

E. coli 불활성화를 위한 단일 소독 공정의 비교

김동석¹ · 송승구² · 박영식^{3*}

¹대구가톨릭대학교 환경과학과, ²부산대학교 화학공학과, ³대구대학교 보건과학부

A Comparison of Single Disinfection Process for Inactivation of *E. coli*

Dong-Seog Kim¹, Seung-Koo Song², and Young-Seek Park^{3*}

¹Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

²Department of Chemical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

³Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea

Abstract This study was carried out to evaluate the performance of three kinds of single process (electrolysis, UV and ultrasonic process) for the purpose of disinfection of *Escherichia coli* in water. Among the five kinds of electrode material, disinfection performance of Ir electrode was higher than that of the other electrodes. The order of disinfection performance for *E. coli* in single process lies in: electrolysis > UV >> ultrasonic process. Performance of the three single processes was increased with the increase of the electric power. Disinfection efficiency of the three processes was increased with the decrease of the pH. Disinfection of the UV process were decreased by the increase of NaCl dosage and air flow rate. However, ultrasonic process was not affected above two parameters. OH radical was not produced in UV and ultrasonic process. *E. coli* disinfection of the electrolysis process was well agreed with RNO degradation tendency, except pH.

Keywords: disinfection, OH radical, *E. coli*, electrolysis, ultrasonic process, UV process

서 론

소독 공정은 2차 오염 없이 원하는 수준으로 병원성 미생물을 제어하는 공정으로 정수처리 및 하수처리 공정에서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 소독 공정에 대한 지속적인 연구 및 개발에도 불구하고 지난 10년간 병원성 미생물에 의한 지속적인 발병사례가 보고 되고 있어, 소독 공정에 대한 관심 및 중요성이 증가하고 있다 [1].

국내에서는 염소 소독 이외의 소독 방식에 대한 설치실적 및 운영기술 축적 부족 등으로 지자체에서 소독방법 선정에 많은 애로가 발생하고 있다. 최근에는 염소 소독의 단점들로 인하여 여러 가지 대체 소독법들이 개발되었는데, 이 중 화학적 방법으로는 과산화수소, 구리, 철염, 오존, 과망간산칼륨 등이 있고, 물리화학적 방법으로는 이산화티타늄

광촉매 분해반응, 광 소독 등이 있으며, 물리적인 방법으로는 자기장, 마이크로 파, 초음파, 자기장 및 자외선 소독 등의 방법이 있다 [2,3].

이들 여러 소독방법들 중 대부분의 방법들은 염소 소독을 대체할 수 있는 방법으로 인식되지 못하고, 오존과 자외선 조사만이 비교적 정수처리나 하수처리 공정에서 대안으로 채택되고 있다. 그러나 오존 소독은 오존 발생장치 및 배오존 파괴를 위한 장치 등 부속설비가 필요하고, 장치의 가격이 높고 부유물질이나 유기물질이 존재하는 경우 오존 요구량이 증가되어 경제적 타당성이 적은 것으로 알려졌다 [3,4].

파장이 짧은 자외선의 조사는 살생물제 (biocide) 효과가 있는데, DNA 복제를 방해하는 thymine dimers를 DNA내에 생성하여 살균시키는 것으로 알려져 있으며, 파장이 254 nm에서 그 효과는 최대인 것으로 알려져 있다. 자외선 조사는 모사 배관 시스템에서 염소 소독, 가열, 오존 소독보다 미생물 살균에 효과적이며, 소독 부산물이 발생하지 않아 수질에 영향을 주지 않고, 배관을 부식시키지 않는 등의 장점이 있다. 그러나 자외선 살균 시스템은 미생물 회복 (repair)

*Corresponding author

Tel: +82-53-650-8043, Fax: +82-53-650-8049

e-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

의 잠재적인 위험을 가지고 있어, 미국과 유럽에서는 후처리로 염소 소독이 필요한 것으로 보고 되고 있다 [3,5].

최근 기존의 소독제로 처리하기 어려운 병원성 미생물들이 새롭게 발견되고, 그에 따라 기존 소독 공정과는 다른 새로운 소독 기술이 개발되고 있다. 초음파 공정은 기존의 공정으로 주로 실험실에서 미생물 파쇄에 많이 이용되고 있으며, 정수나 하수 처리 공정에는 거의 이용되지 않고 있지만 세포조직을 단락 및 파괴시키는 작용을 하기 때문에 조류 제거에 이용하기도 하며, 최근 주로 식기나 주방용품 등 주로 소규모의 소독 분야에서 새로이 이용되고 있는 공정이다 [6,7].

전기화학적 소독이 염소 소독에 대한 대안으로 떠오르고 있는데, 전기분해에 의한 소독은 전기분해에 의한 소독은 양극 표면에서 $\cdot\text{OH}$ 이 발생하고, 염소 이온이 존재시 유리 염소인 차아염소산과 차아염소산 이온이 생성되어 이들 라디칼과 소독제가 미생물을 소독시키는 것으로 알려져 있는데, 다른 소독 기술에 비해 초기 투자비가 저렴하고 운전 및 유지관리가 용이한 대체 소독기술로 인식되고 있다 [8,9].

최근에는 새로운 공정의 개발 외 개별 소독 공정을 조합할 경우 각 공정의 단점을 보완하여 시너지 효과가 발생하는 복합 소독 공정에 대한 연구가 진행되고 있다. 시너지 효과가 존재할 경우 소독제의 사용량, 전력 소비량 및 반응 시간 등을 줄일 수 있기 때문에 경제적인 측면이나 효율적 측면에서 중요하지만 복합 소독 공정에 대한 통합적이고 정량적인 연구가 수행된 바 없다 [10].

본 연구의 목적은 복합 소독 공정의 개발을 위한 기초 연구로서 전기분해, UV 및 초음파 소독 공정 등 단독 공정의 성능을 비교하였다. 단일 공정의 성능에 영향을 미칠 수 있는 전력, NaCl 첨가량, pH 및 공기 공급량 등의 인자의 영향을 고찰하여 각 인자에 따라 OH 라디칼의 생성여부를 알 수 있는 지표물질인 N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO) 분해에 대해서도 고찰하여 공정의 결합에 대한 기초 자료로 활용하고자 하였다 [11].

재료 및 방법

실험재료

실험 균주는 *E. coli*를 선택하였으며, 한국미생물배양센터에서 분양받았다. 대표적인 종으로 *E. coli* ACTC 15489를 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 대수 성장기를 유지하도록 48시간 동안 연속 배양하였다. 48시간이 경과한 후 원심분리기에서 10,000 rpm에서 15분간 원심 분리시켜 3회 이상 세척한 다음 균 stock을 확보하였다.

실험에 사용한 모든 전극의 크기는 63 × 110 mm (면적 : 41.05 cm²)이었다. 전기분해 반응은 직류 전원공급기의 전류

를 조절하여 전력을 10~30 W로 변화시켰다. UV 램프는 4, 6, 8, 및 10 W의 UV-B 램프와 UV-C 램프를 실험에 맞게 1~3개 조합하여 사용하였다. 초음파는 주파수가 20 kHz 인 초음파 장치 (Sonics, VCX500, Tokyo, Japan)를 이용하여 출력을 5~20 W로 조절하여 실험하였다. 반응기는 아크릴로 제작하였으며, 반응 부피는 1 L이고, 혼합을 위하여 교반기를 이용하여 교반하였다. 전기분해 반응 적용시 전극 간격은 2 mm로 고정하였다.

분석 및 측정

실험방법으로는 균 stock 용액 1 mL를 증류수와 전해질이 들어 있는 1 L의 반응 장치에 넣고 10¹⁰ CFU/L로 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 thiosulphate 와 10% sodium thioglycolate) 10 μL를 투입하여 연속적으로 희석하여 nutrient agar에 투입한 다음 37°C로 유지되는 BOD 배양기에서 48시간동안 배양한 뒤 형성된 집락을 colony counter를 이용하여 계수하였다. 실험은 5회 실시하고 평균값과 표준편차를 그림에 나타내었다.

또한 오염물질의 산화나 소독에 영향을 주는 요소인 $\cdot\text{OH}$ 은 생성량을 직접적으로 측정하기 어려워 전기분해시 $\cdot\text{OH}$ 과 선택적으로 반응하는 것으로 알려진 N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO)의 표백효과에 의해 확인할 수 있다 [11]. 세 공정에서 $\cdot\text{OH}$ 생성을 확인할 수 있는 RNO의 분해를 측정하여 간접적으로 $\cdot\text{OH}$ 에 영향을 미치는 인자에 대하여 고찰하였다 (초기농도 : 50 mg/L).

RNO는 흡광광도계를 이용하여 440 nm에서 흡광도를 측정하여 미리 만들어진 검량선을 이용하여 농도를 계산하였다.

결과 및 고찰

전기분해 반응에서 전극과 UV 공정에서 램프의 선정

전기분해 공정에서 UV, 초음파 소독 공정과의 성능 비교를 위해 사용할 전극을 선정하기 위하여 시중에서 구입할 수 있는 Pt, Ir 전극 및 염소 발생용 전극인 JP130 (Ru, 45%; Ti, 50%; 기타, 5%), JP202 (Ru, 25%; Ir, 25%; 기타, 50%), JP520 (Pt, 50%; 기타, 50%) 5 종류의 촉매성 산화물 전극의 대장균 소독 성능을 8 W, NaCl 0.5 g/L로 실험조건을 고정하여 실험하여 Fig. 1에 나타내었다.

Ir 전극은 초기 대장균균수 1 × 10¹⁰ CFU/L에서 10분 후 10⁰ CFU/L로 나타났고, JP202 전극의 경우 10¹ CFU/L, Pt와 JP130 전극은 10² CFU/L, JP520 전극은 10³ CFU/L로

나타나 전극의 성능은 Ir > JP202 > JP130 > Pt > JP520의 순서로 나타났다. 향후 실험은 소독 성능이 가장 높았던 Ir 전극을 이용하여 실험하였다. 단일 성분인 Pt와 Ir 전극 중 Ir 전극의 성능이 우수하였고, 혼합 전극인 JP130, JP202 및 JP520 전극에서 Ir 성분이 혼합된 JP202 전극의 성능이 세 전극에서 가장 우수한 것으로 나타나 5종류의 전극의 성능을 비교해보면 전극 성분 중 Ir 성분이 소독 성능을 향상시키는 것으로 사료되었다.

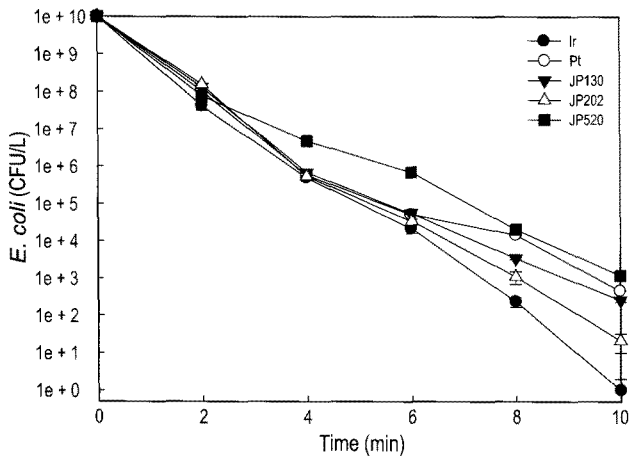


Fig. 1. Effect of electrode type on the disinfection of *E. coli*.

UV 램프의 종류가 대장균 소독에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 램프 전력이 8 W인 UV-B 램프와 UV-C 램프를 이용한 대장균 소독 성능을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 UV-B 램프보다는 살균용 램프인 UV-C 램프에 의한 소독 성능이 우수한 것으로 나타나 이후 실험은 UV-C 램프를 사용하여 실험하였다.

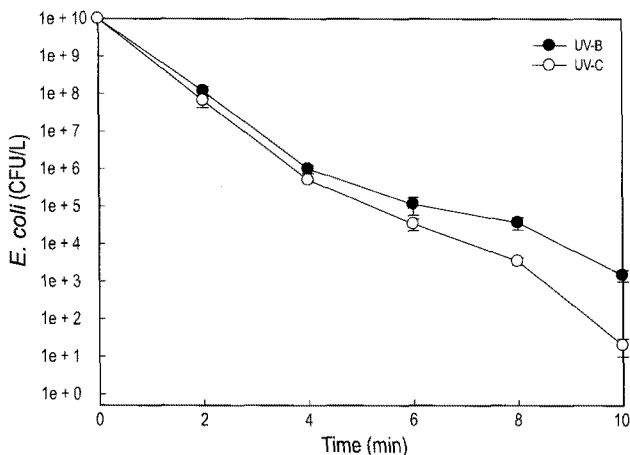


Fig. 2. Effect of UV lamp type on the disinfection of *E. coli*.

전력 변화에 따른 각 공정의 소독 성능

전극 선정 실험에서 선정된 Ir 전극, UV 램프 실험에서

선정한 UV-C 램프를 이용하여 전기분해, UV 및 초음파 공정에서 전력의 변화에 따른 소독 성능을 Fig. 3에 나타내었다. 초음파 공정의 경우 기기 특성상 전체 500 W에 대해 1%로 출력을 조절할 수 있기 때문에 1%인 5 W씩 증가시켜 실험하였다.

모든 공정에서 전력이 증가함에 따라 소독 성능이 증가하는 것으로 나타났다. 전기분해 공정 (Fig. 3(a))의 경우 12 W 이상의 전력에서는 10분이 되면 잔류 대장균수가 100 CFU/L 이하로 나타났다. UV 공정 (Fig. 3(b))의 경우 16 W와 20 W가 10분의 소독시간에서 잔류 대장균수가 100 CFU/L 이하로 나타났다. 반면 초음파 공정 (Fig. 3(c))의 경우 20 W에서도 10^3 CFU/L의 대장균수가 검출되어 세 종류의 단일 소독 공정 중에서 성능이 가장 낮은 것으로 나타났다.

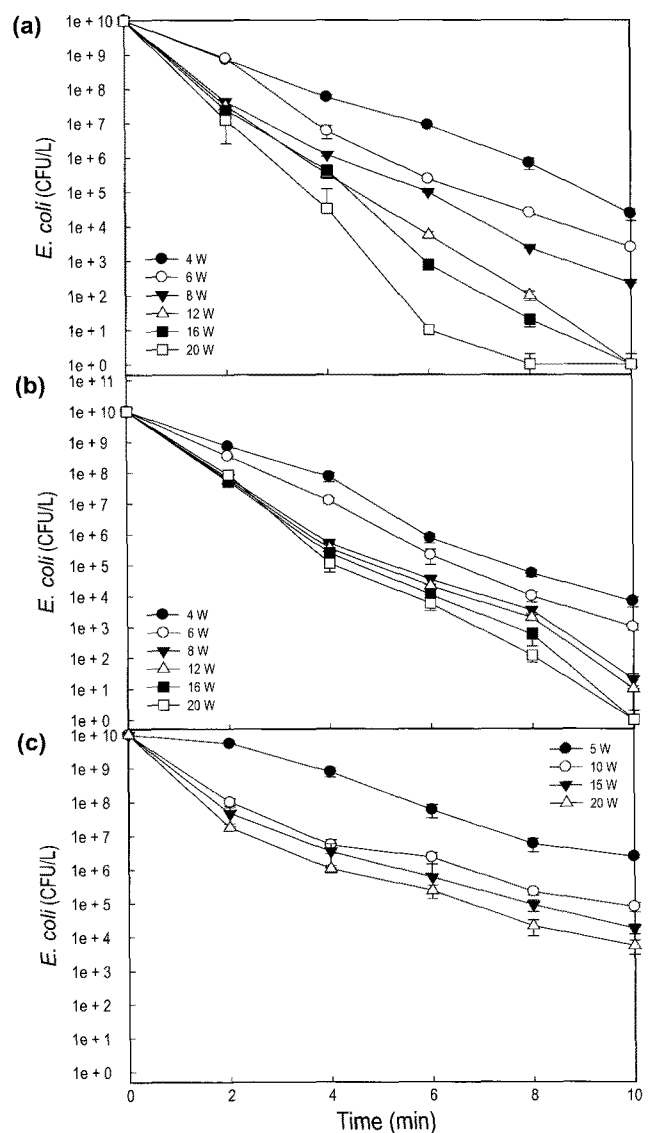


Fig. 3. Effect of electric power on the disinfection of *E. coli* in three disinfection process. (a) electrolysis, (b) UV process, (c) ultrasonic process.

전기분해 공정은 전력의 증가에 따라 대장균균수가 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, UV 공정의 경우 8 W까지는 전력 증가에 따라 대장균균수 감소가 증가하지만 8 W 이상에서는 감소폭이 둔화되었다. 초음파 공정의 경우 5 W에서 10 W로 증가할 때 대장균균수 감소폭이 컸으나 10 W 이상의 전력에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

NaCl 농도 변화에 따른 각 공정의 소독 성능

전해질은 전기분해 반응에서는 산화제 생성과 전력량 감소 등과 관계되는 중요한 인자이지만 전기분해 공정과 복합 공정을 이루는 다른 단일 공정에서 NaCl의 영향을 고찰해야 한다. 따라서 전기분해 공정을 비롯한 단일 공정에서 NaCl 농도가 대장균 소독에 미치는 영향을 12 W를 기준(초음파, 10 W)으로 NaCl 농도를 0.25-2.5 g/L로 변화시키면서 대장균균수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

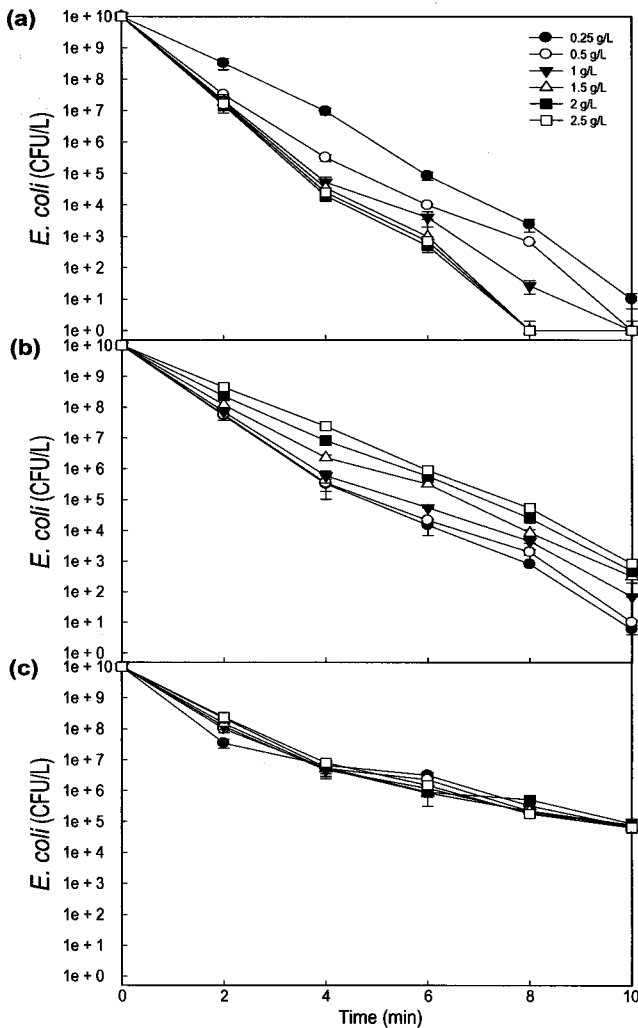


Fig. 4. Effect of NaCl concentration on the disinfection of *E. coli* in three disinfection process. (a) electrolysis, (b) UV process, (c) ultrasonic process.

Fig. 4(a)에 보이듯이 NaCl 농도가 0.25 g/L에서 1.5 g/L로 NaCl 농도가 증가함에 따라 잔류 대장균균수가 감소하였으나 1.5 g/L 이상의 NaCl 농도에서는 NaCl 증가에 따른 소독 성능 증가는 없었다. 이는 본 실험 NaCl 농도보다 낮은 농도 (0-0.25 g/L)에서 실험하였지만 NaCl 농도 증가에 따라 이산화염소, 유리 염소 등의 염소계 산화제뿐만 아니라 오존과 과산화수소 등 산소계 산화제 농도가 증가하여 레지오넬라균의 살균 성능이 높아졌다고 보고한 박과 김 [12]의 보고와 비슷한 결과를 얻었다. 또한 촉매성 산화물 전극을 이용한 산화제 생성 실험에서 사용한 전극과 전력이 다르지만 NaCl 농도가 1.5 g/L이르기까지는 이산화염소, 유리 염소, 과산화수소 및 오존 등의 산화제 생성량이 NaCl 농도 증가에 따라 직선적으로 증가하지만 1.5 g/L 이상에서는 증가율이 둔화되었다고 보고한 박과 김 [13]의 보고와 일치하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4(b)는 UV 공정에서 NaCl이 대장균 소독에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보듯이 NaCl 증가에 따라 소독 성능이 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 UV 등을 이용한 염료의 제거에서 수중 NaCl 농도 증가에 따라 염료 분해율이 감소하였다고 보고한 김과 박 [14]의 결과에서도 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다. Abdullah 등 [15]은 아래와 같이 광분해 반응시 Cl^- 이 산화 라디칼종을 포집 (scavenging)함으로써 산화속도를 감소시키며, 촉매 표면의 활성점을 막아서 촉매활성을 저해하는 것으로 보고한 결과와 비교할 때 UV 공정에서 NaCl의 첨가는 소독 성능의 감소에 영향을 미치는 것으로 사료되었다.



Fig. 4(c)에 초음파 공정에서 대장균 소독에 대한 NaCl의 영향을 나타내었다. 그림에서 보듯이 초음파 공정은 NaCl의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

김과 박 [14]은 UV와 전기분해 공정을 결합한 염료 처리에서 NaCl은 UV 공정에는 저해 효과를, 전기분해 반응에서는 증진 효과가 있지만 전기분해 반응에서의 증진 효과가 크기 때문에 두 공정을 결합한 전기 + UV 복합 공정에서는 증진 효과가 나타난다고 보고하였다. 본 연구와 김과 박 [14]의 결과를 종합해보면 전기분해와 초음파 공정을 결합할 경우 전기분해 공정의 소독 증진효과가 기대되고, 초음파 + UV 공정의 경우 전해질을 첨가하지 않으면 저해 효과는 발생하지 않을 것으로 사료되었다.

pH 변화에 따른 각 공정의 소독 성능

각 소독 공정의 성능에 pH가 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전력을 12 W, NaCl 농도를 1.5 g/L로 유지한 조건에서 pH를 3-11로 변화시켰을 때 대장균균수 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

전기분해 공정의 경우 pH 3에서의 소독 효과가 가장 큰

것으로 나타났고, 7이상의 pH에서의 소독 효과는 pH 7과 비슷한 것으로 나타났다. 이는 전기분해 반응을 이용한 염료 처리에서 pH 증가에 따라 염료 분해가 감소하였다는 연구 결과와는 중성 이상의 pH에서의 실험 결과가 다른데, 이는 분해대상물의 차이에 기인하는 것으로 사료되었다 [16]. 즉, 염료 분해의 경우 중성 이상의 pH에서 pH의 영향을 적게 받는 반면, 미생물의 경우 미생물 활성화와 pH가 밀접한 관련이 있는 이유로 산성과 염기성에서의 소독이 영향을 받는 것으로 사료되었다. UV 공정과 초음파 공정의 경우 pH 3과 11에서 대장균수가 낮아 산성과 염기성 영역에서 소독 효과가 높은 것으로 나타났다. UV와 초음파 공정의 경우 산성과 염기성에서의 소독 효과 증가는 대장균의 적정 pH 범위를 벗어나는 pH에서의 충격 때문인 것으로 판단되었다.

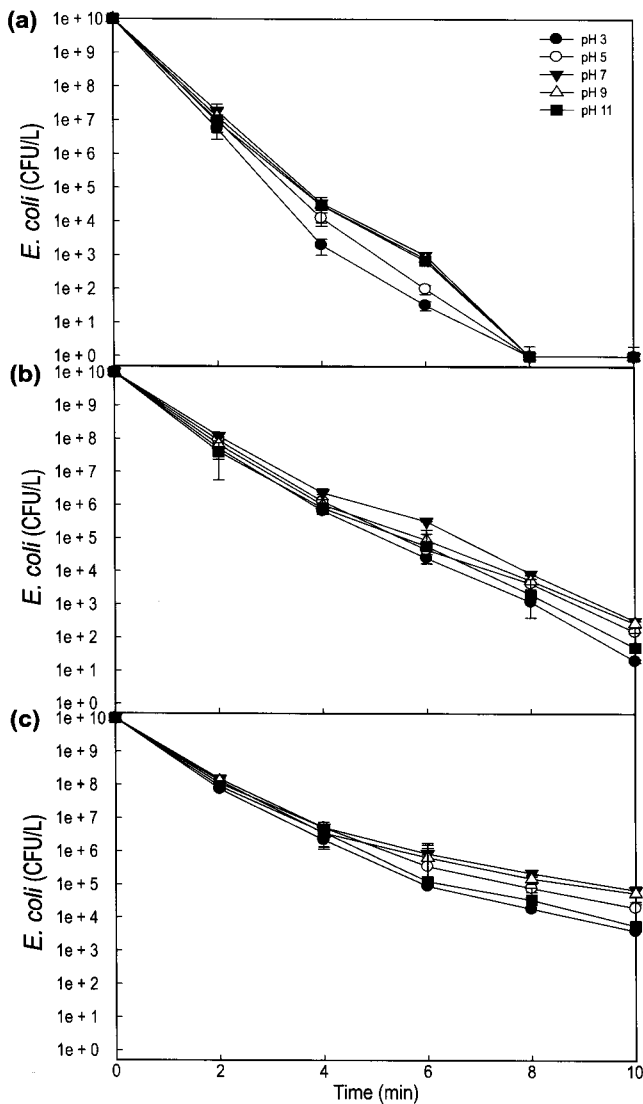


Fig. 5. Effect of pH on the disinfection of *E. coli* in three disinfection process. (a) electrolysis, (b) UV process, (c) ultrasonic process.

공기 공급량 변화에 따른 각 공정의 소독 성능

공기의 공급량이 대장균의 소독에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전력을 12 W, NaCl 농도를 1.5 g/L로 유지한 조건에서 공기 공급량을 0-4 L/min으로 변화시켰을 때 대장균수 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

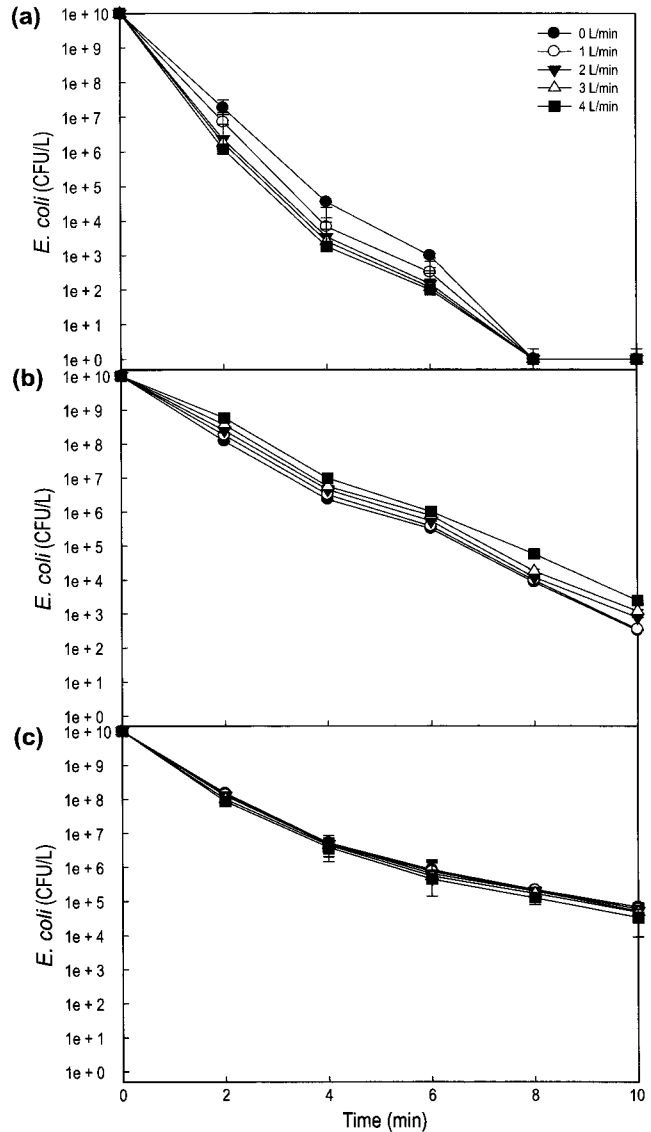


Fig. 6. Effect of air flow rate on the disinfection of *E. coli* in three disinfection process. (a) electrolysis (b) UV process (c) ultrasonic process.

전기분해 공정 (Fig. 6(a))의 경우 공기 공급량이 0에서 2 L/min으로 증가하면서 대장균수 감소가 증가하였으며, 2 L/min 이상에서는 증가가 둔화되어 최적 공기 공급량은 2 L/min으로 사료되었다. UV 공정은 공기 공급량이 증감하면서 소독 효과가 감소하는 것으로 나타났다. Nam 등 [17]은 분말 TiO₂를 이용한 광촉매 반응기에서 공기유속

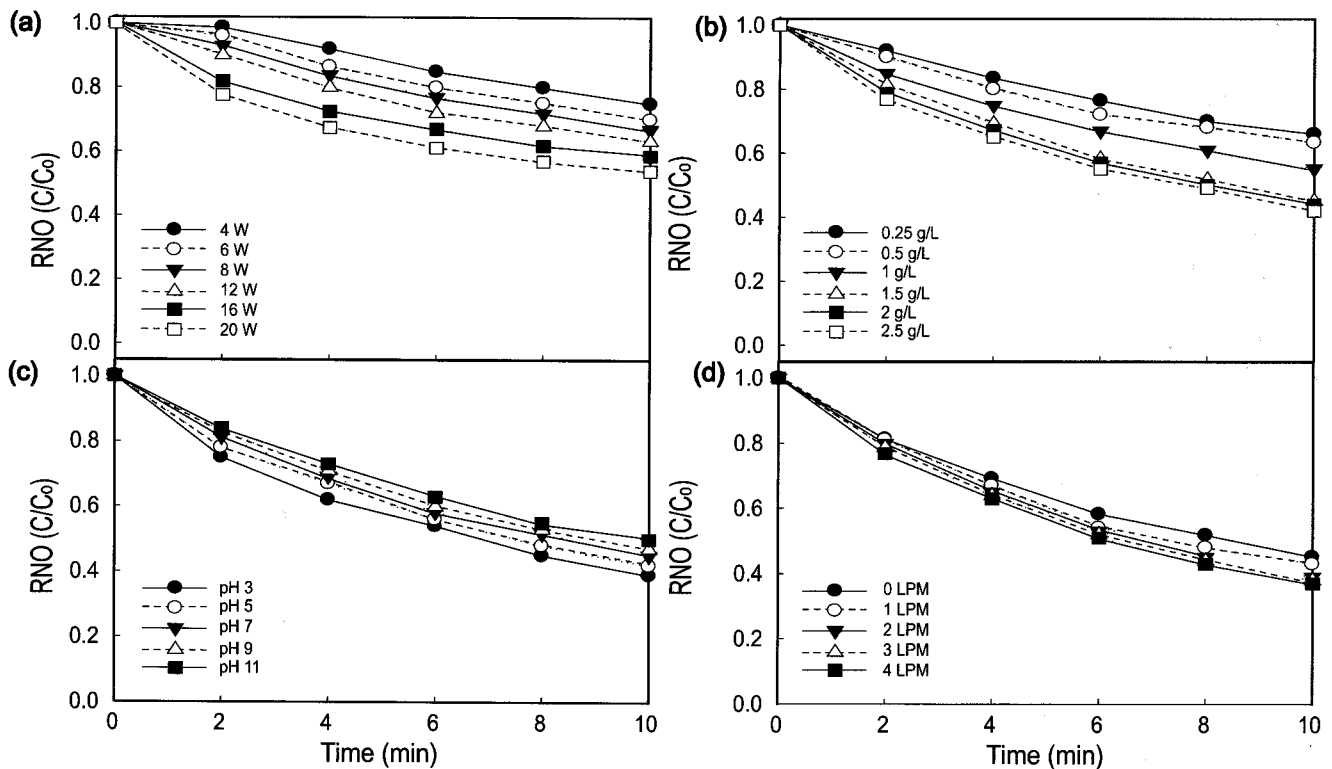


Fig. 7. Effect of operating parameter on the degradation of RNO with electrolysis process. (a) electric power, (b) NaCl dosage, (c) pH, (d) air flow rate.

증가는 TiO_2 와 수중의 오염물질 사이의 물질전달이 증가되어 분해속도가 증가하지만 일정 범위 이상에서는 다량 공급되는 공기 기포가 UV 빛이 광촉매와의 접촉을 방해하기 때문에 최적 공기 공급량이 존재한다고 보고하였다. 본 연구와 Nam 등 [17]의 연구 결과를 종합하여 비교하면 이것은 UV 공정의 특성상 램프에서 방출되는 자외선이 투과하여 미생물과 접촉을 해야 하는데, 공기 공급량이 증가하면서 다량의 기포 방출이 자외선의 투과를 방해하고 광촉매 공정과는 다르게 물질전달 증가로 인한 소독 증대효과는 없기 때문인 것으로 사료되었다. 초음파 공정의 경우 소독 성능은 공기 공급량에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

공정에 따른 RNO 농도 변화

$\cdot\text{OH}$ 생성을 간접적으로 알 수 있는 RNO 분해를 통하여 운전인자가 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. UV 공정과 초음파 공정은 RNO 분해를 측정된 결과 공정의 특성상 RNO가 분해 되지 않았으며, 전력, NaCl, pH 및 공기 공급량의 변화 실험에서도 RNO가 분해 되지 않아 $\cdot\text{OH}$ 이 생성되지 않는 것으로 사료되어 Fig. 7에 나타내지 않았다 [3,6].

전기분해 공정에서 시간과 전력량이 증가함에 따라 RNO는 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 3(a)에서 관찰된 바와 같이 소독 성능에 직접적인 상관관계가

있는 것으로 나타났다. NaCl 농도의 경우 1.5 g/L까지 RNO 분해가 증가하는 것으로 나타났으나 1.5 g/L 이상에서는 큰 차이를 보이지 않았다. NaCl 역시 RNO 분해 경향과 소독 경향이 거의 같은 것으로 나타났다. pH의 경우 RNO는 pH가 감소함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 중성 이상의 pH에서는 RNO 분해와 Fig. 5(a)의 전기분해 공정에서 pH에 따른 소독 경향과는 다른 경향을 나타내었다. 이는 전기분해의 경우 IrO_2 전극을 이용한 이산화염소 생성에서 pH가 높으면 전기-생성되는 이산화염소의 농도가 감소한다고 보고한 Pillai 등 [18]의 결과와 산성 pH에서 과산화수소 생성량이 증가한다고 보고한 Qiang 등 [19]의 결과와 같이 OH 라디칼 외 소독에 영향을 주는 전극에서 발생하는 산화제 및 미생물에 대한 pH의 효과와 등과 같은 인자를 종합적으로 고려해 볼 때 pH가 증가할수록 일부 산화제와 $\cdot\text{OH}$ 생성 감소로 소독을 감소효과가 발생하지만 Fig. 5(a)와 (b)에 나타나듯이 UV나 초음파 공정에서 산성이나 염기성 pH에서의 소독 증가에서 볼 수 있듯이 미생물에 대한 pH 쇼크가 이를 소독을 감소효과를 상쇄하기 때문에 Fig. 5(a)와 같은 결과가 나타났다고 사료되었다.

Fig. 7(d)에 공기 공급량 변화에 따른 RNO 변화를 나타내었다. 공기 공급량이 증가하면서 RNO 농도는 감소하였으나 2 L/min 이상의 공기공급량에서 RNO 농도 감소는 크지 않아 최적 공기공급량은 2 L/min으로 사료되었다. 이와 같은 결과는 Fig. 6(a)의 공기 공급량에 따른 대장균수

변화와 같은 결과를 나타내었다.

이는 전기분해시 양극 표면에서 산소가 발생하는데 생성된 산소는 오존과 과산화수소 발생에 관여한다. 공기 공급량의 증가에 따라 공기 중의 산소가 수중의 용존산소 농도를 높여 과산화수소를 더 많이 생성하고 과산화수소와 오존의 반응에 의한 $\cdot\text{OH}$ 생성량이 증가하기 때문인 것으로 사료되었다 [20]. 일정 온도에서 공기 공급량이 용존 산소의 농도가 포화될 때까지 증가하면 생성되는 산화제 농도가 증가하지만 포화상태 이상의 공기 공급량에서는 잉여 공기는 산화제 생성에 이용되지 않기 때문에 일정 공기 공급량 이상에서는 생성되는 $\cdot\text{OH}$ 도 일정해지고 대장균 소독도 이에 따라 영향을 받는 것으로 사료되었다.

결 론

본 연구에서는 복합 소독 공정의 개발을 위하여 복합 소독 공정을 이루기 위한 전기분해, UV 및 초음파 소독 등 세 종류의 단일 소독 공정의 성능 비교와 각 개별 공정의 성능에 영향을 줄 수 있는 운전인자의 영향을 고찰하였다. 실험에 사용한 5종류의 촉매성 산화물 전극 중에서 소독 성능이 가장 우수한 전극은 Ir 전극인 것으로 나타났으며, 여러 금속 성분이 혼합된 복합 전극의 경우도 Ir 성분이 있는 전극의 성능이 우수한 것으로 나타났다. UV-B와 UV-C 램프 중 살균 램프인 UV-C 램프의 소독 성능이 우수한 것으로 나타났다. 모든 공정에서 전력이 증가함에 따라 소독 성능이 증가하는 것으로 나타났다. 전기분해 공정에서 NaCl 농도가 1.5 g/L로 증가함에 따라 잔류 대장균수가 감소하였으나 1.5 g/L 이상의 NaCl 농도에서는 NaCl 증가에 따른 소독 성능 증가는 없어 최적 NaCl 농도는 1.5 g/L로 나타났다. UV 공정은 NaCl 증가에 따라 소독 성능이 감소하는 것으로 나타났고, 초음파 공정은 NaCl의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 모든 단일 공정에서 산성의 pH에서 소독 효율이 높은 것으로 나타났는데, pH가 미생물 활성에 영향을 주기 때문인 것으로 사료되었다. 적정량의 공기가 공급될 때 전기분해 공정의 소독은 촉진되지만 UV 공정은 공기의 빛 산란 방해로 소독 성능이 감소하는 것으로 나타났고 초음파 공정은 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. UV와 초음파 공정은 OH 라디칼의 생성 지표인 RNO가 거의 분해 되지 않아 OH 라디칼이 거의 생성 되지 않았으며, 운전인자의 변화에서도 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 전기분해 공정의 경우 소독 경향과 OH 라디칼 생성 경향은 염기성영역의 pH의 모든 운전인자의 경우에서 같은 경향을 나타내었다.

감 사

본 논문은 송승구 교수님의 퇴임을 기념하는 논문으로

그동안 교수님의 지도와 사랑에 감사드립니다.

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업 (일반연구자지원사업)으로부터 지원 받아 수행되었습니다 (2009-0070619).

접수 : 2009년 11월 2일, 게재승인 : 2009년 11월 22일

REFERENCES

1. Cho, M., J. E. Kim, and J. Y. Yoon (2004) Synergistic sequential inactivation mechanism of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants. *Proceedings of the Korean Society of Water and Wastewater Korean Society on Water Quality 2004 Joint Autumn Conference*. November 1-4. Taejeon, Korea.
2. Lee, S. H. (2002) UV disinfection for drinking water treatment. *Proceedings of the Korean Society of Water and Wastewater-Korean Society on Water Quality 2002 Joint Spring Conference*. April 19. Chungju, Korea.
3. Park, Y. S. and D. S. Kim (2009) *E. coli* disinfection by electrolysis, UV and ultrasonic waves. *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Conferences*. November 5-7. Pusan, Korea.
4. Pei, X., M. L. Janex, P. Savoye, and A. Cock (2002) Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Wat. Res.* 36: 1043-1055.
5. Bergmann, H., T. Iourtchouk, K. Schops, and K. Bouzek (2002) New UV irradiation and direct electrolysis-promising methods for water disinfection. *Chem. Eng. J.* 85: 111-120.
6. Sim, J. H., H. J. Seo, and B. D. Kwon (2006) Study on the efficiency of algae removal using ultrasonic waves in double cisterns. *J. of Kor. Soc. Environ. Eng.* 28: 1313-1315.
7. DMP Company, Products. <http://www.dmp22.com/>. (2005).
8. Suzuki, H., Y. Sumida, H. Umezawa, Y. Kuwaki, M. Iseki, D. Takaoka, and M. Yasuda (2004) Electrolytic disinfection system for recycling water with high-performance direct-electrolysis technology. *Proceedings of the Korean Society of Water and Wastewater-Korean Society on Water Quality 2004 Joint Autumn Conference*. November 1-4. Taejeon, Korea.
9. Kang, G. Y. (2008) Application of electrochemical technology for reusing biologically treated water. *J of Kor. Soc. Environ. Eng.* 30: 453-458.
10. Cho, M., J. E. Kim, S. M. Moon, H. M. Chung, and J. Y. Yoon (2004) Quantitative evaluation of the synergistic inactivation on sequential disinfection process. *Proceedings of the Korean Society of Water and Wastewater-Korean Society on Water Quality 2004*

- Joint Autumn Conference*. November 1-4. Taejeon, Korea.
11. Zhang, B. T., L. X. Zhao, and J. M. Lin (2008) Study on superoxide and hydroxyl radicals generated in indirect electrochemical oxidation by chemiluminescence and UV-Visible spectra. *J of Environ. Sci.* 20: 1006-1011.
 12. Park, Y. S. and D. S. Kim (2007) Inactivation of *Legionella pneumophila* by electrochemical disinfection. *J of Kor. Soc. on Wat. Qual.* 23: 613-619.
 13. Park, Y. S. and D. S. Kim (2009) Oxidants formation with operating parameters with electrolysis process. *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Conferences*. November 5-7. Pusan, Korea.
 14. Kim, D. S. and Y. S. Park (2009) Removal of Rhodamine B in water by ultraviolet radiation combined with electrolysis(II). *J of the Environ. Sci.* 18: 667-674.
 15. Abdullah, M., G. K. Low, and R. W. Matthews (1990) Effects of common inorganic anions on rates of photocatalytic oxidation of organic carbon over illuminated titanium dioxide. *J. of Phys. Chem.* 94: 6820-6825.
 16. Awad, H. S. and N. A. Galwa (2005) Electrochemical degradation of acid blue and basic brown dyes on Pb/PbO₂ electrode in the presence of different conductive electrolyte and effect of various operating factors. *Chemo.* 61: 1327-1335.
 17. Nam, W. S., J. M. Kim, and G. Y. Han (2002) Photocatalytic oxidation of methyl orange in a three-phase fluidized bed reactor. *Chemo.* 47: 1019-1024.
 18. Pillai, K. C., T. O. Kwon, B. B. Park, and I. S. Moon (2009) Studies on process parameters for chlorine dioxide production using IrO₂ anode in an un-divided electrochemical cell. *J. of Hazard. Mater.* 164: 812-819.
 19. Qiang, Z., J. H. Chang, and C. P. Huang (2002) Electrochemical generation of hydrogen peroxide from dissolved oxygen in acidic solutions. *Wat. Res.* 36: 85-94.
 20. Yoo, S. B. (2005) *A study on the sterilization characteristics of household water purifier by electrolysis*. M.S. Thesis. Inha University, Incheon, Korea.