



고전압 임펄스 기술을 활용한 슬러지 가용화

Solubilization of wasted sludge using high voltage impulse technique

조승연¹·장인성^{2*}

Seung-Yeon Cho¹·In-Soung Chang^{2*}

¹호서대학교 나노바이오토크닉스학과, ²호서대학교 환경공학과

¹Department of Nanobiotronics, Hoseo University, ²Department of Environmental Engineering, Hoseo University

ABSTRACT

Several disposal processes for waste sludge from wastewater treatment plants such as landfill, ocean dump, incineration, reuse as fuels or fertilizers are practiced. However, ocean dumping is prohibited by international treat. New constructions of landfill sites or incineration facilities are limited by NIMBY and reuse processes are still suffering from low energy yield. Therefore, development of alternative processes for sludge disposal are currently needed. In this study, alternative technique for sludge solubilization using HVI (high voltage impulse) was suggested and verified experimentally. Sludge solubilization was carried out for 90 minutes using HVI discharge with peak voltage of 16 kV and pulse duration for 40 microsecond. About 3~9 % of MLSS and MLVSS concentration were reduced, but the soluble COD, TN, TP of the sludge increased to 372 %, 56 % and 102 % respectively. It indicates that the flocs and/or cells of the sludge were damaged by HVI. These resulted in flocs-disintegration and cells-lysis, which means the internal matters were bursted out of the flocs as well as the cells. Thus, electrical conductivity in bulk solution was increased. All of the results verified that the HVI could be used as an alternative technique for sludge solubilization processes.

Key words: high voltage impulse, MLSS, sludge, solubilization

주제어: 고전압임펄스, MLSS, 슬러지, 가용화

1. 서 론

하폐수의 유기오염물질 제거는 주로 생물학적 처리로 이루어지고 있으며, 이는 미생물에 의한 유기물질 및 영양소의 섭취에 의한 제거 기작에 근거한다. 따라서 수중의 오염물질을 제거하면서 미생물은 성장하게 되며 이에 따른 잉여슬러지 (waste sludge)의 발생은 회피할 수 없으며, 하폐수 발생량의 증가에 따라 슬러지 발생량도 계속 증가하는 추세이다. 현재 시행되는 하수 슬러지의 기본적인 처분 방법으로는 매

립, 해양투기, 소각, 연료화 및 퇴비화 등이다 (Korean ministry of environment, 2008). 그러나 런던협약 의정서의 발효에 의해 슬러지의 해양배출이 이미 전면 금지되었고, 매립장 및 소각장의 신규건설은 님비(NIMBY) 현상에 의해 제한받고 있으며 연료 및 퇴비화는 낮은 경제성으로 인해 효과적인 슬러지 처분 방법에 대한 대안 기술의 개발이 요구받고 있다. 즉, 새로운 슬러지 처분 방법뿐 아니라 하수 슬러지를 원천적으로 저감할 수 있는 슬러지 감량화 (또는 가용화) 기술 개발의 필요성이 요구되고 있다.

현재 시도되고 있는 슬러지 가용화 방법으로는 초음파 (Lee and Park, 2008), 열처리 (Vlyssides et. al, 2004), 오존처리 (Chu et. al., 2008; Lee et. al., 2004),

Received 10 March, revised 31 May, accepted 21 June

*Corresponding author: In-Soung Chang(E-mail: cis@hoseo.edu)

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

미생물 처리 (Liang et. al., 2006; Yang et. al., 2008) 등 물리/화학/생물학적 처리 방안이 연구되고 있으나, 에너지 과소비, 2차오염물질 발생에 따른 처리비용 증가 등의 단점을 가지고 있어서 여전히 기술개선 또는 대체 가용화 기술개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 슬러지 처분 방법의 보완책이자 발생량 저감을 위하여 HVI (High Voltage Impulse) 기술을 도입하여 슬러지의 가용화 가능성을 살펴보고자 하였다. HVI 기술은 식품산업에서 식품의 비열살균 (non-thermal sterilization) 목적으로 개발되었으며, 보통 5-80 kV/cm의 고전압 전계 하에서 발생하는 펄스를 적게는 수십 나노초 (nano-seconds)에서 길게는 수백 마이크로초 (micro-seconds) 동안 미생물의 세포막 (또는 세포벽)에 인가하는 기술을 지칭한다 (Aronson et. al., 2005; Dutreux et. al., 2000; Loginov et. al., 2005). 이렇게 HVI가 인가되면 강한 전기장과 함께 충격파 (shockwave)를 발생시키며 미생물 세포막의 절연 파괴로 인해 세포 내외의 단백질, DNA 등의 분자들이 세포 밖으로 이동하게 되는 세포막 파괴가 일어나는 것으로 밝혀져 있다 (Jayaram, 2000; Loey et. al., 2002; Reyens et. al., 2004; Zhang et. al., 1994). 즉, Fig. 1에 나타난 바와 같이 인가된 전기장 (E)의 세기가 임계전기장 (E_c) 세기보다 크게 되면 전기장에 의한 비가역적 세포막 천공현상 (electroporation)이 발생하여 미생물이 사멸하게 되는 메커니즘이 알려져 있다 (Raso and Heinz, 2006).

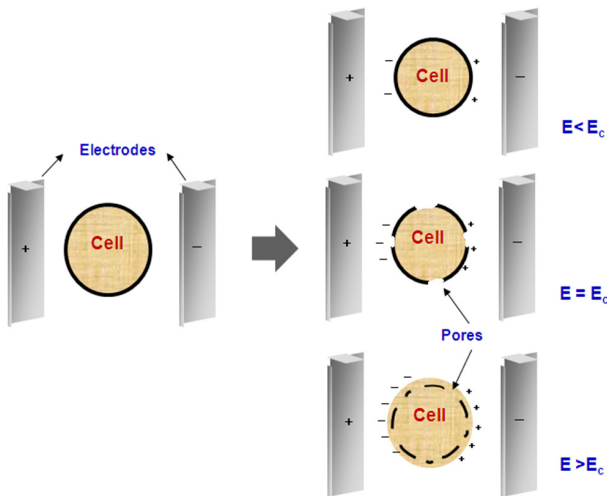


Fig. 1. Electroporation of cell membrane when exposed to HVI treatments: E= external electric field strength, E_c = critical electric field strength (Raso and Heinz, 2006)

본 연구에서는 하/폐수 처리장에서 발생하는 2차 슬러지가 대부분 미생물 세포 및 플록 (floc)으로 이루어져 있다는 점에 착안하여 잉여슬러지를 가용화할 목적으로 HVI 기술을 활용하고자 하였다. 즉, 본 연구의 목적은 하/폐수 처리장의 유기성 슬러지에 HVI를 인가하여 슬러지를 가용화 하였고, 그 가능성 및 성능을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시료의 준비

슬러지 시료는 장기폭기식으로 운영 중인 A시의 오수처리 시설에서 채취하였다. 슬러지 시료의 평균 MLSS는 1,650 mg/L, MLVSS는 1,500 mg/L이었다. 또한 용존성-COD, -TN, -TP의 각각의 평균값은 21 mg/L, 37 mg/L, 16 mg/L이었다.

2.2 HVI 시스템 구성

본 연구에 사용된 HVI 시스템은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전원 (power supply), 고전압발생기 (high voltage generator), 축전기 (capacitors)와 펄스발생 스위치, 펄스 발생기 (impulse generator)로 구성되어 있다. 교류전원은 고전압 발생기에서 승압된 후 충전기에 저장된 후 스위치 작동에 의해 임펄스 발생기에 의해 HVI가 만들어진다. 스위치는 회전로타방식 (rotary gap switch)을 이용하여 하나의 상부 전극에 회전체의 로터리 갭 전극을 6개 설치하여 속도 조절이 가능한 모터를 이용하여 회전시킴으로 스위칭 동작을 구현하는 방법, 즉 auto-trigger pulses를 발생시킬 수 있도록 제작하였다. 만들어진 HVI는 반응기에 연결된 전극으로 보내져 HVI를 시료에 인가하는 구조로 이루어져 있다. HVI 시스템과 연결된 voltage divider와 current transformer (Stagenes, USA)를 오실로스코프 (TDS oscilloscope 2022B, Tektronix, USA)와 연결하여 HVI 반응기 내에 인가되는 펄스의 전압과 전류 파형을 확인할 수 있도록 구성되었다.

발생한 HVI는 슬러지 시료가 담겨져 있는 반응기 (Fig. 3) 내부의 전극에 연결하였다. 반응기의 재질은 내부가 보일 수 있도록 아크릴 재질로 제작되었다. 반응기의 직경과 길이는 각각 90 mm과 200 mm이다. 전극은 디스크형과 침형 두 가지 형태로 제작하였고



재질은 스테인레스 (SUS 306)를 사용하였다. 디스크형 전극의 직경은 70 mm이고 침형 전극의 직경은 5 mm이었다. 전극 간 거리는 1 ~ 30 mm의 범위로 조절할 수 있고, 반응기 하부에 직경 20 mm의 다공판을 설치하여 폭기가 가능하게 제작하였다. 인가된 HVI의 운전 조건은 Table 1에 요약하였다.

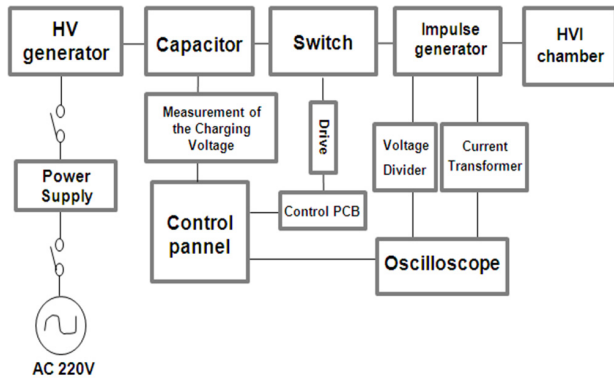


Fig. 2. Schematic diagram of HVI system used in this study

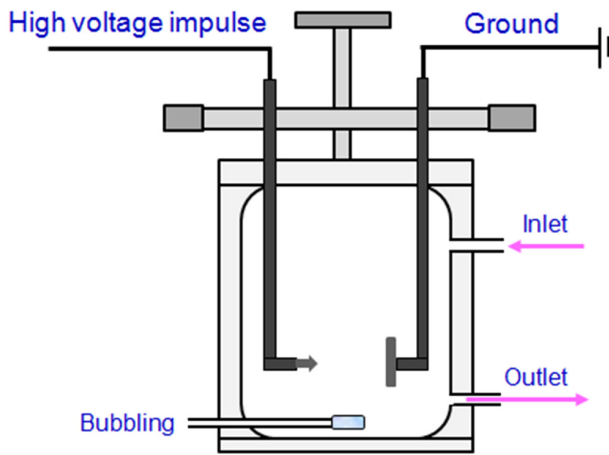


Fig. 3. Schematic diagram of HVI reaction chamber

Table 1. Operating condition of HVI system

Parameter	Unit	Values
Electric fields	kV/cm	6.5
Current	A	6
Pulse width	μs	125
Distance of electrodes	mm	20
Treatment volume	mL	1000
Treatment time	min	90
Capacitors	nF	20

2.3 실험 및 분석방법

시료 슬러지의 가용화 여부를 확인하기 위하여 HVI 처리 전과 후 시료의 성상변화를 측정하였다. 측정 항목과 분석 방법은 Table 2에 요약하였다. 주요 정량분석 항목은 모두 Standard Methods (1995)에 규정된 방법에 의해 수행되었다.

Table 2. Analytical methods

Item	Methods, apparatus (or references)
Conductivity	Conductivity meter (Hach HQ14d)
pH	pH meter (Hach DQ11d)
TN	Persulfate method (Standard Methods)
TP	Vanadomolybdophosphoric acid method (Standard Methods)
CODcr	Open reflux (Standard Methods)
SS and VSS	Gravimetric method (Standard Methods)

3. 결과 및 고찰

3.1 HVI 장치의 펄스파형 특성

고전압 펄스의 파형은 스위치가 인가되면 순간적으로 전압이 증가한 후 일정시간 동안 감소하는 지수감소형 파형 (exponential decay waveform)의 형태와 일정 구간 동안 일정한 전압을 나타내다가 급격히 감소한 사각파형 (square waveform) 형식이 있다 (Yang, et. al. 2010).

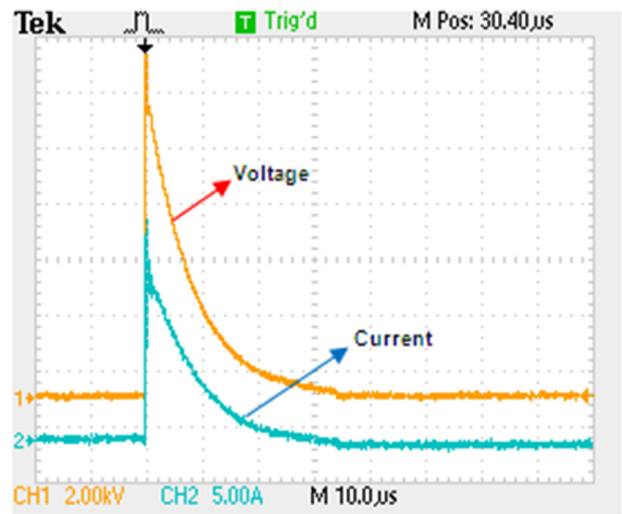


Fig. 4. Typical voltage and current wave forms of the HVI

Fig. 4는 HVI 시스템에서 발생하는 고전압 펄스의 전형적인 파형을 오실로스코프로부터 캡처한 그림이다. 발생한 펄스는 스위치가 동작되면 약 12 kV까지 순간적으로 전압이 증가한 후 약 40 마이크로초 (micro-second) 기간 동안 감소하는 전형적인 지수감소형 파형의 형태를 보이고 있다. 전압과 아울러 전류도 동일한 형태로 인가 초기에 증가하였다가 지수적으로 감소하는 파형을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 HVI 처리에 의한 슬러지 가용화

HVI 처리에 의한 슬러지 가용화 정도를 파악하기 위하여 HVI 처리 전/후의 활성슬러지의 성장변화, 즉 MLSS, MLVSS, 용존성-COD, -TN, -TP의 농도변화를 관찰하였다. HVI 시스템의 충전 전압은 15~16 kV, 로타리갭 스위치를 이용하여 시료 1000 mL를 90분 동안 HVI 인가하는 실험을 수행하였다. HVI 처리 후의 시료 중 용존성 물질의 측정은 시료를 여과지 (GF/C)로 여과한 후 정량 분석하였다.

MLSS는 2,900 mg/L에서 90분 후 2,810 mg/L로 감소하였고, MLVSS는 2,540 mg/L에서 2,440 mg/L로 감소하였다. 또한 용존성-COD (S-COD)는 초기에 28 mg/L에서 90분 후 125 mg/L, 용존성-TN은 44 mg/L에서 50 mg/L 그리고 용존성-TP는 18 mg/L에서 44 mg/L로 각각 346%, 14% 그리고 144% 증가하였다.

이는 HVI 처리에 의해 슬러지의 플러크이 해체되었거나 각 미생물 세포가 손상되었음을 시사하고 있다. 즉, HVI에 의해 세포막이 파괴되어 세포 내 유기물질이 모용액 (bulk solution)으로 용출되어 MLSS는 감소하는 반면에 전기전도도, SCOD, S-TN과 S-TP의 농도는 모두 증가한 것으로 판단된다.

HVI 처리에 따른 전기전도도와 온도의 변화를 관찰하였다. 슬러지의 온도가 18 °C에서 29 °C로 상승하였고, 동시에 전기전도도가 766 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 844 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 증가하였다. 이 결과 또한 HVI 처리에 의해 세포막이 파괴되어 세포 속 유기물질이 모용액으로 용출되었기 때문에 용존성 물질의 증가에 의해 전기전도도가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 HVI가 방전됨으로 인해 줄열 (joule heat)이 발생하였으며 이로 인해 온도가 상승한 것으로 판단된다.

3.3 HVI 반복인가에 의한 가용화 검증

이상의 단기간 회분식 실험으로부터 HVI 처리가

슬러지 가용화를 유도할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 활성슬러지를 HVI를 인가하면서 가용화 효과를 장기간 확인하는 작업의 필요성이 대두되었다. 이를 위해 현재 운영 중인 오수 처리장의 폭기조의 동일한 위치에서 매일 슬러지 시료를 채취하여 실험실로 운송한 후, Table 1의 운전조건으로 90분간 HVI를 인가하는 실험을 13일간 수행하였다.

Fig. 5에서 보듯이 MLSS와 MLVSS 농도는 HVI 처리 후에 모두 감소한 것을 확인할 수 있었다. 가용화에 사용된 활성슬러지의 MLSS의 평균 변화량은 초기 농도 1,650 mg/L에서 HVI 처리 후 1,520 mg/L로, MLVSS는 1,490 mg/L에서 1,360 mg/L로 약 9% 가량 감소한 것으로 나타났다. 총 13일 동안 동일한 실험을 반복하였고, 그 결과 MLSS 농도가 변화하고 있음에도 불구하고 HVI 처리로 인해 슬러지가 해체되어 MLSS와 MLVSS가 항상 감소하는 가용화 현상이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 일견 약 9%의 가용화 효과는 미미한 것으로 생각될 있으나 본 연구에 사용된 HVI 장치는 방전 전극이 한 쌍으로 되어 있고 회분식으로 운영되고 있기 때문에, 실제로 현장 적용을 위해서는 여러 쌍의 전극을 연결하여 연속식으로 운용한다면 더 높은 가용화 효과가 나타날 것으로 예측된다.

Fig. 6에서는 S-COD, S-TN, S-TP와 전기전도도의 변화를 기록한 것으로 HVI 인가 후 모두 증가하고 있음을 알 수 있다. S-COD의 평균 변화량은 21 mg/L에서 89 mg/L로 372%가 증가하였고, S-TN은 37 mg/L에서 49 mg/L로, S-TP는 16 mg/L에서 318 mg/L로 각각 56%와 102% 증가하였다. 전기전도도는 758 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 817 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 약 8% 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 HVI 처리에 의해 활성슬러지의 일부가 가용화되었음을 시사하고 있다.

이상의 반복 실험 결과로부터, HVI 처리가 잉여 슬러지를 부분적으로 가용화할 수 있는 전처리 기술로 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

한편 HVI 기술은 수중의 경도물질을 제거하는 탈염 (desalting) 목적으로도 응용이 가능한 것으로 알려져 있다. 즉, 경도유발 물질인 칼슘이온을 수중에서 석출시킬 수 있음이 보고되고 있다 (Yang and Chang, 2015). 아울러 본 연구의 HVI에 의한 슬러지 가용화 공정으로부터 얻어진 용존성 유기물질을 외부탄소원의 대체 자원으로 사용될 수 있는 가능성이 있다. 즉 가용화된 슬러지를 BNR (Biological Nutrients Removals)

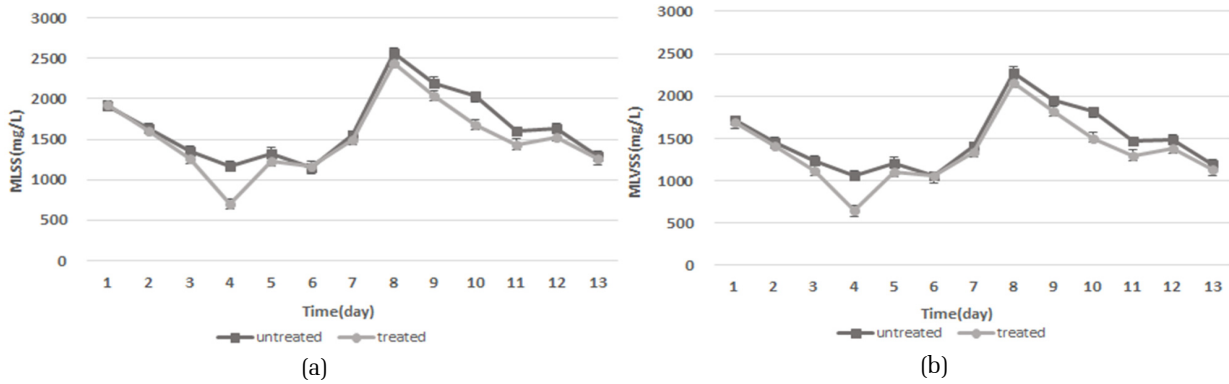


Fig. 5. Variation of MLSS (a) and MLVSS (b) concentration for 13 days (Treatment time : 90min)

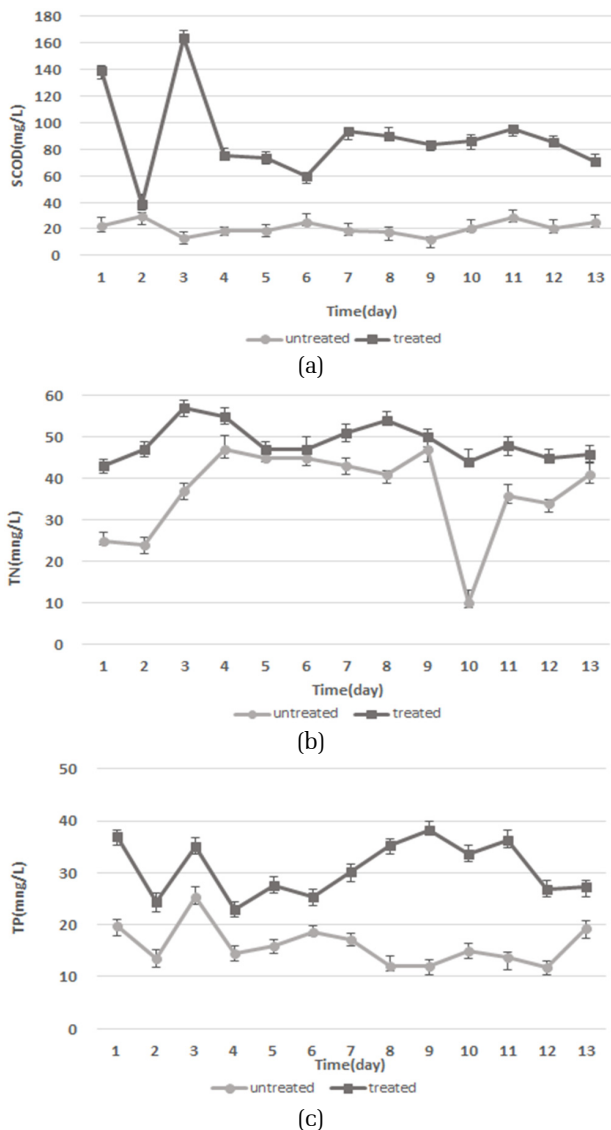


Fig. 6. Variation of soluble-COD (a), -TN (b) and -TP (c) concentration (treatment time : 90min)

공정에서 사용되는 외부탄소원을 대체할 수 있는 가능성이 있다. BNR 공정에서 탈질 공정의 낮은 C/N비를 조절하기 위하여 투입되는 메탄올과 같은 외부탄소원을 가용화된 슬러지가 대체할 수 있는 가능성이 있으며, 이는 HVI를 활용할 수 있는 한 분야로 향후 추가적인 연구가 필요한 부분이다.

4.결 론

본 연구에서는 슬러지를 감량화하는 대체 공정으로 HVI 방전 기술을 활용한 슬러지 가용화를 시도하였다. 90분간 회분식 반응기에서 HVI 처리를 한 활성슬러지의 MLSS와 MLVSS는 약 3-9% 감소하였다. 반면 용존성-COD, -TN, -TP는 각각 372%, 56%, 102%가 증가하였다. 전기전도도 또한 758 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 817 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 증가하는 결과를 얻었다. 이는 활성슬러지의 미생물 세포막이 파괴되어서 모용액으로 세포 내 물질이 방출되었거나 플록이 일부 파괴되어 플록 내 유기물질들이 용출되었음을 의미한다. 즉, 입자성 물질이 용존성 물질로 전환되어 벌크 용액안의 전도성 물질이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 HVI 처리에 의한 활성슬러지의 부분적인 슬러지 가용화가 가능함을 입증하였다고 결론지을 수 있다.

사 사

이 논문은 2016년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2016-0031)

- pp. 197-204
- pp. 205-217
- pp. 219-228
- pp. 229-236
- pp. 237-248
- pp. 249-256
- pp. 257-262

References

- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W. (1995). *Standard method for the examination of water and wastewater*, 19th edition. APHA, AWWA, WEF, USA.
- Aronsson, K., Ronner U., Borch E. (2005). Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* in relation to membrane permeabilization and subsequent leakage of intracellular compounds due to pulsed electric field processing”, *Int. J. Food Microb.* 99, 19-32.
- Chu, L., Yan S., Xing, X., Yu, A., Sun, X., Jurcik, B. (2008). Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation, *Chemosphere*, 72, 205-212.
- Dutreux, N., Notermans, S., Wijtze, T., Gongora-Nieto, M., Barbosa-Canovas, G., Swanson B. (2000). Pulsed electric fields inactivation of attached and free-living *Escherichia coli* and *Listeria innocua* under several conditions, *Int. J. Food Microb.* 54, 91-98.
- Jayaram, S. (200). Sterilization of liquid foods by pulsed electric fields, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 16, 17-25.
- Korean Ministry of Environment. (2008). Sewage statistics.
- Lee, C, Park, S. (2008). Improvement of solubilization and anaerobic biodegradability for sewage sludge using ultrasonic pre-treatment, *J. of Korea Organic Resource Recycling Association*, 16 (3), 83-90.
- Lee, C., Hwang, E., Kang, S., Bin, J., Lee, B. (2004). Reduction and solubilization of sewage sludge by ozonation, *J. of Korean Society on Water Quality*, 20 (3), 290-295.
- Liang, P., Huang, X., Qian Y. (2006). Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of *Aeolosoma hemprichi*, *Biochem. Eng. J.*, 28, 117-122.
- Loginov, M., Lebovka, N., Larue, O., Shynkaryk, M., Nonus, M., Lanoiselle, J., Vorobiev E. (2010). Effect of high voltage electrical discharges on filtration properties of *Saccharomyces cerevisiae* yeast suspensions, *J. Membr. Sci.* 346, 288-295.
- Loey, A., Verachtert, B., Hendrickx, M. (2002). Effects of high electric field pulses on enzymes, *Trends in Food Sci. Technol.* 12, 94-102.
- Raso, J. Heinz, V. (2006). Pulsed electric fields technology for the food industry: fundamentals and application, Springer.
- Reyens, K., Diels, A., Michiels, C. (2004). Generation of bactericidal and mutagenic components by pulsed electric field treatment, *Int. J. Food Microb.* 93, 165-173.
- Vlyssides, A.G., Karlis, P.K. (2004). Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 91 (2), 201 - 206.
- Yang, H., Lee J., Lee, E. (2008). Solubilization of Sewage Sludge by Inoculation of Lactic Acid Bacteria, *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* 36 (3), 233 - 239.
- Yang, Y., Friedman, A., Cho, Y. (2010). Plasma discharge in water, *Advances in Heat Transfer*, 42, 179-292.
- Yang, S., Chang, I. (2015). Control of scale formation using high voltage impulse”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16 (3), 2301-2307.
- Zhang, Q., Monsalve-Gonzalez, A., Qin B., Barbosa-Canovas, G., Swanson, B. (1994). Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by square wave and exponential decay pulsed electric field, *J. Food Process Eng.* 17, 469-479.