

토양 환경 내 과불화화합물(PFAS)의 오염 현황, 규제 및 정화 기술 동향

최종복 · 나이슬 · 이덕영 · 손영규*

국립금오공과대학교 환경공학과

A Comprehensive Review of Contamination, Regulatory Trends and Remediation Technologies for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil Environments

Choi Jongbok, Na Iseul, Lee Dukyoung, and Son Younggyu*

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

ABSTRACT

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are representative persistent organic pollutants widely distributed in soil and groundwater through sources such as aqueous film-forming foam (AFFF), industrial activities, sewage sludge, and landfill leachate. High concentrations have been particularly observed in soils near fire sites, industrial areas, and military bases. While countries such as the United States, Canada, Denmark, and the Netherlands have introduced strict regulatory standards (often at the ng/g or ng/L level) for compounds like PFOA and PFOS, South Korea currently lacks legal standards, with only limited monitoring being conducted. PFAS remediation technologies can be broadly categorized into separation-based methods, such as soil washing, phytoremediation, and adsorption, and degradation-based methods, including thermal, mechanochemical, hydrothermal, sonochemical and electrochemical methods. Integrated management approaches that consider the reuse potential and ecological safety of remediated soil are increasingly necessary. This study aims to provide scientific baseline data essential for developing PFAS management policies in South Korea and to support the establishment of effective remediation strategies.

Key words : PFAS, Soil contamination, Regulatory trends, Remediation technologies

1. 서 론

과불화화합물(Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS)은 C-F 결합의 강력한 안정성으로 인해 자연환경에서 거의 분해되지 않는 인공 화학물질로, 대표적인 잔류성 오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)로 분류된다. 1940년대 이후부터 PFAS는 섬유, 식품 포장재, 소화제, 방수제, 반도체, 금속 도금 공정 등 다양한 산업 및 소비재에 사용됐으며, 이에 따라 환경 중 널리 분포하게 되었다

(Cousins et al., 2019; Prevedouros et al., 2006). PFAS는 내열성, 소수성, 친수성 등을 동시에 갖는 특성으로 인해 유출 시 자연계 내 다양한 매체로 이동하며, 그중에서도 토양과 지하수는 주요한 축적 및 확산 경로로 볼 수 있다 (Brusseau et al., 2020).

PFAS의 주요 오염원들은 수성막형성소화제(Aqueous Film Forming Foam, AFFF)(D'Ambro et al., 2021; Prevedouros et al., 2006), 하수처리장에서 발생하는 슬러지 및 방류수 (Ahrens et al., 2016; Sinclair and Kannan, 2006), 매립지 침출수(Lang et al., 2017; Gallen et al., 2016) 등이 있다. PFAS는 지하수와 상호작용을 통해 다양한 흡착, 탈착, 재용출 등의 과정을 거치며 이동성과 안정성을 동시에 갖춘 독특한 거동을 보인다(Wang et al., 2022). PFAS는 유기물이나 점토광물 등과 결합하여 토양 내 잔류하거나, 강우나 지하수 흐름에 따라 하부 대수층으로 이동하여 오염원으로부터 수 km 떨어진 지역의 지하수에서 검출된

주저자: 최종복, 국립금오공과대학교 환경공학과, 박사후연구원;
나이슬, 국립금오공과대학교 환경공학과, 대학원생
공저자: 이덕영, 국립금오공과대학교 환경공학과, 박사후연구원
*교신저자: 손영규, 국립금오공과대학교 환경공학과, 교수
E-mail: yson@kumoh.ac.kr

Received : 2025. 7. 5 Reviewed : 2025. 7. 17

Accepted : 2025. 8. 8 Discussion until : 2025. 8. 31

사례도 다수 보고되었다(Loganathan and Wilson, 2022; Zhang et al., 2016).

현재 국내의 경우, 토양과 지하수 내 PFAS에 대한 법적 규제는 아직 마련되어 있지 않은 실정이며, 환경부의 일부 모니터링 사업 외에는 체계적인 조사가 부족한 실정이다. 반면에, 미국과 유럽 일부 국가들은 PFOA와 PFOS를 중심으로 토양 및 지하수 모니터링 기준을 제정하여 시행하고 있으며, 미국 내 각 주와 덴마크, 캐나다 등은 PFAS의 다성분 규제 농도 기준을 도입하고 있다(ITRC, 2025).

본 연구는 PFAS의 정의와 특성, 토양 및 지하수 내 오염 경로, 국내외 규제 현황, 검출 사례, 그리고 최신 정화 기술에 대해 종합적으로 고찰함으로써, 향후 환경 및 건강 보호를 위한 정책 수립과 실질적 대응 전략 마련에 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. PFAS의 정의 및 특성

PFAS는 C-F 결합을 하나 이상 포함하는 물질로 정의한다(Schymanski et al., 2023). PFAS는 정의에 따라서 수 백만 종의 화합물들이 포함되는 것으로 보이며, 2024년도 EPA에서 Toxic Substances Control Act에 따라 PFAS 13,054종의 사용을 제한하였다(EPA, 2024).

PFAS는 일반적으로 퍼플루오르 알킬 사슬(perfluoroalkyl

chain) 끝에 카르복실산(-COOH)이나 술폰산(-SO₃H) 등의 작용기가 붙어있는 형태를 가지고 있다. 물리화학적으로 매우 안정적이며, 내열성 및 내화학적 특성을 가진다(Bolan et al., 2021). 추가적으로 강한 소수성·친유성의 성질을 가질 수 있으며, 작용기의 성질에 따라서 친수성·소유성의 성질도 가질 수 있기 때문에 다양한 산업 분야에서 방수제, 발수 코팅제, 발유 코팅제, 소방용 폼 등에 폭넓게 활용되어 왔다(Prevedouros et al., 2006). 자연계에서 쉽게 분해되지 않는 특징 때문에 환경에 노출된 이후 긴 시간 잔류하며, “영원히 사라지지 않는 화학물질(Forever Chemicals)”로 불리고 있다(Brunn et al., 2023).

PFAS는 폴리머(Polymer)와 논폴리머(Non-polymer)로 구분될 수 있으며, 자연계에서 가장 흔히 검출되는 물질들은 논폴리머 종류 중 탄소 골격의 모든 수소가 완전히 불소화되어 있는 퍼플루오르알킬물질(perfluoroalkyl substances)과 부분적으로 하나 이상의 탄소 사슬의 일부 수소원자가 불소원자로 대체된 폴리퍼플루오르알킬물질(Polyfluoroalkyl substances)로 나눌 수 있다(Fig. 1). 퍼플루오르알킬물질에는 과불화알킬산(perfluoroalkyl acids, PFAAs)이 포함되며 이중 과불화알킬 카르복실산(perfluoroalkyl carboxylic acids, PFCAs)과 과불화알킬 설펜산(perfluoroalkyl sulfonic acids, PFSAs)이 포함된다. 이들의 대표적인 물질은 과거에 사용량이 많고, 인체 및 자

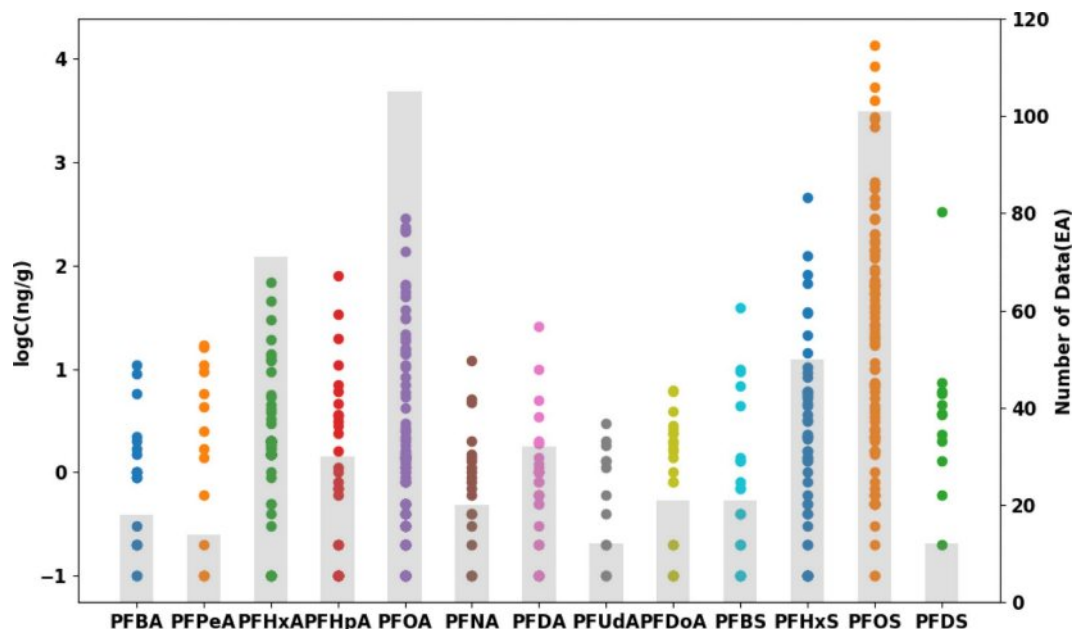


Fig. 1. PFAS concentrations and number of data in worldwide soil (dots represent concentration of PFAS, and bars indicate the number of data points; Gan et al., 2022; Johnson et al., 2022; Ma et al., 2022; Mattias et al., 2022; Liu et al., 2021; Pepper et al., 2021; Brusseau et al., 2020; Nickerson et al., 2020; Shigei et al., 2020; Bräunig et al., 2019; Anderson et al., 2016; Navarro et al., 2016; Xiao et al., 2015; García-Valcárcel et al., 2012; Strynar et al., 2012; Wang et al., 2010).

Table 1. Classification of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (ITRC, 2023)

Family	Class	Subclass	Group
PFAS	Non-polymer	Per-fluoroalkyl Substances	Perfluoroalkyl acids (PFAAs)
			Perfluoroalkyl ether acids (PFEAs)
			Perfluoroalkane sulfonyl fluorides (PASFs)
			Perfluoroalkane sulfonamides (FASAs)
			Perfluoroalkanoyl fluorides (PFAs or PACFs)
			Perfluoroalkyl iodides (PFAIs)
			Perfluoroalkyl aldehydes (PFALs)
	Polymer	Poly-fluoroalkyl Substances	Fluorotelomer substances
			Polyfluoroalkane sulfonamido substances
			Chloropolyfluoroalkylether acids
			Chloropolyfluoroalkyl acids
			Polyfluoroalkyl carboxylic acids (PolyFCAs)
	Polymer	Fluoropolymers	-
		Polymeric Perfluoropolyethers (PEPE)	-
		Side-chain fluorinated polymers	-

연환경에서 검출 빈도가 높다고 알려진 과불화옥탄산 (Perfluorooctanoic acid, PFOA) 및 과불화옥탄술폰산 (Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS)이다(Botelho et al., 2025).

PFAAs는 PFAS 분자 중에서 가장 단순한 구조의 물질로 알려져 있으며, PFAS들은 자연계에서 분해되거나 변형되어 대부분이 PFAAs가 되기 때문에, “terminal PFAS” 또는 “terminal transformation product”로 불리기도 한다. 독성과 생물축적능에 따라서 PFAAs를 사슬 길이로 구분하며 장쇄 PFAS(long-chain PFAS)와 단쇄 PFAS(short-chain PFAS)로 명명하였다(OECD, 2013). PFAAs 중 PFCAs는 8개 이상의 탄소를 포함하는 집단을, PFAAs 중 PFSAs는 6개 이상의 탄소를 가지고 있는 집단을 장쇄 PFAS으로 정하였다. 장쇄 PFAS들은 생물학적 및 비생물학적 변형에 의해서 단쇄 PFAS 형태로 치환될 수 있다.

PFOA와 PFOS는 전 세계적으로 다양한 환경에서 검출되는 누적 오염물질로서 환경 및 인체 유해성에 관한 연구가 진행된 바 있다. 두 물질 모두 생물에 흡수된 후 혈액 및 단백질에 강하게 결합하는 성질을 가지고 있어서 배출 속도가 매우 느리다. 사람의 혈액에서 PFOA의 반감기는 약 2-4년, PFOS는 약 5년이며(USEPA, 2017), 지속적인 노출 시 체내에 축적되어 질병을 유발할 수 있다. 국제 암 연구소(IARC)에서 2023년 PFOA를 인간에게 발암성이 있는 물질(carcinogenic to humans, Group 1)로 지정하였으며, PFOS는 인간에게 발암 가능성이 있는 물질(possibly carcinogenic to humans, Group 2)로 지정한 바 있다(WHO,

2023). USEPA에서는 두 물질에 대한 음용수 건강 권고 기준을 사실상 “무검출 수준”으로 강화하였으며, 농도 PFOA는 0.004 ppt, PFOS는 0.02 ppt를 제시하였으며(USEPA, 2022), 2024년도에는 음용수 내 최종 최대오염 물질 농도 (Final Maximum Contaminant Levels (enforceable levels))에 대하여 두 물질의 규제 농도를 4 ppt로 정하였다(USEPA, 2025). 토양 환경 분야에서도 최근 다양한 국가에서 PFAS의 농도 기준이 제시되고 있으며, 토양 환경에 대한 규제는 다른 환경 조건들에 비해서 높지 않은 편이다.

3. 토양·지하수 내 PFAS 오염경로

PFAS는 자연적으로는 잘 분해되지 않는 인공 화학물질로, 1940년대부터 다양한 산업 및 소비재에 사용되고 있으며, 토양 및 수질 등 다양한 자연환경에서 광범위하게 발견되고 있다. 이 중 토양 내 PFAS는 유입된 후 지하수로의 침투 가능성이 매우 높으며, 모세관 현상 및 지하수의 흐름 등으로 인하여 수십 미터 아래까지 영향을 끼칠 수 있다. 단쇄 PFAS는 지하수 환경에서 장쇄 PFAS보다 높은 이동성을 보이며, 유출원으로부터 수 킬로미터 떨어진 지역에서도 검출된 바 있다(Zhang et al., 2016). Guelfo and Higgins(2013)에 따르면 토양의 입자크기, 유기물 함량, 이온강도 등에 따라서 토양에서 PFAS의 흡착능이 크게 달라지며, 이에 따라 지하수 내 이동 경로 및 속도 차이가 발생한다고 한다. 불포화대를 통과하면서 다

양한 흡착 및 탈착 반응이 일어나고 대수층에 도달한 이후에도 수십 년 동안 잔류할 수 있어 지하수의 오염에 큰 영향을 미친다(Brusseau et al., 2020). 본 연구에서는 소방용 폼, 하수처리장 슬러지 및 방류수, 매립지 침출수, PFAS 오염 토양에 의한 지하수 오염, 대기 이동에 의한 침착을 토양 내 PFAS의 주요 오염경로로 설명하고자 하였다.

PFAS 오염의 가장 대표적인 점오염원 중 하나는 소화용 폼 중 하나인 AFFF이다(D'Ambro et al., 2021; Prevedouros et al., 2006). AFFF는 주로 군사기지, 공항, 소방 훈련장에서 사용되었으며 PFOS, PFOA, PFHxS 등 장쇄 PFAS가 주요 성분이다. 저장, 취급, 사용, 소방 훈련 등의 과정에서 토양 및 지하수로 유입되며, 대규모 오염을 유발한다(Cousins et al., 2019; Houtz and Sedlak, 2012). 호주에서는 약 90개, 미국에서는 26,000개 이상의 PFAS 오염 지점이 보고되었으며(Darlington et al., 2018), 소방시설을 보유한 군사기지 인근에 위치한 지역에서 음용 지하수의 PFAS 농도가 기준치를 초과한 사례가 빈번하게 보고되었다(Cousins et al., 2019; Darlington et al., 2018). 미국 앨라배마주의 한 사례에서는 지표수 및 지하수 내 PFOA 농도가 최대 11,000 ng/L에 달한 바 있으며(Lindstrom et al., 2011), 이는 심각한 건강 영향을 초래할 수 있는 수준이다.

하수처리장에서 발생하는 슬러지 및 방류수는 토양 내 PFAS 오염의 주된 오염원 중 하나이다. 가정 및 산업 현장에서 사용된 PFAS이 하수로 유입되며, 하수처리과정을 거쳐 슬러지에 농축된다. 미국에서 운영하는 하수처리장 슬러지에서의 PFOS가 평균 403 ng/g, PFOA는 34 ng/g 수준으로 검출된 바 있으며(Venkatesan and Halden, 2013), 스위스에서는 PFOS가 15 – 600 ng/g 범위로 보고된 바 있다(Sun et al., 2010). PFAS는 생물반응조에서 전구체가 분해되며 농도가 증가할 수 있으며(Houtz and Sedlak, 2012), 스웨덴에서는 지하수 내 26종 PFAS의 평균 농도가 49 ng/L, 미국 뉴욕주의 하수처리장 방류수에서는 PFOA가 최대 1,050 ng/L 검출되었다(Ahrens et al., 2016; Sinclair and Kannan, 2006). PFOS는 슬러지에 강하게 흡착되어 방류수 내 농도는 낮게 나타나는 특징을 보인다(Yu et al., 2009; Becker et al., 2008; Schultz et al., 2006). 하수처리장에서 발생한 슬러지를 비료 등으로 농경지에 활용할 경우, PFAS이 직접 토양에 유입될 수 있다(Venkatesan and Halden, 2013). Sepulvado et al.(2011)은 PFAS이 지표에서 120 cm 깊이까지 침투될 수 있음을 보고한 바 있으며, Washington et al.(2010)의 연구에서는 슬러지가 활용된 토양에서 PFOS 및 PFOA가 각각 최대 408 ng/g, 312 ng/g 검출되었다. 슬러지의 비료 활용 등에 의한 사

용은 PFAS의 생물농축 및 식물 흡수를 통해 생태계와 인체에 영향을 미칠 수 있다.

PFAS는 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수로 배출될 수 있다(Lang et al., 2017; Gallen et al., 2016). 폐기물 내 PFAS는 치수가 불완전한 매립지에서 토양과 지하수로 유입되며, 제거가 어려운 단쇄 PFAS는 심각한 환경오염 문제를 야기시킨다(Knutsen et al., 2019). 중국에서는 침출수 내 PFAS가 최대 292,000 ng/L로 보고된 바 있다(Yan et al., 2015).

PFAS는 대기를 통해 장거리 이동(Long-Range Atmospheric Transport, LRAT)되며, 강우나 강설 등을 통한 습식 침착과 미세먼지 등을 통한 건식 침착으로 토양에 유입될 수 있다(Shimizu et al., 2021; Chen et al., 2019; Gewurtz et al., 2019). 북극, 남극, 태평양 지역에서도 PFAS가 검출되었는데, 이는 대기 중 장거리 수송의 결과로 볼 수 있다(Wong et al., 2018; Xie et al., 2015; Del Vento et al., 2012). PFAS 중 FTOH는 대기 중 OH 라디칼과 반응하여 PFCAs로 전환되며, 이후 토양 침착으로 인한 오염을 일으킬 수 있다(Webster and Ellis, 2010; Young et al., 2007; Gauthier and Mabury, 2005).

PFAS는 표층수 및 지하수와의 상호작용을 통해 지속적으로 교환되며, 표층 지하수와의 흡·탈착 작용, 강우에 의한 침투, 유기물과의 결합 및 점토광물과의 흡착 등 다양한 작용을 통해 PFAS 농도에 영향을 미친다(Wang et al., 2022). 또한, 지하수의 수문학적 특성에 따라 PFAS는 상부 대수층에서 하부 대수층으로 이동하거나 반대로 유출되기도 하며, 이는 장기적인 확산 및 축적 문제를 초래한다(Loganathan and Wilson, 2022; Zhang et al., 2016). PFAS 오염은 단기간에 해결되기 어려운 복합적인 문제로, 토양과 지하수의 관리를 통한 장기적이고 선제적인 대응 전략을 마련할 필요가 있다.

4. 토양/지하수 내 PFAS 규제 현황

토양과 지하수의 오염은 따로 구분 짓기 어려운 정도로 밀접한 관계가 있다. 이에 따라서 토양과 지하수 내 PFAS 규제 현황을 정리하였다. 현재 국내 및 아시아에서는 토양·지하수 내 PFAS에 대한 규제가 마련되어 있지 않은 실정이며, 대부분의 자료를 미국 기술/법 관련 주 협의회(ITRC, Interstate Technology and Regulatory Council)에서 제공하는 PFAS의 규제에 대한 북미 및 유럽의 규제 현황을 참조하여 작성하였다(ITRC, 2025).

미국에서는 중앙정부의 규제가 따로 없으며, 미국 환경

Table 2. Regional screening levels for PFAS in soil and groundwater (USEPA, 2024)

Compunds	Soil (ng/g)	Groundwater (ng/L)
PFPPrA	39,000	9,800
PFBA	78,000	18,000
PFHxA	32,000	9,900
PFOA	0.019	0.0027
PFCAs PFNA	190	59
PFUnDA	19,000	6,000
PFDoDA	3,200	1,000
PFTeDA	63,000	20,000
PFODA	2,500	800,000
PFBS	19,000	6,000
PFBS-K	19,000	6,000
PFSAs PFHxS	1,300	390
PFOS	6.3	2
PFOS-K	6.3	2
Gen-X	230	15
Others Bis(trifluoromethylsulfonyl)amine (TFSI)	23,000	5,900

보호청(USEPA)에서 2024년도에 PFAS 물질 16종에 대하여 지역 스크리닝 기준(Regional Screening Levels, RSLs)을 제시하였다(Table 2). 미국 내 6개 주에서 토양 정화를 위한 목적으로 제한된 규제를 마련하여 시행 중이었으며, 캐나다 및 덴마크, 네덜란드 등에서 관련 법규를 마련하여 시행 중이다(Table 3). 미국에서는 주마다 다른 명칭의 PFAS 토양 정화 기준을 마련하여 시행하고 있으며(Cleanup level(알래스카), Provisional soil cleanup target level(플로리다), Environmental action level(하와이), Final proposed soil remediation standard(뉴햄프셔), Interim soil remediation standard(뉴저지), Preliminary soil remediation goal(노스캐롤라이나)), 캐나다(Soil quality guideline), 덴마크(Soil and GW used as water supply), 네덜란드(Maximum values for land application(Industry))도 토양 환경 내 PFAS 농도를 규제하고 있다. 규제 항목이 하나뿐인 노스캐롤라이나와 캐나다를 제외한 지역에서는 공통적으로 PFOA와 PFOS를 규제 항목으로 포함했으며, 이들의 규제 농도는 각각 0.4~1,300 ng/g 및 0.5~1,300 ng/g으로 넓은 범위로 나타났다. 비교적 최근인 2024년도에 시행된 하와이 및 뉴햄

Table 3. Regulations of PFAS in soil (unit: ng/g; ITRC, 2025)

Location	USA						Canada	Denmark	Netherlands
	Alaska	Florida	Hawaii	New Hampshire	New Jersey	North Carolina			
Year	2017	2020	2024	2024	2022	2018	2021	2021	2019
PFCAs	PFPPrA		5,000						
	PFBA		48,000						
	PFPeA		5,100					400	
	PFHxA		6,300					400	
	PFHpA		250					400	
	PFOA	1,300	1,300	38	0.4	130		400	1,100
	PFNA			38	1.3	47		400	
	PFDA			25				400	
	PFUnDA			63				400	
	PFDoDA			85				400	
	PFTTrDA			85				400	
	PFTeDA			850					
PFSAs	PFBS		3,800			250,000		400	
	PFHxS		25	0.4				400	
	PFHpS		130					400	
	PFOS	1,300	1,300	25	0.5	110	10	400	110
	PFDS			130				400	
Others	PFOSA			150				400	
	6:2 FTS			4,900				400	
	8:2 FTS							400	
	Gen-X			47		230			960

Table 4. Regulations of PFAS in groundwater (unit: ng/L; ITRC, 2025)

Location	USA													Canada		Den- mark	Ger- many	Nether- lands
	Alaska	Colorado	Iowa	Massa- chusetts	Michi- gan	Mon- tana	New Hamp- shire	New Jersey	North Carolina	Rhode Island	Texas	Vermont	Washing- ton	Alberta				
Year	2016	2018	2016	2019	2021	2019	2019	2022	2024	2023	2023	2020	2022	2022	2021	2018	2020	
PFBA									7,000		24,000				100	10,000		
PFPeA											12,000				100			
PFHxA					400,000				4,000		12,000				100	6,000		
PFHpA				20						20	560	20			100			
PFOA	400	70	70	20	8	70	12	14	0.001	20	290	20	10	20,000	100	100	170,000	
PFNA				20	6		11	13	10	20	290	20	9		100	60		
PFDA				20						20	370				100			
PFUnDA											290				100			
PFDoDA											290				100			
PFTTrDA											290				100			
PFTeDA											290							
PFBS					420				2,000		34,000		345		100	6,000		
PFHxS				20	51		18		10	20	93	20	65		100	100		
PFHpS															100			
PFOS	400	70	70	20	16	70	15	13	0.7	20	560	20	15	60,000	100	100	56,000	
PFDS											290				100			
PFOSA											290				100			
6:2 FTS															100			
Gen-X					370			20	10				24				140,000	
CIPFPECA								2										

프셔의 규제를 살펴보면, 하와이의 규제에서는 PFAS 및 관련 약품 중 20 항목(PFPrA, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTTrDA, PFTeDA, PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFDS, PFOSA, 6:2 FTS, HFPO-DA (Gen-X))을 포함했으며, 뉴햄프셔에서는 PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS를 각각 0.4, 1.3, 0.4, 0.5 ng/g으로 규제하였다. 이는 토양 내 PFAS에 대한 규제 항목 및 농도 기준이 강화되고 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

미국 내 13개 주에서 지하수 수질 규제를 시행 중이며, 캐나다(앨버타주) 및 덴마크, 독일, 네덜란드 등에서는 관련 법규를 마련하여 시행 중이다(Table 4). PFAS 물질 중 공통으로 PFOA 및 PFOS를 규제하고 있으며, PFOA 및 PFOS의 농도 범위는 각각 0.001~170,000 ng/L 및 0.7~60,000 ng/L로 넓은 범위에 분포되어 있다. 이 중 최근에 시행된 2024년도 노스캐롤라이나의 임시 최대 허용기준(interim maximum allowable standard)에서는 8종의 PFAS를 규제하고 PFOA 및 PFOS의 농도를 낮게 정하였으며(0.001 ng/L 및 0.7 ng/L), 2023년도 텍사스주에서 시행된 Tier 1 PCL(Protective Concentration Level)에서는 PFAS 16종을 규제 항목에 포함하였다. 덴마크는 2021년도에 지하수 품질기준 항목에 17종의 PFAS가 포함하였다.

토양과 지하수 내 PFAS에 대한 규제는 북미와 유럽을 중심으로 빠르게 정비되고 있으며, 규제 항목과 기준 농도 또한 점차 강화되는 추세이다. 특히 PFOA와 PFOS는 대부분 국가 및 지역에서 공통으로 규제하고 있으며, 최근에는 단쇄 PFAS 및 대체 화합물까지 규제 대상에 포함하는 경향을 보인다. 미국의 여러 주, 캐나다, 덴마크, 네덜란드 등은 토양 및 지하수에 대한 농도 기준을 마련하고 있으며, 일부 지역은 1 ng/g 또는 ng/L 이하의 매우 엄격한 기준을 적용하고 있다. 반면, 국내 및 아시아 국가들은 아직 명확한 법적 기준이 부재한 상황으로, 향후 환경 및 건강 보호를 위한 과학적 근거 기반의 규제 마련이 시급한 실정이다.

5. 국내외 토양 내 PFAS 검출 현황

5.1. 자료 수집 및 방법

16편의 국외 논문에서 토양 내 PFAS 검출 사례가 보고된 자료들을 수집하였으며, 미국(Johnson et al., 2022; Pepper et al., 2021; Brusseau et al., 2020; Nickerson et al., 2020; Xiao et al., 2015; Anderson et al., 2016; Strynar et al., 2012), 캐나다(Liu et al., 2021), 호주(Bräunig et al., 2019), 중국(Gan et al., 2022; Ma et al., 2022; Wang et al., 2010), 스웨덴(Mattias et al., 2022), 스페인(Navarro et al.,

Table 5. Land use-specific PFAS concentrations in worldwide soil (Gan et al., 2022; Johnson et al., 2022; Ma et al., 2022; Mattias et al., 2022; Liu et al., 2021; Pepper et al., 2021; Brusseau et al., 2020; Nickerson et al., 2020; Shigei et al., 2020; Bräunig et al., 2019; Anderson et al., 2016; Navarro et al., 2016; Xiao et al., 2015; García-Valcárcel et al., 2012; Strynar et al., 2012; Wang et al., 2010)

	Firefighting Site		Industrial Area		Landfill		Residential Land	
Compounds	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA
Number of data (EA)	52	52	3	3	16	16	32	34
Maximum Conc. (ng/g)	13,400	25.7	2,583	16.9	55.0	10.3	6.1	0.1
Minimum Conc. (ng/g)	2.1	287	0	50.1	0	136	0.5	0.5
Average Conc. (ng/g)	801.4	0.1	861.0	0.3	7.9	0.1	1.2	0.1

2016; García-Valcárcel et al., 2012), 요르단(Shigei et al., 2020), 멕시코 및 일본(Strynar et al., 2012) 지역의 화재 현장, 주거지역, 산업 용지, 매립지 등에서 PFAS를 검출한 자료를 수집 활용하였다.

국내 토양 내 PFAS을 중심으로 다룬 학술자료는 거의 없으며, 대신 공공데이터 포털(<https://www.data.go.kr/>)을 통하여 관련 자료를 수집하였다. 한국환경공단에서는 2008년부터 다양한 환경 조건에 존재하는 잔류성 유기오염물질을 모니터링하고 있으며, 본 논문에서는 최근 10년 잔류성유기오염물질 측정망 운영 결과(2014~2023년도)의 자료를 수집하였다. 전국의 토양 측정 지점은 61개소이며, 측정 지점의 용도는 공원(10개소), 공장용지(13개소), 농지(2개소), 대지(6개소), 임야(21개소), 학교용지(9개소)로 구분되었다. PFOS는 2014년도부터 자료가 제공되었으며, PFOA는 2015년부터 측정된 자료가 제공되고 있었다. 토양 내 과불화화합물의 농도는 ng/g 단위로 수집 후 log를 취한 값을 그래프에 나타냈다. 박스 플롯(box plot)으로 표현된 그래프에서는 아래부터 최소값, 제1사분위수, 중앙값, 제3사분위수, 최대값을 나타내며, 그래프 밖의 데이터는 이상점 및 극단점을 의미한다.

5.2. 국외 토양 내 PFAS 검출 현황

9개 국가의 105개의 데이터 세트에서 총 13종의 PFAS(PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUdA, PFDoA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS)가 측정되었으며, 그 분포는 Fig. 1과 같다. 그 중의 대다수는 PFOA(105개) 및 PFOS(103개)를 포함한 데이터 세트를 보고하였다. 다른 물질들은 70% 미만의 데이터 세트가 확인되었다(PFHxA(72개), PFHxS(59개), 나머지는 34개(32.4%) 이하). PFCAs 물질 중에서 단쇄 PFAS에 해당하는 PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA의 평균농도(범위)는 각각 2.5 ng/g(0.1~11.0 ng/g), 4.4 ng/g(0~16.8 ng/g), 4.8 ng/g(0.1~68.4 ng/g), 1.6 ng/g(0~11.0 ng/g)으로 값이 검출되

었으며, 장쇄 PFAS 물질인 PFOA, PFNA, PFDA, PFUdA, PFDoA 물질들은 17.2 ng/g(0.1~287.0 ng/g), 1.9 ng/g(0~12.0 ng/g), 2.1 ng/g(0~26.0 ng/g), 0.7 ng/g(0~3.0 ng/g), 1.2 ng/g(0~6.2 ng/g) 검출되었다. PFASs 물질 중 단쇄 PFAS에 해당하는 PFBS, PFHxS의 평균농도(범위)는 3.9 ng/g(0~39.0 ng/g), 16.7 ng/g(0~450 ng/g)으로 검출되었으며, 장쇄 PFAS인 PFOS, PFDS의 농도는 498.6 ng/g(0~13,400 ng/g), 39.8 ng/g(0.2~329.6 ng/g)으로 측정되었다. PFOA와 PFOS의 농도가 다른 물질과 비교하여 상대적으로 높게 검출되었다.

PFOS 및 PFOA를 용도별(화재 현장, 산업 용지, 매립지, 주거지역)로 구분하여 데이터를 분석하였다(Table 5). PFOS는 화재 현장(52개 데이터), 산업 용지(3개 데이터), 매립지(16개 데이터), 주거지역(32개 데이터)에서의 PFOS는 최대 13,400 ng/g, PFOA는 최대 287 ng/g 수준까지 보고되었으며, 특히 화재 현장과 산업 용지에서 고농도로 검출되었다.

5.3. 국내 토양 내 PFAS 검출 현황

국내 토양 모니터링 지점 61개소 중 PFOS 및 PFOA는 연도별로 최대 11개소 및 16개소에서 검출되었으며, 최대 75.8 ng/g 및 3.2 ng/g 수준으로 각각 보고되었다(Fig. 2). 부지 용도별로는 농지에서는 거의 검출되지 않았으며, 공원, 대지, 임야, 학교용지보다 공장용지에서 가장 높은 농도가 확인되었다(Table 6). 모니터링 결과는 평균적으로 수 ng/g 이하 수준으로 다양한 용지에서 고르게 검출되었으며, PFAS 오염이 의심되는 화재 현장, 군부대 주변 등을 조사하면 더 많은 오염 부지의 확인이 가능할 것으로 예상된다.

국내외에서 토양 내 PFAS의 오염이 다양한 용도 지역에서 광범위하게 발생하고 있으며, 특히 화재 현장, 산업 용지, 매립지 등에서 높은 농도가 반복적으로 보고되고 있다. 해외 연구에서는 PFOS와 PFOA가 가장 빈번하게 검출되며, 일부 지역에서는 수천 ng/g에 달하는 고농도 오염 토양도 확인되고 있다. 반면, 국내의 경우에는 아직

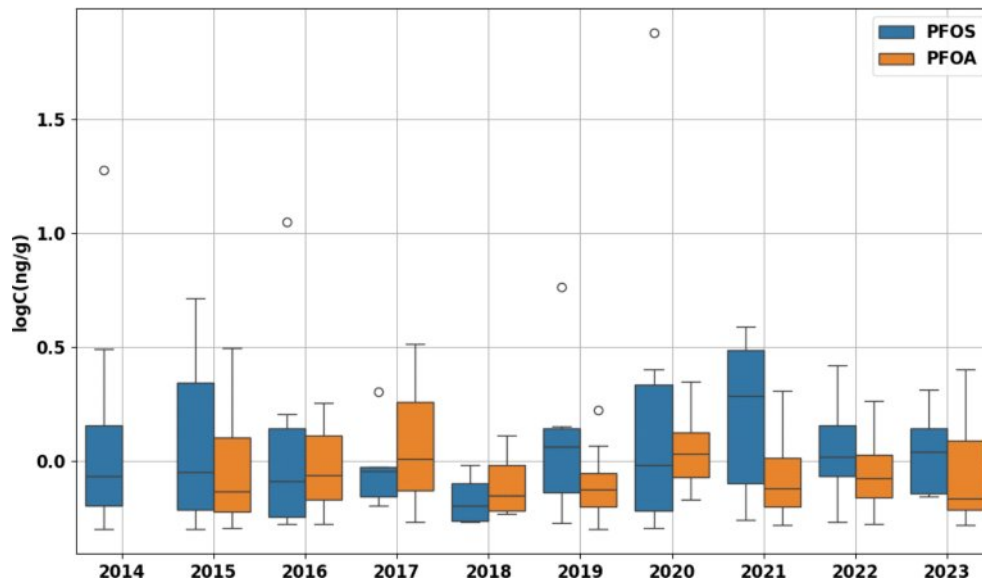


Fig. 2. Annual PFAS concentrations in South Korea soil (Korea Environment Corporation, 2014~2023).

Table 6. Land use-specific PFAS concentrations in South Korea soil (Korea Environment Corporation, 2014~2023)

	Park		Industrial Area		Agricultural Land		Residential Land		Forest Land		Educational Land	
Compounds	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA
Number of data (EA)	18	20	47	22	-	-	1	4	9	36	4	2
Maximum Conc. (ng/g)	2.0	3.1	75.8	3.2	-	-	0.5	1.1	1.3	2.5	19.0	0.8
Minimum Conc. (ng/g)	0.5	0.5	0.5	0.6	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
Average Conc. (ng/g)	0.8	0.9	1.5	0.9	-	-	0.5	0.7	0.8	0.9	1.6	0.6

관련 연구가 부족한 실정이며, 공공 데이터 기반의 환경 모니터링 자료를 통해 제한적인 범위에서만 PFAS 분포를 확인할 수 있었다. 특히 국내 자료에서도 공장용지, 학교 용지, 임야 등 다양한 토양에서 PFAS가 검출되고 있어, 향후 보다 체계적인 조사 지점 확대와 고위험 지역에 대한 정밀 모니터링이 필요하다. 이러한 자료들은 향후 국내 PFAS 관리 및 규제 기준 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 잠재적인 오염 지역의 조기 발굴과 효과적인 정화 전략 수립에 중요한 역할을 할 것이다.

6. PFAS 오염 토양의 정화 기술

PFAS의 정화기술은 토양으로부터 분리하는 기술과 PFAS를 분해하는 기술로 나누어 볼 수 있으며, 주요 연구 결과는 Table 7과 같다.

6.1. PFAS 분리 정화 기술

분리 기술은 토양 내 존재하는 PFAS를 액상으로 이동

시키거나 식물 및 흡착제로 이동시켜서 토양 내 PFAS를 줄이는 데 목적이 있으며, 토양세척법, 식물정화법, 흡착제 적용 등이 대표적이다. 토양세척법(Soil washing)은 유기 용매나 킬레이트제 등을 세척제로 적용하여 PFAS를 토양 입자로부터 용출시킨 후, 세척액을 회수하여 처리하는 방식으로 적용되는 기술이다. PFAS의 사슬 길이와 전하 상태에 따라 세척제의 선택이 중요하며, 양이온성 계면활성제는 음전하를 띠는 토양과 결합하여 PFAS의 용출을 촉진할 수 있다(Tang et al., 2017). Munoz et al.(2018)의 연구 결과에 따르면, 메탄올에 아세트산 암모늄을 400 mM 첨가한 용액을 세척액으로 사용할 경우 86종의 PFASs가 대부분 분리되는 것을 확인하였으며, Tang et al.(2017)은 옥살산 이온을 이용한 장시간 세척을 통하여 약 80%의 PFOS가 분리되는 것을 보고하였다.

식물정화법(Phytoremediation)은 식물을 이용하여 유해한 오염물질을 식물의 뿌리, 줄기 및 열매로 흡수시켜서 정화하는 방법이다. Krippner et al.(2015)은 옥수수 뿌리를 이용하여 토양 내 PFAS의 이동을 살펴본 연구를 수행한 바

Table 7. PFAS remediation technologies in soil environment

Processes	Experimental conditions	Pollutant		Soil (g)	Liquid (mL)	Time	Removal efficiency	References
		Target	Initial Concentration (ng/g)					
Separation								
Soil washing	Methanol + CH ₃ COONH ₄ 400 mM	86 PFAS	106-8,200	1	4	15.5 min (0.5 min (vortexing) + 10 min (sonication) + 5 min (5000 rpm))	Normalized responses 85–110%	Munoz et al., 2018
	Na ₂ C ₂ O ₄ 100 mM 250 rpm	PFOS	200	1	10	18 hrs	78%	Tang et al., 2017
Phytoremediation	Zea mays	10 PFAAs	100,000	12,000	-	24 d	kernel (<1%) « straw	Krippner et al., 2015
Adsorption	Activated carbon 3%	PFOS	42.4	90	900	10 d (8 d (shaker) + 2 d (settle))	99%	Hale et al., 2017
	Biochar 5%	22 PFAS	1,200	40	400	16 d (14 d(100 rpm) + 2d (settle))	> 90%	Sormo et al., 2021
Degradation								
Thermal treatment	500°C	13 PFAS	2.2-79 (nmol/g)	-	-	30 min	> 99%	Alinezhad et al., 2022
Mechanochemical method	Cylindrical burundum 988 g 80 rpm	PFOS	580	78.6	19.6	3 hrs	81%,	Battye et al., 2022
Hydrothermal method	350°C NaOH 5M	148 PFAS	1,270-65,800	0.5	3	1.5 hrs	> 95%	Hao et al., 2022
Sonochemical method	20 kHz+43 kHz Na ₂ S ₂ O ₈ 5 g	14 PFAS	87	20	1,000	6 hrs	71%	Lei et al., 2020
Electrochemical method	Anode/Cathode: Ti/Ir ₂ O ₅ 24V	PFOA	10,000	500	364	10 d	PFOA: 52%, PFOS: 33%	Hou et al., 2022

있으며, 단쇄 PFAS 물질이 장쇄 PFAS 물질보다 줄기 및 옥수수씨에 더 많이 이동하였다고 보고하였다.

흡착법(Adsorption)은 PFAS를 흡착제에 결합해서 침출 가능성을 억제함으로써 이차 확산을 막을 수 있다. 대표적인 흡착제로는 활성탄(Activated Carbon)이 있으며, 다공성 구조와 비극성 표면을 가지고 있다. Hale et al.(2017)에 따르면, 토양 3% 비율의 활성탄을 적용하여 장시간 흡착을 적용하면 99%의 흡착능을 보인다. 최근에는 바이오차(Biochar)를 흡착제로 활용한 연구가 지속적으로 발표되고 있다. 바이오차는 유기성 폐기물을 산소가 차단된 조건에서 고온을 가하여 제조할 수 있으며, 다양한 작용기 (-OH, -COOH 등)와 다양한 공극 형태를 갖추고 있다. Sormo et al.(2021)의 연구 결과에 따르면 토양 대비 5%의 바이오차를 14일간 반응시켜 22종의 PFAS를 90% 이상을 흡착할 수 있다.

6.2. PFAS 분해 정화 기술

PFAS를 무기화할 수 있는 다양한 분해 기술이 개발되고 있으며, 그중 대표적인 기술은 열분해법, 기계화학법, 수열처리법, 초음파화학법, 전기화학법 등이 있다. 열분해법

(Thermal treatment)은 고온의 열을 이용하여 C-F 결합을 파괴하고 무기물로 전환하는 방식으로 PFAS의 무기화에 유리하지만, 고온에서의 처리 시 CF₄, HF 등 독성 가스가 발생할 수 있다. Alinezhad et al.(2022)의 연구 결과에 따르면, 500°C의 열을 30분간 가할 때 99% 이상의 제거를 유도할 수 있다고 보고한 바 있다.

기계화학법(Mechanochemical method)은 볼 밀링과 같은 장비를 활용하여 기계적 충격 및 발생하는 고에너지를 활용하여 오염물질을 분해하는 방식이다. Battye et al.(2022)의 연구 결과에 따르면, 원통형 합성산화물을 입자성 물질로 적용하여 80 rpm으로 3일간 반응시켜 PFOS를 81% 감소시켰으며, 하석모래에 6:2 FTS, AFFF를 오염시킨 뒤 각각 97%, 91% 저감시켰다.

수열처리법(Hydrothermal method)은 토양을 고온고압의 조건을 가하여 오염물질의 분해를 유도하는 방법이다. Hao et al.(2022)의 연구에서는 수열처리법 적용 결과를 최초로 적용하였다. 주요 연구 결과는 5M의 수산화나트륨 용액에 오염 토양을 넣고 350°C 조건에서 90분간 반응시켜서 95% 이상의 PFAS가 줄어든 것이다.

초음파화학법(Sonochemical method)은 초음파 조사 시

발생하는 캐비테이션 효과를 이용하여 오염물질을 줄이는 방법이며, 토양을 대상으로 한 연구 결과는 아직 많지 않다. Lei et al.(2020)은 20 kHz와 43 kHz의 초음파 장비를 활용하여 과황산염을 활성화시킴과 동시에 초음파 발생 시 나타나는 캐비테이션 현상을 활용하여 14 종의 PFAS를 분해하는 연구 결과를 발표하였다. 6시간 조사 시 PFAS가 약 71%의 저감되었다. 열을 이용한 과황산염 활성화 기술을 활용할 경우, PFOS는 거의 감소하지 않는다고 보고된 바 있으며(Park et al., 2016), PFAS 분해를 위한 초음파 기술의 적용을 위해서는 후속 연구가 필요하다.

전기화학적 처리법(Electrochemical method)은 습윤 토양에 전극을 설치하여 전류를 흐르게 함으로써 직접 또는 간접적으로 PFAS를 분해하는 기술이다. Hou et al.(2022)은 $\text{Ti/Ir}_2\text{O}_5$ 전극을 이용하여 토양 내 PFOA 및 PFOS를 10일간 52% 및 33% 저감할 수 있다는 연구 결과를 발표한 바 있으며, 토양 내 PFAS 정화 기술로서의 적용 가능성을 확인하였다.

최근 단독 기술을 이용하는 방법뿐만 아니라 토양 세척 후 흡착제를 적용하거나 전기동역학적 기술의 적용 후 흡착제를 이용하여 포집하는 방식들이 연구되고 있으며(Bolan et al., 2021), 처리 후 토양의 재사용 가능성과 생태 독성에 대한 평가에 대한 중요성이 커지고 있다. 일부 PFAS 제거 기술은 토양의 구조적 변화나 영양성분 손실을 유발할 수 있으므로, 정화 후 토양의 재활용성을 고려한 후처리 공정의 연구 및 복원 계획 등이 병행되어야 할 것이다.

7. 결 론

과불화화합물(PFAS)은 C-F 결합의 높은 안정성으로 인해 자연적으로 거의 분해되지 않는 인공 화학물질로, 토양과 지하수에 장기간 잔류하며 환경과 인체 건강에 심각한 영향을 미친다. 주요 유입원으로는 소방용 폼, 하수처리장 슬러지 및 방류수, 매립지 침출수, 대기 침착 등이 있으며, 특히 장쇄 PFAS는 토양에 흡착되고 단쇄 PFAS는 지하수로 이동하기 쉬운 특성을 가진다. 국외에서는 미국, 캐나다, 덴마크, 네덜란드 등을 중심으로 PFOA와 PFOS를 포함한 다양한 PFAS에 대해 ng/g 또는 ng/L 수준의 엄격한 농도 기준을 마련하고 있다. 반면 국내는 아직 토양 및 지하수 내 PFAS에 대한 법적 규제가 부재하며, 공공 데이터 기반의 모니터링만이 일부 수행되고 있다. 정화 기술은 PFAS를 토양에서 분리하거나 분해하는 방식으로 구분되며, 토양 세척, 식물정화, 흡착 등의 분리 기술과 열분해, 기계화학, 수열처리, 초음파, 전기화학 등의 분해 기술이

연구되고 있다. 기술 간 융합, 토양의 재활용 가능성 평가, 생태 독성 저감 등을 고려한 통합적 접근이 필요하며, 향후 국내 실정에 맞는 규제 기준 수립과 정밀 모니터링, 효과적인 정화 기술 개발이 시급하다.

사 사

본 연구는 2025년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원 체계(RISE)-아이디어 창업밸리의 지원 및 과학기술정보통신부 한국연구재단의 지원(RS-2024-00350023)을 받아 수행된 결과입니다.

약 어

PFPrA	= perfluoropropanoic acid (C3)
PFBA	= perfluorobutyric acid (C4)
PFBS	= perfluorobutane sulfonic acid (C4)
PFPeA	= perfluoropentanoic acid (C5)
PFHxS	= perfluorohexane sulfonic acid (C6)
PFHxA	= perfluorohexanoic acid (C6)
PFHpA	= perfluoroheptanoic acid (C7)
PFHpS	= perfluoroheptane sulfonic acid (C7)
PFOA	= perfluorooctanoic acid (C8)
PFOS	= perfluorooctane sulfonic acid (C8)
PFNA	= perfluorononanoic acid (C9)
PFDA	= perfluorodecanoic acid (C10)
PFDS	= perfluorodecane sulfonic acid (10)
PFUnDA	= perfluoroundecanoic acid (C11)
PFDoDA	= perfluorododecanoic acid (C12)
PFTTrDA	= perfluorotridecanoic acid (C13)
PFTeDA	= perfluorotetradecanoic acid (C14)
PFOSA	= perfluorooctane sulfonamide (C8)
6:2 FTS	= 6:2 Fluorotelomer sulfonate
8:2 FTS	= 8:2 Fluorotelomer sulfonate
Gen-X	= ammonium salt of hexafluoropropylene oxide dimer acid (HFPO-DA)
CIPFPECAs	= chloroperfluoropolyether carboxylates

References

- Ahrens, L., Hedlund, J., Dürig, W., Troger, R., and Wiberg, K., 2016, Screening of PFASs in groundwater and surface water, *Institutionen för Vatten Och Miljö*, SLU.
- Ahrens, L., Shoeib, M., Harner, T., Lee, S.C., Guo, R., and

- Reiner, E.J., 2011, Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere, *Environ. Sci. Technol.*, **45**(19), 8098-8105.
- Alinezhad, A., Challa Sasi, P., Zhang, P., Yao, B., Kubátová, A., Golovko, S.A., Golovko, M.Y., and Xiao, F., 2022, An investigation of thermal air degradation and pyrolysis of per-and polyfluoroalkyl substances and aqueous film-forming foams in soil, *Acs EST. Eng.*, **2**(2), 198-209.
- Anderson, R.H., Long, G.C., Porter, R.C., and Anderson, J.K., 2018, Occurrence of select perfluoroalkyl substances at US Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire-training areas: Field-validation of critical fate and transport properties, *Perfluoroalkyl Substances in the Environment*, CRC Press, Chapter 15.
- Battye, N.J., Patch, D.J., Roberts, D.M., O'Connor, N.M., Turner, L.P., Kueper, B.H., Hulley, M.E., and Weber, K.P., 2022, Use of a horizontal ball mill to remediate per-and polyfluoroalkyl substances in soil, *Sci. Total Environ.*, **835**, 155506.
- Becker, A.M., Gerstmann, S., and Frank, H., 2008, Perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in the sediment of the Roter Main river, Bayreuth, Germany, *Environ. Pollu.*, **156**(3), 818-820.
- Bolan, N., Sarkar, B., Yan, Y., Li, Q., Wijesekara, H., Kannan, K., Tsang, D.C.W., Schauerte, M., Bosch, J., Noll, H., Ok, Y.S., Scheckel, K., Kumpiene, J., Gobindlal, K., Kah, M., Sperry, J., Kirkham, M.B., Wang, H., Tsang, T.F., Hou, D., and Rinklebe, J., 2021, Remediation of poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS) contaminated soils—to mobilize or to immobilize or to degrade?, *J. Hazard. Mat.*, **401**, 123892.
- Botelho, J.C., Kato, K., Wong, L.Y., and Calafat, A.M., 2025, Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure in the US population: NHANES 1999-March 2020, *Environ. Res.*, **270**, 120916.
- Bräunig, J., Baduel, C., Barnes, C.M., and Mueller, J.F., 2019, Leaching and bioavailability of selected perfluoroalkyl acids (PFAAs) from soil contaminated by firefighting activities, *Sci. Total Environ.*, **646**, 471-479.
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K.G., and Valentin, I., 2023, PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites, *Environ. Sci. Eur.*, **35**(1), 1-50.
- Brusseau, M.L., Anderson, R.H., and Guo, B., 2020, PFAS concentrations in soils: background levels versus contaminated sites, *Sci. Total Environ.*, **740**, 140017.
- Chen, H., Zhang, C., Yu, Y., and Han, J., 2012, Sorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on marine sediments, *Mar. Pollut. Bull.*, **64**(5), 902-906.
- Chen, H., Zhang, L., Li, M., Yao, Y., Zhao, Z., Munoz, G., and Sun, H., 2019, Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in precipitation from mainland China: contributions of unknown precursors and short-chain (C2C3) perfluoroalkyl carboxylic acids, *Water Res.*, **153**, 169-177.
- Cousins, I.T., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Miller, M., Ng, C.A., Patton, S., Scheringer, M., Trier, X., Vierke, L., Wang, Z., and Dewitt, J.C., 2019, The concept of essential use for determining when uses of PFASs can be phased out, *Environ. Sci. Process. Impacts*, **21**, 1803-1815.
- D'Ambro, E.L., Pye, H.O., Bash, J.O., Bowyer, J., Allen, C., Efstathiou, C., Gilliam, R.C., Reynolds, L., Talgo, K., and Murphy, B.N., 2021, Characterizing the air emissions, transport, and deposition of per-and polyfluoroalkyl substances from a fluoropolymer manufacturing facility, *Environ. Sci. Technol.*, **55**(2), 862-870.
- Darlington, R., Barth, E., and McKernan, J., 2018, The challenges of PFAS remediation, *The Military Engineer*, **110**(712), 58-60.
- Del Vento, S., Halsall, C., Gioia, R., Jones, K., and Dachs, J., 2012, Volatile per-and polyfluoroalkyl compounds in the remote atmosphere of the western antarctic peninsula: an indirect source of perfluoroalkyl acids to antarctic waters?, *Atmos. Pollut. Res.*, **3**(4), 450-455.
- Eschauzier, C., Raat, K.J., Stuyfzand, P.J., and De Voogt, P., 2013, Perfluorinated alkylated acids in groundwater and drinking water: identification, origin and mobility, *Sci. Total Environ.*, **458-460**, 477-485.
- Gallen, C., Drage, D., Kaserzon, S., Baduel, C., Gallen, M., Banks, A., Broomhall, S., and Mueller, J.F., 2016, Occurrence and distribution of brominated flame retardants and perfluoroalkyl substances in Australian landfill leachate and biosolids, *J. Hazard. Mater.*, **312**, 55-64.
- Gan, C., Peng, M., Liu, H., and Yang, J., 2022, Concentration and distribution of metals, total fluorine, per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in vertical soil profiles in industrialized areas, *Chemosphere*, **302**, 134855.
- García-Valcárcel, A.I., Miguel, E., and Tadeo, J.L., 2012, Determination of ten perfluorinated compounds in sludge amended soil by ultrasonic extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Anal. Methods*, **4**(8), 2462-2468.
- Gauthier, S.A. and Mabury, S.A., 2005, Aqueous photolysis of 8:2 fluorotelomer alcohol. *Environ. Toxicol. Chem.*, **24**(8), 1837-1846.
- Gewurtz, S.B., Bradley, L.E., Backus, S., Dove, A., McGoldrick, D., Hung, H., and Dryfhout-Clark, H., 2019, Perfluoroalkyl acids in great lakes precipitation and surface water (2006-2018) indicate response to phase-outs, regulatory action, and variability in fate and transport processes, *Environ. Sci. Tech-*

nol., **53**(15), 8543-8552.

Guelfo, J.L. and Higgins, C.P., 2013, Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-Impacted sites, *Environ. Sci. Technol.*, **47**(9), 4164-4171.

Hale, S.E., Arp, H.P.H., Slinde, G.A., Wade, E.J., Bjørseth, K., Breedveld, G.D., Straith, B.F., Moe, K.G., Jartun, M., and Høisæter, Å., 2017, Sorbent amendment as a remediation strategy to reduce PFAS mobility and leaching in a contaminated sandy soil from a Norwegian firefighting training facility, *Chemosphere*, **171**, 9-18.

Hao, S., Choi, Y.J., Deeb, R.A., Strathmann, T.J., and Higgins, C.P., 2022, Application of hydrothermal alkaline treatment for destruction of per-and polyfluoroalkyl substances in contaminated groundwater and soil, *Environ. Sci. Technol.*, **56**(10), 6647-6657.

Higgins, C.P., Field, J.A., Criddle, C.S., and Luthy, R.G., 2005, Quantitative determination of perfluorochemicals in sediments and domestic sludge, *Environ. Sci. Technol.*, **39**(11), 3946-3956.

Hou, J., Li, G., Liu, M., Chen, L., Yao, Y., Fallgren, P.H., and Jin, S., 2022, Electrochemical destruction and mobilization of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in saturated soil, *Chemosphere*, **287**(3), 132205.

Houtz, E.F. and Sedlak, D.L., 2012, Oxidative conversion as a means of detecting precursors to perfluoroalkyl acids in urban runoff, *Environ. Sci. Technol.*, **46**(17), 9342-9349.

Houtz, E.F., Higgins, C.P., Field, J.A., and Sedlak, D.L., 2013, Persistence of perfluoroalkyl acid precursors in AFFF-impacted groundwater and soil, *Environ. Sci. Technol.*, **47**(15), 8187-8195.

ITRC, 2023, PFAS Technical and Regulatory Guidance Document, <https://pfas-1.itrcweb.org> [accessed 25.07.05]

ITRC, 2025, PFAS Fact Sheets, <https://pfas-1.itrcweb.org/fact-sheets> [accessed 25.07.05]

Johnson, G.R., 2022, PFAS in soil and groundwater following historical land application of biosolids, *Water Res.*, **211**, 118035.

Knutsen, H., Mæhlum, T., Haarstad, K., Slinde, G.A., and Arp, H.P.H., 2019, Leachate emissions of short- and long-chain per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from various Norwegian landfills, *Environ. Sci. Process. Impacts*, **21**, 1970-1979.

Korea Environment Corporation, 2014~2023, Monitoring data on POPs from national environmental surveillance, <https://www.data.go.kr/data/15070345/fileData.do> [accessed 25.07.05]

Krause, M.J., Thoma, E., Sahle-Damesessie, E., Crone, B., Whitehill, A., Shields, E., and Gullett, B., 2022, Supercritical water oxidation as an innovative technology for PFAS destruction, *J. Environ. Eng.*, **148**(2), 05021006.

Krippner, J., Falk, S., Brunn, H., Georgii, S., Schubert, S., and Stahl, T., 2015, Accumulation potentials of perfluoroalkyl car-

boxylic acids (PFCAs) and perfluoroalkyl sulfonic acids (PFASs) in maize (*Zea mays*), *J. Agric. Food Chem.*, **63**(14), 3646-3653.

Lang, J.R., Allred, B.M., Field, J.A., Levis, J.W., and Barlaz, M.A., 2017, National estimate of per-and polyfluoroalkyl substance (PFAS) release to US municipal landfill leachate, *Environ. Sci. Technol.*, **51**(4), 2197-2205.

Lei, Y.J., Tian, Y., Sobhani, Z., Naidu, R., and Fang, C., 2020, Synergistic degradation of PFAS in water and soil by dual-frequency ultrasonic activated persulfate, *Chem. Eng. J.*, **388**, 124215.

Lindstrom, A.B., Strynar, M.J., Delinsky, A.D., Nakayama, S.F., McMillan, L., Libelo, E.L., Neill, M., and Thomas, L., 2011, Application of WWTP biosolids and resulting perfluorinated compound contamination of surface and well water in Decatur, Alabama, USA, *Environ. Sci. Technol.*, **45**(19), 8015-8021.

Liu, Y., Blowes, D.W., Ptacek, C.J., and Groza, L.G., 2019, Removal of pharmaceutical compounds, artificial sweeteners, and perfluoroalkyl substances from water using a passive treatment system containing zero-valent iron and biochar, *Sci. Total Environ.*, **691**, 165-177.

Liu, M., Munoz, G., Vo Duy, S., Sauvé, S., and Liu, J., 2021, Per-and polyfluoroalkyl substances in contaminated soil and groundwater at airports: a Canadian case study, *Environ. Sci. Technol.*, **56**(2), 885-895.

Loganathan, N. and Wilson, A.K., 2022, Adsorption, structure, and dynamics of short-and long-chain PFAS molecules in kaolinite: molecular-level insights, *Environ. Sci. Technol.*, **56**(12), 8043-8052.

Ma, D., Zhong, H., Lv, J., Wang, Y., and Jiang, G., 2022, Levels, distributions, and sources of legacy and novel per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the topsoil of Tianjin, China, *J. Environ. Sci.*, **112**, 71-81.

Mattias, S., Kikuchi, J., Wiberg, K., and Lutz, A., 2022, Spatial distribution and load of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden, *Chemosphere*, **295**, 133944.

McDonough, J.T., Anderson, R.H., Lang, J.R., Liles, D., Matteson, K., and Olechiw, T., 2021, Field-scale demonstration of PFAS leachability following in situ soil stabilization, *ACS Omega*, **7**(1), 419-429.

Munoz, G., Ray, P., Mejia-Avendano, S., Duy, S.V., Do, D.T., Liu, J., and Sauvé, S., 2018, Optimization of extraction methods for comprehensive profiling of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam impacted soils, *Anal. Chim. Acta.*, **1034**, 74-84.

Navarro, I., de la Torre, A., Sanz, P., Pro, J., Carbonell, G., and de los Ángeles Martínez, M., 2016, Bioaccumulation of emerging organic compounds (perfluoroalkyl substances and halogenated flame retardants) by earthworm in biosolid amended soils,

Environ. Res., **149**, 32-39.

Nickerson, A., Maizel, A.C., Kulkarni, P.R., Adamson, D.T., Kornuc, J.J., and Higgins, C.P., 2020, Enhanced extraction of AFFF-associated PFASs from source zone soils, *Environ. Sci. Technol.*, **54**(8), 4952-4962.

OECD, 2013, Synthesis paper on per and polyfluorinated chemicals, https://www.oecd.org/en/publications/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals_0bc75123-en.html [accessed 25.07.05]

Park, S., Lee, L.S., Medina, V.F., Zull, A., and Waisner, S., 2016, Heat-activated persulfate oxidation of PFOA, 6: 2 fluorotelomer sulfonate, and PFOS under conditions suitable for in-situ groundwater remediation, *Chemosphere*, **145**, 376-383.

Pepper, I.L., Brusseau, M.L., Prevatt, F.J., and Escobar, B.A., 2021, Incidence of PFAS in soil following long-term application of class B biosolids, *Sci. Tot. Environ.*, **793**, 148449.

Prevedouros, K., Cousins, I.T., Buck, R.C., and Korzeniowski, S.H., 2006, Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates, *Environ. Sci. Technol.*, **40**(1), 32-44.

Schultz, M.M., Higgins, C.P., Huset, C.A., Luthy, R.G., Barofsky, D.F., and Field, J.A., 2006, Fluorochemical mass flows in a municipal wastewater treatment facility, *Environ. Sci. Technol.*, **40**(23), 7350-7357.

Schymanski, E.L., Zhang, J., Thiessen, P.A., Chirsir, P., Kondic, T., and Bolton, E.E., 2023, Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. *Environ. Sci. Technol.*, **57**(44), 16918-16928.

Sepulvado, J.G., Blaine, A.C., Hundal, L.S., and Higgins, C.P., 2011, Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids, *Environ. Sci. Technol.*, **45**(19), 8106-8112.

Shigei, M., Ahrens, L., Hazaymeh, A., and Dalahmeh, S.S., 2020, Per- and polyfluoroalkyl substances in water and soil in wastewater-irrigated farmland in Jordan, *Sci., Total Environ.*, **716**, 137057.

Shimizu, M.S., Mott, R., Potter, A., Zhou, J., Baumann, K., Surratt, J.D., Turpin, B., Avery, G.B., Harfinann, J., and Kieber, R.J., 2021, Atmospheric deposition and annual flux of legacy perfluoroalkyl substances and replacement perfluoroalkyl ether carboxylic acids in Wilmington, NC, USA, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **8**(5), 366-372.

Sinclair, E. and Kannan, K., 2006, Mass loading and fate of perfluoroalkyl surfactants in wastewater treatment plants, *Environ. Sci. Technol.*, **40**(5), 1408-1414.

Singh, R.K., Brown, E., Thagard, S.M., and Holsen, T.M., 2021, Treatment of PFAS-containing landfill leachate using an enhanced contact plasma reactor, *J. Hazard. Mater.*, **408**, 124452.

Sörmo, E., Silvani, L., Bjerkli, N., Hagemann, N., Zimmerman, A.R., Hale, S.E., Hansen, B.H., Hartnik, T., and Cornelissen, G., 2021, Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar, *Sci. Total Environ.*, **763**, 144034.

Strynar, M.J., Lindstrom, A.B., Nakayama, S.F., Egeghy, P.P., and Helfant, L.J., 2012, Pilot scale application of a method for the analysis of perfluorinated compounds in surface soils, *Chemosphere*, **86**(3), 252-257.

Sun, H., Gerecke, A.C., Giger, W., and Alfredo, A.C., 2010, Long-chain perfluorinated chemicals in digested sewage sludges in Switzerland, *Environ. Pollut.*, **159**(2), 654-662.

Tang, J., Zhang, Y., Zha, Y., Li, X., and Fan, S., 2017, Oxalate enhances desorption of perfluorooctane sulfonate from soils and sediments, *Water Air Soil Pollut.*, **228**, 462.

USEPA, 2017, Technical Fact Sheet – Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA), https://19january2021snapshot.epa.gov/fedfac/technical-fact-sheet-perfluorooctane-sulfonate-pfos-and-perfluorooctanoic-acid-pfoa-0_.html [accessed 25.07.05]

USEPA, 2022, Lifetime Drinking Water Health Advisories for Four Perfluoroalkyl Substances, <https://www.federalregister.gov/documents/2022/06/21/2022-13158/lifetime-drinking-water-health-advisories-for-four-perfluoroalkyl-substances> [accessed 25.07.05]

USEPA, 2024, Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables, <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables> [accessed 25.07.05]

USEPA, 2025, Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation, <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas> [accessed 25.07.05]

USEPA, 2024, TSCA Section 8(a)(7) Reporting and Record-keeping Requirements for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances, <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/tsca-section-8a7-reporting-and-recordkeeping> [accessed 25.07.05]

Venkatesan, A.K. and Halden, R.U., 2013, National inventory of perfluoroalkyl substances in archived US biosolids from the 2001 EPA national sewage sludge Survey, *J. Hazard. Mater.*, **252-253**, 413-418.

Wang, Y., Fu, J., Wang, T., Liang, Y., Pan, Y., Cai, Y., and Jiang, G., 2010, Distribution of perfluorooctane sulfonate and other perfluorochemicals in the ambient environment around a manufacturing facility in China, *Environ. Sci. Technol.*, **44**(21), 8062-8067.

Wang, Y., Kim, J., Huang, C.H., Hawkins, G., Li, K., Chen, Y., and Huang, Q., 2022, Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances in water: A review, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, **8**(6), 1136-1151.

- Washington, J.W., Yoo, H., Ellington, J.J., Jenkins, T.M., and Libelo, E.L., 2010, Concentrations, distribution, and persistence of perfluoroalkylates in sludge-applied soils near Decatur, Alabama, USA, *Environ. Sci. Technol.*, **44**(22), 8390-8396.
- Webster, E. and Ellis, D.A., 2010, Potential role of sea spray generation in the atmospheric transport of perfluorocarboxylic acids, *Environ. Toxicol. Chem.*, **29**(8), 1703-1708.
- Webster, E.M. and Ellis, D.A., 2012, Understanding the atmospheric measurement and behavior of perfluorooctanoic acid, *Environ. Toxicol. Chem.*, **31**(9), 2041-2046.
- WHO, 2023, IARC Monographs evaluate the carcinogenicity of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS), <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-monographs-evaluate-the-carcinogenicity-of-perfluorooctanoic-acid-pfoa-and-perfluorooctanesulfonic-acid-pfos> [accessed 25.07.05]
- Wong, F., Shoeib, M., Katsoyiannis, A., Eckhardt, S., Stohl, A., Bohlin-Nizzetto, P., Li, H., Fellin, P., Su, Y., and Hung, H., 2018, Assessing temporal trends and source regions of perand polyfluoroalkyl substances (PFASs) in air under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), *Atmos. Environ.*, **172**, 65-73.
- Xiao, F., Simcik, M.F., Halbach, T.R., and Gulliver, J.S., 2015, Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a US metropolitan area: migration and implications for human exposure, *Water Res.*, **72**, 64-74.
- Xie, Z., Wang, Z., Mi, W., Moller, A., Wolschke, H., and Ebinghaus, R., 2015, Neutral poly-/perfluoroalkyl substances in air and snow from the Arctic, *Sci. Rep.*, **5**, 1-6.
- Yan, H., Cousins, I.T., Zhang, C., and 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.
- Young, C.J., Furdul, V.I., Franklin, J., Koerner, R.M., Muir, D.C., and Mabury, S.A., 2007, Perfluorinated acids in arctic snow: new evidence for atmospheric formation, *Environ. Sci. Technol.*, **41**(10), 3455-3461.
- Yu, Q., Zhang, R., Deng, S., Huang, J., and Yu, G., 2009, Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: kinetic and isotherm study, *Water Res.*, **43**(4), 1150-1158.
- Zhan, J., Zhang, A., Héroux, P., Guo, Y., Sun, Z., Li, Z., Zhao, J., and Liu, Y., 2020, Remediation of perfluorooctanoic acid (PFOA) polluted soil using pulsed corona discharge plasma, *J. Hazard. Mater.*, **387**, 121688.
- Zhang, S., Lu, X., Wang, N., and Buck, R.C., 2016, Biotransformation potential of 6:2 fluorotelomer sulfonate (6:2 FTSA) in aerobic and anaerobic sediment, *Chemosphere*, **154**, 224-230.