

지하수 중 과불화화합물의 국내·외 관리동향 및 저감방법 고찰

박승환 · 윤종현 · 권종범 · 최현희 · 노성유 · 김문수 · 박선화*

국립환경과학원 환경자원연구부 토양지하수연구과

A Study on Domestic and International Management Trends and Treatment Methods of PFAS in Groundwater

Seunghwan Park, JongHyun Yoon, JongBeom Kwon, Hyeonhee Choi, Seong-Yu Noh, MoonSu Kim, and Sunhwa Park*

Soil and Groundwater Research Division Environmental Resources Research Department Environmental Research Complex, Hwangyong-ro 42, Seo-gu, Incheon 22689, Republic of Korea

ABSTRACT

PFAS (Per- and Polyfluoroalkyl Substances) are synthetic chemicals valued for their exceptional water and heat resistance, leading to widespread use in industries such as semiconductors, firefighting foams, coatings, and a variety of consumer products. However, due to their environmental persistence, low sorption to soils, and high mobility, PFAS can easily contaminate groundwater. Once ingested, they can bioaccumulate in the human body, posing risks such as carcinogenicity, reproductive toxicity, and endocrine disruption. In response to these concerns, regulatory agencies in the US, EU, Australia have tightened standards and enhanced monitoring of PFAS in drinking water and groundwater. Consequently, a range of groundwater remediation technologies has been developed, including granular activated carbon, ion exchange resins, high-pressure membranes, foam fractionation, and colloidal activated carbon. Among these, activated carbon-based methods are widely studied for their cost-effectiveness and broad applicability, utilizing hydrophobic and electrostatic adsorption mechanisms. Given the environmental persistence and health risks associated with PFAS, there is a growing need to align domestic strategies with international regulatory trends. This paper provides foundational data on PFAS properties, sources, regulations, and groundwater treatment technologies.

Key words : PFAS, Groundwater, Water regulation, PFAS removal, Granular activated carbon

1. 서 론

과불화화합물은 1938년 DuPont Company의 Roy J. Plunkett이 염화불화탄소(Chlorofluorocarbon) 냉매를 이용한 실험을 수행하던 중 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE, Polytetrafluoroethylene)으로 처음 발견하게 되었다(Science History Institute, 2017). 이후 과불화화합물은 내수성과 내

열성 등의 특성으로 소방용품, 코팅제, 포장재, 의료기기, 반도체, 화장품 등 다양한 산업 분야에서 폭넓게 사용되었다. 이러한 제반 산업에서 사용되는 과불화화합물이 다양한 수생환경에서 높은 농도로 검출되는 사례가 있어 과불화화합물의 종합적 관리가 필요하다.

또한, 과불화화합물은 높은 화학적 안정성으로 인체에서 오랜 시간 잔류하여 발암 가능성 및 생식독성, 생물축적성 및 지속성 등의 유해성을 가진다(ATSDR, 2019). 이러한 위험성 때문에 미국은 높은 수준의 기준 및 목표치를 도입하여 관리하고 있으며, 유럽연합(EU; European Union), 호주 등 세계적으로도 과불화화합물 관련 규제를 강화하고 있다.

미국 EPA(Environmental Protection Agency)는 2024년 4월 10일 국가 음용수 규정(NPDWR; National Primary

주저자: 박승환, 전문연구원

공저자: 윤종현, 전문연구원; 권종범, 전문연구원; 최현희, 전문연구원; 노성유, 연구사; 김문수, 과장

*교신저자: 박선화, 연구관

E-mail: parksu@korea.kr

Received : 2025. 06. 05 Reviewed : 2025. 06. 09

Accepted : 2025. 06. 18 Discussion until : 2025. 08. 31

Drinking Water Regulation)을 발표하였다. 먹는물 내 과불화화합물의 관리를 위해 6가지 항목에 대하여 법적 기준인 최대 오염 허용치(MCL; Maximum Contaminant Levels)와 이상적인 기준인 최대 오염 허용 목표치(MCLG; Maximum Contaminant Level Goals)를 발표하였다. 미국 ITRC(Interstate Technology and Regulatory Council)는 전 세계 및 미국 내 각 주의 지하수, 먹는물, 지표수 등에 대한 과불화화합물 기준을 정리하였다. 그 중 미국 EPA에서는 총 16개의 RSL(Regional Screening Level)기준을 설정하여 관리 중이다. 유럽연합은 2020년 6월 잔류성 유기 오염물질(POPs; Persistent Organic Pollutants)의 사용을 제한하는 현행 유럽연합 법률을 개정하는 규정 (EU) 2020/784를 발표하였으며, 먹는물 수질지침(DWD; Drinking Water Directive)을 통해 PFAS-total과 Sum of PFAS로 과불화화합물의 기준치를 설정해 관리하고 있다. PFAS-total은 과불화화합물 전체의 합을 의미하며, 대체 지표로 총 유기 불소(TOF; Total organic fluorine)를 권장하고 있다. Sum of PFAS는 지정된 20개 과불화화합물 농도의 합계를 의미한다. 호주는 FSANZ(Food Standards Australia New Zealand)에서 2017년 건강기반지침값(HBGV; Health Based Guidance Value)를 통해 용도에 따라 2가지 항목에 대하여 지침값을 발표하였으며, DOH(Department of Health and Aged Care)에서 2018년 공식적으로 해당 지침값을 지정하여 관리 중이다. 대한민국 환경부는 2018년 5월 수돗물 감시항목 기준으로 PFOS(Perfluorooctane sulfonic acid) 70 ng/L, PFOA(Perfluorooctanoic acid) 70 ng/L, PFHxS(Perfluorohexane sulfonic acid) 480 ng/L을 지정하여 관리 중이다. 또한, 지하수에서도 2022년 10월 과불화화합물 2종(PFOS, PFOA)을 수질기준 후보물질로 지정하여 관리 중에 있다.

지하수에 적용 가능한 과불화화합물 처리 방법으로 입상활성탄, 이온 교환 수지, 고압 멤브레인, 거품 분리, 콜로이드 활성탄이 있다. 입상활성탄은 표면의 소수성 및 정전기적 흡착을 통해 오염물질을 제거하는 방법으로(Yu et al., 2009; Seo et al., 2024), 과불화화합물 처리에 주로 사용되는 방법이다. 음이온 교환 수지는 최근 과불화화합물의 제거에 대한 효과성이 입증되고 있으며, 일회용 수지가 주로 이용되고 있다(Woodard et al., 2017). 고압 멤브레인은 나노여과 방식(NF, Nanofiltration)과 역삼투 방식(RO, Reverse Osmosis)으로 구분되며, 제거 효율이 높으나 상대적으로 고비용이다(Tang et al., 2007). 거품 분리 처리는 공기와 난류로 기포를 생성하여 과불화화합물과 같은 양친매성 물질을 제거하는 방법으로 현장 수처리에서 주로 활용되고 있다(Burns et al., 2022). 콜로이드 활성탄

처리하는 대수층에 직접 콜로이드 활성탄을 주입하여 지하수에서 이동하는 오염물질을 포집하는 방법으로 오염의 확산을 방지하기 위해 주로 사용된다(McGregor, 2020).

이와 같이, 최근 변화하는 해외 과불화화합물 관리 동향 파악을 바탕으로 국내 상황에 적합한 관리기준 검토가 필요하며, 지하수 중 과불화화합물 처리 방법에 대해서도 다양한 연구사례를 바탕으로 국내 상황에 적절한 방안 마련이 필요하다.

2. 과불화화합물의 주요 특성 및 현황

2.1. 과불화화합물의 물리·화학적 특성

대부분의 과불화화합물은 실온에서 결정질 또는 분말 형태의 고체로 존재한다. 예외로, 과불화화합물 중 구조식이 짧은 화합물(the acid forms of PFCA(Perfluoroalkyl Carboxylic Acid) and PFSA(Perfluoroalkyl Sulfonic Acid), FTS(Fluorotelomer Sulfonate) and FTOH(Fluorotelomer Alcohol) with a 4- to 6-carbon tail)의 경우 실온에서 액체 형태로 존재하는 경향이 있다. 과불화화합물의 녹는점과 끓는점은 대체로 불소화 사슬의 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다. 예로 PFBA(C_4F_7COOH)의 녹는점은 $-17.5^{\circ}C$ 이고 PFTeDA($C_{13}F_{27}COOH$)의 녹는점은 $130\sim 135^{\circ}C$ 이다. 과불화화합물은 독특한 화학 구조로 인해 친수성과 소수성을 동시에 가지는 특성을 보인다. 소수성을 지니는 과불화탄소사슬($-C_nF_{2n+1}$)과 친수성을 지니는 수용성 작용기($-COOH$, $-HSO_3$ 등)로 이루어져 있다(ATSDR, 2019; NCBI, 2025). 주요 과불화화합물은 흡착성이 낮아 토양에 잘 흡착되지 않는다(Zareitalabad et al., 2013; Brusseau et al., 2020). 이러한 특성으로 지하수로 쉽게 침투하며, 오염범위가 쉽게 확산될 수 있다. 주요 과불화화합물의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다(NCBI, 2025).

2.2. 과불화화합물의 발암성

국제암연구소인 IARC(International Agency for Research on Cancer)에서는 발암성 위험을 체계적으로 평가하기 위해 연구 물질을 5가지 그룹으로 나눈다(Table 2)(IARC, 2025). 그중, PFOA는 Group 1의 발암성 물질로 분류하며, PFOS는 Group 2B의 발암 가능성이 있는 물질에 해당한다.

2.3. 과불화화합물의 오염원

과불화화합물은 다양한 산업에서 활용되고 있다. 대표적으로 과불화화합물 중 PFOS는 반도체 코팅제, PFOA는 의류·조리기구 코팅제 및 소화제 등의 원료로 사용된다.

Table 1. Physicochemical properties of major PFAS (NCBI, 2025)

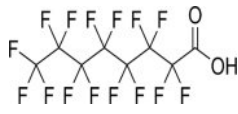
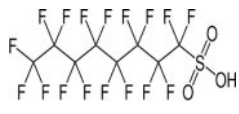
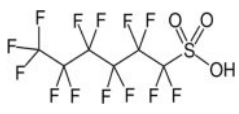
Properties	PFOA	PFOS	PFHxS
Skeletal Structure			
Chemical Formula	C ₈ HF ₁₅ O ₂	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S
Molar Mass (g/mol)	414.07	500.13	400.12
Boiling Point (°C)	189.0	249	238.5
Solubility (mg/L at 25°C (In water))	3,300	680	6.2
Density (g/mL at 20°C)	1.792	1.84	1.841
Vapor Pressures (mmHg at 25°C)	3.16×10^{-2}	2.0×10^{-3}	4.6×10^{-3}
Henry's Law Constant (mol/(m ³ Pa) at 25°C)	1.1×10^{-4}	9.0×10^{-4}	5.1×10^{-1}

Table 2. IARC Classification of carcinogenic agents (IARC, 2025)

Group	Description	Number of Agents	Examples
Group 1	Carcinogenic to humans	132	Benzene, Cadmium, PFOA
Group 2A	Probably carcinogenic to humans	96	Inorganic Lead Compounds, Acrylamide
Group 2B	Possibly carcinogenic to humans	320	Lead, DDT, PFOS
Group 3	Not classifiable as to its carcinogenicity to humans	499	Fluoride, Selenium
Group 4	Probably not carcinogenic to humans	-	-

Table 3. Sample historic and current uses of PFAS (ITRC, 2025)

Industry/Application	Polymer	Nonpolymers
Aviation and Aerospace	Fluoropolymer components (PTFE, PFA tubing, piping, seals, gaskets, cables, insulators)	Hydraulic fluid additives made from PFSA salts
Automotive	Fluoropolymer components (wiring, cable, fuel tubing, seals, bearings, gaskets, lubricants, carpet coatings)	Surface treatments for textiles, upholsteries, carpets, leather, exterior surfaces
Biocides (Herbicides and Pesticides)	None reported	Active and inert ingredients in pesticides, herbicides
Building and Construction	Fluoropolymer membranes and coatings in architectural materials	Paint additives, surface treatments
Cable and Wiring	Fluoropolymer coatings and jacketings	None reported
Cosmetics/Personal Care Products	Dental floss and micro powders used in creams and lotions	Cosmetics, shampoos, nail polish, eye makeup, denture cleaners
Electronics	Fluoropolymers in insulators, circuit boards, electronic components	Flame retardants (e.g., PFBS potassium salt)
Energy	Fluoropolymer films for solar panels, fuel cells	Fuel cell and battery electrolytes
Firefighting/Safety	Fluoropolymers in firefighting equipment and protective clothing	Fire-fighting foams, vapor suppression for flammable liquids
Food Processing	Fluoropolymer fabrication materials (e.g., PTFE liners)	May be used as coatings on food packaging
Household Products	Nonstick coatings, aftermarket textile treatments	Cleaning products, polishes, waxes
Medical Products	Surgical patches, implants, medical devices	X-ray film, protective medical fabrics
Metal Plating	None reported	Wetting agents, mist suppression
Oil Production	Gas pipe lining	Well production additives
Mining	None reported	Ore flotation surfactants
Paper and Packaging	Repellent coatings for paper products	Phosphate ester salts
PFAS Production	Not applicable	Processing aids, monomers
Photolithography & Semiconductor	Equipment materials (e.g., PFA)	Photolithography chemicals
Textiles (Upholstery, Carpets), Leather, and Apparel	Fluoropolymers for outdoor gear, repellent treatments	Leather treatments, textile coatings

이와 같은 산업단지 주변과 과불화화합물 소비재를 사용하는 다양한 곳에서 지하수로 유출된다(Lee et al., 2025). 과불화화합물은 전 세계적으로 지하수에서 검출되고 있으며, 특히 산업 활동이 활발한 지역이나 소방 연료가 사용된 지역에서 높은 농도로 검출되고 있다(Johnson et al., 2022). 과불화화합물이 사용되는 주요 분야와 용도는 Table 3과 같다(ITRC, 2025).

2.4. 과불화화합물의 분포 현황

과불화화합물은 세계적으로 하천, 호소수, 지하수 등 다양한 수생환경에서 검출되고 있는 것으로 확인되었다.

특히, 산업단지 및 미군기지 등 일부 특정지역에서 지하수 중 과불화화합물이 높은 수준으로 나타나고 있으며, 국내·외 관리수준을 초과하는 사례가 다수 확인되고 있다. Table 4는 문헌조사를 통해 얻은 과불화화합물의 국내·외 검출사례를 정리한 자료이다.

3. 과불화화합물 규제 현황

과불화화합물은 2009년 스톡홀름 협약(Stockholm Convention)에 따라 PFOS 및 그 관련 물질이 잔류성 유기 오염물질(POPs)로 처음 등재되었다. 이후, 2019년 PFOA

Table 4. Detection of PFAS in Korea and abroad

Country	Sample	PFOA (ng/L)	PFOS (ng/L)	Reference
South Korea	River/Lake Water	ND~590.4	ND~10.6	Ministry of Environment, 2018a
	Water Treatment Plant	38	-	
	Wastewater Treatment Plant	4,800	-	Ministry of Environment, 2018b
	Sewage Treatment Plant	220~242	-	
	River/Lake Water	-	730	So et al., 2004
	River/Lake Water	-	8~651	Rostkowski et al., 2006
	River Water	0.63~67	0.1~6.9	Yeo et al., 2012
	River Water	ND~386	ND~1,411.5	Cho et al., 2005
	River/Lake Water	0.4~47.1	ND~14.6	NIER, 2017
	Seawater	9~50.7	13.8~51.7	Son et al., 2017
	Sewage Treatment Plant	57~580	ND~264	
	River Water	ND~37	ND~67	Shin et al., 2009
United States	River Water	10~173	<0.8~1,090	Sinclair et al., 2006
	Groundwater	<0.7~149	<1.4~98.8	Minnesota Pollution Control Agency, 2013
	Groundwater	9~57	5~12	New Jersey EPA, 2014
	Military Base Groundwater	400~300,000	5,00~75,000	McGuire et al., 2014
	Military Base Groundwater	12,000~220,000	15,000~78,000	
	Military Base Groundwater	8.6~57,000	88~65,000	Backe et al., 2013
Italy	Groundwater	0.15~20.8	0.058~2.5	ATSDR, 2019
France	Groundwater	1.1~341	2.4~539	Vo et al., 2020
Spain	Groundwater	21~32	61~74	Flores et al., 2013
Germany	River Water	<2~3,640	<2~192	Skutlarek et al., 2006
United Kingdom	Groundwater	350	250	Eschauzier et al., 2018
Scotland	Groundwater	<5~32.8	<5~14.7	Scotland's CREW, 2017
Australia	Groundwater	1.7~74	1.3~4,800	Hepburn et al., 2019
New Zealand	Groundwater	<1~2.8	<1~17	ESR, 2022
China	River Water	0.48~5.33	ND~5.54	Cao et al., 2019
	Groundwater	7~175.2	<0.5~37	Chen et al., 2016
Japan	Tap Water	2.3~84	0.2~22	Takagi et al., 2008
	Groundwater	0.47~60	0.28~133	Murakami et al., 2009
India	River Water	0.08~1.18	ND~1.73	Sharma et al., 2016

및 관련 화합물, 2022년 PFHxS 및 관련 화합물이 스톡홀름 협약 부속서에 등재되었으며, 각 물질을 이용한 생산과 사용이 금지되고 있는 추세이다. 뿐만 아니라, 음용수 및 지하수 등 매체별로 높은 수준의 기준 및 목표치를 도입하고 있으며, 국가적인 협의를 통해 기준을 더 강화하는 추세이다.

3.1. 미국 EPA 과불화화합물 관리 동향

미국 EPA는 2024년 4월 10일 국가 음용수 규정(NPDWR)을 발표하였다. 음용수 내 과불화화합물의 관리를 위해 법적으로 제제 가능한 최대 오염 허용치를 4~10 ng/L로 설정하였으며, 과불화화합물의 관리를 통해 나아가야 할 최대 오염 허용 목표치를 0~10 ng/L로 발표하였다. 최대 오염 허용치와 최대 오염 허용 목표치에 해당하는 항목은 PFOA, PFOS, PFHxS, PFNA, HFPO-DA 및 두 종류

이상의 과불화화합물(PFHxS, PFNA, HFPO-DA, PFBS)이다(Table 5) (EPA, 2025). 2027년까지 과불화화합물에 대한 초기 모니터링을 진행하고, 이후 지속적인 규정을 준수하는 모니터링을 지속해야 한다. 모니터링 결과가 최대 오염 허용치를 초과할 경우 2029년까지 저감조치를 취해야한다. 또한 2029년부터 음용수에서 최대 오염 허용치 중 하나 이상을 초과하는 경우, 과불화화합물 농도 저감 조치를 실시하고 위반 사실을 공고하여야 한다.

또한, 미국 EPA는 제5차 미규제 오염물질 모니터링 규칙(UMCR 5; Unregulated Contaminant Monitoring Rule 5)을 통해 2023년부터 2025년까지 3년간 공공수도 시스템을 대상으로 30종의 미규제 오염물질(과불화화합물 29종, 리튬)을 분기별로 샘플링하여 데이터 구축 및 잠정 결과를 공개하고, 최종 데이터는 2026년에 발표할 예정이다.

미국 ITRC는 지하수, 먹는물, 지표수 등에 대한 과불화

Table 5. MCLG and MCL of 6 types of PFAS in USEPA (EPA, 2025)

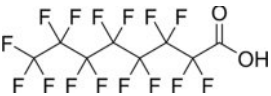
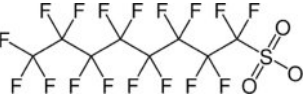


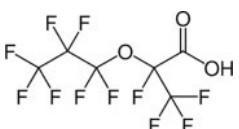
Compounds	Structure	MCLG (ng/L)	MCL (ng/L)
Perfluorooctanoic acid (PFOA)		0	4
Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)		0	4
Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS)		10	10
Perfluorononanoic Acid (PFNA)		10	10
HFPO-DA and its ammonium salt (GenX)		10	10
Mixtures containing two or more of PFHxS, PFNA, HFPO-DA, and PFBS		1 (unitless) Hazard Index	1 (unitless) Hazard Index

Table 6. Guidance values for PFAS in groundwater (ITRC, 2025)

Compounds		PFOA	PFOS	PFOS-K	PFNA	PFBA	PFBS	PFBS-K
RSL(ppt)		0.0027	2	2	59	18,000	6,000	6,000
PFHxS	PFHxA	PFUnDA (PFUDA)	PFDoDA	PFTeDA (PFTeTA)	HFPO-DA (Gen-X)	PFODA	PFPrA	Bis-amine (TFSI)*
390	9,900	6,000	1,000	20,000	15	800,000	9,800	5,900

*Bis(trifluoromethylsulfonyl)amine

Table 7. Total PFAS and Sum of PFAS in EU (European Parliament and Council, 2020)

Criteria	Compounds	Concentration (ppt)
Total PFAS	Until and analysis method for “total PFAS” is available, a parameter such as “Total Organic Fluorine” could be considered	500
Sum of PFAS	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnA, PFDoDA, PFTrDA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, FUnDS, PFDoDS, PFTrDS	100

화합물 설정 기준을 각 주별(30개주) 및 나라별(12개국)로 정리하였다. 그 중 대표적으로 미국 EPA는 지하수에 대하여 총 16개의 항목의 RSL 기준(2025)을 설정하여 관리 중이다(Table 6)(ITRC, 2025).

매사추세츠는 체계적인 지하수 관리 기준을 보여주는 주 중 하나로, 매사추세츠 환경보호부(MassDEP; Massachusetts Department of Environmental Protection)는 지하수의 용도와 환경적 특성에 따라 GW-1, GW-2, GW-3으로 분류하여 관리 중이다. 그중 GW-1은 현재 또는 미래에 음용수로 사용될 수 있는 지하수 구역을 의미하며, 이 구역에서 6종의 과불화화합물(PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS, PFHpA, PFDA)의 합이 20 ppt를 초과할 경우 즉각적인 정화 조치가 요구된다. GW-2는 건물 인근 지하수로, 휘발성 PFAS가 살내 공기로 유입될 위험이 있는 경우에 해당하며, GW-3는 지하수가 지표수로 유출되어 생태계에 영향을 미칠 수 있는 지역을 의미한다.

3.2. 유럽(EU) 과불화화합물 관리 동향

유럽연합(EU)은 2020년 6월 잔류성 유기 오염물질(POPs)의 사용을 제한하는 현행 EU 법률을 개정하는 규정 (EU) 2020/784를 발표하였다. 또한 PFOA, 그 염 및 PFOA 관련 화합물의 사용을 제한하는 규정이 2020년 7월 4일에 발효되었다. 최근 2023년 3월에는 네덜란드, 독일, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이 5개국이 지난 3년간 조사를 통해 과불화화합물이 ‘EU의 화학물질의 등록·평가·승인·제한 규정 (REACH; Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals)의 고잔류성 기준을 초과한다’며 전면 사용 제한을 유럽화학물질청(ECHA; European Chemicals Agency)에 제안하였다. EU 집행위원회(EC; European Commission)는 2025년에 과불화화합물의 사용 제한에 대한 최종 결정을 내릴 예정이다. 현재의 계획대로라면, 빠르면 2026년부터 EU 내에서 과불화화합물 사용제한 조치가 적용될 것으로 예상된다. 이러한 규제 움직임은 과불화화합물의 광범위한 사용과 그에 따른 환경 오염에 대한 심각성을 반영하고 있다. 2023년 2월에는 Forever Pollution Project를 통해 유럽 대륙 전역의 과불화화

합물 오염에 대한 지도가 공개되었으며, 이를 통해 유럽 전역에서 23,000개의 오염 현상이 확인되었다. 이는 과불화화합물 오염이 유럽 전체에 걸쳐 광범위하게 퍼져 있음을 보여주었다.

유럽연합(EU)은 2020년 12월 먹는물 수질지침(DWD) 개정안을 확정하여 과불화화합물에 대한 기준치로 PFAS-total과 Sum of PFAS를 도입했다. 각각 PFAS-total 0.5 µg/L, Sum of PFAS 0.1 µg/L의 기준치를 설정하였다(Table 7) (European Parliament and Council, 2020).

독일 환경청(UBA; Umweltbundesamt)은 2018년 지하수 관리기준(GFS; Grundwasser- und Trinkwasser-Leitwerte)을 지정하여 지하수와 음용수에서 개별 과불화화합물의 농도를 관리해 왔다. 개별 과불화화합물의 기준 농도는 PFBA 10 µg/L, PFHxA 6 µg/L, PFOA 0.1 µg/L, PFNA 0.06 µg/L, PFBA 6 µg/L, PFHxS 0.1 µg/L, PFOS 0.1 µg/L이다. 2026년부터는 EU의 음용수 지침(Directive (EU) 2020/2184)를 도입해 더 강화된 자체적 합산 기준을 적용할 계획이다. 해당 기준은 Total PFAS(sum of 20 PFAS)와 PFAS 4(sum of PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS)이며 각각의 합산 기준은 100 ng/L, 20 ng/L이다.

스웨덴 식품청(Livsmedelsverket)은 2023년 과불화화합물 4종(PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS)의 합계 기준 4 ng/L를 권고치고 시행되었으며, 2026년부터 27가지 합계 기준(PFAS-4, PFAS-21)을 법적 기준으로 적용할 계획이다. 해당 기준은 PFAS-4(sum of PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS), PFAS-21(sum of 21 PFAS)이며 각각의 합산 기준은 4 ng/L, 100 ng/L이다. 이러한 일련의 조치들은 과불화화합물의 사용을 단계적으로 줄이고, 궁극적으로는 필수적인 용도 외에는 사용 금지를 위한 조치이다.

3.3. 호주 과불화화합물 관리 동향

호주 식품기준청(FSANZ)은 과불화화합물에 대한 건강 기반지침값(HBGV)을 2017년 4월 발표하였으며, 호주 보건부(DOH)에서 2018년 해당 기준을 공식적으로 지정하여 관리하고 있다. 건강기반지침값은 일반 대중을 과불화화합물 노출로부터 보호하기 위해 설정되었으며, 식품,

Table 8. Health based guidance value in Australia (FSANZ, 2017)

Health based guidance value (HBGV)	Total (PFOS + PFHxS)	PFOA
Tolerable daily intake (ng/kg bw/day)	20	160
Drinking water quality guideline value (ng/L)	70	560
Recreational water quality guideline value (ng/L)	2,000	10,000

음용수, 레크리에이션용 물에서의 2가지 항목의 과불화화합물에 대한 기준이 설정되어 있다. 음용수의 경우, Total(PFOS+PFHxS) 70 ng/L, PFOA 560 ng/L를 기준으로 관리하고 있으며, 각 항목별 및 기준은 (Table 8)(FSANZ, 2017)과 같다. 또한, 호주에서도 기준 강화를 위한 국가적 논의를 진행 중이며, 2025년 중 최종 결정 예정이다.

3.4. 국내 음용수 및 지하수 중 과불화화합물 관리 동향

환경부에서는 「잔류성오염물질 관리법」 제2조제1호에 따른 잔류성 오염 물질의 종류와 제13조제6항에 따른 잔류성오염물질의 제조·수출입·사용의 금지·제한이 면제되는 세부적인 물질과 용도를 규정하는 것을 목적으로 잔류성 유기오염물질의 종류 및 특정 면제에 관한 규정(환경부 고시 2024-186)을 시행하고 있다. 제2조제1호에 따라 환경부 장관이 정하여 고시하는 잔류성오염물질에 포함되는 과불화화합물은 [고유번호 2009-21] 과불화옥테인 설펜산(Perfluorooctane sulfonic acid), 그 염류와 과불화옥테인설펜플로라이드(Perfluorooctane sulfonyl fluoride)

9종, [고유번호 2019-30] 과불화옥탄산(Perfluorooctanoic acid), 그 염류와 과불화옥탄산 관련 화합물 353종, [고유번호 2022-31] 과불화헥세인설펜산(Perfluorohexane sulfonic acid), 그 염류와 과불화헥세인설펜산 관련 화합물 147종이다.

또한, 환경부는 2018년 5월 과불화화합물 3종(PFOS, PFOA, PFHxS)을 수돗물 수질감시항목으로 지정하여 관리 중이다. 현행 감시항목 기준은 PFOS 70 ng/L, PFOA 70 ng/L, PFHxS 480 ng/L와 같다.

또한, 환경부 국립환경과학원에서는 지하수관리기본계획('22~'31) 및 지하수법 제17조(지하수의 측정 등), 지하수법 시행령 제27조(지하수 변동실태의 조사 등)에 따라 지하수 중 미규제 오염물질을 선정하고 전국 비음용 측정망을 대상으로 모니터링 수행하고 있다. 조사결과를 바탕으로 인체위해도, 지하수 침투가능성 및 환경 노출 위험도 등을 고려하여 지하수 수질기준 후보물질을 선정하고 관리방안 마련을 위한 연구를 수행 중에 있으며, 2022년 10월에는 과불화화합물 2종(PFOS, PFOA)을 수질기준 후보물질로 지정하여 관리 중에 있다.

Table 9. Widely adopted PFAS treatment methods for groundwater remediation

Treatment Method	Mechanism	In-situ /Ex-situ	Advantages	Limitations	Removal Efficiency		Reference
					Long-chain	Short-chain	
Granular Activated Carbon	Adsorption (hydrophobic/electrostatic interactions)	Ex-situ	Widely used, cost-effective	Requires regeneration when saturated	80~99%	10~60%	Xiao et al., 2017b Kothawala et al., 2017b
Ion Exchange	Anion exchange resin adsorption	Ex-situ	High selectivity and treatment efficiency depending on conditions	High initial cost, resin regeneration and disposal needed	90~99%	30~70%	Dixit et al., 2021 Ross et al., 2018 Appleman et al., 2013
High-Pressure Membrane (RO)	Size/charge exclusion	Ex-situ	High removal efficiency for most PFAS	High energy consumption, wastewater treatment required	95~99%	90~99%	Dudarko et al., 2024 Appleman et al., 2013
High-Pressure Membrane (NF)					95~99%	80~95%	Tang et al., 2007b
Foam Fractionation	Adsorption/concentration on bubble surface	Ex-situ	Low energy consumption, effective for high concentrations	Difficulty in removing short-chain PFAS Additional surfactants are often required	70~95%	40~80%	Harding Marjanovic et al., 2015
Colloidal Activated Carbon	In situ injection /immobilization	In-situ	Inhibiting PFAS migration	Complex system design and application	70~90%	30~60%	Kucharzyk et al., 2017

4. 지하수 중 과불화화합물 처리 방법

지하수 중 과불화화합물 현장정화방법으로 입상활성탄(GAC; Granular Activated Carbon), 이온교환(IX; Ion exchange), 고압멤브레인, 거품분리, 콜로이드활성탄(CAC; Colloidal Activated Carbon)이 주로 활용 및 연구되고 있다(Table 9)(ITRC, 2025).

4.1. 입상활성탄

입상활성탄(GAC)은 다양한 환경 매체에서 오염 물질을 줄이는 데 주로 사용 되어온 흡착제이다. 입상활성탄은 고온에서 처리된 탄소 기반 물질로, 높은 표면적과 기공 구조를 가진다. 입상활성탄의 표면의 소수성 및 정전기적 흡착을 통해 오염물질을 제거한다(Yu et al., 2009; Seo et al., 2024). 특히 긴 사슬 과불화화합물을 제거하는 데 유리하다. 또한, 다른 처리 방법에 비해 상대적으로 비용이 낮고, 과불화화합물을 제거한 후 재생하여 재사용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 이점으로 입상활성탄은 과불화화합물을 제거하기 위한 처리 기술로서 군사시설, 산업단지, 급수시설 등에서 15년 이상 사용되었다(Forrester, 2018).

연구에 따르면 입상활성탄은 USEPA 537.1(Shoemaker and Tettenhorst, 2018) 방법을 통해 과불화화합물의 유출 수 농도를 분석 검출 한계 이하로 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 지하수 내 다양한 오염물질이 많을 경우, 입상활성탄 효율이 낮아져 교체 주기를 짧게 설정하여야 한다. 연구에 따르면 다양한 입상활성탄 기본 재료(유연탄, 갈탄, 코코넛 껍질) 중 유연탄 기반 입상활성탄이 과불화화합물 제거에 효과적인 것으로 확인되었다(McNamara et al., 2018; Westreich et al., 2018).

또한, 최근에는 최종적인 과불화화합물 제거를 위해, 과불화화합물의 열분해의 첨가제로써 입상활성탄이 연구되고 있다. 열분해시 입상활성탄을 첨가하면 300°C, 1.9 atm 조건에서 60분 이내에 PFOA의 90%를 무기화가 가능한 것으로 확인 되었다(Runze et al., 2024). 이는 PFOA만 열분해시 700°C에서 약 80%의 무기화가 가능한 것 대비 효율적이다.

4.2. 이온교환

이온교환(IX) 수지는 1930년대 후반부터 수처리 공정에서 널리 사용되어 온 효과적인 흡착제이다. 주로 질산염, 과염소산염, 비소 등 다양한 오염물질 제거에 활용되었으며, 최근에는 과불화화합물 제거에도 그 효과성이 입증되고 있다. 이온교환 처리는 음이온 형태로 존재하는

과불화화합물이 이온교환 수지의 양이온과 결합하여 제거되는 방법이다.

과불화화합물 제거를 위한 선택적 수지의 개발과 사용은 아직 초기 단계이지만, 그 효과성은 이미 잘 입증되어 있다. 이온교환 처리는 흡착에 비하여 빠른 반응 속도를 가지며, 짧은 사슬 과불화화합물에 대해서도 상대적으로 높은 제거 효율을 보인다(Smaili et al., 2023). 일회용 수지는 사용이 간편하고 규제 대상 과불화화합물을 불검출 수준으로 낮추는 데 효과적이다. 현재 지하수에서 과불화화합물을 제거하는 데 주로 일회용 수지가 사용되고 있으며, 일반적으로 일회용 이온교환 수지의 제거 용량은 재생 가능한 이온교환 수지보다 높다. 이온교환 수지의 효과는 적절한 조건에서 현장의 과불화화합물 농도를 100 ppb에서 분석 검출 한계 이하로 감소시키는 것으로 입증되었다(Kothawala et al., 2017; McCleaf et al., 2017; Woodard et al., 2017; Zeng et al., 2020).

이온교환 처리의 특징으로 과불화화합물의 하위 그룹에 대한 친화도는 일반적으로 과불화알킬술폰산(PFSA)이 과불화카르복실산(PFCA) 보다 높다. 각 하위 그룹 내에서 탄소 사슬 길이가 증가함에 따라 친화도는 증가하는 경향이 있다(Liu et al., 2021).

이온교환 처리의 한계점으로는 높은 재생 비용, 재생 과정에서 고농도의 과불화화합물 폐액 발생, 황산 이온과 같은 다른 음이온과의 경쟁시 효율 감소 등이 있다. 또한, 사용되는 이온교환 수지의 유형에 따라 pH 또는 부식성에 단기간적인 장애를 일으킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 효율적인 이온교환 수지 처리 전에 pH 조절 및 부식성 완화를 위한 전처리 과정이 필요하다(Smith et al., 2023b).

4.3. 고압 멤브레인

고압 멤브레인 처리는 압력을 이용해 물 분자만을 멤브레인으로 통과시켜 과불화화합물과 같은 불순물을 제거하는 방법이다. 멤브레인의 공극 크기와 전하가 과불화화합물의 제거에 중요한 역할을 한다. 크기 배제(Size exclusion)와 전하 배제(Charge exclusion)가 주요 제거 메커니즘이다. 멤브레인의 공극 크기는 과불화화합물의 크기에 따라 제거 효율을 결정하며, 전하 배제는 과불화화합물의 전하와 멤브레인의 전하 간 상호작용에 의해 발생한다. 멤브레인의 소재는 폴리아미드(Polyamide), 폴리테트라설펜(Polyethersulfone) 등이 사용되며, 최근에는 MXene-TiO₂와 같은 새로운 소재도 개발되고 있다.

고압 멤브레인 처리는 주로 나노여과(NF; Nanofiltration)와 역삼투(RO; Reverse Osmosis) 방식이 사용된다. 나노여과는

상대적으로 낮은 압력에서 작동하며, 역삼투 방식은 더 높은 압력에서 작동하여 더 작은 분자를 효과적으로 제거한다. 이 기술은 일반적으로 부피가 작은 고농도 액체보다 부피가 큰 저농도 액체에 더 적합한 것으로 알려져 있다. 두 기술 모두 적절하게 적용하면 다양한 급수원에서 과불화화합물을 효과적으로 제거할 수 있다.

나노여과 방식은 압력을 이용한 멤브레인 기술의 한 형태이며 과불화화합물 제거에 효과적인 것으로 확인되었다(Tang et al., 2007). 이 여과 방법은 낮은 압력 하에서 높은 물 유속을 유지한다(Izadpanah and Javidnia, 2012). 일반적으로 나노여과 멤브레인은 크기가 큰 분자에 유리하고, 1가 이온 및 더 작은 분자의 처리는 어렵다.

역삼투압 방식은 반투과성 막을 통해 물에 강제로 압력을 가해 대부분의 오염물질을 제거하는 기술이다. 단독으로 사용되는 경우는 드물며 주로 처리 시스템의 일부로 사용된다. 가장 효율적인 역삼투압 성능을 위해 전처리가 필요하다. 역삼투압 멤브레인은 수용액에서 대부분의 유기 및 무기 화합물을 제거하는 데 효과적이다. 최근 새로운 폴리머 화학 및 제조 공정으로 효율성을 개선하여 작동 압력을 낮추고 운영 비용을 절감했다(Lau et al., 2012). 그 결과, 산업계에서 화학물질을 농축하거나 제거하기 위해 역삼투압 멤브레인의 사용률이 높아지고 있다. 역삼투압 멤브레인은 가정용 식수 정수 시스템, 생수병 생수 생산, 독립형 정수 장치(미군 부대), 산업용(냉각탑, 보일러, 탈이온수 공급)으로 일반적으로 사용되고 있다.

하지만, 고압 멤브레인 방법은 일반적으로 과불화화합물 제거를 위해 설계된 입상활성탄 처리 또는 이온교환수지 시스템에 비해 설치 및 운영 비용이 더 높으며, 농축된 폐수 처리에 대한 고려가 필요하다.

4.4. 거품 분리

거품 분리 처리는 흡착 기포 분리 기술 중 하나이다. 거품 분리는 공기와 난류를 사용하여 물기둥을 통해 상승하는 기포를 생성하여 물에서 과불화화합물과 같은 양친매성 물질을 제거하는 방법이다(Lemlich and Lavi, 1961; Lemlich, 1972). 거품 분별 기술은 상업적 규모의 수족관 사업에서 단백질성 오염물을 분리 및 제거하여 물을 정화하는 데 주로 사용되었으며 과불화화합물 분리 및 농축을 위한 방법으로 발전해 왔다. 양친매성 과불화화합물은 거품이 상승할 때 거품 표면에 흡착된다. 농축된 거품 형태로 컬럼 상단에 축적된 과불화화합물은 추가 처리 또는 폐기를 위해 분리한다.

거품 분리 처리는 비교적 처리 장비가 단순하며, 운영

비용이 낮다. 또한, 전처리 없이도 다양한 수질 유형에서 과불화화합물을 효과적으로 제거한다. 이러한 장점으로 거품분리는 지하수(Burns et al., 2021), 침출수(Burns et al., 2022; Newman, 2022; Smith et al., 2022; McCleaf et al., 2021; Robey et al., 2020) 및 산업용수(Smith et al., 2023a)에서 과불화화합물 제거를 위해 활용되고 있다.

거품분리는 단쇄 과불화화합물 제거에는 효과적이지 않으며, 효율을 높이기 위해 보조 계면활성제를 추가하는 경우가 많다. 이러한 보조 계면활성제의 사용은 운영비용을 증가시키고, 다른 오염을 발생시킬 수 있다. 이러한 점을 해결하기 위해, 보조 계면활성제의 대안 및 환경 영향을 최소화하기 위한 추가적인 연구가 필요하다(We et al., 2024).

4.5. 주입식 콜로이드 활성탄

주입식 콜로이드 활성탄(CAC) 처리는 미세한 활성탄 입자(평균 직경 2 μm)를 수용성 현탁액으로 만들어 현장에서 지하수로 주입하는 방법이다. 이 기술은 오염물질을 흡착하여 고정시키고 지하수 내 확산을 방지한다. 대수층에 콜로이드 활성탄을 주입하면 지하수에서 이동하는 용존 오염물질을 포집한다. 장기적인 성능은 입상활성탄과 마찬가지로 오염물질 및 오염물질 농도와 같은 매개변수에 따라 달라진다.

콜로이드 활성탄은 오염원 구역에 격자 패턴으로 주입하여 오염원을 고정하거나, 오염물질 흐름을 완화하기 위해 횡단 패턴으로 주입할 수 있다. 수직 관정을 통해 중력 공급 또는 저압 주입으로 대수층으로 주입할 수 있다(McGregor, 2020). 주입 후 대수층 내 매트릭스에 강하게 부착되어 과불화화합물을 포함한 유기 오염물질에 대한 흡착제 역할을 한다. 입자의 크기가 작아 표면적이 넓기 때문에 과불화화합물의 흡착 속도가 입상활성탄보다 빠르며 제거 효율이 높다(Xiao et al., 2017).

과불화화합물을 처리하는 다른 기술에 비해 콜로이드 활성탄 처리는 현장 운영 비용이 낮다. 또한, 주입 후 과불화화합물의 농도가 빠르게 감소하며, 장기적으로도 효과가 지속될 수 있다. 하지만, 콜로이드 활성탄의 주입 위치와 양이 제거 효율에 큰 영향을 미치고, 효율적인 흡착을 위해 현장 지하수의 조건(pH, EC, 지하수 흐름 속도)에 따른 적절한 방식 설정이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 과불화화합물의 물리·화학적 기초정보를 제공하고, 지중 환경 중 과불화화합물의 주요 오염원 및

분포 현황에 대한 자료를 조사하였다. 또한, 과불화화합물의 규제 및 관리 등에 대한 국제적 동향을 파악하고, 지하수 중 과불화화합물 처리 방법들의 장점·한계점·경제성·제거율 등을 비교·검토함으로써 과불화화합물 관리시 고려해야될 사항을 확인하였다.

과불화화합물은 대표적인 잔류성유기오염물질로써 난분해성 물질의 특성으로 인해 인체 및 생태환경에 축적되며 동시에 위해성을 가지고 있어 그 문제성이 대두되고 있다. 이에 따라 미국, 유럽, 호주 등 주요 국가들에서는 과불화화합물에 대한 엄격한 기준을 설정하고, 특히 국제암연구소(IARC)에서는 과불화화합물 중 PFOA를 1A, PFOS를 2B 그룹으로 지정하여 인체에 대한 위험성이 있는 물질로 분류하고 있다.

지하수에서 주로 활용하는 과불화화합물의 처리 방법으로 입상활성탄, 이온교환, 고압 멤브레인, 거품분리, 콜로이드 활성탄 등이 있으나, 각 방법마다 장단점과 기술적 한계로 효율적인 처리를 위해 현장 환경을 고려한 기술적용이 필수적이다. 본 논문에서는 현장 적용에 관한 범용성과 경제·효율성을 고려하였을 때, 일반적으로 입상활성탄을 이용한 저감방법이 비용대비 효과가 좋을 것으로 사료된다. 입상활성탄을 이용한 과불화화합물 저감의 경우 원재료를 쉽고 저렴하게 구할 수 있다는 장점과 적용방법의 편의성, 실시간으로 변화하는 자연환경에 대한 범용성 등을 갖추고 있기 때문이다. 또한, 고농도로 오염된 지하수의 경우, 지하수 내 과불화화합물의 분포, 지하수 흐름 방향 등을 고려하여 콜로이드 활성탄을 대수층 내에 직접 주입하여 처리하는 방법을 병행하는 것도 좋은 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

과불화화합물의 규제, 처리기술 등 종합적인 접근을 통해 과불화화합물로 인한 환경오염과 건강 위험을 최소화하고, 지속 가능한 환경 관리가 필요하다. 더 나아가 과불화화합물로부터 생태계와 인체건강을 보호하기 위해서는 과불화화합물 사용자체를 줄이고 대체물질을 개발하는 방법이 병행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2025년 국립환경과학원의 “지하수 오염물질 기준설정 및 관리방안연구(2025)”사업으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR),

2019, Toxicological profile for perfluoroalkyls, ATSDR, <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp200.pdf> [accessed 25.04.23]

Appleman, T. D., Dickenson, E. R. V., Bellona, C., and Higgins, C. P., 2013, Nanofiltration and granular activated carbon treatment of perfluoroalkyl acids, *J. Hazard. Mater.*, **260**, 740-746.

Backe, W. J., Day, T. C., and Field, J. A., 2013, Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from U.S. military bases, *Environ. Sci. Technol.*, **47**(10), 5226-5234.

Brusseau, M. L., Anderson, R. H., and Guo, B., 2020, PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites, *Sci. Total Environ.*, **740**, 140017.

Burns, D. J., Hinrichsen, H. M., Stevenson, P., and Murphy, P. J. C., 2022, Commercial-scale remediation of per- and polyfluoroalkyl substances from a landfill leachate catchment using Surface-Active Foam Fractionation (SAFF®), *Remediation*, **32**(3), 139-150.

Burns, D. J., Stevenson, P., and Murphy, P. J. C., 2021, PFAS removal from groundwaters using Surface-Active Foam Fractionation, *Remediation*, **31**(4), 1-15.

Cao, H., Li, X., and Wang, Y., 2019, Occurrence, sources and health risk of polyfluoroalkyl substances (PFASs) in soil, water and sediment from a drinking water source area, *Environ. Pollut.*, **252**, 1534-1542.

Chen, M., Li, X., Wang, Y., and Zhang, Z., 2016, Perfluorinated compounds in soil, surface water, and groundwater from rural areas in eastern China, *Environ. Sci. Technol.*, **50**(12), 3456-3463.

Cho, H. S., Kang, J. H., Lee, D. I., and Ko, G. J., 2005, Contamination of PFOS and PFCs in water quality and surface sediments of Gwangyang Bay watershed, *Proc. Korean Mar. Environ. Energy Soc.*

Dixit, F., Barbeau, B., Mostafavi, S. G., and Mohseni, M., 2021, Review of Removal Techniques for the Treatment of PFAS-Contaminated Water, *Water*, **13**(3), 366.

Dudarko, M. J., Hladik, M. L., Roberts, A. L., and Strynar, M. J., 2024, Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances from Natural Waters, *Environ. Sci. Technol. Water*, **4**(5), 1234-1245.

Environmental Science and Research (ESR), 2022, National Survey of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Groundwater 2022, ESR.

Eschauzier, M. S., Vergouwen, E., and de Voogt, P., 2018, Applicability of the direct injection liquid chromatographic tandem mass spectrometric analytical approach to the sub-ng L-1 determination of perfluoroalkyl substances (PFAS), *Environ. Sci. Technol.*, **52**(1), 123-131.

European Parliament and Council, 2020, Directive (EU) 2020/2184 of 16 December 2020 on the quality of water intended for

- human consumption, *Off. J. Eur. Union L.*, **435**, 1-62.
- European Union Law (EU), EUR-Lex., <https://eur-lex.europa.eu> [accessed 25.04.23]
- Flores, C., Ventura, J., Martin-Alonso, J., and Caixach, J., 2013, Occurrence of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in N.E. Spanish surface waters and their removal in a drinking water treatment plant, *Sci. Total Environ.*, **461-462**, 618-626.
- Food Standards Australia New Zealand (FSANZ), <https://www.foodstandards.gov.au> [accessed 25.04.23]
- Forrester, E., and Matthis, J., 2018, Treatment solutions for PFAS removal: Evaluating total cost. *Forrester & Matthis*.
- Harding-Marjanovic, K. C., Houtz, E. F., Sedlak, D. L., and Alvarez-Cohen, L., 2015, Foaming and removal of perfluoroalkyl substances from groundwater, *Environ. Sci. Technol.*, **49**(10), 6267-6275.
- Hepburn, E., Madden, S., Szabo, C., Coggan, S., Clarke, M., Currell, C., and Allinson, A., 2019, Contamination of groundwater with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban redevelopment precinct, *Sci. Total Environ.*, **687**, 456-468.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), About IARC Mission. World Health Organization, <https://www.iarc.who.int/about-iarc-mission> [accessed 25.04.23]
- Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC), 2020, Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Technical/Regulatory Guidance, ITRC, https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2020/10/itrc_pfas_techreg_sept_2020_508-1.pdf [accessed 25.04.23]
- Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC), <https://pfas-1.itrcweb.org> [accessed 25.04.23]
- Izadpanah, A., and Javidnia, A., 2012, The ability of a nanofiltration membrane to remove hardness and ions from diluted seawater, *Water*, **4**(2), 283-294.
- Johnson, G. R., Brusseau, M. L., Carroll, K. C., Tick, G. R., and Duncan, C. M., 2022, Global distributions, source-type dependencies, and concentration ranges of per- and polyfluoroalkyl substances in groundwater, *Sci. Total Environ.*, **851**, 156602.
- Kothawala, D. N., Köhler, S. J., Östlund, A., Wiberg, K., and Ahrens, L., 2017, Influence of dissolved organic matter concentration and composition on the removal efficiency of perfluoroalkyl substances (PFASs) during drinking water treatment, *Water Res.*, **121**, 320-328.
- Kothawala, D. N., Sander, M., Hofstetter, T. B., Bolotin, J., and Gunten, U. V., 2017, Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption and ion exchange, *Water Res.*, **123**, 320-329.
- Kucharzyk, K. H., Darlington, R., Benotti, M., Deeb, R., and Hawley, E., 2017, Novel treatment technologies for PFAS compounds: A critical review, *J. Environ. Manage.*, **204**, 757-764.
- Lau, W. J., Ismail, A. F., Misdan, N., and Kassim, M. A., 2012, A recent progress in thin film composite membrane: A review, *Desalination*, **287**, 190-199.
- Lee, J. Y., Cha, J., and Lee, J., 2025, A review on the inflow paths, occurrence, fate, remediation technologies, and related regulations of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater, *J. Geol. Soc. Korea*, **61**(1).
- Lemlich, R., and Lavi, E., 1961, Foam fractionation with reflux, *Science*, **134**(3473), 191-191.
- Lemlich, R., 1972, Adsorptive Bubble Separation Techniques, Academic Press.
- Liu, X., and Sun, Y., 2021, Ion exchange removal and resin regeneration to treat PFAS in drinking water, *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**(4), 105432.
- McCleaf, P., Englund, S., Östlund, A., Lindegren, K., Wiberg, K., and Ahrens, L., 2017, Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests, *Water Res.*, **120**, 77-87.
- McCleaf, P., Kjellgren, Y., and Ahrens, L., 2021, Foam fractionation removal of multiple per- and polyfluoroalkyl substances from landfill leachate, *AWWA Water Sci.*, **3**(5), e1238. <https://doi.org/10.1002/aws2.1238>
- McGregor, R., 2020, Distribution of colloidal and powdered activated carbon for the in situ treatment of groundwater, *J. Water Resour. Prot.*, **12**(12), 1001-1018.
- McGuire, M. E., Schaefer, J., Richards, C. P., Backe, J. S., Field, J. A., and Houtz, L. S., 2014, Evidence of remediation-induced alteration of subsurface poly- and perfluoroalkyl substance distribution at a former firefighter training area, *Environ. Sci. Technol.*, **48**(12), 6644-6652.
- McNamara, J. D., Franco, R., Mimna, R., and Zappa, L., 2018, Comparison of activated carbons for removal of perfluorinated compounds from drinking water, *J. Am. Water Works Assoc.*, **110**(1), E2-E14.
- Ministry of Environment, 2018, August. 전국 정수장·산업단지 과불화화합물 검출 실태조사 발표 [Results of Investigation on Perfluorinated Compounds Detection in National Water Purification Plants and Industrial Complexes], Ministry of Environment, Press Release.
- Ministry of Environment, 2018, 2017년 잔류성유기오염물질 (POPs) 추정망 운영 결과보고서 [2017 Result Report of Persistent Organic Pollutants (POPs) Monitoring Network Operation], Ministry of Environment.

- Minnesota Pollution Control Agency, 2013, Perfluorinated chemicals in Minnesota's ambient groundwater, Minnesota Pollution Control Agency.
- Murakami, M., Kuroda, K., Sato, N., Fukushi, T., Takizawa, S., and Takada, H., 2009, Groundwater pollution by perfluorinated surfactants in Tokyo, *Environ. Sci. Technol.*, **43**(10), 3480-3486.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI), PubChem Substance and Compound databases, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov> [accessed 25.04.23]
- National Institute of Environmental Research, 2017, 담수어류 중 잔류성 유기오염물질의 축적성 연구(VI) [Accumulation Study of Persistent Organic Pollutants in Freshwater Fish (VI)], National Institute of Environmental Research.
- New Jersey EPA, 2014, Occurrence of perfluorinated chemicals in untreated New Jersey drinking water sources, New Jersey EPA.
- Newman, P., 2022, Foam Fractionation for PFAS Removal: Leveraging the Physiochemistry of PFAS Against Itself, Rem-Tech 2022, Edmonton, Alberta, Canada.
- Robey, N. M., da Silva, B. F., Annable, M. D., Townsend, T. G., and Bowden, J. A., 2020, Concentrating Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Municipal Solid Waste Landfill Leachate Using Foam Separation, *Environ. Sci. Technol.*, **54**(19), 12550-12559. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01266>
- Ross, I., McDonough, J., Miles, J., Storch, P., Thelakkat Kochunurayan, P., Kalve, E., Hurst, J., Dasgupta, S. S., and Burdick, J., 2018, A review of emerging technologies for remediation of PFASs, *Remediation*, **28**(2), 101-126.
- Rostkowski, P., Yamashita, N., So, I. 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., Jones, P. D., Kannan, K., and Giesy, J. P., 2006, Perfluorinated compounds in streams of the Shihwa industrial zone and Lake Shihwa, South Korea, *Environ. Toxicol. Chem.*, **25**(9), 2374-2380.
- Science History Institute, 2017, Historical biography: Roy J. Plunkett. Science History Institute, <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/roy-j-plunkett> [accessed 25.04.23]
- Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW), 2017, Scoping study for addressing risk to private water supplies from the presence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS).
- Seo, S., Han, J., Na, S., Lee, J., and Kim, M., 2024, Influence of molecular structure on the adsorption of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) to activated carbon in the aqueous phase, *J. Environ. Anal. Health Toxicol.*, **27**(4), 206. <https://doi.org/10.36278/jeht.27.4.206>
- Sharma, B. M., Bharat, G. K., Tayal, S., Larssen, T., Bečanová, J., Karásková, P., Whitehead, P. G., Futter, M. N., Butterfield, D., and Nizzetto, L., 2016, Perfluoroalkyl substances (PFAS) in river and ground/drinking water of the Ganges River basin: Emissions and implications for human exposure, *Environ. Pollut.*, **208**, 704-714.
- Shin, M. Y., Im, J. K., Kho, Y. L., Choi, K. S., and Zoh, K. D., 2009, Monitoring study of PFOA and PFOS in effluents from sewage treatment plants and the Han River in Seoul, *J. Environ. Health Sci.*, **35**(4), 334-342.
- Shoemaker, J. A., and Tetttenhorst, D. R., 2018, Method 537.1: Determination of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances in Drinking Water by Solid Phase Extraction and Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry (LC/MS/MS), U.S. Environmental Protection Agency.
- Sinclair, E., Mayack, D. T., Roblee, K., Yamashita, N., and Kannan, K., 2006, Occurrence of perfluoroalkyl surfactants in water, fish, and birds from New York State, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **50**(3), 398-410.
- Skutlarek, D., Exner, M., and Färber, H., 2006, Perfluorinated surfactants in surface and drinking water, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **13**(5), 299-307.
- Smaili, H., and Ng, C., 2023, Adsorption as a remediation technology for short-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water – a critical review, *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, **9**, 344-362.
- Smith, S. J., Lewis, J., Wiberg, K., Wall, E., and Ahrens, L., 2023, Foam fractionation for removal of per- and polyfluoroalkyl substances: Towards closing the mass balance, *Sci. Total Environ.*, **871**, 162050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162050>
- Smith, S. J., Wahman, D. G., Kleiner, E. J., Abulikemu, G., Stebel, E. K., Gray, B. N., Datsov, B., Crone, B. C., Taylor, R. D., Womack, E., Gastaldo, C. X., Sorial, G., Lytle, D., Pressman, J. G., and Haupt, L. M., 2023, Anion exchange resin and inorganic anion parameter determination for model validation and evaluation of unintended consequences during PFAS treatment, *ACS EST Water*, **3**(2), 576-587.
- Smith, S. J., Wiberg, K., McCleaf, P., and Ahrens, L., 2022, Pilot-Scale Continuous Foam Fractionation for the Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from Landfill Leachate, *ACS EST Water*, **2**(5), 841-851. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00032>
- So, M. K., Taniyasu, S., Yamashita, N., Giesy, J. P., Zheng, J., Fang, Z., Im, S. H., and Lam, P. K. S., 2004, Perfluorinated compounds in coastal waters of Hong Kong, South China, and Korea, *Environ. Sci. Technol.*, **38**(15), 4056-4063.
- Son, J. H., Chung, S. Y., and Kwon, B. G., 2017, Monitoring of perfluorinated compounds in seawater from the East and West Coasts of Korea, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **17**(1), 5-12.
- Sun, R., et al., 2024, New insights into thermal degradation products of long-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)

- and their mineralization enhancement using additives, *Environ. Sci. Technol.*, **58**(50), 22417-22430.
- Takagi, S., Adachi, F., Miyano, K., Koizumi, Y., Tanaka, H., Mimura, M., Watanabe, I., Tanabe, S., and Kannan, K., 2008, Perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanonate in raw and treated tap water from Osaka, Japan, *Chemosphere*, **72**(10), 1409-1412.
- Tang, C. Y., Fu, Q. S., Criddle, C. S., and Leckie, J. O., 2007, Effect of flux (transmembrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nanofiltration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing wastewater, *Environ. Sci. Technol.*, **41**(6), 2008-2014.
- Tang, C. Y., Shiang Fu, Q., Gao, D., Criddle, C. S., and Leckie, J. O., 2007, Effect of solution chemistry on the adsorption of perfluorooctane sulfonate onto mineral surfaces, *Environ. Sci. Technol.*, **41**(15), 5666-5672.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA, <https://www.epa.gov> [accessed 25.04.23]
- Vo, P. N. V., Nguyen, T. M., Bui, H. T., Chen, J., Huang, W., and Fang, C., 2020, Poly- and perfluoroalkyl substances in water and wastewater: A comprehensive review from sources to remediation, *Sci. Total Environ.*, **729**, 138995.
- We, A. C. E., Zamyadi, A., Stickland, A. D., Clarke, B. O., and Freguia, S., 2024, A review of foam fractionation for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from aqueous matrices, *J. Hazard. Mater.*, **465**, 133182.
- Westreich, P., Mimna, R., Brewer, J., and Forrester, F., 2018, The removal of short-chain and long-chain perfluoroalkyl acids and sulfonates via granular activated carbons: A comparative column study, *Remediation*, **28**(4), 43-55.
- Woodard, S., Berry, J., and Newman, B., 2017, Ion exchange resin for PFAS removal and pilot test comparison to GAC, *Remediation*, **27**(3), 19-27.
- Xiao, F., Zhang, C., Webster, M. F., Conder, R. C., Bowden, J. L., and Higgins, C. P., 2017, Sorption of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) relevant to AFFF-impacted groundwater using colloidal activated carbon, *Environ. Sci. Technol.*, **51**(11), 6342-6350.
- Xiao, F., Simcik, M. F., Halbach, T. R., and Gulliver, J. S., 2017, Sorption of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) Using Carbonaceous Sorbents, *Environ. Sci. Technol.*, **51**(11), 6342-6351.
- Yeo, M. K., Hwang, E. H., and Jeong, G. H., 2012, Distribution characteristics of perfluorinated compounds in major river water and sediment in South Korea, *Anal. Sci. Technol.*, **25**(5), 313-323.
- 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**, 1150-1158.
- Zareitalabad, P., Siemens, J., Hamer, M., and Amelung, W., 2013, Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in surface waters, sediments, soils and wastewater – A review on concentrations and distribution coefficients, *Chemosphere*, **91**, 725-732.
- Zeng, C., Atkinson, A., Sharma, N., Ashani, H., Hjelmstad, A., Venkatesh, K., and Westerhoff, P., 2020, Removing per- and polyfluoroalkyl substances from groundwaters using activated carbon and ion exchange resin packed columns, *AWWA Water Sci.*, **2**(1), e1172.