

## 물리적 파쇄 가용화를 이용한 혼합슬러지의 가용화 효율 및 바이오가스 특성 평가

최재훈<sup>1</sup> · 정성엽<sup>2</sup> · 김지태<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원, <sup>2</sup>(주)환경에너지오앤엠 기술연구소, <sup>3</sup>경기대학교 창의공과대학 환경에너지공학과

### Evaluation of Physical Shear Pre-treatment and Biogas Characteristics using Mixed Sludge

Jae-Hoon Choi<sup>1</sup> · Seong-Yeob Jeong<sup>2</sup> · Ji-Tae Kim<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Graduate School, Kyonggi University

<sup>2</sup>Environment Energy O&M Institute of Technology

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Kyonggi University

(Received 1 October 2018, Revised 16 July 2019, Accepted 18 July 2019)

#### Abstract

In this study, biodegradation efficiency improvement of mixed sludge for the anaerobic digestion process in wastewater treatment plant was investigated. In order to release the organic material contained in the sludge cell and promote the hydrolysis step, mixed sludge of 7% TS (Total Solids) was physically shear-treated at a shear strength of 1,000 ~ 4,000 rpm and a maximum of 120 mins. As a result of the comparison between mixed sludge before and after the treatment, the concentration of SCOD<sub>Cr</sub> (Soluble Chemical Oxygen Demand-chromium method) was increased through the conversion of granular organic matter into dissolved organic matter as shear strength and treatment time increases. The solubilization efficiency increased rapidly after 30 min of solubilization application time, and they were 11.23 %, 20.10 %, 22.52 % and 25.43% at 120 min for each shear strength conditions, respectively. Additionally, the BMP (Biochemical Methane Potential) test was conducted with the optimized samples to determine the increase of methane production by the shear pre-treatment. Consequently, methane production of each samples were 0.275, 0.310, 0.323 and 0.335 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub>, which indicates that methane production was increased to a maximum of 21.28 % compared to the control without the solubilization process (0.262 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub>). As a result, the physical shear-treatment is a promising process for sewage sludge pre-treatment to reduce the organic waste and increase the energy production.

**Key words** : BMP test, Mixed Sludge, Shear Pre-treatment, Solubilization

<sup>1</sup> 석사과정(master's course), [cjh92@kyonggi.ac.kr](mailto:cjh92@kyonggi.ac.kr), <https://orcid.org/0000-0002-5654-5304>

<sup>2</sup> 박사(Ph.D.), [ssungyubzz@nate.com](mailto:ssungyubzz@nate.com), <https://orcid.org/0000-0001-5020-7956>

<sup>3,\*</sup> Corresponding author, 교수(Professor), [jtkim221@kgu.ac.kr](mailto:jtkim221@kgu.ac.kr), <https://orcid.org/0000-0001-7213-1681>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. Introduction

2015년 현재 국내 500m<sup>3</sup>/일 규모 이상의 공공하수처리시설 625개 중 93개소에서 하수슬러지 처리시설이 운영되고 있다. 하수슬러지 발생량은 2009년 대비 21.2% 증가한 3,842천톤/일로 집계되었으며, 하수도 보급률이 증가함에 따라 하수슬러지 발생량 또한 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다(ME, 2016). 2012년 이전까지 발생된 하수슬러지는 대부분이 해양투기로 처리되었지만, 2013년 이후 런던협약에 따라 유기성 폐기물의 해양투기가 금지되어 하수슬러지의 효율적인 처리방안이 필요한 실정이다(Kim et al., 2016). 하수슬러지의 처리방안은 재활용, 소각, 육상매립 등과 같은 기술이 이용되고 있으며, 이 중, 재활용 방법은 단순 처리대상이었던 하수슬러지를 혼소, 열분해, 탄화등의 건조공정을 적용한 고형연료화 및 혐기성소화 공정의 biogas화를 통하여 에너지원으로 활용 할 수 있다는 장점이 있다(Kang et al., 2015).

혐기성소화 공정은 유기물이 다량으로 함유된 하수슬러지를 혐기성 미생물이 기질로 활용하여 가수분해, Acid생성, Methane생성 단계를 거쳐 에너지원인 biogas를 생산하는 과정이다. 혐기성 소화 공정에 투입되는 원료인 하수슬러지는 생슬러지인 Primary Sludge(PS)와 잉여슬러지인 Waste Activated Sludge(WAS) 및 PS와 WAS가 병합된 혼합슬러지로 구분 된다. 생슬러지는 하·폐수 처리장의 1차 침전지에서 단순 분리된 슬러지로서 단순 유기성 물질이 많은 부분을 차지하고 있어 별도의 가용화 없이 높은 생분해 특성을 나타낸다(Kim and Kim, 2010). 하지만 2차 처리된 잉여슬러지의 경우, 미생물과 세포 외 고분자 물질인 Extracellular Polymer Substance(EPS) 및 무기 물질간의 이화학적 결합으로 이루어진 플록 형태를 이루고 있다. 이 중 유기물질인 탄수화물, 단백질은 약 80%가 EPS 내에 존재하고 있어 생분해성이 낮은 특징이 있다(Eskicioglu et al., 2006; Nazari et al., 2017). 이에 따라 하수슬러지를 가용화 하지 않고 혐기성 소화조 내 투입 시, 높은 HRT(Hydraulic Retention Time), 저해인자 및 독성인자로 인한 공정 효율저하 및 안정성 등의 문제가 발생할 수 있으므로 가용화 공정이 필수적으로 요구된다. 이러한 생슬러지와 잉여슬러지의 특성을 고려할 시, 잉여슬러지 단일 원료를 대상으로 한 가용화가 효율적이라는 인식이 대부분이지만, 대부분의 하수슬러지 처리시설의 혐기성소화 공정에서는 잉여슬러지와 생슬러지가 혼합되어 투입되므로 혼합슬러지에 대한 가용화 평가 연구가 필요하다(Montusiewicz et al., 2010).

하수슬러지 세포 내·외 다수 함유하고 있는 유기물질의 방출을 유도하기 위해 적용되고 있는 가용화 방법은 열적, 화학적 및 기계적 전처리 등이 있다. 이러한 가용화 방법들은 용해 또는 파쇄 작용을 통하여 가수분해 단계 촉진시킴으로써, 슬러지 감량화 및 바이오 가스 생산을 향상시키기 위해 적용 되어진다(Kim et al., 2017). 화학적 가용화는 오존 처리법과 알칼리 처리법으로 분류된다. 오존 처리법은 오존

투입 농도에 따른 하수슬러지의 산화 반응을 유도하는 방법이며, 알칼리 전처리는 높은 약품 투입비용의 단점이 존재한다(Sahinkaya and Sevimli, 2013). 하지만, 다른 가용화 공정에 비해 운영이 간편하고, OH<sup>-</sup> 이 포함된 약품을 투입하기 때문에 지질 성분의 비누화 및 단백질 가용화 효율이 높은 것으로 알려져 있다. 하수슬러지내 미생물 세포벽을 물리적인 힘을 통해 파괴하여 EPS내 유기물을 용출시키는 기계적 가용화는 초음파, 발밀, 충돌 플레이트 분사, 전단력을 이용한 파쇄 방법 등이 있다. 열적, 화학적, 기계적 가용화 모두 용존 유기물 및 biogas 증대에 우수한 효과가 있지만, 화학적 가용화는 높은 약품비용 및 산화반응으로 인한 methane 수율 감소, 열적 가용화 및 기계적 가용화과 높은 전력소모량 등의 단점으로 인하여, 그에 따른 최적화 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 하지만 기계적 가용화에 대한 연구는 다른 가용화 연구에 비해 상대적으로 부족한 실정이며, 기계적 가용화 방법 중에서도 기존 하수처리시설의 혐기성소화 공정에서 가용화 장치의 추가설치 만으로도 하수슬러지를 효과적으로 가용화 할 수 있는 전단력을 이용한 파쇄 가용화에 대한 연구는 미비한 실정이다(Carrère et al., 2010; Hwang, 2008).

따라서 본 연구에서는 TS 7%의 고농도 혼합슬러지를 대상으로, 전단력을 이용한 물리적 파쇄 가용화공정의 파쇄강도(Shear strength) 및 가용화 시간에 따라 나타날 수 있는 혼합슬러지의 이화학적 특성변화와 혐기성 소화시 생분해도 효과 분석을 진행함으로써 전단력을 이용한 파쇄 가용화 공정의 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 혼합슬러지의 제조

본 연구에 사용된 혼합슬러지는 S 환경사업소에서 발생하는 생슬러지 및 잉여슬러지를 혼합하여 사용하였다. 현장에서 채수해온 하수슬러지를 Testing Sieve (1 mm)로 헹잡물을 제거한 뒤 각각 TS 7%로 농축하고, 해당 시설의 생슬러지 및 잉여슬러지의 발생량을 고려하여 무게 비율 1:1로 혼합한 후, 성장변화를 방지하기 위해 4 °C에서 냉장보관 하였다. 농축된 혼합슬러지의 이화학적 특성은 <Table 1>에 나타내었다.

**Table 1.** The characteristics of mixed sludge

Parameter	Unit	Mixed Sludge
TS	g/L	70.16
VS	g/L	53.85
TCOD <sub>Cr</sub>	g/L	82.13
SCOD <sub>Cr</sub>	g/L	0.73
TN	g/L	6.00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	g/L	0.08
pH	-	6.64
Alkalinity	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	600

### 2.2 파쇄가용화 장치 및 운전조건

TS 7% 혼합슬러지를 대상으로 파쇄 가용화 특성과 Biogas 수율 및 methane 생산량을 평가하기 위하여 High shear 방식의 K&S Company HM1HF 균일분산 장치를 사용하여 파쇄 가용화를 실시하였다(Fig. 1). 혼합슬러지의 가용화는 파쇄 장치 하부의 회전하는 Rotor와 고정되어 있는 Stator 사이의 간극(0.2 mm) 내에 발생하는 전단력에 의해 수행된다. 이때, Rotor의 회전력에 의해 와류현상이 발생하고, 이에 따라 슬러지는 Rotor · Stator 간극 사이에 유입되며 Stator 외부로 분산작용이 연속적으로 이루어진다. 하지만, 가용화를 위해 적용되는 하수슬러지의 투입량에 따라 Rotor · Stator 간극사이의 유입 및 분산작용에 따른 실질적인 파쇄 적용시간의 차이가 발생할 수 있으므로 혼합슬러지를 동일하게 1 L를 주입하였고, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 rpm의 파쇄강도에서 최대 120분간 운전하였다. 가용화 슬러지는 전처리 조건에 맞게 실시간으로 분취하였다.

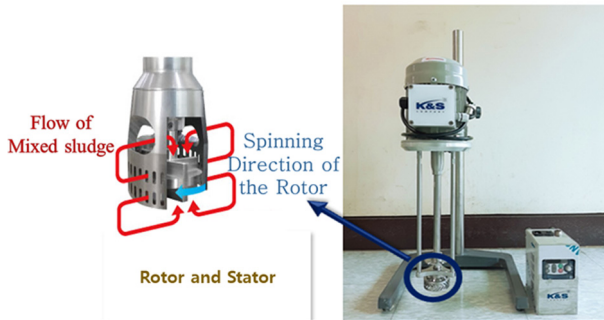


Fig. 1. Physical shear pre-treatment device

### 2.3 성상 분석

#### 2.3.1 기초성상 및 Biogas 분석 방법

물리적 파쇄 가용화 슬러지에 대한 기초성상(TCOD<sub>Cr</sub>, SCOD<sub>Cr</sub>, TS, VS, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, pH) 분석은 21st Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater(APHA, AWWA, WEF, 2005)에 준하여 실시하였다. 또한 용존성 물질(SCOD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 경우 6,000 rpm에서 5분간 원심분리 후 고형물이 제거된 상등액을 GF/C filter(Whatman, England)로 여과한 여과액을 사용하였다. pH 측정에는 HANNA사의 pH meter(HANNA HI223)를 사용하여 측정하였다. BMP Test (Biochemical Methane Potencial Test) 통해 발생된 biogas는 500 µL Sample Lock Syringe(HA-81256, Hamilton. inc., USA)를 사용하여 포집 한 뒤, Column(HP-PLOT/Q, Agilent Technologies, inc., USA)을 장착한 GC(Agilent 7890)(Agilent 7890A, Agilent Technologies, inc., USA)의 TCD detector 사용하여 측정하였다. Injector 및 Detector 온도조건은 각각 230 °C, 250 °C이며, Oven 온도는 초기 60 °C에서 30 °C/min로, 최대 240 °C까지 승온 되도록 설정하였고, Carrier gas는 H<sub>2</sub>를 이용하였다.

#### 2.3.2 가용화를 평가

하수슬러지의 가용화(Solubilization) 효율은 가용화 적용 전 · 후 입자상 물질에서 용존성 물질로 전환되는 효율로써,

다양한 가용화 방법 및 조건에 대한 효율을 평가할 수 있는 지표이다. 가용화 적용전 초기 입자상 유기물의 농도인 PCOD<sub>Cr</sub> (Particulate Chemical Oxygen Demand)와 가용화의 적용전 · 후의 증가된 용존성 유기물 농도(SCOD<sub>Cr</sub>)의 백분율로 나타낸다. 가용화 효율 계산식은 많은 선행연구에서 보편적으로 활용되어지는 아래의 산정식(1)을 사용하였다(Choi et al., 2014; Kim et al., 2010).

$$COD_{Solubilization} (\%) = \frac{COD_S - COD_{SO}}{COD_{PO}} \times 100 \quad (1)$$

- COD<sub>S</sub> = 가용화 적용 후 SCOD<sub>Cr</sub>(g/L)
- COD<sub>SO</sub> = 가용화 적용 전 SCOD<sub>Cr</sub>(g/L)
- COD<sub>PO</sub> = 가용화 적용 전 PCOD<sub>Cr</sub>(g/L)

### 2.4 BMP test (Biological Methane Potential) 설정

물리적 파쇄를 위한 가용화장치를 통하여 다양한 조건에 따라 가용화된 혼합슬러지의 biogas 특성 및 methane 효율을 평가하기 위한 BMP test를 실시하였다(Dwyer et al., 2008; Esposito et al., 2012). 식종슬러지는 국내 S 환경사업소에서 배출되는 소화슬러지를 사용하였으며, 소화슬러지 내 혐기성 미생물의 영양 공급을 위한 배지는 Shelton and Tiedje (1984)가 제시한 방법에 따라 제조하였다. 배지의 구성성분은 <Table 2>에 나타내었다.

제조한 배지는 고압멸균기를 이용하여 120 °C에서 약 15분간 멸균시킨 뒤 35 °C 증온조건이 조성될 때 까지 상온에서 방냉하였다. 이후 소화슬러지를 배지 총량의 1/10에 해당하는 양을 주입을 하여 식종슬러지를 제조하였다. 이후 500 mL Duran bottle에 제조된 식종슬러지 300 mL와 가용화시료를 식종슬러지 부피기준 2 g VS/L로 산정하여 주입하였다. 또한 집종된 혼합슬러지 및 소화슬러지의 pH를 증정조건으로 조정하기 위해 0.02 N HCl 및 0.02 N NaOH를 주입하였고, 반응 초기단계에서의 Acid생성 반응으로 인한 pH 저하를

Table 2. The composition of anaerobic medium

	Material	Concentration
Trace metals	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.50 mg/L
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.05 mg/L
	ZnCl <sub>2</sub>	0.05 mg/L
	CuCl <sub>2</sub>	0.03 mg/L
	NaMo <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.01 mg/L
	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.50 mg/L
	NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.05 mg/L
	Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	0.05 mg/L
Mineral salt	NH <sub>4</sub> Cl	0.53 g/L
	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.075 g/L
	MgCl · 6H <sub>2</sub> O	0.10 g/L
	FeCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.02 g/L
Phosphate buffer	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.27 g/L
	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.35 g/L

방지하기 위하여 알칼리도 물질인 중탄산염( $\text{NaHCO}_3$ )을 1.2 g/L 주입하였다. 특히, 혐기조건을 조성하기 위해 BMP test Seeding의 진행 단계마다  $\text{N}_2$  gas purging을 진행하여 bottle 내 산소를 제거하였다. 최종적으로 식종이 완료되면 반응조 상단에 고무패킹과 실리콘 마개를 조합하여 플라스틱 캡으로 밀봉한 후 35 °C 중온조건에서의 배양기에서 test를 진행하였으며, biogas 발생량은 10 mL, 50 mL gas tight syringe를 이용하여 측정하였다.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 가용화 슬러지 특성 평가

혼합슬러지를 대상으로 물리적 파쇄 가용화 전·후 Control 및 조건별 가용화 슬러지의 기초성상 분석을 통하여 이화학적 성상 변화를 관찰하였다. TS 7% 혼합슬러지를 대상으로 Shear strength 조건별 시료의 성상 변화는 <Fig. 2>에 각각 나타내었다. 가용화 슬러지 내  $\text{SCOD}_{\text{Cr}}$  및  $\text{NH}_4^+$  농도 분석 결과, 모든 조건별 가용화 슬러지에서 Shear strength 및 시간이 증가함에 따라 입자성 물질에서 용존성 물질로 전환된 것을 확인하였다.

가용화 효율을 나타낼 수 있는  $\text{SCOD}_{\text{Cr}}$  농도의 경우 파쇄 가용화 적용 전 0.73 g/L에서 각 파쇄강도별 120 min 조건에서 최대 9.87, 17.09 19.06, 21.43 g/L으로 증가하였다.  $\text{SCOD}_{\text{Cr}}/\text{TCOD}_{\text{Cr}}$  (%) 또한 점차 증가하여 최대 12.02, 20.61,

22.77, 25.51 % 값으로 평가되었다. 이는, 하수슬러지 가용화 방법 중 가장 많이 적용되는 Jeong et al. (2014)의 160 °C 30 min 고온 열적가용화 효율과 비슷한 수치이므로 파쇄 가용화 또한 유기물 가용화에 효율적으로 작용될 수 있다고 판단된다.  $\text{NH}_4^+$ 의 농도 또한 EPS내 유기물이 가용화 되면서 파쇄강도별 120 min 조건에서 최대 0.30, 0.57, 0.63, 0.84 g/L로 증가하는 것으로 나타났다. Wilson and Novak (2009)의 연구에 의하면 약 0.8 g/L의  $\text{NH}_4^+$ 의 농도를 함유하는 하수슬러지가 혐기성 소화조내에 투입될 시, 혐기성 소화조 내 독성인자로 작용될 가능성은 낮다고 보고하였다. 이러한 결과로 보아 물리적 파쇄 가용화의 적용은 하수슬러지 혐기성 소화공정에서 가장 많이 적용되는 고온 열적가용화 효율을 나타내며 동시에 독성인자에 대한 영향이 발생하지 않을 것으로 예상되므로 하수슬러지에 대한 물리적 파쇄 가용화 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

#### 3.2 가용화율 평가

1,000, 2,000, 3,000, 4,000 rpm 조건별 가용화율을 평가한 결과, 1,000 rpm 조건에서는 최대 11.23%로써, 2,000, 3,000, 4,000 rpm에서 나타난 20.10, 22.52, 25.43 % 효율에 비해 낮은 수치를 나타냈다. 이는, 파쇄 작용을 수행하는 Rotor의 회전과 동시에 혼합슬러지가 Stator 공간으로 유입되며 파쇄가 진행될 때, 혼합슬러지의 높은 점성에 비해 1,000 rpm의 낮은 회전력으로 인하여 가용화 초기에 실질적인 파쇄적용 시

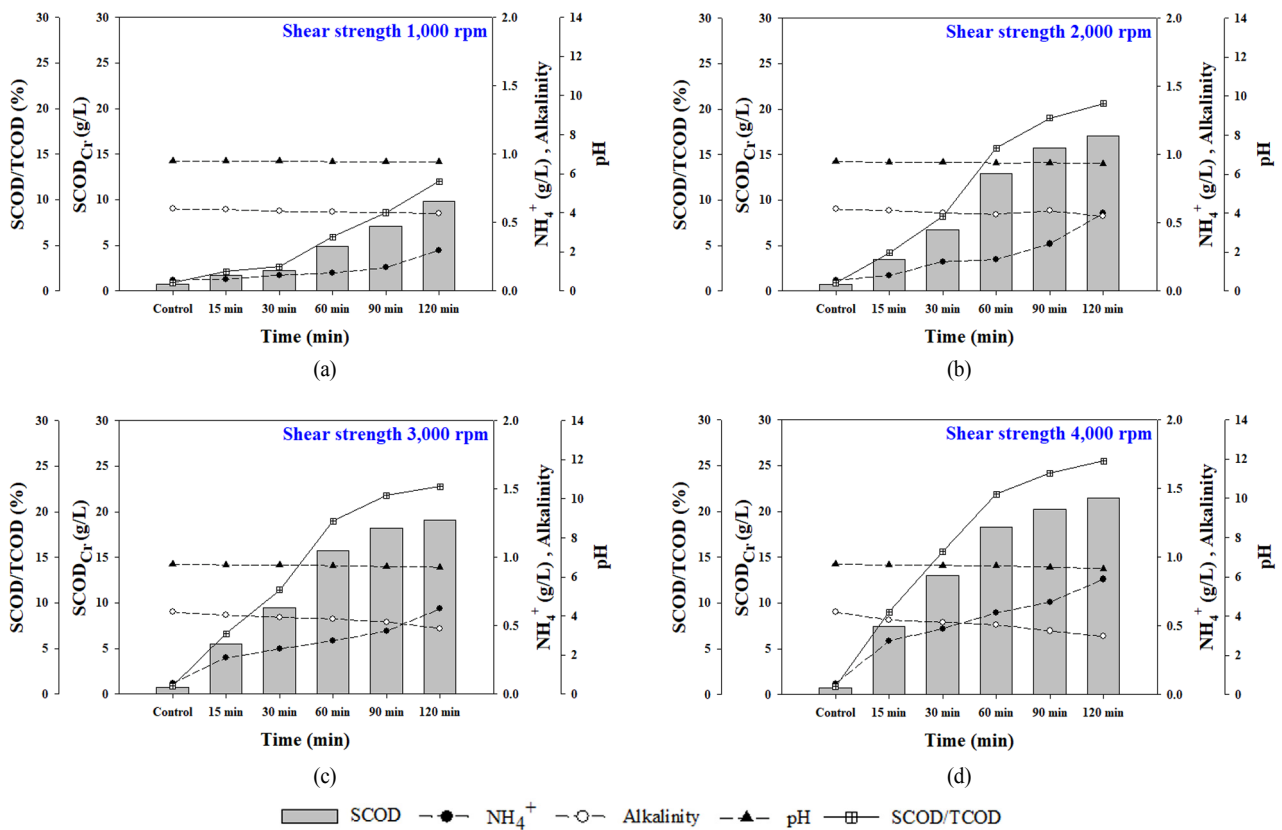
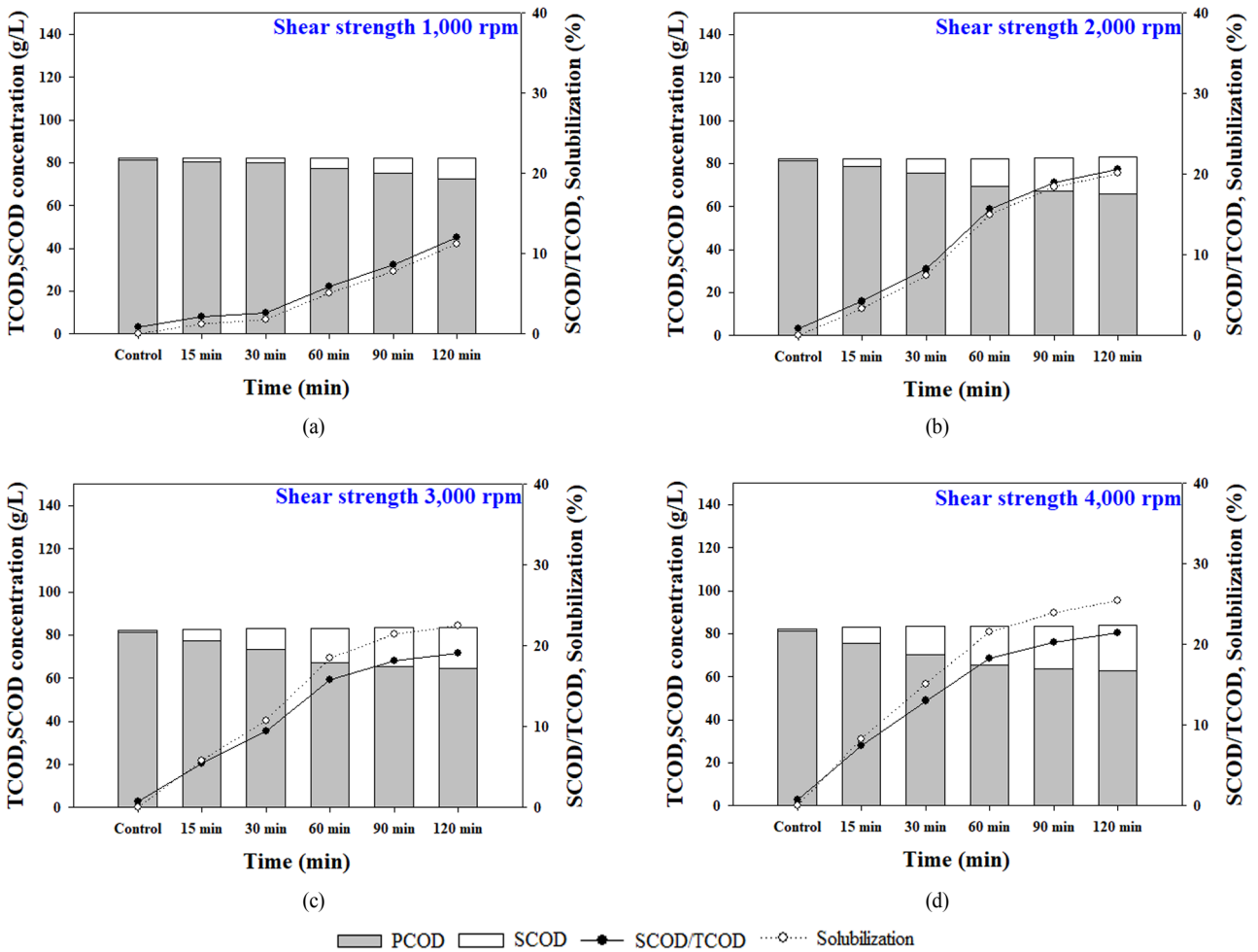


Fig. 2. The impact of shear pre-treatment on characteristics  
Shear strength : (a) 1,000 rpm (b) 2,000 rpm (c) 3,000 rpm (d) 4,000 rpm



**Fig. 3.** The impact of shear pre-treatment on solubilization  
 Shear strength : (a) 1,000 rpm (b) 2,000 rpm (c) 3,000 rpm (d) 4,000 rpm

간이 감소하였기 때문에 사료된다. 하지만 2,000 rpm 이상의 조건에서는 Rotor의 회전력이 상승함에 따라 Rotor와 Stator 사이에 혼합슬러지의 유입이 원활해져 가용화효율의 급격한 증가를 확인하였다. 또한 가용화 시간에 따른 효율을 고려시 30 min 이후부터 효율이 급격하게 상승하는 것으로 나타나는데, 이는 가용화가 진행될수록 EPS 내 Liquid성분이 용출되어 혼합슬러지의 점성이 낮아짐에 따라 원료와 Rotor와 Stator 간극사이에 유입되는 슬러지의 유동성이 확

보되기 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라 혼합슬러지를 대상으로 Rotor와 Stator 0.2 mm 간격을 보유한 파쇄 가용화를 적용할시 파쇄강도는 2,000 rpm 이상, 가용화 적용시간은 30 min 이상의 조건에서 실시해야 할 것으로 판단된다.

**3.3 BMP test 결과**

회분식 BMP tset를 통하여 조건별 물리적 파쇄 가용화를 적용한 가용화 전·후의 혼합슬러지 대상 biogas 특성을 평

**Table 3.** The comparative of study of BMP test

Substrate	TS (%)	Treatment Conditions		Methane Yeild	Reference
		Method	Time (min)		
WAS	5.92	Thermal (180 °C)	30	0.299 m <sup>3</sup> /kg VSS <sub>add</sub> (65% ↑)	Jeong et al. (2014)
WAS	1.45	Thermal (190 °C)	15	0.314 m <sup>3</sup> /kg VSS <sub>add</sub> (23% ↑)	Bougrier et al. (2007)
WAS	3.91	Thermal + Chemical (80 °C, pH=10)	300	305 m <sup>3</sup> /kg VSS <sub>add</sub> (4% ↑)	Nazari et al. (2017)
PS	2.95	Thermal + Chemical (80 °C, pH=10)	300	506 kg m <sup>3</sup> /kg VSS <sub>add</sub> (3% ↑)	



가한 결과, 가용화를 적용한 각 조건별 최대 methane 발생량은 0.275, 0.310, 0.324, 0.335 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub>로 조사되었다. 가용화를 적용하지 않은 혼합슬러지의 methane 발생량은 0.262 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub> 로써 최대 21.28% 증가한 것으로 나타났다. 이는, 3~65% methane 발생량이 증가된 열적 가용화, 화학적 가용화 선행 연구와 비교해보았을 때, 다른 가용화 공정에 적용된 기질의 methane 발생량 보다 높은 효율을 나타내는 것으로 조사되었다.

물리적 파쇄 가용화의 Shear strength 및 가용화 적용 시간에 따른 methane 발생량은 각 원료별 가용화효율과 비슷한 경향으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 1,000 rpm에서의 methane 발생량의 증가율은 다른 조건에 비해 낮게 나타났으며, 가용화 적용시간 30 min 이후부터 유의한 결과가 도출되었다. 이러한 결과는 가용화 적용 30 min 이후 부터 유의하게 증가된 용존유기물의 농도(SCOD<sub>cr</sub>)에 따른 가용화율 증대에 기인하는 것으로 판단되며, Rani et al. (2012)의 가용화를 적용 전·후 COD 가용화율과 생분해 사이의 관계가

있음을 도출해낸 연구 결과와 일치한다. 특히, 앞서 언급한 본 가용화 시료의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도는 생분해도 평가에서 저해인자로 작용되지 않아, 증가하는 용존유기물 함량 대비 methane 발생량이 감소하는 경향을 나타내는 Kim et al. (2013), Wett et al. (2010)의 연구와 상응한다.

본 연구에서는 잉여슬러지에 비해 상대적으로 가용화의 효율이 낮은 생슬러지를 혼합하여 물리적 파쇄 가용화를 진행하였음에도 불구하고 높은 가용화 효율을 확보하였으며, 증대된 methane 발생량을 확인하였다. 추후 물리적 파쇄 가용화 방식으로 적용된 carbohydrate와 protein의 특성변화 및 biogas 특성의 연관성을 평가하여 해당 인자들을 효과적으로 가용화할 수 있는 추가적인 병합가용화 공정에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 더 나아가 Shear 방식의 특성상, 균일 분산화 할 수 있다는 장점을 활용하여 하수슬러지와 혼합되기 어려운 유분성분의 Fat, Oil and Grease 및 음폐수 분산화율 및 병합소화 공정에 대한 적용성에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

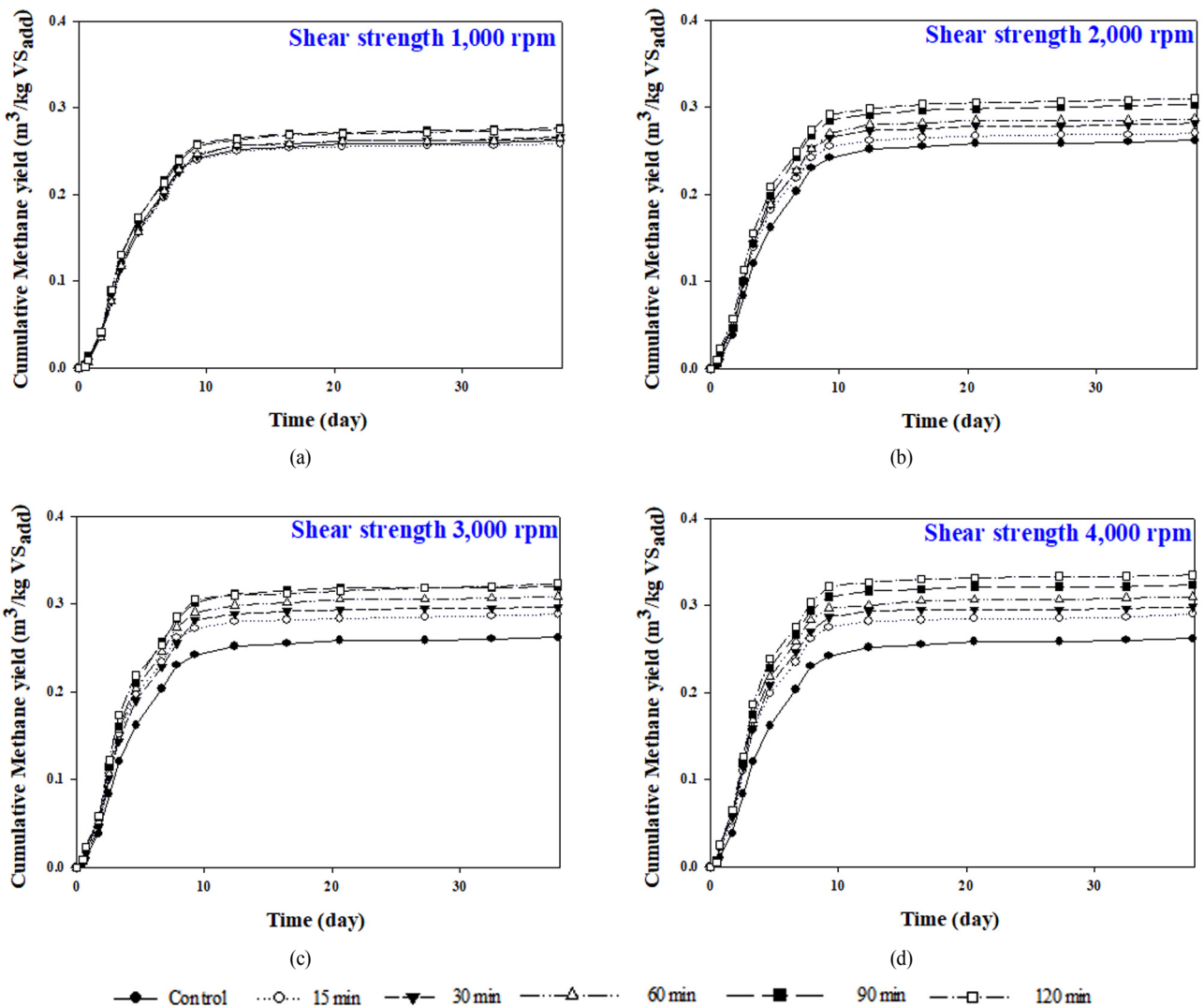


Fig. 4. Cumulative methane yield  
Shear strength : (a) 1,000 rpm (b) 2,000 rpm (c) 3,000 rpm (d) 4,000 rpm

## 4. Conclusion

1. High Shear 작용이 일어나는 물리적 파쇄 가용화 전 · 후 혼합슬러지의 이화학적 특성조사 결과 입자성 물질에서 Shear strength 및 가용화 시간이 상승함에 따라 4,000 rpm 120 min 조건에서 SCOD<sub>Cr</sub> 농도가 최대 21.43 g/L로 평가되어, 혐기성소화 공정 적용시 산발효 및 율속단계로 알려져 있는 가수분해 단계를 촉진 시킬 것으로 판단된다.
2. 가용화 효율 평가에 보편적으로 이용되는 가용화 효율식을 통하여 각 농도 별 COD<sub>Cr</sub> 가용화율을 평가 시, Shear Strength 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 rpm 조건에서 각각 11.23, 20.10, 22.52, 25.43 %로써, 하수슬러지 가용화에 보편적으로 적용되어 지고 있는 고온 열적가용화 공정 만큼의 효율이 극대화된 것으로 나타났다.
3. BMP test 결과, 각 조건별 최대 methane 발생량은 0.275, 0.310, 0.324, 0.335 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub>로써 가용화를 적용하지 않은 혼합슬러지의 methane 발생량 0.262 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>add</sub> 대비 최대 21.28 % 증가하였다.
4. 가용화 슬러지의 생분해도 특성 평가결과, 1,000 rpm에서 2,000 rpm으로 Shear strength가 상승 시, 가용화효율 및 methane 생산량이 급격하게 증가하였다. 이후 3,000, 4,000 rpm에서는 급격한 증가를 나타내지 않은 것으로 보아, 최적 Shear Strength는 2,000 rpm로 평가 되었다.
5. 2,000 rpm 조건에서 시간대별 효율대비 최적 적용시간은 30 min으로 나타남에 따라 물리적 파쇄 가용화의 최적조건은 2,000 rpm 30 min으로 판단되며, 추후 반 연속 혐기성 소화조의 운영을 통하여 전력소모량 및 에너지 회수율을 비교 · 검토하는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 2019년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

(This work was supported by Kyonggi University's Graduate Research Assistantship 2019).

## References

- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (APHA, AWWA, WEF). (2005). *Standard methods for the examination of water & wastewater*, Health association Washington, D. C., USA.
- Bougrier, C., Delgenes, J. P., and Carrere, H. (2007). Impacts of thermal pretreatments on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge, *Biochemical Engineering Journal*, 34(1), 20-27.
- Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., and Ferrer, I. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 183(1-3), 1-15.
- Choi, J. S., Kim, H. G., and Joo, H. J. (2014). Solid reduction and methane production of food waste leachate using thermal solubilization, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(5), 559-567. [Korean Literature]
- Dwyer, J., Starrenburg, D., Tait, S., Barr, K., Batstone, D. J., and Lant, P. (2008). Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability, *Water research*, 42(18), 4699-4709.
- Eskicioglu, C., Kennedy, J. K., and Droste, L. R. (2006). Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment, *Water Research*, 40(20), 3725-3736.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., and Pirozzi, F. (2012). Bio-methane potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates, *The Open Environmental Engineering Journal*, 5, 5-8.
- Hwang, Y. G. (2008). *Study on sludge solubilization using fisintegrato*, Master's Thesis, Youngnam University, 1-2. [Korean Literature]
- Jeong, S. Y., Jung, S. Y., and Chang, S. W. (2014). Enhancement of anaerobic biodegradability and solubilization by thermal pre-treatment of waste activated sludge, *New & Renewable Energy*, 10(1), 20-29. [Korean Literature]
- Kang, H., Oh, B. Y., and Shin, K. S. (2015). Anaerobic treatment of leachate solubilized from thermal hydrolysis of sludge cake, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(10), 583-589. [Korean Literature]
- Kim, D. H., Cho, S. K., Lee, M. K., and Kim, M. S. (2013). Increased solubilization of excess sludge does not always result in enhanced anaerobic digestion efficiency, *Bioresource Technology*, 143, 660-664.
- Kim, D. H., Jeong, E., Oh, S. E., and Shin, H. S. (2010). Combined (alkaline + ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration, *Water Research*, 44, 3093-3100.
- Kim, D. J. and Kim, H. Y. (2010). Sludge solubilization by pre-treatment and its effect on methane production and sludge reduction in anaerobic digestion, *Korean Chemical Engineering Research*, 48(1), 103-109. [Korean Literature]
- Kim, H. J., Kim, T. K., Ko, G. B., Kim, Y. K., and Park, S. U. (2016). Characteristics of material movement in thermal pretreatment reaction, *Proceedings of the 2016 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, 209-210 [Korean Literature]
- Kim, S. G., Lee, S. J., Lee, J. B., Son, B. K., and Lee, K. H. (2017). A study on dewatering and drying characteristics of sewage waste water sludge, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 34(7), 668-677. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Statics of sewerage 2015*, Sewerage Division, 14-15.

- Montusiewicz, A., Lebiocka, M., Rozej, A., Zacharska, E., and Pawlesowski, L. (2010). Freezing/thawing effects on anaerobic digestion of mixed sewage sludge, *Bioresource Technology*, 101(10), 3466-3473.
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D., Xu, C. C., and Ray, B. M. (2017). Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation, *Water Research*, 113, 111-123
- Rani, R. U., Kumar, S. A., Kaliappan, S., Yeom, I. T., and Banu. J. R. (2012). Low temperature thermo-chemical pretreatment of dairy waste activated sludge for anaerobic digestion process, *Bioresource Technology*, 103(1), 415-424.
- Sahinkaya, S. and Sevimli, M. F. (2013). Synergistic effects of sono-alkaline pretreatment on anaerobic biodegradability of waste activated sludge, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 197-206.
- Shelton, D. and Tiedje, J. (1984). General method for determining anaerobic biodegradation potential, *Applied Environmental Microbiology*, 47(4), 850-857.
- Wett, B. B., Phothilangka, P., and Eladawy, A. (2010). Systematic comparison of mechanical and thermal sludge disintegration technologies, *Waste Management*, 30(6), 1057-1062.
- Wilson, C. A. and Novak, J. T. (2009). Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment, *Water Research*, 43(18), 4489-4498.