



고도정수처리 공정에서 브로메이트의 거동 평가

Formation behaviour of Bromate in Processes of Advanced Water Treatment System using Nakdong river water

김영진¹ · 현길수^{2*}

Kim, Young Jin¹ · Hyun, Kil Soo^{2*}

1 부산광역시 수질연구소, 2 경북대학교 건축도시환경공학부

(2011년 7월 9일 접수 ; 2011년 8월 8일 수정 , 2011년 8월 12일 채택)

Abstract

The objectives of this study are to investigate a bromate behaviour in the processes of advanced water treatment system (AWTS: preozonation, coagulator-settler, rapid sand filter, postozonation, biological activated carbon (BAC) beds) and to investigate the effects of ozonation, pH and ammonia nitrogen on bromate (BrO_3^-) formation. As a result, BrO_3^- was not detected in the processes of the AWTS without ozonation, while it was detected in a preozonated and postozonated water. For BrO_3^- formation during June to November, the BrO_3^- concentration of $<9.4\mu\text{g/L}$ was observed in postozonated water, while it was reduced to about 46% by BAC beds. When applied ozone dosage and ozone contact time for influent with Br^- of $<0.3\text{mg/L}$ were 0.5–2.0mg/L.min and 10 min., BrO_3^- concentration increased with increasing ozone dosage. Longer contact time and lower ozone level also was needed to inhibit the formation of BrO_3^- . At ozone dosage of 1.4 mg/L.min, the formation rate of BrO_3^- increased with increase of pH value. When $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration increased from 0.1mg/L to 0.4mg/L, BrO_3^- concentration decreased to about 38%. These results revealed that BrO_3^- concentration increased with increasing Br level, ozone dosage, and pH value, while it decreased with increase of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration.

Key words : Bromide, Bromate, Advanced water treatment system, Ozonation, pH, Ammonia nitrogen

주제어 : 브로마이드, 브로메이트, 고도정수처리시스템, 오존처리, pH, 암모니아성 질소

1. 서론

비점오염원이나 하.폐수 처리수중에 함유되어 상수원(하천이나 호소)으로 유입되어 정수처리과정에서 문제시 되는 다양한 미량오염물질이 증가하고 있는 실정이다. 이로 인해 기존의 급속모래여과 방식에 오존처리공정과 입상활성탄 처리공정을 도입한 고도정수처리시스템은 주로 냄새물

질이나 트리할로메탄(THM)의 전구물질을 제거하기 위하여 국내외적으로 도입되기 시작하였다. 특히 전염소대체 처리공정으로 도입된 오존처리공정의 경우 강한 산화력으로 수중에 포함되어 있는 각종 유기물질을 주로 제거 대상으로 하였지만 오존의 경우 몇몇 물질과 반응하여 산화부산물질을 생성하는 것으로 보고되고 있다 (Moriwa (1995), 김 등(2006)).

* Corresponding author Tel:+82-54-530-1442, Fax:+82-54-530-1449, E-mail: kshyun@knu.ac.kr(Hyun, K.S.)

오존처리공정은 염소부산물의 생성은 적으나 염소처리공정보다 다량의 알데히드류나 기타 산화유기부산물을 생성시킨다(Moniwa (1995), 김 등(2007)). 또한 오존 처리시 자연수 중에 존재하는 무기물질인 브로마이드(Br^-)와 반응하여 브로메이트(BrO_3^-)가 생성되므로서 고도정수처리시 문제시 되고 있는 실정이다(Richardson, et al (1999), 김 등(2011)). BrO_3^- 는 원수중에는 존재하지 않지만 Br^- 을 오존처리시에 생성되는 것으로 보고되고 있으며, BrO_3^- 는 발암물질로서 국내외적으로 규제대상물질로서 음용수 수질 기준으로 $10\mu\text{g/L}$ 을 제시하고 있다(USEPA(1998), WHO(2004), DeAngelo, et al.(1998)). 이러한 가운데 브롬화합물의 생성억제나 저감을 위하여 UV (ultraviolet) 조사에 의한 저감(Siddiqui et al, 1994), 화학적 처리에 의한 저감 (Gordon et al, 2002), 여과처리에 의한 저감 (Marhaba et al, 1993), 그리고 입상활성탄을 이용한 저감연구(Kirisitis et al, 2000) 등 다양한 연구가 진행되어 왔다. BrO_3^- 의 생성과 관련되어 있는 영향인자로서는 수온, 오존, pH, 유기물농도, 암모니아성질소 농도 등 다양한 인자가 작용하는 것으로 보고되고 있다(Bernard et al. (2004), Mohamed et al.(1995)). 따라서 본 연구에서는 낙동강 하류유역의 하천수를 상수원수로 하여 정수 처리하는 정수장에 파일렛 플랜트를 설치하여 고도정수처리시스템의 각 공정에 있어서 BrO_3^- 의 생성과 저감특성을 조사하였으며, 또한 유입수의 수질변동과 오존처리에 따른 BrO_3^- 생성거동에 대한 조사를 통하여 고도정수처리시스템에 있어서 브롬화합물을 저감 시키고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 위해 사용된 파일렛플랜트의 계통도는 Fig.1에 나타난 바와 같이 원수저류조, 전오존 접촉조, 급속교반조, 응집.침전지, 모래여과지, 후오존 접촉조, 생물활성탄(BAC) 공정 및 최종처리수조 등으로 구성된다. 파일렛 플랜트의 처리용량은 $100\text{ m}^3/\text{일}$ 정도의 규모로서 장치의 재료는 주로 투명아크릴판과 원통 및 스테인레스 재질을 사용하였다. 파일렛 플랜트는 낙동강하류 유역에 위치한 취수장내의 건물 내에 설치하여 외부환경의 영향을 최소화하였다.

2.2. 실험방법

고도정수처리 파일렛 플랜트는 통상적으로 Table 1과 같은 조건을 중심으로 운전하였으며, 응집처리공정에서 사용된 응집제는 PSO-M(AlO_3 7%)로서 50 mg/L 의 농도로

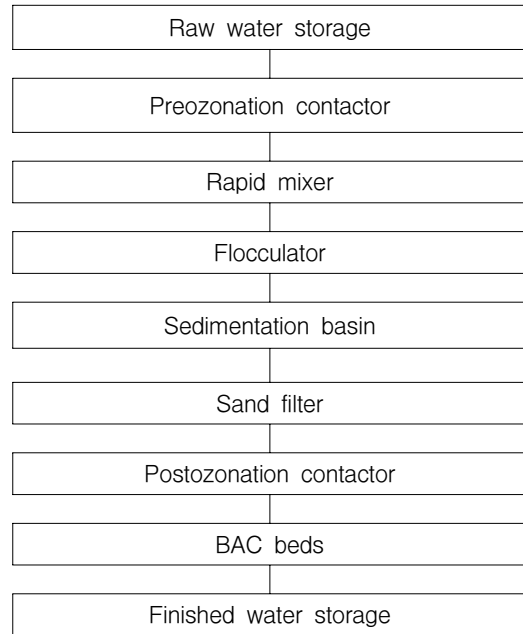


Fig. 1. 고도정수처리시스템의 처리계통도

Table 1. Pilot plant의 운전조건

Parameter	value
Preozonation contact time (min)	6.9
Rapid mixing time (min)	1.25
Coagulation time (min)	33.8
Sedimentation time (min)	194.3
Rapid sand filter flowrate (m/d)	103
Postozonation contact time (min)	20.6
BAC EBCT (min)	14.7
Bed depth (m)	2.5
Backwashing flowrate (m/h)	34.4
Backwashing time (min)	20
GAC expansion rate (%)	40.7

주입하였다. 그러나 전,후오존의 처리특성을 조사하기 위해서 전,후오존주입농도는 각각 $0.8-4.0\text{ mg/L}$, $0.3-4.0\text{ mg/L}$ 로 하였고, 접촉시간은 5-38분으로 각각 적용하였다. 취수된 원수의 수질특성은 Table 2에 정리하였다. Br^- 의 분석을 위하여 시료는 $0.4\ \mu\text{m}$ PDVF filter의 여과수를 사용하였다. 분석기기는 IC (Dionex IC-3000)로서 column은 Dionex AS19, AS19 Guard, Eluent는 KOH로 하여 최대검출한계(MDL)는 $0.78\ \mu\text{g/L}$ 였다. 또한 BrO_3^- 의 분석을 위하여 채수한 시료의 전처리는 테프론 마개가 달린

Table 2. 원수 수질특성

Parameter	range
Water temp.(°C)	15.5-28.2
pH	7.2-9.0
BOD (mg/L)	2.2-2.6
COD (mg/L)	4.3-5.2
SS (mg/L)	20.9-33.5
NH ₄ -N (mg/L)	0.007-0.134
DOC (mg/L)	2.76-3.23
Br ⁻ (mg/L)	< 0.1

Table 3. BrO₃⁻ 분석을 위한 HPLC의 운전조건

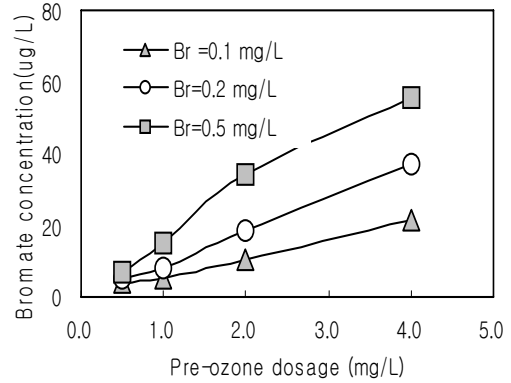
Parameter	Condition
HPLC	Waters Alliance System
Column	IC-PAK Anion HC(4.6mm×150mm)
Flow rate	1.4mL/min
Mobile phase reagent	5mL Na ₂ CO ₃ +12% ACN
Injection volume	200uL
Post column reagent	o-dianisidine(2HCl)
Post column flow rate	0.5mL/min
Column temp.	40°C
Post column temp.	80°C
Detector type	UV detector(450nm)
Maximum detector limit	0.9ug/L

갈색 30 mL 유리병에 시료를 담고 시료 내 잔류오존이 함유되어 있을 경우는 채수 직후에 아황산나트륨(Na₂SO₃)으로 제거하였다. 이와 같이 전처리된 시료는 분석하기 전까지는 냉암소에서 4°C를 유지하여 보관하였으며 채취일부터 4일 이내에 신속히 분석하였다. BrO₃⁻ 분석은 일본상수시험방법(日本水道協會, 2001)중 o-dianisidine법을 이용하였으며, 분석기기는 HPLC(WATERS Alliance UV system)로서 MDL은 0.90 µg/L였다. BrO₃⁻ 분석을 위한 기기 조건은 Table. 3에 정리하였다.

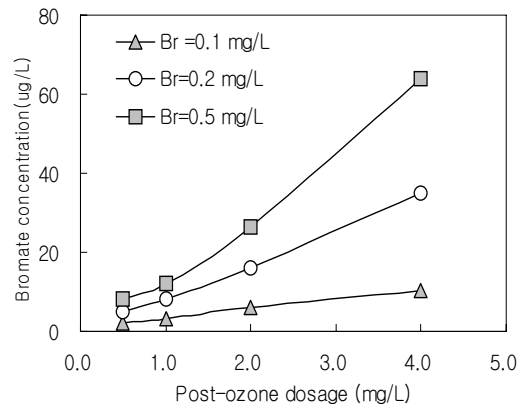
3. 결과 및 고찰

3.1 오존처리에 따른 BrO₃⁻ 생성거동

Fig. 2 (a),(b)는 전.후오존처리공정에서의 원수중의 Br⁻농도와 오존주입농도에 따른 BrO₃⁻ 생성특성을 나타낸 것이다. 원수로서는 유입수와 모래여과수로 사용하였으



(a) Preozonation



(b) Postozonation

Fig. 2. 전.후오존처리에 따른 BrO₃⁻ 생성거동

며, 원수중의 Br⁻농도(0.1 mg/L 이하)가 매우 낮아 BrO₃⁻ 생성연구에 어려움이 있어서 NaBr 용액을 사용하여 Br⁻ 농도를 0.1, 0.2, 0.5 mg/L로 조성하여 사용하였다. 그리고 오존주입농도를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mg/L로 변화시키면서 오존접촉시간은 10분으로 하여 실험을 수행하였다. 그 결과 원수중의 Br⁻ 주입농도(0.1-0.5 mg/L) 별 BrO₃⁻ 생성농도는 전오존의 경우 Fig.2 (a)와 같이 4.0-21.1 µg/L, 5.0-37.3 µg/L, 7.0-55.4 µg/L를 나타냈고, 후오존의 경우 Fig.2 (b)와 같이 3.0-10.5 µg/L, 4.9-35.0 µg/L, 8.2-64.0 µg/L를 나타냈다. 원수중의 Br⁻농도가 0.1 mg/L일 때 BrO₃⁻ 농도는 후오존처리수에 비해 전오존 처리수가 약 50%정도 높았는데 이것은 전염소 처리가 안 된 유입원수의 pH값이 응집.침전처리를 거친 모래여과수의 pH값 보다 높은 것에 기인한 것으로 평가된다 (von Gunten, et al., 1998). 반면에 Br⁻농도가 0.5 mg/L일때 BrO₃⁻ 농도는 전오존처리수에 비해 후오존 처리수중에서

13.4%정도 높게 나타났다. 이것은 오존처리수에서 BrO_3^- 부산물의 생성은 원수중의 Br^- 농도에 의해 영향을 받는 것에 기인한 것으로 평가된다 (Faust와 Aly, 1998). 특히 오존주입농도별 BrO_3^- 생성율이 전.후오존 주입농도가 1mg/L이하일 때 23-50%, 2mg/L이상일 때 38-59%를 나타냄으로서 전.후오존처리 모두 BrO_3^- 생성에 오존주입농도의 영향이 큼을 알 수 있었다.

Table 4는 오존발생농도와 접촉시간이 BrO_3^- 생성에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 정리한 것이다. 회분실험은 총오존주입량을 1.5 mg/L(평균 오존농도/DOC=0.5)이 되도록 오존발생농도(0.5-3.0 mg/m³.min)와 오존접촉시간(5-38분)의 비율을 조절하면서 수행하였다. 모래여과수를 원수로 하여 Br^- 농도를 0.1, 0.3mg/L으로 조성하였으며, 본 실험에 적용한 Br^- 농도범위는 EU의 하천수중의 Br^- 농도(0.03 - 0.2 mg/L)와 유사함을 나타냈다 (Legube, 1996). 표에 나타난 바와 같이 원수중의 Br^- 농도가 0.1mg/L과 0.3 mg/L일때 BrO_3^- 생성농도는 각각 4.9-9.5 $\mu\text{g/L}$, 11.5-14.8 $\mu\text{g/L}$ 로서 Br^- 농도 0.1mg/L인 원수에 오존발생농도 0.5 mg/m³.min, 접촉시간 38분을 적용한 운전조건에 오존발생농도 3.0 mg/m³.min, 접촉시간 5분을 적용한 운전조건이 BrO_3^- 생성농도를 2배나 높게 증가시켰다. 따라서 BrO_3^- 의 생성비율을 최소화하기 위해서는 낮은 오존발생농도와 긴 접촉시간의 비율로 총오존주입량이 되도록 하여 처리하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

3.2 pH와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 변화에 따른 BrO_3^- 거동

Table 5는 pH값의 변동이 BrO_3^- 생성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 원수중의 Br^- 농도를 0.2 mg/L로 조성하여 실험한 결과를 정리한 것이다. 실험은 pH를 6.0, 7.0, 8.0, 9.0으로 조절하면서 오존주입농도와 오존접촉시간을 각각 1.4 mg/L, 10분으로 하여 수행하였다. 실험결과 pH값의 변동에 따른 BrO_3^- 의 생성농도가 pH 6일때 보다 pH 7, pH 8, pH 9일때 각각 30%, 46%, 44% 더 증가하는 양상을 나타냈는데 이러한 결과는 BrO_3^- 생성은 수온이 20°C인 경우 pH가 산성영역이나 중성영역보다는 알칼리성영역에서 보다 많이 생성된다는 연구보고와 유사한 결과를 나타냈다 (Marhaba와 Medlar, 1993).

일반적으로 BrO_3^- 는 Br^- 가 OBr^- , BrO_2^- 를 거쳐 생성되고, 분자오존과 OH 라디칼과 함께 반응하는 브롬함유 중간체로서 복잡한 경로를 거쳐서 생성된다. pH가 증가할수록 $\text{Br}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{HOBr} + \text{O}_2 + \text{OH}^-$ 의 반응식에 의해 OBr^-/HOBr 이 증가하여 $\text{HOBr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OBr}^-$ 의 반응식과 $\text{OBr}^- + 2\text{O}_3 \rightarrow \text{BrO}_3^- + 2\text{O}_2$ 의 반응식에 의해 BrO_3^- 생성이 증가하고, 또한 pH가 높아지면 OH 라디

Table 4. 모래여과수중의 Br^- 농도, 오존주입농도, 접촉시간의 변동에 따른 BrO_3^- 생성특성

Condition	Bromate ($\mu\text{g/L}$)	
	Br^- (0.1mg/L)	Br^- (0.3mg/L)
*OGC: 0.5 mg/m ³ .min Contact time : 38 min	4.9	11.5
*OGC: 1.0 mg/m ³ .min Contact time : 17 min	7.0	14.6
*OGC: 3.0 mg/m ³ .min Contact time : 5 min	9.5	14.8

* Ozone generation concentration

Table 5. pH값의 변동에 따른 BrO_3^- 생성특성

pH	BrO_3^- ($\mu\text{g/L}$)
6.0	4.6
7.0	6.0
8.0	6.7
9.0	6.6

칼이 증가함으로 BrO_3^- 생성이 증가하는 양상을 나타낸다 (Haag, et al., (1983), von Gunten, et al. (1998)). 실제 정수 처리수 유입원수의 pH값이 8~9로 증가하는 경우가 있으나 전오존에 의해 BrO_3^- 가 거의 발생되지 않고 모래여과수의 pH값이 7.0 부근으로 유지됨으로 pH에 대한 영향은 적을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 BrO_3^- 생성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 유입원수 중에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도를 0, 0.2, 0.4 mg/L 변화시키면서 실험한 결과를 나타낸 것이다. 이때 오존접촉시간은 5, 10, 20, 30분, 오존주입농도를 1.3 mg/L, Br^- 농도는 0.3 mg/L로 하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 0.2-0.4 mg/L일때 접촉시간 5분까지는 BrO_3^- 생성이 지연되었지만 5분 이후부터는 직선적으로 증가하는 양상을 보였다. 특히 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 0 mg/L, 접촉시간이 30분일 때 BrO_3^- 가 14.9 $\mu\text{g/L}$ 정도 생성된 반면에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도가 0.4 mg/L, 접촉시간이 30분일 때 BrO_3^- 가 9.3 $\mu\text{g/L}$ 정도 나타나 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도의 증가로 인하여 BrO_3^- 생성농도가 약 38%정도 억제됨을 알 수 있었다. von Gunten (1998)는 HOBr이 NH_3 과 반응하여 NH_2Br 이 생성됨으로 브롬산 생성의 주요 물질인 OBr^- 을 줄일 수 있음을 보고하였으며, Bernard et al. (2004)는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 를 첨가하면 오존 분해가 불안정해지고 $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 거의 소진될 때까지 BrO_3^- 의 생성이 지연된다고 보고하였

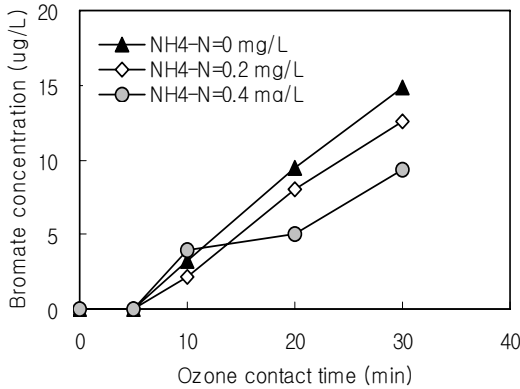


Fig. 3. NH₄-N농도와 오존접촉시간에 따른 BrO₃⁻ 생성특성

다. 따라서 원수 BrO₃⁻농도가 증가할 경우 오존주입량 감소 및 NH₄-N를 주입하여 BrO₃⁻생성을 최소화할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 NH₄-N주입에 의한 BrO₃⁻의 생성억제방법은 낙동강 하천수중의 Br⁻농도가 저농도 (<0.1 mg/L)를 유지하는 평수기에는 적용할 필요는 없겠지만 Br⁻농도가 고농도(>0.1 mg/L)로 유입되는 갈수기에는 한시적으로 적용하는 것이 필요함을 보여준다.

3.3 고도정수처리공정별 BrO₃⁻ 분포특성

Fig. 4는 고도정수처리시스템에 있어서 각 공정별 BrO₃⁻의 생성거동을 나타낸 것으로 본 실험은 6월-11월동안에 수행되었다. 실험기간인 6, 7, 9, 11월 동안 오존주입농도는 실제 정수장의 운전조건에 의거하여 적용하였다. 오존처리의 경우 전오존(PRO)은 1.2, 1.5, 1.5, 0.8 mg/L, 후오존(POO)은 1.0, 0.3, 0.7, 0.3 mg/L를 각각 주입하였다. 이때 원수는 낙동강 하천수로서 인공적으로 농도를 조절하지 않고 그대로 사용하였으며, 원수중의 Br⁻농도는 67-83 μg/L였다. 그림에 나타난 바와 같이 오존처리를 하지 않았을때 BrO₃⁻는 시스템 전 공정에서 검출이 되지 않은 것으로 나타났다. 반면에 오존처리를 하였을때 각 공정별 BrO₃⁻ 농도분포를 조사한 결과 6-9월경까지는 모래여과수(SF)까지는 BrO₃⁻가 거의 검출되지 않았지만 후오존수에서 0.8-9.4 μg/L정도의 BrO₃⁻가 검출되었다. 특히 9월경에는 여과공정까지 불검출되다가 후오존 처리수에서 9.4 μg/L정도의 높은 BrO₃⁻농도가 검출되었으며, 후속 공정인 BAC공정에서 46% 정도 감소하는 경향을 보였다. 11월경에서는 전오존처리에서 생성된 BrO₃⁻가 침전 여과공정에서 12% 정도 감소되었다가 후오존처리에서 다시 증가된 후 생물활성탄공정에서 7% 제거되는 것으로 나타났다. 이는 자연유기물(NOM)의 영향을 덜 받는 여과수에서 원

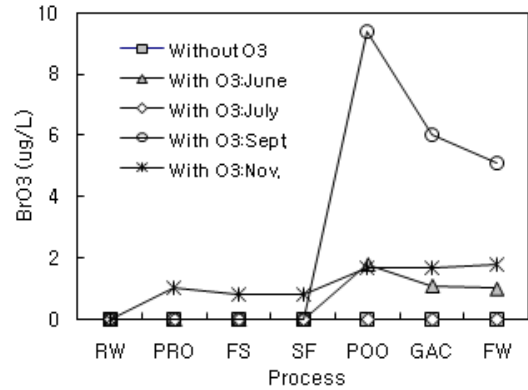


Fig. 4. 오존처리에 따른 고도정수처리 공정별 BrO₃⁻농도분포

수보다 BrO₃⁻가 잘 생성된다는 것을 알 수 있었고 입상활성탄에서의 BrO₃⁻ 제거는 재생탄 및 사용기간이 경과된 활성탄의 경우 제거율 5~62%로 다양하게 나타난다는 기존의 연구와 유사한 결과를 나타냈다 (宮田雅典 등 (1997), Kirisitis et al(2000)). 따라서 11월경을 제외하면 전오존수에서는 BrO₃⁻가 검출되지 않고 후오존수에서는 생성된 것으로 나타나 전오존 처리에서는 경쟁관계의 물질들(유기물, NH₄-N 등)과의 반응으로 인해 상대적으로 오존과 Br⁻과의 반응이 적었던 것으로 추정된다. 또한 후오존에서는 전단계공정에서의 유기물질제거와 NH₄-N의 제거로 인한 경쟁물질의 농도가 저감하면서 BrO₃⁻ 생성에 대한 오존비율이 증대되어 전오존에 비해 후오존수에서 많은 BrO₃⁻가 생성된 것으로 생각된다.

4. 결 론

낙동강 상수원수를 이용하여 고도정수처리에 따른 BrO₃⁻의 생성거동을 조사하기 위해서 고도정수처리시스템의 각 처리공정별 BrO₃⁻ 생성특성 및 유입원수의 수질변동(pH, NH₄-N)과 오존처리에 따른 BrO₃⁻ 생성특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론으로 얻을 수 있었다.

1. 오존주입농도(0.5-2.0 mg/L)와 Br⁻농도(0.1-0.3 mg/L)의 변동에 따른 BrO₃⁻의 생성특성을 조사한 결과 전, 후오존 주입량이 1 mg/L이하 및 2 mg/L이상일때 BrO₃⁻ 생성량이 각각 23-50%, 38-59%를 나타냄으로서 오존 주입율과 BrO₃⁻생성량이 밀접한 상관성이 있음을 나타냈다. 또한 오존발생농도(0.4-3.0 mg/m³.min)와 접촉시간(5-38분)의 변동에 따른 BrO₃⁻의 생성특성을 조사한 결과 총오존주입량은 낮은 오존발생농도와 긴 접촉시간의 비율로 산정하는 것이 BrO₃⁻생성량을 최소화하는데 적절

함을 나타냈다.

2. pH의 변화(6-9)에 따른 BrO_3^- 의 생성특성을 조사한 결과 pH 6이하일때 보다 pH 7이상 일때 BrO_3^- 의 생성율이 30-46%정도 더 증가함으로서 pH가 높을 수록 BrO_3^- 의 생성농도도 증가함을 나타냈다. 또한 $\text{NH}_4\text{-N}$ 주입농도의 변화(0.1-0.4 mg/L)와 오존접촉시간의 변화(5-30분)에 따른 BrO_3^- 의 생성은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도를 0 mg/L에서 0.4 mg/L로 증가시켰을때 38%정도의 BrO_3^- 생성 억제효과를 나타냈다.

3. 고도정수처리시스템에 있어서 각 공정별 BrO_3^- 의 생성 거동을 조사한 결과 오존처리를 하지 않았을 때 BrO_3^- 는 시스템 전 공정에서 BrO_3^- 이 생성되지 않은 반면에 오존처리시 6-9월경에는 원수에서 모래여과수까지는 BrO_3^- 가 거의 생성되지 않았지만 후오존수에서 0.8-9.4 $\mu\text{g/L}$ 정도 생성되는 것으로 나타났다. 9월경에 생성된 BrO_3^- 농도의 약 46%정도가 생물활성탄(BAC)공정에 의해 저감됨을 나타냈다.

참고 문헌

- 김영진, 송미정, 빈재훈, 현길수 (2011) 낙동강 유역의 하천수와 정수중의 브롬화합물 거동, *한국수처리학회지*, **19**(2), pp.37-44.
- 김영진, 송미정, 임용승, 유평중, 현길수 (2007) 낙동강 유역내 알데히드 분포 및 정수처리특성, *한국수처리학회지*, **15**(3), pp.89-96.
- 김영진, 현길수 (2006) THM과 HAA의 생성반응에 있어서 주요 영향인들의 특성조사, *한국수처리학회지*, **14**(2), pp.79-86.
- 宮田雅典 等 (1997) 高度淨水處理過程における臭素酸イオンの生成とその挙動, *水道協會雑誌*, **750**, pp. 16~25.
- 日本水道協會 (2001) *日本上水試験方法*, pp.312-315
- Bernard, L., Bernard, p., Karine, G., Florence, B. and Jean, P. C. (2004) Modeling of Bromate Formation by Ozonation of Surface Waters in Drinking Water Treatment, *Water Research*, **38**, pp. 2185-2195.
- DeAngelo, A.B., George, M.H., Kilburn, S.R., Moore, T.M. and Wolf, D.C. (1998) Carcinogenicity of potassium bromate administered in the drinking water to male B6C3F mice and F344/N rats, *Toxicol. Pathol.*, **26**(5), pp.587-594.
- Faust, S.D., Aly, O.M. (1998) *Chemistry of Water Treatment*, second ed. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p.69
- Glaze, W.H., Weinberg, H.S. (1999) *Identification and occurrence of ozonation by-products in drinking water*. In: AWWRF, Denver, CO, p.47
- Gordon, G., Gauw, R., Emmert, G., Walters, B., Bubnis, B. (2002) Chemical reduction methods for bromate ion removal, *J. AWWA*, **94**(2), pp.91-98.
- Haag, W.R., Hoigne, J.(1983) Ozonation of bromide-containing waters: kinetics of formation of hypobromous acid and bromate, *Environ Sci Technol*, **17**, pp.261-267.
- Kirisitis, M., Snoeyink, V., Kruithof, J. (2000) The reduction of bromate by granular activated carbon, *Water Res.*, **34**(17), pp.4250-4260.
- Legube, B.A (1996) A survey of bromate ion in European drinking water, *Ozone Sci. Eng.*, **18**, pp. 325-348.
- Marhaba, T., Medlar, S. (1993) Treatment/removal of bromate and bromide ions from drinking water. *Proceedings AWWA Water Quality Technology Conference*, Miami, USA, pp. 297-320.
- Mohamed S. Siddiqui, Gary L. Amy, Rip G. Rice (1995) Bromate Ion Formation : A Critical Review, *Jour.AWWA*, **87**(10), pp. 58~70.
- Moniwa, T. (1995) Ozonation in water purification, *J. Jpn Water Works Assoc.* **64**(10), pp.2-6.
- Richardson, S.D., Thruston Jr.A.D., Caughran, T.V., Chen, P.H., Collette, T.W., Floyd, T.L., Sun, K.M., Lykins, Jr.B.W., Sun, G. and Maletich, G.(1999) Identification of new drinking water disinfection byproducts formed in the presence of bromide, *Envir. Sci. Technol.*, **33**(19), pp.3378-3383.
- Siddiqui, M., Amy, G.(1994) Removal of bromate during drinking water treatment by UV irradiation, *IOA Regional Conference Proceedings*, Zurich, Switzerland, pp.49-62.
- US.EPA (1998) *Health risk assessment/characterization of the drinking water disinfection byproducts bromate*. Office Science and Technology, Office of Water, March 13,1998. Quoted in Federal Register 63(61), 15,673-15,692, FR Document 98-8215.
- Von Gunten, U, Oliveras, V.(1998) Advanced oxidation of bromide-containing waters: bromate formation mechanisms, *Environ Sci Technol*, **32**, pp.63-70.
- WHO (2004) *Guidelines for Drinking Water Quality*, The 3rd ed. **1**. p.340.