



국내 주요 정수장의 과불화화합물 분포 및 위해성 평가

Distribution and Risk Assessment of Perfluorinated Compounds (PFCs) in Major Drinking Water Treatment Plants, Korea

손보영¹·이이내¹·양미희¹·박상민¹·표희수²·이원석¹·박주현^{1*}

Boyoung Son¹·Leenae Lee¹·Mihee Yang¹·Sangmin Park¹·Heesoo Pyo²·Wonsuk Lee¹·Juhyun Park^{1*}

¹국립환경과학원 상하수도연구과, ²한국과학기술연구원

¹National Institute of Environmental Research, ²Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

The chemical structures of perfluorinated compounds(PFCs) have unique properties such as thermal and chemical stability that make them useful components in a wide variety of consumer and industrial products. Two of these PFCs, perfluorooctane sulfonate(PFOS) and perfluorooctanoic acid(PFOA), have received attention and were the most commonly detected. In this study it was analyzed the concentrations of 8 PFCs in samples were collected from drinking water treatment plants for 5 years(2012-2016). PFOS and PFOA were also high concentration and frequency. The mean concentrations of PFOA and PFOS were detected 0.0026-0.0069 µg/L and 0.0009-0.0024 µg/L in samples from drinking water treatment plants. These were relatively lower or similar compared to PFOS concentrations in Osaka(Japan). In general, these levels are below health-based values set by international authoritative bodies for drinking water. These results will be serve as the first monitoring data for PFCs in drinking water and be useful for characterizing the concentration distribution and management of PFCs in future studies.

Key words: Drinking water treatment plants, LC-MS/MS, Perfluorinated compounds, Risk assessment

주제어: 정수장, 액체크로마토그래피-텐덤질량분석기법, 과불화화합물, 위해도평가

1. 서 론

과불화화합물(PFCs)은 미국 3M사에서 제품생산을 위해 처음 사용한 이래 지난 50-60년 동안 별다른 규제 없이 수많은 공산품이나 소비재에 사용되어져 왔다 (Lindstrom et al., 2011, The environmental Working Group, 2003). 1960년대 후반 혈액 샘플에서 PFCs 중 PFOA가 처음 검출되었고 동물실험에서 경구 및 흡입 노출을 확인하였다(Cui, et al., 2009, Hinderliter, et al., 2006). 이후 PFCs의 지속적인 노출이 확인됨에 따라 2000년에 들어서 PFCs의 사용을 호주, 미국 등에서 규제하기 시작했다. 호주 화학물질관리청(NICNAS)에

서는 PFCs의 사용을 규제하고 대체물 개발을 적극 장려하고 하고 있으며 EPA, EU에서는 PFCs 규제를 제한 또는 규제안을 마련하였다 (NICNAS, 2013). 하지만 대만, 홍콩 등 동아시아 국가에서는 PFCs 전면 규제가 아닌 PFOS에 대한 규제만 하는 나라가 대부분이며, 인체 축적성 및 잔류 특성으로 상당기간 인체 노출은 계속 될 것으로 예상된다 (Table 1) (Domingo, 2012, Hekster et al., 2003, Law et al., 2007).

PFCs는 탄화수소의 수소자리에 불소가 완전히 치환된 과불화꼬리(-C_nF_{2n+1})와 수용성반응기(SO₃⁻ 또는 COO)가 결합된 형태를 띠고 있다. 이처럼 물과 기름에 대한 저항성을 갖는 꼬리와 수용성을 갖는 반응기를 모두 가지고 있는 특성 때문에 주로 계면활성제나 코팅제, 화장품, 광택제 등 다양한 제품에 사용되고

Received 6 September 2017, revised 31 October 2017, accepted 2 November 2017

*Corresponding author: Ju-hyun Park (E-mail: soyang@korea.kr)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

Table 1. Time course of important development regarding PFCs exposure and health risks

Year	Event
1947	PFC production starts at 3M plant in Cottage Grove, Minnesota.
1956	PFC waste is deposited off-site from 3M plant.
1962	Internal Dupont document raises concern about health risks.
1970s	PFC vapor pressures and water solubilities are published in chemical handbooks.
1978	Monkey study reveals immunotoxicity and other adverse effects PFOA.
1980	Organic fluoride determined in serum from production workers.
1981	Concern is raised about birth defects in children of female production workers.
1987	PFOA carcinogenicity is reported in rat study.
1993	3M begins to monitor PFOA in serum from production workers. Mortality study shows excess occurrence of prostate cancer.
1998	Serum from U.S. blood donors is shown to contain PFCs.
2000	Persistence and global environmental dissemination of PFCs is documented. 3M announces plan to phase out commercial production of PFOS.
2002	PFOS phase-out at 3M is said to have been completed.
2008	Health risk limits for PFCs in drinking water are issued. Mouse study shows immunotoxicity at serum PFC concentrations similar to human exposures.
2010	Decrease of PFOA emissions by 95% is said to be completed.
2011	PFOA induces delayed mammary gland development in mice at low exposures.
2012	PFC immunotoxicity is reported in children.

있다 Prevedouros et al., 2006, Shin et al., 2009).

PFCs 중 8개의 탄소를 가지는 PFOS와 PFOA는 직접 및 간접적 광분해에 안정적이며 반감기는 41년 이상이다. 이러한 이유로 PFCs보다 최종 대사체인 PFOS와 PFOA에 대해 주목해 왔고, 많은 연구가 진행되었다 (Martin et al., 2002). PFCs 중 PFOS는 특히 한번 배출 되면 오랜 세월 잔존할 수 있는 특징 때문에 2009년 5월 스톡홀름협약 제4차 당사국총회에서 잔류성 유기오염 물질(persistent organic pollutants, POPs)로 분류되었다 (Kim and Lee, 2010). 일본의 오사카 요도 강(Yodo river)유역에서 PFOS와 PFOA는 각각 0.123 µg/L와 2.6 µg/L로 검출되었고, 특히 PFOA의 경우 먹는물에서 0.598 µg/L까지 검출되었다 (Lein et al., 2008). EPA에서는 PFOS, PFOA 등 6종을 UCMR 3(The third unregulated contaminant monitoring rule)에 포함시켜 2013-2015년에 모니터링을 수행하였다. 보고농도는 0.01~0.09 µg/L이며 공공수도시설에서 검출빈도는 PFOA(2.4%), PFOS(1.9%), PFHpA(1.7%), PFHxS(1.1%), PFNA(0.3%), PFBS(0.2%) 순이었다 (EPA, 2017). Boiteux(2012)은 10종의 PFCs를 정수장 모니터링을 했으며 PFHxA(0.004~0.125 µg/L), PFOS(0.004-0.022 µ

g/L), PFHxS(0.004~0.018 µg/L)순으로 검출되어 다른 유럽 국가와 비슷한 경향성을 보였다 (Fujii et al., 2007, Atkinson et al., 2008).

Giesy and Kannan(2001)은 생산 및 소비지역과 멀리 떨어진 지역에서도 일부 PFCs가 검출된다는 점에 주목하고 PFCs의 장거리 이동성 연구를 통해 주요 이동 경로를 제시하였다. 또한 Dinglasan et al., 2004은 일부 PFCs가 부유입자물질에 붙어 대기를 통해 이동하거나 과불화 플로오르텔로머 알콜(fluorinated telomer alcohols, FTOHs)이나 술폰산염(sulfonate)과 같은 전구물질이 대기를 통해 장거리 이동할 수 있음을 보고하였다. 휘발성을 가진 전구물질은 이동 중에 대기산화반응을 통해 축적성이 강한 PFOA나 PFOS라는 긴 사슬 형태로 바뀌어 환경에 축적된다.

PFOS의 경우 북미에서 2002년부터 사용을 단계적으로 중단하였으며 환경에서 검출되는 농도가 줄어들고 있다 (Calafat et al., 2007). 하지만 중국 등 개발도상국에서는 여전히 사용하고 있어 장기적인 환경오염 척도를 분석하기 위해 모니터링 조사는 지속적으로 이루어져야 한다.

PFCs 오염에 관한 모니터링 연구는 국외뿐만이 아니라

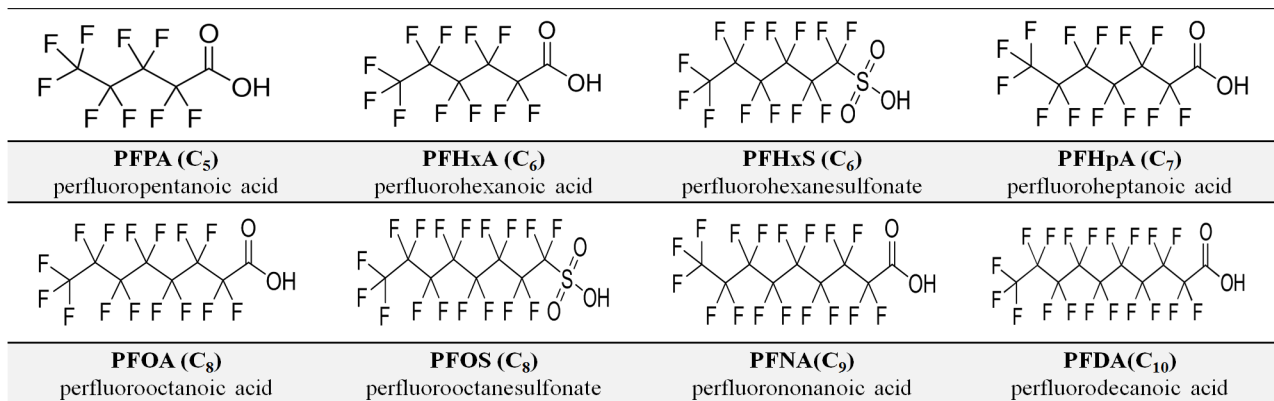


Fig. 1. Chemical structures of PFCs.

국내에서도 관심을 가지고 활발하게 진행되고 있다. 다양한 매체에서의 PFCs 모니터링 연구가 있으나 정수장에서의 PFCs 모니터링 연구 사례는 매우 제한적이다.

본 연구는 전국 주요 정수장 과불화합물 분포실태 조사를 통해 인체위해 여부를 평가하고, 추후 지속적인 모니터링 실시 등 적정관리 방안 마련을 위해 실시되었다.

2. 연구방법

2.1 분석 대상물질

Fig. 1에 나타난 것과 같이 과불화합물은 과불화꼬리에 붙은 수용성 반응기 종류에 따라 perfluoroalkyl sulfonate (PFASs, $CF_3(CF_2)_nSO_3$)와 perfluoroalkyl carboxylates (PFCAs, $CF_3(CF_2)_nCO_2$)로 나눌 수 있다. PFASs에는 perfluorohexyl sulfonate(PFHxS), perfluorooctyl sulfonate (PFOS) 등이 포함되며, PFCAs에는 perfluorohexanoic acid(PFHxA), perfluorooctanoic acid(PFOA), perfluoroheptanoic acid (PFHpA), perfluorononanoic acid(PFNA), perfluorodecanoic acid(PFDA), perfluorodecanoic acid(PFDA) 등이 있다.

본 연구에서는 PFCs 중 대표되는 PFOS와 PFOA를 포함한 8종의 표준물질을 Fig. 1에 나타냈으며, 시중에 시판되는 2000 mg/L 농도를 구입하여 100 mg/L가 되도록 희석하여 사용하였다. 내부표준물질은 $^{13}C_4$ -PFOS와 $^{13}C_4$ -PFOA의 50 mg/L 표준원액을 구입하여 100 µg/L로 희석하여 사용하였다.

2.2 시료채취 및 보존방법

본 연구에서 수행된 1차 시료채취는 2012년 2월부터

9월까지 총 4회에 걸쳐 이루어졌고, 2차는 2013년 5월부터 10월까지 걸쳐 총 3회를 하였다. 그리고 3차 시료는 2014년 5월부터 10월까지 3회, 4차는 2015년 7월과 10월, 5차는 2016년 1월과 3월에 모니터링을 실시하였다. 조사 지점은 Fig. 2와 같이 전국 주요 70개 정수장에서 최종 처리수를 채취하였다. 수도권 25개 정수장, 경상도 20개 정수장, 충청도 12개 정수장, 전라도 8개 정수장, 강원도 4개 정수장 그리고 제주지역의 1개 정수장이 포함되었다. 시료채취시 용기는 폴리에틸렌(LDPE) 재질의 1회용 무균 채수병을 준비하여 1L에 가득 채취하여 냉장보관(4°C)하였다.



Fig. 2. Locations of sampling sites for PFCs.

2.3 분석방법

2.3.1 전처리방법

시료에 입자상 불순물을 제거하기 위해 0.45 μm 필터를 사용하여 여과한 후, EPA method 537을 참고하여 고체상추출(SPE)법으로 전처리하였다. Oasis HLB 카트리지에 메탄올과 증류수를 이용하여 활성화시킨 후 500 mL 시료를 5~7 mL/min의 속도로 통과시켰다. 질소 가스로 카트리지를 건조시킨 후 메탄올을 이용하여 추출, 농축하여 분석하였다.

2.3.2 기기분석

LC-ESI-MS/MS으로 분석하였고 10 mM 아세트산암모늄 이동상을 사용하였다. 8종의 PFCs 모두 선구이온(precursor ion)이 [M+H]⁻ 형태이고, 각각 최적의 충돌 에너지로 2차 생성이온을 확인하여 정량하였다. 검정곡선은 0.005-0.2 μg/L 농도범위에서 상관계수 0.998 이상의 직선성을 나타내었다. PFCs 8종의 방법검출한계(Method detection limit, MDL)와 정량한계(Limit of quantification, LOQ)를 table 2에 정리하였다. 본 실험에서 구한 검출한계 범위는 0.0001~0.0007 μg/L, 정량한계는 0.0001~0.0023 μg/L 범위를 나타내었다. 정확도(Accuracy)와 정밀도(Precision)는 각각 73.2~97.5%, 1.3~14%로 나타났다.

2.4 위해도 평가

2.4.1 위해도 평가 절차

위해성 평가란 오염물질이 다양한 경로로 인체에 노출됐을 때 나타날 수 있는 인체 영향을 정성 또는 정량적인 방법으로 추정하는 과정이다. 가장 보편적으로 쓰이는 위해성 평가는 미국국가연구위원회(NRC, National Research Council)에서 고안한 방법으로서 평가 절차로는 첫 번째로 위험성 확인(Hazard identification)이다. 이 단계에서는 모든 역학 자료와 동물실험결과를 종합하여 인체에 노출됐을 때를 가정하여 위험성을 확인한다. 두 번째 단계는 용량-반응평가(dose-response assessment)에서는 비발암성 물질과 발암성 물질을 구분하여 평가한다. 세 번째 단계는 노출평가(exposure assessment)로 노출될 수 있는 다양한 경로와 노출 강도, 기간 등을 고려하여 오염물질에 대한 인체 노출량을 평가한다. 마지막 단계는 불확실성

을 감안하여 위해도를 결정(risk characterization)한다.

2.4.2 위해도 추정

인체 발암성 물질에 대해서는 기대수명 중 30년 동안 수돗물을 매일 섭취함으로써 발생 가능한 평생초과발암위해도(ECR, Excess cancer risk)를 추정한다.

$$ECR = \text{섭취발암잠재력}(\text{mg/kg-day})^{-1} \times \text{인체노출량}(\text{mg/kg-day})$$

인체 비발암 독성 물질에 대해서는 수돗물을 매일 섭취함으로써 발생가능한 일평균 독성위험 값(HQ, Hazard Quotient)을 추정한다.

$$HQ = \text{인체노출량}(\text{mg/kg-day}) / \text{섭취 노출참고치}(\text{RfD})(\text{mg/kg-day})$$

정량적인 발암잠재력 또는 노출참고치(RfD, TDI, ADI 등)가 제시되어 있지 않은 경우에는 독성학적 POD(Point of departure)을 이용한 MOE(Margin of exposure)를 평가한다. MOE가 100 이하일 경우 잠재적 노출 위험가능성이 있는 것으로 평가한다.

인체 비발암 독성 물질인 PFCs의 경우 EPA에 제시되어 있는 섭취권고치(0.000 02 mg/kg-day)를 이용하여 일평균 독성위험 값을 구하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 함유실태 조사 결과

본 연구에서는 5년 동안 전국 시도 70개 정수장에 대한 8종의 PFCs 검출 현황을 지역별로 나누어 Fig. 3(a)에 나타내었다. 각 지역별 정수장의 검출 농도를 비교해 보면 산업단지가 있고 대도시의 경우 PFCs의 농도가 높게 나타났다. 검출된 총 PFCs 농도를 비교하면 울산시>경상남도>부산시>대구시>경상북도>경기도>강원도>충청남도>충청북도>인천시>서울시>대전시>전라남도>전라북도>광주시>제주시 순으로 나타났다.

특히 PFOA가 거의 모든 지역 정수장에서 높게 나왔으며 부산시, 울산시, 경상남도 지역에서 N.D.~0.0971 μg/L, 0.0065~0.0368 μg/L, N.D.~0.0995 μg/L 각각의 검출범위를 보였고, 평균값은 0.0152 μg/L, 0.0201 μg/L,

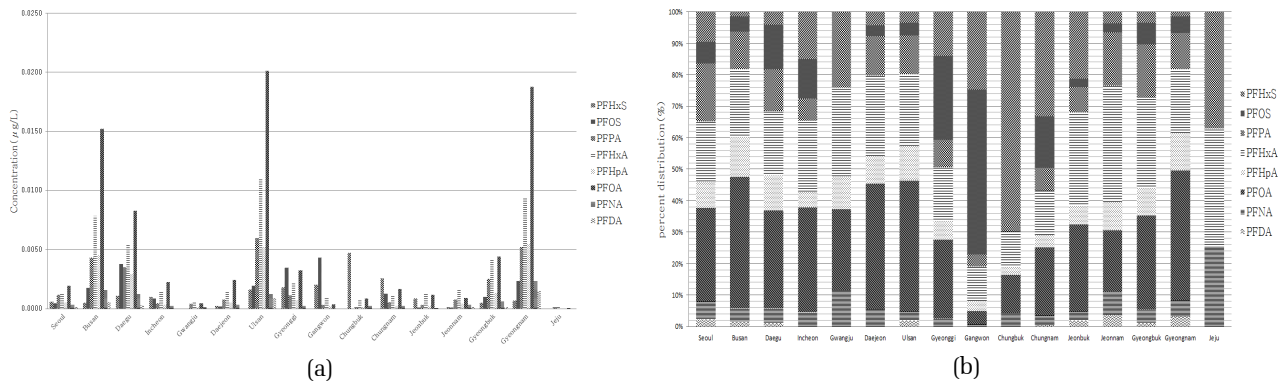


Fig. 3. (a) The concentrations of PFCs detected in drinking water treatment plants; (b) percent distribution (scaling up to 100%) of PFCs.

Table 2. The QA/QC results of PFCs

Group	Compounds	MDL ($\mu\text{g/L}$)	LOQ ($\mu\text{g/L}$)	Accuracy (%)	Precision (%)
PFCs	PFOS	0.0001 ~ 0.0006	0.0004 ~ 0.0020	76.8 ~ 93.1	2.7 ~ 6.1
	PFOA	0.0001 ~ 0.0007	0.0004 ~ 0.0020	85.3 ~ 87.1	3.4 ~ 8.4
	PFHxS	0.0001 ~ 0.0002	0.0001 ~ 0.0005	86.5 ~ 97.5	1.3 ~ 3.8
	PFPA	0.0002 ~ 0.0005	0.0007 ~ 0.0017	74.5 ~ 87.1	3.1 ~ 9.5
	PFHxA	0.0001 ~ 0.0004	0.0004 ~ 0.0014	76.1 ~ 94.4	5.0 ~ 7.7
	PFHpA	0.0002 ~ 0.0005	0.0007 ~ 0.0017	73.2 ~ 92.2	3.9 ~ 5.9
	PFNA	0.0002 ~ 0.0007	0.0007 ~ 0.0023	83.0 ~ 95.0	3.8 ~ 6.3
	PFDA	0.0001 ~ 0.0004	0.0004 ~ 0.0015	81.1 ~ 91.3	2.2 ~ 14

0.0188 $\mu\text{g/L}$ 이었다. PFOA와 PFOS같은 이온성 물질은 최종 대사체로서 원수 중에 함유되어 있는 FOSEs (fluorooctylsulfonamidoethanol), FROHs (fluorotelomer alcohols) 와 같은 전구물질이 광분해, 가수분해, 정수처리 과정 등을 거치면서 분해 과정을 지속되어 농도가 증가한 것으로 추측된다.

외국의 PFCs 분석결과를 비교해 보면 우리나라와 비슷한 경향을 보였으며 수돗물에서도 PFOS와 PFOA가 검출농도가 높았다. 일본 오사카시의 수돗물에서 PFOA와 PFOS가 각각 0.0023 ~ 0.084 $\mu\text{g/L}$, 0.0002 ~ 0.022 $\mu\text{g/L}$ 검출된 적이 있으며 (Takagi et al., 2008), 미국 뉴저지주 수돗물에서 PFOA가 0.0045 ~ 0.039 $\mu\text{g/L}$ 검출되었다 (Post et al., 2009).

국내의 수돗물에서 PFCs의 검출은 높은 수용성과 잔류성이 높아 자연적으로 분해되기 어렵고 (Post et al., 2009, Post et al., 2012) 또한 일반 정수처리 과정에서 극미량의 PFCs를 효과적으로 제거하기가 어렵기 (Lin et al., 2009) 때문인 것으로 보인다.

지역별 PFCs 분포를 보면 PFOA는 대부분의 지역에서 높은 분포를 보였으며 PFOS, PFHxS는 광주시와 충청북도에서 가장 높았다 (Fig. 3(b)). 검출률 40% 이상인 항목은 PFHxS(40.6%), PFHxA(68.4%), PFHpA(43.5%), PFOA(61.6%)이며, 20% 이상 40% 미만 검출된 항목은 PFOS(31.6%), PFPA(37.9%), PFNA(34.2%) 이다. 20% 미만은 PFDA(15.8%)이다 (Table 3).

3.2 위해도평가

3.2.1 위험성 확인

PFCs는 탄소와 불소가 결합되어 있는 형태로 산화, 환원 등에 의해서도 분해가 쉽지 않아 환경잔류성이 높다. 산업단지 주변의 지표수, 생물체 등에서 검출되고 알래스카 북극곰에서도 발견될 정도로 광범위하게 분포되어 있다. 주로 경구나 흡입 노출로 인체로 들어 오게 되며 동물실험을 이용해 분석 결과 혈장, 간 등에 주로 분포하고 특히 PFOA의 90% 이상이 혈청 알부민과

pp. 481-490
pp. 491-499
 pp. 501-510
 pp. 511-519
 pp. 521-527
 pp. 529-537
 pp. 539-549
 pp. 551-566
 pp. 567-575
 pp. 577-586
 pp. 587-597
 pp. 599-609
 pp. 611-618
 pp. 619-628

결합하는 것으로 나타났다 (Han et al., 2003). 동물의 발암성 실험에서는 간, 고환, 유방 등의 특정 종양의 위험성을 높인다고 보고했으나 동물의 암 위험 영향을 미치는 방식이 사람에게도 동일할 것인지는 확실하지 않다. 인간에 대한 연구는 주로 PFCs를 사용하는 공장에서 일하거나 공장 근처에서 일하는 집단의 암 발생률을 조사했다. 연구들 중 일부는 PFCs의 노출이 증가함에 따라 고환암의 위험이 증가한다고 보고했다. 다른 연구에서는 전립선암, 방광암, 난소암 등 다른 암과의 관련성을 제시하였으나 모든 연구가 암과의 연관성을 발견한 것이 아니며 명확하게 증명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 보조적으로 미국암학회(IARC, American Cancer Society)와 미국환경보호국(EPA, Environmental Protection Agency)의 분류체계에 의해서 발암성 물질과 비발암성 물질을 분류한다. Table 4에서 나타냈듯이 IARC는 동물실험에서 방광암을 발생할 수 있다는 제한된 증거를 기반으로 하여 PFOA를 Group 2B(인간에게 발암 가능성이 있음)로 분류했다. EPA에서 공식적으로 발암성을 분류하지 않았으며 미국 독성물질질병등록국 (ATSDR, 2015)에서도 암과의 결정적인 증거는 없다고 발표했다.

3.2.2 인체발암등급 및 용량-반응평가

비발암성 물질은 참고치(RfD, Reference Dose)값을 이용하는데 오염물질로부터 평생 동안 노출되었을 때 해로운 영향이 없을 것으로 기대되는 인구 집단(민감한 하위 집단 포함)에 대한 노출 추정치이다. 부작용이 없는 영향수준의 최고치를 나타내는 평균 혈청의 인체해당선량(HED, Human Equivalent Dose)이나 부작용을 초래하는 용량 중 가장 낮은 용량을 나타내는 평균 혈청의 인체해당선량을 불확실성 상수(UF, Uncertainty Factor)로써 감안한 값이다. 불확실성은 인간 간의 감도 변화, 동물과 인간의 차이, 연구대상 종의 수명과 비교한 노출기간 등을 고려하여 실제적으로 허용이 가능한 용량을 결정하기 위해 적용한다. EPA에서는 건강보호수준(HA, Health Advisories)을 산출하였는데 독성학적인 건강참고치로서 경제적 인식 및 기술적 여건 등 모든 다른 조건들이 만족하는 수준이라고 가정하고 독성학적으로 안전한 수준을 제시하는 것이다. 따라서 Table 4에 나타냈듯이 EPA에서 PFOA와 PFOS의 농도가 0.07 µg/L 이하인 식수는 일생동안

Table 3. The number of total samples and detection rate of PFCs

Group	Compounds	total sample	detection rate
PFCs	PFOS	937 (2012-2016)	296 (31.6%)
	PFOA		577 (61.6%)
	PFHxS		380 (40.6%)
	PFPA		355 (37.9%)
	PFHxA		641 (68.4%)
	PFHpA		408 (43.5%)
	PFNA		320 (34.2%)
	PFDA		148 (15.8%)

노출되더라도 건강에 악영향을 미치지 않는다고 설명한다.

$$RfD = \frac{HED_{NOAEL} \text{ or } HED_{LOAEL}}{UF}$$

$$HA = \frac{(NOAEL \text{ or } LOAEL \text{ or } BMDL) \times BW}{UF \times DW} \times RSC$$

3.2.3 노출평가

PFCs는 흡입, 경구, 피부노출 등 다양한 경로를 통해 인체로 노출되지만 경구노출이 주된 노출경로로 예상하고 있다. EPA에서는 PFOA, PFOS의 먹는물 상대적 기여도(RSC, Relative Source Contribution)를 20% (0.20)로 권고하고 있으며, 식품의약품안전처에서는 인체 총 노출량 중 식품이 기여하는 비율을 PFOA 40%, PFOS 15% 정도로 평가하고 있다. 본 연구에서는 먹는물 이외의 오염원이 다수 존재하는 것을 감안하여 상대기여율(RSC)을 PFCs 모두 10%로 적용하였다.

경로노출량을 산출하기 위해 각 노출변수들의 확률분포를 이용한 Monte-Carlosimulation을 적용하였다. 분석결과가 검출한계 미만인 경우에는, 평가 시에 모든 값이 있어야하기 때문에 별도의 기준을 두어 오염도 값을 계산하였다.

수용체의 체중 및 물 섭취량 평가방법으로 국민건강영양조사의 물 섭취량(1컵, 200 ml) 및 체중(kg) 자료로부터 SAS 통계프로그램으로 산출하였다. 그 결과로 전 연령의 경우 물 섭취량 조사의 대상자수는 36,968명이고, 평균 2.3 L를 음용하는 것으로 산출되었다. 체중의 경우 조사 대상자수는 38,778명이고, 전 연령 평균 체중은 56 kg으로 계산하였다.



식품 위해성 평가를 위한 지침(GEMS/Food-EURO, 1995)에서 제시하고 있는 불검출자료의 처리방법을 근거로 하여 본 연구에서는 검출률 20~40%에 해당하는 물질 PFOS, PFPA, PFNA 3종에 대해서 보수적 원칙에 따라 검출률 20~40 %의 불검출 값에 1/2 검출한계 (LOD) 값을 사용하였다. 산출한 오염도 값은 각 물질별로 평균값, 95th%값을 적용하여 평가하였다.

$$I_{dw} = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

I_{dw} : 인체노출량(mg/kg/day)

C : 먹는물 오염도(mg/L)

CR : 일일물섭취량(L/day)

EF : 평균연간노출일(days/yr)

ED : 평균노출기간(years)

BW : 체중(kg)

AT : 평생노출일(days)

3.2.4 위해도 추정

오염도 및 인체 노출 계수의 확률 분포를 이용하여 Monte-Carlo simulation에 의한 위해도의 확률분포를 결정하고 섭취 일일평균노출량(LADD, Lifetime average daily dose)을 섭취 독성노출참고용량(RfD)으로 나누어 비발암독성 위험값을 산출하였다(Table 5).

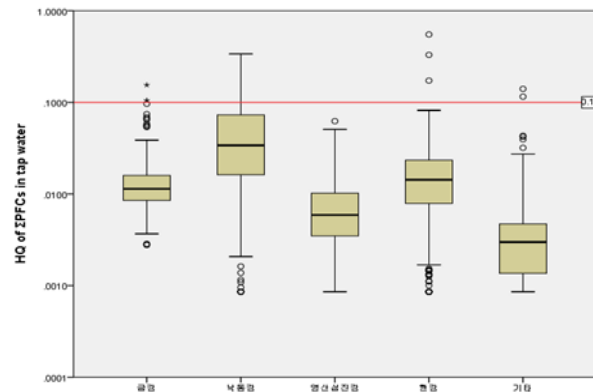


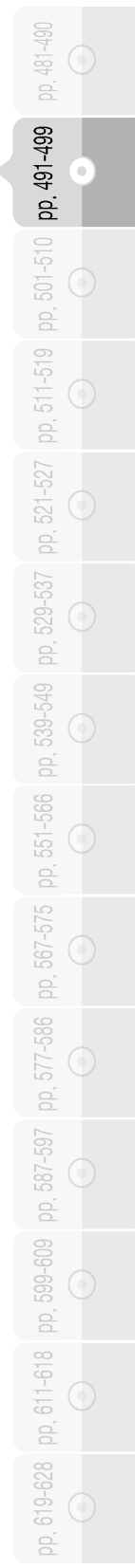
Fig. 4. Comparison of Hazard Quotient(HQ) by water in PFCs.

Table 4. Dose-response data via ingestion for PFCs

Group	Compounds	IRIS/IARC	RfD mg/kg-day	HA µg/L	POD mg/kg-day
PFCs	PFOS	-	0.00002	0.07	-
	PFOA	-/2B	0.00002	0.07	-
	PFHxS	-	-	-	-
	PFPA	-	-	-	-
	PFHxA	-	-	-	50
	PFHpA	-	-	-	-
	PFNA	-	-	-	-
	PFDA	-	-	-	30

Table 5. Human exposure dose and Hazard Quotient(HQ) of non-carcinogens for PFCs

Group	Compounds	detection rate (%)	pollution level (ug/L)		LADD (mg/kg-day)		Hazard Quotient (HQ)	
			aver.	95th%	aver.	95th%	aver.	95th%
PFCs	PFHxS	40.6	0.001	0.004	2.14E-8	7.13.E-8	0.001	0.004
	PFOS	31.6	0.002	0.007	3.01E-8	1.06.E-7	0.002	0.005
	PFPA	37.9	0.002	0.008	3.00E-8	1.26.E-7	0.002	0.006
	PFHxA	68.4	0.003	0.013	5.11E-8	2.09.E-7	0.003	0.010
	PFHpA	43.5	0.002	0.007	2.50E-8	1.11.E-7	0.001	0.006
	PFOA	61.6	0.005	0.022	8.16E-8	3.45.E-7	0.004	0.017
	PFNA	34.2	0.001	0.004	1.41E-8	5.80.E-8	0.001	0.003
	PFDA	15.8	0.000	0.002	6.52E-9	2.94.E-8	0.000	0.001



8종의 PFCs는 비발암 만성 독성물질의 독성 유해지수(HQ)가 WHO 허용위해수준의 1/10을 초과하지 않았다. 수역별(한강, 금강, 낙동강, 영산강, 기타)로 위해도를 추정하였는데 평균 잠재위험지수가 비발암독성 허용위해수준(HQ>1)을 초과하지 않았다 (Fig. 4).

또한 국내 주요 정수장 PFCs 조사결과는 국내 수질기준 및 감시항목의 설정여부 판단기준인 WHO 허용위해수준의 1/10(위해지수 > 0.1)을 넘지 않으므로 별도의 관리기준을 설정할 단계는 아닌 것으로 판단된다. 다만 PFCs의 검출빈도가 낮지 않으므로, 지속적인 모니터링을 통해 인체 위해여부에 대한 평가가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

국내 주요 정수장 PFCs 조사결과 인체위해 가능성은 낮은 것으로 나타나 별도의 관리기준을 설정할 단계는 아닌 것으로 판단된다. 다만, PFCs의 검출빈도가 낮지 않으므로 지속적인 모니터링은 필요한 것으로 보인다. 본 연구에서 수행된 주요 결과는 아래와 같다.

1) PFOA가 거의 모든 지역 정수장에서 높게 나왔으며 부산시, 울산시, 경상남도 지역에서 N.D.~0.0971 µg/L, 0.0065~0.0368 µg/L, N.D.~0.0995 µg/L 각각의 검출범위를 보였고, 평균값은 0.0152 µg/L, 0.0201 µg/L, 0.0188 µg/L 이었다.

2) 섭취 일일평균노출량(LADD, Lifetime average daily dose)을 섭취 독성노출참고용량(RfD)으로 나누어 비발암독성 위험값을 산출한 값에서는 비발암 만성 독성물질의 독성 유해지수(HQ)가 WHO 허용위해수준의 1/10을 초과하지 않았다.

3) 위해성 평가 결과, WHO 허용위해수준의 1/10(위해지수 > 0.1)을 넘지 않으므로 별도의 관리기준을 설정할 단계는 아닌 것으로 판단되지만 PFCs의 검출빈도가 낮지 않으므로, 지속적인 모니터링 평가가 필요할 것으로 사료된다.

References

Atkinson, C., Blake, S., Hall, T., Kanda, R., Rumsby, P. (2008). Survey of the prevalence of perfluorooctane sulphonate

(PFOS), perfluorooctanoic acid(PFOA) and related compounds in drinking water and their sources, Report DEFRA 7585.

Australian Government Department of Health (2013). <http://www.nicnas.gov.au/chemical-information/Topics-of-interest/subjectsper-and-poly-fluorinated-chemicals-pfcs> (Aug 7, 2017).

Boiteux, V., Dauchy, X., Rosin, C., Munoz, J.F. (2012). National Screening Study on 10 Perfluorinated Compounds in Raw and Treated Tap Water in France, *Archives Environ. Contam. Toxicol.* 63, 1-12.

Calafat, A.M., Wong, L.Y., Kuklenyik, Z., Reidy, J.A., Needhan, L.L. (2007). Polyfluoroalkyl Chemicals in the U. S. Population: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003-2004 and Comparisons with NHANES 1999-2000, *Environ. Health Perspect.* 115, 1596-1602.

Cui, L., Zhou, Q.F., Liao, C.Y., Fu, J.J., Jiang, G.B. (2009). Studies on the Toxicological Effects PFOA and PFOS on Rats Using Histological Observation and Chemical Analysis, *Archives of Environ. Contam. Toxicol.*, 56, 338-349.

Dinglasan, M.J., Ye, Y., Edwards, E.A., Mabury, S.A. (2004). Fluorotelomer Alcohol Biodegradation Yields Poly- and Perfluorinated Acids, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 2857-2864.

Domingo, J. L. (2012). Health risks of dietary exposure to perfluorinated compounds, *Environ. Int.*, 40, 187-19.

Fujii, S., Polprasert, C., Tanaka, S., Lien, N.P.H., Qiu, Y. (2007). New POPs in the environment: distribution, bioaccumulation and treatment of perfluorinated compounds, *J. Water Suppl. Res. Technol. AQUA*, 56, 313-326.

Giesy, J. P. and Kannan, K. (2001). Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1339-1342.

Han, X., Snow, T.A., Kemper, R.A., Jepson, G.W. (2003). Binding of perfluorooctanoic acid to rat and human plasma proteins, *Chem. Res. Toxicol.*, 16, 775-781.

Hekster, F.M., Laane, R.W., Vooqt, P. (2003). Environmental and toxicity effects of perfluoroalkylated substances, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 179, 99-121.

Hinderliter, P.M., DeLorme, M.P., Kennedy, G.L. (2006). Perfluorooctanoic acid: Relationship between repeated inhalation exposures and plasma PFOA concentration



in the rat, *Toxicol.* 222, 80-85.

Kim, B. H. and Lee, J. Y. (2010). Policy & Management of persistent organic pollutant in Korea, *KIC news*, 13, 1-10.

Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., LAi, D., Pfahles-Hutchens, A., Seed, J. (2007). Perfluoroalkyl acid: a review of monitoring and toxicological findings, *Toxicol. Sci.*, 99, 366-394.

Lein, N.P.H., Fujii, S., Tanaka, S., Nozoe, M., Tanaka, H. (2008). Contamination of perfluorooctane sulfonate(PFOS) and perfluorooctanoate(PFOA) in surface water of the Yodo River basin(Japan), *Desalination*, 226, 338-347.

Lin, A.Y., Panchangam, S.C., Lo, C.C. (2009). The impact of semiconductor, electronics and optoelectronic industries on downstream perfluorinated chemical contamination in Taiwanese rivers, *Environ. Pollution*, 157, 1363-1372.

Lindstrom, A.B., Strynar, M.J., Libelo, E.L. (2011). Polyfluorinated compounds: past, present and future, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7954-7961.

Martin, J.W., Muir, D.C.G., Moody, C.A., Ellis, D.A., Kwan, W.C., Solomon, K.R., Mabury, S.A. (2002). Collection of Airborne Fluorinated Organics and Analysis by Gas Chromatography/Chemical Ionization Mass spectrometry, *Anal. Chem.*, 74, 584-590.

Post, G.B., Louis, J.B., Cooper, K.R., Boros-Russo, B.J., Lippincott, R.L. (2009). Occurrence and Potential Significance of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) Detected in New Jersey Public Drinking Water Systems, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 4547-4554.

Post, G.B., Cohn, P.D., Cooper, K.R. (2012). Perfluorooctanoic acid, an emerging drinking water contaminant: A critical review of recent literature, *Environ. Res.*, 116, 93-117.

Prevedouros, K., Cousins, I.T., Buck, R.C., Korzeniowski, S.H. (2006). Source, fate and transport of perfluorocoboxylates, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 32-44.

Shin, M.Y., Im, J.K., Kho, Y.L., Zoh, K.D. (2009). Quantitative Determination of PFOA and PFOS in the Effluent of Sewage Treatment Plants and in Han River, *J. Environ. Hlth. Sci.*, 35, 334-342.

Takagi, S., Adachi, F., Miyano, K., Koizumi, Y., Tanaka, H., Mimura, M., Watanabe, I., Tanabe, S., Kannan, K. (2008). Perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanonate in raw and treated tap water from Osaka, Japan, *Chemosphere*, 72, 1709-1412.

The environmental Working Group (2003), <http://www.ewg.org/research/pfcs-global-contaminants/pfoa-pollutes-air-drinking-water-food#WaJT7U2QwdU> (May 11, 2017).

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628