

ORIGINAL ARTICLE

제주도 쓰레기매립장 침출수 중 과불화화합물의 검출 특성

백병천 · 감상규^{1)*}

전남대학교 환경시스템공학과, ¹⁾제주대학교 환경공학과

Characteristics of Perfluorinated Compounds Detected in Landfill Leachates on Jeju Island

Byeong Cheon Paik, Sang-Kyu Kam^{1)*}

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

Raw leachates from three landfills and treated leachates from two landfills on Jeju Island were analyzed for ten perfluorinated compounds (PFCs) detected in aquatic environments. The leachates were collected six times in 2014 and 2015. Among the ten PFCs, three were not detected, namely perfluoroundecanoic acid (PFUnDA), perfluorododecanoic acid (PFDoDA), and perfluorodecane sulfonate (PFDS). The total concentrations of PFCs ranged as 724-3313 ng/L (mean 1999 ng/L) in raw leachates and from less than the limit of quantification (LOQ) to 394 ng/L (mean 133.2 ng/L) in treated leachates. The dominant compounds measured were perfluorooctanoic acid (PFOA) (mean contribution 37.7%) and perfluorobutane sulfonate (PFBS) (mean contribution 38.2%) in raw leachates, and PFOA (mean contribution 40.7%), perfluorohexanoic acid (PFHxA) (mean contribution 27.3%) and PFBS (mean contribution 26.5%) in treated leachates. No significant correlations were observed between total/several individual PFCs and leachate pH and COD_{Cr}, which may be due to complex chemical nature of landfill leachates and characteristics of waste and landfills.

Key words : Perfluorinated compounds (PFCs), Landfill leachate, PFOA, PFBS, Jeju Island

1. 서론

매립은 수명이 다한 소비자 제품에 대한 가장 일반적인 처리방안이고(Renou et al., 2008), 이러한 다양한 고형폐기물이 매립되는 쓰레기매립장에는 다양한 오염물질을 함유하는 침출수가 발생함으로 환경적인 문제, 야생생물 및 인간의 건강 문제를 유발할 수 있는 광범위한 화학물의 오염원이 될 수 있다(Eggen et al., 2010). 매립

장 침출수에 관한 일반적인 연구는 주로 COD, BOD, 영양염류, 중금속 등과 같은 항목으로 평가하였고, 1990년대 이후로 페놀 화합물, 염화 방향족화합물, 다환방향족 화합물(PAHs) 등과 같은 유기 화합물이 포함되었으며(Oman and Hynning, 1993; Welandar, 1997), 최근에는 과불화화합물(perfluorinated compounds, PFCs)과 같은 새로운 화합물이 평가대상으로 대두되기 시작하였고, 다양한 환경매질(Schultz et al., 2006; Sinclair and

Received 2 July, 2021; Revised 21 July, 2021;

Accepted 22 July, 2021

*Corresponding author: Sang-Kyu Kam, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3444
E-mail : sakyukam@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kannan, 2006) 및 생물체(Kannan et al., 2002; Martin et al., 2004)에서 검출되고 있다.

PFCs는 기능기에 있는 수소를 제외하고 탄소에 결합되어 있는 모든 수소가 불소로 치환된 한 개 이상의 과불화알킬 잔기(C_nF_{2n+1})를 갖고 있는 다양한 그룹의 지방족 화합물로(Hamid et al., 2018), 기능기에 따라 카르복실산이 붙어 있는 perfluoro carboxylic acids (PFCAs)와 술폰산기가 붙어 있는 perfluoroalkane sulfonates (PFASs)로 구분되며, 전구물질로는 fluorotelomer alcohols (FTOHs), perfluorooctyl sulfonamides (PFOSAs), perfluorooctyl sulfonamidoethanols (PFOSEs), perfluorooctyl sulfonamidoacetic acids (PFOSAAs) 등이 있다(Kim, 2008; Park et al., 2012). PFCs는 소수성과 소유성, 높은 열적 및 화학적 안정성, 표면장력 감소능 및 안정한 거품 생성능 등의 독특한 성질 때문에 1950년대 이후에 무수한 소비자 제품(세정제, 카펫, 직물, 종이코팅, 화장품, 소방용 거품 그리고 포장용 식품용기 등) 및 산업용도(금속도금, 소방용 거품, 전자제품 생산, 사진술 등)에 광범위하게 사용된 중요한 산업적 유기화합물(Hekster et al., 2003; Paul et al., 2008), 매립장 침출수에 관한 일부 보고는 이들 물질이 PFCs의 중요한 오염원이라고 제시하고 있다(Busch et al., 2010).

PFCs는 비교적 높은 소수성을 갖는 지속성 있는 유기오염물질과는 달리 대부분이 수계에서도 발견되어지는 데(Schultz et al., 2006), 이는 발생하는 쓰레기매립장 침출수가 대부분 자체 처리하지 않고 하수처리장으로 유입되고 여기에서 주로 적용되는 생물학적처리기술에 의해 제거되지 않아 이를 제거하기 위한 효과적인 처리기술이 필요하다는 것을 의미한다. 이들 화합물은 지속성, 생물축적성 그리고 인간 및 생물체에 대한 독성 때문에 많은 관심을 받고 있으며(Houde et al., 2011), 이 중 perfluorooctane sulfonate (PFOS)는 2009년 스톡홀름 회의에서 POPs (persistent organic pollutants)로 등록되어(UNEP, 2009) PFOS 및 이의 전구물질 및 관련 화합물의 생산과 사용을 금지하였고, perfluoro-octanoic acid (PFOA)는 여전히 POPs 심의위원회에서 심의중에 있다(Stockholm Convention, 2017).

다양한 용도로 사용되고 있는 PFCs 함유 소비자제품 등이 쓰레기매립장에 매립되면 생물학적 및 무생물의 작

용에 의해 이들 물질로부터 PFCs가 침출수 증으로 유리되고(Allred et al., 2015), 유리된 이들 침출수는 대부분 차집되어 하수처리장으로 운반되어 지표수로 방류 전 처리되거나 대부분의 하수처리장은 이들 오염물질을 제거하기 위한 처리시설이 구비되지 않아 수계에서 PFCs의 2차오염원으로 작용하고 있다고 보고되고 있다(Eggen et al., 2010; Allred et al., 2015). 쓰레기매립장에서 PFCs 함유 고형폐기물이 매립되어 왔고 계속해서 매립되면 장기간 점오염원으로서 침출수 중 PFCs를 연구하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 제주도내 쓰레기매립장에서 발생하는 침출수에 대해 자체 처리하지 않고 하수처리장으로 유입하는 침출수 원수와 자체 처리하는 침출수 처리수에 대해 수환경 중 주로 검출하는 것으로 보고되고 있는 10종의 PFCs를 대상으로 검출 현황과 물질별 검출 특성을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료 채취

제주도내 쓰레기매립장내에서 발생하는 침출수 중 PFCs의 검출특성을 조사하기 위해 사용된 5곳의 매립장 및 채수한 시료형태에 관한 정보를 Table 1에 나타내었다. 3곳의 매립장(HL, WL, EL)은 제주시에 있는 쓰레기매립장으로 시료는 발생하는 침출수 원수를 채수하였으며, 2곳의 매립장(SL, PL)은 서귀포시에 있는 매립장으로 시료는 발생하는 침출수를 자체 처리한 처리수를 채수하였다. 매립장의 침출수 특성을 살펴보면(JSSGP, 2014), 매립장 HL은 제주시의 H 쓰레기매립장으로 침출수 일일 발생량은 $379.4 \text{ m}^3/\text{d}$ 이며, 발생하는 침출수는 전용관로를 통해 J 하수처리장으로 이송되어 처리되며, 매립장 WL은 제주시의 W 쓰레기매립장으로 침출수 일일 발생량은 $6.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 이며, 침출수는 역시 전용관로를 통해 W 하수처리장으로 이송되어 처리된다. 매립장 EL은 제주시의 E 쓰레기매립장으로 침출수 일일 발생량은 $6.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 이며 침출수는 수거하여 차량으로 J 하수처리장으로 운반되어 처리된다. 매립장 SL은 서귀포시의 S 쓰레기매립장으로 일일 발생량은 $5.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 이며, 발생하는 침출수를 생물학적 처리, 화학응집 및 모래 및 활성탄 여과 작용에 의해 자체 처리한 후 전용관로를 통해 서귀포시의

Table 1. Landfill sites and sample types surveyed for characteristics of perfluorinated compounds (PFCs) detected in landfill leachates on Jeju Island (JSSGP, 2014)

Landfill site	Location	Amounts of leachates generated (m ³ /d)	Sample type collected	Remarks
HL	H landfill in Jeju City	379.4	Raw leachate	Raw leachate is transferred to J WWTP (wastewater treatment plant) through a dedicated pipeline
WL	W landfill in Jeju City	6.3	Raw leachate	Raw leachate is transferred to W WWTP through a dedicated pipeline
EL	E landfill in Jeju City	6.8	Raw leachate	Raw leachate is transported to J WWTP by a vehicle after being collected
SL	S landfill in Seogwipo City	5.0	Water treated from raw leachate by the methods of biological, chemical flocculation, and soil and activated carbon filtration	Treated water is transferred to S WWTP through a dedicated pipeline
PL	P landfill in Seogwipo City	2.0	Treated water from leachate by GOS method	Treated water is self-sprayed to landfill

S 하수처리장으로 이송되어 처리되며, 매립장 PL은 서귀포시의 P 쓰레기매립장으로 일일 발생량은 2.0 m³/d으로, 침출수를 GOS (Groon Oxidation System) 공법으로 처리하여 처리수는 매립장으로 자체 살포된다.

이들 5곳 매립장 침출수 시료는 2014년 및 2015년 각각 5월, 8월 및 10월 등 총 6회에 걸쳐 채수하였다. 모든 시료는 PFCs의 유리흡착특성을 배제하기 위하여 methanol (MeOH)과 초순수로 세척한 폴리프로필렌 (polypropylene, PP) 재질의 시료병을 사용하였으며 시료로 3회 이상 시료병을 세척한 후 시료병에 취한 후 아이스박스에 저장되어 실험실로 운반되었고, 즉시 전처리를 실시하거나 바로 전처리를 할 수 없는 경우에는 분석 전까지 4℃의 냉장고에 보관하였다.

2.2. 조사대상 물질 및 재료

조사대상물질로 환경 중 일반적으로 검출되고 있는 PFOS 및 PFOA 외에 문헌을 통해 수계에서 검출되고 있는 perfluorohexanoic acid (PFHxA), perfluorononanoic acid (PFNA), perfluorodecanoic acid (PFDA), perfluoroundecanoic acid (PFUnDA), perfluorododecanoic acid (PFDoDA), perfluorobutane sulfonate (PFBS), perfluorohexane sulfonate (PFHxS), perfluorodecane

sulfonate (PFDS) 등 10종의 PFCs를 선정하였으며 (Paik et al., 2014; Kam et al., 2016), 이들 10종의 표준물질과 내부 표준물질인 ¹³C₄-PFOA 및 ¹³C₄-PFOS은 모두 50 mg/L으로 조제되어 판매하고 있는 Wellington Laboratories Co. (Canada)에서 구입하였고, 사용 전 -4℃ 이하의 냉장고에 보관하였으며, 사용시 이들 표준물질 및 내부 표준물질은 MeOH (HPLC grade, J.T. Baker, USA)를 사용하여 각각 1~100 ng/mL 및 50 ng/mL으로 희석하였다. 그리고 PFCs의 분석시 이동상의 완충용액으로 사용하는 ammonium acetate (Junsei, Japan)는 특급시약을 사용하였고, 증류수는 Milli-Q system을 통과한 3차 증류수를 사용하였다.

2.3. 시료의 전처리

채수한 시료 중 PFCs의 전처리 및 분석은 Kiest (Korea Institute of Environmental Science & Technology, 2008) 및 국내의 문헌(Cho et al., 2009; Kunacheva et al., 2011; Yang et al., 2011)을 참고로 하여 수행하였다. 전 실험과정 동안 발생 가능한 오염을 줄이기 위하여 테플론 재질의 실험도구 및 분석물질이 흡착될 가능성이 있는 유리제품을 배제하였고, PP재질의 도구를 사용하였다.

시료의 전처리 과정은 이전의 보고(Paik et al., 2014; Kam et al., 2016)에 자세히 기술되어 있으며, 수 중 시료로부터 PFCs의 추출, 시료(PFCs)의 용리 및 농축 방법의 순으로 수행하였고 이를 살펴 보면 다음과 같다. 채수한 시료는 잘 혼합하여 정치 및 유리섬유여지로 여과한 시료 200 mL에 내부표준물질($^{13}\text{C}_4\text{-PFOS}$, $^{13}\text{C}_4\text{-PFOA}$) 5 ng을 첨가하고, 이를 MeOH 6 mL, 초순수 6 mL를 흘려 활성화한 HLB cartridge (Waters OASIS® HLB 3 cc, 60 mg, USA)에 HLB cartridge adaptor로 통해 연결하고 시료를 Vacuum Manifold (Supelco Visiprep 57044, USA)로 1초당 1방울의 속도로 포집한 후 40% MeOH 3 mL, 초순수 3 mL을 흘려 방해물질을 제거하였으며 압력을 증가하여 HLB cartridge 내의 수분을 완전히 제거하였다. HLB cartridge에 포집된 PFCs를 100% MeOH 4 mL로 2회 용리하여 15 mL PP tube에 모은 후 초고순수 질소 가스(99.999%)를 이용하여 건조시켰고, 여기에 MeOH 1 mL를 가하여 Vortex Mixer (Times Lab VM-10, Korea)로 혼화하고 0.22 μm nylon syringe filter로 여과하여 이를 LC용 vial에 가하여 분석시료로 하였다.

2.4. 시료 중 PFCs의 분석

시료 중 PFCs는 시료 자동주입기(Acquity Sample Manager, Waters, USA), UPLC (Acquity Binary Solvent Manager, Waters, USA)와 질량분석기(ACQUITY TQ Detector, Waters, USA)가 연결된 Waters사의 LC-MS/MS를 사용하였고, 이온화방식(electrospray ionization)은 음이온모드에서 각 물질별 선구이온(precursor ion)을 선택하여 생성이온(product ion)을 생성시킨 후 특성이온을 선택하는 MRM (Multiple Reaction Monitoring) 방법을 사용하여 분석하였으며, 시료의 정량은 시료에 내부표준물질($^{13}\text{C}_4\text{-PFOS}$, $^{13}\text{C}_4\text{-PFOA}$)를 첨가하여 이의 회수율을 이용하는 내부표준법으로 하였다. LC Column은 Thermo Scientific사의 UPLC 전용컬럼인 BETASIL C18 (100×2.1 mm, 5 μm)을 사용하여 칼럼의 온도는 30°C가 되도록 유지하였으며, 이동상은 20 mM ammonium acetate용액(A)과 MeOH (B)를 사용하여 0.2 mL/min의 속도로 흘려보내 기울기 용리로 각 물질을 분리하였으며, 기타 자세한 기기분석 조건, 분석조건에서 얻어진 PFCs의 크로마토그램과 각 물질별 생성이온 스펙트럼

은 이전의 보고(Paik et al., 2014)에 자세히 기술되어 있다.

본 연구 대상 PFCs의 표준용액(1 ~ 100 ng/mL)에 대해 내부표준물질을 첨가하여 LC/ESI-MS/MS로 분석하여 얻어진 자료를 내부표준법을 이용하여 검량선을 작성한 결과, 모든 PFCs의 결정계수(r^2)는 0.99 이상의 양호한 값을 보였고, 정제수 500 mL에 PFCs 표준용액을 첨가하여 200 pg/mL가 되도록 한 후 전처리를 거쳐 표준물질의 농도를 3회 반복 측정하여 구한 회수율은 PFBS 평균 62.2%를 제외하고 나머지 PFCs에 대해 평균 87.7 ~ 106.4%의 값으로 매우 높은 결과를 나타내었다. PFBS의 낮은 회수율은 탄소수의 감소로 인한 비극성도가 감소하여 HLB cartridge의 세척단계에서 손실에 기인한 것으로 판단된다. 정제수의 9개의 시료에 PFCs의 표준물질의 농도를 점차적으로 낮춰 전처리과정을 거쳐 구한 방법검출한계(MDL) 및 정량한계(LOQ)은 각각 0.4 ~ 1.9 pg/mL, 1.5 ~ 6.5 pg/mL 이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 매립장 침출수 및 처리수의 일반 수질 현황

본 연구에서 채수된 쓰레기매립장 침출수 원수 및 처리수에 대해 2014년 같은 시기의 쓰레기매립장 침출수 시료의 주요 일반 오염물질의 현황(JSSGP, 2014)을 정리하여 Table 2에 나타내었다. pH는 침출수 원수 및 처리수에 대해 각각 7.3 ~ 8.3(평균 7.8), 7.2 ~ 9.1(평균 7.8)로 약알카리성을 나타내었으며, 유기물 오염의 지표로 이용되는 COD_{Cr} 은 침출수 원수 및 처리수에 대해 각각 1231 ~ 2564(평균 1772) mg/L, 9.2 ~ 451(평균 102.5) mg/L, BOD는 각각 216 ~ 720(평균 378) mg/L, 0.5 ~ 72.0(평균 14.1) mg/L 으로 침출수 원수는 평균농도로 처리수에 비해 COD_{Cr} 은 17.3배, BOD는 26.8배 높은 농도로 함유하고 있었고, BOD/ COD_{Cr} 은 전체적으로 0.03 ~ 0.58(평균 0.18)로 침출수 원수 및 처리수는 본 연구대상 화합물인 PFCs를 포함한 대부분 생물학적으로 처리하기 어려운 난분해성 유기물로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 그리고 색도는 침출수 원수 및 처리수에 대해 각각 908 ~ 1880(평균 1369)도, 3.6 ~ 288(평균 66)도로 침출수 원수는 처리수에 비해 약 21배 높은 색깔을 보임을 알 수 있었다. 부유물질(SS)은 침출수 원수

Table 2. Summary of water quality of landfill leachates surveyed in this study (JSSGP, 2014)

Landfill site	Water quality: range (mean)					
	pH	COD _{Cr} (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD/ COD _{Cr}	Chromaticity (Degree)	SS (mg/L)
HL	7.5~8.3 (7.9)	1429~2041 (1641)	298~494 (374)	0.15~0.35 (0.24)	908~1108 (1025)	22~63 (41)
WL	7.3~7.8 (7.5)	1231~1633 (1410)	216~720 (408)	0.13~0.58 (0.31)	1208~1604 (1384)	26~310 (127)
EL	7.7~8.3 (8.0)	2041~2564 (2266)	247~525 (353)	0.10~0.24 (0.16)	1460~1880 (1699)	36~46 (41)
SL	7.2~7.7 (7.4)	35~451 (188)	4.6~72.0 (27.4)	0.06~0.16 (0.13)	23~288 (123)	4.6~34.0 (15.1)
PL	7.8~9.1 (8.2)	9.2~25.6 (17.0)	0.5~0.9 (0.7)	0.03~0.08 (0.05)	3.6~13.0 (9.1)	0.3~0.8 (0.5)

및 처리수에 대해 각각 22 ~ 310(평균 70) mg/L, 0.3 ~ 34(평균 7.8) mg/L로 약 9배 높은 농도를 함유하고 있었다.

3.2. 매립장 침출수 및 처리수 중의 PFCs의 총 농도

본 연구의 쓰레기매립장 침출수 원수를 채수한 3곳의 쓰레기매립장(HL, WL, EL)과 쓰레기매립장 침출수 처리수를 채수한 2곳의 쓰레기매립장(SL, PL) 등 5개의 쓰레기매립장에 대해 2014년 및 2015년 2년동안 총 6회 채수한 시료에 대해 상기 2.2.에서 제시한 10가지 PFCs 항목에 대해 분석하였고, 그 중 각 매립장의 침출수에 대해 총 PFCAs 농도(Σ PFCAs)의 평균농도, 총 PFASs 농도(Σ PFASs)의 평균농도, Σ PFCAs의 평균농도와 Σ PFASs의 평균농도의 합으로 나타낸 총 PFCs 농도(Σ PFCs)의 평균농도를 Fig. 1에 나타내었다.

모든 시료 중에 10개의 PFCs 항목 중 3가지 항목(PFUnDA, PFDODA, PFDS)를 제외한 7가지 항목이 검출되었다. 침출수 원수를 분석한 3곳(HL, WL, EL)의 매립장의 Σ PFCs는 각각 724 ~ 1119(평균 878) ng/L, 1164 ~ 2571(평균 1945) ng/L, 2742 ~ 3313(평균 2933) ng/L이었고, 침출수 처리수를 분석한 2곳(SL, PL)의 매립장의 Σ PFCs는 각각 20 ~ 394(평균 234) ng/L, <LOQ ~ 88.3(평균 32.4) ng/L로 침출수 원수의 Σ PFCs의 평균농도는 침출수 처리수에 비해 약 14배 높은 농도로 검출되었다. 매립장 침출수 처리수는 침출수 원수와 동일한 매립장에서 채수하지 않았고 매립장의 연

도, 매립장 폐기물의 특성 및 침출수 발생량이 달라 침출수 원수와 처리수를 비교하기에는 다소 어렵지만 본 연구의 침출수 처리수는 원수에 비해 매우 낮은 농도를 보였으며, 침출수 처리수 중에도 GOS 공법으로 처리한 PL 매립장의 처리수는 생물학적 처리, 화학응집 및 모래 및 활성탄 여과작용을 거친 SL 매립장의 처리수의 약 0.14 배 농도를 보임을 알 수 있었다. 이는 침출수 중 PFCs의 처리공정에 따라 다양한 처리효율을 보임을 예측할 수 있다. 매립장 침출수 원수에 대해 RO (Reverse Osmosis) 법, NF (nanofiltration)법, 활성탄 흡착법, WAO (Wet Air Oxidation)법, 생물학적 처리법 등 다양한 처리공정을 비교한 Busch et al.(2010)에 의하면, PFCs의 처리효율은 RO법 > NF법 > 활성탄 흡착법의 순이었고, WAO 법 및 생물학적 처리법은 PFCs의 처리에 비효율적이라고 보고하였다. 즉, 막기반 여과처리법인 RO법과 NF법은 PFCs의 처리에 효과적이며, 세공의 크기가 더 작은 RO법은 NF법보다 효과적이며, 오염물질의 활성탄 흡착에 기인하는 활성탄 흡착법은 PFCs의 농도 및 질량흐름에 따라 68 ~ 99%의 처리효율을 보였다고 보고하고 있으며, OH 라디칼을 발생시키는 오존에 의한 WAO법과 생물학적 처리법은 처리 후 원수의 농도와 변화가 없거나 오히려 증가하였는데 이는 이들 처리법에 의해서는 PFCs의 분해가 어렵거나(Silva et al., 2004; Schultz et al., 2006) 전구물질의 PFCs로의 분해에 의한 것으로 (Rhoads et al., 2008) 보고되고 있다.

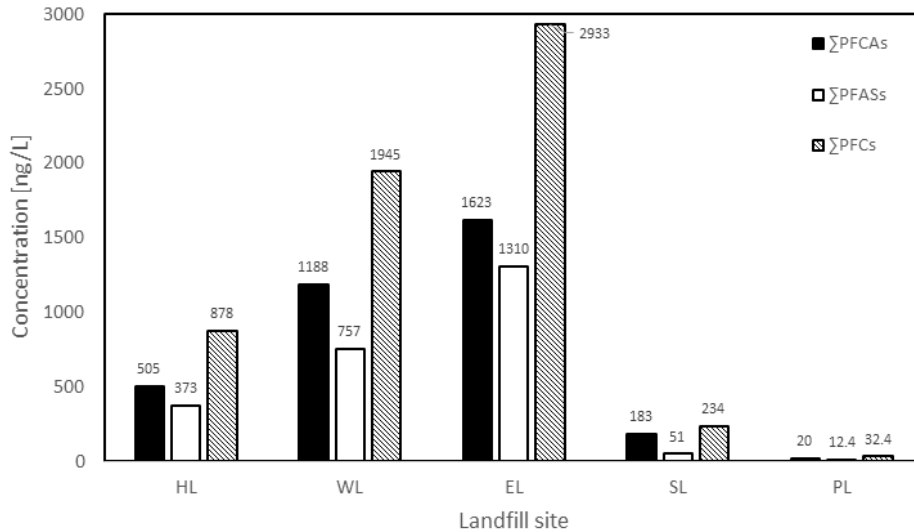


Fig. 1. Mean concentrations of Σ PFCAs, Σ PFASs, and Σ PFCs in raw (HL, WL, and EL) and treated (SL and PL) leachates from different landfill sites surveyed in this study.

Σ PFCs를 Σ PFCAs와 Σ PFASs로 구분하여 비교해 보면, HL은 각각 303 ~ 615(평균 505) ng/L, 187 ~ 552(평균 373) ng/L, WL은 각각 547 ~ 1783(평균 1188) ng/L, 396 ~ 1060(평균 757) ng/L, EL은 각각 1221 ~ 1927(평균 1623) ng/L, 1030 ~ 1638(평균 1310) ng/L, SL은 각각 14 ~ 318(평균 183) ng/L, 6 ~ 84(평균 51) ng/L, PL은 각각 <LOQ ~ 52(평균 20) ng/L, <LOQ ~ 36.3(평균 12.4) ng/L로, 평균농도로 비교하여 Σ PFCAs는 Σ PFASs보다 침출수 원수는 1.24 ~ 1.65배, 침출수 처리수는 1.61 ~ 3.59배 높은 농도를 보임을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 덴마크(Bossi et al., 2008), 독일(Busch et al., 2010), 미국(Huset et al., 2011) 및 북스페인(Fuertes et al., 2017)에서 PFCs의 결과와 일치하고 있다.

본 연구의 3곳 매립장의 침출수 원수의 Σ PFCs [724 ~ 3313(평균 1919) ng/L] 및 처리수의 Σ PFCs[<LOQ ~ 394(평균 133.2) ng/L]를 외국의 매립장 침출수 원수 및 처리수와 비교하였다. 본 연구의 침출수 원수의 Σ PFCs의 농도는 Yan et al.(2015)에 의한 중국 5개 도시의 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs[7280 ~ 292,000(평균 82,100) ng/L], Eggen et al.(2010)에 의한 노르웨이 2곳 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs[2191 ~ 6123(평균

4157) ng/L], Gallen et al.(2017)에 의한 호주의 운영중인 6곳 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs의 평균농도 5254 ng/L, Huset et al.(2011)에 의한 미국 6곳 지역 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs[2253 ~ 6157(평균 3884) ng/L], Allred et al.(2014)에 의한 미국 6곳 지역 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs[614 ~ 25640(평균 8352) ng/L], Busch et al.(2010)에 의한 6곳 매립장 침출수 원수의 Σ PFCs [31 ~ 12922(평균 6086) ng/L]와 평균농도로 0.02 ~ 0.49배 낮은 농도로 검출되었으나 Fuertes et al.(2017)에 의한 북스페인의 4곳 침출수 원수의 Σ PFCs[639 ~ 1379(평균 1082) ng/L] 보다는 1.77배 높은 농도를 보였다. 본 연구의 침출수 처리수의 Σ PFCs는 Yan et al.(2015)에 의한 중국 5개 도시의 매립장 침출수를 MBR/RO처리 최종 방류수의 Σ PFCs(98.4 ~ 190 ng/L)와 유사하나 MBR/UF(ultrafiltration) 방류수의 Σ PFCs (2130 ~ 79,000 ng/L), Woldegiorgis et al.(2006)에 의한 스웨덴 4곳 매립장 침출수 처리수의 Σ PFCs(평균 2088 ng/L), Busch et al.(2010)에 의한 20곳 매립장 침출수 처리수의 Σ PFCs[4 ~ 8059(평균 1335) ng/L], Fuertes et al.(2017)에 의한 북스페인의 2곳 침출수 침출수의 Σ PFCs[856 ~ 3162(평균 2009) ng/L]보다는 처리수의 Σ PFCs의 농도가 매우 낮음을 알 수 있었다.

Table 3. Individual concentration of PFCs in raw (HL, WL, and EL) and treated (SL and PL) leachates from different landfill sites surveyed in this study

Landfill site	PFCs (ng/L) : range (mean)						
	PFHxA	PFOA	PFNA	PFDA	PFBS	PFHxS	PFOS
HL	105~226 (157)	165~352 (305)	14~38 (25)	7~31 (18)	131~508 (317)	10~30 (19)	24~48 (37)
WL	157~665 (333)	343~1032 (789)	30~67 (44)	8~31 (22)	354~1025 (697)	8~44 (22)	20~66 (38)
EL	176~283 (235)	899~1301 (1110)	99~429 (246)	9~45 (32)	944~1578 (1253)	9~27 (17)	26~59 (40)
SL	4~125 (70)	10~206 (104)	<LOQ~23 (8)	<LOQ~3.3 (1)	6~70 (44)	<LOQ~8 (3)	<LOQ~7 (4)
PL	<LOQ~20 (8)	<LOQ~32 (12)	<LOQ	<LOQ	<LOQ~30 (11)	<LOQ~4.0 (1.0)	<LOQ~2.4 (0.4)

3.3. 매립장 침출수 및 처리수 중의 각 PFCs의 농도

상기에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 검토한 10개 항목의 PFCs 중 3개 항목(PFUnDA, PFDoDA, PFDS)를 제외한 7개 항목이 검출되었고, 이들 항목의 검출 농도의 범위 및 평균값을 Table 3에 나타내었다. 침출수 원수(HL, WL, and EL) 및 처리수(SL and PL) 중 각 PFCs의 농도는 PFHxA의 경우 각각 105 ~ 665(평균 242) ng/L, <LOQ ~ 125(평균 39) ng/L, PFOA의 경우 각각 165 ~ 1301(평균 735) ng/L, <LOQ ~ 206(평균 58) ng/L, PFNA의 경우 각각 14 ~ 429(평균 105) ng/L, <LOQ ~ 23(평균 4) ng/L, PFDA의 경우 각각 7 ~ 45(평균 24) ng/L, <LOQ ~ 3.3(평균 0.5) ng/L, PFBS의 경우 각각 131 ~ 1578(평균 756) ng/L, <LOQ ~ 70(평균 27.5) ng/L, PFHxS의 경우 각각 8~44(평균 19) ng/L, <LOQ ~ 8(평균 2) ng/L, PFOS의 경우 각각 20 ~ 66(평균 38) ng/L, <LOQ ~ 7(평균 2.2) ng/L으로 침출수 원수 중에는 PFOA 및 PFBS가 가장 높은 농도로 검출됨을 알 수 있었고, 침출수 처리수에서는 PFOA가 가장 높은 농도로 검출되었고, 다음으로 PFHxA, PFBS가 높은 농도로 검출됨을 알 수 있었다.

침출수 원수 및 처리수에서 각 PFCs의 평균농도를 총 PFCs의 평균농도에 대한 질량분율을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이, 침출수 원수(HL, WL, EL)의 경우 PFOA 및 PFBS가 각각 34.7 ~ 40.6(평균 37.7)%, 35.8 ~ 42.7(평균 38.2)%로 총 PFCs 농도의

매우 높은 질량 분율을 나타내었으며, 다음으로 PFHxA가 8 ~ 17.9(평균 14.3)%, 기타 화합물은 5% 미만의 낮은 질량분율을 나타내었고, 침출수 처리수의 경우 PFOA가 37 ~ 44.4(평균 40.7)%로 가장 높은 질량분율을 나타내었으며, 다음으로 PFHxA가 24.7 ~ 29.9(평균 27.3)%, PFBS가 18.9 ~ 34(평균 26.5)%로 두 화합물은 비슷한 질량분율로 검출되었으며 나머지 화합물은 3% 미만의 낮은 질량분율로 검출되었다.

매립장 침출수 원수 또는 처리수에서 총 PFCs 중 각 화합물이 차지하는 질량분율은 매립장의 특성(매립장의 운영기간, 운영 또는 종료, 고형폐기물의 종류, 분석 항목, 침출수의 처리법 등)에 따라 다양한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 중국의 주요 5개 도시 매립장의 침출수 중 PFCs의 농도를 검토한 Yan et al.(2015)에 의하면, 침출수 원수에서는 PFOA, PFBS 및 pentafluoropropionic acid (PFPrA)가 총 PFCs 중 평균 질량분율로 각각 28.8%, 26.1%, 15.9%로 대부분이었으며, 과거 PFCs 중 높은 용도로 사용되어 온 PFOS는 2.1 ~ 15.8%의 범위로 위의 3가지 화합물에 비해 매우 낮은 질량분율로 검출되었고, MBR/RO 또는 MBR/NF로 처리한 처리수 중에는 PFOA 및 PFBS가 평균 질량분율로 각각 36.8%, 40.8%로 대부분이었다고 보고하고 있다. Eggen et al.(2010)은 노르웨이 2곳의 쓰레기매립장 침출수 원수 중의 PFCs의 분석에서 평균 질량분율로 PFOS, PFHxA, PFOA, PFNA가 각각 34.3%, 19.7%,

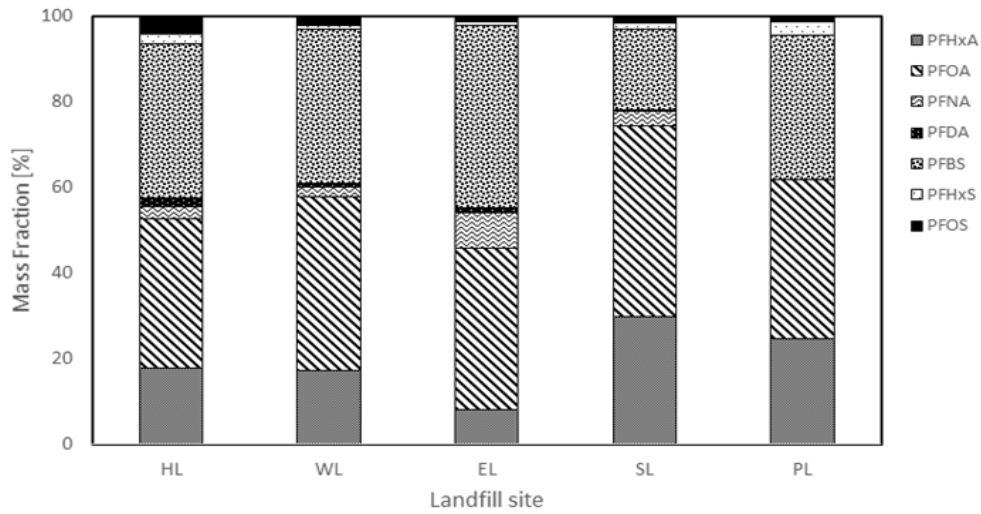


Fig. 2. Mass fraction of average individual PFCs to average Σ PFCs in raw (HL, WL, and EL) and treated (SL and PL) leachates from different landfill sites surveyed in this study.

18.4%, 16.5%로 대부분이었으며, PFBS는 <LOQ 라고 보고하였다. Gallen et al.(2017)은 호주의 27개 매립장 침출수 원수 중의 PFCs의 분석에서 총 PFCs 중 PFHxA가 가장 높은 농도로 검출되었으며, PFHxA, PFHxS, PFOA, PFHpA, PFOS가 평균 질량분율로 각각 37%, 24%, 18%, 11%, 8%로 보고하였다. Busch et al.(2010)은 독일의 6곳의 침출수 원수 및 20곳의 침출수 처리수 중 PFCs의 분석에서 각 PFCs의 총 PFCs에 대한 질량분율은 평균으로 침출수 원수 중에는 PFBA가 27%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, PFBS, PFHxA, PFOA가 각각 24%, 15%, 12%, 침출수 처리수 중에는 역시 PFBA 39%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, PFHxA 19.9%, PFBS 18.7%, PFOA 12.3%로 이들 화합물이 총 PFCs의 대부분을 차지하였다고 보고하였다. 북 스페인의 4곳의 매립장에 대해 침출수 원수 4곳 및 MBR/UF로 처리한 2곳의 침출수 처리수 중의 PFCs를 분석한 Fuertes et al.(2017)에 의하면 침출수 원수 중에는 PFOA, PFHxA가 각각 42.6%, 30.1%, 처리수 중에는 PFHxA, PFBS, PFOA가 각각 26.5%, 18.7%, 17.7%로 총 PFCs의 대부분을 차지하였다고 보고하고 있다.

본 연구에서 침출수 중 PFOA가 매우 높은 농도로 검출되었는데, 이는 PFCAs의 제품 생산에서 오랫동안 C8-기반의 상업적 제품 생산의 결과로 설명할 수 있으며

(Oliaei et al., 2010; Huset et al., 2011), 이 화합물은 가죽, 직물, 종이 및 전자제품 등의 표면처리제로 오랫동안 사용되었고(Wang et al., 2014), 미반응 잔류물은 소비자 제품에 존재하여 높은 비율로 검출된다고 보고하고 있다(Eggen et al., 2010; Vestergren et al., 2015). 그리고 PFBS도 높은 농도로 검출됨을 알 수 있는데, 이는 PFASs 중 광범위하게 사용되었던 PFOS가 지속성, 생물축적성 및 생물체에 대한 독성관계로 스웨덴 스톡홀름 협약에서 POPs에 등록되어 2002년부터 단계적 생산이 중단되고 이 화합물이 주로 C4 기반의 화합물(PFBS)로 주로 대체되었기 때문인 것으로 보고되고 있다(Oliaei et al., 2010; Allred et al., 2014).

3.4. 침출수의 화학적 성질과 PFCs 농도와 상관성

PFCs는 매립장에서 오랫동안 고형 폐기물의 침출과정에 의해 침출수중에 존재하고 이의 전구물질도 이 과정에 의해 고형 폐기물로부터 수중 매질로 침출되고 생물학적 과정에 의해 PFCs로 전환되며(Stock et al., 2004), 이러한 과정은 PFCs의 물리화학적 성질 뿐만 아니라 침출수의 물리화학적 성질에 의해서도 영향을 받는다고 보고되고 있다(Yan et al., 2015). 침출수 중의 pH가 증가할수록 PFCs 기능기의 음이온성이 증가하고 매립장 퇴적물 표면 음이온성 또는 침출수 용액 중의

Table 4. Correlation between PFCs concentrations and general water quality parameters in raw leachates used in this study

PFCs (ng/L)	Correlation coefficients (r^2)		logPFCs (ng/L)	Correlation coefficients (r^2)	
	pH	COD _{Cr}		pH	COD _{Cr}
∑PFCs	0.0651	0.0319	Log∑PFCs	0.0184	0.0032
PFHxA	0.0418	0.0145	Log PFHxA	0.0055	0.0535
PFOA	0.0021	0.0142	Log PFOA	0.0043	0.0027
PFBS	0.1815	0.0450	Log PFBS	0.1079	0.0151
PFOS	0.1372	0.0712	Log PFOS	0.125	0.0909

음이온성이 증가하여 이들 사이의 정전기적 반발력이 증가하여 PFCs의 이동성이 증가하므로 침출액 중의 pH와 PFCs의 농도와는 유의성 있는 상관성을 보인다고 보고되고 있다(Wang and Shih, 2011; Benskin et al., 2012). 또한 소수성의 유기오염물질은 유기물과 밀접하게 관련되므로(Nam et al., 2008) 침출수 중의 TOC는 매립장에서 잠재적으로 PFCs의 침출성을 증가시킬 수 있어 침출수 중의 TOC와 PFCs와는 유의성 있는 상관성을 나타낼 수 있다(Gallen et al., 2015). 그리고 Gallen et al.(2015)은 PFCs 농도의 대수값과 pH/TOC 사이에 유의성 있는 상관성을 보였다고 하였다.

본 연구에서 침출수 원수 중의 총 PFCs 및 주로 검출되는 PFCs(PFHxA, PFOA, PFBS, PFOS)의 농도 및 대수 농도값과 Table 1의 수질항목 중 pH 및 COD_{Cr}와의 상관성을 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 보이는 바와 같이 PFCs의 농도 및 이들 화합물의 대수값은 pH 사이의 결정계수(r^2)는 각각 0.0021 ~ 0.1815, 0.0043 ~ 0.125, COD_{Cr}와의 결정계수는 각각 0.0142 ~ 0.0712, 0.0027 ~ 0.0909로 상관성이 없거나 낮은 상관성을 보였다. Yan et al.(2015)은 각 PFCs의 농도와 pH 사이에는 중간 정도의 상관성($r=0.364 \sim 0.514$), 각 PFCs의 농도와 TOC 사이에는 상관성이 없었다고 보고하였으며, Gallen et al.(2017)은 각 PFCs의 농도의 대수값과 pH 사이에는 약한 상관성($r^2 = 0.08 \sim 0.15$), TOC 사이에는 다소 높은 상관성($r^2 = 0.16 \sim 0.36$)을 보고하였다. 본 연구결과는 일부 타 연구결과와 다소 차이를 보임을 알 수 있는데, 이는 침출수의 이질성과 복잡한 화학적 성질, PFCs의 유기물체에 의한 흡착성 등(Higgins and Luthy, 2006)과 침출성에 영향을 미치는 매립장의 운영기간 및 온도, 폐기물의 조성, 치

밀도, 물리적 상태, 수분함량, 수분 이동율 등(Edil, 2003; Mor et al., 2006) 다양한 인자의 영향에 의한 것으로 사료된다. 따라서 현 시점에서는 명확히 설명하기에 어려움이 있어 향후 PFCs의 농도와 침출수의 물리화학적 인자와의 체계적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

제주도 3곳의 매립장 침출수 원수와 2곳의 침출수 처리수를 2014 ~ 2015년 동안 6회 채수하여 수계 중 일반적으로 검출되고 있는 10개 PFCs의 농도를 분석하여 침출수 중의 PFCs의 검출특성을 검토하였다.

10개의 PFCs 중 3개 항목(PFUnDA, PFDoDA, PFDS)를 제외한 7개 항목이 검출되었고, 침출수 원수 및 처리수 중의 총 PFCs의 농도는 각각 724 ~ 3313(평균 1999) ng/L, <LOQ ~ 394(평균 133.2) ng/L를 보였으며, 이를 국외 타 매립장의 침출수 원수 및 처리수와 비교한 결과 매우 낮은 농도로 검출됨을 알 수 있었다.

침출수 중의 각 PFCs를 검토한 결과, 침출수 원수 중에는 PFOA 및 PFBS가 매우 높은 농도로 검출되었고, 처리수 중에는 PFOA가 매우 높은 농도로, 다음으로 PFHxA 및 PFBS가 비슷한 농도로 검출되었다.

침출수 중의 PFCs의 농도와 침출수 중의 pH 및 TOCs와의 상관성을 검토한 결과, 일부 타 연구결과와는 달리 침출수의 특성 및 침출성에 미치는 매립장 및 폐기물의 다양한 인자에 기인하여 상관성이 없는 것으로 나타났다.

본 연구결과와 관련 참고문헌을 통해 매립장의 침출수에 포함되어 있는 PFCs는 POPs의 특성을 보이는 최근 이슈화된 유기오염물질로 매립장에서 대부분 자체

처리되지 않고 하수처리장으로 유입되어 일반적인 오염 물질과 함께 처리되고 있으나 이 오염물질은 하수처리장의 일반적인 처리공법인 생물학적 처리공정에 의해 제거되지 않고 방류되어 수계 및 생물계에 위해를 끼칠 수 있으므로 매립장 침출수 및 하수처리장에서 이들 오염물질의 현황조사와 함께 이들 오염물질을 제거하기 위한 적절한 처리공법에 관한 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Allred, B. M., Lang, J. R., Barlaz, M. A., Field, J. A., 2014, Orthogonal zirconium diol/C18 liquid chromatography - tandem mass spectrometry analysis of poly and perfluoroalkyl substances in landfill leachate, *J. Chromatogr. A*, 1359, 202-211.
- Allred, B. M., Lang, J. R., Barlaz, M. A., Field, J. A., 2015, Physical and biological release of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from municipal solid waste in anaerobic model landfill reactors, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 7648-7656.
- Benskin, J. P., Li, B., Ikononou, M. G., Grace, J. R., Li, L. Y., 2012, Per- and polyfluoroalkyl substances in landfill leachate: patterns, time trends, and sources, *Environ. Sci. Technol.*, 46, 11532-11540.
- Bossi, R., Strand, J., Sortkjaer, O., Larsen, M. M., 2008, Perfluoroalkyl compounds in Danish wastewater treatment plants and aquatic environments, *Environ. Int.*, 34, 443-450.
- Busch, J., Ahrens, L., Sturm, R., Ebinghaus, R., 2010, Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachates, *Environ. Pollut.*, 158, 1467-1471.
- Cho, C. R., Eom, I. C., Kim, E. J., Kim, S. J., Choi, K., Cho, H. S., 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), 296-306.
- Edil, T. B., 2003, A Review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners, *Waste Manag.*, 23, 561-571.
- Eggen, T., Moeder, M., Arukwe, A., 2010, Municipal landfill leachates: a significant source of new and emerging pollutants, *Sci. Total Environ.*, 408, 5147-5157.
- Fuertes, I., Gomez-Lavin, S., Elizalde, M. P., Urriaga, A., 2017, Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates, *Chemosphere*, 168, 399-407.
- Gallen, C., Drage, D., Eaglesham, G., Grant, S., Bowman, M., Mueller, J. F., 2017, Australia-wide assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachates, *J. Hazard. Mater.*, 331, 132-141.
- Hamid, H., Li, L. Y., Grace, J. R., 2018, Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills, *Environ. Pollut.*, 235, 74-84.
- Hekster, F. M., Laane, R. W. P. M., DeVoogt, P., 2003, Environmental and toxicity effects of perfluoroalkylated substances, *Rev. Environ. Cont. Toxicol.*, 179, 99-121.
- Higgins, C. P., Luthy, R. C., 2006, Sorption of perfluorinated surfactants on sediments, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 7251-7256.
- Houde, M., De Silva, A. O., Muir, D. C., Letcher, R. J., 2011, Monitoring of perfluorinated compounds in aquatic biota: an updated review: PFCs in aquatic biota, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7962-7973.
- Huset, C. A., Barlaz, M. A., Barofsky, D. F., Field, J. A., 2011, Quantitative determination of fluorochemicals in municipal landfill leachates, *Chemosphere*, 82, 1380-1386.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2014, Internal report on the treatment status of landfill leachates in Jeju Island and was not published officially.
- Kam, S. K., Paik, B. C., Kim, K. S., 2016, A Study on the perfluorinated compounds (PFCs) in the public sewage treatment plants- case of Jeju Province sewage treatment plants, *J. Korean Soc. Urban Environ.*, 16, 35-45.
- Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J., Oehme, G., Focardi, S., Giesy, J. P., 2002, Perfluorooctane sulfonate and related fluorinated hydrocarbons in marine mammals, fishes, and birds from coasts of the Baltic and the Mediterranean Seas, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3210-3216.
- KIEST (Korea Institute of Environmental Science & Technology), 2008, Manual for analysis and degradability estimation of perfluorinated chemicals,

- 1-74.
- 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), 143-164.
- Kunacheva, C., Tanaka, S., Fujii, S., Boontanon, S. K., Musirat, C., Wongwattana, T., Shivakoti, B. R., 2011, Mass flows of perfluorinated compounds (PFCs) in central wastewater treatments of industrial zones in Thailand, *Chemosphere*, 83, 737-744.
- Martin, J., Smithwich, M. M., Braune, B. M., Hoekstra, P. F., Muir, D. C. G., Mabury, S. A., 2004, Identification of long-chain perfluorinated acids in biota from the Canadian Arctic, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 373-380.
- Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R., Chandra, A., 2006, Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site, *Environ. Monit. Assess.*, 118, 435-456.
- Nam, J. J., Gustafsson, O., Kurt-Karakus, P., Breivik, K., Steinnes, E., Jones, K. C., 2008, Relationship between organic matter, black carbon and persistent organic pollutants in European background soils: implications for sources and environmental fate, *Environ. Pollut.*, 156, 809-817.
- Oliaei, F., Kriens, D., Weber, R., 2010, Discovery and investigation of PFOS/PFCs contamination from a pFC manufacturing facility in Minnesota- environmental releases and exposure risks, *Organohalog. Compd.*, 72, 1338-1341.
- Oman, C., Hynning, P. A., 1993, Identification of organic compounds in municipal landfill leachates, *Environ. Pollut.*, 80, 265-271.
- Paik, B. C., Kim, T. R., Kam, S. K., 2014, Distribution of perfluorinated compounds (PFCs) in Sumjin river and southern coastal area of Korea, *J. Korean Soc. Urban Environ.*, 14, 87-99.
- Park, J. E., Kim, S. K., Oh, J. K., Ahn, S. Y., Lee, M. N., Cho, C. R., 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), 326-334.
- Paul, A. G., Jones, K. C., Sweetman, A. J., 2008, A First global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 386-392.
- Rhoads, K. R., Janssen, E. M. L., Luthy, R. G., Criddle, C. S., 2008, Aerobic biotransformation and fate of n-ethyl perfluorooctane sulfonamidoethanol (n-EtFOSE) in activated sludge, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 2673-2678.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., 2008, Landfill leachate treatment: review and opportunity, *J. Hazard. Mater.*, 150, 468-493.
- Schultz, M. M., Hyggins, C. P., Huset, C. A., Luthy, G., Barofsky, D. F., Field, J. A., 2006, Fluorochemicals mass flows in municipal wastewater treatment facility, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 7350-7357.
- Silva, A. C., Dezotti, M., Sant'Anna Jr, G. L., 2004, Treatment and detoxication of a sanitary landfill leachate, *Chemosphere*, 40, 7350-7357.
- Sinclair, E., Kannan, K., 2006, Mass loading and fate of perfluoroalkyl surfactants in wastewater treatment plants, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 1408-1414.
- Stock, N. L., Lau, F. K., Ellis, D. A., Martin, J. W., Muir, D. C., Mabury, S. A., 2004, Polyfluorinated telomer alcohols and sulfonamides in the North American temperature, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 991-996.
- Stockholm Convention, 2017, Comments on the draft risk management evaluation on PFOA, its salts and PFOA-related compounds, Available from <http://www.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POP12/POP12Followup/PFOAComments/tabid/5950/Default.aspx> (accessed month day, year).
- UNEP, 2009, The new 9 new POPs under the Stockholm Convention, <http://chm.pops.int/Programmes/NewPops/The9newPOPs/tabid/672/language/en-US/Default.aspx> (accessed month day, year).
- Vestergren, R., Herzke, D., Wang, T., Cousins, I. T., 2015, Are imported consumer products an important diffuse source of PFASs to the Norwegian environment?, *Environ. Pollut.*, 198, 223-230.
- Wang, F., Shih, K., 2011, Adsorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) on alumina: influence of solution pH and cations: *Water Res.*, 45, 2925-2930.
- Wang, Z., Cousins, I. T., Scheringer, M., Buck, R. C., Hungerbühler, K., 2014, Global emission inventories for C4-C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, part I: production and emission from quantifiable sources, *Environ. Int.*, 70,

- 62-75.
- Welander, U., 1997, Identification by gas chromatography of organic constituents in leachates from sanitary landfills, *Resour. Environ. Biotechnol.*, 1, 283-296.
- Woldegiorgis, A., Andersson, J., Remberger, M., Kaj, L., Ellcheden, Y., Blom, L., Brostrom-Lunden, E., 2006, Results from the Swedish national screening programme 2005, Subreport 3: perfluorinated alkylated substances (PFAS), B1698, IVL Swedish Environmental Research Institute Report, 46.
- Yan, H., Cousins, I. T., Zhang, C., Zhou, Q., 2015, Perfluoroalkyl acids in municipal landfill leachates from China: occurrence, fate during leachate treatment and potential impact on groundwater, *Sci. Total Environ.*, 524-525, 23-31.
- 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, 806-814.
-
- Professor. Byeong-Cheon Paik
Department of Environmental System Engineering,
Chonnam National University
bpaik@jnu.ac.kr
 - Professor. Sang-Kyu Kam
Department of Environmental Engineering, Jeju National
University
sakyukam@jejunu.ac.kr