

목욕시 Chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출

조 완근
경북대학교 환경공학과
(1997년 11월 26일 접수)

Inhalation and Dermal Exposures to Chloroform while Bathing

Wan-Kuen Jo

Dept. of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea

(Manuscript received 26 November 1997)

Recently, bathes have been suspected to an important source of indoor exposure to volatile organic compounds(VOCs). Two experiments were conducted to evaluate chloroform exposure and corresponding body burden by exposure routes while bathing. Another experiment was conducted to examine the chloroform dose during dermal exposure and the chloroform decay in breath after dermal exposure. The chloroform dose was determined based on exhaled breath analysis. The exhaled breath concentration measured after normal baths ($2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was approximately 13 times higher than measured prior to normal bathes ($0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Based on the means of the normalized post exposure chloroform breath concentration, the dermal exposure was estimated to contribute to 74% of total chloroform body burden while bathing. The internal dose from bathing (inhalation plus dermal) was comparable to the dose estimated from daily water ingestion. The risk associated with a weekly, 30-min bath was estimated to be 1×10^{-5} , while the risk from daily ingestion of tap water was to be 0.5×10^{-5} for 0.15 l and 6.5×10^{-5} for 2.0 l. Chloroform breath concentration increased gradually during the 60 minute dermal exposure. The breath decay after the dermal exposure showed two-phase mechanism, with early rapid decay and the second slow decay. The mathematical model was developed to describe the relationship between water and air chloroform concentrations, with $R^2 = 0.4$ and $p < 0.02$.

Key words : bath, dermal, inhalation, exposure, chloroform, body burden, dose

1. 서 론

현재, 국내에서 공급되는 수도수내 휘발성 유기 물질(volatile organic compounds, VOCs)에 대한 법적 기준은 하루 물 2 리터를 마신다고 가정할 때 특정 위험성(risk)을 유발시키는 수중 농도에 근거하고 있다. 그러나, 일반 가정에서 염소 처리된 수도수를 샤워의 목적으로 사용할 때, 수도수 사용자가 VOCs에 노출(exposure)되어 야기되는 위험성이 염소 처리된 수도수 2 리터를 하루에 마신다고 가정하여 추산된 위험성과 유사하거나 오히려 더 크다는 연구 결과가 나오고 있다(Andelman, 1985a; Andelman, 1985b; Andelman et al., 1986; McKone & Knezovich, 1991; Jo et al., 1990a; Jo et al., 1990b). 더욱이 최근에는 하루에 일반 수도수를 2 L 마시는 경우가 거의 없다. 따라서, 수도수를 마시는 경우뿐만 아니라 일반 가정에서 다른 용도로 사용될 때, 이의 사용으로 야기되는 위험성의 평가에 근거하여 Chloroform과 같은 VOCs에 대한 음용수 수질 기준이 재평가되어야 한다.

일반 가정에서의 수도수는 음용수 이외에도 목욕, 샤워, 세탁, 식기 세척, 및 수세식 화장실에 이용된다. 샤워시, 비교적 좁고 밀폐된 샤워실의 공간으로 오염 물질이 휘발되어 샤워실 공기 내에는 높은 농도의 VOCs가 존재하게 되고, 샤워 개인(showering individual)의 인체 전부가 물 속에 잠존하는 VOCs에 노출되기 때문에, 샤워시 VOCs에 대한 노출 및 인체 부담(body burden)이 심도 있게 연구되었다. 선진 연구(Andelman, 1985a; Andelman, 1985b; Andelman et al., 1986; McKone & Knezovich, 1991)는 샤워실 공기의 Trichloroethylene (TCE) 농도는 샤워시간에 따라 증가한다고 보고하였다. 또한, Nicholas et al. (1992)는 6분 동안의 샤워를 할 때 야기되는 TCE 흡기 노출(inhalation exposure)이 동일한 물을 1 리터 마실 때 야기되는 ingestion exposure보다 2 배정도 높은 것으로 발표하였다. 샤워중 흡기 노출의 중요성이 강조되어 왔던 것과는 달리 (Andelman, 1985a; Andelman, 1985b; Andelman et al., 1986; McKone, 1987), 샤

위중 피부 노출(dermal exposure)의 중요성은 큰 관심을 받지 못하다가 1990년에 Jo et al.(1990a)에 의한 샤워중 피부 노출에 대한 연구 결과가 발표되고서야 이에 대한 관심도 증가하기 시작했다. Jo et al.(1990a)는 샤워시 흡기 노출과 피부 노출에 의한 Chloroform 인체 부담이 유사하다고 결론 지었다. 최근 연구 (Weisel & Jo, 1996; Weisel et al., 1992)에서는 샤워로 인한 Chloroform 노출후 시간 경과에 따른 인체내 Chloroform 농도 변화를 관찰하였고, 수영시 피부 접촉 노출이 흡기 노출의 2.5배로 추산되었다 (Jo, 1994). VOCs로 오염된 물의 사용과 관련된 또 하나의 최근 연구 (McKone, 1993)에서는 VOCs 노출 경로에 따라 노출에 의한 영향이 다르기 때문에 VOCs에 의한 인체 부담에 대한 약리속도론(pharmacokinetics) 연구와 이에 대한 위해성을 평가하기 위해서는 노출 경로에 따른 노출량이 우선적으로 조사되어야 함이 지적되었다.

샤워시와 유사하게, 목욕 개인(bathing individual)도 목욕실 공기로 휘발되는 VOCs와 목욕 내의 물에 잔류하는 VOCs에 노출될 수 있다. Murphy(1987), Brown et al.(1984) 그리고 Brown and Hattis (1989)은 목욕시 피부 접촉에 의해서 VOCs가 인체내로 침투할 수 있다고 보고하였다. 수학적 모델을 사용하여, Foster and Chrostowski (1986)는 목욕 중 VOCs에 대한 피부 노출 보다 오히려 흡기노출량이 많은 것으로 추산하였다. 목욕 중 VOCs의 노출에 대한 앞선 연구가 수학 모델을 이용한 추산치이거나, 또는 동물을 이용한 실험 결과치로서, 실제 목욕시 야기되는 VOCs에 대한 노출량과 인체 부담에 대한 실측 자료는 아직 발표되지 않고 있다. 더욱이 목욕시 야기되는 인체 부담에 대한 약리속도론 연구와 위해성을 평가의 기초가 되는 목욕시 노출 경로에 따른 오염물질의 노출량과 노출중 및 노출후 오염물질의 체내 거동이 알려져 있지 않다.

VOCs로 오염된 물을 이용하여 목욕시 오염된 물로부터 휘발되는 VOCs의 양이 목욕실의 공기 농도와 목욕시 야기되는 흡기 노출을 결정하는 주요 인자로 작용한다. 목욕에 이용되는 VOCs의 농도가 물과 공기에서 측정이 되면, 물과 공기에서의 VOCs의 특성을 이용하여 물과 공기 사이의 VOCs에 대한 관계를 모델링(modeling)을 수행할 수 있다. 이렇게 개발되는 모델은 공기내의 VOCs 농도를 측정하지 않고 수중 농도만 측정하고 모델에 이용되는 변수 값들만 입력이 되면 공기내의 VOCs 농도를 예측 가능하게 한다.

본 연구는 염소 처리된 수도수를 이용하여 목욕을 할 때 야기되는 Chloroform에 대한 노출량과 인체 부담을 노출 경로별로 구분하여 평가하였고, 물과 공기내 Chloroform 농도 관계를 설명하는 기·액 모델(Air-Water Model)을 개발하였다. 또한 노출 평가 결과에 근거하여 수도수를 목욕과 음용수로 이용할 때 야기되는 Chloroform에 대한 발암 위해성이 평가되었고, 목욕시 피부 접촉 노출중 및 노출후의 인체내 Chloroform 거동이 조사되었다. 해당 노출량과 인체 부담을 측정하고 체내 Chloroform의 거동을 조사하기 위해서, 물, 공기 및 목욕 개인의 호기(exhaled breath)내의 Chloroform 농

도를 측정하였다. 여기서 호기농도 측정법은 폐포공기와 폐포의 실핏줄 사이에서 일어나는 기체와 액체의 평형 원리에 근거한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취

2.1.1 호기 시료 채취

호기 시료는 본 연구에서 제작된 호기 시료 채취기(breath sampler)를 이용하여 채취되었다. 호기 시료 채취기는 재흡기되지 않는 밸브 (non-rebreathing two-way valve, Laerdal Medical Co.)를 중심으로 왼쪽의 흡기 부분에는 1 인치 외경의 Teflon tube를 연결하고, 오른쪽의 시료채취부에는 0.5 인치 외경과 25 피트 길이의 Teflon tube를 연결하여 제작되었다. 시료채취부는 다시 1/4 인치 외경의 Stainless Steel(SS) tube와 Union fitting을 이용하여 시료 채취 trap과 개인 시료 채취 핀프(MG-4, AMTEK)에 연결되었다. 정화된 공기를 피실험자에게 공급하기 위해서, 흡기부의 tube 입구에 두 개의 NIOSH- and MSHA- approved organic vapor cartridge를 부착하였다. 호기 시료는 피실험자가 호기 시료 채취기를 통해서 호흡을 할 동안 Tenax가 채워진 1/4 인치 외경과 4.4 인치 길이의 Pyrex trap을 통하여 채취되었다.

Tenax trap은 사용 전에 Soxhlet 장치에서 Methanol (Spectra grade)로 24 시간 동안, 그 다음 24 시간 동안은 n-Pentane을 이용하여 추출 및 세척되었다. 이렇게 세척된 Tenax trap은 정화된 질소가 공급되는 동안 dry oven(220 °C) 안에서 24시간 동안 건조되었다. 분석기기의 감도(sensitivity)와 측정 대상 물질의 효율적 한계 부피(breakthrough volume)를 고려하여 호기 시료는 230 - 250 mL/min 사이에서 노출후의 시료는 30초 동안 그리고 노출 전의 시료는 2 분 동안 채취되었다. 호기 시료 채취기의 반복 사용에 따른 오염을 최소화하기 위해서, Methanol과 활성탄을 통과한 질소 가스를 이용하여 호기 시료 채취기를 정기적으로 세척 및 소독하였다.

시료 채취 절차는 Jo et al.(1988)에 근거하여 시료의 외부 오염을 최소화하는 방법을 이용하였다. 실험실과 현장에서 trap을 취급시, 손의 지문 또는 화장품으로부터 trap이 오염되는 것을 방지하기 위해서, 항상 깨끗한 면장갑을 착용하였다. 운반시 trap이 외부 공기 및 차동차내 VOCs에 노출되어 오염되는 것을 방지하기 위해서, trap의 운반시는 오염되지 않은 Teflon 막이 부착된 마개와 유리관을 이용하였다.

2.1.2 물 시료 채취

물 시료는 목욕 전후에 Teflon cap이 부착된 40 mL 유리병을 이용하여 채취되었다. 물 시료를 채취하기 전에, 물에 잔류하는 염소의 반응을 억제시키기 위해서 각 시료 병에 Sodium thiosulfate 10 mg을 첨가하였다. 물 시료 채취 절차를 위해서 EPA Method 502.1 (USEPA, 1981)을 응용하였다.

목욕시 Chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출

2.1.3 공기 시료 채취

공기 시료는 개인 시료 채취 펌프(MG-4, AMTEK)와 호기 시료 채취시 사용된 것과 동일한 trap을 이용하여 목욕중에 채취되었다. 시료 채취 trap은 목욕 개인의 호흡 영역에 설치되었다. 공기 시료는 10 - 20 mL/min 사이에서 노출 시간 동안 채취되었고 이 또한 분석기기의 감도(sensitivity)와 측정 대상 물질의 효율적 한계 부피(breakthrough volume)에 근거하여 결정되었다. 시료 채취 절차는 호기 시료 때와 동일하였다.

2.2 시료 분석

2.2.1 호기 및 공기 시료 분석

채취된 공기 시료는 미국의 연방 환경 보호국(United States Environmental Protection Agency, USEPA)의 방법 TO-1 (Winberry et al., 1988)을 응용하여 Chloroform에 대해서 분석되었다. Capillary column (Supelco VOCOL 30m*0.53 mm inside diameter)과 전자 포획 검출기(Electron Capture Detector, ECD)가 장치된 기체크로마토그라피 (Gas Chromatography, GC: Hewlett-Packard 5890A)와 열탈착 장치 (Thermal Desorbing Unit, TDU: Supelco TDU Model 890/891)가 분석 장치로 이용되었다. GC의 temperature programming을 위해서 향온조(oven)의 초기 온도는 40 °C에서 4분간, 온도 상승 속도는 8 °C/min, 그리고 최종 온도 200°C로 조절되었다. TDU에서 열탈착을 위해서 온도는 200 °C 그리고 열탈착 시간은 9 분이 이용되었다. TDU에서의 운반 기체(carrier gas, N₂)의 유량은 9 mL/min, Transfer line의 온도는 240°C 그리고 장치 내의 Valve 온도는 230 °C로 고정되었다.

2.2.2 물 시료 분석

채취된 물 시료의 분석을 위해서, Purge & trap system과 호기 시료 분석 때와 동일한 GC가 이용되었다. Purge를 위해서 25 mL 용량의 sparger(Supelco, Co.)에 20 mL의 물을 옮겨 담고, hydrocarbon trap을 통과한 N₂ gas를 이용하여 10분간 purge하여 수중의 Chloroform을 1/4 인치 Tenax trap에 이전시켰다. 이렇게 준비된 trap은 24시간 이내에 공기 시료의 분석과 동일한 방법으로 분석되었다.

2.3 호기 시료 채취기 시험

제작된 호기 시료 채취기(breath sampler)의 작동 여부가 4회의 흡기 노출 실험을 이용하여 시험되었다. 이 시험을 위해서, 중형 아파트(대구시 서구 내당동 7호 광장 삼익 아파트)의 목욕실 욕조에 염소 처리된 수도수를 채웠다. 피부 노출을 피하기 위해서 피실험자가 수도수가 채워진 욕조 옆에서 옷을 입은 채 정화된 공기가 공급되는 호기 시료 채취기에 연결된 호흡구(respirator)를 통해서 호흡을 하면서 30분간 목욕실에 머물렀다. 입실 전후의 호기내 Chloroform 농도를 측정하여, 호기 농도 차이에 근거하여 호기 시료 채취기의 작동 여부를 판단하였다.

2.4 실험 1: 목욕에 의한 노출

네명의 피실험자를 우선권 없이 무작위로 선정하여 정상적인 목욕을 하게 하여 15회의 목욕에 의한 Chloroform 노출에 관한 실험 결과를 얻었다. 본 연구에서 정상적인 목욕이란 피실험자가 평상시의 목욕 방식을 유지하여 목욕할 때 야기되는 흡기 및 피부 노출 모두를 포함하는 조건을 의미한다. 목욕 조건에 따른 Chloroform에 대한 노출량과 인체 부담의 변화를 줄이기 위해서 여러 목욕 인자들이 조절되었다. 물의 온도에 따른 수중 잔류 농도와 목욕실내 공기 농도 변화를 줄이기 위해서 목욕물의 온도는 일반적인 목욕 온도인 40 °C와 43 °C 사이에서 조절되었다. 온수와 냉수의 혼합비를 조절하기 위해서 예비 실험을 통해서 표시된 조절 벨브를 이용하였다. 모든 목욕은 30분간 행하고, 비누 종류에 따른 피부 노출량의 변화를 줄이기 위해서 한 종류의 비누(Ivory)만 사용하였다. 모든 목욕에 대하여 목욕탕 환기는 동일하게 유지되었다. 피실험자의 입실은 물이 채워진 직후, 그리고 퇴실 시간은 욕조에서 나온 뒤 1분 30초로 조절되었다. 피실험자의 호흡 시료는 입실 직전 2분 동안 그리고 퇴실 30초 후에 30 초 동안 채취되었다. 각 노출 실험 사이의 시간 간격은 이전 실험의 영향을 받지 않을 정도로 최소 4 시간을 유지시켰다. 또한, 피실험자의 잔류 인체 부담이 다음의 실험 결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서 피실험자의 연속 노출 실험 간격은 최소 하루가 되게 하였다.

2.5 실험 2: 피부 접촉에 의한 노출 I

정상적인 목욕 실험에 참여한 동일한 네명의 피실험자가 흡기 노출 없이 피부 노출만에 의한 Chloroform의 노출 실험에 참여하였다. 이 실험을 위해서 피실험자는 염소 처리된 수도수가 채워진 욕조에 담고, 흡기 노출을 방지하기 위해서, 피실험자는 정화된 공기가 공급되는 호기 시료 채취기에 연결된 호흡구(respirator)를 통해서 호흡하면서 30분간 욕조에 머물렀다. 이러한 피부 노출 전후에, 피실험자의 호기 시료를 채취하고 Chloroform에 대하여 측정하여 피부 노출로 인한 Chloroform의 노출량을 평가하였다. 다른 실험 조건은 정상적인 목욕 실험의 조건과 동일하게 조절되었다.

2.6 실험 3: 피부 접촉에 의한 노출 II

실험 2와 동일한 피실험자와 피부 접촉 노출 방법을 이용하여 이 실험에서 욕실의 높은 온도로 인한 피실험자의 불편을 줄이기 위해서 욕실의 출입문과 창문을 열어 놓았고, 노출중의 Chloroform 거동을 보다 긴 시간 동안 관찰하기 위해서 60 분간 피부 접촉 노출이 이루어졌다. 호기 시료는 노출 전후 및 노출 중에 채취되었다. 노출 전, 노출 중 및 노출 후의 호기 시료 채취는 노출 시작 후 15, 30, 45 및 55 분이 경과했을 때 30초 동안 채취되었다. 또 다른 일련의 호기 시료가 노출 후 2, 30, 60, 150, 및 300 분에 채취되었다. 노출 후 첫 한 시간 이내에 채취된 호기 시료는 30초 동안 그리고 그 이후 및 노출 전의 호기 시료는 2 분 동안 채취되었다.

Table 1. Breath chloroform concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) prior to and right after 30 minute stay, and air chloroform concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in the bathroom with door closed

	Experiment 1		Experiment 2		Experiment 3		Experiment 4	
	Prior to	After						
Air in Bathroom	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
	13.3		16.4		12.8		10.7	

Table 2. Chloroform concentrations in the air of bathroom, in the water of bathtub, and in the exhaled breath of individuals prior to and after normal bathing

Air Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Water Conc. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Breath Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Normalized Breath Conc. ^c ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\mu\text{g}/\text{L})$)
		Prior to ^a	After ^b	
12.3	9.2	0.3	2.4	0.26
9.8	8.6	0.1	1.4	0.16
21.2	10.8	0.2	5.2	0.48
20.7	9.9	0.3	3.3	0.33
13.5	8.8	0.2	3.5	0.40
15.7	8.6	0.2	3.1	0.36
14.1	9.0	0.4	3.7	0.41
15.4	10.0	0.2	2.2	0.22
19.6	9.7	0.3	3.1	0.32
15.2	10.0	0.3	2.4	0.24
14.6	7.4	0.2	2.4	0.32
17.6	8.3	0.2	1.9	0.23
7.8	7.9	0.1	2.1	0.27
12.9	8.1	0.1	2.4	0.30
NA	7.4	0.1	2.7	0.36

^a indicates breath chloroform concentrations prior to bathing.

^b indicates breath chloroform concentrations after bathing.

^c indicates breath chloroform concentration after bathing, normalized to water chloroform concentration.

* NA indicates "not available".

3. 결과

3.1 호기 시료 채취기의 시험

호기 시료 채취기를 시험하기 위해서 피실험자가 욕실에서 30분 동안 호기 시료 채취기를 통하여 호흡을 한 전후에 피실험자의 호기를 채취 분석하였다. 입실 전 후에 측정된 호기내 Chloroform 농도가 Table 1에 나타난다. 피실험자가 욕실 내에 머무르는 동안 욕실내 공기 중 Chloroform 평균 농도의 범위는 10.7 - 16.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 입실 전후의 호기내 Chloroform 농도간에 차이가 없었으므로 호기 시료 채취기는 욕실내의 공기 중 Chloroform의 영향을 받지 않은 것으로 판단되었다.

3.2 목욕에 의한 노출

네명의 피실험자에 의한 15회의 정상적인 목욕 전과 후 각각에 15개의 목욕물 시료와 15 개의 호기 시료가 채취되었다. 또한 15 개의 공기 시료가 15회의 목욕 중에 채취되었다. Table 2에 나타난 물 농도는 목욕 전후 물 농도의 평균을 의미하며, 정규화된 호기 농도(normalized breath concentration)는 측정된 호기 농도

도를 물 농도에 대하여 정규화한 값으로 나타내었다. Table 2에 나타난 바와 같이 물, 공기 및 호기 농도는 목욕을 반복함에 따라 변화를 보였다. 물 농도의 경우 평균과 표준편차는 각각 8.9 및 1.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었고 농도 범위는 7.4 - 10.6 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었다. 공기 농도는 15.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균과 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 표준편차를 보였고 공기 농도의 범위는 7.8 - 21.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 목욕 후의 호기 농도는 평균과 표준편차가 각각 2.8 및 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 농도 범위는 1.4 - 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 피실험자의 배경 호기 농도는 평균과 표준편차가 각각 2.8 및 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 농도 범위는 1.4 - 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 피실험자의 배경 호기 농도를 나타내는 목욕 전의 농도 범위인 0.1- 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 훨씬 높게 나타났다. 목욕 전후의 호기 농도에 근거할 때 Chloroform에 대한 인체 부담은 일회 목욕으로 인해 약 13 배 증가하는 것으로 추산되었다.

3.3 피부 접촉에 의한 노출 I

정상적인 목욕 실험에 참여한 동일한 네명의 피실험자에 의한 15회의 피부 노출전과 후 각각에 15개의 목욕물 시료와 15 개의 호기 시료가 채취되었다. 앞과 동일한 방법으로 정규화된 호기 농도와 물의 평균 농도가

Table 3. Chloroform concentrations in the water of bathtub and in the exhaled breath of individuals prior to and after dermal exposures in the bathroom

Water Conc. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Breath Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Normalized Breath Conc. ^c ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\mu\text{g}/\text{L})$)
	Prior to ^a	After ^b	
10.1	0.2	2.8	0.28
9.7	0.2	1.8	0.19
10.3	0.1	2.2	0.21
11.2	0.2	2.8	0.25
7.5	0.2	1.6	0.21
6.3	0.2	1.1	0.17
13.5	0.2	3.6	0.27
7.9	0.1	1.2	0.15
12.4	0.2	2.4	0.19
8.3	0.2	2.3	0.28
6.3	0.3	1.2	0.19
13.5	0.1	3.8	0.28
5.9	0.1	1.4	0.23
12.7	0.2	3.2	0.25
14.2	0.2	3.7	0.26

^a indicates breath chloroform concentrations prior to dermal exposure.^b indicates breath chloroform concentrations after dermal exposure.^c indicates breath chloroform concentration after dermal exposure, normalized to water chloroform concentration.

Table 3에 나타난다. 물의 평균 농도와 표준편차가 각각 10.0 및 2.9 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이고 농도 범위는 5.9 - 14.2 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었다. 피부 접촉 노출전의 호기 농도가 0.1에서 0.3 범위로서 앞 실험 경우와 유사하며 피부 접촉 노출후의 호기 농도의 평균과 표준편차가 각각 2.3 및 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 농도 범위는 1.1 - 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 피부 접촉 노출후의 호기 농도가 노출전의 호기 농도보다 높게 나타났으나 정상적인 목욕 후의 호기 농도보다는 낮게 나타났다.

정상적인 목욕에 의한 노출과 피부 접촉에 의한 노출을 통계학적으로 비교하기 위해서 Table 2와 Table 3에 나타난 정규화된 호기 농도를 이용하였다. F-test에 의하면 $p = 0.002$ 에서 정상적인 목욕에 의한 노출과 피부 접촉에 의한 노출에는 상호 유의성이 있는 것으로 나타났다. 이 두개 노출의 정량적인 차이를 계산하기 위해서 두 개 노출에 의한 표준화된 호기 농도의 평균을 이용하였다. 목욕에 의한 노출에 의한 표준화된 호기 농도의 평균은 $0.31(\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\mu\text{g}/\text{L})$ 이고 피부 접촉에 의한 노출의 경우는 $0.23(\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\mu\text{g}/\text{L})$ 이었다. 따라서 피부 접촉에 의한 노출은 정상적인 목욕에 의한 노출의 약 74%에 해당하는 것으로 계산되었다.

3.4 피부 접촉에 의한 노출 II

피부 접촉 노출 실험에 이용된 물과 욕실 공기에서의 Chloroform 농도와 피부 접촉 노출전, 노출중 및 노출후의 호기 농도가 Table 4에 나타난다. 물 농도의 경우 평균과 표준편차는 각각 13.3 및 1.6 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었고 농도 범위는 11 - 15 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었다. 욕실내 공기 농도는 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균과 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 표준편차를 보였고 공기 농도 범위는 0.6 - 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 피부 접촉 노출중

에는 호기 농도가 시간에 따라 증가하였고 노출 시작 55분 후에는 호기 농도($4.3 - 6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 노출전($0.04 - 0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 72 - 160 배정도 높게 나타났다. 피부 노출후의 최대 호기 농도($1.8 - 4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 노출 2분 후에 나타났고 노출후 초기 단계에서는 시간이 경과함에 따라 호기 농도가 급격히 감소하다가 노출 1 시간 후에는 서서히 배경 호기 농도(background breath concentration)로 접근하였다.

4. 고 칠

목욕시 신체의 대부분이 욕조 내의 물에 잠기고 물로부터 욕실의 공기로 오염물질의 일부가 휘발하기 때문에 목욕중에 야기되는 오염 물질에 대한 가능 노출 경로는 흡기 노출 및 피부 접촉 노출이다. 본 연구에서는 피부 접촉 노출시에 증가되는 체내 Chloroform 인체 부담(Breath Concentration)을 측정함으로서 염소 처리된 수도수를 이용하여 목욕하는 개인은 피부 흡수를 통해 Chloroform에 노출된다는 사실을 확인하였다. 이러한 피부 접촉에 의한 Chloroform 노출은 앞선 연구의 지지를 받는다. Scheuplein and Irvin (1971)은 비극성 산업용 유기 용매는 진한 용액보다 묽은 용액 상태에서 피부 흡수율이 높다고 추산하였다. Murphy (1987)와 Brown et al.(1984)도 목욕시 피부 흡수를 통해 VOCs 이 인체내로 침투할 수 있다고 보고하였다. 실험적으로는 Sato와 Nakajima (1978)와 Stewart와 Dodd (1964)가 호기 분석법을 이용하여 Chlorinate Hydrocarbon Solvents가 피부 흡수를 통해 인체내로 침투한다는 것을 증명하였다. 최근에도 Jo et al.(1990b)은 샤워시 Chloroform이 피부 접촉에 의해 인체내로 침투한다고 보고하였다.

Table 4. Chloroform breath concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) prior to, during, and after 60 minute dermal exposure

Time	Dermal Exposure Run 1	Dermal Exposure Run 2	Dermal Exposure Run 3	Dermal Exposure Run 4
Prior to	0.06	0.04	0.05	0.06
15 min during	1.6	1.4	1.8	2.1
30 min during	4.6	3.2	4.1	4.1
45 min during	5.7	3.8	4.5	5.3
55 min during	6.4	4.3	5.2	5.6
2 min after	4.1	1.8	NA	3.2
3 min after	NA	NA	3.3	NA
5 min after	4.6	2.1	NA	3.4
7 min after	NA	NA	3.5	NA
10 min after	3.2	1.5	3.3	2.7
20 min after	1.3	NA	1.1	1.8
30 min after	0.5	1.1	0.9	1.1
40 min after	0.5	0.9	0.6	0.7
50 min after	NA	0.7	0.3	NA
60 min after	0.2	NA	0.1	0.2
70 min after	NA	0.1	NA	NA
150 min after	0.1	0.08	0.08	0.09
300 min after	0.07	0.06	0.07	0.07
Bathroom Air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^a :	0.8	0.6	0.7	0.7
Water Conc. ($\mu\text{g}/\text{L}$)				
prior to:	15	13	11	13
after:	14	14	11	15

* NA means not-available

* Superscript "a" represents the condition- both bathroom door and window opened.

흡기 노출을 추산하기 위해서 정상적인 목욕에 의한 Chloroform 노출과 피부 접촉에 의한 Chloroform 노출이 비교되었다. 정상적인 목욕과 피부 접촉에 의한 노출간에는 유의한 차이가 있었다. 이러한 차이는 정상적인 목욕의 경우 피부 접촉 노출뿐만 아니라 흡기 노출도 일어나기 때문에으로 사료된다. 즉 목욕중에 수중의 Chloroform이 일부 휘발하여 목욕 개인의 호흡을 통해 Chloroform이 인체내로 침투하고 이로 인해 목욕 개인의 Chloroform에 대한 인체 부담이 증가한다는 이론이다. 이러한 이론은 여러 앞선 연구들에 기초한다. Andelman et al.(1986)과 Mckone and Knezovich (1991)은 샤워시 TCE가 휘발한다고 발표하였다. 나아가, Jo et al.(1990b)은 샤워시 샤워실 공기내의 Chloroform 농도가 증가하며 이로 인해 샤워 개인의 Chloroform에 대한 인체 부담이 증가하는 것을 발견하였다.

Chloroform에 대한 노출 경로에 따른 인체 부담률은 목욕과 샤워시에 서로 다르게 추산되었다. 목욕시의 피부 접촉과 흡기에 의한 Chloroform에 대한 인체 부담은 각각 74 및 26%로 추산된 반면에 Jo et al. (1990b)은 샤워시 피부 접촉과 흡기에 의한 Chloroform 노출에 의한 부담이 각각 50%가 된다고 추산하였다. 이러한 차이는 샤워중에는 개인이 불연속적인 샤워 물방울 속의 Chloroform에 노출되는 반면에 목욕중에는 신체가 욕조 물에 거의 항상 담겨져 있기 때문에 샤워에 비해 목욕시는 피부 접촉에 의한 Chloroform에 대한 인체 부담

률이 큰 것으로 사료된다. 다른 하나의 설명은 샤워시 샤워 개인의 머리 위에서 낙하하는 물방울이 샤워 개인의 몸과 욕조 바닥에 충돌하면서 보다 많은 Chloroform이 욕실내로 휘발되어 목욕에 비해 흡기 노출에 의한 Chloroform 인체 부담이 커진다는 것이다.

4.1 흡기 노출

수도수의 용도에 따른 Chloroform의 노출량을 비교하기 위해서 일회 목욕 및 하루 마시는 수도수에 의한 흡입량(dose)을 추산하였다. 목욕으로 인한 흡입량은 흡기 노출과 피부 접촉 노출에 의한 흡입량의 합으로 추산되었다. 흡기 노출로 인한 Chloroform의 흡입량은 $0.07 \mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 추산되었고 이용된 계산식은 다음과 같다:

$$D_t = E_r \times C_a \times R_b \times T_d / Wt \quad (1)$$

여기서, D_t 는 흡기 노출로 인한 Chloroform의 흡입량 ($\mu\text{g}/\text{kg}$); E_r 은 호흡기관을 통한 Chloroform의 흡수율 (absorption efficiency), 0.77 (USEPA, 1980); C_a 는 목욕시 욕실 공기중의 Chloroform 평균 농도, $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$; R_b 는 호흡률, $0.014 \text{ m}^3/\text{min}$ (Syneder et al., 1984); T_d 는 소요 목욕시간, 30 min; Wt 는 표준성인 남자의 몸무게, 70 kg.

4.2 피부 접촉 노출

피부 접촉 노출로 인한 Chloroform의 흡입량은 $0.20 \mu\text{g}/\text{kg}$ 로 추산되었고 이용된 계산식은 다음과 같다:

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

목욕시 Chloroform에 대한 흡기 및 피부 접촉 노출

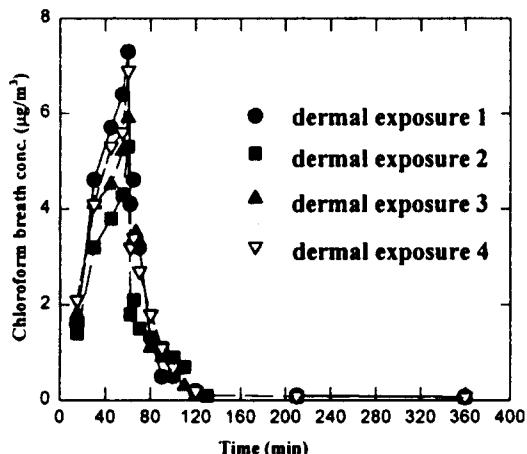


Fig. 1. Chloroform breath concentrations during and after 60-min dermal exposures.

여기서, D_d 는 피부 노출로 인한 Chloroform의 흡입량 ($\mu\text{g}/\text{kg}$); F 는 흡입 노출에 대한 피부 노출에 의한 인체 부담의 비, $(0.23/(0.31 \cdot 0.23)) = 2.9$ (본 연구). 따라서 일회 목욕으로 인한 Chloroform의 흡입량은 흡기 노출로 인한 $0.07 \mu\text{g}/\text{kg}$ 과 피부 접촉으로 인한 $0.2 \mu\text{g}/\text{kg}$ 의 합계인 $0.27 \mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 추산되었다.

4.3 Ingestion 노출

한편 하루에 마시는 수도수로 인한 Chloroform의 흡입량은 하루 2 L의 마시는 양에 대해서 $0.25 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$ 그리고 0.15 L에 대해서 $0.02 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$ 로 추산되었고 이용된 계산식은 다음과 같다:

$$D_{ig} = E_i \times C_w \times A_w / \text{Wt} \quad (3)$$

여기서, D_{ig} 는 수도수를 마실 때 야기되는 Chloroform의 흡입량($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$); E_i 는 소화 기관을 통한 Chloroform의 흡수율(absorption efficiency), 100% (최대 흡입량 산출에 적용); C_w 는 목욕물의 Chloroform 평균 농도, $8.9 \mu\text{g}/\text{L}$; A_w 는 하루 마시는 물의 양 - 2.0 또는 0.15 L.

4.4 위해성 분석

일주일에 일회 목욕과 하루에 마시는 수도수에 의해 야기되는 Chloroform의 흡입량을 이용하여 해당 노출에 대하여 발암 위해성이 계산되었다. 이 계산을 위해서 선형 모델을 이용하였고 (Marty, 1989), 이 모델은 다음과 같다:

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

여기서, P_d 는 일생동안의 위해성; f 는 일일 노출 횟수, 목욕에 대해서 $1/7$ (일주일에 일회 목욕을 가정) 음용수에 대해서는 1 ; q 는 cancer risk potency slope($\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day}$) $^{-1}$, 0.26 (Marty, 1989); D 는 Chloroform 흡입량($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$). 일회 목욕으로 인한 흡입량 $0.27 \mu\text{g}/\text{kg}$ 에 대하여 일주일에 일회 목욕으로 인한 발암 위해성은 1×10^{-5} 으로 계산되었다. 한편 목욕에 이용될 때와 동일한 물을 하루 2 L 마실 때 야기되는 Chloroform 흡

입량인 $0.25 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$ 에 대한 발암 위해성은 6.5×10^{-5} 그리고 0.15 L 마실 때 야기되는 Chloroform 흡입량인 $0.02 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{day}$ 대해서는 0.5×10^{-5} 으로 계산되었다. 대부분의 사람들이 하루에 실제 마시는 수도수가 2 L 가 되지 않으므로 0.15 L 의 물을 마신다고 가정할 때 일주일에 일회 목욕을 할 때 야기되는 Chloroform에 의한 발암 위해성은 하루 0.15 L 의 물을 마실 때 보다 두 배정도 높게 추산되었다.

4.5 Chloroform Decay

체내 Chloroform Decay를 조사하기 위해서 수행된 피부 접촉 노출 실험에 대한 결과를 시각적으로 나타내기 위해서 Table 4의 결과에 근거하여 Figure 1을 작성하였다. Figure 1에 나타난 바와 같이 호기내 Chloroform은 노출전보다 노출이 시작되면서 지속적으로 상승하였다. 비록 실험상의 편의 때문에 호기 농도가 측정되지 못했지만 마지막 노출 시간인 노출 60 분 후에 노출 중 최대 호기 농도가 나타날 것으로 추정되므로 Figure 1에서 나타난 노출 60 분 후의 호기 농도를 계산하기 위해서 직선 외삽법 (linear extrapolation)을 이용하였다.

Figure 1에 나타난 바와 같이 호기 작용(expiration)과 신진대사(metabolism)에 의하여 Chloroform 농도가 체내에서 감소되면서 피부 접촉후 초기 60 분 이내에는 호기 농도가 급격히 감소하고 그 이후에는 호기 농도가 서서히 감소하는 두 단계 감소(two-phase decay) 현상이 나타났다. 이러한 현상은 목욕시 Chloroform 인체 부담에 대한 약리속도론적 연구를 위해서 two-compartment model이 이용될 수 있음을 시사한다. 즉, 초기 급격한 호기 농도 감소는 동맥 (compartment 1)에서 일어나고 두 번째 단계인 느린 호기 농도 감소는 인체 조직(tissue)에서 일어남을 의미한다 (Berlin et al., 1980). 이는 호기내의 Chloroform 농도가 수영 후 시간이 경과함에 따라 감소하였고 이러한 감소는 one-compartment model보다 two-compartment model을 이용하여 나은 결과를 얻은 Weisel and Shepard (1994) 연구와 일치한다.

4.6 기-액 모델

정상적인 목욕시 Chloroform의 욕실내 공기 농도와 수중 농도의 관계를 나타내는 기-액 모델이 선형회귀분석법을 이용하여 개발되었다.

$$C_{air} = 2.5 \times C_w - 7.7 \quad (R^2=0.4, p<0.02) \quad (5)$$

여기서, C_{air} 는 욕실내 Chloroform 농도; C_w 는 욕조내 수중 Chloroform 농도. 이 모델을 이용하면 공기내 Chloroform 농도를 직접 측정하지 않고 수중 농도만 측정하여 공기내 농도를 추정할 수 있다. 그러나, 욕조내 물의 온도, 목욕실내의 환기 조건 및 목욕자의 목욕 습관 등과 같은 목욕 변수에 따라 목욕시 흡기 및 피부 접촉 노출이 달라질 수 있으므로, 위 모델은 본 연구의 실험 조건과 크게 다를 경우에는 이 모델이 적용되지 않을 수도 있다. 따라서, 다양한 목욕 조건에서 조사된 실제 자료를 이용하여 새로운 기-액 모델들을 개발하는 것이

장래 연구로서 추천된다.

5. 결 론

본 연구에서 제작된 호기 시료 채취기를 사용하여 목욕으로 인한 흡기 및 피부 접촉 노출이 성공적으로 평가되었다. 염소 처리된 수도수를 이용하여 목욕을 하는 개인은 목욕중에 흡기 및 피부 접촉을 통해서 Chloroform에 노출이 된다. 목욕 전후의 평균 호기 농도에 근거할 때 Chloroform에 대한 인체 부담은 일회 목욕으로 인해 약 13 배정도 증가하는 것으로 추산되었다. 일회 목욕으로 야기되는 Chloroform 흡입에 대하여 피부 접촉이 74% 그리고 흡기가 26% 영향을 미치는 것으로 추산되었다.

일주일에 일회 목욕으로 인해 야기되는 Chloroform 흡입량과 이로 인한 위험성은 하루 0.15 L 의 물을 마실 때 보다 2 배정도 높게 추산되었다. 따라서 수도수가 Chloroform으로 오염되었기 때문에 음용수로 부적합하다고 경고된 지역에서는 수도수를 이용하여 목욕을 해서도 안된다는 경고도 내려져야 한다. 더욱이 염소 처리된 수도수를 평가할 때 목욕 및 가정에서의 다른 수도수 용도에 의한 VOCs의 노출 및 흡입량이 포함되어야 한다.

체내 Chloroform 거동 연구 결과에 근거하여 목욕시 노출과 관련된 두 가지 주요 특성이 확인되었다. 첫째, 목욕시 피부 접촉 노출로 인한 Chloroform 인체 부담은 한 시간의 목욕시간 동안 지속적으로 증가한다. 둘째, One-compartment model 보다 two-compartment model이 목욕시 Chloroform 인체 부담에 대한 약리속도론적 연구에 나은 결과를 제공한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 '97 핵심전문연구과제 지원금(과제번호: 971-0701-008-1)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 피실험자들에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Andelman, J.B., 1985a, Inhalation exposure in the home to volatile organic contaminants of drinking water, *Sci. Total Environ.* 47, 443-460.
- Andelman, J.B., 1985b, Human exposures to volatile halogenated organic chemicals in indoor and outdoor air, *Env. Health Persp.* 62, 313-318.
- Andelman, J.B., S.M. Meyers, and L.C. Wilder, 1986, Chemicals in the environment, 323-330.
- Berlin, M., J.C. Gage, B. Gullberg, S. Holm, P. Knutsson, and A. Tunek, 1980, Breath concentration as an index of the health risk from benzene, *Scand. J. Work Environ. Health*, 6: 104-111.
- Brown, H.S., D.R. Bishop, and C.A. Rowan, 1984, The role of skin absorption as a route of exposure for volatile organic compounds (VOCs) in drinking water, *Amer. J. of Public Health*, 74:5:479-483.
- Brown, H.S., and D. Hattis, 1989, The role of skin absorption as a route of exposure to volatile organic compounds(VOCs) in household tap water: A simulated kinetic approach, *J. Am. Coll. Tox.* 8:839-851.
- Foster S.A. and P.C. Chrostowski, 1986, Integrated household exposure model for use of tap water contaminated with volatile organic chemicals, the 79th.
- Jo, W.K., 1994, Chloroform in the water and air of Korean indoor swimming pools using both sodium hypochlorite and ozone for water disinfection, *J. Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol. 4, No. 4, 491-502.
- Jo, Wan K., L. Berraffato, C. Pietarinen, and A. Di-Gioia, 1988, Field sampling for volatiles at a residential site, Presentation at the 81st Annual Meeting of APCA, Dallas, Texas.
- Jo, W. K., C.P. Weisel, and P.J. Lioy, 1990a, Chloroform exposure and the health risk and body burden from showering with chlorinated tap water, *Risk Analysis*, 10, 581-585.
- Jo, W.K., C.P. Weisel, and P.J. Lioy, 1990b, Routes of chloroform exposure and body burden from showering with chlorinated tap water, *Risk Analysis*, 10, 575-580.
- Marty, M.A., 1989, A health risk assessment for airborne chloroform, Presented at the 82nd Annual Meeting of APCA, Anaheim, California, June 25-30.
- McKone, T.W., 1987, Human exposure to volatile organic compounds in household tap water, *Sci. Total Environ.* 47, 443-460.
- McKone, 1993, Linking a PBPK model for chloroform with measured breath concentrations in showers: Implications for dermal exposure models, *J. of Exposure Analysis and Environ. Epid.* 3, 3, 339-365.
- McKone T.E. and J.P. Knezovich, 1991, The transfer Trichloroethylene (TCE) from a shower to indoor air: Experimental measurements and their implications, *J. Air Waste Manage. Assoc.* 40:282-286.
- Murphy B.L., 1987, Total exposure from contaminated tap water, the 80th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association.
- Murphy, and R.M. Riggan, 1988, Compendium of methods for the determination of toxic or-

- ganic compounds in ambient air, EPA/600/4-89/017, U.S. EPA, Research Triangle Park.
- Nicholas, J., Giardino, E., Gumerman, N.A., Esmen, and J.B. Andelman, 1992, Shower volatilization exposures in homes using tap water contaminated with trichloroethylene, *J. Exposure Analysis and Environ. Epid.* Suppl. 1, 147-158.
- Sato, A., and T. Nakajima, 1978, differences following skin or inhalation exposure in the absorption and excretion kinetics of trichloroethylene and toluene, *Bri. J. Ind. Med.* 35, 43-49.
- Scheuplein, R.J. and I.H. Irvin, 1971, Permeability of the skin, *physiological Reviews*, 51, 702-747.
- Stewart, R.D., and H.C. Dodd, 1964, Absorption of carbon tetrachloride, trichloroethylene, methylene chloride, and 1,1,1-trichloroethane through the human skin, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 25, 439-446.
- Syneder, W.S., M.J. Cook, E.S. Nasset, L.R. Karhausen, G.P. Howells, and I.H. Tipton, Report of the task group on reference man, International Commission on Radiological Protection Papers, No. 23 (Pergamon Press, New York, 1984), p. 360.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1980, Ambient water quality criteria for chloroform, EPA 440/5-80-033. Winberry, W.T., Jr., N.T. U.S. Environmental Protection Agency, April 1981, The determination of halogenated chemicals in water by the purge and trap method, Method 502.1, Environmental Monitoring and Support Laboratory, Cincinnati, Ohio.
- Weisel, C.P. and Wan-Kuen Jo, 1996, Ingestion, inhalation, and dermal exposures to chloroform and trichloroethene, *Environmental Health Perspectives*, 104, 1, 48-51.
- Weisel, C.P., W. K. Jo and P. J. Lioy, 1992, Utilization of breath analysis for exposure and dose estimates of chloroform, *J. Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Suppl. 1, 55-69.
- Weisel, C. P. and T. A. Shepard, 1994, Chloroform exposure and the resulting body burden associated with swimming in chlorinated pools. In: *Water Contamination and Health*. Marcel DInc. New York, NY. pp. 135-148.
- Winberry, W.T., Jr., N.T. Murphy, and R.M. Riggan, 1988, Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air, EPA/600/4-89/017, U.S. EPA, Research Triangle Park.