

섬진강 수계 퇴적물에서 과불화화합물(PFCs)의 검출 특성

백병천[†] · 감상규*

전남대학교 환경시스템공학과 · *제주대학교 환경공학과

(2016년 11월 24일 접수, 2016년 12월 12일 수정, 2016년 12월 15일 채택)

Detection Characteristics of Perfluorinated Compounds (PFCs) in the Sediments of Sumjin River

Byeong-Cheon Paik[†] · Sang-Kyu Kam*

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

**Department of Environmental Engineering, Jeju National University*

(Received 24, November 2016, Revised 12, December 2016, Accepted 15, December 2016)

Abstract

The objective of this study is to investigate the detection characteristics of perfluorinated compounds(PFCs) in the sediments of Sumjin river, South Korea, which is part of an ongoing program of monitoring on the local distribution of PFCs. All samples were analyzed by liquid chromatography tandem mass spectrometry(LC/ESI-MS/MS). 6 PFCs which are perfluorooctanoic acid(PFOA), perfluorooctane sulfonate(PFOS), perfluorononanoic acid(PFNA), perfluorodecanoic acid(PFDA), perfluoroundecanoic acid(PFUnDA), and perfluorododecanoic acid(PFDoDA) were detected in the sediments of Sumjin river. PFCs were detected at the all sampling sites, and average concentration of PFCs at each sample site were in the range of 0.060 to 0.835 ng/g.dw(dry weight). PFCs with high detective frequency and high concentration in the sediments of Sunjin river were PFOA and PFOS, and average concentration at each sample site of PFOA and PFOS in 2015 were in the range of 0.06 to 0.13 ng/g.dw and N.D. to 0.24 ng/g.dw, respectively. These results suggest that the continuous monitoring of PFOA and PFOS is needed in the sediments of Sumjin river.

Keywords : PFCs, Sediments, Detection, Sumjin River

1. 서론

섬진강은 전라북도 진안군 백운면과 장수군 장수읍의 경계인 팔공산에서 발원하여 전라남·북도의 동쪽 지리산 기슭을 지나 남해의 광양만으로 흘러드는 강으로, 섬진강유역은 동경 126° 51' 41" ~ 127° 52' 56" , 북위

34° 40' 9" ~ 35° 49' 60" 에 걸쳐 한반도의 남부 중서부에 있고, 유로 연장은 222.05 km, 유역 면적은 4,914.32 km²로 남한에서 네 번째로 큰 강이다. 지리적으로 전라남도과 전라북도, 경상남도의 3도에 걸쳐 있어, 이들 지역에 주요한 수자원으로 이용되고 있다¹⁾.

과불화화합물(perfluorinated compounds, PFCs)

[†]Corresponding author E-mail: bpaik@jnu.ac.kr

은 탄화수소 사슬에 불소가 수소위치에 치환된 물질로서 주로 전기화학적 불소화방법(electrochemical fluorination, ECF)과 불소화합물들의 화학적 결합을 이용하는 텔로머화(telomerization)에 의해 인공적으로 제조되는 화합물로 구분된다²⁻⁴⁾. 이들 물질은 작용기에 따라 과불화기(perfluoro-)에 카르복실기가 붙어 있는 perfluorocarboxylic acids(PFCAs)와 술폰산기가 붙어있는 perfluoroalkyl sulfonates(PFASs)로 구분되며, 전구물질로는 fluoro telomer alcohols (FTOHs), perfluorooctyl sulfonamides(FOSAs), perfluorooctyl sulfonamidoethanols(FOSEs), perfluorooctyl sulfonamidoacetic acids(FOSAAAs) 등이 있다^{2,4)}. 또한, 이들 물질은 열적 화학적으로 매우 안정하므로 다른 물질과 거의 반응하지 않고 가수분해, 광분해, 생분해, 대사분해에 저항하는 독특한 성질을 갖고 있기 때문에 지난 50년 동안 산업 부문과 소비자제품 등에 널리 이용되어 왔으며, 이들 물질은 지속성(Persistence), 생물축적성(Bioaccumulation), 생물독성(Toxicity)과 같은 PBT 특성을 갖는 물질로 알려져 있어, 거의 모든 환경매체 및 오염원이 없는 극지방을 포함한 원거리 지역에까지 다양하게 검출되고 있는 실정이다^{2,3,6,-12)}.

지금까지 국내의 수계에서 PFCs 오염에 관한 조사연구로는 시화호¹³⁾, 서울시 한강 및 주요 하수처리장⁵⁾, 4대강 수계 및 전국의 6개 산업단지³⁾, 전주 폐수처리장⁴⁾, 낙동강 수계¹⁴⁾에서 수행되었으며, 2013년부터 환경부에서 과불화합물(PFCs) 중 일부를 잔류성 유기오염물질 측정설치·운영 항목에 포함시킨 바¹⁵⁾, 이에 대한 지속적인 오염도 조사가 절실히 요구되어진다.

PFCs 오염에 대한 분석은 많은 다른 성질의 PFCs 때문에 매우 복잡하다. 이의 오염을 철저히 평가하기 위하여 PFOS, PFOA 및 관련화합물에 대한 연구가 이들의 공간적인 분포 및 거동특성 평가를 위해 포함되어야 한다. 본 연구에서는 섬진강 수계 퇴적물에서

PFCs의 주요 오염물질인 PFOS 및 PFOA를 비롯한 관련화합물에 대한 검출 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

섬진강 수계의 퇴적물에서 PFCs 농도를 조사하기 위해 섬진강 주요 수계에서 2015년도 1차 시료 채취는 5월말에 7개 지점에 대해, 2차는 10월초에 7개 지점에 대해 시료를 채취하였다. 조사지점 3번 지점은 주암호1, 4번은 주암호조정지(상사호)1, 5번은 보성강 댐1, 8a번은 곡성1, 8b번은 곡성2, 9a번은 구례1, 9b번은 구례2를 나타내며, Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

2.2. 조사대상 물질 선정

조사대상물질은 수중에서와 동일¹⁶⁾ 6종의 PFCAs (perfluorohexanoic acid (PFHxA), perfluorooctanoic acid(PFOA), perfluorononanoic acid (PFNA), perfluorodecanoic acid (PFDA), perfluoroundecanoic acid (PFUnDA), perfluorododecanoic acid(PFDoDA))와 4종의 PFASs (perfluorobutane sulfonate(PFBS), perfluorohexane sulfonate(PFHxS), perfluorooctane sulfonate(PFOS), perfluorodecane sulfonate (PFDS)) 등 10종에 대해 조사하였다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 시약 및 기구

조사대상 PFCs 표준물질인 PFHxA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS 등 10종과 그리고 내부표준물질인 13C4-PFOA, 13C4-PFOS는 모두 Wellington Laboratories Co.(Canada)에서 구입하였다. 퇴적물 중의 PFCs의 추출은 초음파 추출장치를 사용하였다. 시료의 전처리에 사용



Fig. 1. Sampling sites in Sumjin river of Korea.

Table 1. Sampling sites in Sumjin river of Korea

site	name	administrative district	sampling point	GPS(latitude/longitude)
3	Juam lake1	Jeonnam Suncheon	Juam Kwangcheon reservior, Gusan-ri, Juam-myeon, Suncheon-si	35.0782296 / 127.2326002
4	Juam(sangsa lake) 1	Jeonnam Suncheon	Pyeongkang Bridge, Oungryeong-ri, Sangsa-myeon, Suncheon-si	34.9380651 / 127.4566628
5	Boseong river dam1	Jeonnam Boseong	Boseong river dam, Yongsan-ri, Gyeombaek-myeon, Boseong-gun	34.8084951 / 127.1497399
8a	Gokseong1	Jeonnam Gokseong	Abrok camping site, Abrok-ri, Ogok-myeon, Gokseong-gun	35.1920835 / 127.3797179
8b	Gokseong2	Jeonnam Gokseong	Abrok-ri, Ogok-myeon, Gokseong-gun	35.2108679 / 127.3713125
9a	Guryeoi1	Jeonnam Guryeoi	Hansu Bridge, Songjeong-ri, Toji-myeon, Guryeoi-gun	35.1975490 / 127.5694166
9b	Guryeoi2	Jeonnam Guryeoi	Muncheok Bridge, Weoljeon-ri, Muncheok-myeon, Guryeoi-gun	35.1982430 / 127.4744692

하는 방법은 HLB (hydrophilic-lipophilic balanced) 충전물이 채워진 cartridge를 이용한 고상추출법(SPE)을 사용하였고, HLB는 Waters 사의 OASIS® HLB Cartridges(3 cc, 60 mg)를 구입하였다. 추출과 HPLC 이동상으로 사용한 용매인 Methanol(MeOH)은 HPLC grade(J.T. Baker, USA)를 사용하였으며, 이동상의 완충용액으로 사용한 ammonium acetate (Junsei, Japan)는 특급시약을 사용하였고, 증류수는 Milli-Q system을 통과한 3차 증류수를 사용하였다. 그리고 메탄올 용매 추출 후 시료 농축은 초고순도 질소(99.9995%)를 이용하였으며, 분석기기

는 Waters사의 ACQUITY® TQ Detector가 장착된 LC/ESI-MS/MS를 이용하였다¹⁶⁾.

2.3.2. 표준용액 제조

조사대상 PFCs 표준물질(50 mg/L)인 PFHxA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDODA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS는 메탄올(methanol) 및 PP 재질의 용기를 사용하여 500 ng/mL의 표준용액을 조제한 후 -4 °C 이하의 냉장고에 보관하였으며, 사용 시에 각 표준용액 적당량을 취하여 농도에 맞게 메탄올로 희석하여 사용하였다. 내부표준물질로 사용된 동위원소물질

인 13C4-PFOA 및 13C4-PFOS는 -4 °C 이하의 냉장고에 보관하였으며, 사용시에 50 ng/mL이 되도록 메탄올으로 희석하여 사용하였다¹⁶⁾.

2.3.3. 전처리

섬진강 수계 퇴적물에서 채취한 퇴적물 시료병은 미리 메탄올(MeOH)과 초순수로 세척한 500 mL 용량의 PP 재질의 시료병을 사용하였고, 채취한 시료는 시료병에 취한 후 아이스박스에 저장되어 실험실로 운반되었고, 즉시 전처리를 실시하거나 바로 전처리를 할 수 없는 경우에는 분석전까지 4 °C의 냉장고에 보관하였다. 전 실험과정 동안 발생 가능한 오염을 줄이기 위하여 테플론 재질의 실험도구 및 분석물질이 흡착될 가능성이 있는 유리제품을 배제하였다. 퇴적물 시료의 전처리 과정은 1) 퇴적물 시료로부터 PFCs의 추출 과정: 퇴적물 시료 중 약 20 g을 MeOH로 미리 세척한 PP재질의 접시에 담아 상온에서 충분히 풍건 → 풍건한 시료를 균질화하고 약 5 g을 50 mL PP 튜브에 넣음 → 내부표준물질(13C4-PFOS, 13C4-PFOA) 5 ng 첨가 (50 ng/mL, 100 μ L) → 튜브에 MeOH 20 mL를 가하고 손으로 200회 이상 격렬히 진탕 → 초음파추출장치(SUC-D22H)를 이용하여 30분간 추출 → 원심분리기에서 2500 rpm으로 10분간 운전 → 분리된 상층액의 용매를 새로운 50 mL PP 튜브에 옮김 → 남은 퇴적물 시료 튜브에 다시 MeOH 20 mL를 가하고 상기와 동일 조작 → 추출용매를 이전의 추출용매와 합침 2) 시료(PFCs)의 농축과정: 회전식 증발농축기와 초고순도 질소가스(99.999%)로 건조 → PP Tube에 Methanol 1 mL를 넣고 Vortex mixer로 30초간 진탕 → 0.22 μ m syringe filter로 여과 → 여액을 vial에 모음 (분석시료)의 과정을 거친 후 시료의 분석은 수중에서와 동일하게 분석하였다¹⁶⁾.

2.3.4. 분석기기 및 조건

퇴적물에서 PFCs의 분석은 Kiest(Korea Institute of Environmental Science & Technology)에서 확립한 PFCs의 분석법¹⁷⁾ 및 국내외 참고문헌^{3,4,18-20)}을 토대로 효율적으로 분석할 수 있는 최적의 조건을 마련하였다. LC Column은 Thermo Scientific사의 UPLC 전용 컬럼인 BETASIL C18(100 $\times$ 2.1 mm, 5 μ m)을 사용하여 Column의 온도는 30°C가 되도록 유지하였으며, 이동상은 20 mM Ammonium Acetate용액(A)과 메탄올(B)을 사용하여 0.2 mL/min의 속도로 흘려보내 물질을 분리하였으며, 기타 자세한 기기분석 조건은 참고문헌¹⁶⁾과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 시료의 회수율, 검출한계 및 정량한계

오염되지 않은 것으로 추정되는 퇴적물에서 채취한 3개의 시료 각각 8개에 대해서 전처리를 거쳐 표준물질 및 내부표준물질의 농도를 3회 반복 측정하여 그 결과를 분석하며 회수율, 방법검출한계(MDL) 및 정량한계(LOQ)를 구하였다. 퇴적물 시료 각각에 대해 3개에 대해 공시험을 수행한 결과 PFCs는 검출되지 않은 바, 본 연구에 사용된 퇴적물 시료는 PFCs에 오염되지 않은 것으로 판단되었다.

PFCs의 회수율은 PFOA의 경우 97.6~106.0 (평균 103.0)% , PFHxA의 경우 93.7~118.6(평균 107.9)%, PFNA의 경우 92.3~111.4(평균 102.9), PFDA의 경우 87.3~112.1(평균 102.8)%, PFUnDA의 경우 80.7~86.7(평균 83.1)%, PFDoDA의 경우 89.1~112.1(평균 97.8)%, PFOS의 경우 96.6~106.5(평균 102.6)%, PFBS의 경우 97.7~108.6(평균 104.0)%, PFHxS의 경우 94.4~110.6 (평균 101.4)%, PFDS의 경우 90.2~106.8(평균 98.3)%로 시료에 따라 약간의 차이는 있으나 전반적으로 만족할만한 회수율을 보였으며, 전처리에 따른 보정 및 분석을 위해 사용된 내

Table 2. Method detection level(MDL) and Limit of quantification (LOQ) of PFCs

PFCs	Spike conc. (ng/g)	sample A		sample B		sample C	
		MDL	LOQ	MDL	LOQ	MDL	LOQ
PFOA	0.049	0.018	0.060	0.013	0.043	0.027	0.090
PFHxA	0.064	0.020	0.063	0.019	0.064	0.021	0.072
PFNA	0.089	0.053	0.179	0.043	0.150	0.058	0.192
PFDA	0.064	0.009	0.031	0.023	0.075	0.017	0.055
PFUnDA	0.063	0.046	0.154	0.071	0.237	0.057	0.190
PFDoDA	0.070	0.026	0.087	0.024	0.078	0.028	0.092
PFOS	0.065	0.028	0.093	0.033	0.113	0.024	0.075
PFBS	0.065	0.007	0.023	0.018	0.060	0.007	0.026
PFHxS	0.070	0.025	0.085	0.036	0.119	0.006	0.019
PFDS	0.054	0.015	0.052	0.028	0.093	0.016	0.054

부표준물질(surrogate)인 13C4-PFOA의 회수율은 84.8~118.3(평균 105.3)%, 13C4-PFOS의 회수율은 104.5~110.4(평균 107.8)%로 역시 만족할만한 회수율을 보였다.

오염되지 않은 3종류의 퇴적물 시료 각각 8개의 시료에 표준물질의 농도를 첨가하고 전처리과정을 거쳐 기기분석 후 『방법검출한계(MDL) = 표준편차 $\times$ t값』, 『정량한계(LOQ) = 10 $\times$ 표준편차』의 식에 의하여 구하였고, 이를 Table 2에 나타내었다. MDL은 PFOA의 경우 0.013~0.027(평균 0.019) ng/g, PFHxA의 경우 0.019~0.021(평균 0.020) ng/g, PFNA의 경우 0.043~0.058(평균 0.051) ng/g, PFDA의 경우 0.009~0.023(평균 0.016) ng/g, PFUnDA의 경우 0.046~0.071(평균 0.058) ng/g, PFDoDA의 경우 0.024~0.028(평균 0.026) ng/g, PFOS의 경우 0.024~0.033(평균 0.028) ng/g, PFBS의 경우 0.007~0.018(평균 0.011) ng/g, PFHxS의 경우 0.006~0.036(평균 0.022) ng/g, PFDS의 경우 0.015~0.028(평균 0.020) ng/g 이었으며, LOQ는 PFOA의 경우 0.043~0.090(평균 0.064) ng/g, PFHxA의 경우 0.063~0.072(평균 0.066) ng/g, PFNA의 경우 0.150~0.192(평균 0.174) ng/g, PFDA의 경우 0.031~0.075(평균 0.054) ng/g, PFUnDA의 경우 0.154~0.237(평균 0.194) ng/g, PFDoDA의

경우 0.078~0.092(평균 0.086) ng/g, PFOS의 경우 0.075~0.113(평균 0.094) ng/g, PFBS의 경우 0.023~0.060(평균 0.036) ng/g, PFHxS의 경우 0.019~0.119(평균 0.074) ng/g, PFDS의 경우 0.052~0.093(평균 0.066) ng/g 이었다.

3.2. 섬진강 수계 퇴적물의 PFCs 오염도

2015년 5월말과 10월초에 섬진강 수계 7개 지점 (3, 4, 5, 8a, 8b, 9a, 9b번)에서 채취한 1차 및 2차 퇴적물 시료에 대한 PFOS, PFOA 및 관련화합물의 오염도를 Fig.2~Fig.8에 나타내었다. Fig. 2~Fig. 8에 나타난 바와 같이 섬진강 수계의 퇴적물 7개 조사지점에서 PFHxA, PFBS, PFHxS, PFDS 의 4개 항목은 검출한계 미만으로 나타났으나, PFOA, PFOS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA 등의 6개 물질은 지점에 따라 검출되었다.

Fig. 2에서 보여주듯이 2015년 1차 조사에서 PFOA 농도 범위는 0.06~0.12 ng/g.dw(dry weight), 2차 조사에서 0.06~0.13 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 0.06~0.11 ng/g.dw로 나타났다. 7개 조사지점의 지점별 PFOA의 평균 농도는 3번 지점이 0.085 ng/g.dw, 4번 지점 0.09 ng/g.dw, 5번 지점 0.065 ng/g.dw, 8a 지점 0.11 ng/g.dw, 8b 지점 0.085 ng/g.dw, 9a

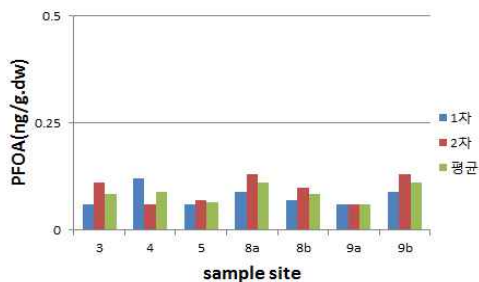


Fig. 2. PFOA concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

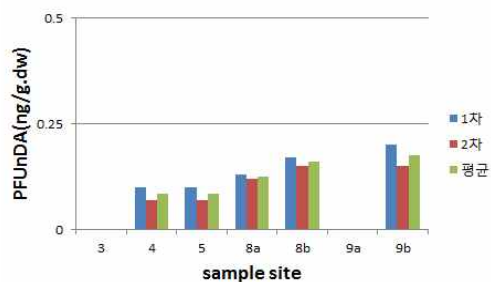


Fig. 6. PFUnDA concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

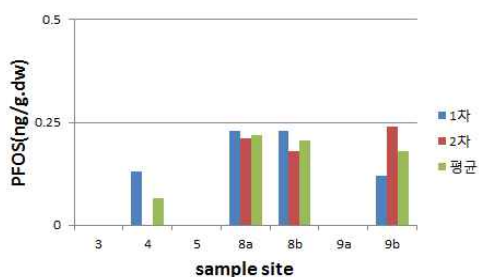


Fig. 3. PFOS concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

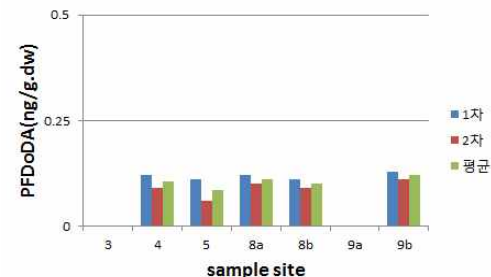


Fig. 7. PFDoDA concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

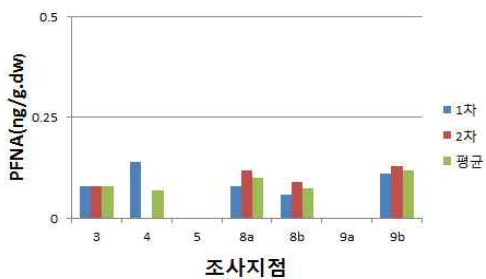


Fig. 4. PFNA concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

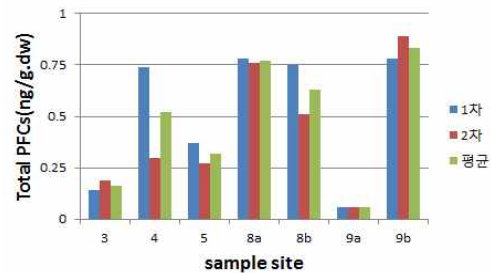


Fig. 8. Total PFCs concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

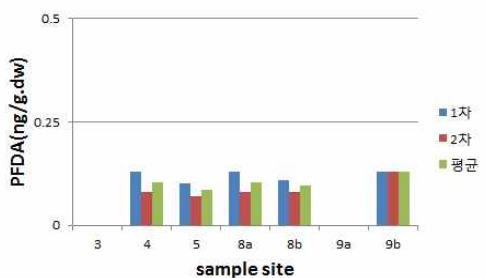


Fig. 5. PFDA concentration in the sediments of Sumjin river in 2015.

지점 0.06 ng/g.dw, 9b 지점 0.11 ng/g.dw으로 8a, 9b 지점이 높게 나타났다.

Fig. 3에서 보여주듯이 PFOS의 1차 조사 농도 범위는 N.D.~0.23 ng/g.dw, 2차 조사에서 N.D.~0.24 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 N.D.~0.22 ng/g.dw으로 나타났다. 7개 조사지점의 지점별 PFOS의 평균농도는 3번 지점이 N.D. ng/g.dw, 4번 지점 0.065 ng/g.dw, 5번 지점 N.D. ng/g.dw, 8a 지점 0.22 ng/g.dw, 8b 지점

0.205 ng/g.dw, 9a 지점 N.D. ng/g.dw, 9b 지점 0.18 ng/g.dw으로 8a, 8b, 9b 지점이 높게 나타났다.

Fig. 4에서 보여주듯이 PFNA 의 1차 조사 농도 범위는 N.D.~0.14 ng/g.dw, 2차 조사에서 N.D.~0.13 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 N.D.~0.12 ng/g.dw으로 나타났으며, 8a와 9b 지점이 각각 0.1 ng/L, 0.12 ng/g.dw로 높은 값을 보였다. Fig. 5에서 보여주듯이 PFDA의 1차 조사 농도 범위는 N.D.~0.13 ng/g.dw, 2차 조사에서 N.D.~0.13 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 N.D.~0.13 ng/g.dw으로 나타났으며, 9b 지점이 각각 0.13 ng/g.dw로 높은 값을 보였다.

Fig. 6에서 보여주듯이 PFUnDA의 1차 조사 농도 범위는 N.D.~0.2 ng/g.dw, 2차 조사에서 N.D.~0.15 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 N.D.~0.175 ng/g.dw으로 나타났으며, 8a와 9b 지점이 각각 0.125 ng/L, 0.175 ng/g.dw로 높게 나타났다. Fig. 7에서 보여주듯이 PFDoDA

의 1차 조사 농도 범위는 N.D.~0.13 ng/g.dw, 2차 조사에서 N.D.~0.11 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 N.D.~0.12 ng/g.dw으로 나타났으며, 8a와 9b 지점이 각각 0.11 ng/L, 0.12 ng/g.dw로 높게 나타났다.

Fig. 8에서 보여주듯이 섬진강 수계에서 2015년 1, 2차 조사결과 퇴적물에서 검출된 총PFCs의 1차 조사 농도 범위는 0.06~0.78 ng/g.dw(dry weight), 2차 조사에서 0.06~0.89 ng/g.dw로 평균 농도 범위는 0.06~0.835 ng/g.dw으로 나타났으며, 3번 지점의 퇴적물에서 검출된 총 PFCs의 평균 농도는 0.165 ng/g.dw, 4번 지점에서 0.52 ng/g.dw, 5번 지점에서 0.32 ng/g.dw, 8a 지점에서 0.77 ng/g.dw, 8b 지점에서 0.63 ng/g.dw, 9a 지점에서 0.06 ng/g.dw, 9b 지점에서 0.835 ng/g.dw로 나타났으며, 9b 지점에서 0.835 ng/g.dw로 가장 높은 값을 보였다.

Table 3. Concentration of PFCs in the lake and river sediments of China and Korea

Location	Conc. (ng/g dw)		
	PFOA (average)	PFOS (average)	기타 PFCs (average)
Sumjin River, Korea	0.06 - 0.13 (0.09)	N.D. - 0.24 (0.10)	PFNA: N.D. - 0.14(0.06), PFDA: N.D. - 0.18(0.07), PFUnDA: N.D. - 0.20(0.09), PFDoDA: N.D. - 0.13(0.07)
4 major river watersheds in Korea ²⁾	N.D. - 0.99 (0.09)	N.D. - 0.74 (0.10)	
6 industrial complex areas in Korea ²⁾	N.D. - 2.07 (0.26)	N.D. - 9.17 (1.61)	
Liao River, China ¹⁸⁾	0.02 - 0.18 (0.08)	0.04 - 0.48 (0.15)	PFNA: 0.01 - 0.07(0.02), PFDA: 0.01 - 0.50(0.10) PFUnDA: 0.01 - 0.03(0.02), PFDoDA: N.D. - 0.04(0.01) PFBS: N.D. - 0.13(0.06), PFHxS: N.D. - 0.10(0.04)
Taihu Lake, China ¹⁸⁾	N.D. - 0.52 (0.16)	0.06 - 0.31 (0.15)	PFNA: 0.01 - 0.07(0.02), PFDA: 0.01 - 0.50(0.10) PFUnDA: 0.01 - 0.03(0.02), PFDoDA: N.D. - 0.04(0.01) PFBS: N.D. - 0.13(0.06), PFHxS: N.D. - 0.10(0.04)
Haihe River, China ¹⁹⁾	0.9 - 3.7 (1.8)	1.8 - 7.3 (5.2)	PFHxA: 0.6 - 3.2(1.7)
Dagu Drainage Canal, China ¹⁹⁾	0.27 - 1.7 (0.89)	0.09 - 2.3 (0.67)	PFHxA: 0.13 - 3.5(1.5)

3.3. 국내외 수계 퇴적물의 PFCs 오염도와 비교

국내외의 수계의 퇴적물에서 PFOA, PFOS 및 관련화합물의 오염도에 대해 조사된 자료를 Table 3에 나타내었다. 국외의 수계에서 수행된 PFOA, PFOS 및 관련화합물의 연구에서 중국 Liao강, Taihu호, Haihe강, Dagube수운하¹⁸⁻¹⁹⁾에서 PFOS 0.04~7.3 ng/g dw, PFOA N.D.~1.7 ng/g dw으로 본 연구의 섬진강 수계 퇴적물은 이 들 지역의 수계 퇴적물 보다는 다소 낮은 농도를 보였다. 국내 4대강 유역의 PFOS N.D.~0.74(평균 0.10) ng/g dw, PFOA N.D.~0.99(평균 0.09) ng/g dw 과는 평균 농도는 유사하였으며, 국내 6개 산업단지 수계의 퇴적물의 PFOS N.D.~9.17(평균 1.61) ng/g dw, PFOA N.D.~2.07(평균 0.26) ng/g dw 보다는 매우 낮은 농도를 보임을 알 수 있었다.

PFCs의 거동을 파악하기 위해서는 수계 외에 퇴적물에서의 PFCs의 오염도를 측정해야 하지만 이는 생물체에게도 축적되어 커다란 위해를 끼칠 수 있으므로 향후에는 생물체에 대한 독성 및 거동을 파악하기 위해 생물체에 대한 오염도도 함께 검토하여야 할 것이다.

4. 결 론

섬진강 수계 퇴적물에서 2015년도 과불화합물(PFCs)의 검출 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 오염되지 않은 퇴적물에서 10 종류 PFCs의 회수율은 80.7~118.6(평균 100.4)%의 범위를 보였으며, MDL은 0.006~0.071 ng/g dw, LOQ는 0.019~0.192 ng/g dw로 나타났다.
- 2) 섬진강 수계 퇴적물에서 2015년 동안 10개의 PFCs 화합물 중 PFHxA, PFBS, PFHxS, PFDS의 4개 항목은 검출한계

미만으로 나타났으나, PFOA, PFOS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA 등의 6개 물질은 지점에 따라 검출되었다.

- 3) PFOA의 경우 2015년도에 모든 지점에서 검출되었으며, 지점별 평균농도 범위는 0.06~0.11 ng/g dw으로 나타났으며, PFOS의 경우 지점별 평균 농도 범위는 N.D.~0.22 ng/g dw로 다소 높은 농도를 보였다.
- 4) 섬진강 수계 퇴적물에서 2015년도에 검출된 총 PFCs의 평균 농도 범위는 0.06~0.835 ng/g dw으로 나타났으며, 9a 지점이 0.06 ng/g dw로 가장 낮았으며, 9b 지점에서 0.835 ng/g dw로 가장 높은 값을 보였다.

사 사

본 연구과제는 환경부지정 전남녹색환경지원센터의 연구비지원에 의해 수행된 연구과제입니다.

References

1. 전라남도(2010), 전라남도 섬진강수계 제2단계 오염총량관리 기본계획.
2. Kim, S. K.(2008), Environmental distribution and fate of perfluorinated compounds (PFCs) as emerging POPs: physico-chemical properties, emission, contamination level, inter-phase distribution and long-range transport, J. Environ. Toxicol., 23(3), pp. 143-164.
3. Cho, C. R., Eom, I. C., Kim, E. J., Kim, S. J., Choi, K., Cho, H. S., and Yoon, J.(2009), Evaluation of the level of PFOS and PFOA in environmental media from industrial area and four major river basin, J. Kor. Soc.

- Environ. Anal., 12(4), pp. 296-306.
4. Park, J. E, Kim, S. K., Oh, J. K., Ahn, S. Y., Lee, M. N., Cho, C. R., and Kim, K. S.(2012), Study on concentrations and mass flows of perfluorinated compounds (PFCs) in a wastewater treatment plant, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 34(5), pp. 326-334.
5. Shin, M. Y., Im, J. K., Kho, Y. L., Choi, K. S., and Zoh, K. D.(2009), Quantitative determination of PFOA and PFOS in the effluent of sewage treatment plants and in Han River, J. Environ. Health Sci., 35(4), pp. 334-342.
6. Kudo, N., and Kawashima, Y.(2003), Toxicity and toxicokinetics of perfluorooctanoic acid in humans and animals, J. Toxicol. Sci., 28(2), pp. 49-57.
7. Kissa, E.(1994), Fluorinated Surfactants: Synthesis, Properties, and Applications, Marcel Dekker, New York.
8. Giesy, J. P., and Kannan, K.(2001), Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife, Environ. Sci. Technol., 35, pp. 1339-1342.
9. Kannan, K., Tao, L., Sincliar, E., Pastva, S. D., Jude, D. J., and Giesy, J. P.(2005), Perfluorinated compounds in aquatic organisms at various trophic levels in a great lakes food chain, Arch. Environ. Contam. Toxicol., 48, pp. 559-566.
10. Lau, C., Butenhoff, J. L., and Rogers, J. M.(2004), The developmental toxicity of perfluoroalkyl acids and their derivatives, Toxicol. Appl. Pharmacol., 198, pp. 231-241.
11. Hekster, F., Laane, R., and de Voogt, P.(2003), Environmental and toxicity effects of perfluoroalkylated substances, Rev. Environ. Contam. Toxicol., 179, pp. 99-121.
12. Kennedy, G. L., Butenhoff, J. L., Olsen, G. W., O'Connor, J. C., Seacat, A. M., and Perkins, R. G.(2004), The toxicology of perfluorooctanoate, Crit. Rev. Toxicol., 34, pp. 351-384.
13. Kannan, K., Giesy, J. P., Rostkowski, P., Yamashita, N., So, M. K., Taniyasu, S., Lam, P.K. S., Falandysz, J., Lee, K. T., Kim, S. K., Khim, J. S., Im, S. H., Newsted, J. L., and Jones, P. D.(2006), Perfluorinated compounds in streams of the Shihwa industrial zone and Lake Shihwa, South Korea, Environ. Sci. Technol., 25, pp. 2374-2380 .
14. Son, H. J., Hwang, Y. D., Yoom, H. S., Choi, J. T., and Kwon, K. W.(2013), Detection of perfluorinated compounds (PFCs) in Nakdong River basin, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 35(2), pp. 84-93.
15. 환경부(2013), 잔류성유기오염물질 측정망 설치·운영 계획 개정, 환경부고시 제 2013-14호.
16. Paik, B. C., Kim, T. R., and Kam, S. K.(2014), Distribution of Perfluorinated Compounds (PFCs) in Sumjin river and southern coastal area of Korea, J. of KSUE, 14, pp. 87-99.
17. Kiest(2008), Manual for Analysis and Degradability Estimation of Perfluorinated Chemicals, 83 p.
18. Yang, L., Zhu, L., Liu, Z. (2011), Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China, Chemosphere, 83, pp. 806-814.
19. Li, F., Sun, H., Hao, Z., He, N., Zhao, L., Zhang, T., Sun, T. (2011), Perfluorinated compounds in Haihe River and Dagou Drainage Canal in Tainjin, China, Chemosphere, 84, pp. 265-271.
20. Gomez, C., Vicente, J., Echavarri-Erasun, B., Porte, C., Lacorte, S. (2011), Occurrence

of perfluorinated compounds in water, sediment and mussels from the Cantabrian Sea(North Spain), Mar. Pollut. Bull., 62, pp. 948-955.