

## 하수처리장에서 발생하는 고농축 잉여슬러지의 열적가용화 특성에 관한 연구

김은혁<sup>a</sup>, 박명수<sup>a†</sup>, 구슬기<sup>a</sup>

### A Study on the Thermal Solubilization Characteristics of Highly Thickened Excess Sludge in Municipal Wastewater Treatment Plant

Eunhyuk Kim<sup>a</sup>, Myoung Soo Park<sup>a†</sup>, Seulki Koo<sup>a</sup>

(Received: Sep. 5, 2022 / Revised: Oct. 25, 2022 / Accepted: Nov. 2, 2022)

**ABSTRACT:** The current environmental problem is that environmental pollution is accelerating due to the generation of large amounts of waste and indiscriminate consumption of energy. Fossil fuels, a representative energy production fuel, are burned in the process of producing energy, generating a large amount of greenhouse gases and eventually causing climate change. In addition, the amount of waste generated worldwide is continuously increasing, and environmental pollution is occurring in the process of waste treatment. One of the methods for simultaneously solving these problems is the energy recovery from and reduction of organic wastes. Sewage sludge generated in sewage treatment plants has been treated in various ways since ocean disposal was completely prohibited, but the amount generated has been continuously increasing. Since the sewage sludge contains a large amount of organic materials, it is desirable to recover energy from the sewage sludge and reduce the final discharged waste through anaerobic digestion. However, most of the excess sludge is a mass of microorganisms used in sewage treatment, and in order for the excess sludge to be anaerobically digested, the cell walls of the microorganisms must be destroyed first, but it takes a lot of time to destroy the cell walls, so high rates of biogas production and waste reduction cannot be achieved only by anaerobic digestion. Therefore, the pre-treatment process of solubilizing excess sludge is required, and the thermal solubilization process is verified to be the most efficient among various solubilization methods, and high rates of biogas production and waste reduction can be achieved by anaerobic digestion after destroying cell walls the thermal solubilization process.

In this study, when pretreating TS 10% thickened excess sludge through a thermal solubilization system, a study was conducted on solubilization characteristics according to retention time and operating temperature variables. The experimental variables for the retention time of the thermal solubilization system were 30 minutes, 60 minutes, 90 minutes, and 120 minutes, respectively, while the operating temperature was fixed at 160°C. The solubilization rates calculated through TCOD and SCOD derived from the experimental results increased in the order of 12.11%, 20.52%, 28.62%, and 31.40%, respectively. And the variables according to operating temperature were 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, and 200°C, respectively, while the operating retention time was fixed at 60 minutes. And the solubilization rates increased in the order of 7.14%, 14.52%, 20.52%, 40.72%, and 57.85%, respectively. In addition, TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, and VFAs were analyzed to evaluate thermal solubilization characteristics of thickened excess sludge. As a result, in order to obtain 30% or more solubilization rate through thermal solubilization of TS 10% thickened excess sludge, 120 minutes of retention time is required when the operating temperature is fixed to 160°C, and 170°C or more of operating temperature is needed when the operating time is fixed to 60 minutes.

**Keywords:** Thermal solubilization, Thickened excess sludge, Biogas production, Waste reduction, Sewage sludge treatment

<sup>a</sup> 엔텍스(주) 기업부설연구소 연구원(Researcher, R&D Center, Entecs Co., Ltd.)

† Corresponding author(e-mail: [eco2en@naver.com](mailto:eco2en@naver.com))

**초 록:** 현대의 환경문제는 다량의 폐기물의 발생과 무분별한 에너지의 소비로 인한 환경오염이 가속화 되고 있다는 것이다. 대표적인 에너지 생산 연료인 화석연료는 에너지를 생산하는 과정에서 연소가 이루어져 다량의 온실가스가 발생하고 최종적으로 기후변화를 야기한다. 또한 전 세계적으로 발생하는 폐기물의 양도 지속적으로 증가하고 있으며 처리하는 과정에서 환경오염이 발생하고 있다. 이와 같은 문제들을 동시에 해결하기 위한 방법 중 하나는 유기성 폐기물의 에너지화 및 감량화이다.

하수처리장에서 발생하는 하수슬러지는 해양매립이 전면 금지된 이후로 다양하게 처리되고 있으나, 그 발생량은 지속적으로 증가하는 추세이다. 하수슬러지는 유기물을 다량 함유하고 있어 혐기소화를 통하여 하수슬러지를 에너지화 하고 최종 배출되는 폐기물을 감량화 하는 것이 바람직하다. 하지만, 잉여슬러지의 경우 대부분이 하수처리에 이용되었던 미생물 덩어리로서 잉여슬러지가 혐기성소화 되기 위해서는 먼저 미생물의 세포벽이 파괴되어야 하는데 세포벽 파괴에는 많은 시간이 요구되기 때문에 혐기성 소화 과정만으로는 높은 바이오가스 생산율이나 폐기물 감량율을 달성할 수 없다. 따라서 잉여슬러지를 가용화하는 전처리 공정이 필요하며, 여러 가지 가용화 공법 중에서 열적 가용화 공정이 가장 효율적인 것으로 검증되었고, 혐기성소화 공정의 전처리 과정으로써 열적가용화 공정을 이용하여 잉여슬러지에 포함된 세포벽을 파괴한 후 전처리 된 잉여슬러지를 혐기성소화 함으로써 높은 바이오가스 생산율과 폐기물 감량율을 달성할 수 있다.

본 연구에서는 열적 가용화장치를 통하여 TS 10%의 농축 잉여슬러지를 전처리하는데 있어서 체류시간 및 운전온도 변수에 따른 가용화 특성에 대한 연구를 수행하였다. 열적 가용화장치의 체류시간에 대한 실험변수는 운전온도를 160 °C로 고정된 상태에서 각각 30분, 60분, 90분, 120분이었다. 실험 결과로 도출된 TCOD와 SCOD를 통해 계산된 가용화율은 각각 12.11%, 20.52%, 28.62%, 31.40% 순으로 증가하였다. 또한, 운전온도에 따른 변수는 반응시간을 60분으로 고정된 상태에서 각각 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C였으며 가용화율은 각각 7.14%, 14.52%, 20.52%, 40.72%, 57.85% 순으로 증가하였다. 이 외에 TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, VFAs를 분석하여 농축 잉여슬러지를 대상으로 하는 열적 가용화 특성에 대한 평가를 수행 했으며, 그 결과 TS 10%의 농축 잉여슬러지에 대한 열적 가용화를 통하여 30% 이상의 가용화율을 얻기 위해서는 운전온도를 160°C로 고정할 경우 120분의 체류시간이 필요하며, 운전시간을 60분으로 고정할 경우 170°C 이상의 운전온도가 요구되어 진다.

**주제어:** 열적 가용화, 농축 잉여슬러지, 바이오가스 생산, 폐기물 감량화, 하수 슬러지 처리

## 1. 서 론

### 1.1. 탄소중립과 하수슬러지 현황

현시대는 세계 각국에서 다양한 현상으로 이상기후가 발생하고 있다. 1992년 기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change) 채택 이후, EU 국가들은 1990년대부터 2°C 목표를 강하게 주장해 왔으며, 2007년 기후변화에 관한 정부 간 협의체 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제4차 종합평가보고서에 2°C 목표가 포함됐다. 이후 2015년 파리협정에서 2°C보다 훨씬 아래(well below)로 유지하고, 나아가 1.5°C로 억제하기 위해 노력해야 한다는 목표가 설정됐다.<sup>1)</sup>

한국에너지공단의 2021 에너지통계에 따르면, 국내 신·재생에너지 공급비중은 2019년 기준 5.36%로

매우 낮은 수준에 있으며,<sup>2)</sup> 2050 탄소중립 달성을 위해서는 지속가능한 에너지인 신·재생에너지의 적극적인 활용이 중요하다. 신·재생에너지 중 바이오 가스는 대기 중의 탄소를 고정하고 이를 에너지로 사용하여 다시 대기중으로 배출하는 개념으로 대기중의 이산화탄소 농도를 증가시키지 않는 탄소중립(Net zero) 에너지이다. 바이오가스를 얻는 대표적인 방법으로는 유기성 물질의 혐기소화 과정에서 주로 발생한다. 특히 매립지, 하수처리장, 분뇨처리장 등과 같은 다량의 유기성 폐기물이 발생하는 장소에서 얻을 수 있다. 이와 같은 유기성 폐기물의 혐기성 소화는 폐기물의 감량화, 퇴비화, 재활용, 에너지사용 등의 탄소중립을 달성할 수 있는 방법 중 하나로 다양한 연구와 사업이 진행되고 있다.

하수슬러지의 감량화는 과거부터 계속 주목되었으며, 현재도 다양한 실증화 및 연구가 진행되고 있

다. 하수슬러지는 과거 해양투기를 통해 처리했으나, 2014년 이후 육상 폐기물은 해양투기가 금지됨과 동시에 매립량이 증가하고 있으며, 이를 감량화 하는 기술이 필요한 실정이다. 국내 하수처리장은 2017년 말 국내 500 m<sup>3</sup>/일 이상 처리규모 하수처리장 수는 660 개소이며, 9,810 톤/일의 하수슬러지가 발생하고 있다. 이는 10년 전 500 m<sup>3</sup>/일 이상 처리규모 하수처리장 수 403개소에서 7,719 톤/일의 하수슬러지가 발생된 것에 비해 약 30%가 증가한 수치이며, 향후 2030년에는 14,938 톤/년에 이를 것으로 예상하고 있다.<sup>3)</sup> 국내 하수슬러지 처리는 연료화, 토양이용, 고화, 건설자재와 등 재활용, 소각, 건조, 탄화, 용융 등의 방법으로 처리되고 있다. 하수슬러지의 처리는 재활용(56.7%) > 소각(19%) > 매립(15.3%) > 건조(6.1%) > 기타(1.8%) 순으로 나타났으며, 이 중 재이용 효율(연료화, 비료와, 기타)은 2012년 48.7%(4,236 톤/일)에서 56.7%(6,705 톤/일)로 점차 증가하고 있다. 환경부 하수도 통계에 따르면 2018년 기준 하수처리장에서 자체 처리되는 슬러지 발생량 대비 재활용 수준은 21.9%로<sup>4)</sup> 슬러지 재활용의 잠재력에 비해 활용도는 낮은 상황이다.

### 1.2. 슬러지 열적 가용화

하수슬러지는 혐기발효를 통해 바이오가스를 생성할 수 있다. 혐기성소화는 유기물을 미생물의 분해

작용에 의하여 메탄으로 전환하는 일련의 프로세스로서 ①고형상의 유기물을 액상화 하고 가수분해하는 과정, ②식초산, 프로피온산, 뷰티르산을 생성하는 저급 지방산(VFAs) 생성과정, ③이들을 식초산 및 H<sub>2</sub>가스로 분해하는 과정, ④이들 산물을 최종적으로 이용하여 메탄을 생산하는 과정 등 4단계로 이루어진다.

잉여슬러지에 포함된 세포 외 고분자물질은 입체적이고 젤 같은 물질로 상대적으로 난분해성으로써 혐기성 미생물들의 분해를 저해시키는 것으로 알려졌다<sup>5)</sup> 활성미생물의 세포벽(막)은 단단 구조의 폴리 펩타이드 구조(Poly peptide structure)로 이를 혐기성 미생물들이 가수분해 시키는데 오랜 시간을 소모하게 만드는 속도제한 단계로 작용된다. 그러므로 잉여슬러지는 혐기성소화 시 20일 이상의 긴 체류시간에도 휘발성 고형물(Volatile solids ; VS)의 제거율이 낮고, 결과적으로 바이오가스 생산량의 감소 및 최종 슬러지 감량도 크지 않는 결과를 초래한다. 슬러지 세포의 생분해성을 높이려면 혐기성 슬러지 분해 전에 슬러지 세포를 용해(Solubilization) 또는 가수분해(Hydrolysis) 해야 한다.

주요 수분 함량이 많은 유기성 폐기물인 하수 슬러지를 자원으로 전환하는 방법으로는 생화학적, 화학적, 열화학적 방법이 있다.<sup>6)</sup> 그 중 물리학적 방법으로는 초음파(ultrasonic) 처리, 고압 균질화(High pressure homogenization), 파쇄 교반 볼밀(grinding-stirred ball mills),

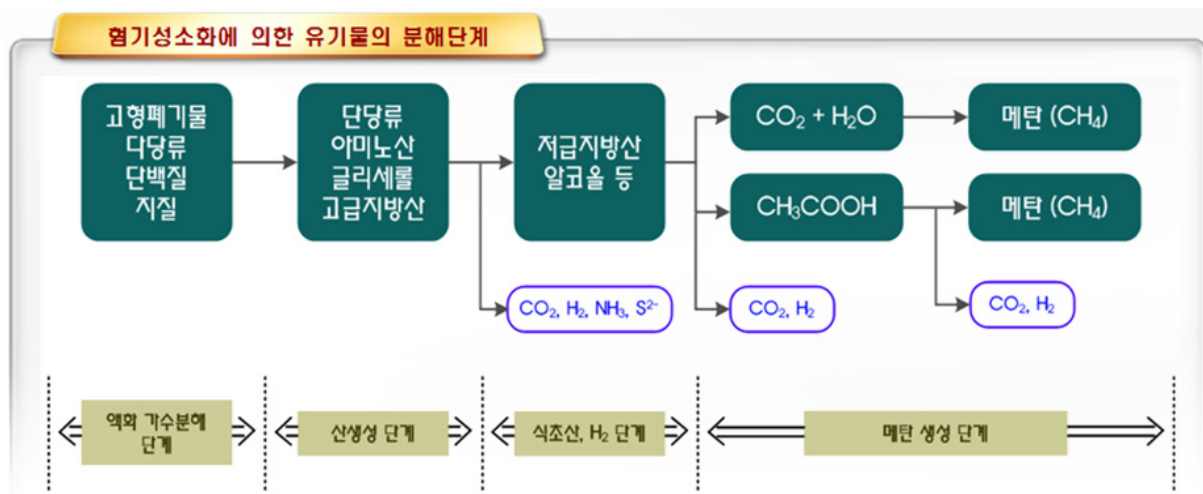


Fig. 1. Anaerobic digestion step.

열전처리(Thermal pre-treatment) 기술 등이 있으며, 화학적 방법으로는 강산성 또는 강알칼리 처리(acid or alkaline treatment), 오존산화(Ozonization) 기술, 그리고 현장에서 자주 쓰이지는 않지만 생물학적 처리로는 감량화가 목표인 고온 자가발열 호기성 소화(Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion), 효소 가수분해(Enzyme hydrolysis) 기술, 그리고 두 가지 이상의 전처리 기술이 복합적으로 결합된 복합처리 기술 등이 있다.

이 중 열가용화 전처리 기술은 혐기성 소화조에 투입되는 슬러지의 유기물 부하를 높게 유지할 수 있으며, 바이오가스 생산 수율(Biogas yield)을 증대시킨다. 또한, 일반적으로 하수슬러지의 연료화를 위한 전처리로 건조공정이 필수<sup>7)</sup>이기 때문에 열적 가용화 공정은 이를 포함한 공정으로써 소화조의 체류시간을 단축시키고 상대적으로 높은 슬러지 감량율을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있어 가장 널리 상용화된 기술로 알려져 있다. 열적 가용화를 통한 슬러지 전처리의 효과는 아래와 같다.

- COD의 가용화에 따른 SCOD 증가.
- 고분자 유기물질의 분해에 따른 VFAs의 증가 (일부 산발효조 역할 수행).
- 슬러지 내 미생물의 견고한 세포벽을 파괴하여 생분해성 증대.
- 점액질 체외효소 분해에 따른 탈수성 증대, 슬러지 이송 및 교반 효율 증대.
- 반응온도가 증가할수록 VSS 감소
- 고형물 가수분해 및 고분자 유기물질의 신속한 분해
- 기존 물리·화학·생물학적 가용화 기술 대비 높은 처리효율 달성

하수처리장에서 발생하는 잉여슬러지의 감량화 및 바이오가스 생산의 전처리 과정으로 열적가용화 공정을 적용한 경우 가용화율 30% 이상을 목표로 하고 있으며, 현재까지 TS(Total Solids) 약 6%의 농축 잉여슬러지를 대상으로 다년간 운전한 결과 최적의 운전조건은 160°C, 60분이었다. 그러나 농축기술의 발달과 현장에서의 요구로 인하여 열적가용화 공정

을 이용하여 처리하고자 하는 잉여슬러지의 TS 농도가 10% 이상으로 상향됨에 따라, 본 연구에서는 고농축 잉여슬러지에 대한 열적가용화 특성을 규명하고자 TS(Total Solids) 약 10%의 농축 잉여슬러지를 대상으로 온도 및 체류시간 변화에 따른 실험을 진행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치는 약 1 L 용량의 열적 가용화 반응기를 이용하여 실험하였다. 몸체를 가열하는 세라믹 밴드히터(220 V, 8.6 A, 1.8 kW)가 몸체를 감싸게 설치되어 있으며, 반응기 내부 교반을 위한 교반기, 압력계, RPM측정기로 구성되어 있다.

가용화 반응기 실험은 온도 컨트롤러와 타이머 설정으로 히터가 작동되며 설정 온도에 근접하면 전류제어로 온도가  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  내외로 제어되며, 냉각수가 반응기 내부로 순환하여 설정온도를 제어한다. 설정 온도에 도달함과 동시에 타이머가 작동되며 설정 시간 이후에는 히터 전력이 차단되며 실험이 종료된다. 내부 교반기의 회전은 180 rpm으로 실험하였고, 실험 종료 후 샘플은 압력과 온도가 안정화 된 후 샘플을 채취하여 냉장 보관하였다.

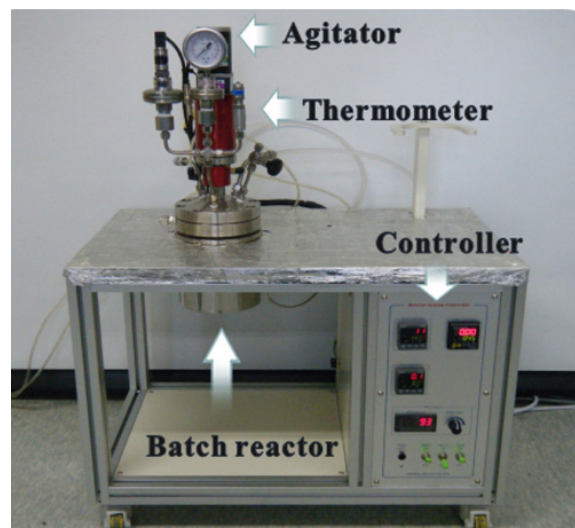


Fig. 2. Thermo pre-treatment reactor.

### 2.2. 재료 및 실험방법

본 실험에서는 약 10%의 농축 잉여슬러지에 대한 열적가용화 특성을 알아보기 위한 실험을 진행 하였다. 열적가용화 기준은 실증설비 운전 경험에 따라 160°C, 60분을 기준으로 하였으며, 시간변수는 160°C기준 30분, 60분, 90분, 120분으로 진행하였고 온도변수는 60분 기준, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C로 진행하였다.

가용화 결과는 TCOD(Total Chemical Oxygen Demand), SCOD(Soluble Chemical Oxygen Demand), VS(Volatile Solids), TS(Total Solids), T-N(Total Nitrogen), T-P(Total Phosphorus), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, VFAs(Volatile Fatty Acids)에 대해 분석하였으며, 가용화 효율을 나타내는 COD 가용화율(Solubilization)은 아래 식을 통해 계산하였다.

$$COD_{solubilization}(\%) = \frac{(C_s - C_{so})}{(C_o - C_{so})} \times 100$$

(식 1)

여기서, C<sub>o</sub> = 전처리 전 TCOD 농도(mg/L),  
 C<sub>s</sub> = 처리 후 SCOD 농도(mg/L),  
 C<sub>so</sub> = 전처리 전 SCOD 농도(mg/L)

열적가용화 테스트를 위한 잉여슬러지 샘플은 J 환경사업소 농축 잉여슬러지를 사용하였으며, 각 항목에 대한 분석방법과 그 성상은 <Table 1>과 같다.

## 3. 결 과

### 3.1. 시간에 따른 가용화 특성

농축 잉여슬러지에 대한 가용화 특성을 알아보기 위해 체류시간에 따른 가용화 특성을 평가하였다. 온도는 현재 현장에서 운영 중인 온도를 반영하여 160°C로 고정 하였으며, 시간변수는 30~120분까지 30분 차이를 두고 실험을 진행하였다. 가용화율은 식(1)을 통해 계산하였으며, Fig. 3은 가용화율과 TCOD, SCOD에 대한 값을 나타내었다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 시간별 30분, 60분, 90분, 120분에 대해 SCOD 값이 2,445 mg/L, 3,424 mg/L, 4,370 mg/L, 4,691 mg/L로 증가하는 결과가 나왔다. 이에 따라 가용화율도 시간에 따라 12.11%, 20.52%, 28.62%, 31.40% 순으로 증가 하였다. 농축 잉여슬러지에 대한 가용화율은 같은 온도에서 체류시간에 따라 증가함을 보이고 있다. 시간에 따른 가용화 결과를 토대로 가용화율

Table 1. Characteristics of Concentrated Sludge and Analysis Methods

Parameter	Concentration (mg/L)	Analysis method		
		Method	Analysis equipment	
TCOD	12,675	COD <sub>Cr</sub> , Chemical Oxygen Demand-Titrimetric Method-Dicromate	-	
SCOD	1,035			
T-N	930	Total Nitrogen-UV/Visible Spectrometry-Oxidation Method	UV-spectrophotometer (HACH, DR-4000, USA)	
T-P	383	Total Phosphorus-UV/Visible Spectrometry		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	57	Ammonium Nitrogen-UV/Visible Spectrometry		
VS	84,751	수질오염공정시험 방법	Furnace (WiseTherm, DAIHAN, Korea)	
TS	99,050			
VFAs	-	Gas Chromatography(TCD)	Column	DB-FFAP
			Carrier gas	N <sub>2</sub>
			Injection	20 µl
			Split ratio	3:1
			Injector temp.	200°C
			Detector temp.	230°C
	Oven temp.	230°C		

이 30%이상을 달성하기 위해서는 160°C에서 운전할 경우 120분 이상의 운전조건이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 시간에 따른 열적가용화 결과 중 TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N에 대한 결과를 나타내었다. 가용화 온도가 160°C로 고정된 상황에서 체류시간이 증가하더라도 TS, VS, T-N, T-P는 크게 증가하거나 감소하는 모습을 보이지 않았다. 반대로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 경우에는 반응시간이 증가함에 따라 56 mg/L, 62 mg/L, 64 mg/L, 66 mg/L 까지 다소 증가하는 경향을 보이는데, 연구에 의하면<sup>8,9)</sup> NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 혐기소화를 저하시키는 요인으로 작용 할 수 있어 CH<sub>4</sub>생산의 감소로 이어질 수 있다고 보고되고 있으나, 본 실험의 경우에는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 70 mg/L 이하로 매우 낮아 별다른 악영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

VFAs는 산발효 중 중간단계 물질로 바이오가스 생산의 척도로 삼을 수 있다.<sup>7)</sup> VFAs에 대한 결과는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 30분 ~ 90분까지는 지속적으로 증가하다가 120분에는 증가폭이 적어지거나 반대로 다소 감소하는 경향을 보이고 있지만 그 차이가 크지 않아 운전온도 160°C에서 가용화율 30% 이상을 달성하기 위한 열적가용화 체류시간은 120분이 적합한 것으로 판단된다.

### 3.2. 온도에 따른 가용화 특성

운전 온도 160°C를 기준으로 시간에 따른 특성을 실험한 결과 120분이 가장 적합하다고 판단되었으나, 현장에서 운전하고 있는 60분의 체류시간 대비 반응조의 용적이 두 배로 늘어남에 따라 설치비가 증가하는 경제적 부담이 발생하게 된다. 따라서 이번에는 기준 조건으로 체류시간을 60분으로 고정하고 온도에 따른 농축 잉여슬러지의 열적가용화 특성을 알아보기 위해 온도를 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C까지 순차적으로 증가시키며 실험을 진행하였다. Fig. 6은 온도에 따른 농축 잉여슬러지 가용화율과 TCOD, SCOD 값을 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 SCOD값은 각각 1,867 mg/L, 2,726 mg/L, 3,424 mg/L, 5,775 mg/L, 7,738 mg/L로 증가하며, 이에 따라 가용화율도 7.14%, 14.52%, 20.52%, 40.72%, 57.85%까지 증가함을 보였다. 따라서 체류시간을 60

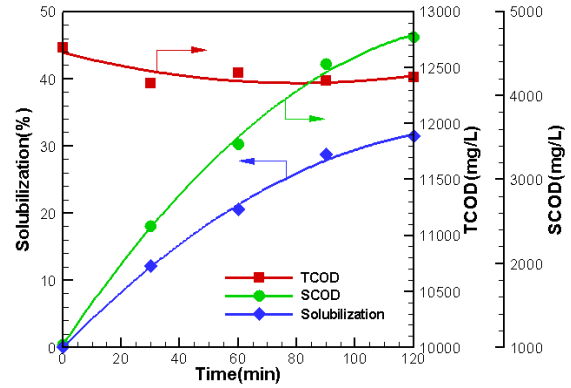


Fig. 3. Thermal solubilization properties over time (solubilization, TCOD, SCOD).

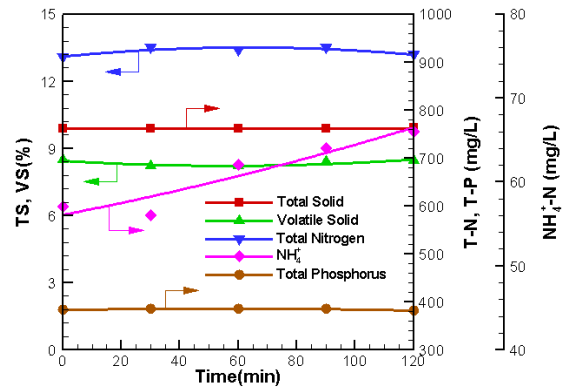


Fig. 4. Thermal solubilization properties over time(TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N).

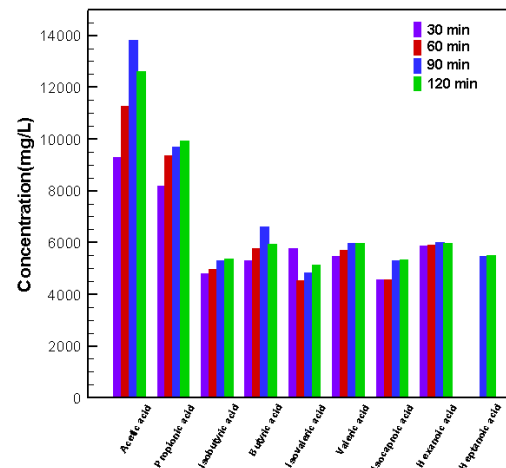


Fig. 5. Thermal solubilization properties over time(VFAs).

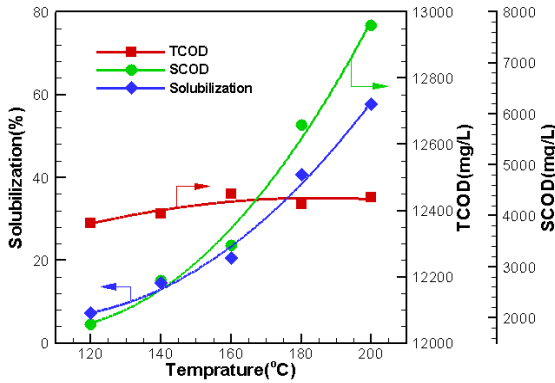


Fig. 6. Thermal solubilization characteristics according to temperature(solubilization, TCOD, SCOD).

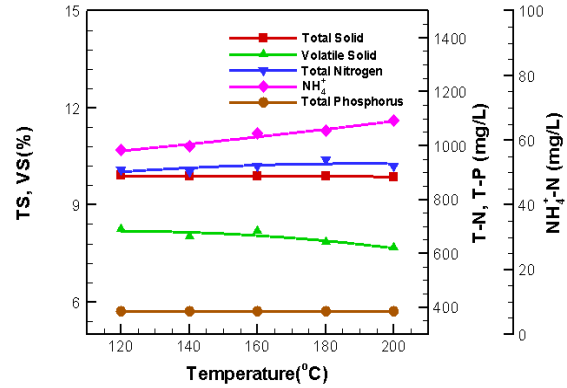


Fig. 7. Thermal solubilization characteristics according to temperature(TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N).

분으로 고정하여 30%이상의 가용화율을 얻기 위한 최적의 온도조건은 170°C 이상으로 판단된다.

Fig. 7은 온도 변수에 따른 TS, VS, T-N, T-P, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 결과를 나타내었다. 시간변수와 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N이 57 mg/L, 58 mg/L, 62 mg/L, 63 mg/L, 66 mg/L로 증가하였다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 그 농도가 70 mg/L 이하로 매우 낮아 혐기성소화에 별다른 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다. 시간 변수와 다르게 VS의 농도는 온도가 증가함에 따라 8.23%, 8.01%, 8.19%, 7.84%, 7.66%로 변화하는 경향을 보이고 있는데, 160°C까지는 큰 변화가 없지만 180°C 이상에서 감소하고 있음을 볼 수 있다. VS는 휘발성 고형물로 유기물의 양을 나타내는 지표로 볼 수 있다. VS의 농도가 180°C 이상에서 온도가 증가함에 따라 감소되는 경향을 보면 온도가 높아짐에 따라 가용화율이 높더라도 유기물의 양의 감소로 이어질 수 있으므로 적절한 온도 조건에서 운전해야 함을 알 수 있다.

온도 변수에 따른 VFAs에 대한 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 지속적으로 증가함을 볼 수 있다. 가용화 온도가 증가함에 따라 acetic acid, propionic acid의 증가폭이 크게 나타났으며, CH<sub>4</sub>로 전환이 가장 용이한 acetic acid<sup>10)</sup>농도가 높은 비중을 차지하고 있어 혐기성 소화에 유리할 것으로 예상된다.

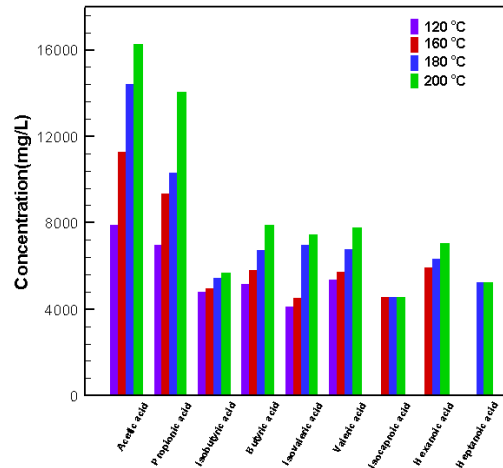


Fig. 8. Thermal solubilization characteristics according to temperature(VFAs).

## 4. 결론

본 연구에서는 하수처리장에서 발생하는 잉여슬러지의 감량화 및 바이오가스 생산의 전처리 과정으로 TS 약 10%의 고농축 잉여슬러지에 대한 열적 가용화 공정의 온도 및 체류시간 변수에 따른 운전 특성에 대하여 연구를 수행하였다.

### 4.1. 체류시간 변수에 따른 결과

체류시간에 따른 변수는 온도를 160°C로 고정된 상태에서 30분 ~ 120분 까지 30분 간격으로 수행했으며, 시간에 따라 가용화율은 12.11%, 20.52%, 28.62%,

31.40% 순으로 증가하였다. 가용화율은 체류시간이 증가함에 따라 증가하며 30% 이상의 가용화율을 얻기 위해서 120분 이상의 운전 조건이 필요하다. 그리고  $\text{CH}_4$  생산을 저해하는  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 56 mg/L, 62 mg/L, 64 mg/L, 66 mg/L 까지 다소 증가하는 경향을 보이거나, 그 농도가 매우 낮아 혐기성소화에는 별 다른 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다. 또한 120분에서 VFAs가 다소 감소하는 경향을 보이지만 큰 차이가 없으므로 반응온도 160°C에서 가용화율 30% 이상을 달성하기 위한 최적의 체류시간은 120분으로 판단된다.

#### 4.2. 온도 변수에 따른 결과

온도 변수는 120 ~ 200°C까지 20°C간격으로 실험을 수행하였다. 온도가 증가함에 따라 가용화율은 7.14%, 14.52%, 20.52%, 40.72%, 57.85%까지 증가하였다. 체류시간 변수와 마찬가지로 온도가 증가하면서  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 57 mg/L, 58 mg/L, 62 mg/L, 63 mg/L, 66 mg/L로 증가함을 보였으나 앞에서 언급한 바와 같이 그 농도가 매우 낮아 혐기성 소화에는 별 다른 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다. 체류시간 변수와 달리 VS의 농도가 온도가 증가함에 따라 8.23%, 8.01%, 8.19%, 7.84%, 7.66%로 변화하는 경향을 보이고 있는데, 160°C까지는 큰 변화가 없지만 180°C 이상에서 감소하고 있음을 볼 수 있으며 이것은 180°C 이상에서 온도가 증가함에 따라  $\text{CH}_4$  생성과 연관된 유기물의 양이 감소함을 나타내고 있다. VFAs는 온도가 증가함에 따라 증가함을 보이고 있으며  $\text{CH}_4$ 로 전환이 가장 용이한 acetic acid 농도가 높은 비중을 차지하고 있어 혐기성 소화에 유리할 것으로 예상된다. 따라서 체류시간 60분을 기준으로 유기물의 손실 없이 가용화율 30% 이상을 달성하기 위한 최적의 반응온도는 170°C로 판단된다.

#### 4.3. 결론

TS 10%의 농축 잉여슬러지를 대상으로 열적가용화공정 적용 시, 현재 현장에서 운전하고 있는 온도 160°C를 기준으로 가용화율 30% 이상 달성을 위한 최적 체류시간은 120분이나, 현장에서 운전하고 있

는 체류시간 60분 대비 반응조의 용적이 두 배로 늘어나 설치비가 증가함에 따라 경제적으로 부담이 될 수 있다. 그리고 체류시간 60분을 기준으로 유기물의 손실 없이 가용화율 30% 이상 달성하기 위한 최적 온도는 170°C로 나타났다. 그러므로 설계 반영 시에는 현장 및 사업 여건에 따라 '160°C, 120분' 또는 '170°C, 60분'을 선택적으로 반영할 수 있을 것으로 기대한다.

## 사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상하수도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2021002690002).

## References

1. Hu, S. U., "Energy Laws and Policies in the Era of Climate Crisis", Ph.D. Dissertation, Seoul National University. (2021).
2. Korea Energy Agency, "Energy Statistics Handbook". (2021).
3. Phae, J. G., Park, J. H., Kim, Y. S., Oh, J. R., Kim, D. W., Lee, J. S., Jeong, J. Y., So, Y. S., Park, H., Kim, D. B. and Choi, C. M., "Performance evaluation of sewage sludge reduction project and improvement plan research", Ministry of Environment. (2019).
4. Ahn, J. W., "Thermal Hydrolysis of Municipal Sewage Sludge and Utilization as Agricultural Biosolids", J. Korea Soc. Waste Manag., 38(4) pp. 350~356. (2021).
5. Jung, K. W., Hwang, M. J., Cha, M. J. and Ahn, K. H., "Application and optimization of electric field-assisted ultrasonication for disintegration of waste activated sludge using response surface methodology with a Box-Behnken design", Ultrasonics Sonochemistry, 22, pp. 437~445. (2015).
6. Cho, W. R., Kim, J. Y., Lee, J. J. and Lee, J.



- Y., "A Study on Characteristics of Sewage Sludge and Wood Waste-derived Hydrochar", *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 37(4), pp. 295~300. (2020).
7. An, J. W., Oh, M. A., Oh, S. J. and Lee, J. Y., "A Study on Optimal Conditions for Bio-drying with a Mixture of Sewage Sludge and Food Waste Compost", *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 37(7), pp. 481~486. (2020).
  8. Sung, S. H. and Liu, T., "Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion", *Chemosphere*, 53(1), pp. 43~52. (2003).
  9. Angelidaki, I. and Ahring, B. K., "Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature", *Water Research*, 28(3), pp. 727~731. (1994).
  10. Jeong, S. Y., Jeung, J. H., Moon, D. H. and Chang, S. W., "Enhancement of Anaerobic Biodegradability and Solubilization by Thermal Pre-treatment of Waste Activated Sludge", *Korean Society for New and Renewable Energy*, 10(1), pp. 20~29. (2014).