



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2013年 8月
석사학위논문

초음파 처리가 슬러지의 연속회분식
호기성 소화에 미치는 영향

조선대학교대학원

토목공학과

이인호

초음파 처리가 슬러지의 연속회분식
호기성 소화에 미치는 영향

Effect of Ultrasonication on Aerobic Sludge Digestion by
Sequencing Batch Reactor

2013년 8월 23일

조선대학교대학원

토목공학과

이인호

초음파 처리가 슬러지의 연속회분식 호기성 소화에 미치는 영향

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

이 인 호

이인호의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 길 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

2013년 5월

조선대학교대학원

목 차

ABSTRACT

| | |
|---------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 제 2 장 이론적 고찰 | 3 |
| 2.1 호기성 소화 원리 | 3 |
| 2.2 호기성 소화의 종류 | 6 |
| 2.3 슬러지 전처리 | 16 |
| 2.4 초음파 처리 | 20 |
| 제 3 장 실험재료 및 방법 | 23 |
| 3.1 슬러지 가용화 | 24 |
| 3.2 회분식 호기성 소화 실험 | 28 |
| 3.3 연속회분식 호기성 소화 실험 | 30 |
| 제 4 장 결과 및 고찰 | 32 |
| 4.1 슬러지 가용화 실험 | 32 |
| 4.2 회분식 호기성 소화 실험 | 34 |
| 4.3 연속회분식 호기성 소화 실험 | 39 |
| 제 5 장 결 론 | 41 |
| 참 고 문 헌 | 42 |

표 목 차

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 표 2.1 | 호기성 소화의 장·단점 | 3 |
| 표 2.2 | 하수슬러지의 전처리 유형 | 16 |
| 표 3.1 | 초음파 발생장치 제원 | 26 |
| 표 3.2 | 반송슬러지 수질 | 27 |
| 표 3.3 | 회분식 호기성 소화 실험 운전 방법 | 29 |
| 표 3.4 | 소화슬러지와 반송슬러지 수질 | 31 |

그림 목 차

| | |
|---|----|
| 그림 3.1 초음파 전처리 실험 장치 | 24 |
| 그림 3.2 초음파 발생 장치 | 25 |
| 그림 3.3 회분식 호기성 소화 실험 장치 | 28 |
| 그림 3.4 연속회분식 호기성 소화 실험 장치 | 30 |
| 그림 3.5 연속회분식 호기성 소화 실험 장치 사진 | 31 |
| 그림 4.1 초음파 조사시간에 따른 소화 슬러지 성분 변화 | 33 |
| 그림 4.2 낮은 초음파 조사율에서 소화 슬러지의 성분 변화 | 35 |
| 그림 4.3 높은 초음파 조사율에서 소화 슬러지의 성분 변화 | 38 |
| 그림 4.4 연속 회분식 호기성 소화 슬러지의 성분 변화 | 40 |

ABSTRACT

Effect of Ultrasonication on Aerobic Sludge Digestion by Sequencing Batch Reactor

Lee, In Ho

Advisor : Prof. Kim, Sung Hong, Ph.D

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Primary sludge and excess sludge from wastewater treatment plant contain high content of organics. Sludge digestion is stabilization process of these sludge and the organics in the sludge is transformed to methane by anaerobic digestion process or mineralized to water and carbon dioxide by aerobic digestion process. Digestion process requires long SRT because particle organisms is hard to solubilize. Ultrasonic power is helpful to solubilize the particulate and the solubilized form of COD is easily used to microorganisms. Ultrasonication combined with aerobic digestion experiment was carried out in this study. Ultrasonication is effect to solubilize of particulate solids. But the aerobic digestion efficiency was not significantly increased by the ultrasonic pretreatment because the increased SCOD was reused to synthesize aerobic microorganisms. Direct periodic ultrasonication on the aerobic digestion process shows relatively higher digestion rate rather than ultrasonication pretreatment. Phosphorus was leached by the solubilization of particulates and the leaching rate was proportional to SCOD increase rate.

제 1 장 서 론

하수슬러지는 2011년 기준 전국 505개 하수처리시설에서 연간 3,095,948톤이 발생되고 이 중 32.6%인 1,010,322톤이 해양배출로 처리되고 재이용이 25.9%인 802,318톤, 소각이 22.2%인 687,868톤, 육상매립이 8.4%인 261,262톤으로 처리되고 있다(환경부, 2012). 하지만 해양투기의 경우 '72런던협약과' 96개정 의정서의 국제적인 해양배출 규제동향에 따라 우리나라도 2012년부터는 하수슬러지의 해양배출을 금지하는 해양오염 방지법 시행규칙개정을 준비하고 있다(환경부, 2007).

하수슬러지는 하·폐수에 포함되어 있는 입자상, 콜로이드 및 용존상의 오염물질 제거시 발생하는 고품상의 2차 환경오염물질로써, 함수율이 높고 유기물질을 다량 함유하여 부적절한 처리시에는 부가적인 오염으로 인해 환경피해가 발생할 우려가 있어 처리가 요구되며, 유기물의 효율적인 이용과 매립지의 소모량을 줄이기 위한 감량화 처리 또한 요구 된다. 하수슬러지 성상면에서 수분함량이 85%이하(고형물 함량 15%이상)이면서 유기물(VS함량, 생분해 가능한 물질의 함량)의 함량을 40%를 경계로, 40% 이상이면 유기성슬러지, 40%이하이면 무기성슬러지로 구분한다. 현재 환경부의 관련법 내에서 관리되고 있는 하수처리슬러지, 폐수처리슬러지, 분뇨처리슬러지, 축분폐수처리슬러지 등은 대부분 유기성슬러지에 포함되고, 정수슬러지는 무기성슬러지에 포함된다(하범용, 2006).

하수처리장에서 발생하는 슬러지를 처리하는 방법으로는 최종산물인 탈수케익을 재활용하는 방안과 하수처리공정 중 소화조 효율개선, 농축 및 탈수 시설 개선을 통해 슬러지를 감량화하는 방안으로 크게 나눌 수 있다. 하수슬러지 재활용 방안으로는 연료화, 성토재, 경량공재, 시멘트 연료화, 탄화기술 등이 있으며, 슬러지 저감 및 감량화 방안으로 물리적 처리, 화학적 처리, 생물학적 처리, 초음파 처리에 의한 방법이 있다(한금석 등, 2010). 하수슬러지의 전처리 방법 중 초음파 처리는 높은 음향강도에서 슬러지를 처리함으로써 강성이 악화되고 에너지가 많이 소비된다는 단점을 가지고 있으나, 슬러지 생산의 감소 및 소화공정의 효율향상을 가능하게 할 수 있어 하수슬러지의 전처리 방법으로 뛰어난 잠재성을 가진 것으로 평가되어지고 있다(고현웅 등, 2004).

호기성 소화는 일차 및 이차 슬러지를 장기폭기함으로써 미생물을 내생 호흡단계로 유도하여 슬러지를 구성하는 유기물을 안정화시키고 슬러지의 고형물을 분해시키는 공

정이다. 호기성 소화는 혐기성 소화에 비해 처리 소요 시간이 짧고, 악취 발생이 거의 없으며, 부유 물질의 응집 분리를 촉진시킬 뿐만 아니라 병원성 미생물의 제거 등의 이차적 효과를 도모할 수 있다(김성홍 등, 2002).

본 연구에서는 초음파 캐비테이션을 이용한 전처리 기술을 연속회분식 반응조에 적용하여 유기물의 변화를 분석하고 호기성 소화에 적용하여 초음파 처리가 슬러지의 호기성소화에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 호기성 소화 원리

호기성 소화는 순 폐활성슬러지, 폐활성슬러지 혹은 살수여상 슬러지와 1차 슬러지의 혼합, 장기포기시설에서 발생하는 슬러지를 처리하는데 사용된다. 혐기성 소화와 비교하여 호기성 소화의 장·단점은 표 2.1과 같다.

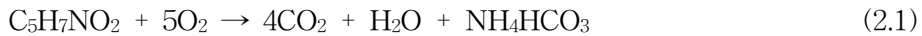
표 2.1 호기성 소화의 장·단점

| 장 점 | 단 점 |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • 상징수의 낮은 BOD 농도 • 약취 없고 휴믹물질 같은 생물학적으로 안정한 최종 산물의 생산 • 슬러지 내에서 보다 많은 비료성분의 회수 • 비교적 쉬운 운전 방법 • 작은 투자비 • 영양소가 풍부한 슬러지 안정화 적합 | <ul style="list-style-type: none"> • 산소를 공급하는데 필요한 높은 동력비 • 기계적 탈수능이 낮은 소화 슬러지 생산 • 온도, 위치, 반응조 형태, 유입 슬러지의 농도, 교반과 포기 장치 등에 따라 큰 영향을 받음 |

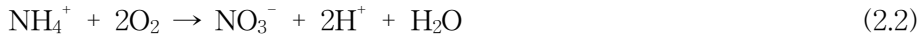
호기성 소화는 활성슬러지 공정과 비슷하다. 유용한 기질 (먹이)가 고갈됨에 따라 미생물들은 세포 작용의 유지를 위한 에너지를 얻기 위하여 자신의 원형질을 소모하기 시작한다. 세포조직으로부터 에너지를 얻을 때 미생물들은 내생호흡단계(endogenous phase)에 있다고 표현한다. 세포조직은 호기적으로 이산화탄소와 물과 암모니아로 산

화된다. 실제적으로 세포조직의 약 75 ~ 80% 정도가 산화된다. 나머지 20 ~ 25%는 생분해되지 않는 불활성 물질과 유기물의 혼합이다. 생분해 불가능 휘발성 부유 고형물은 호기성 소화로부터 최종산물로 남게 된다. 미생물이 소화조로 폐기되고, 미생물의 세포물질의 구성식이 $C_5H_7NO_2$ 로 대표된다는 것을 고려하면, 호기성 소화에서 생화학적 변화는 다음 식으로 표현될 수 있다.

미생물의 분해



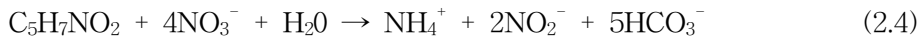
방출되는 암모니아 질소의 질산화



질산화 완결 시 총괄식



전자 수용체로 질산성 질소가 사용되는 경우 (탈질)



질산화/탈질화 완결식



식 (2.1)부터 (2.5)까지 주어진 바와 같이 유기성 질소의 질산염으로의 전환은 충분한 완충능이 슬러지 안에 존재하지 않을 경우 수소이온 농도의 증가로 인한 pH 강하가 일어난다. 이론적으로 질산화에 소모되는 알칼리도의 약 50%는 탈질에 의해 회수된다. 용존산소가 1mg/L 이하로 낮게 유지된다면 질산화는 일어나지 않는다. 실제적으로 포

기와 교반으로 이루어지는 호기성 소화조의 주기는 pH 조절을 하면서 탈질을 극대화 하는데 효과적이다. 완충능이 부족한 경우 pH가 5.5 이하로 강하하는 경우, 요구되는 pH를 유지하기 위해 알칼리도 공급 장치가 필요하다.

2.2 호기성 소화의 종류

2.2.1 재래식 호기성 소화

재래식 호기성 소화조를 설계함에 고려해야하는 요인들은 온도, 고형물 체류시간, 소화조 부피, 유입 고형물의 농도, 산소 요구량, 교반에 필요한 에너지 요구량, 그리고 공정의 운전 방식 등을 포함한다.

가. 온도

대부분의 호기성 소화조는 대기에 노출되어 있기 때문에 소화조 액의 온도는 계절조건에 영향을 받으며 변화가 매우 심하다. 모든 생물학적 시스템에서와 같이 낮은 온도는 공정을 지연시키는 반면 높은 온도는 공정을 가속화시킨다. 온도 영향을 고려할 때 강철 구조 대신 콘크리트를 사용한다거나 반응조를 지상에 두지 않고 지하에 둔다거나 지상의 반응조에 대해 단열처리를 하거나 표면 포기를 하는 대신 수면 포기 등을 함으로써 열 손실을 최소화해야 한다. 극단적인 추운 날씨의 경우 슬러지나 주입되는 공기를 가열하거나 반응조에 커버를 씌우는 등의 조치를 강구해야 한다. 설계는 예상되는 가장 낮은 온도에서 슬러지 안정화가 필요한 만큼 이루어지도록 해야 하며, 예상되는 최대 운전 온도에서 최대 산소요구량을 만족시키도록 해야 한다.

나. 휘발성 고형물 감량

호기성 소화의 주요한 목적은 처분을 위한 고형물의 질량 감소이다. 이 감소는 비록 유기물이 아닌 것들의 분해도 있지만 슬러지의 생분해 가능 부분에서만 이루어진다고 가정한다. 35 ~ 40% 정도의 휘발성 고형물 감량은 호기성 소화에 의해 수행된다.

완전 혼합 소화조에서 생분해 가능 휘발성 고형물의 변화는 반응조의 부피가 일정할 경우에 1차 생화학적 반응으로 표현 가능하다.

$$\frac{dM}{dt} = -k_d M \quad (2.6)$$

$\frac{dM}{dt}$: 생분해 가능 휘발성 고형물 (M)의 단위시간당 변화율, (MT^{-1})

k_d : 반응 상수, (T^{-1})

M : 호기성 소화조 내에 시간 t 에 남아 있는 생분해 가능 휘발성 고형물의 질량, (M)

식 (2.6)의 시간 항은 호기성 소화조 내의 슬러지 체류시간 (SRT)이다. 호기성 소화조가 어떻게 운전되느냐에 따라 시간 t 는 이론적 수리학적 체류시간 (t)보다 크거나 같을 수 있다. 식에서 휘발성 고형물의 생분해 가능 부분을 사용하는 이유는 1차 처리를 거친 하수처리시설로부터 발생하는 폐활성슬러지의 약 20 ~ 35%가 생분해 가능하지 않다는 점 때문이다. 접촉 안정화 공정의 폐활성슬러지의 생분해 불가능 휘발성 고형물의 비율은 25 ~ 35% 범위이다.

반응 상수 k_d 는 슬러지 종류, 온도, 고형물 농도에 따른 함수이다. 폐활성 슬러지에 대한 k_d 의 대표 값은 15°C의 0.05d⁻¹에서 25°C의 0.14d⁻¹ 범위이다. 반응속도는 여러 조건에 따라 영향을 받기 때문에, 실험실 규모나 현장 실증 실험을 통해 사멸 계수값을 구하는 것이 필요하기도 하다.

다. 반응조 부피와 체류시간

반응조 부피는 요구되는 휘발성 고형물 감량을 달성하기에 필요한 체류시간에 의해 결정되고, 식 (2.7)에 의해 계산 가능하다.

$$V = \frac{Q_i(X_i + YS_i)}{X(k_d P_v + 1/SRT)} \quad (2.7)$$

V : 호기성 소화조 부피, m^3

Q_i : 소화조에 유입되는 평균 유량, m^3/d

X_i : 유입 부유 고형물, mg/L

Y : 1차 슬러지를 구성하는 BOD 분율 (소수점으로 표현됨)

S_i : 유입 BOD, mg/L

X : 소화조 부유 고형물, mg/L

k_d : 반응 속도 상수, d^{-1}

P_v : 소화조 부유 고형물의 휘발성분 분율 (소수점으로 표현됨)

SRT : 슬러지 체류시간, d

YS_i 항은 1차 슬러지가 호기성 소화조의 슬러지 부하로 포함되지 않으면 제외할 수 있다. 만일 호기성 소화 공정이 단 (이단 혹은 삼단 공정)을 이루며 완전혼합 방식으로 운전된다면, 총 SRT 는 각 단에 대해 균등하게 나누어져야 한다.

라. 유입 고형물 농도

유입 고형물 농도는 호기성 소화조의 설계와 운전에 중요하다. 농축공정이 호기성 소화 앞에 위치한다면 보다 높은 유입 고형물 농도를 유지할 수 있게 되고 이는 소화

조 부피당 보다 많은 산소공급과 긴 SRT, 보다 작은 소화조 부피, 공정 제어의 용이성 등에 따라 휘발성 고형물 감량의 향상을 가져올 것이다. 그러나 유입 고형물 농도가 3.5 ~ 4% 이상이면 생물학적 공정을 유지하기 위해 필요한 적당한 용존 산소 수준으로 소화조 내 구성물을 잘 혼합하기 위한 교반이나 송풍 시스템의 능력에 영향을 미칠 수 있다. 유입 고형물 농도가 4%를 초과하면 송풍장치는 적당한 혼합과 송풍이 이루어지는지 주의 깊게 평가되어야 한다.

마. 산소 요구량

호기성 산화 공정 동안 만족스러운 산소 요구량은 세포조직과 1차 슬러지의 BOD가 요구하는 양이다. 식 (2.1)과 (2.2)에 의해 계산되는 세포조직의 완전 산화(질산화 포함)에 요구되는 산소량은 세포 1몰당 7몰 혹은 세포 1kg당 2.3kg이다. 1차 슬러지에 포함된 BOD의 완전 산화를 위해 요구되는 산소량은 분해되는 BOD 1kg 당 1.6 ~ 1.9kg까지 변한다. 잔류 산소는 모든 운전 조건하에서 1mg/L 혹은 그 이상 유지되어야 한다.

바. 교반에 필요한 에너지 요구량

적합한 운전을 위하여 호기성 소화조 내의 구성물은 잘 교반되어야 한다. 큰 반응조에 있어서 다중 교반 장치가 교반 에너지의 효율적인 분배를 위해 설치된다. 일반적으로 산소 요구량을 맞추기 위해 공급되어야 하는 공기의 양이 매우 많으므로, 적당한 교반이 이루어져야 한다. 그렇지만 교반 에너지 요구량은 점점되어야 한다. 특히 유입 고형물 농도가 3.5% 이상일 경우 더욱 그러하다. 농축공정에서 고분자 응집제가 사용된다면(특히 원심 농축의 경우), 더 많은 양의 에너지가 요구된다.

미세기포 산기에 의한 교반(fine-pore diffuse air mixing)이 사용되면 송풍시스템 선택시 고려 사항에 좋은 교반을 위한 유입 고형물 농도의 한계점을 파악하여야 한다. 유입 고형물 한도에 대한 추천사항은 송풍 장치의 제작자로부터 얻어야 한다. 슬러지 decanting이 필요한 경우에는 산기관의 막힘현상 (fouling)도 고려해야 한다.

사. 공정운전

시스템의 완충 능력에 따라 긴 수리학적 체류시간에서 pH는 5.5 이하까지 떨어진다. pH의 잠재적인 하락은 용액내 질산 이온의 증가와 탈기작용(air stripping)에 의한 완충 능력의 하락에 기인한다. 사상균의 증식은 낮은 pH 영역에서 이루어진다. pH는 주기적으로 점검되어야 하고 너무 낮으면 조정해 주어야 한다. 용존 산소와 호흡율은 적절한 공정의 성능을 확인하기 위해 점검되어야 한다.

침전공정 없는 호기성 소화조는 이어지는 공정으로 배출되기 전 소화 슬러지의 농축을 위해 배출 시설 (decanting facility)이 갖추어져야 한다. 운전과 배출 조작의 시각화는 중요한 설계 고려인자이다. 소화조가 운전되어 유입 슬러지가 상징수를 대체하는데 사용되고 고형물이 쌓이게 되면 슬러지 체류시간은 수리학적 체류시간과 같지 않게 된다.

2.2.2 이중 소화

호기성 고온 소화는 이중 소화 공정의 첫 번째 단계로서 유럽에서만 사용되어져 왔다. 두 번째 단계로는 중온 혐기성 소화이다. 이중 소화는 첫 단계에서 고순도 산소를 이용하여 미국에서도 시도되고 있다. 호기성 소화조의 체류시간은 대표적으로 18 ~ 24시간 범위이며 반응조 온도는 55 ~ 65℃ 정도이다. 혐기성 소화조의 체류시간은 10일이다. 이중 소화에서 고온 호기성 소화를 사용하는 장점은 병원균 사멸율이 증가하고, 휘발성 고형물 감량이 상승하며, 혐기성 소화조에서 메탄 생산량이 증가하고, 유기물이 적게 유입되고 안정화된 슬러지에서 발생하는 악취가 감소하고 동일 휘발성 고형물 감량이 단단 혐기성 소화조보다 1/3의 반응조에서 이루어질 수 있다는 것 등이다. 호기성 반응조의 수화반응은 이어지는 혐기성 소화에서의 분해와 가스 생산을 증진시킨다. 약 10 ~ 20% 정도의 휘발성 고형물이 호기성 소화조에서 액상화하는 반면 COD 감소는 5% 이하이다. 거품과 악취 제거를 위한 조치가 필요하다.

2.2.3 자체 발열 고온 호기성 소화

자체 발열 고온 호기성 소화(ATAD : Autothermal Thermophilic Aerobic Digension)은 재래식 방법과 고순도 산소 호기성 소화의 대표적인 변형이다. ATAD 공정에서 유입 슬러지는 일반적으로 전농축되고 반응조는 소화 공정에서 휘발성 고형물의 산화로부터 발생하는 열을 보존하기 위해 단열처리 된다. 친열성 운전 온도 (일반적으로 55 ~ 70℃)는 발열적인 미생물 산화 반응에 의해 발생하는 열을 이용함으로써 외부 열의 유입 없이 유지된다. 약 20,000kJ의 열은 제거되는 휘발성 고형물 1kg에서 발생된다. 송풍과 교반에 의해 유입되는 열을 제외하고 추가적인 열 공급이 없기 때문에 이 공정은 자체발열 (autothermal)이라고 불린다.

ATAD 반응조 내에 충분한 양의 산소, 휘발성 고형물, 그리고 교반이 호기성 미생물로 하여금 유기물을 이산화탄소, 물, 그리고 질소 부산물로 분해하도록 한다.

ATAD의 주요 장점은 재래식 호기성 소화조와 비슷한 30 ~ 50%의 휘발성 고형물 감량을 달성하는데 짧은 체류시간 (약 5 ~ 6일로)에서도 가능하다는 것과 운전의 간편성, 혐기성 소화와 비교했을 때, 박테리아와 바이러스가 크게 감소하고, 그리고 교반이 잘 이루어지고 온도가 55℃ 이상 유지되었을 경우, 병원성 바이러스, 세균, 기생충 알, 다른 기생충들이 측정 한계 이하로 감소하여 A급 슬러지의 병원균 감소 요구량을 충족하게 된다. 단점은 불쾌한 냄새가 발생하고 처리 슬러지의 탈수성이 떨어지며 질산화가 어렵다는 것이다.

가. 공정 이론

고온 호기성 소화의 생화학적 조건은 재래식 호기성 소화조와 매우 다르다. 높은 운전 온도 때문에 질산화는 저해를 받고, 식 (2.4)부터 (2.7)에 나타낸 것과 같은 후속 반응 없이 휘발성 고형물의 호기성 분해가 식 (2.3)과 같이 일어난다. 추가적으로 전부는 아니지만 대부분의 ATAD 시스템은 산소요구량이 산소 공급량을 초과하는 호기성 조건하 (microaerobic)에서 운전될 수도 있다. 마이크로 호기성 조건하에서 단백질 성분의 세포 물질은 단백질이 식 (2.8)에 기술한 것처럼 펩톤으로 변화하는 발효를 일으킨다.



식 (2.1)과 (2.8)은 모두 물과 이산화탄소와 결합하여 암모늄 중탄산염과 암모늄 탄산염을 형성하게 되는 암모니아를 생산하는데 이는 알칼리도를 증가시킨다. 질산화는 일어나지 않으므로 ATAD 시스템에서 pH는 재래식 호기성 소화조에서보다 큰 8 ~ 9 범위이다. 생성되는 암모니아성 질소는 방출되는 gas와 용액 내에 몇 백 mg/L의 농도로 존재한다. 암모니아성 질소의 대부분은 약취 조절과 탈수 시설로부터 반류수 (sidestream)을 통해 처리 공정으로 되돌아온다. 단백질의 발효로부터 생성되는 아세트산 (혹은 아세트산염)은 휘발성 지방산의 하나이다. 아세트산은 식 (2.9)에서 나타낸 바와 같이 충분한 용존 산소의 존재 하에서 산화될 것이다.



혐기성 조건은 ATAD 시스템 내에서 때때로 조성되고 대부분 ATAD 전에 위치하는 슬러지 보관 시설에서, 그리고 슬러지가 공급된 직후와 공급되는 동안 첫 번째 ATAD 반응조에서 일어난다. 혐기성 조건하에서 약취 조절 시스템의 설계와 성능에 영향을 미치게 되는 환원된 황 화합물이 생성될 수 있다.

나. 공정 설계

ATAD 시스템은 단열 처리된 반응조 안에서 짧은 수리학적 체류시간을 가지도록 설계된다. ATAD 시스템이 잘 교반되고 충분한 산소가 공급되는한, 반응조의 온도는 정상 상태에 이를 때까지, 즉 발열반응과 기계적 에너지 유입으로 인한 열유입과 열손실이 같아질 때까지 상승할 것이다. 온도는 공정이 산소물질 전달 한계에 도달할 때까지 상승을 계속할 것이다.

ATAD 시스템을 설계하는데 있어서 고려해야 할 사항은 전농축, 반응조의 수와 형

태, 후냉각/농축, 유입슬러지 특성, 체류시간, 유입 주기, 송풍과 교반, 온도와 pH, 그리고 거품과 약취제어 등이다.

ATAD 시스템은 반응조에서 높게 요구되는 충분한 산소를 전달하도록, 배출되는 공기에서 잠열의 손실을 최소화하면서 요구되는 산소를 공급하도록 설계되어야 한다.

세포 단백질과 지질, 지방과 그리스 물질들이 분해되고 ATAD 공정의 용액 내로 방출되면서 상당량의 거품이 발생된다. 거품 층은 반응조의 단열효과와 산소 이용을 향상시키는 생화학적으로 활성을 띤 고형물을 고농도로 포함하고 있다. 그러므로 거품 층의 효과적 관리와 조절은 중요하다. 기계적 제품 제거기는 거품 제어에 일반적으로 사용되지만 스프레이 시스템과 같은 다른 방법들도 적용된다. 0.5 ~ 1.0m 정도의 여유고가 거품 층 제어를 위해 일반적으로 제안된다.

ATAD 시스템의 후속으로 기계적 탈수가 있는 곳에서 원심분리나 여과포 압축기의 성능 향상을 위한 슬러지 냉각을 위해 ATAD 슬러지의 후저장이 요구된다.

ATAD의 마지막 단의 반응조 내에서 ATAD 슬러지를 긴 체류시간하에 후저장하면 휘발성 고형물의 감량을 더욱 증가시킬 수 있다.

2.2.4 고순도 산소 소화

고순도 산소 호기성 소화는 공기대신에 고순도 산소를 이용하는 호기성 소화 공정의 한 변법이다. 생산되는 슬러지는 재래식 호기성 소화의 그것과 비슷하다. 유입 슬러지 농도는 2 ~ 4%로 다양하다. 재순환 흐름은 재래식 호기성 소화에 의해 이루어지는 것과 또한 비슷하다. 고순도 산소 호기성 소화는 공정자체가 발열반응이며, 생화학적 활성의 증가로 인해 주위 공기 온도의 변화에 상대적으로 덜 민감하게 되므로, 추운 겨울 날씨에서 특히 적용성이 높다. 고순도 호기성 소화 공정 (high-purity aerobic digestion)의 한 가지 변형은 대기에 노출되어 있다는 것인데, 호기성 소화는 고순도 산소 활성 슬러지 공정 (high-purity oxygen activated-sludge process)에서 사용하는 바와 비슷하게 밀폐된 반응조에서 이루어진다. 고순도 산소 호기성 소화에 밀폐된 반응조가 사용된다면 소화공정의 발열 특성 때문에 일반적으로 높은 운전 온도를 유발하게 된다. 반응조에서 이와 같이 높은 온도를 유지하는 것은 휘발성 고형물의 파괴율을 상당히 증가시키게 된다. 밀폐된 반응조가 사용되면 고순도 산소의 대기가 액상 표면 위에서 유지되고, 산소는 기계적 송풍기를 통해 슬러지 내부로 전달된다. 열린 포기조가 사용되면 산소는 미세한 산소 방울을 생산하는 특별한 산기기에 의해 액상 슬러지에 공급된다. 공기 방울은 공기와 용액의 경계면에 이르기 전에 용해된다.

고순도 산소 호기성 소화의 주요 단점은 산소 공급에 따르는 비용의 증가이다. 결과적으로 고순도 산소 호기성 소화는 고순도 활성슬러지 시스템과 연계하여 사용되었을 때만이 일반적으로 비용면에서 효과적이다.

2.3 슬러지 전처리

슬러지 전처리는 기존에는 주로 슬러지의 탈수성을 높이거나 슬러지의 살균을 통한 악취방지 등의 보조적 용도로 연구되어 왔으나 최근 들어 슬러지의 처리, 처분성을 높이는 효과적인 방법으로 제기되면서 슬러지의 생분해성을 높일 수 있는 다양한 전처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근 들어 하수처리시설의 고도와 사업과 병행하여 탈질에 필요한 외부탄소원의 확보를 목적으로 슬러지 전처리와 관련된 연구를 수행하는 경우도 있다. 현재 슬러지 처리공정으로 상용화되고 있는 단계에 접근해 있다고 할 수 있다(허진, 2011). 하수슬러지의 전처리 유형은 표 2.2와 같다.

표 2.2 하수슬러지의 전처리 유형

| 형 태 | 공 정 |
|---------|--|
| 기 계 적 | <ul style="list-style-type: none"> • 볼밀링(Ball milling) • 고압을 이용한 균질화(High pressure homogenisation) • 전단력을 이용한 균질화(Shear gap homogenisation) • 원심분리(Lysate impulse discharge) |
| 전 기 적 | <ul style="list-style-type: none"> • 정전위(Electer impulse discharge) |
| 열 적 | <ul style="list-style-type: none"> • 열분해(Pyrolysis) |
| 열-생물학적 | <ul style="list-style-type: none"> • 호기성소화(Aerobic digestion) |
| 화 학 적 | <ul style="list-style-type: none"> • 산/염기 반응(Acid/Base reactions) • 오존산화(Ozone oxidation) |
| 생 물 학 적 | <ul style="list-style-type: none"> • 효소첨가(Addition of enzymes) |
| 음 향 | <ul style="list-style-type: none"> • 공동현상/초음파 반응(Cavitation/Sonochemical reactions) |

(김광인, 2011)

2.3.1 기계적 전처리

기계적 전처리는 세포벽을 물리적인 방법으로 파괴하여 세포 내 물질의 용출을 유도하는 방법으로 슬러지 내 세포를 파괴하기 위해 세포벽이 견딜 수 있는 이상의 힘을 제공한다. 기계적 전처리방법으로는 Stirred Ball Mills(SBM), High Pressure Homogenizers(HPH), Ultrasonic Homogenizers(UH), Mechanical Jet Smash Technique(MJS), High Performance Pulse Technique(HPP), Lysat-Centrifugal Technique(LC) 그리고 Shear-gap homogenizer 등을 들 수 있다(모우중, 2012).

최 등(1966)의 실험에 의하면 폐활성슬러지를 Jet 분사기를 사용하여 전처리하였을 경우 평균 초기 SCOD는 152mg/L 였지만, 30 bar로 분사하였을 경우 평균 990mg/L, 50bar로 분사하였을 경우 평균 1,250mg/L까지 증가하는 것으로 나타났다.

2.3.2 열 전처리

열처리는 60 ~ 250℃ 의 고온에서 약 15 ~ 60분간 체류시켜 입자상 유기물질을 용해성 유기물질로 변화시킴으로써 혐기성 소화효율을 증가시키는 방법이다. 원래 열처리는 슬러지의 탈수성을 향상시키기 위해 개발되었는데, 열처리를 함으로써 슬러지의 탈수성은 눈에 띄게 향상되지만 상정수 처리는 여전히 문제가 되었으며 이에 대한 해결책으로 제안되었던 방법이 열 전처리·혐기성 소화 (TP/AD : Thermal Pretreatment/Anaerobic Digestion)이다. TP/AD 공정은 1차 슬러지와 폐활성 슬러지를 열처리한 후 슬러지를 소화, 탈수하는 것으로 처리하지 않은 슬러지에 비해 가수분해성이 개선되었으며 혐기성 소화가 촉진되는 것으로 알려졌다(Li, Y. Y. 등, 1992).

2.3.3 동결·용해 전처리

동결·용해 전처리는 슬러지를 -25℃로 냉각시킨 후 용해함으로써 슬러지 플록의 구조를 변화시키고, 슬러지 입자와 결합수의 파괴 및 EPS(Extracellular Polymers Substances)를 방출시켜 후속 공정인 소화효율 개선 및 탈수성을 향상시키는 방법이다.

동결·용해 처리의 원리는 미생물을 동결시키면 성장하는 얼음이 세포내 수분을 안으

로 빨아들이고, 세포 밖 빙정의 대형화와 세포 안으로 녹아 들어온 가스의 이탈에 따르는 체적의 증가 등이 세포벽에 손상을 주고, 미생물 세포의 표면과 세포 내부에 존재하는 유기물이 비가역적으로 액중으로 옮겨오는 것이다. 따라서 세포가 입는 손상의 정도는 동결속도가 더딜수록 크다고 할 수 있고, 슬러지의 융해시 가열하는 것이 융해 속도를 크게 하고 용출효과를 촉진한다(Hung 등, 1997).

2.3.4 화학적 전처리

화학적 처리, 즉 산·알칼리 처리는 폐활성 슬러지에 강산을 가하여 낮은 pH 조건을 유지시키다가 다시 강알칼리를 첨가하여 높은 pH 조건으로 변화시키는 등 급격한 pH 변화를 유발시킴으로써 미생물의 세포벽을 와해시켜 혐기성 소화를 촉진시키는 전처리 방법으로 후속 혐기성 소화를 위해서는 중화과정이 요구된다(동효선, 2010).

주로 고농도 및 저농도에서의 알칼리 처리가 활발히 연구되고 있는데, 폐활성 슬러지의 가수분해를 촉진시키기 위한 알칼리로 보통 NaOH, Lime 등이 이용되었으며, 알칼리 전처리 효율은 Lime 등에 비하여 NaOH가 훨씬 효과적인 것으로 보고된 바 있다(Tanaka 등, 1997).

2.3.5 오존 전처리

오존 전처리는 오존 자체의 강력한 산화 작용을 이용하는 방법으로, 오존이 수중에서 분해 될 때 생성되는 OH 라디칼에 의하여 미생물의 표면에 손상을 주어 슬러지의 세포벽을 산화시키는 원리를 이용한다. 세포벽이 파괴됨으로써 세포 내부에 존재하는 단당류와 유기산 등이 용출되어 일부 오존산화에 의해 분해되거나 이분해성으로써 세포(readily biodegradable COD)로 변환되는 전처리 방법이다. 오존 전처리는 오존의 산화력으로 가용화도의 증가와 호기·혐기성 소화 효율의 향상으로 슬러지 감량화 측면에서 매우 효과적이다(모우종, 2012). 그리고 난분해성 물질을 효과적으로 처리할 수 있고 하수처리장에서는 오존 소독 처리 공정을 통해 병원성 미생물 사멸에도 이용하는 것으로 알려져 있으며 활성슬러지 공정에서 흔히 발생하는 사상균 제어와 더불어 슬러지 침전성 및 탈수성 향상 그리고 입자의 균질화에도 효과적인 것으로 알려져 있다(Chen 등, 2001).

2.3.6 효소처리

효소처리는 미생물을 슬러지에 투여하는 생화학적 방법으로, 이러한 생화학적 방법은 슬러지의 생물학적, 화학적 특성에 따라 간섭을 많이 받기 때문에 혐기성소화에서 슬러지 전처리의 한 방법으로 사용될 수 있다는 가능성 정도의 결과에 불과하다 (Knap 등, 1978).

2.4 초음파 처리

2.4.1 초음파의 원리

초음파는 석영과 같은 압전성(piezoelectric)물질에 의해 발생되는데 압전성 물질의 판 (plate) 양면에 크기가 같고 방향이 반대인 전하를 교대로 걸어주게 되면 그 물질은 팽창과 수축을 반복하게 되며 이와 같은 과정을 통해 압전성 물질은 전기 에너지를 기계 에너지로 변환하게 된다. 이때 발생된 기계적 진동이 초음파를 발생시키게 된다. 또한 매질의 일부를 초음파의 주파수와 동일한 주파수로 진동하게 하여 발생시킬 수 있으며, 그 발생방법은 매질의 상태에 따라 여러 가지가 있다(Mo, S. Y. 등, 1998).

2.4.2 공동화 현상

초음파의 화학적 효과들은 공동화현상에 따르며, 공동화는 유체 내에 국지적으로 큰 부압이 적용될 때 미세기포가 생기는 현상이다. 액체 매질에 초음파를 조사할 경우 공동화(cavitation) 현상을 일으켜 이때 발생된 기포의 파열과 함께 생성과 소멸을 반복하게 된다. 기포가 성장하여 파괴될 때 기포 내의 고온·고압의 가스가 순간적으로 방출되면서 열분해(prolysis)와 OH radical과 같은 강한 산화성 물질의 생성이 이루어진다. 또한 기포가 파열되면서 생성된 충격파로 인한 높은 압력의 영향으로 분자 간에 충돌이 활발하게 일어나게 함으로써 각종 화학반응에서의 반응율을 증대시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Appels, L. 등, 2008).

2.4.3 초음파 전처리

가. 슬러지 가용화

용존성 COD를 이용한 슬러지 가용화율의 계산은 식 (2.10)과 같다

$$\text{가용화율(\%)} = (\text{SCOD} - \text{SCOD}_0) / (\text{TCOD}_0 - \text{SCOD}_0) \times 100 \quad (2.10)$$

SCOD = 초음파 처리 후 용존 COD(mg/L)

SCOD₀ = 초음파 처리 이전 용존 COD(mg/L)

TCOD₀ = 초음파 처리 이전 총 COD(mg/L)

최 등(2009)은 초음파에 의한 슬러지의 전처리는 동일한 초음파 에너지 투입조건에서 시료의 양이 적을수록, 단위 체적당 투입되는 에너지량이 많을수록 가용화 효율이 증대한다고 한다. 슬러지에 투여되는 초음파 에너지량을 1000W로 일정하게 하고, 시료의 양을 각각 100mL, 200mL, 500mL로 변화시키고 초음파 조사시간에 따라 시료를 채취한 결과 초음파의 시간이 길어질수록 슬러지의 세포가 파괴되면서 용출되어 나온 물질에 의해 SCOD가 지속적으로 증가하였고 SCOD의 증가와 함께 초음파에 의한 가용화효율 역시 증가한다고 발표하였다.

김 등(2011)은 초음파 조사시간 별 슬러지 가용화율을 측정한 결과 100W/L에서의 가용화 효율은 조사시간에 상관없이 11 ~ 18%였지만, 140W/L에서는 약 두 배가 넘는 가용화 효율 33 ~ 39%를 보여, 슬러지 전처리에 사용되는 초음파의 소요전력이 높을수록 SCOD의 농도가 높아져 조사시간이 증대되어도 가용화 효율에 미치는 영향이 미비하다고 발표하였다.

Bougrier의 연구 자료에서는 초음파 처리가 용존성 물질과 입자성 물질과 같은 총 물질의 양을 바꾸지 않는다고 발표하였다. 총 고형물 농도 TS(Total Solids)는 변하지 않는 것이다. 그리고 총 무기물질량과 총 유기물질의 양도 일정하다고 보고하였다. 즉, 초음파는 무기화를 진행시키지는 않는다고 할 수 있다. 그러나 입자성 부분과 용존성 부분의 고형물은 초음파 조사에너지에 따라 변화하였다. 결국, 초음파는 유기물질의 가용화에는 유도되지만 무기물질의 가용화에는 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다(허진, 2011).

나. 병합처리 가용화

김 등(2011)은 알칼리처리와 초음파처리를 적용하여 최적의 가용화 조건을 도출하고자 각각의 단일처리, 병합처리로 가용화율을 확인하였다. 알칼리처리 시 NaOH를 이용한 전처리 방법에서 가장 높은 가용화율(27.6%)을 확인하였으며, 시약의 주입농도가 높아지더라도 가용화에 미치는 영향에는 한계가 있음을 확인하였고, 초음파처리 시 조사시간은 증대되어도 가용화율에 미치는 영향은 미비하다고 하였다. 병합처리 시 초음파처리 후 알칼리처리를 적용한 방법에 비해 알칼리처리 후 초음파처리를 적용하는 방법이 더 높은 가용화율을 나타내었는데 이는 슬러지를 이루고 있는 플록은 초음파 처리만으로는 높은 처리효율을 기대하기 어렵고, 이렇게 부분적으로 파쇄된 슬러지에 알칼리 처리를 한다고 해도 미생물과 알칼리의 반응횟수나 시간이 많이 부족할 것으로 예측할 수 있다고 보고하였다. 따라서 보다 높은 가용화 효율을 기대한다면 알칼리 처리를 먼저 진행하여 슬러지의 플록을 파쇄하는 것이 우선적인 것으로 판단된다.

서장원(2010)의 연구자료에서는 전기장처리와 초음파처리를 각각의 단일처리, 병합처리로 가용화율을 확인하였다. 전기장 단독처리의 경우 슬러지 성상에 큰 변화가 없는 것으로 보아 전기장으로 인하여 슬러지의 파괴는 일어나지 않은 것으로 보이고, 병합처리 시 가용화율이 초음파 단독처리 시 가용화율 보다 증가하는 것을 보아 전기장이 초음파 처리와 결합될 경우 전기장에 의한 미생물의 사멸이론에 따라 슬러지 세포벽의 변형 및 미세기공의 형성 등으로 인하여 팽창되고 약화된 세포막이 초음파 전처리의 효과를 더 크게 하여 초음파의 처리효율이 증가한다고 발표하였다. 전기장처리와 초음파처리의 복합처리는 초음파 단독처리보다 높은 슬러지 가용화율을 얻을 수 있어 같은 전력으로 슬러지 처리시간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 슬러지 감량화 및 바이오 가스의 생산효율 증대에 긍정적 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 장 실험재료 및 방법

초음파 전처리를 통한 슬러지의 호기성 소화 효율 향상을 위해 크게 3 가지의 실험을 실시하였다. 실험은 실험실 규모의 반응조를 이용하여 실험실 내에서 실시하였으며, 다음과 같다.

① 초음파에 의한 슬러지 가용화 실험

- 하수슬러지에 초음파를 지속적으로 조사하여 조사시간(조사율)에 따른 슬러지의 가용화율 및 용출율을 파악하고자 하였다.

② 초음파 전처리 후 회분식 호기성 소화 실험

- 하수슬러지에 일정한 범위의 초음파를 조사하여 전처리한 후, 회분식의 호기성 소화 실험을 실시하여, 전처리 효과와 호기성 소화 효율의 관계를 알아보고자 하였다.

③ 초음파 결합형 연속회분식 호기성 소화 실험

- 연속회분식반응조 안에 초음파 조사 장치를 설치하여 호기성 소화 과정에 간헐적으로 초음파를 조사함으로써, 슬러지의 용해율을 높이고 호기성 소화 효율을 높이고자 하였다.

자세한 실험 방법은 다음과 같다.

3.1 슬러지 가용화

본 실험에서 사용한 실험장치는 그림 3.1과 같다. 초음파 반응조는 자체 제작한 것으로 높이 35cm, 외경 20cm, 내경 18cm의 원통형이며, 아크릴로 제작하였고, 반응조 내부에 기계식 교반기(디지털교반기, 미성과학)를 설치하여 120rpm으로 고정하면서 초음파 조사하였다.

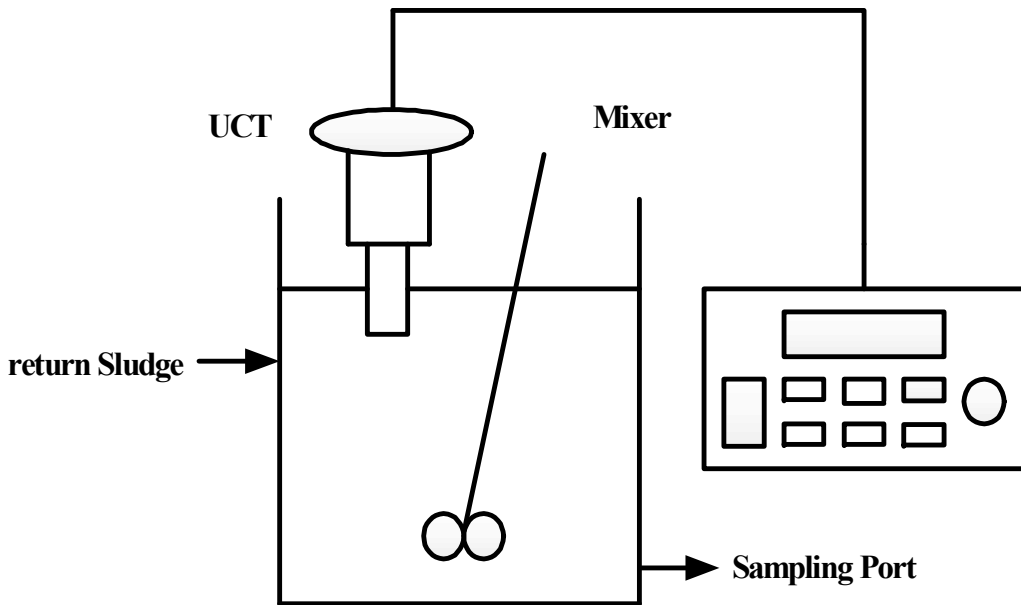


그림 3.1 초음파 전처리 실험 장치

초음파 발생장치는 그림 3.2와 같다. Sonictopia에서 제작한 Ultrasonic Homogenizer STH-200S 모델로 28KHz 고정주파수이며, 최대 출력은 200W이다. 초음파 발생장치의 제원은 표 3.1과 같다.



그림 3.2 초음파 발생장치

표 3.1 초음파 발생장치 제원

| | |
|---------------------|------------------------------------|
| Company Name | Sonictopia |
| MODEL No | STH-200S |
| Input Power | AC220V, 3A |
| Output Power | 200W |
| Interface | 로터리 엔코더, RS232 커멘드 |
| Frequency | 28KHz |
| Dimension(HXWXD) | 120 X 375 X 280(mm) |
| Cable length | 3m |
| Eletric Requirement | 220v/60Hz(접지콘센트) |
| Converter | PZT(3mm X 4ea,PZT-81)Length : 90mm |
| Booster | Ti6-Al4 (STB-2320, Ø30 X 89.6mm) |
| Horn | Ti6-Al4 (STH-2412, Ø24 X 89.9mm) |

실험에 사용된 슬러지는 광주광역시 환경관리공단의 2차 침전지로부터 반송되는 반송슬러지를 채취하여 실험실로 반입하였다. 협작물에 의한 방해요인을 없애고자 #40번 채로 걸러낸 후 추가적으로 중력농축을 시킨 후 실험을 실시하였다. 반송 슬러지의 특성은 표 3.2와 같다.

실험 방법은 유효용적 10L인 초음파 반응조에 반송 슬러지 5L 넣고 교반기를 120rpm으로 고정하였으며 초음파 최대출력 200W의 75%인 150W로 실험을 수행하였고 210분 동안 연속적으로 초음파 조사를 하였다. 시료 채취는 60ml씩 하며 시료채취 시간은 초기에 2분으로 시작하여 5분, 10분, 30분, 1시간 총 10회 실시하여, TS, SS, SCOD, P04-P 등의 변화를 복수실험을 통해 각각 측정하였다.

표 3.2 반송슬러지 수질

| 성분 | | 측정값(mg/L) |
|--------|--------|-----------|
| Solids | TS | 7,310 |
| | VS | 5,830 |
| | FS | 1,480 |
| SS | TSS | 7,200 |
| | VSS | 5,860 |
| | FSS | 1,330 |
| CODcr | TCODcr | 19,200 |
| | SCODcr | 82 |
| P | TP | 357 |
| | P04-P | 17.90 |

3.2 회분식 호기성 소화 실험

초음파 전처리의 유효 범위를 파악하기 위해 우선 초음파 조사율을 0 ~ 0.3Wh/L로 달리한 경우와 0 ~ 40Wh/L로 약 100배가량 높은 경우로 구분하여 실험을 실시하였다. 혐기성 소화 슬러지 15L를 초음파 전처리한 후 반응슬러지 5L와 함께 40L 반응조에 넣고, 반응조 상부에 교반장치를 고정시키고 폭기장치를 설치하였다. 회분식 호기성 소화 실험 장치는 그림 3.3과 같다.



그림 3.3 회분식 호기성 소화 실험 장치

각 반응조의 운전 방법은 표 3.3와 같고, 매일 시료를 채취하여 TS, SCOD, PO4-P 등의 수질항목을 복수실험을 통해 측정하였으며, 포기에 따라 수분의 증발이 발생하였으므로 증발산량을 계산하여 탈이온수를 보충하였고, 측정된 수질항목의 농도는 증발의 효과를 고려하여 보정하였다.

표 3.3 회분식 호기성 소화 실험 운전 방법

| 반응조 | 조사율 (Wh/L) | 동력 (W) | 가동시간 (sec) | 정지시간 (sec) | 총 가동 횟수 | 총 가동시간 (sec) | 조사량 (Wh/L) |
|-----|----------------|--------|------------|------------|---------|--------------|------------|
| R1 | 초음파 전처리 하지 않음. | | | | | | |
| R2 | 0.1 | 100 | 18 | 5 | 3 | 54 | 1.5 |
| R3 | 0.2 | 100 | 18 | 5 | 6 | 108 | 3.0 |
| R4 | 0.3 | 100 | 18 | 5 | 9 | 162 | 4.5 |

(a) 낮은 초음파 전처리 효과 실험의 운전 방법

| 반응조 | 조사율 (Wh/L) | 동력 (W) | 총 가동시간 (min) | 조사량 (Wh) |
|-----|----------------|--------|--------------|----------|
| R1 | 초음파 전처리 하지 않음. | | | |
| R2 | 10 | 200 | 45 | 150 |
| R3 | 20 | 200 | 90 | 300 |
| R4 | 40 | 200 | 180 | 600 |

(b) 높은 초음파 전처리 효과 실험의 운전 방법

3.3 연속회분식 호기성 소화 실험

본 실험에서 사용한 실험 장치는 그림 3.4와 같다. 초음파 반응조와 교반기 및 발생 장치는 초음파 전처리 실험 장치와 동일하고 연속회분식 호기성 소화를 시키기 위해 폭기장치(LP-60A, 고성밸브)를 설치하였다. 유입은 튜빙펌프에 의해 이루어졌으며 유출은 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 운전주기는 24시간으로써 별도의 침전물은 없고, 10분 유입 후에 연속 포기를 실시하였고 23시간 30분에 유출밸브를 열어 슬러지가 자연 유기로 유출되도록 하였다.

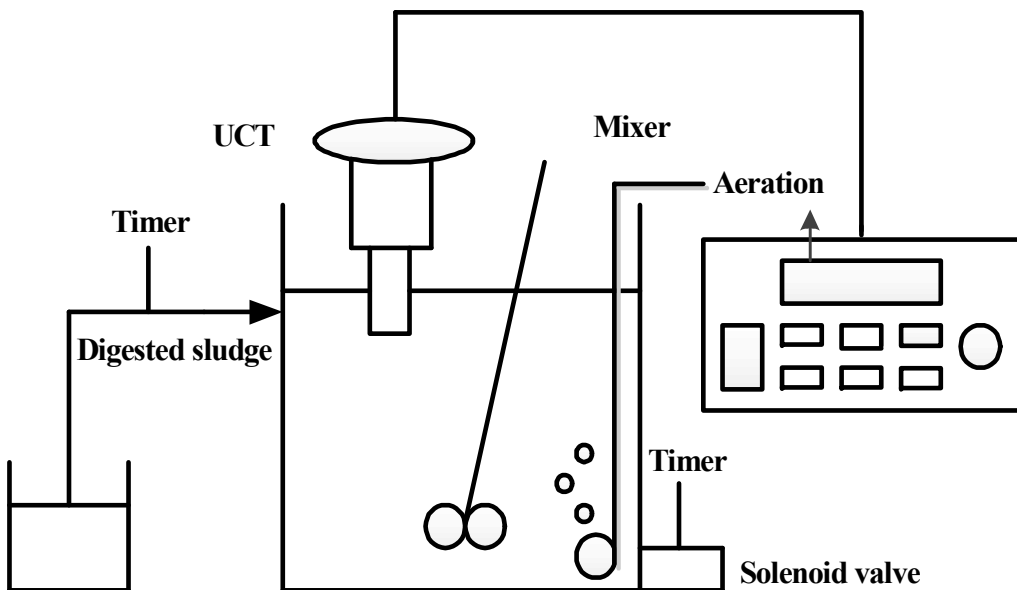


그림 3.4 연속회분식 호기성 소화 실험 장치

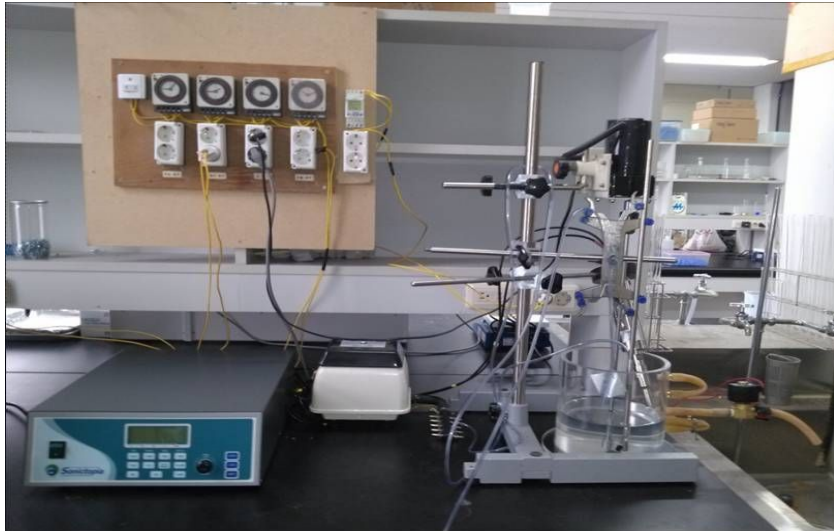


그림 3.5 연속회분식 호기성 소화 실험 장치 사진

본 연구에서는 하루 동안의 연속회분식 호기성 소화 실험 시 슬러지의 성분 변화를 관찰하고자 한다. 실험에 사용된 슬러지는 광주광역시 환경관리공단의 소화슬러지와 2차 치전지로부터 반송되는 반송슬러지를 채취하여 실험실로 반입하였다. 반송슬러지는 #40번체로 걸러낸 후 중력농축을 시켜 실험을 실시하였다. 소화슬러지와 반송슬러지의 수질은 표 3.4에 나타내었다. 교반기는 120rpm으로 고정되었고 유효용적 10L인 초음파 반응조에 소화슬러지 2L 와 반송슬러지 0.5L를 넣었다. 초음파 출력은 최대출력 200W의 70%인 140W로 출력하였고, 조사시간은 4시간 주기로 10분간 총 6번 가동하였다. 이에 따른 성분 변화를 파악하고자 SCOD, PO₄-P, NO₃-N을 복수실험을 통해 측정하였으며, 시료 채취는 약 2시간 간격으로 총 14회 실시하였다.

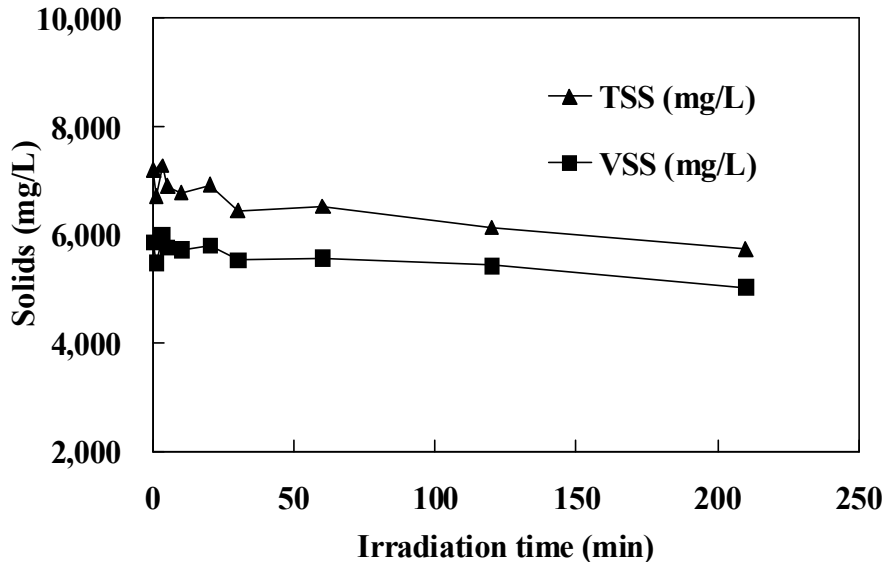
표 3.4 소화슬러지와 반송슬러지 수질

| 성분 | 소화슬러지 | 반송슬러지 |
|--------------------|-----------|-----------|
| SCODcr | 1,620mg/L | 552mg/L |
| PO ₄ -P | 2.59mg/L | 15.11mg/L |
| NO ₃ -N | 176mg/L | 10.27mg/L |

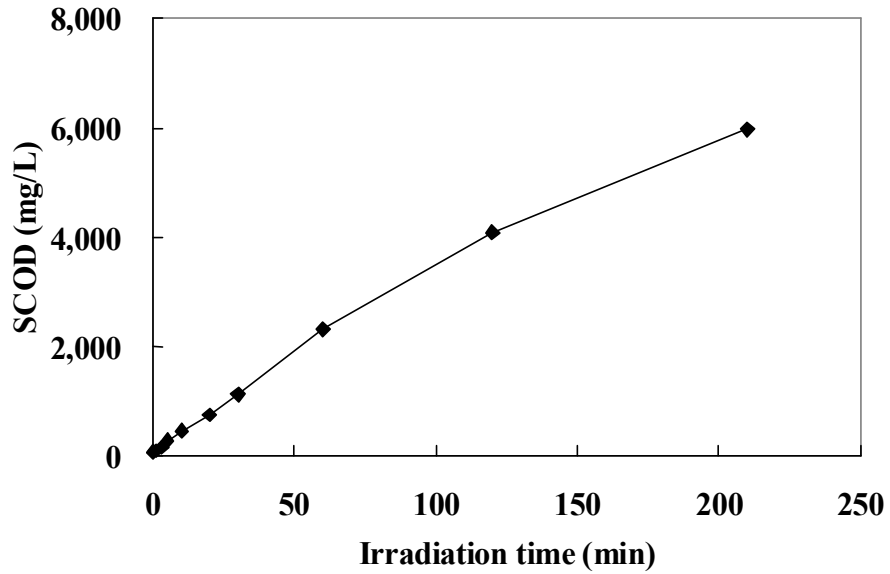
제 4 장 결과 및 고찰

4.1 슬러지 가용화 실험

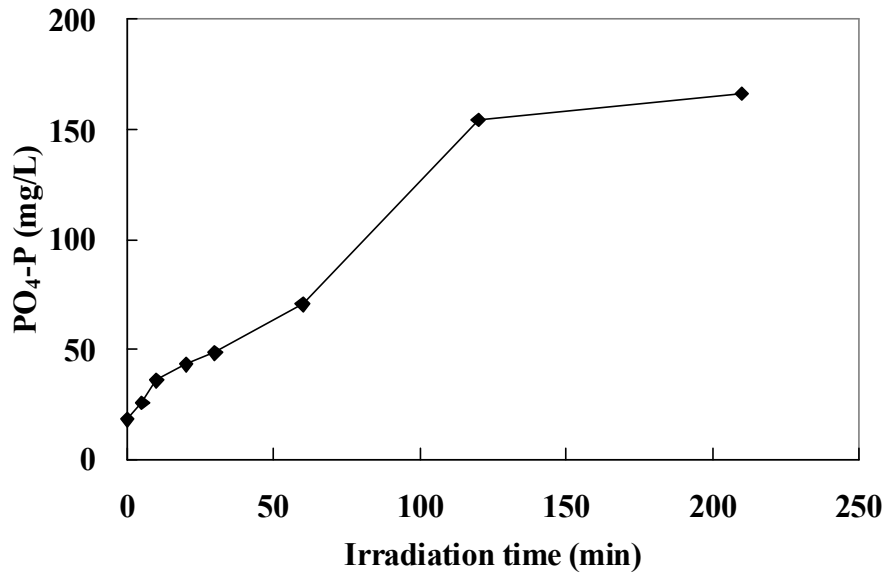
그림 4.1은 초음파 조사 시간에 따른 슬러지의 성분 변화를 나타내었고 210분 동안의 운전에서 주기적으로 시료를 채취하여 TSS, TS, SCOD, PO₄-P의 수질항목을 복수 실험을 통해 측정하였다. TSS, VSS는 초음파 조사 시간에 따라 각각 7,200mg/L ~ 5,733mg/L, 5,876mg/L ~ 5,033mg/L으로 감소하였고, SCOD는 82mg/L에서 5985mg/L까지 약 70배 정도로 크게 증가하였다. PO₄-P는 초음파 조사에 의한 용출된 인으로 인해 18mg/L에서 167mg/L까지 약 9배 증가하였다. TSS, VSS는 초음파 조사에 대해 꾸준히 감소하고, SCOD 역시 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. PO₄-P는 초음파 조사 시간 120분 이후에는 증가가 둔화 되는 것으로 나타났으므로 초음파 조사시간은 120분 정도가 적합하다고 판단된다.



(a) 초음파 조사시간에 따른 TSS, VSS 변화



(b) 초음파 조사시간에 따른 SCOD 변화



(c) 초음파 조사시간에 따른 PO₄-P 변화

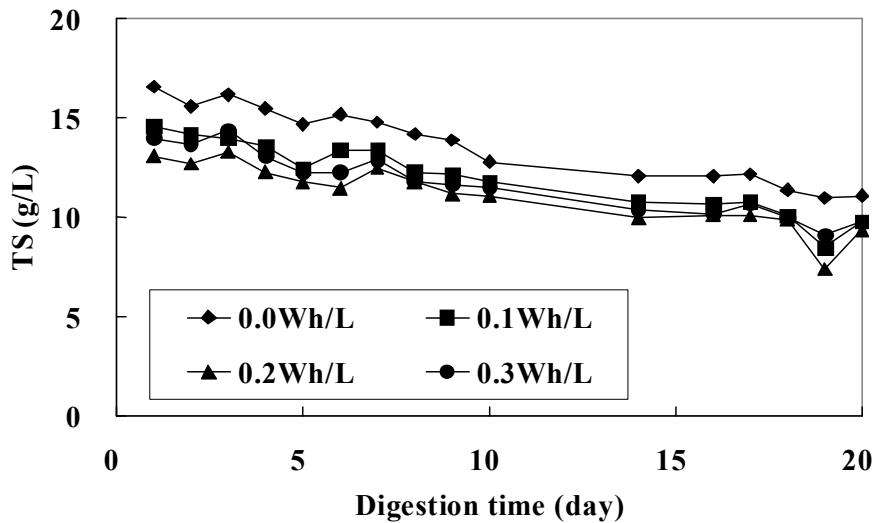
그림 4.1 초음파 조사시간에 따른 반응 슬러지 성분 변화

4.2 회분식 호기성 소화 실험

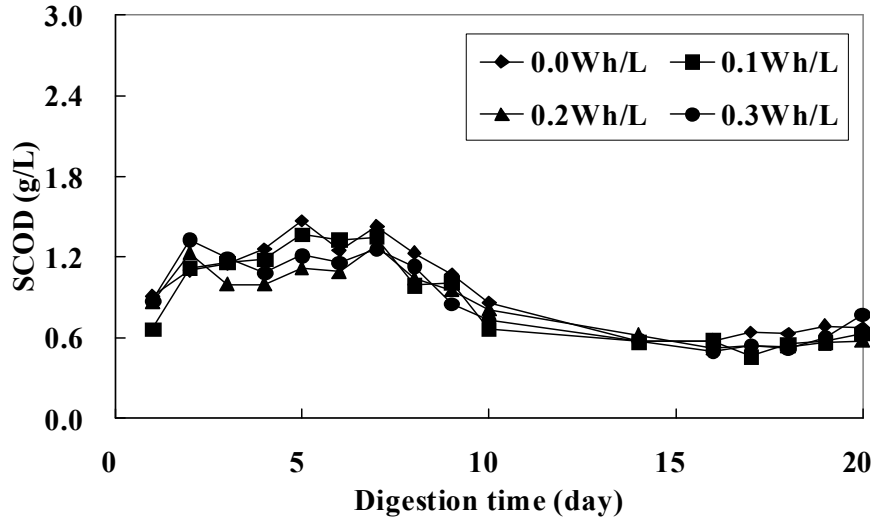
4.2.1 낮은 초음파 전처리와 호기성 소화

그림 4.2는 낮은 초음파 조사율에 따른 슬러지의 성분 변화를 나타내었다. 20일간의 운전에서 TS, VS, Alkalinity, SCOD 등은 지속적으로 감소하였다. TS는 29 ~ 34% 제거되었으나 초음파 전처리를 하는 경우와 하지 않은 경우가 큰 차이를 보이지는 않았다. 이러한 결과는 초음파의 조사율이 서로 큰 차이를 두지 않았기 때문으로 예상된다.

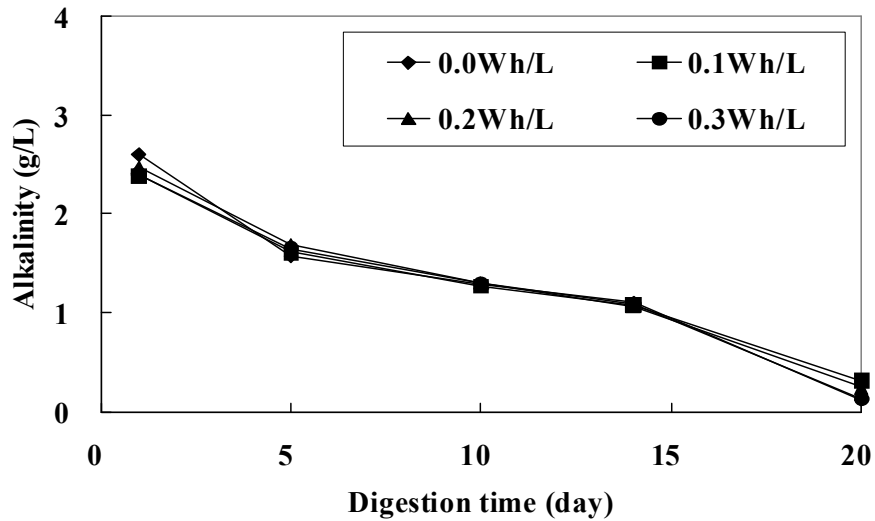
SCOD는 운전 5일동안 가수분해에 의해 일시적으로 증가하다가 슬러지 합성으로 다시 감소하며 17일 이후 난분해성 용존 유기물의 축적으로 점진적으로 증가하는 경향을 보였다.



(a) 낮은 초음파 조사율에 따른 TS 변화



(b) 낮은 초음파 조사율에 따른 SCOD 변화



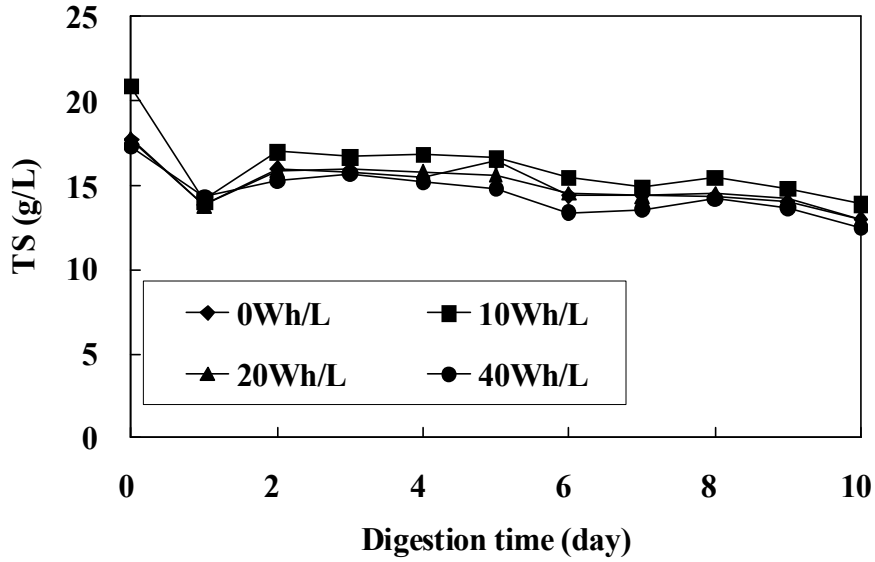
(c) 낮은 초음파 조사율에 따른 알칼리도 변화

그림 4.2 낮은 초음파 조사율에서 소화 슬러지의 성분 변화

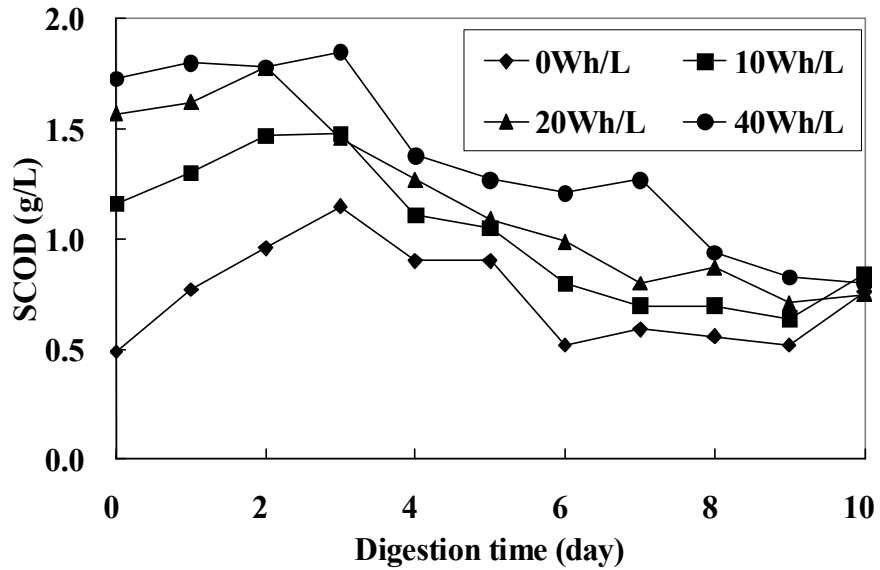
4.2.2 높은 초음파 전처리와 호기성 소화

낮은 초음파 전처리 효과 실험에서 초음파 조사율 별로 소화효율의 차이가 크지 않았으므로 초음파 조사율을 100배 증가시키고 그 차이 또한 크게 하여 호기성 소화실험을 실시하였다.

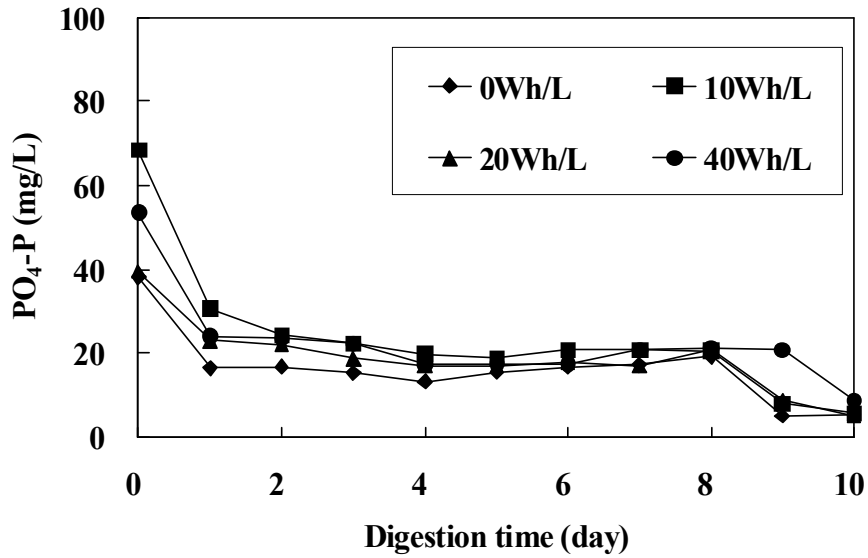
그림 4.3은 높은 초음파 조사율에 따른 슬러지의 성분 변화를 나타내었다. 10일 동안의 운전에서 TS, PO₄-P, TN 등은 지속적으로 감소하였다. TS는 17 ~ 25% 제거되었으나 초음파 조사율 별 경향은 나타나지 않았다. SCOD는 3일 동안 크게 증가하다가 슬러지 합성으로 다시 감소하기 시작하였다. 초음파 전처리를 하지 않은 경우 SCOD는 492mg/L 이지만 초음파를 40Wh/L 전처리한 경우 SCOD가 1,854mg/L까지 증가하였다. 이는 초음파 조사시 미생물의 세포벽을 파괴함으로써 세포 내 존재하는 용해성 유기물질을 방출하여 SCOD가 증가된 것으로 사료된다. 소화가 진행될수록 유기물과 고형물의 농도가 모두 점진적으로 감소하였고, 초음파 조사로 인해 용출된 질소는 질산화와 함께 탈질 반응도 함께 나타나서 TN 농도 역시 지속적으로 감소하였다.



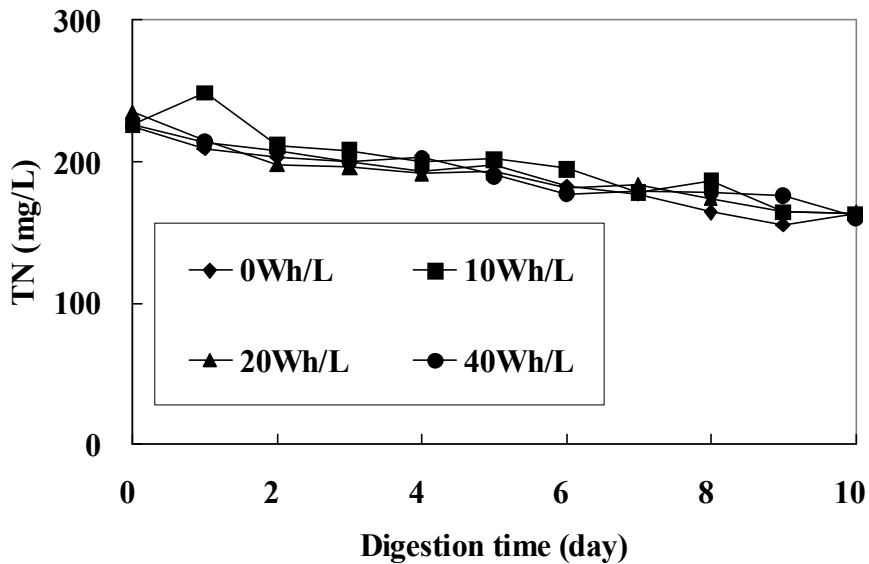
(a) 높은 초음파 조사율에 따른 TS 변화



(b) 높은 초음파 조사율에 따른 SCOD 변화



(c) 높은 초음파 조사율에 따른 PO₄-P 변화

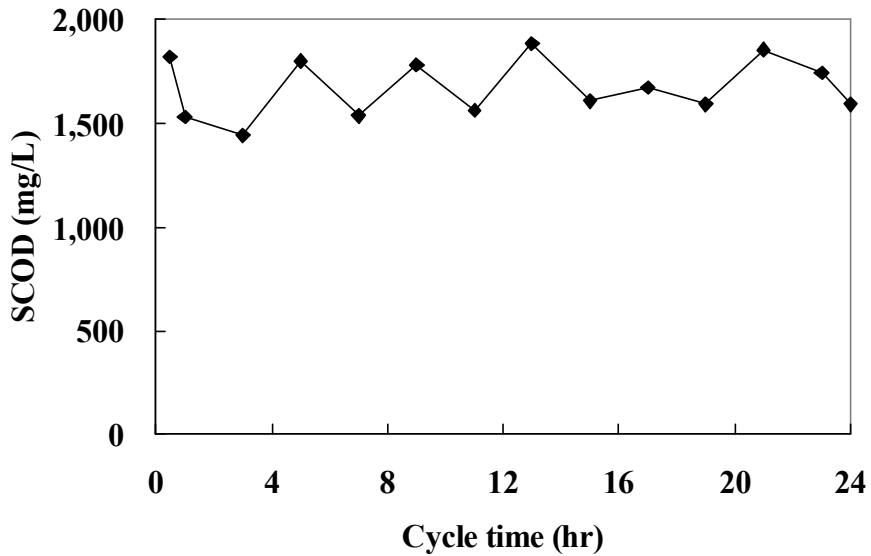


(d) 높은 초음파 조사율에 따른 TN 변화

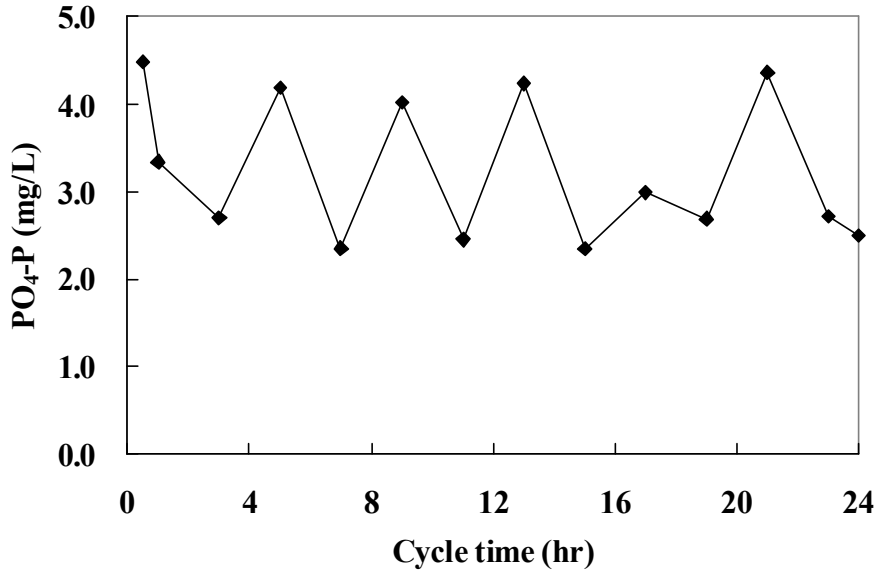
그림 4.3 높은 초음파 조사율에서 소화 슬러지의 성분 변화

4.3 연속회분식 호기성 소화 실험

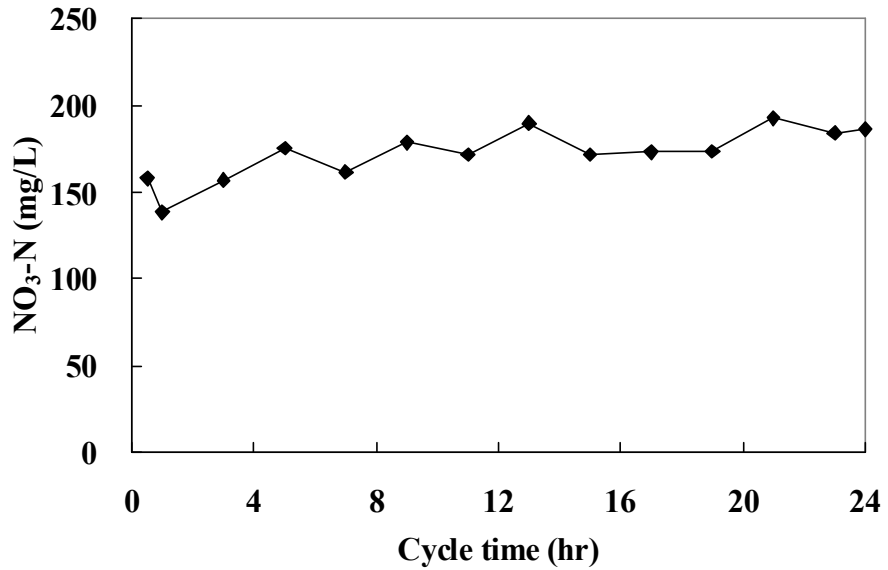
그림 4.4는 연속회분식 반응조에서 간헐적으로 초음파를 조사한 경우의 SCOD, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 주기 변화 특성을 나타내었다. 초음파 조사시점에서 가용화에 따른 SCOD가 증가하는 일정한 경향을 나타내었고 SCOD는 약 1500 - 1800mg/L 범위에서 반복되는데 난분해성 SCOD가 존재하는 것으로 판단된다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 도 마찬가지로 초음파 조사시점에 따라 일정한 주기 거동을 보였다. 초음파 조사시 용출된 질소와 인으로 인해 증가하는 경향이 나타났다.



(a) 초음파 조사에 따른 SCOD 주기 변화 특성



(b) 초음파 조사에 따른 PO₄-P 주기 변화 특성



(c) 초음파 조사에 따른 NO₃-N 주기 변화 특성

그림 4.4 연속 회분식 호기성 소화 슬러지의 성분 변화

제 5 장 결 론

초음파 캐비테이션을 이용한 전처리 기술이 슬러지의 호기성소화에 미치는 영향을 실험하고, 연속회분식 반응조에 적용하여 유기물의 변화 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 조사 시간에 따른 슬러지의 성분 변화를 분석한 결과 TSS, VSS는 지속적으로 감소하는 경향을 보였고, 초음파 가용화에 따라 SCOD는 지속적으로 증가하였다. PO₄-P는 초음파 조사에 의해 용출된 인으로 인해 초기에 증가하는 경향을 보였으나, 조사시간 120분 이후에는 증가가 둔화 되는 것으로 나타났으므로 초음파 조사 시간은 120분 정도가 적합하다고 판단된다.
2. 초음파 조사 후 호기성 소화에 따라 TS, SCOD, Alkalinity는 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 초음파 조사량과 무관하게 20일간의 운전과 10일간의 운전에서 각각 약 29 ~ 34%, 17 ~ 25%감소하고 Alkalinity는 약 2,500mg/L에서 거의 200mg/L 수준까지 감소하였다. SCOD는 호기성 소화 초기에는 일시적으로 증가한 이후 슬러지 합성으로 인해 다시 감소하였다.
3. 초음파 조사에 따른 주기 변화 특성 결과 초음파 조사시점에 따라 SCOD, PO₄-P는 용출과 세포합성에 따라 증가와 감소가 반복하는 것으로 나타났다. 초음파 조사시점에서 가용화에 따른 SCOD는 약 1500 ~ 1800mg/L 범위에서 반복되는데 난분해성 SCOD가 존재하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 김광인(2011), 초음파 전처리 슬러지의 2단 혐기성 소화 특성 연구, 성균관대학교 석사학위논문
- 2) 김성홍, 김희준, 정태학(2002), 간헐포기에 의한 슬러지의 호기성 소화 기술, 대한토목학회논문집, 22(2), pp. 245~252
- 3) 김재형, 양홍규, 이준철, 박홍선, 최광근, 박대원(2011), 알칼리처리와 초음파처리를 이용한 슬러지 가용화 연구, 에너지공학, 20(2), pp. 84~89
- 4) 고현웅, 정병길, 정연화, 김형석, 장성호, 성낙창(2004), 회분식 초음파 전처리를 이용한 하수슬러지의 분해에 관한 연구, 유기물자원화, 12(4), pp. 121~129
- 5) 동효선(2010), 초음파 오존처리에 의한 하수슬러지 재이용 방안, 서울산업대학교 석사학위논문
- 6) 모우종(2012), 초음파와 전기장 처리에 의한 하수슬러지 탈수성 향상에 관한 연구, 인하대학교 석사학위논문
- 7) 서장원(2010), 전기장과 초음파를 이용한 유기성슬러지의 가용화 특성 연구, 인하대학교 석사학위논문
- 8) 최인수, 정희석, 한인섭(2009), 하수슬러지 가용화와 하수처리 운전조건 개선을 통한 하수슬러지 발생저감 연구, 대한환경공학회지, 31(12), pp. 1113~1122
- 9) 최홍복, 황경엽, 신웅배(1996), 하수슬러지 전처리에 의한 혐기소화 향상, 한국수질보전학회지, 12(4), pp. 401~407

- 10) 하범용(2006), 초음파 전처리가 하수슬러지의 혐기성 소화에 미치는 영향, 단국대학교 박사학위논문
- 11) 한금석, 최예덕, 최현숙, 노진상, 김영진, 최영준, 박용상(2010), 슬러지 전처리방법에 따른 가용화율 비교평가 연구, 대한상수도학회·한국물환경학회 2010공동 추계 학술발표회 논문요약집, pp. 179~180
- 12) 허진(2011), 전처리 방법에 따른 하수슬러지의 생분해성 촉진 효과 비교 연구, 성균관대학교 석사학위논문
- 13) 환경부, 2011 하수도통계, 2012
- 14) 환경부, 런던협약 '96 의정서 발효에 따른 하수슬러지관리 종합대책, 2007
- 15) Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R.(2008), Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Energy Comb. Sci., 34, pp. 755~781
- 16) Chen, Y., Yand, H., and Gu, G.(2001), Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling, Wat. Res., 35(11), pp. 2615~2620
- 17) Knap, J. S. and Howell, J. A.(1978), Treatment of Primary sludge with Enzymes, Biotechnol. Bioeng., 20, pp. 1221~1234
- 18) Li, Y. Y. and Noike, T.(1992), Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment, Wat. Sci. Tech., 26(3-4), pp. 857~866
- 19) Metcalf and Eddy.(2004), 폐수처리공학 II, pp. 1699~1714

- 20) Mo, S. Y., Son, J. R., Kim, M. S., Jang, H. K. and Lee, G. J.(1998), Kinetics of the sonolytic reaction of nondegradable organic compounds in aqueous solution, Korean Society of Environmental Engineers, 22(3), pp. 325~340
- 21) Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K. and Bildan, M. L. S.(1997), Effects of thermochemical pre-treatment on the anaerobic digestion of waste activated sludg,. Water Sci. Tech, 35, pp. 209~215
- 22) Hung, W. T., Feng, W. H., Tsal, I. H., Lee, D. J. and Hong, S. G.(1997), Uni-directional Freezing Versus Radial Freezing, Wat. Res., 31(9), pp. 2219~2228

감사의 글

학·석사 연계과정으로 시작된 석사기간 동안 경험과 지식 등 중요한 가르침을 얻었습니다. 석사기간동안 도움을 준 많은 분들께 감사하고 석사논문 속 감사의 글을 통해 감사의 마음을 전하고자 합니다.

지도교수님이신 김성홍 교수님 감사합니다. 교수님께서서는 석사기간 동안 좋은 방향으로 나갈 수 있게 지도해주시고 자상함과 따뜻함으로 이끌어 주셨습니다. 교수님의 가르침을 바탕으로 제 자신을 발전시킬 수 있었습니다. 교수님과 함께했기에 석사과정을 잘 마무리 할 수 있었습니다.

그리고 박길현 교수님, 김운중 교수님, 김대현 교수님, 박정웅 교수님, 이원희 교수님, 박상준 교수님의 열정적인 지도와 심사에도 진심으로 감사드립니다. 교수님들의 가르침에 졸업논문을 잘 마무리 할 수 있었습니다.

다음으로 대학원 생활 동안 항상 함께했던 동기들에게 감사의 마음을 전하고, 좋은 추억을 만들어준 대학원 선·후배 분들과 대학 선·후배 분들에게도 감사의 마음을 전합니다.

언제나 든든한 버팀목이 되어준 나의 친구들에게도 감사의 마음을 전합니다. 친구들에게도 든든한 버팀목이 될 수 있도록 나날이 발전하는 친구가 되도록 노력하겠습니다.

마지막으로 대학원 생활동안 믿어주시고 응원해주신 어머니, 아버지, 형에게 감사와 사랑한다는 말을 전합니다.