

[연구논문]

## 조리시 가열에 따른 수돗물 중 염소소독부산물의 농도 변화와 인체 섭취 노출

김 회 갑, 이 수 형

강원대학교 자연과학대학 환경과학과

## Changes in the Concentrations of the Tap Water Chlorination By-Products by Heating during Cooking, and Human Ingestion Exposure

Hekap Kim and Soohyung Lee

*Department of Environmental Science, College of Natural Sciences  
Kangwon National University, Chunchon, Korea 200-701*

### ABSTRACT

A number of disinfection by-products (DBPs) are formed as a result of the addition of chlorine into the public water supply and some of them have been suggested to cause adverse health effects on humans. However, the estimation of human ingestion exposure to each DBP has been performed simply by multiplying the concentration of a chemical in the cold tap water by the volume of water consumed during a given period of time. However, a questionnaire concerning water consumptions administered to sixty people residing in Chunchon showed that the volume of tap water consumed accounted for approximately 70% of the total volume of water consumed and that of heated water represented approximately 94% of tap water ingested. Heating durations for water-containing foods (e.g., soups and pot stews) and heated beverages (e.g., barley tea) were grouped into 10, 20, 30, and 35 minutes. Based on these time frames, an aluminum pot containing one liter of tap water was heated for the above respective time periods using a gas range to determine the variations of the concentrations of individual DBPs by heating. The pH and total residual chlorine were measured before and after heating. Collected water samples were carried to the laboratory and analyzed for eight DBPs and total organic carbon. Chloroform, bromodichloromethane, chloral hydrate, 1, 2-dichloro-2-propanone, 1, 1, 1-trichloropropanone, and dichloroacetonitrile were not detected following heating for 10 minutes and longer. The concentration of dichloroacetic acid (DCAA) was elevated with heating duration, resulting in the averages of 2.0, 3.1, 4.7, and 12 times the initial concentration, respectively, for 10, 20, 30, and 35 minute heating periods. On the other hand, the concentration of trichloroacetic acid (TCAA) decreased with heating duration, with 0.65, 0.40, 0.34, and 0.19 times lower than the initial concentration.

Therefore, it is suggested that ingestion exposure to DCAA increases with heating duration but that ingestion exposure to TCAA decreases. In addition, while the amount of DCAA was elevated at the initial time periods (10 or 20 minutes) and then slowly decreased, that of TCAA was rapidly decreased. In conclusion, water-heating processes during cooking influence the concentrations of individual DBPs in the tap water, with lower levels for volatile DBPs and TCAA, and higher levels for DCAA. Therefore, concentration change needs to be taken into consideration in the estimation of human ingestion exposure to DBPs.

**Key words** : chlorination, dichloroacetic acid, disinfection by-products (DBPs), heating, ingestion exposure, tap water, trichloroacetic acid

## 서 론

가정 및 공공 시설 등에 공급되는 수도물에는 수인성 질환을 예방할 목적으로 염소를 첨가하고 있다. 그러나, 이 과정에서 잔류염소는 부식질(humic substances)과 같은 유기화합물과 반응하여 trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs) 등과 같은 부산물(disinfection by-products, DBPs)을 생성하는 것으로 알려져 왔다(Krasner *et al.*, 1989). 동물 실험 결과에 따르면, 이들 중 몇몇 화합물들은 발암성 등의 해로운 효과를 나타내고, 어떤 역학 연구에서는 수도물의 섭취와 방광암의 발병(Cantor *et al.*, 1987) 또는 발생·생식독성 효과(Aschengrau *et al.*, 1993; Bove *et al.*, 1995) 사이에 상관성이 있다고 보고하기도 하였다.

수도물 중의 DBPs는 음용수로 사용할 때 경구를 통해 들어가는 섭취(ingestion) 경로뿐만 아니라, chloroform과 같은 휘발성 화합물들(volatile organic compounds, VOCs)은 샤워나 목욕할 때 흡기(inhalation) 및 피부접촉(dermal contact)의 경로를 통해 인체에 유입될 수 있다(Jo *et al.*, 1990; 조완근, 1998). 반면에 dichloroacetic acid (DCAA)와 trichloroacetic acid (TCAA)와 같은 비휘발성 화합물은 피부를 통해 인체에 유입되기도 하지만, 주요 노출 경로는 섭취 경로인 것으로 보고되었다(Kim and Weisel, 1998).

그런데, 현재 미국의 EPA나 우리 나라의 환경부 등 대다수 국가의 규제 기관에서 수도물 중 DBPs의 최대오염물수준(maximum contaminant level, MCL)을 설정할 때, DBPs에 대한 노출량

평가는 위의 세 가지의 경로 중 섭취노출만을 고려해 한 개인이 하루에 수도꼭지에서 나오는 찬물을 2L 마신다고 가정 하에 실시되고 있다(U.S. EPA, 1994). 이는 흡기 및 피부접촉을 통한 노출을 포함시키지 않고 있다는 점 이외에도, 물을 가열하여 섭취할 때 물 중의 DBPs의 농도가 변하는 것을 고려하고 있지 있다는 점에서 실제적인 노출량과는 상이하다고 할 수 있다.

실제로 가열판(Hot Plate)에서 500 mL의 수도물을 5분 동안 가열하였을 때 부피는 468 mL로 감소하였고, 이 때 DCAA의 농도와 양은 각각 1.5와 2.7% 감소한 반면에 TCAA의 농도와 양은 각각 34와 39% 감소하였다(Kim, 1997). 이를 통해 DCAA는 열에 대해 안정한 화합물인 반면에 TCAA는 열에 의해 쉽게 분해되어 5분 동안의 가열에 의해서도 농도와 양이 크게 감소한 것을 알 수 있다. 또한, 샤워나 목욕할 때 찬물과 뜨거운 물을 섞어 쓰는 것을 고려하여 수도물을 65°C에서 각각 30분, 1시간 및 8시간 동안 가열하였을 때, THMs의 농도는 가열 시간에 따라서 증가하는 경향을 보인 반면에, haloacetoneitriles (HANs)와 halo ketones (HKs)의 농도는 감소하는 경향을 나타냈다(Weisel and Chen, 1994). 이로 미루어 볼 때 수도물 중의 DBPs는 가열 온도와 시간에 따라 농도가 변하기 때문에, 인체에 대한 노출 평가에서 어떤 형태의 물을 사용하는지에 대한 연구가 선행되고, 각 경우에 대한 물 중의 DBPs의 농도를 사용하여야 함을 암시하고 있다.

우리나라 사람들의 식생활이 서양의 경우와 다른 점은 물을 많이 함유하면서 가열하여 익힌 국이나 찌개 등과 같은 음식을 많이 섭취한다는 것

이다. 또한, 일반적으로 수도물을 음용수로 사용할 경우 잔류 염소나 기타 화합물에서 비롯되는 냄새와 맛을 혐오하여 끓인 후에 마시거나 또는 보리차, 옥수수차 등을 만들어 섭취하게 된다. 따라서, 이러한 가열 과정에서 물 중에 존재하는 휘발성 화합물들은 공기 중으로 날아가고 일부 화합물들은 열에 의해 다른 형태의 화합물로 전환될 가능성이 있다. 또한, 잔류 염소와 유기물과의 반응이 더 진행되어 DBPs의 생성량이 증가될 수도 있다.

이 연구는 설문조사를 통해 개인이 일상 생활에서 하루 동안에 섭취하는 물의 종류와 양을 조사하고, 가열하여 섭취하는 음식이나 음료에 대해 가열 시간에 따른 수도물 중의 DBPs의 농도 변화를 알아보고 이를 섭취노출 평가에 적용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 설문조사

1998년 8월 중에 춘천시에서 거주하는 남자 11명과 여자 49명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문조사 참여자의 연령 분포는 만 20세 이하가 17명, 30~49세가 32명, 50세 이상이 11명이었다. 설문지는 우편으로 또는 직접 방문하여 전달되었고, 각 참여자가 작성하도록 하였다. 설문지는 크게 두 부분으로 구성되어, 설문지 I에는 설문조사 당시의 일반적인 물 사용 패턴에 관한 질문으로, 정수기의 사용 여부, 맹물·커피·차 등 음료에 사용되는 물의 종류(수도물/정수된 수도물/생수), 국·찌개·밥을 만들 때 사용되는 물의 종류, 샤워 횟수와 시간, 목욕 횟수와 시간 및 설거지 횟수와 시간 등이 포함되었다. 설문지 II에는 각 개인이 하루 동안에 섭취한 물의 종류, 양 및 가열 시간에 관한 질문이 포함되었다. 물의 종류에는 정수 처리되지 않은 수도물, 정수 처리된 수도물, 끓인 수도물, 보리/옥수수 차, 생수(지하수, 샘물), 커피, 차, 우유, 마시는 요구르트, 주스, 탄산음료, 이온음료 등이 포함되었다. 섭취한 물의 양을 추산하기 위하여 가정에서 사용하는 유리컵을 중간 크기로 간주하여 이와 비슷한 크기의 잔으로 섭취한 경우에는 '중', 이보다 적거나 많은 경우에는 각각 '소'와 '대'

에 표시하도록 하였다. 하루 동안에 섭취한 각 음료에 대한 양은 '소', '중'과 '대'에 대한 부피를 각각 200, 240과 280 mL로 추정하고, 여기에 마신 횟수를 곱하여 추산하였다. 커피와 차(국산차)는 보통 크기(중)의 잔을 150 mL, 이보다 작은 크기(소)는 120 mL, 큰 것(대)은 180 mL로 어림잡아 추산하였다. 또한, 각 식사 때에 섭취한 물이 함유된 음식의 이름과 횟수, 가열 시간 및 물의 종류를 기록하도록 하였고, 각각에 대하여 섭취한 물의 양은 음식별로 50~170 mL의 각각 다른 부피를 적용하여 추산하였다. 각 참여자에 대해 설문지 I은 1회, 설문지 II는 총 3회에 걸쳐 작성하되, 설문조사 당일 취침 이전에 기록하도록 하였다. 이와 같이 작성된 설문지는 우편이나 직접 방문하여 회수되었다.

### 2. 시 약

실험에 사용된 bromodichloromethane (BD-CM), (±)-2-bromopropionic acid (BPA), *t*-butyl methyl ether (MTBE), chloral hydrate (CH), dichloroacetic acid (DCAA), methanol (MeOH), sodium sulfate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sodium thiosulfate (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)와 trichloroacetic acid (TCAA)는 Fluka Chemie에서, chloroform (CF)과 ethyl ether는 Junsei Chemical에서, 1-bromo-3-chloropropane (BCP), dichloroacetonitrile (DCAN)과 1, 1-dichloro-2-propanone (DCP)은 Aldrich Chemical에서, 1, 1-trichloropropanone (TCP)은 Supelco에서, HCl (35%)은 Matsunoen Chemicals에서 구입하였으며 정제하지 않고 구입한 그대로 사용하였다.

### 3. 실험방법

#### 1) 수도물 가열 실험 및 시료 채취

설문지에 근거하여 일반적으로 보리차·커피·라면·두부찌개 등은 10분, 김치찌개·된장찌개·콩나물국·미역국 등은 20분, 설령탕·갈비탕·곰국 등은 30분 이상 가열하는 것으로 설정하고, 각각의 가열 시간에 따른 DBPs의 농도 변화를 알아보려고 하였다. 수도물 1L를 알루미늄 냄비에 넣고 뚜껑을 닫은 상태에서 도시가스를 연료로 사용하는 가스레인지에 이용하여 약 720

°C의 불꽃으로 가열하였다. 1, 2차 실험에서는 각각 10, 20, 30분 동안, 3, 4차 실험에서는 여기에 35분을 추가하여 실험하였다.

또한, 상온에서 시간이 경과함에 따른 DBPs의 농도 변화를 알아보기 위하여 별도의 대조 표준 실험을 실시하였다. 알루미늄 냄비에 수돗물 1L를 넣고 뚜껑을 닫은 상태에서 각각 10분과 30분 동안 방치하였다.

실험 직후 pH와 총 잔류염소(T-Cl)를 측정하고 물 시료는 4mg의  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 가 들어있는 40mL의 유리 용기에 담아 실험실로 운반하여 총 유기탄소(TOC)와 8가지의 DBPs에 대하여 분석하였다.

#### 2) pH, T-Cl 및 TOC 측정

pH는 휴대용 pH 측정기 (Model 71P, Isteck)로, T-Cl은 CP-15 Chlorine Photometer (HF Scientific, Inc.)로 측정하였다. 그리고 TOC는 시료 10mL를 12mL의 유리 용기에 옮긴 후 0.1mL의 2N HCl 용액을 첨가하여 하루 동안 냉장고에 보관하였다가 TOC 분석기 (5000A, Shimadzu)로 측정하였다.

#### 3) DBPs에 대한 분석

수돗물 중의 CF, BDCM, CH, DCP, TCP과 DCAN는 다음과 같이 정량분석되었다. 시료 20mL를 40mL의 유리 용기에 옮겨 넣고 2mL의 MTBE를 첨가한 후, 내부표준시료 (internal standard)로 159ng BCP/ $\mu\text{L}$  MTBE 용액 5 $\mu\text{L}$ 를 주입하고 4g의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 를 첨가한 뒤 마개를 막고, 손으로 2분 동안 격렬하게 흔들어서 주었다. 상온에서 두 층이 완전히 분리될 때까지 방치한 후 상층(MTBE 층) 1mL 정도를 4mL의 작은 유리 용기에 옮겨 기체크로마토그래프/전자포획검출기(GC/ECD, Varian 3400CX)에 1 $\mu\text{L}$ 를 주입하여 분석하였다.

DCAA와 TCAA에 대한 분석은 10mL의 시료를 40mL의 용기에 옮긴 후, 진한 황산 0.5mL를 첨가하여 pH가 0.5 이하가 되도록 조정하였다. 여기에 7mL의 MTBE를 첨가하고, 내부표준시료로서 170ng BPA/ $\mu\text{L}$  MTBE 용액 3 $\mu\text{L}$ 와 4g의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 를 첨가하여 손으로 2분 동안 격렬하게 흔들어서 주었다. 5mL의 상층은 15mL 용량의 원심분리관에 옮긴 후, 질소가스로 불어주어

2mL까지 농축하고 여기에 2mL의 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in MeOH 용액을 첨가하였다. 안쪽 표면이 테플론으로 덮여있는 마개로 원심분리관을 꼭 막은 상태에서 수욕조(water bath)에 넣어 60°C에서 1시간 동안 가열하여 식힌 후, 5mL의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  포화 수용액을 첨가하고 vortex mixer로 10초 동안 흔들어 주었다. 두 층이 분리된 후 2 $\mu\text{L}$ 의 상층을 GC/ECD에 주입하여 정량하였다.

분석에 사용된 GC/ECD의 조건으로 주입은 splitless 방식을 사용하였고, 주입구 (injection port)의 온도는 200°C, 검출기인 ECD (63Ni)의 온도는 280°C로 유지되었다. 분리에 사용된 모세관은 Rtx-5 (Restek)로 길이 30m, 내경 0.25mm, 필름 두께는 0.5 $\mu\text{m}$ 이었다. 또한, 관 운반가스(column carrier gas)로는 초고순도 질소가 사용되었고 유속은 30 mL/min이었다. 오븐의 온도는 초기에 40°C에서 8분간 유지되었다가 분당 6°C씩 증가하여 150°C까지 상승한 후 4분간 유지되었다가, 다시 분당 15°C씩 상승하여 250°C까지 도달하여 12분간 더 유지되었다. 시료 당 분석에 소요된 시간은 총 49분이었다.

#### 4. 품질확신 및 품질관리 (QA/QC)

각 실험에 대해 탈이온화되고 증류된 물을 40mL의 유리 용기에 담아 실험 장소까지 운반하였고, 이 공시료(blank sample)는 시료와 함께 분석되어 배경오염을 점검하였다. 또한, MTBE와 ethyl ether를 용매로 사용하여 시료를 추출할 때, 시료간의 추출효율(extraction efficiency)의 일관성을 점검하기 위해 내부표준시료로 CH 및 휘발성 DBPs에 대해서는 BCP를, DCAA와 TCAA에 대해서는 BPA를 일정량 주입하여 얻어진 크로마토그램으로 면적을 비교하여, 상대 오차가 20%의 범위를 벗어난 시료는 다시 분석하였다. 검량선을 만들 때 표준시료를 시료와 동일한 과정을 따라 추출·분석하고, 각 시료간의 추출효율의 차이에 대해 보정하기 위하여 분석물질(analyte)의 크로마토그램상의 면적을 내부표준시료에 대한 면적으로 나누어 얻어진 값을 GC의 반응으로 이용하였다. 검량선은 최소 세 개 이상의 점의 농도를 이용하여 작성되었고, 새로 분석할 때마다 농도를 아는 하나의 외부표준시료(external standard)로 점검하여 상대오차가 20%

의 범위를 벗어난 경우에는 새로운 검량선을 만들었다. 또한, 검출한계는 S/N 3을 기준으로 정하여 이 값 이하는 '검출한계 이하(<DL)'로 표시하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 물 사용에 대한 설문 조사

설문조사에 참여한 60명 중 5명은 설문지II에서 개인이 아닌 식구 전체의 물 섭취량을 기록하는 등 자료의 신빙성에 의심이 들어, 이들을 제외한 55명에 대한 자료만 개인의 물 섭취량의 추산에 이용되었다.

개인의 일반적인 물 사용에 대한 설문조사(설문지I)에서 정수기 사용자는 전체 응답자 60명 중 3명(5%)에 불과하였다. 보리차를 포함하여 정수처리하지 않은 수돗물을 맹물로 섭취한다고 응답한 사람은 35명(53.3%), 생수를 마신다고 응답한 사람은 20명(33.3%), 정수기를 통해 처리된 물을 마시는 사람은 4명(6.7%), 나머지 1명은 모른다고 응답하였다. 반면에, 커피/차, 국/찌개, 밥 등을 만들어 먹을 때는 수돗물에 대한 비율이 더 높아서 각각 47(73.3%), 49(81.7%)와 51명(85.0%)으로 조사되었다. 이는 수돗물에 대한 사용의 기피가 국, 찌개 등 음식을 만들어 먹을 때보다는 맹물을 섭취할 때 더 높게 나타나고 있다. 그 이유는 수돗물 중 잔류염소에서 비롯되는 맛이나 냄새가 국이나 찌개 등을 만들 때 가려지기 때문인 것으로 생각된다. 샤워의 빈도는 평균 하루에 1회 꼴로 나타났으며, 샤워 시간은 14분, 욕실에 체류하는 총 시간은 22분 정도로 나타났다. 또한, 목욕은 일주에 평균 1.5회 실시하고, 목욕 시간은 1회에 1시간 정도인 것으로 조사되었다.

수돗물, 생수, 기타 음료, 국·찌개류 등 55명에 대해 개인이 섭취한 물의 총량을 추산한 값은 1.83 ± 0.77 L (평균 표준편차)이고, 이를 남녀로 구분하였을 때 남자 11명은 2.02 ± 0.75 L이고 여자 44명은 1.78 ± 0.77 L인 것으로 조사되었다. 그러나, 5% 유의수준에서 *t*-검정을 실시한 결과 남녀간의 물 섭취량의 평균의 차이는 없는 것으로 나타났다(정규분포, 동등분산, *p*=0.100). 그리고 총 물 섭취량 중에서 수돗물이 차지하는 비율

은 70%이었다. 이 설문 조사로부터 얻은 자료의 수가 적기는 하지만, 이는 Cantor 등(1987)이 수돗물의 섭취와 방광암의 발병과의 관계를 연구하기 위한 Case-Control Study에서 얻어진 값과 유사하였다. 그들은 남자의 총 물 섭취량은 2.01 L/day로서 이 중 수돗물이 70%(1.40 L/day) 차지하였고, 여자의 총 물 섭취량은 1.72 L/day로서 이 중에서 수돗물이 79%를 차지(1.35 L/day)하는 것으로 조사되었다.

또한 섭취하는 수돗물 중에서 가열하여 섭취하는 비율이 약 94%로 추산되었다. 이로써 수돗물의 대부분은 가열한 후에 섭취하는 것으로 조사되어 어떤 화합물에 대한 섭취 노출량을 추산할 때 가열 온도 및 시간에 따라 그 농도가 어떻게 변화되는지를 반드시 고려할 필요가 있다는 것을 암시하였다.

#### 2. 수돗물 가열에 따른 농도의 변화

대조 표준 실험에서 얻어진 결과를 Table 1에 나타내었다. T-Cl은 30분이 경과하면서 뚜렷한 농도의 감소를 보였다. DBPs 중에서 CH는 10분까지 변화가 없다가 30분이 되면서 농도가 다소 증가한 반면에, 이를 제외한 나머지 화합물들은 10과 30분 동안 방치해 놓아도 농도에는 거의 변화가 없었다. DCP는 초기에 실험에 사용된 수돗물 중에서의 농도가 검출한계로 나타나 자료를 얻지 못했지만, 화학 구조적으로 유사한 TCP와 같은 경향을 보일 것으로 추측된다.

가열에 따른 물의 부피, pH, TOC 및 DBPs의 농도 변화를 Table 2에 나타내었다. 가열이 시작되어 약 5분 정도의 시간이 경과되면서 물이 끓기 시작하였고, 초기의 부피가 1,000 mL (1L)이었던 것이 각각 10분 동안 가열시에는 820~866 mL, 20분 동안 가열시에는 540~605 mL, 30분 동안 가열시에는 240~340 mL, 35분 동안 가열시에는 90~125 mL로 감소하였다.

pH는 가열에 의해 초기보다 증가되었는데, 평균 6.8의 중성의 범위에 있던 것이 10, 20, 30, 35분에 대해서 각각 8.1, 8.2, 8.3, 8.6으로 증가되었다. 이는 물에 용해되어 있던 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 가열에 의해 휘발되었기 때문이라고 생각된다. 그렇지만, 유의수준 0.05에서 비모수검정 중의 하나인 Kruskal-Wallis 검정 결과 가열

**Table 1.** Comparisons of T-Cl, TOC and the concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) of DBPs between before and after 10 or 30 minute standing at room temperature. DCP was not included due to its absence in the initial tap water

| Duration (min) | T-Cl | TOC | CF | BDCM | CH  | TCP | DCAN | DCAA | TCAA |
|----------------|------|-----|----|------|-----|-----|------|------|------|
| 0              | 1.1  | 1.1 | 13 | 2.0  | 2.6 | 1.1 | 1.1  | 13   | 14   |
| 10             | 1.0  | 1.3 | 12 | 1.7  | 2.6 | 1.2 | 1.1  | 11   | 12   |
| 30             | 0.48 | 1.4 | 13 | 1.7  | 3.7 | 1.0 | 1.0  | 12   | 12   |

**Table 2.** Changes of water volume (mL), pH, T-Cl (mg/L), TOC (mg/L) and the concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) of CF, BDCM, CH, DCP, TCP, DCAN, DCAA, and TCAA with heating duration

|        | Duration (min) | Vol (mL) | pH  | T-Cl | TOC | CF  | BDCM | CH   | DCP  | TCP  | DCAN | DCAA | TCAA |
|--------|----------------|----------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Exp. 1 | 0              | 1,000    | 6.3 | 0.35 | 1.4 | 8.0 | 0.78 | 1.9  | 0.70 | 0.96 | 1.2  | 16   | 17   |
|        | 10             | 866      | 7.9 | 0.24 | 1.7 | *   |      |      |      |      |      | 37   | 12   |
|        | 20             | 605      | 7.9 | 0.27 | 2.4 |     |      |      |      |      |      | 39   | 7.4  |
|        | 30             | 340      | 8.1 | 0.27 | 3.7 |     |      |      |      |      |      | 47   | 6.4  |
| Exp. 2 | 0              | 1,000    | 7.0 | 0.41 | 1.4 | 10  | 0.91 | 2.3  | 0.81 | 1.1  | 1.3  | 14   | 16   |
|        | 10             | 880      | 8.0 | 0.28 | 1.7 |     |      |      |      |      |      | 30   | 7.7  |
|        | 20             | 600      | 8.4 | 0.32 | 2.2 |     |      |      |      |      |      | 39   | 4.9  |
|        | 30             | 310      | 8.5 | 0.28 | 3.9 |     |      |      |      |      |      | 51   | 4.6  |
| Exp. 3 | 0              | 1,000    | 6.8 | 0.43 | 1.5 | 6.3 | 0.82 | 1.0  | 1.3  | 0.80 | 0.19 | 11   | 12   |
|        | 10             | 830      | 8.1 | 0.33 | 2.5 |     |      |      |      |      |      | 20   | 9.2  |
|        | 20             | 560      | 8.2 | 0.36 | 2.9 |     |      |      |      |      |      | 44   | 5.8  |
|        | 30             | 280      | 8.3 | 0.32 | 4.9 |     |      |      |      |      |      | 68   | 4.1  |
|        | 35             | 125      | 8.7 | 0.31 | 8.9 |     |      |      |      |      |      | 115  | 1.8  |
| Exp. 4 | 0              | 1,000    | 7.0 | 0.42 | 1.5 | 6.4 | 0.83 | 0.99 | 1.1  | 0.78 | 0.19 | 12   | 13   |
|        | 10             | 820      | 8.5 | 0.32 | 2.1 |     |      |      |      |      |      | 20   | 8.7  |
|        | 20             | 540      | 8.1 | 0.35 | 2.8 |     |      |      |      |      |      | 39   | 5.2  |
|        | 30             | 240      | 8.1 | 0.32 | 5.1 |     |      |      |      |      |      | 73   | 5.1  |
|        | 35             | 90       | 8.5 | 0.36 | 14  |     |      |      |      |      |      | 162  | 3.7  |

\*\* Below the detection limit (CF, 0.61; BDCM, 0.20; CH, 0.81; DCP, 0.32; TCP, 0.17; DCAN, 0.070  $\mu\text{g/L}$ )

시간 10, 20, 30과 35분 사이에서의 유의적인 차이는 보이지 않았다 ( $p$ -value=0.176). pH와 유사하게 T-Cl도 초기의 농도가 평균 0.40에서 가열에 의해 10, 20, 30, 35분에 대해 각각 0.29, 0.33, 0.30, 0.34로 감소하였지만, 가열시간 간에는 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다 ( $p$ -value=0.549). 이와 같이 pH와 T-Cl이 가열시간 사이에 유의적인 차이를 보이지 않은 것은 초기 가열시(5분 이내)에는 물의 휘발량보다 이산화탄소와 잔류염소의 휘발량이 많다가, 끓기 시작한 이후에는 이산화탄소와 잔류염소가 물에서부터 손실되는 속도가 물의 부피의 감소 속도와

거의 유사했기 때문인 것으로 생각된다. 반면에, TOC의 농도는 가열시간이 경과함에 따라 증가하여, 유의수준 0.05에서 각 가열시간 사이에 유의적인 차이를 보였다 ( $p$ =0.010). 이는 물 중에 존재하는 대부분의 유기화합물들이 가열에 의해 분해되거나 휘발되는 부분은 일부이고, 대부분은 물 중에 잔류하여 물의 부피가 감소됨에 따라 농축되는 결과를 가져온다는 것을 알 수 있다.

가열시간에 따른 DBPs의 농도 변화를 살펴보면, CF, BDCM, CH, DCP, TCP 및 DCAN은 10분과 그 이상의 시간 동안 가열하였을 때 검출 한계 (각각 0.61, 0.20, 0.81, 3.2, 0.17, 0.070

g/L) 이하가 되었다. 이는 국이나 찌개와 같이 가열한 후에 물을 섭취할 경우, 이들 화합물들에 대한 섭취노출은 무시할 수 있다는 것을 암시한다. 그렇지만, 이들 물질이 실내 공기 중으로 유입됨으로써 공기 중의 DBPs의 농도를 증가시켜 흡기를 통한 노출 증대를 가져올 것이라는 점에 유의할 필요가 있다.

가열시간에 따라 수돗물 중 DCAA의 농도는 증가하는 경향을 나타냈는데, 이를 Fig. 1에 나타

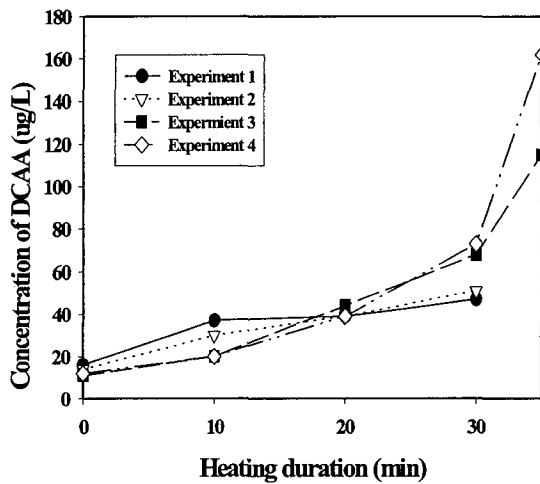


Fig. 1. A plot of the concentration of DCAA (µg/L) vs. heating duration (min)

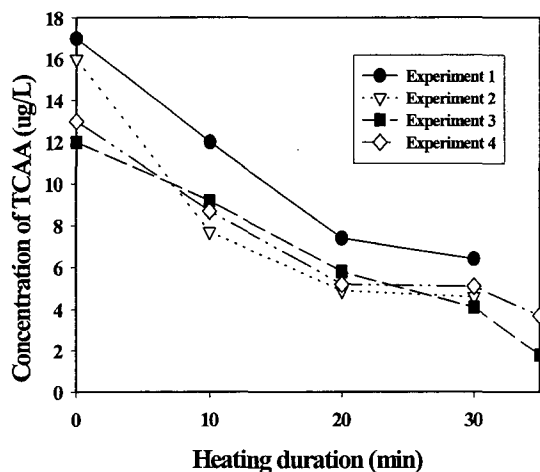


Fig. 2. A plot of the concentration of TCAA (µg/L) vs. heating duration (min)

났다. 30분 동안 가열하였을 때 초기에 비해 최저 2.9배에서 최고 6.1배까지 증가하였고, 35분 동안 가열하였을 때는 무려 10배 이상 증가하였다. 이로써 같은 양의 물을 섭취할 경우 장시간 가열하여 조리하는 음식을 섭취할 경우 원래의 수돗물을 섭취하는 경우보다 더 높은 수준으로 DCAA에 섭취 노출될 것이다.

반면에, TCAA의 농도는 가열시간에 따라서 감소하는 경향을 나타냈다. 이를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 2이다. 30분 동안 가열하였을 때 TCAA의 농도는 초기의 0.29배에서 0.38배로 되었고, 35분 동안 가열하였을 때는 0.15와 0.23배로 낮아졌다. 따라서, 가열시간이 증가할수록 DCAA와는 반대로 TCAA에 대한 섭취노출량은 현저하게 감소하는 것을 나타낸다.

### 3. 수돗물 가열에 따른 양의 변화

가열시간 별로 물 중의 T-Cl, TOC, DCAA 및 TCAA에 대하여 농도와 부피를 이용하여 절대적인 양을 계산하였다(Table 3).

T-Cl의 양은 가열시간에 따라 매우 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그렇지만, 앞에서 보여주었듯이 농도에는 큰 변화가 없는 것은 물의 휘발로 인한 총 부피의 감소 때문이라고 할 수 있다. 반면에, TOC의 양은 시간에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타냈다. 한편, DCAA의 양은 실험 1과 2에서는 10분 가열시에 증가하였다가 그 이

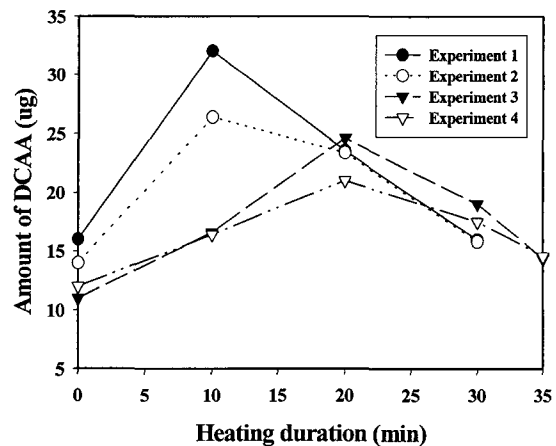
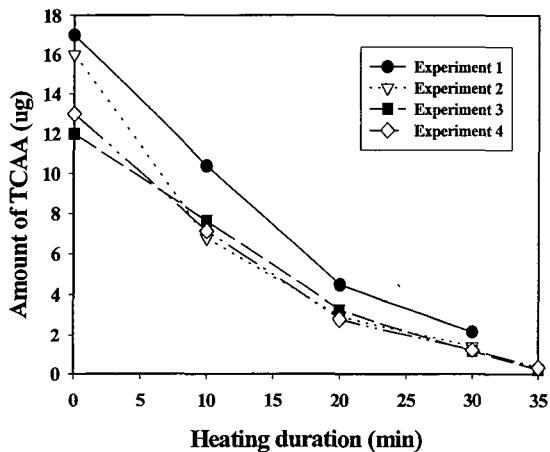


Fig. 3. A plot of the amount of DCAA (µg) vs. heating duration (min)

**Table 3.** Changes in the amounts of T-Cl, TOC, DCAA, and TCAA with heating duration

|        | Time (min) | T-Cl (mg) | TOC (mg) | DCAA ( $\mu\text{g}$ ) | TCAA ( $\mu\text{g}$ ) |
|--------|------------|-----------|----------|------------------------|------------------------|
| Exp. 1 | 0          | 0.35      | 1.4      | 16                     | 17                     |
|        | 10         | 0.21      | 1.5      | 32                     | 10                     |
|        | 20         | 0.16      | 1.5      | 23                     | 4.5                    |
|        | 30         | 0.092     | 1.3      | 16                     | 2.2                    |
| Exp. 2 | 0          | 0.41      | 1.4      | 14                     | 16                     |
|        | 10         | 0.25      | 1.5      | 26                     | 6.8                    |
|        | 20         | 0.20      | 1.3      | 23                     | 2.9                    |
|        | 30         | 0.087     | 1.2      | 16                     | 1.4                    |
| Exp. 3 | 0          | 0.43      | 1.5      | 11                     | 12                     |
|        | 10         | 0.27      | 2.1      | 17                     | 7.6                    |
|        | 20         | 0.20      | 1.6      | 25                     | 3.2                    |
|        | 30         | 0.090     | 1.4      | 19                     | 1.1                    |
|        | 35         | 0.039     | 1.1      | 14                     | 0.23                   |
| Exp. 4 | 0          | 0.42      | 1.5      | 12                     | 13                     |
|        | 10         | 0.26      | 1.7      | 16                     | 7.1                    |
|        | 20         | 0.19      | 1.5      | 21                     | 2.8                    |
|        | 30         | 0.077     | 1.2      | 18                     | 1.2                    |
|        | 35         | 0.032     | 1.3      | 15                     | 0.33                   |

**Fig. 4.** A plot of the amount of TCAA ( $\mu\text{g}$ ) vs. heating duration (min)

후에는 감소하는 경향을 보였으며, 실험 3과 4에서는 10, 20분 가열시에 그 양이 증가하다가 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 이는 온도가 상승함에 따라 초기에는 물 중의 잔류염소가 부식질을 포함한 유기화합물과 반응하여,

생성된 DCAA의 양이 열에 의해 분해되는 양보다 많다가, 시간이 더 경과하면서 DCAA의 생성량이 감소되거나 열에 의해 분해되는 양이 생성량보다 많아 총량이 감소한 것으로 생각된다. 여기서 DCAA는  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 와  $\text{CO}_2$ 로 분해될(thermal decarboxylation) 것으로 생각되는데 향후 이에 대해 확인할 필요가 있다. 반면에, TCAA는 가열시간이 길수록 그 양이 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있는데(Fig. 4), 이는 이 화합물이 가열하는 동안에 생성된다 할지라도 열에 의해 쉽게 분해되기 때문인 것으로 보인다. TCAA는 열에 의해  $\text{CHCl}_3$ 와  $\text{CO}_2$ 로 분해되는 것으로 알려져 있다(Eichloff, 1905).

## 결론

결론적으로, 수도물 중에 존재하는 휘발성 및 비휘발성의 염소소독부산물들은 가열에 의해 농도가 변한다. 수도물 중의 휘발성 DBPs는 보통 가정에서 조리하는데 소요되는 시간인 10분 이상 가열하였을 때 공기 중으로 대부분 휘발되어 검출한계 이하로 나타났다. 이와 마찬가지로 TCAA의 농도 역시 가열시간이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸 반면에, DCAA의 농도는 오히려 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서, 수도물 중의 DBPs에 대한 섭취노출량을 산정할 때, 단순히 찬물 중의 농도를 사용한다면, 휘발성화합물들 및 TCAA에 대하여는 실제 섭취하는 양보다 과대 평가하게 되는 반면에, DCAA에 대하여는 과소 평가하게 된다. 따라서, DBPs에 대한 노출 평가에는 가정에 공급되는 수도물 중의 농도와 더불어, 조리시 사용되는 물의 부피와 가열 온도 및 시간에 따른 농도변화, 그리고 각 개인이 섭취한 물의 양 등이 함께 고려되어야 한다. 또한, 물로부터 휘발된 화합물들은 실내 공기 중으로 유입되기 때문에, DBPs에 대한 총 노출량의 계산에는 샤워나 목욕에서 비롯되는 흡기 및 피부접촉 노출 이외에도 거실 등의 실내 공기 중의 DBPs에 대한 흡기노출이 포함되어야 한다고 생각된다. 더욱이 대부분의 시간을 가정에서 보내는 어린아이나 가정 주부에게는 흡기를 통한 노출이 중요할 것으로 생각되어 차후 이에 대한 연구가 필요하다고 본다.



### 감사의 글

설문조사에 참여해 주신 분들과 이 실험에 필요한 GC/ECD를 사용할 수 있도록 배려해 주신 강원대학교 환경·생물공학부 환경공학전공에 감사드립니다.

### 참고 문헌

Aschengrau, A., Zierler, S., and Cohen A. Quality of community drinking water and the occurrence of late adverse pregnancy outcomes. *Arch. Environ. Health* 1993; 48: 105-113

Bove, F.J., Fulcomer, M.C., Klotz, J.B., Esmart, J., Dufficy, E.M., Savrin, J.E. Public drinking water contamination and birth outcomes. *Am. J. Epidemiol.* 1995; 141: 850-862

Cantor, K.P. et al. Bladder cancer, drinking water source, and tap water consumption: a case-control study. *Journal of the National Cancer Institute (JNCL)* 1987; 79(6): 1269-1279

Eichloff, R. Ueber halogenirte Essigs ure, *Justus Liebigs Annalen der Chemie.* 1905; 342: 115-123

Jo, W.K., Weisel, C.P., and Lioy, P.J. Routes of chloroform exposure and body burden from showering with chlorinated tap water. *Risk Analysis* 1990; 10: 575-580

Kim, Hekap. Human Exposure to Dichloroacetic Acid and Trichloroacetic Acid from Chlorinated Water during Household Use and Swimming. Ph.D. Dissertation, Rutgers University, 1997

Kim, H. and Weisel, C.P. Dermal absorption of dichloro- and trichloroacetic acids from chlorinated water. *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.* 1998; 8(4): 555-575

Krasner, S.W., McGuire, M.J., Jacangelo, J.C., Patania, N.L., Reagan, K.M., and Aieta, E.M. The occurrence of disinfection by-products in US drinking water. *J. AWWA* 1989; 81(8): 41-53

U.S. EPA. National Primary Drinking Water Regulations; Disinfectants and Disinfection Byproducts; Proposed Rule. EPA 811-Z-94-004

Weisel, C.P. and Chen, W.J. Exposure to Chlorination By-Products from Hot Water Uses. *Risk Analysis* 1994; 14(1): 101-106

조완근. 목욕시 Chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출. *한국환경과학회지* 1998; 7(3): 301-309