

## 정수소독공정에 이용되는 염소, 이산화염소, 오존 소독제의 비교, 고찰에 관한 연구

이윤진<sup>†</sup> · 이선종 · 이동찬 · 김 현 · 이 환\* · 이철호\* · 남상호  
건국대학교, \*(주)오이코스

## Comparison of Chlorine, Chlorine Dioxide and Ozone as Disinfectants in Drinking Water

Yoon Jin Lee<sup>†</sup> · Sun Jong Lee · Dong Chan Lee · Hyun Kim · Hwan Lee\* ·  
Cheol Hyo Lee\* · Sang Ho Nam

Department of Environmental Engineering, Konkuk University

\*OIKOS Co., Ltd.

(Received 2 April, 2002; Accepted 5 August, 2002)

### ABSTRACT

The experiments for the characterization of inactivation were performed in a series of batch processes with the total coliform as a general indicator organism based on chlorine, chlorine dioxide and ozone as disinfectants. The water samples were taken from the outlet of settling basin in a conventional surface water treatment system that is provided with the raw water drawn from the mid-stream of the Han River. The inactivation of total coliform was experimentally analyzed for the dose of disinfectant, contact time, pH, Temperature and DOC. The nearly 2.4, 3.0, 3.9 log inactivation of total coliform killed by injecting 1 mg/l at 5 minutes for chlorine, chlorine dioxide and ozone. For the inactivation of 99.9%(3 log), Disinfectants required were 1.70, 1.00 and 0.60 mg/l for chlorine, chlorine dioxide and ozone, respectively. The higher the pH is, the poorer the disinfections effects are in the range of pH 6~9 by using chlorine and ozone. But the influence of pH value on killing effects of chlorine dioxide is weak. The parameters estimated by the models of Chick-Watson, Hom, and Selleck from our experimental data obtained for chlorine are:  $\log(N/N_0) = -0.16 CT$  with  $n = 1$ ,  $\log(N/N_0) = -0.71C^{0.87}T$  with  $n \neq 1$ , for Chicks-Watson model,  $\log(N/N_0) = -1.87C^{0.47}T^{0.36}$  for Hom model. For chlorine dioxide are:  $\log(N/N_0) = -1.53 CT$  with  $n = 1$ ,  $\log(N/N_0) = -2.29C^{0.94}T$  with  $n \neq 1$ , for Chicks-Watson model,  $\log(N/N_0) = -3.64C^{0.43}T^{0.24}$  for Hom model and for ozone are:  $\log(N/N_0) = -2.59 CT$  with  $n = 1$ ,  $\log(N/N_0) = -2.82C^{0.36}T$  with  $n \neq 1$ , for Chicks-Watson model,  $\log(N/N_0) = -4.53C^{0.26}T^{0.19}$  for Hom model.

**Keywords :** Chlorine, Chlorine dioxide, Ozone, Total

### I. 서 론

정수처리 및 배급수 과정에서의 소독은 바이러스, 세균, 원생동물류에 의한 각종 수인성 질병을 예방할 목적으로 행해진다.<sup>1,2)</sup> 염소는 가격이 싸고 소독력이 비교적 크며 잔류 염소의 지속되는 장점을 가지고 있어 수돗물의 소독제로 가장 많이 이용되어 왔다.<sup>3,4)</sup>

미국은 1983년 Milwaukee시에서 원충류인 *crypto-*

*sporidium*의 식수오염으로 감염된 환자가 40만명에 이르고 그중 100여명이 사망한 사례가 있는 후 미생물에 대한 기준을 강화시키는 법적 제도를 마련하였다.<sup>3)</sup> 즉, 미국 연방환경청(USEPA)은 1989년에 개정된 미국 음용수 수질기준법(National Drinking Water Regulation)과 관련하여 대장균군에 관한 규정(total coliform rule) 및 지표수처리에 관한 규정(surface water treatment rule)을 제정한 후 SWTR guidance manual을 발간하여 적정수준의 소독효과를 얻기 위해 소독제의 농도에 미생물의 접촉시간을 곱한 소독능으로서 Ct (disinfectant conc.×contact time)값과 병원미생물의 사멸/불활성화율로 규제하고 있다.<sup>1)</sup> 최근 국내에서도

<sup>†</sup>Corresponding author : Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University  
Tel: 02-447-8367, Fax: 02-447-8367  
E-mail: yjlee@konkuk.ac.kr

수돗물에서의 바이러스 검출 논쟁 등과 더불어 더욱 강력한 소독력이 요구되고 있으나 과용시 THM (Trihalomethane) 등의 인체에 유해한 부산물을 생성되므로 이를 대체할 소독제에 관한 관심이 더욱 높아지고 있다.<sup>4)</sup> 대체소독제로는 이산화염소, 오존, 클로라민 등이 있다.<sup>5)</sup>

이산화염소는 신경계 독성물질인 chlorite( $\text{ClO}_2^-$ ), chlorate( $\text{ClO}_3^-$ )를 생성시키는 것으로 보고되고 있으며 안정화 이산화염소 파동이후 현재 국내 정수처리에서는 거의 이용되지 않고 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나, 이산화염소는 염소와 같이 THM 등을 생성하지 않고 맛과 냄새 및 페놀제어 등의 장점이 있다.<sup>7)</sup> 더구나 정 등<sup>5)</sup>의 보고에 따르면 빛으로부터 차단된 급수시스템에서의 잔류시간이 약 48시간으로 알려져 있다. 오존은 강한 산화력으로 THMs의 생성억제, 여과성능의 개선, 조류사멸, 유기물의 산화 그리고 염소에 의해 잘 불활성화되지 않는 *Cryptosporidium*과 같은 미생물에 대해 큰 소독능을 가지고 있다.<sup>8,9)</sup> 그러나, 오존은 수중에서 빠른 속도로 자기분해반응(self-decomposition reaction)을 하며 브로메이트( $\text{BrO}_3^-$ ), 알데히드, 저분자 유기산 등과 같은 부산물을 발생시킨다.<sup>10)</sup>

소독효율은 소독제의 농도, 접촉시간, 수중의 pH, 온도 조건 등의 인자에 의해 영향을 받는다.<sup>11,12)</sup> 따라서 각 소독제의 영향인자에 따른 변화특성을 파악하는 것이 소독제의 도입에 앞서 요구된다. 수인성 병원미생물의 소독속도와 접촉시간을 함축하고 있는 동역학적 모델(kinetic model)은 소독제의 적정투입량 및 투입위치

의 결정, 정수지, 배수지, 배수관망 등을 설계하고 운영하는 기본이 된다.<sup>13)</sup> 본 연구에서는 지표미생물인 총대장균을 대상으로 염소, 이산화염소, 오존 소독제의 농도 및 접촉시간에 따른 소독효율 등을 고찰하였고 수중의 온도, pH조건, DOC의 영향인자를 변화시켜 이에 따른 소독력을 평가하였다. 또한 실험결과를 토대로 기존의 동역학적 모델들을 재조명하고 각 모델의 계수를 산정하여 보았다.

## II. 연구방법

### 1. 대장균군 접종액의 배양

가정 하수에서 채수한 시료를 pore size  $11\ \mu\text{m}$  (Wattman No.1)로 여과하여 간섭물질을 제거하였다. 전처리한 하수를 M-endo배지<sup>14)</sup>에 접종시켜 생성된 대장균의 집락들을 nutrient배지 250 ml에 주입한 후  $35\pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서  $24\pm 2$ 시간동안 배양하였다. 이중 10 ml를 분취해 낸 후 2500 rpm으로 20분간 원심 분리하여 농축된 미생물을 배지성분과 분리하였다. 분리된 미생물을 voltex mixer로 10분간 균일하게 혼합한 후 대장균의 초기 농도가  $10^7\sim 10^9$  범위일 때 미생물 실험에 이용될 초기 접종액으로 준비하였다.

### 2. 소독제의 발생장치 및 분석방법

염소표준용액은 12%의 차아염소산나트륨용액( $\text{NaOCl}$ )을 초순수증류수로 희석하여 5000 mg/l의 stock solution을 조제하였고, DPD비색법을 이용하여 그 농도

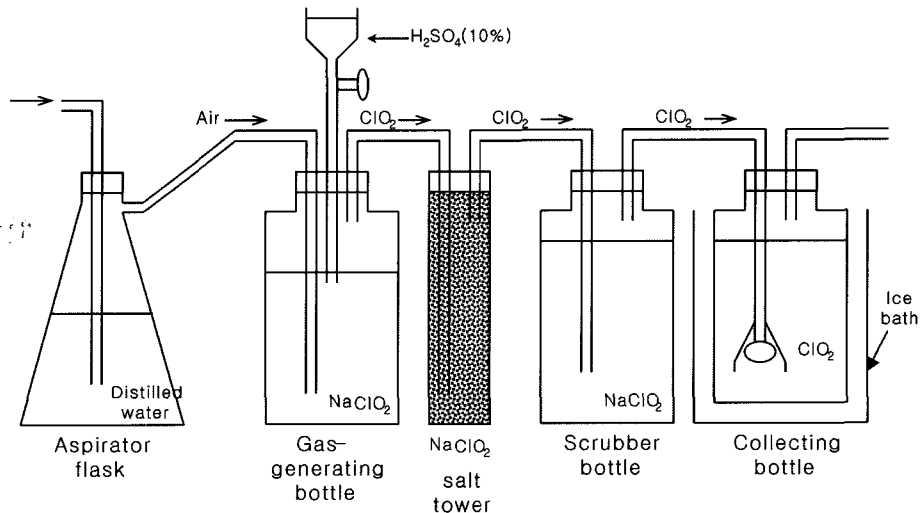


Fig. 1. Chlorine dioxide generation system.

를 측정하였다. 고농도의 염소용액은 사용하기 직전에 농도를 측정하여 주입농도에 따라 분취하여 시료에 주입하였다.

본 연구에서 이용된 이산화염소의 발생장치는 Fig. 1과 같다.<sup>14)</sup> 반응용기에서 0.083 M의 아염소산 나트륨과 10%의 황산이 반응하여 압축공기에 의해 최종용기로 이산화염소가 이동하여 증류수에 용해된다. 반응시 발생된 이산화염소의 분해를 막기 위해 빛으로부터 차단하였다. 장치로부터 발생된 이산화염소염소는 비교적 안정화될 수 있는 농도범위인 200~500 mg/l가 되도록 하였다. Stock 이산화염소의 농도는 UV-Visible Spectrophotometer(UV-1610, Shimadzu)로 몰흡광계수 1113.7 M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>를 이용하여 360 nm에서 측정하였다.

오존발생기(Erwin Sander, German)를 이용하여 발생된 오존은 총 유효용량 2 l의 밀폐된 갈색 플라스크에 100 ml/min로 10분간 유입되게 하였다. 잔류오존의 농도는 Indigo colorimetric method(standard method, 4500-O3 B)에 의해 나타나는 흡광도를 자외선분광광도계(Shimadzu, UV-1601)를 이용해 측정하였다.<sup>14)</sup>

**3. 실험장치**

본 실험에 이용된 시료는 서울 특별시에 위치한 T정수장의 침전지 유출수로 실험기간 중의 수질현황은 Table 1과 같다. 전염소의 투입으로 인해 T정수장의 침전지 유출수에 0.07 mg/l의 유리염소가 잔류하였고, 이때 총대장균은 검출되지 않았다. 침전지 유출수를 Table 2와 같은 모래여과지에 통과시킨 후 실험실로 운반하여 Fig. 2와 같은 장치로 유입되게 하였다. 전염소로 인해 잔류염소가 소독반응에 영향을 줄 수 있으므로 시료는 미리 질소 가스로 퍼징시켜 잔류소독제를 휘발시킨 후 수행하였다.

소독을 위한 반응조는 내경 180 mm, 높이 250 mm, 유효용적 5 l의 원형 아크릴으로 제작되었으며 반응기

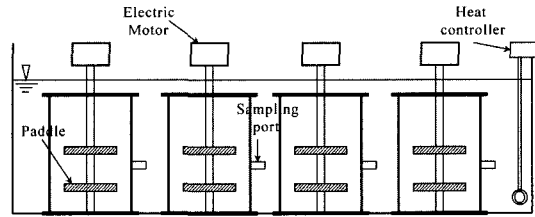
**Table 1.** The characteristics of water for this study

Parameters	Conditions
pH	7.2
Temperature(°C)	22.0 ± 3
DO(mg/l)	8.2
TOC(mg/l)	2.54
NH <sub>3</sub> -N(mg/l)	0.09
Turbidity(NTU)	1.2
Free chlorine(mg/l)	0.07mg/l
HPC(cfu/ml)	10
Total coliform(number/100 ml)	ND

\*ND: Not detected.

**Table 2.** Summary of configuration design for sand filter

Item	Conditions
Diameter(m)	0.05
Height(m)	1.2
Sand layer(m)	1
Q(m <sup>3</sup> /d)	0.44
LV(m/h)	9.35
EBCT(min)	7.69



**Fig. 2.** Schematic diagram of the disinfection system.

하단으로부터 125 mm의 높이에서 시료의 채취가 가능하도록 하였다. 반응조 상단에 패들을 설치하여 G(The velocity of gradient)를 500 sec<sup>-1</sup>로 교반하였다. 1% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 또는 NaOH로 실험조건의 pH를 조정하고 인큐베이터 내에 반응기를 설치하여 온도를 20±0.5°C로 변화시켜 주었고 5분 동안 각 소독제와 반응시켰다. 각 반응시간에 도달하면 염소, 이산화염소에 대해서는 3%의 티오황산나트륨(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.2 ml를 시료에 주입하였고 오존에 대해서는 3%의 sodium formate 0.2 ml를 주입하였다. 각 소독제에 의해 손상된 대장균은 여과기(Microfil TM, Millipore)를 이용하여 멸균된 0.45 µm 여과지로 흡수시킨 후 M-endo 배지에 접종하였다. 접종한 대장균은 35±0.5°C에서 24±2시간 동안 배양한 후 집락수를 계수하였다.

**III. 결과 및 고찰**

**1. 소독제 주입농도 및 접촉시간에 따른 소독력 평가**

각 소독제의 주입농도의 변화에 따른 소독력을 고찰하기 위해 반응시간 5분 동안 접촉시킬 때의 소독효율은 Fig. 3과 같다. 각 소독제 단위 1 mg/l 주입시 로그 생존비율지수(log Nt/No)는 염소, 이산화염소, 오존에 대해 각각 2.42, 2.99, 3.93으로 오존, 이산화염소, 염소 순으로 소독력이 높았다. 99.9%(3 log)의 소독력을 이루기 위한 염소, 이산화염소, 오존의 주입 농도는 각각 1.7, 1.0, 0.6 mg/l이었다.

동일한 소독력을 이루기 위해 주입되는 소독제의 농

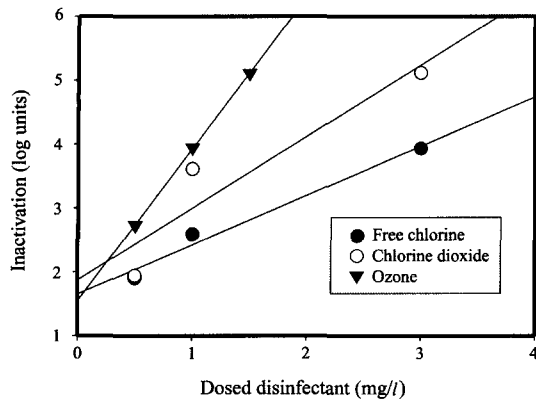


Fig. 3. Effect of disinfectant concentration on total coliform inactivation of free chlorine, chlorine dioxide and ozone.

도는 염소에 비해 이산화염소와 오존을 주입하였을 때 더 낮았다. 이같은 현상은 이산화염소의 수중 용해도가 염소의 5배에 해당되며<sup>15)</sup> 염소처럼 수중에서 가수분해 반응을 하지 않고 거의 100%에 가까운 분자상태로 녹아 있으므로 세균의 세포막을 침투하여 파괴하는데 더욱 유리한 것으로 생각된다. 특히, 오존은 산화력이 매우 강한 소독제로 잘 알려져 있으며 소독메카니즘은 다음과 같다.<sup>8)</sup> 오존 소독시 세균막을 파괴함과 동시에 효소의 -SH를 포함하고 있는 disulfide 결합에 작용함으로써 효소의 활동도를 저해하는 것으로 보고되어 있다. 또한 세포막 뿐 아니라 세포 내에 있는 핵물질과도 직접 반응하여 세균에 대한 소독력이 높은 것으로 보여진다.

소독 5분 후에 유리염소, 이산화염소, 오존의 잔류농도는 Fig. 4와 같다. 모든 소독제에 대해 반응 5분 이내에 70~80%가 소모되었다. 반응 5분 후에 주입한 소독제의 농도와 잔류하는 소독제의 농도와의 관계는 염소, 이산화염소, 오존소독제의 경우 각각  $C_{t=5} = 0.35C_0 - 0.04$ ,  $C_{t=5} = 0.33C_0 - 0.09$ ,  $C_{t=5} = 0.37C_0 - 0.20$ 의 관계를 보여 오존이 가장 빠른 속도로 소모되었다.

## 2. pH조건에 따른 소독력 평가

염소, 이산화염소, 오존소독제 1 mg/l을 주입한 후 각 pH 조건에서의 총대장균에 대한 소독력은 Fig. 5와 같다. 염소의 소독효율은 pH 6~9범위에서 pH가 낮을수록 증가하였다. 수중에서 염소는 식 (1), (2)와 같이 분해되는데 HOCl은 OCl<sup>-</sup>의 약 80배이상의 소독력을 가진다. 이는 pH가 높아질수록 소독력이 높은 HOCl의 농도가 감소하는 반면, 소독력이 비교적 낮은 OCl<sup>-</sup>의

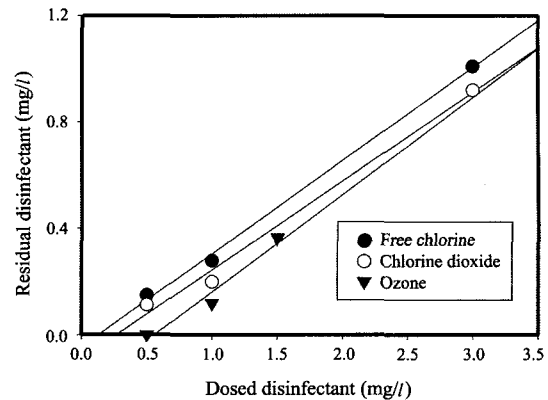
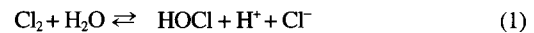
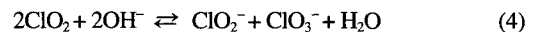


Fig. 4. Disinfectant residuals detected after 5 min of contact time as a function of the dosage.

농도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. White<sup>9)</sup>의 보고에 따르면 pH 7에서 유리염소 중에 HOCl 및 OCl<sup>-</sup>의 농도는 각각 79, 21%이었는데 비해 pH 9에서는 각각 4, 94%이었다.



이산화염소의 소독효율도 pH가 높아질수록 감소하였는데 식 (3), (4)와 같은 이산화염소의 반응에 의해 설명될 수 있다. 이산화염소는 수중에서 소독력이 약한 chlorite와 chlorate로 변환되었기 때문에 소독효율이 감소한 것으로 보여지며 이러한 물질들은 신경계 독성물질로 보고된 바 있다.<sup>16)</sup>



이산화염소에 의한 소독효과는 pH가 높을수록 감소하였으나, pH에 따라 큰 폭으로 변화하지 않아 본 pH 범위에서는 비교적 유효한 소독력을 보였다. Junli 등<sup>17)</sup>의 연구결과에 의하면 *Sarcina*, *Staphylococcus* 등의 세균에 대하여 이산화염소를 주입한 결과 pH값에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다.

본 연구결과, 오존은 세 종류의 소독제 중 가장 pH 조건에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 반면, Farooq *et al.*(1977)<sup>18)</sup> pH조건이 semi-batch시스템에서 오존의 소독반응에 거의 영향을 주지 않는다고 보고하였다. 그러나 Labatiuk(1992)의 연구의 따르면 batch연구에서 pH는 오존 잔류농도를 감소시키는 매우 중요한 인자라고 보고한 바 있다.<sup>19)</sup> Facile 등은 CT

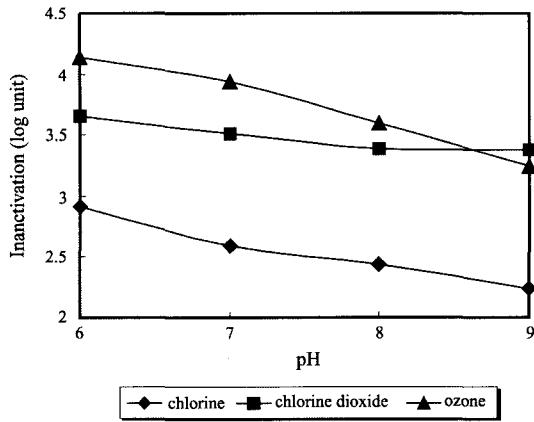


Fig. 5. Total coliform inactivation of free chlorine, chlorine dioxide and ozone at different pH values.

값의 산정시 pH6.3에서 pH8.3에서보다 낮아진다고 하였다.<sup>20)</sup>

3. 온도 조건에 따른 소독력 평가

염소, 이산화염소, 오존에 대해 온도 10, 20, 30°C일 때의 소독력을 평가해 본 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 소독제의 효과는 온도가 높아짐에 따라 증가하였다. 염소소독제의 경우 단위 10°C 증가시 비활성화도는 0.2 log증가하였다. 오존소독제의 경우 온도의 증가에 따른 소독효과는 타소독제에 비해 비교적 차이가 컸다. 소독 반응속도상수의 온도의존성은 다음과 같은 아레니우스식으로 나타낼 수 있다.<sup>21)</sup>

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{Rt}} \quad (5)$$

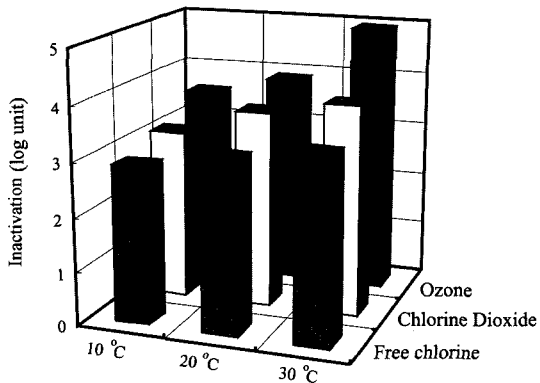


Fig. 6. Total coliform inactivation of free chlorine, chlorine dioxide and ozone at different temperature.

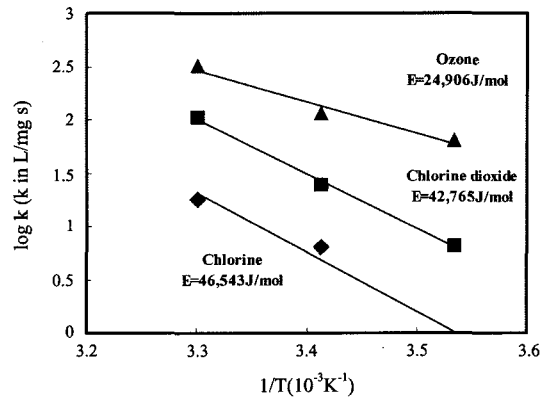


Fig. 7. Temperature dependence of inactivation rate constant k and activation energy with chlorine, chlorine dioxide and ozone.

- $E_a$  : 활성화에너지(kJ/mol)
- $R$  : 기체상수(8.314J/K · mol)
- $T$  : 절대온도
- $A$  : 잣음률

각 소독제의 온도에 따른 미생물의 비활성화율을 식 (5)에 의해 산정해 보면 Fig. 7과 같다. pH 7에서 대장균의 활성화 에너지는 염소, 이산화염소, 오존은 각각 46,543, 42,765, 24,906 J/mol이었다. E-coli의 활성화에너지는 염소, 이산화염소에 대해 34,580, 19,000 J/mol이라고 보고된 바 있다.<sup>17)</sup> 이산화염소와 오존의 활성화에너지는 염소보다 낮아 세균의 비활성화에 대해 염소보다 용이함을 나타낸다.

4. 유기물 농도에 따른 소독력 평가

Fig. 8에서 용존 유기물의 농도가 증가함에 따라 소독효율은 낮아졌다. 소독효율은 유리염소, 이산화염소, 오존소독제를 주입하였을 때 용존 유기물농도가 단위 1 mg/l 증가함에 따라 각각 0.16, 0.25, 0.37 log감소하였다.

특히 오존의 경우 다른 소독제에 비해 용존 유기물의 존재시 소독효율의 감소하는 폭이 컸는데 이같은 현상은 식 (6)~(11)에 의해 설명될 수 있다. 용존 유기물이 존재하는 경우 오존은 수산화기의 영향을 받아 OH·로 전환되는데, 오존시 소독효율은 분자상의 오존이 OH·보다 높으며 OH·는 빠른 속도로 소멸된다.



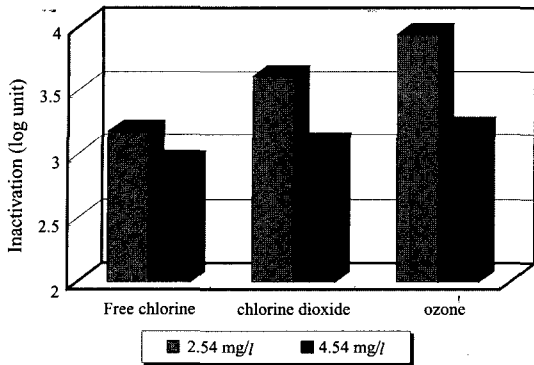


Fig. 8. Total coliform inactivation of free chlorine, chlorine dioxide and ozone at different.

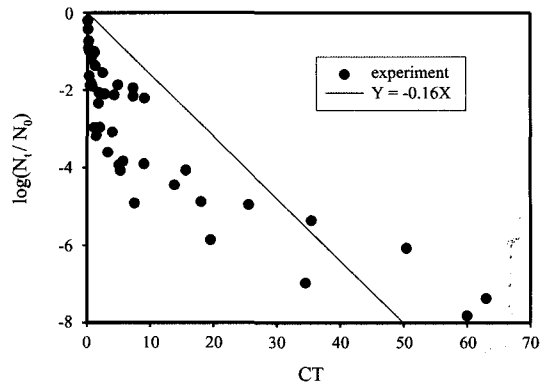
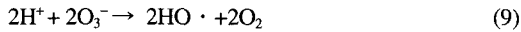
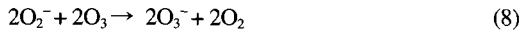
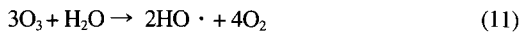


Fig. 9. Relationship between log survival ratio and CT with chlorine.



이를 합산하면 식 (11)과 같다.



5. 동력학적 모델의 계수산정

소독공정에서의 각 소독제의 반응과 소독효율과의 관계를 보다 체계화하여 수식화하고자 하는 모델들이 제시되어 왔다. Chick는 소독효율과 시간과의 관계에 다음과 같은 관계가 있음을 보고하였다.<sup>22)</sup>

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k^* T \quad (12)$$

N : 접촉시간 t에서의 미생물의 수  
 N<sub>0</sub> : t=0일 때의 미생물의 수  
 k\* : 반응속도상수  
 t : 접촉 시간

Watson<sup>13)</sup>은 Chick의 반응속도상수에 소독제의 농도개념이 추가된 (13)와 같은 함수를 도입하여 식 (14)을 도출하였다.

$$k^* = kC^n \quad (13)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -kC^n T \quad (14)$$

k : 1차반응속도상수  
 C : 소독제의 농도  
 n : 회석상수

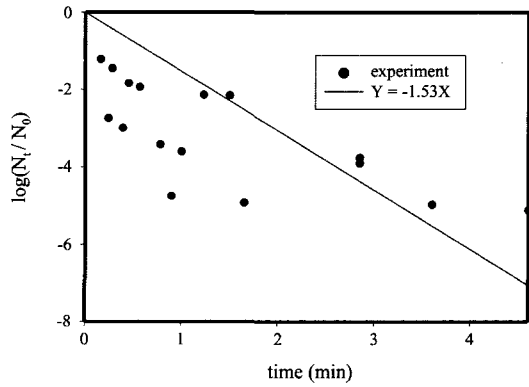


Fig. 10. Relationship between log survival ratio and CT with chlorine dioxide.

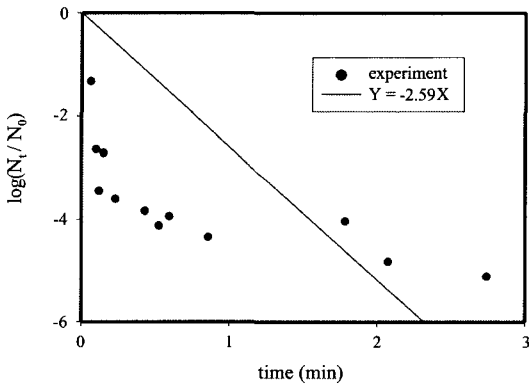


Fig. 11. Relationship between log survival ratio and CT with ozone.

염소, 이산화염소, 오존을 각각 0.5, 1, 3 mg/l로 주입하여 0.5, 1, 3, 5, 15, 30, 60분동안 접촉시킬 때

Chicks-Watson법칙으로 고찰해 보면 다음과 같다. 일반적으로 Chicks-Watson모델에서  $n$ 은 1로 가정하는 경우가 많은데  $n=1$ 일 때 총 대장균군의 사멸율과 CT값과의 관계는 Fig. 9~11과 같다.  $n=1$ 이라고 가정하고 산정된  $k$ 값은 시료의 수온이 20°C에서의 소독제와 유기물에 대한 특정 상수가 된다.<sup>11)</sup>

총 대장균의 생존비율지수와 CT값과는 식 (14)와 같은 관계가 있었고,  $k$ 값은 유리염소, 이산화염소, 오존에 대해 각각 0.16, 1.53, 2.59이었다.

$$\text{유리염소, } \log \frac{N}{N_0} = -0.16CT \quad (15)$$

$$\text{이산화염소, } \log \frac{N}{N_0} = -1.53CT \quad (16)$$

$$\text{오존, } \log \frac{N}{N_0} = -2.59CT \quad (17)$$

한편  $n \neq 1$ 일 때 본 소독실험결과를 토대로 시료의 염소소독제에 대한 Chicks-Watson 모델에 대한  $n$ ,  $k$ 값을 산정해 본 결과 각각 0.87, 0.71이었다. 이산화염소에 대하여 Chicks-Watson 모델에 대한  $n$ ,  $k$ 값을 산정해 본 결과 각각 0.94, 2.29이었다. 오존에 대하여 Chicks-Watson 모델에 대한  $n$ ,  $k$ 값을 산정해 본 결과 각각 0.36, 2.82이었다.

$$\text{유리염소, } \log \frac{N}{N_0} = -0.71C^{0.87}T \quad (18)$$

$$\text{이산화염소, } \log \frac{N}{N_0} = -2.29C^{0.94}T \quad (19)$$

$$\text{오존, } \log \frac{N}{N_0} = -2.82C^{0.36}T \quad (20)$$

Hom<sup>23)</sup>은 염소 소독시 생존비율지수와 시간과의 함수를 도시하였을 때 Chicks-Watson의 직선적인 형태보다는 다음과 같은 형태의 곡선을 나타낸다고 보고하였다.

$$\log \frac{N}{N_0} = -kC^n T^m \quad (21)$$

Hom모델의 상수들을 구하기 위해 식 (21)를 양변에 로그를 취하고 각 항들의 함수를 Fig 산정하였다. 염소소독제의  $k$ ,  $n$ ,  $m$ 은 각각 1.87, 0.47, 0.36이었다. 이산화염소 소독제의  $k$ ,  $n$ ,  $m$ 은 각각 3.64, 0.43, 0.24이었다. 오존 소독제의  $k$ ,  $n$ ,  $m$ 은 각각 4.53, 0.26, 0.19이었다. Hass<sup>24)</sup> 등은  $m$ 이 1보다 작을 경우에 tailing-off형의 곡선이 나타나며, 반대의 경우에는 반응초기에 shoulder곡선을 나타낸다고 보고하였다. 본 시료에서 유리염소, 이산화염소, 오존의  $m$ 값은  $m < 1$

인 경우에 해당되었다.

$$\log \left( -\log \frac{N}{N_0} \right) = \log(k) + n \log(c) + m \log(t) \quad (22)$$

$$\text{유리염소, } \log \frac{N}{N_0} = -1.87C^{0.47}T^{0.36} \quad (23)$$

$$\text{이산화염소, } \log \frac{N}{N_0} = -3.64C^{0.43}T^{0.24} \quad (24)$$

$$\text{오존, } \log \frac{N}{N_0} = -4.53C^{0.26}T^{0.19} \quad (25)$$

#### IV. 결 론

본 연구는 서울시 T정수장의 시료를 대상으로 염소, 이산화염소, 오존의 소독효율을 비교하고 영향인자별 소독특성을 고찰하였다. 또한 실험결과를 토대로 소독공정의 설계 및 운전에 기본이 되는 기존 동역학적 모델을 재조명하고 각 소독제에 대해 모델들의 계수를 산정하여 보았다. 연구 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 접촉시간 5분동안 99.9%(3 log)를 이루기 위해 요구되는 염소, 이산화염소, 오존의 주입 농도는 1.7, 1.0, 0.6 mg/l이었고 단위 1 mg/l에 대한 로그생존비율지수는 각각 2.4, 3.0, 3.9로 오존, 이산화염소, 염소순으로 소독력이 높았다. 염소, 이산화염소, 오존에 대한 대장균군의 활성화에너지는 각각 46,543, 42,765, 24,906 J/mol로 오존, 이산화염소가 염소에 비해 활성화에너지가 낮아 수중에서 비활성화가 용이하였다.

2. pH 6~9범위에서 염소, 오존은 수중 pH조건이 낮을수록 소독효율이 증가하였으며 특히 오존의 경우 pH 조건에 민감한 것으로 나타났다. 반면 이산화염소는 pH 조건의 변화에 큰 폭으로 변화하지 않고 양호한 소독효율을 보였다.

3. 염소에 대한 기존의 모델의 상수값을 산정해 본 결과는 다음과 같았다. Chicks-Watson 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -0.16CT$  ( $n=1$ 일 때),  $\log \frac{N}{N_0} = -0.71C^{0.87}T$  ( $n \neq 1$ 일 때), Hom 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -1.87C^{0.47}T^{0.36}$  이었다.

4. 이산화염소에 대한 기존의 모델의 상수값을 산정해 본 결과는 다음과 같았다. Chicks-Watson 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -1.53CT$  ( $n=1$ 일 때),  $\log \frac{N}{N_0} = -2.29C^{0.94}T$  ( $n \neq 1$ 일 때), Hom 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -3.64C^{0.43}T^{0.24}$  이었다.

6. 오존에 대한 기존의 모델의 상수값을 산정해 본 결과는 다음과 같았다. Chicks-Watson 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -2.59CT$  ( $n=1$ 일 때),  $\log \frac{N}{N_0} = -2.82C^{0.36}T$  ( $n \neq 1$ 일 때), Hom 모델은  $\log \frac{N}{N_0} = -4.53C^{0.26}T^{0.19}$  이었다.

### 참고문헌

1. EPA : Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirement for public water. 1st Ed., AWWA, Denver, 141-152, 1991.
2. 환경부 : 상수도시설기준(유지 관리편). 1판, 한국수도협회, 서울, 128-132, 1998.
3. 윤재용, 변석중, 이상덕 : CT값에 의한 정수장의 소독능 평가. 한국물환경학회지, **14**(4), 413-423, 1998.
4. Geo, C. W. : The handbook of chlorination and alternative disinfectants. 3rd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 290-478, 1992.
5. 정승우, 오현제, 박훈수, 강준원, 최승일 : 이산화염소 반응특성과 이온크로마토그래피를 이용한 이산화염소체 분석법. 대한환경공학회지, **17**(6), 543-552, 1995.
6. 이윤진 : 이산화염소에 의한 수돗물의 소독효과와 부산물의 생성 거동에 관한 연구. 건국 대학교 석사학위논문, 31-39, 1996.
7. Masschelein, W. and Rip, G. R. : Chlorine dioxide chemistry and environmental impact of oxychlorine compounds. Ann Arbor Science Publishers Inc, Michigan, 25-60, 1979.
8. Siddiqui, M. S., Amy, G. R. and Murphy, B. D. : Ozone enhanced of natural organic matter from drinking water sources. *Wat. Res.*, **31**(2), 3098-3106, 1997.
9. Katz, J. : Ozone and chlorine dioxide technology for disinfection of drinking water. *Noyes Data Corporation*, 350-354, 1986.
10. Thurman, E. M. : Organic geochemistry of natural waters. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, 103-110, 1985.
11. AWWA : Water treatment plant design. 3rd Ed., McGRAW-Hill, New York, 221-280, 1998.
12. White, G. C. : Disinfection practices in the San Francisco Bay Area. *J. WPCF*, **46**, 89-93, 1974.
13. AWWA : Water quality and treatment. 5th Ed, McGRAW-Hill, New York, **14**, 22-32, 1999.
14. APHA, AWWA and WEF : Standard methods for the examination of water and wastewater (19th edition). American Public Health Association, Washington, 1995.
15. Hoigné, J. : Ozonation manual for water and wastewater treatment, John Wiley & Sons, New York, 57-62, 1982.
16. Richard, J. B. and Frederick, C. K. : Health effects of disinfectants and disinfection by-products. AWWA Research Foundation and AWWA, 39-42, 1991.
17. Huang Junli, Wang Li, Ren Nanqi, Ma Fang and Juli : Disinfection effect of chlorine dioxide on bacteria in water. *Wat. Res.*, **31**(3), 607-613, 1997.
18. Farooq, S., Chain, E. S. K. and Engelbrecht, R. S. : Basic concepts in disinfection with ozone. *Journal of water pollution control federation*, **49**, 1818-1831, 1977.
19. Labatiuk, C. W. Belosevic, M. and Finch, G. R. : Factors influencing the infectivity of *Giardia Muris* cysts following ozone inactivation in laboratory and natural waters. *Wat. Res.*, **26**, 733-743, 1992.
20. Nathalie Facile, Benoit Barbeau, Michele Prevost and Boniface Koudjonou : Evaluation bacterial aerobic spores as a surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* inactivation by ozone. *Wat. Res.*, **34**(12), 3238-3246, 2000.
21. Bitton, D. : Wastewater microbiology, Ann Arbor Science Publishers. Michigan, 113-138, 1994.
22. Chick, H. : An investigation of the laws of disinfection. *J. Hygiene*, **8**, 92-158, 1908.
23. Hom, L. W. : Kinetics of chlorine disinfection in an ecosystem. *J. Sanitary Eng. Div.*, **98**(1), 183-193, 1972.
24. Hass, C. N. and Karra, S. B. : Kinetics of microbial inactivation by chlorine-II. Kinetics in the presence of chlorine demand. *Wat. Res.*, **18**(11), 1444-1449, 1984.