

혐기성 소화를 위한 폐활성슬러지의 초음파와 알칼리 전처리

박인근, 손한형, 이채영[†]
수원대학교 건설환경에너지공학부

Ultrasonic and Alkaline Pre-treatments of Waste Activated Sludge for Enhancing Anaerobic Digestion

In Geun Park, Han Hyung Son, Chae Young Lee[†]

Division of Civil, Environmental and Energy Engineering, The University of Suwon

(Received: May 24, 2018 / Revised: Jun. 6, 2018 / Accepted: Jun. 7, 2018)

ABSTRACT: The hydrolysis of organic solid waste, such as sludge, is the rate-limiting step of the anaerobic digestion. The longer rate-limiting step lead to decrease of treatment efficiency and increase hydraulic retention time and anaerobic digester. Therefore, the pre-treatment has been applied for accelerating the hydrolysis step. This study was investigated the effects of pre-treatment of waste activated sludge using ultrasonic and alkaline integrated treatment simultaneously. The results showed the cumulative methane production and the methane production rate increased while the lag phase decreased. Therefore ultrasonic and alkaline integrated pre-treatment of waste activated sludge resulted in acceleration of hydrolysis step in anaerobic digestion.

Keywords: Waste Activated Sludge, Ultrasonic, Alkaline, Pre-treatment, Anaerobic digestion

초 록: 가수분해반응에서 율속 단계가 되어 수리학적 체류시간이 길어지고 처리 효율이 떨어지며 불안정한 처리 및 대규모 소화조 크기에 문제가 발생한다. 따라서 처리효율을 높이기 위해서는 하수 슬러지를 방해하는 요소들에 대해 혐기성 소화를 최소화하기 위한 전처리가 필요하며, 본 연구에서는 폐수 처리공정에서 초음파 및 알칼리 처리를 이용한 하수 슬러지의 분해 및 전처리효과를 검토하였다. 초음파 및 알칼리 전처리를 사용한 폐활성슬러지에 대한 혐기성 생분해도 분석결과 지체기의 시간이 감소하는 동안 누적 메탄 생산 및 메탄 생성 속도가 증가하였다. 따라서 초음파 및 알칼리 전처리를 이용한 하수 슬러지의 전처리는 율속단계를 작용하는 가수분해단계에서 지체기를 포함한 반응 시간을 줄이고 메탄 생산 속도 및 최종 메탄 수율을 증가시켜 효과적으로 가속화할 수 있다.

주제어: 폐활성슬러지, 초음파, 알칼리, 전처리, 혐기성 소화

1. 서 론

2015년 기준으로 3,907개소의 공공하수처리시설

에서 264,836 m³/일의 하수슬러지가 발생되며 수처리 기술의 고도화, 수질 기준의 강화 등으로 인해 지속적으로 증가될 것으로 예상된다¹⁾. 유기성 폐기

[†] Corresponding author(e-mail : chaeyoung@suwon.ac.kr)

물의 육상 직매립이 2005년 이후로 금지되고, 2006년 런던협약에 따라 해양투기 또한 금지됨에 따라 발생하는 하수슬러지를 처리 또는 자원화하는 육상 처리 방법이 요구되지만 원천적으로 감량화하는 것이 선행되어야 한다²⁾.

혐기성 소화는 하수처리공정에서 발생하는 하수 찌꺼기를 안정화 및 감량화시키는 대표적인 방법이다. 그러나 하수찌꺼기의 세포벽과 세포막으로 인해 가수분해가 율속단계(rate-limiting step)로 작용하여 처리시간 증대와 이로 인해 처리효율 감소 및 소화조 용량 증대를 야기한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 전처리 방법들이 도입되었다³⁻⁵⁾. 하수슬러지 전처리 방법에는 화학적, 열적, 생물학적 그리고 기계적 처리 등이 있다⁵⁻⁸⁾. 이 중 초음파 전처리는 공동화 현상(cavitation)에 의해 기포의 소멸과 발생이 반복적으로 일어난다. 이 때 순간적으로 고온·고압이 발생하면서 열적 파괴와 동시에 산화성이 높은 수산화기(OH radical)와 같은 물질이 생성된다⁹⁾. 형성된 OH 라디칼은 체외 고분자물질(ECP, extracellular polymer)과 반응하여 슬러지의 탈수능을 향상시키는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾.

폐활성슬러지의 알칼리 전처리는 다른 방법에 비

해 제조 방법이 간단하고 운전이 용이하며 효율이 높다. 알칼리 전처리의 주요 특징은 탄수화물을 분해하지 않고 리그닌만을 선택적으로 제거하여 다공성과 표면적을 증가시킴으로써 효소들의 가수분해를 촉진시킨다는 점이다¹¹⁾. 기존의 연구결과 낮은 주입량(0.1 mol/L)에서도 용존성 화학적 산소 요구량의 증가와 휘발성 부유 고형물의 감소가 가능하다고 나타났으며 또한 낮은 알칼리 주입에 의한 슬러지는 열적 가수분해의 보조적인 역할을 수행하는 것으로 연구되었다¹²⁾.

이에 본 연구는 초음파 및 알칼리 병합 전처리를 이용하여 하수처리장에서 발생하는 폐활성슬러지의 농도에 따른 가용화 및 혐기성 소화를 통해 하수처리공정에 슬러지 전처리가 미칠 수 있는 영향을 평가하고자 한다.

2. 시험방법

2.1. 실험재료

2.1.1 폐활성슬러지의 성상

가용화 실험을 위해 하루 평균 처리량 300,000m³

Table 1. Characteristics of waste activated sludge

Parameter	Unit	Concentration
		waste activated sludge
pH	-	6.6-6.8
TS(Total Solids)	mg/L	9,370.0
VS(Volatile Solids)	mg/L	6,620.0
VS/TS	%	70.7
TCOD(Total Chemical Oxygen Demand)	mg/L	9,782.8
SCOD(Soluble Chemical Oxygen Demand)	mg/L	141.5
SCOD/TCOD	%	1.4
Protein	mg/L	1,868.5
Carbohydrate	mg/L	1,063.7
S-Protein	mg/L	33.8
S-Carbohydrate	mg/L	26.6
TN(Total Nitrogen)	mg/L	492.3
TP(Total Phosphorus)	mg/L	350.4
S-TN	mg/L	37.0
S-TP	mg/L	26.0

Table 2. Concentration of waste activated sludge used in experiments

Waste activated sludge	
TS (mg/L)	4,940
	9,370
	11,860

의 표준활성슬러지공법을 사용하는 S시 하수처리장의 최종침전지에서 발생하는 폐활성슬러지를 사용하였다. Table 1에는 폐활성슬러지와 성상을 제시하고 있다.

폐활성슬러지의 농도에 따른 전처리시 가용화 효율을 평가하기 위하여 슬러지를 Table 2에 제시된 것과 같이 희석 및 침전을 통하여 시료를 준비하였다. TS가 9,370 mg/L인 폐활성슬러지를 5시간 침전 및 희석을 하였다.

2.1.2 초음파 및 알칼리 전처리

폐활성슬러지의 전처리를 위하여 초음파 및 알칼리 전처리를 이용하였다. 실험에 사용된 초음파장치는 Fig. 1과 같이 10 L 용량의 진동판 형식으로 스테인리스강(stainless steel) 재질이며, 출력과 주파수는 600 W 및 20 kHz이다.

초음파 단독처리는 초음파장치에 5L의 대상 슬러지를 넣어 전처리하였으며 반응시간은 0, 10, 30, 60, 120분으로 설정하였다. 초음파-알칼리 병합 전처리는 5N KOH를 이용하여 pH를 12로 설정하고 24시간동안 반응시킨 후 초음파 처리하였다. 초음파 처리시 비 에너지 투입량(specific energy input)은 장치

의 출력, 반응시간 그리고 총 고형물의 양을 이용하여 산정하였다(식 (1) 참조)¹³⁾.

$$Specific\ energy\ input = \frac{P \times t}{TS \times V} \quad (1)$$

여기서, *Specific energy input* = 비 에너지 투입량 (kJ/kg TS)

P = 초음파 장치 출력 (kW)

t = 초음파 반응 시간 (s)

V = 초음파 처리 대상 체적 (L)

TS = 초음파 처리 대상 총 고형물 농도 (kg/L)

2.1.3 분석항목 및 분석방법

폐활성슬러지의 초음파 및 알칼리 전처리에 따른 가용화 효율을 평가하기 위해 총 고형물(Total Solids, TS), 휘발성 고형물(Volatile Solids, VS), 화학적 산소 요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 단백질, 탄수화물, 총 질소(Total Nitrogen, TN), 총 인(Total Phosphorus, TP) 그리고 점도를 분석하였다. 그리고 전처리 전·후의 현미경촬영을 진행하였다. Table 3은 각 항목에 따른 분석 방법과 장비를 제시하고 있다.

초음파 및 알칼리 전처리시 폐활성슬러지의 COD에 대한 가용화 효율(degree of disintegration)을 아래의 식(2)을 이용하여 평가하였다¹⁷⁾. 그리고 SCOD는 30분 동안 3,000 rpm으로 원심분리 후 상등액을 GF/C 여과지(Ø47mm, 0.45 μm)로 여과한 시료로 분석하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Ultrasonic equipment, and (b) vessel and controller for ultrasonic pre-treatment.

$$DD_{COD} = \frac{SCOD_t - SCOD_0}{TCOD - SCOD_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, DD_{COD} = 가용화 효율 (%)
 $TCOD$ = 초기 시료의 총 화학적 산소요구량 (mg/L)
 $SCOD_0$ = 초기 시료의 용존성 화학적 산소요구량 (mg/L)
 $SCOD_t$ = 임의시간 시료의 용존성 화학적 산소요구량 (mg/L)

또한, 단백질, 탄수화물, TN 및 TP의 가용화 효율을 평가하기 위하여 아래의 식(3), 식(4), 식(5) 및 식(6)을 이용하였다¹⁸⁾. 그리고 단백질, 탄수화물, TN, TP의 용존성 농도는 30분 동안 3,000 rpm으로 원심분리 후 상등액을 GF/C 여과지(Ø47mm, 0.45 µm)로 여과한 시료로 분석하였다.

$$DD_{Protein} = \frac{P_{sup} - P_{sup_0}}{P_{total} - P_{sup_0}} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$DD_{Carbohydrate} = \frac{C_{sup} - C_{sup_0}}{C_{total} - C_{sup_0}} \times 100(\%) \quad (4)$$

$$DD_{TN} = \frac{TN_{sup} - TN_{sup_0}}{TN_{total} - TN_{sup_0}} \times 100(\%) \quad (5)$$

$$DD_{TP} = \frac{TP_{sup} - TP_{sup_0}}{TP_{total} - TP_{sup_0}} \times 100(\%) \quad (6)$$

여기서, $DD(Protein, Carbohydrate, TN, TP)$ = 가용화 효율 (%)
 $(P, C, TN, TP)_{total}$ = 초기 시료의 총 농도

Table 3. Analysis methods and equipments used in experiments

Parameter	Methods & Equipment
TS, VS	Standard Methods ⁹⁾
TCOD, SCOD	Standard Methods ⁹⁾
Carbohydrate, S-Carbohydrate	phenol/sulfuric method ¹⁰⁾
Protein, S-Protein	bicinchoninic acid method ¹¹⁾
pH	Thermo Orion 720A
TN	수질공정시험법
TP	HACH DR5000
Viscosity	Vibro Viscometer SV-10

(mg/L)

$(P, C, TN, TP)_{sup0}$ = 초기 시료의 용존성 농도 (mg/L)

$(P, C, TN, TP)_{sup}$ = 임의시간 시료의 용존성 농도 (mg/L)

2.1.4 혐기성 회분식 실험

전처리된 폐활성슬러지의 혐기성 생분해도 평가를 위해 회분식 실험을 수행하였다. 혐기성 회분식 실험에 사용된 식중슬러지는 S시 하수처리장 혐기성 소화조의 소화슬러지를 이용하였다. 하수처리장의 혐기성 소화조는 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT) 20일이며 중온(35°C)으로 운전되고 있으며 소화슬러지의 TS와 VS는 각각 34,920 mg/L 및 24,954 mg/L이다.

실험에 사용된 기질은 전처리를 수행하지 않은 폐활성슬러지와 전처리 및 알칼리 전처리된 것을 이용하였다. 주입된 기질의 양은 가수분해에 따른 반응조 내부에서 극심한 pH의 저하를 방지하기 위하여 2g VS/L로 고정하였다. 혐기성 배지 내의 알칼리도 유지를 위해 $NaHCO_3$ 5.04 g/L로 첨가하였으며, 2N HCl과 5N KOH를 이용하여 초기 식중 pH를 7.0 ± 0.1 로 조정하였다. 최종적으로 질소가스를 이용하여 10분 동안 탈기 후 35°C로 고정된 회분식 진탕 배양기에서 실험을 수행하였다. 회분식 실험에서 발생된 메탄가스의 발생량은 식(7)과 같이 계산하였으며, 온도와 증기압을 보정하였다.

$$V_{CH_4} = M_1 (V_1 + V_0) - M_0 V_0 \quad (7)$$

여기서, V_{CH_4} = 메탄발생량 (ml)

M_1 = 현 시료 채취시 메탄 함량 (%)

M_0 = 현 시료 채취 전의 메탄 함량 (%)

V_1 = 유리 주사기로 측정된 바이오 가스 부피 (ml)

V_0 = serum bottle의 기상 부분의 부피 (ml)

메탄의 함량은 열전도도 검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)가 장착된 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC Gow Mac series 580, USA)를 이용하여 분석하였다. 회분식 실험에서 구한 결과값은

식(7)에 제시한 수정 Gompertz 식을 이용하여 지체기(λ), 최대 메탄 발생속도(R_m) 및 최종 메탄수율(P)을 평가하였다¹⁹⁾.

$$M = P \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{R_m \cdot e}{P}(\lambda - t) + 1\right)\right] \quad (8)$$

여기서, M = 누적메탄 발생량 (ml CH₄/g VS)

λ = 지체기 (d)

P = 최종메탄수율 (ml CH₄/g VS)

R_m = 메탄 발생속도 (ml CH₄/g VS.d)

e = 지수

3. 결과 및 고찰

3.1. 초음파 단독 전처리를 이용한

폐활성슬러지의 가용화

초음파 처리는 동일한 장치와 반응시간을 적용하고 대상 물질인 폐활성슬러지의 TS 농도를 달리하여 가용화 효율을 평가하였다. TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지의 초음파 단독 처리(반응시간 120 분) 시 COD, 단백질 그리고 탄수화물의 가용화 효율은 22.0%, 13.3% 그리고 20.9%로 나타났다. TS 농도 9,370 mg/L인 폐활성슬러지의 경우에는 각각 16.0%, 9.9% 및 18.0%이며 TS 농도 11,860 mg/L인 시료는 각각 15.8%, 9.8%, 21.3%로 조사되었다.

적용 대상 물질인 폐활성슬러지의 TS 농도가 달라짐에 따라 상대적인 비교가 어려워 비 에너지 투입량 기준으로 가용화 효율의 경향을 평가하였다. Fig. 2에는 폐활성슬러지의 TS 농도별 비 에너지 투입량에 따른 COD, 탄수화물, 단백질, TN 및 TP의 가용화 효율 경향을 제시하였다. Fig. 2(a)는 TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지를 대상으로 초음파 전처리를 수행하였으며 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 각각 9,370 mg/L 및 11,860 mg/L인 시료를 적용하였다. 대상 물질의 초기 TS 농도와는 관계없이 지속시간이 증가할수록 모든 항목에 대하여 가용화 효율은 증가하는 경향으로 나타났다. 그러나 초음파 전처리의 출력 및 반응시간은 동일하지만 초기 대상 물질

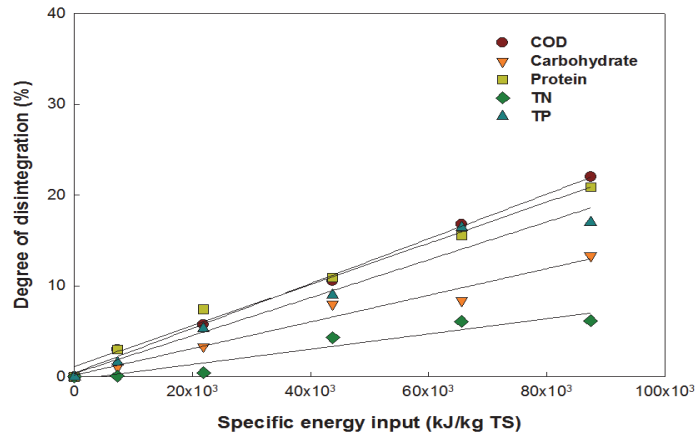
의 TS 농도에 따라 비 에너지 투입량에 따른 증가율은 상이하게 나타났다. TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지의 경우에는 비 에너지 투입량 대비 가용화 효율의 증가율이 COD 항목에 관하여 0.0002로 가장 높게 나타났다. TS 농도 9,370 mg/L인 폐활성슬러지의 COD 항목에 관한 비 에너지 투입량 대비 가용화 효율의 증가율은 0.0003로 TS 농도 4,920 mg/L에 비해 높게 나타났다. TS 농도 11,860 mg/L인 폐활성슬러지는 COD 가용화 효율의 증가율이 0.0005로 TS 농도 4,940 mg/L인 것에 비해 2.5배 높게 나타났다. TP의 경우 TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지에서는 비 에너지 투입량 대비 증가율(8.4×10^{-5})이 가장 낮은 것으로 나타났으나 TS 농도 9,370 mg/L 및 11,860 mg/L에서는 각각 0.0006과 0.0009로 가장 높은 증가율로 조사되었다. TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지의 비 에너지 투입량 대비 가용화 효율의 증가율은 COD>단백질>TN>탄수화물>TP 순으로 나타났으나 TS 농도 9,370 mg/L와 11,860 mg/L인 시료에서는 TP>단백질>COD>탄수화물>TN 순으로 조사되었다.

3.2. 초음파 및 알칼리 전처리를 이용한

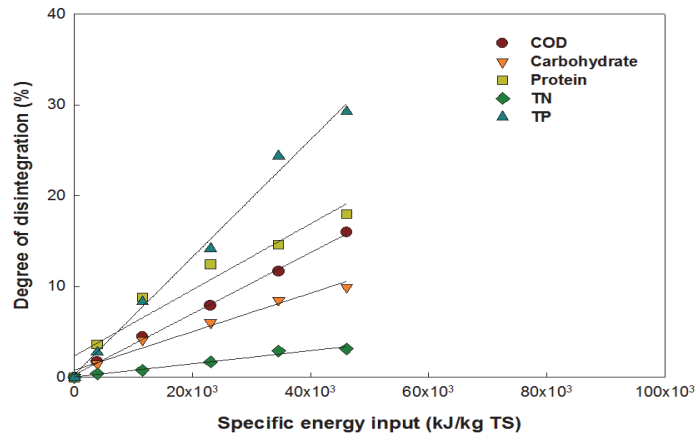
폐활성슬러지의 가용화

Fig. 3에는 알칼리 처리 후 초음파를 적용한 폐활성슬러지의 가용화 효율 경향을 제시하였다. pH 12에서 24시간 알칼리 처리한 폐활성슬러지의 COD, 단백질 및 탄수화물의 가용화 효율은 TS 농도 4,940 mg/L, 9,370 mg/L 및 11,860 mg/L에서 각각 19.0~20.3%, 26.4~26.8% 그리고 29.2~30.7%로 유사한 결과를 보였다. 알칼리 처리한 폐활성슬러지의 COD, 단백질 및 탄수화물에 대한 가용화 효율은 초음파 단독 처리한 것에 비해 전체적으로 높은 것으로 나타났다.

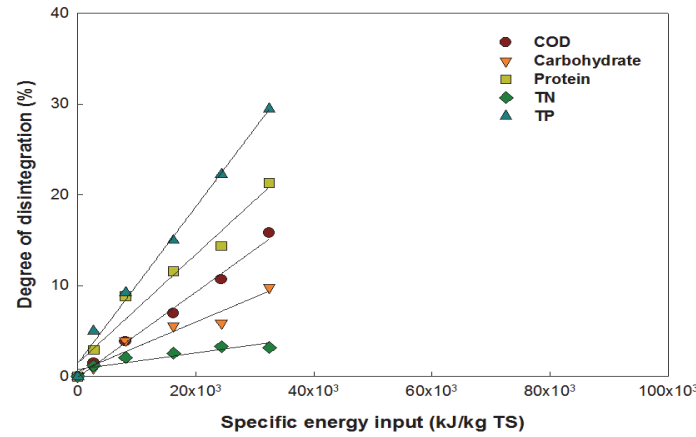
TS 농도 4,940 mg/L인 폐활성슬러지는 초음파 단독처리 시 COD의 비 에너지 투입량 대비 가용화 효율의 증가율이 가장 높게 나타났으나 초음파-알칼리 전처리 시 단백질의 증가율이 가장 높은 것으로 조사되었다. TS 농도 9,370 mg/L 및 11,860 mg/L인 폐활성슬러지에서는 초음파 단독 처리 시 TP의 비 에너지 투입량 대비 가용화 효율이 가장 높게 나타났으나 초음파-알칼리 처리하는 경우에는 각각 단



(a)



(b)

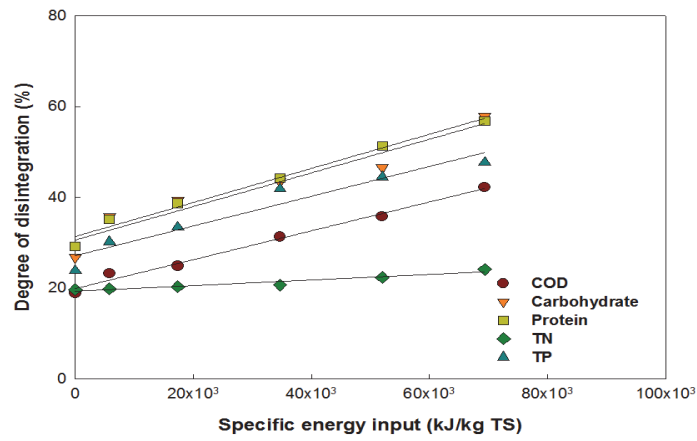


(c)

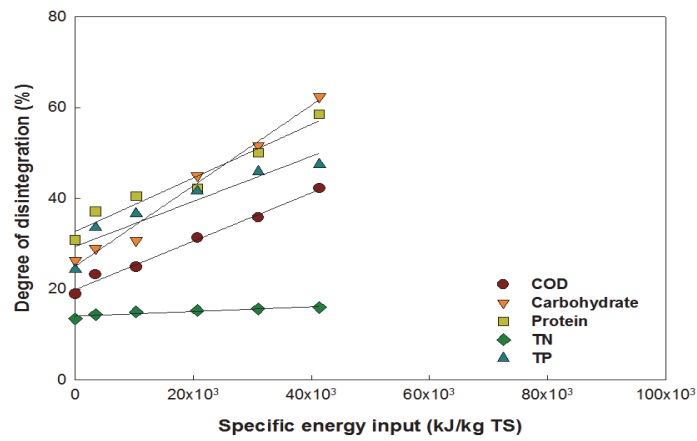
Fig. 2. Degree of disintegration using ultrasonic pre-treatment with different WAS of TS. [a) 4,940 mg/L; b) 9,370 mg/L; c) 11,860 mg/L]

백질과 탄수화물이 가장 높은 증가율을 보였다.
초음파-알칼리 전처리를 적용함에 따라 폐활성슬

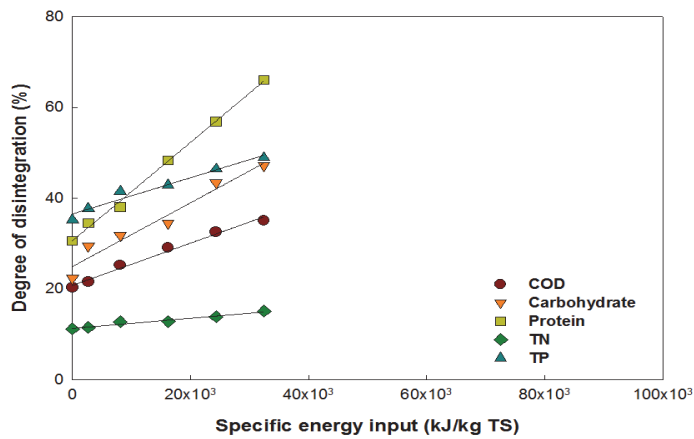
러지의 모든 항목에 관하여 가용화효율은 증가하였
으며 이 중 단백질이 가장 큰 폭으로 향상되었다.



(a)



(b)

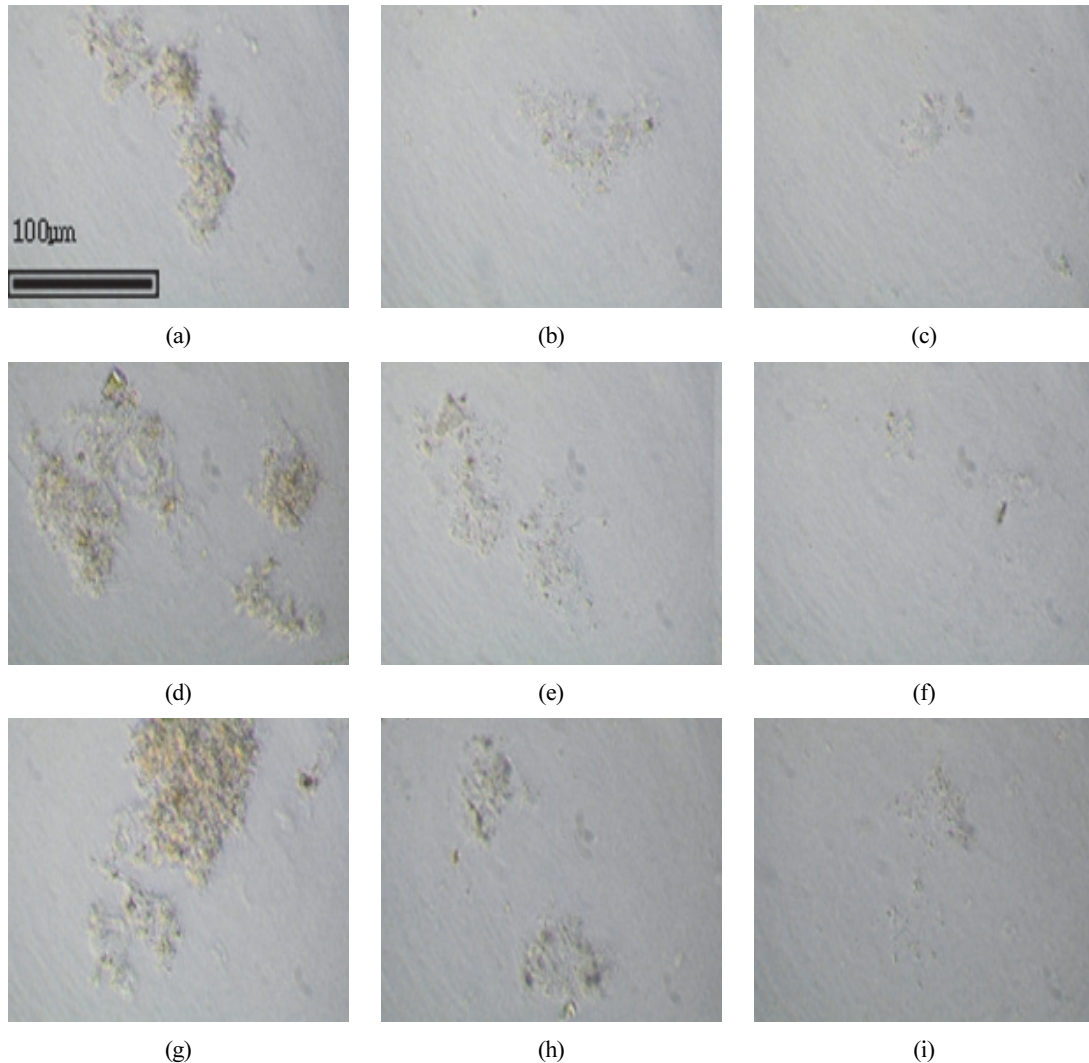


(c)

Fig. 3. Degree of disintegration using ultrasonic-alkali integrated pre-treatment with different WAS of TS. [(a) 4,940 mg/L; (b) 9,370 mg/L; (c) 11,860 mg/L]

이는 알칼리 처리 시 폐활성슬러지와 첨가한 알칼리가 반응하여 세포벽의 비누화 반응(saponification)

등에 의해 분해 또는 용해되어 내부 물질이 용출된 것으로 판단된다²¹⁾.



(a) U0 (TS=4,940mg/L), (b) U120 (TS=4,940mg/L), (c) A+U120(TS=4,940mg/L)
 (d) U0 (TS=9,370mg/L), (e) U120(TS=9,370mg/L), (f) A+U120(TS=9,370mg/L)
 (g) U0 (TS=11,860mg/L), (h) U120(TS=11,860mg/L), (i) A+U120(TS=11,860mg/L)

Fig. 4. Microscopic photograph of pre-treated sludge.

Fig. 4에서는 폐활성슬러지의 초음파 및 알칼리 전처리시 슬러지의 변화 및 가용화 상태를 현미경 분석을 통하여 제시하고 있다. 그 결과, 초기에 슬러지가 결합되어 있는 상태에서 초음파와 알칼리 전처리 수행 시 결합구조가 깨지게 되고, 액상으로 용출되었음을 판단할 수 있다.

3.3. 폐활성슬러지의 혐기성 생분해도 평가

초음파와 알칼리 전처리를 이용하여 폐활성슬러지의 혐기성 생분해도를 BMP (Biochemical Methane

Potential) 실험을 통해 평가하였다. 그 결과, Fig. 5에 제시된 것과 같이 전처리 하지 않은 폐활성슬러지보다 초음파 단독 처리 그리고 초음파와 알칼리 전처리 병행시에 메탄 발생 속도 및 최대 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 초음파와 알칼리 전처리의 병행시 TS 농도 9,370 mg/L에서 최대 210.8 ml CH₄/g VS_{added}의 메탄 수율을 보였으며, 전처리하지 않은 폐활성슬러지의 비해 약 1.7배가 증가한 것으로 조사되었다. 또한, 초음파 단독 처리시 메탄 발생량에 비해 알칼리 전처리와 병행하여 처리한 경우 TS 농

Table 4. Kinetic constants of pre-treated sludge in anaerobic digestion

Treatment (TS)	Lag phase (λ d)	Methane production rate (Rm, ml CH ₄ /g VS · d)	Ultimate methane production (P, ml CH ₄ /g VS)
Raw sludge (TS = 9,370 mg/L)	4.9	8.1	121.6
Ultrasonic (TS = 4,490 mg/L)	2.6	12.7	180.5
Ultrasonic (TS = 9,370 mg/L)	1.9	11.7	179.4
Ultrasonic (TS = 11,860 mg/L)	2.6	12.3	176.5
Ultrasonic+Alkaline (TS = 4,490 mg/L)	2.7	11.0	196.0
Ultrasonic+Alkaline (TS = 9,370 mg/L)	3.2	13.5	210.8
Ultrasonic+Alkaline (TS = 11,860 mg/L)	2.8	13.0	191.0

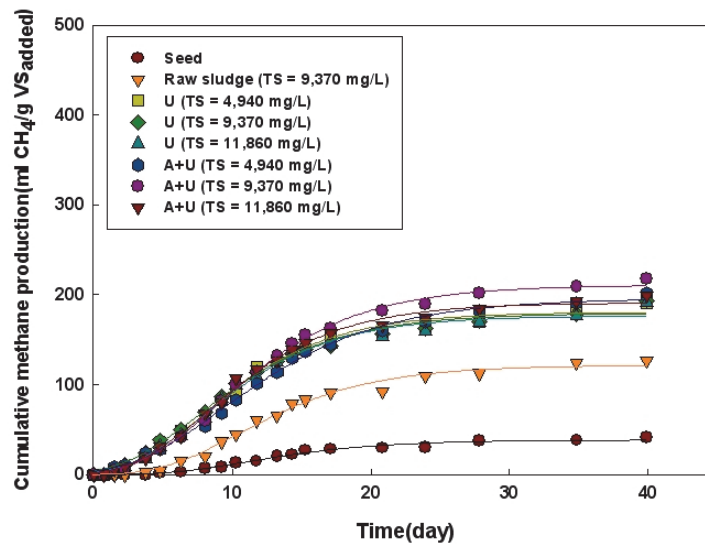


Fig. 5. Biochemical methane potential of pre-treated WAS.

도에 따라 8.2~17.5%까지 메탄 수율이 증가한 것으로 나타났다.

Table 4에는 초음파와 알칼리를 이용하여 전처리한 폐활성슬러지의 BMP 실험시 동역학적 상수를 제시하고 있다. 전처리하지 않은 폐활성슬러지의 경우 보다 초음파 및 알칼리 전처리를 수행한 경우의 지체기가 더 짧게 나타났다. 초음파 단독 전처리시 TS 농도별 지체기는 1.9~2.6일로 단축되었고, 초음파와 알칼리 전처리의 병행시 TS 농도별로 2.7~3.2

일로 초기에 비하여 짧아졌다. 초음파와 알칼리 병행 전처리가 더 길게 나타난 것은 초기 5N KOH를 이용하여 알칼리 전처리 시 pH를 12로 높이고 BMP 실험시 pH를 7로 조절하기 때문에 급격한 pH의 변화가 약간의 저해효과를 준 것으로 판단된다. 그리고 메탄 발생 속도는 초음파 단독 전처리와 알칼리 병행 전처리의 경우 각각 평균 12.2 및 12.5 ml CH₄/g VS · d로 유사한 결과를 나타내었다.

4. 결론

하수처리장에서 발생하는 폐활성슬러지를 대상으로 농도별로 초음파 및 알칼리 전처리를 통해 하수슬러지의 처리, 처분 및 혐기성 생분해도의 향상을 평가하기 위해 실험을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

1. 폐활성슬러지 농도에 따른 전처리 시 용존성 유기물의 농도에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 폐활성슬러지의 전처리 시 COD에 대한 가용화 효율은 농도가 증가함에 따라 효율이 감소하는 경향으로 나타났다. 그러나 초음파 전처리 시 비 에너지 투입량에 따른 가용화 효율의 증가율은 TS 농도가 높을수록 증가하는 경향으로 나타났다.
2. 초음파 단독 처리보다 알칼리 전처리와 병행할 경우 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 알칼리 전처리를 통해 폐활성슬러지의 결합 구조가 깨지게 되면서 초음파 단독 처리에 비해 알칼리 전처리와 병행하는 경우 가용화 효율이 증가하는 것으로 나타났다.
3. 초음파와 알칼리 전처리를 이용하여 폐활성슬러지의 혐기성 생분해도를 평가한 결과 누적 메탄 발생량과 메탄 발생 속도가 증가하였으며, 지체기는 단축되는 경향이 나타났다. 초음파와 알칼리 전처리의 병행시 TS 농도 9,370 mg/L에서 210.8 ml CH₄/g VS_{added}의 메탄 수율을 보였고, 전처리하지 않은 폐활성슬러지의 비해 약 1.7배가 증가한 것으로 조사되었다. 따라서 초음파 및 알칼리 전처리를 이용한 폐활성슬러지의 전처리는 혐기성 소화 시 율속단계로 작용하는 가수분해 단계를 촉진시켜 지체기를 포함한 반응 시간을 단축시키고, 메탄 발생 속도 및 최종 메탄 수율을 증가시키는데 효과적이라고 판단된다.

References

1. Ministry of Environment, “The status of public sewage treatment plant” (2015). (in Korean).
 2. Korea Water and Wastewater Works Association, “A study on volume reduction of sewage sludge” (2011). (in Korean).
 3. Neumann, P., González, Z. and Vidal, G., “Sequential ultrasound and low-temperature thermal pretreatment: Process optimization and influence on sewage sludge solubilization, enzyme activity and anaerobic digestion”, *Bioresource Technology*, 234, pp. 178~187 (2017).
 4. Veluchamy, C. and Kalamdhad, A. S., “Influence of pretreatment techniques on anaerobic digestion of pulp and paper mill sludge: A review”, *Bioresource Technology*, 245, pp. 1206~1219. (2017).
 5. Ding, H. H., Chang, S. and Liu, Y., “Biological hydrolysis pretreatment on secondary sludge: Enhancement of anaerobic digestion and mechanism study”, *Bioresource Technology*, 244, pp. 989~995. (2017).
 6. Chen, X., Xiang, X., Dai, R., Wang, Y. and Ma, P., “Effect of low temperature of thermal pretreatment on anaerobic digestion of textile dyeing sludge”, *Bioresource Technology*, 243, pp. 426~432. (2017).
 7. Han, Y., Zhou, Y., Peng, D., Yao, Q., Li, H. and Qu, Q., “Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion”, *Bioresource Technology*, 244, pp. 836~843. (2017).
 8. Li, H., Li, C., Liu, W. and Zou, S., “Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion”, *Bioresource Technology*, 123, pp. 189~194. (2012).
 9. Chu, C. P., Lee, D. J. and Chang, B. V., “Weak ultrasonic pre-treatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids”, *Water Research*, 36, pp. 2681~2688. (2002).
 10. Neyens, E., Baeyens, J., Dewil, R. and Heyder, B. D., “Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering”, *Journal of Hazardous Materials*, 106, pp. 1~10. (2003).
1. Ministry of Environment, “The status of public sewage treatment plant” (2015). (in Korean).
- J. of KORRA, 26(2), 2018

- pp. 83~92. (2004).
11. Kim, J. S., Lee, Y. Y. and Kim, T. H., "A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass", *Bioresource Technology*, 199, pp. 42~48. (2016).
 12. Lin, J. G., Chang, C. N. and Chang, S. C., "Enhancement of anaerobic sludge digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization", *Bioresource Technology*, 62, pp. 85~90. (1997).
 13. Bougrier, C., Carrere, H. and Delgenes, J. P., "Solubilisation of waste activated sludge by ultrasonic treatment", *Chemical Engineering Journal*, 106, pp. 163~169. (2005).
 14. APHA-AWWA-WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 18th edition, Am. Public Health Assoc, Washington, D. C, USA (2005).
 15. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith F., "Colormetric method for determination of sugars and related substances", *Analytical Chemistry*, 28(3), pp. 350~356. (1956).
 16. Sapan, C. V., Lundblad R. L. and Price N. C., "Colorimetric protein assay techniques", *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 29, pp. 99~108. (1999).
 17. Li, H., Jin, Y., Mahar, R. B., Wang, Z. and Nie, Y., "Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment", *Bioresource Technology*, 99, pp. 5140~5144. (2008).
 18. Gonze, E., Pillot, S., Valette, E., Gonthier, Y. and Bernis, A., "Ultrasonic treatment of an anerobic activated sludge in a batch reactor", *Chemical Engineering and Processing*, 42, pp. 965~975. (2000).
 19. Shin, H. S., Lee, C. Y. and Kang K, H., "Anaerobic biodegradability of Leachates Generated at Landfill Age", *Korea Organic Resources Recycling Association*, 8, pp. 90~96. (2000).
 20. Chu, C. P., Chang, B., Liao, G. S., Jean, D. S. and Lee, D. J., "Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge", *Water Research*, 35(4), pp. 1038~1046. (2001).
 21. Neyens, E., Baeyens, J. and Creemers, C., "Alkaline thermal sludge hydrolysis", *Journal of Hazardous Materials*, 97, pp. 295~314. (2003).