

# 하수슬러지 가용화와 하수처리 운전조건 개선을 통한 하수슬러지 발생저감 연구

## Study on Sludge Reduction by Sludge Solubilization and Change of Operation Conditions of Sewage Treatment Process

최인수 · 정희석 · 한인섭 †  
In Su Choi · Hoe-Suk Jung · Ihnsup Han †

서울시립대학교 환경공학부  
Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

(2009년 8월 31일 접수, 2009년 11월 12일 채택)

**ABSTRACT** : In order to find the way to solve the problem of sewage sludge discharge into the ocean, the sludge solubilization by ultrasonic and the improvement methods of wastewater treatment process were studied. In the membrane bioreactor the sludge retention time was stepwise increased from 5.1 day to 442 days where the biomass average concentration has been increased from  $c_B=3.4 \text{ gTSSL}^{-1}$  to  $c_B=14.5 \text{ gTSSL}^{-1}$  respectively. At the same time, the biomass yield coefficients were reduced from 0.5-0.7 at SRT=5.1 day to 0.005-0.007 at SRT=442 days which means the reduction of sludge production. Oxygen mass transfer coefficients and  $\alpha$ -factor were investigated with changing stirrer speed to find the relation between the high biomass concentration and aeration efficiency in the propeller loop reactor. As a result of sludge solubilization, the solubilization of sludge by ultrasound was increased with increasing energy input and it led to improved anaerobic digestion rate with more biogas production than that of non-solubilized sewage sludge.

**Key words** : Sewage sludge, Solubilization, Aeration efficiency, Ultrasound, Anaerobic digestion

**요약** : 하수슬러지의 해양투기 배출규제에 대한 대체 처리방안으로, 하수슬러지의 초음파 가용화를 통한 재기질화와 하수처리 공정에 대한 개선을 통한 슬러지 발생량의 저감방안을 살펴보았다. 분리막 반응조(MBR) 실험을 통해 SRT를 점진적으로 SRT=5.1일에서 442일까지 증가시켰으며, 이때 반응조내 미생물의 평균 농도값은  $c_B=3.4 \text{ gTSSL}^{-1}$ 에서  $c_B=14.5 \text{ gTSSL}^{-1}$ 까지 증가하였다. 이때 기질제거율과 미생물의 성장량과의 관계를 나타내는 미생물 수율( $Y_{B/S}$ )은 SRT=5.1일 일때의 약 0.5-0.7에 비해 SRT=442일 일때 0.005-0.007로 저감되어, 직접적인 슬러지 발생량의 감소를 가져오게 되는 것을 확인하였다. 반응조내 미생물 농도와 폭기효율과의 관계를 프로펠러 루프 반응조에서 교반속도에 따른 산소전달계수와  $\alpha$ -factor의 변화로써 살펴보았다. 한편 슬러지에 대한 초음파 가용화는 에너지 투입량에 따라 가용화 효율이 증가하고, 가용화한 슬러지의 혐기성 소화효율은 가용화하지 않은 슬러지에 비해 바이오가스 발생량이 많았다.

**주제어** : 하수슬러지, 슬러지 가용화, 폭기효율, 초음파 가용화, 혐기성소화

## 1. 서론

하수슬러지는 각종 하폐수에 포함되어 있는 입자상, 콜로이드상 및 용존상의 오염물질로서, 수질오염방지 장치를 위한 하수종말처리시설 및 고도처리시설에서 하폐수를 처리하였을 때 발생하는 2차 환경오염물질이다. 이러한 하수슬러지의 처리는 육상직매립이 주처리방법이었으나, 2003년 7월 매립지 안정화 곤란과 악취발생 등의 문제로 인해 전면 금지되었다. 이후 해양배출을 통한 하수슬러지 처리는 처리비용이 저렴하고, 처리설비 설치 등과 같은 건설비 부담이 없어 광범위하게 확대되었다. 한편 1972년 채택된 “폐기물 및 기

타 물질의 배출에 대한 해양오염 방지에 관한 협약(통상 런던협약)”과 런던협약 96 의정서에 의해 한국의 유기성 폐자원의 해양배출도 규제를 받는 상황에 이르렀고, 합리적인 처리방안을 마련하기 위한 각종 정책개발, 슬러지 발생저감기술의 개발, 슬러지 처리기술의 개발 및 우수기술에 대한 육성보급이 매우 필요한 시점이다.

본 연구는 해양배출을 주요 처리방법으로 하는 하수슬러지의 합리적인 대체 처리방안으로써, 하수처리 공정에 대한 운전조건 개선을 통해 슬러지 발생량의 원천적 저감 방안을 찾는 것을 그 목표로 한다. 이러한 연구의 결과는 향후 슬러지 처리 비용의 절감과 적절한 공정개선을 통한 하수처리 운영비

† Corresponding author : E-mail : ishan@uos.ac.kr Tel : 02-2210-2418 Fax : 02-2244-2245

절감 등의 기대효과를 가져올 수 있을 것이다.

연구의 내용으로는 우선 분리막 반응조(MBR) 실험을 통해 SRT를 점진적으로 증가시켰으며, SRT의 증가와 함께 반응조 내 미생물 농도를 증가시켰다. 반응조내 높은 미생물 농도의 유지는 결과적으로 잉여슬러지로 배출되는 슬러지의 발생량 감소를 의미하는데, 이러한 미생물 농도의 증가와 슬러지 발생량과의 관계를 미생물 수율을 통해 알아보았다. 한편 미생물 농도의 증가는 필연적으로 폭기 효율의 감소를 가져오게 되는데, 이러한 미생물 농도의 증가와 폭기효율 감소와의 관계를 산소전달계수( $k_{La}$ )와  $\alpha$ -factor를 측정함으로써 평가하였다.

또한 슬러지의 재기질화를 위해 초음파에 의해 잉여슬러지를 가용화하고, 그 가용화 효율을 알아보았으며, 가용화를 통해 기질화된 슬러지를 혐기성 혐기성 소화조에 투입하여 바이오가스 발생량을 비교 분석함으로써, 그 소화효율을 평가하였다.

## 2. 연구 배경

### 2.1. 하수슬러지 감량화 기술의 현황

하수슬러지의 감량화 기술은 크게 슬러지 발생후 감량화와 슬러지 발생전 감량화 기술로 나눌 수 있다.

발생후 처리를 기반으로 하는 감량화 기술은 대개 전처리, 중간처리 및 최종처분으로 구분된다. 전처리는 농축, 소화, 기계탈수, 개량과 같이 처리를 용이하게 하는 것이며, 중간처리는 최종처분을 위하여 탈수케이크를 감량 또는 안정화시키는 방법으로 퇴비화, 건조, 소각, 용융, 고화, 연료화, 열분해 등이 이에 해당한다. 한편 최종처리는 처리공정에서 발생하는 최종 산물을 매립 또는 재활용하는 것이다<sup>1)</sup>.

한편, 앞에서 언급된 하수슬러지 처리 기술들은 대부분 슬러지 발생 후 감량화의 입장에서 연구되어 온 것으로, 이러한 개념만으로 하수슬러지 처리를 위한 근본적인 방안을 도출하기는 어려울 것이다. 따라서, 하수슬러지를 발생단계에서 원천적으로 저감시킬 수 있는 하수처리시스템 제어의 관점에서 다양한 연구가 진행되어야 하며, 하수처리장 공정의 제어와 최적화의 입장에서 고품질 저감, 가용화 및 생분해도 개선, 탈수성 개선의 측면이 종합적으로 검토되어야 할 것이다. 즉 최종처리에 맞추어진 하수슬러지 처리방식에서 슬러지 발생을 억제하는 수처리 제어공정의 개발과 발생된 슬러지의 가용화에 의한 재기질화를 통해 슬러지 발생량 저감을 이루는 방식으로 그 무게중심이 이동되어야만 할 것이다.

수처리 공정과정에서 슬러지 생산량을 감량시키는 대표적인 기술로는 호열균을 이용한 하수슬러지 감량화,<sup>2)</sup> MBR을

이용,<sup>3,4)</sup> 및 상향류식 다단 생물반응기<sup>5)</sup>를 통한 하수슬러지의 호기성 소화기술 등이 있다. 최근 막기술에 대한 관심이 높아지면서, MBR을 이용한 고농도 박테리아 상태에서의 호기성 소화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>6~8)</sup>

### 2.2. 반응조 미생물 농도의 증가와 잉여슬러지 발생량과의 관계

#### 2.2.1. SRT의 증가와 미생물 농도의 변화

생물학적 하폐수 처리에서 잉여슬러지의 배출량 감소는 반응조내 미생물 연령의 증가를 의미하며, 미생물의 반응조내 체류시간(SRT)의 증가는 반응조내 미생물 농도의 증가와 직접적으로 연결되어 있다. 즉 반응조내 미생물 농도의 증가는 침전조 이후에 배출되는 잉여슬러지의 양을 줄이게 되는 것으로 슬러지 발생량의 저감을 의미한다. 일반적인 중력에 의한 침전조를 이용하여 반응조내 미생물 농도를 증가시킬 수 있는 미생물 농도의 한계는 약 8-10 gMLSS/L이다. 이보다 더 높은 반응조내 미생물 농도에 도달하기 위해서는 최근 정수 및 폐수처리 등의 수처리 분야에서 신기술로 각광을 받고 있는 분리막 기술을 이용하여야 하며, 분리막을 이용하여 반응조내 미생물의 농도를 단계적으로 증가시킨다.<sup>6,7)</sup>

#### 2.2.2. 잉여슬러지 저감효과 및 산소전달계수( $k_{La}$ )

슬러지 발생량 저감은 일반적 하수처리장에서 운영되고 있는 미생물 농도 2-4 gMLSS/L를 기준으로 발생되어지는 잉여슬러지량과 본 실험에서 얻어진 높은 미생물 농도를 비교하여 평가한다. 실험을 통해 얻어진 미생물 농도가 산소전달계수( $k_{La}$ )에 미치는 영향, 유기물 분해효율과의 관계 및 미생물 수율( $Y_{B/S}$ ) 등을 비교 분석한다.<sup>6,9,10)</sup>

하수슬러지의 감량화를 위한 전처리 공정의 형태로 호기성 소화에 비해 혐기성 소화가 월등히 많이 이용되고 있다. 호기성 처리가 빠른 반응속도에 따른 작은 부지면적과 적은 설치비용을 요하는 등의 장점에도 불구하고, 소화조(반응조)내 슬러지의 농도가 높을 경우 산소전달계수의 감소에 따른 폭기비용이 급격히 상승하기 때문이다. 산소전달계수( $k_{La}$ )는 하수처리장 운전비용중 많게는 60-70 %까지를 차지하는 폭기비용에 직접적으로 영향을 미치는 주요한 인자이다. 이와 관련한 최근의 연구는 산소전달계수의 향상을 위해, 폭기시 미세한 공기방울의 형성과 미생물 플록(floc)의 해체를 돕는 폭기 및 교반장치의 개발이 주를 이루고 있다.

### 2.3. 슬러지 가용화와 혐기성 소화효율

#### 2.3.1. 초음파에 의한 슬러지 가용화

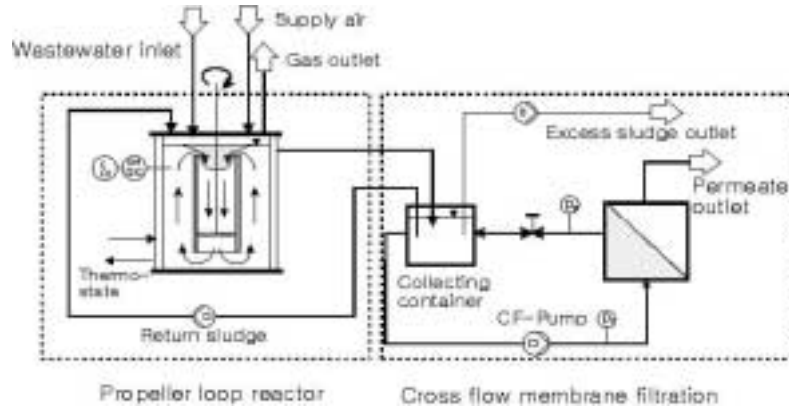


Fig. 1. Bioreactor with the Membrane Filtration.

하수처리장에서 발생하는 하수슬러지의 감량화 방안중 가용화를 통한 재기질화는 널리 연구되는 분야이다.<sup>11~14)</sup> 이러한 재기질화 방안의 하나로써 초음파 처리를 이용한 하수슬러지의 가용화에 대해서 알아본다. 초음파 처리는 초음파를 이용하여 활성슬러지 미생물을 파괴하는 방법으로 초음파 진동자 표면에서 초음파를 방출했을 때 생기는 음향공동화(acoustic cavitation)현상을 이용하여 세포벽을 파괴하고 이를 통해 세포내 물질을 추출한다. 초음파의 세기와 투입시간에 따른 슬러지의 가용화 정도를 파악하고, 가용화된 슬러지는 재기질화를 위해 반응조로 투입되는데, 본 연구에서는 혐기성 소화실험에 이용되었다.

### 2.3.2. 가용화된 슬러지의 혐기성 소화 실험

혐기성 소화공정은 하수슬러지 감량화에 쓰이는 일반적인 방법으로, 산소가 존재하지 않는 상태에서 혐기성 미생물에 의해 유기성 물질을 메탄과 이산화탄소로 분해하고, 발생된 메탄의 활용을 통해 에너지를 회수하는 수처리 공정이다. 미생물이 유기물의 산화를 위해 산소를 이용하는 호기성 공정에 비해 미생물의 생장이 월등히 적은 것을 특징으로 하며, 발생하는 슬러지의 양이 적어 감량화의 효과가 크다.<sup>15,16)</sup> 혐기성 미생물에 의한 혐기성 소화는 크게 가수분해단계, 산생성단계 및 메탄생성단계로 구분되어 진다. 본 연구에서는 초음파로 전처리된 하수슬러지를 혐기성 소화 실험을 통하여 바이오 가스 생성효율에 미치는 영향을 평가하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. 분리막 반응조(MBR) 실험

미생물 농도 변화 실험은 교차여과(cross-flow filtration)

방식의 분리막 시스템을 장착한 생물분리막 반응조(MBR)에서 진행되었다. 본 실험에 사용된 기질은 미생물의 성장에 필요한 유기물과 무기물의 구성(C:N:P의 원소비율을 고려)을 일정하게 하기 위해 인공적으로 제조된 합성기질을 이용하였다. 반응조의 용적은 약 13 L이며, 완전혼합 반응조(Completely Stirred Tank Reactor; CSTR)이다.

반응조내 용존산소의 농도는 컴퓨터와 연결된 용존산소 측정기(Oxi 340, WTW, Germany)를 통하여, 스위치 조작에 의해 원하는 용존산소의 농도로 조절, 유지되었다. 교반속도는 미생물의 농도증가에 따라, 약 700~1,100 rpm까지 변동되었으며, 반응조의 온도는 약  $22.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지되었다. 반응조내의 pH는 0.2 - 0.3 M NaOH의 투입으로 실험에 필요한 pH를 유지하였다. 반응조의 용적에 비해 매우 적은 양의 희석된 NaOH가 투입되어 미생물에 미치는 영향은 극히 미미하거나 없을 것으로 판단되었다. 반응조내 용존산소의 농도는  $c'_{\text{O}_2} > 2 \text{ mg/L}$ 로 유지되었고, 유입유량은  $Q = 1.3 \text{ Lh}^{-1}$ 로 유지하여 HRT=10~10.2 h로 일정하였다. 전체 실험 기간중 유입기질의 농도는 약  $c_{\text{SO}} = 500 \text{ mg/L DOC}$ 이었으며 제거효율은  $> 90\%$ 로 매우 높게 나타났다.

한편 반응조내 미생물의 농도가 높을 경우 급격한 산소전달계수( $k_{\text{La}}$ )의 감소에 따른 미생물 성장에 영향을 미칠 수 있어, 이를 방지하기 위해 반응조내 높은 미생물 농도에서도 폭기효율의 증대를 가져올 수 있는 특수 제작된 프로펠러 루프 반응조(Fig. 1)를 사용하였다. Fig. 1은 사용된 실험장치의 개략도를 보여준다.

반응조내 미생물 농도의 증가는 저장조(collecting container)로부터 유출되는 잉여슬러지의 양을 단계적으로 줄여나감으로써 반응조내 미생물 농도 역시 단계적으로 증가할 수 있도록 하였다. 미생물 농도의 증가와 함께, 각각의 구간에서 반응조로부터 샘플을 채취하여, DOC(DIMA-TOC

100, Dimatec, Germany)를 측정함으로써, 유기물 제거 효율을 함께 조사하였다. 미생물 농도의 증가와 함께 탄소에 대한 물질수지를 통해 미생물 수율( $Y_{B/S}$ )값을 구하고, 산소에 대한 물질수지를 통해 산소전달계수( $k_{LA}$ )를 구하였다.

$$0 = Q_g \cdot (c_{O_2,0} - c_{O_2,1}) - (k_{LA}) \cdot (c^*_{O_2} - c'_{O_2}) \cdot V_R \quad (1)$$

여기서,  $Q_g$  gas flow rate  
 $c_{O_2,0}$  influent oxygen concentration of air  
 $c_{O_2,1}$  effluent oxygen concentration of air  
 $c^*_{O_2}$  saturation oxygen concentration of water  
 $c'_{O_2}$  dissolved oxygen concentration of water  
 $V_R$  reactor volume

$$k_{LA} = \frac{Q_g \cdot (c_{O_2,0} - c_{O_2,1})}{(c^*_{O_2} - c'_{O_2}) \cdot V_R} \quad (2)$$

유입, 유출되는 공기중의 산소농도는 가스 분석기(Magnos 16)를 통해 실시간으로 측정되었으며, 용존산소의 농도는 산소 측정기(WTW, Oxi 530)를 통하여 측정되었다. 한편 포화 산소 농도는 다음과 같이 구하였다.

$$c^*_{O_2} = \frac{c_{O_2}}{H'} \quad (3)$$

여기서,  $H'$  = Henry's constant

반응조내 온도의 변화는 점도, 밀도, 표면장력과 같은 물의 물리적 성질에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 확산계수와 산소전달 계수에도 영향을 미친다. 따라서, 서로 다른 반응조내 온도에서 측정되어진 산소전달계수( $k_{LA}$ )값은 다음과 같이 보정되었다.

$$(k_{LA})_{20} = (k_{LA}) \cdot \theta^{(20-T)} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$  coefficient for the temperature correction  
 $\theta$ 값은 경험적인 것이며, 다양한 연구자들이  $\theta = 1.008 \sim 1.047$  범위의 값을 제시하고 있다. 본 연구에서는 1.024값을 적용하였다<sup>17)</sup>.

산소전달계수에 미치는 미생물 농도의 영향을 정량화하기 위해 수도물에서의  $k_{LA}$ 값과 실험대상 폐수에서의  $k_{LA}$ 값의 비율로써  $\alpha$ -factor값은 다음과 같이 정의되었다.

$$\alpha = \frac{(k_{LA})_{WW}}{(k_{LA})_{TW}} \quad (5)$$

여기서,  $(k_{LA})_{WW}$  measured in wastewater  
 $(k_{LA})_{TW}$  measured in tap water

한편 미생물 수율계수(biomass yield coefficient,  $Y_{B/S}$ )는 다음과 같이 정의되었다.

$$Y_{B/S} = \frac{C_{B1} - C_{B0}}{C_{S0} - C_{S1}} = \frac{r_{B,0}}{r_S} \quad (6)$$

여기서,  $C_B$  measured in tap water,  
 $C_{B0}$  measured in tap water,  
 $C_{S0}$  substrate influent concentration,  
 $C_{S1}$  substrate effluent concentration,  
 $r_{B0}$  measured in tap water,  
 $r_S$  measured in tap water

### 3.2. 초음파를 이용한 가용화 실험

본 실험에 사용된 슬러지는 서울시 J 물재생센터의 반송슬러지 파이프라인에서 채취하였으며, 채취한 슬러지는 중력침강 후 상등액을 제거하여 TS 농도 1.0 및 1.5%로 조정하여 사용하였다. 초음파 장치는 주파수 38 kHz, 최대 출력 1,000 W인 한국초음파산업 제품을 사용하였다. 적절한 비교실험을 위한 전처리 조건은 시료의 양과 투입에너지의 양을 고정시키고, 초음파 조사 시간을 0, 15, 30, 60, 120, 240초로 달리하여 그 효율을 비교하였다. 한편 초음파 장치내 물(water)과 시료의 pH 및 온도 변화는 200 mL의 시료에 초음파 조사 시간을 각각 0, 2, 30, 60, 600초로 달리하였으며, 초음파 가용화 전후를 체크하여 기록하였다. 이때 시료의 슬러지 농도는 3.56 gTSS/L(3.26 gVSS/L)였다. 초음파 전처리된 하수슬러지 시료는 원심분리기를 이용하여 3,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후 상등액을 GF/C 여과지(Whatman, England)로 여과하였으며, 얻어진 여과액을 4℃에서 냉장보관하면서 분석하였다. 가용화 특성을 알아보기 위한 실험항목으로 TCODcr 및 SCODcr은 standard methods에 준하여 분석하였다. 초음파에 의한 슬러지 가용화율은 다음과 같이 구하였다.

$$\text{가용화율 } \beta = \frac{SCOD_t - SCOD_0}{SCOD_0} = 100\% \quad (7)$$

여기서,  $SCOD_t$  Soluble COD measured at time t  
 $SCOD_0$  Soluble COD measured at time 0

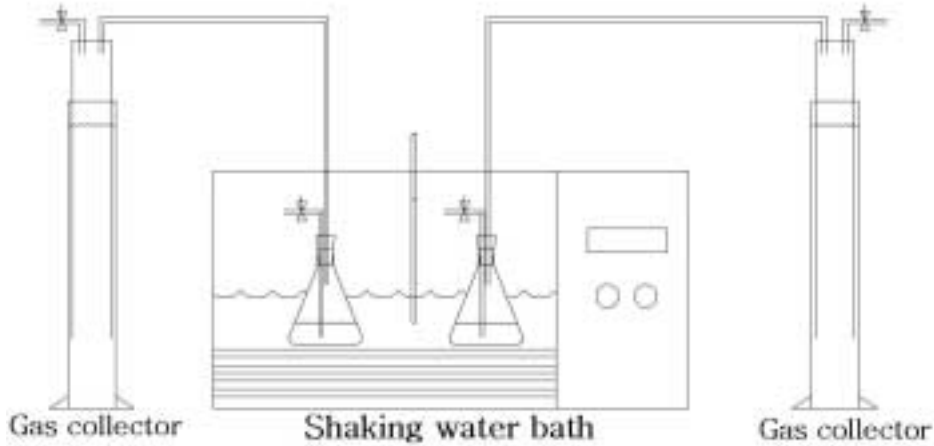


Fig. 2. Diagram for Anaerobic Digestion Test.

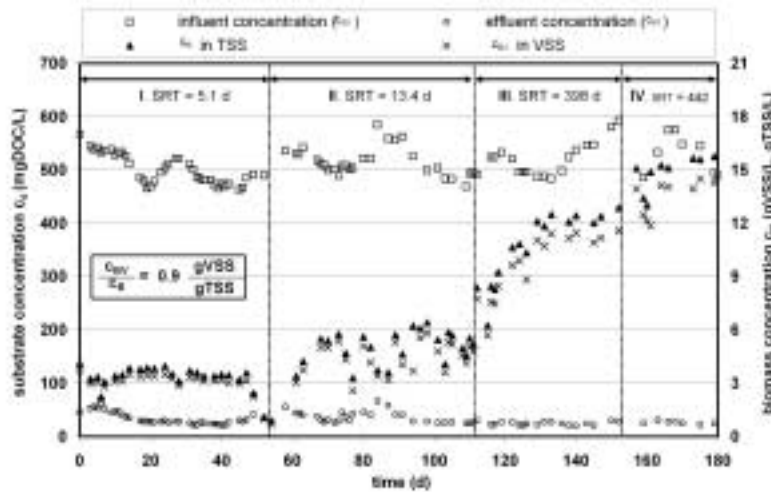


Fig. 3. Continuously Operated MBR with Increasing Biomass Concentrations  $C_B$ .

### 3.3. 혐기성 소화효율 실험

슬러지에 대한 초음파 전처리를 평가하기 위하여, 초음파에 의해 전처리 가용화된 슬러지와 가용화하지 않은 슬러지를 각각 회분식 혐기성 처리장치에 넣어 혐기성 소화효율을 측정하였다.

혐기성처리 실험장치는 시료를 혐기성 상태에서 처리하기 위한 삼각플라스크와 일정온도(37°C)로 유지시키면서 교반(100 rpm)을 하는 Shaking water bath, 가스발생량을 측정하는 가스포집기로 구성하였다(Fig. 2). 단기간 중에 최대한 많은 시료를 통해 결과물들을 도출해내기 위해, 최대 10개의 삼각플라스크를 동시에 설치할 수 있게 장치하였으며, 일정온도(37°C)의 혐기성 상태에서 발생하는 바이오가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 등)는 자체 제작한 실린더 형태의 공기발생량 측정기(가스포집기)를 사용하여 가스발생 누적량을 측정할 수 있게 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 분리막 반응조의 운전

#### 미생물의 농도 증가

MBR 반응조는 반응조내 긴 미생물 체류시간(SRT)과 높은 미생물 농도를 유지시키는데 매우 유용하다. 미생물의 완벽한 체류를 가능하게 하고, 긴 SRT의 유지는 미생물 성장을 효율적으로 지원함으로써 유입수의 변동에 대한 시스템의 안정성 향상과 슬러지 발생량 감소에 따른 슬러지 처분비용을 절약할 수 있게 한다.

Fig. 3은 약 180일간 SRT를 단계적으로 증가시키면서 반응조의 미생물 농도를 증가시킨 실험의 결과이다. 이때 수리학적 체류시간(HRT)은 약 10시간으로 고정되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 전체 실험구간은 4개의 서로 다른 미생물 농도를 나타내는 SRT 구간으로 나누어진다. 반응조내 미생물 농도(평균값)는 단계적으로  $C_B=3.4 \text{ gL}^{-1}$ TSS에서  $14.5 \text{ gL}^{-1}$

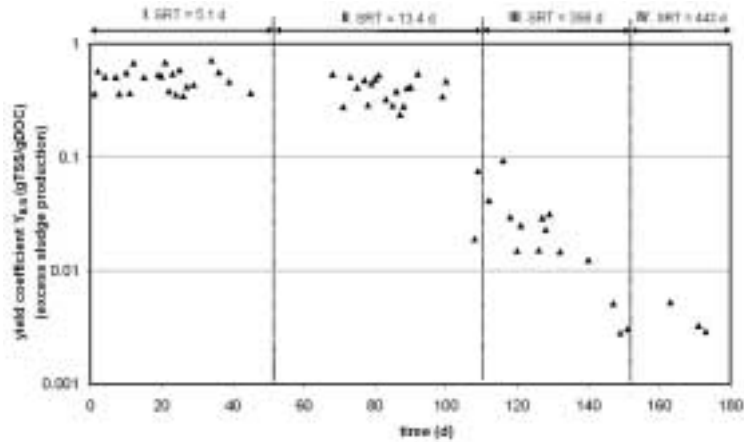


Fig. 4. Yield Coefficient  $Y_{B/S}$  from Excess Sludge Production with Changing SRTs.

TSS로 증가하였다. 반응조내 미생물 농도  $> 12 \text{ gL}^{-1}$  TSS를 유지하기 위해서는 잉여슬러지의 인출을 정지시켜야만 했다. 일정한 SRT는 폐수와 함께 유입되는 TSS와 미생물의 성장 및 슬러지 배출간에 평형이 이루어졌음을 의미하게 되고, 증가하는 SRT는 슬러지의 인출(발생)이 적어짐을 의미하며, 이는 곧 잉여슬러지 처분 비용의 감소를 의미하는 것이다.

#### 4.1.1. SRT 증가(반응조 미생물 농도의 증가)에 따른 유기물 제거효율의 변화

SRT는 약 5.1일부터 442일까지 변화하였으며, 고정된 유입원수와 HRT에 따라 잉여슬러지의 유출량을 조정하면서 SRT값을 정하였다. 잉여슬러지의 유출은 매 2시간마다 일정량을 일일 12번 자동적으로 이루어졌다.

반응조의 SRT를 증가시켜 잉여슬러지의 발생량을 감량시키는 결과를 평가하기 위하여 반응조내의  $C_B$ 와  $C_{BV}$  및 유입수와 유출수의 DOC의 농도를 측정하였다. 반응조에서의 미생물 농도( $C_B$ )는 시간이 경과함에 따라 증가하고, 유기성 미생물 농도( $C_{BV}$ ) 또한 시간이 지남에 따라 증가하였다(Table 1). 즉 SRT를 증가시키면 반응조내의 미생물 농도가 높아지는데, 유기물의 제거효율이 일정하다면 그만큼 발생되어지는 잉여슬러지의 양이 감소하는 것을 의미하게 된다.

미생물 농도와 SRT의 증가는 미생물 효소의 활성도를 감소시킨다.<sup>18)</sup> 긴 SRT에서 장기간 운전하게 되면, 미생물 효소의

활성도가 급격히 떨어질 수 있는데, 이때 기질의 분해율은 미생물 활성도 감소의 영향을 받을 수 있다. 그러나 본 연구에서는  $C_{BV}/C_B$  비율이 약 90%를 유지됨으로써 활성화된 유기물의 비율은 긴 SRT=442일과 높은 미생물 농도( $C_B=14.5 \text{ gVSSL}^{-1}$ )의 영향을 크게 받지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.1.2. 미생물 수율( $Y_{B/S}$ )의 감소

Fig. 4는 앞의 Fig. 3에 상응하는 그림으로써, 반응조의 부하율이 일정할 때, 실험기간의 경과와 SRT의 증가에 따른 미생물 수율( $Y_{B/S}$ )이 명백히 감소하는 상태를 보여주고 있다. 시간의 경과에 따른 잉여슬러지 발생의 감소는 Fig. 3에서 보여준 반응조내 미생물 농도의 증가 경향에 대칭되는 모습을 보여주고 있다.

이러한 결과는 MBR 반응조가 긴 고형물 체류시간(SRT)의 조건과 잉여슬러지 발생량의 감소라는 조건을 만족시키며 운전되어질 수 있음을 보여주는 것이다. 증가하는 SRT에 따라 미생물 수율은 감소하고 있으며, SRT의 증가는 미생물의 내호흡율의 증가와 미생물 사멸율의 증가를 가져와 결국 잉여슬러지 발생의 감소를 가져오게 되는 것이다.

#### 4.1.3. 산소전달계수( $k_{La}$ )의 변화

산소전달계수는 에너지투입 및 유량 등의 다양한 프로세스 인자와 밀도, 점도 등의 물리적 인자의 영향을 받게 된다.<sup>19)</sup> MBR 반응조에서 미생물의 농도는 높은 수준까지 증가할 수 있는데,

Table 1. Operation Parameters of the MBR Varying SRT(pH=7±0.02) (Fig. 3)

Period	Days	HRT [h]	SRT [d]	$c'_{O_2}$ [mgL <sup>-1</sup> ]	$C_{BV}$ [gL <sup>-1</sup> VSS]	$C_B$ [gL <sup>-1</sup> TSS]	$C_{BV}/C_B$ [%]
I	1 - 52	10.2	5.1	2.5 - 7.0	3.0	3.4	90.7
II	53 - 110	10.2	13.4	2.0 - 6.0	4.3	4.9	88.7
III	111 - 152	10.1	398	2.0 - 6.5	9.7	10.7	90.7
IV	153 - 180	10.0	442	2.6 - 7.3	13.3	14.5	91.3

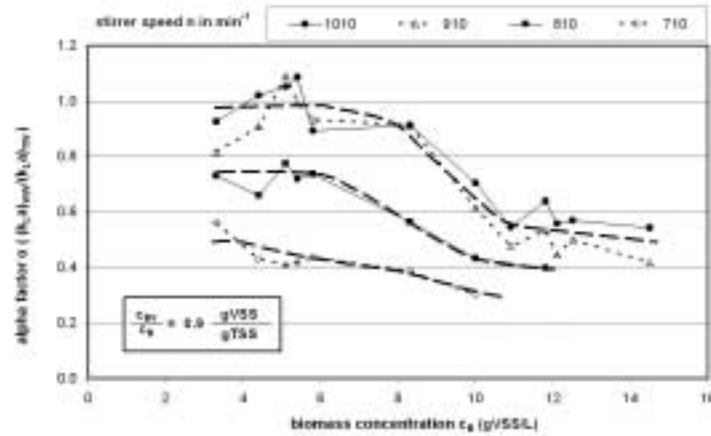


Fig. 5.  $\alpha$  Factors with Different Stirrer speeds  $n$  and Biomass Concentrations  $c_B$ .

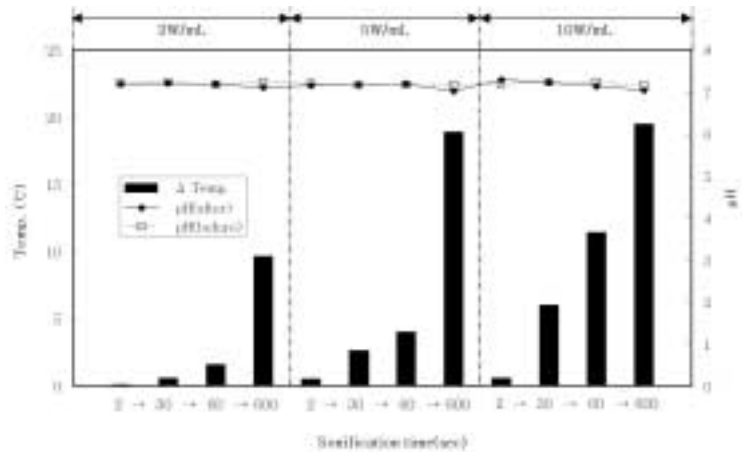


Fig. 6. Variation of Temperature and pH for Varing Sonification Time.

이는 산소전달계수를 감소시키고 반응조의 폭기에 나쁜 영향을 미치게 된다. 미생물의 농도뿐 아니라 교반기의 속도 역시도 산소전달계수에 미치는 주요한 영향 인자이다. 이러한 산소전달계수에 미치는 미생물의 농도와 교반속도의 영향을 알아보기 위해 미생물 농도와 교반속도에 따른 산소전달계수를 구하였다. 반응조는 완전혼합 반응조이며, 프로펠러 교반기에 의한 순환흐름을 통해 폭기가 되는 프로펠러 루프 반응조(Fig. 1)이다.

Fig. 5는  $\alpha$ -factor값을 반응조내 미생물의 농도 변화와 교반속도의 변화에 따라 나타내었다. 교반속도  $n=710$  rpm은 본 실험에 사용된 프로펠러 루프 반응조에서 프로펠러 교반기에 의한 순환흐름이 완전하게 일어나는 지점이고, 이 교반속도부터 100 rpm씩 증가시켰다. 미생물 농도  $c_{BV} \leq 6 \text{ gL}^{-1} \text{ VSS}$  와 교반속도  $> 910$  rpm 일때  $\alpha$ -factor는 최대치  $\alpha=1$ 에 도달하였다. 이후 미생물 농도의 증가에 따라 그 값은 감소하였다. 이와는 달리 교반속도  $n=710$  rpm에서는  $\alpha$ -factor값이 오직 그 절반수준인 약  $\alpha=0.5$ 에 머물렀다.  $\alpha$ -factor값은 교반속도에 크게 영향을 받았으며, 특히 미생물 농도  $4 \leq c_{BV} <$

$10 \text{ gL}^{-1} \text{ VSS}$ 에서 그 영향력이 크게 나타났다. 미생물 농도  $c_{BV} \geq 10 \text{ gL}^{-1} \text{ VSS}$ 에서는 교반속도가  $\alpha$ -factor값에 미치는 영향은 크게 감소되었다. 한편 프로펠러 루프 반응조에서 미생물의 농도가 같을 경우, 에너지 투입의 감소를 의미하는 교반속도의 감소는 산소전달계수의 감소를 의미하는  $\alpha$ -factor값의 감소를 가져오게 된다. 따라서, SRT 증가에 따른 미생물 농도의 증가는 폭기효율을 향상시키기 위한 교반속도의 증가를 가져오기 위한 추가적인 에너지 소비를 수반하게 된다.

#### 4.2. 초음파에 의한 슬러지 가용화

초음파에 의한 슬러지 전처리시 에너지 투입량, 즉 단위용적당 투입되는 초음파 세기와 초음파 조사시간에 따라, 시료의 온도변화가 달리 나타났다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 초음파 조사시간 2초, 30초, 60초 및 100초의 서로 다른 에너지량에 따라 현격한 온도의 상승이 관찰되었다. 초음파 전처리 과정에서 발생하는 열에너지도 슬러지 가용화에 주요한 영향요소로 판단되어진다. 한편, 각각의 시

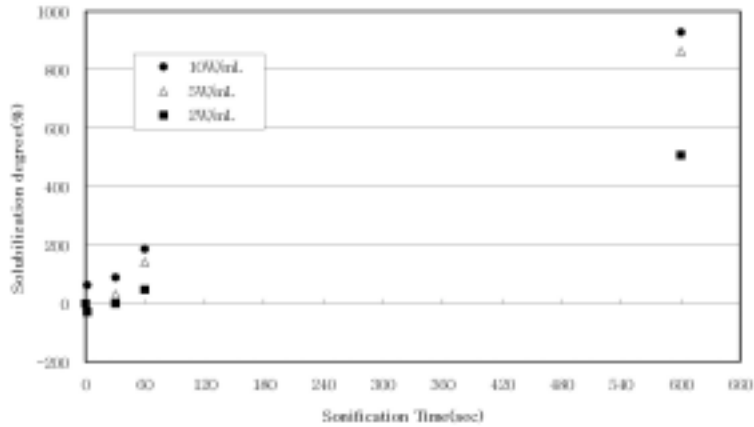


Fig. 7. Variation of Solubilization Efficiency for Varing Sonification Time.

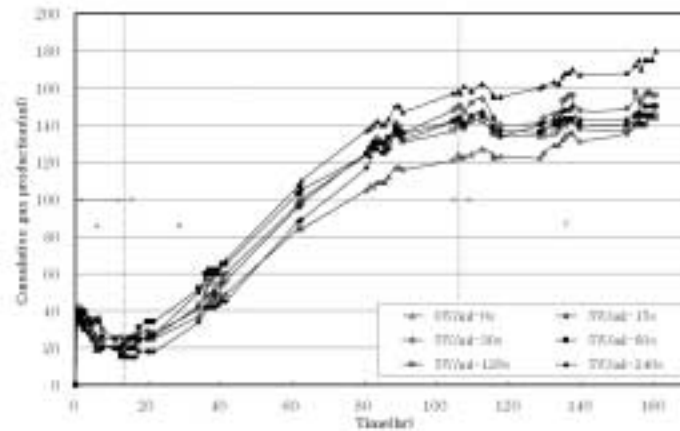


Fig. 8. Cumulative Biogas Production on Anaerobic Digestion.

료에 대한 pH의 변화는 약간의 pH값의 변동이 관찰되지만, 초음파 전처리에 의해 커다란 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

Fig. 7은 초음파를 이용하여 잉여슬러지를 가용화한 결과를 나타낸 것이다. 슬러지에 투입되는 초음파 에너지량을 1,000 W로 일정하게 하고, 시료의 양을 각각 100 mL, 200 mL 및 500 mL로 변화시키고, 초음파 조사시간에 따라 시료를 채취하여 분석하였다. 초음파의 시간이 길어질수록 슬러지의 세포가 파괴되면서 용출되어 나온 물질에 의해 SCOD는 지속적으로 증가하였고, SCOD의 증가와 함께, 초음파에 의한 가용화 효율 역시 증가하였다. 즉 동일 에너지 투입조건에서 시료의 양이 적을수록 SCOD값이 높게 나오는 것을 볼 수 있는데, 이는 단위 체적당 투입되는 에너지량이 많기 때문이다. 단위용적당 투입되는 에너지가 많은 10 W/mL에서 조사시간이 가장 긴 600초에서 최고의 가용화 효율을 보여주었다.

#### 4.3. 가용화된 슬러지의 혐기성 처리실험

슬러지에 대한 초음파 전처리의 목적은 슬러지 혐기성 소

화효율을 향상시키는 것이다. 혐기성 소화실험은 회분식 형태로 진행되었으며, 가용화를 위한 초음파 전처리의 조건과 혐기성 처리실험의 조건을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 8은 가용화된 슬러지의 혐기성 처리 실험의 결과를 보여주는 것이다. 가용화된 또는 가용화하지 않은 잉여슬러지와 소화슬러지의 비율을 9 : 1 (270 mL : 30 mL)로 일정하게 하고 혐기성 처리효율 실험을 실시하였다. 또한 각 하수슬러지 시료의 가용화율을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 8의 전체적인 가스발생량을 살펴보면 초음파 조사시간이 가장 긴(5 W/mL-240 s), 즉 단위체적당 에너지투입량이 가장 높은 곳, 가용화율이 가장 높은 곳에서 가스의 발생량이 가장 높게 나타났다. 초음파 조사시간의 순서(가용화율과 비례)에 따라 순차적인 그래프 변화를 보여주진 않지만 초음파 조사시간이 길수록 혐기 처리성이 잘되는 것을 확인하게 되었으며, 전체적으로 초음파에 의한 전처리를 한 슬러지의 혐기성 소화가 가용화하지 않은 슬러지의 혐기성 소화보다 많은 바이오가스 생산을 보여주었다.



**Table 2.** Experimental Condition of Anaerobic Treatment of Sewage Sludge

	Sonification Energy (W)	Quantity of Sludge (mL)	Sonification time (sec)	spec. Input of Energy (W-sec/mL)	Description
I	0	200	0	0	0 W/mL-0 s
II	1000	200	15	75	5 W/mL-15 s
III	1000	200	30	150	5 W/mL-30 s
IV	1000	200	60	300	5 W/mL-60 s
V	1000	200	120	600	5 W/mL-120 s
VI	1000	200	240	1200	5 W/mL-240 s

Temp. : ~ 37°C, Mixing speed: 100 rpm

**Table 3.** Experimental Condition of Solubilization Degree of Sewage Sludge

	Description	SCOD (mg/L)	Solubilization Degree (%)	
I	0 W/mL-0 s	8	0.0	$\frac{SCOD_t - SCOD_0}{SCOD_0} \times 100\%$
II	5 W/mL-15 s	34	325.0	
III	5 W/mL-30 s	38	375.0	
IV	5 W/mL-60 s	54	575.0	
V	5 W/mL-120 s	150	1775.0	
VI	5 W/mL-240 s	248	3000.0	

혐기성 소화의 초기구간인 A에서 가용화된 잉여슬러지와 소화슬러지를 혼합하여 초기에 발생되었던 바이오가스의 양이 하루동안 지속적으로 줄어드는 구간이 있는데, 이는 가스 발생량을 측정하기 위해 제작한 가스 포집기(gas collector in Fig. 2)안에 채워진 물에 의해 발생된 바이오가스가 용해되어 우선적으로 감소되고, 약 하루가 지난 후 채워진 물이 바이오가스(ex. CO<sub>2</sub>)에 의해 포화된 후, 추후 발생된 바이오가스의 양이 측정된 것으로 추측된다. 이러한 초기 가스 발생량 감소의 문제는 가스 포집기안의 물에 NaCl을 포화시켜 사용함으로써 해결할 수 있다.

한편 구간 B에서는 이분해성 유기물질들이 급격하게 혐기성 소화과정을 거쳐 가스를 발생시키고, 이러한 이분해성 유기물질들이 대부분 가스로 전환이 된 구간 C에서는 난분해성 물질들이 소화과정을 관여하여 가스발생속도가 현격히 늦어지고, 가스 누적량이 일정한 형태를 보여주고 있다. 잉여슬러지에 대한 가용화 전처리후 혐기성 처리는 처리효율뿐만 아니라, 감량화율을 증대시키고, 화석연료의 고갈과 미래 신재생에너지 사회에 대비한 바이오에너지로써의 바이오가스를 획득할 수 있는 이점이 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하수처리 공정에 대한 운전조건 개선을 통하여 잉여슬러지 발생량을 저감하는 방안이 연구되었으며, 초음파에 의한 슬러지 가용화율과 가용화된 슬러지의 혐기성 처리효율을 알아보았다.

1. 프로펠러 교반기를 장착한 MBR 반응조에서, 미생물 평

균 농도값은 시간이 경과함에 따라 약 3.4에서 14.5 gTSSL<sup>-1</sup>로 증가하고, 반응조의 부하율이 일정할 때, 실험기간의 경과와 SRT의 증가(442일)에 따라 미생물 수율(Y<sub>B/S</sub>)이 명백히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

2. MBR 반응조는 긴 미생물 체류시간(SRT), 즉 높은 미생물 농도의 조건과 잉여슬러지 발생량의 감소라는 조건을 만족시키며 운전되어 질 수 있음을 보여주었다.
3. 한편 프로펠러 루프 반응조에서 미생물 농도의 증가에 따라 산소전달계수(k<sub>La</sub>)가 낮아지나, 교반속도의 증가로 폭기효율을 향상시켜, α-factor의 증가를 가능하게 할 수 있었다.
4. 초음파에 의한 슬러지의 전처리는 동일한 초음파에너지 투입조건에서 시료의 양이 적을수록, 즉 단위 체적당 투입되는 에너지량이 많을수록 가용화 효율이 증대하였다.
5. 회분식 형태로 진행된 잉여슬러지의 혐기성 처리실험은 초음파의 조사시간이 가장 길어 에너지 투입량이 가장 높은 곳에서 소화효율이 가장 높게 나타났으며, 초음파를 통한 가용화를 하지 않은 잉여슬러지의 소화효율은 가장 낮게 나타나, 슬러지의 초음파 가용화가 혐기성 소화효율에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있었다.

KSEE

## 사 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-351-D000221).

## 참고문헌

1. 환경관리공단, "하수슬러지의 효율적 처리방안 보고서," (2004).
2. 김순영, 신윤미, 박철휘, 김진수, "호열균을 이용한 하수잉여 슬러지 감량화 연구," 한국물환경학회, 대한상하수도학회, 공동춘계학술발표회 논문집, D-6, pp.259-262(2004).
3. Yeom, I. T., Lee, K. R. Kwon, J. H., Kim, H. S., "Effects of sludge pre-treatment of membrane-coupled aerobic digestion," *Journal. of KSCS*, **22**(6-B), pp. 803-809(2002)
4. 염익태, 이기룡, 황의성, 권재현, 김형수, "슬러지 전처리와 막분리를 이용한 고효율 슬러지 감량화 공정," 대한환경공학회지, **25**(3), 379-384(2003).
5. 최홍복, "ER-1을 이용한 하수슬러지의 호기성 소화기술," 하수슬러지처리 및 악취저감에 관한 기술발표회, 한국상하수도협회, pp. 193-199(2006).
6. Rosenberger, S., "Charakterisierung von belebtem Schlamm in Membranbelebungs- reaktoren zur Abwasserreinigung," TU-Berlin, Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr. 769, Düsseldorf: VDI-Verlag, (2002)
7. Choi, I. S., "Aerobic degradation of surfactant and nitrification in a membrane bioreactor (MBR) with CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gas analysis" TU-Berlin, Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr. 838, Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-18-383803-6(2005)
8. 정경은, 배민수, 조윤경, 조광명, "부직포 여과막 생물반응조에서의 폐활성슬러지 감량화," 대한환경공학회지, **28**(1), 88-96(2006).
9. Cornel, P., Wagner, M. and Krause, S., "Investigation of oxygen transfer rates in full scale membrane bioreactors," *Water Sci. Technol.*, **47** (11), 313-319(2003)
10. Guender B. and Krauth K., "Replacement of secondary clarification by membrane separation - Results with tubular plate and hollowfibre modules," *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), 311-320(1999)
11. Tiehm A., Nickel K. and Neis U., "The use of ultrasonication to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge", *Water Sci. Technol.*, **36**(11), 121-128(1997)
12. Scheminski A., Krull R. and Hempel D. C., "Oxidative treatment of digested sewage sludge with ozone", *Water Sci. Technol.*, **42**(9), 151-158(2000)
13. 박성현, "마이크로파와 초음파를 이용한 하수슬러지 전처리에 관한 연구," 동아대학교 대학원 환경공학 전공 박사학위 논문(2005).
14. Bourigrier, C., Albasi, C., Delgenes, J.P. and Carrere, H., "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilization and anaerobic biodegradability" *Chem. Eng. Proc.*, **45**, 711-718(2006)
15. Wang Q., Kuninobu M., Kakimoto K., Ogawa H.I. and Kato Y., "Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment," *Bioresour. Technol.*, **68**(3), 309-313(1999)
16. 김혜영, 이수철, 한동우, 김동진, "전처리 방법에 따른 하수 슬러지 가용화 효과 및 혐기소화 효율 비교," 대한환경공학회 2008 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 1191-1197,(2008)
17. Stenstrom, M.K. and Gilbert, R.G., Review paper: "Effects of alpha, beta, and theta factor upon the design, specification and operation of aeration systems". *Water Res.*, **15**(6), 643-654(1981)
18. Cicek, N., Macomber, J., Davel, J., Suidan, M.T., Audic, J. and Genestet, P., "Effect of solids retention time on the performance and biological characteristics of a membrane bioreactor," *Water Sci. Technol.*, **43**(11), 43-50(2001)
19. Gottschalk C., Libra J. A. and Saupe A., "Ozonation of water and waste water - A practical guide to understanding ozone and its application," Wiley-VCH, ISBN 3-527-30178-X(2000)