

대구수돗물의 THMs 생성특성

A Study on Characterization of THMs Formation in Tap Water in Daegu

배기수 · 백윤경 · 류기성 · 신상희 · 이찬형[†]

Gi-soo Bae · Yoon-kyung Baek · Ki-sung Ryu · Sang-hee Shin · Chan-hyung Lee[†]

대구광역시 상수도사업본부 수질연구소

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Daegu

(2011년 10월 25일 접수, 2011년 12월 30일 채택)

Abstract : The occurrence of THMs, the characteristics of THMs formation and removal of THMs were investigated. The treatment train of M plant consists of prechlorination, flocculation, sedimentation, filtration, ozonation, activated carbon and postchlorination. The study of THM formation indicated that about 92% of the THMs were formed in the flocculation/sedimentation/filtration process which affected by prechlorination. The formation of THMs was highly correlated to $KMnO_4$ consumption and water temperature in raw water. The regression model had showed 0.72~0.80 of determination coefficient so it could be used to predict the amount of THMs formation in finished water. Compared to the prechlorination process, the THMs formation was reduced in interchlorination process. With the addition of PAC, fewer THMs were formed in PAC-chlorination process than in chlorination-PAC process. Our results showed that air stripping could be used to remove the existing THMs.

Key Words : Trihalomethane, Interchlorination, Formation Potential, Correlation

요약 : 정수처리공정별 THMs 현황과 영향인자와의 상관성 등 생성특성을 분석하고 저감할 수 있는 운영방안을 연구하였다. M정수장의 처리공정은 전염소-응집-침전-여과-오존-활성탄-후염소로 구성되어 있다. 공정별 THMs 농도는 응집침전여과의 기본공정에서 92~93%가 생성되어 전염소처리공정이 주된 영향을 미치는 것으로 조사되었다. THMs 생성과 원수수온, $KMnO_4$ 소비량의 결정계수는 0.80, 0.72로 높게 나타났으며 정수장에서는 원수수온과 $KMnO_4$ 소비량으로 생성농도를 예측하는 것이 효율적이라 판단된다. 중염소처리를 한 경우 정수 THMs이 전염소처리의 48% 수준으로 나타나, 염소 주입지점만 변경하는 중염소 처리가 THMs 저감에 유용한 방식으로 판단된다. 전구물질 제거를 위한 분말 활성탄 실험에서는 전염소 앞단에 주입하는 경우에 THMs 생성이 줄었다. 생성된 THMs 제거에는 에어스트리핑 방법이 효과가 있었다.

주제어 : 트리할로메탄, 중염소, 생성능, 상관

1. 서론

음용수의 소독은 20세기 초반부터 음용수에서 유해균을 제거하거나 불활성화하기 위해 사용되었다. 소독제는 음용수로부터 유해균의 제거 외에 정수처리에 있어 산화제로 사용된다. 정수공정에서 맛, 색도의 제거, 철과 망간의 산화, 응집과 여과 효율 증진, 침전지와 여과지의 조류 성장 저해, 급수계통의 미생물학적 재성장 방지 목적으로 사용된다. 염소는 살균력이 뛰어나고 잔류소독능이 높고 가격이 저렴하여 정수처리공정에서 가장 많이 사용되고 있는 수처리제이다.¹⁾

염소는 원수중에 존재하는 천연유기물(NOMs; Natural Organic Matters)과 반응하여 소독부산물(DBPs; Disinfection By-Products)을 생성시켜 인체에 유해성을 나타낸다. 염소소독부산물은 트리할로메탄(THMs; Trihalomethanes), 할로아세트익 에시드(Haloacetic Acids), 할로아세토니트릴(Haloacetonitriles), 할로케톤(Haloketones) 등이 있고 분석기술의 발달로 발견되는 종류는 계속 증가하고 있으며 국내외적으로 소독부산물에 대한 규제를 추가하고 강화해가는 추세이다.

트리할로메탄은 메탄의 수소원자 4개 가운데 3개가 염소, 브롬, 요오드 등 할로겐원자로 치환된 물질로, 클로로포름

(Chloroform), 디브로모클로로메탄(Dibromochloromethane), 브로모디클로로메탄(Bromodichloromethane), 브로모포름(Bromoform)의 네 가지 물질을 총칭하여 총트리할로메탄으로 부른다.

이번 연구는 대표적인 염소소독부산물인 THMs의 정수처리공정별 생성현황, 영향인자와의 상관성 등 생성특성을 분석하고 THMs 생성을 저감시킬 수 있는 운영방안을 찾고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 분석대상 및 방법

2009년 1월부터 2010년 12월까지 대구시 M정수장의 원수 및 공정수(침전수, 여과수, 오존처리수, 활성탄처리수, 정수, 관말수)를 대상으로 월 1회 이상 분석하였다.

M정수장은 시설용량 80만톤/일, 평균생산량 43만톤/일의 시설로 처리공정은 착수정, 혼합응집, 침전, 모래여과, 오존처리, 활성탄처리, 후염소 공정의 고도처리공정으로 구성되어 있으며 원수수질은 Table 1과 같다.

[†] Corresponding author E-mail: chlee@daegu.go.kr Tel: 053-670-2651 Fax: 053-670-3905

Table 1. Raw water quality (2009~2010)

	pH	Temp (°C)	Turbidity (NTU)	TOC (mg/L)
Max	9.3	31.1	447.0	6.09
Min	6.9	1.5	2.8	1.81
Avr	8.1	15.8	23.9	2.84

파이로트플랜트는 전염소/전오존, 혼화응집, 침전, 모래여과, 오존처리, 활성탄처리, 후염소의 공정으로 운영되며 계절당 50톤/일의 시설을 2계열 운영하고 있다.

실험방법은 먹는 물 수질공정시험기준과 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였으며, THMs 분석은 Teklink3100 concentrator Purge & Trap을 사용하여 HP 7890 series GC-ECD로 분석하였다. THMFP (THM Formation Potential)는 일본상수방법에 따라 시료를 pH 7.0±0.2, 온도 20°C, 반응시간 24시간, 24시간 후의 유리잔류염소 1~2 mg/L의 조건에서 실험하여 생성된 THMs를 측정하였다.

월별 THMs 발생현황과 공정별 THMs 분석은 M정수장의 자료를 이용하였고, 파이로트플랜트에서는 염소 주입 지점에 따른 THMs 생성실험을 하였다. 다른 실험은 실험실에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 월별 THMs 발생현황

정수의 월별 THMs의 생성현황을 Fig. 1에 나타내었다. 월별 정수 THMs 농도는 평균 0.037 mg/L, 최대 2010년 8월 0.085 mg/L, 최소 2009년 1월 0.005 mg/L이며, 7~8월에 평균 0.070 mg/L로 높게 생성되었다. 최대값이 나타난 2010년 8월은 원수 TOC 6.09 mg/L로 유기물질이 많이 유입되어 THMs가 높게 생성되었다. 계절별로는 여름철에 높게 나타나고 겨울철에 낮게 나타났다. 2010년 1월의 THMs 농도가 높은 것은 낙동강 원수에 암모니아성 질소농도가

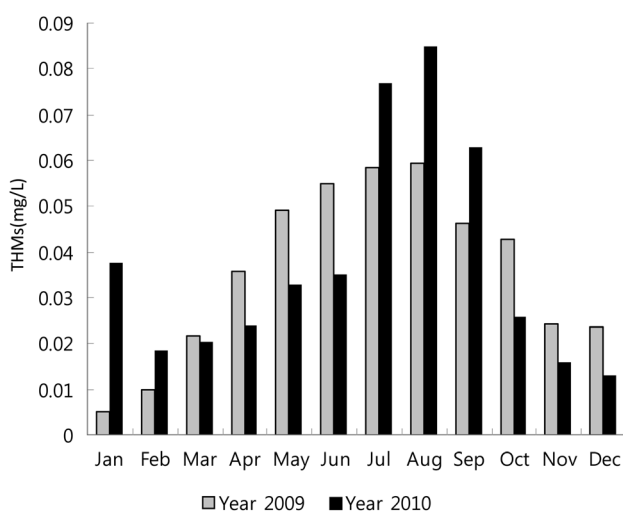


Fig. 1. Monthly THMs concentration of finished water.

과도하게 높아져 암모니아성질소 제거를 위해 전염소 주입율이 증가하여 THMs 생성이 늘어났다. 여름철 THMs 발생농도가 겨울철에 비해 높게 나타나는 계절별 THMs 발생경향은 국내 수계별 정수장에서 공통적으로 나타나는 현상이다.²⁾

THMs 구성성분의 생성비율은 클로로포름 62% (38~89%), 브로모디클로로메탄 29% (11~51%), 디브로모클로로메탄 7% (0~19%)로 클로로포름의 생성량이 가장 많았고 브로모포름은 생성되지 않았다. 할로겐족 원소중에서 염소가 브롬이나 요오드보다 반응성이 좋아 THMs 전구물질인 유기물과 주로 반응하여 THMs중에서 클로로포름의 비율이 높다고 판단된다.³⁾

3.2. 공정별 THMs 분석

정수공정별로는 전염소 처리후 응집침전수에서 연평균 0.029~0.030 mg/L, 모래여과수 0.033~0.035 mg/L, 오존처리수 0.034~0.035 mg/L, 활성탄수 0.034~0.036 mg/L, 후염소처리 한 정수에서 0.036~0.037 mg/L이 생성되었고 관말에서 0.040~0.041 mg/L로 나타나 정수처리후 배급수계통에서도 THMs가 생성되는 것으로 나타났다. 정수처리공정에서 제거가 용이하지 않은 천연유기물중 저분자 또는 친수성 유기물이 정수중에 남게 되어 배급수계통에서 잔류염소와 반응하여 THMs가 생성되는 것으로 판단된다. 정수장에서는 관말의 잔류염소 농도를 0.1 mg/L 이상으로 유지하기 위해 배수관망이 복잡하고 긴 지역일수록 정수장에서 고농도를 주입하여 관말의 잔류염소를 유지하는데, 과염소주입을 지양하고 배수관망의 중간지점에서 염소재주입을 고려함으로 소독부산물 최소화와 소독제량 절감효과를 얻을 수 있다.⁴⁾

오존처리 전후의 농도차이가 나지 않아 오존처리는 THMs 제거에 영향을 미치지 못하며, 활성탄처리 전후에서도 농도차이가 나지 않아 M정수장에서 사용하는 활성탄(BAC)은 현재 THMs제거능이 없는 상태라고 판단된다.

정수처리공정에서 발생하는 THMs의 생성비율은 침전수에서 78~84%, 모래여과수에서 9~14%, 응집침전여과의 기본공정에서 92~93%가 생성되어 전염소처리공정이 THMs 발생에 주로 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 활성탄수에 후염소 처리한 정수에서 3~5%생성되며, 관말은 정수보다 8~12% 정도 더 생성되었다.

3.3. THMs 영향인자와의 상관관계

소독부산물 생성에 영향을 미치는 인자에는 전구물질의 농도와 특성, 수온, pH, 접촉시간, 잔류하는 소독제의 농도 등이 있다.^{5,6)} THMs 생성에 영향을 미치는 인자를 찾기 위해 원수의 수질인자와 정수처리공정별 생성 THMs 농도의 상관관계를 분석하였다.

상관분석결과 공정별 처리수와 관련있는 원수 수질인자는 수온과 유기물농도를 나타내는 KMnO₄소비량, TOC항목과 상관관계수가 높게 나타났으며 전염소주입율과는 0.3 정도로 낮게 나타났다.

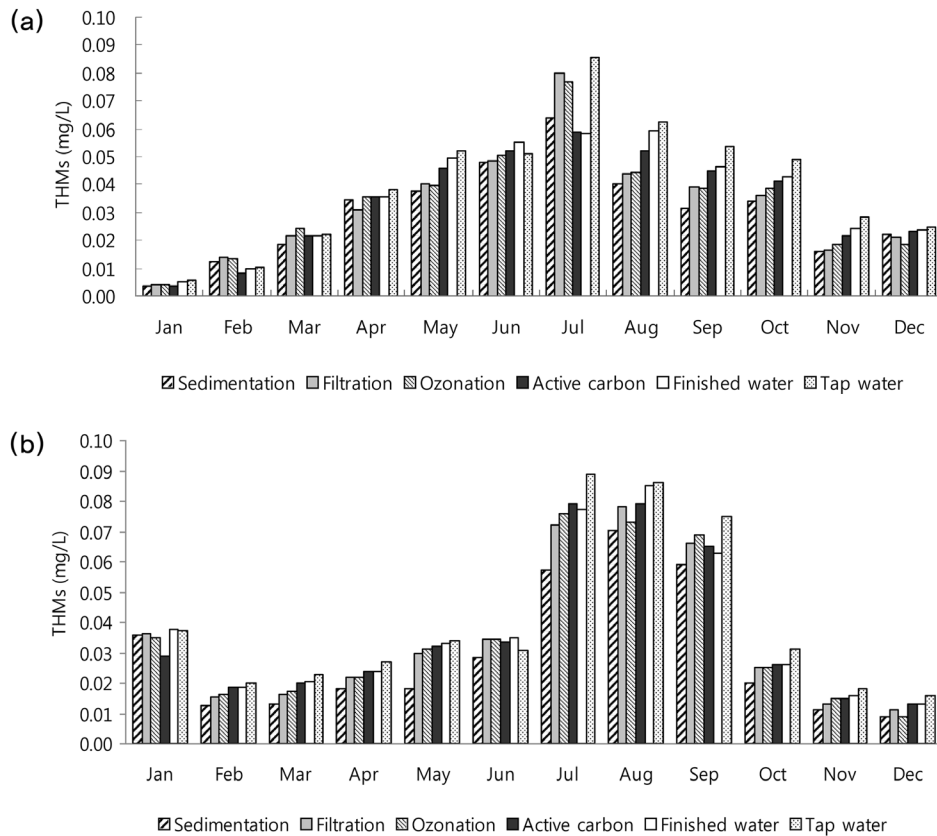


Fig. 2. THMs concentration at purification process ((a) year 2009, year 2010).

Table 2. Correlation between the parameters of raw water quality and THM on purification process (2009~2010)

	Sedimentation	Filtration	Ozonation	Active Carbon	Finished Water	Tap Water
Water Temp.	0.745	0.784	0.799	0.839	0.819	0.809
Prechlorination	0.360	0.287	0.241	0.208	0.321	0.227
SS	0.535	0.525	0.483	0.532	0.548	0.482
KMnO ₄ Consumption	0.837	0.837	0.808	0.800	0.801	0.785
Turbidity	0.539	0.532	0.492	0.528	0.537	0.486
TOC	0.840	0.826	0.804	0.784	0.782	0.778
UV ₂₅₄	0.578	0.597	0.561	0.575	0.571	0.546
UV ₂₆₀	0.574	0.592	0.556	0.571	0.567	0.541

3.3.1. 수온과 THMs 생성

정수 THMs과 수온은 매우 유사한 경향을 나타내는데 수온이 20℃ 이상 되는 여름철의 THMs 농도가 수온이 6℃ 이하인 겨울철에 비해 2배 이상 높게 생성되었다. 수온에 따른 THMs 생성차이는 미국이나 서울에서 10℃ 이상의 따뜻한 물에서 발생하는 THMs 농도가 10℃ 미만일 때와 비교하여 2배의 차이가 나는 것과 유사하다.⁷⁻⁹⁾ THMs과 수온은 강한 상관관계를 나타내며, 수온이 15℃ 이상이면 생성 THMs은 0.03 mg/L 이상을 나타낸다. 결정계수는 0.80으로 매우 높은 편으로 나타나 수온에 따라 THMs 농도를 예측할 수 있어, 정수장에서는 두 항목의 관계를 이용하여 자체 설정한 THMs 농도에 수온이 근접하면 집중적으로 분석하고 대비할 수 있다. 수온이 높은 시기에 THMs이 높게 발생하는 것은 수온의 상승에 따른 화학반응속도 촉진과 염소요구량의

증가에 기인한 것으로 판단된다. 수온은 THMs 생성에 있어 전구물질과 염소와의 반응속도를 좌우하는 영향인자로 정수장에서 THMs 발생량은 계절에 따라 여름철에는 증가하고 수온이 낮은 겨울철에는 감소하는 추세를 보이고 있다.

원수의 성상이 같은 경우 수온에 따른 THMs 생성변화를 조사하기 위해 동일 원수를 대상으로 수온별로 THMFPP 실험을 하였다.

4℃를 기준하면 10℃에서 1.5배, 20℃에서 1.9배, 35℃에서 3.4배, 45℃에서 4배의 THMs 농도를 나타내었다. 구성성분별로는 클로로포름이 69%에서 85%로 늘어났으나 브로모디클로로메탄은 26%에서 13%로, 디브로모클로로메탄은 6%에서 2%로 줄어들어 온도증가에 따른 클로로포름의 증가가 THMs 증가에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

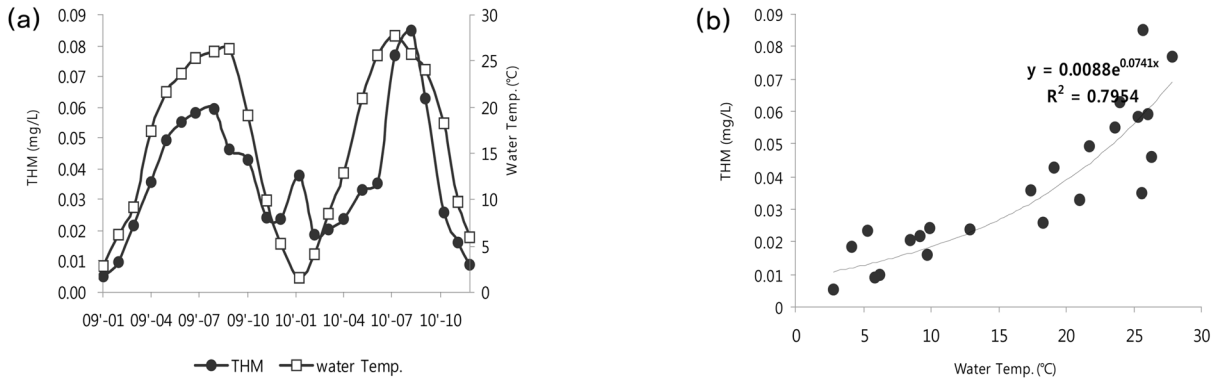


Fig. 3. Raw water temp. and THMs of finished water ((a) monthly variation, (b) correlation).

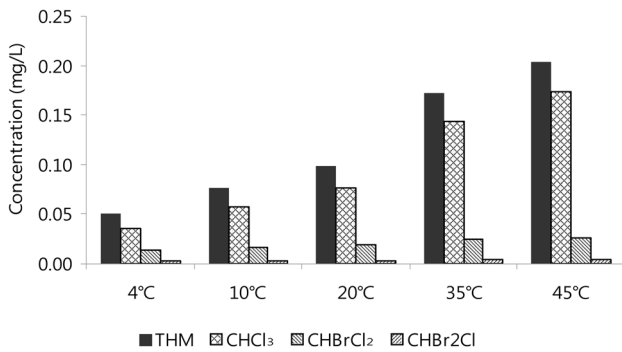


Fig. 4. Effect of water temp. on the speciation of THMs.

3.3.2. 유기물항목과 THMs 생성

천연유기물이 소독부산물의 전구물질로 작용하므로 유기

물 농도 변화에 따라 THMs 생성이 달라질 수 있다. 원수중 유기물 농도의 지표인 TOC, KMnO₄소비량과 정수 THMs의 월변화를 조사하였다.

유기물 농도와 THMs 생성은 비슷한 경향을 나타내므로, 유기물 농도에 따라 THMs 생성량을 추정할 수 있다. THMs 분석은 전처리, 고가 장비, 숙련된 인력이 필요하므로 분석은 전문기관에서 하고 정수장에서는 예측할 수 있도록 하면 효율적인 정수공정운영에 도움이 되리라 생각된다. 상관분석결과 THMs과 관련있는 원수 수질인자중 KMnO₄소비량과 TOC항목의 결정계수가 0.72, 0.65로 높게 나타나는데 현장에는 고가의 TOC장비보다 쉽게 측정할 수 있는 KMnO₄소비량을 가지고 THMs의 농도를 예측하는 것이 효율적이라 판단된다.

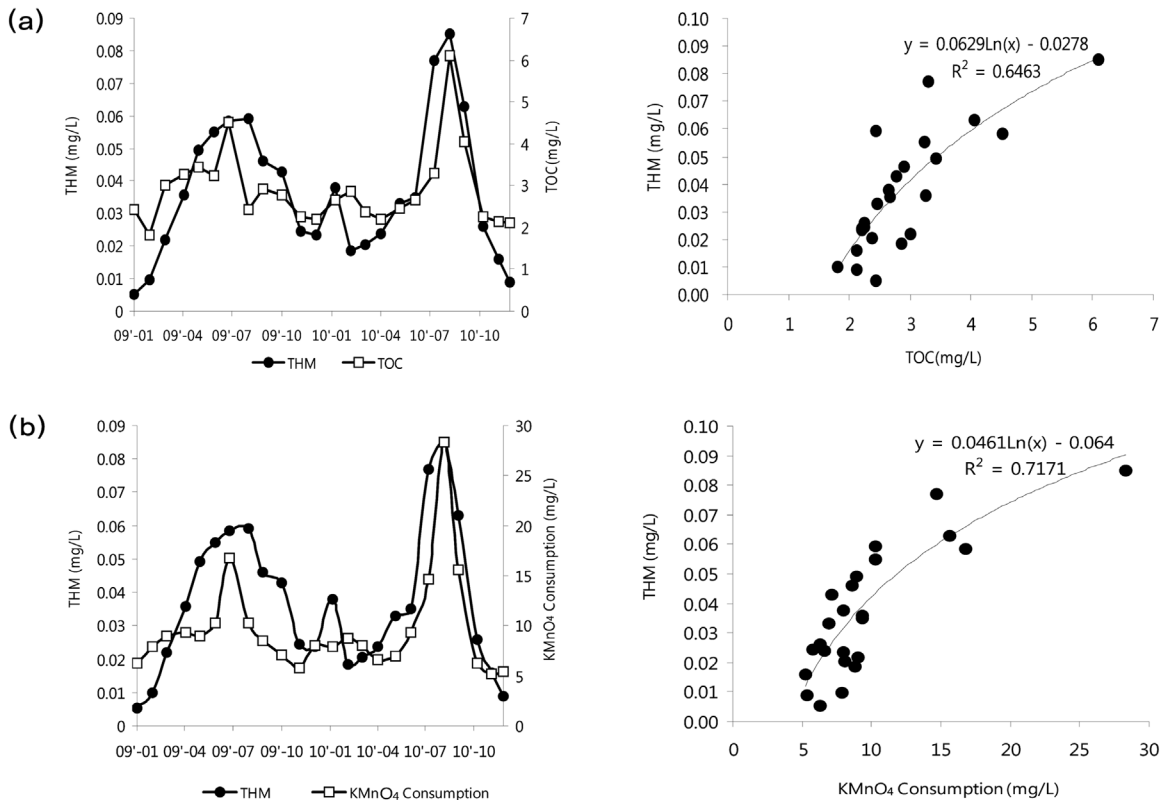


Fig. 5. Organic material of raw water and THMs of finished water((a) TOC, (b) KMnO₄ consumption).

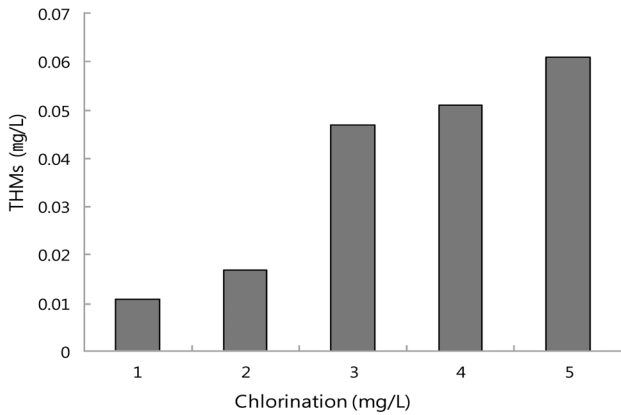


Fig. 6. Effect of chlorination on the formation of THMs.

3.3.3. 염소주입율과 THMs 생성

전염소 주입율과는 상관관계가 낮게 나타나는데 정수장의 전염소주입율은 응집효과 증진과 미생물 감소, 암모니아성 질소 제거등 원수의 성상에 따라 다르게 주입됨으로 전염소 주입율이 높더라도 여러 목적으로 소비되어 월별 분석하면 THMs 생성과 상관성은 떨어진다.

원수에 염소량을 달리하여 자테스트 시험한 결과 THMs는 염소량이 증가함에 따라 생성량이 증가하였다. 염소를 2 mg/L 이하로 주입한 경우 0.017 mg/L 이하로 나타났고 염소를 3 mg/L 주입하면 THMs의 농도가 0.047 mg/L로 나타나 2배 이상 생성되었으며 그 이후의 증가폭은 둔화되는 것으로 나타났다. 염소 2 mg/L, 3 mg/L 주입에 따라 THMs 생성이 2 배 이상 차이가 남으로, 실험에 사용된 원수 수질(탁도 53 NTU, TOC 4.19 mg/L)에서는 염소 2 mg/L의 주입이 THMs 발생을 현저히 저감시키는 것으로 판단된다.

3.3.4. pH와 THMs 생성

많은 연구자들이 원수의 pH와 THMs 생성은 상관성이 있다고 보고하고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ 낙동강 원수는 갈수기에 조류번식 등으로 pH가 9 이상으로 상승하여 정수장에서는 정수공정효율을 높이기 위해 응집제와 염소주입을 강화하여 운영하고 있다. THMs 생성에 미치는 pH의 영향을 알아보기 위해 낙동강원수에 H₂SO₄와 NaOH을 사용하여 pH를 조정하고

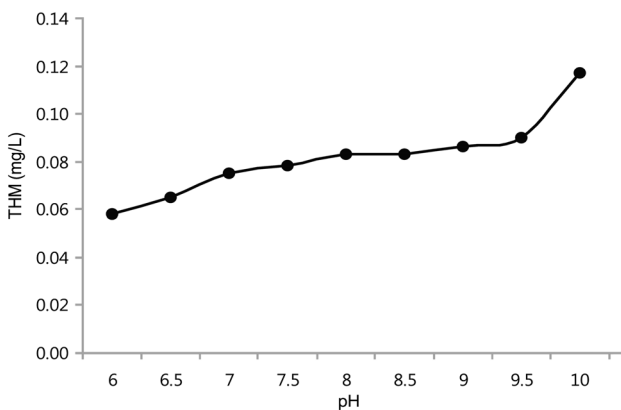


Fig. 7. Effect of pH on the formation of THMs.

THMFP 실험을 실시하였다. pH가 낮을수록 THMs 생성이 감소하였으며, pH 6의 THMFP는 pH 10의 THMFP농도 50% 수준이었다.

pH에 따른 THMs 생성증가는 pH증가에 따른 humic acid의 용존상태의 변화 및 할로젠반응의 촉진 등을 원인으로 들 수 있다.⁶⁾ THMs 생성반응은 염기성 촉매반응(base-catalyzed reaction)으로 pH값의 증가에 따라 생성량은 증가한다. 낮은 pH값에서는 전구물질과 염소가 중간체를 형성하고 있다가 pH값이 증가하면 수화분해되어 THMs량이 증가한다.⁶⁾ 원수 pH가 높은 갈수기에는 황산이나 이산화탄소 등으로 pH를 조정함으로써 응집제와 염소의 주입을 줄이고 THMs 생성도 줄일 수 있다고 판단된다.

3.3.5. 반응시간과 THMs 생성

염소 접촉시간에 따른 THMs 생성을 알아보기 위하여 시간별 THMFP조사를 하였다.

전구물질과 염소의 빠른 반응에 의해 반응초기부터 12시간까지 THMs 생성이 급격히 증가하다가 완만해지는 추세를 보였으며, 12시간 내 THMs 생성량은 72시간까지 생성된 THMs 농도의 59%를 나타내었다.

3.4. 염소 주입 지점에 따른 THMs 생성

파이로트 플랜트의 침전지 전(전염소), 후(중염소)에 염소 주입을 실시하여 주입 지점에 따른 THMs 생성을 조사하였다. 염소주입농도는 여과지 유입전의 잔류염소가 0.15~0.25 ppm

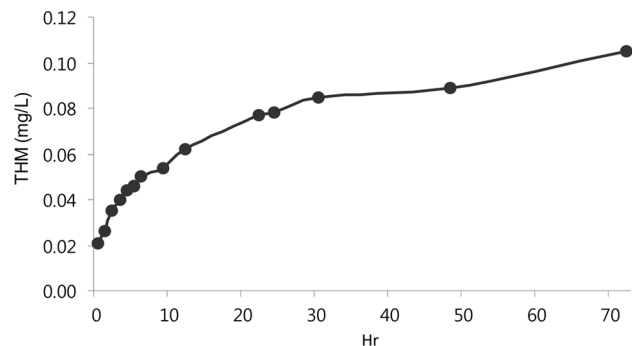


Fig. 8. Effect of THMs as a function of chlorine contact time.

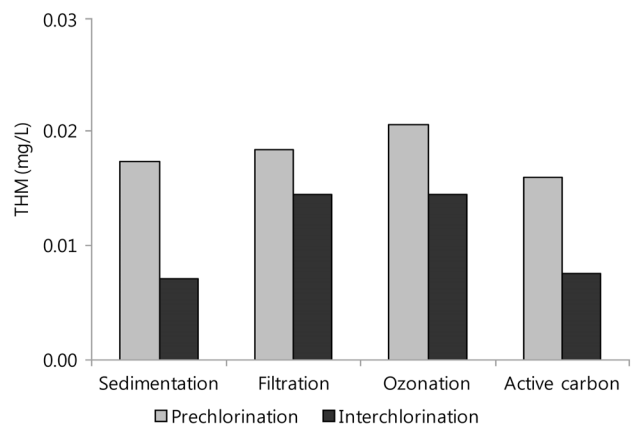


Fig. 9. Effect of THMs as a function of chlorination position.

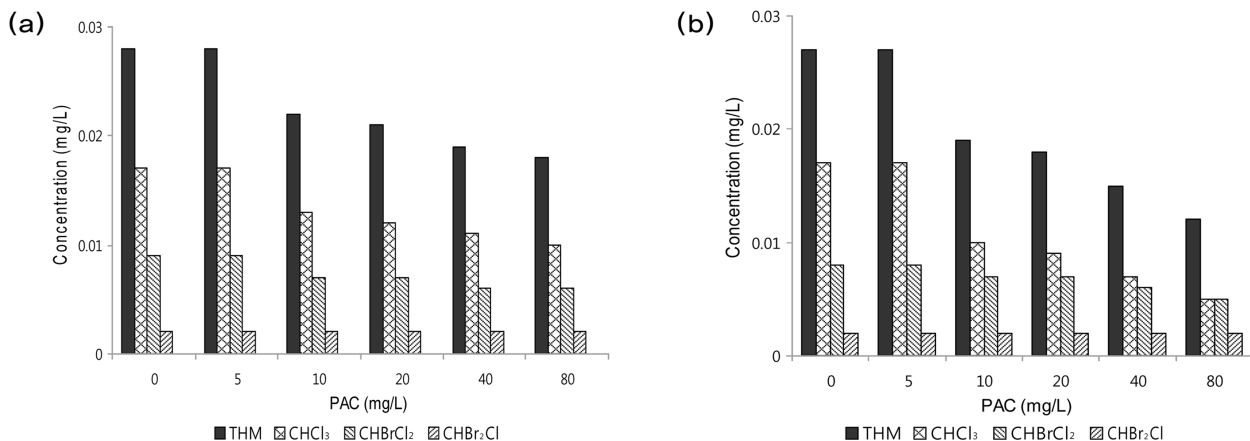


Fig. 10. Effect of PAC on the speciation of THMs((a) chlorination-PAC, (b) PAC-chlorination).

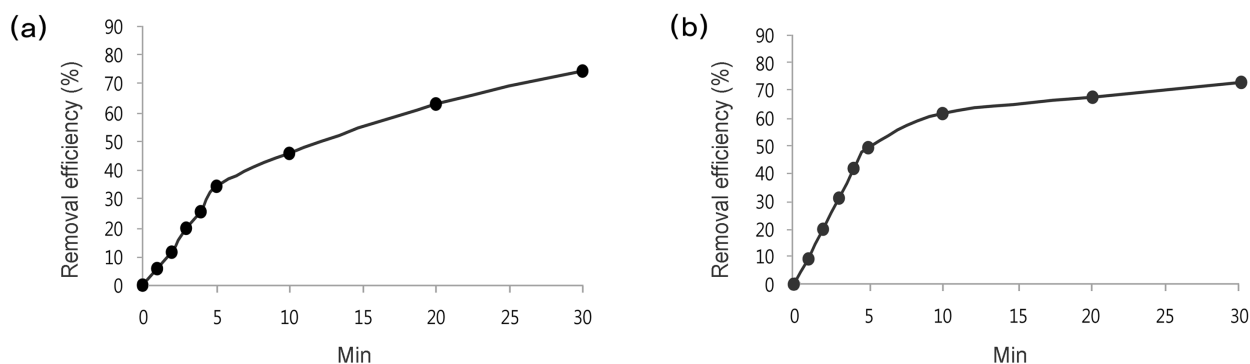


Fig. 11. Removal efficiency of THMs from (a) water by ozonation, (b) water by active carbon in air stripping pilot.

을 유지할 수 있도록 주입하였다.

중염소처리의 THMs는 전염소처리 THMs 농도에 비해 침전수에서 41%, 활성탄수에서 48% 수준으로 나타났는데, 침전공정에서 전구물질이 상당수 제거되어 중염소 주입시 THMs 생성이 감소되었기 때문이다.

대전수도기술연구소의 연구결과¹⁴⁾에 의하면 전염소와 중염소를 같은 농도로 주입하고 후염소처리한 경우 THMs은 중염소-후염소처리가 전염소-후염소처리의 87~96%의 수준으로 생성되었다. 실제 공정에서 중염소를 처리하면 전염소의 주입율보다 낮게 주입됨으로 THMs은 더 낮게 생성될 것으로 판단된다.

M정수장의 경우 착수정에서 전염소 주입을 하고 있는데 착수정에서 염소주입량을 최소화 하고 침전수에 추가로 염소처리를 실시하는 중염소방식이 THMs 생성을 억제시키고 염소사용량을 저감시킬 수 있다고 판단된다. 중염소처리는 전염소처리의 염소주입지점만 변경하여 주입함으로 대폭적인 시설보수 및 증설이 필요하지 않아 실행이 쉽다.

3.5. 분말활성탄 주입에 따른 THMs 생성

분말활성탄(Powdered Activated Carbon)의 THMs 전구물질과 생성된 THMs의 제거능력을 조사하기 위해 분말활성탄을 넣지 않는 경우와 분말활성탄을 농도별로 넣은 경우를 자 테스트하였다. M정수장은 전염소주입후 분말활성탄주입시

설이 설치되어 염소성분이 분말활성탄에 흡착되어 흡착능에 영향을 미치므로 전염소-분말활성탄 방식과 분말활성탄-전염소 방식으로 시험하여 비교하였다.

두 경우 모두 분말활성탄 5 ppm에서는 제거효과가 없었으며, 10 ppm 이상부터 제거효과가 나타났다. 분말활성탄-전염소 방식의 THMs 농도가 전염소-분말활성탄 방식보다 분말활성탄 10 ppm에서는 13.6%, 분말활성탄 80 ppm에서는 33.3% 낮아 분말활성탄을 먼저 주입한 후 전염소를 사용하는 방식이 THMs 생성을 줄일 수 있다.

3.6. Air stripping

에어스트리핑은 용존상태의 휘발성유기화합물을 공기를 이용하여 액상에서 기상으로 전달시키는 기술이다. THMs은 구성성분이 휘발성 유기화합물이므로 에어스트리핑 적용이 가능하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 2 L 비이커에 오존처리수와 활성탄처리수를 넣고 공기량 220 mL/min으로 포기하여 포기시간별로 THMs을 조사하였다.

두 경우 모두 포기시간 5분 내에 급격히 제거율이 증가하였고 차츰 완만한 제거율을 나타내었다. 30분 포기 후 THMs 제거율은 오존처리수 74.3%, 활성탄수 72.7%로 비슷하게 나타났다. 5분 내 제거율은 활성탄수에서 높게 나타나지만 현장 적용 시에는 오존처리수에 에어스트리핑을 하는 것이 활성탄에 부하를 줄여 활성탄의 수명을 연장할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

월별 정수 THMs 생성농도 중 최대는 2010년 8월의 0.085 mg/L, 최소는 2009년 1월의 0.005 mg/L로 나타났으며, 구성 성분비율은 클로로포름이 62%로 가장 많았다. 공정별 THMs 농도는 응집침전여과의 기본공정에서 92~93%가 생성되어 전염소처리공정이 THMs발생에 주로 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

THMs생성 영향 인자중 원수 수온, KMnO₄소비량, TOC 항목의 결정계수는 0.80, 0.72, 0.65로 높게 나타났으며 정수장에서는 수온과 KMnO₄소비량으로 생성농도를 예측하는 것이 효율적이라 판단된다.

염소 주입을 실험에서는 실험에 사용된 원수 수질(탁도 53 NTU, TOC 4.19 mg/L)의 경우 염소 2 mg/L의 주입이 THMs 발생을 현저히 저감시키는 것으로 조사되었다. 중염소처리를 한 경우 THMs이 전염소처리의 41~48%수준으로 검출되므로 THMs 생성 저감에 유용한 방식으로 나타났다.

분말활성탄을 주입하고 전염소처리하는 방식이 THMs 생성을 줄였으며, 생성된 THMs을 제거하기 위한 air stripping의 현장 적용은 오존처리수에 에어스트리핑을 하는 것이 활성탄에 부하를 줄여 활성탄의 수명을 연장할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Sadiq, R. and Rodriguez, J., "Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review," *Sci. Tot. Environ.*, **321**, 21~46(2004).
2. 김진근, 정상기, 신창수, 조혁진, "국내 정수장의 소독부산물 생성 특성", *상하수도학회지*, **19**(3), 301~311(2005).

3. 가길현, "정수처리공정 최적운영 관리방안에 관한 연구," 서울시립대학교 대학원 박사학위논문(2009).
4. 신형순, 최필권, 김종수, 최일우, 김상훈, 김태현, 이경희, 이수문, 장은아, 정연훈, 김주열, "소독부산물 최소화를 위한 운영조건 연구", *상하수도학회지*, **19**(3), 330~337(2005).
5. Golfopoulos, S. K. and Nikolaou, A. D., "Survey of disinfection by-products in drinking water in Athens, Greece," *Desalination*, **176**, 13~24(2005).
6. 남상호, 이운기, "THM 분석에 있어서의 영향인자에 관한 연구," *한국환경위생학회지*, **18**(2), 88~91(1992).
7. Chen, W. J. and Weisel, C. P., "Halogenated DBP concentrations in a distribution system," *J. Am. Water Works Assoc.*, **90**(4), 151~163,(1998).
8. 김상운, "상수도 시스템에서의 염소 소독부산물 생성과 제어," 서울시립대학교대학원 박사학위논문(2009).
9. 장현성, 이도원, 김창모, 이인숙, 이수원, 박현, "서울시 수돗물 배급수 계통에서 소독부산물 분포특성," *화학공학*, **44**(2), 216~226(2006).
10. 이동석, 민병섭, 박선구, 김정화, 류재근, "정수장에서 소독부산물의 생성특성", *수질보전학회지*, **20**(1), 55~62(2004).
11. 가길현, 배민호, 이준호, 안치화, 한인섭, 민병대, "정수처리 공정별 THMs 발생 특성과 저감방안에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **30**(7), 721~728(2008).
12. Peters, C. J., Young, R. J. and Perry, R., "Factors influencing the formation of haloforms in the chlorination of humic substances," *Environ. Sci. Technol.*, **14**(11), 1391~1395(1980).
13. Liang, L. and Singer, P., "Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(13), 2920~2928(2003).
14. 박은주, 김미숙, 김미정, 정제길, 오준세, "소독부산물 저감을 위한 정수처리방안 연구," *대전광역시 수도기술연구소* (2007).