

펄스전기장 (Pulsed Electric Fields)의 전극 코팅과 인가 전압에 따른 슬러지의 가용화 효과

엄세은¹, 장인성^{2*}

¹호서대학교 나노바이오트로닉스학과, ²호서대학교 환경공학과

Effect of electrode coating and applied voltage of pulsed electric fields (PEF) on sludge solubilization

Se-Eun Um¹, In-Soung Chang^{2*}

¹Department of Nanobionics, Hoseo University

²Department of Environmental Engineering, Hoseo University

요약 하폐수 슬러지 발생량의 꾸준한 증가로 인해 폐 슬러지의 효율적인 처리 기술개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 PEF (Pulsed Electric Fields) 기술을 활용하여 슬러지의 가용화를 통한 감량화 가능성을 평가하였다. PEF에 사용되는 스테인레스 재질의 전극에 테프론과 에폭시로 코팅한 후 활성슬러지 혼합액에 전계 펄스를 인가하여 전극 코팅에 따른 가용화 효율을 평가하였다. 또한 인가된 전압의 세기를 6, 12, 15 kV로 변화시켜 가며 가용화 정도를 평가하였다. 에폭시 코팅 전극에서는 MLSS, 용존성-COD, -TN, -TP를 분석한 결과 슬러지의 가용화가 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 테프론으로 코팅한 전극에서는 MLSS는 최대 9% 감소하였고 MLVSS 역시 최대 10% 감소하였다. 또한 용존성-COD는 최대 496% 증가하였다. 인가전압 6 kV 하에서는 가용화가 거의 발생하지 않았으나, 12 kV와 15 kV의 전압에서는 슬러지 가용화가 발생한 것으로 나타났다. 또한 슬러지 가용화가 발생한 12 kV와 15 kV의 전압에서는 코로나가 발생한 것으로 보아 슬러지 가용화는 코로나에 의해 유도되었으며, 코로나가 발생하는 임계전압이 존재하는 것으로 판단되었다. 결론적으로 PEF의 인가전압과 적절한 코팅제를 선택하여 코로나 발생을 제어함으로써 슬러지의 가용화를 유도할 수 있음을 확인하였다.

Abstract Alternative technologies for sludge treatment and disposal need to be developed urgently because the amount of produced production has increased continuously. In this study, Pulsed Electric Fields (PEF) technique was applied for sludge solubilization and the performance was evaluated. The PEF equipped with electrodes coated by epoxy resin and teflon was inducted to the activated sludge suspension, and the effect of the coating materials on the solubilization was determined. In addition, the effect of the applied voltage on the solubilization yield was investigated as the applied voltage was increased from 6 to 12 and 15 kV. Sludge solubilization was not observed when the epoxy-coated electrode was used for PEF induction regardless of the applied voltage. However, sludge solubilization occurred when 12 and 15 kV were applied to the teflon-coated electrodes. The MLSS decreased to 9%, and the soluble-COD increased to 496% when the applied voltage was 15 kV. But sludge solubilization did not happen under 6 kV condition. The corona discharge was observed at applied voltages of 12 and 15 kV, (Ed- sorry but I cannot understand the following highlight) but if 6 kV, strongly indicating that the corona discharge make the sludge solubilized, which suggests that the critical voltage for sludge solubilization lies between 6 and 12 kV. Consequently, proper selection of electrode-coating materials and the applied voltage of PEF could lead to sludge solubilization by corona discharge.

Keywords : Electrode coating, Pulsed Electric Fields, Sludge, Solubilization, Voltage

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기본연구사업 (NRF2016R1D1A1B03930377)의 지원에 의해 수행된 연구로 관계부처에 감사드립니다.

*Corresponding Author : In-Soung Chang(Hoseo Univ.)

Tel: +82-10-9949-5744 email: cis@hoseo.edu

Received July 25, 2018

Revised September 7, 2018

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

하폐수 발생량의 꾸준한 증가로 인해 하수 슬러지 발생량 또한 증가하고 있다. 국내 하수 슬러지 발생량은 2003년 2,266,888 m³/년에서 2014년에는 3,654,237 m³/년으로 증가하였다[1]. 하폐수 처리장에서 배출되는 폐 슬러지는 여러 단계의 물리/화학적 처리를 거친 후 퇴비화, 연료화, 매립, 소각 및 해양투기 방법으로 최종 소멸된다. 그러나 우리나라는 해양오염방지 조약인 ‘런던협약 96의정서’에 가입하여 2012년부터 해양투기를 전면 금지[2] 하고 있으며, 혐오시설로 인식된 매립장 및 소각장의 건설 또한 넘비현상으로 인해 신규 증설이 극도로 제한받고 있다. 또한 퇴비화 및 연료화 등 재사용 방법은 경제적인 한계점이 있기 때문에 슬러지 처분 방법으로 활용하는데 어려움이 존재한다. 따라서 폐 슬러지의 효율적인 처리기술의 개발 또는 슬러지 발생량 자체를 감소시키는 감량화 기술의 개발이 시급한 실정이다.

최근 고전압 펄스 전기장을 이용하여 세포를 파괴시키는 방법인 고전압펄스 (High voltage impulse) 또는 펄스전기장 (Pulsed electric fields, 이하 PEF) 기술이 주목받고 있다[3-4]. PEF는 수 kV의 고전압을 μm 의 짧은 시간으로 방전시켜 높은 에너지를 갖는 펄스로 만드는 기술이다. 높은 에너지를 갖는 고전압 펄스를 미생물에 가해주게 되면, 강한 전기장에 의해 세포막에 전기천공 (electro-poration) 현상이 일어나게 되어 미생물 세포가 가역적 또는 비가역적으로 불활성화 된다[5-7]. 즉, 높은 에너지의 전기장을 갖는 펄스가 반복적으로 인가되어 세포막 표면이 천공됨으로써 미생물을 사멸시키는 원리이다. 식품산업에서 살균 목적으로 수행하는 열처리 공정은 식품의 풍미, 맛 성분 및 단백질을 변성시키거나 비타민을 파괴할 수 있다. 이와 달리 PEF 기술은 상온에서 운영 가능하기 때문에 식품산업에서 비열 살균 공정으로 활용되어 왔다[8-9].

수중에 PEF를 인가하면 조건에 따라서는 코로나가 발생하게 되는데, 이때 산화력이 매우 높은 라디칼 (radical)이 함께 생성 된다[10-11]. 라디칼은 미생물의 세포 구조를 파괴 손상시키기 때문에 하수처리장에서 발생하는 2차 슬러지 즉, 활성슬러지의 가용화 공정에 PEF 기술을 적용할 수 있다. 즉, 활성슬러지의 플록과 세포를 가용화하여 폐 슬러지의 감량화를 기대할 수 있다.

본 연구의 목적은 하폐수 처리장에서 발생하는 폐 슬러지를 감량화 하기 위해 PEF 기술을 활용하여 활성슬러지의 가용화 가능성 연구를 수행하는 것이다. 이를 위해 PEF 공정의 중요한 운전 변수인 전기장 (electric field)의 세기를 결정하는 인가전압 (applied voltage)을 변화시켜가며 가용화 정도를 관찰하였다.

PEF의 전극 간에 통전이 되면 발생하는 줄열 (joule heat)에 의해 온도가 상승하고 전력량 소모가 증대된다. PEF에서는 이를 방지하기 위해 전극을 절연물질로 코팅하여 사용하기도 한다. 본 연구에서는 줄열 발생에 의해 미생물이 불활성화 되는 현상을 방지하기 위하여 전극을 코팅하여 사용하였다. 본 연구에서는 두 종류의 전극 코팅 물질을 사용하여 전극 코팅이 활성슬러지의 가용화에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 활성슬러지 배양

활성슬러지의 가용화 연구에 사용된 활성슬러지 혼합액은 C시 환경사업소의 포기조에서 채취한 것으로 실험실에서 수 개월간 합성폐수로 순응시켜 사용하였다. 합성폐수는 Glucose 2,000 mg/L, Peptone 300 mg/L, Yeast extract 800 mg/L, (NH₄)₂SO₄ 100 mg/L, KH₂PO₄ 25 mg/L, MgSO₄·7H₂O 35 mg/L, MnSO₄·4~5H₂O 7.5 mg/L, CaCl₂·2H₂O 60 mg/L, NaHCO₃ 500 mg/L로 조제되어 6 L의 원통형 아크릴 회분식 반응조에서 배양하였다. 세부적인 운전조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Specification and the operating conditions of the bio-reactor for the acclimation of activated sludge

Parameters	Values
Reactor Working Volume (L)	6
MLSS (mg/L)	6,500 ± 500
F/M ratio (g-COD/g-MLSS·day)	0.25 - 0.30
HRT (Hydraulic Retention Time) (hr)	12
SRT (Solids Retention Time) (day)	10
pH	7.5 ± 0.2

2.2 고전압 임펄스 (PEF) 시스템

2.2.1 PEF 장치 및 파형

연구에 사용된 PEF 장치의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다. 220 V의 입력 교류전압을 변압기 (transformer) 및 정류기를 통해 kV 단위의 고전압 직류로 변환한 후, 반도체 스위치를 이용한 펄스 발생기 (pulse generator)에서 고전압 펄스로 출력된다. PEF 장치에 인가된 전압과 전류의 세기를 측정하기 위해 고전압 프로브 (PVM-6, Teledyne Lecroy Inc, USA)와 전류 프로브 (CP150, Teledyne Lecroy Inc, USA)를 오실로스코프 (104xi-A, Teledyne Lecroy Inc, USA)에 연결하여 파형을 관찰하였다. 발생한 고전압 펄스는 반응기 내부 전극으로 연결되어 출력된다. PEF 장치에 의해 발생한 펄스의 출력 제원을 Table 2에 정리하여 나타내었다. PEF 공정의 중요한 전변수인 전계의 세기를 달리하기 위해 반응기 내 전극의 간격은 20 mm로 동일하게 고정하고 인가전압만 변화시켜가며 전계의 세기를 조절하였다.

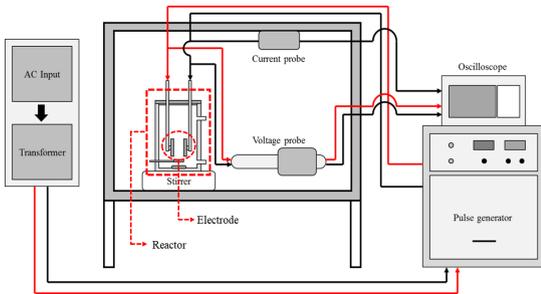


Fig. 1. Schematic of the PEF system and the reactor.

Table 2. Specifications of the output pulses from the PEF system

Parameters	Values
Pulse voltage (kV)	0-30
Pulse width (μs)	4-40
Pulse frequency (Hz)	100-300

2.2.2 전극 코팅

반응기 내부에 설치된 전극은 지름 35 mm의 원형 전극을 판 대 판 (plate-to-plate) 형식으로 배치하였다. 전극의 재질은 SUS304이다. 전극 코팅재질에 따른 가용화 효과를 비교하기 위해 각각 에폭시 (epoxy)와 테프론

(teflon)으로 전극을 코팅하였다.

에폭시 코팅을 위해 시판 중인 몰딩 에폭시 A제 (EM-3020/white, 신개암, 한국)와 B제 (EM-3020, 신개암, 한국)를 2대 1로 혼합하고, 감압 건조기에서 30분간 방치하여 건조와 동시에 기포를 제거한다. 전극코팅을 위해 제작된 금형 틀 상부에 설치된 마이크로미터 (digimatic micrometer, Mitutoyo, Japan)에 원 전극을 매단 후 바닥으로부터 350 μm 거리만큼 이격시켜 고정한다. 금형 틀에 혼합 에폭시를 붓고 전극을 담그어 24 시간 동안 건조하여 굳힌다.

전극의 테프론 코팅에는 ETFE (ethylene과 tetrafluoroethylene의 공중합체)를 사용하였다. 코팅을 수행하기 위해 전극의 표면에 스크래치를 내어 예열시킨 후 테프론 스프레이를 뿌려 코팅하였고, 150~420 °C에서 소성하는 작업을 총 3회 반복하였다.

2.3 활성슬러지 가용화 분석

코팅된 전극을 이용하여 슬러지 가용화 실험을 위해 아크릴 재질의 반응조를 제작하였다. 반응조의 내경과 내부 높이는 각각 100, 205 mm이고, 외경과 외부 높이는 각각 120, 215 mm이다.

PEF를 인가하기 위한 가용화 실험 조건은 Table 3과 같다. PEF 인가 후 가용화 정도를 파악하기 위해 인가 전·후의 활성슬러지 특성 분석을 수행하였다. 분석 항목은 MLSS, MLVSS, 용존성-COD, 용존성-TN, 용존성-TPO로 각각의 분석방법 및 기구를 Table 4에 요약하였다. 용존성 COD 및 -TN과 -TP 분석에 사용된 시료는 여과지 (GF/C, Whatman)로 여과한 여액을 사용하여, 분광광도계 (DR/4000 U, HACH, USA)로 측정하였다.

Table 3. Operating conditions of the sludge solubilization using the PEF system

Parameters	Values				
	Epoxy		Teflon		
Sample volume (L)	1				
Electrode size (mm)	35				
Electric fields (kV/cm)	5	7.5	3	6	7.5
Voltage (kV)	10	15	6	12	15
Electrode gap (mm)	20				
Contact time (min)	90	600	45		
Pulse width (μm)	4				
Pulse frequency (Hz)	100				

Table 4. Analysis methods and apparatus

Item	Methods and Apparatus
MLSS & MLVSS	Gravimetric method, Standard Method
COD	Reactor digestion method, Method 8000, DR4000, HACH
TN	Persulfate digestion method, Method 10129, DR4000, HACH
TP	PhosVer3 with acid persulfate digestion, Method 8190, DR4000, HACH

3. 결과 및 고찰

3.1 코로나 발생 파형

시료의 전기전도도가 높거나 인가된 전압이 임계점보다 높아지면 전극의 코팅에 흡이 발생하면서 전극 표면 또는 뒷면에서 코로나 (corona)가 발생한다. 코로나 방전이 발생하면 줄열이 발생함과 동시에 하이드록실 라디칼 (hydroxyl radical) 발생량이 증가하는 것으로 알려져 있다[13]. 활성슬러지 미생물도 라디칼에 의한 산화로 인해 세포 파괴에 의한 가용화 효과가 있을 것으로 예상되어 코로나 발생 유무를 파악할 필요가 있다.

수중에서 코로나가 발생하면 전극 표면에 강한 발광 현상이 발생한다. 따라서 코로나 발생 유무를 육안으로 직접 관찰할 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용하는 활성슬러지 혼합액의 경우 용액이 혼탁하고 불투명하기 때문에 전극 표면에서 발생하는 발광 현상을 직접 육안으로 관측하는 것이 매우 어렵다. 따라서 코로나가 발생하면 펄스의 전압과 전류 파형이 변화하는 현상을 통해 간접적인 방법으로 코로나 발생 유무를 평가하였다.

Fig. 2는 테프론으로 코팅된 전극을 사용하여 활성슬러지 혼합액에 15 kV의 PEF를 인가했을 때 발생한 전압파형을 관찰한 것이다. (a)는 코로나가 발생하지 않았을 때의 전압 파형이고, (b)는 전극 표면에 코로나가 발생한 후의 전압 파형이다. 본 연구에 사용된 고전압 장치의 전압파형은 먼저 구형 (square wave)파가 발생한 후 약 5 μ s동안 유지되다가 이후 전압이 감소하기 시작한다. 전압은 약 20 μ s 가량 지수감소 (exponential decay)하여 0 kV에 다다른다. Fig. 3(a)와 (b)의 전압파형을 비교해 보면, 구형과 부분인 A와 A'의 길이는 동일하게 유지되었다. 그러나 코로나가 발생하면 지수감소 구간에

서 전압이 15 kV에서 5 kV까지 감소하는 시간이 짧아지는 것을 관찰할 수 있다. 즉 그림에서 B'/C' 비율이 B/C 비율보다 적어짐을 알 수 있다.

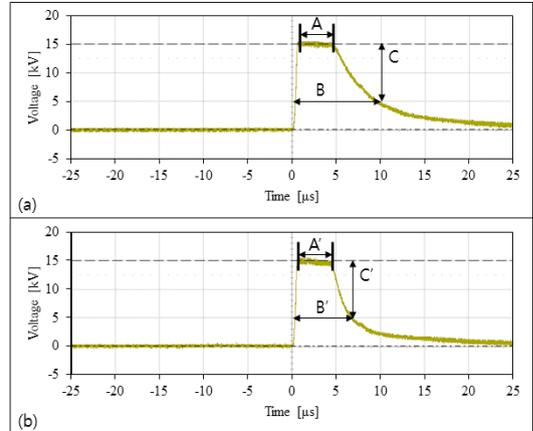


Fig. 2. Voltage waveform of the PEF under 15kV condition; (a) without corona discharge, (b) with corona discharge.

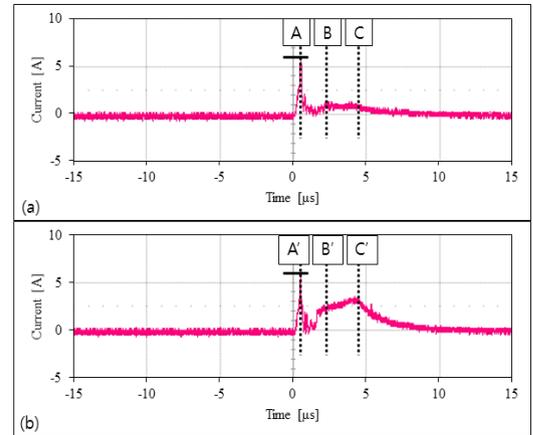


Fig. 3. Current waveform of the PEF under 15kV condition; (a) No-corona, (b) Corona.

Fig. 3은 위와 동일한 조건으로 실험했을 때 발생한 전류의 파형으로, (a)는 코로나가 발생하지 않았을 때의 파형이고 (b)는 코로나가 발생했을 때의 파형이다. 전압을 인가했을 때 전극 사이에 전류가 흐르지 않을 경우 전류파형은 서지전류 (surge current)에 의해 순간적으로 증가했다가 즉각 0으로 떨어지게 된다. 그러나 코로나가 발생하여 전극 간에 전류가 흐르면 파형은 서지전류 이

후에 통전되는 전류에 해당하는 면적을 보이게 된다. Fig. 3(a)와 (b)의 전류과형을 비교해보면, 두 과형 모두 서지전류에 의해 동일한 시점에서 동일한 높이의 피크 (A와 A')가 형성된 것을 관측할 수 있다. 그러나 코로나가 발생하지 않은 (a)의 B-C구간에서는 전류과형이 0에 근접한 것을 볼 수 있지만, (b)의 B'-C'구간에서는 전류과형의 면적이 뚜렷하게 발생한 것을 관찰할 수 있다. 즉, 코로나가 발생하여 전극 사이에 전류가 흐르고 있음을 말해주고 있다. 결국 펄스의 전압과 전류 과형의 관찰을 통해 코로나 발생을 확인할 수 있다고 판단하였다.

3.2 에폭시 코팅 전극의 슬러지 가용화

3.2.1 MLSS와 MLVSS 변화

활성슬러지 혼합액에 PEF를 인가하고 부유미생물 농도변화를 관찰하기 위해 MLSS와 MLVSS를 측정하였다. Fig. 4는 에폭시 코팅한 전극을 이용하여 각각 10 kV와 15 kV의 전압에서 PEF를 인가한 경우이다. 10 kV의 전압을 인가하였을 때 MLSS는 6,800에서 6,475 mg/L로, MLVSS는 6,325에서 5,975 mg/L로 변화하였다. 15 kV의 전압을 인가한 경우에는 MLSS는 6,800에서 6,925 mg/L로, MLVSS는 6,300에서 6,425 mg/L로 약간 증가하였다. 이상의 결과는 PEF 인가 전후에 MLSS와 MLVSS의 차이가 측정 오차범위 내에 있는 것으로 PEF에 의해 MLSS와 MLVSS가 변화가 없는 것으로 판단된다. 그러나 활성슬러지의 가용화를 MLSS와 MLVSS 농도변화만 보고 판단할 수 없기 때문에 다음 절의 용존성 물질 농도를 분석하여 정확한 판단을 하고자 하였다.

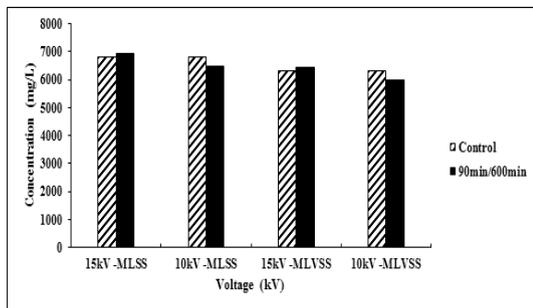


Fig. 4. Effect of the applied voltage on the MLSS and the MLVSS concentration of the activated sludge: epoxy coated electrodes.

3.2.2 용존성-COD, -TN, -TP 변화

PEF 인가 후 활성슬러지의 가용화를 판단하기 위해 용존성-COD, -TN, -TP를 분석하여 Fig 5와 6에 나타내었다. PEF를 인가하였을 때 활성슬러지가 가용화 되었다면 용존성-COD, -TN, -TP가 증가하게 된다. 이는 세포가 손상되면서 유기물질들이 모 용액 (bulk solution)으로 방출되어 그 농도가 증가하기 때문에 가용화를 간접적으로 확인할 수 있는 분석 항목이다.

15 kV의 전압에서 600분 동안 인가한 실험군의 용존성-COD는 160에서 167 mg/L로 변화하였고, 10 kV의 전압에서 90분간 인가한 실험군은 72에서 64 mg/L로 감소하였다. 이 차이는 매우 근소하고 측정오차 범위 내에 있어 활성슬러지가 가용화 되었다고 결론짓기에는 무리가 있다. 또한 용존성-TN과 TP는 PEF 인가 전후에 차이가 거의 없음을 확인하였다.

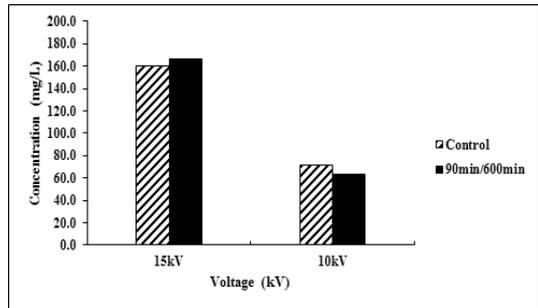


Fig. 5. Changes in the soluble COD concentration according to the applied voltage using the epoxy coated electrode.

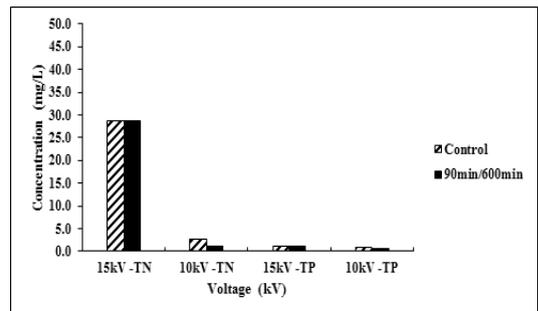


Fig. 6. Changes in the soluble TN and TP concentration according to the applied voltage using the epoxy coated electrode.

이상의 결과를 통해 에폭시로 코팅한 전극을 사용한 PEF의 경우에 활성슬러지의 가용화가 거의 발생하지 않

은 것으로 판단된다. 이는 에폭시 코팅으로 인해 전극 간 통전 현상이 차단되어 코로나 발생이 억제되었기 때문으로 해석할 수 있다(Fig. 7).

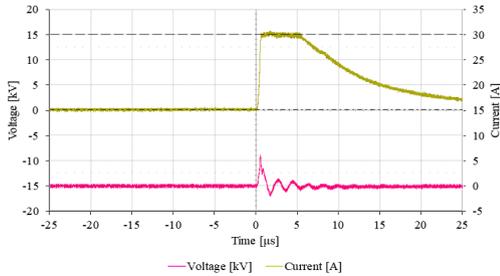


Fig. 7. Voltage and current wave-forms of the PEF under 15kV condition.

3.3 테프론 코팅 전극의 슬러지 가용화

3.3.1 MLSS와 MLVSS 변화

테프론으로 코팅된 전극을 사용하여 PEF를 인가한 경우 부유미생물 농도변화 관찰을 위해 MLSS와 MLVSS를 측정하였다 (Fig. 8). 각각 6, 12, 15 kV의 전압에서 45분 동안 PEF를 인가하였다. 6 kV의 전압을 인가하였을 때 MLSS는 6,775에서 6,750 mg/L로, MLVSS는 6,350에서 6,325 mg/L로 거의 변화가 없었다. 그러나 전압을 12 kV로 증가시킨 경우 MLSS는 6,325에서 6,100 mg/L로 감소하였고, MLVSS는 5,925에서 5,700 mg/L로 감소하였다. 인가전압을 15 kV로 상승시키면 MLSS는 6,725에서 6,100 mg/L로 감소하였고, MLVSS는 6,200에서 5,575 mg/L로 감소하였다. 즉, 6 kV의 비교적 적은 인가전압 하에서는 부유물질 농도가 크게 변하지 않았지만 12 kV와 15 kV로 증가시켰을 경우에는 활성슬러지의 가용화가 진행되어 MLSS와 MLVSS가 상당부분 감소한 것을 확인하였다. 이는 가용화를 달성하기 위해서는 임계점 이상의 전압이 인가되어야 함을 시사하고 있다.

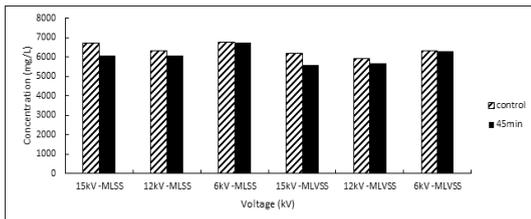


Fig. 8. Change in the MLSS and MLVSS concentration according to the applied voltage using the teflon coated electrode.

3.3.2 용존성-COD, -TN, -TP 변화

활성슬러지의 가용화 여부를 좀 더 확실하게 판단하기 위해 용존성-COD 및 -TN, -TP의 변화를 분석하여 Fig 9와 10에 나타내었다. 용존성-COD는 전압이 6, 12, 15 kV일 때 각각 5, 108, 496 % 증가하였다. TN은 23, 48, 83 %, TP는 25, 48, 449 % 증가하였다. 15 kV의 전압을 인가했을 경우 COD, TN, TP 모두 큰 증가량을 보여 활성슬러지가 가용화가 진행되었음을 보여주고 있다. 인가전압이 12 kV인 경우에도 용존성-COD 및 -TN, -TP 모두 큰 폭으로 증가한 것으로 보아 활성슬러지가 가용화 되었음을 시사하고 있다. 그러나 6 kV의 전압을 인가하였을 경우에는, COD는 실험오차 수준의 미미한 증가를 보였고, TN과 TP는 약 20 % 정도의 증가를 보였으나 농도로 표현할 경우 각각 1.8 mg/L와 0.3 mg/L로 증가하여 사실상 거의 변화가 없다고 할 수 있다. 따라서 6 kV의 전압을 인가하였을 경우에는 활성슬러지의 가용화가 거의 발생하지 않고 있다고 결론지을 수 있다.

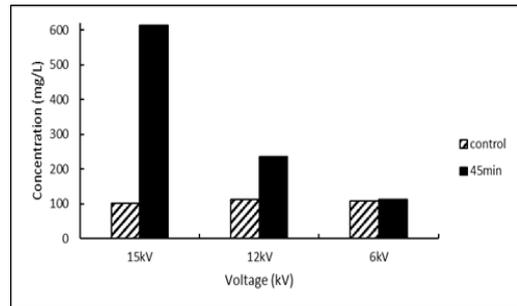


Fig. 9. Change in the soluble COD concentration according to the applied voltage using the teflon coated electrode.

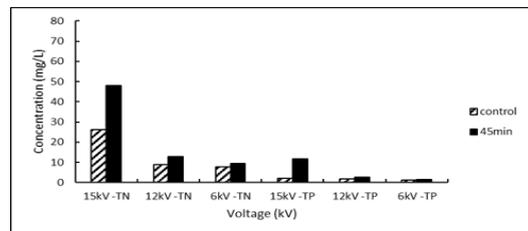


Fig. 10. Change in the soluble-TN and soluble-TP concentration according to the applied voltage using the teflon coated electrode.

이상의 결과를 통해 테프론 코팅 전극을 사용하였을

때 전압의 세기를 12, 15 kV로 인가하면 활성슬러지의 가용화가 발생하고, 6 kV일 때는 가용화가 발생하지 않는다고 결론지을 수 있다. 이런 결과는 코로나 발생 유무와 깊은 관련이 있으며, 이로 인해 활성슬러지가 가용화되는데 코로나의 영향이 매우 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

또한 12, 15 kV의 전압에서만 코로나가 발생한 것으로 보아 임계전압 (critical voltage)이 6~12 kV 사이에 존재하고 있음을 시사하고 있다. 임계전압은 전극 피막을 파괴하여 전극 사이에 전류를 흐르게 하는 최소한의 전압을 뜻하며, Kim (2016)은 코로나가 발생하는 임계전압은 약 10 kV라고 보고하고 있다[14].

4. 결론

본 연구는 매년 증가추세에 있는 하·폐수 슬러지를 효율적으로 처리하기 위해 PEF 기술을 이용하여 폐 슬러지의 감량화 연구를 시도하였다. 또한 PEF 기술의 주요 인자인 전기장의 세기를 다르게 조정하기 위하여 전극 간격을 고정시키고 전압의 세기를 달리하여 인가해 주면서 가용화 정도를 관찰하였다. PEF 인가 전후의 MLSS, MLVSS, 용존성-COD, -TN, -TP 등을 측정하여 활성슬러지의 가용화 정도를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 코로나 발생 여부를 평가하기 위해 PEF 파형을 관찰하였다. 코로나가 발생한 파형과 그렇지 않은 경우의 전압과 전류 파형에 특징적인 변화가 발생하여 이를 관찰함으로써 코로나 발생 여부를 판단할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 에폭시 코팅 전극을 사용하여 6 ~15 kV의 전압으로 PEF를 활성슬러지 혼합액에 인가한 결과 슬러지의 가용화를 확인할만한 수준의 MLSS와 MLVSS에 변화가 나타나지 않았다. 용존성-COD, -TN, -TP 측정 결과 역시 가용화 효과를 확인할만한 수준의 변화가 없었다. 에폭시로 코팅된 전극에서는 코로나가 거의 발생하지 않았으며 이로 인해 슬러지의 가용화가 진행되지 않은 것으로 판단된다.
- 3) 테프론 코팅 전극을 사용하여 6~15 kV의 PEF를

인가하였을 때, MLSS는 0, 4, 9 % 감소하였고 MLVSS는 0, 4, 10 % 감소하였다. 용존성-COD는 5, 108, 496 % 증가하였다. 6 kV를 제외한 12, 15 kV의 인가전압에서 슬러지 가용화가 확실하게 발생하였음을 알 수 있었다. 용존성-TN과 -TP도 동일한 가용화 효과를 보였다.

- 4) 코로나 방전이 발생한 테프론 코팅된 전극에서만 슬러지 가용화가 가능한 것으로 보아 슬러지의 가용화는 코로나 방전에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 또한 코로나가 발생하는 임계전압은 6~12 kV 사이에 존재하고 있다고 판단된다.

References

- [1] Korean ministry of environment[Internet], Sewage statistics in 2014. Available From: <https://bit.ly/2GulbmE>
- [2] Korean ministry of environment[Internet], Sewage sludge management comprehensive measures, 2007. Available From: <https://goo.gl/ctt3qN>
- [3] M. Somolinos, P. Mañas, S. Condón, R. Pagán, D. García, "Recovery of *Saccharomyces cerevisiae* sublethally injured cells after Pulsed Electric Fields", *International Journal of Food Microbiology*, Vol.125, pp.352-356, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.04.023>
- [4] W. Zhao, R. Yang, X. Shen, S. Zhang, X. Chen, "Lethal and sublethal injury and kinetics of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in milk by pulsed electric fields", *Food Control*, Vol.32, No.1, pp.6-12, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.029>
- [5] K. M. F. A. Reyns, A. M. J. Diels, C. W. Michiels, "Generation of bactericidal and mutagenic components by pulsed electric field treatment", *International Journal of Food Microbiology*, Vol.93, No.2, pp.165-173, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2003.10.014>
- [6] J. Raso, V. Heinz, Pulsed Electric Field Technology in Food Processing Industry : Fundamentals and Applications, p.97-123., Germany: Springer, 2006. Available From: <https://www.springer.com/gp/book/9780387310534>
- [7] U. R. Pothakamury, A. Monsalve-González, G. Barbosa-Cánovas, B. G. Swanson, "Inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in model foods by pulsed electric field technology", *Food research international*, Vol.28, pp.167-171, 1995. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0963-9969\(95\)90801-G](https://dx.doi.org/10.1016/0963-9969(95)90801-G)
- [8] T. Grahl, H. Märkl, "Killing of microorganisms by pulsed electric fields", Vol.45, No.1-2, pp.148-157, 1996. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s002530050663>

- [9] M. Stoica, G. Bahrim, G. Carac, Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances, p.291-302, Badajoz: Formatex Research Center, 2011. Available From: <http://www.formatex.org/microbiology3/>
- [10] J. P. Jiang, Z. Y. Luo, L. Zhao, J. Y. Xuan, M. X. Fang, X. Gao, "Detection of OH Radicals Generated in Wire-Plate Pulsed Corona Discharge by LIF", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.45, No.5, pp.1747-1757, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPS.2015.2417972>
- [11] D. Yuan, S. Tang, J. Qi, N. Li, J. Gu, H. Huang, "Comparison of hydroxyl radicals generation during granular activated carbon regeneration in DBD reactor driven by bipolar pulse power and alternating current power", *Vacuum*, Vol.143, pp.87-94, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.06.003>
- [12] APHA, AWWA, WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th, pp.2-53~58, USA, 1995. Available From: https://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_4000-6000.pdf
- [13] S. Y. Cho, I. S. Chang, "Effect of operating conditions of high voltage impulse on generation of hydroxyl radical", *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol.31, No.6, pp.611-618, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.11001/jksww.2017.31.6.611>
- [14] H. R. Kim, Studies on bromate-free disinfection of bottled drinking water using high voltage impulse technique and on kinetics, a master's thesis of hoseo university, 2016.

장 인 성(In-Soung Chang)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업화학 과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업화학 과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공업화학 과 (공학박사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도, 청정기술, 반도체 공정기술, 반도체산업 폐수처리

엄 세 은(Se-Eun Um)

[준회원]



- 2016년 2월 : 호서대학교 환경공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 호서대학교 나노바이오트로닉스학과(환경공학 석사)

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도