

수영장 활동공간 내 유해인자 노출특성 연구

이윤국 · 김난희 · 최영섭 · 김선정 · 박주현 · 강유미 · 배석진 · 서계원 · 김종민[†]
광주광역시보건환경연구원

Characteristics of Exposure Distribution to Hazard Factors in Indoor Swimming Pool Activity Areas in Gwangju

Youn-Goog Lee, Nan-Hee Kim, Young-Seop Choi, Sun-Jung Kim, Ju-Hyun Park,
Yu-Mi Kang, Seok-Jin Bae, Kye-Won Seo, and Jong-Min Kim[†]
Health and Environment Research Institute of Gwangju

ABSTRACT

Objective: This study is designed to measure the concentration of DBPs (disinfection by-products) in pool water and in air and to estimate the carcinogenic potential through the evaluation of inhalation exposure.

Methods: The subjects were six indoor swimming pools with many users in Gwangju. Samples of pool water and indoor air were taken every one month from August 2018 to August 2019 and analyzed for eight swimming pool standards. Three-liter air samples were collected and the VOCs were analyzed using GC/MS directly connected to thermal desorption.

Results: pH was 6.8-7.5 and the concentration of free residual chlorine in pool water was 0.40-0.96 mg/L. Physicochemical test items such as KMnO₄ consumption and heavy metal items such as Aluminum met existing pool hygiene standards. No VOC materials were detected except for the DBPs. The concentration of THMs in the pool water was 11.05-41.77 µg/L and the THMs mainly consist of Chloroform (63-97%) and BDCM (3-31%). The concentration of indoor air THMs is 13.24-32.48 µg/m³ and consists of Chloroform. The results of carcinogenic assessment of chloroform in the indoor swimming pool via inhalation exposure were 2.0 to 6.4 times higher than the 'acceptable risk level' suggested by the US EPA.

Conclusions: The concentration of THMs in the pool water is 11.05-41.77 µg/L, most of which is chloroform. In addition, the concentration of indoor air THMs is 13.24-32.48 µg/m³. The result of carcinogenic assessment of chloroform was 2.0 to 6.4 times higher than the 'acceptable risk level' suggested by the US EPA.

Key words: Indoor swimming pool, DBPs (disinfection by-product), risk assessment

I. 서 론

여가활동과 건강을 위해 다수가 이용하는 수영장은 보건위생상 안전한 수영장 수질을 확보하기 위해 염소 또는 오존을 이용한 소독은 아주 중요한 공정이다. 소독방식은 소금을 전기분해하여 차아염소산나트륨을 형성하는 현장제조 소독방식과 제품화된

차아염소산나트륨을 이용한 염소소독방식 그리고 오존소독을 병행한 염소소독방식으로 크게 구분한다.

소독은 병원성 미생물에 대해 확실한 효과가 있으나 수영장 내 유기물질과 반응하여 다양한 소독부산물(disinfection by-products, 이하 DBPs)을 생성한다.¹⁾ 생성된 소독부산물은 직접 섭취, 피부 접촉, 호흡을 통해 인체에 유입되어 중추신경계 결합, 유산

[†]Corresponding author: Health and Environment Research Institute of Gwangju, 149, Hwaajeong-ro, Seo-gu, Gwangju 61986, Republic of Korea, Tel: +82-62-613-7600, Fax: +82-62-613-7619, E-mail: nepume@korea.kr
Received: 11 February 2020, Revised: 27 February 2020, Accepted: 28 February 2020

등 생식독성 유발과 함께 발암성을 증가시키는 것으로 알려져 있다.^{2,3)} 하지만 우리나라의 수영장 수영조 욕수 수질기준은 유리잔류염소 농도를 규제하고 있고 소독부산물에 대한 수질기준은 마련되어 있지 않다. 또한 욕조수에 존재하는 소독부산물은 공기중으로 휘발되어 호흡을 통해 인체에 영향을 미친다. 따라서 수영장 욕수 수질과 함께 수영장 내 실내공기질까지 적절히 관리하는 것이 보건학적으로 더욱 중요하다.

염소, 오존 등 다양한 소독방법에 따른 소독부산물의 생성특성에 대한 연구는 다양하나,²⁻⁶⁾ 수영장 내 실내공기질에 대한 연구조사는 상대적으로 적다. 기 수행된 수영장 내 실내공기질에 대한 연구는 1회 또는 단기간 동안 측정하거나 짧은 측정횟수로 인해^{7,8)} 수영장 내 실내공기질의 정확한 실태파악이 어려운 실정이다. 또한 수영하는 경우 일상적인 휴식보다 10~12배 정도, 일반 작업보다 6~7배 정도 많은 호흡량이 필요하므로 호흡량이 증가함에 따라 유해물질의 인체 흡입량도 늘어나므로 이용자들의 건강보호를 위해 실제 노출정도를 평가하고 실제 호흡량을 고려한 위해성을 평가하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 광주광역시에 위치한 6곳의 수영장을 대상으로 수영장 수영조 욕수 내 소독부산물 농도와 수영장 내 실내공기질 중 소독부산물 농도를 파악하고, 호흡에 의한 노출위험을 평가하여 발암가능성을 추정하였다. 이를 통해 실내수영장 이용자에게 쾌적하고 위생적으로 안전한 환경이 확보되도록 수영조 욕수 수질 및 수영장 내 실내공기질 관리를 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 및 기간

광주광역시에 소재하고 있는 수영장 6곳을 대상으로 2018년 8월부터 2019년 8월까지 11회(2019년 7월 제외)를 조사하였으며, 수영장별로 보수공사, 방학, 정기휴일 등 시설휴관에 따라 조사횟수는 차이가 있다. 현장제조염소 방식으로 소독하는 수영장 1개소(SP 1), 제품화된 차아염소산나트륨을 사용하는 수영장 5개소(SP 2~SP 6)로 구분하였으며, Table 1에 수영장의 정보를 나타냈다.

2. 시료채취 및 시험방법

수영장별로 매월 채수 및 공기포집을 동시에 실시하였다. 수영조 욕수는 표층 5곳을 채수하여 혼합 후 무균 채수병에 2L를 채취하였으며, 먹는물수질공정시험기준에 따라 수소이온농도, 탁도, 과망간산칼륨소비량, 유리잔류염소, 대장균군, 비소, 수은, 알루미늄과 온도(수영조 욕수 및 실내공기)를 측정하였다(Table 2).

실내공기 포집은 수영장 중간지점의 양쪽에서 VOC 시료채취기(Sibata Σ-30, Japan)를 사용하여 stainless steel Tenax 흡착관(1/4 inch O.D.×3 1/2 inch long)에 0.1 mL/min으로 30분 동안 채취하였다. Tenax 흡착관은 오염방지를 위하여 사용 전 Tube Conditioner TC-20 (Markes, UK)을 이용하여 고순도 질소가스(99.9999%)가 100 mL/min로 흐르는 조건하에서 320°C에서 2~3시간 동안 전처리하여 사용하였다. 공기포집 후 흡착관은 PTFE 패럴을 이용하여 밀봉 후 운반하고, 즉시 분석하였다.

Table 1. Information of indoor swimming pool

	Disinfection method	Pool size W×L (m)	User/day	Water source of pool
SP 1	on site oxidant generation	25×50	1,800~2,000	Tap
SP 2	sodium hypochlorite	10×25	450~550	Tap
SP 3	sodium hypochlorite	11×25	500~600	Tap
SP 4	sodium hypochlorite	9×18	30~50	Tap
SP 5	sodium hypochlorite	25×50	500~600	Tap
SP 6	sodium hypochlorite	10×25	850~950	Tap

Table 2. Analytical methods and instruments for each item

Items	Methods and Instruments
pH	pH meter (ORION 250A, USA)
Free residual chlorine	Pocket colorimeter (HACH 46700, Japan)
Consumption of KMnO ₄	Titration method
Turbidity	Turbidity Method (HACH 2100AN, USA)
As, Hg, Al	ICP-MS (PerkinElmer, USA)
<i>E. coli</i>	Tube method

Table 3. The analysis conditions of GC/MS for volatile organic compounds on swimming pool water

Parameter	Condition
Column	DB-624 (30 m×0.24 mm×3.0 μm)
Carrier gas and flow	He (99.999%), 1.0 mL/min
GC temperature program	50°C (5 min)→10°C/min→200°C (4 min)
Detector type	EI (Quadrupole)
MS source temperature	230°C
Electron energy	70 eV
Mass range	35~350 amu

Table 4. The analysis conditions of TD and GC/MS for THMs on swimming pool indoor air

	Parameter	Condition
Markes TD	Desorption temperature	270°C
	Desorption time	8 min
	Cold trap	Hydrophobic (Tenax/Carbopack B)
	Cold trap low temperature	50°C
	Cold trap high temperature	300°C
	Cold trap hold time	3 min
	Transfer line temperature	150°C
	In split	50:1
Agilent GC/MS	Column	DB-1 (60 m×0.32 mm×3.0 μm)
	Carrier gas and flow	He (99.999%), 1.0 mL/min
	GC temperature program	40°C (5 min)→10°C/min→250°C (4 min)
	Detector type	EI (Quadrupole)
	MS source temperature	230°C
	Electron energy	70 eV
	Mass range	35~350 amu

휘발성유기화합물 분석은 열탈착장치(TD: Thermal Desorption, Markes, U.K)가 직접 연결된 가스크로마토그래피/질량분석기(6890N, Agilent, USA)시스템을 사용하였으며, 운전조건은 Table 3과 4와 같다.

3. 위해도 평가

본 연구에서는 수영장 내 실내공기질 중 THMs 농도를 이용하여 호흡에 의한 발암가능성을 평가하였다. 미국 환경청(US EPA)의 발암잠재력(carcinogenic

slope factor)을 이용하였으며, 아래의 모델식을 사용하여 추정하였다.⁹⁾ 체중, 연령, 노출시간 등 노출평가에 필요한 계수들은 한국 노출계수 핸드북을 참고하여 인체노출 평가를 수행하였다.¹⁰⁾

$$\text{Cancer risk} = \text{CDI} \times \text{SF}$$

$$\text{CDI} = \frac{\text{CA} \times \text{IR} \times \text{ET} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

where

CDI: Chronic Daily Intake

SF: Slope Factor

CA: Contaminant concentration in air, mg/m³

IR: Inhalation Rate, 1 m³/hr

ET: Exposure Time, 1 hr/day

EF: Exposure Frequency, 3 days/week×52 weeks/year=156 days/year

ED: Exposure Duration, 30 years

BW: Body Weight, Male 69.2 kg, Female 56.4 kg

AT: Average Time, 78.6 years×365 days/year=28,689 day

발암물질의 경우 linearized multistage model에서 계산된 발암력(slope factor)을 CDI값에 곱하여 발암력(cancer risk)값으로 표시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 실내수영장 욕조수 수질 평가

국내 수영장 수영조 욕수 수질기준에 규정된 pH 등 8항목의 결과는 Table 5와 같다. 수영장 수영조 욕수 수질은 공급 원수의 종류, 수영장수 교체 및 역세척 주기, 이용객 수, 소독제 및 응집제 등 수처리제 종류에 따라 달라질 수 있다.^{3,4)}

조사대상 수영장의 수영조 욕수 온도는 26~29°C, 실내 온도는 27~30°C였다. 그리고 pH는 6.9~7.5, 탁도는 0.04~0.78 NTU, 과망간산칼륨소비량은 1.1~2.4 mg/L, 유리잔류염소는 0.63~0.79 mg/L, 대장균군은 불검출, 중금속인 비소(As)와 수은(Hg)은 불검출이었으며, 알루미늄(Al)은 0.02~0.17 mg/L로 나타나 연구대상 수영장은 모두 수영장 수영조 욕수 수질기준에 적합하였다(Table 5). Jo 등(2015)이 조사한 광주광역시에 소재한 수영장 수질조사 결과에서 유리잔류염소 농도는 80회 측정 중 10회가 수영장 수영조 욕수 수질기준인 1.0 mg/L을 초과하였으나¹¹⁾ 본 연구에서는 모두 기준 이내로 나타났다. 이는 정기 수질검사, 지속적인 교육 및 점검을 통해 수영장 운영·관리가 개선되어 적정하게 관리되었다고 볼 수 있다.

연구대상 수영장의 클로로포름(Chloroform, CF),

Table 5. Water quality of indoor swimming pool (unit: mg/L except pH, Turbidity, *E. coli*)

		pH	Free residual chlorine	Turbidity (NTU)	Consumption of KMnO ₄	<i>E. coli</i>	Al	Hg	As
Guideline		5.8~8.6	0.4~1.0	<1.5	<12	<2ea	<0.5	<0.007	<0.05
SP 1 (n=3)	Mean±SD	6.9±0.1	0.64±0.09	0.06±0.01	1.3±1.3	Neg.	0.03±0.00	ND	ND
	Range	6.8~7.0	0.53~0.70	0.06~0.07	0.7~2.8		0.02~0.03		
SP 2 (n=10)	Mean±SD	7.5±0.2	0.79±0.12	0.20±0.07	1.2±0.8	Neg.	0.17±0.06	ND	ND
	Range	7.2~7.8	0.57~1.27	0.13~0.33	0.6~2.8		0.11~0.27		
SP 3 (n=10)	Mean±SD	7.1±0.2	0.65±0.23	0.11±0.06	1.6±0.8	Neg.	0.05±0.02	ND	ND
	Range	6.8~7.4	0.26~0.93	0.04~0.20	0.5~2.7		0.02~0.10		
SP 4 (n=7)	Mean±SD	7.1±0.2	0.61±0.17	0.15±0.01	1.2±1.2	Neg.	0.02±0.00	ND	ND
	Range	6.9~7.3	0.44~0.80	0.14~0.16	0.4~2.90		0.02~0.03		
SP 5 (n=9)	Mean±SD	7.0±0.2	0.64±0.25	0.20±0.17	1.1±1.0	Neg.	0.05±0.03	ND	ND
	Range	6.8~7.3	0.35~0.96	0.04~0.48	0.4~3.2		0.02~0.08		
SP 6 (n=9)	Mean±SD	7.4±0.2	0.63±0.13	0.28±0.19	2.4±1.0	Neg.	0.09±0.05	ND	ND
	Range	7.2~7.6	0.41~0.84	0.10~0.59	1.1~4.1		0.02~0.15		

Table 6. The concentrations of DBPs in swimming pool water at each sites (unit: $\mu\text{g/L}$)

		TTHMs	CF	BDCM	DBCM	BF
SP 1 (n=3)	Mean \pm SD	22.45 \pm 16.27	14.08 \pm 7.55	5.59 \pm 5.58	2.78 \pm 3.16	ND
	Range	7.56~39.81	7.34~22.23	0.22~11.66	ND~6.22	ND
SP 2 (n=10)	Mean \pm SD	41.77 \pm 19.15	37.06 \pm 17.32	3.93 \pm 2.96	0.79 \pm 1.55	ND
	Range	28.40~91.62	21.06~81.93	ND~9.69	ND~4.28	ND
SP 3 (n=10)	Mean \pm SD	21.54 \pm 11.34	20.26 \pm 10.19	1.28 \pm 2.00	ND	ND
	Range	11.70~49.86	11.70~45.33	ND~4.53	ND	ND
SP 4 (n=7)	Mean \pm SD	24.21 \pm 13.81	22.12 \pm 10.95	2.09 \pm 3.03	ND	ND
	Range	14.43~51.57	13.78~43.81	ND~7.76	ND	ND
SP 5 (n=9)	Mean \pm SD	11.05 \pm 6.23	9.89 \pm 5.77	0.90 \pm 1.74	0.26 \pm 0.73	ND
	Range	2.24~19.26	2.24~15.96	ND~4.51	ND~2.07	ND
SP 6 (n=9)	Mean \pm SD	41.48 \pm 25.39	40.11 \pm 24.88	1.37 \pm 2.13	ND	ND
	Range	10.53~89.23	10.53~84.30	ND~4.93	ND	ND

브로모디클로로메탄(Bromodichloromethane, BDCM), 디브로모클로로메탄(Dibromochloromethane, DBCM), 브로모포름(Bromoform, BF) 그리고 전체 THMs (Total Trihalomethanes, TTHMs)의 평균 농도는 Table 6과 같다. 클로로포름은 발암물질로 알려져 있으며 중추신경계의 기능을 저하시키거나 마취하는 성질을 가지고 있다. 특히 간이나 신장에 손상을 주며 마취할 경우 호흡곤란 또는 심장 이상으로 인하여 사망에 이르는 경우도 있다. 그리고 브로모디클로로메탄은 중추신경계 기능저하와 호흡곤란을 유발하며, 디브로모클로로메탄은 호흡기와 소화기에 영향을 미칠 수 있으며, 간과 신장에 손상을 주며, 브로모포름은 중추신경계 및 신장과 간에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 수영장 수영조 욕수의 가장 높은 THMs 농도를 나타낸 SP 2 수영장은 41.77 \pm 19.15 $\mu\text{g/L}$, SP 6 수영장은 41.48 \pm 25.39 $\mu\text{g/L}$ 였으며, 가장 낮은 값을 나타낸 SP 5 수영장의 THMs의 농도는 11.05 \pm 6.23 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 소독부산물의 생성은 염소주입량과 접촉시간, 수온, 유기물질의 양, pH 등 여러 인자들이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^{13,14)} THMs의 농도가 상대적으로 높은 SP 2 수영장은 주로 어르신들이 이용하는 시설이며, 이용자들의 건강관리와 여가활동을 위하여 다양한 프로그램을 제공하고 있어 상시 이용자가 많은 곳으로 유리잔류염소 농도가 다른 수영장에 비해 다소 높게 유지되고 있다. 그리고 SP 6 수영장은 어린이 생존

수영 교육 및 연습, 주부를 대상으로 하는 프로그램 실시 등으로 하루에 약 850~950명이 이용하는 시설로 유기물농도의 지표인 과망간산칼륨소비량이 최고 4.1 mg/L로 다른 수영장에 비해 다소 높게 나타났다. 하지만 SP 5 수영장은 고교 체육특기자들이 연습 및 훈련하는 곳으로 오전과 저녁에만 일반인에게 개방하는 곳으로 시설 개선 등으로 가장 낮은 THMs 농도를 나타냈다.

Table 5와 같이 유리잔류염소, 과망간산칼륨소비량, 탁도 등 수영장별 욕수 수질은 큰 차이가 없고 특히 소독방법에 따른 THMs 생성량과의 상관성을 파악하기가 어려운 것으로 보이며, 각각 수영장의 월별 또는 계절별 농도는 큰 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 수질관리 방식의 차이 및 이용객 현황 등을 고려하면 소독방법의 차이만으로 THMs의 발생농도를 직접 비교하여 평가하는 것은 다소 어려움이 있다. E Righi 등(2014)이 이탈리아 에밀리아 로마그나 지역에 소재한 24개 실내수영장을 대상으로 조사한 결과에 따르면 전체 THMs의 평균 농도는 36.9 $\mu\text{g/L}$ 이며, 최대 농도는 134.0 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났으며 클로로포름이 80.3%를 보였다. 그리고 온도나 pH, 유리잔류염소의 농도와 소독부산물의 농도와는 상관관계가 거의 없다고 하였다.¹⁵⁾ 그리고 Lee 등(2006)이 서울시내 수영장을 대상으로 소독방법에 따른 THMs의 농도를 연구한 결과를 살펴보면 클로로포름의 평균 농도는 염소소독의 경우 40.7 \pm 21.4

Table 7. The concentrations of DBPs in swimming pool indoor air at each sites (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		TTHMs	CF	BDCM	DBCM	BF
SP 1 (n=3)	Mean±SD	28.90±38.93	16.33±19.24	8.71±13.63	3.87±6.18	ND
	Range	3.81~73.76	2.56~38.31	0.65~24.45	ND~11.00	ND
SP 2 (n=10)	Mean±SD	25.06±12.97	20.69±10.22	3.88±2.47	0.50±0.54	ND
	Range	2.11~49.17	1.66~37.72	0.45~9.58	ND~1.87	ND
SP 3 (n=10)	Mean±SD	32.48±15.63	27.37±14.13	3.97±2.53	0.85±1.45	ND
	Range	11.80~65.08	10.87~59.14	0.93~9.64	ND~3.93	ND
SP 4 (n=7)	Mean±SD	22.26±11.61	17.50±9.28	4.37±2.12	0.38±0.28	ND
	Range	12.09~43.07	9.91~33.71	2.17~8.45	ND~0.90	ND
SP 5 (n=9)	Mean±SD	13.24±11.71	10.48±9.87	1.72±0.96	1.04±2.75	ND
	Range	0.30~33.3	ND~22.27	0.21~2.80	ND~8.37	ND
SP 6 (n=9)	Mean±SD	17.71±10.89	17.10±10.37	0.60±0.66	ND	ND
	Range	0.94~36.34	0.94~34.50	ND~1.84	ND	ND

$\mu\text{g}/\text{L}$, 오존-염소소독은 $28.5\pm 15.6 \mu\text{g}/\text{L}$ 을 보였으며, 브로모디클로로메탄은 염소소독의 경우 $2.99\pm 1.74 \mu\text{g}/\text{L}$, 오존-염소소독은 $2.39\pm 0.93 \mu\text{g}/\text{L}$ 의 농도를 보였다. 그리고 디브로모클로로메탄은 미량 검출되었으며, 브로모포름은 모두 불검출된 것으로 조사하였다.⁴⁾ 또한 Jeon 등(2007)⁵⁾이 부산시내 20개소 수영장의 소독부산물 특성연구에 의하면 THMs의 평균 농도는 $21.5\pm 17.8 \mu\text{g}/\text{L}$ 였으며, 소독방법에 따른 THMs의 농도는 큰 차이는 없으나 잔류염소 농도가 영향을 미치는 것이라 하였다.⁵⁾ 이와 같이 소독방법이 소독부산물 생성량에 영향을 미친다는 일관된 결론을 얻기는 어렵다.

THMs 구성은 대부분 클로로포름(63~97%)이었으며, 브로모디클로로메탄(3~31%), 디브로모클로로메탄(0~14%)의 순서로 나타났으며, 브로모포름은 모든 수영장에서 검출되지 않았다. Lee 등(2006)⁴⁾, Jeon 등(2007)⁵⁾, E Righi 등(2014)⁵⁾의 선행 연구들 역시 클로로포름이 대부분이었으며, 브로모디클로로메탄 등 다른 소독부산물의 구성비율도 비슷한 결과를 나타냈다.

2. 수영장내 실내 공기질 평가

본 연구에서는 실내 수영장 중간지점의 양쪽에서 포집한 시료를 각각 분석하여 평균농도를 구하였다. 조사대상 수영장 실내공기중 클로로포름, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄, 브로모포름 그리고

전체 THMs의 평균 농도는 Table 7과 같다. 가장 높은 값을 나타낸 SP 3 수영장은 $32.48\pm 15.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, SP 1 수영장은 $28.90\pm 38.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 가장 낮은 값을 보인 SP 5 수영장의 농도는 $13.24\pm 11.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수영장에 따라 최고 2.5배나 차이를 보였다. 수영장 욕수에서 생성된 THMs는 휘발성이 강하므로 수영장 욕수 및 실내 온도, 이용자의 수 및 수영방법 등이 휘발에 영향을 미치며, 환기 횟수, 환기 시간 및 환기구 위치 등에 따라 수영장 실내공기중 소독부산물의 농도가 차이가 날 수 있다.^{5,8)} Aggazzotti G 등(1998)에 따르면 수영장 이용객이 한 시간 수영하는 동안 THMs의 노출량은 일반적인 휴식을 취할 때와 비교하여 7배 정도 높은 것으로 나타나⁶⁾, 수영장내 공기질에 대한 관리 는 실내수영장 이용객들에게 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

연구대상 수영장의 욕조수와 실내공기 중 THMs 농도를 비교한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 수영장 욕조수의 THMs의 농도와 실내공기 중 THMs의 농도는 몇몇 수영장에서는 상당히 다른 결과를 보였다. 수영장 욕조수 중 $41.77 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 가장 높은 농도를 보인 SP 2의 경우 공기중에서는 $25.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, SP 6의 경우 욕조수 농도는 $41.48 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 높은 반면 공기중 농도는 $17.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났다. 하지만 SP 3의 경우 욕조수 농도는 $21.54 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 다른 수영장에 비해 낮은 편이었으나, 공기중

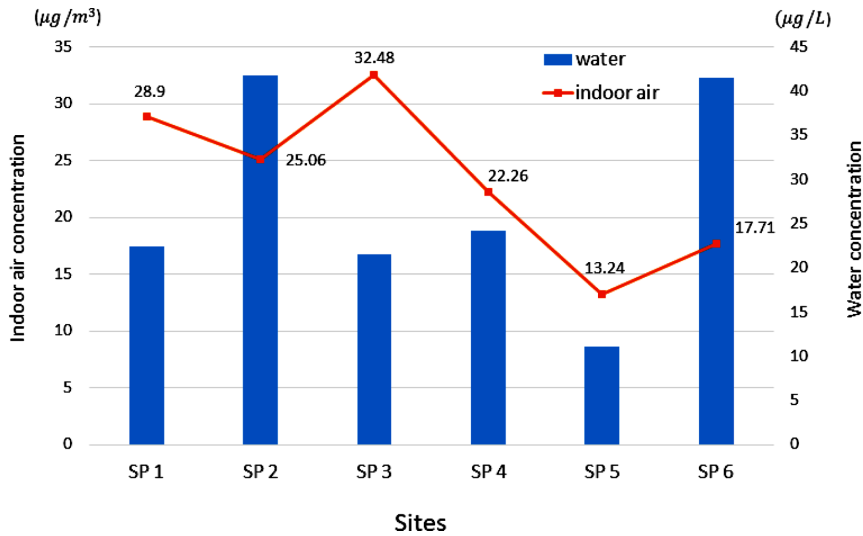


Fig. 1. The concentration of THMs in swimming pool water and indoor air at each sites

농도는 상대적으로 높은 32.48 µg/m³로 나타났다. 따라서 일부 수영장의 경우 욕조수의 THMs의 농도가 높으면, 공기 중 THMs의 농도 역시 높을 것이라는 예상과는 달리 큰 차이를 보였다. 이는 실내수영장 내 환기의 영향으로 볼 수 있다. 환기는 염소 등 소독제 냄새를 제거하고 온·습도를 일정하게 유지하여 이용자에게 쾌적한 실내공기를 제공하기 위한 것이다. 대부분 수영장의 환기방식은 자연환기만으로는 적절한 환기량을 얻을 수 없으므로 송풍기를 이용한 기계적인 방법을 통해 환기를 하게 된다. 또한 직접 오염물질을 포집하여 외부로 배출하는 국소배기장치와는 달리 전체 환기의 경우 외부에서 공기를 공급하여 실내 유해물질의 농도를 희석시키는 방식을 이용한다. 본 연구에서는 같은 공간의 양쪽 지점에서 동일한 시간에 측정된 오염물질의 농도는 서로 차이가 있었으며, 특히 2018년 10월과 2019년 4월에 측정된 SP 2와 2019년 3월 SP 6 수영장의 공기질 농도는 최고 3배까지 차이가 발생한 결과를 보면 동일한 공간 내에서도 측정지점에 따라 농도가 달라 환기의 영향은 크다고 할 수 있다. 본 연구에서 조사한 환기방식은 수영장에 따라 차이가 있지만 주로 한쪽 벽면에서 급기된 공기가 맞은 편 벽면 쪽의 배기구를 통해 배출되거나, 천장에서 공급되고 바닥에 설치된 배기구를 통해 배출되는 형태로 이루어져 환기 방식이나 환기 용량, 환기 주기에 따라 실내 수

영장내 오염물질의 농도는 크게 달라지는 것을 알 수 있다.

Jo와 Hwang(1994)이 소독방법이 다른 2개의 수영장을 대상으로 조사한 연구에 따르면 실내공기 중 소독부산물의 농도는 28.0 µg/m³ (염소 소독), 33.6 µg/m³ (오존소독 병행)를 보였으며¹⁷⁾, Lee 등(2007)이 경기도 소재 10개 수영장을 대상으로 조사한 결과에 따르면 클로로포름이 5.8~63.9 µg/m³으로 나타나,⁷⁾ 본 연구와 비슷한 결과를 보였다. 또한 Park 등(2010)이 서울시 소재 1개 수영장을 대상으로 한 연구결과에 의하면 클로로포름의 평균 농도는 78.6 µg/m³ (최고 농도는 118.1 µg/m³)였다. 또한 THMs 중에서 클로로포름의 농도가 가장 높았고, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄의 순으로 나타났으며, 브로모포름은 모든 지점에서 검출되지 않은 것으로 나타났다.⁸⁾ 따라서 THMs 농도는 본 연구결과와 비교하면 다소 높은 농도를 보였다. 하지만 이 연구는 실내수영장 1곳을 대상으로 겨울철인 12월에 이틀 동안 측정된 결과를 나타낸 것으로 낮은 온도, 이용자의 감소 등을 고려하면 본 연구와 직접 비교하는 것은 다소 어려움이 있다.

Park 등(2010)의 연구결과에서는 실내수영장 내 높은 농도로 존재하는 소독부산물의 저감을 위해서 급기유량의 보완, 급·배기구의 위치 조정 등의 개선을 통해서 실내환경을 더욱 쾌적하게 유지할 수 있음을

제시하였다.⁸⁾ 이와 같이 THMs의 발생, 확산, 정제, 소멸 등 오염물질의 거동 메커니즘은 여러 가지 환경변수에 의해 영향을 받을 수 있어 단정하기는 어렵다. 실내 수영장내 공기중 THMs 구성은 수영장 욕수 결과와 마찬가지로 대부분 클로로포름이었으며 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄의 순서로 나타났으며, 브로모포름은 검출되지 않았다.

3. THMs의 노출에 따른 발암성 평가

수영장 실내공기 중 THMs 평균농도를 이용한 발암성평가 결과를 Table 8에 나타냈다. 발암력은 평균 체중의 건강한 성인이 어떤 화학물질의 단위노출량으로 오염된 환경매체(물, 공기, 식품 등)를 기대수명 기간 동안 접촉하였을 경우 그로 인해 발생 가능한 초과발암확률의 95% 상한값으로 저농도 노출 시 암발생과의 직선 상관성의 기울기를 의미한다.⁹⁾ 선행 연구에 의하면 수영하는 동안 수영조 욕수의 직접 섭취나 피부 흡수를 통한 인체 영향은 낮은 것으로 나타나,⁴⁾ 본 연구에서는 호흡에 의한 영향만을 고려하여 인체 노출량을 평가하였다. 브로모디클로로메탄과 디브로모클로로메탄의 대한 발암잠재력은 호흡에 의한 계수가 없으므로 클로로포름($SF_{inhalation} 8.10 \times 10^{-2}$ (mg/kg/day)⁻¹)만을 대상으로 발암성 평가 결과를 Table 8에 나타냈다. 연구결과에 의하면 남성의 경우 $2.0 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-6}$, 여성의 경우 $2.5 \times 10^{-6} \sim 6.4 \times 10^{-6}$ 으로 나타나, 100만명 당 2.0~6.4명(남성 2.0~5.2명, 여성 2.5~6.4명)으로 WHO 허용위해수준(발암가능성이 100만명당 1명)을 초과한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 노출빈도(주 3회)와 노출지속시간(30년)으로 가정하여 보수적인 노출계수를 적용하여 계산하였으므로 실제로는 노출정도가 다소 과장되어 평가될 수 있다. 그리고 유해물질 노출에 따른 발암성 평가는 개인의 건강상태, 수영 습관, 유전적 특성 등에 따라 다양한 차이가 발생할 수 있음을 고려해야 한다.⁸⁾ 또한 평균 체중의 건강한 성인을 대상으로 노출계수를 적용한 위해성 평가이므로 상대적으로 유해인자에 취약한 어린이, 노약자 등 민감 계층에 대해 구별된 위해성 평가가 필요할 것으로 사료된다.

Park 등(2010)의 연구에 의하면 전체 발암위험에서 차지하는 비중은 클로로포름(89%)이 가장 높았으며, 브로모디클로로메탄(9%), 디브로모클로로메탄(2%)의 순이었다. 그리고 위해성 평가결과 남성은

Table 8. The cancer risk from chloroform at indoor swimming pools air at each sites

	$SF_{inhalation}$	Male	Female
SP 1 (n=3)		3.1×10^{-6}	3.8×10^{-6}
SP 2 (n=10)		4.0×10^{-6}	4.9×10^{-6}
SP 3 (n=10)	8.1×10^{-2}	5.2×10^{-6}	6.4×10^{-6}
SP 4 (n=7)		3.3×10^{-6}	4.1×10^{-6}
SP 5 (n=9)		2.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}
SP 6 (n=9)		3.3×10^{-6}	4.0×10^{-6}

1.50×10^{-5} , 여성은 1.84×10^{-5} 으로 나타나 수용할 수 있는 위험수준(acceptable risk level)인 10^{-6} 보다 15~18배나 높은 것으로 나타났다고 밝혔다.⁸⁾ 같은 노출계수를 사용한 위해성 평가결과를 본 연구와 비교하면 남성의 경우 2.9~7.5배, 여성의 경우 2.9~7.3배나 높은 것으로 나타났다. 또한 Lee 등(2010)은 소독방법에 따른 THMs의 인체 위해성 평가결과에 따르면 직접 섭취와 피부접촉에 의한 위해성은 10^{-6} 보다 작았지만 호흡을 통한 위해성은 소독방법에 따라 남성의 경우 $3.4 \times 10^{-6} \sim 4.9 \times 10^{-6}$, 여성의 경우 $4.0 \times 10^{-6} \sim 5.7 \times 10^{-6}$ 로 10^{-6} 보다 3.4~5.7배 높은 것으로 나타나,¹⁸⁾ 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

IV. 결 론

본 연구는 광주광역시에 위치한 6곳의 실내 수영장을 대상으로 수영장 욕조수 내 소독부산물 농도와 수영장 내 공기중 소독부산물 농도를 파악하였으며 THMs의 호흡으로 인한 위해성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수영장 욕조수 pH는 6.8~7.5이었으며, 유리잔류 염소는 0.40~0.96의 범위로 나타났고, $KMnO_4$ 소비량, 탁도, 알루미늄 등 중금속 항목은 수영장 위생기준에 적합하였으며, 소독부산물을 제외한 다른 휘발성유기화합물질은 모두 검출되지 않았다.

2. 수영장 수영조 욕수 온도는 26~29°C, 실내 온도는 27~30°C였으며, 수영장 욕조수의 THMs의 농도는 최저 $11.05 \mu\text{g/L}$ 에서 최고 $41.77 \mu\text{g/L}$ 의 범위였다. THMs 구성은 대부분 클로로포름(63~97%)이었으며, 브로모디클로로메탄(3~31%), 디브로모클로로메탄(0~14%)의 순서로 나타났으며, 브로모포름은 검출되지 않았다.

3. 수영장내 공기중 THMs의 농도는 최저 13.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최고 32.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위였다. THMs 구성은 대부분 클로로포름(54~97%)이었으며, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄의 순서였으며, 브로모포름은 검출되지 않았다.

4. 한국 노출계수 핸드북에서 제시한 노출계수를 이용하여 호흡으로 인한 클로로포름에 대한 발암성 평가는 미국 환경청이 제시한 수용할 수 있는 위험수준(acceptable risk level)보다 2.0~6.4배 정도 높았다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 환경부 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축” 사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Boyce SD, Hornig JF. Reaction pathway of trihalomethane formation from the halogenation of dihydroxyaromatic model compounds for humic acid. *Environmental Science and Technology*. 1983; 17: 202-211.
2. Reckhow DA, Platt TL, MacNeil AL, McClellan JN. Formation and degradation of dichloroacetonitrile in drinking water. *J. IWA. AQUA*. 2001; 50: 1-13.
3. Kim HK, Shim JH, Lee SH. Formation of disinfection by-products in chlorinated swimming pool water. *Chemosphere*. 2002; 46: 123-130.
4. Lee J, Ha KT, Zoh KD. The Characteristics of THMs Production by different disinfection methods in swimming pools water. *Kor. J. Env. Hlth*. 2006; 32(2): 171-178.
5. Jeon DY, Kim HJ, Jung SY, Lee SM, Lim YS. Characteristics of disinfection by-products of swimming pool waters in busan. *The annual report of busan metropolitan city institute of Health and environmental*. 2007; 17(1): 93-102.
6. Lee MH, Jeon MJ, Kim HJ, Eom SW, Choi HY. Characteristics of by products from three different disinfection technologies applied to indoor swimming pool in seoul. *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*. 2008; 11(4): 268-274.
7. Lee YK, Lee SM, Choi IW, Kim SH, Seo IS. A study of air quality in indoor swimming pool. *Proceeding of the 45th meeting of KOSAE*. 2007: 542-543.
8. Park HD, Park HH, Shin JA, Kim TH. Assessment for inhalation exposure to trihalomethanes(THMs) and Chlorine and efficiency of ventilation for an indoor swimming pool. *J. Env. Hlth. Sci*. 2010; 36(5): 402-410.
9. USEPA: Guidelines for carcinogen risk assessment. Risk assessment forum U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/630/P/03/001F, 2005.
10. Jang JY, Jo SN, Kim S, Kim SJ, Cheong HK. Korean Exposure Factors Handbook, Ministry of Environment, Seoul, Korea, 2007.
11. Jo GU, Lee SH, W W, Yoon SH, Kim NH, An SS, Jung SK, Kim DS, Cho YG. Characteristics of water quality parameters by disinfection methods in indoor swimming pool water-focusing on Bromate, Chlorate and Chloride-. *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*. 2015; 18(2): 101-111.
12. Savitz DA, Andrews KW, Pastore LM. Drinking water and pregnancy outcome in Central North Carolina; Source, amount, and trihalomethane levels. *Environ. Health Perspect*. 1995; 106: 592-596.
13. Trussel RR, Umphres MD. The formation of trihalomethanes. *J. AWWA*. 1978; 70: 604-612.
14. Singer PC. Control of disinfection by-products in drinking water. *J. Environ. Eng.*, 1994; 120: 727-744
15. Elena R, Gugliemaina F, Guerrino P, Gabriella A. Bromate, chlorite, chlorate, haloacetic acids, and trihalomethanes occurrence in indoors swimming pool waters in Italy. *Microchemical Journal*. 2014; 113: 23-29.
16. Aggazzotti G, Fantuzzi G, Righi E, Predieri G. Blood and breath analyses as biological indicators of exposure to trihalomethanes in indoor swimming pools. *Science of the Total Environment*. 1998; 217: 155-163.
17. Jo WK, Hwang YM. Chloroform in the air of indoor swimming pools and the outdoor air near the swimming pools in a city of Korea. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*. 1994; 3(3): 253-261.
18. Lee J, Ha KT, Zoh KD. Characteristics of trihalomethane(THM) Production and associated health risk assessment in swimming pool waters treated with different disinfection methods. *Science of Total Environment*. 2009; 407: 1990-1997.

<저자정보>

이윤국(환경연구사), 김난희(환경연구사), 최영섭(환경연구사), 김선정(환경연구사), 박주현(환경연구사), 강유미(공무직), 배석진(환경연구관), 서계원(보건연구관), 김종민(환경연구관)