

전기분해 공정을 이용한 *E. coli* 소독에 미치는 인공하수 수질의 영향

박영식 · 김동석^{1)*}

대구대학교 기초교육원, ¹⁾대구가톨릭대학교 환경과학과
(2011년 6월 7일 접수; 2011년 7월 7일 수정; 2011년 7월 26일 채택)

Effect of Water Quality of Artificial Sewage on *E. coli* Disinfection Using Electrolysis Process

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

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

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

(Manuscript received 7 June, 2011; revised 7 July, 2011; accepted 26 July, 2011)

Abstract

There is an increasing incidence in health problems related to environmental issues that originate from inadequate treatment of sewage. This has compelled scientists to engage in innovative technologies to achieve a effective disinfection process. Electrolysis has emerged as one of the more feasible alternatives to conventional disinfection process. The objectives of the present paper were to investigate the effect of chemical characteristics on oxidant formation and *Escherichia coli* (*E. coli*) disinfection in synthetic sewage effluents. The influence of parameters such as COD, SS, T-N and T-P were investigated using laboratory scale batch reactor. The results showed that the higher COD, T-N and T-P concentration, the lower N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO, indicator of the generation of OH radical) degradation and *E. coli* disinfection was observed. The order of effect of RNO degradation and *E. coli* disinfection was T-P > COD > T-N > SS. When 4 parameter of water quality were worked simultaneously, oxidants formation and disinfection was decreased with increase of the concentration of sewage. To increase of the disinfection performance, the increase of disinfection time or electric power was need.

Key Words : Water quality, Disinfection, Sewage, *E. coli*, Electrolysis, Oxidants

1. 서론

우리나라에서는 1979년 청계천 하수처리장이 건설된 이래로 하수처리장 방류수 수질기준 중 대장균군

을 규제하지 않았으나 국민의 보건 향상과 생태계 보호 차원에서 2003년 1월 1일부터 하수처리장 방류수 수질기준 중 대장균군에 대한 규제조항이 새로 신설되었다. 신설된 대장균군 규제는 2003년 1월 1일부터 시행되어 대장균군수 기준이 3,000 개/mL 이하로 방류하여야 하며, 청정지역, 상수원보호구역 및 그 경계 구역으로부터 상류 유하거리 10 km 이내 지역, 취수 시설로부터 상류로 유하거리 10 km 이내 지역은 1,000 개/mL 이하로 대장균군수 규제를 적용받고 있

*Corresponding author : Dong-Seog Kim, Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea
Phone: +82-53-850-3250
E-mail: kimds@cup.ac.kr

다(김 등, 2004; 환경부, 2005). 2011년 2월 17일에 개정된 하수도법 시행규칙에서 공공하수처리시설의 방류수수질기준에 의하면 2012년 1월 1일부터 청정지역 등 기존 규제지역 외 취수시설로부터 유하거리 15 km 이내의 지역이 1,000 개/mL 이하로 대장균군수를 배출하여야한다(법제처, 2011).

현재 주로 이용되는 소독법 중 염소처리법은 소독 부산물인 클로로아민 화합물과 THM(트리할로메탄)이 위해하고, 수생 생물에 대하여 급성 및 만성 독성을 나타내고 물고기의 종류, 수를 감소시키는 것으로 나타나 THMs 문제를 해소할 수 있는 탈염소설비 등 대책을 강구하거나 다른 소독법들로 대체되고 있는 실정이다(환경부, 2007).

염소 소독을 대체하기 위한 여러 종류의 물리·화학적 소독법들이 개발되었으나, 오존과 자외선 조사 공정이 정수처리나 하수처리 공정에서 염소 소독의 대안으로 채택되고 있다. 그러나 오존 소독은 오존 발생장치가 고가이고 배오존 제거를 위한 부속설비가 필요하고, 부유물질이나 유기물질이 존재하는 경우 오존 요구량이 증가되어 경제적 타당성이 적은 것으로 알려졌다(Pei 등, 2002). 자외선 소독의 경우 자외선을 조사시켜 DNA 복제를 방해하는 thymine dimers를 DNA 내에 생성하여 살균시키는 것으로 알려져 있으며(Liu 등, 1995), 소요 면적 및 부대설비가 적고 고장에 대한 부담이 없고 유지관리가 간편하다는 장점이 있지만 하수처리장과 같이 탁도 및 SS (suspended solid)가 높은 수질에 대해서는 자외선의 투과율이 낮아 살균효과가 감소되는 단점이 있다(김 등, 2003).

최근 전자선이나 전극을 이용하는 전기화학적 소독 공정이 기존 소독 공정을 대체할 새로운 소독 공정으로 연구되고 있다(김 등, 2004b; 김과 박, 2010). 이 중 전기화학적 소독 공정은 물에서 양극과 음극에 직류 전원을 통전시키면 전위차(0.7~2.7 V)가 발생하며 이 전위차에 의해 직접 세포막이 파괴되는 직접소독과 전극에서 발생하는 하이드로퍼옥시칼(HOO·), 과산화수소(H₂O₂) 및 오존(O₃) 등의 산화물질에 의한 살균되는 간접소독에 의해 소독이 이루어진다(김 등, 2004b).

본 연구진은 선행연구에서 전기화학적 소독 공정의 대장균 살균 성능이 우수하다는 것을 보고한 바 있

다(김과 박, 2008). 그러나 수돗물을 대상으로 실시한 기초 실험이어서 실제 하수처리장 방류수에 함유되어 있는 물질에 대한 고려가 있어야 한다. 이에 따라 2012년 1월 1일부터 기준이 적용되는 공공하수처리 시설 방류수 수질기준에서 배출농도가 높은 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, 대장균군수 3,000 개/mL이하인 수질기준(법제처, 2011)에 대해 전기분해 공정을 적용하였을 때 개별 수질기준 인자가 산화제 생성 경향, 각 성분의 분해 경향 및 소독에 미치는 영향을 고찰하였고, 복합 수질을 고려한 공공하수처리시설 방류수 수질기준에서의 소독 성능 평가를 통하여 현장적용 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험에 사용한 전극은 110 × 63 mm 크기의 메시형 JP202 (Ru, 25%; Ir, 25%; 기타 성분, 50%) 전극으로 Ti 표면에 금속을 코팅한 전극이다. 실험에 사용한 반응기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 회분식이며 반응 부피는 1 L이다. 반응기 내에서의 교반을 위하여 에어펌프를 사용하여 공기를 공급 하였으며, 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50 V 20 A)를 이용하여 전극에 전원을 공급하였다. 전해질인 NaCl 농도 및 공기 공급량은 JP202 전극에 대해 행한 기 실험자료에서 얻은 최적 조건인 1.5 g/L, 2 L/min을 기준으로 실험하였다(김과 박, 2010).

실험 균주는 *E. coli* ACTC 15489를 선택하였으며, 한국미생물배양센터에서 분양받았다. 배지로는 nutrient broth(beef extract 3 g/L, peptone 5 g/L)를 사용하였고, 균은 300 mL 삼각 플라스크에 접종한 후, 37°C로 유지되는 배양기에서 대수성장기를 유지하도록 48시간 동안 배양하였다. 48시간이 경과한 후 원심분리기에서 10,000 rpm에서 15분간 원심 분리시켜 3회 이상 세척한 다음 균 stock을 확보하였다. 실험은 인공하수를 만들어 사용하였다. 인공 하수는 이 등(2005)의 인공 하수제조법에 따라 제조하였다. COD는 glucose와 sodium acetate(CH₃COONa), T-N은 NH₄Cl, T-P는

K_2HPO_4 와 KH_2PO_4 , SS는 Kaolin을 이용하여 원하는 농도로 조절하여 제조하였으며, 실험에 따라 농도를 변화시켜 사용하였다.

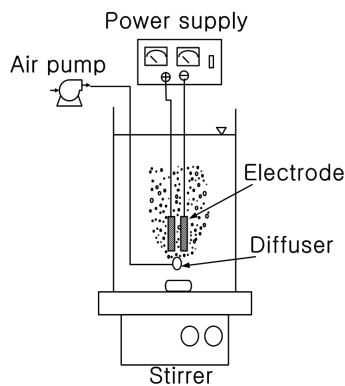


Fig. 1. Schematic diagram of electrochemical reactor system.

2.2. 분석 및 측정

실험방법으로는 균 stock 용액 1 mL를 증류수와 전해질이 들어 있는 1 L의 반응 장치에 넣고 초기 미생물 농도를 10^{10} CFU/L로 설정한 다음, 소독 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하였다. 균의 접종은 pour plate method에 의해 무균실에서 이루어졌다. 1개의 시료당 5개의 평판을 만들어 사용하였고, 시료 채취 후에는 수중에 잔존하는 산화제에 의해 계속적인 소독이 진행되는 것을 막기 위해 중화제 (neutralizer, 14.6% sodium thiosulphate와 10% sodium thioglycolate) 10 μ L를 투입하여 연속적으로 희석하여 nutrient agar에 투입한 다음 37°C로 유지되는 BOD 배양기에서 48시간 배양한 뒤 형성된 집락을 colony counter를 이용하여 계수하였다. 실험은 5회 실시하고 평균값과 표준편차를 그림에 나타내었다.

산화제 생성변화는 N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO)의 분해로 간접 확인하였다. $\cdot OH$ 은 생성량을 직접적으로 측정하기 어려워 $\cdot OH$ 과 선택적으로 반응하는 것으로 알려진 RNO의 분해를 통하여 간접적으로 측정하였다(Li 등, 2009). COD, SS, T-N, T-P는 Standard Method를 기준으로 측정하였다(APH-AWWA-WPCE, 1992).

3. 결과 및 고찰

3.1. 전력 선정

인공 하수 성분 변화에 따른 산화제 생성 변화와 소독에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전해질로 1.5 g/L의 NaCl을 첨가하고 공기 공급량이 2 L/min인 조건에서 전류를 변화시켜 전극에 걸리는 전압을 2, 4, 8 및 12 W로 변화시켜 전력 변화에 따른 RNO 분해정도를 Fig. 2에 나타내었다. 전력이 2 W인 경우 반응시간의 증가에 따라 RNO가 직선적으로 감소하였으나, 4 W부터 완만한 곡선을 나타내며 감소하는 경향을 보였다. 8 W와 12 W는 초기 반응속도가 2 W와 4 W에 비해 빠른 것으로 나타났고, 8 W와 12 W의 RNO 제거율 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 2 W와 4 W는 12분의 반응시간에서 RNO가 모두 제거되지 않았다. 반면 10분 이상의 반응시간에서 8 W의 RNO 제거율이 12 W의 RNO 제거율에 근접하였으며, 12분에서 8 W에서의 RNO 제거율은 99%, 12 W는 99.6%로 나타났다. 따라서 소독을 위한 전류는 8 W만으로도 충분한 것으로 사료되어 이후 소독 실험은 8 W에서 실험하였다.

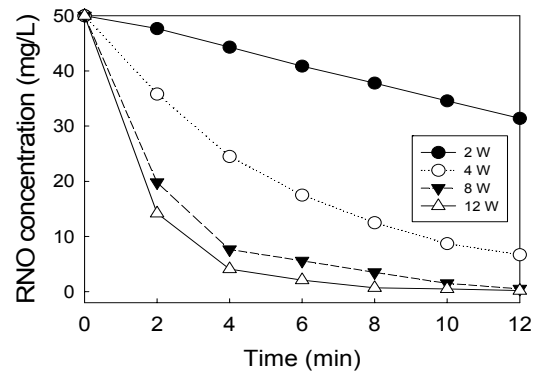


Fig. 2. Effect of electric power on RNO degradation.

3.2. COD와 SS의 영향

Fig. 3(a)에 초기 COD 농도 변화에 따른 OH 라디칼의 생성을 간접적으로 알 수 있는 RNO 변화, Fig. 3(b)에 COD 농도 변화, 초기 COD 농도 변화에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 Fig. 3(c)에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 보듯이 8분후 COD가 존재하지 않는 경우

RNO 처리율은 91.4%이지만 초기 COD 농도 증가에 따라 선형적으로 감소하여 방류수 수질기준인 40 mg/L에서는 86.6%, COD가 60 mg/L인 경우 82.6%인 것으로 나타나 초기 COD 농도가 증가할수록 RNO 분해가 감소하는 것으로 나타나 수중의 유기물 농도가 산화제 생성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 발생한 유기물이 존재하지 않는 경우 발생한 산화제가 단일 분해대상 물질인 RNO 분해에 모두 사용되어야 하지만 경쟁대상인 COD가 존재하기 때문에 RNO와 유기물 분해에 대해 경쟁반응을 하여 RNO 분해가 영향을 받는 것으로 사료되었다.

Fig. 3(b)에서 보듯이 초기 COD 농도가 15~60 mg/L일 때 반응시간에 따른 COD 농도 변화를 나타내었다. 초기 COD 농도가 15 mg/L인 경우 8분의 반응시간에서 8.8 mg/L의 COD가 제거되어 41.2%의 COD가 제거되었고, 30 mg/L에서는 30.5%의 COD가 제거되었고, 방류수 수질기준 범위와 유사한 45 mg/L에서는 10.1 mg/L의 COD가 제거되어 22.2%의 COD가 제거되었다. 방류수 수질기준보다 높은 60 mg/L인 경우 10.5 mg/L의 COD가 제거되어 17.5%의 COD가 제거되었다.

이와 같은 COD 제거율은 COD가 15~21 mg/L인 하수처리장 방류수에서 UV (417 mW/L)를 조사하였을 때 COD 제거율이 미미하였으며, 오존 (7.2 mg/L · min)을 처리하였을 때 COD 제거율이 20%였다고 보고한 이 등(2002)의 결과와 비교해볼 때 전기분해 공정이 UV 공정보다는 COD 제거율이 높고 오존 공정보다는 COD 제거율이 비슷하거나 높은 것으로 나타났다. 그러나 공정의 총괄평가는 COD 처리율, *E. coli* 소독 성능 및 장치비, 약품이나 전력비 등을 고려하여 종합적으로 판단하여야 할 것으로 사료되었다 (백과 손, 2006).

Fig. 3(c)에 초기 *E. coli* 농도가 10^{10} CFU/L이었을 때 초기 COD 농도에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 나타내었다. 초기 COD가 존재하지 않을 때 8분의 소독 시간에서 잔류 *E. coli* 집락수는 log 1.2로 8 log가 감소되어 방류수 수질기준 이내로 나타났다. COD 농도가 증가하면서 잔류 *E. coli* 집락수도 증가하였다. 초기 COD 농도가 45 mg/L이었을 때 잔류 *E. coli* 집락수는 log 1.8, 초기 COD 농도가 60 mg/L이었을 때는

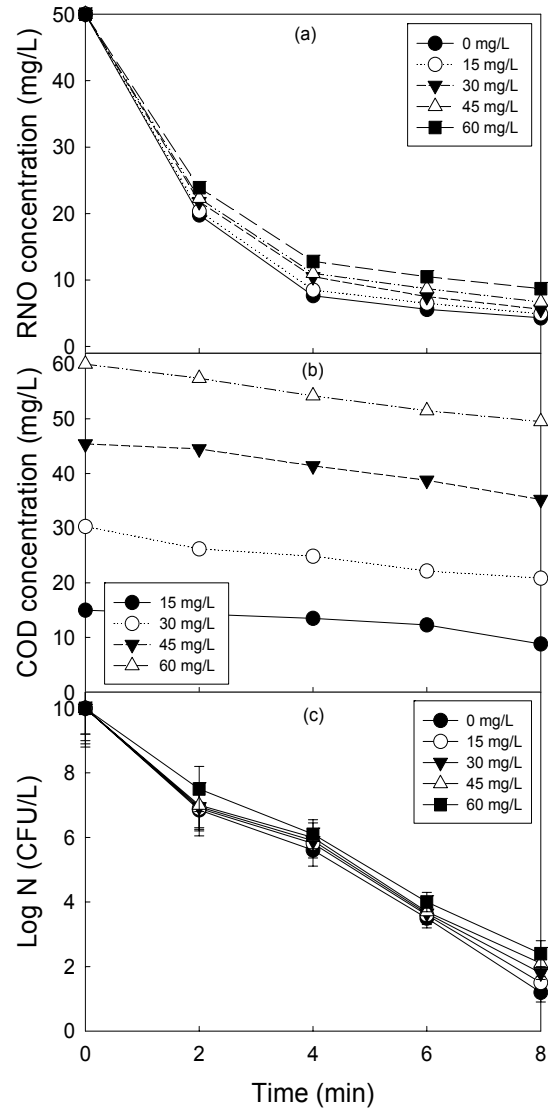


Fig. 3. Variation of RNO degradation, COD degradation and *E. coli* disinfection with initial COD concentration: (a) RNO degradation, (b) COD degradation, (c) *E. coli* disinfection.

log 2.1로 나타나 log 7.9가 감소되었다. RNO 분해가 COD 농도 증가에 따라 영향을 받지만 그러나 *E. coli* 소독의 경우는 초기 COD 농도에 따른 소독 성능 차이는 크지 않았다. 초기 COD 농도가 수질 기준을 증가하는 60 mg/L에서도 방류수 수질기준인 3,000 CFU/mL

(3×10^6 CFU/L)을 만족하는 것으로 사료되었다. 향후 실험은 단일 수질 항목 대신 실제 하수를 고려한 복합 수질기준에 대한 안전인자를 적용하여 잔류 *E. coli* 집락수를 1 CFU/mL (1×10^3 CFU/L or log 3 CFU/L)로 임의의 기준으로 결정하여 실험하였다.

김 등(2004)은 실제 하수처리장 방류수의 소독을 위해 1.0 kGy의 전자선 조사시 4.4^8 CFU/L의 초기 미생물 농도에서 잔류 *E. coli* 집락수가 2.9^5 CFU/L까지 감소하였으며, 부수적인 COD 감소는 미미하였다고 보고하였다. 본 결과와 비교할 때 실제 하수와 인공 하수의 차이가 있고, 사용 에너지 및 반응시간 등에 대한 자료가 없어 정확한 비교가 어렵지만 전기분해를 이용한 본 연구의 경우 방류수 수질기준을 넘는 COD 농도에서도 8분의 전기분해 시간동안 *E. coli* 제거율이 높고, COD 수질기준 내에서 20~40%의 부수적인 COD도 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 백과 손(2006)은 하수 방류수 중 대장균군 발생에 영향을 주는 인자에 대한 연구에서 12개의 수질 인자 중 수온, COD, 아질산성 질소, 염소이온 및 망간에 대한 회귀 모델에서 COD가 방류수의 대장균군 증식에 가장 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 따라서 소독 공정 선택 시 방류수의 소독과 동시에 COD의 제거는 방류 후 대장균군의 증식에 영향을 미치지 때문에 소독 효과와 동시에 COD를 제거할 수 있는 전기분해와 같은 공정의 선택이 중요하다고 사료되었다.

Fig. 4(a), (b) 및 (c)에 초기 SS 농도에 따른 RNO 농도 변화, SS 농도 변화와 *E. coli* 집락수 변화에 대해 나타내었다. Fig. 4(a)에서 보듯이 수중의 SS 농도가 0에서 잔류 RNO 농도는 4.3 mg/L이었으며 초기 SS 농도 증가에 따라 RNO 처리가 감소하여 SS 투입시 8분후 SS 농도인 4.3 mg/L에서 12.5 mg/L 투입시 RNO 농도는 6.2 mg/L로 나타나 초기 SS 농도가 RNO 분해에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 처리율 차이가 3.8%에 불과하며, 방류수 수질기준인 10 mg/L에서는 SS가 존재하지 않을 때와 RNO 처리율이 1.6%밖에 차이 나지 않아 SS가 산화제 생성에 미치는 영향은 적은 것으로 사료되었다. Fig. 4(b)에서 보듯이 SS 농도 변화에 따른 SS 제거율은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 플라즈마 공정에서는 SS가 제거될 물리화학적 작용이 없기 때문에 전혀 제거

되지 않은 것으로 사료되었다.

Fig. 4(c)에 초기 SS 농도에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 나타내었다. 8분에 SS가 존재하지 않을 때 잔류 *E. coli* 집락수는 log 1.2로 나타났으며, 방류수 수질기준인 10.0 mg/L에서는 log 1.5, 12.5 mg/L에서도 log 1.65로 나타나 수중의 SS 농도는 소독에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 UV 소독에서

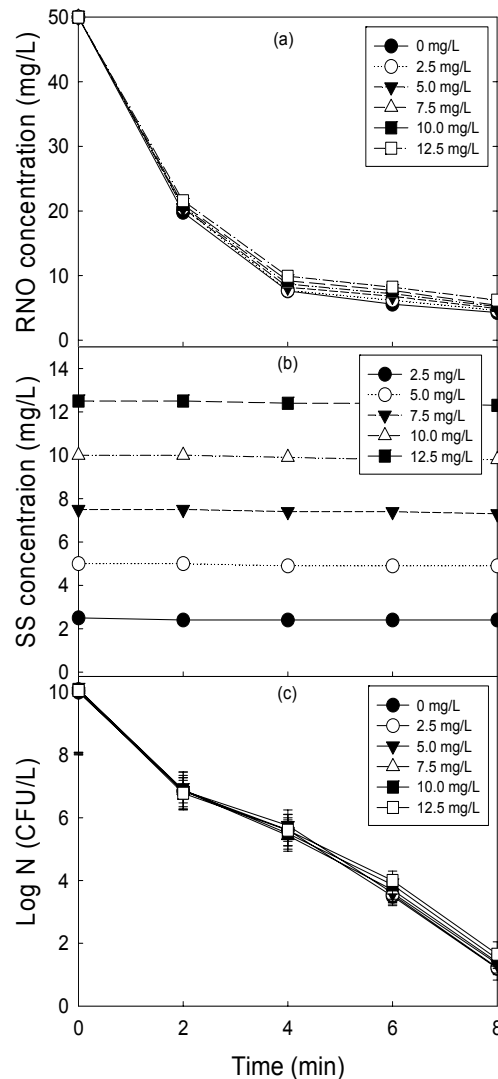


Fig. 4. Variation of RNO degradation, SS degradation and *E. coli* disinfection with initial SS concentration:(a) RNO degradation, (b) SS degradation, (c) *E. coli* disinfection.

SS 농도가 높을 때 자외선의 투과율이 나빠져 살균 효율이 감소하거나(김 등, 2003), 고전압 펄스 전기장을 이용한 하수처리장 방류수 소독에서 SS 농도가 0 mg/L에서 24 mg/L로 증가할 때 SS로 인한 에너지 차단 때문에 대장균군의 사멸율이 현저히 감소하였다고 보고한 이 등(2008)의 보고와 비교할 때 전기분해에 의한 소독의 경우 다른 소독 공정보다는 SS의 영향은 적은 것으로 사료되었다.

3.3. T-N과 T-P의 영향

Fig. 5에 RNO, T-N 제거 및 *E. coli* 소독에 미치는 T-N 농도의 영향을 나타내었다. 초기 T-N 농도가 0~60 mg/L로 증가할 때의 RNO 분해 경향을 Fig. 5 (a)에 나타내었다. 8분 경과시 T-N 농도가 0 mg/L인 경우 최종 RNO 농도는 4.3 mg/L, 방류수 수질 기준 근처인 15 mg/L인 경우 4.5 mg/L, 60 mg/L인 경우 6.7 mg/L로 나타나 T-N 농도가 0 mg/L와 60 mg/L인 경우의 RNO 제거율 차이가 4.8%를 나타내어 초기 T-N 농도가 산화제 생성에 미치는 영향은 COD보다는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5 (b)에 초기 T-N 농도에 따른 T-N 농도 변화를 나타내었다. 초기 T-N 농도가 15 mg/L에서는 8분 동안 1.8 mg/L(제거율, 12.0%), 45 mg/L는 5.2 mg/L(제거율, 11.6%), 60 mg/L에서는 12.5 mg/L(제거율, 20.8%)의 T-N이 제거되었다. 이는 3.2절의 COD 제거율보다 낮은 제거율을 보였으며, 전기분해를 이용한 소독 공정 적용의 경우 방류수 수질기준에 따라 10~20%의 부수적인 T-N 제거율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. Kim 등(2006)은 본 연구에서 사용한 유사한 종류의 DSA (dimensional stable anode) 전극을 이용한 전기분해에서 NH_4Cl 에서 N_2 로의 전환은 전극 표면에서 발생하는 OH 라디칼 때문이며, 실험조건에 따라 NH_4Cl 제거율이 5~30%라고 보고한 결과와 유사한 결과를 얻었다. 그러나 Kim 등 (2006)은 용액에 존재하는 염소 이온의 증가에 따라 암모니아 제거율이 증가하는 것으로 나타났다고 보고하였다. 본 연구 결과와 비교하여 종합적으로 판단할 때 인위적인 염소계 전해질이 첨가되지 않은 실제 하수처리 시 T-N 제거율이 감소할 가능성이 있는 것으로 사료되었다. 김 등(2004a)은 전자선을 조사하여 하수처리장 방류

수를 소독할 경우 소독에 필요한 전자선 조사량인 1 kQy에서는 소독과 20% 전후의 COD와 SS 제거효율을 얻을 수 있었으며, T-N과 T-P 제거는 미미하였고 보고한 결과로 볼 때 10~20%의 T-N 제거율을 부수적으로 얻을 수 있는 전기분해 공정이 유리한 것으로 사료되었다.

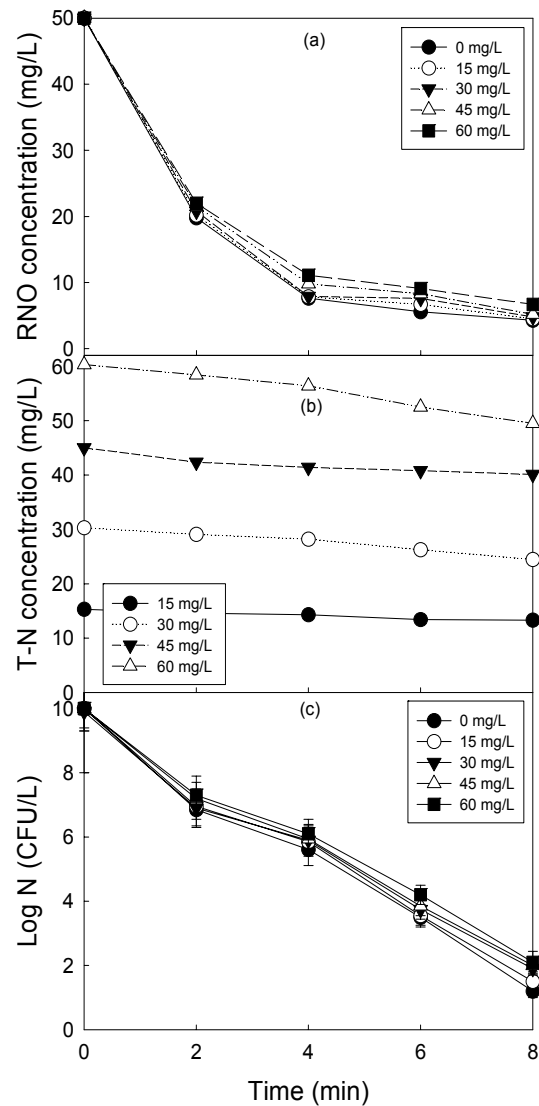


Fig. 5. Variation of RNO degradation, T-N degradation and *E. coli* disinfection with initial T-N concentration:(a) RNO degradation, (b) T-N degradation, (c) *E. coli* disinfection.

Fig. 5 (c)에 RNO 농도, T-N 농도, 초기 T-N 농도 변화에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 나타내었다. T-N 이 존재하지 않을 때 8분경과시 log 1.2에서 T-N 농도가 15 mg/L에서는 log 1.5, 30 mg/L에서는 log 1.9, 45 mg/L에서는 log 2.0 및 60 mg/L에서는 log 2.1로 나타나 T-N 농도 증가에 따라 *E. coli* 소독에 대한 T-N 농도의 영향은 적은 것으로 사료되었다.

Fig. 6에 초기 T-P 농도에 따른 RNO 농도, T-P 농도 및 *E. coli* 집락수 변화에 대해 나타내었다. Fig. 6 (a)에 나타내었듯이 초기 T-P 농도가 증가됨에 따라 RNO 제거율 감소는 다른 항목보다는 큰 것으로 나타났다. 즉, T-P가 0 mg/L에서는 8분 후 잔류 RNO 농도는 4.3 mg/L, 2 mg/L에서는 5.3 mg/L, 5 mg/L에서는 9.2 mg/L로 나타나 공공하수처리시설 방류수 수질기준에서 배출농도가 높은 1일 하수처리용량 500 m³ 이상에서 IV지역의 T-P 기준인 2 mg/L에서는 T-P 농도가 RNO 제거에 미치는 영향이 크지 않지만 본 실험범위를 넘는 12월1일부터 3월31일까지의 겨울철 T-P 기준인 8 mg/L인 경우 T-P에 의한 RNO 분해 저해효과가 상당히 클 것으로 사료되었다. 다른 수질항목과 T-P의 영향을 비교할 때 T-P의 경우 수질기준이 낮지만 산화제 생성을 나타내는 RNO 제거에 대한 저해율이 가장 높은 것으로 사료되었다. Fig. 6(b)에 초기 T-P 농도 변화에 따른 T-P 농도 변화를 나타내었다. 수질기준인 2 mg/L에서 잔류 T-P 농도는 1.9 mg/L, 5 mg/L에서는 4.81 mg/L로 나타나 제거율은 각각 5.0%와 3.8%로 나타났다. 전기분해를 이용한 하수나 축산 폐수 처리시 인의 주요 제거 메커니즘은 철이나 알루미늄과 같은 용해성 전극을 이용한다(선과 김, 2003; 윤, 2003). 용출된 금속 이온이 인과 결합하여 침전의 형태로 제거되는 점과 전극 성분이 용해되지 않는 DSA 전극을 이용하여 소독을 목적으로 저 전력에서 전기분해하는 본 연구의 경우 0.5 mg/L이하의 T-P 제거율은 분석 오차에 들어갈 수 있는 T-P 제거량을 나타내어 실질적인 T-P 제거가 거의 이루어지지 않았다고 사료되었다.

Fig. 6(c)에 초기 T-P 농도 변화에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 나타내었다. 8분의 소독 시간에서 T-P가 존재하지 않을 때 log 1.2에서 수질기준인 2 mg/L에서 log 2.1로 나타났고 5 mg/L에서는 log 2.9로 나타나

T-P는 실험한 수질인자 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 방류수 수질기준인 3,000 CFU/mL (log 3.47 CFU/mL 또는 3×10^6 CFU/L 또는 log 6.47 CFU/L)보다는 훨씬 적은 수가 잔류하여 수질기준에는 적합한 것으로 나타났다.

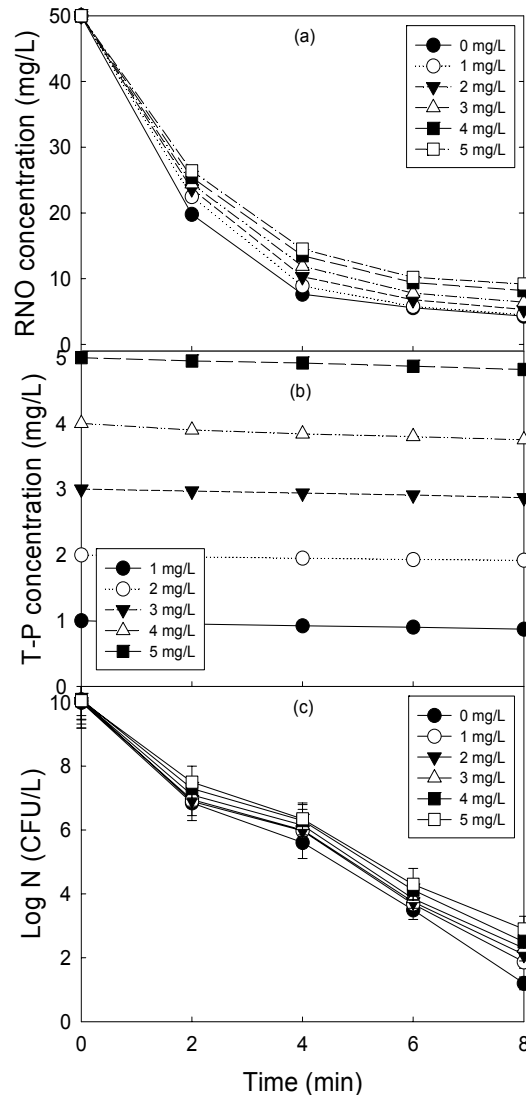


Fig. 6. Variation of RNO degradation, T-P degradation and *E. coli* disinfection with initial T-P concentration:(a) RNO degradation, (b) T-P degradation, (c) *E. coli* disinfection.

3.4. 복합 수질인자의 영향과 소독 성능의 향상

3.1절에서 3.3절까지 방류수 단일 수질인자에 대한 RNO 분해, 수질인자의 분해 및 *E. coli* 집락수 변화에 대해 고찰한 결과 방류수 중의 물질이 RNO 분해와 수질인자의 분해를 저해하는 것으로 나타났고, 잔류 *E. coli* 집락수도 영향을 받는 것으로 나타났다. 실제 하수를 고려할 경우 단일 인자가 아니라 모든 수질인자가 복합적으로 작용하기 때문에 모든 수질인자를 합쳐 증류수, 수질기준의 1/2 및 방류수 수질기준 및 방류수 수질기준을 넘게 하수를 조제하여(COD, 60 mg/L; SS, 12.5 mg/L; T-N, 60 mg/L; T-P, 5 mg/L) 예비테스트 한 결과 잔류 *E. coli* 집락수가 본 연구진이 레지오넬라 소독과 성능 비교를 위해 임의기준으로 정한 log 3 CFU/L를 넘는 것이 발생하여 소독 시간을 10분으로 늘리거나[Fig. 7(a)와 (b)], 전력을 증가시켜 12 W에 대해서도 RNO 분해와 *E. coli* 집락수 변화에 대해 Fig. 7(c)와 (d)에 나타내었다(김 등, 2010). Fig. 7 (a)에서 보듯이 하수 성분의 농도가 증가할수록 RNO 분해가 낮아지는 것으로 나타났다. 방류수 수질

기준인 2/2 sewage에서 8분의 반응시간에서 잔류 RNO 농도는 7.9 mg/L (제거율, 84.2%)이었으며, 10분으로 증가되면서 RNO 농도는 6.2 mg/L(제거율, 87.6%)로 나타났다. Fig. 7(b)에 인공 하수 농도 성분 변화에 따른 *E. coli* 집락수 변화를 나타내었다. 단일 성분만 변화시켰던 3.2 및 3.3절의 결과와는 달리 모든 성분이 혼합된 경우 8분의 소독시간에서는 방류수 수질기준이상인 하수 농도에서는 잔류 *E. coli* 집락수가 log 3을 넘었다. 소독시간을 2분 늘려 10분간 소독한 결과 방류수 수질기준 보다 높은 농도에서도 log 2 이하로 나타났다.

Fig. 7(c)와 (d)는 전력을 8 W에서 12 W로 증가시켜 RNO 분해와 *E. coli* 집락수 변화를 고찰하였다. Fig. 7(c)에 나타내었듯이 8 W에서 10분간 분해시켰을 때와 12 W에서 RNO 분해를 비교하면 12 W에서 6분간 반응시켰을 때의 잔류 RNO 농도가 8 W에서 8분간 반응시켰을 때가 유사한 것으로 나타났다. 8 W, 10분과 12 W, 8분에서의 잔류 RNO 농도의 경우 12 W, 8분에서의 잔류 RNO 농도가 낮은 것으로 나타났다.

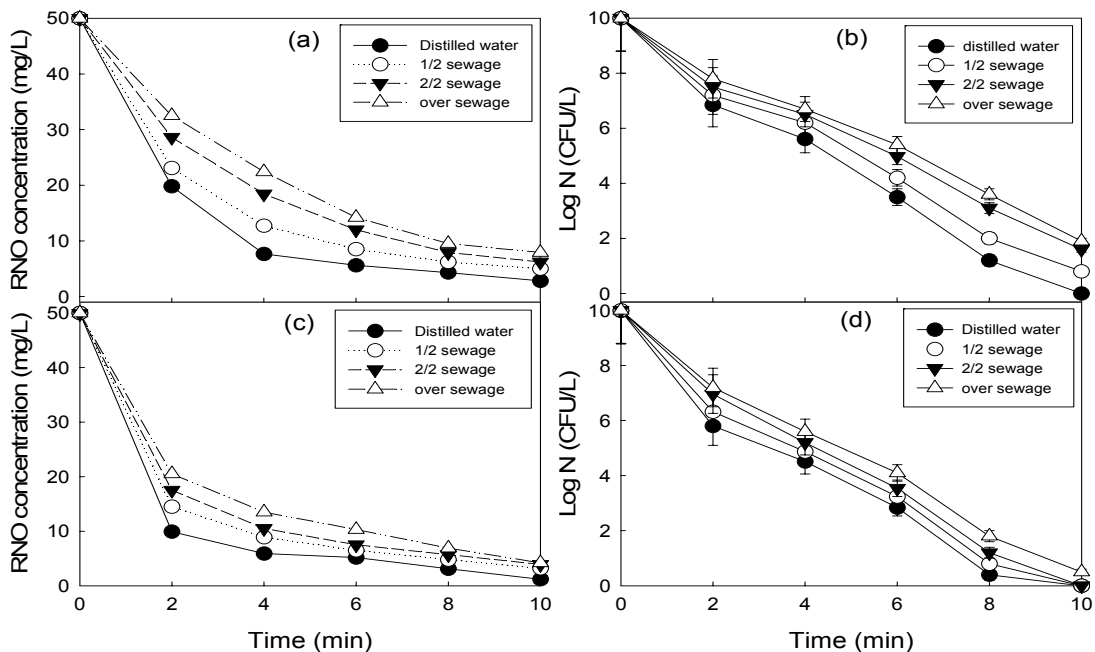


Fig. 7. Variation of RNO degradation and *E. coli* disinfection with electric power:(a) RNO degradation at 8 W, (b) *E. coli* disinfection at 8 W, (c) RNO degradation at 12 W, (d) *E. coli* disinfection at 12 W.

12 W에서 8분간 소독하였을 때 실험한 모든 수질에서 log 2 이하의 잔류 *E. coli* 집락수를 나타내었고, 10분에서는 모든 하수 농도에서 log 1 이하로 나타났다. 소독 시간을 증가시키거나 전력을 증가시키는 것 모두 소독 효율을 증가시키는 것으로 나타났으나 소독 시간을 증가시키는 것이 다소 유리한 것으로 나타났다. 또한 8 W에서의 10분간 소독할 경우의 소비 전력량은 1.33 W·h, 12 W에서의 8분간 소독시 소비 전력량은 1.6 W·h로 나타나 소비 전력 면에서도 소독시간을 늘리는 것이 유리한 것으로 나타났다. 그러나 OH 라디칼 생성을 나타내는 RNO 분해는 12 W가 초기 반응속도가 빠르고 하수 농도에 큰 영향을 받지 않고 분해되는 것으로 나타나 소독 외 COD 제거 등 부수적인 수질 감소 효과는 고찰이 더 필요한 것으로 나타났다. 또한 증류수에 전해질을 첨가하고 수질기준에 맞춘 수질인자 시험자료가 현장 적용되기 위해서는 실제 공공하수처리시설의 방류수를 대상으로 하여 실험을 행할 필요성이 제기되었다. 또한 전기화학 적 소독법의 실제 현장 적용을 위해서는 기존 소독 공정과의 소독 성능 비교, 성능대비 시설 및 유지비 등 경제성도 함께 고려하여 종합적으로 판단하여야 할 것으로 사료되었다.

4. 결론

하수처리장의 방류수 수질 각 항목이 전기분해 공정에서 산화제 생성, 각 수질인자의 분해 및 *E. coli* 소독에 미치는 영향을 고찰하고 각 인자들이 복합적으로 작용하는 경우 산화제 생성과 *E. coli* 소독에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1. 전력이 2~12 W인 조건에서 RNO 분해를 고찰한 결과 8 W와 12 W에서의 초기 RNO 분해속도가 빠르고 10분 이상의 반응시간에서 8 W의 RNO 제거율이 12 W의 RNO 제거율에 근접하여, 최적 전류는 8 W인 것으로 사료되었다.
2. 초기 COD 농도가 0 mg/L에서 60 mg/L로 증가할수록 RNO 분해가 감소하는 것으로 나타났다. 초기 COD 농도에 따라 COD 제거율이 18~41%로 나타나 감소한 산화제가 COD 제거에 이용되는 것으로 나타났다. 초기 SS 농도는 RNO 분해

나 *E. coli* 소독에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3. 초기 T-N 농도에 따라 약 5%의 RNO 분해 저해를 받으나 10~20%의 T-N 제거율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. T-N 농도 증가에 따른 *E. coli* 소독의 영향은 적은 것으로 나타났다. 초기 T-P 농도 대비 RNO 분해 저해가 높은 것으로 나타났다. T-P는 제거되지 않는 것으로 나타났다. T-P는 실험한 모든 수질 인자 중에서 *E. coli* 소독 저해율이 가장 높은 것으로 나타났으나 방류수 수질기준을 충족시키는 것으로 나타났다.
4. 4종류의 수질기준 인자가 복합적으로 작용할 때 RNO 처리율은 단일 인자보다는 낮아졌으며, 농도가 증가할수록 감소되었다. 소독 효율 증가를 위해 소독 시간의 증가와 전력을 증가시켜 비교한 결과 소독 시간을 늘리는 것이 전력을 증가시키는 것 보다 유리한 것으로 사료되었다.

참고 문헌

- 김동석, 박영식, 2008, 냉각탑수 수질이 Ru/Ti 전극을 이용한 *Legionella pneumophila* 소독에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 17(6), 581-592.
- 김동석, 박영식, 2010, 직접 산화와 간접 산화용 전극의 dye 제거 성능 비교, 한국물환경학회지, 26(6), 963-968.
- 김동석, 송승구, 박영식, 2010, *E. coli* 불활성화를 위한 단일 소독 공정의 비교, 한국생물공학회지, 25(1), 25-32.
- 김상진, 김기곤, 윤병루, 최승관, 전창수, 왕창근, 2003, 자외선과 기포를 이용한 기포부상식 UV 하수소독 기술, 춘계학술발표회논문집, 대한환경공학회, 537-542.
- 김유리, 한범수, 김진구, 강호, 2004a, 전자선을 이용한 하수처리장 방류수 내 대장균군 살균, 한국물환경학회지, 20(4), 376-381.
- 김홍석, 서인석, 최일환, 김연권, 김지연, 이진영, 2004b, 용존공기를 이용한 소독능 향상 전기분해 소독 공정 개발, 공동추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회-대한상수도학회, 625-628.
- 법제처, 2011, 하수도법시행규칙 20100630, 별표 1 공공하수처리시설의 방류수수질기준(제3조제1항제1호 관련).

- 백영석, 손진식, 2006, 하수방류수의 대장균군 발생에 영향을 미치는 수질인자에 관한 연구, 한국물환경학회지, 22(1), 166-171.
- 선용호, 김영석, 2003, 전기분해를 이용한 축산폐수처리 장치에서 수리학적 체류시간에 따른 유기물 및 영양염류 제거 특성, J. of Environ. Sci., 9(1), 17-21.
- 윤용수, 2003, 전기분해를 이용한 생활하수 처리 특성, 한국환경분석학회지, 6(2), 125-132.
- 이장훈, 장승철, 권혁구, 김동욱, 2005, 인공하수 조성 성분에 따른 SBR 처리 공정의 효율에 관한 연구, 한국환경보건학회지, 31(2), 99-106.
- 이흥구, 이경혁, 박종복, 강준원, 2002, 하수 처리장 방류수 재이용을 위한 고급산화공정 평가, 24(12), 2175-2182.
- 환경부, 2007, 하수처리장 소독시설 설치사업 업무처리 일반지침, 101-102.
- 환경부, 2005, 친환경 방류수 처리 · 관리기술- 고순도 이산화염소 발생 자동화를 통한 하수고도처리 및 소독 기술 개발, 1-2.
- APH-AWWA-WPCE, 1992, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., APHA, Washington D.C., 1992.
- Kim, K. W., Kim, Y. J., Kim, I. T., Park, G. I., Lee, E. H., 2006, Electrochemical conversion characteristics of ammonia nitrogen, Wat. Res., 40, 1431-1441.
- Li, M., Feng, C., Hu, W., Zhang, Z., Sugiura, N., 2009, Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO₂-Pt and Ti/IrO₂-Pt, J. of Hazard. Mat., 162, 455-462.
- Liu, Z., Stout, J. E., Tedesco, L., Boldin, M., Hwang, C., Yu, V. L., 1995, Efficacy of ultraviolet light in preventing *Legionella* colonization of a hospital water distribution system, Wat. Res., 29, 2275-2280.
- Pei, X., Janex, M. L., Savoye, P., Cock, A., 2002, Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design, Wat. Res., 36, 1043-1055.