

RESEARCH NOTE

멀티 플라즈마 공정을 이용한 하수 미생물의 불활성화

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육원

Inactivation of Sewage Microorganisms using Multi-Plasma Process

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park^{1)*}

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

¹⁾Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

Abstract

For the field application of dielectric barrier discharge plasma reactor, a multi-plasma reactor was investigated for the inactivation of microorganisms in sewage. We also considered the possibility of degradation of non-biodegradable matter (UV₂₅₄) and total organic carbon (TOC) in sewage. The multi-plasma reactor in this study was divided into high voltage neon transformers, gas supply unit and three plasma modules (consist of discharge, ground electrode and quartz dielectric tube). The experimental results showed that the inactivation of microorganisms with treated water type ranked in the following order: distilled water > synthetic sewage effluent >> real sewage effluent. The dissolved various components in the real sewage effluent highly influenced the performance of the inactivation of microorganisms. After continuous plasma treatment for 10 min at 180 V, residual microorganisms appeared below 2 log and UV₂₅₄ absorbance (showing a non-biodegradable substance in water) and TOC removal rate were 27.5% and 8.5%, respectively. Therefore, when the sewage effluent is treated with plasma, it can be expected the inactivation of microorganisms and additional improvement of water quality. It was observed that the NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P concentrations of sewage was kept at the constant plasma discharging for 30 min. On the other hand, NO₃⁻-N concentration was increased with proceeding of the plasma discharge.

Key words : Dielectric barrier discharge plasma, Inactivation, Sewage effluent, *E. coli*

1. 서론

우리나라는 국민의 보건향상, 생태계 보호 차원에서 하수처리장의 방류수 수질기준에 대장균 항목을 신설하여 2003년도부터 상수원의 수질에 영향을 미치는 지역의 하수처리장의 대장균수는 1,000 개/mL 이하, 상수원의 수질에 미치는 영향이 비교적 적은 기타지역의 하수처리장은 대장균수가 3,000 개/mL 이하로 대장균에 대한 관리를 실시하고 있다(Kim 등, 2004; Lee 등, 2008).

그러나 우리나라 4대강 주요 수역의 2002년-2006년간 분원성 대장균 농도 평균치는 수영과 같은 1차적인 신체 접촉뿐만 아니라 유선(遊船)행위와 같은 2차적인 신체접촉에도 위험할만큼 높은 것으로 보고되었다(Kim, 2007).

따라서 방류수 수질기준을 충족시키기 위해서는 하수처리장내에서 방류수역의 이수 특성, 경제성, 효율성 등을 종합적으로 검토하여 적절한 소독방법을 선정하여야 한다. 하수처리장에서 일반적으로 이용될 수 있는 소독 방법은 주로 가열, 자외선 조사, 감마선

Received 25 September, 2013; Revised 6 November, 2013;

Accepted 4 March, 2014

*Corresponding author : Young-Seek Park, Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

Phone: +82-53-850-4571

E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

조사 등의 물리적 방법과 액화 염소, 차아염소산나트륨, 이산화염소 등 각종 염소화합물, 브롬 등의 할로겐족 산화제, 오존이나 과산화수소 등의 비할로겐족 산화제, 이온교환수지와 이온교환막 등의 이온교환제 등의 방법이 있다. 이들 방법 중 많은 소독 조건을 만족시킬 수 있는 소독 방법은 염소, 이산화염소, 오존 및 자외선 조사법 등이다(KWWA, 2011).

이들 방법 중 염소 소독은 잔류염소가 공공수역에 방류됨에 따라 수중생태계에 독성을 유발하므로 잔류염소량을 최소화할 필요가 있다(MOE, 2004). 오존 소독 공정은 우리나라에서 하수도시설기준에 들어 있는 공정 중의 하나이다. 그러나 오존 소독방법을 선정할 경우 잔여오존 대책 및 경제성을 비교하여 신중하게 결정하여야 한다고 알려져 있다(KWWA, 2011).

자외선 소독의 경우 램프의 주기적인 교체가 필요하고 처리수 내 탁도나 색도 등이 존재할 경우 소독효율이 떨어지는 문제점이 발생하는 것으로 알려져 있다(Kim 등, 2004). 또한 하수 중의 유기물이나 질소, 인 등이 존재할 경우 소독능이 크게 감소하는 것으로 알려져 있다(Kim과 Park, 2013b).

최근 기존 소독법을 대체할 새로운 소독 공정이 연구되고 있다. 이들 공정 중에서 수중 유전체 장벽 방전 플라즈마(DBDP, dielectric barrier discharge plasma)는 수중에서 고전압 방전에 의해 플라즈마를 발생시키는 공정이다.

수중에서 고전압 방전에 의하여 플라즈마를 발생시키면 자외선, shock wave 및 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$, $\cdot\text{O}$, $\cdot\text{O}_2$, $\cdot\text{HO}_2$, H_2O_2 와 O_3 등과 같은 라디칼 및 화학적 활성종들이 생성되며 소독 처리 등에 이용된다(Kim과 Park, 2011; Shi 등, 2009).

본 연구진들은 소량의 물을 처리할 수 있는 기본 플라즈마 반응기를 개발한 결과 난분해성 물질과 미생물 불활성화에도 적용 가능한 것으로 보고한 바 있으나, 대량의 물을 처리하기 위해서는 스케일 업용 플라즈마 반응기가 필요하였다(Kim과 Park, 2011). 그러므로 본 연구에서는 플라즈마 반응기의 스케일 업을 위한 기초연구로써 하수 중의 미생물을 대상으로 멀티 플라즈마 반응기에서 의한 미생물 불활성화 성능을 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

인공하수 실험에 사용한 미생물 균주는 한국미생물 배양센터에서 분양받은 *Escherichia coli*(ACTC 15489)를 선택하였다. 배지는 nutrient broth(beef extract 3 g/L, peptone 5 g/L)를 사용하였고, 균의 배양은 300 mL의 삼각 플라스크에 접종한 후, 37°C로 유지되는 배양기에서 대수성장기를 유지하도록 48시간 동안 연속 배양하였다. 48시간이 경과한 후 원심분리기에서 10,000 rpm에서 15분간 원심 분리시켜 3회 이상 세척한 다음 균 stock을 확보하였다. 인공 하수는 Lee 등(2005)의 인공 하수제조법에 따라 제조하였다. COD는 glucose와 sodium acetate(CH_3COONa), T-N은 NH_4Cl , T-P는 K_2HPO_4 와 KH_2PO_4 , SS는 kaolin을 이용하여 원하는 농도로 조절하여 제조하였으며, 실험에 따라 농도를 변화시켜 사용하였다.

미생물 불활성화 실험에 사용한 실제 하수는 경북 소재 K 하수처리장의 2차 침전지 방류수와 용존공기 부상 공정의 유출수를 사용하였다. K 하수처리장에서는 2차 침전지 방류수를 용존공기부상 공정(DAF, dissolved air flotation)과 응집제를 이용하여 인을 제거한 후 소독 공정인 UV 불활성화 공정을 거쳐 방류한다. 하수처리장에서 채취한 2차 침전지 유출수는 유리섬유여과지(GF/C)로 여과하여 2차 침전지에서 침전되지 않고 부상한 슬러지를 제거한 후 냉장보관 후 사용하였다. 용존공기부상 공정을 거친 유출수는 슬러지가 거의 없는 상태이기 때문에 여과하지 않고 바로 실험에 사용하였다. 2차 침전지 유출수와 용존공기 부상 공정 유출수 모두 3일 이내에 실험에 사용하였고 3일이 지나면 폐기하고 다시 하수처리장에서 채취하여 실험에 사용하였다.

모든 불활성화 실험에 사용된 반응기의 부피는 5 L이었다. 플라즈마 반응기 시스템은 방전 전극, 유전체 및 1개의 접지 전극으로 이루어진 플라즈마 모듈, 공기 펌프와 로터미터로 이루어진 공기 공급장치, 정전압 공급기와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 등 3부분으로 나누어진다. 멀티 플라즈마 반응기의 모듈 개수는 실험 목적에 따라 1~5 개를 사용하였다. 플라즈마 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였

으며 공기 펌프에서 발생한 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 공급하였다. 1차 전압은 정전압 공급기를 이용하여 전압을 80 ~ 220 V로 조절한 후 네온트랜스(15 kV, 20 kHz)에서 고전압을 발생시켜 전극에 공급하였다.

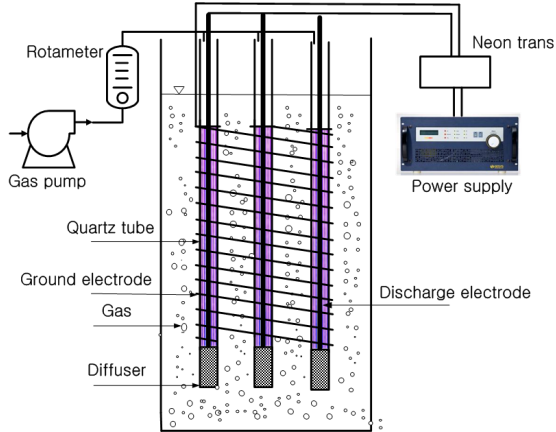


Fig. 1. Schematic diagram of a multi plasma reactor system.

2.2. 분석 및 측정

인공하수를 이용한 *E. coli* 불활성화 실험은 균 stock 용액 1 mL를 증류수와 전해질이 들어 있는 5 L의 반응기에 넣고 10^{10} CFU/mL가 되도록 설정한 다음, 불활성화 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하였다. 균의 집중과 계수는 주입평판법을 이용하여 클린 벤치에서 이루어졌다. 실험 오차를 줄이기 위해 1개의 시료당 5개의 평판을 만들어 사용하였으며, 시료 채취 후에는 수중에 잔존하는 산화제에 의해 지속적인 불활성화가 진행되는 것을 막기 위해 중화제 (neutralizer, 14.6% sodium thiosulphate와 10% sodium thioglycolate) 10 µL를 투입하여 연속적으로 희석하여 nutrient agar에 투입한 다음 37°C로 유지되는 BOD 배양기에서 48시간동안 배양한 뒤 형성된 집락을 집락계수기를 이용하여 계수하였다.

실제 하수의 불활성화 실험은 하수 5 L를 냉장상태에서 상온으로 온도를 높인 후 5 L의 반응기에 투입하고 불활성화 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하였다. 시료 채취 후는 인공하수의 불활성화 실험과 같은 방법으로 실험하였다. TOC 분

석은 TOC 분석기(Phoenix-800)을 이용하여 측정하였다. UV₂₅₄ 흡광도 측정은 UV-Vis spectrophotometer (Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 254 nm에서 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1. *E. coli* 불활성화에 미치는 인공하수의 영향

본 실험을 위한 기초 실험에서 처리 용량이 적은 단일 유전체 장벽 방전 플라즈마 반응기의 스케일 업을 위해 멀티 플라즈마 반응기에 대해 기본 설계 인자와 운전인자에 대해 실험한 결과, 기본 플라즈마 모듈 사이의 간격은 2 cm, 플라즈마 모듈이 3개 장착되고, 고전압을 인가하는 네온트랜스 개수가 3개가 최고이며, 인공하수의 불활성화를 위한 최적 전압 조건이 80 V라는 결과를 얻었다(Kim과 Park, 2013a; 2013b)

멀티 플라즈마 공정에서 *E. coli* 불활성화에 미치는 수질의 영향을 비교·고찰하기 위하여 증류수 및 배출수 허용기준(공공하수처리시설 방류수 수질기준에서 1일 하수처리용량 500 m³이상에서 IV지역의 수질기준인 COD 40 mg/L 이하, SS 10 mg/L, T-N, 20 mg/L 이하, T-P, 2 mg/L 이하)으로 농도를 조절한 인공하수를 이용하였다. 이때 네온트랜스 개수와 플라즈마 모듈이 3개 장착된 멀티 플라즈마를 이용하여 실험하였으며, 네온트랜스에 공급되는 1차 전압은 80 V이었다.

Fig. 2에서 보듯이 증류수에서 *E. coli*는 빠르게 감소되어 90초 만에 대부분의 미생물이 불활성화되는 것으로 나타났다. 인공하수의 방류수 수질기준과 같은 수질 조건에서는 90초의 잔류 미생물 농도는 log 0.477(3 CFU/ mL)로 나타나 증류수보다 약간 낮은 불활성화율을 나타내었으나 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 90초의 불활성화 시간에서 대장균에 대한 가장 높은 규제치를 나타내는 구역인 청정지역, 상수원보호구역 및 경계구역으로부터 상류로 유하거리 10 km 이내 지역, 취수시설로부터 상류로 유하거리 15 km 이내 지역 등의 기준인 100 개/mL를 쉽게 달성할 수 있는 것으로 나타났다(Ministry of Environment, 2002).

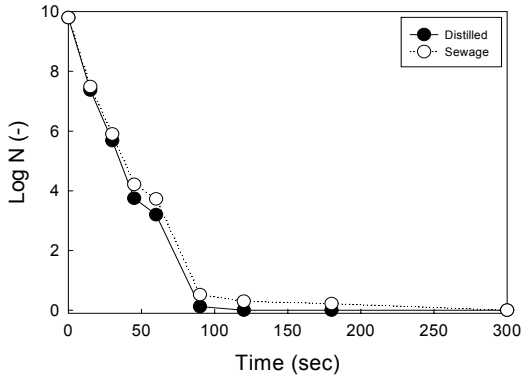


Fig. 2. Effect of water type on the inactivation of *E. coli* in artificial sewage(Kim과 Park, 2013(b)).

3.2. 하수처리장 2차 침전지 유출수의 미생물 불활성화

멀티 플라즈마 공정을 이용한 증류수 및 인공하수 실험을 통해 볼 때, 수중의 *E. coli* 불활성화 성능이 우수한 것으로 나타났다. Pilot 규모의 플라즈마 장치를 개발하고 실제 공정에 응용하기 위해서 실험실 규모의 멀티 플라즈마 공정을 이용한 실제 하수처리장의 2차 침전지 유출수를 채취하여 멀티 플라즈마 반응기의 불활성화 성능을 실험하였다. 네온트랜스3 - 모듈3의 조건에서 1차 전압을 80~220 V로 변화시켰을 때 1차 전압 80 V에서는 초기 미생물 농도 10.1×10^{10} CFU/mL에서 반응 3분까지 빠르게 불활성화가 진행된 후 3분 이후부터 느려지는 경향을 보였다. 1차 전압을 120 V에서 220 V까지 증가시킨 결과 모든 전압에서 80 V와 유사한 불활성화 경향을 나타내었다. 반응 5분에서 80 V, 140 V, 및 220 V에서 잔류 미생물 농도는 각각 4.74 log, 3.7 log 및 3.25 log로 나타났다. 불활성화 시간을 7.5분으로 증가시킨 결과 잔류 미생물 농도는 각각 4.69 log, 3.20 log 및 3.00 log로 나타났고 반응시간을 10분으로 증가시킨 결과 140 V, 180 V, 및 220 V에서 각각 3.10 log, 2.93 log, 2.71 log로 나타났다. 140 V 이상의 1차 전압에서는 방류수 수질 기준인 대장균수인 3.48 log (3,000 CFU/mL)를 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 불활성화 시간의 증가는 불활성화 성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 미생물의 불활성화 성능이 증류수 > 인공 하수 > 실제 하수의 순으로 나타났다. 특히

실제 하수의 경우는 인공 하수와는 다르게 다양한 성분들이 용존 되어 있는데, 이들이 불활성화 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

1차 전압에 따른 UV₂₅₄ 흡광도 변화 경향을 Fig. 3 (b)에 나타내었다. UV₂₅₄ 흡광도 변화는 하수 중 미생물 불활성화 경향과 거의 유사하게 나타났다. 반응 5분의 경우 80 V에서도 23.2%의 UV₂₅₄ 흡광도 제거효율을 나타내었으며 220 V의 경우는 36.7%의 제거효율을 얻었다. 10분의 경우 80 V는 25.2%, 220 V는 41.0%로 나타나 플라즈마 공정을 소독에 이용할 경우 하수 중 미생물의 불활성화 외 난분해성 물질 처리 가능성도 있는 것으로 사료되었다.

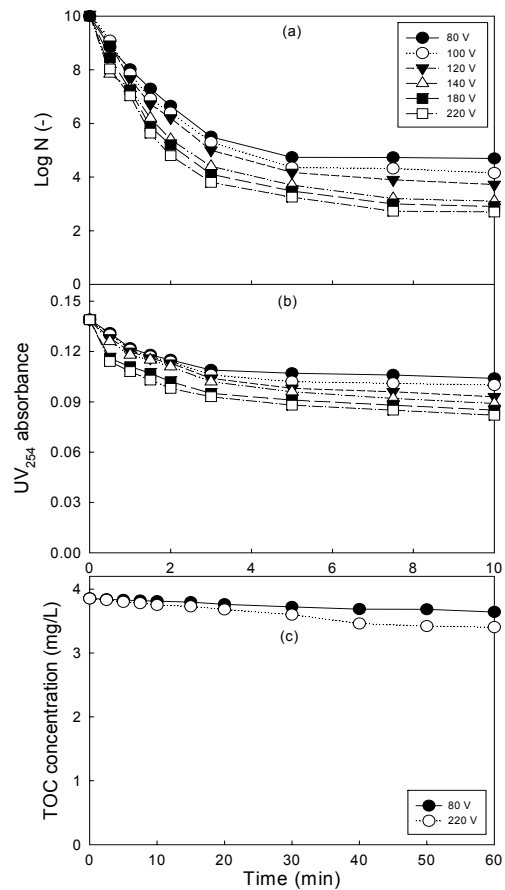


Fig. 3. Effect of 1st voltage on (a) the inactivation of microorganisms (b) UV₂₅₄ and (c) TOC in secondary clarifiers effluent.

Fig. 3(c)에 80 V 및 220 V에서의 TOC 변화를 나타내었다. 80 V는 반응 30분에 3.4%, 60분에는 5.5% 제거되는 것으로 나타났다. 220 V에서는 30분에 5.2%가 제거되었고, 60분에는 11.7%가 제거되었다.

3.3. 용존공기부상 공정 유출수의 미생물 불활성화

K 하수처리장에서는 2차 침전지 유출수를 응집제를 사용하여 응집시킨 후 용존공기부상 공정을 이용하여 처리한 후 방류하기 전에 UV 램프를 이용하여 미생물을 불활성화한 후 방류하고 있다. 현장에서 실질적인 불활성화 공정은 용존공기부상 공정의 유출수를 대상으로 이루어지기 때문에 최종적으로 용존공기부상 공정의 유출수를 대상으로 불활성화 실험을 실시하였다.

Fig. 4(a)에 용존공기부상 공정 유출수의 1차 전압에 따른 미생물 불활성화를 나타내었다. 2차 침전지 유출수의 총 미생물 농도는 $10^{10.1}$ CFU/mL에서 용존공기부상 공정의 유출수에서는 $10^{6.4}$ CFU/mL로 낮아졌다. 이는 2차 침전지 유출수에서는 침전되지 못한 슬러지가 유출되어 GF/C로 여과를 하여 실험에 이용하였지만 공정의 특성상 미생물이 많이 존재하고, 용존공기부상 공정의 유출수는 미생물과 고형물이 응집제에 의해 응집된 후 용존공기에 의해 부상된 후 제거되기 때문에 미생물 농도가 낮아진 것으로 생각되었다. 80 V에서는 10분의 불활성화 후 6.5 log에서 3.1 log로 나타났고, 180 V에서는 7.5분에 잔류 미생물 농도는 2 log 이하로 나타났다. 220 V에서는 5 분에서 잔류 미생물 농도가 2 log 이하로 나타났고 10분에서는 1.55 log로 나타나 80 V에서도 방류수 수질기준을 만족시키는 것으로 나타났으며, 220 V의 경우 10분에서 방류수 수질기준 중 가장 높은 기준인 100 개/mL도 만족할 수 있는 것으로 나타났다. 방류수 수질기준은 대장균에 한해서 기준을 적용하지만, 본 실험은 하수 처리수를 대상으로 총 미생물을 실험하였다. 따라서 하수에 존재하는 총 미생물 중에서 존재하는 대장균의 수는 총 균수보다 적기 때문에 실질적인 잔류 대장균수는 2 log 이하로 나타날 것이라고 판단되었다 (Kim과 Park, 2013c).

Fig. 4 (b)는 용존공기부상 공정 유출수의 1차 전압에 따른 UV₂₅₄ 흡광도 변화를 나타내었다. 2차 침전지

유출수의 UV₂₅₄ 흡광도는 0.139로 나타났으나 용존공기부상 공정 유출수의 경우 0.131로 나타났다. UV₂₅₄ 흡광도는 1차 전압의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 80 V의 경우 10분에 10.7%, 30분 후는 22.1%의 UV₂₅₄ 흡광도가 제거되는 것으로 나타났고, 220 V의 경우 10분에 29.0%의 제거효율을 30분에는 34.4%의 제거효율을 나타내었다.

Fig. 4 (c)는 1차 전압에 따른 TOC 변화를 나타내었다. 80 V는 반응 30분에 3.7%, 60분에는 6.8% 제거되는 것으로 나타났다. 220 V에서는 30분에 8.8%가 제거되었고, 60분에는 13.9%가 제거되어 2차 침전지 방류수보다는 처리효율이 다소 증가하였는데, 이는 수중의 다양한 물질들이 응집제와 용존공기부상 공정에서 제거되어 플라즈마에서 발생하는 이온화 가스가 수중의 유기물질과 반응 시 불활성화할 미생물도 적을 뿐만 아니라 경쟁할 다른 물질이 적어졌기 때문에 TOC 처리효율이 약간 증가한 것으로 사료되었다.

하수 방류수를 플라즈마로 처리할 경우 미생물 불활성화 효율이 높고 UV₂₅₄ 흡광도 및 TOC 농도도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 수중에는 TOC와 같은 유기물질 외 질소와 인 성분이 존재하는데 플라즈마 처리가 수중의 질소와 인 농도에 미치는 영향에 대해 관찰하였다. Fig. 5에 플라즈마 처리가 용존공기부상 공정 유출수의 수질(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P)에 미치는 영향에 대해 관찰하였다. 용존공기부상 공정 유출수의 NH₄⁺-N 농도(Fig. 5(a))는 0.33 mg/L이었으며 1차 전압이 80~220 V로 변하여도 플라즈마 반응에 의해 NH₄⁺-N 농도는 변하지 않는 것으로 나타났다. NO₃⁻-N의 경우 초기 농도는 9.59 mg/L이었으나 플라즈마 반응이 진행되면서 농도 변화가 나타났다. 80 V에서는 30분 후 9.57 mg/L로 나타나 NO₃⁻-N 농도 변화가 없는 것으로 나타났다. 140 V에서는 2.5분에 10.41 mg/L로 증가하였으며, 30분 후 11.2 mg/L로 증가하였다. 180 V에서는 30 분후 12.24 mg/L로 증가하였으며, 220 V에서는 2.5분에 11.18 mg/L로 증가하였고, 30분에서는 12.6 mg/L로 증가하였다.

PO₄³⁻-P는 초기 농도가 0.22~0.23 mg/L로 나타났다. 전압별로 PO₄³⁻-P 농도 변화가 있는 것으로 보이나 80 V와 180 V의 PO₄³⁻-P 농도와 140 V와 220 V의 PO₄³⁻-P 농도가 유사한 것으로 나타나 용존공기부상

공정의 유출수의 PO_4^{3-} -P 농도는 플라즈마 반응에 의해 크게 변하지 않는 것으로 판단되었다. Kim과 Park(2012)은 양액 재배에 사용하는 양액을 플라즈마를 이용하여 처리하였을 때 NH_4^+ -N과 PO_4^{3-} -P 농도는 변화가 없으나 NO_3^- -N은 농도가 증가한다고 한 보고와 같은 결과를 얻었다. 이와 같은 현상은 플라즈마 반응을 위해 공급하는 공기 중의 질소가 방전 현상을 통해 질산을 만들기 때문에 NO_3^- -N이 증가하는 것으로 판단되었다(MOE, 2004).

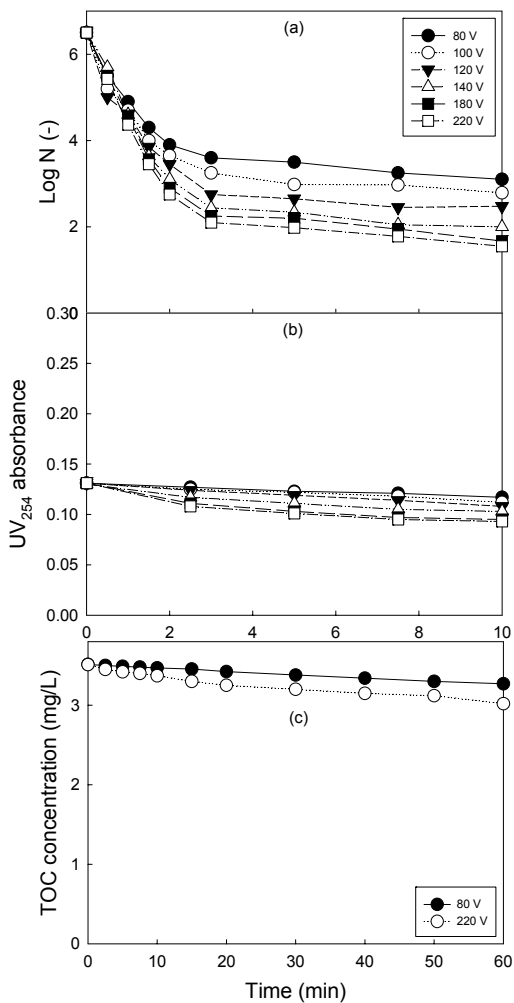


Fig. 4. Effect of 1st voltage on (a) the inactivation of microorganisms (b) UV_{254} absorbance and (c) TOC in the DAF effluent.

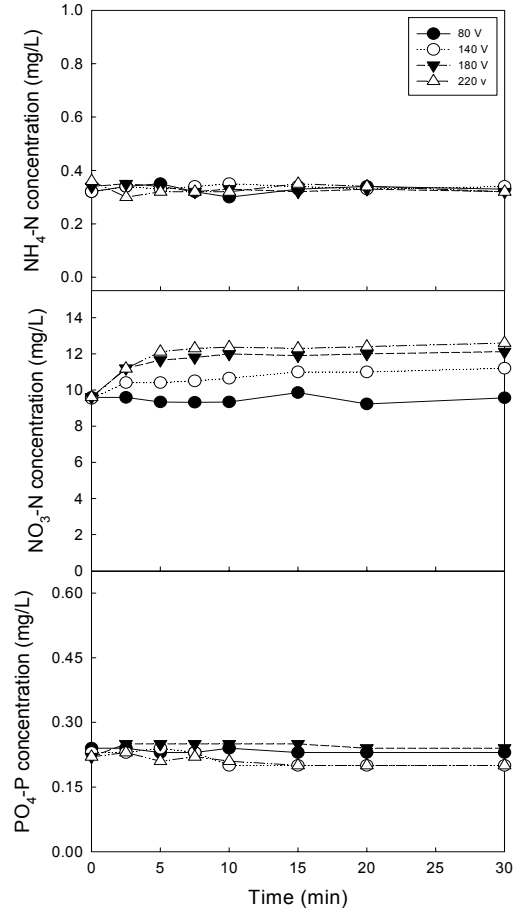


Fig. 5. Effect of 1st voltage on the of water quality of DAF effluent (a) NH_4^+ -N, (b) NO_3^- -N, (c) PO_4^{3-} -P.

3.3. 연속 운전에서 용존공기부상 공정 유출수의 미생물 불활성화

반응기의 실질적인 운전 능력을 검증하기 위하여 용존공기부상 공정의 유출수를 연속 공정으로 운전하여 실험실 규모 플라즈마 반응기의 최종 성능을 평가하였다. Fig. 6(a)에 1차 전압에 따라 연속 운전 시간에 따른 미생물 불활성화 정도를 나타내었다. 초기 미생물 농도는 6.8 log이었으며, 80 V에서 법적 허용치인 3.48 log 이하의 잔류 미생물 농도(안전인자를 고려하여 대장균 농도 대신 총 미생물 농도를 기준으로 사용)를 얻을 수 있는 불활성화 시간은 10분, 140 V이상의 전압에서는 5분이 소요되는 것으로 나타났다. 180 V

와 220 V에서는 10분에 2 log 이하로 나타나 실질적인 미생물 수는 100개 이하로 불활성화할 수 있는 것으로 나타났다.

Shin과 Lee(2005)는 무전극 UV 램프를 이용한 하수 소독에서 최적 전압은 300 W이며, 99.9% 제거에 5분이 소요된다고 보고하였다. Han 등(2003, 2011)은 Pulsed UV등을 이용한 하수소독에서 30분 동안 소독한 결과 초기 총 미생물수 1800 개/mL에서 30분 후 잔류 총 미생물 수는 1000 개/mL라고 보고하였다. 본 실험에서는 네온트랜스 3개를 이용하였으며 180 V의 전압을 인가하면 총 전력은 133 W가 소요된다. 실험 조건, 대장균 농도 등이 달라서 정확한 비교가 어렵지만 Shin과 Lee(2005)의 99.9% 제거에 소요된 전력은 25 W.h, Han 등(2003)은 500 W.h, 본 연구는 22.2 W.h가 필요하였다. 소독 성능도 99.9% 제거에 본 연구는 3분 이하, Shin과 Lee(2005)는 5분, Han 등(2003, 2011)은 50%가 제거되어 UV 소독 공정보다 성능과 경제성 면에서 우수한 것으로 판단되었다.

Fig. 6 (b)에 UV₂₅₄ 흡광도 변화를 나타내었다. 초기 UV₂₅₄ 흡광도는 0.131이었으며 플라즈마 반응시간에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 80 V에서는 반응 10분에서는 14.5%의 UV₂₅₄ 흡광도가, 30분에서는 26.4%의 UV₂₅₄ 흡광도가 제거되는 것으로 나타났다. 220 V(10분에 29.0% 제거)과 180 V(10분에 27.5% 제거)의 제거효율을 비교할 때 UV₂₅₄ 흡광도 감소 경향이 큰 차이를 보이지 않고 있는 것으로 나타났다. 이것은 Fig 6(a)의 미생물 불활성화에서도 유사한 현상이 관찰되었으며, 2 log 부근의 잔류 미생물 농도와 UV₂₅₄ 흡광도 제거 효과를 고려하면 180 V가 최적 전압인 것으로 사료되었다.

Fig. 6(c)에 1차 전압에 따른 TOC 농도 변화를 나타내었다. 초기의 TOC 농도는 3.51 mg/L이었으며, 80 V에서는 10분 후 0.9%의 제거효율을, 140V에서는 3.9%, 180 V에서는 8.3%, 220 V에서는 10.3%의 제거효율을 각각 나타내었다. 30분 후 80 V에서는 2.9%의 제거효율을, 140 V에서는 6.7%, 180 V에서는 13.6%, 220 V에서는 17.2%의 제거효율을 각각 나타내었다.

플라즈마 공정으로 하수처리장 유출수를 처리할 경우 180 V의 1차 전압으로 운전할 경우 체류시간 10

분에서 방류수 수질기준치 이하로 유지할 수 있을 뿐만 아니라 난분해성 물질을 나타내는 UV₂₅₄ 흡광도 제거효율은 27.5%, TOC는 8.5%가 되는 등의 부수적인 효과도 있는 것으로 나타났다.

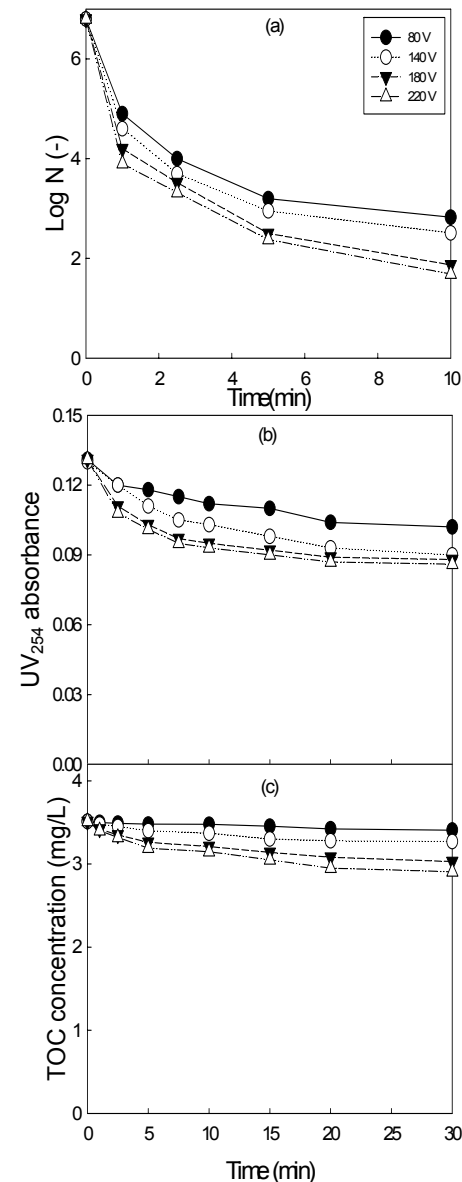


Fig. 6. Effect of 1st voltage on (a) the inactivation of microorganisms (b) UV₂₅₄ absorbance and (c) TOC in the secondary clarifiers effluent.

4. 결 론

처리량이 소량인 단일 플라즈마 공정을 대량의 물을 처리하기 위한 멀티 플라즈마 공정으로 개발하기 위한 연구로써 인공 하수와 실제 하수 중의 미생물 불활성화 실험을 실시하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 증류수와 인공 하수에서 80 V의 1차 전류에서 *E. coli*는 90초 만에 대부분의 미생물이 불활성화되는 것으로 나타났으며, 불활성화 효율 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

2) 하수처리장의 2차 침전지 유출수(초기 미생물 농도, $10^{10.1}$ CFU/mL)를 대상으로 불활성화 실험을 한 결과 220 V에서 10분간의 실험에서 잔류 미생물 농도는 2.71 log로 나타났으며, 불활성화 시간의 증가는 불활성화 성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 하수처리장의 용존공기부상 유출수(초기 미생물 농도, $10^{6.4}$ CFU/mL)를 대상으로 불활성화 실험을 실시한 결과 220 V에서는 10분에서는 잔류 미생물 농도가 1.55 log로 나타났다. 실제 하수의 미생물 불활성화가 인공하수보다 낮게 나타났다.

3) 플라즈마 반응에 의해 하수 처리수 중의 NH_4^+-N 와 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 농도는 변하지 않는 것으로 나타났고, NO_3^--N 의 경우 초기 농도는 9.59 mg/L이었으나 220 V에서는 반응 30분에서는 12.6 mg/L로 증가하였다.

4) 용존공기부상 공정 유출수에 대한 연속 운전 실험에서 180 V에서는 체류시간 10분에서 잔류 미생물 농도가 2 log 이하로 나타나 플라즈마 공정을 이용한 하수의 불활성화 효율이 높은 것으로 나타났다. 수중의 난분해성 물질을 나타내는 UV₂₅₄ 흡광도 제거율은 27.5%, TOC는 8.5%가 되는 등의 부수적인 수질 향상도 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(일반연구자 지원사업, 기본연구 유형II, 과제번호: 2010-0020916)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Beck, Y. S., Sohn, J. S., 2006, Studies on the effect of

water quality parameters on total coliform concentrations in sewage effluents, *J. Kor. Soc. Wat. Qual.*, 22(1), 166-171.

Kim, D. S., Park, Y.S., 2011, A basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment, *J. Environ. Sci.*, 20(5), 623-630.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Change of hydroponic components by plasma treatment, *J. Environ. Sci.*, 21(3), 363-368.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2013a, Development of multi dielectric barrier discharge plasma reactor for water treatment, *J. Environ. Sci.*, 22(7), 863-872.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2013b, *E. coli* disinfection using multi plasma reactor, *J. Environ. Health Sci.*, 39(2), 187-195.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2013c, Inactivation of microorganisms in sewage using pilot plasma reactor, *J. Environ. Health Sci.*, 39(3), 288-298.

Kim, D. W., 2007, To disinfect thoroughly national sewage treatment plant effluent, <http://waterjournal.blog.me/110019790227>.

Kim, Y. R., Han, B. S., Kim, J. K., Kang, H., 2004, Disinfection of total coliforms in sewage treatment effluent using electron beam, *J. Kor. Soc. Wat. Qual.*, 20(4), 376-381.

Korea Water and Wastewater Works Association, 2011, Ministry of the Environment established sewer facility criteria, 555-557.

Lee, J. H., Jang, S. C., Kwon, H. K., Kim, D. W., 2005, A study on efficiency of SBR process by composition of artificially wastewater, *J. Environ. Health Sci.*, 31(2), 99-106.

Lee, M., K., Jung, K. S., Kam, S. K., 2008, A study on the disinfection of coliform group in the effluent of sewage plant by high voltage electric field treatment, *J. Environ. Sci.*, 17(7), 817-826.

Ministry of Environment, 2002, General guidelines for business transactions handled the installation of the sewage treatment plant disinfection facilities.

Ministry of Environment, 2004, Water treatment plant efficiency advanced treatment technology - developing cost-effective water treatment ozone generator.

Shi, J., Bian, W., Yin, X., 2009, Organic contaminants removal by the technique of pulsed high-voltage discharge in water, *J. Hazard. Mat.*, 171, 924-931.

- Shin, D. H., Lee, Y. T., 2005, Manufacturing and characteristics of the electrodeless UV lampn for disinfection of the sewage effluent, J. Korean Ind. Eng. Chem., 16(4), 570-575.
- Han, D. H., Lee, K. K., Lee, Y. T., 2003, The development of electrodeless UV lamp by the sewage effluent disinfection, Appl. Chem., 7(2), 639-642.
- Han, J. H., Lee, S. J., Her, N. G., 2011, A study of disinfection of total coliforms in CSOs by by pulsed UV irradiation, 2011 Kor. Soc. Wat. Wastewat. · Kor. Soc. Wat. Qual. Joint Conference Proceedings, 241-242.