멀티 플라즈마 반응기를 이용한 *E. coli* 소독

김동석 · 박영식*

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 기초교육원

E. coli Disinfection Using a Multi Plasma Reactor

Dong-Seog Kim and Young-Seek Park*

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

*Faculty of Liberal Education, Daegu University

ABSTRACT

Objectives: For the practical application of the dielectric barrier discharge plasma reactor, a plasma reactor able to manage large volumes of water is needed. This study investigated the possibility of the practical application of a multi-plasma reactor which is a scaled-up version of a single plasma reactor.

Methods: The multi-plasma reactor consists of several high-voltage transformers and plasma modules (discharge, ground electrodes and quartz dielectric tubes). The effects of water characteristics such as voltage (30-120 V), air flow rate (1-5 l/min), number of high-voltage transformers and plasma modules, and water quality on *Escherichia coli* (*E. coli*) disinfection and decrease of COD and UV₂₅₄ absorbance were investigated.

Results: The experimental results showed that at a voltage of over 80 V, most of the *E. coli* were disinfected within 90 seconds. *E. coli* inactivation was not affected by the air flow rate. *E. coli* disinfection in the multi-plasma process showed the traditional log-linear form of the disinfection curve. *E. coli* inactivation performance by transformer 3-Reactor 5 and transformer 3-Reactor 3 were similar. The disinfection performance of the UV process was affected by artificial sewage water. However, the plasma process was less affected by the artificial sewage within the standards for effluent water quality.

Conclusions: Disinfection performance with several low voltages and plasma modules of three to five in number applied to the plasma process was higher than that concentrating a small amount of high voltage through a single plasma reactor. Removal of COD, UV₂₅₄ absorbance, and *E. coli* disinfection with the plasma process were better than with the UV process.

Keywords: Multi-plasma, *E. coli*, disinfection, COD, UV process

I. 서 론

우리나라는 그간 하수처리장 방류수에서 대장균을 규제하지 않았으나 국민의 보건향상 및 생태계 보호 차원에서 우리나라에서는 신설되어 2003년 1월 1일부터 방류수 수질기준에 대장균군에 대한 기준이 신설되어 시행됨에 따라 각 지자체에서는 살균 공정을

설치하고 있는 추세다.¹⁾ 신설된 대장균군은 지역 구분 없이 3000개/ml를 유지하고, 청정지역, 상수원 보호구역 및 경계구역으로부터 상류로 유하거리 10 km 이내 지역, 취수시설로부터 상류로 유하거리 15 km 이내 지역 등은 100개/ml로 강화하여 적용하고 있다.²⁾

살균 방법은 처리장의 시설규모, 방류수역의 특성,

†Corresponding author: Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk, 712-714, Korea, Tel : +82-53-850-4571, Fax : +82-53-850-4369, E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

Received: 8 March 2013, Revised: 15 April 2013, Accepted: 19 April 2013

하수처리과정에서의 대장균군 처리효율 등을 감안하여 결정되어야 하나, 현재까지 현장에 설치된 소독 공정은 염소 소독, 오존 소독 및 자외선 소독 등에 국한되어 있는 실정이다. 지금까지 대규모 처리장에 대부분 설치되어 있었던 염소 소독시설은 소독 부산물인 trihalomethane (THM)의 위해성, 수생 생물에 대하여 급성 및 만성 독성을 나타내고 물고기의 종류, 수를 감소시키는 것으로 나타나 대부분 가동 중단되었다.^{1,2)}

국내에서는 염소 소독 이외의 소독 방법에 대한 설치 실적이 적고 운영 부족 등으로 지자체에서는 소독 방법을 선정하는데 애로가 많다. 염소 소독을 대체하기 위한 여러 가지 대체 소독법 중 가장 많은 공정이 자외선 소독이다. 자외선에 의한 소독은 일반적으로 살균선이라고 불리는 UV-C (253.7 nm)가 세포 내에 존재하는 DNA에 흡수되어 (a) 세포 벽을 손상시키고, (2) 세포의 투수성에 변화를 주며, (3) 세포원형의 콜로이드 특성에 변화를 주고, (4) 효소 활성을 방해하고, (5) 세포 내의 유전정보 물질인 DNA나 RNA에 손상을 입힌다.^{3,5)} 자외선을 이용한 소독은 운전 조작이 간단하고 접촉시간이 짧으며 2차 반응부산물이 발생하지 않는 등의 장점이 있지만 잔류소독효과가 없고 근자외선 등에 노출되었을 때 손상된 DNA가 회복되는 광회복(photoactivation)이 발생하는 단점이 있다.^{5,6)}

오존 소독 공정은 자외선과 같이 대표적인 염소 소독 공정의 대안 공정으로 알려져 있다. 그러나 오존 소독은 오존발생장치 및 배오존 파괴를 위한 장치 등 부속설비가 필요하고, 장치의 가격이 높고 부유물질이나 유기물질이 존재하는 경우 오존 요구량이 증가되어 경제적 타당성이 적은 것으로 알려졌다.^{7,8)}

최근 전자선, 전기분해 및 플라즈마 등 전기화학 기술에 의한 소독법이 기존 소독법들을 대체할 새로운 소독법으로 연구되고 있다. 전기분해 반응에서 발생한 전해수는 소독은 물론 병해충 방제용뿐만 아니라 채소나 과일 표면의 세척수로 사용하는 등 용도와 성능이 다양한 장점이 있다. 그러나 전해수는 전해질이 필요하고 전극의 수명 때문에 유지관리비가 비싼 것으로 알려져 있다.⁹⁻¹¹⁾

수중 플라즈마 공정은 코로나 방전이나 유전체장벽 플라즈마 장치를 이용하여 수중에서 플라즈마를 발생시키는 방법이다. 수중 플라즈마 공정은 약품 투

입이 필요 없고 처리 공정도 간단한 새로운 수처리 공정이다. 반응기의 열화가 방지되고 수표면이나 수중에서 강한 전계를 형성하여 효율적으로 에너지를 전달할 수 있는 장점이 있다.¹²⁾ 수중에서 플라즈마를 발생시키면 다양한 물리, 화학적 공정에 의해 자외선, shock wave 및 OH, H, O, O₂⁻, HO₂, H₂O₂와 O₃ 등과 같은 라디칼 및 화학적 활성종들이 생성되며 이들이 난분해성 물질 처리, 색도 및 오폐수의 살균 처리 등에 이용된다.^{13,14)}

본 연구진들은 소량의 물을 처리할 수 있는 플라즈마 반응기와 전원이 1개인 기본 플라즈마 반응기를 개발한 후 난분해성 물질은 물론 소독 처리에도 적용 가능하다는 것을 보고한 바 있다. 그러나 대규모의 수처리를 위해서는 플라즈마 반응기의 스케일업이 필요하며 이를 위한 스케일업용 멀티 플라즈마 반응기 설계에 대한 기초연구를 수행한 후, 멀티 플라즈마 반응기를 이용한 대장균 소독에 적용하여 스케일업한 반응기의 실제 적용가능성을 고찰하였다.¹⁵⁻¹⁷⁾

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료 및 실험 방법

멀티 플라즈마 반응기의 기초가 되는 단일 플라즈마 반응기의 기본 모듈은 Fig. 1(a)에 나타내었다. 기본 모듈은 접지 전극, 유전체 및 방전 전극으로 이루어져 있으며, 기 연구에서 최적 설계 조건을 도출하였다.¹⁵⁾ 기본 모듈에서 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였다. 방전 전극과 접지 전극은 모두 티타늄을 사용하였다. 방전 전극은 직경이 2 mm인 봉 형 전극을 사용하였고, 접지 전극은 직경이 1 mm인 전극을 스프링 형태로 만든 후

Fig. 1. Schematic diagram of a cross-sectional drawing of basic module and multi plasma reactor.

Fig. 2. Schematic diagram of a multi plasma reactor system.

사용하였다. 기본 모듈을 바탕으로 실험 후 최종 선정된 멀티 플라즈마 반응기의 배열은 Fig. 1(b)와 같다. 방전 전극이 내부에 장착되어 있는 유전체가 spacer에 의해 2 cm간격으로 배치되어 있고, 유전체-spacer 장치 외부에 1개의 접지 전극이 스프링 형태로 감겨있다. 스트리머 형태의 플라즈마가 각 유전체 내부에서 발생한다. 멀티 플라즈마 반응기의 기본 모듈 개수는 실험 목적에 따라 1개-5개를 사용하였다. 실험에 사용한 플라즈마 반응기 시스템의 개요도를 Fig. 2에 나타내었다. 플라즈마 반응기 시스템은 방전 전극, 유전체 및 1개의 접지 전극으로 이루어진 플라즈마 반응기와 공기 펌프와 로터미터로 이루어진 공기 공급장치, 정전압 공급기와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 등 세 부분으로 나누어지며, 반응기의 부피는 5 l이었다(Fig. 2). 플라즈마 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였으며 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.

UV 소독의 경우 네온트랜스 3개를 이용하여 멀티 플라즈마 반응기에 1차 전압을 80 V로 유지할 경우의 전력인 59.8 W와 거의 같은 전력인 10 W 용 살균등(중심파장이 254 nm) 6개를 이용하여 소독 실험에 이용하였다.

인공 하수는 이 등¹⁸⁾의 인공 하수제조법에 따라 제조

하였다. 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.

실험 균주는 한국미생물배양센터에서 분양 받은 *E. coli*(ATCC 15489)를 이용하였다. 배지로는 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.

2. 분석 및 측정

균 stock 용액 1 ml를 증류수와 전해질이 들어 있는 5 l의 반응 장치에 넣고 10^{10} CFU/ml로 설정한 다음, 소독 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 ml를 채취하였다. 균의 접종은 pour plate method에 의해 무균실에서 이루어졌다. 실험 오차를 줄이기 위해 1개의 시료당 5개의 평판을 만들어 사용하였으며, 시료 채취 후에는 수중에 잔존하는 산화제에 의해 계속적인 소독이 진행되는 것을 막기 위해 중화제(neutralizer, 14.6% sodium thiosulphate와 10% sodium thioglycolate) 10 µl를 투입하여 연속적으로 희석하여 nutrient agar에 투입한 다음 37로 유지되는 BOD 배양기에서 48시간 동안 배양한 뒤 형성된 집락을 colony counter를 이용하여 계수하였다.

COD 분석은 Standard methods¹⁹⁾에 준하여 수행하였다. UV₂₅₄ 흡광도 측정은 UV-Vis spectrophotometer (Genesys 5, Spectronic)를 사용하여 254 nm에서 흡광도를 측정하였다. 플라즈마 반응기에 걸리는 전압의 측정은 20 kV의 전압까지 측정 가능한 고전압 probe (Pintek, DP-20K)를 장착한 디지털 오실로스코프 (Rigol, DS1062CA)를 사용하여 측정하였다.

III. 결 과

1. 1차 전압과 공기 공급량이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향

멀티 플라즈마 반응기 개발을 위한 기초 실험에서 Fig. 1(a)의 기본 모듈과 플라즈마에 고전압을 일으키는 고전압 전원인 네온 트랜스수의 최적 조건을 구한

Fig. 3. Effect of 1st voltage on the *E. coli* disinfection.

Fig. 4. Effect of gas flow rate on the of *E. coli* disinfection.

결과 네온트랜스 3개-반응기 5개의 배열이 OH 라디칼 생성지표인 RNO (N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline) 분해율이 가장 높아 기준으로 삼아 실험하였다.¹⁷⁾ Fig. 3에 네온트랜스 3개-반응기 5개인 멀티 플라즈마 시스템에서 공기 공급량을 5 l/min으로 유지하고 1차 전압을 30~120 V로 변화시킨 조건에서 1차 전압이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향을 나타내었다. 1차 전압이 30 V에서는 30초에 10^{10} CFU/ml에서 10^5 CFU/ml까지 감소하였으나 30초 이후 소독 효과가 나타나지 않았다. 50 V의 경우 90초에 10^2 CFU/ml까지 감소하였으나 90초 이후 소독 효과가 나타나지 않았다. 반면 80 V 이상의 1차 전압에서는 90초에 대부분의 *E. coli*가 사멸되는 것으로 나타났다.

Fig. 5. Effect of power-reactor arrange on the of *E. coli* disinfection.

Fig. 4에 공기 공급량이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향을 1차 전압 80 V에서 고찰하여 나타내었다. 공기 공급량이 1~5 l/min으로 변화하여도 공기공급량 변화에 따른 *E. coli* 불활성화는 영향을 받지 않는 것으로 나타나 RNO 분해와는 다른 경향을 보여주었다.

2. 플라즈마 반응기 수와 전원 수 및 하수 성분이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향

멀티 플라즈마 반응기의 설계를 위해 OH라디칼 생성 지표인 RNO 분해에서 나타난 최적 전원-반응기 조합이 1차 전압과 공기 공급량이 다른 조건에서 *E. coli* 불활성화에서 같이 나타나는지 고찰하기 위해 전원 수-반응기 수 조합의 변화가 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다.

전원3-반응기3과 전원3-반응기5의 소독 경향은 거의 유사한 것으로 나타났다. RNO 분해에서는 전원3-반응기5인 조건이 최적이었으며, 전원3-반응기3인 조건은 RNO 느린 것으로 나타났다.¹⁷⁾ 반면 *E. coli* 불활성화에서는 전원3-반응기5과 전원3-반응기3 조건이 유사하게 나타났다.

멀티 플라즈마 공정에서 인공하수의 수질의 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 증류수, 배출수 허용기준(공공하수처리시설 방류수 수질기준에서 배출농도가 높은 1일 하수처리용량 500 m^3 이상에서 IV지역의 수질기준인 COD 40 mg/l 이하, SS 10 mg/l , T-N, 20 mg/l 이하, T-P, 2 mg/l 이하) 및 배

Fig. 6. Effect of water type on the of *E. coli* disinfection.

출수 허용기준 2배의 수질에서 *E. coli* 소독 실험을 실시하였다.

인공하수의 4종류 수질이 배출허용기준과 같은 경우는 증류수와 같은 소독 경향을 나타내었으며, 10^1 CFU/l이하의 차이를 나타내었다. 반면 인공하수 농도가 배출수 허용기준의 2배로 증가하자 초기 소독 속도가 감소하였으며, 최소 잔류 *E. coli* 농도에 도달되는 시간이 90초에서 120초로 증가하였다. 120 초 이후 잔류 *E. coli* 농도는 10^1 CFU/ml를 유지하였다. 배출수 허용기준이 2배인 조건에서 배출수 허용기준을 만족하기 때문에 실제 하수 처리 방류수처리 시에도 수질기준을 만족하면서 소독할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. UV 소독이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향

최근 하수처리장에는 UV 소독 장치가 설치되어 있다. 기존 하수처리장 방류수 소독 기술인 UV 소독과 플라즈마 소독 기술과의 성능 비교를 위해 증류수와 하수처리장 방류수 수질기준을 기준으로 하여 네온트랜스 3개를 1차 전압 80 V로 운전할 경우의 전력인 59.8 W와 거의 같은 전력인 10 W 용 살균등 6개를 이용하여 소독 실험하여 Fig. 7에 나타내었다. UV를 이용하여 증류수에서 소독한 경우 반응 120초에 평형 농도에 도달된 후 미생물 농도의 감소가 일정하게 유지되었다.

인공하수 실험에서 방류수 수질기준에서 UV 공정을 적용할 경우 초기 불활성화 속도가 느려지고 120 초에서의 최저 농도도 10^3 CFU/ml 이상을 나타내었

Fig. 7. Effect of water type on the of *E. coli* disinfection in UV process.

다. 하수의 수질이 방류수 수질기준의 2배가 되었을 때 120초에서 10^4 CFU/ml에 도달된 후 더 이상의 불활성화 없이 지속적으로 유지되었다.

4. UV와 플라즈마 공정이 인공 하수의 COD와 UV₂₅₄ 흡광도에 미치는 영향

E. coli 불활성화는 증류수나 인공 하수 모두에서 플라즈마 공정의 성능이 UV 공정보다 우수한 것으로 나타났다. 플라즈마 공정의 주요 목적은 하수 방류수 중의 미생물을 소독하는데 있으나 플라즈마 공정이 OH 라디칼은 물론 오존과 과산화수소와 같은 산화제가 발생되기 때문에 방류수 중의 유기물질이 추가로 산화될 수 있다. 플라즈마 처리에 의한 질소와 인 성분은 변화가 크지 않은 것으로 나타나 플라즈마와 UV 처리수의 COD 처리를 비교 고찰하였다.²⁰⁾ 또한 플라즈마와 UV 공정에서 정수 공정과 폐수처리 공정에서 난분해성 유기물질의 존재와 분해 정도를 나타내는 지표로 사용한 UV₂₅₄ 흡광도도 비교하였다.^{21,22)}

Fig. 8에서 볼 때 플라즈마 공정의 경우 5분의 처리시간에서 약 2%의 COD가 처리되는 것으로 나타났다, UV 공정의 경우도 약 2%로 나타나 대장균 소독이 완료되는 5분 이내에서의 COD 처리는 기여도가 낮은 것으로 나타났다. 반응시간을 60분으로 증가시켰을 때 플라즈마 공정은 20.6%의 COD가 제거되었고, UV 공정은 14.8%의 COD가 제거되어 플라즈마 공정의 COD 제거율이 좀 더 높은 것으로

Fig. 8. Effect of disinfection process on the COD and UV_{254} absorbance.

나타났다. 이와 같은 결과는 *E. coli* 불활성화가 쉽기 때문에 적은 산화제와 반응시간만으로도 성능 차이가 나지만 COD의 경우 분해가 더 어렵기 때문에 시간이 더 소요되고 차이가 적게 나타나는 것으로 사료되었다. 인공하수의 UV_{254} 는 0.096으로 나타났으며, UV 공정의 경우 반응 5분에 UV_{254} 흡광도는 0.082로 14.6%의 제거율을 나타내었고, 플라즈마 공정은 0.079로 17.7%로 나타났다.

IV. 고 찰

증류수를 이용한 *E. coli* 불활성화는 80 V의 낮은 1차 전압만으로도 달성이 가능한 것으로 나타났다. 플라즈마를 이용한 소독 공정에 적용하는 소독 모델은 크게 4개로 나눌 수 있다. 첫 번째 분류는 미생물의 불활성화 곡선을 설명하는 전통적인 log-linear 형태이다. 두 번째 분류는 전통적인 log-linear, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, log-linear 감소 후에 끌기(tailing) 현상이 나타나는 유형, 지체기+log-linear+끌기가 동시에 나타나는 유형이

속하며, 경험적인 특성과 전형적인 1차 불활성화 속도식을 기초로 하고 있다는 특징을 가지고 있다. 세 번째 분류는 전형적인 log-linear 유형, convex(볼록면)이 나타나는 형태, 2상의 불활성화 속도를 나타내는 형태로 정의된다. 네 번째 분류는 전형적인 log-linear 곡선, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, concave(오목면) 곡선, convex(볼록면)/concave(오목면) 곡선이 나타난 후 끌기 현상이 나타나는 유형들이다.²³⁾ 멀티 플라즈마 반응에서 *E. coli*의 소독은 Figs. 3~7에 나타난 운전인자의 영향에 관계없이 전통적인 log-linear 형태의 소독 곡선을 나타내었다.

공기 공급량은 유전체 내부에서의 절연 유지에 필수적인 뿐만 아니라 공급하는 가스의 종류와 농도에 따라 생성되는 산화제의 농도와도 본 멀티 플라즈마 반응기에 공급하는 공기 공급량은 중요한 운전인자 중의 하나이다. 예비실험 결과 공기를 공급 가스로 이용할 경우 단일 플라즈마 반응기와 멀티 플라즈마 반응기에서의 OH 라디칼 생성의 지표인자인 RNO 분해에 대한 최적 공기 공급량은 각각 4 l/min과 3 l/min으로 유사하게 나타났다. 이는 RNO 분해는 난분해성이기 때문에 소독시간이 많이 소요되고 생성 산화제의 농도와 관련이 있는 공기 공급량이 중요하지만, *E. coli* 불활성화는 80 V라는 낮은 전압에서 소독이 90초라는 매우 빠른 시간에 이루어지기 때문에 공기 공급량은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료되었다. RNO 분해에서의 운전인자인 1차 전압과 공기 공급량은 *E. coli* 불활성화에서 얻은 위의 조건과 다르게 나타났다.¹⁷⁾ 멀티 플라즈마 반응기에서의 설계 조건인 전원과 플라즈마 반응기 수도 RNO 분해와 *E. coli* 불활성화와의 성능이 다르게 나타날 수 있어 플라즈마 반응기 수와 전원 수의 조합이 *E. coli* 불활성화에 미치는 영향을 다시 고찰할 필요성이 있는 것으로 사료되었. 기 보고한 자료에서 RNO 분해를 위해 220 V, 5 l/min으로 운전한 조건에서는 멀티 플라즈마 반응기의 최적 전원과 반응기수의 조합은 전원3-반응기5로 나타났다.¹⁷⁾ 반면 *E. coli* 소독에서는 전원 수 3인 조건에서 전력을 집중하여 반응기 1개에서 플라즈마를 발생시킨 경우는 10^1 CFU/ml에 도달되는데 180초가 소요되어 전원3-반응기5와 전원3-반응기3보다 초기 소독 반응이 느린 것으로 나타났다. 또한 80 V의 전원 3개를 전원1개에서 240 V를

인가하고 반응기를 1개로 실험한 경우의 *E. coli* 불활성화는 300초의 소독시간에서도 잔류 *E. coli* 농도가 10^2 CFU/ml 이상을 나타내어 소독 효과가 가장 낮은 것으로 나타났다. 1차 전압이 80 V인 경우 플라즈마를 일으키는 고전압은 오실로스코프로 측정 한 결과 4.3 kV, 240 V는 15.7 kV로 측정되었다. 고전압이 소량 인가되는 것보다 저전압이 대량 인가되고 플라즈마 반응기가 1개로 집중되는 것보다 3~5개로 분산되는 것이 소독 성능이 더 우수한 것으로 사료되었다.

전기분해 공정의 경우 수질이 전기전도도에 영향을 미치고 산화제 생성 및 소독 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.²⁴⁾ 박과 김²⁵⁾은 전기분해 공정에서 COD, T-N, 및 T-P와 같은 수질이 복합적으로 작용할 때 생성된 산화제가 오염물질과의 산화와 소독과의 경쟁 반응 때문에 RNO 분해와 소독 효율이 감소한다고 보고하였다. 또한 플라즈마 반응기는 전기전도도의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있지만 수경재배용 양액을 플라즈마로 처리하였을 때 양액의 성분이 변화하는 것으로 알려져 있기 때문에, 하수의 수질도 멀티 플라즈마 공정에서의 *E. coli* 불활성화에 영향을 줄 수 있다.²⁰⁾

수질이 소독에 영향을 주는지에 대한 실험 결과 플라즈마 공정의 경우 하수의 수질이 소독에 영향을 주지만 전해질 농도 등에 직접 영향을 받는 전기분해 공정과는 다르게 플라즈마 공정은 수중의 전해질 농도 등에 영향을 받지 않기 때문에 하수 배출수 허용기준 내에서는 수질의 영향이 적은 것으로 사료되었다. 배출수 허용기준의 2배에서 소독 성능이 저해를 받는 것은 수질이 플라즈마 발생 등에 영향을 주기 보다는 발생한 산화제가 미생물 소독에 모두 이용되지 않고 수중의 유기물질이나 다른 물질 분해에 이용되기 때문에 낮은 농도에서는 큰 영향을 주지 않으나 높은 농도에서는 경쟁 관계가 증가하기 때문에 소독에도 영향을 주기 때문인 것으로 사료되었다.

플라즈마 공정의 증류수에서 소독한 결과와 UV 소독 결과를 비교할 때 UV 소독의 경우 초기 미생물 불활성화 속도가 느리고 최저 농도에 도달하는 시간도 30초 느려지는 것으로 나타났다. UV 공정에서 증류수와 인공 하수에서 소독 실험을 행한 결과 인공 하수의 성분이 UV 소독에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었으며, 방류수 수질기준에서 불

활성화의 영향이 적었던 플라즈마 소독에 비해 수질의 영향을 크게 받는 것으로 사료되었다. 인공 하수에서의 플라즈마 소독과 비교할 때 대략 10^3 CFU/ml 이상의 소독능 차이가 나는 것으로 나타나 소독의 경우 플라즈마 소독의 성능이 우수하고 더 경제성이 있는 것으로 사료되었다.

60분의 반응시간에서 플라즈마 공정의 COD가 제거율이 UV 공정의 COD 제거율보다 5.8% 높아 플라즈마 공정의 COD 제거율이 좀 더 높은 것으로 나타났다. *E. coli* 소독과 COD 분해에 소요되는 시간은 큰 차이를 보였는데 이는 *E. coli* 불활성화가 쉽기 때문에 적은 산화제와 반응시간만으로도 소독이 가능하지만 COD의 경우 분해가 더 어렵기 때문에 분해에 소요되는 시간이 더 필요하기 때문인 것으로 사료되었다. 60분의 반응시간에서 UV공정은 55.5%의 제거율을 나타내었고, 플라즈마 공정은 62.5%의 제거율을 나타내어 소독은 물론 COD와 UV₂₅₄ 흡광도 제거도 같은 전력량에서 플라즈마 공정이 UV 공정보다 다소 우수한 것으로 나타났다. UV 공정의 경우 잔류 소독 효과는 없지만 2차 오염 등의 우려는 없다. 플라즈마 공정의 경우 UV 공정보다는 소독 성능이 우수하지만 산기관을 통해 미 반응 플라즈마 가스가 발생되기 때문에 이를 제거한 후 환경에 배출하여야 한다. 플라즈마 반응에서 발생하는 가스의 용존율을 높이면 플라즈마 공정의 성능을 더욱 더 높일 수 있고 배가스 처리율을 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 현재 플라즈마 가스의 용존율을 높이는 방안에 대해 연구를 진행하고 있다. 플라즈마 공정은 UV 공정과 같이 램프 교체와 같은 비용 문제는 발생하지 않으나 설비, 가스 용존장치 등의 설치로 인해 전체적인 경제성은 설치 및 운전 유지비용을 고려하여 평가하여야 할 것으로 사료되었다.

V. 결 론

전원 3개-반응기 5개인 멀티 플라즈마 시스템에서 1차 전압을 30~120 V로 변화시킨 조건에서 80 V이상의 1차 전압에서는 90초에 대부분의 *E. coli*가 사멸되는 것으로 나타났다. 공기 공급량이 1~5 l/min에서 공기 공급량은 *E. coli* 불활성화에 영향을 미치지 않는 것으로 사료되었다. *E. coli* 불활성화에서는

전원3-반응기5과 전원3-반응기3 조건이 유사하게 나타났다. 고전압이 소량 인가되는 것보다 저전압이 대량 인가되고 플라즈마 반응기가 1개로 집중되는 것보다 3~5개로 분산되는 것이 소독 성능이 더 우수한 것으로 사료되었다. 인공하수의 수질이 배출허용기준과 같은 경우는 증류수와 같은 소독 경향을 나타내었으며, 배출수 허용기준의 2배로 증가하자 초기 소독 속도가 감소하였으나 잔류 *E. coli* 농도는 10¹ CFU/ml를 유지하여 실제 하수 처리 방류수처리 시에도 수질기준을 만족하면서 소독할 수 있을 것으로 판단되었다. UV를 이용한 소독 공정은 플라즈마 공정의 증류수에서 소독한 결과와 비교할 경우 초기 미생물 불활성화 속도가 느리고 최저 농도에 도달하는 시간도 30초 느려지는 것으로 나타났다. 인공하수 실험에서 하수의 성분이 UV 소독에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 소독은 물론 COD와 UV₂₅₄ 흡광도 제거도 플라즈마 공정이 UV 공정보다 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

- Kim YR, Han BS, Kim JK, Kang H, Disinfection of total coliforms in sewage treatment effluent using electron beam, *J Kor Soc Wat Qual.* 2004; 20(4): 376-381.
- Ministry of Environment, General guidelines for business transactions handled the installation of the sewage treatment plant disinfection facilities. 2002
- Kim DS, Park YS, Inactivation of *E. coli* by electrolysis+UV process, *J Kor Soc Wat Qual.* 2009; 25(5): 667-673.
- Jung KW, Yoon CG, Jang JH, Hwang HS, Investigation on the application of UV disinfection for reuse of secondary effluent. *Kor Soc on Wat EnvironKor Soc of Wat and Wastewat. 2004 Joint Spring conference Proceeding.* 189-192.
- Kim DS, Park YS, Effect of disinfection process combination on *E. coli* deactivation and oxidants generation. *J Environ Sci.* 2011; 20(7): 891-898.
- Karl GU, Jeannie LD, Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. *Wat Res.* 1994; 28(4): 805-817.
- Park YS, Kim DS, *E. coli* removal using multiple disinfection process, *Proceeding Kor Environ Sci Soc Conf.* 2009; 258-291.
- Pei X, Janex ML, Savoye P, Cockx A, Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Wat Res.* 2002; 36: 1043-1055.
- Nimitkeatkai N, Kim JG. Washing Efficiency of acidic electrolyzed water on microbial reduction and quality of 'Fuji' apples. *Kor J Horti Sci Tech.* 2009; 27(2): 250-255.
- Kim DS, Park, YS. Effect of operating parameters on electrochemical degradation of Rhodamine B by three-dimensional electrode. *J Environ Heal Sci.* 2009; 35(4): 295-303.
- Kim DS, Park YS, A study on the microorganism disinfection and characteristics of discharged water of dielectric barrier discharge plasma systems. *J Environ Heal Sci.* 2012; 38(2): 159-166.
- Moon JH, Lee HD, Lee ME, Park HK, Chon KI, Jong JW, Phenol conversion by pulsed corona discharges in aqueous solution. *Kor Soc Environ Eng, Spring Conference Proceeding.* 2008; 1-3
- Shi J, Bian W, Yin X, Organic contaminants removal by the technique of pulsed high-voltage discharge in water. *J Hazard Mat.* 2009; 171: 924-931.
- Kim DS, Park YS, 2011, A basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment. *J Environ Sci.* 2001; 20(5): 623-630.
- Kim DS, Park YS, Basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment. *J. Environ Sci.* 2011; 20(5): 623-630.
- Kim DS, Park YS, Removal of Rhodamine B dye using a water plasma process. *J Environ Health Sci.* 2011; 37(3): 218-225.
- Park YS, Kim DS, The design of a multi-plasma process. *Proceed Kor Soc Environ Health.* 2011.98.
- Lee JH, Jang SH, Kwon HK, Kim DK, A study on efficiency of SBR process by composition of artificial wastewater. *J Environ Health Sci.* 2005; 31(2): 99-106.
- APH-AWWA-WPCE, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., APHA, Washington D.C., 1992.
- Kim DS, Park YS, Change of hydroponic components by plasma treatment. *J Environ Sci.* 2012; 21(3): 363-368.
- Back YA, Joe WH, Kim JM, Choi YJ., Reduced post-chlorine dosage required for disinfection: improvement with ozonation and GAC process. *J Kor Soc Wat Waste.* 2007; 21(4): 445-452.
- Tezcanli-Guyer G, Ince NH., Degradation and toxicity reduction of textile dyestuff by ultrasound. *Ultraso Sonochem.* 2003; 10: 235-240.
- Baek SE, Kim DS, Park YS, Application of disin-

- fection models on the plasma process. *J Environ Sci.* 2012; 21(6): 695-704.
24. Kim DS, Park YS, Effect of water quality of cooling tower on *Legionella pneumophila* disinfection using Ru/Ti electrode. *J Environ Sci.* 2008; 17(6): 581-589.
25. Park YS, Kim DS, Effect of water quality of artificial sewage on *E. coli* disinfection using electrolysis process. *J Environ Sci.* 2011; 20(9): 1115-1124.