

pH, 수온, 염소주입량이 정수장 소독부산물 생성에 미치는 영향

Effects of pH, Water Temperature and Chlorine Dosage on the Formation of Disinfection Byproducts at Water Treatment Plant

이기창 · 이원태*[†]

Ki-chang Lee · Wontae Lee*[†]

경상북도보건환경연구원 · *금오공과대학교 환경공학전공

Gyeongsangbuk-do Institute of Health and Environment

*Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received September 2, 2015; Revised September 8, 2015; Accepted September 11, 2015)

Abstract : This study investigated formation potential of 16 disinfection byproducts (DBPs) (e.g., g trihalomethanes, haloacetic acids, haloacetonitriles, chloral hydrate, etc.) upon chlorination of raw water at various pH, water temperatures, and chlorine doses. We also compared the DBP formation potential (DBFPF) of raw and filtered waters. Most of DBPs were formed higher at neutral pH, but dichloroacetic acid, chloroform, and bromodichloromethane were formed higher over pH 7. As water temperature increased, concentrations of chloral hydrate, haloacetic acids, and haloacetonitriles linearly increased while that of trihalomethanes exponentially increased. Formation of chloral hydrate, trihalomethanes, and trihaloacetonitriles significantly increased up to 2.0 mg/L Cl₂ of chlorine addition, then gradually increased at 2.0~5.6 mg/L Cl₂. Filtered water formed less DBPs than raw water in most DBPs except for trihalomethanes.

Key Words : Disinfection Byproducts, pH, Water Temperature, Chlorine Dosage, Water Treatment Plant

요약 : 본 연구는 경북 소재 A정수장의 원수를 대상으로 pH, 수온, 염소주입량에 대한 소독부산물(trihalomethanes, haloacetic acids, haloacetonitriles, chloral hydrate 등 16종) 생성능을 조사하고 여과수의 소독부산물 생성능과 비교하였다. 조사한 소독부산물의 생성능은 대부분 중성 pH에서 높았다. 다만, dichloroacetic acid, chloroform, bromodichloromethane의 생성능은 염기성 pH에서 증가하였다. Chloral hydrate, haloacetic acids, haloacetonitriles의 생성능은 수온의 증가와 함께 직선형으로 증가하였고, trihalomethanes의 생성능은 지수함수의 증가추세를 보였다. Chloral hydrate, trihalomethanes, trihaloacetonitriles의 생성능은 염소주입농도 2.0 mg/L Cl₂까지 급격하게 상승하였고, 2.0~5.6 mg/L Cl₂에서는 완만하게 증가하였다. 여과수의 소독부산물 생성능은 원수에 비해 대부분의 물질에서 낮게 나타났다. 다만, trihalomethanes은 여과수가 원수보다 약 1.4배 높은 생성률을 나타냈다.

주제어 : 소독부산물, pH, 수온, 염소주입량, 정수장

1. 서론

국내의 고도정수기술 및 시스템에 관한 연구는 1990년대 초반부터 제한적으로 수행하여, 1992년 말부터 정부의 주도하에 연구개발이 본격적으로 시작되었으며 이에 따라 수중의 유기물질, 철, 망간, 암모니아성 질소, 유기성 질소 등의 제거를 위한 전염소처리의 필요성이 대두 되었다.¹⁾ 그 후 대부분의 정수처리장에 염소처리공정이 설치되고 운영되고 있으며 정수시 염소처리와 관련된 많은 연구들이 이루어졌다.

현재 국내 대부분의 정수장에서 사용되는 소독제인 염소는 다른 소독제에 비하여 살균효율이 높고 잔류성이 뛰어나며 경제성이 우수한 장점이 있으나 물에 존재하는 자연유기물질(natural organic matter, NOM)과 반응하여 인체에 유해한 물질을 포함하는 매우 복잡하고 다양한 소독부산물(disinfection byproducts, DBPs)을 생성할 수 있다는 단점도 있다.²⁾ 염소소독부산물은 크게 Trihalomethanes (THMs), Haloacetic

acids (HAAs), Haloacetonitriles (HANs)로 나누어진다.³⁾

소독부산물의 생성량에 영향을 미치는 인자 중 하나인 NOM은 단백질, 리그닌, 유기산 등의 불균질 혼합체이며, NOM중 대표적인 난분해성 물질인 휴믹물질(humic substance)은 고도정수처리공정 중 하나인 막여과 공정의 막을 오염시키는 중요한 원인물질로 알려져 있다.⁴⁾ 소독부산물의 전구물질인 NOM을 소독공정 전에 제거하는 것은 소독부산물 생성을 제어할 수 있는 가장 좋은 방법 중 하나이나 기존 응집/침전공정은 NOM, 특히 친수성 NOM 제거에 비효율적인 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 이에 정수공정에서 NOM의 제거효율을 높이기 위한 고도응집, 활성탄과 같은 추가공정이 제안되고 있으며 관련된 연구가 수행되고 있다.^{6,7)}

소독부산물 발생은 물에 포함된 유기물(NOM) 외에 pH와 수온의 영향도 많이 받는다. THMs은 일반적으로 물의 pH가 높을수록, 그리고 수온이 높을수록 발생농도가 증가하고,⁸⁾ HAAs 중 DCAA (dichloroacetic acid)의 경우 pH 5~9.4의 범위 내 아무런 영향이 없는 반면 TCAA (Trichloroacetic

[†] Corresponding author E-mail: wtlee@kumoh.ac.kr Tel: 054-478-7636 Fax: 054-478-7859

acid)는 pH가 9.4에서 생성량이 더 낮은 것으로 보고되었다.⁹⁾ 또한 배급수 시스템에서 HAAs의 거동특성에 대한 조사에서 DCAA가 TCAA보다 겨울과 봄철에 높았고 반면에 TCAA가 DCAA보다 여름과 가을에 높았으며,¹⁰⁾ 이는 수온이 높을 경우에 DCAA의 분해속도가 빨라져 계절에 따라 다른 농도 분포를 보이는 것으로 보고되었다.¹¹⁾ 그밖에도 가수분해 반응을 하는 HANs의 경우에 염소와 반응시간이 증가함에 따라 농도가 감소하는 특성을 나타내기도 한다.¹²⁾

그 외에도 브롬이온 농도, 소독제의 종류와 주입량, 접촉 시간 등도 소독부산물의 발생에 영향을 미치는 것으로 보고되었다.⁸⁾ 브롬이온은 소독부산물 중 브롬계 물질(예, THMs 중 bromodichloromethanes와 dibromochloromethanes 등) 발생량과 상관성이 대체로 높으며 이는 브롬계 염소치환 소독부산물의 형성이 빠르게 진행됨을 나타낸다.¹³⁾

소독부산물 생성인자와의 상관성에 대한 국내의 연구는 대부분 실험실 규모로 진행되어 왔으며 실제 운영 중인 정수장에서 운전 조건의 변화에 따른 소독부산물의 생성특성에 대한 연구는 상대적으로 미비하다.¹⁴⁾ 계절적 요인, 유입 원수의 수질, 염소주입지점, 주입량 등의 변화와 정수장별 특성에 따라 소독부산물의 발생특성이 다를 수 있으므로 해당 정수장의 소독부산물 발생을 최소화하기 위해서는 정수장별 운전조건에 따른 소독부산물 생성특성에 대한 기초 연구와 모니터링이 필요하다.

따라서, 본 연구는 경상북도의 정수장을 대상으로 처리 대상수의 pH, 수온, 염소주입량 변화에 따른 소독부산물 생성특성을 조사하였다. 특히 수질 요인 변화별 소독부산물 생성추이와 종별 분포, 브롬치환 DBPs 생성 등을 조사하였다. 본 연구는 소독부산물 발생에 영향을 미치는 요인들의 다각적인 분석을 통하여 향후 실제정수장에서 소독부산물 관리를 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료

경북지역에 위치한 A정수장의 원수와 여과수를 이용하여 소독부산물 생성특성을 조사하였다. A정수장은 호소수를 원수로 이용하여 표준정수처리 시스템으로 정수하고 있다. 원수와 여과수의 수질특성은 Table 1에 나타내었다. 원수의 유기물 성분은 정수공정을 통해 효율적으로 제거되고 있으며 평균적으로 DOC 44%, UVA₂₅₄ 61%, SUVA₂₅₄ 41%로 감소되었다. 염소를 제외한 무기이온성분은 정수공정에 의한 농도변화가 없었다.

2.2. 소독부산물 생성능 실험

소독부산물 생성능에 대한 기본 실험은 다음과 같이 수행하였다. 먼저, 시료 중 잔류염소농도가 DOC 농도의 약 3배가 되게 차아염소산나트륨(NaOCl)을 주입하였다. 준비된 시료를 60 mL vial에 공기층이 없도록 가득 담아 밀봉한 후,

Table 1. Water qualities of raw water and filtered water

Parameters	Raw water	Filtered water
Temperature, °C	27.4	27.1
pH	7.1	6.9
Chlorine, mg/L	0	0.85
DOC, mg/L	2.0	1.1
UVA ₂₅₄ , cm ⁻¹	0.0314	0.0124
SUVA ₂₅₄ , L/mg.m	1.60	0.95
Hardness, mg/L as CaCO ₃	20	16
F ⁻ , mg/L	0.06	0.06
Cl ⁻ , mg/L	9.9	18.8
NO ₃ ⁻ -N, mg/L	0.40	0.37
SO ₄ ²⁻ , mg/L	8.95	8.97

20°C로 설정된 인큐베이터(HB-103L, 한백과학)를 이용하여 24시간 동안 반응시켰다. 수온 및 반응시간에 대한 소독부산물 생성능(DBPFP) 실험은 각 조건에 따라 설정하였다. pH는 H₂SO₄ (0.05 N)와 NaOH (0.05 N) 용액을 이용하여 조절하였다. 반응이 완료된 시료는 즉시 NaHSO₃ (0.5 N) 용액으로 잔류염소를 고정시켜 분석시료로 사용하였으며, 분석값은 3개의 시료에 대한 평균값을 이용하였다.

2.3. 분석방법

소독부산물 중 HANs계는 dichloroacetonitrile (DCAN), bromochloroacetonitrile (BCAN), dibromoacetonitrile (DBAN), trichloroacetonitrile (TCAN) 항목을 분석하였다. HAAs계는 chloroacetic acid (CAA), mbromoacetic acid (BAA), dichloroacetic acid (DCAA), trichloroacetic acid (TCAA), dibromoacetic acid (DBAA) 항목을 분석하였다. THMs 항목은 chloroform (CF), bromodichloromethane (BDCM), dibromochloromethane (DBCM), bromoform (BF)를 분석하였으며, chloral hydrate (CH), ethylene dibromide (EDB), 1,2-dibromo-3-chloropropane (DBCP) 항목도 포함하여 같이 수행하였다. HANs계(4종)와 CH, EDB, DBCP를 포함하는 총 7종과 HAAs계(5종) 분석은 gas chromatography/electron capture detector (GC/ECD, Agilent 6890N, USA)의 분석기기를 이용하였으며, HAAs 분석은 전처리방법이 다른 관계로 동일한 기기분석조건에서 별도로 동시분석 하였다. THMs은 gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS, Bruker 320MS, USA)와 purge & trap 시스템을 이용하여 동시분석 하였다. 모든 소독부산물의 전처리와 기기분석은 먹는물수질공정시험기준에 따라 수행하였다. 용존유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)는 0.45-µm filter (Millipore, USA)로 시료를 여과한 후 TOC 분석기(Sievers 900, USA)를 이용하여 분석하였다. UVA₂₅₄는 UV-visible spectrophotometer (Cary 300, Varian, USA)을 이용하여 분석하였다. Specific UV absorbance (SUVA₂₅₄)는 254 nm 파장에서 측정된 UV 흡광도를 DOC 농도로 나누어 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. pH 및 수온의 영향

pH는 소독부산물 생성에 영향을 미치는 주요 인자이므로 우선 pH 범위 3.5~10.0에서 DBPFP 생성변화를 조사하였다(Fig. 1). 소독부산물 생성능 실험결과 총 16종 중 TCAN, CAA, BAA, BF, EDB, DBCP 항목은 불검출인 것으로 나타났다.

소독부산물 생성능 시험후 잔류염소소모량은 산성조건인 pH 3.5에서 가장 낮았고 pH 7.0까지 계속 증가하여 최대값을 나타냈으며, 이후 pH 8.5까지 일정하다가 pH 10.0에서 다소 감소하였다. pH에 따른 잔류염소소모 특성은 기존 보고된 연구결과와 유사하였다.¹⁵⁾

CH 생성능(CHFP, 이하 생성능은 FP로 표기)은 pH 3.5에서 7.0까지 급속히 증가한 후 pH 10.0까지 큰 변화 없이 유사한 농도를 나타내었다. THAAFP는 산성에서 중성 pH 7.0로 갈수록 지속적으로 증가하여 가장 높았으며, 이후 pH 10.0까지 다소 감소하는 것으로 나타났다. THAA 중 DCAAFP와 TCAAFP는 염기성 pH에서 서로 상반된 결과를 보여주었으며, 이는 Min 등⁹⁾이 보고한 결과와 유사하였다. DCAAFP는 pH가 3.4에서 10.0으로 높아질수록 계속 증가하였지만, TCAAFP는 염기성 pH일 때 감소하기 시작하여 pH 10.0에서 생성농도는 pH 7.0보다 약 71.0%가 낮은 최소농도를 나타내었다. DBAAFP는 pH 7.0부터 생성되어 pH 10.0까지 유사한 농도를 보였다.

HANFP는 검출된 모든 항목이 염기성 pH에서 농도가 감소하였다. DCANFP는 pH 3.5에서 7.0까지 점차 증가하여 최대농도를 보였고, 염기성 pH 10.0에서 급격하게 감소하여 pH 7.0보다 약 78%가 낮은 최소농도를 나타내었다. BCANFP와 DBANFP는 약염기성 pH 8.5에서 약간 감소하였으며, 강염기성 pH 10.0에서는 불검출로 나타났다. 이는 강염기성 pH에서 HANs의 가수분해 속도가 산성 및 중성 조건보다 더 빨리 일어나기 때문인 것으로 사료된다.¹⁵⁻¹⁸⁾

THMFPP는 pH가 높을수록 지속적으로 증가하여 기존보

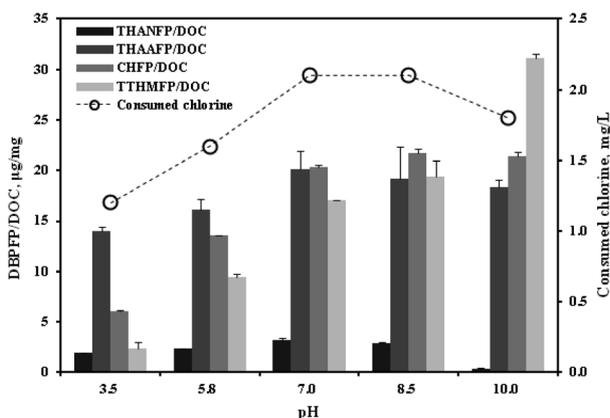


Fig. 1. Comparison of DBPFP at various pHs (DOC concentration, 2.0 mg/L; chlorine dose, 5.6 mg/L; water temperature, 20°C; reaction time, 24 h).

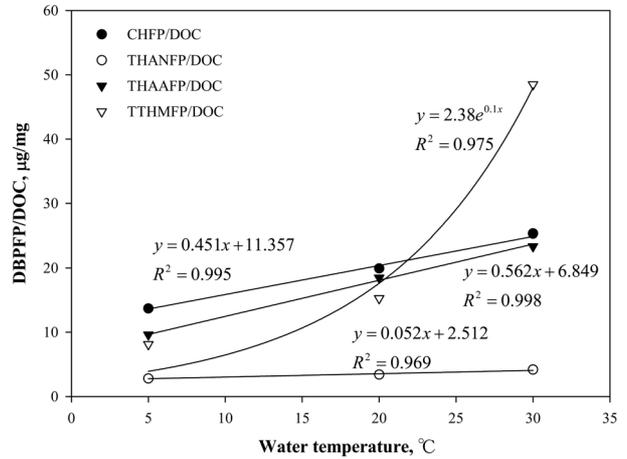


Fig. 2. Effects of water temperature on DBPFP (DOC concentration, 2.0 mg/L; chlorine dose, 5.6 mg/L; pH, 7.1; reaction time, 24 h).

고된 내용과 유사하였다.^{19,20)} 특히, pH 10.0에서 CFPP는 pH 7.0보다 2.1배 증가하여 pH 영향이 가장 높았다. BDCMFP 생성은 pH 7.0보다 1.6배 정도 더 높았으며, DBCMFP는 중성 pH 이상에서 큰 변화는 없었다. pH가 높을수록 THMs의 생성이 증가하는 것은 알칼리성 pH에서 다른 DBPs(예, 1,1-dichloropropanone, 1,1,1-trichloropropanone, 1,3-dichloropropanone, trichloroacetonitrile)의 가수분해에 의한 부산물로 THMs이 생성될 수 있기 때문이다.^{21,22)}

수온은 소독부산물 생성에 영향을 미치는 주요인자로서, 계절적 조건에 의해 변화한다.²⁰⁾ Fig. 2는 수온에 따른 DBPFP 특성실험의 결과를 나타낸 것인데, 수온이 높을수록 DBPFP/DOC는 증가하여 기존에 보고된 연구결과와 유사하였다.²³⁾ DBPFP 중 CHFP, THAAFP, THANFP의 생성은 수온증가에 따라 직선형으로 증가하였다. TTHMFPP는 20°C보다 30°C에서 약 3배 이상으로 급격하게 증가하는 지수함수의 형태를 보였으며, Bae 등(2011)의 연구결과와 유사하였다.²⁴⁾

3.2. 염소주입량의 영향

염소주입농도에 대한 영향을 살펴본 실험에서 THANFP, THAAFP, TTHMFPP 값은 염소주입농도가 증가할수록 증가하였다. 실험한 모든 수온(5, 20, 30°C)에서 같은 결과를 보였다. THMFPP 중에는 CFPP이 염소주입량 증가에 따라 가장 큰 반응성을 보였으며, 전체 중 절반이상의 농도비율을 차지하였다. 특히, 수온 30°C에서는 CFPP의 급격한 증가로 THMFPP 중 약 89%의 농도비율을 차지하였다. HAAFP 중에는 DCAAFP와 TCAAFP가 유사한 생성비율을 보였으며, 둘 다 염소주입량 증가와 함께 생성농도가 높아졌다. HANFP 중에는 DCANFP가 염소주입량의 증가에 따른 생성증가가 가장 높았다. THM, HAA, HAN 모두 브롬으로 치환된 종은 염소주입농도의 영향이 크지 않았다. 한 개의 브롬으로 치환된 BDCMFP, BCANFP는 염소주입량이 증가할수록 다소 증가하였으나, 두 개의 브롬으로 치환된 DBAAFP, DBCMFP, DBANFP는 염소주입농도범위 0.56~5.60 mg/L에서

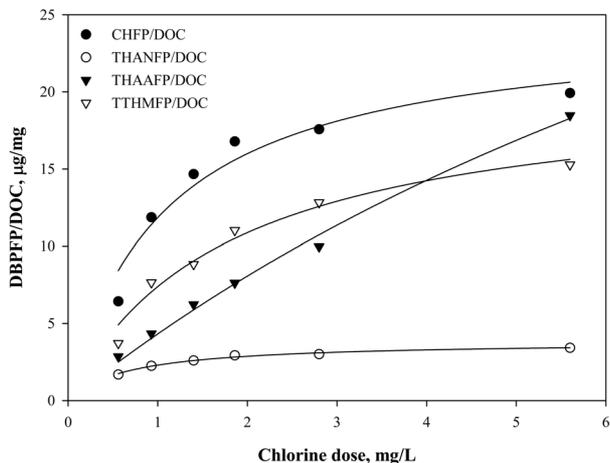


Fig. 3. Effect of chlorine dose on DBPFP (DOC concentration, 2.0 mg/L; water temperature, 20°C; pH, 7.1; reaction time, 24 h).

거의 일정한 생성농도를 보였다.

염소주입량 증가에 대한 CHFP, TTHMFP 및 TTHNFP의 추이는 서로 유사하게 나타났다(Fig. 3). 이 물질들의 생성 농도는 염소주입농도 약 2.0 mg/L까지 급격하게 증가하여 작은 염소주입량 변화에도 생성농도 차이가 비교적 큰 것으로 나타났고, 염소주입농도 2.0~5.6 mg/L 범위에서는 완만한 증가형태로서 기존 보고된 결과와 유사하였다.²⁴⁾ 반면에, THAAFP 생성은 염소주입량 증가와 함께 직선형에 가까운 증가추세를 보였다.

염소주입농도와 DBPFP의 생성관계는 방정식 (1)을 잘 따랐으며, 상수 a, b와 선형결정계수(R²)를 Table 2에 나타내었다.

$$y = \frac{ax}{b+x} \quad (1)$$

여기서, x는 염소주입농도(mg/L), y는 단위 DOC당 생성된 소독부산물량(µg/mg)을 말한다. 상수 a는 생성계수를 말하며 수온이 높을수록 생성계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 수온증가와 함께 CHFP의 a는 16.3~32.1, THANFP는 3.0~5.1, THAAFP는 18.7~71.7, TTHMFP는 9.1~67.5로 증가하였으며, 이들 그래프의 R² 범위는 0.938~0.997로 높게 나타났다. 상수 b는 선형모양에 영향을 주는 인자로서 수치가 클수록 직선형에 가까워진다. CHFP, THANFP, TTHMFP에 대한 상수 b는 각각 수온이 클수록 다소 증가하였고, b

의 범위는 0.6~2.0으로서 서로 유사한 곡선그래프를 나타내었다. 반면, THAAFP의 상수 b는 5.2~13.3 범위로 비교적 높아 직선모양에 가까운 형태를 나타냈다(직선방정식의 추세선 적용시 R²가 0.95 이상으로 높게 나타남).

3.3. 원수와 여과수의 소독부산물 생성능 비교

여과수에 대한 DBPs 생성능 조사는 후염소처리에 의해 생성되는 소독부산물의 거동을 파악하는데 중요하므로, 본 연구는 원수와 여과수를 대상으로 DBPFP를 조사하였다. 각 시료의 염소주입농도는 DOC의 약 3배로 하였고, 수온(20°C), 반응시간 (24 h), pH (~7)는 같은 조건에서 실험을 수행하였다(Fig. 4). 생성능(FP) 실험 전 원수의 소독부산물 농도는 모두 검출한계 이하로 나타났으며, 여과수는 CH 21.5 µg/L, DCAN 0.7 µg/L, CF 36 µg/L, BDCM 9 µg/L, DBCM 3 µg/L, DCAA 13 µg/L, TCAA 8 µg/L로 검출되었다. 이외의 DBPs는 여과수 내에서 불검출 되었다. 여과수에 포함되어 있던 소독부산물의 농도는 생성능 실험후 발생 농도에서 차감하고 비교하였다.

여과수의 THAAFP/DOC는 9.9 µg/mg로 원수(18.5 µg/mg)의 약 50%로 낮은 생성특성을 보였다. 여과수의 CHFP/DOC와 THANFP/DOC는 각각 16.2 µg/mg, 2.5 µg/mg로 원수(각각 19.9, 3.4 µg/mg)보다 다소 낮았지만 큰 차이는 없었다. 반면, TTHMFP/DOC의 생성은 20.8 µg/mg로 원수(15.3 µg/

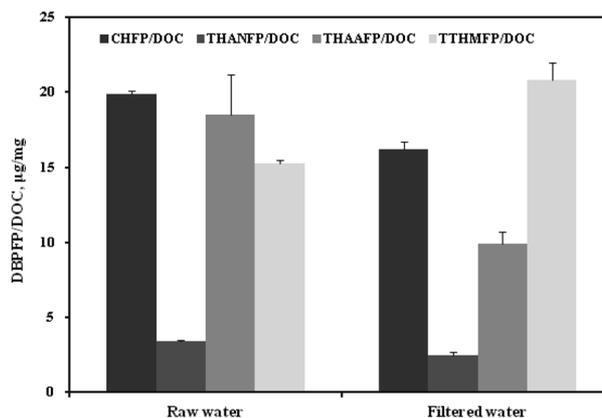


Fig. 4. Comparison of DBPFP between raw water and filtered water (water temperature, 20°C; reaction time, 24 h; i) raw water: DOC concentration, 2.0 mg/L; chlorine dose, 5.6 mg/L; consumed chlorine, 2.1 mg/L; pH 7; ii) filtered water: DOC concentration, 1.1 mg/L; chlorine dose, 3.1 mg/L; consumed chlorine, 1.0 mg/L; pH 7).

Table 2. Summary of parameters in the equations ($y = \frac{ax}{b+x}$) for DBPFP at various water temperatures and chlorine dosages

	CHFP/DOC			THANFP/DOC			THAAFP/DOC			TTHMFP/DOC		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
5°C	16.3	0.7	0.982	3.0	0.6	0.991	18.7 (1.8)*	5.2 (1.0)	0.997 (0.950)	9.1	0.7	0.949
20°C	24.6	1.1	0.942	3.8	0.7	0.987	61.5 (3.3)	13.3 (1.2)	0.994 (0.989)	20.6	1.8	0.972
30°C	32.1	1.4	0.938	5.1	1.0	0.988	71.7 (4.7)	11.5 (0.4)	0.996 (0.975)	67.5	2.0	0.958

(*): Values of a, b, and R² for $y = ax + b$ equation

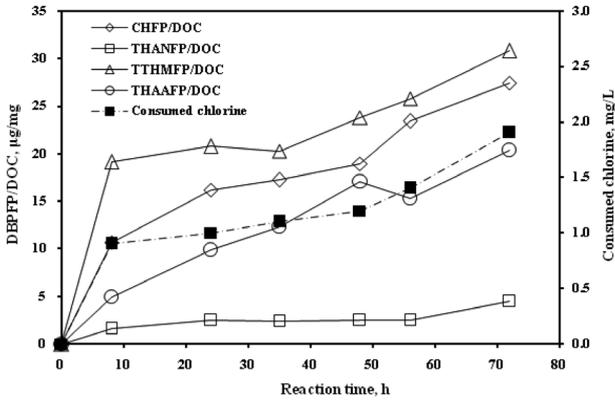


Fig. 5. DBPFP/DOC as a function of reaction time (DOC concentration, 1.1 mg/L; chlorine dose, 3.1 mg/L; water temperature, 20°C; pH 7).

mg)보다 다소 높게 나타났다. 원수대비 여과수의 CHFP 농도 감소율은 53.7%, THANFP는 58.2%, THAAFP는 69.3%로 나타났으며, 특히, 원수에서 높은 생성특성을 띤 HAAs는 해당 정수장의 응집수 모니터링에서도 정수대비 72%의 높은 생성비율을 나타내었다.²⁵⁾ 반면, TTHMFP 경우는 22.1%로 다른 소독부산물에 비해 감소율이 낮았고, 실제 응집수에서도 약 43%의 비교적 낮은 생성비율을 보였다.²⁵⁾

후염소처리가 소독부산물 생성에 미칠 수 있는 영향을 간접적으로 조사하기 위해 반응시간에 따른 여과수의 DBP 생성추이를 조사하였다(Fig. 5). 염소소모량은 반응초기 8시간 동안 0.9 mg/L로 가파르게 증가하였으며, 이후 완만하게 증가하였다. DBP별 생성추이는 전반적으로 잔류염소소모량과 유사하였고, 생성농도는 잔류염소 존재 시 반응시간이 경과할수록 계속 증가하므로 실제 관말수도꼭지까지 수돗물 중 DBPs 생성이 지속적으로 증가할 수 있음을 알 수 있다.^{24,26)} 대체로 DBPFP 비율은 반응초기에 높았고, 24시간 이내의 생성량이 72시간까지 생성된 총 농도대비 48.7~67.5% 정도 차지하였다.

4. 결론

본 연구는 경북 소재 A정수장의 원수를 대상으로 pH, 수온, 염소주입량에 대한 소독부산물 생성능을 조사하였다. 또한, 원수와 여과수에 대한 소독부산물 생성능을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대부분의 소독부산물은 대체로 중성 pH에서 생성률이 높았다. 다만, THMs은 염기성 pH에서 생성률이 높았다.
- 2) 수온이 높을수록 소독부산물 생성은 증가하였으며, CH, HAAs, HANs는 직선형, THMs는 지수함수형태의 증가추세를 보였다. 따라서 여름철 수온이 높을 경우 THMs이 급격하게 증가할 수 있다.
- 3) 염소주입량을 증가시킬수록 소독부산물 생성도 증가하였는데, 특히 염소주입농도가 낮은 범위(0-2 mg/L Cl₂)에

서는 작은 농도 차이로도 소독부산물 생성능의 차이가 비교적 크게 나타나 최적의 염소주입운영이 필요할 것으로 판단된다. 염소주입농도별 CHFP, THANFP, TTHMFP는 서로 유사한 곡선그래프로 증가한 반면, THAAFP는 직선형에 가까운 증가추세를 보였다.

4) 원수와 여과수에 대해 소독부산물 생성능을 비교한 결과, 대부분의 소독부산물은 정수를 통해 소독부산물 생성능이 낮아지는 것으로 나타났다. 다만, THMs은 여과수에서 상대적으로 높은 생성률을 나타냈다. 또한, 반응시간이 길어질수록 소독부산물의 발생이 지속적으로 증가하므로 THM의 농도를 낮게 유지하기 위해서는 배급수시 체류시간을 줄일 필요가 있다.

Acknowledgement

이 연구는 금오공과대학교학술연구비(2012-104-152)에 의하여 지원된 논문임.

KSEE

References

1. Lee, S. W., "The present and the prospect of advanced water treatment process in Korea," Master Dissertation, Dong-eui University(2004).
2. Seo, H. J., Kim, J. M., Min, K. W., Kang, Y. J., Paik, K. J., Park, J. T. and Kim, S. J., "Generation characteristics of disinfection by-products(DBPs) by chlorination in sewage effluent," *J. Korean Analytical Sci. Technol.*, **22**(3), 272~276(2009)
3. Yang, X., Shang, C., Lee, W. T., Westerhoff, P. and Fan, C., "Correlations between organic matter properties and DBP formation during chloramination," *Water Res.*, **42**, 2329~2339(2008).
4. Oh, I. Y., "Enhanced coagulation for removal of turbidity and NOM in dinking water treatment," Master Dissertation, The University of Seoul(2005).
5. Lin, H. C. and Wang, G. S., "Effect of UV/H₂O₂ on NOM fractionation and corresponding DBPs formation," *Desalination*, **270**, 221~226(2011).
6. Sarathy, S. and Mohseni, M., "The impact of UV/H₂O₂ advanced oxidation on molecular size distribution of chromophoric natural organic matter," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 8315~8320(2007).
7. Lim, S. M., Chiang, K., Amal, R., Fabris, R., Chow, C. and Drikas, M., "A study on the removal of humic acid using advanced oxidation processes," *Sep. Sci. Technol.*, **42**, 1391~1404(2007).
8. Kim, S. E., "Formation and control of chlorinated disinfection by-products in water supply system," Doctor Dissertation (2009).
9. Min, B. S., Rhee, D. S., Ryu, J. K. and Park, S. K., "For-

- mation characteristics of Haloacetic acids in water treatment plant,” *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **6**, 41~48(2003).
10. Stevens, A. A., Moore, L. A., Slocum, C. J., Smith, B. L. and Seeger, D. R., “By-products of chlorination at ten operating utilities. In disinfection by-product: Current Perspectives. Denver, Colo: American Water Work Association.
 11. Williams, D. T., Lebel, G. L. and Benoit, F. M., “Disinfection by-products in Canadian drinking water,” *Chemosphere*, **34**, 229~316(1997)
 12. Krasner, S. W., McGuire, M. J., Jacangelo, J. G., Patania, N. L., Reagan, K. M. and Aieta, E. M., “The occurrence of disinfection by-products in United-States drinking-water,” *J. Am. Water Works Assoc.*, **81**, 41~53(1989)
 13. Park, J. H., Lee, J. B., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Choi, J. Y., Ahn, H. S., Seo, K. A., Oh, J. H., Jung, W. H., Park, S. J., Jang, S. J., Park, J. Y., Kim, G. S., Kim, J. H., Kim, T. S. and Han, J. S., “A study on occurrence and control of disinfection by-products (DBPs) in drinking water(I) - Monitoring of DBPs and its precursors-,” *J. Korean National Inst. Environ. Res.*, pp. 20~21(2010).
 14. Kim, S. J., Kim, J. M., Jeon, Y. T., Park, J. E. and Won, C. H., “The characteristics of disinfection by-products occurrence and speciation in D water treatment processes,” *J. Korean Soc. Water Qual.*, **26**(3), 406~412(2010)
 15. Huang, H., Wu, Q. Y., Tang, X., Jiang, R. and Hu, H. Y., “Formation of haloacetonitriles and haloacetamides during chlorination of pure culture bacteria,” *Chemosphere*, **92**, 375~381(2013).
 16. Reckhow, D. A., Platt, T. L. and Macneill, A. L. and McClellan, J. N., “Formation and degradation of dichloroacetonitrile in drinking waters,” *J. Water Supply: Res. Technol. - AQUA*, **50**(1), 1~13(2001).
 17. Hayes-Larson, E. L. and Mitch, W. A., “Influence of the method of reagent addition on dichloroacetonitrile formation during chloramination,” *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 700~706(2010).
 18. Hu, J., Song, H. and Karanfil, T., “Comparative analysis of halonitromethane and trihalomethane formation and speciation in drinking water: the effects of disinfectants, pH, bromide, and nitrite,” *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 794~799(2010).
 19. Kim, J. K., Jeong, S. G., Shin, C. S. and Cho, H. J., “Characteristics of disinfection by-products formation in Korea,” *J. Korean Soc. Water Waste.*, **19**(3), 301~311(2005).
 20. Sadiq, R. and Rodriguez, M. J., “Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review,” *Sci. Total Environ.*, **321**, 21~46(2004).
 21. Doederer, K., Gernjak, W., Weinberg, H. S. and Farré, M. J., “Factors affecting the formation of disinfection by-products during chlorination and chloramination of secondary effluent for the production of high quality recycled water,” *Water Res.*, **48**, 218~228(2014).
 22. Nikolaou, A. D., Lekkas, T. D. and Kostopoulou, M. N., Goufopoulos, S.K., “ Investigation of the behaviour of halo ketones in water samples,” *Chemosphere*, **44**(5), 907~912 (2001).
 23. Zhang, Q., Kuang, W. F., Liu, L. Y., Li, K., Wong, K. H., Chow, A. T. and Wong, P. K., “Trihalomethane, haloacetonitrile, and chloral hydrate formation potentials of organic carbon fractions from sub-tropical forest soils,” *J. Hazard. Mater.*, **172**, 880~887(2009).
 24. Bae, G. S., Baek, Y. K., Ryu, K. S., Shin, S. H. and Lee, C. H., “A Study on Characterization of THMs Formation in Tap Water in Daegu,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**, 893~899(2011).
 25. Lee, K. C., Gegal, B. C., Choi, I. H. and Lee, W. T., “Formation Characteristics and Control of Disinfection By-products in a Drinking Water Treatment Plant Using Lake Water,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(5), 269~276(2015).
 26. Chang, H. S., Lee, D. W., Kim, C. M., Lee, I. S. and Park, H., “Characteristics of Disinfected Byproducts in Tap Water of Seoul,” *J. Inst. Ind. Technol.*, **12**, 97~102(2004).