

## 전기분해 전처리 슬러지의 혐기성 소화 및 질산염 제거효율 평가

김재형 · 전해연 · 박대원<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

(2014년 2월 3일 접수, 2014년 3월 12일 수정, 2014년 3월 12일 채택)

### Evaluation of Anaerobic Fermentation and Nitrate Removal Efficiency of Sewage Sludge Pre-treated with Electrolysis

Kim Jaehyung · Jeon Hyeeyeon · Pak Daewonk<sup>†</sup>

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science and Technology

(Received 3 February 2014, Revised 12 March 2014, Accepted 12 March 2014)

#### 요 약

본 연구에서는 하수슬러지의 소화가스 생산 효율향상을 위해 전기분해 처리방법을 수행하고 이를 소화가스 생산과 탈질실험 효과를 확인하였다. 전기분해 처리시간, 전류밀도가 증가함에 따라 가용화율은 증가하였으며 전극간격 4 mm에서 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup>로 60분 처리 시 가용화율은 9.02%를 보였다. 이를 이용하여 BMP실험을 진행한 결과 0.49 L CH<sub>4</sub>/g VS의 메탄생산량을 보이며 대조군대비 88.4% 증가함을 보였다. 같은 조건으로 처리된 하수슬러지를 이용하여 탈질실험을 진행한 결과 19.2 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N/g MLVSS·hr의 탈질율을 보였으며 이를 통해 전기분해 처리된 하수슬러지는 생분해성이 증대됨에 따라 혐기성소화와 탈질공정에도 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

**주요어** : 슬러지, 가용화, 전기분해, 메탄, 혐기성소화

**Abstract** - This study was performed with electrolysis treatment method for improving anaerobic digestion gas production efficiency in a sewage sludge, thereby confirmed in anaerobic digestion production and denitrification effect. As a result, solubilization was increased by increasing treatment time of electrolysis and current density, also showed to be 9.02% with 10 mA/cm<sup>2</sup> of current density in 4 mm electrode distance. Based on the results of BMP test used the above experiment, methane production was 0.49 L CH<sub>4</sub>/g VS, and increased by 88.4% compared with control groups. As for the results of denitrification using the sewage sludge treated with the same conditions, denitrification rate appeared 19.2 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N/g MLVSS·hr, and through the sewage sludge treated with electrolysis, it can be applied to anaerobic digestion and denitrification process by increasing biodegradation.

**Key words** : Sewage sludge, Solubilization, Electrolysis, Methane, Anaerobic fermentation

#### 1. 서 론

우리나라에서는 하수슬러지의 발생량이 지속적인

로 증가하는 추세를 보이고 있으며 산업 활동과 새로운 하수처리시설의 신설로 지속적인 증가를 보일 것으로 전망되고 있다[1]. 현재까지 대부분의 하수슬러지는 해양배출로 처리되어 왔으나 런던협약의 발효로 인해 2012년부터는 해양배출이 전면 금지되었고 점차 연료화 및 재활용 등 에너지화 추세를 보이고 있다[2]. 하지만, 연료화 및 재활용은 수요처가 한정되

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Seoul National University of Science and Technology, 172,  
Gongneung 2 Dong, Nowon-Gu, Seoul, Korea  
Tel : 02-970-6595 E-mail : daewon@seoultech.ac.kr

어 있어 대량처리가 곤란하여 어려움을 겪고 있어 실질적인 대안방법들이 검토되고 있다[3]. 현재까지는 이에 대한 대안으로 혐기성소화와 같은 폐자원 에너지화 기술이 각광받고 있으며 각국에서 1970년대부터 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 혐기성소화는 가수분해(hydrolysis), 산생성(acidogenesis), 초산생성(acetogenesis), 메탄생성(methanogenesis)으로 크게 4단계의 과정을 거치게 되는데 그중 가수분해단계가 율속단계로서 메탄생산속도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하수슬러지는 수분을 제외하고는 대부분이 미생물로 구성되어 있어 가수분해단계의 속도개선을 위해 생분해도를 높이는 전처리 방법들이 강구되어 왔다[4-7]. 특히, 초음파를 이용한 하수슬러지 전처리는 20-40 kHz, 16,000 kJ/kg조건에서 SCOD(soluble chemical oxygen demand)가 최대 40%까지 향상되었다고 보고된 바 있다[8,9], 하수슬러지 열처리는 160-180°C에서 처리한 결과, 9-60%의 메탄가스 생산량이 증대된다고 보고된 바 있으며 [10,11], 200°C, 20 MPa의 고온, 고압의 조건에서 바이오가스 생산량이 증대된 연구결과를 발표된바 있다[12]. 알칼리처리와 같은 화학적 방법은 열처리와의 병합처리가 각광을 받고 있으며[13,14], 170°C의 열처리와 알칼리(NaOH) 조합에서 48~75%의 메탄생산량 증대가 보고된바 있다[15]. 선진 연구자들에 의해 물리적, 화학적, 생물학적 등 다양한 하수슬러지 전처리기술이 개발되고 있지만, 전기화학적인 방법을

적용한 슬러지 전처리 기술은 현재까지 연구사례가 많지 않은 것으로 확인되고 있다. 특히, 전기화학적 하수슬러지 전처리 기술은 실험실규모의 전해농축에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며[16,17], 전기분해를 하수슬러지에 적용한 사례는 가용화율 향상과 감량화에 국한되어 연구결과가 보고된 바 있다[18]. 기존 연구결과에서는 하수슬러지에 전기분해를 적용하여 전류밀도와 처리시간을 다르게 하여 대조군대비 효율을 평가하였으며 이때, SCOD농도는 1,436±64 mg/L로 Control 대비 약 7.2배, 가용화율은 9.11±0.41%로 7.7배 가용화율을 확인된바 있다[19]. 이에 본 연구에서는 앞선 하수슬러지의 전기분해 처리결과를 바탕으로 혐기성발효를 통한 메탄가스 생산량을 확인하여 혐기성소화효율을 평가하고, 외부탄소원으로 이용하여 탈질효과를 확인하여 실험을 통해 전기분해 처리된 하수슬러지의 에너지화 가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2-1. 실험재료

바이오가스 생산에 사용된 기질은 선행연구로 얻어진 전기분해 전처리 된 하수슬러지를 이용하였다 [19]. Table. 1과 같은 반응기를 이용하여 전극간격 5 mm 기준으로 전기분해 처리시간(10~60분)과 전류

**Table 1.** Condition of electrolysis treatment of sewage sludge

Electrolysis Reactor	Size	320 mm(W) × 170 mm(L) × 360 mm(H)
	Working volume	7.5 L
Electrode	Material, Number	RuO <sub>2</sub> /Ti, Anode (5 ea), Cathode (5 ea)
	Type	Mesh
	Size	23.5 × 23.0 cm <sup>2</sup>

**Table 2.** Solubilization ratio of various factor for electrolysis of sewage sludge

Pre-treatment factor		Solubilization ratio (%) (SCOD/TCOD)
Current density (treatment time 30 min)	2 mA/cm <sup>2</sup>	1.36±0.35
	5 mA/cm <sup>2</sup>	2.26±0.39
	8 mA/cm <sup>2</sup>	3.22±0.29
	10 mA/cm <sup>2</sup>	6.82±0.63
Pre-treated time (Current density 8mA/cm <sup>2</sup> )	10 min	0.94±0.36
	20 min	1.72±0.21
	30 min	3.22±0.29
	40 min	4.52±0.25
	50 min	5.43±0.25
	60 min	7.48±0.39

밀도(2, 5, 8, 10 mA/cm<sup>2</sup>)가 각각 다른 조건에서 처리된 하수슬러지를 이용하였으며 이때 사용된 슬러지의 가용화율을 Table. 2에 나타내었다. 전극간격별 전기분해 처리 하수슬러지는 앞선 처리시간, 전류밀도 조건에서 전극간격을 4, 5, 6 mm로 달리하여 처리된 하수슬러지를 채취하여 이용하였다. 탈질실험에서는 5 mA/cm<sup>2</sup>, 전극간격(4 mm), 처리시간(60분)으로 처리된 반응슬러지를 외부탄소원으로 사용하였고 질소원으로는 KNO<sub>3</sub>, P원으로는 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>와 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 이용하였다. 바이오가스 생산에서 혐기성소화균주는 서울시 J물재생센터에서 소화처리 된 혐기성슬러지를 채취하여 실험이 진행 전까지 혐기상태 유지를 위해 질소가스로 혐기성상태를 유지하여 이용하였다.

## 2.2. 실험 장치 및 방법

바이오가스 생산 실험에 사용된 반응조는 유효부피 100 mL(총용량 125 mL)의 세럼병을 이용하였고, 식종균과 전기분해 전처리된 하수슬러지를 1:9 (V/V)의 비율로 조제하였다. 혼합시료의 초기 pH는 7.2-7.8 이었고, 반응조를 질소로 충분히 치환 후 35°C, 150 rpm의 진탕배양기에서 실험을 진행하였다. 탈질실험은 1 L 샘플병에 탈질균주와 전기분해 전처리된 슬러지를 1:1(V/V)로 혼합하여 shaking incubator에서 20°C, 150 rpm으로 실험을 진행하였다. 이때 대조군으로는 반응슬러지를 이용하였고 각 시료채취는 10분 간격으로 이루어졌다.

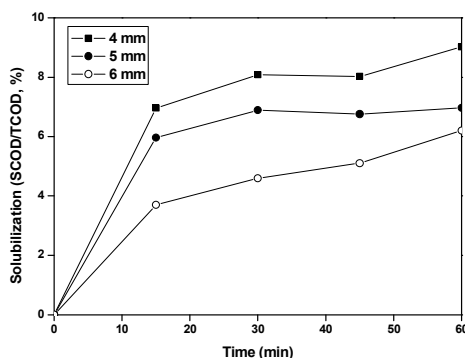


Fig. 1. Solubilization according to the electrode distance and treatment time at the sewage sludge electrolysis treatment

## 2.3. 분석방법

TS, VS, SS, VSS, SCOD<sub>Cr</sub>, TCOD<sub>Cr</sub>은 모두 standard methods[20]를 기준으로 시행하였으며, pH 미터(UB-5, Denver instrument, USA)를 이용하였다. 가스발생량은 루어락(luer lock tip) 형태의 유리주사기를 이용하여 측정하였으며, 발생가스의 성분분석은 TCD가 장착된 가스크로마토그래피(Acme 6000, Younglin)을 이용하였다. 컬럼은 Carboxen-1000(supelco)을 이용하였으며 가스크로마토그래피 운전조건은 아르곤을 운반기체로 이용하였고, 유속은 30 mL/min, 주입구와 검출기의 온도는 각각 210, 220°C로 고정하였고, 오븐온도는 35°C에서 8분간 유지 후 210°C까지 8°C/min으로 승온 후 최종 온도에서 2분간 유지하였다. NO<sub>3</sub>-N분석은 이온크로마토그래피(883 Basic IC plus1, Metrohm, Swiss)를 이용, Metrosep A Supp 4 컬럼으로 서프레스(50 mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)와 1.8 mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 1.7 mM NaHCO<sub>3</sub>을 용리액으로 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 하수슬러지의 전기분해 전처리 시 전극간격에 따른 가용화율 및 메탄가스 생산량

전극간격(4, 5, 6 mm)별 전류밀도와 처리시간에 따른 하수슬러지 전기분해 처리 결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 처리시간을 증가시킨 결과 60분 처리 시 전극간격 4,

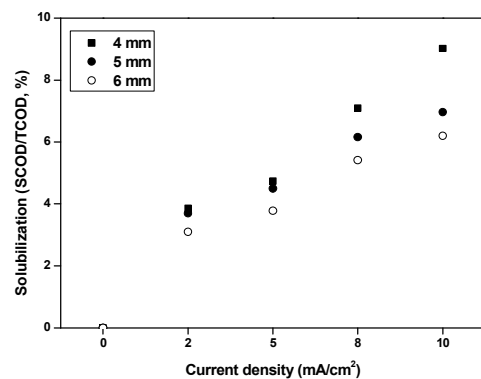


Fig. 2. Solubilization according to the electrode distance and current density at the sewage sludge electrolysis treatment

5, 6 mm에 따라 9.02, 6.97, 6.2%로 증가하는 경향

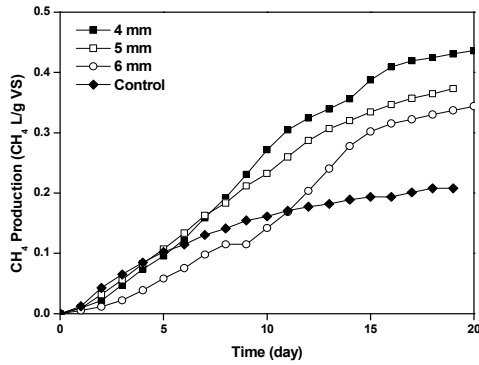


Fig. 3. Comparison of methane gas production with electrolysis treatment samples by different electrode gap

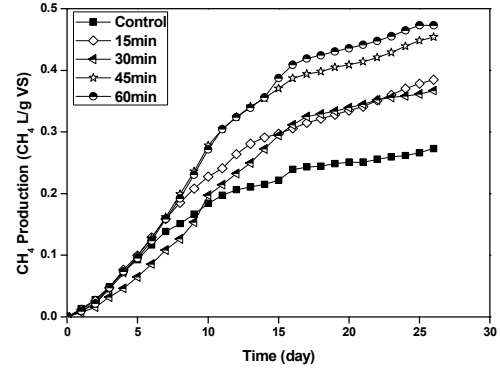


Fig. 4. Methane production by treatment time of sewage sludge with electrolysis at 5 mm electrode distance and 10 mA/cm2 current density

을 보였으며, 전극간격이 좁을수록 더 높은 가용화율을 보였다. 전기분해 처리시간 60분을 기준으로 한 전류밀도에 따른 전극간격별 결과에서도 전류밀도가 증가함에 따라 가용화율은 증가하는 경향을 보였으며 이와 동시에 전극간격이 좁을수록 더 높은 효율을 보였다. 하수슬러지의 전기분해 처리는 직·간접산화에 의해 투입 에너지에 따라 강한 산화물이 생성되어 슬러지 내 세포벽과 체외고분자물질 등 유기물을 산화시키는 방법으로 처리시간과 전류밀도가 높아질수록 투입에너지가 높아져 유기물 분해가 증가하여 가용화율이 증가한 것으로 사료된다[21-24].

전극간격별로 전기분해 처리된 하수슬러지를 이용하여 혐기성소화를 BMP(Biochemical Methane Potential) 실험으로 평가한 메탄발생량 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 대조군인 전처리되지 않은 슬러지를 이용한 메탄생산량은 총 0.20 L CH<sub>4</sub>/g VS를 보였으나 전극간격별(4, 5, 6 mm)로 처리된 하수슬러지를 이용한 시료의 20일까지의 메탄생산량은 전극간격 4 mm에서 0.44 L CH<sub>4</sub>/g VS로 대조군 대비 약 2.2배 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 대조군의 메탄생산 속도는 실험시작 약 10일 경과 이후 부터는 메탄가스 생산이 거의 없는 것으로 확인되었으나 전기분해 처리된 슬러지를 이용한 메탄생산속도는 15일까지는 지속적으로 증가하는 경향을 보이며 메탄생산이 증대됨을 확인할 수 있었다.

전극간격별 메탄생산량은 5 mm 시료에서는 0.38 L CH<sub>4</sub>/g VS, 6 mm 시료에서는 0.37 L CH<sub>4</sub>/g VS로 전극간격이 좁을수록 가용화율과 유사하게 메탄가

스 생산량도 증가함을 확인할 수 있었다. 전기분해는 양극전극(Anode)과 음극전극(Cathode)의 표면반응에 의한 것으로 유기물의 직접산화와 동시에 전극표면에서 생성되는 OH radical에 의한 간접산화를 통해 유기물이 산화됨에 따라 전극간격이 좁을수록 유기물과 생성되는 oxidant에 의해 산화력이 증대되게 된다 [25]. 본 BMP 실험에서도 전극간격이 좁은 전기분해 처리 시료에서 유기물량이 증대되어 가용화율이 상승되고 이에 따라 메탄생성균주의 기질이 증대되어 총 메탄생산량이 증가된 것으로 확인된다. 또한, 이러한 기질은 메탄생성균주가 기질로써 이용이 용이하므로 전극간격별 시료에 따라 메탄생산속도에도 영향을 미친 것으로 사료된다.

### 3.2. 전기분해 처리시간 및 전류밀도에 따른 메탄가스 발생량

하수슬러지의 전기분해 처리에 따른 가용화율 효과를 혐기성소화로 평가하기 위해 각 인자 (전기분해, 전류밀도)별 전기분해 처리된 하수슬러지를 이용하여 BMP 실험을 진행하였다. 실험결과는 휘발성고형물 g당 발생한 메탄생산량으로 표현하였으며 이를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 하수슬러지의 전기분해 처리시간별 시료를 이용한 BMP 실험결과에서는 시간의 증가에 따라 바이오가스 생산량이 증가함을 확인하였으며 이때 대조군인 전처리가 적용되지 않은 하수슬러지를 이용한 시료의 바이오가스발생량이 0.27 L CH<sub>4</sub>/g VS인데 반해 60분간 전기분해 처리된 하수슬

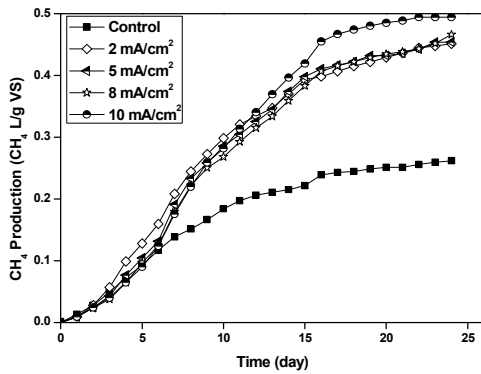


Fig. 5. Methane production by current density of sewage sludge with electrolysis at 5 mm electrode distance and 60 min treatment time of electrode

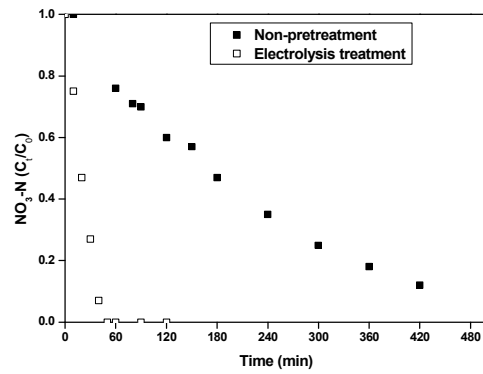


Fig. 6. Change of NO<sub>3</sub>- concentrations in denitrification process by external carbon source

리지를 이용한 BMP 실험결과에서는 0.47 L CH<sub>4</sub>/g VS로 대조군 대비 약 74% 높은 바이오가스 발생량을 나타내었다. 하수슬러지의 전류밀도별 전기분해 처리된 시료를 이용한 BMP 실험결과에서도 앞선 가용화율 증대와 유사하게 전류밀도를 증가 시 메탄가스 생성량도 증가하는 경향을 보였으며 10 mA/cm<sup>2</sup>으로 60분간 처리된 시료의 메탄가스는 0.49 L CH<sub>4</sub>/g VS로 대조군 대비 약 88.4% 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. BMP 실험결과는 앞선 전기분해 처리조건별 실험의 가용화율과 유사한 경향으로 메탄생산량이 증대됨을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 서술한바와 같이 투입에너지가 증가함에 따라 하수슬러지에 더 높은 에너지가 투입됨에 따라 전기화학적 직접산화반응과 간접산화반응이 슬러지의 플록과 세포벽이 파괴되어 슬러지 내부의 다양한 유기물의 용출로 인해 가용화율이 증대되고, 혐기소화 시 메탄생산균의 기질로써 이용이 용이한 형태의 유기물량이 증대되어 가용화율과 메탄가스 생산량의 증가가 유사한 경향을 보인 것으로 사료된다. 이러한 전기분해 처리 슬러지의 메탄가스 생산량 증대 결과는 전기분해 폐수를 이용한 혐기소화 생산량 증대를 보고한 B. Tartakovsky[26]의 연구와도 유사한 결과로 B. Tartakovsky는 혐기성소화공정과 유입폐수의 전처리 공정을 단상발효공정으로 적용하여 폐수에 2.8-3.5V로 전기분해 처리 후 기질로 직접 이용하여 약 10-25%의 메탄가스 증대결과를 보고한바 있다. 본 실험에서도 전기분해 처리된 슬러지를 이용하여 메탄생산량 증대를 확인할 수 있었으며 전기분해 전처리

가 하수슬러지의 메탄가스 생산량 증대를 위한 전처리 방법으로 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

### 3-3. 전기분해 전처리 하수슬러지를 외부탄소원으로 이용한 탈질효과

선진연구자들에 의해 탈질산화 반응은 0차 반응인 것으로 확인되어 왔으며, 무산소 반응조 질산농도는 경과시간에 따라서 일정한 속도로 감소되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 전기분해 슬러지를 이용하여 탈질실험을 진행한 결과, Fig. 6에서와 같이 선진연구자들의 결과와 유사한 경향을 나타낸 것으로 확인되었다.[27]

선진연구자들에 의한 탈질 산화반응은 식(1)과 같으며 이를 식(2)와 같이 질소제거속도상수(kDN)를 반응시간별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도의 변화를 기준으로 한 0차 반응식으로 해석하였다.

$$\frac{dNO_3^-}{dt} = -X_{DN} \times U_{DN} = -k_{DN} \quad (1)$$

여기서, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도(mg/L)

XDN : MLVSS 농도(mg/L)

UDN : 탈질율(mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/g MLVSS·hr)

kDN : 질소제거속도상수(mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/L·hr)

$$C_t = C_0 - kt \quad (2)$$

여기서, C<sub>0</sub> : 초기 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도(mg/L)

Ct : t 시간 후  $\text{NO}_3^-$ -N 농도(mg/L)  
 k : 반응속도상수(mg/L·hr)  
 t : 반응시간(hr)

식(2)로 부터 도출된 질산염 질소( $\text{NO}_3^-$ -N)농도를 기준으로 한 질소 제거속도상수(kDN)는 대조군인 하수슬러지의 경우 23.2 mg  $\text{NO}_3^-$ -N/L·hr를 나타내었고 전기분해 슬러지는 51.7  $\text{NO}_3^-$ -N/L·hr를 나타내어 대조군대비 2.2배 높은 질소 제거속도상수를 나타내었다. 전기분해 슬러지의 탈질율은 19.2 mg  $\text{NO}_3^-$ -N/g MLVSS·hr로 대조군인 10.53mg  $\text{NO}_3^-$ -N/g MLVSS·hr 에 비해 81.7% 높은 결과를 보였다. 질소제거 과정에서 탄소원은 그 성상에 기인하여 영향을 높게 받는 것으로 알려져 있으며 본 결과를 통해 기존 공정에서 탈질을 위해 외부탄소원으로 사용되는 메탄올을 대체할 수 있는 정도의 수준인 것으로 확인되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하수슬러지의 소화가스 생산 효율 향상을 위해 전기분해 처리방법을 수행하고 이를 소화가스 생산과 탈질실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 전기분해 처리시간, 전류밀도와 하수슬러지 가용화율은 비례적인 관계를 나타내었으며, 특히 전극 간격 4 mm에서 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup>로 60분 처리 시 가용화율은 9.02%로 가장 높은 증가율을 나타내었다.
2. 전기분해 처리된 슬러지를 이용하여 BMP실험을 진행한 결과, 전기분해 처리조건별로 행하여 구한 가용화율과 메탄가스 생산량은 비례하는 관계를 나타내었으며, 앞선 처리조건(전극간격 4 mm, 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup>로 60분간 처리한 시료에서 0.49 L CH<sub>4</sub>/g VS으로 가장 높은 메탄생산량을 보였다.
2. 같은 조건의 전기분해 처리 슬러지를 이용하여 탈질실험을 진행한 결과 19.2 mg  $\text{NO}_3^-$ -N/g MLVSS·hr의 탈질율로 탈질공정의 외부탄소원으로 이용이 용이할 것으로 사료된다.

이상의 결과로 전기화학적인 처리 방법을 적용한 하수슬러지가 소화가스 발생량의 증대와 탈질율 향상이

가능한 것으로 확인되었으며 현재 운영 중인 하수처리시설에 적용 시 운전비용의 절감과 효율 증대를 일 정부분 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 사 사

이 연구는 환경부 “차세대에코이노베이션기술개발사업”으로 지원받은 과제이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 환경부, “미래지향형 하수처리 시스템에 대한 기술동향, 기술동향보고서”, 2011
2. 환경부, 2012 하수도통계, 2013
3. 배재근, “국내 하수슬러지 처리현황과 해결방안”, 한국상하수도협회지, 2003, 3, 28-35
4. H. Carrere, C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Baststone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer, I. Ferrer, "Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review", J. Hazard. Mater., 2000, 183, 1-15
5. Y. Y. Li; T. Noike, “Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment”, Water Sci. Technol., 1992, 26, 857-866
6. X. Q. Zhang; P. L. Bishop, Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances, Chemosphere, 2003, 50, 63-69
7. Z. W. Wang; Y. Liu; J. H. Tay. Biodegradability of extracellular polymeric substances produced by aerobic granules, Appl. Microbiol. Biotechnol., 2007, 74, 462-466
8. M. R. Salsabil, A. Prorot, M. Casellas, C. Dagot, “Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility”, Chem. Eng. J., 2009, 148, 327-335
9. H. Li, Y. Y. Jin, R. B. Mahar, Z. Y. Wang, Y. F. Nie, “Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability”, J. Hazard. Mater., 2009, 161, 1421-1426

10. M. Dohanyos, J. Zabranska, J. Kutil, P. Jenicek, "Improvement of anaerobic digestion of sludge", *Water Sci. Technol.* 2004, 49, 89-96
11. C. Fjordside, "An operating tale from Næstved Sewage Treatment Plant", in: *Municipal wastewater treatment Nordic Conference, Copenhagen (Denmark), 2001*
12. X. Yang, X. Wang, L. Wang, "Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process", *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 2580-2584
13. J. Kim, C. Park, T. H. Kim, M. Lee, S. Kim, S. W. Kim, J. Lee, "Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge", *J. Biosci. Bioeng.*, 2003, 95, 271-275
14. A. Valo, H. Carrere, J. P. Delgenes, "Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2004, 79, 1197-1203
15. D. C. Stuckey, P. L. McCarty, "Thermochemical pretreatment of nitrogenous materials to increase methane yield", *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 1978, 8, 219-233
16. J. Rubio, M. L. Souza, R. W. Smith, "Overview of flotation as a wastewater treatment technique", *Minerals engineering*, 2002, 15, 139-155
17. K. W. Cho, C. M. Chung, Y. J. Kim, T. H. Chung, "Continuous clarification and thickening of activated sludge by electrolytic bubbles under control of scale deposition", *Bioresour. Technol.*, 2010, 101, 337-346
18. 이지선, 장인성, 이철구, 정선용, "전기분해에 의한 하수슬러지 가용 효과 연구", *한국산학기술학회논문지*, 2011, 12, 979-984
19. 김재형, 전혜연, 이준철, 박대원, "전기분해를 이용한 하수슬러지 가용화 연구", *에너지공학*, 21(2), 194-201, 2012
20. APHA, AWWA and WEF : *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed. Baltimore, American Public Health Association 2, 1998
21. H. P. Yuan, K. B. Cheng, S. P. Chen, N. W. Zhu, Z. Y. Zhou, "New sludge pretreatment method to improve dewaterability of waste activated sludge", *Bioresour. Technol.*, 2011, 102, 5659-5664
22. M. F. Dignac, V. Urbain, D. Rybacki, A. Bruchet, D. Snidaro, P. Scribe, "Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure", *Water Sci. Technol.*, 1998, 38, 45-53
23. B. Jin, B. M. Wilen, P. Lant, "Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge", *Chem. Eng. J.*, 2004, 98, 115-126
24. K. Keiding, P. H. Nielsen, "Desorption of organic macromolecules from activated sludge: effect of ionic composition", *Water Res.*, 1997, 31, 1665-1672
25. D. Kasherman, M. Skyllas-kazacos, "Effects of anode-cathode distance on the cell potential and electrical bath resistivity in an aluminium electrolysis cell with a sloping TiB2 composite cathode", *Journal of applied electrochemistry*, 1988, 18, 863-868
26. B. Tartakovsky, P. Mehta, J. S. Bourque, S. R. Guiot, "Electrolysis-enhanced anaerobic digestion of wastewater", *Bioresour. Technol.*, 2011, 1002, 5685-5691.
27. Metcalf and Eddy. Inc. 2003. *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse*. 4th ed., McGraw Hill. New York. 630-631