



Review

지하수 내 과불화화합물(PFAS)의 유입경로, 발현, 운명, 정화 방법 및 관련 법규 고찰

이진용^{1,*}, 차지혜^{1,2}, 이재중²

¹강원대학교 지질학과

²미주리대학교 캔자스시티 과학·공학부

A review on the inflow paths, occurrence, fate, remediation technologies, and related regulations of per- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater

Jin-Yong Lee^{1,*}, Jihye Cha^{1,2}, Jejung Lee²

¹Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

²School of Science and Engineering, University of Missouri, Kansas City, MO 64108, USA

Received: September 1, 2024 / Revised: November 8, 2024 / Accepted: November 20, 2024

*Corresponding author: +82-33-250-8551 / E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

요약: 본 리뷰에서는 지하수 내 과불화화합물(PFAS)의 유입경로, 발현, 운명, 정화 방법 및 관련 법규를 고찰하였다. 과불화화합물은 독특한 화학적 특성으로 인해 다양한 산업, 상업, 농업 분야에서 널리 사용되지만, 환경에서의 지속성이 높아져 지하수 오염 문제가 대두되고 있다. 본 고찰에서는 산업 배출, 폐기물 관리, 농업 유출 등 과불화화합물의 주요 유입경로를 살펴보고, 지하수에서의 농도 분포를 지역별로 살펴보았다. 또한 과불화화합물의 이동성, 변형, 생물 농축 가능성 등을 통해 지하수 내 운명을 논의하였으며, 활성탄 흡착, 이온 교환, 막 분리, 고급 산화 공정, 생물학적 처리 등 기존 및 새로운 정화 기술을 평가하였다. 아울러 국내외 법규와 정책을 검토하고, 과불화화합물 오염 관리에서의 도전과 향후 방향을 논의하였다. 마지막으로 과불화화합물의 환경 및 건강 영향을 완화하기 위한 지속적인 연구와 보다 효과적인 전략 개발의 필요성을 강조하였다.

주요어: 과불화화합물, 발암물질, 지하수, 정화 방법, 건강영향

ABSTRACT: This review examines the pathways, occurrence, fate, remediation methods, and regulatory frameworks associated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater. PFAS are synthetic chemicals widely used in various industrial, commercial, and agricultural applications due to their unique chemical properties. However, these properties also make PFAS highly persistent in the environment, leading to significant contamination concerns in groundwater. The review explores the primary sources of PFAS entry into groundwater, including industrial discharges, waste management practices, and agricultural runoff. The occurrence and distribution of PFAS in groundwater are analyzed, highlighting the variability in concentration levels across different regions. The fate of PFAS in groundwater is discussed in terms of their mobility, transformation, and bioaccumulation potential. The review also evaluates traditional and emerging remediation techniques, such as activated carbon adsorption, ion exchange, membrane filtration, advanced oxidation processes, and biological treatments. Additionally, it provides an overview of existing regulations and policies at the national and international levels, addressing the challenges and advancements in managing PFAS contamination. The review concludes with a discussion on the need for continued research and the development of more effective strategies to mitigate the environmental and health impacts of PFAS.

Key words: per- and perfluoroalkyl substances, carcinogen substance, groundwater, remediation technologies, health effect

1. 서론

과불화화합물(PFAS, Per- and Polyfluoroalkyl Substances)은 높은 안정성과 내화학성을 지닌 인공화합물질로, 다양한 산업 및 소비재에 널리 사용된다. PFAS는 물과 기름, 열에 대한 저항성이 강하며, 이러한 특성 때문에 방수제, 식품 포장재, 소화용 폼(foam), 전자제품 등에 널리 사용된다(Buck *et al.*, 2011; Kwiatkowski *et al.*, 2020). 그러나 이러한 화합물은 탄소와 불소의 안정적인 화학 구조로 자연적으로 분해되지 않아 ‘영원한 화학물질(never chemical)’로 알려져 있으며, 환경과 생태계에서의 축적이 우려된다(Sunderland *et al.*, 2019; Glüge *et al.*, 2020).

한편 PFAS는 환경 중에서 쉽게 이동하며, 특히 지하수로 유입되어 수질 오염을 유발한다. 이러한 지하수 오염은 먹는 물 섭취 등을 통해 인간의 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 다양한 연구에서 PFAS 노출이 사람의 면역력 감소, 콜레스테롤 수치 상승, 발암 가능성 증가 등과 연관이 있음을 보여주고 있다(C8 Science Panel, 2012; Grandjean and Clapp, 2015; ATSDR, 2021). 특히, 신규 미량 오염물질인 PFAS 화합물에 대한 연구는 아직 충분하지 않아, 더 많은 연구가 필요하다.

이 리뷰 논문의 목적은 지하수 내 PFAS에 대한 최신 연구 동향을 파악하고, PFAS의 환경 내 운명과 거동, 정화 방법, 그리고 세계 여러 나라에서 시행되고 있는 관련 법규를 종합적으로 고찰하는 것이다. 이러한 포괄적인 분석을 통해 지하수 내 PFAS 문제에 대한 심층적인 이해를 돕고, 향

후 연구 및 정책 수립에 기여하고자 한다. 본 고찰에서는 세계적으로 문헌연구에 많이 이용되고 있는 Web of Science 데이터베이스를 활용하여 ‘groundwater’와 ‘PFAS’를 주요어로 설정하여 관련 논문들을 검색하고 분석하였다.

구체적으로는 지하수 내 PFAS에 관한 기존 연구들을 연도별, 지역별로 고찰하여 연구의 진행 상황과 최근의 연구 집중 분야를 파악하고 주요 쟁점을 이해한다. 특히 PFAS의 물리적, 화학적 특성, 환경 내에서의 잔류성, 그리고 지하수로의 유입 및 확산 메커니즘을 중점적으로 다룬다. 또 현재 사용되고 있는 PFAS의 정화 방법과 그 효과를 분석하며, 이와 관련된 최신 기술 동향을 고찰한다. 특히 기존 정화 기술의 한계와 새로운 기술 개발의 필요성을 토의한다. 그리고 세계 여러 나라에서 시행 중인 PFAS 관련 법규와 정책을 비교 분석하여, 각국의 규제 접근 방식을 평가하고 향후 발전 방향을 제시한다. 이를 통해 PFAS 관리 및 규제의 글로벌 트렌드를 이해하는 데 중요한 정보를 제공할 것이다.

2. 연구논문 동향

상기한 바와 같이 지하수와 PFAS를 키워드로 검색한 결과 총 758건의 논문이 검색되었으며 연구논문의 수는 꾸준히 증가해왔다(그림 1a). 연구 초기인 2010년과 2013년에는 매년 소수의 논문만이 출판되었으나, PFAS 오염에 대한 인식과 우려가 높아지면서 관련 연구논문의 수는 급격히 증가하였다(Wang *et al.*, 2017; Glüge *et al.*, 2020). 2014

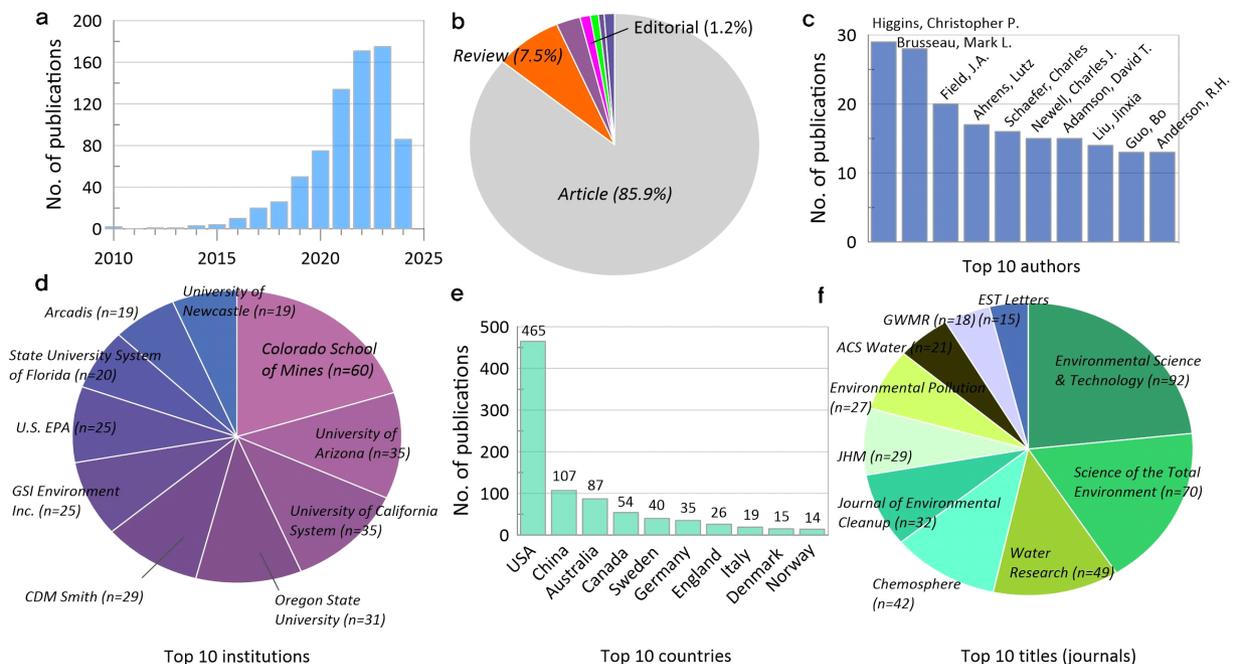


Fig. 1. Publications on PFAS and groundwater searched for Web of Science database on August 10, 2024.

년부터는 논문 수가 더욱 빠르게 증가하며, PFAS에 대한 관심과 연구의 중요성이 커지고 있음을 보여준다. 한편 전체 논문의 약 85.93%가 연구논문(Article)으로 구성되어 있다(그림 1b). 이는 PFAS와 관련된 연구가 주로 실험 및 데이터 기반의 연구로 이루어지고 있음을 의미한다. 그 외 리뷰 논문(Review article)은 약 7.54%를 차지하며, 이는 이 분야의 지식이 점점 더 체계화되고 있다는 것을 시사한다. 초기 접근 논문(Early access article), 사설(Editorial material), 학술회의 초록(Meeting abstract) 등의 유형은 상대적으로 적은 비율을 차지한다.

상위 게재 저자 순에 의하면 콜로라도광산대학(Colorado School of Mines)의 Christopher P. Higgins, 아리조나대학(University of Arizona)의 Mark L. Brusseau와 같은 주요 연구자들이 PFAS와 지하수 관련 연구에 큰 기여를 하고 있음을 확인할 수 있다(Higgins and Luthy, 2006; Higgins *et al.*, 2007; Brusseau and Van Glubt, 2019; Brusseau *et al.*, 2020; 그림 1c, 1d). 이러한 연구자들은 지질학을 기반으로 지하수를 탐구하는 것 외에도 주로 환경과학 분야에서도 잘 알려진 기관에 소속되어 있으며, 특히 이들이 속한 기관이 PFAS 연구의 중심에 있음을 보여준다. 한편 연구 논문 출판 수에서 국가별로는 미국이 가장 많은 기여를 하고 있으며, 465편의 논문이 출판되었다(그림 1e). 이는 미국이 PFAS에 대한 환경 연구와 규제에 적극적으로 나서고 있음을 반영한다. 그리고 중국, 호주, 캐나다 등도 상당한 연구를 수행하고 있으며, 이러한 연구 활동은 각국의 PFAS 오염 문제의 심각성과 연구의 필요성을 반영한다.

한편 PFAS와 지하수 관련 연구는 “Environmental Science & Technology”와 같은 저명 저널에 많이 게재되고 있으며, 이 저널은 92편의 논문을 출판한 바 있다(그림 1f). 이외에도 “Science of the Total Environment”, “Water Research”, “Chemosphere” 등이 중요한 저널로서, 이들 저널이 PFAS 오염 분야에서 높은 영향력을 갖고 있음을 나타낸다.

3. 지하수 내 PFAS의 유입경로

3.1. 산업 및 상업 활동

PFAS는 다양한 산업 및 상업 활동을 통해 지하수에 유입될 수 있다. 이러한 유입경로는 주로 PFAS를 포함한 화학물질이 사용되는 공정과 폐기물 관리 과정에서 발생한다(Liu *et al.*, 2019; Sunderland *et al.*, 2019). 금속 도금, 전자제품 제조, 섬유 및 가죽 방수 처리, 불소화 화학제품 생산 등에서 PFAS가 필수적인 역할을 한다(그림 2). 그러므로 제조, 사용, 폐기의 각 단계마다 환경(폐수, 배출 가스, 고체 폐기물 등)으로 방출되어 하천을 따라 해양으로 이동하거나 이동 중 함양되어 지하수에 유입될 수 있다.



Fig. 2. Sources of PFAS.

한편 상업적 용도로도 PFAS가 많이 사용된다. 특히 소화용 폼(firefighting foam)은 공항, 군사 기지, 화학 공장 등에서 대량으로 사용되며, 이로 인한 토양 및 지하수 오염이 문제가 되고 있다(Moody and Field, 2000; Buck *et al.*, 2011; Houtz *et al.*, 2013). 소화용 폼 사용 후 남은 PFAS는 토양에 흡착되거나 지하수로 침투하여 오염을 일으킬 수 있다. 그리고 PFAS는 프라이팬, 종이컵 코팅재 등 다양한 상업적 용도로도 널리 사용된다(Blum *et al.*, 2015). 프라이팬과 같은 조리기구에는 PFAS가 포함된 비스틱(Non-stick) 코팅이 사용되는데 이런 코팅은 음식이 팬에 달라붙지 않도록 도와주며, 조리 및 청소를 쉽게 해준다(Begley *et al.*, 2005). 대표적인 PFAS 화합물로는 테플론이 있으며, 이는 폴리테트라플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene, PTFE)이라는 형태로 프라이팬 표면에 코팅된다. 그리고 PFAS는 종이컵의 내수성 코팅 재료로도 사용된다. 종이컵에 PFAS 기반 코팅을 적용하면 음료가 새지 않도록 방지할 수 있으며, 컵의 구조적 무결성을 유지하는 데 도움이 된다(Trier *et al.*, 2011). PFAS는 또 방수 처리된 의류와 카펫, 얼룩 방지제, 기름 및 물을 튕겨내는 특성을 요구하는 제품에서 많이 사용된다(Buck *et al.*, 2011; Vierke *et al.*, 2012a). 이런 상업 물질들의 제조 및 사용 과정에서 지하수와 토양 오염의 원인이 될 수 있다.

3.2. 폐기물 처리 및 관리

PFAS는 폐기물 처리 및 관리 과정에서 지하수로 유입될 수 있으며, 자연에서 쉽게 분해되지 않는 특성으로 인해 장기간 잔류할 수 있다. 이러한 이유로 환경 오염과 인체 건강

에 큰 위협을 가할 수 있다. PFAS는 다양한 제품에서 사용된 후 폐기되거나 폐수 처리 과정에서 오염이 발생하며, 이는 여러 경로를 통해 지하수로 침투한다(Dauchy *et al.*, 2017; Post *et al.*, 2017).

한편 폐기물 소각 처리 중에도 PFAS가 대기로 방출되거나 잔재물에 남아 있을 수 있으며, 이들이 다시 환경으로 유입되면서 토양과 지하수를 오염시킬 수 있다(Weber *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013a). 특히 소각 잔재물은 주변에 매립되거나 다른 여러 방식으로 처리될 때, 다시 PFAS 오염의 원인이 될 수 있다.

그리고 폐수 처리장에서 PFAS는 기존의 수처리 기술로 완전히 제거되지 않으며, 처리된 물에서 PFAS 일부가 잔류할 수 있다(Rahman *et al.*, 2014; Krafft and Riess, 2015). 처리된 폐수는 지표수로 방류되거나 재활용되어 지하수로 침투할 수 있으며, 이는 지하수 오염의 또 다른 경로가 된다. 또한, 폐수 처리 과정에서 생성된 하수 슬러지 및 바이오슬러지에도 PFAS가 농축될 수 있으며, 이들 물질이 재활용되거나 자연환경에 매립될 경우, 다시 지하수로 유입될 가능성이 있다(Venkatesan and Halden, 2013; USEPA, 2022).

3.3. 농업 및 기타 유입원

농업에서는 주로 바이오슬러지(인간 및 동물의 폐기물에서 유래된 유기 비료)의 사용을 통해 PFAS가 토양에 유입될 수 있다(Venkatesan and Halden, 2014; USEPA, 2019a). 이러한 바이오슬러지는 주로 폐수 처리 공정에서 발생하며, 농업에 비료로 활용될 때 PFAS가 포함될 수 있다. 이 비료가 토양에 사용되면 PFAS가 토양에 흡수되거나 지표 아래 지하수로 침투할 가능성이 있다. 또한, 농업에서 사용

하는 일부 농약 및 제초제도 PFAS를 포함하고 있을 수 있으며, 이러한 화학물질의 잔류물이 시간이 지나면서 토양과 지하수를 오염시킬 수 있다(Blaine *et al.*, 2013; Milinovic *et al.*, 2015).

4. 지하수에서 PFAS의 발현

4.1. PFAS의 물리적 및 화학적 특성

PFAS는 화학적 구조에서 탄화수소의 기본 골격 중 수소(H)가 불소(F)로 치환된 형태의 합성 화합물이다(Buck *et al.*, 2011; 그림 3). PFAS는 탄소 개수에 따라 긴 사슬(long-chain)과 짧은 사슬(short-chain)로 분류되는데, PFAS는 매우 안정적인 물리적 및 화학적 특성을 가지며, 주로 다음과 같은 특징이 있다.

첫째는 내열성과 화학적 안정성이다. PFAS는 불소-탄소 결합이 매우 강해, 열과 화학적 분해에 저항성이 크다(Wang *et al.*, 2017). 이로 인해 PFAS는 환경에서 쉽게 분해되지 않으며, “영원한 화학물질”로 불리기도 한다. 이러한 안정성은 PFAS가 환경에서 오랜 기간 동안 존재할 수 있게 만든다.

둘째는 친수성(hydrophilic)과 소수성(hydrophobic)을 모두 보이는 양면성이다. PFAS 분자는 양극성 구조를 가지고 있어, 한쪽 끝은 물과 잘 혼합되는 친수성을, 다른 쪽 끝은 물을 튕겨내는 소수성을 보인다(Gebbink and van Leeuwen, 2020). 이러한 성질로 인해 PFAS는 표면활성제(surfactant)로 사용되며, 오염물질이 물과 같은 액체 매체에서 어떻게 이동하고 분포하는지를 크게 좌우한다.

셋째는 저휘발성이다. 대부분의 PFAS는 자연상에 고체 상태로 존재하며, 상온에서는 휘발성이 매우 낮다(Cousins

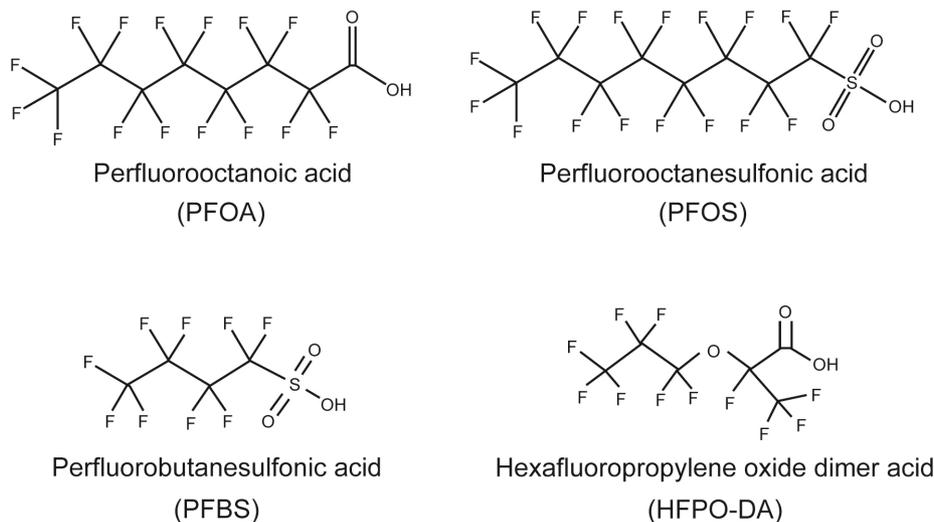


Fig. 3. Various chemical forms of PFAS.

Table 1. Some representative studies of PFAS contamination in groundwater.

Region	Measured PFAS concentration range (ng/L)	Primary sources of contamination	References
Minnesota, USA	2 - 150	Industrial discharges, Firefighting sites	Hu <i>et al.</i> (2016)
North Carolina, USA	10 - 1500	Chemical plants	Sun <i>et al.</i> (2016)
Stockholm region, Sweden	5 - 90	Airforce bases, Firefighting training areas	Filipovic <i>et al.</i> (2015)
Baden-Württemberg, Germany	1 - 20	Industrial wastewater, Landfills	Skutlarek <i>et al.</i> (2006)
Jiangsu Province, China	7 - 132	Electronics manufacturing	Wang <i>et al.</i> (2019)
Kyoto region, Japan	0.5 - 30	Electronics manufacturing, Agricultural runoff	Lien <i>et al.</i> (2011)
Victoria, Australia	0.2 - 40	Agricultural activities, Firefighting sites	Thompson <i>et al.</i> (2011)
Ansan, South Korea	10 - 180	Electronics and chemical plants	Lee <i>et al.</i> (2017)
Helsinki region, Finland	1 - 50	Commercial and industrial wastewater	Hölzer <i>et al.</i> (2008)
Ontario, Canada	2 - 35	Industrial discharges, Waste management	Munoz <i>et al.</i> (2020)

et al., 2016). 이로 인해 대기 중으로 쉽게 이동하지 않지만, 물이나 토양에 침투하여 지속적으로 환경 오염을 발생시킬 수 있다.

넷째는 높은 용해도와 저흡착성이다. 일부 PFAS, 특히 짧은 사슬을 가진 화합물은 물에 대해 높은 용해도를 가지며(Giesy and Kannan, 2002; Lindstrom *et al.*, 2011), 토양이나 퇴적물에 잘 흡착되지 않는다(Zareitalabad *et al.*, 2013; Brusseau *et al.*, 2020). 이러한 특성은 PFAS가 지하수 내에서 쉽게 이동할 수 있게 하며, 오염 범위가 넓어질 수 있는 위험성을 증가시킨다.

이러한 물리적 및 화학적 특성들은 PFAS가 환경에서 어떻게 거동하고, 지하수 및 토양 내에서 오염을 유발할 수 있는지를 이해하는 데 중요한 요소이다. PFAS의 내구성과 이동성은 특히 환경 복원(정화) 및 관리에 큰 도전 과제를 제기한다.

4.2. 국내외 지하수 PFAS 오염 사례

표 1은 전 세계 여러 지역에서 측정된 지하수 내 PFAS 농도와 주요 오염원 그리고 참고문헌의 몇 가지 사례를 정리한 것이다. PFAS에는 Perfluorooctanoic acid (PFOA)와 Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)가 포함되며, 이들은 주로 산업 지역과 특정 오염원과 연관된 환경 오염 물질이다.

미국 미네소타 주의 경우 검출된 PFAS 농도 범위는 2-150 ng/L이며 이 지역의 지하수 오염은 주로 산업 배출과 소방 훈련장에서 발생한다. 특히 PFAS를 포함한 소방용 폼(foam)이 과거에 광범위하게 사용되어 지하수 오염이 발생한 것으로 보고되었다(Hu *et al.*, 2016). 한편 미국 노스캐롤라이

나 주의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 10-1,500 ng/L이며 이 지역은 PFAS를 제조하거나 사용하는 화학 공장으로 인해 오염이 심각하다. 특히 산업 공정에서 중대한 지하수 오염이 발생하는 것으로 알려진다(Sun *et al.*, 2016). 또 스웨덴 수도권 지역 지하수에서 측정된 PFAS 농도는 5-90 ng/L 범위를 보였으며 이 지역의 지하수 오염은 주로 공군 기지와 소방 훈련장에서 발생한다. 이러한 시설에서는 PFAS를 포함한 소방용 폼이 사용되어 지하수가 오염된 것으로 알려진다(Filipovic *et al.*, 2015).

독일 바덴뷔르템베르크 주의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 1-20 ng/L로 이 독일 지역에서는 산업 폐수와 매립지가 PFAS 오염의 주요 원인으로 보이며, 낮은 농도 범위로 보았을 때 산업 폐수의 배출이 어느 정도 관리되고 있음을 시사한다(Skutlarek *et al.*, 2006). 한편 중국 장쑤성의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 7-132 ng/L로 전자제품 제조의 중심지인 장쑤성은 이들 산업 활동으로 인해 상당한 PFAS 오염을 겪고 있는 것으로 파악된다. 그리고 농도 범위가 넓은 것은 산업 배출과 환경 관리의 차이에 따라 다양한 오염 수준을 반영한다(Wang *et al.*, 2019). 일본 교토 지역의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 0.5-30 ng/L로 교토 지역은 전자기기 제조와 농업용 폐수로 인해 PFAS 오염이 발견되는데 비교적 낮은 농도는 PFAS 사용이 적거나 관리가 잘 이루어지고 있음을 나타낸다(Lien *et al.*, 2011). 그리고 지하수를 많이 사용하는 호주 빅토리아 주의 지하수의 경우 측정된 PFAS 농도 범위는 0.2-40 ng/L로 나타났다. 빅토리아 주에서는 농업 활동과 소방 훈련장이 주요 오염원으로 추정된다. 이 지역의 농도는 세계적인

로 보고된 범위 중 낮은 편에 속하며, 이는 PFAS 사용이 적었음을 나타낸다(Thompson *et al.*, 2011).

핀란드 수도권 지역의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 1-50 ng/L로 핀란드 수도권 지역에서는 상업 및 산업 폐수가 주요 오염원으로 알려진다. 중간 정도의 농도 범위는 지속적인 오염이 있음을 나타내지만, 어느 정도의 규제가 있음을 시사한다(Hölzer *et al.*, 2008). 한편 캐나다 온타리오 주의 지하수에서 측정된 PFAS 농도 범위는 2-35 ng/L로 온타리오 주에서는 산업 배출과 폐기물 관리 관행이 주요 오염원으로 알려졌지만 농도가 낮은 편으로 상당한 관리 수준을 추정케 한다(Munoz *et al.*, 2020). 마지막으로 우리나라 안산시의 지하수에서 측정된 PFAS의 농도는 10-180 ng/L로 나타났으며 산업 도시인 안산은 전자 및 화학 제조 공장으로 인해 상당한 PFAS 오염을 겪고 있다. 비교적 높은 농도 범위는 환경으로 배출되는 상당한 양의 PFAS 오염물질을 반영한다(Lee *et al.*, 2017).

위에서 살펴본 바와 같이 지하수 내 PFAS 농도는 지역에 따라 크게 다르며, 이는 주로 지역 산업 활동, 소방 훈련장 사용, 폐기물 관리에 따라 달라진다(Sun *et al.*, 2016; Guelfo and Adamson, 2018). 일반적인 오염원으로는 화학 및 전자 제조업에서의 산업 배출, 소방 훈련장, 농업용 폐수, 매립지 침출수 등이 있는데 예를 들어, 미국 노스캐롤라이나 주는 화학 공장이 많이 존재하기 때문에 가장 높은 농도가 보고되었다. 반면 호주 빅토리아 주와 일본 교토 지역은 상대적으로 낮은 농도를 보고하고 있으며, 이는 더 엄격한 규제나 PFAS 사용이 적었기 때문으로 볼 수 있다.

4.3. 지하수 환경에서의 이동 및 변형

PFAS는 그 독특한 화학적 특성으로 인해 지하수 환경에서 복잡한 이동 및 변형(분해) 과정을 겪는다. PFAS는 지하수 내에서 다음과 같은 주요 메커니즘을 통해 이동하고 변형된다.

첫째는 확산과 이송이다. PFAS는 지하수 내에서 확산(diffusion)과 이송(advection)에 의해 이동할 수 있다. 확산은 농도 기울기에 의해 PFAS가 퍼지는 과정이며, 이송은 지하수의 흐름에 의해 PFAS가 물리적으로 이동하는 과정을 의미한다(McGuire *et al.*, 2014; Cousins *et al.*, 2016). 특히 이송에 의한 이동은 지하수의 흐름 속도에 크게 의존하며, 이는 PFAS가 오염된 지하수 영역을 확산시키는 주요 기작 중 하나이다. 이송 중 분산(dispersion)에 의해 오염물질이 더 퍼져나가는 현상도 발생한다.

둘째, 흡착과 탈착으로 PFAS는 주로 토양 및 지하수 내의 고체 입자에 흡착되는 경향이 있다(Higgins and Luthy, 2006; Ahrens, 2011; Ahrens and Bundschuh, 2014). 그러나 PFAS의 길고 짧은 사슬 구조에 따라 흡착 강도가 달라

지며, 짧은 사슬 PFAS는 흡착이 적고 물에 더 잘 용해되어 지하수 내에서 더 먼 거리까지 이동할 수 있다(Higgins and Luthy, 2006; Gellrich *et al.*, 2012). 이러한 흡착과 탈착 과정은 PFAS의 이동성을 결정하는 중요한 요소이다. 또한 토양의 유기물 함량, pH, 이온 강도 등도 PFAS의 흡착 특성에 영향을 미친다(Ahrens and Bundschuh, 2014).

셋째는 변형(transformation)과 분해(degradation)이다. PFAS는 매우 안정한 화합물로, 지하수 내에서 자연적으로 분해되거나 변형되는 경우가 드물다(Vecitis *et al.*, 2009; Buck *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013b). 그러나 일부 PFAS는 특정 조건에서 미생물에 의해 부분적으로 변형될 수 있으며, 이 과정에서 더 짧은 사슬을 가진 PFAS로 변환될 수 있다(Higgins and Luthy, 2006; Liu and Mejia Avendano, 2013). 이러한 짧은 사슬 PFAS는 상대적으로 이동성이 높아져 지하수 오염을 더욱 확산시킬 수 있다(Zhang *et al.*, 2013).

넷째는 비정상적인 이동이다. PFAS의 일부는 지하수 흐름 경로를 벗어나 비정상적인 방식으로 이동할 수 있다(D'eon and Mabury, 2011). 예를 들어, 공기 중으로 배출된 PFAS가 비와 함께 지하로 침투하거나, 유기물이 많은 특정 지하 환경에서 더 멀리 이동하는 사례도 보고되었다(Vierke *et al.*, 2012b; Ahrens and Bundschuh, 2014). 이러한 이동은 예상보다 더 넓은 지역에서 오염을 발생시킬 수 있으며, 이는 환경 관리와 정화 전략을 더욱 어렵게 만든다(Kannan *et al.*, 2004; Lindstrom *et al.*, 2011).

결론적으로 PFAS는 지하수 환경에서 매우 이동성이 크고 다양한 요인에 의해 그 이동과 변형이 복잡하게 이루어진다. 이러한 특성은 지하수 오염 문제를 해결하는 데 있어서 큰 도전 과제가 되며, 정확한 이해와 평가가 필요하다.

5. 생태계 및 인간 건강에 미치는 영향

PFAS는 환경에서 매우 안정적이며 이로 인해 생태계와 인간 건강에 걸쳐 광범위한 영향을 미친다. PFAS의 생물 농축(bioaccumulation) 및 생물 증폭(biomagnification) 특성은 이들 화합물이 먹이사슬을 통해 전달되면서 생태계와 인간 건강에 심각한 영향을 미치게 한다(Houde *et al.*, 2006; Conder *et al.*, 2008; Kelly *et al.*, 2009).

첫째, PFAS는 주로 수생 생태계에서 농축되며, 물고기, 조류, 포유류 등 다양한 수생 생물에게 영향을 미친다(Giesy and Kannan, 2001). PFOS와 같은 긴 사슬 PFAS는 물고기에서 높은 농도로 축적될 수 있으며, 이는 상위 포식자인 조류나 수생 포유류에 의해 섭취된다. 연구에 따르면, PFAS의 축적은 생식 능력 저하, 성장 지연, 면역 기능 억제 등의 생리적 문제를 유발할 수 있으며(Lau *et al.*, 2007), 높은 농도로 축적되면 독성 효과가 발생하여 개체군의 생존에 영

향을 미칠 수 있다(Giesy and Kannan, 2001).

둘째, 육상 생물도 PFAS에 노출될 수 있으며, 이는 주로 오염된 토양, 물, 먹이 등을 통해 발생한다. 육상 포유류는 먹이사슬을 통해 PFAS를 섭취할 수 있으며, 이로 인해 생식 장애, 호르몬 교란, 면역 기능 억제 등의 영향이 보고되고 있다(Lau *et al.*, 2007; DeWitt *et al.*, 2012). 특히, 육상 포유류의 간과 신장에 PFAS가 집중적으로 축적되어 독성 효과가 발생할 수 있다. 일부 연구에서는 PFAS가 특정 종의 생존율에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다(Stahl *et al.*, 2011).

한편 PFAS는 사람에게도 영향을 준다. 인간은 오염된 식수, 식품, 공기 등을 통해 PFAS에 노출될 수 있다. PFAS는 신체 내에서 쉽게 분해되지 않으며, 주로 간, 신장, 혈액에 축적된다(ATSDR, 2021). 장기간 노출 시 PFAS는 여러 가지 건강 문제를 일으킬 수 있다. 예를 들어, PFAS는 간 효소 수치를 변화시키고, 콜레스테롤 수치를 증가시키며, 면역 반응을 억제할 수 있다(Grandjean and Clapp, 2015). 일부 연구에서는 PFAS가 발암성과 관련이 있을 수 있다고 보고하고 있으며, 특히 신장암, 고환암 등의 위험성을 증가시킬 수 있다(Barry *et al.*, 2013). 임신 중 PFAS에 노출된 경우 태아의 발달에 영향을 미칠 수 있으며 저체중 출생, 조산, 신경 발달 장애와 같은 문제를 유발할 수 있다(Braun and Lanphear, 2014). 성인 남성의 경우 생식 기능에 부정적인 영향을 미쳐, 정자 수 감소 및 정자 질 저하를 초래할 수 있다(Joensen *et al.*, 2009). 그리고 PFAS는 면역 체계에도 영향을 미칠 수 있다. 연구에 따르면, PFAS 노출은 백신 반응을 감소시키고, 감염에 대한 저항력을 약화시킬 수 있다(Grandjean *et al.*, 2012; Granum *et al.*, 2013). 특히, 어린이의 경우 면역 기능이 저하되어 감염병에 대한 취약성이 증가할 수 있다.

6. 지하수에서의 PFAS 정화 방법

6.1. 기존 정화 기술

오염된 지하수를 양수하여 PFAS를 제거하는 지상처리(ex-situ) 방법이다. (1) 활성탄 흡착법(Activated Carbon Adsorption)은 가장 널리 사용되는 PFAS 제거 기술 중 하나이다. 활성탄은 높은 표면적과 강한 흡착 능력을 가지고 있어 PFAS를 효과적으로 제거할 수 있다(Dudley *et al.*, 2020). 주로 입자상 활성탄(granular activated carbon, GAC)과 분말상 활성탄(powdered activated carbon, PAC)이 사용되며, 특히 긴 사슬을 가진 PFAS를 흡착하는 데 효과적이다(Appleman *et al.*, 2014). 그러나 이 방법은 주기적인 활성탄의 교체가 필요하고, 짧은 사슬 PFAS 제거에는 상대적으로 효율이 낮을 수 있다. (2) 이온 교환(Ion Exchange)

방법은 PFAS의 음전하를 이용해 수지에 결합시키는 방식으로, 주로 물 처리 공정에서 활용된다(Cousins *et al.*, 2020). 이 방법은 비교적 높은 제거 효율을 가지지만, 수지의 포화 및 재생 과정에서 추가적인 비용과 관리가 필요하다(Schröder and Meesters, 2005). (3) 막 분리(Membrane Filtration) 방법은 나노필트레이션(nanofiltration, NF) 또는 역삼투압(reverse osmosis, RO)과 같은 방법을 이용해 PFAS를 제거한다(Appleman *et al.*, 2014). 이 방법은 매우 작은 크기의 막을 사용해 물 속의 PFAS를 물리적으로 걸러내며, 짧은 사슬과 긴 사슬 PFAS 모두를 효과적으로 제거할 수 있다(Rahman *et al.*, 2014). 하지만 막의 유지 관리 비용이 높고, 처리된 농축물의 처리가 필요하다는 단점이 있다.

6.2. 새로운 정화 기술 및 접근 방법

첫째는 고급 산화 공정(Advanced Oxidation Processes, AOP)으로 강력한 산화제를 사용해 PFAS를 분해하는 방법이다. 일반적으로 오존, 과산화수소, UV 빛을 이용해 PFAS 분자를 분해한다. 그러나 이 방법은 PFAS를 부분적으로 분해할 수 있으나, 완전한 분해가 어려울 수 있으며, 처리 비용이 상대적으로 높다(Vecities *et al.*, 2009).

두 번째는 전기화학적 산화(Electrochemical Oxidation)로 이는 전극을 이용해 PFAS를 산화시키는 방법이다. 전기적 자극을 통해 PFAS 분자가 분해되며, 이를 통해 지하수에서 PFAS 농도를 낮출 수 있다. 이 방법은 높은 제거 효율을 보일 수 있으나, 전기 비용과 전극 재료의 선택이 중요한 변수로 작용한다(Lin *et al.*, 2015).

세 번째는 생물학적 처리(Biological Treatment) 방법으로 미생물을 이용해 PFAS를 분해하거나 변환한다. 특정 미생물 종은 PFAS의 일부를 분해할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 이를 활용한 연구가 진행되고 있다(Luo *et al.*, 2014). 그러나 생물학적 처리는 아직 초기 단계에 있으며, 실제 환경에서의 효율성에 대한 추가 연구가 필요하다.

6.3. 정화 방법의 효과 및 한계

소개된 정화 방법을 살펴보면 활성탄 흡착법은 널리 검증된 기술로, 특히 긴 사슬 PFAS 제거에 매우 효과적이다. 이온 교환은 특정 PFAS에 대해 높은 제거 효율을 보이며, 빠른 처리 속도를 가지며 막 분리 기술은 다양한 PFAS를 높은 효율로 제거할 수 있어, 복합적인 오염 상황에서도 유용하다. 또한 고급 산화 공정과 전기화학적 산화는 PFAS 분해에 유망한 기술로, 기존 기술과 결합해 효과를 극대화할 수 있다(Rahman *et al.*, 2014; Schwabe *et al.*, 2020).

그러나 활성탄 흡착법은 짧은 사슬 PFAS 제거에 비효율적일 수 있으며, 사용 후 활성탄의 처리 문제가 있다. 또 이온 교환은 수지 포화 및 재생에 따른 운영 비용이 발생하며,

특정 PFAS에 대한 선택적 제거가 필요하다(Appleman *et al.*, 2014). 그리고 막 분리 기술은 처리 후 농축된 PFAS 용액의 처리 문제가 있으며, 막의 오염 및 손상이 발생할 수 있다(Tang *et al.*, 2006). 또한 고급 산화 공정과 전기화학적 산화는 고비용의 문제와 함께 PFAS의 완전한 분해가 어려울 수 있다(Rahman *et al.*, 2014). 그리고 생물학적 처리는 아직 연구 단계로 실제 적용까지는 시간이 필요하며, 효율성 또한 변수이다.

종합하면 지하수에서 PFAS를 효과적으로 정화하기 위해서는 각 기술의 장단점을 고려한 복합적인 접근이 필요하다(Cousins *et al.*, 2020). 특히 여기에 소개되는 기술들이 모두 지하수를 양수한 후 처리하는 기법으로 지하수를 그대로 지중에 둔 채 제거하는 기술은 시도되거나 개발되지 않고 있어 지속적인 연구와 기술 개발을 통해 현위치 또는 양수 후 처리를 위한 보다 효율적이고 경제적인 정화 방법의 개발이 필요하다.

7. PFAS 관련 법규 및 정책

7.1. 국내외 규제 현황

세계 여러 국가들은 PFAS에 대한 규제를 강화하고 있다. 유럽연합(EU)은 PFAS 중 일부 물질을 우선적으로 규제하고 있으며, 특히 PFOA와 PFOS에 대한 엄격한 제한을 두고 있다. REACH(Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)는 PFAS 사용을 제한하고, 신규 PFAS 물질의 시장 진입을 엄격하게 규제한다(ECHA, 2017). 또한 미국 환경보호청(EPA)은 PFOA와 PFOS에 대한 건강권고치(Health Advisory Level)를 설정하고, PFAS 오염 모니터링과 정화 활동을 적극적으로 추진하고 있다(USEPA, 2016a).

우리나라에서도 PFAS에 대한 규제가 강화되고 있다(Ministry of Environment, 2020). 과불화화합물은 인체와 환경에 유해한 영향을 미칠 수 있는 특정수질유해물질로 분류되어 관리되는데, 환경부는 2023년 4월 17일 개정된 ‘물환경보전법 시행규칙’을 통해 PFAS의 관리 및 규제 방안을 마련하였다. 또한 환경부는 2023년 7월부터 전국 정수장을 대상으로 과불화화합물 3종(PFOS, PFOA, PFHxS)을 먹는 물 수질 감시 항목으로 지정하였으며, 배출원 관리를 위해 낙동강 수계 지역은 2023년 7월부터 기타 지역은 2024년부터 과불화화합물 3종을 수질 오염물질 감시 항목으로 지정하여 관리하도록 하였다. 또한, 「화학물질관리법」에 따라 PFAS의 등록 및 평가가 이루어지고 있으며, PFAS가 포함된 제품의 제조 및 사용에 대한 관리가 강화되고 있다. 우리나라는 유럽과 미국의 규제를 참고하여 국내 규제 기준을 점차 강화하고 있다.

7.2. 법적 기준 및 관리 전략

한편 PFAS에 대한 법적 기준은 주로 수질 기준과 배출 허용기준을 중심으로 설정된다. 수질 기준은 음용수와 지하수에서의 PFAS 농도를 규제하며, 이는 인체와 환경 보호를 위해 중요한 역할을 한다(USEPA, 2016a; ECHA, 2020). 각국의 법적 기준은 다소 차이가 있지만, 공통적으로 PFOA와 PFOS를 우선적으로 규제하고 있다. 미국의 경우, EPA는 PFOA와 PFOS의 건강권고치를 각각 70 ppt (parts per trillion) 이하로 설정하고 있으며, 유럽연합은 더욱 엄격한 기준을 적용하고 있다(USEPA, 2016b; ECHA, 2020).

PFAS 관리 전략은 오염 예방, 모니터링, 정화 활동으로 구성될 수 있다(USEPA, 2019b). 첫째, 오염 예방 전략으로는 PFAS의 사용 제한 및 대체 물질 개발이 포함된다. 둘째, 모니터링 전략으로는 지하수와 수질의 PFAS 농도를 지속적으로 측정하고, 오염 경향을 분석하는 활동이 이루어진다. 셋째, 정화 전략으로는 오염된 지하수 및 토양을 정화하기 위한 기술적 접근이 포함되며, 활성탄 흡착, 막 분리, 전기화학적 산화 등이 주요 기술로 사용된다.

7.3. 법규의 발전 방향 및 도전 과제

PFAS의 환경적 영향에 대한 과학적 이해가 깊어짐에 따라 관련 법규는 더욱 강화될 것이다. 앞으로의 법규 발전 방향은 PFAS 화학물질군에 대한 규제를 강화하고, 새로운 PFAS 물질에 대한 규제 기준을 신속히 설정하는 데 중점을 둘 것이다(Buck *et al.*, 2011). 또한, PFAS의 장기적인 환경 및 건강 영향에 대한 연구를 기반으로 더욱 세부적이고 포괄적인 법적 기준이 마련될 것이다.

PFAS 법규와 정책의 발전에는 여러 도전 과제가 존재한다. 첫째, PFAS는 매우 다양한 화합물로 구성되어 있어, 모든 PFAS 물질을 포괄하는 규제를 마련하는 것이 어려울 수 있다(Kwiatkowski *et al.*, 2020). 둘째, PFAS 대체 물질 개발과 관련된 기술적, 경제적 장벽이 존재한다. 셋째, 기존 오염에 대한 정화 비용과 기술적 한계가 법적 대응을 어렵게 만들 수 있다. 마지막으로 국제적 협력과 조화된 규제 체계의 필요성도 중요한 과제로 부각되고 있다.

8. 결론

본 리뷰 연구는 PFAS가 지하수 환경에 미치는 영향을 심층적으로 고찰하고, 이에 대한 정화 방법과 법적 대응 방안을 제시하는 데 중점을 두었다. PFAS는 그 독특한 화학적 특성으로 인해 환경에서 매우 안정적이며, 이로 인해 생태계와 인간 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 본 리뷰에서 고찰한 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, PFAS의 물리적 및 화학적 특성으로 PFAS는 강한

탄소-불소 결합을 가진 화합물로, 높은 화학적 안정성과 내열성을 특징으로 한다. 이는 PFAS가 환경에서 쉽게 분해되지 않으며, 오랜 기간 동안 잔류할 수 있음을 의미한다.

둘째, 지하수에서 PFAS의 농도는 지역별로 큰 차이를 보이며, 이는 주로 지역의 산업 활동과 폐기물 관리 관행에 기인한다. 특히 군사 기지, 산업 지역, 화재 진압용 소화품이 사용된 지역에서 높은 농도의 PFAS가 보고되고 있다.

셋째, 지하수 환경에서의 이동 및 변형으로 PFAS는 흡착, 확산, 대류 등의 메커니즘을 통해 지하수에서 이동하며, 일부 PFAS는 생물학적 처리 과정에서 변형될 수 있다. 그러나 대부분의 PFAS는 매우 안정적이어서 환경 내에서 분해되지 않고 축적되는 경향이 있다.

넷째, PFAS 정화 방법으로는 활성탄 흡착, 이온 교환, 막 분리 등의 전통적인 기술과, 고급 산화 공정, 전기화학적 산화, 생물학적 처리와 같은 새로운 접근 방법이 검토되고 있다. 각 방법은 특정 상황에서 효과적일 수 있지만, 비용과 기술적 한계가 존재한다.

다섯째, 법규 및 정책으로 국내외적으로 PFAS에 대한 규제가 강화되고 있으며, 특히 PFOA와 PFOS에 대한 제한이 엄격하게 적용되고 있다. 그러나 PFAS의 광범위한 사용과 다양한 화합물군에 대한 포괄적 규제는 여전히 과제로 남아 있다.

한편 본 리뷰를 통해 PFAS의 지하수 오염 문제에 대한 전반적인 이해가 증진되었으나, 여전히 많은 부분에서 추가 연구가 필요하다. 향후 연구는 다음과 같은 영역에 중점을 두어야 한다.

첫째, PFAS 화합물군은 매우 다양하며, 현재까지 규제된 물질 외에도 많은 신규 PFAS가 존재한다. 이들 물질의 환경적 거동과 독성에 대한 평가가 필요하며, 이를 기반으로 포괄적인 규제 체계를 마련해야 한다. 둘째, 현재 사용되는 PFAS 정화 기술은 비용과 효율성 측면에서 한계가 있다. 따라서 더 경제적이고 효과적인 정화 기술의 개발이 필요하다. 특히, 생물학적 처리와 같은 친환경적 접근 방법에 대한 연구가 더욱 강화되어야 한다. 셋째, PFAS의 장기적 생태학적 영향과 인체 건강에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 특히, 저농도 PFAS 노출이 생물체와 인간에게 미치는 장기적 영향을 이해하는 것이 중요하다. 넷째, PFAS 문제는 국가 간 경계를 넘어서는 글로벌 이슈로, 국제적인 협력과 조화된 정책적 대응이 필요하다. 이에 대한 정책 연구와 국가 간 협력 메커니즘을 강화하는 연구가 필요하다. 그리고 마지막으로 PFAS의 사용을 최소화하고, 안전한 대체 물질을 개발하는 것이 중요하다. 이를 위해 산업계와의 협력 연구 및 대체 물질의 환경적 안전성 평가가 이루어져야 한다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00352562). 유익한 수정 의견을 주신 심사위원님들께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahrens, L., 2011, Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: a review of their occurrence and fate. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 20-31.
- Ahrens, L. and Bundschuh, M., 2014, Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33, 1921-1929.
- Appleman, T.D., Higgins, C.P., Quinones, O., Vanderford, B.J., Kolstad, C., Zeigler-Holady, J.C. and Dickenson, E.R.V., 2014, Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water Research*, 51, 246-255.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2021, Toxicological Profile for Perfluoroalkyls. U.S. Department of Health and Human Services.
- Barry, V., Winquist, A. and Steenland, K., 2013, Perfluorooctanoic acid (PFOA) exposures and incident cancers among adults living near a chemical plant. *Environmental Health Perspectives*, 121, 1313-1318.
- Begley, T.H., White, K., Honigfort, P., Twaroski, M.L., Neches, R. and Walker, R.A., 2005, Perfluorochemicals: Potential sources of and migration from food packaging. *Food Additives and Contaminants*, 22, 1023-1031.
- Blaine, A.C., Rich, C.D., Hundal, L.S., Lau, C., Mills, M.A., Harris, K.M. and Higgins, C.P., 2013, Uptake of Perfluoroalkyl Acids into Edible Crops via Land Applied Biosolids: Field and Greenhouse Studies. *Environmental Science & Technology*, 47, 14062-14069.
- Blum, A., Balan, S.A., Scheringer, M., Goldenman, G., Trier, X., Cousins, I.T., Diamond, M., Fletcher, T., Higgins, C., Lindeman, A.E., Peaslee, G., de Voogt, P., Wang, Z. and Weber, R., 2015, The Madrid Statement on Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs). *Environmental Health Perspectives*, 123, A107-A111.
- Braun, J.M. and Lanphear, B.P., 2014, Epidemiological studies of environmental exposures and human reproductive health. *Current Opinion in Pediatrics*, 26, 233-239.
- Brusseau, M.L., Anderson, R.H. and Guo, B., 2020, PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites. *Science of the Total Environment*, 740, 140017.
- Brusseau, M.L. and Van Glubt, S., 2019, The influence of surfactant and solution composition on PFAS adsorption at fluid-fluid interfaces. *Water Research*, 161, 17-26.
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., Jensen, A.A., Kannan, K., Mabury, S.A. and van Leeuwen, S.P., 2011, Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7, 513-541.

- C8 Science Panel, 2012, Probable link reports. C8 Science Panel, 1-48.
- Conder, J.M., Hoke, R.A., Wolf, W.D., Russell, M.H. and Buck, R.C., 2008, Are PFCAs Bioaccumulative? A Critical Review and Comparison with Regulatory Criteria and Persistent Lipophilic Compounds. *Environmental Science & Technology*, 42, 995-1003.
- Cousins, I.T., Vestergren, R., Wang, Z., Scheringer, M. and McLachlan, M.S., 2016, The precautionary principle and chemicals management: The example of perfluoroalkyl acids in groundwater. *Environment International*, 94, 331-340.
- Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Glüge, J., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Miller, M., Ng, C.A., Scheringer, M. and Wang, Z., 2020, The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22, 2307-2312.
- Dauchy, X., Boiteux, V., Rosin, C., Munoz, J.F. and Héraud, F., 2017, Poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in bottled waters: Analysis of tap water and mineral water. *Water Research*, 124, 482-492.
- D'eon, J.C. and Mabury, S.A., 2011, Is indirect exposure a significant contributor to the burden of perfluorinated acids observed in humans?. *Environmental Science & Technology*, 45, 7974-7984.
- DeWitt, J.C., Peden-Adams, M.M., Keller, J.M. and Germolec, D.R., 2012, Immunotoxicity of perfluorinated compounds: recent developments. *Toxicologic Pathology*, 40, 300-311.
- Dudley, L., Arevalo, E., Knappe, D.R., Mededovic Thagard, S., Dickenson, E.R.V. and Evans, B., 2020, Removal of per- and polyfluoroalkyl substances by PAC and GAC adsorption: A comparative analysis. *Water Research*, 182, 115982.
- ECHA (European Chemicals Agency), 2017, Restriction of perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related substances under REACH.
- ECHA (European Chemicals Agency), 2020, Perfluoroalkyl Chemicals (PFASs) in the Environment: Understanding the Issues and Managing the Risks. Helsinki, Finland: ECHA.
- Filipovic, M., Woldegiorgis, A., Norström, K., Bibi, M., Lindberg, M. and Österås, A.H., 2015, Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, surface water, and fish. *Chemosphere*, 129, 39-45.
- Gebbink, W.A. and van Leeuwen, S.P.J., 2020, Environmental contamination and human exposure to PFASs near a fluorochemical production plant: Review of historic and current PFOA and GenX contamination in the Netherlands. *Environment International*, 137, 105583.
- Gellrich, V., Stahl, T. and Knepper, T.P., 2012, Behavior of perfluorinated compounds in soils during leaching experiments. *Chemosphere*, 87, 1052-1056.
- Giesy, J.P. and Kannan, K., 2001, Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. *Environmental Science & Technology*, 35, 1339-1342.
- Giesy, J.P. and Kannan, K., 2002, Perfluorochemical surfactants in the environment. *Environmental Science & Technology*, 36, 146A-152A.
- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D. and Wang, Z., 2020, An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22, 2345-2373.
- Grandjean, P., Andersen, E.W., Budtz-Jørgensen, E., Nielsen, F., Mølbak, K., Weihe, P. and Heilmann, C., 2012, Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds. *JAMA*, 307, 391-397.
- Grandjean, P. and Clapp, R., 2015, Perfluorinated alkyl substances: Emerging insights into health risks. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 25, 147-163.
- Granum, B., Haug, L.S., Namork, E., Stølevik, S.B., Thomsen, C., Aaberge, I.S., van Loveren, H. and Løvik, M., 2013, Pre-natal exposure to perfluoroalkyl substances may be associated with altered vaccine antibody levels and immune-related health outcomes in early childhood. *Journal of Immunotoxicology*, 10, 373-379.
- Guelfo, J.L. and Adamson, D.T., 2018, Evaluation of a national data set for insights into sources, distribution, and trends in PFAS concentrations in U.S. drinking water. *Environmental Pollution*, 236, 505-513.
- Higgins, C.P. and Luthy, R.G., 2006, Sorption of perfluorinated surfactants on sediments. *Environmental Science & Technology*, 40, 7251-7256.
- Higgins, C.P., McLeod, P.B., MacManus-Spencer, L.A. and Luthy, R.G., 2007, Bioaccumulation of perfluorochemicals in sediments by oligochaetes. *Environmental Science & Technology*, 41, 4600-4606.
- Hölzer, J., Midasch, O., Rauchfuss, K., Kraft, M., Reupert, R., Angerer, J. and Wilhelm, M., 2008, Biomonitoring of Perfluorinated Compounds in Children and Adults Exposed to Perfluorooctanoate-Contaminated Drinking Water. *Environmental Health Perspectives*, 116, 651-657.
- Houde, M., Martin, J.W., Letcher, R.J., Solomon, K.R. and Muir, D.C.G., 2006, Biological monitoring of polyfluoroalkyl substances: A review. *Environmental Science & Technology*, 40, 3463-3473.
- 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. *Environmental Science & Technology*, 47, 8187-8195.
- Hu, X.C., Andrews, D.Q., Lindstrom, A.B., Bruton, T.A., Schaidler, L.A., Grandjean, P. and Sunderland, E.M., 2016, Detection of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in U.S. drinking water linked to industrial sites, military fire training areas, and wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology Letters*, 3, 344-350.
- Joensen, U.N., Bossi, R., Leffers, H., Jensen, A.A., Skakkebaek, N.E. and Jørgensen, N., 2009, Do perfluoroalkyl compounds impair human semen quality?. *Environmental Health Perspectives*, 117, 923-927.
- Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J., Fillmann, G., Kumar, K.S., Loganathan, B.G. and Giesy, J.P., 2004, Perfluorooctanesulfonate and related fluorochemicals in human blood from several countries. *Environmental Science & Technology*, 38, 4489-4495.

- Kelly, B.C., Ikononou, M.G., Blair, J.D., Surrige, B., Hoover, D., Grace, R. and Gobas, F.A.P.C., 2009, Perfluoroalkyl contaminants in an Arctic marine food web: Trophic magnification and wildlife exposure. *Environmental Science & Technology*, 43, 4037-4043.
- Krafft, M.P. and Riess, J.G., 2015, Selected physicochemical aspects of poly- and perfluoroalkylated substances relevant to performance, environment and sustainability—Part one. *Chemosphere*, 129, 4-19.
- Kwiatkowski, C.F., Andrews, D.Q., Birnbaum, L.S., Bruton, T.A., DeWitt, J.C., Knappe, D.R.U., Maffini, M.V., Miller, M.F., Pelch, K.E., Reade, A., Soehl, A., Trier, X. and Venier, M., 2020, Scientific basis for managing PFAS as a chemical class. *Environmental Science & Technology Letters*, 7, 532-543.
- Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A. and Seed, J., 2007, Perfluoroalkyl acids: A review of monitoring and toxicological findings. *Toxicological Sciences*, 99, 366-394.
- Lee, H., Choi, S., Kim, Y. and Shin, H., 2017, Assessment of Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Groundwater and the Surrounding Environment of an Industrial Complex in Korea. *Environmental Pollution*, 220, 425-433.
- Lien, N.P.H., Fujii, S., Tanaka, S. and Nozoe, M., 2011, Perfluorinated Compounds in Tap Water from Osaka, Kyoto, and Tokyo: Removal Efficiency of Water Purification Processes. *Water Research*, 45, 5583-5592.
- Lin, H., Niu, J. and Ding, S., 2015, Electrochemical degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) by a novel PbO₂ nanowire electrode. *Environmental Science & Technology*, 49, 7776-7783.
- Lindstrom, A.B., Strynar, M.J. and Libelo, E.L., 2011, Polyfluorinated compounds: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45, 7954-7961.
- Liu, J. and Mejia Avendaño, S., 2013, Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environment International*, 61, 98-114.
- Liu, Y., D'Agostino, L.A., Qu, G., Jiang, G. and Martin, J.W., 2019, High-resolution mass spectrometry (HRMS) methods for non-target discovery and characterization of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in environmental and human samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 121, 115420.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., Liang, S. and Wang, X.C., 2014, A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473-474, 619-641.
- McGuire, M.E., Schaefer, C., Richards, T., Backe, W.J., Field, J.A., Houtz, E. and Sedlak, D.L., 2014, Evidence of transport of perfluoroalkyl acids in groundwater at a site in California. *Environmental Science & Technology*, 48, 9072-9079.
- Milinic, J., Lacorte, S., Rigol, A. and Vidal, M., 2015, Pollutant release and sediment deposition in a small urban watershed: Influence of pesticides and pharmaceuticals. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 349-359.
- Ministry of Environment, 2020, Amendment to the Enforcement Decree and Enforcement Rules of the Act on the Conservation of Water Quality and Aquatic Ecosystems. Seoul, South Korea: Ministry of Environment.
- Moody, C.A. and Field, J.A., 2000, Perfluorinated surfactants and the environmental implications of their use in firefighting foams. *Environmental Science & Technology*, 34, 3864-3870.
- Muñoz, G., Liu, S., Vo Duy, S., Sauvé, S. and Budzinski, H., 2020, Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances in water samples from the Great Lakes (Ontario, Canada). *Chemosphere*, 243, 125439.
- Post, G.B., Gleason, J.A., Cooper, K.R. and Lorber, M., 2017, Key scientific issues in developing drinking water guidelines for perfluoroalkyl acids: Contaminants of emerging concern. *PLOS Biology*, 15, e2002855.
- Rahman, M.F., Peldszus, S. and Anderson, W.B., 2014, Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review. *Water Research*, 50, 318-340.
- Schröder, H.F. and Meesters, R.J.W., 2005, Removal of perfluorinated surfactants by conventional wastewater treatment processes. *Water Science and Technology*, 52, 57-64.
- Schwabe, A.L., Herrmann, H. and Ruhl, A.S., 2020, Advanced oxidation processes for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from contaminated water. *Chemosphere*, 252, 126593.
- Skutlarek, D., Exner, M. and Färber, H., 2006, Perfluorinated surfactants in surface and drinking waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 13, 299-307.
- Stahl, T., Mattern, D. and Brunn, H., 2011, Toxicology of perfluorinated compounds. *Environmental Sciences Europe*, 23, 38, <https://doi.org/10.1186/2190-4715-23-38>.
- Sun, M., Arevalo, E., Strynar, M., Lindstrom, A., Richardson, M., Kearns, B. and Knappe, D.R., 2016, Legacy and emerging perfluoroalkyl substances are important drinking water contaminants in the Cape Fear River watershed of North Carolina. *Environmental Science & Technology Letters*, 3, 415-419.
- Sunderland, E.M., Hu, X.C., Dassuncao, C., Tokranov, A.K., Wagner, C.C. and Allen, J.G., 2019, A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and health effects. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29, 131-147.
- Tang, C.Y., Fu, Q.S., Robertson, A.P., Criddle, C.S. and Leckie, J.O., 2006, Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater. *Environmental Science & Technology*, 40, 7343-7349.
- Thompson, J., Eaglesham, G. and Mueller, J.F., 2011, Concentrations of PFOS, PFOA, and Other Perfluorinated Alkyl Acids in Australian Drinking Water. *Chemosphere*, 83, 1320-1325.
- Trier, X., Granby, K. and Christensen, J.H., 2011, Polyfluorinated surfactants (PFS) in paper and board coatings for food packaging. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 1108-1120.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2016a, Lifetime Health Advisories and Health Effects Support Documents for PFOA and PFOS. EPA 822-R-16-005.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2016b, Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). Washington, DC: U.S. EPA.

- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2019a, Biosolids: Targeted National Sewage Sludge Survey Report - Overview. U.S. Environmental Protection Agency.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2019b, PFAS Action Plan. Washington, DC: U.S. EPA.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2022, Sludge/Biosolids: Regulations and Guidance. U.S. Environmental Protection Agency.
- Vecitis, C.D., Park, H., Cheng, J., Mader, B.T. and Hoffmann, M.R., 2009, Kinetics and Mechanism of the Sonolytic Conversion of the Aqueous Perfluorinated Surfactants, Perfluorooctanoate, and Perfluorooctanesulfonate. *Journal of Physical Chemistry A*, 113, 4267-4276.
- Venkatesan, A.K. and Halden, R.U., 2013, National Inventory of Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Archived U.S. Biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey. *Environmental Science & Technology*, 47, 4794-4802.
- Venkatesan, A.K. and Halden, R.U., 2014, National Inventory of Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Archived U.S. Biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey. *Environmental Science & Technology*, 47, 4794-4802.
- Vierke, L., Berger, U., Cousins, I.T. and D'Hollander, W., 2012a, Polyfluorinated chemicals in European surface waters, groundwater, and drinking water: A review of current monitoring and potential sources. *Water Research*, 46, 1958-1970.
- Vierke, L., Möller, A. and Wenzel, K.D., 2012b, Atmospheric deposition of poly- and perfluorinated alkyl substances (PFASs): A significant source to surface and groundwater?. *Environmental Science & Technology*, 46, 3172-3179.
- Wang, S., Huang, J., Yang, Y., Hui, Y., Ge, Y., Larssen, T., Yu, G., Deng, S., Wang, B. and Harman, C., 2019, First report of a Chinese PFOS alternative overlooked for 30 years: Its toxicity, persistence, and presence in the environment. *Environmental Science & Technology*, 47, 10163-10170.
- Wang, Z., Cousins, I.T., Scheringer, M. and Hungerbühler, K., 2013a, Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates: A chemical perspective. *Environmental Science & Technology*, 47, 3821-3835.
- Wang, Z., Cousins, I.T., Scheringer, M. and Hungerbühler, K., 2013b, Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs), perfluoroalkane sulfonic acids (PFASAs), and their potential precursors. *Environment International*, 60, 242-248.
- Wang, Z., DeWitt, J.C., Higgins, C.P. and Cousins, I.T., 2017, A never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)?. *Environmental Science & Technology*, 51, 2508-2518.
- Weber, R., Watson, A., Forter, M. and Oliaei, F., 2011, Persistent organic pollutants and landfills—a review of past experiences and future challenges. *Waste Management & Research*, 29, 107-121.
- 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.
- Zhang, X., Szostek, B., McCausland, P.K., Wolstenholme, B.W., Lu, X. and Folsom, P.W., 2013, Transport of perfluoroalkyl acids in groundwater: Relative importance of physical and chemical factors. *Environmental Science & Technology*, 47, 2474-2481.