

전처리 방법에 따른 하수슬러지 가용화 비교연구

Comparison of Sewage Sludge Solubilization through Different Pretreatment Methods

권재현^{1,*} · 김봉준² · 김민규³ · 염익태⁴ · 김형수⁴

Kwon, Jae-Hyun^{1,*} · Kim, Bong-Jun² · Kim, Min-Kyu³ · Yeom, Ick-Tae⁴ · Kim, Hyung-Soo⁴

1 인제대학교 환경시스템학부

2 (주)아쿠아텍

3 김해시 시설관리공단

4 성균관대학교 토목환경공학과

(2003년 6월 2일 접수, 2003년 7월 15일 최종수정논문 채택)

Abstract

The pretreatment process was carried out to solubilize the sewage sludge for enhancing its biodegradability using alkaline treatment, ultrasonic treatment(15kHz), ozone treatment and different combination of these three methods: alkaline followed by ultrasonic as well as ozone, and ultrasonic followed by alkaline. The solubilization efficiency was evaluated based on the SCOD/TCOD ratio and VSS/TS ratio. In results, the proper condition of alkaline treatment was shown as 30meq/l of NaOH, pH 12 and 3hours of reaction time. Solubilization efficiency increased to 17% from initial 2% based on SCOD/TCOD ratio under this condition. In ultrasonic treatment, the higher ultrasonic power, the longer treatment time and the lower sludge volume resulted in higher solubilization respectively. There was a rapid increase in solubilization efficiency after 20 minute, then it was measured as 32% of SCOD/TCOD ratio in 1 hour at a ultrasonic power of 1,300W with 1l sludge. Solubilization efficiencies in combined treatment using alkaline and ultrasonic were 47-53% higher than single treatment at a sonicated time of 1 hour. Ozone treatment followed by alkaline treatment also represented the enhanced solubilization compared to ozone treatment. Therefore, ultrasonic or ozone treatment assisted by alkaline could achieve the short treatment time as well as high solubilization efficiency.

Key words: Alkaline, Combined pretreatment, Ozone, Sewage sludge, Solubilization, Ultrasonic

주제어: 알칼리, 병합전처리, 오존, 하수슬러지, 가용화, 초음파

1. 서론

하수슬러지 처분에 대한 규제가 강화되면서 슬러지 감량화 기술에 대한 연구와 기술개발이 활발히 이뤄지고 있다. 하수슬러지는 생분해성과 고액분리성을 향상시켜야 효율적으로 감량화를 이룰 수 있다. 일반적으로 하수슬러지를 구성하는 미생물은 견고한 세포벽으로 둘러 싸여 있어 생분해성이 낮으며, 세포 내부수나 간극수 등과 같은 부착수(bound water) 함량이 높고 친수성이 높아 고액분리성이 좋지 못하다(Erdinciler and Vesilind, 2000). 슬러지 전처리의 목적은 세포벽을 파괴하여 세포구성물질들의 가수분해를 촉진시켜 슬러지의 생분해성을 높이는 것이다. 이를 통해 세포나 미세한 플러 내부에 갇혀 있던 수분이 유출되면서 고형물로부터 수분의 분리가 용이해진다. 현재까지 연구된 주요 전처리 방법은 오존처리(Weemaes 등, 2000; Yasui and Shibata, 1994; Kwon 등, 2001), 초음파처리(Tiehm 등, 2001), 알칼리처리(Lin 등, 1998), 열처리(Li and Noike, 1992), 효소처리(Thomas 등, 1993), 산처리(Woodard and Wukasch, 1994), 기계적 분쇄(Kopp 등, 1997), 염소처리(Saby 등, 2002) 등과 같은 단일처리와 알칼리/초음파 병합처리(Chiu 등, 1997), 알칼리와 열 병합처리(Penaud 등, 1999) 등이 있다. 이들 방법 중에서 오존처리와 초음파처리는 가용화 효율이 높고, 또한 초음파처리는 환경적으로 무해하며, 알칼리 처리는 경제성이 높은 방법으로 알려져 있다(Muller, 2001).

초음파를 수용액상에 조사할 경우 음파에너지의 전달 방향으로 진동에너지가 전달되어 수용액내의 압력이 변화되고 gas와 증기로 구성된 고온(약 5,000K), 고압(수백 기압)의 공동(cavitation)이 형성된다. 이로 인한 열분해 반응과 기포내의 산소로부터 형성되는 OH 라디칼 반응은 초음파화학(sonochemistry) 작용을 일으키는 원동력이 된다. 이러한 공동이 생성되었다가 붕괴되는 주기는 약 100ns 정도로 순간적으로 공동이 생성되고 붕괴되는 과정이 지속적으로 일어나며 공동 붕괴시 강력한 물리적 전단력이 발생하게 된다. 공동현상이 발생하기 용이한 조건은 낮은 주파수 영역인 20-40KHz로 주파수가 낮을수록 슬러지 가용화 효율은 향상된다. 이와 같은 물리적 전단력과 초음파 화학반응이 하수슬러지를 분

해시키는 효과를 가져오게 된다(Tiehm 등, 2001; Chu 등, 2001). 오존은 자체의 산화력과 OH 라디칼의 간접 반응에 의해 슬러지 고형물을 부분 산화시키거나 가용화시켜 생분해성을 높이게 된다(Weemaes 등, 2000). 알칼리 처리는 가수분해에 의해 셀룰로오스나 폐활성슬러지와 같은 기질을 가용화시켜 생분해성을 높인다(Chiu 등, 1997).

슬러지 생분해성 향상을 위한 전처리의 효과는 호기적 생분해도나 혐기적 생분해도 테스트로 평가될 수 있다(Lin 등, 1999; Yeom 등, 2002). 그러나 이 방법들은 20-30일이라는 긴 시간이 요구되는 단점이 있다. 전처리 효과를 평가하기 위한 보다 간편한 방법은 슬러지의 가용화 정도, 즉 전처리 직후에 SCOD 또는 VSS의 변화를 측정하는 것이다. 가용화 정도와 생분해성의 직접적인 상관성은 여러 연구결과에서 보고된 바 있다. Tiehm 등(2001)에 의하면 혐기소화조에서 휘발성고형물의 감소량은 초음파 전처리후의 가용화 정도에 비례하여 증가하였는데, COD 가용화율이 10%와 20%로 증가하면 휘발성고형물 감소량은 각각 29%, 48%로 증가하였다. 이는 가용화에 의해 슬러지의 생분해성이 크게 향상됨을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 하수슬러지의 생분해성을 높이기 위해 알칼리처리, 초음파처리, 오존처리 및 이들의 병합처리와 같은 다양한 전처리 방법을 사용하여 슬러지 가용화 효율을 비교하고 적정 처리 조건을 도출하여 효율적인 전처리 방법을 알아보고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 S시 K하수처리장의 잉여슬러지를 채취하여 실험재료로 사용하였는데 그 특성은 Table 1과 같다. 슬러지의 TS는 약 1.2%이며, SS/TS, VSS/TS, SCOD/TCOD비가 각각 89%, 70%, 2%로 고형물 중에서 현탁성 유기성분함량이 높고 용존성 유기성분은 매우 낮음을 알 수 있다. 잉여슬러지의 가용화 효율을 평가하기 위한 지표로서 COD 가용화율($SCOD_{cr}/TCOD_{cr}$)과 세포잔존율(VSS/TS)을 사용하였다.

알칼리처리는 NaOH를 사용하였는데 슬러지 시료 500ml에 4N NaOH 일정량을 투입하여 초기 pH를 변

Table 1. Characteristics of sewage sludge used in this study

Parameters	Concentrations
pH	6.81
TCOD _{cr} (mg/l)	13,631
SCOD _{cr} (mg/l)	259
TS(mg/l)	12,296
VS(mg/l)	9,213
SS(mg/l)	10,936
VSS(mg/l)	8,558

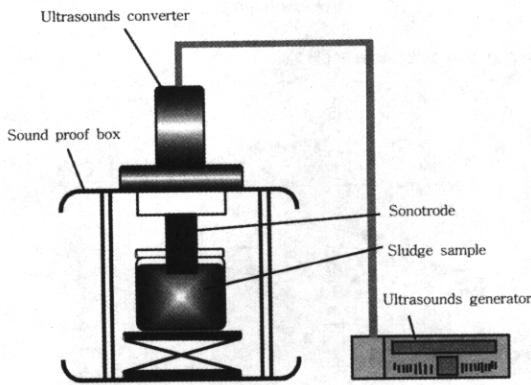


Fig. 1. Ultrasonic cell disrupter.

화시켰다. NaOH를 첨가할 때 NaOH의 분산과 슬러지의 침전을 방지하기 위해 Jar Tester를 이용해 250rpm으로 회전시키면서 주입하였으며, NaOH 일정량이 주입된 후에도 일정 반응시간 동안 계속 시료를 혼합시켰다. 초음파 처리에 사용된 초음파 장치는 Fig. 1과 같다. 초음파 발생기는 Sonic Korea사의 SKB-2500 모델을 사용하였는데 주파수는 15kHz로 고정하고, 전력은 900-1,300W로 변화시켰다. 시료 용기는 바닥이 평평한 2.5l의 스테인레스 용기를 사용하였고, Sonotrode의 위치는 시료 수면에서 1cm 잠기도록 하였다. 초음파와 시료와의 반응시간, 시료부피 및 전력조건을 변화시키면서 슬러지의 TCOD_{cr}, SCOD_{cr}, TS, VSS의 변화를 각각 측정하였다. 오존 처리는 직경 10cm, 높이 1m의 아크릴 원통형 반응조에 슬러지 1.6l를 채워 실시하였고, 오존발생기는 Ozonia사의 TOG-2를 사용하였으며 송기량은 5l/min, 오존 주입농도는 4.3mgO₃/air로 고정하였다. 본 연구에서는 오존과 슬러지의 접촉시간을 변화시키면서 슬러지의 가용화 효율을 측정하였는데, 오존처

리장치와 실험방법은 권 등(2002)이 이용한 방법으로 행하였다. 알칼리, 초음파, 오존 단독처리와 함께 병합처리가 슬러지 가용화에 미치는 영향을 알아보기 위해 알칼리처리 후 초음파처리, 초음파처리 후 알칼리처리, 알칼리처리 후 오존처리도 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 알칼리 처리

알칼리 처리에 있어 알칼리 적정 주입량을 결정하기 위해 반응시간 1시간, 3시간, 6시간 각각에 대해 NaOH의 주입량을 80meq/l까지 늘리면서 슬러지의 COD 가용화를 변화를 측정하여 Fig. 2(a)에 나타내었다. 알칼리 처리 전에 SCOD 농도가 259mg/l였는데 NaOH 80meq/l를 주입하였더니 슬러지의 pH가 13까지 상승하였고, 알칼리의 가수분해 작용에 의해 6시간 반응 후에 SCOD 농도가 2,925mg/l로 약 11배 증가하여 21.5%의 가용화율을 보였다. 각 반응시간에서 NaOH를 30meq/l 이상 주입하면 가용화율의 변화가 적어 이 주입량을 적정한 값으로 결정하였으며, 이때의 pH는 12이었다. NaOH 주입량을 pH 12로 고정하고 반응시간을 6시간까지 변화시킨 실험결과는 Fig. 2(b)와 같다. 3시간 이후 SCOD/TCOD비는 거의 변화가 없어서 반응시간은 3시간이 적정하였다. 이상의 결과를 토대로 알칼리처리의 적정 조건은 NaOH 주입량 30meq/l, pH 12, 반응시간 3시간으로 하였으며, 이 조건에서 슬러지의 가용화율 SCOD/TCOD비는 처리 전 2%에서 17%로 증가하였다. Lin 등(1998)은 TS 1%의 폐활성슬러지에 대한 알칼리 적정 주입량을 NaOH 30meq/l로 보고한 바 있는데, 이 결과는 본 연구결과와 일치하였다.

3.2. 초음파 처리

슬러지 가용화에 대한 초음파 처리조건에 영향을 조사하기 위해 반응시간, 시료부피, 전력의 변화에 따른 슬러지의 SCOD 농도 변화를 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 낮은 주파수 영역에서 가용화 효율이 높다는 기존 연구결과(Tiehm 등, 2001)에 따라 본 연구에서는 주파수를 15kHz로 고정하였다. 주파수 15kHz, 전력 1,300W 조건에서 슬러지 부피 0.5l, 1l, 2l 각각에 초음파 조사시간을 3시간까지 변화시킨 결

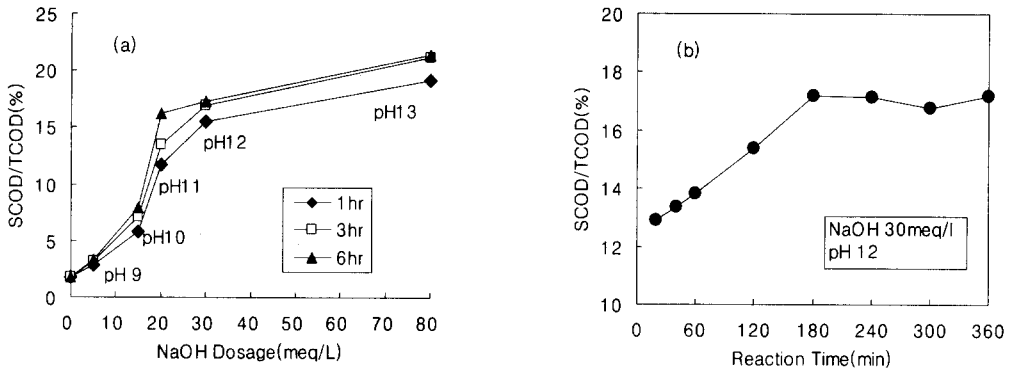


Fig. 2. Variations in SCOD/TCOD ratio of sludge with (a) NaOH dosage and (b) reaction time at pH 12.

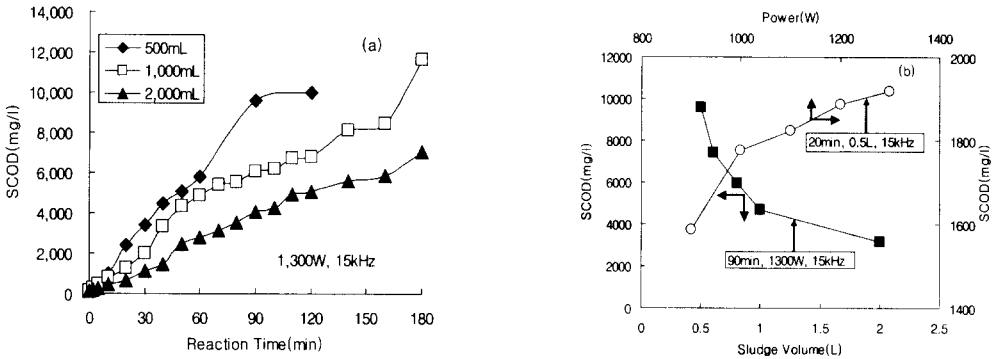


Fig. 3. Effects of (a) sonication time, (b) ultrasonic power and sludge volume on sludge soluble COD.

과, 모든 시료부피에서 처리시간에 따라 SCOD는 계속 증가하였다(Fig. 3(a)). 또한 초음파 조사시간 90분에서 슬러지 부피가 증가할수록 SCOD 농도는 크게 감소하였으며, 초음파 조사시간 20분에서 전력의 영향을 조사한 결과 전력이 높을수록 SCOD 농도는 증가하였다(Fig. 3(b)). 이상의 결과에서 초음파 조사시간, 시료부피, 전력 등이 슬러지 가용화에 영향을 미침을 알 수 있었고, 초음파 투입량은 위 3가지 요인을 고려하여 $kW \cdot h/l$ 혹은 $kW \cdot h/kgSS$ 로 표현할 수 있을 것으로 보인다.

초음파 처리 동안에 시료의 온도가 최대 $55^{\circ}C$ 까지 상승함으로써 시료 내 수분의 일부가 증발하여 시료 부피가 감소하였다. 슬러지 온도 변화를 보면 20분에 $43^{\circ}C$, 1시간 후에 $55^{\circ}C$ 를 나타내었으며 그 후로는 변화가 없었다. 슬러지 부피는 초기 1에서 20분까지는 큰 변화가 없다가 1시간 후에 0.9l, 2시간, 3시간

후에 각각 0.76l, 0.61l로 계속 감소하였다. 이와 같은 시료부피 감소로 인한 농축효과로 TCOD와 TS 농도가 각각 초기 $13,631mg/l$, $12,296mg/l$ 에서 3시간 후 $20,324mg/l$, $18,523mg/l$ 로 크게 증가하였다. 가용화 효율에 대한 수분증발효과의 영향을 없애기 위해 각 조건에서 전처리된 시료들의 SCOD, VSS, TCOD, TS 농도와 슬러지 부피 변화를 각각 측정하여 질량단위로 환산한 후에 가용화율을 나타내었다. 슬러지 1l, 초음파 전력조건 1,300W에서 반응시간에 따른 SCOD/TCOD비와 VSS/TS비의 변화는 각각 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)와 같다. TCOD를 질량단위로 환산하면 초기 $13,631mg$ 에서 3시간 후 $12,397mg$ 으로 9% 감소하여 슬러지내 유기물질의 일부가 초음파의 산화반응에 의해 분해되어 무기화(mineralization)됨을 알 수 있다. COD 가용화율(SCOD/TCOD)은 초기 2%에서 20분에 9%로 늘어난 후에 빠르게 증가하

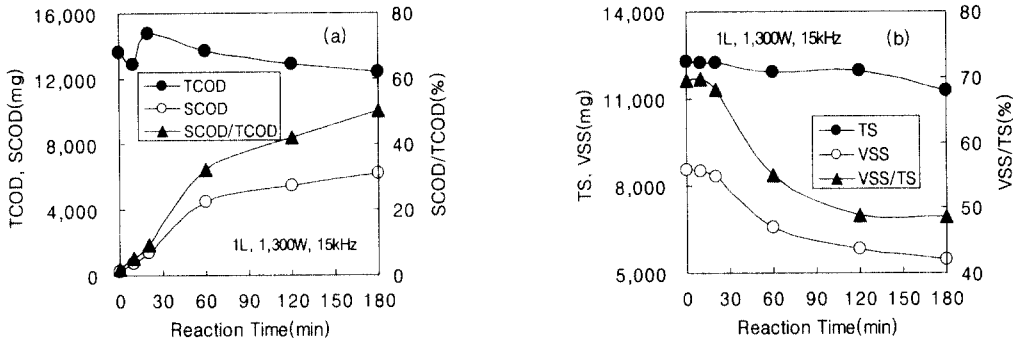


Fig. 4. Variations in (a) SCOD/TCOD and (b) VSS/TS of sludge according to sonicated time.

여 1시간 32%, 2시간 42%, 3시간 후에 50%를 각각 나타내었다(Fig. 4(a)).

Fig. 4(b)에서 TS의 질량은 TCOD 질량과 마찬가지로 반응시간에 따라 감소하였다. 세포잔존율 VSS/TS비는 초기 70%에서 20분까지는 큰 변화가 없다가 1시간 후 55%로 크게 감소하였으며 2시간 뒤에 49%로 감소하다가 그후로는 변화가 없었다. 이상의 결과로 볼 때 초음파의 물리·화학반응이 효과적으로 나타나기 위해서는 20분 이상의 반응시간이 필요로 하며, 초음파의 에너지 비용과 슬러지의 가용화율을 동시에 고려해 볼 때 1시간 정도가 적합할 것으로 보인다. 이 처리조건을 전술한 초음파 주입량으로 환산하면 SS기준으로 120kW·h/kgSS, 부피기준으로 1.3kW·h/l에 해당된다. 그러나 전처리 정도는 대상 슬러지의 농도나 저장시간, SRT 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로(Lin 등, 1998), 슬러지 상태에 따른 가용화 정도의 차이가 심도있게 조사되어야 보다 객관적인 적정 처리조건이 도출될 수 있다고 본다.

3.3. 병합처리

알칼리와 초음파의 병합처리가 가용화 효율에 미치는 영향을 조사하여 세가지 처리 조합에 따른 가용화율 변화를 초음파 단독처리의 경우와 함께 Fig. 5에 나타내었다. 첫 번째 처리조건은 슬러지에 30meq NaOH/l의 알칼리를 첨가시켜 3시간 동안 혼합하여 반응시킨 후에 시료 1l, 주파수 15kHz, 전력 1,300W 조건에서 초음파 처리한 경우이다(A3+S). 두 번째는 동일한 알칼리 주입량에서 알칼리 주입 직후에 동일한 조건으로 초음파 처리하였으며(A+S), 마지막

으로 초음파로 1시간 처리한 후에 알칼리로 3시간 처리하였다(S1+A3). COD 가용화율이나 VSS 잔존량으로 볼 때 알칼리나 초음파의 단독처리보다 이들의 병합처리가 슬러지 가용화율을 훨씬 높였다. 병합처리의 방법에 따라 반응시간별로 가용화율에 다소 차이를 보였는데, 초음파 처리 1시간을 기준으로 알칼리 3시간 후 초음파 처리가 53%의 COD 가용화율과 42%의 VSS 잔존율을 보여 알칼리와 초음파의 동시 처리나 초음파 후 알칼리 처리에 비해 높은 가용화 효율을 나타내었다. 알칼리와 초음파의 동시처리는 초음파 처리시간 2시간에서 69%라는 가장 높은 COD 가용화율을 나타내었다. COD 가용화율 30%를 기준으로 초음파 단독처리는 약 1시간의 처리시간이 요구되는 반면에 알칼리 전처리 후에 초음파 처리는 약 20분으로 초음파 처리시간이 1/3로 단축되었다. 알칼리와 초음파를 동시처리해도 알칼리 3시간 처리 후에 초음파 처리한 경우와 30%대의 가용화율에 별 차이가 없기 때문에 전체적으로 처리시간을 1/3로 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 따라서 알칼리와 병합처리를 통해 초음파 전력비의 절감이 기대된다.

Fig. 6은 오존단독처리와 pH 12 조건에서 NaOH로 3시간 처리한 후에 오존처리한 결과로 오존접촉시간에 따라 슬러지 가용화율이 비례적으로 증가하였다. 알칼리와 병합처리는 오존단독처리에 비해 동일한 오존접촉시간에서 가용화율을 크게 높였다. 이는 일정한 가용화율을 얻기 위해 소요되는 오존처리 시간을 감소시키는 긍정적인 효과를 나타내어, 30% COD 가용화율을 기준으로 알칼리와 병합처리는

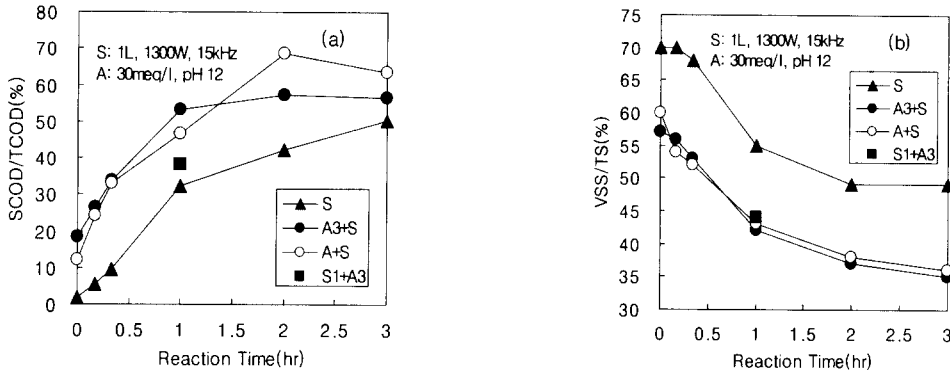


Fig. 5. Sludge solubilization of combined pretreatments using ultrasound and alkaline(NaOH). S: ultrasound, A3+S: alkaline for 3 hours then ultrasound, A+S: simultaneous alkaline and ultrasound, S1+A3: ultrasound for 1 hour then alkaline for 3 hours. Sonicated time vs. (a) SCOD/TCOD ratio, (b) VSS/TS ratio.

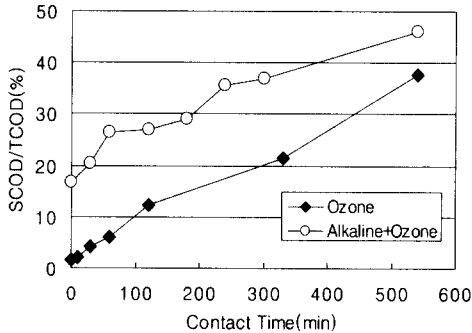


Fig. 6. Effect of combined pretreatment using ozone and alkaline on sludge solubilization.

오존처리시간을 약 1/2 이하로 단축시켰다. 게다가 오존처리하는 슬러지 pH를 크게 감소시키는데(권 등, 2002), 알칼리와 오존의 병합 전처리로 슬러지의 pH 저하를 방지할 수 있어 후속하는 생물학적 공정에 대한 pH의 영향을 줄일 수 있다.

Chiu 등(1997)에 의하면 알칼리와 초음파의 동시 처리는 알칼리나 초음파 단독처리에 비해 슬러지 전처리 시간을 크게 줄이고 SCOD 유출량을 증가시켜 슬러지의 생분해성을 높였다. Muller(2001)의 보고에 의하면 전처리 방법에 따라 처리비용이 크게 다른데 대략적으로 슬러지 고형물 1톤 당 70-150US 달러가 소요되는 것으로 평가되었다. 슬러지의 생분해성이 낮거나 소화공정에 과부하가 걸리거나 혹은 슬러지 처분비용이 높은 처리장에 한해서만 전처리기술이 적용되어야 한다는 것이 그의 주장이다. 전처리 방법간

에 처리비용을 비교해 보면 동일한 COD 가용화율을 달성하기 위해 불필과 같은 기계적인 방법보다 초음파나 열처리가 훨씬 에너지 소비량이 높다. 또한 오존처리나 기계적인 전처리는 알칼리처리에 비해 시설비나 유지관리비가 높다. 따라서 이상의 결과로 볼 때 초음파나 오존과 같이 전력비가 많이 소요되는 전처리 방법에 약품비가 저렴한 알칼리 처리를 병용하면 고가의 초음파나 오존 비용을 줄이면서 높은 슬러지 가용화율을 얻을 수 있어 하수슬러지의 생분해성을 높이기 위한 전처리 방법으로 알칼리를 이용한 병합처리가 효과적임을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

4. 결론

총고형물 함량이 1.2%인 하수처리장 잉여슬러지를 대상으로 다양한 전처리 방법에 따른 가용화 효율을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) COD 가용화율을 기준으로 알칼리 처리의 적정 조건은 NaOH 투입량 30meq/l, pH 12, 반응시간 3시간이었으며, 초기 2%이었던 COD 가용화율이 이 조건에서 17%로 증가하였다.

2) 초음파 처리시 가용화 효율은 처리시간과 전력이 커지면 증가하였고 슬러지 부피가 늘어나면 감소하였다. 초음파 주파수 15kHz, 전력 1,300W 조건에서 슬러지 1/를 초음파 처리하였더니 처리시간 1시간 후에 COD 가용화율은 크게 증가하여 32%를 나타내었으며 VSS/TS비는 초기 70%에서 55%로 감소하였다.

3) 알칼리와 초음파의 병합처리는 초음파 처리 1시간 후에 COD 가용화율 47-53%, VSS/TSS비 42-43%로 초음파 단독처리에 비해 높은 가용화 효율을 보였다. 알칼리와 오존의 병합처리도 오존단독처리에 비해 높은 가용화율을 나타내 오존처리시간을 1/2 이하로 감소시켰다. 따라서 알칼리 처리 후 오존이나 초음파와의 병합처리는 오존, 초음파 단독처리에 비해 슬러지 가용화율을 높일 뿐만 아니라 처리시간을 크게 단축시켜 슬러지 생분해성을 향상시키기 위한 전처리 방법으로 효과적일 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것이며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- 권재현, 류성호, 박기영, 안규홍, 염익태, 이용훈(2002) 오존처리에 의한 하수슬러지의 감량화, *상하수도학회지*, **16**(2), pp. 153-160.
- Chiu Y. C., Chang C. N., Lin J. G. and Huang S. J. (1997) Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **36**(11), pp. 155-162.
- Chu C. P., Chang B. V., Liao G. S., Jean D. S. and Lee D. J. (2001) Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge, *Wat. Res.*, **35**(4), pp. 1038-1046.
- Erdinçler A. and Vesilind P. A. (2000) Effect of sludge cell disruption on compactibility of biological sludges, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(9), pp. 119-126.
- Kopp J., Müller J., Dichtl N. and Schwedes J. (1997) Anaerobic digestion and dewatering characteristics of mechanically disintegrated excess sludge, *Wat. Sci. Tech.*, **36**(11), pp. 129-136.
- Kwon, J. H., Ryu, S. H., Park, K. Y., Yeom, I. T., and Ahn, K. H. (2001) Enhancement of Sludge Dewaterability by Ozone Treatment, *Proceedings of the IWA Specialist Conference of Sludge Management*, 25-28 March, Taipei, Taiwan, pp. 119-124.
- 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.
- Lin J. G., Ma Y. S., and Huang C. C. (1998) Alkaline hydrolysis of the sludge generated from high-strength, nitrogenous-wastewater biological-treatment process, *Bioresource Technology*, **65**, pp. 35-42.
- Muller, J. A. (2001) Prospects and Problems of Sludge Pre-Treatment Process, *Proceedings of the IWA Specialist Conference of Sludge Management*, 25-28 March, Taipei, Taiwan, pp. 111-118.
- Penaud, V., Delgen s J. P. and Moletta R. (1999) Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability, *Enzyme and Microbial Technology*, **25**, pp. 258-263.
- Saby S., Djafer M., and Chen G-H. (2002) Feasibility of using a chlorination step to reduce excess sludge in activated sludge process, *Wat. Res.*, **36**, pp. 656-666.
- Thomas L., Jungschaffer G. and Spr sler B. (1993) Improved sludge dewatering by enzymatic treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **28**(1), pp. 189-192.
- Tiehm A., Nickel K., Zellhorn M. and Neis U. (2001) Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, *Wat. Res.*, **35**(8), pp. 2003-2009.
- Weemaes M., Grootaerd H., Simoens F. and Verstraete W. (2000) Anaerobic digestion of ozonized biosolids, *Wat. Res.*, **34**(8), pp. 2330-2336.
- Yasui H. and Shibata M. (1994) An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process, *Wat. Sci. Tech.*, **30**(9), pp. 11-20.
- Yeom, I. T., K. R. Lee, K. H. Ahn, Y. H. Lee, and S. H. Lee (2002) Effect of Ozone Treatment on the biodegradability of sludge from municipal wastewater treatment plant, *Wat. Sci. Tech.*, **46**(4-5), pp. 421-425.