

## 알칼리처리와 초음파처리를 이용한 슬러지 가용화 연구

김재형\* · 양홍규\* · 이준철\* · 박홍선\* · 최광근\*\* · 박대원\*<sup>†</sup>

\*서울과학기술대학교 에너지환경대학원, \*\*(주)지앤지인텍  
(2011년 3월 14일 접수, 2011년 6월 10일 수정, 2011년 6월 13일 채택)

## A Study of Sewage Sludge Solubilization by Alkali and Ultrasonic pretreatment

Jaehyung Kim\*, Hong Gyu Yang\*, Jooncheol Lee\*, Hongsun Park\*,  
Gwang Geun Choi\*\*, and Daewon Pak\*<sup>†</sup>

\*Graduate School of energy and Environment, Seoul National University of Technology & Science, Seoul 139-743, Korea

\*\*G&G InTech, Gyeonggi R&DB Center, Suwon, Gyeonggi-do 443-766, Korea

(Received 14 March 2011, Revised 10 June 2011, Accepted 13 June 2011)

### 요 약

본 연구는 하수슬러지에 알칼리처리와 초음파처리를 적용하여 최적의 가용화 조건을 도출하고자 각각의 단일 처리, 병합처리로 가용화율을 확인하였다. 단일처리 중 알칼리처리에는 4종의 알칼리시약을 각각 적용하여 전처리한 결과, NaOH를 이용한 방법이 27.6%로 가장 높은 가용화율을 확인할 수 있었으며, 투입농도가 높아지더라도 가용화에 미치는 영향에는 한계가 있음을 확인하였다. 초음파처리는 140 W/L의 조사밀도에서 가용화율이 가장 높았으며(33~39%), 조사주기의 증대는 가용화율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 알칼리처리와 초음파처리를 혼재한 병합처리 시 알칼리처리 후 초음파처리를 적용한 방법이  $70.4 \pm 9.4\%$ 의 가용화율로 초음파처리 후 알칼리처리 방법에 비해 약 22% 높은 결과를 나타내었다. 각 조건에서의 SCOD 증가속도는 병합처리(알칼리처리 후 초음파처리)에서  $0.076 \text{ min}^{-1}$ 으로 가장 높은 결과를 나타내었다.

**주요어** : 슬러지, 가용화, 알칼리처리, 초음파처리, 병합처리

**Abstract** — In this study, individual(alkaline, ultrasonic) and combined(alkaline+ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge solubilization was investigated. COD solubilization rates increased with the dose of NaOH added: solubilization reached 27.6%. Additional alkaline agents did not increase solubilization further. Ultrasonic pretreatment achieved 33~39% solubilization when 140 W/L amplitude. In(alkaline(pre-treatment)+ultrasonic(after-treatment)) treatment, solubilization increased as the combined intensity in creased( $70.4 \pm 9.4\%$ ). SCOD rising rate( $0.076$ ) was achieved.

**Key words** : Sewage sludge, Solubilization, Alkali treatment, Ultrasonic treatment, Combined pretreatment

### 1. 서 론

하수슬러지는 2009년말 기준 전국 433개 하수처리장에서 연간 3,027,829톤이 발생되었으며, 그 중 47.1%

가 해양배출로 처리되고 있다 [1]. 하지만, 폐기물 등의 해양투기 및 해상소각 규제를 목적으로 하는 런던협약에 의해 해양투기가 금지됨에 따라 하수슬러지의 육상처리 필요성이 대두되고 있다 [2]. 현재 대부분의 슬러지 육상처리기술(건조, 소각, 용융, 퇴비화)은 슬러지 저감에 목적을 두고 있고 실효성마저 미비한 실정에 있어, 이에 대한 대안으로 혐기성소화와 같은

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, KOREA  
Tel : 02-970-6595; E-mail : daewon@seoultech.ac.kr

폐자원 에너지화 기술이 각광받고 있다. 하수슬러지의 대부분은 미생물이 차지하고 있으며, 이러한 미생물들은 다량체 기질(microbial matrix; flocs) 내의 집합체 형태로 존재하며, 다당류(polysaccharides), 단백질 [3-5], 핵산(nucleic acid), 우론산(uronic acids), 부식물(humic substances) [6], 지질 등의 중합체인 EPS(Extracellular polymeric substances)에 의해 응집되어 있다. EPS는 30~50%의 생분해성 물질로 구성되어 있어 [7-9], 이러한 슬러지를 이용하는 혐기성 소화와 관련된 연구는 1970년대 이후부터 연구가 지속되어 왔다.

여러 생물학적 단계를 거쳐 최종적으로 메탄을 생산하게 되는데, 특히 슬러지를 이용 시 단백질로 구성된 세포벽의 용해시키는 가용화 가수분해(Hydrolysis) 단계가 율속단계(Rate-limiting Step)로써 이를 해결하기 위한 전처리방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

슬러지 전처리 방법 중 알칼리처리는 화학적 작용에 의해 미생물의 세포벽을 파괴하여 세포내의 용존 유기물을 용출시켜 혐기성소화 효율을 높이는 기술로 현재 열처리(170°C 또는 120~130°C)와의 병합처리에 의한 연구진행이 활발하게 진행되고 있으며 [10,11], 170°C의 열처리와 알칼리(NaOH) 조합에서 48~75%의 메탄생산량 증대가 보고된바 있다 [12].

그리고, 초음파처리는 셀의 구조와 플록을 붕괴시키는 기술로, 진동수가 낮은 초음파가 액상의 매질에 조사되었을 때 공동(cavity)이 발생하고, 이 공동이 파괴되는 과정에서 10,000 K에 달하는 국부적인 고온 영역이 발생하여 입자의 물리·화학적 변화를 촉진시키는 기술이다.

초음파에 의한 슬러지 가용화 메커니즘은 크게 2단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 초음파 처리에 의해 발생된 공동화(cavitation) 작용으로 이 공동이 깨지면서 매우 강력한 전단응력(hydronechanical shear force)이 발생하며 이 전단 응력에 의해 플록 구조 파괴로 크기가 감소된다. 두 번째는 중속영양 박테리아(heterotrophic bacteria)와 전체 미생물이 효과적으로

붕괴되는 단계이다. 미세기포(microbubble)의 온도 증가와 함께 발생된 다량의 자유라디칼(OH·, HO<sub>2</sub>·, H·)은 미생물 불활성화와 유기물 분해에 크게 관여하게 되며, 이 때 불용해성 유기물질을 용해성 상태로 전환시킬 수 있다. 이로 인해 SCOD 값의 증가와 미생물 밀도의 감소가 같이 일어나는 것으로 알려져 있다. 슬러지의 혐기성소화 전처리 시에는 일반적으로 20~40 kHz에서 주로 행하여진다 [13]. 슬러지의 초음파처리로 45.8~50.3%의 유기물감량화에 대한 연구결과가 보고되었고 [14], 이를 혐기성소화에 적용한 결과 20 kHz의 초음파전처리를 이용하여 84%의 바이오가스 생산량 증대를 이룬 결과가 보고되었다 [15].

현재 알칼리처리와 초음파처리를 혼재한 병합처리는 탈수율(Capillary suction time: CST) 증대 및 혐기성소화 증대에 대한 연구결과가 보고되고 있으며 [16], 알칼리, 초음파 병합처리에 있어서 전처리 시간별 SCOD증대와 같은 병합처리 효율 등 효과적이고 경제적인 조합에 의한 연구결과는 미비한 수준이다.

이에 본 연구에서는 슬러지를 이용한 혐기성소화의 선연구로써 슬러지 전처리효율 특히, 알칼리, 초음파 병합처리에 의한 가용화율을 확인하고자, 알칼리, 초음파처리를 다양한 강도에서 단일처리로 효과를 확인하였고 이후, 병합처리로써 알칼리처리 후 초음파처리와 초음파처리 후 알칼리처리의 실험을 수행하여 가용화율을 확인하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 전처리 시간에 따른 SCOD 증가속도를 확인하여 효율적인 알칼리, 초음파 병합처리를 제안하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 실험재료

본 연구에서 사용된 하수슬러지는 S시의 물재생센터에서 채취한 반송슬러지를 중력침강 후 상등액을 분리하여 사용하였으며 그 성상은 Table 1에 제시하였다.

**Table 1.** Characteristic of sewage sludge.

pH	TS (mg/L)	VS (mg/L)	TCODcr (mg/L)	SCODcr (mg/L)
7.6~7.9	10,800~14,500	9,800~11,500	8,000~12,000	310~450

2-2. 실험방법

시약종류에 따른 알칼리처리 실험은 NaOH, KOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub>를 이용하여 pH 12로 조절 후(시약주입농도 NaOH(2 g/L), KOH(2 g/L), Ca(OH)<sub>2</sub>(2 g/L), Mg(OH)<sub>2</sub>(2 g/L)) 상온에서 30분간 교반(50 rpm)을 통해 실시하였으며, 시약 주입농도별 가용화율 비교 실험은 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 g/L sludge로 주입농도를 달리하여 진행하였다. 초음파처리는 Sonoplus R(200 W, 20 kHz, Germany)을 이용하였으며, 조사 대상의 시료부피는 1 L, 조사시간은 30, 60분으로 처리 후 실험을 진행하였다. 병합처리는 알칼리(NaOH)처리 후 초음파처리를 하는 방법과 초음파처리 후 알칼리처리를 하는 방법을 비교하여 진행하였으며, 이때 알칼리 시약 주입농도는 시약농도별 가용화율 비교실험과 같은 양을 주입하였고 초음파처리는 조사밀도 140 W/L sludge와 조사주기 1회를 적용하여 가용화 실험을 진행하였다. SCOD의 증가속도 확인은 알칼리처리(NaOH 2 g/L), 초음파처리(140 W/L, 30 min), 병합처리(단일처리 방법과 동일)로 실험을 진행하였다.

2-3. 분석방법

COD, TS, VS는 standard methods [17]에 준하여 측정하였다. 전처리효율을 나타내는 지표로 이용되는 가용화율(Solubilization)은 식 (Eq. 1)을 이용하여 표현하였다.

$$Solubilization(\%) = \frac{SCOD_{Final} - SCOD_0}{TCOD_0 - SCOD_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, SCOD<sub>Final</sub> = 전처리 후 SCOD  
 SCOD<sub>0</sub> = 초기 SCOD  
 TCOD<sub>0</sub> = 초기 TCOD

슬러지가용화 시간에 따른 SCOD 증가량을 수치화한 SCOD 증가속도는 아래의 식으로 나타내었다. 슬러지 가용화 후 증가하는 용존물(SCOD)은 Eq. 2와 같은 1차 반응으로 나타낼 수 있고, 이를 적분하면 Eq. 3이 된다. 상기 식을 반응시간에 대하여 도식화 후(Eq. 4), 각 직선에서의 기울기 값을 SCOD의 증가속도로 표현하였다.

$$\frac{dSCOD_t}{dt} = kSCOD_t \quad (2)$$

$$\ln \frac{SCOD_t}{SCOD_0} = kt \quad (3)$$

$$Elution\ rate = \ln \left( \frac{SCOD_t}{SCOD_0} \right) \quad (4)$$

여기서, SCOD<sub>t</sub> : 가용화처리 t시간 후의 SCOD  
 SCOD<sub>0</sub> : 초기 SCOD

3. 결과 및 고찰

3-1. 알칼리 처리를 이용한 슬러지 가용화

알칼리 시약을 이용한 슬러지 전처리 결과를 Fig. 1에 나타내었다. NaOH(27.6%)가 가장 높은 가용화율로 control에 비해 약 13배 높은 결과를 보였으며, KOH(23.5%), Ca(OH)<sub>2</sub>(13.1%), Mg(OH)<sub>2</sub>(9.4%) 순의 가용화율을 나타냈다. NaOH, KOH와 같은 일염기(monobasic)성 알칼리 시약이 Mg(OH)<sub>2</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>와 같은 이염기(dibasic)성 알칼리 시약에 비해 가용화율이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 이염기성 알칼리 시약이 일염기성 알칼리 시약에 비해 상대적으로 낮은 용해도이기 때문인 것으로, 일염기성 알칼리시약은 높은 용해도에 의해 이온화도가 높아 주입된 시약의 대부분이 용해되어 생성된 OH<sup>-</sup>이 슬러지에 직접적인 영향을 주어 가용화율이 다른 것으로 사료된다. 이러한 결과는 V. penaud et al. [18]와 유사한 것으로, 알칼리와 열처리의 병합처리에서도 NaOH > KOH > Ca(OH)<sub>2</sub> > Mg(OH)<sub>2</sub>의 가용화율이 보고된바 있다.

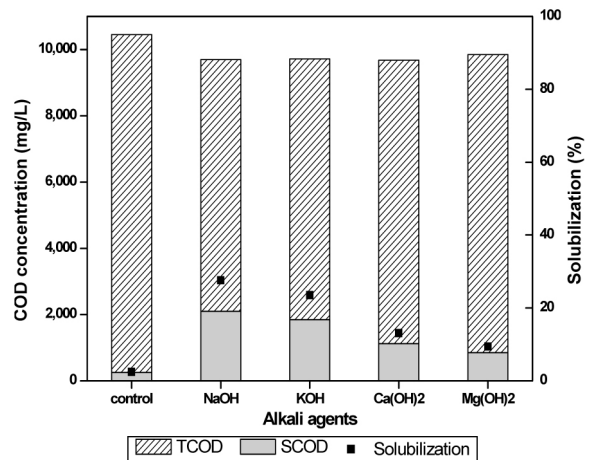


Fig. 1. Influence of various alkali agents addition on COD solubilization.

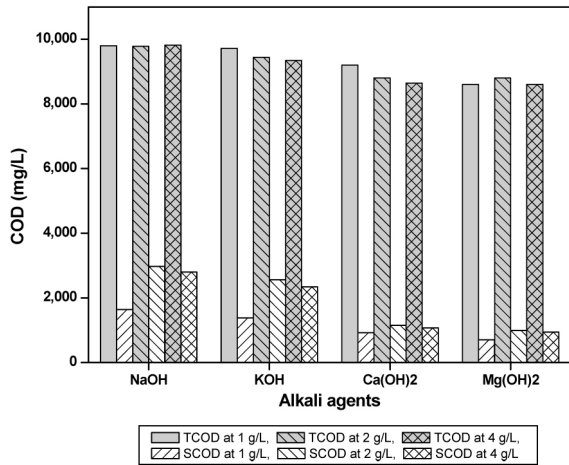


Fig. 2. Influence of alkali agents dosages on COD solubilization.

Fig. 2는 알칼리 주입량에 따른 슬러지 전처리 결과이다. 각각의 시약 주입량 별 최종 pH는 1.0 g/L (pH 10.2~11.2), 2.0 g/L (pH 11.8~12.3), 4.0 g/L (12.1~12.8)로 확인되었으며, 1.0 g/L에서 2.0 g/L로 알칼리 시약의 주입량을 증가 시 NaOH(20.1%→43.6%), KOH (16.5%→37.2%), Ca(OH)<sub>2</sub>(11.1%→15.0%), Mg(OH)<sub>2</sub> (8.9→12.7%)로 가용화율이 증가됨을 확인할 수 있었으며, 앞선 결과와 유사하게 NaOH와 KOH를 사용하는 경우에 가장 높은 가용화율을 확인할 수 있었다. 2 g/L에서 4 g/L로 주입량을 증가 시에는 가용화율에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. pH 12 이상에서의 가용화율은 알칼리시약의 주입농도를 높이더라도 영향에는 한계가 있으며 Kim et al. [10]의 결과에서도 이와 유사한 경향이 보고되었다. 일정량 이상의 알칼리시약 주입은 전처리 효율에 있어서 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 사료된다.

### 3-2. 초음파처리를 이용한 슬러지 가용화

초음파를 이용하여 조사밀도(amplitude), 조사시간 별 슬러지 가용화율을 측정한 결과를 Table 2에 보였다. 조사밀도 100 W/L에서의 가용화 효율은 조사시간에 상관없이 11~18%였지만, 140 W/L에서는 약 두 배가 넘는 가용화 효율(33~39%)을 보였다. 슬러지 전처리에 사용되는 초음파의 소요전력이 높을수록 SCOD의 농도가 높아지는 것을 의미하여 이는 Tichm et al. [19]와 권 등 [20]의 연구와 유사한 결과이다. 초음파처리는 기포가 깨어질때 발생하는 충격파에 의해 처리하는 기술로 상대적으로 단위체적당 투입되는 에

Table 2. Influence of ultrasonic pretreatment methods on COD solubilization.

amplitude (W/L sludge)	time (min)	solubilization (%)
100	30	11.0 ± 2.8
100	60	12.5 ± 0.7
100	90	18.5 ± 2.1
140	30	33.0 ± 1.4
140	60	36.5 ± 2.1
140	90	39.5 ± 0.7

너지량이 낮은 140 W/L에서는 충격파의 압력이 감소되어 반응이 저하되고 이로 인해 가용화율이 낮은 것으로 사료된다. 또한, 초음파 조사시간에서는 슬러지의 가용화율에 큰 차이를 나타나지 않은 것으로 확인되어 전력소모량을 비교해 볼 때 슬러지 초음파 처리시간은 30분이 타당할 것으로 사료된다.

### 3-3. 병합처리(알칼리처리+초음파처리)

단일처리(알칼리)와 병합처리(알칼리+초음파)를 이용한 방법을 비교한 결과를 Fig. 3(알칼리처리 후 초음파처리)과 Fig. 4(초음파처리 후 알칼리처리)에 나타내었다. 앞선 단일처리에서는 가용화율이 50% 이하로 한계가 있었지만, 병합처리는 이를 상회하는 정도의 높은 가용화율을 보였다. 알칼리 처리만을 한 경우는 4g NaOH/L sludge를 주입한 경우가 가장 높은 가용화 효율을 보였으나, 알칼리와 초음파를 혼합하여 적용한 경우는 2g NaOH/L sludge를 주입한 시료가 78.2%로 가장 높게 나타났으며, 4 g NaOH/L(76.1%), 1 g NaOH/L(70.6%), 0.5 g NaOH/L(56.8%)의 가용화율을 나타내었다(Fig. 3). 앞선 단일처리와 동일하게 2, 4 g NaOH/L에서의 가용화율이 유사하게 나타난 것을 확인하였으며, 병합처리(알칼리+초음파)에서의 알칼리시약 주입은 2 g NaOH/L가 최적조건인 것으로 사료된다.

앞선 알칼리처리 후 초음파처리 실험과 비교하기 위해, 초음파 처리를 먼저 실행하는 경우의 결과를 Fig. 4에 보였다. 가용화 효율이 평균 48.3 ± 4.5%(초음파처리시간 30분)에서 66.5 ± 2.7%(초음파처리시간 60분)을 보이는데, 이는 알칼리 처리를 먼저 진행한 실험 결과의 평균(70.4 ± 9.4%)보다 4~22% 정도 낮은 결과를 나타내었다. 알칼리 처리를 먼저 슬러지에 적용 시 약 22%의 가용화 효율이 높아지는 결과

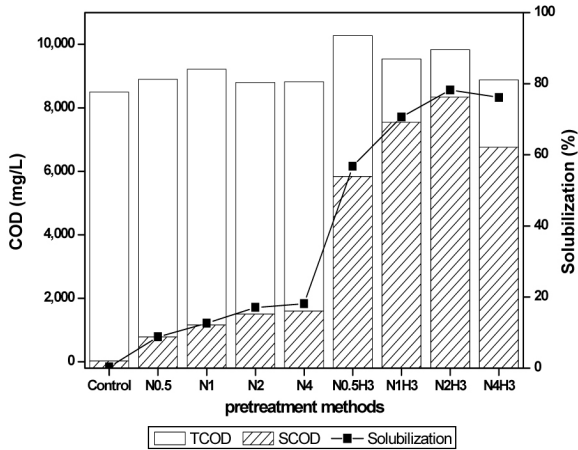


Fig. 3. The combined(alkaline(pre-treatment) + ultrasonic (after-treatment)) treatment effect on sewage sludge solubilization(N : concentration of NaOH for alkali treatment, H : time of ultrasonic treatment).

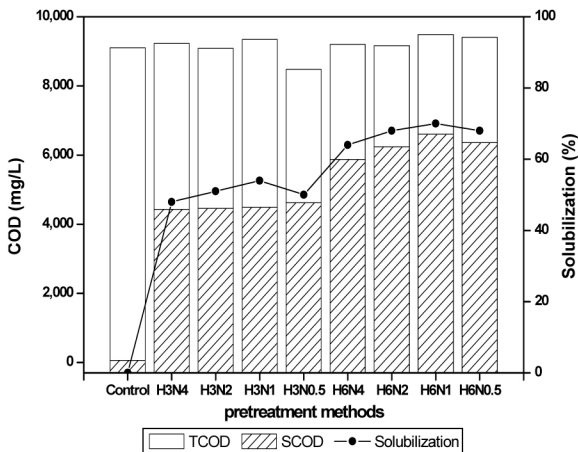


Fig. 4. The combined(ultrasonic(pre-treatment) + alkaline (after-treatment)) treatment effect on sewage sludge solubilization(N : concentration of NaOH for alkali treatment, H : time of ultrasonic treatment).

를 얻게 되었다. 이러한 이유는 알칼리 처리에 의해 먼저 플록(floc)이 깨어지게 되고 그 후 초음파에 의해 세포벽이나 세포막이 쉽게 파쇄 되는 것으로 예측할 수 있다. 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 있다. 따라서 보다 높은 가용화 효율을 기대한다면 알칼리 처리를 먼저 진행하여 슬러지의 플록을 파쇄하는 것이 우선적인 것으로 판단된다.

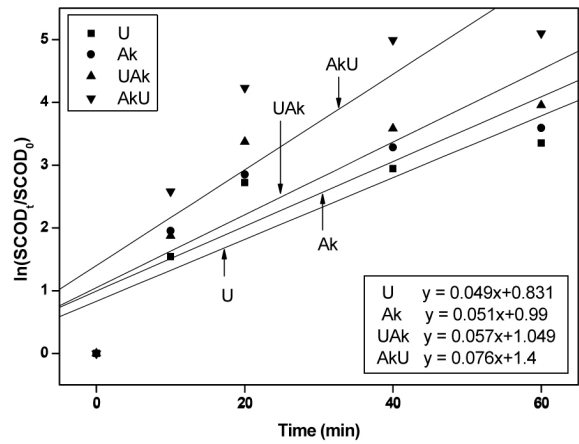


Fig. 5. Rising rate of soluble COD on various treatment method(U: ultrasonic, Ak: alkaline, UAK: ultrasonic (pre-treatment)+alkaline(after-treatment), AkU: alkaline (pre-treatment) + ultrasonic(after-treatment)).

### 3.4. 알칼리, 초음파 병합처리에 의한 유기물 증가속도

앞선 단일처리(알칼리, 초음파), 병합처리(알칼리+초음파)의 각 조건별 SCOD 증가속도를 비교한 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

단일처리(알칼리, 초음파)를 사용하여 슬러지의 가용화에 적용하는 경우에는, 초음파 처리보다 알칼리 처리 시 조금 더 높은 가용화 효율을 보이며, 알칼리 처리 시 0.051 min<sup>-1</sup>, 초음파 처리 시 0.049 min<sup>-1</sup>의 SCOD 증가속도를 보였다. 병합처리에서는 초음파 처리를 먼저 적용하는 경우에 단일처리를 적용했을 때 보다는 SCOD 증가속도가 높게 나타났으며(SCOD 증가속도 : 0.057 m<sup>-1</sup>, SCOD 증가율 약 3.8), 알칼리 처리 후 초음파처리를 적용하는 경우의 SCOD 증가속도는 0.076 m<sup>-1</sup>, SCOD증가율은 5.01로 가장 높은 결과를 확인할 수 있었다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 알칼리에 의해 슬러지의 플록 등이 풀어지고 난 후 초음파의 공동화작용에 의해 세밀한 부분까지 효과가 나타난 것으로 생각된다. 슬러지 병합처리(알칼리+초음파) 시 최적의 가용화 조건은 알칼리 선처리 후 초음파 처리를 적용하는 방법이 최적인 것으로 확인되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 하수슬러지의 메탄발효 시 효율향상을 위해 슬러지 전처리방법 중 알칼리처리와 초음파처리의 효율적인 조합을 위해 다양한 조건에서의 단일 및 병합처리를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 알칼리처리 시 NaOH를 이용한 전처리 방법에서 가장 높은 가용화율(27.6%)을 확인하였으며, 시약의 주입농도가 높아지더라도 가용화에 미치는 영향에는 한계가 있음을 확인하였다.
- (2) 초음파처리 시 조사시간은 증대되어도 가용화율에 미치는 영향은 미비하였으며, 조사밀도 140 W/L sludge에서 가장 높은 효율을 나타내었다.
- (3) 병합처리 시 초음파처리 후 알칼리처리를 적용한 방법에 비해 알칼리처리 후 초음파처리를 적용하는 방법이 더 높은 가용화율(평균 70.4 ± 9.4%)을 나타내었다.

슬러지 메탄발효 시 위와 같은 병합처리를 적용하여 메탄생산량 증대를 이룰 수 있을 것이며, 이에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(과제명 : 바이오가스 생산효율 향상을 위한 고효율 하폐수 슬러지 전처리 기술개발)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 환경부, 2009 하수도통계, 2010.
2. 환경부, 런던협약 '96 의정서 발효에 따른 하수슬러지관리 종합대책, 2007.
3. F. Jorand; P. Guicherd; V. Urbain; J. Manem; and J. C. Block. Hydrophobicity of activated-sludge flocs and laboratory-grown bacteria, *Water Sci. Technol.*, 1994, 30, 211-218.
4. B. M. Wilén; B. Jin; P. Lant. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties, *Water Res.*, 2003, 37, 2127-2139.
5. S. Comte; G. Guibaud; M. Baudu. Effect of extraction method on EPS from activated sludge: An HPSEC investigation, *J. Hazard. Mater.*, 2007, 140, 129-137.
6. B. Frohnlund; T. Griebe; P. H. Nielsen. Enzyme activity in activated-sludge floc matrix, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1995, 43, 755-761.
7. Y. Y. Li; T. Noike, Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment, *Water Sci. Technol.*, 1992, 26, 857-866.
8. X. Q. Zhang; P. L. Bishop, Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances, *Chemosphere*, 2003, 50, 63-69.
9. Z. W. Wang; Y. Liu; J. H. Tay. Biodegradability of extracellular polymeric substances produced by aerobic granules, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2007, 74, 462-466.
10. J. Kim; C. Park; T. H. Kim; M. Lee; S. Kim; S. W. Kim; J. Lee. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge, *J. Biosci. Bioeng.*, 2003, 95, 271-275.
11. A. Valo; H. Carrère; J. P. Delgenès. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2004, 79, 1197-1203.
12. D. C. Stuckey; P. L. McCarty. Thermochemical pretreatment of nitrogenous materials to increase methane yield, *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 1978, 8, 219-233.
13. C. P. Chu; D. J. Lee; B. V. Chang; C. S. You; J. H. Tay. Weak ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids, *Water Res.*, 2002, 36, 2681-2688.
14. A. Tiehm; K. Nickel; U. Neis. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge, *Water Sci. Technol.*, 1997, 36, 121-128.
15. M. R. Salsabil; A. Prorot; M. Casellas; C. Dagot. Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility, *Chem. Eng. J.*, 2009, 148, 327-335.
16. I. Dogan; F. D. Sanin. Alkaline solubilization and microwave irradiation as a combined sludge disintegration and minimization method, *Water Res.*, 2009, 43, 2139-2148.
17. APHA, AWWA and WEF : Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. Baltimore, American Public Health Association 2, 1998, 57-59.
18. V. Penaud; J.P. Delgenès; R. Moletta. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability, *Enzyme Microb. Tech.*, 1999, 25, 258-263.
19. A. Tiehm; K. Nickel; M. Zellhorn; U. Neis. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, *Wat. Res.*, 2001, 35, 2003-2009.
20. 권재현; 김봉준; 김민규; 엄익태; 김형수. 전처리 방법에 따른 하수슬러지 가용화 비교연구, *상하수도학회지*, 2003, 17, 567-573.