



ORIGINAL PAPER

원저

회분식 초음파 전처리를 이용한 하수슬러지의 분해에 관한 연구

고현웅, 정병길*, 정연화**, 김형석***, 장성호****, 성낙창*

(주) 제시엔 중앙연구소, 동아대학교 환경공학과*, 부산광역시 환경시설공단**, 신라대학교 환경공학과***, 국립밀양대학교 환경공학과****

(2004년 11월 20일 접수, 2004년 11월 26일 채택)

A Study on the Disintegration of Sewage Sludge using Batch Ultrasonic Pretreatment

Hyun-Woong Ko, Byung-Gil Jung*, Yon-Hwa Jung**, Hyeung-Seok Kim***, Seong-Ho Jang****, Nak-Chang Sung

R&D Center, XXIEN Co., Ltd.

Department of Environmental Engineering, Dong-A University*, Busan Metropolitan City Environmental Installations Corporation**, Department of Environment Engineering, Silla University***, Department of Environment Engineering, Miryang National University****

ABSTRACT

Anaerobic digestion is the most common process for sewage sludge stabilization and has benefits of VS reduction and biogas production. Many pretreatment methods have been studied to improve hydrolysis rate because the rate of sewage sludge degradation is slow in anaerobic digestion.

This study mainly focused upon the effects on disintegration of sewage sludge by ultrasonic pretreatment according to the variation of acoustic density and duration of sonication time. In this study, acoustic density has been changed as follows : 33W/L, 70W/L, 88W/L, 139W/L in case of 40 kHz with the test time changes of 10min, 20min, 25min, 30min and 40min.

In the comparison of $SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}$ variation for excess sludge and mixed sludge disintegration, the rates of $SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}$ have been increased in the condition of denser acoustic density and longer sonication time with acoustic frequency of 40kHz. The pH of the excess sewage sludge and mixed sewage sludge has been decreased in the condition of denser acoustic density and longer sonication time with acoustic frequency of 40kHz.

Keywords : Sludge, Disintegration, Ultrasonic Pretreatment, Sonication, Acoustic Density

초 록

혐기성 소화공정은 하수슬러지의 안정화와 VS 감소 및 바이오가스 생산의 장점으로 인해 가장 일반적인 하수슬러지 처리공정이다. 혐기성 소화공정에서 하수슬러지의 분해속도가 느리기 때문에 가수분해 속도를 향상시키기 위한 많은 전처리 방법들이 연구되어져 왔다.

본 연구에서는 주로 초음파의 음향강도와 조사시간에 따른 하수슬러지의 초음파 분해에 대한 영향을 검토하였다.

본 연구에서는 주로 초음파의 음향강도와 조사시간에 따른 하수슬러지의 초음파 분해에 대한 영향을 검토하였다. 실험은 초음파의 발진주파수를 40kHz로 하여 초음파 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 및 139W/L로 변화시켜 조사하였고, 초음파 조사시간을 각각 10분, 20분, 25분, 30분, 그리고 40분으로 변화시켜 잉여슬러지와 혼합슬러지의 분해 정도를 평가하였다.

잉여슬러지와 혼합슬러지 분해에 대한 $SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}$ 비의 변화 비교에서 초음파 발진주파수가 40kHz 일 때 초음파의 음향밀도가 증가할수록 그리고 조사시간이 길어질수록 $SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}$ 의 비가 증가함을 보였다. 초음파 전처리 후에 잉여슬러지와 혼합슬러지의 pH는 발진주파수 40kHz에서 음향밀도가 증가할수록 그리고 조사시간이 길어질수록 감소하였다.

핵심용어 : 슬러지, 분해, 초음파 전처리, 초음파조사, 음향밀도

1. 서론

슬러지 처분은 폐수처리 공정에서 운영비가 많이 소요되는 주된 공정의 하나이며, 최근에 와서 증가하는 슬러지 처분에 관한 규제들로 인하여 슬러지의 적정 처분의 필요성이 대두되었고 슬러지 처분 비용도 많아지게 되었다.¹⁾

2001년말 현재 우리나라의 하수처리시설은 전국에 184개소가 가동되고 있으며, 이러한 하수처리시설이 가동됨에 따라 연간 약 1,902,410톤의 하수슬러지가 발생되었으며, 처리량은 총 1,897,016톤으로서 이중 해양투기로 처분된 양이 1,391천톤으로 전체의 73.1%를 차지하며, 육상매립 229천톤(12.0%), 재이용 118천톤(6.2%), 그 외 소각(7.3%), 기타의 방법으로 처분하고 있다.²⁾

하수슬러지를 처리함에 있어 해양투기로 대부분 처리하는 것은 2000년 7월에 폐기물관리법의 개정에 따른 것으로 생각되어지며, 개정된 폐기물관리법 시행규칙에 따르면 1일 처리용량이 10,000m³ 이상의 하수종말처리시설 및 폐수종말처리시설에서 배출되는 유기성 슬러지에 대한 함수율이 75%를 넘는 경우에 직매립을 금지하고 있다. 또한, 2005년 1월부터 축산폐수처리시설과 분뇨처리시설에서 배출되는 슬러지까지 확대 적용하게 될 예정이며, 금명간 해양투기 역시 1998년 런던협약에 따른 해양투기 금지에 관한 입법이 예고되는 등의

각종 규제강화로 인해 처리가 심각한 사회문제로 대두되고 있어 하수슬러지의 효과적인 처리, 처분 방법의 개발과 함께 발생량의 감소가 절실히 요구된다.

하수슬러지의 대부분을 차지하고 있는 호기성 박테리아는 세포벽이 두꺼워 쉽게 분해되지 않고, 혐기성소화 단계가 가수분해단계, 산형성단계, 메탄형성단계로 이루어지는 다단계 반응이기 때문에 긴 체류시간이 요구됨에도 불구하고 유기물 제거 효율은 저조한 실정이다.

중전에는 혐기성소화의 율속단계(limiting step)는 메탄형성단계로 추정되었으나, 최근 연구에 따르면 가수분해단계가 율속단계로 받아들여지고 있다.^{3),4)} 따라서, 미생물의 세포벽을 파괴하여 가수분해를 유도하고 이로 인하여, 차단되었던 양질의 유기물을 용출시키기 위한 적절한 전처리방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재까지 연구된 슬러지의 안정화와 감량화에 대한 효과적인 개선을 위한 전처리공정은 열처리나 세포벽을 분해할 수 있는 효소 첨가에 의한 전처리, 화학적 처리, 기계적 처리, 오존 처리⁵⁾, 전자빔 처리⁶⁾, 초음파 처리⁷⁾ 등 여러 방법이 연구되어지고 있다.

특히, 하수슬러지의 전처리 방법 중 초음파 처리는 높은 음향강도에서 슬러지를 처리함으로써 침강성이 악화되고 에너지가 많이 소비된다는 단점을 가지고 있으나, 슬러지 생산의 감소 및 소화공

정의 효율향상을 가능하게 할 수 있어 하수슬러지의 전처리 방법으로 뛰어난 잠재성을 가진 것으로 평가되어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 대체로 분해가 잘 되지 않는 하수슬러지를 대상으로 초음파 전처리에 적용하기 위한 조사밀도와 조사시간에 따른 하수슬러지의 분해 특성변화를 파악하고 비교·검토하여 혐기성 소화의 전처리 방법으로 이용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 장치

2.1 실험재료

2.1.1 하수슬러지

2.1.1.1 잉여슬러지(Excess sewage sludge)

초음파 전처리에 이용된 잉여슬러지는 부산광역시환경시설공단 남부사업소에서 채취하였다. 남부사업소의 하수처리기는 표준활성슬러지법을 채택하고 있으며, 슬러지 처리에는 중온혐기성 소화를 채택하고 있다.

남부사업소의 처리규모는 340,000m³/일이며, 주로 생활하수가 유입되고 있다. 잉여슬러지는 1차 슬러지와 혼합되기 직전의 배관에서 채취하였고, 채취된 잉여슬러지는 협잡물을 제거하기 위해 2.36mm의 mesh로 여과하고, 12시간 동안 중력 침전 후 상등액을 제거한 것을 초음파 전처리에 사용하였다. 채취된 잉여슬러지는 연구기간동안 미생물 반응을 피하기 위해 4°C에서 냉장 보관하였다.

2.1.1.2 혼합슬러지(Mixed sewage sludge)

본 실험에서 초음파 전처리에 이용된 혼합슬러지는 부산광역시환경시설공단 남부사업소에서 채취하였다. 남부사업소는 표준활성슬러지법으로 운전되는 처리규모 340,000m³/day의 하수처리장으로 주로 생활하수가 유입되고 있다. 혼합슬러지는 1차 침전 후 중력 농축된 1차 슬러지와 2차 침전 후 원심 농축된 잉여슬러지가 3:1의 비율로 혼합되어 소화조로 유입되기 직전의 배관에서 채취하였으며, 채취된 혼합슬러지는 협잡물을 제거하기 위해 2.36mm의 mesh로 여과 후 초음파 전처리를 실시하였다. [Table 1]에 본 실험에 사용한 잉여슬러지와 혼합슬러지의 특성을 제시하였다.

2.2 실험장치 및 방법

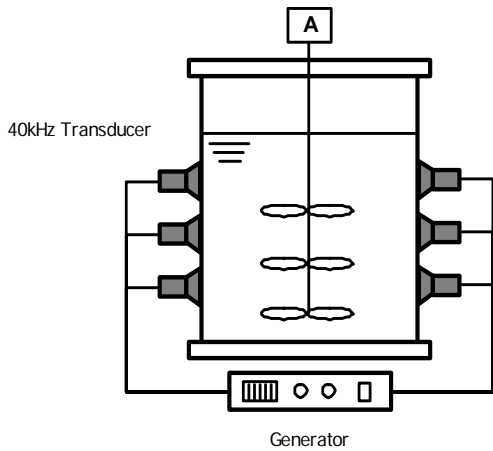
2.2.1 초음파 전처리 장치

본 실험에 사용된 회분식 초음파 전처리 실험장치의 개략도와 사진을 [Fig. 1]와 [Fig. 2]에 각각 나타내었다. 반응기는 너비 9.5cm, 폭 7cm, 높이 20cm의 SUS 304 재질로 제작되었으며, 반응기의 유효용적은 10L였다. 또한 적절한 혼합과 물의 증발을 막기 위해 플라스틱 덮개가 달린 교반기가 반응기 내에 설치되었다.

반응기의 마주보는 평면에는 24개의 40kHz 압전진동자가 설치되었다. 진동자는 직경이 5.0cm이며 최대출력은 50W이다. 반응기는 40kHz의 주파수를 발생시키는 발전기에 연결하였다. 전류조절기를 이용하여 전류강도가 제어되었으며, 클램프테스터(SJ6000, Sejin, Korea)로 모니터링되

[Table 1] Characteristics of Excess Sewage Sludge and Mixed Sewage Sludge

Items	Sewage sludge	
	Excess sewage sludge	Mixed sewage sludge
TCOD(mg/L)	11,000~12,300	26,600~26,800
SCOD(mg/L)	84~407	684~1,900
TS(%)	1.6~1.7	3.9~5.6
VS(%)	47.0~52.0	37.0~38.0
pH	6.3~6.7	6.2~6.3



[Fig. 1] Schematic diagram of ultrasound processor.



[Fig.2] Photograph of ultrasound processor.

[Table2] Physical Dimensions and Characteristics of Dual Frequency Processor

Frequency(kHz)	40
Diameter of the transducer(cm)	4.5
Number of transducers	24
Total area of dissipation(cm ²)	382
Sonication Volume(L)	10.0

었다. 반응기는 40kHz 단독으로 운전하였으며, 초음파 진동자와 및 반응기의 물리적 치수 (dimension)와 특성을 [Table 2]에 나타내었다.

2.2.2 실험방법 및 분석항목

본 실험에서는 초음파 조사가 하수슬러지의 분해 특성에 미치는 영향을 알아보기로 하여 잉여슬러지와 혼합슬러지를 대상으로 하여 그 변화를 관찰하였다. 10L의 잉여슬러지와 혼합슬러지를 초음파 반응조에 유입시켜 40kHz의 주파수로 초음파를 조사하였다. 40kHz의 경우 초음파 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 및 139W/L로 각각 변화시켜 조사하였고, 조사시간을 각각 10분, 20분, 25분, 30분, 그리고 40분으로 변화시켜 초음파를 조사하여 그 영향을 관찰하고자 하였다.

시료에 대한 분석은 초음파 전처리 전과 후의 슬

러지를 대상으로 하여 분석하였으며, 초음파 전처리 전의 시료와 처리된 시료는 10,000rpm에서 10분간 원심분리 후 상등액을 0.45 μm 여지로 여과하여 여과된 여액은 4℃에서 보관하며 분석하였다. 본 실험의 항목별 분석방법을 [Table 3]에 나타내었다. 분석항목은 TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}, TS, VS, pH, 온도 등이며, pH는 pH meter로 측정하였고, TS와 VS는 수질오염공정시험법,⁸⁾ TCOD_{Cr}과 SCOD_{Cr}은 Standard Methods⁹⁾에 준하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잉여슬러지

3.1.1 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 변화

[Fig. 3]은 주파수 40kHz 조사시 조사밀도의

[Table3] Summary of Analytical Methods

Items	Units	Method and instrument
pH	—	pH meter(ORION 310), Korea
Temp.	℃	Thermometer
TCOD _{Cr}	mg/L	Standard methods Closed reflux titrimetric method
SCOD _{Cr}	mg/L	Standard methods Closed reflux titrimetric method
TS	%	Total suspended solids dried an 103~105℃
VS	%	Volatile suspended solids ignited at 550℃

변화에 따른 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 변화를 나타낸 그림이다.

미처리된 잉여슬러지의 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}는 0.033으로 나타났으며, [Fig. 3]을 살펴보면, 초음파 조사시간이 25분일 때, 특히 조사밀도 88W/L와 139W/L에서 가장 큰 폭으로 상승하였다. 그리고 초음파 조사시간이 40분일 경우 그 미처리된 슬러지보다 전처리된 슬러지의 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 비가 초음파 조사밀도에 따라 각각 2.2, 3.1, 6.2 그리고 8.3 배 정도 증가하였다. 이는 초음파 처리를 통해 슬러지의 생분해성이 크게 증가한다고 할 수 있으며 이러한 결과는 Tiehm 등⁷⁾과 신성하¹⁰⁾의 연구결과와도 일치한다.

이것은 주파수가 낮은 쪽이 공동화 현상이 일어나기 쉽고 주파수가 높을수록 기포가 팽창하는 상태의 주기가 짧아져 기포가 성장 할 수 있는 충분한 시간이 주어지지 않기 때문이라고 할 수 있으

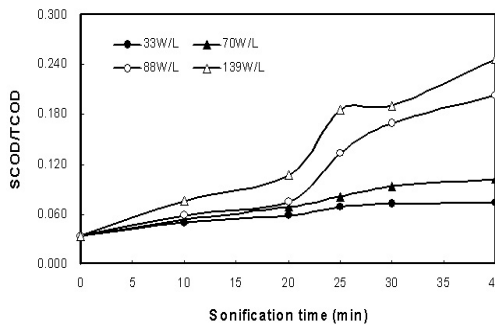
며, 이로 인해 액상 속에서 기포가 생성될 때까지의 소요시간이 길어져 기포의 생장률이 감소하여 충분히 성장한 기포가 깨어질 때 발생하는 충격파의 압력이 감소되어 반응이 저하되었기 때문이라고 할 수 있다.

3.1.2 SCOD_{Cr}의 변화

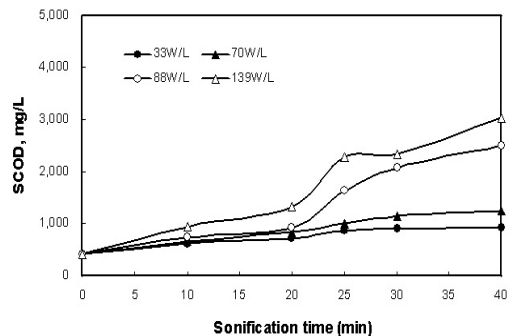
[Fig. 4]는 초음파 조사시 조사밀도의 변화에 대한 SCOD_{Cr}의 변화를 나타낸 그림이다.

초음파 조사시간의 증가에 따라 SCOD_{Cr}의 증가 현상은 초음파 조사밀도가 33W/L와 70W/L에서는 뚜렷한 증가 경향을 보이지 않고 있으나, 88W/L와 139W/L에서는 조사시간 25분 이후부터 급격한 증가를 나타내고 있다.

또한, 미처리된 잉여슬러지의 SCOD_{Cr}는 407mg/L를 나타내었으며, 초음파 조사시간 40분에서 전처리된 잉여슬러지의 SCOD_{Cr}는 초음파 조



[Fig. 3] Variation of SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr} of excess sewage sludge according to acoustic density.



[Fig. 4] Variation of SCOD_{Cr} of excess sewage sludge according to acoustic density.

사밀도가 33W/L일 때 905mg/L로 약 2.2배 증가 하였으며, 70W/L일 때 1,250mg/L로 약 3.1배, 88W/L에서 2,500mg/L로 6.1배 증가하였고, 또한 139W/L에서 3,020mg/L로 약 7.4배 증가한 것으로 나타났다.

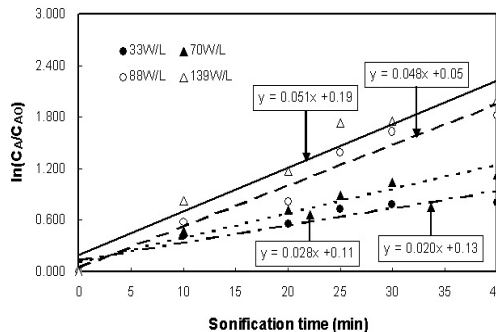
이것은 권재현¹¹⁾ 등의 잉여슬러지에 대한 전처리 연구에 의하면 전력이 높을수록 SCOD_{Cr}의 농도가 증가하였다는 결과와 일치하며, 이상의 결과에서 초음파 조사시간과 초음파 조사밀도 그리고 시료의 고형물 농도 등이 슬러지의 가용화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.1.3 용출속도 비교

[Fig. 5]는 초음파 조사밀도의 변화에 따른 용출속도의 변화를 나타내었다.

그림을 살펴보면, 조사밀도가 139W/L에서 초음파 조사시간이 40분일 경우 가장 높은 2.004의 용출율을 나타내고 있으며, 조사밀도가 88W/L에서 초음파 조사시간이 25분일 때 가장 높은 증가율을 나타내었다.

또한, 조사밀도가 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 그리고 139W/L로 변화할 때 유사 1차 반응의 경향을 나타내었으며 이때의 용출속도상수, R은 각각 0.020, 0.028, 0.048 및 0.051min⁻¹로 나타나 조사밀도가 88W/L일 경우 139W/L에 비해 크게 차이가 나지 않으면 전력소모량을 비교해 볼 때 88W/L로 조사했을 때가 가장 최적의 조건이라고



[Fig. 5] Variation of extraction rates of excess sewage sludge according to acoustic density.

판단된다.

3.1.4 pH의 변화

[Fig. 6]은 초음파 조주시 초음파 조사밀도에 따른 pH의 변화를 나타낸 그림이다.

초음파 조사밀도가 클수록 조사시간이 증가할수록 pH는 감소하는 경향을 나타내었다. 미처리된 잉여슬러지의 최초 pH는 6.33이었으나 초음파 조사시간 40분에서 조사밀도 33W/L일 때 pH는 6.06까지 감소하였으며, 70W/L에서 5.95, 88W/L에서 5.88, 139W/L에서 5.83까지 감소하였다.

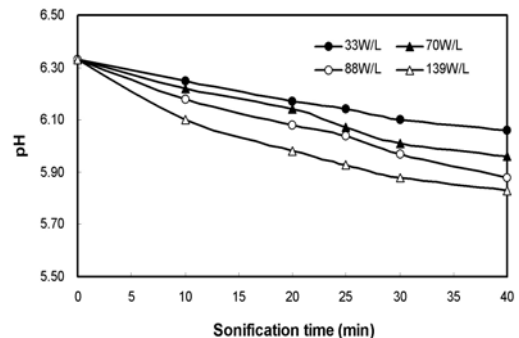
모세영¹²⁾ 등의 연구에서 난분해성 유기화합물이 포함된 수용액 중에서 초음파 조사시간이 증가할수록 pH가 감소하는 것으로 보고하고 있다.

3.2 혼합슬러지

3.2.1 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 변화

[Fig. 7]은 초음파 조사밀도의 변화와 초음파 조사시간에 따른 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 변화를 나타낸 그림이다.

미처리된 혼합슬러지의 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}는 0.071로 나타났으며, 초음파 조사시간이 40분일 때, 각 조사밀도에서 최대값을 나타내었다. 이때 초음파 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 그리고 139W/L로 변화시켜 조사하였을 때,



[Fig. 6] Variation of pH of excess sewage sludge according to acoustic density.

SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}가 각각 0.097, 0.118, 0.158 및 0.176로 나타났다 그리고 초음파 처리시간이 40분일 경우 그 미처리된 슬러지보다 전처리된 슬러지의 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 비가 조사밀도에 따라 각각 1.4, 1.7, 2.2 그리고 2.5 배 정도 증가하였다.

3.2.2 SCOD_{Cr}의 변화

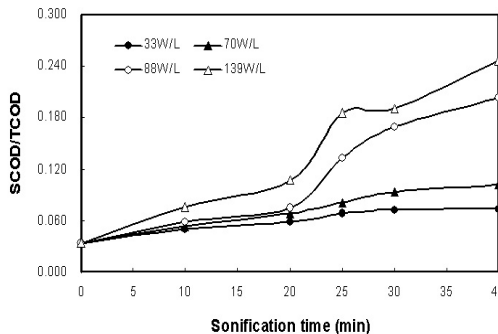
[Fig. 8]은 초음파 조사시 조사밀도의 변화에 대한 SCOD_{Cr}의 변화를 나타낸 그림이다.

미처리된 혼합슬러지의 SCOD_{Cr}는 1,900mg/L를 나타내었다. 초음파 조사시간 40분에서 전처리된 혼합슬러지의 SCOD_{Cr}는 초음파 조사밀도가 33W/L일 때 2,580mg/L로 약 1.4배 증가하였으며, 70W/L일 때 3,140mg/L로 약 1.7배, 88W/L에서 4,200mg/L로 2.2배 증가하였고, 또한 139W/L에서 4,675mg/L로 약 2.5배 증가한 것으로 나타났다.

강호¹³⁾ 등의 연구에 의하면 농축슬러지에 전자선을 조사하였을 경우 SCOD_{Cr}의 농도가 증가한 것으로 보고되었다. 이와 마찬가지로 초음파로 하수슬러지를 조사하였을 경우, 슬러지를 양질의 기질로 전환시킬 수 있다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

3.2.3 용출속도 비교

[Fig. 9]는 초음파 조사밀도의 변화에 따른 용출속도의 변화를 나타내었다.



[Fig. 7] Variation of SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr} of mixed sewage sludge according to acoustic density.

[Fig. 9]에서 조사밀도가 139W/L에서 초음파 조사시간이 40분일 경우 가장 높은 0.900의 용출율을 나타내었다.

초음파 조사밀도가 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 그리고 139W/L로 변화할 때 유사 1차 반응의 경향을 나타내었으며 이때의 용출속도상수, R은 각각 0.008, 0.013, 0.020 및 0.023min⁻¹로 나타나 조사밀도가 139W/L일 경우가 가장 용출이 잘 일어나나 전력소비량 등의 경제성을 고려한다면 조사밀도가 88W/L가 가장 최적이라고 판단된다.

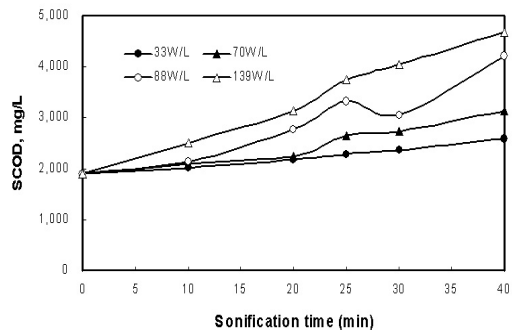
3.2.4 pH의 변화

[Fig. 10]은 주파수 40kHz의 초음파 조사시 조사밀도에 따른 pH의 변화를 나타낸 그림이다.

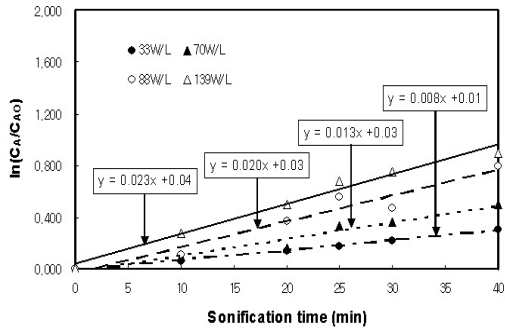
초음파 조사밀도가 클수록 조사시간이 증가할수록 pH는 감소하는 경향을 나타내었다. 미처리된 혼합슬러지의 최초 pH는 6.28로 나타내었다. 초음파 조사시간 40분에서 조사밀도 33W/L일 때 pH는 6.12까지 감소하였으며, 70W/L에서 6.09, 88W/L에서 6.05, 139W/L에서 6.00까지 감소하였다.

4. 결론

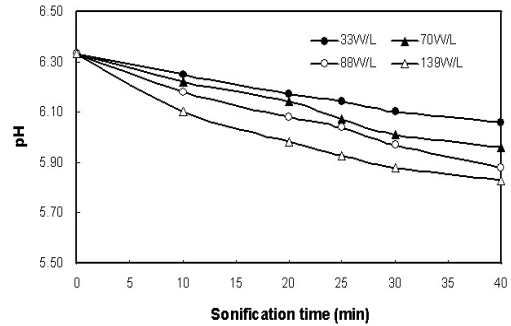
하수슬러지의 전처리 방법으로 초음파 조사밀도와 조사시간을 변화시켜 처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



[Fig. 8] Variation of SCOD_{Cr} of excess mixed sludge according to acoustic density.



[Fig. 9] Variation of extraction rates of mixed sewage sludge according to acoustic density.



[Fig. 10] Variation of pH of excess sewage sludge according to acoustic density.

1. SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 비를 살펴보면 혼합슬러지는 초음파 주파수가 40kHz일 때 초음파 조사밀도가 증가할수록 그리고 조사시간이 길어질수록 SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}의 비가 증가하여 초음파 처리를 통해 슬러지의 생분해성이 크게 증가한다고 할 수 있다.
2. 주파수 40kHz일 경우 조사시간 40분에서 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 및 139W/L로 조사하였을 때 초기 SCOD_{Cr}은 407mg/L였으며, 초음파 처리된 SCOD_{Cr}는 각각 905mg/L로 약 2.2배, 1,250mg/L로 약 3.1배, 2,500mg/L로 6.1배, 그리고 3,020mg/L로 약 7.4배 증가한 것으로 나타났다.
3. 혼합슬러지의 SCOD_{Cr}의 변화를 살펴보면 주파수 40kHz일 경우 조사시간 40분에서 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 및 139W/L로 조사하였을 때 초기 SCOD_{Cr}은 1,900mg/L였으며, 초음파 처리된 SCOD_{Cr}는 각각 2,580mg/L로 약 1.4배, 3,140mg/L로 약 1.7배, 4,200mg/L로 2.2, 그리고 4,675mg/L로 약 2.5배 증가한 것으로 나타났다.
4. 잉여슬러지의 용출속도를 살펴보면 3W/L, 70W/L, 88W/L 그리고 139W/L로 변화할 때 유사 1차 반응의 경향을 나타내었으며 이때의 용출속도상수, R은 각각 0.020, 0.028,

- 0.048 및 0.051min⁻¹로 나타났다. 혼합슬러지의 용출속도를 살펴보면 주파수 40kHz일 경우 조사밀도를 각각 33W/L, 70W/L, 88W/L 그리고 139W/L로 변화할 때 유사 1차 반응의 경향을 나타내었으며 이때의 용출속도상수, R은 각각 0.008, 0.013, 0.020 및 0.023min⁻¹로 나타났다. 그러나 잉여슬러지와 혼합슬러지 모두다 조사밀도가 88W/L일 경우 139W/L에 비해 크게 차이가 나지 않았으며 전력소모량을 비교해 볼 때 88W/L로 조사했을 때가 가장 최적의 조건이라고 판단된다
5. pH를 살펴보면, 잉여슬러지나 혼합슬러지는 초음파 주파수가 40kHz일 때 초음파 조사밀도가 증가할수록 그리고 조사시간이 길어질수록 pH가 감소함을 알 수 있었다

참고문헌

1. 성낙창 외 7명, 상·하 폐수처리, 동일출판사, p 736 (1999)
2. 환경부, “하수도통계” pp 2~11 (2002)
3. Li, Y. Y. and Noike, T., “Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment”, Water Science Technology, 26, pp 857~866 (1992)
4. 박기영, 김대영, 정태학, “하수슬러지의 혐기성

- 소화에 미치는 가용화 전처리의 효과, 대한상하수도학회, 14(1), pp 117~121 (2000).
5. Egemen E., Corpening J. and Nirmalakhandan N., "Evaluation of ozonation system for reduced waste sludge generation", Civil, Agricultural, and Geological Engineering Department, pp 219~228 (2000).
 6. Waite T. D., Wang T., Kurucz C. N. and Cooper W. J., "Parameters affecting conditioning enhancement of biosolids by electron beam treatment", Journal of Environmental Engineering, 123(4), pp 335~344 (1997).
 7. Tiehm A., Nickel K. and Neis U., "The use of ultrasonication to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge", Wat, Sci. Tech, 36(11), pp 121~128 (1997).
 8. 水質汚染公定試験方法, 東和技術 (1998).
 9. Anold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, Andrew D. Eaton, Standard Methods, 18th Edition (1992).
 10. 신성하, 초음파와 오존을 이용한 도시 하수슬러지의 처리, 단국대학교 석사학위논문 (2001).
 11. 권재현, 김봉준, 김민규, 염익태, 김형수, "전처리 방법에 따른 하수슬러지 가용화 비교연구", 상하수도학회지, 17(4), pp 567~573 (2003).
 12. 모세영, 김만수, 장홍기, 이경재, "수용액속의 난분해성 유기화합물의 초음파 분해특성", 대한환경공학회지, 21(4), pp 739~752 (1999).
 13. 강호, 신경숙, 방기연, "하수슬러지의 전처리가 혐기성 소화에 미치는 영향에 관한 연구", Res. Rep. Env. Sci., 17, pp 15~23 (1999). 