

## 전기+UV 공정에 의한 *E. coli* 불활성화

김동석 · 박영식<sup>\*,†</sup>

대구가톨릭대학교 환경과학과

<sup>\*</sup>대구대학교 보건환경전공

## Inactivation of *E. coli* by Electrolysis+UV Process

Dong-Seog Kim · Young-Seek Park<sup>\*,†</sup>

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

<sup>\*</sup>Department of Health & Environment, Daegu University

(Received 13 March 2009, Revised 15 July 2009, Accepted 28 July 2009)

### Abstract

This study has carried out to evaluate the performance of single (electrolysis, UV and ultrasonic process) and complex process (Electrolysis+UV, UV+Ultrasonic and Electrolysis+Ultrasonic) for the purpose of disinfection of *Escherichia coli* in water. The order of disinfection performance for *E. coli* in single process lie in: Electrolysis  $\approx$  UV  $\gg$  ultrasonic process. OH radical was not produced in single disinfection process. Among the three kinds of complex process, disinfection performance of the Electrolysis+UV was higher than that of the other process (UV+Ultrasonic and Electrolysis+Ultrasonic). It demonstrated a synergetic effect between the UV and electrolysis. When the use of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as electrolyte instead of NaCl, current increase or more reaction time was needed for the complete disinfection. The disinfection performance of pre-electrolysis (20 W, 30sec) and post-UV (10 W, 30 sec) was higher than that of the simultaneous electrolysis+UV process at same electric power (30 W, 30 second).

**keywords** : Disinfection, *E. coli*, Electrolysis, OH radical, Oxidants, UV process

## 1. 서론

우리나라는 하수처리시설의 방류수 수질기준에 대장균군 수 항목을 신설 2003년 1월부터 시행함에 따라 병원성 미생물의 상수원 유입을 근원적으로 차단하기로 하였다(신동호와 이용택, 2005). 신설된 대장균군수는 지역구분 없이 2003년 1월 1일부터 3000 개/mL를 유지하고, 청정지역, 상수원보호구역 및 경계구역으로부터 상류로 유하거리 10 km 이내 지역, 취수시설로부터 상류로 유하거리 15 km 이내 지역 등은 100 개/mL로 강화하여 적용하고 있다. 그러나 우리나라의 하수종말처리장 중 2001년 12월을 기준으로 가동 중인 183개소 하수처리장 중 소독시설이 설치·가동 중인 처리장은 해운대 등 4 개소에 불과하며 18 개소는 염소 소독시설이 설치되어 있으나 가동이 중단된 상태인데, 대규모 처리장에 대부분 설치되어 있는 염소 소독시설은 염소소독이 소독부산물인 THM(트리할로메탄)의 위해성, 수생 생물에 대하여 급성 및 만성 독성을 나타내고 물고기의 종류, 수를 감소시키는 것으로 나타나 가동 중단되고 있다(환경부, 2002).

국내에서는 염소소독 이외의 소독 방식에 대한 설치실적

및 운영기술 축적 부족 등으로 지자체에서 소독방법 선정에 많은 애로가 발생하고 있다(환경부, 2002).

최근에는 염소 소독의 단점들로 인하여 여러 가지 대체 소독법들이 개발되었는데, 이중 화학적 방법으로는 오존, 은, 구리, 철산염, 요오드, 브롬, 과산화수소, 과망간산칼륨 등이 있고, 물리화학적 방법으로는 이산화티타늄 광촉매분해반응, 광 소독, 전기화학적 소독 등이 있으며, 물리적인 방법으로는 UV 조사, 초음파, 자기장 소독, 마이크로파 등이 있다(박영식 등, 2007; 이석현, 2002). 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 오존발생장치 및 배오존 파괴를 위한 장치 등 부속설비가 필요하고, 장치의 가격이 높고 부유물질이나 유기물질이 존재하는 경우 오존 요구량이 증가되어 경제적 타당성이 적은 것으로 알려졌다(Pei et al., 2002).

파장이 짧은 UV의 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(Liu et al., 1995).

Muraca 등(1987)에 의하면 UV 조사는 모사 배관 시스템에서 염소 소독, 가열, 오존 소독보다 미생물 살균에 효과적이며, 소독 부산물이 발생하지 않아 수질에 영향을 주지 않

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

ysparkk@daegu.ac.kr

고, 배관을 부식시키지 않는 등의 장점이 있다. 그러나 UV 살균 시스템은 미생물 회복(repair)의 잠재적인 위험을 가지고 있어(Kundson, 1985), 미국과 유럽에서는 후처리로 염소 소독이 필요한 것으로 보고되고 있다(Bergmann et al., 2002).

최근 전기화학적 소독이 염소 소독에 대한 대안으로 떠오르고 있다. 전기화학적 시스템을 소독에 이용하기 시작한 것은 1950년대였으나, 염소 소독이 널리 퍼지게 됨에 따라 별로 호응을 얻지 못하다가, 최근 들어 염소 소독의 대안으로 물 산업에서 각광받기 시작하였다(Bergmann et al., 2002).

전기분해에 의한 소독은 다른 소독 기술에 비해 초기 투자비가 저렴하고 운전 및 유지관리가 용이한 대체 소독 기술로 인식되고 있다(유석봉, 2005; Suzuki et al., 2004). 전기분해에 의한 소독은 물에 직류전원을 통전시키면 전위차(0.7~2.7 V)가 발생하며 이 전위차에 의한 세포막 파괴에 의한 균이 살균되는 직접소독 효과와 전극에서 발생하는 하이드로과옥시칼( $\text{HO}\cdot$ ), 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 및 오존( $\text{O}_3$ ) 등의 산화물질에 의한 살균되는 간접소독 효과로 나눌 수 있다(김홍석 등, 2004). 또한 시설비와 유지관리가 용이하고, 처리수 내에 존재하는 유기물 등도 전기분해에서 발생하는 각종 라디칼 등에 의해 부수적으로 제거되는 효과가 있다(Drogui et al., 2001).

초음파는 주로 실험실에서 미생물 파쇄에 많이 이용되는데, 소독 공정에는 거의 이용되지 않고 있지만 세포조직을 단락 및 파괴시키는 작용을 하기 때문에 조류 제거에 이용하기도 한다(심주현 등, 2006).

본 연구의 목적은 전기분해, UV 및 초음파 소독 공정 등 단독 공정의 성능을 비교하고 단일 공정의 복합화가 소독 성능에 미치는 영향을 고찰하여 복합 공정의 적용가능성을 고찰하였다. 또한 복합 공정에서의 OH 라디칼과 산화제 측정과 소독 성능의 관계를 고찰하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험재료 및 실험방법

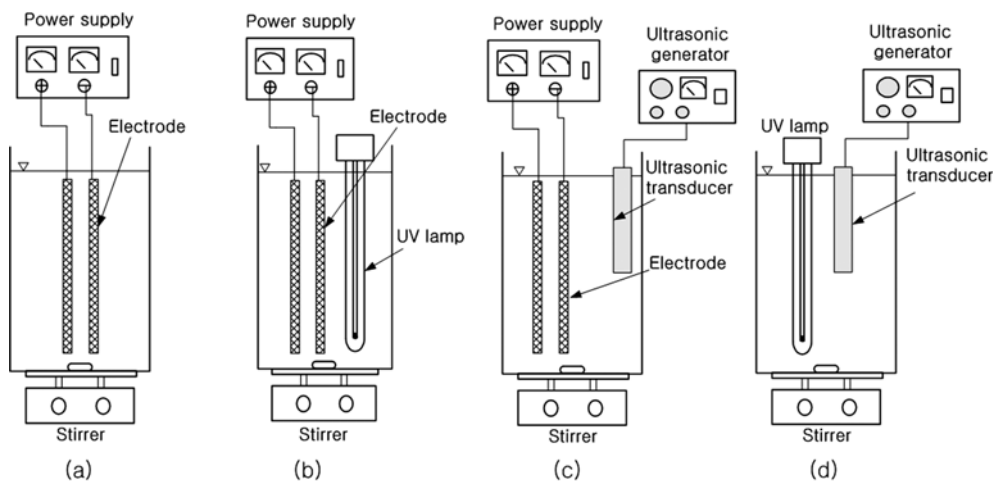


Fig. 1. Schematic diagram of single and dual system. (a) Electrolysis (b) Electrolysis+UV (c) Electrolysis+US (d) UV+US.

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.

Pt/Ti 전극은 Ti 메시 두께가 1 mm이고 코팅 두께가 5  $\mu\text{m}$ 인 메시형 도금 전극(현성 E&E)을 구매하여 사용하였다. 실험에 사용한 모든 전극의 크기는 63 × 110 mm (면적: 41.05  $\text{cm}^2$ )이었다. 전기분해 반응은 직류 전원공급기의 전류를 조절하여 전력을 10~30 W로 변화시켰다. UV 램프는 10 W UV-C 램프(Lighttech, G12T5L)를 실험에 맞게 1~3개 사용하였다. 초음파는 주파수가 20 kHz인 초음파 장치(Sonics, VCX500)를 이용하여 출력을 10~30 W로 조절하여 실험하였다. 반응기는 아크릴로 제작하였으며, 반응 부피는 720 mL이고, 혼합을 위하여 교반기를 이용하여 교반하였다. 모든 실험은 전해질로 NaCl 0.0125%를 사용하여 실험하였으며, 전극 분해 반응 적용시 전극 간격은 2 mm로 고정하였다. Fig. 1에 단일 공정과 복합 공정의 반응기 배열에 대하여 나타내었다.

Fig. 1(a)는 전기분해 반응기이고, (b)는 전기+UV 반응기이며, 전극 1 cm 옆에 10 W UV 램프를 1~3개 설치하였다. (c)는 전기+초음파 반응기이며, 초음파 진동자를 전극 옆 1cm지점에 설치하였다. (d)는 UV+초음파 반응기이며 초음파 진동자와 UV 등의 간격을 1 cm로 유지하여 설치하였다.

### 2.2. 분석 및 측정

실험방법으로는 균 stock 용액 1 mL를 증류수와 전해질이 들어 있는 720 mL의 반응 장치에 넣고  $10^6$  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 지속적인 소독이 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 colony counter를 이용하여 계수하였다. 실험은 5회 실시하고 평균값과 표준편차를 그림에 나타내었다.

반감기가 매우 짧은 수산화 라디칼은 직접 농도를 측정하기 어려우므로, 수산화 라디칼 probe로 널리 알려진 4-CBA(chloro benzoic acid)의 분해속도를 측정함으로써 수산화 라디칼의 생성속도를 간접적으로 파악할 수 있다(Rosenfeldt et al., 2006). 4-CBA 용액은 1 L의 acetone에 10 g의 4-CBA를 녹인 stock 용액을 100 mmol/L의 phosphate buffer와 혼합하여 제조하였다. 4.8 mL의 phosphate buffer, 0.48 mL의 4-CBA stock 용액, 777.6 mg Na<sub>2</sub>SO<sub>2</sub> 시약을 초순수에 혼합하여 4.8 L가 되게 하였다. Phosphate buffer와 4-CBA의 최종 농도는 0.1 mmol/L와 1 mg/L가 되게 하였다. 4-CBA는 UV-VIS detector와 ODS column을 가진 HPLC(Shimadzu LC-10AD)를 이용하여 측정하였다. 이때 injection 시료는 200 µL이고, carrier는 acetonitrile (70%)와 0.1% phosphoric acid (30%)로서 1 mL/min의 유량으로 흘리고, 234 nm의 UV detection에서 분석하였다.

유리 염소 및 이산화염소는 HACH pocket colorimeter와 유리 염소 및 이산화염소 측정용 시약을 사용하여 DPD방법(N, N-diethyl-p- phenylendiamine)으로 측정하고, 오존 농도는 Indigo법을 이용하여 측정하였다. 과산화수소의 측정은 1 M NaOH 50 µL를 첨가하여 phenol red를 알칼리 용액으로 발색시켜 UV-Vis spectrophotometer (Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 596 nm에서 흡광도를 측정하고, 과산화수소 표준용액으로 작성한 검량선과 비교하여 농도를 구하였다(권순구 등, 1990).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 단일 공정에서의 소독 성능

Fig. 2는 전력을 10~30 W(41.7 W/L)로 변화시키면서 (a) UV, (b) 전기분해, (c) 초음파 소독 공정 등 단일 공정에 따른 대장균수 변화를 나타내었다. 모든 단일 공정에서 전력 증가에 따라 소독 효과가 증가하는 것으로 나타났다. 초음파를 이용한 소독은 30 W의 전력에서 6분간 초음파 처리시 37.6%의 제거율을 얻어 다른 공정보다는 소독 효과가 적은 것으로 나타났다. 심주현 등(2006)에 의하면 28 kHz의 주파수에서 30 W/L의 초음파 출력에서 초기농도 1000/mL의 조류 제거율이 30% 정도이지만 15분 이상 노출할 경우 90% 이상의 조류제거 효율을 보였다고 보고한 결과로 볼 때 본 실험 조건에서 초음파에 의한 살균 효과를 얻기 위해서는 더 시간이 필요한 것으로 사료되었다. 전기분해와 UV에 의한 소독은 초기 분해는 거의 유사한

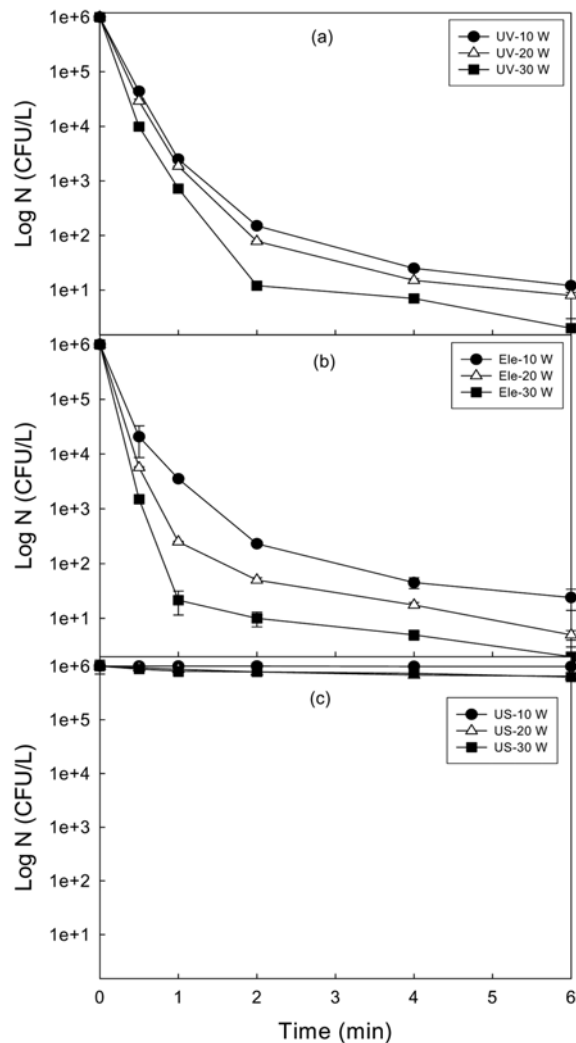


Fig. 2. Effect of single process type on the disinfection of *E. coli*. (a) UV (b) Electrolysis (c) Ultrasonic process.

것으로 나타났으나 1분 경과시 전기분해(30 W)에서의 잔류 대장균수는  $2.1 \times 10^1$  CFU/L, UV는  $7.2 \times 10^2$  CFU/L로 나타나 전기분해의 초기 분해속도가 UV 소독보다 빠른 것으로 나타났다.

전기분해에 의한 소독은 물에 직류를 통전시키면 전위차(0.7~2.7 V)가 발생하는데, 이 전위차에 의한 세포막 파괴에 의해 대장균이 10<sup>6</sup>초 이내에 소독되는 직접 소독과 전극에서 발생하는 과산화수소, 유리 염소, 이산화염소 등의 산화제에 의한 간접 산화로 인해 소독 속도가 빠르며(김홍석 등, 2004), UV에 의한 소독은 지체기(lag phase)가 발생한다고 보고한 조민 등(2004)의 보고와 비교할 때 직접적인 비교는 어렵지만 본 연구결과와 어느 정도 유사한 것으로 사료되었다.

#### 3.2. 복합 공정에서의 소독 성능

Fig. 1의 (b), (c) 및 (d)에 나타난 바와 같이 전기+UV, 전기+초음파, UV+초음파 공정을 각각 결합하여 총 전력이 30 W가 되게 공정을 구성하고 있는 단일 공정의 전력을

조절된 복합 공정에서의 대장균균수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

전기+UV 복합 공정(Fig. 3(a))의 경우 1분에서 잔류 대장균균수는  $1.0\sim 1.5 \times 10^1$  CFU/L로 나타났는데, 이는, UV 단일 공정( $7.2 \times 10^2$  CFU/L)보다는 잔류 대장균균수가 적고 전기분해 단일 공정( $2.1 \times 10^1$  CFU/L)과 비슷하지만 약간 적은 것으로 나타났다. 전기분해나 UV 단일 공정보다는 전기+UV 복합 소독 공정의 최종 대장균균수가 적은 것으로 나타나 복합 공정(AB)의 제거율이 단일 공정의 제거율 합보다 클 경우(즉,  $AB > A + B$ ) 시너지 효과가 나타난다고 보고한 Matos 등(1999)의 보고로 판단할 때 공정의 복합으로 인한 시너지 효과가 존재하는 것으로 사료되었다.

전기+UV 복합 공정에서 전기분해와 UV 공정의 전력 배열 중 전기분해의 전력을 20 W, UV 전력을 10 W로 유지한 복합 공정이 UV 전력을 20 W로 전기분해를 10 W로 유지한 공정의 소독능을 비교한 결과 30초에서 전기(20 W)+UV (10 W)의 경우 잔류 대장균균수는  $6 \times 10^2$  CFU/L, 전기(10 W)+UV (20 W)의 경우는  $1.05 \times 10^3$  CFU/L로 나타났고 2분 이후부터는 두 경우 모두 소독능이 유사한 것

으로 나타나 전기(20 W)+UV(10 W)가 초기에 소독 효과가 큰 것으로 나타났고 이후 실험에서는 전기(20 W)+UV(10 W)로 구성된 전기+UV 복합 공정을 이용하였다.

전기+초음파 복합 공정(Fig. 3(b))의 경우 전기분해에 10 W, 초음파에 20 W의 전력을 주었을 때 총 전력은 30 W로 초음파 단일 공정의 30 W와 같지만 대장균 소독 효율은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 전기분해의 전력이 증가하면서 소독효율도 증가하는 경향을 나타내었으나 전기분해 단일 공정의 대장균 소독보다 낮은 것으로 나타나 전기분해와 초음파 공정의 결합은 초음파 단일 공정보다는 소독 효율이 훨씬 높지만 공정의 결합으로 인한 시너지 효과는 나타나지 않았다.

UV+초음파 복합 공정(Fig. 3(c))의 경우 UV를 10 W만 조사하여도 초음파만 30 W 적용한 경우보다 대장균 소독 효율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 UV+초음파 공정의 경우도 단일 공정의 UV 소독 공정보다 UV+초음파 복합 공정의 소독 효율이 낮게 나타나 전기분해+초음파 공정과 같이 복합 공정의 시너지 효과가 나타나지 않았다. 전기+초음파 공정과 UV+초음파 공정을 비교하면 초기 반응속도는 전기+초음파 공정이 UV+초음파 공정보다 빠른 것으로 나타나 전기분해, UV 단일 공정의 경향과 같은 것으로 나타났다. 실험한 세 가지 복합 공정 중 시너지 효과가 나타난 공정은 전기+UV 공정으로 나타나 향후 실험은 전기+UV 복합 공정을 이용하였다. 그러나 전기+UV 공정의 경우 전기분해 공정에 UV 공정을 첨가하여야 하기 때문에 향후 처리 성능과 설치비와 유지관리비를 함께 고려하여 경제적인 방안을 선택하여야 한다고 사료되었다.

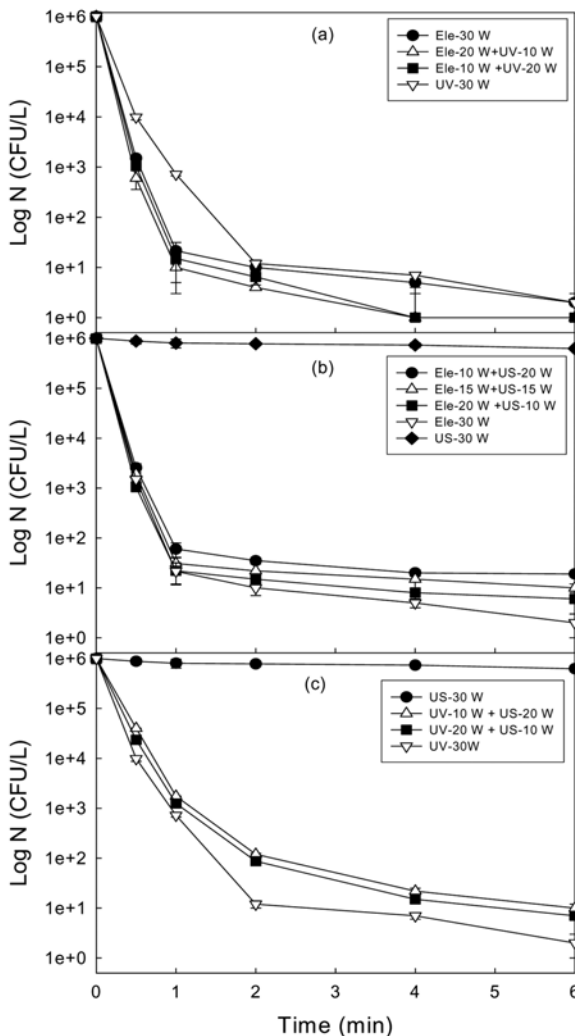
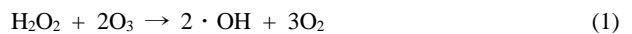


Fig. 3. Effect of process type on the disinfection of *E. coli*. (a) Electrolysis+UV (b) Electrolysis+US (c) UV+US.

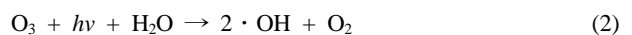
### 3.3. 단일 공정과 전기+UV 공정에서의 OH 라디칼 생성

본 실험에 사용한 Pt/Ti 전극과 같이 촉매성 산화물 전극을 사용하는 일반적인 전기분해 반응에서는 전해질로 NaCl을 사용할 경우  $H_2O_2$ 와  $O_3$ 과 같은 산화제 외 유리염소와 이산화염소 등의 염소계 산화제가 발생하는 것으로 알려져 있다(김동석과 박영식, 2009).

본 실험 중에서 OH 라디칼이 발생할 수 있는 경로는  $O_3/H_2O_2$ , UV/ $O_3$  및 UV/ $H_2O_2$ 이다. 전기분해시 발생하는 오존과 과산화수소 사이의 상호작용 때문에 OH 라디칼이 생성될 수 있다(박영식, 2008; Wu et al., 2008).



전기분해에서 발생하는  $O_3$ 와 UV 조사에 의해,



전기분해에서 발생하는  $H_2O_2$ 와 UV 조사에 의해,



Fig. 4에 전체 전력량이 30 W로 일정한 조건에서 전기분해, 초음파, 및 UV 단독 공정과 복합 공정에서 대장균 소

독 성능이 가장 우수하였던 전기(20 W)+UV(10 W) 복합 공정의 4-CBA 분해를 나타내었다. 전기분해 공정에서는 4-CBA가 0.24 mg/L, UV 공정에서는 0.16 mg/L, 초음파 공정에서는 0.15 mg/L의 4-CBA가 분해되었으나 분석 오차에 들 정도로 나타나 전기분해 공정은 물론 UV와 초음파 공정 모두 공정에서는 OH 라디칼이 거의 발생하지 않는다고 판단되었다.

그러나 전기+UV 공정의 경우 시간에 따라 4-CBA 농도가 선형적으로 감소되어 31.5%의 4-CBA가 분해되는 것으로 나타나 OH 라디칼이 발생하는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 전기+UV 공정에서 OH 라디칼이 발생할 수 있는 식 (1)~(3)의 경로 중에서 전기분해만 적용하였을 경우 식 (1)과 같이 전극에서 발생하는 오존과 과산화수소의 작용에 의한 OH 라디칼 생성은 거의 없는 것으로 나타났기 때문에(김동석과 박영식, 2009), 전기+UV 복합 공정에서 발생하는 OH 라디칼은 전기분해시 발생하는 오존과 과산화수소와 UV 램프의 자외선과의 작용에 의해 식 (2)와 (3)과 같이 발생할 수 있다고 판단된다. 박영식(2008)은 전극과 오존 램프에서 발생하는 과산화수소와 오존이 식 (1)~(3)과 같은 작용에 의하여 발생하는 OH 라디칼이 RhB 분해에 참여하기 때문에 전기분해 공정과 UV 단일 공정보다 전기/UV 공정에서 COD 제거율이 높고 시너지 효과가 나타난다고 보고한 결과와 대상물질은 다르지만 유사한 결과를 얻었다. 상기의 이유에서 Fig. 3(b)와 (c)의 전기+초음파, 초음파+UV 복합 공정에서의 시너지 효과가 관찰되지 않은 것은 두 공정의 결합에서 전기+UV 공정과 같이 시너지 효과를 낼 수 있는 인자가 없기 때문인 것으로 사료되었다.

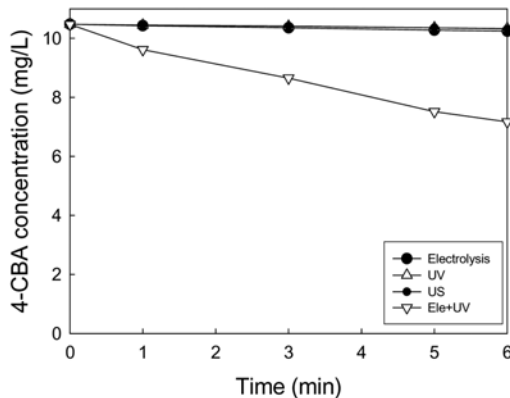


Fig. 4. Effect of process type on the 4-CBA.

Fig. 5에 전기분해 반응(20 W)와 같은 전력에 10 W의 UV-C 램프를 추가하여 적용한 전기+UV 공정에서 발생하는 유리 염소, 이산화염소, 과산화수소 및 오존 농도 변화를 나타내었다. 모든 산화제는 반응시간에 따라 농도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 전기분해 공정에서 발생하는 과산화수소와 오존 농도보다는 10 W의 UV 램프를 첨가한 전기+UV 반응에서의 과산화수소와 오존 농도가 적은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 전기분해 반응에서 UV 적용시 과산화수소와 오존의 농도 감소가 어느

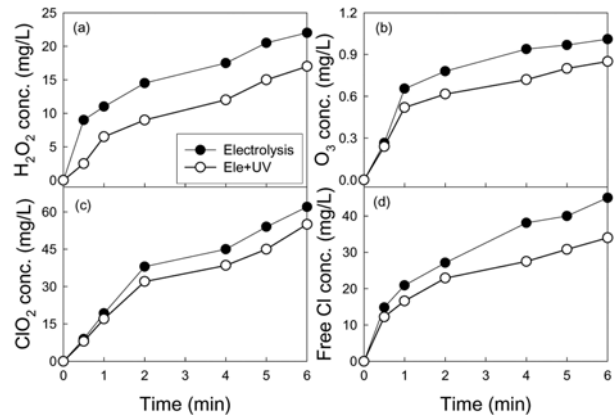


Fig. 5. Comparison of electrolysis and UV/electrolysis process for the oxidants formation (electric power 30 W).

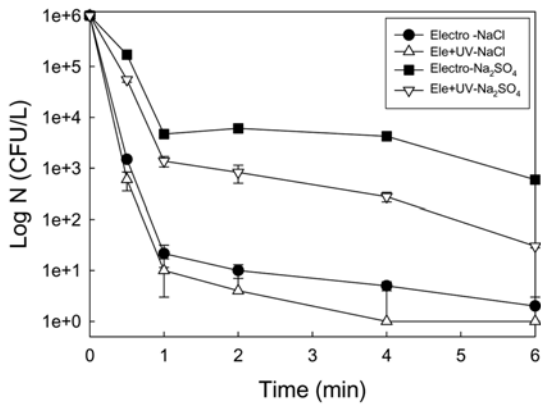
정도로 OH 라디칼 생성에 이용되었는지는 정량적으로 확인할 수 없지만 식 (2)와 (3)과 같이 OH 라디칼 생성에 이용된 것으로 사료되었다.

조민 등(2007)은 UV를 이용한 소독 공정에서 표면 거칠기가 큰 표면과 UV가 조사되는 반대 방향에서는 소독 효과가 낮기 때문에 UV 표면 소독은 표면 내부로 침투가 가능한 다른 소독 방법과 병행해서 수행되어야 효과적일 수 있다고 보고하였는데, 전기+UV 공정은 OH 라디칼이 발생할 수 있고 전기분해 반응에 의한 전위차와 산화제 등의 작용에 의해 UV가 미치지 못하는 부분까지 소독 할 수 있기 때문에 UV 소독 공정의 단점을 보완해 줄 수 있다고 판단되었다.

전기분해 반응에 UV의 적용은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 염소계 산화제인 유리 염소와 이산화염소의 발생을 줄이는 것으로 나타났다. 아직 염소계 산화제 감소의 메커니즘은 알 수 없었으나 NaCl을 전해질로 사용한 전기분해 반응을 이용한 소독에서 염소로 인한 냄새, 부 생성물 등의 줄일 수 있어 1차 처리로 UV 소독, 2차 염소 소독의 경우와 비교할 때 전기+UV 공정은 전기분해와 UV 소독 공정의 동시 적용으로 인한 공정의 간편함, 시너지 효과 및 염소계 산화제 생성량 감소 등의 장점이 있는 것으로 사료되었다.

### 3.4. 전해질 변화의 영향

염소계 산화제의 부작용을 막기 위하여 NaCl 대신 염소계 산화제가 생성되지 않는 같은 농도의 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하여 전기분해 반응과 전기+UV 반응에서 소독 성능을 고찰하여 Fig. 6에 나타내었다. NaCl 대신 같은 전도도를 가지는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용한 경우의 소독 성능은 낮은 것으로 나타났다. 이는 전기분해를 이용한 염색폐수 처리에서 김탁현 등(2001)의 결과와 같은 결과를 얻었다. 이와 같이 다소 낮은 소독 성능은 염소계 산화제가 없기 때문이라고 사료되었다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 전해질로 사용하는 경우 6분의 소독 후에도 10<sup>1</sup>~10<sup>2</sup> CFU/L 정도가 소독되지 않고 남아있기 때문에 완전한 소독을 위해서는 전류 증가나 소독 시간 증가 등의 방법이 필요할 것으로 판단되었다.



**Fig. 6.** Effect of electrolyte on the disinfection of *E. coli* in electrolysis and Electrolysis+UV process (Electric power, 30 W).

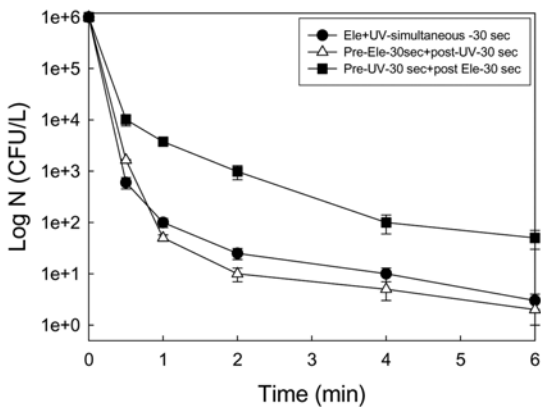
**3.5. 복합 공정의 배열 변화**

전기+UV 공정에서 30초의 반응시간에서도 10<sup>6</sup> CFU/L에서 10<sup>2</sup> CFU/L로 대장균수가 감소되어(Fig. 3(a)), 6분의 소독시간보다 짧은 소독시간에서 소독이 가능하리라 판단되어 반응시간을 줄여 성능 변화를 고찰하였고 공정의 변화를 통해 성능 변화를 고찰하였다.

예비실험 결과 6분의 소독 시간에서 30초 정도로 소독 시간을 줄여도 충분한 것으로 나타나 소독 시간을 30초로 줄이고 총 전력을 30 W로 유지한 조건에서 공정을 변화시켜 보았다. 총 30 W의 전력으로 전기분해와 UV램프를 동시에 30초 적용, 30초 동안 전기분해 20 W 적용 후 30초 동안 10 W UV 램프 운전 및 30초 동안 10 W UV 램프 적용 후 20 W의 전기분해를 적용한 경우 대장균수 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

전기+UV를 동시에 적용한 경우 전원을 30초 동안 인가한 후 30초 후 전원을 끄고 6분까지 소독 성능을 고찰한 결과 잔류 대장균수는 3 CFU/L로 나타나 30초 만으로도 소독이 충분한 것으로 나타났다.

전원 인가 방법을 바꾸어 선-전기분해-후-UV와 선-UV-후-전기분해를 각각 30초씩 적용한 경우 선-전기분해-후-UV



**Fig. 7.** Effect of process modification on the disinfection of *E. coli* in Electrolysis+UV process (Electric power, 30 W; electrolyte, NaCl).

공정의 소독 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이는 선-전기분해-후-UV 공정의 경우 전기분해에서 발생한 산화제가 UV와 반응하여 OH 라디칼을 형성하고 전기분해에서 생긴 산화제의 잔류 소독 효과가 발생하지만 선-UV-후-전기분해는 UV의 특성상 잔류효과가 없어 후-전기분해에서 발생하는 산화제와 UV가 반응하여 OH 라디칼이 발생할 수 없고 전기분해에서의 산화제에 의한 잔류 소독 효과 지속시간이 전기+UV 동시 적용 공정이나 선-전기분해-후-UV 공정보다 짧기 때문이라고 사료되었다. 전기+UV 동시 적용과 선-전기분해-후-UV 공정을 비교하면 동시 적용 공정이 초기 30초간은 선-전기분해-후-UV 공정보다는 빠르지만 30초 이후부터는 선-전기분해-후-UV 공정보다 약간 느린 것으로 나타났다. 이는 동시 적용 공정의 경우 반응 초기에 전기분해, 산화제와 UV 작용에 의한 OH 라디칼 생성 및 생성 산화제에 의한 소독 공정이 초기 30초에 집중되지만 30초 후에는 잔류 산화제에 의한 소독 작용만 존재한다. 반면 선-전기분해-후-UV 공정은 처음 30초의 전기분해 동안 직접 분해와 산화제에 의한 분해에 의해 소독되고 다음 30초의 UV 조사시 생성 산화제와 UV의 작용에 의한 OH 라디칼 생성 및 산화제에 의한 잔류소독 작용으로 소독되는 것으로 사료되었다.

위의 결과로 볼 때 전기+UV 복합 공정 적용시 동시에 적용하는 것보다는 선-전기분해-후-UV 공정이 다소 유리한 것으로 사료되었다. 또한 대장균의 경우 선-전기분해-후-UV 공정의 소독에 총 1분의 시간이면 소독이 거의 완료된다고 판단되었다.

**4. 결론**

전기분해, UV 및 초음파 단독 공정과 전기+UV, 전기+초음파, 및 UV+초음파 복합 공정에서의 대장균 소독 효과와 전기+UV 공정에서 전해질 효과와 공정 변화에 대해 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 세 단일 공정 모두 전력 증가에 따라 소독 성능이 증가하는 것으로 나타났다. 단일 공정 중에서 초음파 공정의 성능이 가장 나쁜 것으로 나타났고, 전기분해와 UV에 의한 소독은 초기 분해는 거의 유사한 것으로 나타났으나 전기분해의 초기 분해속도가 UV 소독보다 빠른 것으로 나타났다.
- 2) 초음파에 전기분해나 UV를 적용한 복합 공정의 경우 초음파 단일 공정보다 소독 성능이 크게 증가되었으나 전기분해나 UV 단일 공정의 소독 성능보다는 낮게 나타났다. 반면 전기+UV 복합 공정은 단일 공정보다 소독 성능이 우수한 것으로 나타나 실험한 세 가지 복합 공정 중 시너지 효과가 나타난 공정은 전기+UV 공정으로 나타났다.
- 3) 단일 공정에서 4-CBA가 거의 분해되지 않고 전기+UV 공정에서 4-CBA가 분해되어 복합 공정에서 OH 라디칼이 발생하는 것으로 사료되었다.
- 4) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 전해질로 사용하는 경우 NaCl보다 소독 성능

이 낮아 완전한 소독을 위해서는 전류 증가나 소독 시간 증가 등의 방법이 필요할 것으로 판단되었다.

- 5) 같은 전력량을 적용한 조건에서 전기분해와 UV를 동시에 적용하는 것보다 선-전기분해-후-UV를 적용하는 것이 소독 성능이 약간 우수한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 권순구, 우준희, 김대수, 어수택, 정연태, 김용훈, 박춘식 (1990). 폐결핵환자에서 호중구의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 형성 및 IgG 수용체의 표현을. *대한내과학회지*, **39**(5), pp. 613-619.
- 김동석, 박영식(2009). 산화제 생성율이 높은 촉매성 산화물 전극(DSA)의 개발에 관한 연구(2). *한국환경과학회지*, **18**(1), pp. 61-72.
- 김탁현, 박철환, 배우근, 신응배, 김상용(2001). RuO<sub>2</sub>/Ti 전극에 의한 염색폐수의 전기화학적 산화처리. *한국섬유공학회지*, **38**(7), pp. 366-372.
- 김홍석, 서인석, 최일환, 김연권, 김지연, 이진영(2004). 용존 공기를 이용한 소독능 향상 전기분해 소독 공정개발. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상수도학회, pp. 625-628.
- 박영식(2008). 전기분해와 UV 조사에 의한 Rhodamine B의 제거(1). *한국환경보건학회지*, **34**(6), pp. 439-445.
- 박영식, 정노성, 김동석(2007). 소규모 오수처리를 위한 전기화학적 방법에 의한 대장균 소독에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **16**(4), pp. 441-447.
- 신동호, 이용택(2005). 하수 방류수 살균 소독을 위한 무전극 UV 램프의 제조 및 특성. *공업화학*, **16**(4), pp. 570-575.
- 심주현, 서형준, 권병대(2006). 초음파에 의한 2중 수조에서의 조류제거 효율에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **28**(12), pp. 1310-1315.
- 유석봉(2005). 전기분해를 적용한 가정용정수기의 살균특성 연구. 석사학위논문, 인하대학교.
- 이석현(2002). 수처리를 위한 자외선소독기술의 현황과 전망. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상수도학회, pp. 33-35.
- 조민, 김지연, 유제용(2004). UV 조사(Ultraviolet Irradiation)에 의한 미생물의 불활성화. *첨단환경기술*, **2**, pp. 5-18.
- 조민, 정우동, 유제용(2007). 표면 살균을 위한 UV 기술의 적용. *대한환경공학회지*, **29**(9), pp. 1020-1026.
- 환경부(2002). 하수처리장 소독시설 설치사업 업무처리일반 지침.
- Bergmann, H., Iourtchouk, T., Schops, K., and Bouzek, K. (2002). New UV irradiation and direct electrolysis-promising methods for water disinfection. *Chem. Eng. J.*, **85**, pp. 111-120.
- Drogui, P., Elmaleh, S., Rumeau, M., Bernard, C., and Rambaud, A. (2001). Hydrogen peroxide production by water electrolysis: application to disinfection. *J. of Appl. Electrochem.*, **31**, pp. 877-882.
- Knudson, G. B. (1985). Photoreactivation of UV-irradiated *Legionella pneumophila* and other Legionella species. *Appl. Environ. Microbiol.*, **18**, pp. 75-80.
- Liu, Z., Stout, J. E., Tedesco, L., Boldin, M., Hwang, C., and Yu, V. L. (1995). Efficacy of ultraviolet light in preventing Legionella colonization of a hospital water distribution system. *Wat. Res.*, **29**, pp. 2275-2280.
- Matos, J., Laine, J., and Herrmann, J. M. (1999). Association of activated carbons of different origins with titania in the photocatalytic purification of water. *Carbon*, **37**, pp. 1870-1872.
- Muraca, P., Stout, J. E., and Yu, V. L. (1987). Comparative assesment of chlorine, heat, ozone and UV light for killing Legionella pneumophila within a model plumbing system. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, pp. 447-453.
- Pei, X., Janex, M. L., Savoye P., and Cockx, A. (2002). Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Wat. Res.*, **36**, pp. 1043-1055.
- Rosenfeldt, E. J., Linden, K. G., Canonica, S., and von Gunten, U. (2006). Comparison of the efficiency of ·OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Wat. Res.*, **40**(20), pp. 3695-3704.
- Suzuki, H., Sumida, Y., Umezawa, H., Kuwaki, Y., Iseki, M., Takaoka, D., and Yasuda, M. (2004). Electrolytic disinfection system for recycling water with high-performance direct-electrolysis technology. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상수도학회, pp. 512-515.
- Wu, J. J., Yang, J. S., Muruganandham, M., and Wu, C. C. (2008). The oxidation study of 2-propanol using ozone-based advanced oxidation processes. *Separation and Purification Technology*, **62**, pp. 39-46.