

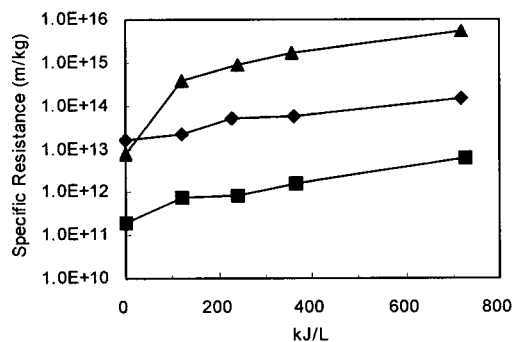


Fig. 4. Specific resistance of the sludge at various ultrasonic energy input. (◆: anaerobic sludge, ■: primary sludge, ▲: activated sludge)

비저항 계수는 생 슬러지가 가장 낮고 활성 슬러지, 혐기소화 슬러지의 순서로 커진다. 초음파 처리가 진행되면서 생 슬러지와 혐기소화 슬러지는 완만히 비저항계수가 증가하는 경향을 보여준다. 활성 슬러지도 역시 비저항계수가 증가하나 그 양상은 매우 다르다. 초음파 에너지가 120 kJ/L까지 증가할 때 비저항계수는 $7.91E+12$ m/kg에서 $3.82E+14$ m/kg으로 급격히 증가한다. 그 후에는 초음파 처리가 더 진행되어도 비저항계수 증가율은 비교적 완만해진다.

Wang 등¹⁰⁾의 연구에서도 활성슬러지를 대상으로 한 실험에서 528 watts/L부터 1,440 watts/L의 에너지 밀도로 실험을 수행하였으며, 각각 초기 1.67×10^{12} m/kg에서 1.33×10^{14} m/kg와 3.43×10^{14} m/kg로 초음파 에너지 밀도가 증가할수록 탈수성은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 문제로 초음파 처리한 슬러지의 탈수성을 향상시키기 위해 고분자 전해질 등의 첨가제를 이용하는 방안을 연구하기도 하였다¹²⁾. 그러나 나 등¹³⁾의 연구에서 초음파 에너지 농도가 3,600~7,200 kJ/L 이상에서는 CST(모세흡입시간)가 감소하여 탈수성이 증가하는 결과를 발표하였으며 이는 에너지 밀도가 낮을 때 초음파에 의해 슬러지의 미생물 군집 구조가 느슨해지고, 입자 크기가 작아지며, 용출된 유기물 등에 의하여 시료의 점도가 증가하기 때문으로 설명하였다. 때문에 탈수성 증진을 위해서는 초음파의 공급 에너지 밀도를 높이거나 초음파 처리 시간을 길게 해야 한다. 그러나 필요한 에너지량이 너무 많아 경제성에는 문제가 있다.

Fig. 5는 혐기소화 슬러지와 생 슬러지, 활성 슬러지의 초음파 에너지 밀도에 따른 슬러지 침전성 변

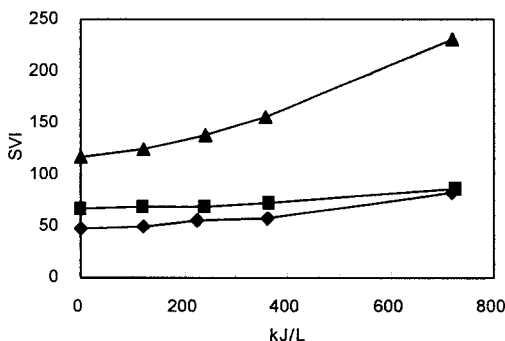


Fig. 5. SVI of the sludge at various ultrasonic energy input. (◆: anaerobic sludge, ■: primary sludge, ▲: activated sludge)

화를 나타내고 있다. 초음파의 처리로 인하여 모든 슬러지에서 침전성이 오히려 나빠진 결과를 얻었다. 혐기 소화 슬러지와 생 슬러지의 경우 각각 48에서 83, 66에서 86으로 SVI(sludge volume index)가 증가하였으며, 활성 슬러지의 경우 다른 두 슬러지에 비하여 초기 118에서 최종 230으로 높은 증가를 보인다. 활성 슬러지의 경우 대부분 플럭 상태의 미생물이 주를 이루고 있어 초음파에 의해 플럭 구조가 느슨해지고, 입자의 크기가 작아지며 고르게 분포하게 되어 침전성이 더 나빠진 것으로 생각된다. 생 슬러지의 경우 대부분이 고형물 혹은 유기물 덩어리이기 때문에 초음파에 의한 침전성 저해는 상대적으로 적은 편이다.

위의 연구결과를 종합적으로 요약하면 초음파를 이용한 슬러지 처리에 있어서 슬러지의 종류와 그리고 슬러지 처리 목적(가용화 전처리, 탈수)에 따라 초음파 에너지의 주사 강도나 처리시간은 달라져야 하며 탈수나 침전성 향상을 위해서는 고분자 전해질과 함께 매우 높은 에너지의 초음파를 주사하는 것이 좋다고 판단되며 가용화 후 혐기소화를 할 목적이면 그보다 낮은 에너지 강도의 초음파로도 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

혐기소화 슬러지와 생 슬러지, 활성 슬러지에 대하여 초음파 처리가 슬러지 가용화와 탈수성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초음파 처리한 결과 COD나 단백질 함량, 부유 고형물의 양으로 계산해볼 때 혐기소화 슬러지, 생 슬러지, 활성 슬러지의 가용화가 모두 증가하였다. 가용화 효과는 혐기소화 슬러지와 활성 슬러지가 생 슬러지에 매우 훨씬 높은 결과를 보였다.

2) 초음파 동력 0.2 kW/L로 슬러지를 처리한 경우 모든 슬러지의 탈수성은 초음파 처리에 의하여 저해를 받는 것으로 나타났다. 일부 초음파에 의한 탈수성 개선 사례는 높은 에너지 밀도(7200 kJ/L 이상)와 고분자 전해물질이 같이 주입될 경우 탈수성을 개선할 수 있어 초음파 자체만으로 탈수성의 개선은 한계가 있다.

3) 슬러지의 침전성은 초음파에 의해 감소하게 되고 이는 플럭 구조의 파괴와 함께 입자들이 작아지며

고르게 되기 때문에 탈수성의 변화와 관련 있다.

감사의 글

본 논문은 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Yin X., Han P., Lu X., Wang Y., 2004, A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pre-treatment, *Ultrason. Sonochem.*, 11, 337-348.
- 2) Bien J. B., Kempa E. S., Bien J. D., 1997, Influence of ultrasonic field on structure and parameters of sewage sludge for dewatering process, *Water Sci. Technol.*, 36(4), 287-291.
- 3) Chu C. P., Chang B. V., Liao G. S., Jean D. S., Lee D. J., 2001, Observations on changes in ultrasonically treated waste activated sludge, *Water Res.*, 35, 1038-1046.
- 4) Chu C. P., Lee D. J., Chang B. V., You C. S., Tay J. H., 2002, Weak ultrasonic pre-treatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids, *Water Res.*, 36, 2681-2688.
- 5) Rehmat T., Branion R., Duff S., Groves M., 1997, A laboratory sludge press for characterizing sludge dewatering, *Water Sci. Technol.*, 35(2-3), 189-196.
- 6) 김은호, 심은기, 이미경, 광철, 박인수, 환영기, 2000, 소화슬러지 탈수성 증진을 위한 폐굴껍질의 재활용, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 11(2), 176-182.
- 7) Huisman M., van Kesteren W. G. M., 1998, Consolidation theory applied to the capillary suction time (CST) apparatus, *Water Sci. Technol.*, 37(6-7), 117-124.
- 8) APHA, AWWA, WEF, 2005, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., 2-55~2-60, 5-14~5-18.
- 9) Bradford M. M., 1976, A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Anal. Biochem.*, 72, 248-254.
- 10) Wang F., Ji M., Lu S., 2006, Influence of ultrasonic disintegration on the dewaterability of waste activated sludge, *Environ. Prog.*, 25(3), 257-260.
- 11) Kim D. J., Youn Y. S., Lee S. C., Cha G. C., 2008, Characteristics of solubilization of wastewater sludge by ultrasound and thermal treatment, *Proceedings of 5th International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes and Energy Crops*, 6A2, 43-44.
- 12) Kim J., Park C., Kim T. H., Lee M., Kim S., Kim S. W., Lee J., 2003, Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge, *J. Biosci. Bioeng.*, 95, 271-75.
- 13) 나승민, 박지호, 김영욱, 김지형, 2005, 초음파 처리에 따른 소화 슬러지의 물리·화학적 특성 및 탈수효율 증가, *한국폐기물학회지*, 22, 637-644.