

연구논문

## 포항시 형산강 주변 산업, 주거, 농촌 지역의 대기 중 과불화화합물 (PFASs)에 대한 호흡 노출 및 건강 위해성 평가

서성희<sup>†</sup>

포항공과대학교 환경공학과

### Risk Assessment of Inhalation Exposure to Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Industrial, Urban-residential and Rural Areas Near Hyeongsan River, Pohang

Sung-Hee Seo<sup>†</sup>

Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, 37673, Republic of Korea

Received May 27, 2022 / Revised June 22, 2022 / Accepted June 25, 2022

The goal of this study was to evaluate human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the air near the Hyeongsan River in Pohang, and to quantify associated health risks. The daily intake of PFOS was the highest, and those of PFBS, PFHxA, PFUnDA, and PFOA were also high. Humans were exposed more to ionic PFASs than to neutral PFASs. The exposure level of PFASs increased from upstream to downstream; this trend suggests that emission sources exist downstream. For the gaseous phase, the exposure level was highest to PFBS, which have the shortest carbon-chain length, whereas for the particulate phase, exposure was highest to PFOS. The exposure and distribution of PFAS congeners differed among sites and phases, which means that humans are exposed differently depending on the PFASs emitted from the emission source at each site, and on the physicochemical properties of PFASs. Inhalation exposure to PFASs was below the PFAS intake safety threshold, and the toxicity was also lower than the level allowed by WHO. However, health risks from long-term exposure to PFASs are of concern, and combining exposure by various routes may have a significant health effect. Therefore, continuous monitoring and risk assessment are required.

**Key words:** PFAS, Air pollution, Inhalation exposure, Industrial complex, Pohang

## 1. 서 론

Perfluoroalkyl Substances (PFASs)은 물과 기름 및 열 저항성을 가진 합성 화학물질로, 주방용품, 아웃도어 제품, 일회용 용기, 방수 코팅제 등으로 널리 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 생산과 사용에 의해 환경 중으로 배출된 PFASs는 미생물 분해, 광분해, 가수 분해 및 산화 과정을 통해 전구체에서 ionic PFASs로 분해되며, 환경 중에 안정하게 잔류하며 거동한다.<sup>2,4)</sup> 최근 이들의 생물 농축성과 독성이

밝혀짐에 따라 perfluorooctanesulfonyl fluoride (PFOSF)와 perfluorooctane sulfonate (PFOS)가 2009년 스톡홀름 컨벤션의 Annex B로 등록되었으며,<sup>5)</sup> 유럽과 미국에서는 PFASs에 대한 규제가 단계적으로 시행되고 있다.<sup>6,7)</sup> 그러나 PFASs의 생산과 사용에 대한 규정은 아시아에서 상대적으로 약하며, 특히 다양한 환경 매체와 인체에서 검출되고 있음에도 불구하고 한국에서 PFASs에 대한 국가 규정은 없다 (<https://www.greenpeace.org/>).

PFASs는 변동성이 높고 수용성이 낮은 neutral PFASs

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

Tel: +1-734-263-4569, Fax: +1-734-263-4569, E-mail: [sunghee918@postech.ac.kr](mailto:sunghee918@postech.ac.kr)

와 변동성이 낮고 수용성이 높은 ionic PFASs로 나뉘며,<sup>8)</sup> 소수성과 친유성을 가지는 다른 잔류성유기오염물질(POPs)과 달리 친수성이 높은 특징을 갖는다.<sup>1,9)</sup> 따라서 주로 수계를 통해 환경 중으로 배출되고 이동하며 분포한다.<sup>10)</sup> 또한 PFAS 동족체의 소수성 탄소 사슬 길이와 작용기에 따라 서로 다른 옥탄올-공기 분배 계수 ( $K_{OA}$ ), 옥탄올-물 분배 계수 ( $K_{OW}$ ), 생물농축성을 가지며, 이로 인해 각 물질의 다매체 환경 중 분포 및 거동 특성이 다르게 나타난다.<sup>5,11)</sup> 이들 화합물은 주로 오염된 음식과 식수 섭취를 통해 인체에 노출되며,<sup>10)</sup> 체내에 노출된 PFASs는 이상지질혈증, 갑상선기능항진증, 신장기능 저하, 당뇨병 등을 유발하는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

PFASs는 주로 수계를 통해 배출 및 이동하기 때문에 대부분의 이전 연구들은 수계에서 오염과 분포 및 이동에 초점이 맞춰져 있으며, 이들 화합물의 위해성 평가 또한 식이섭취를 통한 인체 노출에 초점이 맞춰져 있다. 그에 비해 대기 중으로의 PFASs의 배출, 분포, 이동 특성에 대한 연구는 제한적이며, 더구나 호흡을 통한 인체 노출 평가에 대한 연구는 매우 부족하다. 포항 형산강 하류 지점에는 세계 최대 철강 산업단지인 포스코가 위치해 있으며, 그 외에도 전자, 화학, 제지 산업 단지가 조성되어 있다. 금속의 코팅제로 사용되는 PFASs는 산업단지에 근로자들에게 직업적으로 노출될 수 있으며,<sup>8)</sup> 인근 거주민들도 생활속에서 PFASs에 노출될 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 형산강 주변 대기 중 PFASs 모니터링은 단

한번 수행되었으며,<sup>10)</sup> 호흡을 통한 인체노출 및 위해성 평가는 수행된 적이 없다. 우리의 이전 연구에서는 형산강 주변 대기에서 고농도의 PFASs가 검출되었으며, 이를 통해 PFASs가 배출원으로부터 대기 중으로 배출되고 이동, 침적될 수 있음을 확인하였고, 인근 거주민들이 호흡을 통해 PFASs에 노출될 수 있는 가능성을 확인하였다.<sup>10)</sup>

따라서 본 연구는 포항시 형산강 주변 산업, 주거, 농촌 지역의 대기 중 PFASs에 대하여 호흡을 통한 인체 노출과 건강 위해성을 평가하였다. 각각의 지역에서 야외 활동시 호흡을 통한 노출 영향을 확인할 수 있었으며, 가스상과 입자상 PFASs의 흡입량, neutral PFASs와 ionic PFASs의 인체 노출량, 호흡을 통한 노출로 인한 건강 위해성을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료 채취 지점 및 방법

대기 시료는 2014년 10월 28일부터 30일까지 3일동안 한국 경주와 포항을 가로지르는 형산강 주변에서 수집되었으며, 시료 채취 지점은 Fig. 1에 표시되었다. 대기 시료 채취 및 분석방법은 잔류성유기오염물질 공정시험방법에 따라 수행되었다.<sup>17)</sup> 대기 시료 채취는 하이볼륨에어 샘플러(HiVol, Sibata HVC-500, Japan)로 24시간동안 700 L/min의 유속으로 수행되었다.<sup>17)</sup> 가스상 수집을 위하여 하나의 활성탄 펠트(ACF; 10 mm, KF-1700F, Toyobo,

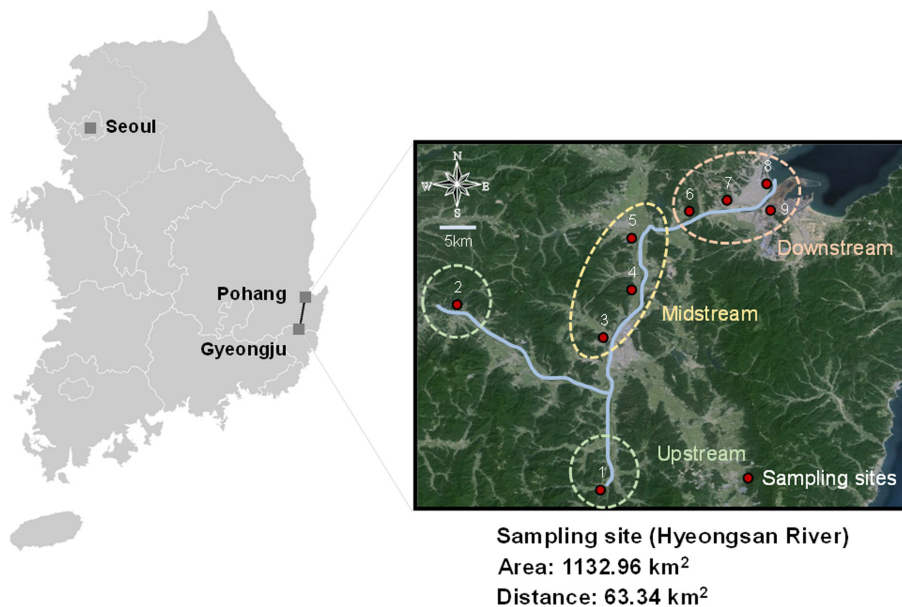


Fig. 1. Location of sampling sites.

**Table 1.** Method detection limits (MDL, pg/m<sup>3</sup>) for air and estimated daily PFAS intake (pg/kg-d) of residents during outdoor activities near the Hyeongsan River

	Chemical	MDL	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Mean
Ionic PFASs	PFBS	0.57	7.81	2.32	7.85	4.48	3.97	42.9	4.81	14.9	26.9	12.9
	PFHxA	0.30	4.59	6.27	6.80	8.24	11.9	11.4	18.9	15.2	21.3	11.6
	PFHpA	0.41	0.57	0.52	0.97	2.18	1.50	2.51	1.83	2.01	3.57	1.74
	PFHxS	0.91	1.12	0.72	0.00	0.84	0.00	2.53	1.97	1.67	5.14	1.55
	PFOA	0.13	1.93	3.51	7.13	9.76	10.8	9.12	21.7	13.1	22.1	11.0
	PFNA	0.27	3.40	1.59	4.78	6.76	4.61	3.62	8.71	7.11	9.50	5.56
	PFOS	0.35	4.21	5.08	6.42	31.7	22.4	33.1	37.4	39.1	5.21	20.5
	PFDA	0.14	2.75	2.61	7.73	10.3	14.0	6.51	18.7	15.6	12.6	10.1
	PFUnDA	0.14	3.65	2.76	5.05	8.43	8.44	8.36	17.3	31.7	33.8	13.3
	PFDS	0.32	4.05	0.43	5.59	0.38	0.00	4.47	1.22	0.15	0.22	1.83
	PFDoDA	0.42	0.04	4.02	0.63	2.20	0.49	1.46	3.17	0.00	12.8	2.75
	PFTriDA	0.22	0.08	0.89	1.61	4.72	4.46	3.69	10.8	10.1	9.65	5.10
	PFTeDA	0.33	0.63	0.00	5.32	0.85	0.97	4.09	2.46	6.81	22.3	4.83
	Neutral PFASs	FHEA	0.52	1.11	0.00	0.03	0.23	0.49	0.25	0.20	0.48	0.33
FOEA		0.20	0.00	0.15	0.02	0.24	0.88	0.00	0.17	0.37	0.93	0.31
FDEA		0.03	0.00	0.87	2.06	0.11	0.00	0.46	0.94	2.82	0.00	0.81
N-MeFOSAA		0.78	0.00	0.16	0.00	0.14	0.32	0.42	0.09	0.83	0.41	0.26
N-EtFOSAA		0.91	0.16	0.44	0.53	0.43	0.39	0.15	0.21	0.96	1.08	0.48
FOUEA		0.81	0.01	1.11	2.33	5.09	5.57	8.87	8.53	3.32	11.2	5.11
FOET		0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total PFASs		-	36.1	33.4	64.8	97.1	91.3	143	159	166	199	110

Osaka, Japan)와 두개의 폴리우레탄 폼 (PUFs; Code 080130-0941A; Sibata, Tokyo, Japan)이 사용되었으며, 입자상 수집을 위하여 석영 섬유 필터 (QFF; Cat no. 4042-3703; ADVANTEC, Japan)가 사용되었다.<sup>17)</sup> Ionic PFASs에 대한 내부표준 물질은 perfluorocarboxylic acid (PFCA)와 perfluoroalkane sulfonates (PFSA) mixtures가 사용되었고, 회수용 내부표준물질은 sodium perfluoro-1-[<sup>13</sup>C<sub>8</sub>] octanesulfonate (M<sub>8</sub>PFOS)과 Perfluoro-n-[<sup>13</sup>C<sub>8</sub>] octanoic acid (M<sub>8</sub>PFOA)이 사용되었다. Neutral PFASs에 대한 표준물질은 perfluoro octane sulfonamidoacetic acids (FOSAA), telomer acids (FTAs), unsaturated telomer acids (FTUAs)가 사용되었으며, 회수용 내부표준물질은 N-deuteriomethylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetic acid (d<sub>3</sub>-N-MeFOSAA)이 사용되었다.

수집된 대기 시료는 메탄올로 18-24시간동안 속슬렛 추출되었으며, Oasis HLB solid phase extraction (SPE) cartridges (Waters Corp., Milford, MA USA)로 정제되었다.<sup>17)</sup> 질소 가스를 이용해 0.5 mL의 부피로 농축된 시료는 API 2000 triple quadrupole mass spectrometer (Applied Biosystems/MDS Sciex, Foster City, CA)로

분석되었다. 일곱개의 복제된 대기 시료를 분석하여 방법 검출 한계 (MDL, pg/m<sup>3</sup>)를 측정하였으며, 그 값은 Table 1에 나타났다. 형산강의 상류(지점 1, 2), 중류(지점 3, 4, 5), 하류(지점 6, 7, 8, 9)에는 각각 농경지, 주거단지가 밀집해 있는 도시, 산업단지가 조성되어 있으며, 특히 하류에는 세계 최대 철강 산업단지인 포스코가 위치해 있다. 따라서 본 연구는 농경지, 주거단지, 산업단지로부터의 PFASs 배출로 인한 호흡 노출과 건강 영향을 평가하였다.

## 2.2. 인체 노출 및 위해성 평가 방법

본 연구에서는 환경 및 인체에서 가장 우세하게 검출되는 13종의 ionic PFASs와 7종의 neutral PFASs가 분석되었으며,<sup>11,12)</sup> 구체적인 분석물질은 Table 1에 표시되었다. 형산강 인근 주민들이 야외 활동시 호흡을 통한 PFASs의 인체 노출량과 건강 위해성 평가를 위하여 우리의 이전 연구에서 측정된 대기 중 PFASs의 농도값을 사용하였다.<sup>10)</sup> 예상 일일 PFASs 섭취량(estimated daily intake, EDI, pg/kg-d)은 이전 연구에서 사용된 방정식을 사용했으며,<sup>13)</sup> 대기 중의 PFASs가 호흡을 통해 100% 체내로 노출된다고 가정하였다. 노출계수는 한국인의 노출

계수 핸드북에서 얻었다.<sup>14)</sup>

$$EDI = \frac{C \times V}{BW} \quad (1)$$

$C$  (concentration,  $\text{ng}/\text{m}^3$ )는 대기 중 PFASs의 농도,  $V$  ( $14.61 \text{ m}^3/\text{d}$ )은 한국 성인의 하루평균 호흡하는 공기의 부피,  $BW$  (body weight,  $64.5 \text{ kg}$ )는 한국 성인의 평균 몸무게이다.

$$LADD = \frac{C \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

$LADD$  (life-time average daily dose,  $\text{ng}/\text{kg}\cdot\text{day}$ )는 야외에서 평균 노출횟수 및 기간을 고려한 일생동안 일일 평균 노출량을 나타낸다.<sup>15)</sup>  $IR$  ( $14.61 \text{ m}^3/\text{d}$ )은 한국 성인의 일일 평균 호흡율이며,  $ET$  ( $1.26 \text{ hrs}/\text{d}$ )는 한국 성인의 하루 평균 야외 활동 시간,  $EF$  ( $247 \text{ d}/\text{yr}$ )는 한국 성인들이 일주일 중 6일은 출퇴근 및 야외활동을 한다고 가정할 연간 평균 야외활동 빈도,  $ED$  ( $40 \text{ yrs}$ )는 평균 야외활동 기간,  $AT$  ( $82.7 \text{ yrs}$ )는 한국인의 평균 수명을 의미한다.

$$HQ = \frac{LADD}{RfD} \quad (3)$$

호흡노출로 인한 비발암독성은  $HQ$  (hazard quotient)이며,<sup>15)</sup>  $RfD$  ( $\text{ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ )는 PFASs에 대한 호흡 reference dose로 본 연구에서는 대기 중 주요한 PFASs인 PFOA ( $20 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ ), PFOS ( $20 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ ), PFBS ( $300 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ )에 대하여 계산되었다 (<https://www.epa.gov/>).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 일일 PFASs 호흡 노출

방정식 (1)을 이용하여 포항 형산강 인근 거주민들의 일일 PFASs 호흡 노출량이 계산되었으며 이는 Table 1에 나타냈다. Ionic PFASs의 노출량이 neutral PFASs의 노출량보다 높았으며, 노출비율은 각각 93%와 7%였다. Neutral PFASs이 분해되어 파생되는 ionic PFASs는 음이온의 형태를 가지기 때문에 휘발성이 낮고 수용해도가 높으며 대기 중에서 존재하는 것이 취약하다.<sup>8)</sup> 그럼에도 불구하고 대기중에서 ionic PFASs이 높게 검출된 것은 neutral PFASs이 분해된 상태로 배출되거나 환경 중에서 분해되어 안정된 상태인 ionic PFASs의 형태로 인체에 노출됨을 의미한다. PFASs 노출량은 상류에서 하류로 갈수록 증가하였으며, 하류에서의 호흡 노출량은 상류에 비해

약 5.5배 높았다. 중류도 상류에 비해 노출량이 높았으며 이는 중류에 위치한 PFASs 배출원이 원인일 수도 있고, 하류 배출원에서 대기 중으로 배출된 PFASs이 중류 지점으로 확산되어 영향을 미쳤을 가능성도 있다. 이를 통해 하류 지점에 PFASs의 배출원이 존재하며, 하류 지점에 거주민들이 호흡을 통해 더 많은 양의 PFASs에 노출될 수 있음이 확인되었다.

전체 물질들 중에 PFOS (mean:  $20.5 \text{ pg}/\text{m}^3$ )가 가장 높은 수준의 농도로 인체에 노출되었으며, 전체 노출량 중 19%를 차지하였다. 또한 PFBS (12%), PFHxA (11%), PFUnDA (11%), PFOA (10%)가 주로 인체에 노출되는 것으로 나타났다. 특히 하류에 산업단지 인근과 주거 단지에서 PFOS의 인체노출이 전체 노출량의 약 23%를 차지하며 높게 나타났으나, 상류에서는 약 12%를 차지하였다. 이는 산업단지와 도심지역에 PFOS의 배출원이 있음을 제안한다. PFOS는 결합력이 상대적으로 강한 스폰지의 작용기를 가지기 때문에 같은 길이의 탄소 사슬과 카르복실기의 작용기를 가지는 PFOA보다 생물농축성이 더 크며, 인체 내에서 더 안정되게 축적될 수 있다.<sup>5,11)</sup> 또한 대기 중에는 주로 짧은 탄소 사슬을 가지는 PFBS와 PFHxA가 많이 분포하여 호흡을 통해 인체에 노출될 수 있으며, 이는 이들 물질들이 다른 PFASs에 비해 상대적으로 낮은  $K_{OA}$  값을 가지고 휘발성이 크기 때문일 수 있다.<sup>5)</sup> PFOA도 PFOS와 유사하게 중류와 하류에서 높게 노출되는 것으로 나타났으며, 반면 PFUnDA는 하류에서만 노출량이 큰 것으로 나타났다. 이는 PFOA가 주거단지와 산업단지에서 배출되는 반면 PFUnDA는 주로 산업단지에서 배출되어 인근 주민들에게 노출될 수 있음을 의미한다. 이전 연구에서도 주로 PFOS, PFOA, PFHxA가 호흡을 통해 인체에 노출되는 것으로 확인되었다.<sup>16)</sup> 하지만 PFUnDA는 다른 연구 결과와 다르게 본 연구에서 노출량이 높았으며 이는 하류의 산업단지에서 PFUnDA에 대한 특정 배출원이 있음을 제안한다.

본 연구에서의 호흡을 통한 PFASs의 인체 노출량은 유럽식품안전청(EFSA) (<http://www.efsa.europa.eu/>)에서 제시하는 PFAS 섭취 안전 임계치인  $4.4 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{week}$  (약  $629 \text{ pg}/\text{kg}\cdot\text{d}$ )보다 낮았으며, 식품의약품안전처(<https://www.mfds.go.kr/>)에서 권고하는 PFOA ( $2.94 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ )와 PFOS ( $6 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{d}$ )에 대한 인체 노출 안전 기준치보다 낮았다. 그러나 PFASs는 호흡뿐만 아니라 식이섭취, 피부접촉과 같은 다양한 경로들을 통해 인체에 노출되기 때문에 복합적인 인체 노출이 고려되어야 한다.

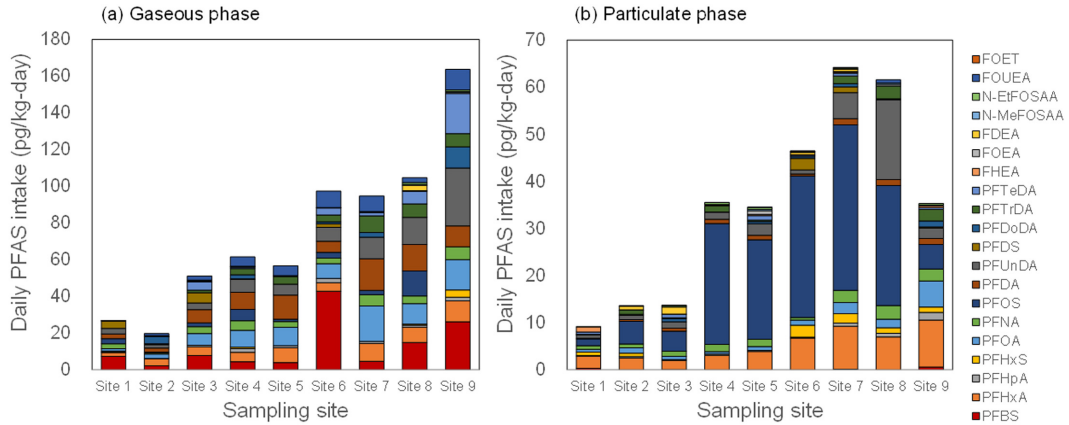


Fig. 2. Daily inhalation exposure to gaseous and particulate PFASs (pg/kg-day).

3.2. 가스상과 입자상 PFASs 호흡 노출

호흡을 통해 인체에 노출되는 가스상과 입자상 PFASs의 노출량을 Fig. 2에 나타냈다. 가스상과 입자상을 통해 인체에 노출되는 PFASs의 동족체 패턴은 달랐다. 가스상에서는 탄소 사슬의 길이가 가장 짧은 PFBS (16%)가 가장 많이 노출되었으며, 카르복실기의 작용기를 가지는 PFHxA (10%), PFOA (12%), PFDA (13%), PFUnDA (11%)가 주로 노출되었다. 이는 PFBS가 낮은  $K_{OA}$ 와 높은 휘발성을 가지기 때문이며, PFCAs가 PFASs에 비해 상대적으로 낮은 옥탄올-탄소 분배 계수 ( $K_{OC}$ )를 가져서 입자상보다는 가스상에 존재하기 때문일 수 있다.<sup>5)</sup> 또한 하류로 갈수록 가스상 PFBS에 대한 노출량이 높아지며, 이는 하류에 위치한 산업단지에서 PFBS가 상대적으로 많이 배출되기 때문일 수 있다. 입자상 PFASs는 가스상과 달리 PFOS (43%)가 가장 많이 노출되며, 이는 상대적으로 높은  $K_{OC}$  값을 가지는 PFOS가 입자상에 강하게 결합하여 인체에 노출될 수 있음을 제안한다.<sup>5)</sup> 또한 PFHxA

(17%)는 가스상뿐만 아니라 입자상으로도 인체에 높게 노출될 수 있는 것으로 나타났다.

가스상과 입자상 PFASs는 상류에서 하류로 갈수록 노출량이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 site 9에서 가스상 PFASs의 노출량은 급격히 높아진 반면, 입자상의 노출량은 줄어드는 경향을 나타냈다. Site 9에는 철강 산업 단지인 포스코가 위치해 있으며, 산업활동 중 가스상 PFASs가 대기 중으로 다량 배출되어 호흡을 통해 인체에 노출된다고 볼 수 있다.

3.3. 위해성 평가

호흡을 통한 비발암독성은 주요한 PFASs인 PFBS, PFOA, PFOS에 대해 계산되었으며, 결과값은 Table 2에 나타났다. 형산강 인근 거주민들이 야외에서 흡입하는 PFASs에 의해 발생하는 평균 비발암 독성 위험값은 PFOA, PFOS, PFBS가 각각 0.0095, 0.018, 0.0074이었으며, PFOS의 독성 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Life-time average daily (LADD, ng/kg-day) and hazard quotient (HQ) for inhalation exposure to PFOA, PFOS, and PFBS

	PFOA		PFOS		PFBS	
	LADD	HQ	LADD	HQ	LADD	HQ
Site 1	0.033	0.0017	0.072	0.0036	0.13	0.00045
Site 2	0.060	0.0030	0.087	0.0044	0.040	0.00013
Site 3	0.12	0.0061	0.11	0.0055	0.14	0.00045
Site 4	0.17	0.0084	0.55	0.027	0.077	0.00026
Site 5	0.19	0.0093	0.39	0.019	0.068	0.00023
Site 6	0.16	0.0078	0.57	0.028	0.74	0.0025
Site 7	0.37	0.019	0.64	0.032	0.083	0.00028
Site 8	0.23	0.011	0.67	0.034	0.26	0.00085
Site 9	0.38	0.019	0.089	0.0045	0.46	0.0015
Mean	0.19	0.0095	0.35	0.018	0.22	0.00074

PFBS는 노출되는 양은 많으나 상대적으로 독성이 높지 않아 체내에 PFOA와 PFOS보다 영향을 덜 미치는 것으로 나타났다.

PFASs의 독성유해지수가 WHO 허용위해수준( $HQ > 1$ )을 초과하지 않았으며,<sup>15)</sup> 이는 유의미한 비발암성 위험이 없음을 의미한다. 그러나 산업단지가 위치한 하류로 갈수록 비발암 위험이 점점 높아졌다. 이 위험 정도는 경미하거나 수용 가능한 것으로 간주되지만, 섭취, 접촉과 같은 다양한 경로를 통한 노출의 결합과 체내에서 안정하게 잔류하고 쉽게 분해 및 배출되지 때문에 체내에서 축적되면 인체에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 지속적인 모니터링과 위해성 평가가 수행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 형산강 인근 거주민들이 호흡을 통해 노출되는 PFASs의 노출량과 위해성을 파악하였다. 주로 neutral PFASs의 분해된 음이온 상태인 ionic PFASs가 인체에 노출될 것으로 추정되었으며, 상류에서 하류로 갈수록 노출량이 증가하였는데 이는 농경지나 주거단지보다 산업단지가 PFASs의 주요한 배출원임을 제안하였다. 노출되는 PFASs의 동족체는 지점과 가스상 및 입자상에 따라 분포가 달라졌으며, 이는 지점별로 배출원에서 배출되는 PFASs에 차이가 있으며, PFASs의 물리화학적 특성에 따라 다른 형태로 인체에 노출될 수 있음을 의미했다. 특히 본 연구에서 인체에 가장 많이 노출되고, 비발암 위험성 또한 높았던 PFOS는 산업단지 인근에서 높은 노출량을 보였으며, 주로 입자상을 통해 인체에 노출되기 때문에 호흡으로 인한 독성영향을 낮추기 위해 배출원에 집진장치 등 미세먼지를 제거하는 장치를 설치하여 노출량을 낮추는 방법을 고려해야 할 것이다. 또한 산업단지에서 근무하는 사람들의 직업적 노출이 심각할 수 있으므로 산업단지 내 PFASs의 모니터링과 위해성 평가가 요구된다. 거주민들의 호흡을 통한 PFASs 노출량은 PFAS 섭취 안전 임계치보다 낮았으며, 독성수치 또한 WHO의 허용수치보다 낮았으나 PFASs의 장기간 노출로 인한 건강 위험이 우려되며, 다양한 노출경로들이 결합했을 때 건강에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 지속적이고 확대된 위해성 평가가 수행되어야 할 것이다. 본 연구는 포항시 형산강 주변 대기 중 PFASs에 대해 호흡을 통한 인체 노출과 건강 위해성을 평가한 첫 연구이며, 이 결과는 추후 산업단지 내 근로자들에 대한 직업적 PFASs 노출 평가와 PFASs 사용 및 배출 규제 정책에 중요한 참고자료가 될 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 지원없이 수행되었습니다. 집필에 도움을 주신 Moon에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J. P. Giesy, and K. Kannan, "Peer reviewed: perfluorochemical surfactants in the environment", *Environmental Science and Technology*, **2002**, 36, 146A-152A.
2. S. A. Gauthier, and S. A. Mabury, "Aqueous photolysis of 8: 2 fluorotelomer alcohol", *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2005**, 24(8), 1837-1846.
3. J. W. Martin, S. A. Mabury, K. R. Solomon, and D. C. G. Muir, "Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)", *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2003**, 22(1), 196-204.
4. M. H. Russell, W. R. Berti, B. Szostek, and R. C. Buck, "Investigation of the biodegradation potential of a fluoroacrylate polymer product in aerobic soils", *Environmental Science and Technology*, **2008**, 42(3), 800-807.
5. Organization for Economic Cooperation and Development, <http://www.oecd.org/ehs/pfc/>, 2006.
6. United State Environmental Protection Agency (US EPA), 2010/2015 PFOA Stewardship Program, 2006.
7. European Union, Directive 2006/122/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006, 2006.
8. United State Environmental Protection Agency (US EPA), Draft Risk Assessment of the Potential Human Health Effects Associated with Exposure to Perfluorooctanoic Acids and Its Salts, 2005.
9. P. D. Jones, W. Hu, W. D. Coen, J. L. Newsted, and J. P. Giesy, "Binding of perfluorinated fatty acids to serum proteins", *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2003**, 22, 2639-2649.
10. S.-H. Seo, M.-H. Son, E.-S. Shin, S.-D. Choi, and Y.-S. Chang, "Matrix-specific distribution and compositional profiles of perfluoroalkyl substances (PFASs) in multimedia environments", *Journal of Hazardous Materials*, **2019**, 364, 19-27.
11. S.-K. Kim, "Environmental distribution and fate of perfluorinated compounds (PFCs) as emerging POPs: physico-chemical properties, emission, contamination level, inter-phase distribution and long-range transport", *Journal of Environmental Toxicology*, **2008**, 23, 143-164.
12. S.-H. Seo, M.-H. Son, S.-D. Choi, D.-H. Lee, and Y.-S. Chang, "Influence of exposure to perfluoroalkyl sub-

- stances (PFASs) on the Korean general population: 10-year trend and health effects”, *Environment International*, **2018**, 113, 149-161.
13. Z. Lu, R. Lu, H. Zheng, J. Yan, L. Song, J. Wang, H. Yang, and M. Cai, “Risk exposure assessment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water and atmosphere in central eastern China”, *Environmental Science and Pollution Research*, **2018**, 25, 9311-9320.
  14. National Institute of Environmental Research, Korean Exposure Factors Handbook, 2019.
  15. B. Liu, L. Xie, H. Zhang, J. Li, X. Wang, and W. Dong, “Spatial Distribution of Perfluorinated Compounds in Atmosphere of the Pearl River Delta, China”, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **2019**, 77, 180-187.
  16. N. Yu, H. Guo, J. Yang, L. Jin, X. Wang, W. Shi, X. Zhang, H. Yu, and S. Wei, “Non-Target and Suspect Screening of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Airborne Particulate Matter in China”, *Environmental Science and Technology*, **2018**, 52, 8205-8214.
  17. 국립환경과학원, “잔류성유기오염물질 공정시험방법”, **2017**, 23호, 882-895.