

전기화학적 소독에 의한 *Legionella pneumophila* 불활성화

박영식[†] · 김동석^{*}

대구대학교 보건환경전공

^{*}대구가톨릭대학교 환경과학과

Inactivation of *Legionella pneumophila* by Electrochemical Disinfection

Young-Seek Park[†] · Dong-Seog Kim^{*}

Department of Health & Environment, Daegu University

^{*}Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

(Received 28 June 2007, Accepted 23 August 2007)

Abstract

This study has carried out a performance of dimensionally stable anode for the purpose of disinfection of *Legionella pneumophila* in water. Three kinds of electrode were prepared by plating and thermal deposition, which were coated by the oxides of Pt, Ru and Ir on Ti metal surface, respectively. The order of disinfection performance for *Legionella pneumophila* was Ru/Ti > Ir/Ti > Pt/Ti. Free Cl and ClO₂ generation of Ir/Ti electrode was higher than that of two electrodes. However, the concentrations of generated H₂O₂ and O₃ of the Ru/Ti electrode were highest among the three electrodes. The higher NaCl concentration was, the more oxidants was generated and disinfection effect was increased. However, optimum NaCl dosage was 0.0125% due to the regulation on the conductivity and Cl⁻ concentration for the cooling water quality of air conditioning and refrigeration equipment. With the increase of current, oxidants was more generated and following disinfection effect was increased. The increase of electrode distance reduced oxidants generation due to the low electric power, and their disinfection effect was decreased accordingly.

keywords : Current, Electrode, Electrode distance, *Legionella pneumophila*, Oxidants

1. 서 론

*Legionella*균이 처음으로 보고된 것은 1967년 필라델피아에서 221명에게서 열성 폐렴이 발생하여 이 중 34명이 사망하였고, 그 이듬해 미국 질병통제센터 조사단이 사망환자의 폐 조직에서 원인 균인 *Legionella pneumophila*를 분리하는데 성공함으로써 알려지게 되었으며, 혈청학적인 연구를 통하여 그 이전에 발생한 유사 질환 환자도 *Legionella*균에 의한 것임이 밝혀지게 되었다(Fraser et al., 1977; Kaufmann et al., 1981).

그 후 Morris 등(1979)은 환경 표본에서 *L. pneumophila*를 분리하여 에어컨 냉각수와 증발형 콘덴서가 *L. pneumophila*의 전파에 중요 경로를 밝혔고, Tobin 등(1981)은 에어컨이 가동되지 않는 병실에 장기 입원중인 장기이식환자와 일반 병동의 샤워기를 사용한 환자로부터 *L. pneumophila*를 분리하는 등 지금까지 집단적이거나 산발적인 환자 발생이 보고되어 왔다.

*Legionella*속은 자연환경뿐만 아니라 냉각탑수, 증발형 콘덴서, 가습기, 치과에서 사용하는 물과 같은 인공 환경

에서도 빈번하게 발견되고 있다. 특히, 대형건물의 냉각탑수가 *Legionella*균으로 오염될 경우 비산되는 냉각탑수의 흡입으로 인하여 *Legionella*증이 유발될 수 있으며(박 등, 2001; States et al., 1987), 건물 내의 급배수 시설에 형성된 생물막내에서 증식한 균이 샤워시 aerosol의 형태로 확산되어 인체 감염이 이루어지는 것으로 알려져 있다(Marrao et al., 1993). 대형 건물의 냉각탑수에 높게 분포하고 있는 *Legionella*균은 여름철 집중적으로 냉방장치가 가동되어 냉각탑수의 부하가 가중됨에 따라 *Legionella*균 증식에 알맞은 조건이 형성되는 8월부터 9월까지는 적절한 소독조치가 없는 상태에서 대부분 오염될 것으로 추정되어 관계당국에서는 매년 여름 1차례 검사하고 그 결과를 발표함으로써 *Legionella*증의 발생예방에 노력하고 있다(황 등, 1999).

황 등(1999)이 1994년부터 1998년까지 5년간 서울시내 다중이용시설 637개소 냉각탑수의 *Legionella*균 분포를 조사한 결과, 평균 *Legionella*균 검출율은 15.7%였는데, 빌딩 15.5%, 호텔 11.7%, 병원 12.65%, 백화점 및 대형쇼핑센터 19.45%, 기타 20%라고 보고하였다. 총 637개소 중 100,000 CFU/L 이상 17개소(2.7%), 10,000~100,000 CFU/L 54개소(8.5%), 10,000 CFU/L 이하 29개소(4.6%)이었으며, 분리된 *Legionella* 균주 중 *L. pneumophila*가 95%이었고

[†] To whom correspondence should be addressed.
ysparkk@daegu.ac.kr

검출된 중량은 평균 $6.1 \times 10^4 \pm 1.4 \times 10^4$ CFU/L이었다고 보고한 결과로 볼 때, 그 위험성은 상존한다고 볼 수 있다. 일본의 *Legionella*증 방지지침에 의하면 냉각탑수의 *Legionella*균수에 대한 대책으로 10^3 /L을 희망범위로, $10^3 \sim 10^4$ /L를 요관찰범위로, $10^4 \sim 10^6$ /L를 요주의 범위로, 10^6 /L 이상을 요긴급처치범위로 냉각탑수를 관리하도록 권장하고 있다(厚生省 生活衛生局 企劃課, 1993). 이 분류에 의하면 희망범위가 84.6%(539개소), 요관찰범위 4.2%(27개소), 요주의범위 10.9%(70개소) 및 요긴급처치범위 0.2%(1개소)인데, 1회 시험결과로 냉각탑수 상태를 전반적으로 나타낼 수 없으므로 지속적인 관리가 요구된다고 보고하고 있다(황 등, 1999).

현재 냉각탑의 레지오넬라균 제거목적으로 국내, 외에서 염소처리, 고온살균법, 자외선 조사, 오존처리, 구리-은 이온화법 등이 사용되고 있으나 어느 방법도 *Legionella*균 제거에는 완벽하지 않은 것으로 인식되고 있다(국립보건원, 2002).

*L. pneumophila*의 적정 배양온도는 37°C 이며, 50°C 이상에서는 생장이 억제되는 것으로 알려져 있어 온수를 55°C 이상으로 유지하여 균을 제어할 수 있으나, 온도유지를 위한 비용이 많이 소요된다. 또한 그 효과는 한시적이며, 배관 등에서 1달 내에 다시 번식한다고 알려져 있다(Lin et al., 1998).

Legionella 속들은 염소에 저항성이 있는 것으로 알려졌는데, 수계에서 이 세균들이 생물막이나 원생동물 등과 결합되기 때문이라고 보고된 바 있다(Atlas, 1999).

최근에는 구리-은 이온화법이 사용되기도 하는데, 이 방법은 균을 억제(suppress)하기보다는 죽이는 역할을 하는데, 살균 효율은 물의 pH에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Lin et al., 2002).

파장이 짧은 UV의 조사는 살균제(biocide) 효과가 있는데, DNA 복제를 방해하는 thymine dimers를 DNA내에 생성하여 살균시키는 것으로 알려져 있으며, 파장이 254 nm에서 그 효과가 최대인 것으로 알려져 있다(Liu et al., 1995). 그러나 UV 살균 시스템은 미생물 회복(repair)의 잠재적인 위험을 가지고 있다. *Legionella* 속들은 *E. coli*보다 UV 조사에 더 민감하지만 태양광하에서 재활성화(photo-reactivation)되어 미생물이 회복될 수 있다는 점이 단점이다(Knudson, 1985).

전기분해에 의한 소독은 다른 소독 기술에 비해 초기 투자비가 저렴하고 운전 및 유지관리가 용이한 대체 소독기술로 인식되고 있다(유 등, 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 균의 직접적인 소독효과와 전극에서 발생하는 하이드로과옥시칼($\text{HOO}\cdot$), 과산화수소(H_2O_2) 및 오존(O_3) 등의 산화물질에 의한 간접 소독효과로 나눌 수 있다(김 등, 2004). 또한 시설비와 유지관리가 용이하고, 처리수 내에 존재하는 유기물 등도 전기분해에서 발생하는 각종 라디칼 등에 의해 부수적으로 제거되는 효과가 있다(Drogui et al.,

2001b). 본 연구의 목적은 전기 소독 기술을 이용하여 냉각탑수 내의 *L. pneumophila*를 일본 후생성 *Legionella*증 방지지침으로 권장하는 수준인 10^3 CFU/L 이하로 유지하도록 처리하기 위한 전기분해를 이용한 소독기술의 가능성을 평가하고 산화제의 정량분석을 통하여 소독 메커니즘을 규명하기 위한 기초자료를 도출하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

*Legionella*균은 *L. pneumophila* (ACTC 33152)를 분양받아 실험에 사용하였다. 배지는 BCYE- α 배지를 37°C 에서 BOD incubator로 배양하였다. 실험방법으로는 균 용액 1 mL를 수돗물이 들어 있는 실험용액에 넣고 1×10^6 CFU/L에 맞춘 후 반응용적이 0.4 L인 회분식 반응기에 투입하고 실험 *Legionella*균을 처리한 다음 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하여 배양하였다.

Pt/Ti 전극과 Ir/Ti 전극은 현재 상업적으로 이용 가능하므로 Ti 매쉬 두께가 1 mm이고 코팅 두께가 5 μm 인 매쉬형 도금 전극(현성 E&E)을 구매하여 사용하였다. Ru/Ti 전극은 제조하여 사용하였다. Ru/Ti 전극의 자세한 제조법은 기 발표된 논문에 자세히 나와 있다(김 등, 2007). 실험에 사용한 모든 전극의 크기는 63×110 mm (면적 : 41.05 cm^2)이었다. 실험은 *Legionella*균과 전해질이 들어 있는 회분식 반응기에 전극을 설치하여 직류전원공급기(현성 E&E)로 60초 동안 전류를 공급하였고, 60초 이후는 전원 공급을 중단하고 수중에 남아있는 산화제에 의해 소독이 되도록 하였으며 180초 후 반응을 종결하였다. 실험은 상온에서 수행하였으며, 예비실험 결과 시간 경과에 따라 온도가 빠르게 상승하므로 온도 상승이 3°C 이내인 60초 동안 전원을 공급하였다.

2.2. 분석 및 측정

표준화된 균 용액 1 mL를 수돗물이 들어 있는 실험용액에 넣고 요긴급처치범위인 1×10^6 CFU/L에 맞춘 후 회분식 반응기에 투입하고 실험 목적에 따라 *Legionella*균을 처리한 다음 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하여 배양하였다. *Legionella*균의 접종은 pour plate method에 의해 무균실에서 이루어졌으며, 실험 오차를 줄이기 위해 1개의 시료당 5개의 평판을 만들었다. *Legionella*균을 배양하는 동안 소독의 진행을 막기 위해 채취된 시료에 중화제(neutralizer, 14.6% sodium thiosulfate와 10% sodium thio-glycolate) 10 μL 를 투입하여 연속적으로 희석하고 BCYE 한천 배지에 투입하고 37°C 로 유지되는 BOD 배양기에서 72시간동안 배양 후 형성된 *Legionella* 집락을 계수하였다. 실험은 3회 실시하고 평균값과 표준편차를 그림에 나타내었다.

유리 염소 및 이산화염소는 HACH pocket colorimeter와 유리 염소 및 이산화염소 측정용 시약을 사용하여 DPD방법(N, N-diethyl-p-phenylenediamine)으로 측정하고, 오존 농

도는 Indigo법을 이용하여 측정하였다. 과산화수소의 측정에는 1 M NaOH 50 μ L를 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(권 등, 1990).

전기전도도는 전도도미터 (Eutech, cybercan PC 300)을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소독 효율과 산화제 생성에 미치는 전극 재료와 전해질 농도의 영향

Fig. 1에 전극의 간격을 2 mm로 유지하고 전극을 Pt/Ti, Ir/Ti, Ru/Ti 세 종류를 사용하고 전해질인 NaCl 농도를 0, 0.0125%, 0.025%로 조절하여 전극 종류와 NaCl 농도에 따른 *Legionella*균의 소독효과를 나타내었다. Fig. 1(a)에서 보듯이 전해질이 투입되지 않은 수돗물을 사용한 경우 Pt/Ti 전극의 경우 180초의 소독시간 이후 최종 농도는 초기 농도의 52%, Ir/Ti 전극의 경우 15.4%, Ru/Ti 전극의 경우는 8.1%로 나타나 소독 효과는 Ru/Ti > Ir/Ti > Pt/Ti 전극의 순서로 나타났다. 유 등(2003)은 염색폐수 처리시 처리율은 Ir/Ti > Ru/Ti > Pt/Ti이라고 보고하였다. 반면, Naumczyk 등(1996)은 염색폐수 처리시 유기물 제거효율은 Ru/Ti > Pt/Ti > Pt-Ir/Ti 전극의 순이라고 보고하였고, 김 등(2007)은 발암성 안료인 Rhodamine B처리에서 탈색은 Ru/Ti > Ir/Ti > Pt/Ti 전극의 순서이었다고 보고하였다. Ru/Ti 전극은 촉매 활성이 좋은 반면 전극 수명이 짧고, Ir/Ti 전극은 전극 수명이 길지만 촉매활성이 떨어지는 단점이 있다고 보고한 연구 등(김 등, 2002; Chen et al., 2001; Kötzt et al., 1991)으로 판단할 때 염색폐수와 미생물 살균이라는 대상물질이 다르지만 전극활성이 좋고 난분해성 물질 제거 능력이 우수한 Ru/Ti 전극의 미생물 살균력도 우수하다고 사료되었다.

수돗물을 사용할 경우 성능이 가장 좋게 나타났던 Ru/Ti 전극도 실제 균수로는 80000 CFU/L로 나타났기 때문에 기준을 만족하지는 못하였다. 용액의 전도도를 높이고 염소첨가로 인한 부수적인 살균효과를 얻기 위하여 NaCl을 0.0125%와 0.025% 첨가하여 Fig. 1(b), (c)에 나타내었다. NaCl이 0.0125% 첨가된 경우 수돗물을 사용한 경우보다 소독능이 향상된 것으로 나타났고, 99.99%의 살균에 소요되는 시간은 Ir/Ti 전극의 경우 90초, Ru/Ti 전극의 경우는 60초가 소요되는 것으로 나타났다. 0.025%의 경우는 99.99% 살균에는 Ir/Ti 전극, Ru/Ti 전극 모두 50초가 소요되었으며, Pt/Ti 전극의 경우 180초 후 99.7%가 살균되는 것으로 나타났으나 세균수는 살균기준으로 선정한 1000 CFU/L를 초과한 3160 CFU/L로 나타났다.

수돗물의 전기전도도는 359 μ S/cm, NaCl 0.0125%는 636 μ S/cm, 0.025%는 907 μ S/cm로 나타나 전해질 첨가에 따라 전기전도도는 직선적으로 증가하는 경향을 보였다.

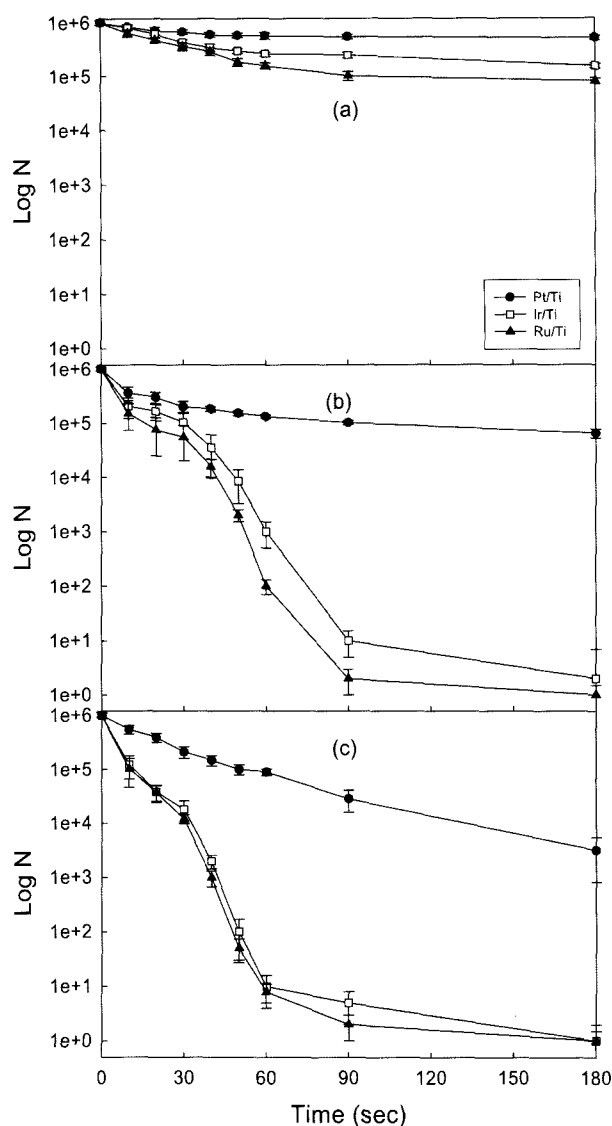


Fig. 1. Effect of electrode material and NaCl concentration on the disinfection of *L. pneumophila* (electrode distance: 2 mm; current: 4.5 A). (a) Tap water, (b) NaCl 0.0125%, (c) NaCl 0.025%.

Fig. 2와 3에 NaCl 농도가 0, 0.0125%인 경우에서의 산화제인 유리 염소, 이산화염소, 과산화수소 및 오존 농도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 유리 염소와 이산화염소의 생성 농도는 Ir/Ti > Ru/Ti > Pt/Ti의 순서로 나타났고, 과산화수소와 오존은 Ru/Ti > Ir/Ti > Pt/Ti로 나타났다. 생성된 산화제 중 가장 농도가 높은 것은 유리 염소로 나타났으며, 오존의 발생량이 가장 적은 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 촉매성 산화물 전극(DSA, dimensionally stable anode)을 이용하여 염색폐수 처리시 유리 염소와 hypochlorite 발생량이 Ir/Ti > Ru/Ti > Pt/Ti > Sn/Ti > SPR/Ti로 나타났다고 보고한 결과와 유사하였다(유 등, 2003).

Ir/Ti와 Ru/Ti 전극의 살균 성능 차이는 염소계와 산소계 산화제 농도가 서로 달라 OH라디칼 측정과 함께 고려해야 하지만 Pt/Ti 전극의 살균능은 모든 생성 산화제의 농도가 낮기 때문에 살균능이 낮다고 사료되었다.

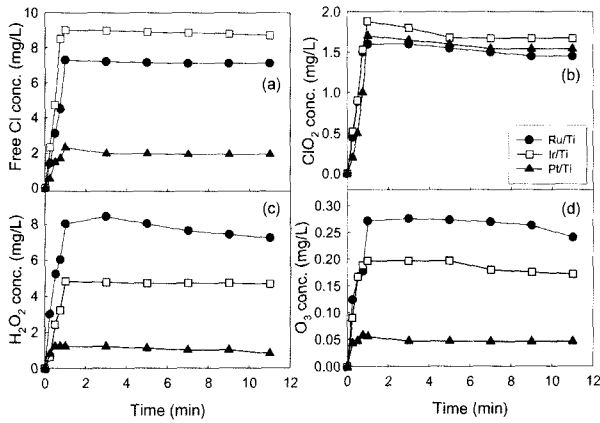


Fig. 2. Effect of electrode material on the oxidants formation (NaCl 0%; electrode distance: 2 mm; current: 4.5 A). (a) Free Cl, (b) ClO₂, (c) H₂O₂, (d) O₃.

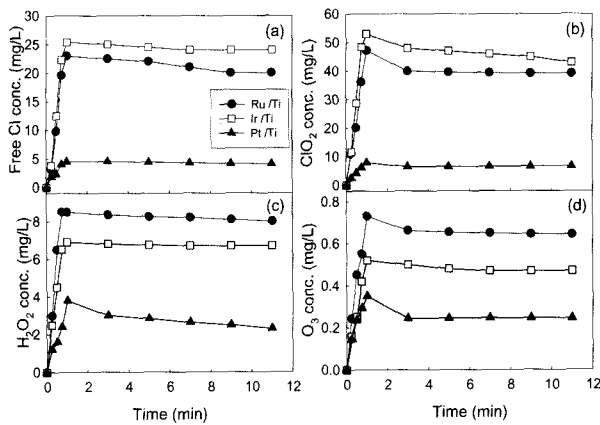


Fig. 3. Effect of electrode material on the oxidants formation (NaCl 0.0125%; electrode distance: 2 mm; current: 4.5 A). (a) Free Cl, (b) ClO₂, (c) H₂O₂, (d) O₃.

전기를 공급하는 시간은 1분이지만 Fig. 2에서 보듯이 생성된 산화제는 시간이 경과함에 따라 무시할 수 있을 정도로 농도가 감소하고 생성된 산화제의 농도가 유지되므로 1분간의 적용된 전기분해 시간으로도 소독효과가 지속될 수 있는 것으로 사료되었다.

Fig. 3에 NaCl이 0.0125%일 때 생성되는 산화제의 농도를 나타내었다. 생성되는 산화제중 전극별 생성순위는 NaCl 0%와 같은 경향을 나타내었다. 생성된 산화제 중 농도가 높은 순서는 이산화염소 > 유리 염소 > 과산화수소 > 오존으로 나타났다. NaCl 량이 0.0125%로 증가하면서 생성되는 산화제의 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 산화제 생성량이 가장 높았던 전극을 기준으로 하였을 때 유리 염소(Ir/Ti 전극)은 9.0 mg/L에서 23.0 mg/L로 2.55배의 농도 증가율을 나타내었고, 이산화염소(Ir/Ti 전극)는 1.88 mg/L에서 53.1 mg/L로 28.2배, 과산화수소(Ru/Ti 전극)는 8.4 mg/L에서 8.7 mg/L로 1.04배, 오존(Ru/Ti 전극)은 0.27 mg/L에서 1.23 mg/L로 4.9배로 각 산화제의 농도증가율은 달랐다. 생성된 산화제 중 첨가된 NaCl 농도와 직접 관련이 있는 유리 염소와 이산화염소의 생성농도가 높았고, 특히 이산화염소는 농도 증가율과 농도가 가장 높은 것으로

나타났다. 과산화수소와 오존은 NaCl 첨가량과는 관계없지만 NaCl 첨가로 인해 높아진 전기전도도 때문에 전류의 흐름이 원활하여 물의 전기분해가 활발하게 일어나 과산화수소나 오존의 생성량이 많아진 것 같다.

0.025% NaCl에서 발생하는 산화제의 농도는 산화제 생성량이 가장 많았던 전극을 기준으로 할 때 유리 염소(Ir/Ti 전극)은 63.1 mg/L, 이산화염소(Ir/Ti 전극)는 116.5 mg/L로, 과산화수소(Ru/Ti 전극)는 22.4 mg/L, 오존(Ru/Ti 전극)는 1.47 mg/L로 나타났다.

NaCl 농도가 높을수록 전기전도도가 증가하고, 생성되는 산화제의 농도가 증가하지만 산업규격(KS)의 냉동·공조용 냉각수 수질기준(1998)에 따르면 냉각탑수의 염소 이온 농도는 200 mg/L이하, 전기전도도는 800 μ S/cm로 제한되어 있기 때문에 허용범위 내의 최대 NaCl 농도는 0.0125% 부근이므로 이후의 소독 실험은 0.0125%에서 수행하였다.

전기소독 기작은 아직까지 정확하게 알려진 바는 없으며, 음 전하를 띄는 미생물이 양극 표면에 전기흡착(electrosorption)되어 직접 전자전달 반응에 의해 파괴되고, 전기화학적으로 발생하는 산화제에 의해 2차적으로 소독되는 것 설명된다(Jeong et al., 2007; Li et al., 2002).

Zhang 등(2006)은 염소 농도가 높을수록 전기분해에 의한 *E. coli* 살균 효과가 증가한다고 보고하였다. Diao 등(2004)는 전기소독에 의해 살균된 *E. coli*을 SEM으로 관찰한 결과, 미생물 형태가 Fenton 산화로 살균된 미생물과 비슷한 형태를 보였으며 전기 소독에서 주요 살균 작용제는 중간 전기분해 산물이라고 보고하였다.

본 연구에서는 전극과 NaCl 첨가량에 따른 4 종류의 산화제의 생성유무와 그 농도를 확인하였으며 이들의 전기소독에서의 역할을 밝혀내지는 못하였다. 이들 생성된 산화제의 소독 역할은 OH 라디칼 측정과 아울러 이들 산화제를 따로 첨가하여 각 산화제의 살균 효과를 고찰하고 생성된 OH라디칼의 blocking 물질을 첨가하여 OH 라디칼의 소독 효과를 고찰하여 산화제의 개별 살균 효과와 시너지 효과도 같이 고찰하여 종합적으로 판단하여야 한다고 사료되었다.

3.2. 소독 효율과 산화제 생성에 미치는 전류의 영향

전극에 걸리는 전류는 소독의 성능을 좌우할 뿐만 아니라 전력량과 직접 관련되기 때문에 운전비와도 연관되는 중요한 운전인자이다. NaCl 0.0125%에서 소독 효율이 가장 높고 소독시간이 짧았던 Ru/Ti 전극을 선정하여 전류를 1, 3 및 4.5 A로 변화시켰을 때 소독 효율을 고찰하였다(Fig. 4). 직류전원공급기는 50 V, 20 A까지 적용 가능하지만 낮은 NaCl 농도로 인해 4.5 A이상의 전류를 가할 수 없었으며 4.5 A가 실험할 수 있는 최대 전류이었다. 그림에서 보듯이 1 A의 경우 180초에 73%, 3 A 경우는 동일 시간에 82%의 *Legionella*가 사멸하였으며, 4.5 A의 경우는 50초에 99.99%가 사멸하였다. 각 전류의 전압은 각각 9.6 V(1 A), 20 V(3 A) 및 50 V(4.5 A)로 나타나 전력량은 각각 9.6 W, 60 W 및 225 W로 나타나 전류 증가에 따라 전력은 매우 빠르게 증가하였다. NaCl 첨가량을 증가시켜

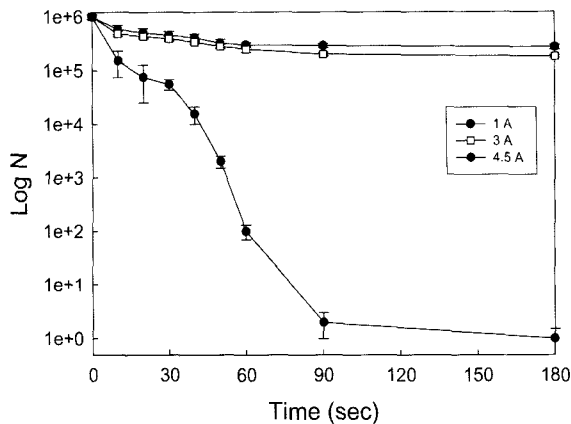


Fig. 4. Effect of current on the disinfection of *L. pneumophila* (electrode: Ru/Ti; electrode distance: 2 mm; NaCl 0.0125%).

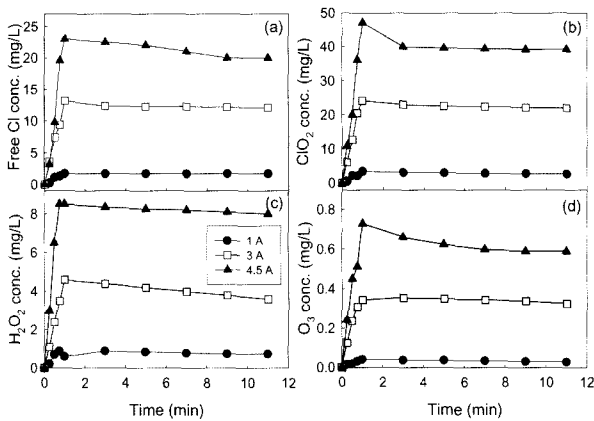


Fig. 5. Effect of current on the oxidants formation (electrode: Ru/Ti; NaCl 0.0125%; electrode distance: 2 mm). (a) Free Cl, (b) ClO_2 , (c) H_2O_2 , (d) O_3 .

적용 전류를 증가시킬 수는 있으나 전류 증가에 따라 전력량이 증가하는 단점이 있다. 4.5 A에서도 1분 내에 충분히 사멸시킬 수 있고, Cl^- 농도와 전기전도도에 대한 법적 규제치 때문에 최적 전류는 0.0125% NaCl 농도에서 3.0 A와 4.5 A 사이에 존재할 것으로 사료되었다.

전류 증가에 따라 생성되는 4종류 산화제의 농도를 나타내었다(Fig. 5). 전류 증가에 따라 각 산화제의 농도는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 1 A인 경우는 생성되는 산화제의 농도는 낮은 농도를 유지하였으며, 3 A의 경우는 유리 염소와 이산화염소의 농도가 10 mg/L 이상인데도 불구하고 소독 효과가 떨어지는 것은 소독 시간이 짧기 때문이라고 사료되었다. Bergmann(2002)이 전류가 증가할수록 염소와 이산화염소의 발생량이 증가하고 그로 영향으로 인해 4종류의 미생물 사멸속도가 급속하게 빨라진다고 보고한 결과와 유사하였다. Li 등(2002)은 해수의 소독에서 소독효율은 접촉시간과 전류에 크게 영향을 받는다고 하였다. 김 등(2005)은 투입 전력량이 증가함에 따라 잔류염소가 직선적으로 증가한다고 보고하였다. Drogui 등(2001a)은 전류가 증가할수록 과산화수소 생성농도가 증가하며, 전류에 의한 직접 소독 효과와 과산화수소에 의한 간접산화 효

과로 하수처리장 방류수가 효과적으로 소독되었다고 보고하였다.

박 등(2007)은 인가전압 증가에 따라 전류가 증가되며 대장균 소독효율도 증가하였다고 보고하였다. Kim 등(2002)이 *Legionella*균 소독에 적절한 이산화염소의 투입량은 1~10 mg/L이며, 소독시간은 수분-수시간, 오존은 0.1~1 mg/L를 수분에서 수 시간이 걸린다고 보고한 결과와 비교할 때 3 A에서 발생한 이산화염소와 오존만 보아도 적용 범위 내에 들어가거나 범위 이상의 농도가 발생하기 때문에 전류를 인가하는 시간을 더 주거나 인가한 후의 시간을 더 길게 주는 등의 방법을 이용하면 충분히 소독될 것이라고 사료되었다.

3.3. 소독 효율과 산화제 생성에 전극 간격의 영향

전극 간격은 전극을 이용한 반응기에서 운전에 주요한 요소이다. 철 전극이나 알루미늄 등의 전극을 이용한 침출수 등의 폐수 처리에 있어 고형물이 많고 전극 표면에 부착된 부착물로 인해 양극과 음극이 합선될 우려가 있어 전극 간격을 1 cm 이상을 유지하는 것이 보통이다(허 등, 2002). 그러나 냉각수의 경우는 고형물이 상대적으로 적고 수질이 좋기 때문에 전극 간격을 더 줄여 소독 성능을 높일 수 있다.

전극 간격을 2~6 mm로 변화시켰을 때의 소독 성능을 보면(Fig. 6), 전극 간격에 따라 소독 성능이 크게 차이는 것으로 나타났다. 전극 간격이 4 mm인 경우 소독율이 97.2%로 나타났다. 이는 전극 간격이 넓어지는 경우 설정 전류인 4.5 A를 충족시키지 못하고 4 mm인 경우는 3 A, 6 mm인 경우는 1.5 A의 전류를 나타내었기 때문이라고 사료되었다. 전극 간격에 따른 소비전력은 각각 225 W, 155 W 및 75 W를 나타내었다. 이것은 전극 간격이 커질수록 전극 사이의 전기 저항이 높아지고 전기 전도도가 낮아져 적은 양의 전류가 흐르기 때문이라고 사료되었다.

전극 간격에 따른 각 산화제의 농도는 전극 간격이 넓어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7).

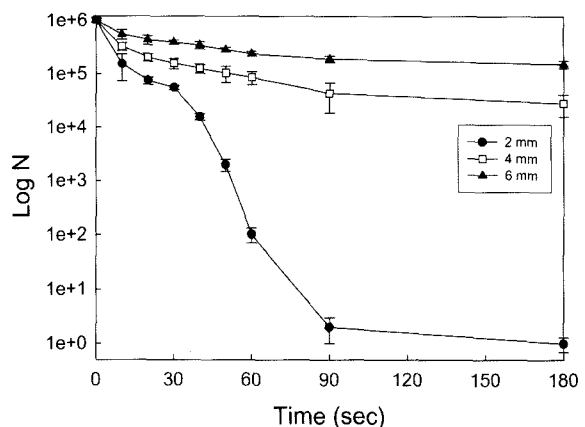


Fig. 6. Effect of electrode distance on the disinfection of *L. pneumophila* (electrode: Ru/Ti; NaCl 0.0125%).

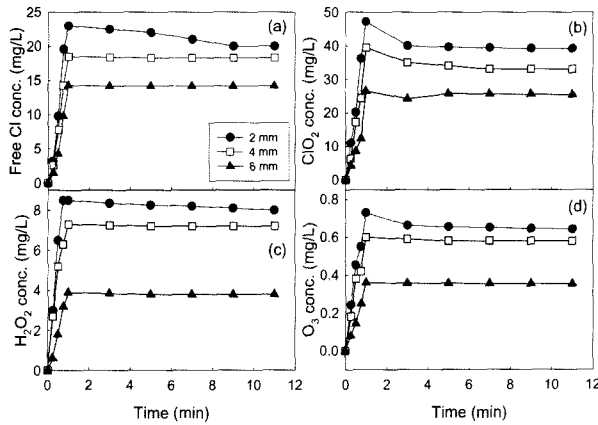


Fig. 7. Effect of electrode distance on the oxidants formation (electrode: Ru/Ti; NaCl 0.0125%). (a) Free Cl, (b) ClO₂, (c) H₂O₂, (d) O₃.

4. 결론

Pt/Ti, Ir/Ti, Ru/Ti의 3 종류의 전극을 이용하여 전기분해 소독공정에서 *Legionella*균의 소독효과를 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험에 사용한 세 전극 중 산업계에서 가장 많이 사용하는 Pt/Ti 전극의 성능이 떨어지고, Ru/Ti 전극의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. NaCl 농도가 높을수록 전기전도도가 높아지기 때문에 소요되는 전력도 감소하고 소독효과도 증가하지만 염소와 전기전도도에 대한 냉각수의 수질기준을 고려할 때 최적 NaCl 첨가량은 0.0125%로 사료되었다. Ru/Ti 전극은 과산화수소와 오존 생성량이 다른 전극보다 높았고, Ir/Ti 전극은 유리 염소와 이산화염소의 생성량이 높은 것으로 나타났다. NaCl 첨가량이 증가하면 유리 염소와 이산화염소 생성량은 크게 증가하고 과산화수소와 오존의 생성량이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 전류가 증가할수록 적용 전력량이 증가하여 소독효과가 증가하였으며, 생성 산화제 농도도 선형적으로 증가하였다.
- 3) 전극 간격이 넓을수록 소독효과가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 전기저항으로 인하여 전류가 적게 흐르기 때문인 것으로 사료되었으며, 전극 간격이 넓을수록 산화제 생성량은 감소하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단의 2006년도 신진교수지원(기초 과학분야)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

국립보건원, 세균부 방역과 자료실, 레지오넬라증 예방관리 (2002).
 권순주, 우준희, 김대수, 어수택, 정연태, 김용훈, 박춘식, 폐결핵환자에서 호중구의 H₂O₂ 형성 및 IgG 수용체의 표

현을, *대한내과학회지*, **39**(5), pp. 613-619 (1990).
 김광욱, 이일희, 김정식, 신기하, 정봉익, 고은 소결된 촉매 산화물 전극의 재료 특성 및 유기물 분해능 연구, *공업화학*, **13**(3), pp. 285-290 (2002).
 김동석, 박영식, 불용성 전극을 이용한 Rhodamine B의 전기 화학적 탈색, *한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 377-384 (2007).
 김영준, 이강평, 이인선, 이기태, 박용석, 전기분해에 의한 밸러스트수 처리기술 개발, *대한조선헌학회 추계학술발표회 논문집*, pp. 174-176 (2005).
 김홍석, 서인석, 최일환, 김연권, 김지연, 이진영, 용존공기를 이용한 소독능 향상 전기분해 소독공정 개발, *한국물환경학회. 대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 625-P628 (2004).
 박영식, 정노성, 김동석, 소규모 오수처리를 위한 전기화학적 방법에 의한 대장균 소독에 관한 연구, *한국환경과학회지*, **16**(4), pp. 441-447 (2007).
 박은희, 차인호, 이상준, 냉각탑수에서 분리한 *Pseudomonas aeruginosa* KLP-2 배양여액에서의 *Legionella pneumophila*에 대한 항균활성, *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **29**(3), pp. 127-133 (2001).
 유석봉, 전기분해를 적용한 가정용정수기의 살균특성연구, 석사학위논문, 인하대학교 (2005).
 유재정, 민경석, 박정민, 염색폐수중 난분해성물질 전기분해 처리특성, *대한환경공학회지*, **25**(10), pp. 1277-1282 (2003).
 한국산업규격 KS M 0000-1998, 냉동·공조용 냉각수 수질 기준(안) (1998).
 허목, 김병현, 김광진, 전기분해법에서의 전극변화에 따른 위생배탕장 침출수의 처리 특성, *폐기물자원화*, **10**(1), pp. 68-74 (2002).
 황광호, 황영욱, 김은정, 정지현, 조남준, 서울시내 다중이용 시설 냉각탑수의 레지오넬라균 분포 및 혈청학적 특징, *한국환경위생학회지*, **25**(4), pp. 20-23 (1999).
 厚生省 生活衛生局 企劃課, Legionellosis 防止指針, 財團法人 Building 管理教育 Center (1993).
 Atlas, R. M., *Legionella: from environmental habitats to disease pathology, detection and control*, *Environ. Microbiol.*, **1**, pp. 283-293 (1999).
 Bergmann, H., New UV irradiation and direct electrolysis-promising methods for water disinfections, *Chem. Eng. J.*, **85**(2/3), pp. 111-117 (2002).
 Chen, X., Chen, G. and Yue, P. L., Stable Ti/IrO_x-Sb₂O₅-SnO₂ Anode for O₂ Evolution with Low Ir Content, *J. Phys. Chem. B.*, **105**, pp. 4623-4628 (2001).
 Diao, H. F., Li, X. Y., Gu, J. D., Shi, H. C. and Xie, Z. M., Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction, *Process Biochemistry*, **39**, pp. 1421-1426 (2004).
 Drogui, P., Elmaleh, S., Rumeau, M., Bernard, C. and Rambaud, A., Oxidising and disinfection by hydrogen peroxide produced in a two-electrode cell, *Wat. Res.*, **35**, pp. 3235-3241 (2001a).
 Drogui, P., Elmaleh, S., Rumeau, M., Bernard, C. and Rambaud, A., Hydrogen peroxide production by water electrolysis: application to disinfection, *J. of Appl. Electrochem.*, **31**, pp. 877-882 (2001b).
 Fraser, D. W., Tsai, T. R. and Crenstein, W., *Legionnaires' disease: description of an epidemic on pneumonia*, *N. Engl*

- J. Med.*, **297**, pp. 1189-1197 (1977).
- Jeong, J. S., Kim, J. Y., Cho, M., Choi, W. Y. and Yoon, J. Y., Inactivation of *Escherichia coli* in the electrochemical disinfection using a Pt anode, *Chemosphere*, **67**, pp. 652-659 (2007).
- Kaufmann, A. F., Mcdade, J. C., Patton, C. M., Bennert, J. V., Newhouse, V. F., Gregg, M. B. and Brachman, P. S., Pontiac fever: isolation of the etiologic agent(*Legionella pneumophila*) and demonstration of its mode transmission, *Am. J. Epidemiol.*, **114**, pp. 337-347 (1981).
- Kim, B. R., Anderson, J. E., Muller, Mueller, S. A., Gaines, W. A. and Kendall, A. M., Literature review-efficacy of various disinfectants against *Legionella* in water systems, *Wat. Res.*, **36**, pp. 4433-4444 (2002).
- Knudson, G. B., Photoreactivation of UV-irradiated *Legionella pneumophila* and other *Legionella* species, *Appl. Environ. Microbiol.*, **18**, pp. 75-80 (1985).
- Kötz, R., Stucki, S. and Carcer, B., Electrochemical waste water treatment using high overvoltage anodes. Part I: physical and electrochemical properties of SnO₂ Anodes, *J. of Applied Electrochemistry*, **21**, pp. 14-20 (1991).
- Li, X. Y., Ding, F., Lo, P. S. and Sin, S. H., P., Electrochemical disinfection of saline wastewater effluent, *J. Environ. Eng. ASCE.*, **128**, pp. 697-704 (2002).
- Lin, Y. E., Vidic, R. D., Stout, J. E. and Yu, V. L., *Legionella* in water distribution systems, *J. American Water Works Association*, **90**, pp. 112-121 (1998).
- Lin, Y. E., Vidic, R. D., Stout, J. E. and Yu, V. L., Negative effect of high pH on biocidal efficacy of copper and silver ions in controlling *Legionella pneumophila.*, *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**, pp. 2771-2775 (2002).
- Liu, Z., Stout, J. E., Tedesco, L., Boldin, M., Hwang, C. and Yu, V. L., Efficacy of ultraviolet light in preventing *Legionella* colonization of a hospital water distribution system, *Wat. Res.*, **29**, pp. 2275-2280 (1995).
- Marrao, G. A., Verissimo, A., Bowker, R. G. and Dacosta, M. S., Biofilms as major sources of *Legionella* spp. in hydrothermal areas their dispersion into stream water, *FEMS. Microbiol. Ecol.*, **12**, pp. 25-33 (1993).
- Morris, G. K., Patton, C. M., Feely, J. C., Johnson, S. E., Gorman, G. W., Martin, W. T., Skaliy, P., Mallison, G. F., Politi, B. D. and Mackel, D. C., Isolation of *Legionnaires'* disease bacterium from environmental samples, *Ann. Intern. Med.*, **90**, pp. 664-666 (1979).
- Naumczyk, J., Szpyrkowicz, L. and Zillo-Grandi, F., Electrochemical treatment of textile wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(11), pp. 17-24 (1996).
- States, S. J., Conley, L. F., Kuchta, J. M., Oleck, B. M., Lipovich, M. J., Wolford, R. S., Wadowsky, R. M., McNamara, A. M., Sykora, J. L., Keleti, G. and Yee, R. B., Survival and multiplication of *Legionella pneumophila* in municipal drinking water system, *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, pp. 979-986 (1987).
- Suzuki, H., Sumida, Y., Umezawa, H., Kuwaki, Y., Iseki, M., Takaoka, D. and Yasuda, M., Electrolytic disinfection system for recycling water with high-performance direct-electrolysis technology, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동추계 학술발표회 논문집*, pp. 512-515 (2004).
- Tobin, O. J., Beare, J., Dunnili, M. S., Fisherhoch, S. P., French, M., Mitchell, R. C., Morons, P. J. and Myers, M. F., *Legionnaires'* disease in a transplant unit: isolation of the causative agent from shower baths, *Lancet.*, **2**, pp. 118-121 (1981).
- Zhang, L. and Liu, W. J., Study on factors affecting electrochemical disinfection effect, *China Water & Wastewater*, **22**(23), pp. 70-73 (2006).