고전압 임펄스(high voltage impulse) 운전 조건에 따른 활성슬러지의 가용화 효과 Effect of Operating Parameters of the High Voltage Impulse (HVI) on Solubilization of Activated Sludge

엄세은 · 이지선* · 장인성**,*
Se-Eun Um · Ji-Sun Lee* · In-Soung Chang**,*

호서대학교 나노바이오트로닉스학과

*호서대학교 대학원 BK21 반도체디스플레이공학과 · **호서대학교 환경공학과

Department of Nanobiotronics Hoseo University

*Department of Semiconductor & Display Engineering Hoseo University

**Department of Environmental Engineering Hoseo University

(Received September 1, 2017; Revised January 9, 2018; Accepted January 9, 2018)

Abstract : Sludge solubilization using the HVI (high voltage impulse) technique was investigated to solve the sludge disposal problems encountered in the wastewater treatment plants. The yield of solubilization was checked after 5 kV/cm of electric field was induced to activated sludge suspension for 90 minutes. The MLSS concentration decreased from 4,280 to 2,800 mg/L (35% reduction), whereas soluble COD increased from 224 to 1,710 mg/L (663% increment). Soluble-TN and -TP increased 134 and 61%, respectively. These indicate that the intra-cellular and/or intra-floc materials were burst out to bulk solution due to electro-poration effect caused by the HVI induction. Electro conductivity increased 2,250 to 2,520 μ S/cm. The proteins and the polysaccharide concentration in the bulk solution increased 492 and 61%, respectively. These clearly support the hypothesis of cell breakage by the HVI induction. Effect of two important operating parameters, i.e., distance between electrodes and contact time on sludge solubilization was investigated. As the applied voltage increased from 6 to 8 and 10 kV while fixing the distances constant, the degree of solubilization increased. However, there were little differences in the solubilization as the distances varied, indicating that the applied voltage is more important parameter affecting sludge solubilization than the electrode gap distance.

Key Words : Electroporation, High Voltage Impulse, Sludge, Solubilization

요약 : 하·폐수 처리장에서 발생하는 슬러지 폐기물의 처분을 위해 고전압 임펄스(High Voltage Impulse, 이하 HVI) 기술을 이용한 슬러지 가용화를 시도하였다. 제작된 HVI 시스템에서 발생한 5 kV/cm의 전계를 활성슬러지 용액 속에 위치한 전극에 90분간 인가하여 가용화 여부를 살펴보았다. MLSS는 4,280 mg/L에서 2,800 mg/L로 35% 감소하였다. 반면에 용존성-COD는 224 mg/L에서 1,710 mg/L로 663% 증가하였다. 용존성-TN과 용존성-TP도 각각 초기농도 대비 134% 및 61% 증가하였다. 이는 HVI의 세포막 전기천공(electro-poration) 효과로 인해 세포 및 플록 내 물질이 모 용액으로 쏟아져 나온 결과로 해석된다. 전기전도도는 2,250에서 2,520 μ S/cm로 증가하였다. 아울러 모 용액의 단백질과 다당류 성분이 각각 492%와 305% 증가한 사실로 이를 설명할 수 있다. 한편 HVI의 중요한 운전특성인 인가전압과 전극간격을 달리하여 가용화 실험을 수행하였다. 전극간격은 고정시키고 인가전압의 크기를 증가(6, 8, 10 kV) 시킬수록 슬러지 가용화 효과가 증가하는 것을 확인하였다. 반면에 전압은 동일하게(15 kV) 인가하지만 전극 간격(5, 10, 20 mm)을 달리하여 가용화 실험을 진행했을 때는 가용화 정도에 확연한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 전극의 간격 보다는 외부에서 가해지는 인가전압의 크기가 슬러지의 가용화에 보다 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

주제어 : 전기천공, 고전압 임펄스, 슬러지, 가용화

1. 서론

하·폐수 처리장으로 유입된 유기물질은 포기조의 미생물에 의해 분해되고 일부는 미생물 플록으로 동화하여 슬러지로 배출된다. 하·폐수 처리장에서 발생하는 슬러지의 처분은 다단계의 물리/화학적 처리 과정을 거쳐 해양투기, 매립, 소각, 퇴비화 및 연료화 등을 통해 최종 소멸된다. 그러나 매립장 및 소각장의 신규 건설이 혐오시설로 인식되어 신규 증설이 극도로 제한받고 있으며, 런던협약 '96의정서' 발효에 의해 해양투기도 전면 금지되었다.¹⁾ 또한 슬러

지의 퇴비화 및 연료화는 낮은 에너지 효율로 인해 경제적인 공정으로 인식 받지 못하고 있다. 따라서 하·폐수 처리장에서 발생하는 슬러지의 처분이 심각한 사회 문제로 대두되고 있으며 새로운 슬러지 처분 공정 또는 슬러지 발생량 자체를 줄이는 슬러지 감량화에 대한 기술개발 요구가 증가하고 있다.

본 연구에서는 슬러지 감량화를 위한 새로운 가용화(solubilization) 기술을 개발하기 위하여 고전압 임펄스(High Voltage Impulse, 이하 HVI) 기술을 활용하고자 하였다. HVI 기술은 수중에 고전압 임펄스를 인가하여 플라즈마 및 코로

* Corresponding author E-mail: cis@hoseo.edu Tel: 041-540-5744 Fax: 041-540-5748

나를 발생시켜서 산화력이 높은 라디칼을 생성시키는 기술을 일컫는다.^{2,3)} 이런 HVI 기술을 폐기하여야 할 슬러지에 인가한다면, 활성슬러지의 플러크와 세포를 손상시켜 입자성 물질의 슬러지를 용존성 물질로 전환시키는 가용화 효과를 기대할 수 있다.

고전압 펄스 전기장에 의한 미생물 불활성화 메커니즘은 세포막의 전기천공(Electro-poration) 현상으로 알려져 있다.^{4,5)} 고전압 장치로부터 발생한 전기장(electric field)이 미생물 세포막을 가로질러 인가되면 세포 내부의 이온이 세포막 주위에 축적된다. 이렇게 축적된 이온들에 의해 세포막을 가로지르는 새로운 전위차가 발생한다. 막 횡단 전압이 임계값을 초과하게 되면 세포막의 천공 현상이 발생한다. 결국 세포막은 비가역적으로 파괴되며 이를 고전압 펄스에 의한 전기청공 현상이라 부른다.⁶⁾ 즉, 고전압에 의한 전기장의 반복적인 인가를 통해 미생물의 세포막이 일시적 또는 영구적으로 천공됨으로써 미생물 세포가 사멸되는 것이다. 식품산업에서는 HVI 공정을 식품의 비열살균(non-thermal pasteurization) 또는 세포 내 유용한 구성물질의 추출(extraction of intra-cellular components)에 활용하기도 한다.^{7,8)}

하·폐수 처리장에서 발생하는 2차 슬러지의 성상이 대부분 미생물 세포 및 플록으로 구성되어 있기 때문에 슬러지에 HVI를 인가한다면 슬러지 가용화 효과를 기대할 수 있다고 보았다. 따라서 슬러지 혼합액에 HVI를 인가하여 슬러지를 감량하는 기술을 적용시키고자 하였다. HVI를 이용한 감량화 연구는 아직 초기단계에 머물고 있고, HVI의 슬러지 가용화 가능성에 대한 탐색 또는 미생물 케이크 층으로 오염된 여과 막(membrane filter)의 세정에 활용하는 수준에 머물고 있다.^{9,10)} 즉, HVI의 운전 조건에 따른 가용화 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다.

본 연구의 목적은 하·폐수 처리장에서 발생하는 유기성 2차 슬러지를 가용화할 목적으로 HVI를 활성슬러지에 인가하여 가용화를 시도하는 것이다. HVI 인가 전 후의 슬러지 성상을 비교 관찰함으로써 HVI 공정의 슬러지 가용화 가능성 및 그 성능을 평가하고자 하였다. 아울러 HVI 공정의 중요한 운전 변수인 인가전압, 접촉시간 및 전극간격과 같은 인자에 따른 가용화 효과의 차이를 관찰하였다.

2. 연구방법

2.1. 활성슬러지 배양

본 연구에 사용된 활성슬러지는 HVI 방전 실험을 수행하기 이전에 실험실에서 3개월 이상 합성폐수로 순응시켜 정상상태에 도달한 것이다. 합성폐수는 Glucose 1,500 mg/L, Peptone 450 mg/L, Yeast extract 1,200 mg/L, (NH₄)₂SO₄ 960 mg/L, MgSO₄·7H₂O 240 mg/L, KH₂PO₄ 220 mg/L, NaHCO₃ 300 mg/L, CaCl₂·2H₂O 24 mg/L, MnSO₄·4H₂O 30 mg/L로 조제되어 8 L의 원통형 아크릴 반응조에서 회분식연속반응조(sequencing batch reactor) 방식으로 운영하였다.

2.2. HVI 장치

본 연구에 사용된 HVI 시스템은 전원(power supply), 고전압발생기(high voltage generator), 축전기(capacitors), 스위치, 펄스 발생기(impulse generator)로 구성되어 있다. 교류전원은 고전압발생기에서 승압된 후 축전기에 저장되고, 스위치 작동을 통해 임펄스 발생기에서 HVI가 만들어진다. 스위치는 회전로타리방식(rotary gap switch)을 이용하였다. 즉, 전극에 회전체의 로터리 갭 전극을 6개 설치하여 속도 조절이 가능한 모터를 장착한 후 회전시킴으로 스위칭 동작을 구현하는 방법, 즉 auto-trigger pulses를 발생시킬 수 있도록 제작되었다. 생성된 HVI는 반응기에 연결된 전극으로 보내져, 반응기 내에 존재하는 활성슬러지 시료에 인가하는 구조로 이루어져 있다. 또한, HVI 시스템과 연결된 전압과 전류 측정기를 오실로스코프(TDS oscilloscope 2022B, Tektronix, USA)에 연결하여 HVI 반응기 내에 인가되는 펄스의 전압과 전류 파형을 확인할 수 있도록 구성하였다. 본 연구에 사용된 HVI 시스템의 주요 성능 및 사양은 Table 1과 같다.

발생한 HVI는 슬러지 시료가 담겨져 있는 반응기(Fig. 1) 내부의 전극에 연결하였다. 반응기의 재질은 내부가 보이도록 아크릴로 제작되었다. 반응기의 직경과 깊이는 각각 90 mm와 200 mm이다. 반응기 온도조절 목적으로 반응기 주위를 감싸는 물 순환 장치(water jacket)를 설치하였다. 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.

Table 1. Performance specifications of HVI system

Parameters	Values
Peak voltage (kV)	0 - 30
Pulse width (μs)	0 - 400
Pulse frequency (Hz)	0 - 60
Capacity (nF)	10 - 200

Fig. 1. Schematic of continuous flow HVI chamber.

2.3. 분석 방법

시료의 가용화 여부를 확인하기 위하여 HVI 처리 전과 후 활성슬러지 시료의 성상 변화를 관찰하였다. 실험에 사용한 활성 슬러지 샘플은 GF/C로 여과한 여액을 사용하여 용존성 물질을 측정하였다. 가용화 실험 전후로 활성슬러지의 성상 분석을 위해 전기전도도, S-COD (soluble-COD), S-TN (soluble-TN), S-TP (soluble-TP), MLSS, MLVSS, 세포외고분자물질(Extra-cellular Polymeric Substances, 이하 EPS)의 주성분인 단백질과 다당류를 분석하였다. 활성슬러지 모 용액의 용존성 단백질 성분은 Lowry method¹¹⁾로, 다당류(Polysaccharide) 성분은 Phenol-sulfuric acid¹²⁾에 의하여 측정하였다. 그 외의 모든 분석 항목은 Standard Methods¹³⁾에 준하여 측정하였다. 분석방법 및 장치는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Analysis methods and apparatus

Parameters	Values
Conductivity	Conductivity meter (Hach HQ14d)
Protein	Lowry method
Polysaccharide	Phenol-sulfuric acid method
S-TN	Persulfate method, Standard Method
S-TP	Vanadomolybdophosphoric acid method, Standard Method
S-CODcr	Open reflux, Standard Method
MLSS and MLVSS	Gravimetric method, Standard Method

3. 결과 및 고찰

3.1. HVI 활용 슬러지 가용화

슬러지 가용화를 위해 전극 간격이 20 mm로 조절된 침평판 형태의 전극에 10 kV의 전압을 인가하여 전기장(electric fields)의 세기가 5 kV/cm가 되도록 고전압 임펄스를 작동하였다. Fig. 2에서처럼 HVI를 90분간 인가한 후 슬러지의 MLSS는 4,280 mg/L에서 2,800 mg/L로 약 35% 감소하였고, MLVSS는 3,990 mg/L에서 2,560 mg/L로 36% 가량 감소했다. 또한 S-COD는 224 mg/L에서 1,710 mg/L로 663%

Fig. 2. Variation of the MLSS, MLVSS and S-COD concentration according to the contact time.

Fig. 3. Variation of the S-TN and S-TP concentration according to the contact time.

증가하였다. 이 결과는 HVI 인가를 통해 슬러지가 일부 가용화 되었음을 간접적으로 시사하고 있다. 즉, 인가된 HVI에 의해 세포전공(electro-poration) 현상이 발생하여 슬러지가 파괴되어 세포 내 구성 물질이 용출되었기 때문이다. 세포전공 현상은 외부에서 전기장이 가해지면 막 표면에 자유전하가 축적되어 세포막 안팎의 전위차가 증가하게 되는데, 이 때 분극된 막이 서로 반대 전하에 의해 당겨지면서 임계전위에 도달하면 점탄성 특성을 초과하여 세포막이 파괴되는 것이다.^{9,14)}

Fig. 3에 HVI를 90분간 인가하며 관찰된 S-TN과 S-TP 농도 변화를 나타내었다. HVI 방전 플라즈마 접촉 시간이 증가할수록 S-TN은 94 mg/L에서 220 mg/L로 134%, S-TP는 180 mg/L에서 290 mg/L로 61%까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 4에서 알 수 있듯이 활성슬러지 모 용액(bulk solution)의 용존성 단백질과 다당류의 농도는 각각 492%와 305% 증가했다. 이러한 현상은 활성슬러지의 플러크와 각 미생물 세포가 손상되어 세포 내부에 있던 고분자성 유기물질이 모 용액으로 용출되었음을 의미한다. 즉, 슬러지가 가용화되었음을 시사하고 있다.

Fig. 5는 HVI 접촉시간에 따른 용액 내의 전기전도도를 나타낸 그래프이다. 접촉시간이 증가함에 따라 전기전도도가 증가하는 추세를 보이고 있다. 이 역시 HVI에 의해 활

Fig. 4. Variation of the S-Protein and S-Polysaccharide concentration variation according to the contact time.

Fig. 5. Variation of the conductivity of the bulk solution.

성슬러지가 가용화되면서, 세포 내에 전도성을 갖는 물질이 용출되면서 모 용액의 전기전도도가 증가하게 된 것이다. 전기전도도는 90분 동안 2,250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 2,520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 약 12% 증가하였다.

HVI의 전기천공 메커니즘에 의한 세포막 파괴에 의해 가용화가 발생하였다고 판단하였다. 그러나 HVI에 의해 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$ radical), 수퍼옥사이드($\cdot\text{O}_2^-$) 및 과산화수소(H_2O_2) 등과 같은 활성산소종(reactive oxygen species, 이하 ROS)이 발생하는 것으로 알려졌다.^{15,16} ROS는 산화력이 높아 강력한 산화제로 작용할 수 있다. 이러한 ROS가 미생물 세포를 산화 분해하여서 가용화를 유도한 것으로 추정된다. HVI에 의해 생성된 ROS는 반응성이 매우 높아 분석하기가 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. ROS를 측정하기 위해서는 DMSO (dimethyl sulfoxide), 중탄산염(HCO_3^-), Salicylic acid ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$) 등과 같은 라디칼 스캐빈저(scavenger)와 반응시켜 다른 물질로 변환시킨 후 이들을 액체 크로마토그래피나 분광 광도계로 정량 분석해야 한다. 이 부분은 본 연구의 범위를 벗어나고 나름대로 방대한 실험 자료가 필요하여 본 연구에서는 ROS가 얼마나 생성되는지에 관한 연구는 수행하지 않았다.

이상의 실험결과를 통하여, HVI에 의해 슬러지의 플러크와 세포가 손상되어 가용화가 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 접촉시간이 증가함에 따라 가용화 효율이 증가함을 확인하였다. 즉, 접촉시간이 HVI 공정의 중요한 운전 변수임을 시사하고 있다.

3.2. HVI 운전특성에 따른 가용화 효과

3.2.1. 전기장 세기에 따른 슬러지 가용화

전극 간격을 20 mm로 고정하고 인가전압을 각각 6, 8, 10 kV로 달리하여 전기장의 세기를 각각 3, 4, 5 kV/cm로 만들어 HVI 인가실험을 수행하였다. Fig. 6은 전기장의 세기에 따른 MLSS의 농도 변화를 접촉시간에 따라 도시하였다. 전기장의 세기가 3, 4, 5 kV/cm 일 때 MLSS는 각각 7,170 mg/L에서 6,990, 6,220, 5,640 mg/L로 각각 초기농도 대비 3, 13, 21% 감소한 것을 알 수 있다. 즉, 인가한 전기장의 세기가 증가할수록 가용화 효과가 증대되고 있음을

Fig. 6. Variation of MLSS concentration as a function of electric field strength.

Fig. 7. Variation of S-COD, S-TN and S-TP concentration as a function of the electric field strength (treatment time : 90 min).

시사하고 있다.

Fig. 7은 전기장 세기의 증가에 따른 S-COD, S-TN, S-TP의 농도 변화를 나타내었다. 전기장의 세기가 3, 4, 5 kV/cm 일 때, S-COD는 95 mg/L에서 102, 1,050, 2,040 mg/L로 각각 7, 1,005, 2,047% 증가하였다. S-TN은 160 mg/L에서 170, 200, 320 mg/L로 각각 6, 25, 100% 증가하였고, S-TP는 180 mg/L에서 250, 350, 420로 각각 39, 94, 133% 증가하였다. 이상의 결과를 통해 전계의 크기가 증가할수록, 즉 인가된 전압의 세기가 증가할수록 슬러지 가용화 효과가 증가함을 확인할 수 있었다.

3.2.2. 전극 간격에 따른 슬러지 가용화

전압을 15 kV로 동일하게 인가하고, 전극 간격을 각각 5, 10, 20 mm로 변화시켜 실험을 진행하였다. 전극 간격의 변화에 따라 인가된 전기장의 세기는 각각 30, 15, 7.5 kV/cm로 고정되었다. Fig. 8은 전극간격을 달리하여 HVI를 90분간 인가한 후 MLSS 농도변화를 접촉시간에 따라 살펴본 것이다. 전극 간격이 5 mm일 때 MLSS의 농도는 초기 5,750 mg/L에서 3,970 mg/L로 감소하였고, 10 mm일 때는 3,840 mg/L로, 15 mm일 때는 3,850 mg/L로 감소하였다. 감소율은 각각 31, 33, 33%이었다. 즉, 전극 간격에 따른 가용화 효과의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 8. Variatoin of MLSS concentration as a function of the electrode gap distance.

Fig. 9. Variation of S-COD, S-TN and S-TP concentration as a function of the electrode gap distance (treatment time : 90 min).

전극 간격에 따른 S-COD, S-TN, S-TP의 농도 변화를 나타낸 Fig. 9를 보면, S-COD는 85.0 mg/L에서 1,670, 1,970, 2,240 mg/L로 1,865, 2,218, 2,535% 증가, S-TN은 190 mg/L에서 410, 470, 490 mg/L로 116, 147, 158% 증가, S-TP는 200 mg/L에서 330, 340, 370 mg/L로 65, 70, 85% 증가하였다. 역시 전극 간격 변화에 의한 전계 세기의 변화는 가용화 효과에 확연한 차이를 주지 않는 것으로 나타났다.

HVI 방전 기술에서 처리 효율과 가장 밀접한 관련이 있는 요소는 전기장의 세기라고 알려져 있다.⁴⁾ 여기서 전기장의 세기는 다음 식에서 보는 바와 같이 전압과 전극 간격에 따라 달라진다.

$$E = V/d \quad (1)$$

E : electric fields (V/cm)

V : applied voltage (V)

d : electrode gap distance (cm)

전압과 전극 간격을 달리 실험한 위의 결과를 통하여 전극의 간격보다는 외부에서 가해지는 전압의 크기가 더 큰 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 즉, 인가전압을 증가시키거나 전극 간격을 줄이는 방법을 이용하여 전기장의 세기를 증가시킨 결과, 전압을 증가시키는 것이 슬러지 가용

화 효율을 높이기 위해 더욱 효과적임을 확인하였다.

이상의 결과를 종합해볼 때 HVI의 운전조건을 보다 다양한 조건으로 확대하여 볼 필요가 있음을 확인하였다. 즉 전극 간격을 넓은 범위에서 증감시켜가며, 아울러 전계의 세기는 5 kV/cm 이상의 조건에서 슬러지 가용화 정도를 탐색하는 연구가 필요하다. 이렇게 확장된 조건에서 슬러지 가용화를 위한 최적 운전조건을 탐색하는 향후 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 HVI 기술을 활용하여 활성슬러지의 가용화에 대하여 연구하였다. 아울러 HVI의 주요 운전요소인 인가전압, 접촉시간, 전극간 거리 및 전기장의 세기가 슬러지 가용화에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 10 kV의 전압을 인가하여 전계를 5 kV/cm로 조절한 HVI를 활성슬러지에 90분 인가하였을 때 슬러지의 MLSS와 MLVSS는 각각 35, 36% 감소하였고, S-COD, S-TN, S-TP는 각각 663, 134, 61% 증가하였다. 그리고 S-Protein과 S-Polysaccharide도 각각 492, 305% 증가하였다. 이는 활성슬러지의 플러크 세포가 일부 파괴되어 모 용액으로 세포 내 물질이 방출된 결과이다. 모 용액 내의 전도성 물질, 즉 전기전도도 또한 12% 증가한 것을 확인하였다. 결국 슬러지 가용화가 일어났음을 시사하고 있다.

2) HVI 기술에서 처리 효율과 가장 밀접한 관련이 있는 요소는 전기장의 세기라고 알려져 있다. 따라서 전기장의 세기에 영향을 주는 요소인 인가전압과 전극 간격을 달리 하여 가용화 실험을 수행한 결과, 전극간격 보다는 외부에서 인가하는 전압의 크기가 슬러지 가용화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3) 결론적으로 HVI는 슬러지 가용화 요소 기술로 사용될 수 있음을 확인하였다. 아울러 전기장의 세기가 증가할수록, 특히 전압을 높여 전기장의 세기를 증가시킬수록 슬러지 가용화가 더 효율적임을 입증하였다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기본연구사업(NRF-2016R1D1A1B03930377)의 지원에 의해 수행된 연구로써, 관계부처에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Korea Ministry of Environment Home Page, <http://www.me>.

- go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=3337, May(2007).
2. Jiang, J. P., Luo, Z. Y., Zhao, L., Xuan, J. Y., Fang, M. X. and Gao, X., "Detection of OH Radicals Generated in Wire-Plate Pulsed Corona Discharge by LIF," *IEEE T. Plasma Sci.*, **43**(5) 1747~1757(2015).
 3. Yuan, D., Tang, S., Zi, J., Li, N., Gu, J. and Huang, H., "Comparison of hydroxyl radicals generation during granular activated carbon regeneration in DBD reactor driven by bipolar pulse power and alternating current power," *Vacuum*, **143**, 87~94(2017).
 4. Raso, J. and Heinz, V., Pulsed Electric Field Technology in Food Processing Industry : Fundamentals and Applications, Springer, Germany, pp. 97~123(2006).
 5. Usha, R. P., Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Canovas, G. V. and Swanson, B. G., "Inactivation of Escherichia coli and Staphylococcus aureus in model foods by pulsed electric field technology," *Can. inst. Food Sci. Technol. J.*, **28**(2), 167~171(1995).
 6. Aronsson, K., Lindgren, M., Johansson, B. R. and Rönner, U., "Inactivation of microorganisms using pulsed electric fields: The influence of process parameters on escherichia coli, listeria innocua, leuconostoc mesenteroides and saccharomyces cerevisiae," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **2**(1), 41~54(2001).
 7. Ohshima, T., Okuyama, K. and Sato, M., "Effect of culture temperature on high-voltage pulse sterilization of *Escherichia coli*," *J. Electrostat.*, **55**, 227~235(2002).
 8. Ohshima, T., Tanino, T. and Kameda, T., "Engineering of operation condition in milk pasteurization with PEF treatment," *Food Control*, **68**, 297~302(2016).
 9. Cho, S. Y. and Chang, I. S., "Solubilization of wasted sludge using high voltage impulse technique," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **31**(3), 257~262(2017).
 10. Lee, J. S. and Chang, I. S., "Membrane fouling control and sludge solubilization using high voltage impulse (HVI) electric fields," *Proc. Biochem.*, **49**, 858~862(2014).
 11. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J., "Protein measurement with the folin phenol reagent," *J. Biol. Chem.*, **193**, 265~275(1951).
 12. Michel, D. B., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F., "Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances," *J. Anal. Chem.*, **28**(3), 350~356(1956).
 13. APHA, AWWA and WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th, USA, pp. 2-53~58, 4-95~96, 4-113~114, 5-12~15(1995).
 14. Pataro, G., Lisi, M. D., Donsi, G. and Ferrari, G., "Microbial inactivation of E. coli cells by a combined PEF-HPCD treatment in a continuous flow system," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **22**, 102~109(2014).
 15. Lukes, P. and Locke, B. R., "Plasmachemical oxidation processes in a hybrid gas - liquid electrical discharge reactor," *J. Phys. D Appl. Phys.*, **38**, 4074~4081(2005).
 16. Lukes, P., Dolezalova, E., Sisrova, I. and Clupek, M., "Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂," *Plasma Sour. Sci. Technol.*, **23**, 015019(2014).