

실험실 규모 크립토스포리디움의 불활성화 실험을 통한 오존 고도정수처리 정수장에서 소독 효과 예측

조민 · 정현미* · 김이호** · 손진식*** · 박상정† · 윤제용†

서울대학교
*국립환경연구원
**한국건설기술연구원
***국민대학교

Prediction of *Cryptosporidium parvum* Inactivation in Advanced Ozone Drinking Water Treatment with Lab Scale Experiments

Min Cho · Hyenmi Chung* · Reeho Kim** · Jinsik Sohn*** · Sangjung Park† · Jeyong Yoon†

Seoul National University

*National Institute of Environmental Research

**Korea Institute of Construction Technology

***Kookmin University

(Received 26 July 2004, Accepted 29 November 2004)

Abstract : With the appearance of pathogenic microorganisms, which were resistant to free chlorine, the significant attention to the necessity of powerful alternative disinfection methods such as ozone, chlorine dioxide, UV irradiation to inactivating pathogens has been increased in water treatment. Among these alternative disinfection methods, ozone is well known as strong biocidal method and the usage of ozone is also increasing in Korea. However, in Korea, there has been no report on the quantitative study of *Cryptosporidium parvum* with ozone and its evaluation in advanced drinking water treatments.

This study reports on the methodology for predicting the ozone inactivation of *Cryptosporidium parvum* by ozone disinfection in advanced drinking water treatment. The method is based on the fact that a specific inactivation level of microorganisms is achieved at a unique value of ozone exposures, independent of ozone dose and type of water, and quantitatively described by a delayed Chick-Watson model. The required values \overline{CT} for 2 log inactivation of *Cryptosporidium parvum* was 6.0 mg/L·min and 15.5 mg/L·min at 20°C and 5°C, respectively. From this obtained *Cryptosporidium parvum* inactivation curves and calculated \overline{CT} values of advanced drinking water treatment water in Korea with FIA (Flow injection alaysis), we can predict that water treatment plant can achieve a 1.1 ~ 1.8 log inactivation and 0 ~ 0.4 log inactivation at 20°C and 5°C, respectively. This methodology will be useful for drinking water treatment plants which intend to evaluate the disinfection efficiencies of their ozonation process without full scale test and direct experiments with *Cryptosporidium parvum*.

keywords : Ozone, *Cryptosporidium parvum*, Modified Delayed Chick-Watson model, Disinfection, \overline{CT}

1. 서론

다양한 연구와 기술 발전에도 불구하고 상수 원수내의 병원성 미생물에 의한 발병 사례가 전세계적으로 지속적으로 보고되고 있어, 정수처리 공정에서 병원성 미생물 관리에 대한 중요성이 크게 강조되고 있다(Carmel et al., 1998). 국내의 경우 2001년 5월 환경부에서 일부 중소규모 정수장에서 바이러스가 검출되었다고 발표하였고 1993년 미국 밀워키(Milwaukee, Wisconsin)에서는 40만명이 상수에 존재하는 병원성 원생동물인 크립토스포리디움

(*Cryptosporidium parvum*)에 의해 감염되는 큰 사고가 난 적이 있다. 또한 영국, 일본 등에서도 상수 원수내의 병원성 미생물에 의한 발병 사례가 보고되었다.

국내 정수장의 경우 미생물 제어는 응집, 침전, 여과, 소독 등을 통해 복합적으로 이루어진다. 세균에 비해 비교적 크기가 큰 지아디아(*Giardia lamblia*)나 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)과 같은 원생동물은 여과 공정에 의해 많이 제거되지만, 소독 공정 또한 정수처리 공정에서 병원성 미생물 제어를 위한 마지막 단계로서 매우 중요하다. 국내 대부분의 정수장에서는 염소를 주로 사용하고 있다. 그러나 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)은 염소에 강한 내성을 가지고 있고, 기존의 염소 처리로는

† To whom correspondence should be addressed.
jeyong@snu.ac.kr

거의 불활성화가 이루어지지 않는 것으로 보고되고 있다(Cho et al., 2003b; Rennecker et al., 1999). 이외에도 염소는 물 속 유기물과 반응하여 발암성을 가진 THMs, HAAs 등의 염소계 소독부산물을 발생시킬 수 있다. 따라서 오존이나 UV와 같이 염소보다는 미생물에 대한 소독효과가 강력하면서도 소독부산물 생성이 적은 대체소독제에 대한 관심이 증가하고 있다(Cho et al., 2003a, 2003b; Gyurek et al., 1999; Shin et al., 2001; 조 등, 2004).

Table 1은 최근 미국의 병원성 미생물 관리를 위한 제도들의 발전을 나타내고 있다. LT2E_SWTR(Long term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule: EPA 815-D-03-009)는 상수원수에 존재하는 크립토스포리디움에 대한 4개별 정수장의 따라야 하는 기준과 방법을 구체적으로 제시하고 있다.

국내에서도 미국 지표수처리법에 준하는 정수처리 기준이 2002년 8월부터 시행되고 있으며 2004년 7월부터 여과 공정과 소독 공정(1 log 이상)을 포함하여 지아디아 3 log의 제거를 모든 정수장이 준수하여야 한다. 그럼에도 불구하고 원생동물의 불활성화에 대한 연구는 거의 수행되고 있지 못하다. 더욱이 원생동물을 사멸화시킴에 있어 염소보다 훨씬 효과적인 오존 공정이 국내에서 정수장 숫자로는 13곳, 정수생산능력의 약 20%에 적용되고 있지만 초기 도입 목적에 부합하는 오존 공정에 대한 체계적인 평가가 거의 이루어지지 않았다. 또한 많고 오존의 탁월한 소독 능력에도 불구하고 오존 공정의 도입 목적이 소독이 아니었기 때문에 소독 공정으로서의 역할 평가는 더욱 미미하다(박 등, 2001; 환경부, 2004). 따라서 국내 정수장의 오존 공정에서 크립토스포리디움과 같은 원생동물에 대한 소독 효능에 대한 개량적인 평가를 하는 것이 매우 중요하다. 그렇지만 소독능 실험을 하기가 여의치 않은 오존 접촉조의 설계라든가 또는 정수장의 현재의 운영 여건으로 이를 수행하기가 수월하지 않다.

본 연구에서는 오존에 의한 실험실규모 원생동물 불활성화 실험을 통하여 실제 오존 공정에서 원생동물의 불활성화 정도를 예측하거나 평가할 수 있는 간략한 방법론을 최초로 제시하고자 하였다. 오존의 원수 특성에 따른 감소 패턴은 실시간으로 분석하였으며 소독 모델로는 Modified Delayed Chick-Watson을 사용하였다. 소독 모델지표 미생

물로는 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)을 선택하였고 분석방법으로는 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화에서 주로 사용되는 분석법인 탈낭법(*in vitro excystation*)을 사용하였다(Jenkins et al., 1997).

2. 재료 및 방법

시약은 초고순도로 알드리치에서 구입하였으며 3차 증류수로 Stock 용액을 만들어 사용하였다.

2.1. 크립토스포리디움 정제 및 분석

불활성화 실험에 사용된 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)은 숙주인 쥐(SCID)로부터 배출된 지 2주 이내의 신선한 것을 사용하였다. 원생동물의 정제에는 김(2003)의 연구에서와 같이, 분변과 크립토스포리디움의 비중 차(1.05)를 이용한 정제기술을 사용하였고, 이러한 정제기술을 통하여 2×10^8 oocysts/mL의 살아있는 난포낭을 얻을 수 있었다.

크립토스포리디움의 분석에 사용된 탈낭법(*in vitro excystation method*)은 난포낭에 동물 및 인간의 장내와 유사한 환경을 제공함으로써 난포낭의 인위적인 탈낭(*excystation*)을 유도하는 원리를 이용한 방법이다. 탈낭(*excystation*)이 일어나게 되면 난포낭은 불활성화가 일어나지 않은 것으로 간주하였다. 초기 난포낭(oocysts) 농도는 EPA 1623방법을 사용하여 측정하였다(국립환경연구원, 2002).

2.2. 증류수에서 오존의 크립토스포리디움 소독능 평가

오존은 자체 분해 및 용존 화학 물질들과의 반응에 의해 빠르게 감소하므로 오존 소독 연구에서는 잔류오존 농도의 변화를 고려하는 것이 중요하였다. 따라서 본 연구에서는 FIA(Flow injection analysis)를 이용하여 정확한 오존 농도를 실시간으로 측정하였다. 오존 반응기로는 head space에서 오존 손실을 막기 위하여 piston type reactor(50 mL, Pyrex)를 사용하였다.

오존에 의한 불활성화 실험에서는 40 mg/L으로 농축된 고농도의 오존(Ozonon Co. CFS-1)을 원하는 초기 오존 농도에 따라 piston type reactor에 주입하였다. 반응기 내부의

Table 1. Regulations in USA for controlling the pathogens

| 미국 소독관련법 | 대상미생물 | 탁도기준 ¹⁾ | 비고 |
|----------|------------------------------|--------------------|--|
| SWTR | 지아디아 (3 log) 바이러스 (4 log) | < 0.5 NTU | 소독수준에 대한 최초의 개량적 기준 도입, 원수 특성과 처리법에 따른 제거율 설정 |
| IESWTR | 크립토스포리디움 (2 log) | < 0.3 NTU | 크립토스포리디움에 대한 위험대비 시설 용량 10,000명 이상에 적용 |
| LTIESWTR | 크립토스포리디움 (3 log) | < 0.3 NTU | 시설 용량 10,000명 이하에도 적용 |
| LT2ESWTR | 크립토스포리디움 (3 log) | < 0.3 NTU | 실증적인 실험 결과로 크립토스포리디움에 대한 소독 기준을 반영 |

1) 4 시간 1회 측정, 월 측정 시료의 95% 이상 만족

용액 중 일부는 line을 통해 Indigo reagent와 섞이게 되고 섞인 시약의 발색차를 이용해(HPLC UV detector, Gilson Co.) 오존 농도를 실시간으로 측정하였다. 또한 계산된 시간에 따라 반응기에서 1 mL씩을 sampling 하여 오존 quenching reagent인 0.01 M Na₂S₂O₃ 0.02 mL가 들어있는 1.6 mL tube에 넣고 앞에서 설명한 방법으로 난포상의 불활성화 정도를 분석하였다.

오존 실험은 오존의 초기 농도를 0.5, 1, 그리고 2 mg/L로 변화시키며 20°C와 5°C에서 수행하였고, 각 오존 농도에서 시간에 따라 5개씩을 sampling 하여 크립토스포리디움을 분석하였다. pH는 phosphate buffer를 이용하여 pH 7.1(10 mM)로 조절하였다.

오존에 대한 노출 정도에 따른 미생물의 불활성화 정도를 개량적으로 평가하고 이를 이용하여 정수장에서 예상되는 운전조건에서 미생물의 불활성화 정도를 예측하기 위해서는 소독 모델을 사용하였다. 따라서 본 연구에서는 Modified Delayed Chick-Watson model(식 (1))을 이용하여 크립토스포리디움의 불활성화를 평가하였다.

$$\log \frac{N}{N_0} = \begin{cases} 0 & \text{if } \bar{C}t \leq \bar{C}T_{lab} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{N}{N_0} \right) \\ -k(\bar{C}t - \bar{C}T_{lab}) & \text{if } \bar{C}t \geq \bar{C}T_{lab} = \frac{1}{k} \log \left(\frac{N}{N_0} \right) \end{cases} \quad (1)$$

- N₀ : 초기 크립토스포리디움 농도 (oocysts/mL)
- N : 오존 처리후 크립토스포리디움 농도 (oocysts/mL)
- $\bar{C} = \int_0^t Cdt/t$: 반응에 참여한 오존 농도 (mg/L),
- k : 불활성화 속도 상수 (L/(mg·min))

Modified Delayed Chick-Watson model은 오존에 의한 미생물 불활성화에 잘 맞을 뿐만 아니라(조 등, 2004; Cho et al., 2003a, 2003b) CT concept(소독제 농도 반응 시간)을 잘 따르기 때문에 결정된 CT 값을 실제 공정에 적용할 때 용이하다는 장점을 가지고 있다. 모델에서 사용된 CT 값은 FIA로 측정된 시간고려 평균 오존 농도 ($\bar{C} = \int_0^t Cdt/t$)와 반응 시간의 곱으로 계산하였다.

2.3. 국내 고도정수처리 정수장에서 오존 소독능 평가 및 예측

국내 고도 정수처리장에서 오존공정에 의한 크립토스포리디움의 소독능을 평가해 보았다. 소독능 평가 실험은 오존 설비가 되어 있는 국내 고도정수처리 정수장 중 13개 정수장에 대하여 오존 공정 유입수(모래여과후)의 물을 채취하여 수행하였다. 시료채취는 2003년 9월에 수행하였으며 시료수의 DOC, UV₂₅₄, 탁도 등의 수질 특성은 Table 2에 나타내었다. 전처리 공정(응집, 침전, 여과 등)을 거친 시료수의 경우, DOC, UV₂₅₄, 탁도 등이 전부 낮은 것을 확인할 수 있었다.

오존은 자기분해와 용존 유기물 등과의 반응에 의해 지속적으로 감소하므로 오존의 자기분해만을 고려하면 되는 증류수에서 실험과 달리 실 공정을 평가하기 위해서는 공정수에 따라 달라지는 오존 분해를 보다 정확히 고려해야 한다. 그러나 기존의 연구에 의하면 각기 다른 원수에서도 같은 CT만큼 처리할 경우 같은 정도의 불활성화가 일어나는 것으로 보고되었다(Cho et al., 2003a). 따라서 본 연구에서는 FIA를 이용하여 오존 분해를 고려한 CT값을 계산하였고, 증류수에서 실험을 수행하여 결정한 오존 CT값

Table 2. Charaterization of pre-treated water in advanced drinking water system

| Water Treatment | pH | DOC (mg/L) | UV ₂₅₄ (cm ⁻¹) | Ozone residual | |
|-----------------|-----|------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | | | | IOD ¹ (mg/L) | k _c (sec ⁻¹) |
| HY | 6.7 | 1.42 | 0.031 | 0.090 | 0.0027 |
| UCS | 6.8 | 1.01 | 0.021 | 0.125 | 0.0033 |
| YS | 6.9 | 1.94 | 0.038 | 0.114 | 0.0034 |
| BE | 6.8 | 1.68 | 0.028 | 0.011 | 0.0019 |
| MCS | 6.8 | 1.24 | 0.021 | 0.124 | 0.0032 |
| MG | 7.0 | 2.12 | 0.030 | 0.092 | 0.0038 |
| DR | 7.2 | 1.70 | 0.027 | 0.099 | 0.0044 |
| MJ | 6.7 | 0.77 | 0.016 | 0.143 | 0.0019 |
| SG | 6.9 | 1.53 | 0.030 | 0.246 | 0.0038 |
| MD | 6.8 | 2.15 | 0.027 | 0.134 | 0.0020 |
| DS | 6.8 | 1.22 | 0.037 | 0.213 | 0.0037 |
| HM | 6.6 | 1.60 | 0.029 | 0.180 | 0.0027 |
| SD | 7.7 | 1.25 | 0.018 | 0.218 | 0.0020 |

1) Instantaneous ozone demand: < 5 sec (Cho et al., 2003c)

을 이용하여 국내 고도정수처리 정수장에서의 오존 소독능을 예측하고자 하였다.

고도정수처리 정수장에서의 오존 소독능을 정확히 예측하고 Cho 등(2003a)의 연구결과를 확인하기 위하여 3개의 정수장에서 공정수를 사용하여 소독능 평가 실험을 수행하였고, 증류수에서 소독능을 예측한 결과와 비교하였다. 실 공정수의 소독능은 3개의 정수장(HM, DS, MJ)의 처리수에 1.5 mg/L의 오존을 주입한 후 FIA를 이용하여 오존 감소를 측정하며 동시에 크립토스포리디움을 sampling, 분석하여 구하였다. 실험은 겨울이 존재하는 국내 수환경을 고려하기 위하여 5°C와 20°C서 수행하였고, 3번 반복 실험을 하였다.

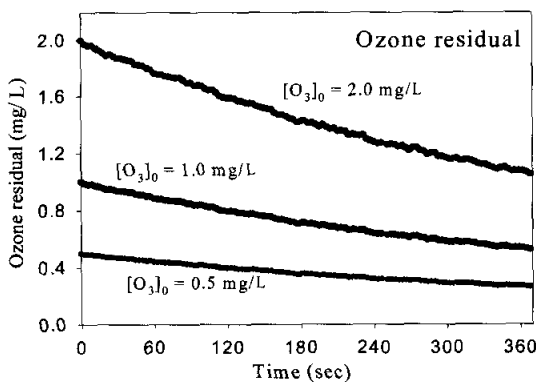
국내 고도정수처리 정수장에서의 오존 소독능 예측은 FIA를 이용하여 수행되었다. 예측 방법은 다음과 같았다. 먼저 증류수에서 실험을 통하여 얻은 \overline{CT} 값과 크립토스포리디움의 불활성화 값을 모델(식 (1))에 넣어 \overline{CT} 값에 따른 크립토스포리디움의 불활성화 곡선을 결정하게 된다. 5°C와 20°C에서 1.5 mg/L의 오존을 주입하고 10분 동안 교반한 후 \overline{CT} 값을 계산하였다. 계산된 \overline{CT} 값을 앞서 결정된 \overline{CT} 값에 따른 크립토스포리디움의 불활성화 곡선에 넣어 계산된 값에서의 예상 크립토스포리디움의 불활성화값을 구하였다.

실공정에서 크립토스포리디움의 불활성화 정도를 예측하기 위해서 오존접촉추가 10분의 반응시간을 가지고 완전 Plug Flow Reactor로 운영된다고 가정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 오존에 의한 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)의 불활성화

Fig. 1은 상온(20°C)에서 0.5, 1.0, 2.0 mg/L의 오존을 주입하였을 때 시간에 따른 잔류오존농도의 감소와 크립토스포리디움의 불활성화 정도를 나타낸 것이다. Fig. 1의 결과는 증류수 조건에서 수행하였으므로 용존 유기물에 의한 영향을 고려하지 않아도 되는데 이 경우에도 알려진 것처럼 자기 분해(Self decay)를 통해 오존 농도가 지속적으로



(a) Ozone decomposition

감소하였고, Fig. 1(b)에서는 주입 오존의 농도가 높을수록 빠른 크립토스포리디움의 불활성화를 보였다. 1 log의 크립토스포리디움의 불활성화를 일으키는데 1.0 mg/L의 오존을 주입한 경우에 3.7분, 2.0 mg/L의 경우에는 2.4분이 걸렸다. 크립토스포리디움의 불활성화를 식 (1)을 이용해 \overline{CT} 값으로 표현한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

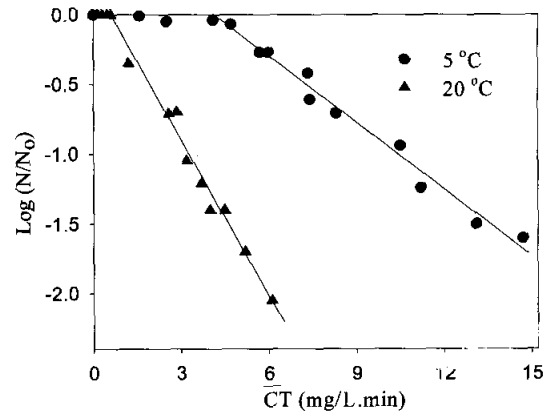
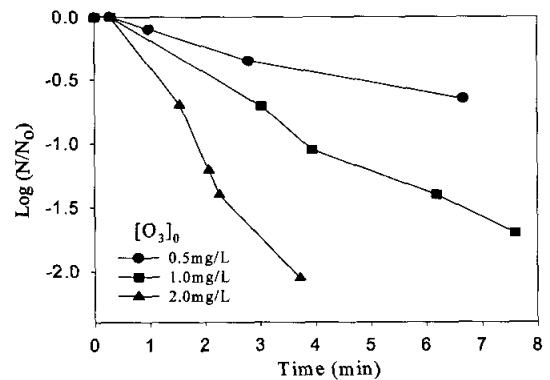


Fig. 2. *Cryptosporidium parvum* inactivation \overline{CT} with ozone treatment

Fig. 2는 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화를 나타낸 것으로 상온(20°C)에서 2 log(99%)불활성화를 위한 \overline{CT} 값이 6.0 mg/L·min인 것을 알 수 있다. 이에 반해 5°C의 낮은 온도에서는 크립토스포리디움의 1 log 불활성화 \overline{CT} 값이 10.8 mg/L·min으로 상온(20°C)과 비교하여 3배 높은 \overline{CT} 값을 요구하는 것을 알 수 있다. 이러한 낮은 온도에서 높은 \overline{CT} 값의 요구는 겨울이 존재하는 국내 수환경에서 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화가 용이하지 않을 것으로 예상할 수 있다.

3.2. 국내 고도정수처리 정수장에서 크립토스포리디움의 불활성화 예측

본 연구에서는 이미 오존 설비가 들어있는 국내 고도정수처리장에서 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화를



(b) Inactivation of *Cryptosporidium*

Fig. 1. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* with ozone (pH 7.1, 20°C).

예측하여 보았다. Cho 등(2004)의 연구에서 알 수 있듯이 원수의 경우 용존 유기물 등에 의한 영향으로 인해 오존의 감소가 빨라질 수 있고, 특히 초기의 빠른 오존 감소인 IOD를 보일 수 있다.

Fig. 3에 국내 HM 정수장에서 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화 정도를 평가한 결과로 오존 감소와 크립토스포리디움의 불활성화를 나타내었다. Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이, 수초 내의 빠른 감소인 IOD(instance ozone demand)가 존재하는 것과 Fig. 1(a)에서의 결과에 비해 빠른 오존 감소곡선(k_c)을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)에는 크립토스포리디움의 불활성화 \overline{CT} 값을 나타내었다. 그 결과 20°C에서 99%(2 log) 불활성화를 위한 \overline{CT} 요구량은 6.0 mg/L·min 이었다. 5°C에서는 90%(1 log) 불활성화를 위한 \overline{CT} 요구량은 10.5 mg/L·min 이었다. Fig. 3(b)의 결과는 Fig. 3(a)의 결과와 거의 유사하고 이것은 크립토스포리디움의 불활성화에 있어 용존 유기물 등에 의한 영향은 미생물의 불활성화보다는, 오존의 감소에 영향을 미치기 때문이다.

Table 3에는 3개의 실 공정수(HM, DS, MJ)에서 크립토스포리디움의 불활성화를 분석(실험)한 결과와 계산된 \overline{CT} 값에서 Fig. 2의 불활성화 곡선을 이용해 예측한 결과를 나타내었다.

Table 3에 나타난 것처럼, 예측값이 실험값과 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 방법을 이용해 국내 고도정수처리 정수장에서 크립토스포리디움 불활성화를 예측하여 보았다(Table 4).

Table 4를 보면 20°C에서 1.5 mg/L의 오존을 주입한 경우 얻을 수 있는 \overline{CT} 값이 물에 따라 4.0 ~ 6.5 mg/L·min 인 것을 알 수 있다. 이 \overline{CT} 값과 Fig. 3(b)의 불활성화 곡선으로부터 각 정수장 처리수의 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화를 예측할 수 있는데, 그 값은 대략 1.1~1.8 log이다. 특히 정수장 BE의 경우 상대적으로 높은 불활성화값을 예측할 수 있었다.

그러나 5°C에서의 결과(Table 4)를 보면 대부분의 조건에서 0.3 log 이하의 낮은 불활성화만이 이루어짐을 알 수 있다. 낮은 온도에서 오존 감소가 더 느려지기 때문에, 큰 \overline{CT} 값을 얻을 수 있었지만, Fig. 3(b)에서처럼 5°C에서 \overline{CT} 값이 20°C에 비해 2.5 배정도 더 크기 때문에 5°C에서는 1.5 mg/L의 오존을 주입할 경우 크립토스포리디움의 불활성화를 거의 기대할 수 없게 된다.

특히 Table 4의 값은 오존 접촉조가 완전 Plug flow reactor라고 가정한 것이므로 실제 처리율은 더 낮아질 것이다. 이러한 결과는 국내 정수장에서 오존을 사용하는 경우에도 1.5 mg/L 보다 훨씬 많은 오존을 주입하지 않을 경우 소독 공정에서 크립토스포리디움 불활성화가 이루어지지 않는 것을 의미한다.

기존의 연구에 의하면 소독 공정뿐만 아니라 여과 공정에서도 크립토스포리디움의 처리가 이루어지므로(국립환경연구원, 2003; 이 등, 2004), 정수처리 공정별 크립토스포리디움의 불활성화 및 제거에 관한 연구와 이의 최적화, 표준화에 관한 연구가 절실히 필요하다.

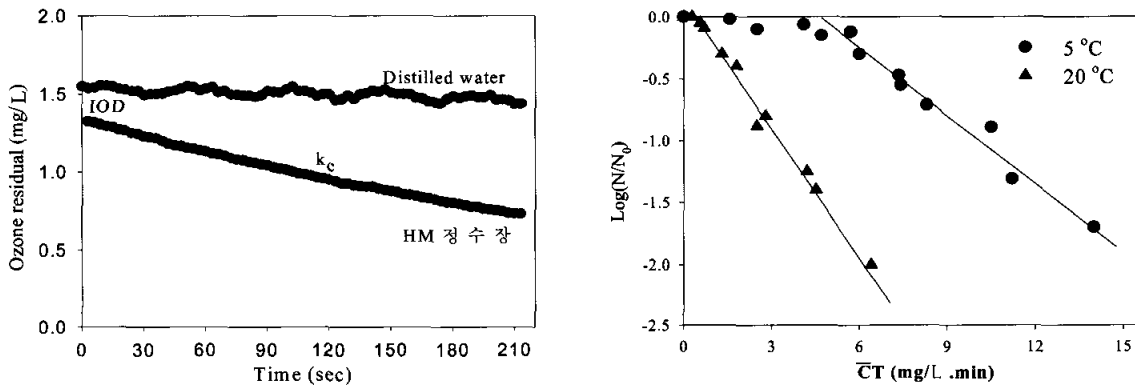


Fig. 3. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* with ozone in advanced drinking water system ($[O_3]_0 = 1.5\text{mg/L}$).

Table 3. Predicted results and experimental results for *Cryptosporidium parvum* inactivation ($-\log(N/N_0)$)

| Water Treatment | 20°C | | 5°C | |
|-----------------|------------------------|-------------------------|------------|------------|
| | Observed ¹⁾ | Predicted ²⁾ | Observed | Predicted |
| HM | 1.4 | 1.4 | 0.3 | 0.3 |
| DS | 1.2 | 1.2 | Negligible | Negligible |
| MJ | 1.6 | 1.7 | 0.3 | 0.3 |

1) Initial Ozone injection : 1.5 mg/L, Reaction time : 10 min

2) \overline{CT} calculation : FIA

Table 4. Prediction of *Cryptosporidium parvum* inactivation in advanced ozone drinking water treatment in Korea

| Water Treatment | 20°C | | 5°C | |
|-----------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| | $\overline{CT}^{(1)}$ (mg/L·min) | Inactivation (-log(N/N ₀)) | $\overline{CT}^{(1)}$ (mg/L·min) | Inactivation (-log(N/N ₀)) |
| HY | 5.2 | 1.5 | 5.6 | 0.2 |
| UCS | 4.8 | 1.5 | 5.1 | 0.1 |
| YS | 4.7 | 1.3 | 5.1 | 0.1 |
| BE | 6.5 | 1.8 | 7.1 | 0.4 |
| MCS | 4.8 | 1.3 | 5.0 | 0.1 |
| MG | 4.6 | 1.3 | 4.8 | 0.0 |
| DR | 4.1 | 1.2 | 4.4 | 0.0 |
| MJ | 5.9 | 1.7 | 6.1 | 0.3 |
| SG | 4. | 1.1 | 4.3 | 0.0 |
| MD | 5.8 | 1.7 | 6.0 | 0.2 |
| DS | 4.2 | 1.2 | 4.5 | 0.0 |
| HM | 5.1 | 1.4 | 6.2 | 0.3 |
| SD | 4.0 | 1.1 | 4.3 | 0.0 |

1) Initial ozone injection : 1.5 mg/L, reaction time : 10 min, Plug flow reactor

4. 결론

본 연구에서는 오존에 의한 크립토스포리디움의 불활성화를 살펴보는 실험실 규모의 실험을 통하여 실제 오존 공정에서 원생동물의 불활성화 정도를 예측하거나 평가할 수 있는 간단한 방법을 제시하고자 하였다. 실험 결과 20°C 및 5°C에서 크립토스포리디움의 2 log (99%) 불활성화를 위한 \overline{CT} 값은 6.0 mg/L·min과 15.5 mg/L·min으로 낮은 온도에서 2.5배 가량의 높은 \overline{CT} 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 \overline{CT} 값은 원수의 특성에 상관없이 일정하였다. 따라서 증류수 조건에서 결정된 \overline{CT} 값에 따른 크립토스포리디움의 불활성화 곡선으로부터 국내 오존 고도정수처리 정수장에서의 크립토스포리디움의 불활성화를 예측하였다. 그 결과 1.5 mg/L의 오존을 주입할 경우 10분 반응시간에 20°C에서는 1.1~1.8 log의 불활성화를, 5°C에서는 최대 0.4 log의 불활성화만을 보일 것으로 예측되었다. 본 연구에서는 3가지의 정수장에 대해 앞서의 예측과 실제 실험값을 비교하였는데, 예측값과 실험값이 일치하였기 때문에 이러한 방법이 원생동물의 소독 효능에 대해 개량적으로 평가하는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

본 연구 결과 5°C에서는 최대 0.4 log의 불활성화를 보였으므로, 크립토스포리디움의 불활성화를 위해 오존을 사용할 경우에도, 겨울철과 같은 낮은 온도에서는 제어에 어려움을 겪을 수도 있음을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 2004년 두뇌한국21사업에 의해 일부 지원되었

고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 정수장의 원생동물 시스템 제어연구 (I), (2002).
- 국립환경연구원, 정수장의 원생동물 시스템 제어연구 (II), (2003).
- 김이호, 크립토스포리디움의 배양 및 정제기술, *첨단환경기술*, 8월호, pp. 6-14 (2003).
- 박훈수, 염철민, 윤제용, 국내 정수처리공정에서 오존 공정 시설의 현황과 특성, *상하수도학회지*, **15**(4), pp. 279-292 (2001).
- 윤제용, 손진식, 최승일, 고도정수처리 정책방향에 관한 연구, *환경부* (2004).
- 이목영, 조은주, 변승현, 김태호, 오세종, 안승구, 응집·침전공정에서의 크립토스포리디움 및 지아디아 제거율 평가, *대한환경공학회지*, **26**(4), pp. 397-403 (2004).
- 조민, 김지연, 윤제용, UV 조사에 의한 미생물의 불활성화, *첨단환경기술*, 2월호, pp. 5-18 (2004).
- 최승일, 윤제용, 정수처리 기준의 의미와 준비현황, *상하수도학회지*, 봄, pp. 28-33 (2004).
- Camel, V. and Bermond, A., The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment, *Water Res.*, **32**, pp. 3208-3222 (1998).
- Cho, M., Chung, H., and Yoon, J., Disinfection of water containing natural organic matter by using ozone-initiated radical reactions, *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, pp. 2284-2291 (2003a).
- Cho, M., Chung, H., and Yoon, J., Quantitative evaluation of the synergistic sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone followed by chlorine, *Environ. Sci. Tech.*, **37**, pp. 2134-2138 (2003b).

- Cho, M., Kim, H., Cho, S. H., and Yoon, J., Investigation of ozone reaction in river waters causing instantaneous ozone demand, *Ozone Sci. Eng.*, **25**, pp. 251-259 (2003c).
- Gyurek, L. L., Li, H., Belosevic, M., and Finch, G. R., Ozone inactivation kinetics of *Cryptosporidium* in phosphate buffer, *J. Environ. Eng.*, **125**, pp. 913-924 (1999).
- Jenkins, M. B., Anguish, L. J., Bowman, D. D., Walker, M. J., and Ghiorse, W. C., Assessment of a dye permeability assay for determination of inactivation rates of *Cryptosporidium parvum* oocysts, *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, pp. 3844-3850 (1997).
- Rennecker, J., Marinas, B. J., Owens, J. H., and Rice, E. W., Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone, *Wat. Res.*, **33**, pp. 2481-2488 (1999).
- Shin, G., Linden, K. G., Arrowood, M. J., and Sobsey, M. D., Low-pressure UV inactivation and DNA repair potential of *Cryptosporidium parvum* oocysts, *Appl. Environ. Microbiol.*, **67**, pp. 3029-3032 (2001).