

공기주입과 영가철을 이용한 하수슬러지 가용화 연구

김용준, 박진규*, 為田一雄**, 이남훈†

안양대학교 환경에너지공학과
(주)에코윌플러스*
후쿠오카대학 대학원 공학연구과**

Assessment of Sludge Solubilization by Aeration and Zero-valent Iron As a Pre-treatment for Anaerobic Digestion

Yong-Jun Kim, Jin-Kyu Park*, Kazuo Tameda**, Nam-Hoon Lee†

Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University
Ecowillplus Co., Ltd.*
Graduate School of Engineering, Fukuoka University**

(Received: Jun. 10, 2016 / Revised: Aug. 23, 2016 / Accepted: Aug. 23, 2016)

ABSTRACT: The reaction of zero-valent iron (ZVI) with oxygen can produce reactive oxidants capable of oxidizing organic compounds. Thus, the aim of this study was to investigate the effect of pre-treatment on sludge solubilization by ZVI and aeration. The results demonstrated that the aeration pre-treatment with ZVI method was more effective than the only aeration for improving sludge solubilization, indicating that ZVI increased the extent of sludge solubilization. In addition, removal rate of $\text{NH}_3\text{-N}$ by ZVI and aeration was found to be 34%, while only aeration was 24%. Thus, ZVI and aeration can be employed as an efficient pre-treatment option to achieve higher sludge solubilization and decrease the toxic effect of $\text{NH}_3\text{-N}$ for sludge digestion.

Keywords: Sewage sludge, Anaerobic digestion, Solubilization, Aeration, Zero-valent iron

초 록: 영가철과 산소가 반응 시 유기화합물들을 산화시킬 수 있는 활성산화제가 생성되게 된다. 이에 본 연구에서는 이러한 반응기작을 고려하여 슬러지의 가용화를 위한 전처리 방법으로서 영가철과 공기주입의 혼합에 의한 전처리 효과를 평가하였다. 실험결과 슬러지의 가용화를 위해 공기주입만 단독으로 적용하였을 때보다 영가철과 공기주입을 동시에 적용하였을 때 슬러지의 가용화가 더욱 효과적인 것으로 분석되어 영가철의 투입이 슬러지의 가용화 범위를 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 영가철과 공기주입 시 암모니아성 질소 농도의 제거율이 34%로 나타난 반면에 단독으로 공기만 주입 시에는 24%로 나타났다. 따라서 영가철과 공기주입에 의한 전처리 방법은 슬러지의 가용화 효율을 향상시킬 수 있으면서 암모니아성 질소로 인한 혐기성 소화의 저해 가능성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 하수슬러지, 혐기성 소화, 가용화, 공기주입, 영가철

† Corresponding Author (e-mail: nhlee@anyang.ac.kr)

1. 서론

산업화에 따른 경제성장과 인구증가는 세계적으로 물 사용량을 증가시켰으며, 이는 발생하는 하수의 양 또한 증가시키게 되었다. 증가된 하수처리를 위하여 우리나라는 2014년말 기준으로 공공하수처리시설은 597개소로 계속 증가하고 있으며, 이에 따라 하수슬러지 발생량도 증가하여 우리나라의 하수슬러지의 발생량은 2006년 2,742,475 톤/년에서 2014년 말 기준으로 3,691,150 톤/년으로 약 35% 증가하여 지속적인 증가추세를 나타내고 있다¹⁾. 지속적으로 발생하는 하수슬러지를 처리하기 위한 기존의 처리 방법으로 매립 또는 해양배출이 주를 이루었으며 특히 해양배출은 하수슬러지 처리의 가장 대표적인 방법이었다. 그러나 전 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 증가하면서 환경 보호를 위한 런던협약 '96의정서가 발효됨에 따라 2011년부터는 하수슬러지의 해양배출이 전면 금지 되었다. 이에 따라 하수슬러지의 육상 처리를 위한 다양한 방법이 연구 중에 있으며, 그 중 혐기성 소화를 통한 처리 방법은 유사 방법인 호기성 소화에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있어 국내의 공공하수처리시설에 설치되어 운영되고 있다. 혐기성 소화는 호기성 소화와 비교하여 운전비용이 낮으며 병원균 사멸을 통한 위생적 처리가 가능하다. 또한 에너지 수입 의존도가 높은 우리나라의 경우 소화 후 생성되는 바이오가스는 신재생에너지로서 석유, 석탄의 대체 에너지로 사용이 가능하기 때문에 혐기성 소화를 통한 하수슬러지 처리에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 하지만, 우리나라의 하수슬러지 특성상 선진국과 비교하면 유기물 함량이 낮아 혐기성 소화조 운영 시 저조한 소화효율로 인하여 운영에 많은 어려움이 겪고 있다²⁾. 이에 혐기성 소화조의 소화효율을 향상시키기 위하여 하수슬러지의 전처리에 따른 가용화 방법에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 전처리 방법으로는 생물학적 처리, 화학적 처리, 열적처리, 기계적 처리 등의 방법이 있다^{3,4)}. 이 중 생물학적 처리는 소량의 산소를 주입하여 혐기 조건을 유지하면서 미생물의 성장 및 효소를 활성화시켜 슬러지의 가용화와 소화효율을 향상시키

는 방법으로 가용화 효율은 타 처리 방법과 비교하여 약간 낮으나 질소 농도를 저감시켜 소화 후 반류수 내의 질소 부하를 저감시킬 수 있는 특징이 있다⁵⁾. 화학적 처리 방법은 오존(O₃), 수산화나트륨(NaOH), 과산화수소(H₂O₂) 등을 이용한 화학반응을 통하여 슬러지내의 유기물을 산화시켜 세포내 물질의 용해도를 높이는 방법으로 가용화 효율은 매우 우수하나 비용 및 화학약품 사용량 등이 문제가 되고 있어, 영가철(Zero-valent iron)을 이용하여 가용화 효율을 높이는 방법이 연구되고 있다⁶⁻⁸⁾. 영가철은 환원제로 혐기성 조건에 적합하게 ORP(Oxidation-reduction potential)를 더욱 낮출 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또한, 가수분해 및 산생성을 위한 주요 효소들을 활성화시킬 수 있으며, 수소(H₂) 이용 미생물의 성장을 촉진시켜 혐기성 소화의 효율을 더욱 높이는 것으로 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 생물학적 처리 방법인 공기 주입과 화학적 처리 방법인 영가철을 이용하여 농축슬러지를 대상으로 전처리를 실시함으로써 산소와 영가철의 산화반응에 의한 슬러지 가용화 및 질소 부하 저감을 위한 혼합 전처리의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 대상시료

본 실험에 사용된 시료는 혐기성소화 대상물질인 농축슬러지를 대상으로 실시하였다. 농축슬러지의 경우 A시의 B공공하수처리장으로부터 샘플링을 실시하였으며 하수처리과정 중 혐기소화조 내부로 투입 직전의 농축슬러지를 대상으로 하였다. 샘플링 후 시료는 전처리 수행 시 시료의 성상 변화에 끼칠 수 있는 영향을 최소화하기 위하여 1차로 헹잡물 및 기타 이물질 등을 10번(2 mm)체로 제거하였다. 이후 대상 시료는 실험실시 전까지 4 °C에서 냉장보관을 실시하였다.

2.2. 전처리 방법

하수처리장으로부터 채취한 시료 3 L를 5 L반응

Table 1. Experimental conditions

No.	Experimental condition	Amount of air (L)	Dosage of ZVI (g/L)
B	Blank	0	0
1	Aeration	216.0	0
2	air + 0.1 %	216.0	3
3	air + 0.5 %	216.0	15
4	air + 1.0 %	216.0	30
5	air + 1.5 %	216.0	45
6	air + 2.0 %	216.0	60

조에 투입 후 공기주입 펌프를 이용하여 6개의 시료에 0.05 volume of air per volume of sludge per minute(vvm)의 공기를 24 hr동안 주입하였다. Hasegawa et al.⁹⁾의 문헌에서는 0.4 vvm과 0.08 vvm의 공기주입량을 각각 다르게 하여 농축슬러지의 가용화율에 대하여 평가하였으며 그 결과 40%의 비슷한 가용화율을 나타내었다. 이에 따라 과잉공기주입에 의한 혐기소화 억제를 방지하기 위하여 공기의 주입량은 0.05 vvm으로 설정하였다.

본 연구에서는 농축슬러지내 용존산소와 영가철의 투입량 증가에 따른 효과를 알아보기 위하여 영가철은 각각 3 g/L, 15 g/L, 30 g/L, 45 g/L, 60 g/L를 투입하였으며, 영가철은 Sigma Aldrich사의 마이크로 크기(60~80 μm)의 제품을 사용하였다. 각 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

영가철의 고른 분포를 위하여 교반속도는 180 rpm으로 교반시켜 주었으며, 이는 기존 전처리 연구에서 교반속도를 120~240 rpm으로 나타내고 있어 중간인 180 rpm을 교반속도로 선정하였다^{10,11)}. Fig. 1에는 전처리를 위한 반응조를 나타내었으며, 각 실험은 3회 반복실험을 실시하였다.

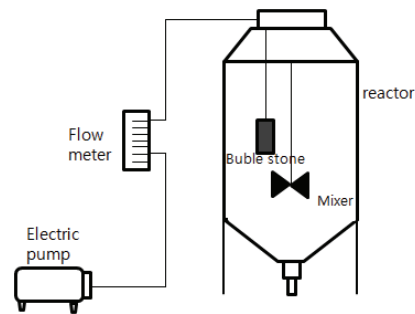


Fig. 1. Schematic diagram of reactor.

2.3. 분석항목

농축슬러지 성상 분석항목으로는 ORP(Oxidation reduction potential), DO(Dissolve oxygen), COD_{cr} (chemical oxygen demand), SCOD_{cr} (Soluble chemical oxygen demand), 총 질소(T-N), 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$), TS(Total solids), VS(Volatile solids)을 대상으로 하였고 모든 실험은 반복실험을 실시하였다. 농축슬러지의 가용화를 판단하기 위한 용존성(soluble) 분석은 400 rpm으로 원심분리 후 GF/C 여과지로 감압여과한 후 실시하였다. 각각의 시료는 당일분석을 원칙으로 하되 여의치 않을 경우 공정시험법에 준한 방법으로 보관하였다. 분석방법은 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Methods and instruments

Parameters	Methods and instruments
pH, ORP	pH meter (YK-2001-ORP)
DO	DO meter (EUTECH INSTRUMENTS DO 2700)
COD_{cr} , SCOD_{cr}	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_8$ closed reflux method (HACK Kit)
T-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, TS, VS	Standard method

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 성상 변화

실험대상 시료의 기본성상은 Table 3에 정리하였다. TS 29,854 mg/L, VS 19,854 mg/L, COD_{cr} 28,268 mg/L로 하수슬러지 내 유기물이 차지하는 부분이 약 66.5%를 나타내었다. 또한 SOCD_{cr}의 농도는 2,821 mg/L로 낮은 농도를 나타내었고, T-N과 NH₃-N은 각각 2,984 mg/L, 222 mg/L를 나타내어 유기물 농도에 비해 질소 농도가 높은 것으로 나타났다.

농축슬러지의 혐기성소화 시 공기는 혐기성미생물의 생장에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하지만 용존산소의 농도가 0.00~0.20 mg/L 사이의 경우 유기물의 산화에 의해 산소가 빠르게 소비되기 때문에 혐기 미생물에는 영향을 미치지 않는

다¹²⁾. Fig. 2는 영가철 투입량에 따른 공기주입 완료 후 DO 농도를 나타낸 것으로, 공기만 주입하고 영가철을 투입하지 않았을 경우 DO 농도가 0.18 mg/L로 나타났으며, 영가철을 함께 투입하였을 때에는 DO 농도가 검출되지 않았다. 이는 투입된 영가철과 산소가 반응하여 모두 소모된 것으로 판단된다.

Fig. 3은 실험조건별 ORP의 변화를 나타낸 것이다. 공기만 주입하였을 경우 ORP가 -203 mV로 상승하였으며, 이는 공기주입으로 인하여 ORP가 상승한 것으로 판단된다. 하지만 통상적 혐기소화 조건인 ORP < -200 mV의 범위에 포함되고 있어 혐기성소화에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 반면에 영가철을 투입하였을 때에는 공기만 주입하였을 경우와 달리 ORP는 점점 감소하여 -230 mV에서 -260 mV를 나타내었다. 이는 영가철의 특성(Eh=-0.447 V)에 기인한 것으로 판단된다¹³⁾.

Table 3. Characteristics of the raw sludge

Parameters	Raw sludge
pH (-)	6.15
TS (mg/L)	39,854
VS (mg/L)	19,854
COD _{cr} (mg/L)	28,268
SCOD _{cr} (mg/L)	2,821
T-N (mg/L)	2,984
NH ₃ -N (mg/L)	222

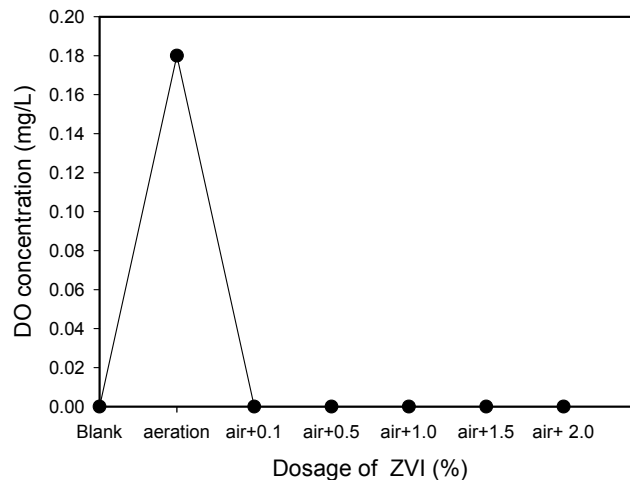


Fig. 2. DO variation by dosage of ZVI.

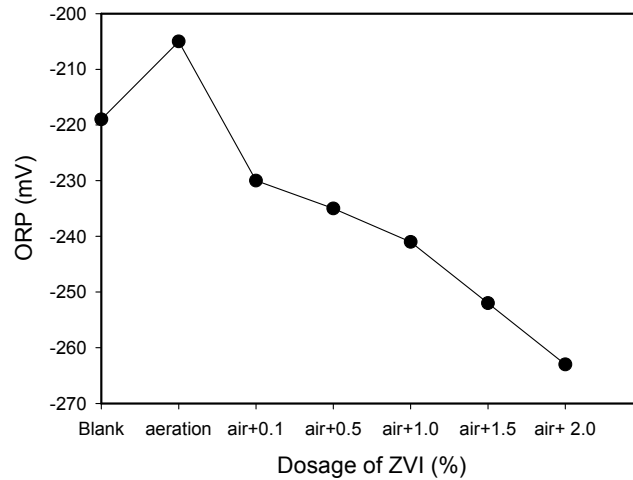
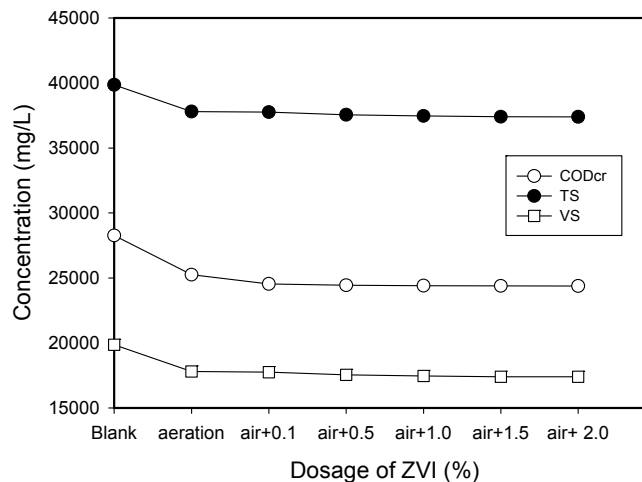


Fig. 3. ORP variation by dosage of ZVI.

Fig. 4. Variation in concentration of COD_{cr}, TS, and VS by dosage of ZVI.

유기물 농도의 경우 Fig. 4와 같이 COD_{cr}, TS, VS 모두 일정량의 공기주입 및 영가철의 투입량 증가에 따라 농도가 점차 감소되어 영가철 2% 투입 시 COD_{cr}, TS, VS의 농도는 각각 24,380 mg/L, 37,389 mg/L, 17,389 mg/L를 나타내었다. 다만, 영가철의 투입량을 증가시켜도 유기물 제거효율은 공기만 주입하였을 때와 비교하여 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2. 슬러지 가용화율

공기주입과 영가철의 혼합 전처리에 의한 가용화율을 평가하기 위하여 다음의 식(1)을 이용하여 산

정하였다¹⁴⁾.

$$S(\%) = \frac{SCOD_f - SCOD_i}{SCOD_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서, S : 가용화율 (%)

SCOD_f : 최종 SCOD 농도 (mg/L)

SCOD_i : 초기 SCOD 농도 (mg/L)

Fig. 5는 공기주입과 영가철의 혼합 전처리에 의한 SCOD_{cr}농도와 가용화율의 변화를 나타낸 것이다. 농축슬러지의 초기 SCOD_{cr}의 농도는 2,821

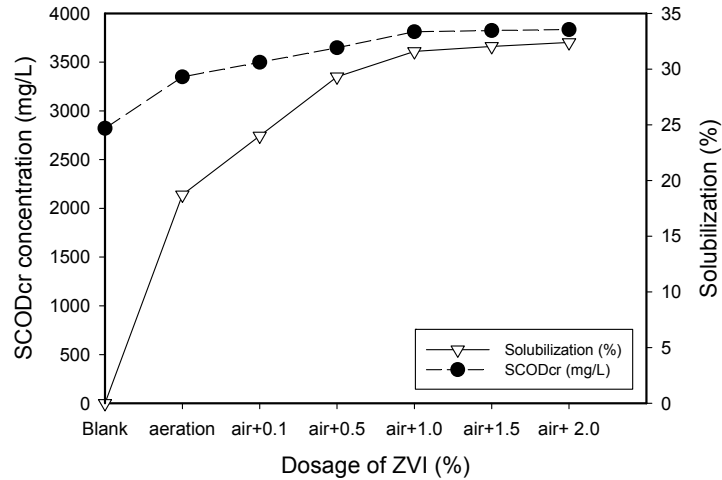
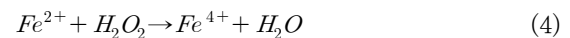
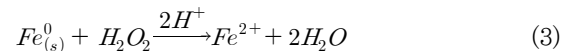
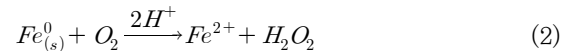


Fig. 5. Variation in SCOD_{cr} concentration and solubilization by dosage of ZVI.

mg/L를 나타내었으나, 전처리 실시 후 3,725 mg/L까지 증가하여 공기주입과 영가철의 투입으로 인한 전처리가 가용화에 효과가 있는 것으로 나타났다. 가용화율은 공기만 주입 시 약 19%를 나타내었으며, 이는 Ahn et al.⁵⁾의 연구에서와 같이 농축 슬러지에 24 hr 공기주입시 약 18%의 가용화율을 나타낸 것과 유사한 결과이다. 또한 영가철을 2.0%까지 투입 하였을 때 가용화율은 최대 약 32%까지 증가한 것으로 나타나 공기의 단독주입 보다는 공기와 영가철을 이용하여 혼합전처리를 하였을 때 가용화율은 더욱 증가하였다.

공기주입과 영가철의 투입에 따른 슬러지의 가용화원리는 산화반응에 의하여 농축슬러지 내의 고분자 물질(Extracellular polymeric substances)이 분해되고 세포벽이 파괴되면서 난분해성 유기고형물이 용해성 저분자로 전환되었기 때문으로 판단된다¹⁵⁾. 슬러지에 주입된 공기 내 산소는 식(2)와 식(3)과 같이 영가철과의 부식 반응을 통해 반응 중간체로 과산화수소(H₂O₂)와 Fe²⁺를 생성하게 된다. 생성된 Fe²⁺는 pH 조건에 따라 반응이 달라지며 산성 pH에서는 Fe²⁺와 H₂O₂의 펜톤반응을 통해 수산화라디칼(·OH)을 생성하나 중성 pH에서는 철이온의 낮은 용해도로 인해 펜톤반응이 제한되어 식(4)와 같이 수산화라디칼보다는 다소 약한 4가철 형태의 산화제를 생성하는 것으로 보고되고 있다¹⁶⁻¹⁸⁾. 이에 본 연구에서는 산소와 영가철의 반응을 통해 4

가철 형태의 산화제가 생성되어 산화반응에 의해 가용화가 이루어진 것으로 판단된다.



하지만 영가철의 투입량 1.0% 이상부터는 가용화율이 크게 증가하지 않았으며, 유기물의 제거율도 크지 않았다. 이는 영가철의 투입량은 증가하였지만 증가한 양에 비해 용존산소의 농도가 부족하여 반응을 하지 못한 것으로 판단된다. Kim et al.¹⁸⁾은 활성산화제는 용존 산소의 환원반응이 개시반응으로 무산소 조건에서는 활성산화제의 생성이 불가능한 것으로 보고하고 있다. Su et al.⁶⁾의 연구에서는 나노 규모의 영가철과 마이크로 규모의 영가철을 투입하였을 때 마이크로 규모의 영가철에서는 메탄 발생량의 증가가 거의 없는 것으로 나타나 마이크로 규모의 영가철만 투입하여서는 전처리 효과가 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서 적절한 공기주입량의 산정과 영가철의 투입량 조절에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 슬러지 내 질소 저감 효과

공기주입 및 영가철의 투입에 따른 전처리 실시 후 암모니아성 질소와 총 질소의 농도변화에 따른 제거율을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 암모니아성 질소와 총 질소의 경우 공기만 주입 시 각각 24%와 19%의 제거율을 나타내었다. 영가철의 투입량에 따른 질소 제거율을 살펴보면 암모니아성 질소 농도의 경우 최대 145.5 mg/L로 감소하여 30%~34%의 제거율을 나타내었다. 총 질소의 농도도 최대 1,898 mg/L로 감소하여 28%~42%의 제거율을 나타내어 단독으로 공기만 주입하였을 경우보다

높은 질소 제거율을 나타냈다. 따라서 공기 및 영가철의 혼합 투입은 가용화 효율의 증가뿐만 아니라 슬러지 내 질소 부하를 감소시켜 혐기성 소화 후 반류수 내 질소 농도를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Feng et al.¹⁹⁾의 연구에 따르면 영가철을 이용한 전처리는 슬러지 내 유기물 감소에 효과적이며, 스크랩 형태의 영가철을 재이용 할 수 있기 때문에 시설의 운영비 및 처리 비용 절감에 효과가 있다고 기술하고 있다. 따라서 영가철을 이용한 전처리는 경제성 확보 측면에서도 효과가 있을 것으로 판단된다.

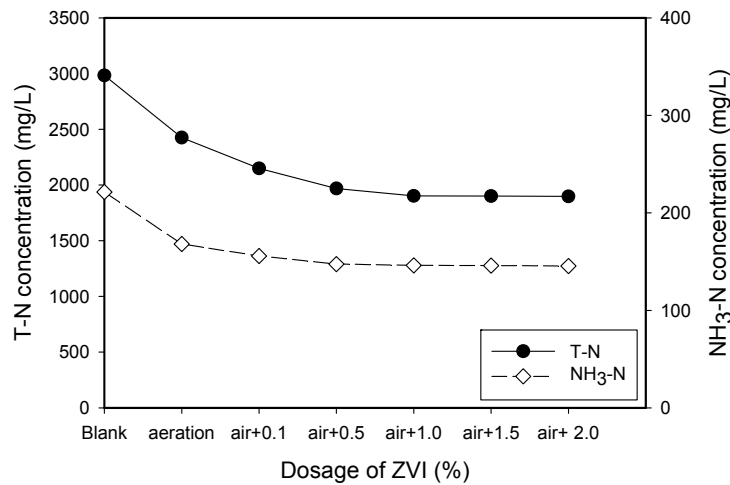


Fig. 6. Variation in concentration of NH₃-N and T-N by dosage of ZVI.

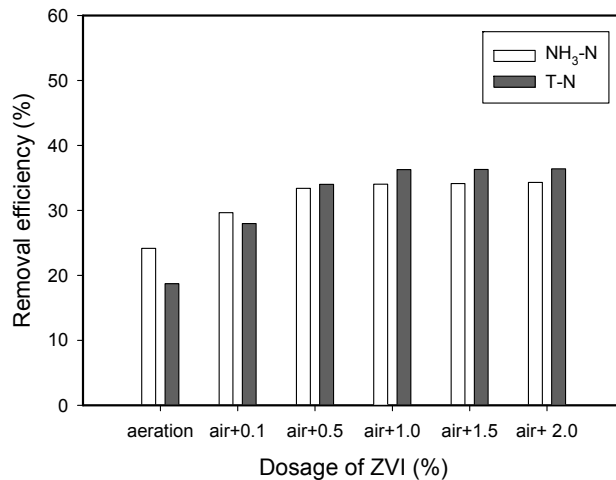


Fig. 7. Removal efficiencies of NH₃-N and T-N by dosage of ZVI.

4. 결론

본 연구에서는 공기주입과 영가철의 투입을 통한 생물학적-화학적 혼합 전처리를 실시하여 슬러지 내 질소 부하 저감 및 가용화 효율 향상을 위한 혼합 전처리의 적용 가능성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공기주입과 영가철을 투입하여 혼합 전처리를 실시한 결과 공기만 단독 주입 시 DO농도는 0.18 mg/L로 나타났으며, 영가철 투입 후 DO는 측정되지 않았다. 이는 투입된 영가철과 산소가 반응하여 모두 소모되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 영가철 투입 후 ORP는 점점 감소하여 -230~-260 mV를 나타내었으며, 이는 영가철의 특성($E_h = -0.447$ V)에 기인한 것으로 판단된다 따라서 공기주입 및 영가철 투입에 따른 전처리가 혐기성소화 저해에 미치는 영향은 없을 것으로 사료된다.
2. 가용화율은 공기만 주입 시 약 19%를 나타내었으며, 영가철을 투입 시 약 32%까지 증가하여 공기주입과 영가철의 혼합 전처리가 단독으로 전처리하는 것보다 가용화 효율이 높은 것으로 나타났다. 이는 산소와 영가철의 반응을 통해 4가철 형태의 산화제가 생성되면서 산화반응에 의한 가용화가 이루어진 것으로 판단된다.
3. 단독으로 공기만 주입하였을 경우보다 공기주입과 영가철을 혼합으로 전처리하였을 때 높은 질소 제거율을 나타냈다. 따라서 공기 및 영가철의 혼합 투입은 가용화 효율의 증가뿐만 아니라 슬러지 내 질소 부하를 감소시켜 혐기성 소화 후 반류수 내 질소 농도를 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

References

1. Ministry of Environment, Sewer Statistics (2015).
2. Ministry of Environment, Sewage Sludge Management Plan (2006).
3. Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenes, J. P., Steyer, J. P. and Ferrer, I., "Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: A Review", *J. Hazard. Mater.*, 183(1-3), pp. 1-15. (2010).
4. Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R., "Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-activated Sludge", *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34(6), pp. 755-781. (2008).
5. Ahn, Y. M., Wi, J., Park, J. K., Higuchi, S. and Lee, N. H., "Effects of Pre-Aeration on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge", *Environ. Eng. Res.*, 19(1), pp. 59-66. (2014).
6. Su, L., Shi, X., Guo, G., Zhao, A. and Zhao, Y., "Stabilization of Sewage Sludge in the Presence of Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI): Abatement of Odor and Improvement of Biogas Production", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 15(4), pp. 461-468. (2013).
7. Karri, S., Sierra-Alvarez, R. and Field, J. A., "Zero Valent Iron as an Electron-Donor for Methanogenesis and Sulfate Reduction in Anaerobic Sludge", *Biotechnol. Bioeng.*, 92(7), pp. 810-819. (2005).
8. Liu, Y., Zhang, Y. and Ni, B.-J., "Zero Valent Iron Simultaneously Enhances Methane Production and Sulfate Reduction in Anaerobic Granular Sludge Reactors", *Water Res.*, 75, pp. 292-300. (2015).
9. Hasegawa, S., Shiota, N., Katsura, K. and Akashi, A., "Solubilization of Organic Sludge by Thermophilic Aerobic Bacteria as a Pretreatment for Anaerobic Digestion", *Water Sci. Technol.*, 41(3), pp. 163-169. (2000).
10. Jhao, J., Wang, D., Li, X., Yang, Q., Chen, H., Zhong, Y. and Zeng, G., "Free nitrous acid serving as a pretreatment method for alkaline fermentation to enhance short-chain fatty acid production from waste activated sludge", *Water Res.*, 78, pp. 111-120. (2015).
11. Li, H., Li, C., Liu, W. and Zou, S., "Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion", *Bioresour. Technol.*, 123, pp. 189-194. (2012).

12. Deshai, B., Bernt, L. and Rune, B., "Oxygen Effects in Anaerobic Digestion, Modeling", *Identif. Control*, 30(4), pp. 191–201. (2009).
13. Xiao, X., Sheng, G. P., Yang, M. and Yu, H. Q., "A Modeling Approach to Describe ZVI-Based Anaerobic System", *Water Res.*, 47, pp. 6007–6013. (2013).
14. Ahn, Y. M., Wi, J., Park, J. K., Higuchi, S. and Lee, N. H., "Effect of Hydrogen Peroxide Pre-treatment on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge", *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 30(8), pp. 915–922. (2013).
15. Neyens, E., Bayens, J., Dewil, R. and Deheyder, B., "Advanced Sludge Treatment Affects Extracellular Polymeric Substances to Improve Activated Sludge Dewatering", *J. Hazard. Mater.*, 106, pp. 83–92. (2003).
16. Lee, H. S., Lee, H. j., Kim, H. E., Kweon, J. Y., Lee, B. D. and Lee, C. H., "Oxidant Production from Corrosion of Nano-and Microparticulate Zero-Valent Iron in the Presence of Oxygen: A Comparative Study", *J. Hazard. Mater.*, 265, pp. 201–207. (2014).
17. Keenan, C. R. and Sedlak, K. L., "Factors Affecting the Yield of Oxidants from the Reaction of Nanoparticulate Zero-Valent Iron and Oxygen", *Environ. Sci. Technol.*, 42(4), pp. 1262–1267. (2008).
18. Kim, H.-H., Lee, H.-J., Kim, H.-E., Lee, H., Lee, B.-D. and Lee, C., "Oxidative Degradation of Phenol Using Zero-Valent Iron-Based Fenton-Like Systems", *J. Soil Groundw. Environ.*, 18(4), pp. 50–57. (2013).
19. Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X. and Chen, S., "Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron", *Waste Res.*, 52, pp. 242–250. (2014).