



기계식 전처리를 이용한 하수슬러지의 가용화

이재영[†], 유황룡

수원대학교 토목공학과

(2009년 9월 3일 접수일, 2009년 9월 28일 수정일, 2009년 9월 29일 채택일)

Disintegration of Sewage Sludge Using Mechanical Pre-treatment

Chae-young Lee[†], Hwang-Ryong Yoo
Dep. of Civil Eng., The University of Suwon

ABSTRACT

Disintegration of sewage sludge (SS) was investigated by batch experiments using mechanical pre-treatment. Mechanical disintegration of SS increased the amount of soluble chemical oxygen demand (SCOD), protein and carbohydrate due to the break-up of cell walls. The mechanical disintegration incorporated with alkaline pre-treatment demonstrated higher amount of SCOD compared with mechanical one only. In terms of anaerobic biodegradability, mechanical pre-treatment enhanced the anaerobic biodegradation of SS, leading to the methane production improvement. The improvement in BMP for SS treated with mechanical and alkaline-mechanical pre-treatments were 24.1% and 44.5%, respectively. This result suggested that disintegration of SS was effective for improving anaerobic biodegradability.

Keywords : Anaerobic Biodegradability, Biochemical Methane Potential, Disintegration, Mechanical Pre-treatment, Sewage Sludge

초록

본 연구에서는 기계식 전처리에 의한 하수 슬러지의 가용화 효과를 회분식 실험을 통해 조사하였다. 기계식 전처리를 통한 하수슬러지의 가용화는 세포벽의 파괴로 통해 용존성 화학적 산소요구량, 단백질 및 탄수화물의 농도를

[†]Corresponding Author : chaeyoung@suwon.ac.kr

증가시키는 것으로 나타났다. 알칼리와 기계식 전처리를 병행하여 슬러지를 가용화한 결과 기계식 전처리만을 수행한 경우에 비해 용존성 화학적 산소요구량이 높은 것으로 나타났다. 혐기성 생분해도 측면에서 기계식 전처리는 메탄 발생량을 증가시키는 것으로 나타났다. 기계식과 알칼리 및 기계식 전처리를 동시에 수행한 경우 각각 24.1%와 44.5%의 생화학적 메탄 잠재능을 향상시키는 것으로 나타나 하수슬러지의 가용화는 혐기성 생분해도 향상에 효과적이다.

핵심어 : 혐기성 생분해도, 생화학적 메탄 잠재능, 가용화, 기계식 전처리, 하수슬러지

1. 서론

하수슬러지는 2007년말 기준으로 전국에 가동 중인 347개소의 공공하수처리시설에서 일일 평균 7,631톤이 발생되고 있으며 공공하수처리시설의 증설로 인하여 지속적인 발생량의 증가가 예상되고 있다¹⁾. 발생되는 하수슬러지의 경우 직매립이 금지됨에 따라 2007년 기준으로 전체 발생량의 68.5%가 비용이 저렴한 해양배출 방식으로 처리되고 있는 실정이다²⁾. 환경부의 경우 런던협약 '96의정서 발효에 따라 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출기준이 대폭 강화되어 슬러지 관리 기본계획('06.7) 및 종합대책('07.5)을 수립하여 2011년 말까지 해양배출을 제로화 하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 하수슬러지 연료화 규정을 2008년말에 제정하였으며 에너지화 사업 및 소화조 효율 개선 사업 등을 수행하고 있다³⁾.

슬러지의 경우 하·폐수 처리 공정의 부산물로 유입하수의 0.5~1.0%를 차지하고 있으며 하·폐수 처리 공정의 자본비와 운전비의 20~50%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 따라서 슬러지의 효과적인 감량화는 이들의 경제적인 처리를 위해 매우 중요하다.

하수슬러지의 감량화 및 안정화를 위해 다양한 방법들이 이용되고 있으며 최근 유기성 고형물을 저감하면서 발생가스를 에너지원으로 활용할 수 있는 혐기성 소화 공정에 대한 관심이 유가 상승과 더불어 증대되고 있다. 혐기성 소화 공정은 가수분해 단계, 산생성 단계, 초산생성 단계 및 메탄생성 단계로 구분할 수 있으며 입자성 물질의 경우 가수분해 단계가 율속단계(rate-limiting step)로 알려져 있다⁵⁾. 따라서 많은 연구자들이 율속단계인 가수분해 단계의 속도를 증진하

기 위하여 가용화(disintegration)에 대한 연구를 활발하게 수행하고 있다.

슬러지 가용화는 탈수 또는 혐기성 소화의 전처리로 널리 사용되어 왔으며 슬러지 감량화에 효과적인 것으로 알려져 있다⁶⁾. Weemaes와 Verstraete (1998)에 의하면 알칼리 전처리는 상대적으로 제조 방법이 간단하고 운전이 용이하며 효율이 높은 것으로 제시하고 있다⁷⁾. 알칼리에 의한 슬러지 처리는 플록(floc)과 세포를 파괴하여 내부의 유기물질을 밖으로 용출시킬 뿐만 아니라 가수분해를 촉진하여 후속 공정인 혐기성 소화조의 성능을 향상시킨다⁸⁻⁹⁾. 초음파 가용화는 국지적인 압력강화로 인해 캐비테이션(cavitation)이 발생하는 현상을 이용하는 방법이다. 즉 캐비테이션 기포의 성장 및 파괴시 생성되는 순간적인 고온 및 고압조건에 따라 발생하는 충격파와 전단력을 이용하여 미생물 세포를 파괴하는 방법이다¹⁰⁾. Tiehm 등 (2001)은 초음파 주파수 41~3,217 kHz에서 실험한 결과 낮은 주파수에서 효과적이며 이와 같은 결과는 미세공간에서 발생하는 버블의 크기가 커지는 것에 기인한다고 제시하고 있다. 초음파 주파수를 0, 41, 207, 360 및 1,068 kHz로 변화한 세포의 분쇄효율은 0.0, 13.9, 3.6, 3.1 및 1.0%로 나타났으며 휘발성 고형물의 제거효율은 각각 23.5, 32.2, 28.9, 26.3 및 25.2%로 나타났다¹¹⁾.

기계식 전처리를 이용한 가용화를 살펴보면 Muller (2000a, b)는 기계적, 열적 및 화학적 슬러지 전처리 방법에 대한 비교 평가 결과 기계적 방법은 상대적으로 낮은 에너지의 주입으로 20~37%의 가용화 효율을 달성한 것으로 제시하고 있다¹²⁻¹³⁾. 최 등 (1997)의 경우 30 bar의 펌프 압력에서 폐활성 슬러지를 충돌관에 분사시켜 세포의 파괴를 유도하는 기계식 가용화 방법

을 개발하였다. 이를 통해 기존 체류시간 2~26일에 2~35%의 휘발성 고형물 제거율을 보인 혐기성 반응조를 기계식 가용화 장치를 이용하여 같은 조건에서 13~50%의 제거율을 달성하였다고 제시하고 있다¹⁴⁾. Nah 등 (2000)은 최 등 (1997)이 제시한 방법을 scale-up 하여 2,000 L 혐기성 소화조에 적용한 결과 소화조의 체류시간을 13일에서 6일로 단축하는 결과를 얻어 기계식 가용화 방법의 경우 혐기성 소화 공정의 효율 향상에 효과적인 것으로 나타났다¹⁵⁾. Kampas 등 (2007)의 경우 섬유해리장치(deflaker) 기술을 슬러리 가용화에 활용하여 적용한 결과 VFAs(volatile fatty acids), SCOD(soluble chemical oxygen demand), 단백질 및 탄수화물 농도의 증가를 달성하였다고 제시하고 있다¹⁶⁾. 또한 김 등(2006)은 수리동력학적 캐비테이션을 이용하여 폐활성 슬러지와 혼합 슬러지에 대한 가용화 연구결과 Δ SCOD/TCOD의 비가 각각 0.016과 0.009를 달성하였으며 벤츄리개소 증가에 따라 가용화 효율이 증가하였다고 제시하고 있다¹⁷⁾. 초음파와 화학적 처리 등에 대한 병행 처리는 일부 연구자에 의해 시도되고 있으나 기계식 가용화 처리의 경우 대부분 기계식 가용화 장치에만 한정되어 연구가 수행되어지고 있다.

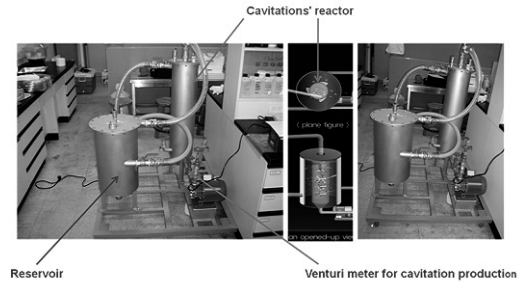
따라서 본 연구에서는 기계식 전처리를 이용한 슬러리 가용화 성능 평가와 알칼리 및 초음파 전처리를 기계식 전처리와 병행하여 수행함으로써 기계식 전처리의 효율 향상 방안을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 기계식 전처리 및 슬러리 특성

본 연구에서는 그림 1에 제시한 것과 같이 N사에서 제작한 기계식 전처리 장치를 이용하였으며 펌프의 출력과 유량은 각각 1,600W와 280 L/min이다. 기계식 장치의 원리는 유체의 속도가 증가하면 유체 내의 압력이 국소적으로 액체의 포화 증기압 이하로 저하되어 액체 내에서는 물 분자와 비응축성 기체 분자로 이루어진 캐비테이션 기포군(cavitation cloud)이 발생하게 된다. 또한 유속이 감소하면서 압력이 회복되면 캐비테

이션 기포(cavitation bubble) 발생하게 된다. 즉 생성된 캐비테이션 기포의 수축, 팽창 및 붕괴과정을 거치면서 슬러지의 가용화가 발생하게 된다¹⁸⁾.



[Fig. 1] Photograph of Mechanical Disintegration Apparatus.

실험에 사용된 슬러지는 S 하수처리장의 농축슬러지를 채취하여 실험을 수행하였다. 농축슬러지의 고형물 농도는 $1.90 \pm 0.156\%$ 의 값을 보였으며 VS/TS 비는 0.83 ± 0.029 로 조사되었다. 농축슬러지의 pH는 6.82, TCOD와 SCOD는 각각 20,298mg/L와 482 mg/L로 조사되었으며 SCOD/TCOD 비는 0.024로 나타나 대부분의 COD 성분이 고형분으로 구성되어 있었다. 기계식 장치의 대상 시료 부피는 60L를 사용하였으며 기계식 장치의 운전은 회분식으로 최대 300분까지 수행하였다. 기계식 장치의 성능을 증가시키기 위하여 기계식 장치 단독 운전 이외에 5N NaOH 용액을 이용하여 초기 pH를 10으로 조정할 경우와 28 kHz의 초음파 처리(10L에 5분 조사)를 수행한 후에도 실험을 수행하였다.

2.2 분석방법

COD (chemical oxygen demand), TS(total solids) 및 VS(volatile solids)는 standard methods에 준해 실험을 수행하였다¹⁹⁾. 단백질의 분석은 Smith 등(1985)이 제시한 bicinchoninic acid 방법²⁰⁾을 이용하였으며 탄수화물은 Debois 등(1956)이 제시한 phenol/sulfuric acid 방법²¹⁾을 이용하였다.

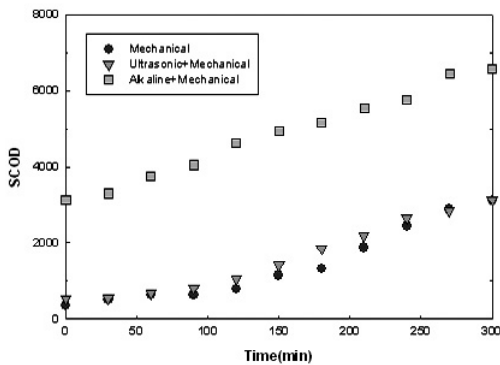
생분해도 평가를 위한 BMP (biochemical methane

potential) 실험과 수정 Gompertz식을 이용한 비선형 해석은 이와 박(2008)의 방법을 이용하였다²²⁾. 발생 가스 조성은 TCD (thermal conductivity detector)가 장착된 GC (gas chromatography, Gow Mac series 580)를 이용하였으며, 칼럼은 Porapak Q (80/100 mesh)를 충전제로 사용한 6ft×2mm(i.d) stainless steel column을 사용하였다. Column, injector 및 detector의 온도는 각각 50, 80 및 90°C 이며, 헬륨 (30 ml/min)을 운반기체로 이용하였다. 점성은 AND Vibro Viscometer(측정범위 0.3~10,000mPa·s)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SCOD 거동

[Fig. 2]는 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리를 이용한 슬러지 가용화시 SCOD의 거동을 제시하고 있다.



[Fig. 2] SCOD Concentration of Supernatant with Time.

모든 조건에서 운전시간 증가에 따라 SCOD가 증가하는 경향을 보이고 있으나 알칼리+기계식 장치를 이용하여 슬러지 가용화 실험을 수행한 경우가 가장 높은 SCOD 증가를 보였다. 즉 알칼리 전처리를 수행하는 경우 Δ SCOD(SCOD_t-SCOD₀)가 2,765mg/L으로 나타났으며 최종적으로 기계식 장치만을 이용하는

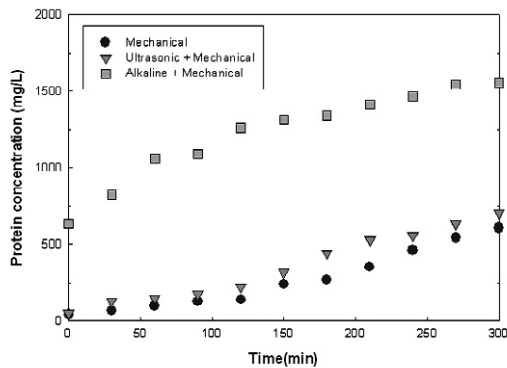
경우에 비해 Δ SCOD가 842mg/L으로 나타났다. 슬러지의 가용화 효율(Δ SCOD/SCOD₀×100)은 기계식 전처리 장치를 이용한 경우 175%로 나타났으며 알칼리와 기계식 전처리를 병행하는 경우 574%까지 향상되었다. 이와 같은 이유는 알칼리 전처리에 의한 세포 용해와 기계식 가용화 장치에 의한 플록 파괴로 세포 내 물질의 외부 유출에 기인한다. Zhang (2002)에 의하면 알칼리에 의한 슬러지 가용화는 플록 구조와 세포벽의 용해 또는 파괴에 의해 이루어진다고 제시하고 있다²³⁾. 초음파+기계식 가용화 장치와 기계식 가용화 장치 단독 실험 결과는 유사한 경향을 보였다.

따라서 슬러지 가용화를 수행하는 경우 가용화 기작이 다른 방법들을 병행하는 경우가 효과적인 것으로 나타났다. Liu 등 (2008)에 의하면 슬러지 가용화시 단일 공법을 이용한 전처리에 비해 두 가지 방법을 병행 처리하는 것이 성능 향상에 효과적인 것으로 나타났다²⁴⁾. Jin 등 (2009)에 의하면 알칼리와 초음파 가용화를 동시에 수행시 단독 처리에 비해 최대 8%의 성능 향상을 보였다고 제시하고 있다²⁵⁾. 본 실험에서는 약품 사용량을 절감하기 위하여 pH를 최적 pH인 12로 조정하지 않고 pH를 10으로 조정하여 실험을 수행하였다. Valo 등 (2004)에 의하면 알칼리 전처리시 pH 12가 pH 10에 비해 약 20%의 성능 향상을 보였다²⁶⁾. 따라서 알칼리와 기계식 처리를 병행시 pH를 12로 상향하는 경우 추가적인 가용화 효율의 향상이 예상된다.

3.2 단백질 및 탄수화물 거동

[Fig. 3]은 기계식 전처리를 이용한 슬러지의 가용화시 단백질 거동을 제시하고 있으며 모든 조건에서 운전 시간 증가에 단백질 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

기계식 가용화 장치를 단독으로 이용하는 경우 단백질 증가는 약 16.9배로 나타났으며 초음파+기계식 장치 및 알칼리+기계식 장치를 병행하는 경우 각각 19.7배와 43.4배로 나타났다. 즉 알칼리+기계식 장치를 이용하여 슬러지 가용화를 수행하는 경우가 가장 높은 단백질 농도 값을 나타내었다. pH 높은 경우 단백질은 느슨한 구조태(causes protein to loose their natural



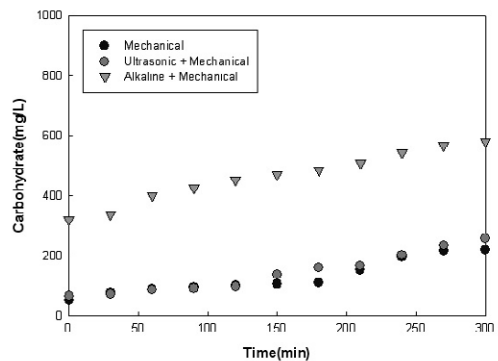
[Fig. 3] Protein Concentration of Supernatant with Time.

shapes), 지방의 비누화(saponification of lipid) 및 RNA의 가수분해가 발생한다고 제시하고 있다²³⁾. 기존 연구결과에 의하면 세포 내부물질은 주로 단백질, 다당류, 지질, 무기염 및 물로 구성되어 있다²⁷⁾. 따라서 서로 다른 기작에 의해 가용화가 발생하는 알칼리+기계식 장치를 이용하는 경우 부압력에 의한 세포 파괴와 세포 용해로 인해 세포 내 물질이 수용액상으로 방출되어 단백질 등의 증가가 일어난다. 특히 가용화시 단백질, 다당류, DNA 등의 증가가 일어나며 이중에서 단백질의 증가가 가장 큰 것으로 보고되고 있다. 기존 연구결과 폐활성 슬러지의 구성비에서 단백질이 차지하는 비율은 전체 구성비의 30%에 해당되는 것으로 알려져 있다²⁸⁾. 따라서 기계식 장치를 이용하여 가용화를 수행하는 경우 SCOD와 단백질 농도 증가에 의해 후속 혐기성 공정의 생분해성 물질을 증가하는 것으로 판단된다.

Kampas 등(2007)에 의하면 기계식 가용화 장치에 의해 생물학적 영양 염류 제거 공정에서 채취한 슬러지의 경우 단백질 함량이 약 27배, 일반적인 생물학적 처리 공정에서 채취한 슬러지의 경우 약 5배 정도 증가하였다고 제시하고 있다⁶⁾. 반면 고압의 펌프와 노즐을 이용하는 기계식 장치를 이용한 경우 약 2.5배의 단백질 함량의 증가가 나타났다고 제시하고 있다¹⁵⁾. 기존 연구결과 초음파(200W, 9kHz) 가용화 장치를 이용하는 경우 최대 48배의 단백질의 증가가 있었다고 제시하고 있으나²⁹⁾ 본 연구에서는 초음파+기계식 가용화 장치의 경우 약 20배로 나타났다. 이와 같은 이유는 본

연구에서 사용한 초음파의 경우 기계식 가용화 장치의 전처리 개념으로 슬러지의 가용화를 위한 충분한 에너지를 조사하지 않고 기계식 가용화 장치에 의한 가용화를 보조하는 측면에서 슬러지 특성을 변화하는 용도로만 이용한 것에 기인된다.

[Fig. 4]는 기계식 전처리를 이용한 슬러지의 가용화시 탄수화물의 거동을 제시하고 있다.



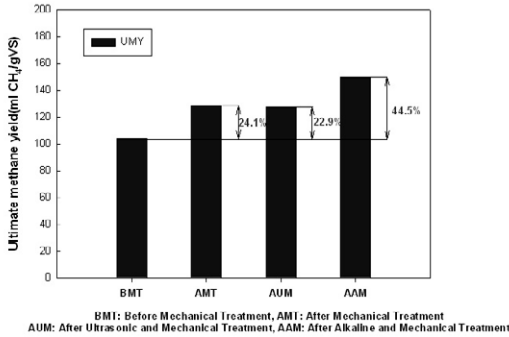
[Fig. 4] Carbohydrate Concentration of Supernatant with Time.

기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식에 의한 가용화 실험 결과 탄수화물 농도는 SCOD 및 단백질의 경우와 유사하게 반응시간 증가에 따라 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 알칼리+기계식 전처리를 이용한 경우가 가장 높은 값을 보였으며 초음파+기계식, 기계식 전처리 순으로 나타났다. Wang 등(2006)의 가용화에 의한 용존성 물질 거동에 관한 연구결과를 보면 탄수화물의 증가량은 단백질 증가량의 약 20% 미만의 값을 갖는 것으로 보고되고 있다²⁷⁾. 즉 슬러지의 경우 탄수화물의 단백질에 대한 비율이 상대적으로 낮기 때문에 가용화시 증가되는 용존성 물질은 대부분 단백질 등으로 구성되어 있으며 탄수화물 또는 DNA 함량은 낮은 것으로 보인다.

3.3 혐기성 생분해 특성

[Fig. 5]은 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리에 의한 가용화시 혐기성 생분해도 결과를

제시하고 있다.



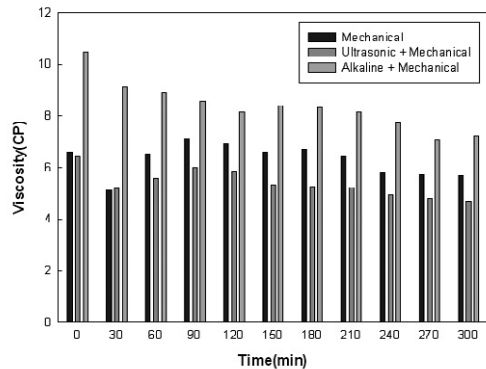
[Fig. 5] Ultimate Methane Yield of Sewage Sludge Before and After Mechanical, Ultrasonic-mechanical and Alkaline Pre-treatments.

혐기성 회분식 실험결과와 수정 Gompertz 식을 이용하여 비선형 해석을 수행한 결과 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리 장치를 이용하는 경우 24.1%, 22.9% 및 44.5%의 메탄 발생량을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 기계식 전처리를 통한 슬러지 가용화는 고형물의 혐기성 분해시 율속단계로 작용하는 가수분해 단계를 효과적으로 단축시켜 지체기를 포함하는 반응시간을 단축시킬 뿐만 아니라 발생속도 및 최종 메탄 수율을 증가시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. Ferrer 등(2008)에 의하면 고온 혐기성 소화시 슬러지의 열적 전처리(70℃)을 적용한 결과 바이오가스 발생량의 30% 증가가 있었다고 제시하고 있다³⁰⁾. 또한 낮은 온도인 70℃에서 약 9시간 정도의 전처리는 메탄 가스 발생량을 증진하는 데 효과적이며 이와 같은 결과는 가용화를 통해 휘발성 용존 고형물(volatile dissolved solids, VDS)과 휘발성 지방산(volatile fatty acids, VFAs)의 농도 증가에 기인한다. Climet 등(2007)에 의하면 낮은 온도에서 열적 전처리를 수행한 결과 바이오가스 발생량의 50% 증가가 발생하였으나 초음파, 마이크로파 및 고온 열처리의 경우 바이오가스 발생량에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다고

제시하고 있다³¹⁾. Bougrier 등(2006)에 의하면 초음파와 열적처리는 바이오가스 발생량을 증가시키나 오존에 의한 전처리는 잔류 오존 또는 난분해성 물질의 생성 등으로 인하여 효과적이지 않은 것으로 제시하고 있다³²⁾.

3.4 점도 거동

[Fig. 6]는 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리를 이용한 슬러지의 가용화시 점도의 변화를 제시하고 있다. 가용화 후의 점도의 변화는 슬러지 이송 또는 침전 특성 등에 영향을 줄 수 있어 이에 대한 영향을 평가하고자 가용화에 따른 점도 변화를 조사하였다.



[Fig. 6] Viscosity of Sewage Sludge Before and After Mechanical, Ultrasonic-mechanical and Alkaline-mechanical Pre-treatments.

알칼리+기계식 전처리를 이용한 슬러지의 가용화시 점도가 가장 높게 나타났으며 이는 알칼리 전처리에 의해 세포내 고분자 물질의 방출 또는 첨가한 알칼리에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 반응시간 증가에 따라 점도는 점차 감소하는 경향을 보여 후속 처리 공정인 혐기성 공정에서 효과적인 안정화가 되는 경우 이로 인한 영향은 적을 것으로 판단된다. 반면 기계식 전처리 및 초음파+기계식 전처리의 경우 가용화로 인한 점도의 영향을 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리를 이용한 슬러지의 가용화 실험 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 기계식 전처리 장치를 이용한 슬러지 가용화의 효율 ($\Delta\text{SCOD}/\text{SCOD}_0 \times 100$)은 175%로 나타났다. 특히 알칼리와 기계식 전처리를 병행하는 경우 가용화 효율은 574%로 나타나 하수슬러지 가용화에 매우 효과적인 것으로 나타났다.
2. 기계식 전처리 장치를 이용한 슬러지 가용화시 단백질과 탄수화물 등의 용존성 물질의 증가가 효과적으로 이루어졌다. 단백질의 경우 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리 장치를 이용한 경우 각각 16.9배, 19.7배 및 43.4배의 증가가 있었다. 특히 알칼리+기계식 가용화의 병행 처리는 부압력에 의한 세포 파괴와 알칼리에 의한 세포 용해로 인해 가용화 효율을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.
3. 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리를 이용하여 슬러지 가용화 실험결과 메탄 가스 발생량의 경우 각각 24.1, 22.9 및 44.5%의 증가가 발생되었다. 기계식 전처리를 통한 슬러지 가용화는 고형물의 혐기성 분해시 율속단계로 작용하는 가수분해 단계를 효과적으로 단축시켜 반응시간 단축뿐만 아니라 최종 메탄 수율을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.
4. 기계식, 초음파+기계식 및 알칼리+기계식 전처리를 이용하여 슬러지 가용화 실험을 수행한 결과 알칼리 전처리에 의한 세포내 고분자 물질의 방출 또는 첨가한 알칼리에 의해 점도가 증가하는 경향을 보였다. 반면, 기계식 전처리 및 초음파+기계식 전처리의 경우 가용화로 인한 점도의 영향은 없는 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 하수슬러지관리 종합대책(수정) (2008.5).
2. Li, H., Jin, Y., Mahar, R., Wang, Z. and Nie,, Y., Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment, *Bioresource Technology*, 99, pp. 5140~5144 (2008).
3. Mata-Alvarez, J., Mac?, S., and Llabr?s, P., "Anaerobic digestion of organic wastes. An overview of research achievements and perspectives", *Bioresource Technology*, 74, pp. 3~16 (2000).
4. 한선기, 이재영, "초음파가 폐활성 슬러지의 혐기성 소화에 미치는 영향(I)-초음파 및 알칼리 전처리를 이용한 폐활성 슬러지의 가용화-", *유기성자원화*, 17(1), pp. 96~102 (2009).
5. Weemaes, M. P., and Verstraete, J., "Evaluation of current wet sludge integration techniques", *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 73, pp. 83~92 (1998).
6. Novelli, A., Ottonello, F., Converti, A., Lodi, A., Rovatti, M., and Delborghi, M., "Alkaline-hydrolysis for the treatment of the organic fraction of municipal solid-wastes and sludges", *Chem. Biochem. Engng. Quarterly* 9, pp. 195~199 (1995).
7. Cassini, S.T., Andrade, M.C.E., and Abreu, T. A., Keller, R., and Goncalves R. F., "Alkaline and acid hydrolytic processes in aerobic and anaerobic sludge: Effect on total EPS and fractions", *Water Sci. Technol.*, 53, pp. 51~58 (2006).
8. Lin, J. G., Chang, C. N., and Chang, S. C., "Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization", *Bioresource Technology*, 84, pp. 113~118. (1997).
9. Kim, J. S., Park, C. H., and Kim, T. H., "Effect of sludge cell disruption on compatibility of biological

- sludge”, *Wat. Sci. Technol.*, 42, 119–126. (2003)
10. 김희준, Nguyen, D. X., 이은영, 허안희, 배재호, “하수슬러지의 초음파 처리에서 가용화 효율에 미치는 여러 가지 인자들의 영향”, *대한환경공학회 2006 추계학술발표회 논문집*, 강릉대학교, 11.2~11.3, pp. 583~588 (2006).
 11. Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., and Neis, U., “Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization”, *Water Res.*, 35(8), pp. 2003~2009. (2001).
 12. Muller, J., “Disintegration as a key-step in sewage sludge treatment”, *Water Sci. Technol.* 41(8), pp. 123~130 (2000a).
 13. Muller, J., “Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge”, *Water Sci. Technol.* 42(9), pp. 167~174 (2000b)
 14. Choi, H. B., Hwang, K. Y., and Shin, E. B., “Effects on anaerobic digestion of sewage sludge pretreatment”, *Water Sci. Technol.* 35, pp. 200~207 (1997).
 15. Nah, I. W., Kang, Y. W., Hwang, K. Y., and Song, W. K., “Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process”, 34(8), pp. 2362~2368 (2000).
 16. Kampas, P., Parsons, S. A., Pearce, P., Ledoux, S., Vale, P., Churchley, J., and Cartmell, E., “Mechanical sludge disintegration for the production of carbon source for biological nutrient removal”, *Water Res.* 41, pp. 1734~1742 (2007).
 17. 김희준, 이은영, 허안희, Nguyen, D. X., 배재호, “수리동력학적 캐비테이션을 이용한 슬러지의 가용화”, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2006 공동 추계학술발표회 논문집*, 11.15~11.16, pp. G133~G140 (2006).
 18. NGsT 기술자료.
 19. APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th edition, Am. Public Health Assoc., Washington, D. C., USA, (1992).
 20. Smith, P. K., Krohn, R. I., Hermanson, G. T., Mallia, A. K., Gartner, F. H., Provenzano, M. D., Fujimoto, E. K., Goetze, N. M., Olson, B. J., and Klenk, D. C., “Measurement of protein using bicinchoninic acid”, *Anal. Biochem.*, 150, pp. 76~85 (1985).
 21. Debois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. “Colorimetric method for determination of sugars and related substances”, *Analyst. Chem.*, 28, pp. 350~356 (1956).
 22. 이채영, 박승용, “하수슬러지의 초음파 전처리를 통한 가용화 및 혐기성 생분해도 향상”, *유기성자원학회지*, 16(3), pp. 83~90 (2008).
 23. Zhang, H., *Biochemistry Tutorial*, third ed. Sichuan University Publishing Company, Chengdu, China, pp. 22~23, 33~34, 103 & 124. (2002).
 24. Liu, X., Lie, H., Chen, J., Du, G., and Chen, J., “Enhancement of solubilization and acidification of waste activated sludge by pretreatment”, *Waste Management*, 28, pp. 2614~2622 (2008).
 25. Jin, Y., Li, H., Mahar, R. B., Wang, Z., and Nie, Y., “Combined alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before aerobic digestion”, 21, *Journal of Environmental Sciences*, pp. 279~284 (2009).
 26. Valo, A., Carrere, H., Delgenes, P., Thermal, chemical and thermochemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79, pp. 1197~1203 (2004).
 27. Wang, F., Lu, S., Ji, M., “Components of released liquid from ultrasonic waste activated sludge disintegration”, *Ultrason. Sonochem.* 13, pp. 334~338 (2006).

28. 박성현, 장성호, 정병길, “마이크로파 조사강도에 따른 하수슬러지의 전처리 특성”, 한국폐기물학회지, 24(1), pp. 45~53 (2007).
29. Wang, Q., Kuninobu, M., Kakimoto, K., and Ogawa, H., and Kato, Y., “Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment”, *Bioresource Technology*, 68, pp. 309~313 (1999).
30. Ferrer, I., Ponsá, S., Vázquez, F., and Font, X., “Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion”, *Biochemical Engineering Journal* 42, pp. 186~192 (2008).
31. Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M.M., Artola, A., Vázquez, F., and Font, X., “Effects of secondary sludge pre-treatment on biogas production under thermophilic conditions”, *Chem. Eng. J.* 133 pp. 335~342 (2007).
32. Bougrier, C., Albasi, C., and Delgenés, J. P., Carrère, H., Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatment on waste activated sludge solubilization and anaerobic digestion, *Chem. Eng. Process*, 45, pp. 711~718 (2006). 