

오존처리시 Bromate생성에 미치는 온도 및 pH의 영향

이 무 강 · 김 영 철 · 최 종 원*
경성대학교 환경공학과 · 경성대학교 약학과
(2003년 12월 2일 접수; 2004년 6월 30일 채택)

The Effect of Temperature and pH on Bromate Formation by Ozonation

Mu-Kang Lee, Young-Chur Kim and Jong-Won Choi*

Department of Environmental Engineering, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea
*Dept. of Pharmacy, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea
(Manuscript received 2 December, 2003; accepted 30 June, 2004)

The objective of this study was to investigate the effects of pH and temperature on the formation of bromate, which is ozonation by-products, during ozonation.

In this experiment, the operating parameters including pH 3~10 and temperature 15~30°C were studied. Through the study for the bromate formation, reaction rate constant, and ozonation effect index on pH and temperature, the results obtained are as follows. At the same initial pH condition, the increase of pH shown similar trends even if the reaction variables such as temperature and reaction time of ozonation were exchanged. As pH and temperature were increasing, the bromate concentration was increased but bromine(HOBr+OBr) was decreased with increasing pH from 3 to 10. The activation energy(J/mol) for bromate formation decreased with increasing pH. The rate constants of bromate formation for the reaction of ozone and bromide, and ozone dosage coefficient(K_o) increased with temperature and pH. Ozonation effect index(OI) decreased with increasing temperature and pH.

Key Words : Ozonation, Bromate formation, Ozone dosage coefficient(K_o), Ozonation effect index(OI)

1. 서 론

오존(O_3)은 산화력이 강한 물질로서, 원형질 등에 직접 작용하여 세포를 살상하기 때문에 많은 분야에서 살균제로 사용되고 있으며, 특히 정수장의 소독에 있어서는 실용화되고 있다. 또한 오존은 산화력이 강하고 탈취, 탈색, 탁도의 제거와 암모니아 및 아질산의 산화 등의 효능을 가지고 있기 때문에 병원미생물의 살균뿐만 아니라 수질정화를 목적으로 최근에는 양식시설이나 수족관 등에 적극적으로 도입되고 있다¹⁾. 특히, 바다 물을 이용하는 육양 양식장이나 또는 바다 물을 냉각수로 이용하는 발전소

등에서 미생물에 의한 오염을 방지하기 위해 오존 처리를 하는 경우가 많으나, 해수 중에서 오존은 브롬 이온(Br^-) 이나 염소(Cl^-)이온 등과 반응하여 Oxidant를 생성하기²⁾ 때문에 담수와는 다른 살균기구가 존재할 가능성이 있다³⁾. 고가(高價)의 오존 처리장치를 양식장에 설치하여도 살균의 기대효과가 얻어지지 않거나, 오존처리를 과잉으로 할 경우에는 양식하는 고기의 사멸을 초래하는 경우가 많으므로²⁾ 적절한 기준을 설정하는 것이 바람직하다. 담수중의 브롬화합물은 지질의 생성, 해수의 침입과 인위적인 것에 의해 존재하게 된다. 인위적인 것으로는 농약, 비료, 유연가솔린의 첨가물, 불연화제, 산업폐수 및 하수 처리수 등에 의해 유입 된다⁴⁾. 또한, 오존과 Br^- 의 화학반응은 반응속도가 비교적 빠르며 바다 속에 있는 다른 성분과의 반응성을 비교해 보면 Br^- 과의 반응이 더 빠르게 일어나는 것으로 알려져 있

Corresponding Author : Mu-Kang Lee, Department of Environmental Engineering, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea
Phone : +82-51-620-4731
E-mail : leemk@ks.ac.kr

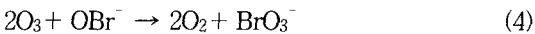
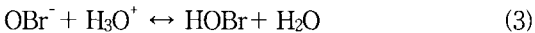
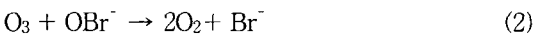
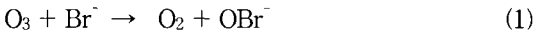
다³⁾. 음용수의 상수원수에 극히 낮은 브롬이온의 농도(지하수: <2 mg/ℓ, 지표수: < 0.8 mg/ℓ)³⁾를 포함하고 있더라도 오존처리에 의해 유기브롬화물 및 무기산화물(TRO; Total Residual Oxidant) 등을 생성하게 된다. 또한, 오존은 Br⁻과 반응하여 차아브롬산(Hypobromous acid: HOBr)을 생성하게 되고, 더욱 산화가 진행되면 Bromate(BrO₃⁻)를 생성하게 된다³⁾. 이러한 TRO 및 BrO₃⁻ 등은 장기간 동물이 섭취하면 신장(腎臟) 등에 치명적인 영향을 미치게 되고, 또한 발암성 물질로도 알려져 있다⁵⁾.

따라서 본 연구는 수중에 Br⁻이 존재할 경우에 오존처리에 의해 생성되는 BrO₃⁻ 영향을 조사하기 위한 연구로서 BrO₃⁻ 생성속도에 영향을 미치는 인자인 온도와 pH에 대해 검토하고, 동시에 오존화 반응의 정도를 나타내는 오존화 효과지수(Ozonation effect Index ; OI)를 결정함으로서 Br⁻과 오존과의 반응성을 검토하였다.

2. 이 론

2.1. Bromide와 O₃의 반응

Br⁻을 포함하는 수용액에 오존을 주입하면 Br⁻은 HOBr을 생성하게 되며, HOBr은 pH의 조건에 따라 OBr⁻, HOBr의 형태로 존재하게 된다^{3,6)}. 이들은 또 다른 O₃ 분자와 반응을 진행하여 BrO₃⁻로 산화됨과 동시에 Br⁻을 생성한다. BrO₃⁻의 생성에 대한 반응식은 다음과 같이 표시할 수 있다⁶⁻⁹⁾.



(1)~(3)식에서 중간체인 HOBr의 농도는 pH가 낮을수록 증가하게 되고, 알카리성에서보다 산성에서 Humic acid와 반응하여 Bromoform을 잘 형성한다고 보고하고 있다¹⁰⁾. (1)~(4)식에서 반응속도는 (2)식의 반응속도가 가장 빠르다는 연구가 보고되고 있는 것으로부터 (2)식의 반응이 BrO₃⁻의 생성에 큰 영향을 줄 것으로 생각된다.

2.2. 오존화 효과지수(Ozonation effect Index ; OI)

오존과 반응물질과의 반응에 대한 수학적 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM}{dt} = -kM \quad (5)$$

(5)식을 적분하면 (6)식이 되고, (6)식으로부터 반응속도 정수 k를 결정할 수 있다.

$$\ln \frac{M}{M_0} = -kt \quad (6)$$

M₀; 반응물질의 초기농도(mg/ℓ)

M; t 시간 후의 반응조 내에 잔류하는 반응물질의 농도(mg/ℓ)

여기서 M은 반응시간 t에서 BrO₃⁻농도를 제외한 반응조에 잔류하는 총 브롬화합물의 농도([Br]_t=Br⁻+Br₂+Br₃+OBr⁻+HOBr)을 의미한다. 여러가지 반응물질에 대한 오존화 분해 가능성을 나타내는 지표¹¹⁾를 OI(Ozonation effect Index)로 표시하면, OI는 다음과 같이 된다.

$$OI = A \frac{T_{1/2}}{M_0} \quad (7)$$

$$A = Rb \frac{T_{1/2}}{V} \quad (8)$$

A; 반응물질의 50%를 소비하는데 필요한 오존주입량(mg/ℓ)

T_{1/2}; 반응물질의 반감기(time)

M₀; 반응물질의 초기농도(mg/ℓ)

Rb; 반응물질의 평균 오존소모율(mgO₃/time)

V; 반응기내 용액의 부피(ℓ)

(8)식의 Rb는 회분식 반응에서 Rb = R · V가 되며, 여기서 R은 실제의 오존주입량(mgO₃/ℓ · time)이다. 위의 (7), (8)식을 재정리하면 다음과 같이 된다.

$$OI = R \frac{(T_{1/2})^2}{M_0} \quad (9)$$

2.3. 오존주입계수 (k₀)

일반적으로 오존주입속도¹¹⁾(Ozone dosage rate)는 특정물질에 대해 일정하므로, (10)식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dO_3}{dt} = R \quad (10)$$

오존주입계수(K₀)를 구하기 위해 (5)식을 (10)식으로 나누어 재정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\left[\frac{dM}{dt} \right]}{\left[\frac{dO_3}{dt} \right]} = - \frac{kM}{R} \quad (11)$$

$$\approx \frac{dM}{dO_3} = - \frac{kM}{R} = -K_0 M \quad (12)$$

(12)식을 적분하면, (13)식으로 된다.

$$\ln\left(\frac{M}{M_0}\right) = K_0 (O_3) \quad (13)$$

K_0 ; 오존주입계수, $K_0 = k/R$ (ℓ/mgO_3)
 (O_3) ; 오존주입량 (mgO_3/ℓ)

여기서 K_0 값에 의해 주어진 반응물질의 양을 소비하는데 필요한 오존주입량을 평가할 수 있다. 즉 K_0 값이 크면, 주어진 반응물질의 양을 소비하는데 필요한 오존량은 감소하게 된다.

3. 재료 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 오존발생기는 독일제 Fischer 500을 사용하였으며, 순수한 산소가스를 1 ℓ/min 으로 주입하면서 오존발생기의 방전전류를 0.7A로 조정하여 오존을 발생시켰다. 이때 발생한 오존농도는 약 17.28 mg/ℓ 이었다. 또한, 발생한 오존가스는 반응조의 밑 부분에 설치한 glass filter를 개조한 산기관을 통하여 반응조에 주입하여 오존화 반응을 수행하였다. 반응조 내의 반응물질은 KBr을 사용하였으며, 반응온도는 15~30 $^{\circ}\text{C}$, 반응시간은 5~40분으로 하였다. 수용액에 염소화합물이나 NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , NO_2 , HCO_3^- , PO_4^{3-} 등이 존재할 경우에는 이러한 무기화합물 등은 오존과의 반응시에 Scavenger로서 작용하므로^{12,13)}, 본 연구에서 사용한 증류수는 오존화 반응을 수행하기 전에 오존으로 처리하고, 잔류오존이 없어질 때까지 He가스로 치환한 용액을 실험에 사용하였다. 또한, pH조절은 1N NaOH와 2N H_2SO_4 용액으로 조절하였다. 반응시간에 따라 생성된 BrO_3^- 및 차아브롬산은 각 반응시간이 끝난 후, Haag 이 제안

한 요오드 적정법³⁾을 사용하여 농도를 측정하였다. Br^- 농도는 Standard Method(APHA, 1992)의 Phenol Red Colorimetric Method에 의해 분석을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 오존처리에 의한 수용액의 pH변화

오존처리에 따른 용액의 pH변화를 고찰하기 위해 용액의 초기 pH를 3, 7, 10으로 조절하고, 반응온도는 15, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ 로 하여 반응시간에 따른 용액의 pH변화를 측정하여 그 결과를 Fig. 2~4에 나타내었다. Fig. 2는 반응온도가 15 $^{\circ}\text{C}$ 이고 용액의 초기 pH가 7인 경우에 반응시간의 증가에 따라 pH가 증가하여 pH 10.8정도를 보였다. pH가 3인 경우에는 반응 이후에 pH가 약 6.8정도가 증가한 pH 9.8을

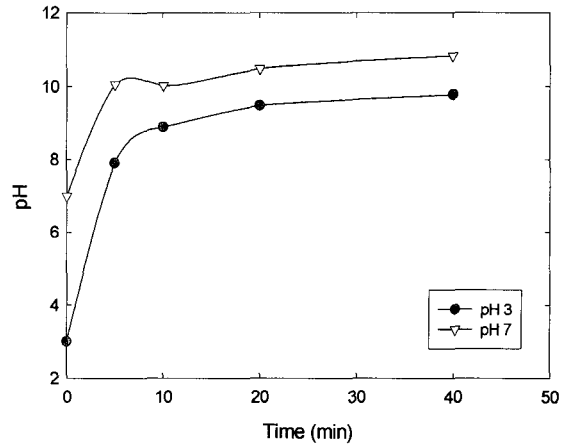


Fig. 2. Variation of pH during ozonation with different pH condition (Temperature 15 $^{\circ}\text{C}$).

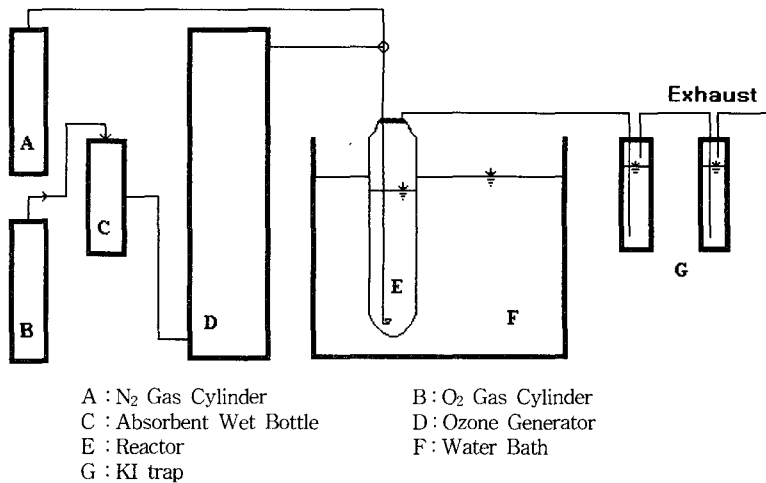


Fig. 1. Schematic diagram of Experimental apparatus.

나타내었다. Fig. 3는 반응온도 20°C에서 각 수용액의 초기 pH와 반응시간에 대한 pH변화를 나타내었다. pH가 3인 경우에는 반응 후 pH는 약 9.7을 보였고, pH 7인 경우에는 반응후의 pH가 10.2를 보였으나, 초기용액의 pH가 10인 경우에는 반응이 진행함에 따라 pH는 9.8로서 약간의 감소를 보였다. 반응온도 30°C에서 각 초기 pH와 반응시간에 대한 pH변화는 초기용액의 pH가 3일 경우에는 반응 후의 pH가 9.5를 보였고, pH가 7인 경우에는 반응 후의 pH는 10을 유지하였다. pH가 10인 경우에는 약간의 pH가 증가하여 pH 10.2를 나타내었다.

반응온도 15°C~30°C에서 오존반응 후의 pH는 초기용액의 pH 3과 pH 10인 경우 반응온도에 따른 pH변화 값의 차이는 크지 않음을 알 수 있었으나, 초기용액의 pH가 7인 경우에는 반응온도가 증가함에 따라 pH는 10.8에서 10으로 약간의 감소를 나타내는 경향을 보였다. 이와 같이 오존처리시 pH가

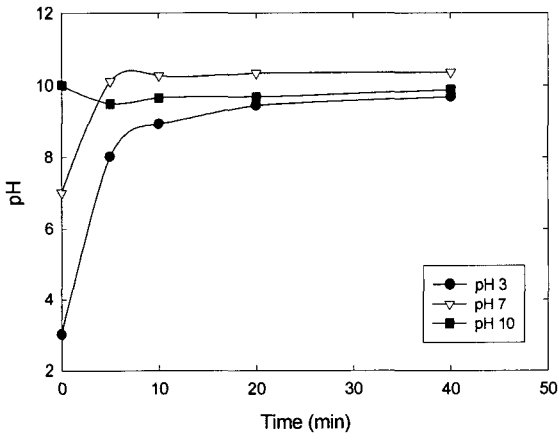


Fig. 3. Variation of pH during ozonation with different pH condition (Temperature 20°C).

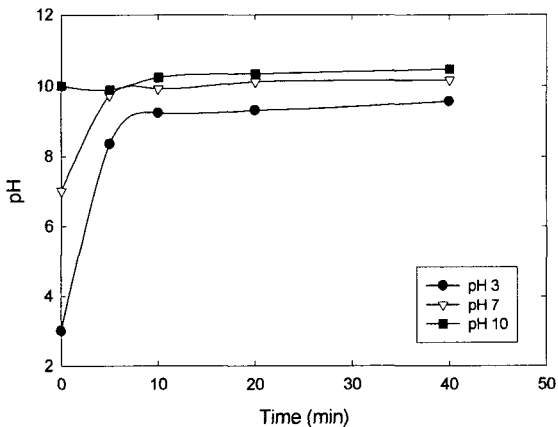


Fig. 4. Variation of pH during ozonation with different pH condition (Temperature 30°C).

변화하는 이유는 오존의 반응특성에 의한 것으로 사료된다. Hoigne 등³⁾이 제안한 오존의 분해반응(HBS model)에 의하면 오존은 수중의 수산화기(OH⁻)와 여러단계의 연쇄반응을 통해 OH·라디칼을 생성하는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서 초기 pH 3과 pH 7의 조건에서 pH가 증가한 것은 차아브롬산(HOBr)의 생성에 의한 수소이온의 소비와 반응시간에 따른 OH⁻생성이 증가한 것에 의해 pH가 증가하였다고 사료되며, 초기 pH 10에서 반응시간에 따른 pH감소는 오존의 분해반응에 따른 수중의 OH⁻기 소비로 인해 pH가 감소한 것으로 사료된다.

4.2. pH변화에 대한 산화부산물의 생성특성

온도 20°C, pH 7에서 오존반응시간에 대한 산화부산물의 생성특성을 Fig. 5에 나타내었다. 생성된 BrO₃⁻농도는 반응시간 20분까지 선형적으로 증가를 보이다가, 이후의 반응시간에서 BrO₃⁻농도의 증가는 둔화되는 경향을 나타내었다. BrO₃⁻농도는 반응시간 40분에서 8.4mM로 최대를 나타내었고, 잔류하는 Br⁻농도는 반응시간의 증가에 따라 감소를 보이고 있다. 또한 Fig. 5에서 오존과 Br⁻의 반응에 의하여 생성된 기타생성물질(Others)은 Br_{2(aq)}, Br_{2(aq)}+Br⁻ ↔ Br₃⁻, HOBr, OBr⁻등¹⁴⁾의 형태로 존재하지만 대부분이 HOBr과 OBr⁻인 기타생성물질(Others)는 반응시간 초기에 일시적인 증가를 보이다 BrO₃⁻생성이 증가를 보이는 반응시간대와 비례하여 점차적으로 감소를 보이고 있다.

초기 수용액의 pH변화와 오존접촉시간에 대한 차아브롬산(HOBr)과 차아브롬산이온(OBr⁻)농도의 합(이하 [HOBr]_t로 한다)을 Fig. 6에 나타내었다. 반응

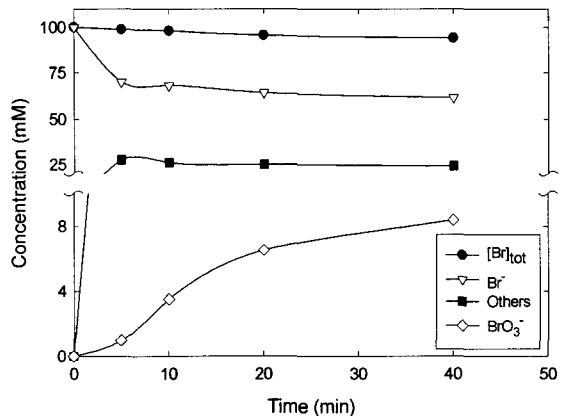


Fig. 5. Variation of ozonated bromide ion species concentration (20°C, pH=7, Water Volume=200mL, Initial Bromide Concentration=100mM, [Br]_{tot}=Br⁻+Others+Bromate, Others=Initial Bromide-Final Bromate).

오존처리시 Bromate생성에 미치는 온도 및 pH의 영향

시간 및 pH증가에 따른 $[HOBr]_t$ 의 농도는 반응초기에 일시적으로 증가를 보이다가, 이후의 반응시간에서는 약간의 감소를 나타내고 있으며, pH 3, 7, 10에서 최대농도는 각각 34.62mM, 27.72mM, 19.02mM를 보였다. 이와 같이 pH증가에 따라 $[HOBr]_t$ 생성 농도가 감소를 보이는 것은 오존과 Br^- 의 반응에 의해 생성된 $[HOBr]_t$ 중 산성영역에서 대부분을 차지하는 HOBr은 pH가 알칼리성 영역으로 진행됨에 따라 2.1절의 식(3)과 같이 OBr로 해리되고, 해리된 OBr는 식(2)와 식(4)의 반응으로 진행되면서 $[HOBr]_t$ 의 농도가 감소를 나타낸 것으로 사료된다. 또한, Haag등⁽¹⁰⁾은 초기 Br^- 이온의 농도가 100 μ M이고, pH 7.4, 8.2, 9.1의 조건에서 $[HOBr]_t$ 농도의 최대 생성율이 각각 60%, 40%, 20%로 보고하고 있는데, 본 연구결과인 Fig. 6에서도 $[HOBr]_t$ 의 최대 생

성율은 pH 3, 7, 10의 조건에서 각각 34%, 27%, 19%로 pH가 증가할수록 $[HOBr]_t$ 의 생성율이 감소하는 유사한 경향을 보였다.

4.3. 반응온도 및 pH변화에 대한 BrO_3^- 의 생성

반응온도 및 초기 수용액의 pH변화에 대한 BrO_3^- 의 생성농도와 반응조내에 잔류하는 $[Br]_t$ (이하 총브롬화합물의 농도로 한다)를 Fig. 7~9에 나타내었다. 반응온도가 15 $^{\circ}$ C인 경우에 BrO_3^- 의 생성농도는 반응시간의 증가에 따라 증가를 보이고 있지만, pH 변화에 따른 BrO_3^- 의 생성농도는 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 반응온도가 20 $^{\circ}$ C와 30 $^{\circ}$ C인 경우에 반응시간에 대한 BrO_3^- 의 생성농도는 초기용액의 pH가 산성영역이나 중성영역 보다는 알칼리성 영역에서 보다 많이 생성됨을 알 수 있었고, 반응온도가 높을수록 생성된 BrO_3^- 농도는 증가를 보였다.

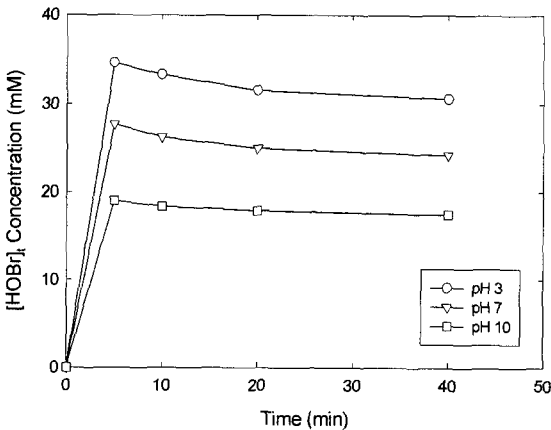


Fig. 6. Variation of hypobromous acid formation with different pH condition (20 $^{\circ}$ C, $[HOBr]_t=HOBr+OBr^-$).

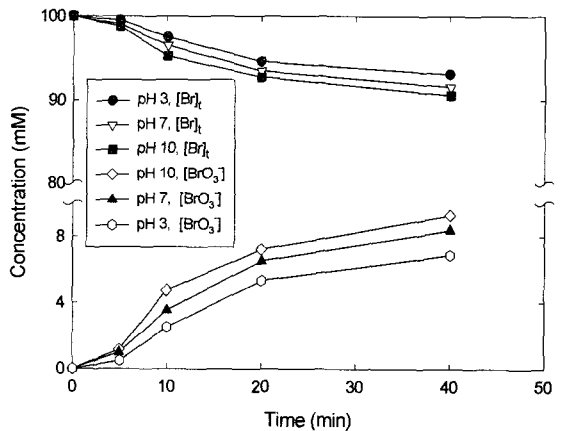


Fig. 8. Effect of pH on bromate ion formation at 20 $^{\circ}$ C ($[Br]_t=Br^-+HOBr+OBr^-$).

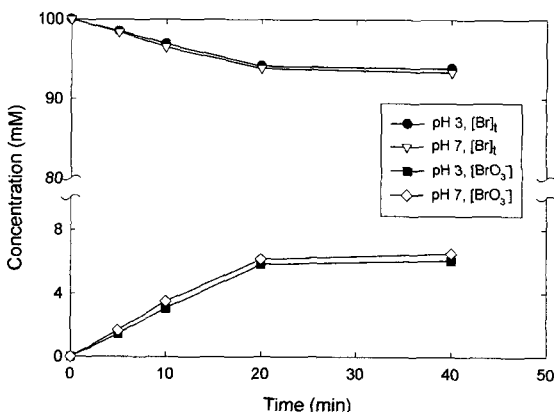


Fig. 7. Effect of pH on bromate ion formation at 15 $^{\circ}$ C ($[Br]_t=Br^-+HOBr+OBr^-$).

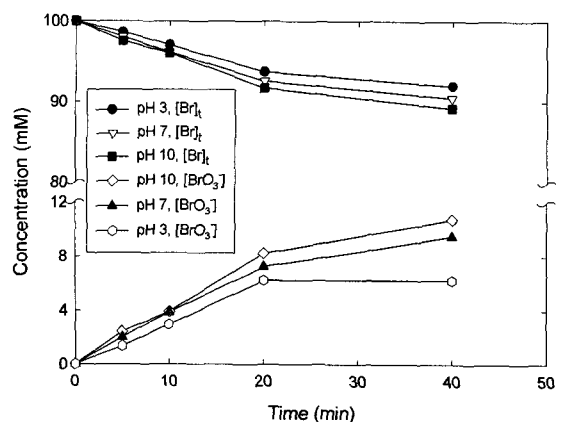


Fig. 9. Effect of pH on bromate ion formation at 30 $^{\circ}$ C ($[Br]_t=Br^-+HOBr+OBr^-$).

반응온도가 15°C일 경우에 반응조내에 잔류하는 총 브롬화합물 농도는 초기용액의 pH에 의해 크게 영향을 받지 않고 있으며, 반응온도가 20°C에서 30°C로 증가함에 따라 총 브롬화합물의 잔류농도는 초기용액의 pH가 산성이나 중성에서보다는 알칼리성 영역에서 더 낮은 농도를 보이고 있다. 이와 같이 초기용액의 pH가 알칼리성인 영역에서 잔류하는 총 브롬화합물의 농도가 더 낮은 농도를 나타낸 것은 본 연구에서 오존처리에 의해 생성된 BrO_3^- 생성이 알칼리성에서 증가를 보였고, 또한 pH가 증가할수록 OBr^-/HOBr 의 비는 커지는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 따라서 알칼리성에서 분율이 큰 차아브롬산 이온 (OBr^-)은 2.1절의 (4)식에 나타낸 바와 같이 오존과 반응하여 BrO_3^- 생성의 증가를 나타낸 것에 의해 반응조내에 잔류하는 총 브롬화합물의 농도는 더 낮은 농도를 보인 것으로 생각된다.

Fig. 10은 반응온도 및 pH변화에 대한 BrO_3^- 의 반응속도정수에 대하여 Arrhenius식으로 Plot한 결과이다. pH 10에서 활성화 에너지 E는 $3.25 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1})$ 을 보였고, pH 7일 경우는 4.43, pH 3일 경우는 5.19로서 pH 10일 경우가 활성화 에너지가 가장 낮은 값을 나타내고 있어 pH가 높은 조건에서 BrO_3^- 의 생성속도가 가장 커짐을 알 수 있었다.

4.4. 오존 주입계수(K_0) 및 오존화 효과지수(OI)

여러 종류의 물질에 대하여 오존처리를 수행할 경우에 오존에 의한 산화 가능성의 크기를 비교하기 위한 지표로서 OI(Ozonation effect Index)를 사용하면 편리하다. 또한, 오존 주입계수 K_0 를 결정함으로써 필요한 오존량도 함께 결정할 수 있다. 일반적으로 OI의 값이 클수록 오존에 의한 산화가 어려운 물질이며, K_0 값이 크면 반응물질의 양을

소비하는데 필요한 오존량이 감소하게 되는 것을 의미한다.

본 연구에서 OI 및 K_0 값은 (9)식과 (13)식에 의해 결정하였으며, 그 결과를 Fig. 11~12에 나타내었다. (13)식으로부터 구한 오존주입 계수 K_0 값은 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 동일한 pH조건에서 반응온도 15~20°C구간까지는 온도의 증가에 따라 증가를 보이고 있으나, 20°C 이상에서는 매우 완만히 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 동일한 반응온도 조건에서 오존주입계수 K_0 는 pH의 증가에 따라 증가를 나타내었다.

Fig. 12의 오존에 의한 Br^- 의 산화를 나타내는 OI값은 반응온도의 증가에 따라 pH 3일 경우에는 537~426min을 보였고, pH 7일 경우에는 516~344min, pH 10일 경우에는 반응온도 20~30°C에서 310~285min으로 OI값은 반응온도와 pH의 증가에 따라 감소를 나타내었다. 반응온도 및 pH의 증가에 의해 OI값이 감소를 보이고 있는 것으로부터, Br^- 에 대한 오존의 산화 정도는 pH 및 반응온도에 의해 영향을 받음을 알 수 있었다. 즉, 반응온도 및 pH의 증가에 따른 OI값의 감소는 오존에 의한 Br^- 의 산화가 증가됨을 나타내고 있다.

pH 조건에 따른 BrO_3^- 생성특성과 OI값의 상관관계를 검토하기 위해 각 pH 조건별 반응속도정수에 대한 OI값을 Fig. 13에 나타내었다. 각 pH와 반응온도에 대한 반응속도정수는 $3 \sim 4 (\times 10^{-3} \text{ min}^{-1})$ 의 범위로 온도와 pH증가에 의해 증가를 나타내었고, OI값은 pH증가와 반응온도의 증가에 의해 감소를 보이고 있는 것으로부터, pH와 반응온도의 증가는 오존에 의한 Br^- 의 산화력을 증가시킴으로 인해 BrO_3^- 생성농도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

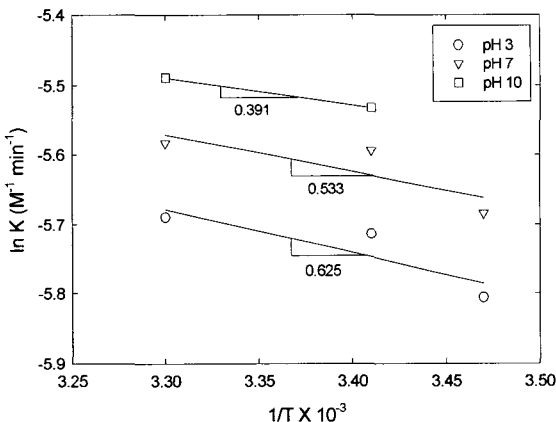


Fig. 10. Plot of Reaction constant versus temperature according to Arrhenius equation.

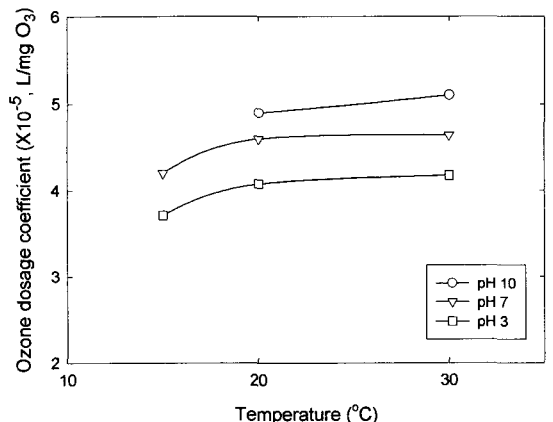


Fig. 11. Ozone dosage coefficient on pH and temperature (Ozone dosage rate, R=81mg/L · min).

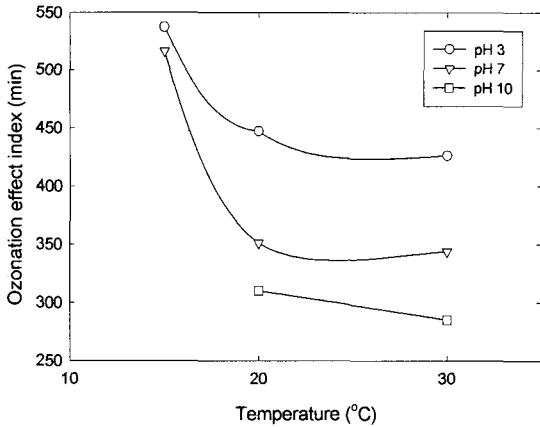


Fig. 12. Ozonation effect index on pH and temperature (Ozone dosage rate, R=81mg/L · min).

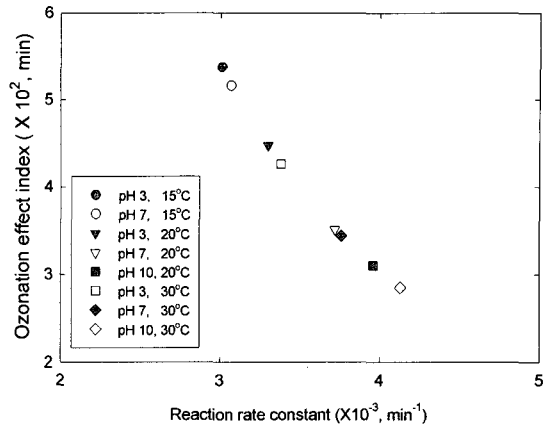


Fig. 13. Plot of reaction rate constant versus ozonation effect index(OI) with pH conditions.

5. 결 론

수중에 Br⁻이 존재할 경우 오존처리에 의해 생성되는 BrO₃⁻영향을 조사하기 위한 기초연구로서 BrO₃⁻생성에 영향을 미치는 인자인 온도와 pH에 대해 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 오존처리에 따른 수용액의 pH변화는 동일한 초기 pH조건에서 반응온도에 큰 영향을 받지 않고 거의 같은 경향을 보였다.
- 2) 오존처리에 의한 Bromine(HOBr+OBr⁻)생성농도는 초기 수용액의 pH증가에 따라 감소를 보였고, BrO₃⁻생성은 반응온도 및 초기 수용액의 pH가 증가함에 따라 증가를 나타내었다.
- 3) BrO₃⁻생성에 대한 활성화에너지 E(J · mol⁻¹)는 pH증가에 따라 감소를 나타내고 있어 pH가 높은 조건에서 BrO₃⁻의 생성속도는 증가함을 알 수 있었다.
- 4) BrO₃⁻생성속도정수 및 오존주입계수(K₀)는 온도와 pH의 증가에 따라 증가를 나타내었고, 오존화 효과지수(OI)는 반응온도 및 pH의 증가에 따라 감소를 보였다.

참 고 문 헌

- 1) 宗宮 功, 1989, 오존이용수처리技術, 公害對策技術研究所同友會, 東京, 1-281pp.
- 2) 杉田治男, 出口吉昭, 1972, 오존による養魚用海水의殺菌, 養殖, 5, 80-83.
- 3) Werner, R. H. and J. Hoigne, 1983, Ozonation of Bromide-Containing Waters ; Kinetics of Formation of hypobromous Acid and Bromate, Environ. Sci. Technol., 17(5), 261-267.
- 4) Mari, A., A. Takako, and M. Yasumoto, 1996, Bromate ion Formation Inhibition by Coexisting

Organic Matters in Ozonation Process, Journal of Japan Society on Water Environment, 19(11), 930-936.

- 5) Kurokawa, Y. J., 1990, Toxicity and Carcinogenicity of Potassium Bromate, - A New Renal Calcinogen, *Environmental Health Perspectives*, 87, 309-335.
- 6) Gunten, U. V. and J. Hoigne, 1994, Bromate Formation during Ozonation of Bromide containing Water: Interaction of Ozone and Hydroxyl radical Reaction, *Environ. Sci. Tech.*, 28, 1234-1242.
- 7) Mohamed, S. S., 1990, Chlorine-Ozone Interactions: Formation of Chlorate, *Wat. Res.*, 30(9), 2160-2170.
- 8) Grguric, G., J. H. Trefry. and J. J. Leaffaber, 1994, Ozonation Products of Bromine and Chlorine in Seawater Aquaria, *Wat. Res.*, 28(5), 1087-1094.
- 9) Staebelin, J. and J. Hoigne, 1985, Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical chain Reaction, *Environ. Sci. Technol.*, 19(12), 1206-1213.
- 10) Haag, W. R., J. Hoigne and H. Bader, 1984, Improved Ammonia Oxidation by Ozone in the Presence of Bromide Ion During Water Treatment, *Wat. Res.*, 18(9), 1125-1128.
- 11) Wang, B. and J. Yin, 1988, Removal of Aromatic Nitro Compounds From Water by Ozone, *Ozone Science & Engineering*, 10, 1-23.

- 12) 佐谷戸安好, 中室克彦, 林美惠子, 橋本孝一, 1990, 水中臭素イオンのオゾン酸化による次亜臭素酸イオン變換に及ぼす共存無機化合物の影響, 水道協會雜誌, 59(12), 19-24.
- 13) 紫田信勝, 茂庭竹生, 1999, 促進酸化法における臭化物イオンのフミン質分解に及ぼす影響と臭素酸イオン生成の抑制, 水環境學會誌, 22(5), 409-414.
- 14) Jenkins, D. and V. L. Snoeyink, 1980, *Water Chemistry*, John Wiley & Sons, 354pp.
- 15) 최혁, 이병현, 이무강, 1999, 해수의 오존처리시 산화부산물 생성에 pH와 암모니아의 영향, 대한환경공학회지, 21(6), 1085-1094.