

## 가정에서 수도물 사용 중에 방출되는 chloroform에 대한 흡입노출

신혜숙 · 김희갑<sup>†\*</sup>

강원도 보건환경연구원

<sup>\*</sup>강원대학교 환경과학과

## Inhalation Exposure to Chloroform Released from Household Uses of Chlorinated Tap Water

Hye-sook Shin · He-kap Kim<sup>†\*</sup>

Gangwon Institute of Health & Environment

<sup>\*</sup>Department of Environmental Science, Kangwon National University

**Abstract** : Exposure to volatile disinfection by-products (DBPs) such as chloroform included in chlorinated tap water can occur during household activities via inhalation as well as ingestion and dermal absorption. This study was conducted to examine the significance of inhalation route of exposure since humans are unintentionally exposed to volatile DBPs while staying home. Two sets of experiments were carried out in an apartment to measure: 1) the variation of chloroform concentrations in the living room air following kitchen activities (cooking and dish-washing); and 2) the variation of chloroform concentrations in the bathroom and living room following showering. Cooking, dish-washing, and showering all contributed to the elevation of household chloroform levels. Even a few minutes of natural ventilation resulted in the reduction of the chloroform levels to the background. Estimates of daily chloroform doses and lifetime cancer risks suggested that inhalation of household air during staying home be a major route of exposure to chloroform and that ingestion be a minor one in Korean people. It is also suggested that ventilation be a simple and important measure of mitigating human exposure to volatile DBPs indoors.

**keywords** : Chlorinated Tap Water, Chloroform, Cooking, Dish-washing, Disinfection by-products, Inhalation, Shower

### 1. 서 론

수도물의 생산과정에서 화학적 처리 방법인 소독은 콜레라와 같은 수인성 질병을 제어하기 위해 필수적이다. 국내에서는 여러 종류의 소독제 중에서 염소( $\text{Cl}_2$ )가 가장 널리 사용되고 있다. 이와 같은 염소소독의 결과 생성되는 부산물들(disinfection by-products, 이하 DBPs)은 주된 전구물질인 부식질(humic substances)이 잔류염소( $\text{HOCl}$  및  $\text{OCl}^-$ )와 반응함으로써 생성되는데, 이 과정은 잔류염소의 농도, 수온, 반응시간 및 pH와 같은 인자에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 많은 DBPs 중에서도 trihalomethanes (THMs), haloacetic acids, haloacetonitriles, haloketones, chlorophenols, chloral hydrate, chloropicrin 등의 20여 가지 화합물이 주를 이루는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup>

수도물 사용과 관련된 역학연구에 따르면, DBPs가 함유된 수도물을 섭취함에 따라 저체중아 출산, 중추신경계 결함, 신경관 결함, 유산, 사산, 유아 발달 지체와 같은 생식 및 발생독성 효과와,<sup>3-5)</sup> 방광암, 직장암, 결장암 등의 암 발생이 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>6-8)</sup>

따라서 미국 환경보호청(U.S. EPA)은 1979년부터 음용수 수질기준 항목 중 chloroform을 포함한 네 종류의 THMs의 농도의 합에 대하여 최대오염물질농도(Maximum Contaminant Level, MCL)를 0.100mg/L로 규정하였으며, 1994년 7월에는 소독제/소독부산물법(D/DBP Rule)에서 0.080mg/L로 제안한 후 1998년 12월에 이를 확정, 공고하였다. 우리나라에서는 1990년부터 먹는 물 수질기준에서 THMs에 대해 0.100mg/L 이하로 규제하고 있다.

이와 같은 휘발성 화합물에 대한 건강 영향 평가 및 환경 기준치를 설정할 때에는 경구노출뿐만 아니라 흡입과 피부노출 등의 주요 노출 경로가 모두 고려되어야 할 것이다. 그 이유는 THMs와 같은 휘발성 DBPs에 대한 노출은 경구섭취 과정뿐만 아니라, 샤워, 목욕, 설거지 등의 수도물을 사용하는 활동 중에도 일어날 수 있기 때문이다.

일반 가정에서 염소로 처리된 수도물로 샤워<sup>9)</sup> 또는 주방활동<sup>10)</sup>을 함으로써 일어나는 피부흡수와 호흡 두 경로를 통한 노출로부터의 발암위해도는 수도물을 경구섭취함으로써 비롯되는 발암위해도와 유사하다고 보고되었다. 또한 휘발성 유기화합물인 trichloroethylene(TCE)로 오염된 수도물을 가정에서 샤워 등의 목적으로 사용할 때, TCE가 실내 공기 중으로 휘발되기 때문에 흡입을 통한 노출로부터 비

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimh@kangwon.ac.kr

롯되는 인체 위해도에는 직접적인 경구섭취 경로보다 잠재적으로 더 클 수도 있음을 시사하였다.<sup>11)</sup> 그리고, 수도물을 사용하여 요리하거나 보리차 등을 만드는 과정에서 물을 가열하게 되면 수도물 중에 존재하는 대부분의 휘발성 DBPs가 공기 중으로 휘발되기 때문에,<sup>12)</sup> 실내 공기 중에는 chloroform를 포함한 휘발성 DBPs의 농도가 증가하게 되고,<sup>13)</sup> 그 결과 가정에 머무르는 동안에는 흡입을 통해 chloroform에 노출될 수 있음을 시사하였다.

이 연구는 가정에서 수도물 사용과 관련된 주요 활동인 요리, 설거지 및 샤워 중에 chloroform이 공기 중으로 휘발됨으로써 비롯되는 흡입노출을 정량적으로 평가하고자 실시하였다. 또한 각 노출 경로 및 활동별로 chloroform에 대한 노출량과 발암위해도를 추정한 후 비교함으로써, 가정에 머무르는 동안에 수도물 사용과 관련해 공기 중으로 배출된 휘발성 DBPs에 대한 비의도적인 노출의 중요성을 평가하고자 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시약

분석물질인 chloroform, 회수율을 보정하기 위해 물 시료에 첨가된 surrogate standard인 1-bromo-3-chloropropane (BCP), 수도물 중 잔류염소를 제거하기 위해 첨가된 sodium thiosulfate( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), 그리고 추출용매인 *t*-butyl methyl ether(MTBE)는 Fluka사의 것을, 물 시료 추출시 추출 효율을 증가시키기 위해 첨가된 sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )는 Junsei Chemical사의 것을 구입하여 사용하였다.

### 2.2. 연구 대상 가정의 구조

가정활동에 의해 실내공기 중으로 휘발되는 chloroform의 시간에 따른 농도 변화를 알아보기 위해 연구 대상으로 선택된 가정은 23평형의 아파트로서, 실제 구조와 시료 채취 지점은 Fig. 1에 나타내었다. 주방활동 및 샤워 동안 침실의 문은 닫아놓았고, 자연환기를 할 때에는 출입문을 제외한 모든 문과 창문을 개방하였다.

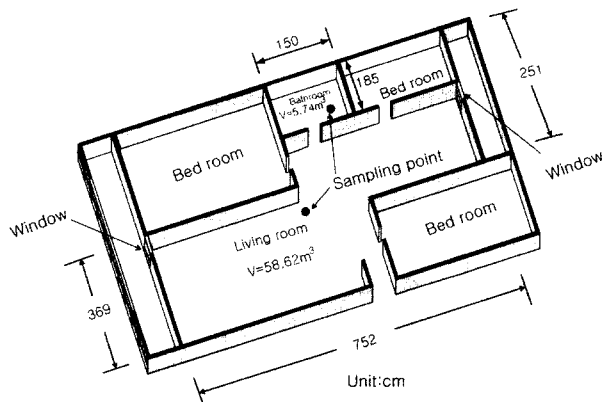


Fig. 1. Structure of the household in which the experiment was conducted.

### 2.3. 주야간 실내공기 중 chloroform의 농도 비교

가정에서 수도물 사용과 관련된 활동(요리, 설거지, 샤워, 세탁, 변기 사용 등)에 의해 chloroform과 같은 휘발성 DBPs가 실내공기 중으로 전이됨에 따라 공기 중에서의 농도가 증가하는지에 대한 실험을 실시하였다. 대상 가정은 23평형과 31평형 아파트 각각 한 곳으로 하였다. 물을 많이 사용하는 야간은 저녁 식사를 준비하는 시점에서부터 아침 식사 후 설거지 종료 시점까지 13시간으로, 그리고 주간은 수도물 사용 활동이 거의 없는 나머지 11시간으로 설정한 후 각 가정의 거실에서 공기 시료를 채취하여 분석하였다.

공기시료는 Tenax TA(20/35 mesh, Alltech) 70mg과 Carboxen 569(20/45 mesh, Supelco) 130mg이 충전된 steel 재질로 된 10cm 길이의 흡착관에 휴대용펌프(Pocket Pump, SKC)를 사용하여 20mL/min의 유속으로 채취하였다.

### 2.4. 주방 활동 및 샤워에 따른 실내공기 중 chloroform의 농도 변화

주방에서의 활동인 요리와 설거지를 하는 동안에 실내공기로 방출된 chloroform이 확산됨으로써, 거실에서 chloroform의 농도가 어떻게 변화하는지 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 요리하기 10분 전에 배경시료를, 그리고 요리를 시작한 시점부터 20분 간격으로 120분까지 거실에서 공기시료를 채취하였다. 이어서 설거지를 시작한 시점부터 20분 간격으로 120분이 될 때까지 공기시료를 채취하였으며, 이 때 펌프의 유속은 200mL/min이었고 채취 시간은 10분이었다. 요리를 시작한 시점에서 10분 동안 쌀과 국거리용 재료를 세척하였으며, 사용한 물의 온도는 19℃이었고 사용한 물의 양은 15.5L이었다. 밥을 짓기 위해 사용한 물은 0.47L이었고, 국을 만들기 위해 사용한 물의 양은 1.6L이었다. 설거지를 하는데 소요된 시간은 7분 25초이었고, 이 때 사용한 수도물의 양은 51.8L이었다.

욕실에서 샤워 활동에 의해 수도물로부터 공기 중으로 방출되어 확산되는 chloroform의 농도 변화를 측정하기 위해 샤워 전, 중 및 후에 욕실과 거실에서 동시에 공기시료를 채취하였다. 샤워 전에 욕실의 문을 열어놓은 상태에서 욕실과 거실에서 각각 한 개씩의 공기시료를 채취하였으며, 욕실 문을 닫고 나서 샤워를 시작한 직후에 시료를 채취하고 샤워 시작 30분 후에 다시 시료를 채취하였다. 그리고 나서 욕실의 문을 활짝 열고 욕실과 거실에서 각각 20분 간격으로 시료를 채취하였으며, 샤워 시작 150분이 경과한 후에는 출입문을 제외한 모든 창문과 문을 개방하고 20분 간격으로 80분 후까지 시료를 채취하였다. 샤워에 사용된 물의 온도는 35℃, 수도물의 유속은 9.1L/min, 샤워 시간은 8분 40초, 그리고 물 사용량은 76.2L이었으며, 샤워 중의 공기시료는 샤워 시작 3분 후부터 채취하였다. 욕실에서 샤워 중 및 직후에 시료를 채취할 때 펌프의 유속은 50mL/min으로 설정하였으며, 그 외의 시료 채취 시에는 펌프의 유속을 200mL/min로 설정하였고, 채취시간은 모두 10분이었다.

또한 가정에서 보일러를 가동시켜 온수를 사용할 때 THMs의 농도가 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해, 수도꼭지를 적당히 조절하여 찬물과 뜨거운 물을 적당한 비율로 섞어 온도에 따라 크게 세 단계로 구분하여 물 시료를 채취한 후 chloroform과 bromodichloromethane(BDCM)에 대해 분석하였다. 이 실험은 각각에 대해 3회에 걸쳐 실시되었다.

## 2.5. 공기 및 물 시료의 분석

분석물질에 대한 검량선 작성을 위해 methanol을 용매로 사용하여 제조한 표준용액 1 $\mu$ L를 150 $^{\circ}$ C로 가열되고 있는 250mL 용량의 gas sampling bulb에 고순도 질소가스를 200mL/min로 흘려주면서 septum을 통해 주입한 후 5분 동안 방치하여, 연결된 흡착관의 흡착제에 표준가스가 흡착되게 함으로써 표준흡착관 시료를 제조하였다.

흡착관에 채취된 시료는 고순도 질소가스를 200mL/min의 유속으로 20분 동안 흘려주어 dry purge한 후 열탈착기-기체 크로마토그래프-펄스방전전자포획검출기(thermal desorber-gas chromatograph-pulsed discharge electron capture detector, TD-GC-PDECD)로 분석하였다.<sup>13)</sup> 탈착온도는 270 $^{\circ}$ C, 탈착시간은 15분, 탈착시 헬륨 기체의 유속은 50mL/min이었고, 탈착된 분석물질은 -30 $^{\circ}$ C로 유지되고 있는 cold trap(Tenax TA 60/80 mesh, 100mg)에 농축시켰다. 재탈착은 5분 동안에 걸쳐 cold trap을 70 $^{\circ}$ C/min의 속도로 가열하여 260 $^{\circ}$ C로 유지시켜 실시하였다. 탈착된 분석물질은 1/16 인치 steel 관을 따라 이동하여 GC 칼럼에 주입되어 분석되었다. 분리에 사용된 칼럼은 DB-624(30m  $\times$  0.25mm  $\times$  1.4 $\mu$ m, J&W Scientific)이었고, 주입구 및 검출기의 온도는 각각 200 및 260 $^{\circ}$ C이었다. 오븐 온도는 70 $^{\circ}$ C에서 8분 동안 머물고, 130 $^{\circ}$ C까지 10 $^{\circ}$ C/min의 구배로 증가한 후 30 $^{\circ}$ C/min로 240 $^{\circ}$ C까지 상승시켜 10분 동안 유지하였다. 이 때 S/N 비 3을 기준으로 추정된 방법검출한계(MDL)는 0.30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>이었다.

수돗물은 약 10mg의 sodium thiosulfate(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 들어 있는 40mL의 유리용기에 채취한 후 실험실로 운반하여 4 $^{\circ}$ C에서 냉장 보관하였다가, 일주일 이내에 GC-PDECD로 분석하였다. 수돗물 시료 20mL가 들어있는 40mL 용량의 EPA 유리 용기에 surrogate standard로 BCP가 함유된 MTBE 2mL를 넣고 4g의 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 가한 후 orbital mechanical shaker(Maxi Mix II 37600, Thermolyne)를 사용하여 1800rpm에서 5분 동안 흔들어서 주었다. 두 층으로 분리된 후 위의 MTBE층 약 1mL는 4mL의 작은 용기에 옮긴 후 GC-PDECD로 분석하였다. 분석에 사용된 칼럼은 모세관칼럼인 HP-5(30m  $\times$  0.32mm  $\times$  0.25 $\mu$ m)이었으며, 관 운반기체는 초고순도의 헬륨(99.999%)으로 유속은 1mL/min로 설정하여 사용하였다. GC 주입구 및 검출기의 온도는 각각 200 및 300 $^{\circ}$ C이었고, 오븐 온도는 35 $^{\circ}$ C에서 4분 동안 머무르고 80 $^{\circ}$ C까지 10 $^{\circ}$ C/min로 증가시킨 후에, 40 $^{\circ}$ C/min로 280 $^{\circ}$ C로 상승시켜 7분 동안 유지시켰다. 방법검출한계는 0.25 $\mu$ g/L로 추정되었다.

## 2.6. Chloroform에 대한 노출 및 발암 위험도 평가

본 연구에서는 기존 연구 및 본 연구에서 측정된 자료를 바탕으로 각 활동별, 경로별로 노출 및 위험도를 추정하여 비교하였다. 이를 위해 작성한 시나리오 및 가정은 다음과 같았다. 가정에서 머무는 시간, 샤워 시간 및 실내공기 중에서의 농도는 선행 연구 결과인 각각 18.6시간, 10분 및 1.4 $\mu$ g/m<sup>3</sup>(겨울철 춘천지역 27 가정의 평균값)을,<sup>13)</sup> 수돗물 중 chloroform의 농도는 14.0 $\mu$ g/L, 샤워 중 욕실에서의 chloroform 농도는 연구 대상 가정의 욕실에서의 농도인 20.4 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 성인의 호흡속도는 18m<sup>3</sup>/day(0.0125m<sup>3</sup>/min), 그리고 성인의 체중은 72kg로 가정하고 각 경로별로 흡수용량을 평가하였다.<sup>14)</sup> 이 때 사용된 식은 다음과 같았다.

$$D_i = \frac{E_r \times C_a \times R \times T}{BW} \quad (1)$$

$$D_d = D_i \times F \quad (2)$$

$$D_{ing} = \frac{E_i \times C_w \times A_w}{BW} \quad (3)$$

여기에서

$D_i$  = 흡입노출로 인한 chloroform의 용량( $\mu$ g/kg)

$E_r$  = 호흡기를 통한 chloroform의 흡수율(0.77)

$C_a$  = 공기 중 chloroform의 농도( $\mu$ g/m<sup>3</sup>)

$R$  = 성인의 호흡 속도(0.0125m<sup>3</sup>/min)

$T$  = 노출 시간(18.6hr 또는 10min)

$BW$  = 표준 인간의 체중(72kg)

$D_d$  = 피부흡수로 인한 chloroform의 용량( $\mu$ g/kg)

$F$  = 피부흡수로 인한 인체부하와 흡입노출로부터의 인체부하의 비(0.93)<sup>9)</sup>

$D_{ing}$  = 섭취노출로 인한 chloroform의 용량( $\mu$ g/kg)

$E_i$  = 위장관을 통한 chloroform의 흡수율(1.0)

$C_w$  = 수돗물 중 chloroform의 농도(14.0 $\mu$ g/L)

$A_w$  = 가열하지 않은 수돗물의 1일 동안 섭취 부피(1.4L $\times$ 0.05=0.07L)

또한 위에서 추정된 용량을 근거로 하여 평생발암위험도를 추정하였는데,<sup>9,13,15)</sup> 이 때 사용된 모델은 다음 식과 같다.

$$P_d = q \times D \times 10^{-3} \quad (4)$$

여기에서

$P_d$  = 평생발암위험도

$q$  = 발암위험도 potency slope[0.26(mg/kg/day)<sup>-1</sup>]

$D$  = Chloroform 용량( $\mu$ g/kg/day)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 실내공기 중 주야간 chloroform의 농도 비교

두 가정에서 각각 1회에 걸쳐 주간과 야간으로 나누어 실내공기를 채취한 후 chloroform에 대해 분석한 결과, chloroform의 농도는 모두 수돗물 사용이 더 많은 야간의 경우에 0.50 및 0.61 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 주간의 0.24 및 0.35 $\mu$ g/m<sup>3</sup>보다

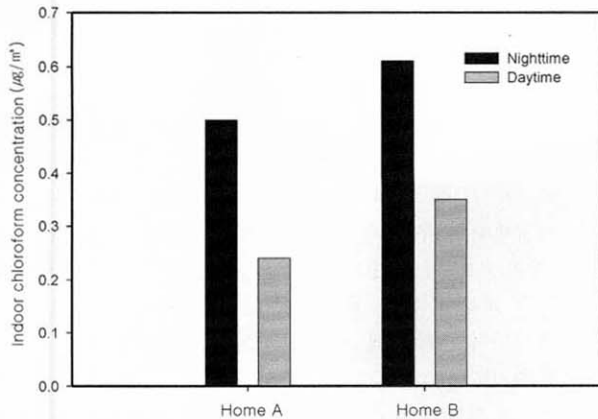


Fig. 2. Comparison of household air chloroform concentrations in the nighttime with those in the daytime for two homes A and B.

약 2배 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 이를 통해 가정에서의 활동에 의해 실내공기 중 chloroform의 농도가 증가되고, 따라서 가정에서 보내는 시간대인 야간에 수도물 사용으로 인해 더 높은 수준으로 chloroform에 노출된다는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 주방활동에 따른 실내 공기 중 chloroform의 농도 변화

이 실험에 사용된 수도물 중 chloroform의 농도는 14.2µg/L이었다. 주방에서의 활동인 조리 및 설거지로 인해 수도물에 함유된 휘발성 DBPs가 공기 중으로 휘발되어 거실에서의 chloroform 농도가 어떻게 변화되는지는 Fig. 3에 나타내었다. 주방에서의 활동 직전 거실에서의 배경농도는 검출한계인 0.30µg/m³ 이하였다가, 조리가 시작되어 20분이 경과할 때에는 농도가 1.5µg/m³로 증가했으며, 40분과 60분이 경과하면서 chloroform의 농도는 각각 1.1과 0.80µg/m³로 감소하였다. 이 때 집안의 모든 문과 창문은 개방되지 않았고, 주방의 후드는 작동되지 않았다.

또한 식사 후 설거지를 시작한 시점부터 20분이 경과하

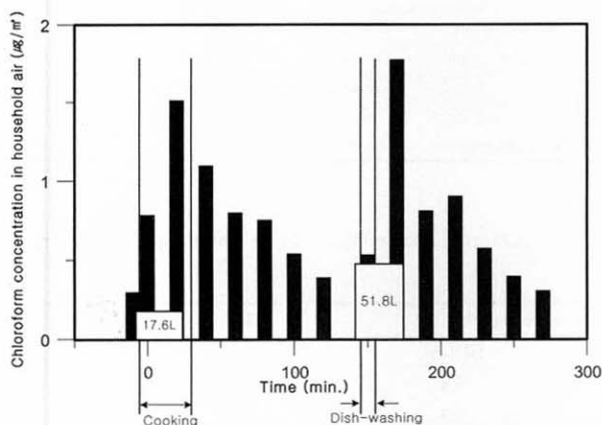


Fig. 3. Variation of chloroform concentrations (µg/m³) in the household air collected from the living room during and after cooking and dish-washing.

였을 때 chloroform의 농도는 1.8µg/m³로 크게 증가하였다가 이후 서서히 감소하여 검출한계 이하가 되었다.

설거지할 때에 사용한 물의 양은 조리 시에 사용한 물의 양보다 약 3배 많았지만, 밥을 짓고 찌개를 끓이는 과정에서는 물을 가열하기 때문에 수도물에 함유된 대부분의 chloroform이 휘발되지만, 설거지의 경우에는 일부만 휘발되기 때문에<sup>12)</sup>, 거실에서 chloroform 농도 증가에 기여하는 정도는 두 경우에 있어 거의 큰 차이를 보이지 않았다.

이와 같은 결과로 미루어 볼 때 주방에서의 대표적인 활동인 요리와 설거지 과정에서, 수도물에 함유되어 있는 휘발성 유기화합물은 공기 중으로 배출됨으로써 실내공기 중에서 그 농도가 증가되고, 그 결과 인간은 가정에서 보내는 시간 동안 이러한 화합물들에 대한 흡입노출이 증가된다는 것을 알 수 있다.

### 3.3. 샤워에 따른 욕실과 거실에서의 chloroform의 농도 변화

샤워에 사용된 수도물 중에 함유된 chloroform의 농도는 21.7µg/L이었다. 샤워 전에 욕실에서 측정된 chloroform의 농도는 검출한계(0.30µg/m³) 이하였지만, 샤워 시작 3분 후부터 10분 동안 측정된 욕실의 공기 중에서의 농도는 20.4µg/m³로 크게 증가하였다(Fig. 4). 욕실의 문이 닫힌 상태에서 샤워 개시 후 30분이 경과한 시점에서 욕실에서의 chloroform 농도는 14.4µg/m³로 29.4% 감소하였는데, 이는 욕실의 문이 닫혀있는 상태이기는 하였지만 문틈을 통해 chloroform가 거실 쪽으로 확산되어 이동했기 때문일 것으로 생각된다. 욕실의 문을 개방하고 20분이 경과한 후 욕실에서의 농도는 1.3µg/m³로 급격히 감소하였다가 80분이 지나서는 0.37µg/m³로, 그리고 100분이 지난 시점에서는 검출한계 이하가 되었다.

욕실의 문을 열고 20분 후에 측정된 욕실과 거실에서의 chloroform 농도는 각각 1.3과 0.97µg/m³로 거의 유사한 수준인 것으로 보아 확산이 거의 다 이루어졌음을 알 수 있

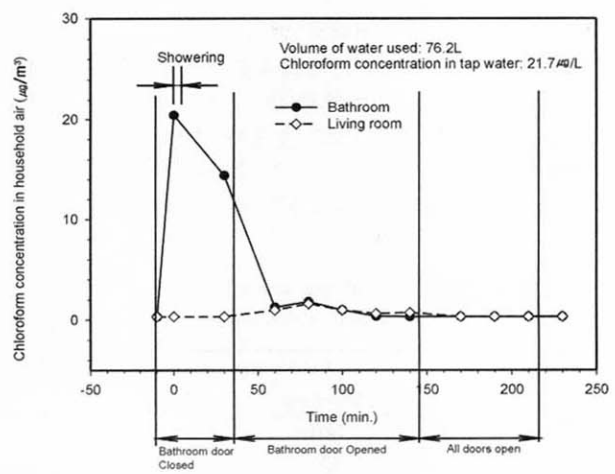


Fig. 4. Variation of chloroform concentrations (µg/m³) in the bathroom and living room during and after showering.

었다. 100분이 경과한 후 욕실에서의 농도는 검출한계 이하, 거실에서의 농도는  $0.72\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다가, 방안의 모든 문을 개방한 직후부터 욕실뿐만 아니라 거실에서의 농도는 검출한계 이하가 되었다.

따라서 이와 같은 결과는 20분 정도의 짧은 시간 동안의 자연환기만으로도 가정 내의 공기로부터 chloroform를 포함한 휘발성 화합물에 대한 노출을 크게 감소시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 이 실험에서는 욕실에서 강제환기를 통한 효과를 별도로 다루지 않았지만, 자연환기와 더불어 환풍기를 통한 강제환기를 시킨다면 실내공기를 흡입함으로써 비롯되는 노출을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.4. 보일러 가동에 따른 수돗물 중 chloroform의 농도 변화

뜨거운 물을 전혀 섞지 않았을 경우에 수온은  $13^\circ\text{C}$ 이었고, 샤워할 때의 조건인 중간 온도는  $35^\circ\text{C}$ 이었으며, 뜨거운 물만의 수온은  $45\sim 55^\circ\text{C}$ 이었다. 세 조건의 시료에 대해 측정된 chloroform의 평균 농도( $\pm$ 표준편차)는 각각  $14.0(\pm 0.8)$ ,  $20.5(\pm 0.7)$  및  $25.4(\pm 1.2)\mu\text{g}/\text{L}$ 로, 온도가 증가할수록 농도가 증가한다는 것을 보여주었다(Table 1). 또한 THMs의 일종인 BDCM도 온도가 증가함에 따라 그 농도가 증가하는 것을 보여주었다.

이와 같은 결과는 물을 가열함에 따라 잔류염소와 DBPs 전구물질의 반응이 촉진될 뿐만 아니라, trichloroacetic acid나 bromodichloroacetic acid와 같은 중간생성물이 분해되면서 chloroform이나 BDCM과 같은 DBPs의 최종 생성물이 증가되기 때문이다.<sup>12)</sup> 보일러 가동 중에는 비교적 밀폐된 공간 내에서 수돗물이 가열되기 때문에 요리할 때와는 다르게 가열에 의해 생성된 chloroform과 BDCM이 공기 중으로 쉽게 휘발되지 못한다. 따라서 보일러를 가동하여 온수를 사용하는 경우에는 냉수를 사용하는 경우보다 chloroform에 더 많이 노출될 것이라는 것을 알 수 있다.

### 3.5. 가정에서 물 사용과 관련된 chloroform에 대한 노출 및 발암 위험도 평가

앞에서 얻은 결과에 따르면 수돗물을 사용하는 가정에서의 주요 활동인 요리, 설거지 및 샤워에 의해 가정 내의 실내공기 중에서 chloroform의 농도는 증가되고, 이에 따라 가정에서 휘발성 DBPs에 노출은 수돗물의 섭취 및 샤워(흡입 및 피부흡수)뿐만 아니라,<sup>9)</sup> 가정에 머무르는 동안에

도 호흡기를 통해서 일어남을 알 수 있다. 많은 연구에서 경구섭취, 샤워 및 목욕 활동에 따른 노출과 위험도에 초점을 맞추기는 하였지만,<sup>9,12,15)</sup> 가정에서 머무르는 동안에 일어나는 비의도적이고 연속적인 노출에는 대해서는 별로 큰 주목을 기울이지 않았었다.

앞의 식 (1)에 따라 계산된 chloroform에 대한 흡입용량은 가정에서 머무는 동안에는  $0.20\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 샤워 중의 흡입용량인  $0.027\mu\text{g}/\text{kg}$ 보다 약 7배 높은 것으로 평가되었다. 샤워 중 피부를 통한 용량은 흡입용량의 93% 정도인 것으로 평가되어,<sup>9)</sup> 식 2에 의해  $0.025\mu\text{g}/\text{kg}(0.027\mu\text{g}/\text{kg}\times 0.93)$ 으로 추정되었다. 경구노출을 통한 chloroform의 내부용량은 1일 물 섭취량 1.4L, 섭취한 수돗물 중 가열하지 않고 마시는 비율은 5%,<sup>9)</sup> 그리고 위장관에서 chloroform의 흡수율은 100%라고 가정하였을 때  $0.014\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 추정되었다(Table 2).

또한 위에서 추정된 용량을 근거로 식 (4)를 이용하여 추정된 chloroform에 대한 위험도는 Table 2에 요약하였다. 가정에서 머무르는 동안에 chloroform에 대한 노출로 인한 발암위험도는  $52\times 10^{-6}$ 로 샤워로 인한 발암위험도  $13.5\times 10^{-6}$ 보다 약 4배, 그리고 수돗물 섭취로 인한 발암위험도  $3.6\times 10^{-6}$  보다는 약 14배 높은 것으로 추정되었다.

이와 같은 결과는 우리나라 사람들의 독특한 식생활 패턴과 매우 밀접한 관련을 갖고 있다. 가정에서 수돗물이 함유되는 대부분의 요리(국, 탕, 찌개 등)와 음료수는 가열한 후에 섭취되기 때문에, 수돗물 중에 존재하는 휘발성 DBPs는 대부분 물에 남아있지 않고 공기 중으로 휘발됨에 따라 경구섭취를 통한 노출은 극히 적은 없는 반면에, 가정에 머무르는 동안에는 실내공기를 흡입함으로써 호흡기를 통한 노출이 상대적으로 높게 된다.

이와 같은 흡입노출량은 계절에 따라 큰 차이를 보이는 데, 한 예로 춘천지역의 60가정을 대상으로 한 연구에서는

**Table 2.** Chloroform doses and the corresponding lifetime cancer risk estimates

Activity type	Exposure route	Chloroform dose ( $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ )	Cancer risk (per million)
Household stay	Inhalation	0.20	52.0
Normal shower	Inhalation	0.027	7.0
	Dermal	0.025	6.5
	Total	0.052	13.5
Water consumption	Ingestion	0.014	3.6

**Table 1.** Variations of the concentrations of chloroform and bromodichloromethane (BDCM) in chlorinated tap water with increased water temperature

	Cold water ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )		Warm water ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )		Hot water ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	
	Chloroform	BDCM	Chloroform	BDCM	Chloroform	BDCM
Mean	14.0	2.8	20.5	3.8	25.4	4.6
SDa	0.8	0.3	0.7	0.3	1.2	0.2
Minimum	13.2	2.6	19.7	3.6	24.1	4.4
Maximum	14.7	3.2	21.1	4.1	26.3	4.8

<sup>a</sup>Standard deviation.

기온이 높은 여름보다 겨울에 훨씬 더 높은 것으로 나타났다.<sup>17)</sup> 여름과 겨울에 수도물 중 chloroform의 평균 농도는 각각 16.6 및 10.9 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 여름이 겨울에 비해 1.5배 높았던 반면에, 거실의 공기 중에서의 농도는 각각 0.18 및 1.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 여름에 비해 겨울에 약 8배 높은 것으로 나타났다. 이 자료를 이용하여 흡입용량을 계산하면 0.027 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 샤워 중 흡입을 통한 노출과 유사한 수준이 되고, 경구섭취에 대한 용량의 약 2배에 해당된다.

따라서 수도물에 함유되어 있는 휘발성 DBPs에 대한 노출은 수도물 중의 농도 및 활동패턴뿐만 아니라 환기 정도에 의해 결정되므로, 가정에서 DBPs에 대한 노출을 감소시키기 위해서는 수도물 사용 중이나 사용 직후 강제 또는 자연환기를 시켜야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

가정에서 수도물을 사용하는 주요 활동인 요리, 설거지 및 샤워로 인해 실내공기 중 휘발성 염소소독부산물인 chloroform의 농도가 상승한다. 그 결과 가정에서 장시간을 보내는 동안에 호흡기를 통해 비의도적으로 노출될 수밖에 없다.

가정에서 수도물 사용과 관련된 주된 활동과 경로에 대한 인체노출량과 평생발암위해도는 가정에서 머무르는 동안에 공기를 흡입함으로써 각각 0.20 $\mu\text{g}/\text{kg}$  및 52.0 $\times 10^6$ 로 가장 크고, 샤워를 과정에서 0.052 $\mu\text{g}/\text{kg}$  및 13.5 $\times 10^6$ 로 그 다음, 그리고 수도물을 경구섭취하는 과정을 통해서 0.014 $\mu\text{g}/\text{kg}$  및 3.6 $\times 10^6$ 로 가장 낮은 것으로 평가되었다. 이는 우리나라 사람들이 수도물을 직접 섭취하는 경우가 매우 낮고 대부분은 가열하여 마시기 때문에 대부분의 휘발성 염소소독부산물이 공기 중으로 휘발되기 때문이다.

따라서 수도물 중에 함유되어 있는 휘발성 DBPs에 대한 역학연구를 실시하거나 건강기준치를 설정하는데 있어서, 경구섭취와 피부흡수뿐만 아니라 가정에 머무르는 동안에 비의도적으로 일어나는 흡입을 통한 노출도 반드시 포함시켜야 할 것이다. 이와 같은 흡입노출은 뜨거운 수도물을 사용할 때에 찬물을 사용할 때보다 더 높게 되고, 환기를 실시함으로써 감소시킬 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2000-00202) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Singer, P. C., Control of disinfection by-products in drinking water. *J. Environ. Eng.*, **120**, pp. 727-744 (1994).
2. Krasner, S. W., McQuire, M. J., Jacangelo, J. G., Patania, N. L., Reagan, K. M., and Aietta, E. M., The occurrence

- of disinfection by-products in US drinking water. *J. AWWA*, **81**, pp. 41-53 (1989).
3. Kramer, M. D., Lynch, C. F., Issacson, P., and Hanson, J. W., The association of waterborne chloroform with intrauterine growth retardation. *Epidemiology*, **3**, pp. 407-413 (1992).
4. Bove, F. J., Fulcomer, M. C., Klotz, J. B., Esmart, J., Dufficy, E. M., and Savrin, J. E., Public drinking water contamination and birth outcomes. *Am. J. Epidemiol.*, **141**, pp. 850-862 (1995).
5. Savitz, D. A., Andrews, K. W., and Pastore, L. M., Drinking water and pregnancy outcome in Central North Carolina: Source, amount, and trihalomethane levels. *Environ. Health Perspect.*, **103**, pp. 592-596 (1995).
6. McGeehin, M. A., Reif, J. S., Beecher, J. C., and Mangione, E. J., Case-control study of bladder cancer and water disinfection methods in Colorado. *Am. J. Epidemiol.*, **138**, pp. 492-501 (1993).
7. Hildesheim, M. E., Cantor, K. P., Lynch, C. F., Dosenechi, M., Lubin, J., Alvanaja, M., and Craun, G., Drinking water sources and chlorination by-products: II. Risk of colon and rectal cancers. *Epidemiology*, **9**, pp. 29-35 (1998).
8. Koivusalo, M., Pukkala E., Vartiainen, T., Jaakkola, J. J. K., and Hakulinen, T., Drinking water chlorination and cancer — a historical cohort. *Cancer Causes Control*, **8**, pp. 192-200 (1998).
9. Jo, W. K., Weisel, C. P., and Liroy, P. J., Chloroform exposure and health risk associated with multiple uses of chlorinated tap water, *Risk Analysis*, **10**, pp. 581-585 (1990).
10. Lin, T-F and Hoang, S-W, Inhalation exposure to THMs from drinking water in south Taiwan, *Sci. Total Environ.*, **246**, pp. 41-49 (2000).
11. Andelman, J. B., Inhalation exposure in the home to volatile organic contaminants of drinking water, *Sci. Total Environ.*, **47**, pp. 443-460 (1985).
12. 김희갑, 이수형, 조리시 가열에 따른 수도물 중 염소소독부산물의 농도 변화와 인체 섭취 노출. *한국환경독성학회지*, **14**, pp. 35-43 (1999).
13. 김희갑, 김문숙, 윤지현, 가정에서의 수도물 사용과 관련된 휘발성 염소소독부산물에 대한 흡입노출평가, *한국환경독성학회지*, **17**, pp. 125-133 (2002).
14. Gephart, L. A., Tell, J. G. and Triemer, L. R., Exposure Factors Manual. *J. Soil Contam.*, **3**, pp. 1-71 (1994).
15. Marty, M. A., A health risk assesment for airborne chloroform. *Presented at the 82nd Annual Meeting of APCA*, Anaheim, California, June, 25-30 (1990).
16. 조완근, 목욕시 Chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출, *한국환경과학회지*, **7**, pp. 301-309 (1998).
17. 김희갑, 원고 준비 중.