

## 염소 및 오존소독시 정수처리공정별 소독부산물 발생 변화

김준성 · 최용욱\* · 정 용\*\*†

메사추세츠 주립대학 환경공학과

\*전주대학교 환경시스템학과

\*\*연세대학교 의과대학 예방의학교실

## DBPs Variation by Chlorination and Preozonation in Drinking Water

Junsung Kim · Yongwook Choi\* · Yong Chung\*\*†

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts

\*Department of Environmental System Engineering, Jeonju University

\*\*Department of Preventive Medicine and Public Health, College of Medicine Yonsei University

(Received 29 August 2005, Accepted 13 October 2005)

### Abstract

This study was researched for disinfection by-products (DBPs) by preozonation, prechlorination and/or postchlorination. DBPs including trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs), halonitriles, and aldehydes were analyzed by the treatment steps of prechlorination, preozonation, sedimentation, filtration, and postchlorination comparatively. THMs were detected as 52.20  $\mu\text{g/L}$  after prechlorination and decreased during sedimentation and filtration process. The HAAs and aldehydes increased more during preozonation than prechlorination. However, chlorinated DBPs and aldehydes increased more by postchlorination. Chlorinated DBPs formed by preozonation increased 26% more than the chlorination process. If aldehydes were included in the total DBPs, DBPs increased up to 39% by preozonation. Preozonation could increase the removal efficiency of organic carbon during the coagulation and sedimentation processes. Ozonation might produce aldehydes that are not permitted for drinking water regulations. Also, DBPs were produced by preozonation than by chlorination. These results would bring a need for alternative disinfection studies to decrease DBPs.

**keywords** : Preozonation, Chlorination, Disinfection by-products, Aldehydes, Trihalomethanes (THMs)

## 1. 서론

수인성 질병의 원인이 되는 병원균 및 세균 등 각종 미생물을 사멸하기 위해 정수과정에서 시행되는 소독제로서는 염소, 오존, 이산화염소와 UV 등을 들 수 있다. 그러나 소독제에 따라 물에 존재하는 유기물질과 반응하여 생성되는 소독부산물의 종류는 다양할 뿐만 아니라, 발암성 소독부산물들이 생성된다(Richardson, 2003). 이중 발생하는 소독부산물 중 염소에 의해 발생하는 소독부산물은 trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs), haloacetonitriles (HANs) 등이 발생되어지며, 오존은 aldehydes 등의 소독부산물이 발생되어진다(Nieminski et al., 1993; Weinberg et al., 1993).

오존처리는 강력한 살균 및 산화기능을 가지고 있어 원수에 포함되어 있을 박테리아나 바이러스를 살균 또는 불활성화 시킬 수 있다(Glaze, 1987). 그리고 산화작용을 이용하여 용존 철, 망간의 산화, 색도 제거 및 맛, 냄새제거

효과를 볼 수 있으며 용존 유기물의 산화로 인해 미세유집 효과를 올릴 수 있다(Reckhow et al., 1984; Amy et al., 1991; David et al., 1996).

우리나라는 부단한 노력에도 불구하고 상수원수가 각종 오염물질로 심각하게 오염되어 있기 때문에 상수원수에 있지 모르는 수인성 미생물의 제거와 암모니아 제거를 위해 정수처리과정 중에 전염소 처리를 실시하고 있다. 또한 정수공급과정에서 가정에 도달하였을 때 수도물의 잔류염소량을 일정량 유지하기 위해 후염소를 사용하기 때문에 염소에 의한 소독부산물이 발생되고 있으며 이에 따른 건강상의 위험이 클 것으로 예상된다(정 등, 1997; 염 등, 2002). 더욱이 깨끗한 수도물을 생산하기 위해 도입된 고도정수처리공정에 오존처리공정이 포함되어 있어, 이로 인해 수중의 유기물을 산화 제거 시킬 수 있는 효과를 거둘 수 있지만, 오존처리로 인해 발생할 수 있는 오존 부산물에 대한 위해성에 대해서는 현황이 파악되고 있지 않은 상태이다(Glaze, 1993). 또한 관망의 2차 미생물 오염을 방지하기 위해 후염소 처리도 병행하기 때문에 염소 부산물도 같이 생성되고 있다. 그러나 수질기준에는 염소소독부산물만 규제하고 있기 때문에 오존처리로 인해 발생하는 오존 부

† To whom correspondence should be addressed.  
jerychung@yumc.yonsei.ac.kr

산물의 현황조사는 물론 염소와의 상호작용에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 오존처리를 사용하고 있는 고도정수처리공정을 대상으로 염소 소독부산물과 오존 부산물의 현황 및 평가에 대한 연구가 필요하므로 본 연구에서는 염소처리 공정과 오존처리 공정이 동시에 처리되고 있는 정수장을 선정하여 염소에 의한 염소소독부산물들과 오존부산물을 측정하여 정수처리공정에 따른 소독부산물 생성변화를 파악하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 선정 및 시료채취

염소처리공정과 오존처리공정에 따른 소독부산물의 발생량을 비교·검토하기 위해 염소처리공정과 오존처리공정이 동시에 운영되고 있는 A정수장을 연구대상으로 선정하였다. A정수장에서 운영되고 있는 처리공정은 Fig. 1과 같이 운영·가동되고 있는데 원수와 침사지를 거친 물은 크게 두 공정으로 나뉘어 각각 처리되어진다. 1과 2정수공정은 전 오존 처리, 응집 및 침전처리, 후오존 및 GAC공정을 이용한 고도정수처리공정이며, 3공정은 기존의 처리공정인 전염소, 응집 및 침전 처리, 후염소공정으로 운영되어 지고 있었다. 그러나 시료 채취 당시, 1, 2정수공정은 후오존 및 GAC공정이 공사중으로 인해 전오존 공정만 사용하고 있는 것으로 나타나 본 연구에서는 후오존과 GAC에 대한 소독부산물의 변화나 효과에 대해서는 연구를 할 수 없었다.

처리공정별 소독부산물 변화를 조사하기 위해 기존의 처리공정인 3정수공정은 원수, 침사지(전염소), 침전지, 여과지 및 정수지(후염소)를 거친 시료를 각각 채수하였다. 전 오존처리공정이 있는 2정수공정은 원수, 침사지(전염소), 전 오존접촉지(전오존), 침전지, 여과지 및 정수지(후염소)를 거친 시료를 각각 채수하여 발생하는 염소 및 오존 소독부산물을 분석하였다.

A정수장도 대부분의 정수장에서 실시되고 있는 경우와

마찬가지로 침사지에서 전염소처리 되어지고, 정수지에서 후염소처리 되어졌다.

채수 되어진 시료는 잔류염소를 제거한 후 4°C에서 보관, 이동하여 실험실에서 분석되었으며, 원수 수질은 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Water quality parameters of raw waters

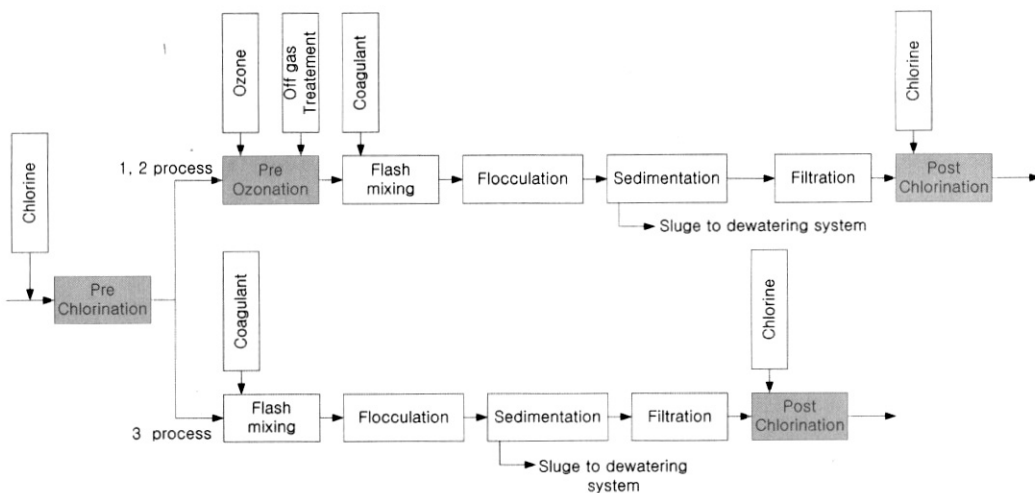
Parameters	Raw water
pH	7.9
Temperature(°C)	23
TOC (mg/L)	3.5
Bromide (mg/L)	ND
COD (mg/L)	5.4
BOD (mg/L)	2.4
Turbidity (NTU)	14
chlorophyll a (mg/mL)	23

### 2.2. 소독부산물 선정

본 연구에서는 국내외 소독부산물 관련문헌들의 고찰을 통해 염소처리에 의해 자주 검출이 되며, 인체 위해성이 높다고 알려진 trihalomethans(4종), haloacetic acids(6종), haloacetonitriles(4종), halo ketons(2종), chloropicrine 및 chloral hydrate 등 소독부산물 18종을 연구대상 물질로 선정하였다(Table 2). 또한 오존소독으로 인해 발생하는 소독부산물은, 분석이 가능하면서 생성능이 높은 알데히드류를 5종 선택하였다. 알데히드 종류로는 포름알데히드(formaldehyde), 아세트알데히드(acetaldehyde) 및 프로피온알데히드(propionaldehyde)와 2차 부산물인 글리옥살(glyoxal)과 메틸글리옥살(methylglyoxal)을 오존 소독 부산물로 포함시켜 총 5종을 대상으로 하여 분석하였다.

### 2.3. 소독부산물 분석

생성된 소독부산물을 측정하기 위한 방법으로써, THMs는 US EPA Method 524.2 (P&T/GC/MSD)법을 응용하여 분석하였다(US EPA, 1992). 이 방법은 휘발성 유기오염물



**Fig. 1.** Treatment process of drinking water in this study.

**Table 2.** Selected disinfection by-products compounds in this study

Species	Compounds
Trihalomethanes (THMs)	Chloroform
	Bromodichloromethane
	Dibromochloromethane
	Bromoform
Haloacetic acids (HAAs)	Chloroacetic acid
	Dichloroacetic acid
	Trichloroacetic acid
	Bromoacetic acid
	Bromochloroacetic acid
	Dibromochloroacetic acid
Haloacetonitriles (HANs)	Trichloroacetonitrile
	Dichloroacetonitrile
	Bromochloroacetonitrile
	Dibromoacetonitrile
Haloketones (HKs)	1,1-dichloropropanone
	1,1,1-trichloropropanone
Aldehydes*	Chloropocrine (CP)
	Chloral hydrate (CH)
	Formaldehyde
Aldehydes*	Acetaldehyde
	Glyoxal
	Methyl Glyoxal

\*ozone by-products

질을 불활성 기체에 탈착시키고 이들을 GC/MSD에서 확인 및 정량 하는 방법이다. 분석기기로는 Tekmar ALS 2016 Autosampler와 Tekmar LSC-2000 Purge and Trap을 HP 6890 Series Gas Chromatograph와 HP 5972A MSD에 연결하여 사용하였다. 컬럼은 J&W Scientific DB-5, 50 m × 0.2 mm × 0.33 μm를 사용하였으며, 분리된 THMs 각 표준 물질들의 질량 스펙트럼을 구하고, base peak를 선택하여 SIM(Selected Ion Monitoring)mode를 만들어 정성분석하였다.

HAAs 분석에는 US EPA method 552.2을 응용하여 분석하였다(US EPA, 1995). 분석에는 할로젠화합물에 민감한 HP 5890 Series II GC/ECD를 사용하였다. 시료의 주입에는 HP 6890 Series Auto sampler를 사용하여 2μL 주입하였고 컬럼은 J&W Scientific DB 1701, 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm를 이용분석하였다.

HANs 및 그 외 소독부산물의 분석에는 US EPA Method 551을 이용한 liquid-liquid 추출방법으로 GC/ECD를 이용하여 정량 하였다(US EPA, 1990). 분석기기는 HAAs분석기와 동일하나 컬럼은 ultra 2.50 m × 0.2 mm × 0.33 μm를 이용하여 분리하였다.

오존에 의해 발생된 부산물 중 알데하이드류를 분석하기 위해서 EPA Method 554를 이용하여 실험실 조건에 따라 최적 조건을 구한 다음 적용하였다(US EPA, 1992). 이 방법은 극미량의 알데하이드류를 2,4-DNPH를 첨가시켜 하이드라존을 형성시킨 다음 비극성 흡착제(C<sub>18</sub> Cartridge)에 흡

착시켜 농축시키고, 이것을 소량의 아세트나이트릴로 탈착하여 HPLC/UV 365 nm를 이용하여 정량하였다.

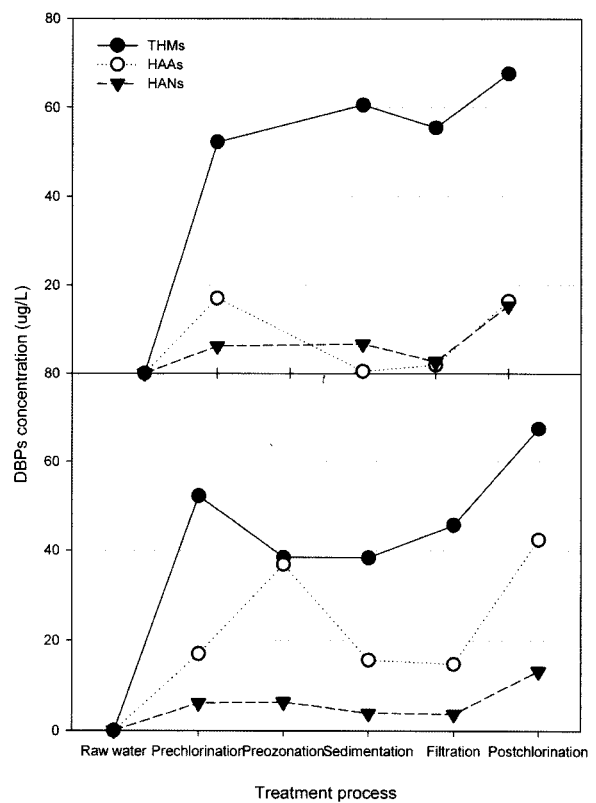
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 공정별 염소소독부산물의 발생

염소소독부산물의 공정별 발생 변화를 알아보려고 A정수장에서 운영·가동되고 있는 염소처리공정(3정수공정)과 전오존처리공정(2정수공정)의 공정별 염소소독부산물의 발생 농도를 조사하였다(Fig. 2).

원수에서는 소독부산물이 검출되지 않았으나, 전염소가 처리된 침사지에는 THMs이 52.20 μg/L, HAAs가 17.05 μg/L, 그리고 HANs는 6.19 μg/L로 발생되었다. 3정수공정의 침전과 여과공정에서는 염소소독부산물이 다소 감소하다가 정수지에서 후염소 처리된 후 THM이 67.62 μg/L, HAAs가 16.45 μg/L, 그리고 HANs가 15.37 μg/L로 다시 증가하였다. 이는 염소소독부산물이 전염소 투여로 인해 수중의 유기물과 반응하여 생성되었다가 침전과 여과공정에서 일부 감소되어지는 것으로 판단된다. 그러나 후염소 투여로 인해 남아 있는 용존유기물과 다시 반응하여 전염소에 의한 소독부산물보다 높은 발생량을 나타낸 것으로 판단된다.

전오존공정이 있는 2정수공정의 경우, 전오존 처리후 THMs이 38.44 μg/L로 전염소에 의해 발생된 THMs가 감소된 반면, HAAs는 36.87 μg/L로 증가되는 변화를 보였다.



**Fig. 2.** Variation of chlorinated DBPs with and without preozonation process.

Smith 등(1989)은 오존처리로 인해 HAA가 다량 발생됨을 보였으며, 오존 투여량이 증가할수록 trichloroacetic acid 보다 dichloroacetic acid의 생성이 증가되는 것을 밝혔다. 또한 침전과 여과공정으로 인해 THMs는 다소 증가하였지만, HAAs와 HAN은 다소 감소 또는 일정하였다. 그러나 후염소 처리후 THMs가 67.45  $\mu\text{g/L}$ , HAAs가 42.36  $\mu\text{g/L}$  그리고 HANs가 13.26  $\mu\text{g/L}$ 으로 전오존 처리공정이 없는 3정수공정에 비해 HAAs가 2.5배 높은 발생을 나타내었다.

측정된 chlorinated DBPs를 비교해 볼때, 기존 정수처리 공정인 3정수공정의 chlorinated DBPs는 108.35  $\mu\text{g/L}$ 인 것에 비해, 전오존이 도입된 2정수의 경우 145.97  $\mu\text{g/L}$ 로 검출되어 높은 발생량을 나타내었다. 이는 HAAs가 염소에 의해 발생되기도 하지만, 염소와 오존이 사용되어지면 높아지기 때문이다(Smith et al., 1989; 김, 2000).

또한 2정수공정과 3정수공정은 소독부산물 발생량의 63%와 85%가 전염소에 의해 발생되어지므로 전염소 처리에 대한 소독부산물 연구가 필요한 것으로 나타났다.

3.2. 공정별 오존부산물의 발생

공정별 aldehydes의 발생 변화를 알아보고자, 전오존처리가 있는 2정수공정과 기존처리공정인 3정수공정의 공정별 aldehydes 발생농도를 조사하였다(Fig. 3).

전염소처리 후, acetaldehyde가 3.73  $\mu\text{g/L}$  발생되었으며, glyoxal과 methyl glyoxal이 각각 5.78  $\mu\text{g/L}$ 와 3.75  $\mu\text{g/L}$ 로 발생되었다. Glyoxal과 methyl glyoxal은 formaldehyde와

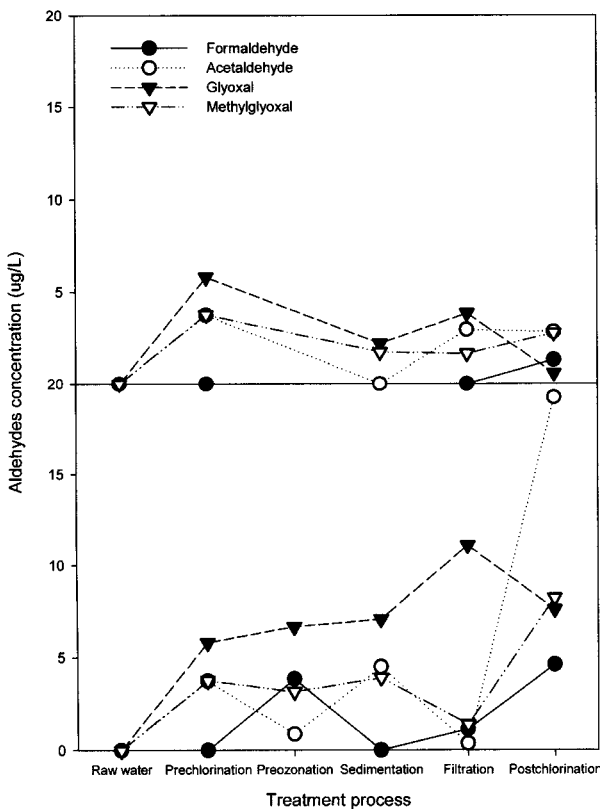


Fig. 3. Variation of aldehydes concentration with and without preozonation.

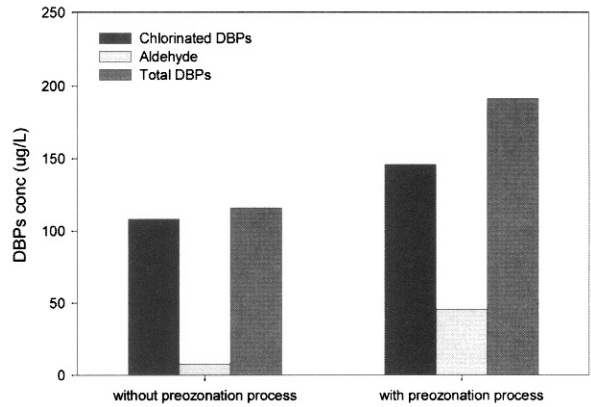


Fig. 4. Comparison of DBPs with and without preozonation.

acetaldehyde의 2차 부산물이므로 염소처리에 의해서도 일부 aldehydes가 발생되는 것으로 조사되었다. Ivancevtumbas 등(2001)에 의하면, 10 mg/L의 염소를 처리한 원수에 acetaldehyde가 21.9  $\mu\text{g/L}$ , formaldehyde가 15.0  $\mu\text{g/L}$  발생되었으며, 응집 후 투여된 염소에 의해서도 acetaldehyde가 19.8  $\mu\text{g/L}$  및 formaldehyde가 13.5  $\mu\text{g/L}$  발생되어 염소처리에 의해서도 aldehydes가 발생되는 것으로 나타났다. 또한 원수 중에 아미노산이 있는 경우 염소와 반응하여 알데하이드가 발생되는 경로가 밝혀져 있다(Periera et al., 1973; Froese et al., 1999)

3정수공정의 경우, 후염소 처리후에 발생된 aldehydes는 formaldehyde가 1.32  $\mu\text{g/L}$ , acetaldehyde가 2.82  $\mu\text{g/L}$  발생되었으며 methyl glyoxal은 침전과 여과공정후 감소되었으나 후염소 후 다소 증가하여 2.75  $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 전오존 처리 공정이 있는 2정수공정은 전오존 처리후 formaldehyde가 3.85  $\mu\text{g/L}$  발생되었으며 2차 오존 부산물인 glyoxal과 methyl glyoxal은 6.64  $\mu\text{g/L}$  및 3.16  $\mu\text{g/L}$ 로 각각 발생되었다.

또한 후염소처리 후 발생된 aldehyde는 formaldehyde가 4.61  $\mu\text{g/L}$ , acetaldehyde가 19.24  $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높게 나타났으며, glyoxal과 methyl glyoxal도 7.57  $\mu\text{g/L}$  및 8.20  $\mu\text{g/L}$ 로 각각 발생되어 오존처리보다 더 높은 농도를 나타내었다.

따라서 본 연구결과 전오존 처리에 의해 aldehydes가 발생되었으나, 이를 후염소처리 하였을 경우 염소에 의해 발생하는 aldehydes로 인해 총 발생물이 증가하는 경향을 보이었다. 이는 오존 처리에 의해 산화된 유기물이 응집 및 침전에 의해 제거 되어지나 제거되지 않은 일부 산화유기물이 염소와 결합하여 aldehydes가 발생된 것으로 판단된다.

3.3. 총 소독부산물의 비교

수돗물이 최종 처리되어 모아진 정수지에서 발생된 총 소독부산물은 3정수공정에서는 염소소독부산물이 108.35  $\mu\text{g/L}$ , aldehydes가 7.76  $\mu\text{g/L}$  발생되어 총 116.11  $\mu\text{g/L}$ 의 DBPs가 염소소독에 의해 발생되었다.

또한 전오존 처리공정이 포함된 2정수공정은 염소소독부

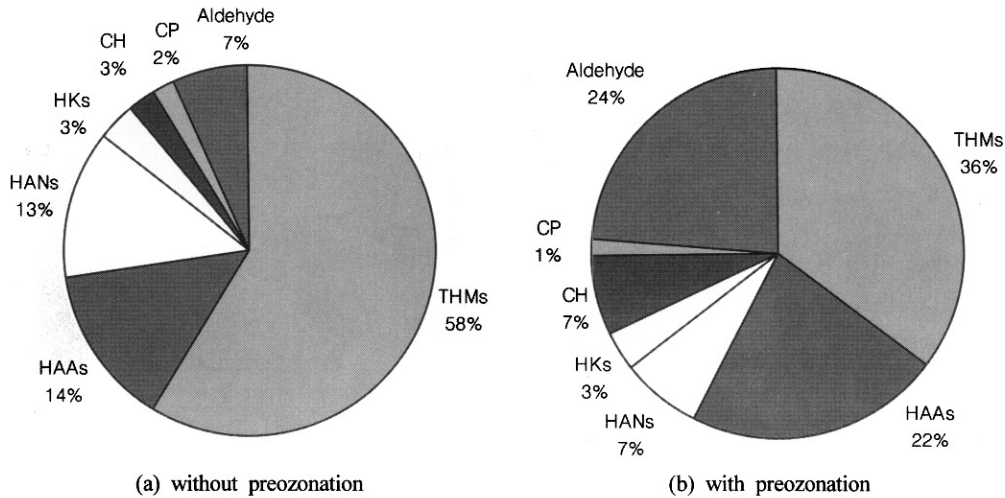


Fig. 5. Composition of DBPs with and without preozonation.

산물이 145.97  $\mu\text{g/L}$ , aldehydes가 45.54  $\mu\text{g/L}$  발생되어 총 191.51  $\mu\text{g/L}$ 의 DBPs가 발생되어 전오존처리공정으로 인해 염소소독부산물들이 26% 증가되었으며, aldehydes를 포함할 경우 39%의 소독부산물이 더 발생되었다. 따라서 전오존처리하는 유기물을 산화시켜 응집효율을 높일 수 있는 효과가 있지만, 전오존으로 인해 HAAs의 발생이 높아졌으며, 응집침전에 의해 제거되지 않은 오존으로 산화된 유기물들이 후염소와 반응하여 aldehydes가 발생되어 높아진 것으로 판단된다.

총 발생된 소독부산물의 구성비를 보면, 3정수공정에서 발생하는 THMs는 58%로 염소처리공정으로 인해 THMs이 주로 발생되었으며, aldehydes도 일부 발생되었다. 또한 전오존 처리공정이 있는 2정수공정은 THMs가 35%인 반면, aldehydes의 구성비는 24%로 증가를 보여 전오존에 의해 aldehydes의 구성비가 증가됨을 보였다.

본 연구에서는 처리공정별 소독부산물의 발생변화를 관찰하기 위해 정수공정별 시료를 채취하였다. 시료 채취시 처리시간을 고려하지 않고 원수에서부터 정수까지 일시에 시료를 채수함으로써 같은 원수의 처리공정별 시료채수가 제한적으로 이루어져 다소 소독부산물의 발생량이 차이가 날수도 있다. 그러나 최종 처리된 수돗물을 모아두는 정수지에서 발생된 총 소독부산물은 기존의 염소처리공정에서 발생되는 소독부산물보다 전오존처리공정이 도입된 정수공정에서 높은 소독부산물이 발생되었다.

이는 염소로 인해 발생하는 소독부산물 외에 전오존처리로 인해 발생하는 부산물이 부가적으로 발생되었기 때문이라 사료되며, 실제적으로 산화를 목적으로 오존을 사용할지라도 염소투여량은 잔류염소 기준을 맞추기 위해 기존의 염소처리공정의 투여량과 비슷한 양을 투여하기 때문에 총 소독 및 산화제가 과다 투여 되고 있으므로 이에 대한 부산물의 발생에 영향을 주는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 염소처리공정과 전오존 처리공정이 병행되는

정수공정을 선택하여 염소소독부산물과 오존부산물을 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

전염소후 발생된 염소소독부산물은 THMs이 52.20  $\mu\text{g/L}$ , HAAs가 17.05  $\mu\text{g/L}$ , 그리고 HANs는 6.19  $\mu\text{g/L}$ 로 발생되었으나, 침전과 여과공정을 거치면서 다소 감소하다가 후염소 처리된 후 THM이 67.62  $\mu\text{g/L}$ , HAAs가 16.45  $\mu\text{g/L}$ , 그리고 HANs가 15.37  $\mu\text{g/L}$ 로 다시 증가하였다. 한편, 전오존처리 직후 THMs은 감소된 반면, HAAs는 36.87  $\mu\text{g/L}$ 로 증가되는 변화를 보였고 염소처리공정에서도 aldehydes가 일부 발생되었다.

전오존 처리 직후 formaldehyde가 3.85  $\mu\text{g/L}$  발생되었으며 2차 오존 부산물인 glyoxal과 methyl glyoxal은 6.64  $\mu\text{g/L}$  및 3.16  $\mu\text{g/L}$ 로 각각 발생되었다. 후염소 처리 후 발생한 aldehyde는 formaldehyde가 4.61  $\mu\text{g/L}$ , acetaldehyde가 19.24  $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높게 나타났으며, glyoxal과 methyl glyoxal도 7.57  $\mu\text{g/L}$  및 8.20  $\mu\text{g/L}$ 로 전오존처리때 보다 후염소처리에 의해 높은 발생을 나타내었다.

따라서 전오존처리공정이 있는 공정과 없는 공정을 비교시, 전오존처리공정이 있는 정수공정의 최종 염소소독부산물이 26% 증가되었으며, aldehydes를 포함할 경우 39%의 총 소독부산물이 더 발생되었다.

#### 사 사

이 논문은 2003년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(M01-2003-000-10044-0).

#### 참고문헌

김준성, 상수 중 염소 및 오존소독부산물의 발생특성과 생성저감공정에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위논문 (2000).

염철민, 조순행, 윤재용, 서울시 정수장의 필요소독능 관리

- 현황, *상하수도학회지*, **16**(4), pp. 455-465 (2002).
- 정 용, 신동천, 양지연, 박연신, 김준성, 수도수중 염소 소독 부산물로 인한 건강위해성 평가에 관한 연구, *한국환경독성학회지*, **12**(3), pp. 31-41 (1997).
- Amy, G. L., Tan, L. and Davis, M. K., The Effects of Ozonation and Activated Carbon Adsorption on Trihalomethane Speciation, *Water Res.*, **25**(2), pp. 191-202 (1991).
- David, L. W., Kimberly, A. G. and Kim, S. M., Removal of Algal-derived Organic Material by Preozonation and Coagulation: Monitoring Changes in Organic Quality by Pyrolysis-GC-MS, *Wat. Res.*, **30**(11), pp. 2621-2632 (1996).
- Froese, K. L., Wolanski, A. and Hruday, S. E., Factors Governing Odorous Aldehyde Formation as Disinfection By-Products in Drinking Water, *Wat. Res.*, **33**(6), pp. 1355-1364 (1999).
- Glaze, W. H., Drinking-Water Treatment with Ozone, *Environ. Sci. Technol.*, **21**(3), pp. 224-230 (1987).
- Glaze, W. H., Determining Health Risks Associated with Disinfectants and Disinfection By-Products : Research needs, *J AWWA*, **85**(3), pp. 53-56 (1993).
- Ivancev-tumbas, I. and Dalmacija B., Effects of Coagulation Processes on Aldehydes Formation in Groundwater Treated with Common Oxidative Agents, *Wat. Res.*, **35**(16), pp. 3950-3958 (2001).
- Nieminski, E. C., Chaudhuri, S. and Lamoreaux, T., The Occurrence of DBPs in Utah Drinking Waters, *J. AWWA*, **85**(9), pp. 98-105 (1993).
- Periera, W. E., Hayano, Y., Summons, R. E., Bacon, V. A. and Du"eld A. M., Chlorination studies II. The Reaction of Aqueous Hypochlorous Acid with Apha-Amino Acids and Peptides, *Biochim. Biophys. Acta*, **313**, pp. 140-180 (1973).
- Reckhow, D. A. and Singer, P. C., The Removal of Organic Halide Precursors by Preozonation and Alum Coagulation, *J. AWWA*, **76**(4), pp. 151-157 (1984).
- Richardson, S., Water Analysis: Emerging Contaminants and Currents Issues, *Anal. Chem.*, **75**(18), pp. 2831-2857 (2003).
- Smith, M. E., Cowman, G. T. and Singer, P. C., The Impact of Ozonation and Coagulation on Disinfection By-Product Formation, AWWA, 1989 annual conference proceedings, LA, California, June 18-22, pp. 24-40 (1989).
- U.S. EPA, Determination of Carbonyl Compounds in Drinking Water by Dinirophenylhydrazine Derivatization and High Performance Liquid Chromatography, Method 554 (1992).
- U.S. EPA, Determination of Haloacetic Acids and Dalapon in Drinking Water by Liquid-liquid Extraction, Derivatization and GC-ECD, Method 552.2. (1995).
- U.S. EPA, Methods for the Determination of Organic Compounds in Drinking Water Supplement I, Method 551 (1990).
- U.S. EPA, Methods for the Determination of Organic Compounds in Drinking Water Supplement II, Method 524.2. (1992).
- Weinberg, H. S., Glaze, W. H., Krasner, S. W. and Scilimenti, M. J., Formation and Removal of Aldehydes in Plants that Use Ozonation, *J. AWWA*, **85**(9) pp. 72-85 (1993).