Printed in the Republic of Korea
ANALYTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 28, No. 1, 58-64, 2015
http://dx.doi.org/10.5806/AST.2015.28.1.58

Concentration distributions and formation characteristics of trihalomethanes in drinking water supplies to rural communities

Hekap Kim★ and Seyoung Kim

Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea
(Received January 16, 2015; Revised February 3, 2015; Accepted February 6, 2015)

농촌지역 마을상수 중 trihalomethanes의 농도 분포 및 생성 특성

김희갑★ · 김세영

강원대학교 환경학과
(2015. 1. 16. 접수, 2015. 2. 3. 수정, 2015. 2. 6. 승인)

Abstract: This study aimed to investigate the concentration distributions and formation characteristics of trihalomethanes (THMs) in drinking water supplies to rural communities. Water samples were collected twice from 40 rural households located on the outskirts of Chuncheon city of Gangwon Province in the summers of 2010 and 2011, and urban drinking water samples were collected from 20 faucets during the same period in 2011 for comparison purpose. Water temperature, pH, and residual chlorine (total and free) concentrations were measured in the field, and samples were analyzed for dissolved organic carbon (DOC) and THM concentrations in the laboratory. The average DOC concentrations in rural water samples were not greatly different between groundwater (n = 20) and surface water (n = 20) which were used as sources for drinking water (1.81 vs. 1.91 mg/L). However, the average concentrations of total THMs (TTHMs) in groundwater (9.77 μg/L) were much higher than those in surface water (2.85 μg/L) and similar to those in urban drinking water samples (10.8 μg/L). Unlike urban water supply, rural water (particularly groundwater) contained more brominated THM species such as dibromochloromethane (DBCM), suggesting its relatively high content of bromide ion (Br^-). This study showed that rural water supplies have different THM formation characteristics from urban water supplies, probably due to their differences in source water quality properties.

요 약: 이 연구에서는 농촌지역 마을상수 중에 함유된 trihalomethanes (THMs)의 농도 분포 및 발생 특성을 파악하였다. 농촌지역의 마을상수 시료는 2010년과 2011년 여름에 강원도 춘천시의 40가정에서 두 차례에 걸쳐 채취하였고, 도시상수 시료는 2011년의 같은 기간에 비교 목적으로 20 곳의 수도꼭지에서 채취하였다. 현장에서 수온, pH 및 잔류염소(총 및 유리) 농도를 측정하였고, 물 시료는 실험실에서 용존유기탄소(DOC)와 THMs 농도에 대해 분석하였다. 마을상수 중 DOC의 평균 농도는 원수로 사용된 지하수와 지표수 간에 거의 차이를 보이지 않았다(1.81 vs. 1.91 mg/L). 그러나 마을상수의 지하수에서(9.77 μg/L)의 총 THMs(TTHMs)의 평균 농도는 지표수보다(2.85 μg/L) 훨씬 더 높았고, 도시상수 중 TTHMs의

★ Corresponding author
Phone : +82-(0)33-250-8577 Fax : +82-(0)33-259-5670
E-mail : kimh@kangwon.ac.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons. org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

평균 농도(10.8 μg/L)와 유사하였다. 도시상수와는 다르게, 마을상수(특히 지하수)는 dibromochloromethane (DBCM)과 같은 더 많이 브롬화된 THMs을 함유하였는데, 이는 마을상수의 원수 중에 bromide ion(Br-)이 비교적 높은 수준으로 존재함을 암시하였다. 이 연구를 통해 마을상수는 도시상수와는 다른 THMs 생성 특성을 나타내는 것을 알 수 있었는데, 이것은 아마도 원수의 수질 특성의 차이에서 비롯되는 것으로 생각된다.

Key words: GC-MS, purge and trap, trihalomethanes, rural drinking water supply

1. 서 론

환경부의 '상수도 통계'[1]에 따르면, 2013년 말 현재 우리나라의 상수도 보급률은 98.5%로 호주, 독일, 일본, 덴마크 등의 OECD 국가들의 보급률(97.2-99.7%)과 유사한 수준으로 매우 높은 편이다. 상수도 보급률을 지역 규모별로 볼 때 7개 특・광역시가 99.9%로 가장 높고, 시 지역은 99.3%, 읍 지역은 96.4%인 반면에 면 단위의 농・어촌 지역은 89.8%에 불과하다. 또한 상수도를 보급 형태별로 구분할 때, 광역상수도(23.3%)와 지방상수도(74.0%)가 대부분을 차지하고 있는 반면에, 농・어촌 지역에서 지방자체단체가 공급하는 마을상수도(1.8%)와 주민들이 공동으로 설치하여 관리하는 소규모급수시설(0.9%)은 둘 다 합쳐도(이하 마을상수로 통칭함) 2.7%에 지나지 않을 정도로 매우 적은 편이다.

특히, 강원도 지역은 대부분이 산지로 구성되어 있는 지형적인 특징을 갖고 있다. 따라서 2010년 현재 강원도민들 중에서 마을상수를 이용하고 있는 인구는 약 125,000명으로, 전체 강원도민들 중 약 8.1%에 이르고 있을 정도로 전국적으로 높은 편이다.[2] 그렇지만 아직까지 마을상수의 수질에 관한 체계적인 연구나 조사는 미흡하기 때문에, 기본적인 현황조차 제대로 파악되어 있지 않은 실정이다.

강원도 내 16 개 시・군의 162곳을 대상으로 마을상수의 상수원에 대하여 조사한 결과에 따르면, 계곡수(이하 지표수)와 지하수가 원수로 각각 41% 및 45% 사용되었으며, 86곳(53%)이 먹는물 수질기준을 충족하지 못하는 것으로 나타났다.[2] 특히 미생물과 탁도의 미충족률이 각각 70.9% 및 36.0%로 매우 높았고, 질산성 질소, 불소 및 알루미늄도 7-9%이었다. 또한 2007년도에 강원도 C시의 마을상수, 광천수 및 우물물에 함유된 금속 및 음이온의 농도 분포 현황을 조사한 결과에서는, 비소와 질산염이 먹는물 기준치를 초과한 비율이 40%를 넘어, 향후 이에 대한 관리의 필요성이 제기되었다.[3]

먹는물 수질기준 항목 중 발암성에 대해 B2 (probable human carcinogen) 그룹에 속하는 trichloromethane (TCM, chloroform), bromodichloromethane(BDCM) 및 tribromomethane(TBM, bromoform)과 C(possible human carcinogen) 그룹에 속하는 dibomochloromethane(DBCM)은[4] 먹는물의 염소 소독 결과 생성되는 염소소독부산물(disinfection by-products, DBPs)로 소위 trihalomethanes (THMs)이라고 한다. 국내의 도시상수에서 4가지 THMs의 농도의 합(total trihalomethanes, TTHMs)은 10 μg/L 내외로 비교적 낮은 편이다.[5-6] 따라서 국내 먹는물 수질기준(100 μg/L)을 충족하지 못하는 경우는 거의 없지만, 도시상수를 조리, 설거지, 샤워 등의 목적으로 사용할 경우, 인체에 대한 건강 영향이 우려된다는 사례들이 보고되어,[5,7,8] 지속적인 연구와 모니터링이 필요하다. 그렇지만, 마을상수에서 THMs을 포함한 DBPs의 농도 분포에 관한 연구는 아직까지 수행된 바가 없다. 따라서 비록 소수이지만 소외 계층에 속하는 산간 농촌지역 주민들의 건강을 보호하기 위해, 이들에게 공급되는 먹는물 중 DBPs 등의 유해물질 농도 분포에 관한 연구는 필요하다.

그러므로, 이 연구에서는 강원도 C시에 위치하고 있는 마을상수도 및 소규모급수시설로부터 먹는물을 공급받고 있는 40 가구를 방문하여, 현장에서 수질을 측정하고, 연구실에서는 물 시료 중 용존유기탄소(dissolved organic carbon, DOC) 및 THMs의 농도를 분석하였다. 또한 이 결과를 도시상수와 비교하기 위해, 동일한 시기에 인근의 동주민센터 및 면사무소에서 도시상수 시료를 측정하고 분석하였다. 또한 마을상수 중 THMs의 생성 특성을 알아보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약

THMs 중 TCM, BDCM 및 DBCM은 Acros사(MA,

USA), TBM은 Fluka사(Seelze, Germany)의 제품을 사용하였다. 그리고 sodium thiosulfate($Na_2S_2O_3$)와 methanol은 각각 Fluka와 B&J사(PA, USA)의 제품을 사용하였다. 대체표준물질(surrogate standard, SS)인 1-bromo-3-chloropropane(BCP)은 Aldrich사(MO, USA)의 것을 사용하였다.

각 분석물질과 BCP의 표준원액은 methanol에 1,000 mg/L의 농도로 제조하였다. 제조한 표준원액은 −20 ºC에서 보관하여 필요 시 사용하였다. 제조한 BCP의 표준원액은 100 mg/L로 희석한 후, 검정곡선 작성 및 시료 분석 시 각 시료에 10 μL씩 첨가하였다.

2.2. 현장 측정 및 시료 채취

강원도 춘천시의 면 단위에 소재한 135 개의 마을 상수도 및 소규모급수시설 중에서 1일 평균 급수 양과 인구 수가 많은 40곳을 시료 채취 장소로 선정하였다. 원수 간의 THMs 농도를 비교하기 위하여 20곳은 지하수를, 20곳은 지표수를 원수로 사용하는 가정을 선정하여, 2010년과 2011년 8월부터 10월 사이에 가구별로 연 1회씩 방문하였다. 또한 이 자료를 도시의 도시상수와 비교하기 위하여 춘천시에 위치한 20곳의 동주민센터나 면사무소에서 2011년 8월부터 10월 사이에 도시상수를 채취하였다.

현장에서 물의 pH와 잔류염소(유리 및 총) 농도를 측정한 후, 1 L의 폴리에틸렌 용기에 물 시료를 채취하였으며, 잔류염소를 제거하기 위하여 각 시료에 0.2 g의 sodium thiosulfate를 첨가하였다. 시료 용기에 헤드 스페이스가 없게 하기 위해 용기의 상단까지 물 시료를 가득 채웠다.

2.3. 시료 전처리 및 분석

물 중 THMs은 미국 EPA Method 524.3에 따라 정량 분석하였다.[9] 물 시료 20 mL을 스파저(sparger)에 넣은 후, He 가스(99.999%, UHP grade)를 40 mL/min의 유속으로 20 분 동안 흘려주어 분석물질을 흡착관으로 퍼지(purge)하였다. 이때 흡착관의 충진제로는 70 mg의 Tenax TA(20/35 mesh, Alltech)와 130 mg의 Carboxen 569(20/45 mesh, Supelco)를 사용하였다. 퍼지의 반대 방향으로 40 mL/min 유속의 He 가스를 6 분 동안 흘려 수분을 제거하였다. 흡착관 시료는 열탈착장치(thermal desorber, KNR)를 사용하여 220 ºC에서 4 분 동안 He 가스(20 mL/min)를 흘려 탈착하였다. 탈착 시료는 저온 트랩(−30 ºC, Tenax TA 60/80 mesh, 20 mg)에서 농축하여 300 ºC에서 8 분 동안 재탈착한 후, 150 ºC의 transfer line을 통해 GC/MS(7890A GC/5975C MS, Agilent Technologies)에 주입하였다. GC/MS의 운전 조건을 *Table* 1에 나타냈으며, 지하수 물 시료에 대한 GC 크로마토그램을 *Fig.* 1에 나타냈다. DOC의 농도는 TOC Analyzer (Sievers M5310 C Laboratory, GE Company)로 분석하였다.

Table 1. GC/MS operating conditions for the quantitative determination of THMs in drinking water

	Parameter	Condition
GC	Carrier gas (flow rate)	He (1 mL/min)
	Injector temperature	220 ºC
	Split ratio	20:1
	Column	DB-5 (30 m × 0.25 mm × 0.5 μm)
	Oven temperature programming	40 ºC (2 min) to 200 ºC at a rate of 8 ºC/min, then hold at 200 ºC for 2 min
MS	Temperature	230 ºC
	Mode	EI (70 eV)
	Selected ions (m/z)	83 and 85 for TCM and BDCM; 127 and 129 for DBCM; 173 and 254 for TBM

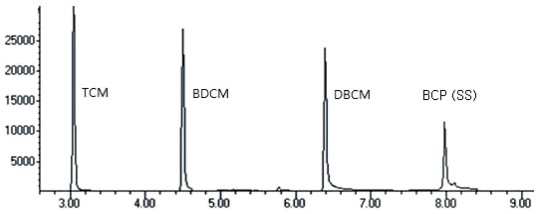

Fig. 1. A total ion chromatogram of trihalomethanes obtained for a rural water sample.

2.4. QA/QC

THMs과 같은 VOCs 시료는 투명 또는 황갈색의 유리 용기에 채취하는 것이 원칙이지만, 이 연구에서는 비교적 많은 양(1 L)의 시료를 폴리에틸렌 용기에 채취하여 아이스박스에 넣어 실험실로 운반한 후 당일에 분석하여, 운반 및 보관 과정에서 오는 분석 오차를 최소화하고자 하였다. THMs의 정량분석 시 추출 효율은 BCP 대체표준물질을 사용하여 보정하였다. THMs에 대한 분석의 재현성은 두 농도 수준(5와 10 μg/L)에 대해 각각 일곱 개의 시료를 분석하여 얻은 결과에 대한 상대표준편차(RSD, %)로 나타냈으며, 4.3-8.6%로 양호하였다. TCM, BDCM, DBCM 및 TBM에 대한 방법검출한계(MDL)는 각각 0.04, 0.04,

Table 2. Recovery percent of THMs obtained by purge and trap

Concentration	TCM	BDCM	DBCM	TBM
5.0 μg/L	93.2	87.3	86.0	84.7
10.0 μg/L	92.2	88.5	83.7	77.1
Mean±SD	92.7±0.52	87.9±0.59	84.8±1.15	80.9±3.78

Table 3. Accuracy of the purge and trap method in two concentration levels

Prepared (μg/L)	Measured (μg/L)			
	TCM	BDCM	DBCM	TBM
5.0 (n=3)	5.00±0.08	5.06±0.07	4.79±0.13	4.92±0.17
15.0 (n=3)	15.2±0.19	15.0±0.12	14.9±0.08	14.9±0.23
Percent difference (%, n=6)	1.50±0.83	1.19±0.89	2.38±2.85	2.58±1.47

0.07 및 0.1 μg/L이었다. 각 분석물질에 대한 분석의 회수율(%)은 분자량이 클수록 낮은 경향을 나타냈는데(*Table* 2), 두 수준(5.0과 10.0 μg/L)에 대해 80-93%로 양호하였다. 또한 두 농도 수준인 5.0과 15.0 μg/L에 대해 정확성을 평가한 결과, 편차율(percentage difference)은 3% 이내로 매우 양호하였다(*Table* 3).

2.5. 자료 분석

마을상수에 대해서는 2010년과 2011년의 평균값을 자료로 사용하여 분석하였다. 통계분석에서 MDL 이하의 측정치는 MDL의 1/2에 해당하는 값을 사용하였다. THMs, TTHMs, DOC, pH 등의 값들을 지하수와 지표수 간에 비교하기 위하여 student *t*-검정을 실시하였다. 동일 분석 항목에 대한 마을상수 전체 시료와 도시상수 간의 비교도 같은 방법으로 분석하였다. 또한 TTHMs의 생성에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해, DOC의 농도, pH, 수온, 유리 및 총 잔류염소 농도를 독립변수로, 그리고 TTHMs의 농도를 종속변수로 정한 후 다중회귀분석을 실시하였다. 자료의 정리 및 통계 처리에는 MS Excel 및 IBM SPSS Statistics (ver. 21)을 사용하였으며, 유의수준(α) 0.05 또는 0.01에서 통계적인 유의 여부를 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. THMs 검출률

Table 4에는 자료를 마을상수-지하수, 마을상수-지표수 및 도시상수-지표수로 구분한 후 THM별로 검출률

Table 4. Detection rate (%) of trihalomethanes in rural and municipal water samples

Type of water	TCM	BDCM	DBCM	TBM
Rural – groundwater (n = 40)[a)]	90.0	100	85.0	0
Rural – surface water (n = 40)[a)]	30.0	60.0	60.0	0
Urban – surface water (n = 20)	100	100	85.0	0

[a)]The number of samples was counted for both the years of 2010 and 2011.

(MDL 이상)을 나타냈다. TBM은 모든 시료에서 검출되지 않았다. 마을상수-지하수(rural-groundwater)에서는 TCM과 DBCM이 각각 90.0 및 85.0%의 높은 검출률을 보였고, BDCM은 모든 시료에서 검출되었다. 마을상수-지표수(rural-surface water)에서 TCM과 BDCM의 검출률은 각각 30.0 및 60.0%로 낮았다. 반면에 도시상수-지표수(urban-surface water)에서 TCM과 BDCM은 모든 시료에서 검출되었고, DBCM도 85.0% 검출되어 가장 높은 검출률을 보였다.

일반적으로 염소 소독의 결과 도시상수의 THMs 중에서 가장 높은 빈도로 검출되는 TCM이[5,7-8] 마을상수-지하수 및 마을상수-지표수에서는 BDCM보다 더 낮은 검출률을 보였다. 이는 마을상수의 원수 중 Br^-의 농도가 도시상수에 비해 더 높고, 그 결과 마을상수에서 HOBr/HOCl의 비가 도시상수에 비해 상대적으로 높아, 염소화된 THMs보다 염소와 브롬이 모두 함유된 THMs이 더 많이 생성되었기 때문이라고 생각한다. 실제로 실험실 내의 모의실험에서 Br^-의 농도를 증가시켰을 때 염소 대신 브롬이 더 많이 함유된 THMs이 더 많이 생성되었으며, 이는 HOBr의 반응 속도가 HOCl보다 더 빠르기 때문인 것으로 추정된다.[10-12] 이에 대해서는 Br^- 농도 측정을 포함한 추후의 연구를 통해 규명할 필요가 있다.

3.2. 마을상수의 수질 특성

Table 5에는 마을상수를 원수에 따라 지하수와 지표수로 구분한 후, THMs의 농도, DOC의 농도, 수온, pH, 총 잔류염소 농도 및 유리 잔류염소 농도의 평균을 서로 비교하였다.

모든 THMs의 평균 농도는 지하수에서 지표수에서보다 더 높았다. 지하수에서 TCM의 평균 농도는 2.81 μg/L로 지표수에서의 0.387 μg/L보다 1% 유의수준에서 높았다(p = 0.00425). 또한 지하수에서 DBCM과

Table 5. Descriptive statistics of the THMs concentrations and the water quality values measured for rural water samples collected in 2010 and 2011[a)]

Water source	Statistic	Concentration (μg/L)				DOC (mg/L)	Water temp. (°C)	pH	Total-Cl (mg/L)	Free-Cl (mg/L)[c)]
		TCM[b)]	BDCM	DBCM[b)]	TTHMs[b)]					
Groundwater (n = 20)	Mean	2.81	2.38	4.57	9.77	1.81	17.6	6.20	0.21	0.13
	SD	3.79	2.65	5.52	9.44	0.77	1.6	0.46	0.12	0.07
	Median	0.727	1.54	1.45	5.47	1.72	17.2	6.22	0.15	0.12
	Range	0.02-12.0	0.141-10.2	0.04-18.3	0.201-30.3	0.434-3.79	15.2-21.0	5.57-7.32	0.09-0.53	0.05-0.27
Surface water (n = 20)	Mean	0.387	1.57	0.891	2.85	1.91	17.1	6.25	0.19	0.094
	SD	0.946	3.09	2.01	4.36	0.90	1.04	0.31	0.09	0.042
	Median	0.02	0.164	0.274	0.565	1.91	16.8	6.27	0.17	0.088
	Range	0.02-3.92	0.02-10.5	0.04-9.11	0.08-13.6	0.457-3.59	15.8-19.3	5.42-6.72	0.09-0.47	0.045-0.20

[a)]These data were obtained from the averages of the values measured in 2010 and 2011.
[b)]Their concentrations were statistically different between groundwater and surface water at the significance level of 1%.
[c)]Their concentrations were statistically different between groundwater and surface water at the significance level of 5%.

TTHMs의 평균 농도는 지표수에서보다 1%의 유의수준에서 더 높았다(각각 p = 000397 및 0.00252). 마을상수의 지하수 및 지표수에서 BDCM의 평균 농도는 각각 2.38 및 1.57 μg/L로 지표수에서 다소 높았지만, 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p = 0.189).

지하수 및 지표수에서 DOC 농도, 수온과 pH의 평균은 각각 약 1.81 및 1.91 mg/L, 17.6 및 17.1 ºC와 6.20 및 6.25로 서로 유사한 수준이었다. 한편 지하수 및 지표수에서 총 잔류염소(total-Cl)의 평균 농도는 각각 0.21 및 0.19 mg/L로 유사한 반면에(p = 0.295), 유리 잔류염소(free-Cl)의 평균 농도는 각각 0.13 및 0.094 mg/L로 5%의 유의수준에서 지하수에서 더 높았다(p = 0.0187). 이러한 잔류염소의 농도는 2011년 도시상수에 대해 측정한 총 잔류염소와 유리 잔류염소의 평균 농도인 0.365 및 0.184 mg/L의 약 50% 수준이었다.

3.3. 마을상수에서 THMs의 생성 인자

마을상수 전체의 자료(n = 80) 중 3 종류 이상의 THM 농도가 검출한계 미만인 경우를 제외한 후, 두 연도의 자료를 평균한 29개의 자료(지하수 19 개, 지표수 10 개)에 대하여 THMs의 생성에 영향을 미치는 인자들을 파악하고자 하였다. TTHMs를 종속변수로, DOC 농도, 수온, pH, 총 잔류염소 농도 및 유리 잔류염소 농도를 독립변수로 놓고 다중회귀분석을 실시하였다. 또한 지표수와 지하수 각각에 대하여도 동일한 분석을 실시하였다.

마을상수 전체 시료(n = 29)에 대해서는 총 잔류염소 농도만이 5% 유의수준에서 통계적으로 유의한(p = 0.012) 진입 변수이었고, 결정계수(R^2)는 0.211로 총 잔류염소가 TTHMs의 농도를 21.1%만을 설명할 수 있음을 보여주었다. 지하수 시료(n = 19)에 대해서도 총 잔류염소 농도만이 5% 유의수준에서 통계적으로 유의한(p = 0.035) 진입 변수이었고, 결정계수(R^2)는 0.235로 총 잔류염소가 TTHMs의 농도를 23.5%의 낮은 수준으로 설명할 수 있음을 보여주었다. 반면에 지표수에 대해서는 어떠한 독립변수도 예측 모형에 진입하지 않았다. 마을상수 전체와 지하수에서 예측된 모형은 각각 TTHMs 농도 = 1.16 + (37.4 × 총 잔류염소 농도)와 TTHMs 농도 = 2.24 + (37.3 × 총 잔류염소 농도)이었다.

지금까지 연구된 DBPs의 생성에는 유기 전구물질을 나타내는 DOC 농도, 방향족 고리 화합물의 함유량을 나타내는 UV_{254}(254 nm에서의 흡광도), DOC 중 방향족 고리 화합물의 비율을 나타내는 SUVA (Specific UV Absorbance, UV_{254}/DOC)뿐만 아니라, 잔류염소 농도, pH, 수온, 반응 시간, Br^-의 농도, NH_3-N 농도 등이 영향을 끼치는 것으로 보고되었다.[13-14] 이 연구에서는 단지 총 잔류염소 농도만이 THMs 생성에 영향을 끼치는 것으로 나타났는데, 이는 마을상수가 갖는 특유한 성질 때문일 수 있다. 도시상수의 원수로 사용되는 호소수에 비해 마을상수의 원수로 사용되는 계곡수나 지하수에서 유기물(DOC)의 농도는 더 높은 편이었지만, THMs의 주요 전구물질인 펄빅산(fulvic acids)과 같은 방향족 고리 화합물은 상대적으로 적게 함유하고 있었기 때문이라고 생각된다. 이에 대한 보다 명확한 설명은 UV_{254}를 측정함으로써 가능하다.

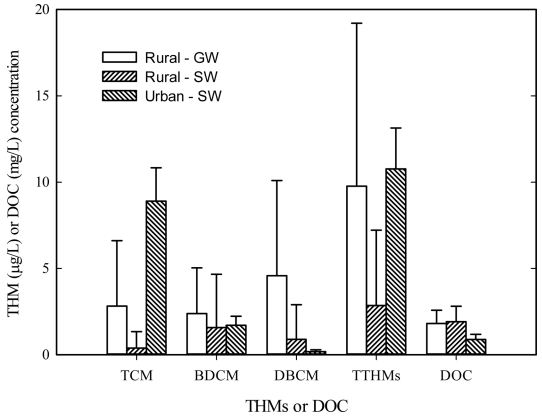

Fig. 2. Average TCM, BDCM, DBCM, TTHMs, and DOC concentrations in rural groundwater, rural surface water, and urban surface water. Error bars indicate standard deviations.

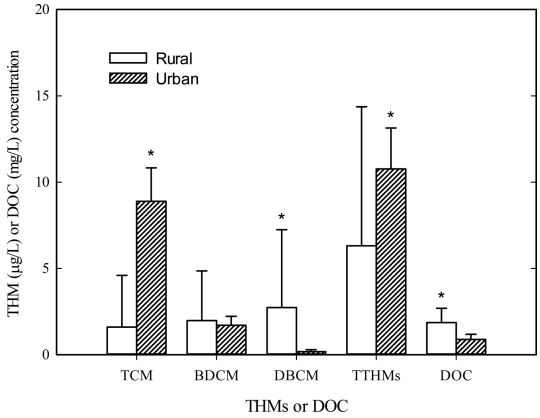

Fig. 3. Average TCM, BDCM, DBCM, TTHMs, and DOC concentrations in rural water and urban water. Error bars indicate standard deviations. Asterisks (*) show that average concentrations are significantly different between the two groups at $\alpha = 0.01$.

3.4. 마을상수와 도시상수의 비교

Fig. 2에서는 마을상수(지하수와 지표수로 구분)와 도시상수에서 세 종류의 THM, TTHMs 및 DOC의 평균 농도를 비교하였다. TCM과 TTHMs의 농도는 도시상수(8.89 및 10.8 μg/L)에서 가장 높은 농도를 나타낸 반면에, BDCM과 DBCM은 지하수를 원수로 사용하는 마을상수(2.38 및 4.57 μg/L)에서 가장 높은 농도를 나타냈다. 특히, 도시상수에서 DBCM의 농도는 마을상수보다 매우 낮아 단지 0.175 μg/L에 불과했다. 한편 DOC의 농도는 도시상수-지표수에서 마을상수보다 더 낮아 0.882 mg/L에 불과했다. 그렇지만 TTHMs의 농도는 도시상수에서 가장 높은 것으로 미루어 볼 때, 도시상수의 원수 중에는 염소 소독에 의해 잘 분해되어 THMs와 같은 DBPs을 더 많이 생성하는 전구물질이 더 많이 함유되어 있음을 추정할 수 있다.

마을상수의 모든 자료를 도시상수 자료와 비교하였다(*Fig.* 3). 마을상수에서 TCM의 평균 농도는 1.60 μg/L로 도시상수의 8.89 μg/L에 비해 20% 수준이었다. 마을상수에서 TTHMs의 평균 농도는 6.31 μg/L로 도시상수의 10.8 μg/L에 비해 낮은 편이었다. BDCM은 마을상수와 도시상수에서 거의 유사한 수준인 반면에, DBCM은 도시상수에서는 매우 낮은 수준으로 존재하였다. BDCM을 제외한 항목들에 대해 마을상수와 도시상수 간에는 1%의 유의수준에서 차이를 보였다.

이와 같이 마을상수와 도시상수에서의 THMs의 농도 분포로 미루어 볼 때, 농촌지역 주민들은 도시의 주민들과는 음용수 사용 과정에서 전혀 다른 노출 패턴을 나타낼 수 있다. 비록 THMs만을 고려해 본다면, THMs 화학종 간의 독성 차이는 크지 않고[4] 마을상수에서 THMs의 농도가 상대적으로 더 낮기 때문에, 농촌지역 주민들이 상대적으로 더 낮은 위해도를 나타낸다고 할 수 있다. 그렇지만, 마을상수는 도시상수와 달리 별도의 물리적 처리 없이 단지 화학적으로만 처리(소독)되고, 적절한 관리가 되지 않는 문제점을 갖고 있다. 게다가 THMs 이외의 다른 DBPs(예, 나이트로사민 등)의 발생 가능성도 있기 때문에, 향후 이에 대한 연구와 관리 방안을 마련하는 것이 필요하다.

4. 결 론

이 연구를 통해 마을상수에도 도시상수와 마찬가지로 염소 소독으로 인해 THMs과 같은 염소소독부산물이 생성된다는 것을 알 수 있었다. 마을상수 중 THMs의 농도 분포는 원수에 따라 크게 차이가 나타났는데, 지표수보다 지하수에서 더 높았다. 실제로 DOC의 농도가 지하수와 지표수 간에 큰 차이가 없었음에도 불구하고 TTHMs의 농도가 3 배 이상 지하수에서 높은 가장 큰 이유는 원수 중 유기 전구물질의 특성이 크게 다르기 때문인 것으로 생각되었다. 즉, 지하수에는 지표수보다 염소 소독 과정에서 THMs으로 분해되기 쉬운 전구물질이 많이 함유되어 있을 것으로 볼 수 있다.

도시상수에 비해 마을상수에서는 상대적으로 더 브롬화된 THMs이 많이 생성되어, DBCM의 농도가 지

하수와 지표수에서 모두 도시상수보다 높게 나타났다. 이는 아마도 Br^-의 농도가 마을상수, 특히 지하수에서 상대적으로 높게 존재하기 때문인 것으로 생각된다. 반면에 도시상수에서 가장 흔히 검출되며, 가장 농도가 높은 TCM은 마을상수에서 매우 낮은 농도로 검출되었다. 따라서 마을상수의 THMs은 도시상수와는 전혀 다른 생성 특성을 나타내고 있음을 시사하였다. 마을상수는 극소수의 주민들이 사용하고 있지만, 그들의 건강을 보호하기 위하여 마을상수 중에 함유된 DBPs를 포함한 건강상 유해 영향 물질의 분포와 건강 영향과의 관계에 대한 연구가 필요함을 시사하였다.

References

1. Ministry of Environment, '2012 Drinking Water Supply Statistics', 2013.
2. K. A. Yun, M. H. Koo, G. H. Yi, H. S. Sin, J. Y. Jung, J. C. Shin, S. R. Kim and G. J. Choi, *Rep. Inst. Health & Environ.*, **22**, 89-98 (2011).
3. H. Kim, J. Song and B. Song, *J. Environ. Toxicol.,* **24**, 293-301 (2009).
4. EPA, Integrated Risk Information System (IRIS), http://www.epa.gov/iris.
5. H. Kim, M. Kim and J. Yoon, *Kor. J. Environ. Toxicol.,* **17**, 125-133 (2002).
6. G. Bae, Y. Baek, K. Ryu, S. Shin and C. Lee, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.,* **33**, 893-899 (2011).
7. H. Shin and H. Kim, *J. Kor. Soc. Water Qual.,* **20**, 120-125 (2004).
8. H. Kim, *Sci. Total Environ.,* **403**, 59-67 (2008).
9. EPA, Method 524.3 - EPA Document # EPA 815-B-09-009 (June 2009), USA.
10. E. E. Chang, Y. P. Lin and P. C. Chiang, *Chemopsphere*, **43**, 1029-1034 (2001).
11. P. Westerhoff, P. Chao and H. Mash, *Water Res.,* **38**, 1502-1513 (2004).
12. V. Uyak and I. Toroz, *J. Hazard. Mater.,* **149**, 445-451 (2007).
13. R. Sadiq and M. J. Rodriguez, *Sci. Total Environ.,* **321**, 21-46 (2004).
14. S. Chowdhury, P. Champagne and P. J. McLellan, *Sci. Total Environ.*, **407**, 4189-4206 (2009).