

공동주택 지하저수조 내 침전된 부유성 고형물의 발생원인 및 제어방안

장준영^{1a} · 김주원^{1b} · 김기팔² · 신현상^{1c} · 임병란^{1d,†}

¹서울과학기술대학교 환경공학과 · ²(주)케이원에코텍

Investigating the Causes and Control Measures for Precipitated Suspended Solids in the Underground Reservoir Tank in an Apartment

JunYoung Jang^{1a} · JooWon Kim^{1b} · KiPal Kim² · HyunSang Shin^{1c} · ByungRan Lim^{1d,†}

¹Department of Environment Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²K-1ecotech Co, Ltd.

(Received 05 January 2023, Revised 06 March 2023, Accepted 10 March 2023)

Abstract

The reservoir tank in an apartment is crucial for maintaining the quality of drinking water after it has undergone treatment. Investigating the water quality and potential contaminants in the reservoir tank is essential to ensure the safety of the drinking water. This study examined the water quality and precipitated suspended solids that accumulate at the bottom of the reservoir tanks in four apartments located in Gyeonggi province. As a result of the water quality investigation, turbidity increased proportionally to the distance from the water treatment plant (WTP) to the household. Heavy metals were also detected in the reservoir tank inlet but not in the water supplied from the WTP. The precipitated suspended solids (SS) in the reservoir tank contain high levels of heavy metals and total organic carbon (TOC). The precipitated SS mainly consists of Al, Mn, and Fe, which are expected to be a combination with turbidity-inducing substances. The X-ray diffraction (XRD) analysis revealed the presence of γ -FeO(OH), MnO₂, and β -Fe₂O₃ in the SS. Additionally, F-EEM analysis indicates that the dissolved organic matter in the SS is mainly derived from a natural water source and microorganism activities, including metal-oxidizing bacteria and biofilms that can absorb metal ions. Based on these findings, several countermeasures can be taken to prevent the inflow of SS into the household, including regularly cleaning the reservoir tank, replacing or cleaning old pipes in the water supply system, and implementing monitoring and filtering systems to manage the SS.

Key words : Heavy metal, Organic matter, Precipitated suspended solids, Underground reservoir tank, Water quality

^{1a} 학사과정(Bachelor Student), tyoung0909@naver.com, <https://orcid.org/0000-0003-0749-6929>

^{1b} 연구원(Researcher), zoowon119@seoultech.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4771-4727>

² 연구소장(Research director), k8279@hanmail.net, <https://orcid.org/0000-0002-5544-9361>

^{1c} 교수(Professor), hyuns@seoultech.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-5197-8645>

^{1d} Corresponding author, 연구교수(Research Professor), limbr@seoultech.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4960-9605>

1. Introduction

최근 붉은 수돗물 사태를 계기로 수돗물에 대한 부정적 이미지가 계속 높아지고 있으며, 시민들이 녹물 민원을 제기하는 건수도 매년 증가하고 있다. 수돗물의 직접 음용률은 약 7%로 상당히 낮은 편이며, 대부분 간접 음용이나 정수기 등을 이용하는 것으로 나타났다(Gschwandtner et al., 2020). 환경부 조사에 따르면, 수돗물을 마시지 않는 가장 큰 이유로 오래된 수도관이나 저수조 문제로 음용을 꺼린다는 경우도 많이 있다(ME, 2021).

공동주택의 경우 고층건물인 경우가 많아 안정적으로 급수하기 위해서는 저수조와 같은 저장 시스템이 필요하다. 그러나 녹물 사태와 같이 가정에서 수돗물 사용 이전에 오염될 수 있는 위험성이 존재한다. 수돗물 2차 오염의 원인은 정수 과정에서 원수의 입자성 물질이 완벽하게 제거되지 않았거나, 체류시간 연장, 관로 오염, 유속의 영향으로 인한 탁도 유발 물질의 축적과 같은 물리적 요인(Kim et al., 2013)과 pH, 알칼리도, 염소이온 및 황산이온, 용존산소 농도 등 배관 부식에 영향을 미치는 화학적 요인(Rahman and Gagnon, 2014), 소독처리 효율 저하로 인한 미생물 활동 증가에 따른 배관 부식 및 스케일 형성과 같은 생물학적 요인(Chen et al., 2013; Liu et al., 2016)으로 나눌 수 있다.

환경부 2021년도 상수도통계 자료에 의하면 매설된 지 21년 이상 경과된 상수도관이 전국에 83,925 km로, 전체의 35.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 경기도의 경우 아연 도강관, 동관 등 비 내식성 배관의 비중은 정수처리 이후 송수관, 배수관, 급수관에서 각각 3.8%, 6.9%, 0.8%로 높지 않았으나, 21년 이상 지난 경년관의 비율은 정수처리 이후 송수관, 배수관, 급수관에서 각각 15.9%, 8.4%, 18.2%를 차지하였다(Jang et al., 2022; ME, 2022). 내식성 배관인 스테인리스 배관, Poly vinyl chloride (PVC) 배관에서도 노후화로 인한 파손, 용접 부위의 잔류응력에 의한 응력부식 균열, 염소 반응에 의한 수면 접촉 부위의 공식현상, 낮은 pH 및 과도한 용존산소 농도로 인해 부식될 수 있으며, 유해 중금속이 수돗물로 용출될 가능성 또한 존재한다(Gonzalez et al., 2013).

수돗물의 안전성을 확보하기 위해 정수장에서 소석회, 방청제 등 약품 주입을 통한 배관 부식성 저감방안을 마련하고 있으며, 수도법 제21조와 수도시설의 청소 및 위생 등에 관한 규칙 제6조에 의거하여 법적으로 수돗물 및 저수조 내부의 수질을 정기적으로 점검하도록 규정하고(Jang et al., 2022), 상수도관망에서 안전성 확보 및 비상시 대응을 위한 실시간 모니터링 시스템을 도입하고 있다(Kim et al., 2013). 또한, 저수조의 내식성 및 수밀성을 확보하고 조류 증식을 방지하기 위해 저수조의 재질을 Polyethylene Double Frame (PDF), Steel Type Stainless (STS)로 전환하거나, 혹은 직결급수 도입 등을 통한 저수조에서의 2차 오염을 방지하는 공동주택이 늘어나고 있다(Jang et al., 2022).

그러나 정수처리 이후 급수과정에서 공동주택 저수조 내의 미생물 활동 및 배관 부식으로 인한 퇴적물 축적은 대장균 등 미생물 성장을 촉진할 수 있으며, 침전물 내에서 복잡한

물리·화학적 반응을 일으킬 수 있다(Al-Bahry et al., 2011). 이러한 상태에서 퇴적물에서 유래된 화학적 및 생물학적 오염물질은 수질을 악화시키고 공중 보건에 심각한 영향을 미칠 수 있다(Ho et al., 2016). 정수처리 이후에도 수돗물 음용 전까지 안전한 수질 유지 여부를 평가하기 위해서는 공동주택 저수조의 위생관리 현황 및 수질변화, 저수조 바닥에 침전된 오염물질의 기원 등을 파악하는 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 정수장으로부터 공급되어 들어오는 경기도 소재 공동주택 지하저수조의 유입수 및 유출수에 대한 수질을 분석하였다. 그리고 지하저수조 바닥에 퇴적된 부유성 고형물의 유입 기원을 파악하기 위하여 중금속 및 유기물 특성을 분석하고, 이들 오염원이 가정으로의 유입을 방지하는 방안을 검토하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 저수조 시료 채취

본 연구에서는 경기도 소재 공동주택 지하저수조 4개소 (Site A, B, C, D)를 선정하여 수질 및 내부 침전물을 조사하였다. Site D는 건축 후 20년이 경과된 지하저수조였으며, 나머지 저수조는 건축 후 4~9년이 경과된 장소이다. 지하저수조의 재질은 4개 모두 PDF로 되어 있으며, Site D의 지하저수조의 경우 다른 지점들과 달리 저수조 상부가 지상에 노출되어 있었고, 초기 설치 시 콘크리트 구조물이었으나 내부를 PDF 재질로 갱신하였다. 4개소 지하저수조는 “수도시설의 청소 및 위생관리 등에 관한 규칙”에 의해 지하저수조를 6개월마다 1회 이상 청소하고 있다. 저수조 내부 청소 시 협조를 받아 2021년 4월 지하저수조 4개소의 침전된 부유성 고형물을 포함한 탁수 시료와 지하저수조 유입수 및 유출수를 2L 무균 폴리에틸렌 용기에 채취하였다. 특히 2020년에 녹물 사고 발생 및 대장균 항목이 먹는물 수질 기준치를 초과한 바 있는 Site B의 경우에 대해 2021년 4월부터 2022년 4월까지 청소 시 침전된 부유성 고형물을 포함한 탁수 시료를 채취하여 분석하였다.

2.2 지하저수조 유입수 및 유출수 수질분석

지하저수조 유입수와 가정으로 보급되는 수돗물의 수질특성을 조사하기 위하여 시료 채취 후 현장에서는 pH, 탁도 (2100P, HACH), 잔류염소(CL-2006, Lutron)를 측정하였으며, 실험실로 이동하여 시료 보관 기간 이내에 총유기탄소 (Total Organic Carbon, TOC-L, Shimazu)를 측정하였고, 중금속 중 알루미늄(Al), 망간(Mn), 철(Fe), 구리(Cu), 아연(Zn)은 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS; Agilent 7900, Agilent)을 이용하여 먹는물수질공정시험기준 (2021.02.08. 改)에 준하여 측정하였다.

2.3 지하저수조 바닥에 침전된 부유성 고형물 분석

저수조 바닥에 퇴적된 입자상물질의 오염원 유래를 파악하기 위하여 내부바닥에 침전된 입자상물질내 중금속은 토양오염 공정시험기준(2017.08.11. 改)을 참조하여 왕수로 용출한 후

ICP-MS로 분석하였고, 정밀한 분석을 위해 X-ray diffraction (XRD; Bruker DE/D8 Advance, Bruker)을 실시하였다.

또한, 유기물 여부를 파악하기 위해 침전물이 포함된 탁수를 0.45 μm로 필터링하여 TOC 측정 및 Fluorescence Excitation-Emission Matrix(F-EEM) 형광분석을 하였다. 형광분석을 위해 여기-방출 행렬(Excitation-Emission Matrix, EEM; Fluorescence Spectrophotometer f-7000, Hitachi)과 UV-Vis 분광광도계 (Cary Series UV-Vis Spectrophotometer, Agilent)을 활용하였으며, 여기파장(Excitation, Ex)의 범위는 200~500 nm, 방출파장(Emission, Em)의 범위는 250~550 nm로 조절하여 측정하였다. 측정값에서 기기의 조건에 따른 영향을 최대한 배제하기 위해 증류수의 Raman 스펙트럼인 350 nm의 방출파장에서 표준화된 형광세기를 사용하였다.

또한, F-EEM을 통한 피크 (Peak) 산정은 유기물에 대한 정보가 중첩되거나, 제한적이라는 단점을 보완하기 위해, 평행인자분석 (Parallel factor analysis, PARAFAC)기법을 활용하였다.

$$x_{ijk} = \sum_{f=1}^F (a_{if} b_{jf} c_{kf} + e_{ijk}) \quad (1)$$

$i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K$

여기서 x_{ijk} 는 i 번째 시료의 j nm 방출파장, k nm 여기파장에서의 형광세기를 나타낸다. F 는 PARAFAC의 구성성분 (Component) 개수, a 는 Component 별 농도, b 는 방출 스펙트럼, c 는 여기 스펙트럼으로 표현된다. e_{ijk} 는 PARAFAC으로 추정되지 않는 잔여 행렬을 의미한다. PARAFAC 분석 방법은 형광분석으로 얻은 결과를 각 성분과 기원에 의한 특징을 Component로 분해할 수 있다(Mun et al., 2020; Stedmon and Bro, 2008).

3. Results and Discussion

3.1 지하저수조 유입수 및 유출수의 수질특성

2021년 4월 경기도 내 4개 공동주택 지하저수조 유입수

및 유출수의 수질을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. 지하저수조 유입수, 유출수에서 대부분 수질항목은 먹는물 수질기준치 이내로 나타났으나, Site A의 유입수 탁도가 먹는물 법적 기준치인 0.5 NTU를 초과하기도 하였다. 이는 정수장에서 저수조까지 급수 중에 오염되었거나 오래된 급·배수관의 부식생성물이 수돗물로 탈리되어 영향을 미친 것으로 판단된다(Li et al., 2019).

또한, 해당 지역들의 정수처리 이후 수질검사 결과와 저수조 유입수의 수질을 비교한 결과, Site A, B, C 유입수의 잔류염소 농도가 정수장에서의 수질보다 감소하였고, 탁도는 정수장보다 저수조 유입수에서 높게 나타났다. 반면 Site D에서는 정수장 및 저수조 유입수에서의 탁도, 잔류염소 농도의 변화는 없었다. 정수장과 공동주택 간의 거리를 조사한 결과, Site A, B에서는 정수장과 공동주택 저수조 간 직선거리가 7.3 km, Site C는 3.5 km, Site D는 1.2 km이었다. 상수도망에서 수돗물의 배관 체류 시간이 길면 잔류 소독제의 손실이나 탁도 유발 박테리아의 재성장 가능성 증가 등 수질 악화의 위험이 있다(Abokifa et al., 2016). 따라서 Site A, B의 정수장, 저수조 유입수 간 잔류염소농도의 감소와 탁도의 증가는 배관 길이 및 체류시간의 영향으로 판단된다.

정수장에서 보급되는 수돗물에서는 알루미늄을 제외한 다른 중금속들은 미검출(Not Detected, N.D.)되었으나 Site A, B 저수조 유입수에서 Al, Mn, Fe, Cu, Zn이 검출되었다. Site C의 경우 정수장 처리수 및 저수조 유입수에서는 Fe, Cu, Zn이 미검출되었으나 유출수에서 검출된 것으로 보아, 이는 급수과정 중에 배관 내 침전물 등이 용출되어 영향을 미친 것으로 판단된다(Cotruvo, 2017). 또한 지하저수조 청소 당일 방분하여 지하저수조 내부에 침전된 탁수를 채취한 후 연구실에서 왕수로 용출시켜 중금속을 분석한 결과 Fig. 1과 같이 나타났다.

Site B의 부유성 고형물에서 Al, Mn, Fe 농도가 가장 높게 나타났으며, Cu는 Site A에서 가장 높게 검출되었다. Mn, Fe의 경우 급·배수관 부식을 유발하는 잔류염소나 금속 산화 박테리아의 영향으로, MnO₂, FeO(OH), Fe₂O₃ 등 산화금속이 생성·탈리되어 저수조 유입수 및 바닥에 침전된 부유성

Table 1. Water quality of influent and effluent of the reservoir tank in the apartment

Parameters	Site A			Site B			Site C			Site D		
	WTP**	Influent	Effluent	WTP**	Influent	Effluent	WTP**	Influent	Effluent	WTP**	Influent	Effluent
pH (-)	7.40	7.70	7.70	7.40	7.03	7.12	7.20	7.50	7.85	7.40	7.40	7.57
Residual Chlorine (mg/L)	0.86	0.68	0.60	0.86	0.43	0.50	1.16	0.48	0.20	0.77	0.77	0.36
Turbidity (NTU)	0.02	0.57	0.24	0.02	0.18	0.15	0.07	0.14	0.20	0.06	0.06	0.16
Al (mg/L)	0.050	0.039	0.031	0.050	0.003	0.009	0.030	0.027	0.022	0.050	0.050	0.054
Mn (mg/L)	N.D.*	0.025	N.D.*	N.D.*	0.00043	0.003	N.D.*	0.001	0.001	N.D.*	N.D.*	0.001
Fe (mg/L)	N.D.*	0.00001	N.D.*	N.D.*	0.00027	N.D.*	N.D.*	N.D.*	0.025	N.D.*	N.D.*	N.D.*
Cu (mg/L)	N.D.*	0.003	N.D.*	N.D.*	0.00002	0.00001	0.006	N.D.*	0.323	N.D.*	N.D.*	0.002
Zn (mg/L)	N.D.*	0.021	0.00001	N.D.*	0.00039	0.089	0.009	N.D.*	0.008	N.D.*	N.D.*	N.D.*

*N.D. : Not Detected.

**WTP: Drinking Water Treatment Plant

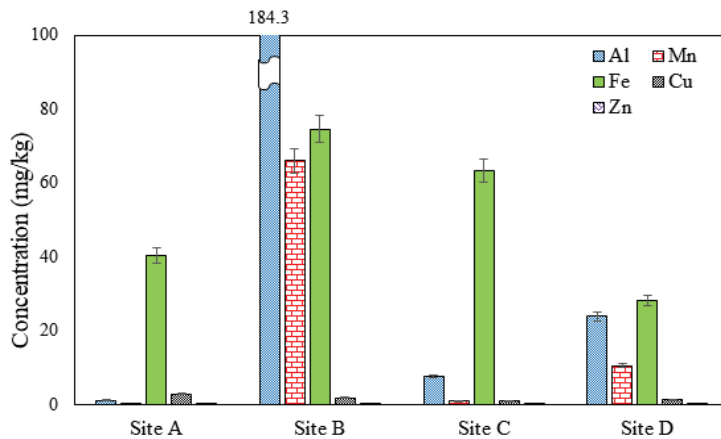


Fig. 1. Heavy metals in precipitated suspended solids at the bottom of the underground reservoir tank.

고형물에서 검출된 것으로 판단된다(Gonzalez et al., 2013; Kohl and Medlar, 2006).

모든 저수조에서 Cu와 Zn이 각각 3.0 mg/kg와 1.0 mg/kg 이내로 검출된 것으로 보아 상수도 배관의 재질은 주철관, 구리아연동관이 사용된 것으로 판단된다. 상수도 배관 내 CuO, CuCO₃·Cu(OH)₂ 등 불안정한 결합의 Cu는 10시간 이상의 배관 체류시간, 7.6~8.4 범위의 pH 및 높은 알칼리도의 영향으로 인해, 수돗물로 용출될 가능성이 높다(Gonzalez et al., 2013).

Zn은 정수장 배수나 정수처리 약품에도 포함되어 있지 않으나 저수조 유입수, 유출수 및 내부 침전물에서 검출된 것은 아연도강관의 부식에 의해 주로 용출되어(Woo et al., 2014) 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한 지하저수조 유입수, 바닥 탁수 및 유출수의 TOC를 측정된 결과, Site A, C의 경우 TOC 농도는 모든 지점에서 1.5 mg/L 이내로 특이한 사항은 발견되지 않았다. Site D의 경우 저수조 내부 바닥에 부유성 고형물과 혼합된 수질의 TOC 농도는 7.13 mg/L로 나타났으며, 유입수 TOC 1.22 mg/L보다 저수조 바닥 탁수 시료에서 높게 나타났다. Site B의 경우도 저수조 유입수의 TOC농도는 1.44 mg/L이었으나, 저수조 바닥 잔류수의 TOC 농도는 12.66 mg/L로 높게 나타났다. 그리고 유입수에 비해 저수조 바닥의 높은 유기물 농도는 해당 지하저수조의 최대 72시간에 달하는 수돗물의 긴 체류시간의 영향, 그리고 4월 경 높은 기온 및 수온으로 인한 급·배수관 내에 부식성 미생물의 탈리 및 부식침전물을 매개체로 한 미생물 축적의 영향으로 판단된다(Fish et al., 2016; Slavik et al., 2020).

4개 저수조의 급수관 재질은 모두 스테인레스(SUS-303) 재질이였으며, 현장조사 및 세대 당 저수조 용량 / 수돗물 사용량 통계(ME, 2022)에 근거한 세대 당 일평균 수돗물 사용량을 통해 산정한 지하저수조 내부 수돗물 평균 체류시간은 60~72 hr로 조사되었다. 상수도 배관 및 저수조 내부에서의 수돗물의 긴 체류시간은 수도관의 부식, 소독부산물 생성, 잔류염소농도의 감소로 인한 생물막 형성 및 배관 부식 미생물의 성장으로 이어질 수 있다(Shamsaei et al., 2013; Simard

et al., 2011). Site B의 부유성 고형물을 포함한 탁수에서 높은 중금속 및 유기물 농도는 수돗물 배관의 긴 체류시간 및 저수조 내부에서의 긴 체류시간의 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.2 지하저수조 내부에 침전된 부유성 고형물내 중금속 분포

현행 수도법 제33조 제2항 및 동법 시행규칙 제22조의 3에 의하면 공동주택 저수조의 경우 연 2회 청소하도록 의무화 되어 있다. 본 연구에서는 Site B 지하저수조의 청소시기에 저수조 내부바닥에 침전된 부유성 고형물을 채취하여 중금속 농도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이, 정수장 처리수에서는 Mn, Fe, Cu, Zn이 검출되지 않았으나, Site B 지하저수조 바닥에 퇴적된 부유성 고형물에서는 높게 검출되었다. 부유성 고형물 내 알루미늄 농도가 높게 나타난 것은 정수처리 공정에서 사용된 응집제가 잔류되어 급·배수관에서 다른 금속류와 반응하여 침전된 것으로 판단된다. 수중의 높은 알루미늄 농도는 소독 효율을 약화시키고, 탁도를 증가시키며, 수돗물의 수송을 방해할 수 있으므로 과잉으로 사용하지 않도록 주의할 필요가 있다(Zhang et al., 2016). 망간(Mn)의 경우 PVC, SUS 등의 배관에서도 용출될 수 있는 금속 성분이다(Alvarez-Bastida et al., 2013). Mn 침전물은 수돗물의 소독 과정에서 물리·화학적 변화 등 다양한 요인에 의해 급수과정에서 재

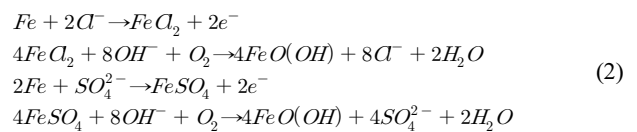
Table 2. Heavy metals in the precipitated suspended solids of the Site B reservoir tank

Items	Precipitated suspended solids (mg/kg)		
	Apr.21	Oct.21	Apr.22
Al	1.843(×10 ³)	1.943(×10 ³)	1.704(×10 ⁵)
Mn	66.000	50.586	1.479(×10 ⁵)
Fe	74.650	226.056	44.495
Cu	2.222	1.342	0.178
Zn	1.680	1.414	0.464

부유할 수 있으며, 특히 염소가 클로라민으로 전환될 때 많이 발생한다(Torrey, 2013). 수돗물 내 용해성 망간은 소독제나 금속 산화 박테리아의 영향으로 비용해성인 Mn^{3+} 나 Mn^{4+} 로 산화되어, 상수도 배관 내부나 저수조에 침전될 수 있다(Kohl and Medlar, 2006). 망간 산화물은 크롬, 구리, 철, 납, 스트론튬 이온 등 금속 이온들을 흡착시키는 데 영향을 미치며(Tanaka et al., 2010), 흡착된 금속 이온을 산화시킬 수 있다. 예를 들어 망간 산화물은 Cr^{3+} 을 Cr^{6+} 로 산화시켜 수중 중금속의 유해성을 증가시킬 수 있다(Gerke et al., 2016).

철(Fe)의 경우 미립자로 용출될 경우 녹물 사고의 직접적인 원인이 될 수 있다. 산화철과 같은 철 부식 생성물이 퇴적될 경우, Mn과 마찬가지로 크롬, 납 등 금속 이온들을 흡착시키는데 영향을 미칠 수 있다(Tanaka et al., 2010). 특히 최근에 사용 빈도가 높아지고 있는 PVC관의 경우, 배관의

안정제로 쓰이는 납이 배관 내 체류시간, 낮은 pH, 잔류염소의 영향으로 수돗물로 용출되어 나올 수도 있다(Lei et al., 2018; Trueman and Gagnon, 2016; Zhang and Lin, 2015). 본 연구에서도 왕수로 용출한 2021년 10월 침전물에서도 크롬, 납의 성분이 각각 1.9 mg/kg, 0.26 mg/kg 검출되었다. 추가적으로 침전되어 있던 부유성 고형물의 XRD를 분석한 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, γ -FeO(OH) (Lepidocrocite)과 MnO_2 , β -Fe₂O₃ 성분이 검출되었다. 특히 γ -FeO(OH)은 주철관 부식 생성물의 핵심 성분으로써, 배관과 수돗물 간 음극·양극반응으로 생성된 γ -FeO(OH)은 배관 표면의 녹으로 형성된다. 그리고 수돗물 내 Cl^- 과 SO_4^{2-} 는 식 (2)와 같은 촉매 작용으로 양극 반응을 촉진하여 부식을 가속시킬 수 있다(Zhang et al., 2011).



저수조 유입수·유출수의 장기 모니터링 결과에 따르면, 탁도 유발과 더불어 중금속 성분들은 pH, 알칼리도, 잔류염소 등의 영향을 받아 급·배수관의 부식에 의한 영향으로(Jang et al., 2022), 배관을 통해 유입되어 바닥에 6개월 동안 축적된 결과로 판단된다. 따라서 지하저수조 부유성 고형물 내 높은 Mn, Fe 성분은 신경계 질환 및 파킨슨병 유발(Mn), 심혈관 질환 유발(Fe) 인체에 치명적인 영향을 끼칠 가능성이 높으며(Jamshaid et al., 2018), 타 중금속 성분들을 산화시켜 유해성을 증가시킬 수 있으므로, 배관 부식 등으로 인한 중금속 용출을 집중적인 관리할 필요가 있다.

3.3 지하저수조 내부에 침전된 부유성 고형물 내 유기물 기원 파악

저수조 바닥에 침전된 입자상물질이 포함된 탁수(TW)의 유기물 여부를 파악하기 위해 TOC를 측정하여 Table 3에 나타내었다. 또한, 유기물 기원 파악을 위해 형광분석법을 이용하여 Biological Index (BIX), Fluorescence Index (FI), Humidification Index (HIX) 를 산정하였다(Lee et al., 2019). 그리고 대조군으로 BOD Ib 등급 도심 하천수의 TOC 및 형

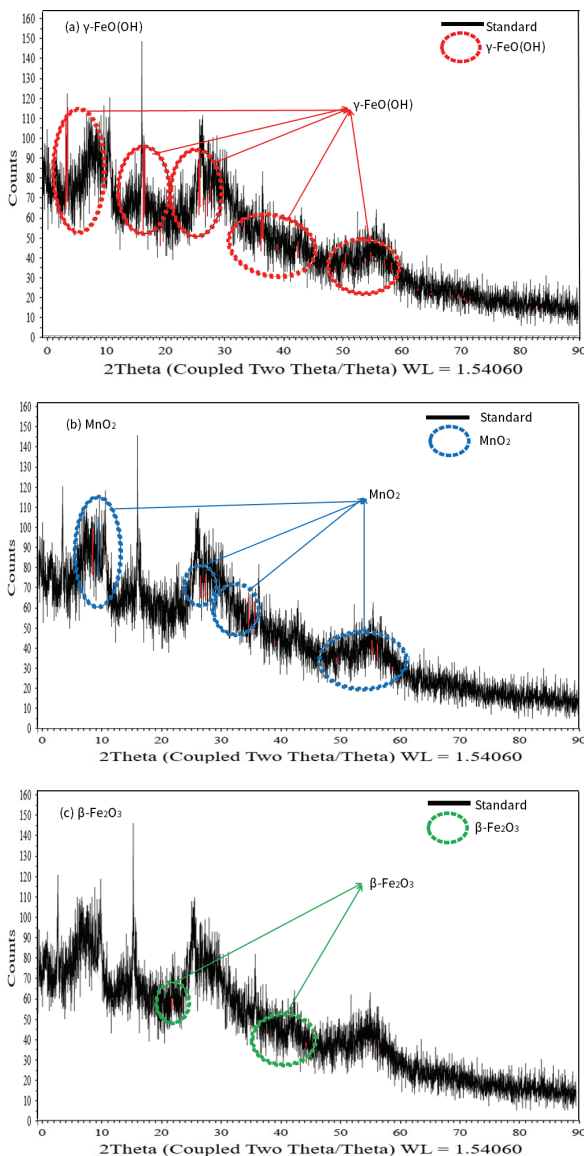


Fig. 2. XRD analysis result of precipitated solids in the reservoir tank's bottom and JCPDS comparison. (a) γ -FeO(OH), (b) MnO_2 , (c) β -Fe₂O₃.

Table 3. TOC and fluorescence analysis of turbid water

Items	TOC (mg/L)	BIX*	FI**	HIX***
TW-Apr.21	12.66	0.792	1.060	0.701
TW-Oct.21	9.00	0.678	0.985	0.857
TW-Apr.22	26.27	1.087	1.077	0.431
Stream-Apr.22	3.15	0.550	1.213	0.871

* BIX > 1.0: relative abundance of microbial derived DOM, BIX < 0.6: relative lack of microbial derived DOM

** FI > 1.9: relative abundance of microbial-derived DOM, FI < 1.4: relative abundance of terrigenous derived DOM

*** HIX > 5: relative abundance of humic derived DOM

광분석 결과를 비교 분석하였다.

BIX는 생물학적 지수로서 미생물의 활동에 의한 생분해 가능성을 지시하는 지표로 사용되며, Table 3의 TW-Apr.22의 높은 BIX는 기온과 비례하여 미생물에 의한 영향이 증가함을 고려할 수 있다. 혹은, 침전물의 높은 중금속 농도가 유입수 배관 부식으로 인한 결과임을 고려하였을 때, 높은 BIX는 급·배수관 부식을 일으키는 미생물의 영향임을 고려할 수 있다(Fish et al., 2016).

본 연구에서 조사한 침전물은 모두 FI가 1.4 미만으로, 육상 기원 유기물이 우세한 것으로 나타났다. 침전물의 높은 DOC는 정수장에서 완전히 처리되지 않은 DOM이나, 정수처리 이후에도 육상 기원 유기물로부터 일정하게 영향을 받고 있다는 것을 추측할 수 있다(Lavonen et al., 2015).

침전물에서 휴믹 계열의 유기물은 미미한 것으로 파악되었다.

BIX, FI의 경우 하천보다 공동주택 지하저수조 내부 침전물에서 높은 수치가 나타났다. 이는 미생물 및 육상 기원 유기물이 저수조 내부에 6개월간 침전물로 축적되어 하천수보다 높은 수치를 나타내는 것으로 판단된다. 반면, HIX는 공동주택 저수조가 하천보다 낮은 수치를 나타내었는데, 휴믹 기반 유기물의 경우 정수장에서 응집 공정 등을 통해 처리가 적절하게 진행되고 있는 것으로 판단된다(Baghoth et al., 2011; Yang et al., 2015).

유기물 기원의 세분화된 분석을 위해, 탁수와 하천수로 PARAFAC을 실시하여, 유기물의 기원을 총 3개의 형광성분으로 분류하였다. 형광성분 1은 육상 휴믹 기원 유기물(Murphy et al., 2008), 형광성분 2는 단백질(Tryptophan-like, protein-like) 기원(Fellman et al., 2010; Stedmon and Markager, 2005) 유기물, 형광성분 3은 육상 기원 유기물(Fellman et al., 2010; Stedmon and Markager, 2005)로 분류되었다. 각 시료의 형광성분의 최대 형광세기(F_{max})의 백분위 비율을 Fig. 3에 막대 그래프로 나타내었다.

Fig. 3의 단백질 기원 유기물이 4월경 채취된 탁수에서 높은 비중을 차지했는데, 이는 Table 3의 2021년 4월, 2022년 4월 높게 나타난 BIX와의 연관성을 고려할 수 있다. 본 연구에서 저수조 내부 바닥 잔류수의 수온은 4월경 20℃, 10월경

14℃로, 4월에 단백질 기원 유기물이 우세해지는 것은 높은 기온 및 수온으로 인한 배관 부식에 영향을 주는 미생물의 활동 증가로 판단되며, 미생물 군체가 생성하는 세포 밖 고분자 물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS)은 양이온 전위 교환을 유도할 수 있는 음이온 그룹이 존재하여, 금속 물질을 흡착해 수돗물의 탁도를 증가시킬 수 있다(Fish et al., 2016). 수온이 6℃ 미만일 경우 미생물 활동 감소로 변색 및 배관 부식의 영향 또한 감소한다(Cook et al., 2016). *Pedomicrobium manganicum*, *Hyphomicrobium*, *Crenothrix*, *Leptothrix* 및 *Clonothrix*은 Mn, Fe를 산화시키고 수돗물 내 탁도를 증가시킬 수 있는 미생물이다(Ginige et al., 2011).

10월경 채취된 탁수에서는 육상 기원 유기물이 우세했다. 육상 기원 유기물은 음용수의 색도, 맛, 악취 등을 발생시킬 수 있고, 중금속 및 유기물을 운반하거나, 트리할로메탄 등 소독부산물의 생성을 촉진 시킬 수 있다(Solomon et al., 2015). 10월에 채취한 시료의 경우, 기온 및 수온의 감소로 인해 미생물 활동 및 미생물 기원 유기물은 감소하지만, 여름철 집중호우 및 여름에서 가을·겨울로 변화되면서 육상 기원 유기물이 증가하여 높은 비중을 차지한 것으로 판단된다(Xu et al., 2021).

2022년 4월에 채취한 경기도 내 한강수계 지류 하천수와 지하저수조 침전물의 유기물 성상의 비중을 비교하였다. 하천수는 비교적 육상 휴믹 기원 유기물이 큰 비중을 차지하지만, 지하저수조 침전물에는 4월경 채취한 탁수는 주로 단백질 기원 유기물이, 10월경 채취한 탁수는 육상 기원 유기물이 상대적으로 큰 비중을 차지하였다. 취수된 원수에서는 일반적으로 휴믹 관련 유기물이 우세한 경우가 많고(Du et al., 2012), 이들은 정수처리 과정 중 응집 공정에서 대부분 제거된다(Baghoth et al., 2011; Yang et al., 2015). 또한 완속 여과 공정을 통해 평균 탄소산화비율(O/C)이 낮은 성분인 육상 기원 유기물을 부분적으로 제거할 수 있으며(Lavonen et al., 2015), 멤브레인 필터링을 통해 미생물이나 미생물 기원 유기물을 감소시킬 수 있다(Lyon et al., 2014). 지하저수조 내부의 침전물은 원수 내 함유되어있는 유기물의 영향, 그리고 외부유입이나 상수도 급·배수관에 부착된 미생물이 높은

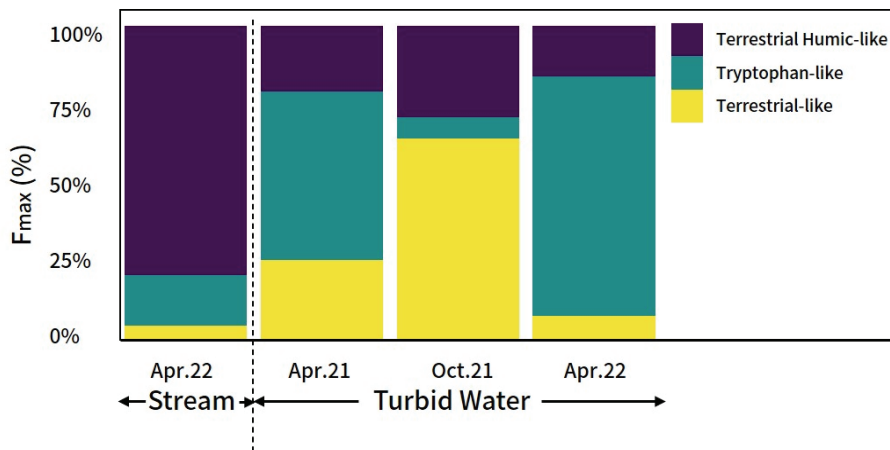


Fig. 3. Comparison of organic components between turbid water and nearby stream.

기온 및 수온의 영향으로 일시적으로 탈리되어 영향을 미친 것으로 판단된다(Fish et al., 2016).

정수처리 과정에서 수돗물은 대부분의 유기물 및 미생물 오염이 제거된 상태로 공급되지만, 본 연구를 통해 수돗물이 지하저수조에 저장되는 과정에서 유기물의 축적이 발생할 수 있음을 발견하였다. 저수조에 체류된 수돗물의 미세 입자는 침전물로써 저수조 내부에 가라앉고, 이후 저수조의 바닥 및 벽면에 흡착되어 생물막을 형성할 수 있다(Shamsaei et al., 2013). 특히 수돗물이 급·배수관 및 지하저수조 내부에서의 체류시간이 길수록 잔류염소의 손실로 인해 유기물 축적이 발생할 수 있다(Simard et al., 2011). 따라서 정수처리 이후에도 가정으로 수돗물이 도달하기 전까지 유기물 및 배관 부식 미생물에 영향을 줄 수 있는 수질 인자(수질, 잔류염소농도)에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

형광분석은 복잡한 시료 전처리 과정 없이 $\mu\text{g/L}$ 단위의 낮은 검출 한계의 형광 데이터를 활용할 수 있으며, PARAFAC은 사용이 간편한 분광형광도계를 사용하여 유기물의 주요 추세를 빠르게 파악할 수 있다. 따라서 수돗물 시료의 각 유기물 구성성분에 대한 자세한 분석이 필요하지 않을 경우에는, High Performance Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (HPLC-MS), Liquid Chromatography-Organic Carbon Detection (LC-OCD)와 같은 정교한 수질 분석 방안의 대안으로서 형광분석의 활용을 제안할 수 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 수돗물의 녹물 사고의 오염원 기원을 파악하기 위해 공동주택 저수조의 현장조사와 더불어 저수조 유입수와 유출수, 저수조 바닥에 침전된 부유성 고형물 분석을 통해 다음과 같은 주요 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 경기도 4개 지역의 저수조 유입수와 유출수의 수질을 분석한 결과, 탁도, 잔류염소 및 중금속 등은 수질 기준치 이내로 유지되는 것을 확인하였다. 그러나 정수장과 저수조 간 거리가 멀수록 수돗물의 잔류염소농도가 감소하고 탁도가 증가하였는데, 이는 급·배수관 내 부식성 중금속이 탈리되어 수질에 영향을 미친 것으로 판단된다.

(2) 저수조 내부에 침전된 부유성 고형물의 중금속 분석결과, 알루미늄, 철 그리고 망간의 비중이 높게 나타났으며, XRD 분석결과, 부유성 고형물 내에 주요성분은 $\gamma\text{-FeO(OH)}$ (Lepidocrocite) 과 MnO_2 , $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 성분이 검출되었다. 이는 정수처리 공정에서의 잔류 응집제, 소독제 혹은 금속 산화 미생물의 영향으로 인하여 배관 부식생성물 등이 침전된 것으로 판단된다.

(3) 침전물을 포함한 탁수의 TOC 분석결과, 저수조 유입수 대비 저수조 바닥에 침전된 고형물의 TOC 농도가 높게 나타나, 이 유기물의 기원을 파악하기 위해 형광분석을 실시한 결과 탁수의 유기물은 육상 유래 유기물의 영향, 그리고 상수도 급·배수관에 부착되어 부식을 유발하는 미생물이 높은 기온 및 수온의 영향으로 일시적으로 탈리된 것으로 판단된다.

(4) 지하저수조 바닥내 침전된 부유성 고형물이 가정으로 유입되지 않도록 안전한 수돗물 공급을 위한 다양한 대책들을 마련할 필요성이 있다. 우선 노후된 급·배수관의 부식생성물은 지하저수조 내부에 중금속이 축적될 위험성을 높일 수 있으므로 해당 급·배수관의 청소 및 교체가 필요하다. 저수조 내부 수돗물의 체류시간이 길어질수록 잔류염소농도의 감소로 인하여 미생물이 번식할 위험성이 있으므로 공동주택의 저수조 내부 체류시간을 짧게 유지하는 방안을 제안할 수 있다. 법적으로는 저수조의 청소주기를 연 2회 이상으로 규정하고 있으나, 지하저수조의 수질 자동모니터링을 통하여 탁도, 색도, SS 농도 등 수질 항목에 이상이 있을 경우 그보다 잦은 주기로 저수조 청소를 실시하는 방안을 제안할 수 있다. 그리고 가정으로의 부유성 고형물의 유입을 방지할 수 있도록 저수조 말단에 여과시스템 등과 같은 보다 안정적인 수질의 수돗물을 공급하기 위한 추가공정의 도입을 통해 검토해 볼 필요가 있다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of the Korea Research Foundation's original technology development project (2020M3E9A1113438) and the fundamental research project (NRF-2020R1A6A1A03042742).

References

- Abokifa, A. A., Yang, Y. J., Lo, C. S., and Biswas, P. (2016). Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution networks, *Water Research*, 89, 107-117.
- Al-Bahry, S. N., Elshafie, A. E., Victor, R., Mahmoud, I. Y., and Al-Hinai, J. A. (2011). Opportunistic pathogens relative to physicochemical factors in water storage tanks, *Journal of Water and Health*, 9(2), 382-393.
- Alvarez-Bastida, C., Martínez-Miranda, V., Vázquez-Mejía, G., Solache-Ríos, M., de Oca, G. F. M., and Trujillo-Flores, E. (2013). The corrosive nature of manganese in drinking water, *Science of the Total Environment*, 447, 10-16.
- Baghouth, S. A., Sharma, S. K., and Amy, G. L. (2011). Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC, *Water Research*, 45(2), 797-809.
- Chen, L., Jia, R. B., and Li, L. (2013). Bacterial community of iron tubercles from a drinking water distribution system and its occurrence in stagnant tap water, *Environmental Science: Processes and Impacts*, 15(7), 1332-1340.
- Cook, D. M., Husband, P. S., and Boxall, J. B. (2016). Operational management of trunk main discoloration risk, *Urban Water Journal*, 13(4), 382-395.
- Cotruvo, J. A. (2017). 2017 WHO guidelines for drinking water quality: First addendum to the fourth edition, *Journal American Water Works Association*, 109(7), 44-51.
- Du, E., Cao, P. R., Sun, Y., Gao, N. Y., and Wang, L. P. (2012).

- Application of fluorescence excitation-emission matrices and parafac analysis for indicating the organic matter removal from micro-polluted raw water in water treatment plant, *Fresenius Environmental Bulletin*, 21, 4030-4039.
- Fellman, J. B., Hood, E., and Spencer, R. G. (2010). Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review, *Limnology and Oceanography*, 55(6), 2452-2462.
- Fish, K. E., Osborn, A. M., and Boxall, J. (2016). Characterising and understanding the impact of microbial biofilms and the extracellular polymeric substance (EPS) matrix in drinking water distribution systems, *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2(4), 614-630.
- Gerke, T. L., Little, B. J., and Maynard, J. B. (2016). Manganese deposition in drinking water distribution systems, *Science of the Total Environment*, 541, 184-193.
- Ginige, M. P., Wylie, J., and Plumb, J. (2011). Influence of biofilms on iron and manganese deposition in drinking water distribution systems, *Biofouling*, 27(2), 151-163.
- Gonzalez, S., Lopez-Roldan, R., and Cortina, J. L. (2013). Presence of metals in drinking water distribution networks due to pipe material leaching: A review, *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95(6), 870-889.
- Gschwandtner, A., Jang, C., and McManus, R. (2020). Improving drinking water quality in South Korea: A choice experiment with hypothetical bias treatments, *Water*, 12(9), 2569.
- Ho, C. K., Christian, J. M., Ching, E. J., Slavina, J., Ortega, J., Murray, R., and Rossman, L. A. (2016). Sediment resuspension and transport in water distribution storage tanks, *Journal American Water Works Association*, 108(6), E349-E361.
- Jamshaid, M., Khan, A. A., Ahmed, K., and Saleem, M. (2018). Heavy metal in drinking water its effect on human health and its treatment techniques-a review, *International Journal of Biosciences*, 12(4), 223-240.
- Jang, J. Y., Kim, J. W., Hwang Y. H., Kim, K. P., Shin H. S., and Lim, B. R. (2022). Water quality variation and corrosion index characteristics of the underground reservoir in an apartment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 38(6), 275-281. [Korean Literature]
- Kim, D. H., Lee, D. J., Hwang, J. S., and Choi, D. Y. (2013). Characteristic analysis and effect of particulate material in drinking water distribution networks, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(5), 312-320. [Korean Literature]
- Kohl, P. M. and Medlar, S. J. (2006). *Occurrence of manganese in drinking water and manganese control*, American Water Works Association.
- Lavonen, E. E., Kothawala, D. N., Tranvik, L. J., Gonsior, M., Schmitt-Kopplin, P., and Köhler, S. J. (2015). Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production, *Water Research*, 85, 286-294.
- Lee, H. S., Hur, J., Lee, M. H., Brogi, S. R., Kim, T. W., and Shin, H. S. (2019). Photochemical release of dissolved organic matter from particulate organic matter: Spectroscopic characteristics and disinfection by-product formation potential, *Chemosphere*, 235, 586-595.
- Lei, I. L., Ng, D. Q., Sable, S. S., and Lin, Y. P. (2018). Evaluation of lead release potential of new premise plumbing materials, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 27971-27981.
- Li, G., Ma, X., Chen, R., Yu, Y., Tao, H., and Shi, B. (2019). Field studies of manganese deposition and release in drinking water distribution systems: Insight into deposit control, *Water Research*, 163, 114897.
- Liu, S., Gunawan, C., Barraud, N., Rice, S. A., Harry, E. J., and Amal, R. (2016). Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems, *Environmental Science and Technology*, 50(17), 8954-8976.
- Lyon, B. A., Cory, R. M., and Weinberg, H. S. (2014). Changes in dissolved organic matter fluorescence and disinfection byproduct formation from UV and subsequent chlorination/chloramination, *Journal of Hazardous Materials*, 264, 411-419.
- Ministry of Environment (ME). (2021). *Report on the results of the survey on tap water consumption in 2021*, https://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=40&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10264&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.code=A5&condition.fromInpYmd=null&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=7776 (accessed August, 2022).
- Ministry of Environment (ME). (2022). *Statistics for water supply in 2021*, https://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10264&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.code=A5&condition.fromInpYmd=null&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=7996 (accessed February, 2023).
- Mun, H. S., Seok, K. S., Chae, M. H., Kim, J. H., Hong, S. H., Lee, J. J., Yoon, J. H., Cho, S. H., Jeon, P. Y., Yoon, J. Y., Kil, G. B., Tae, E. N., Yoon, G. S., Choe, J. Y., Kim, W. S., Bae, S. Y., and Han S. R. (2020). *Investigation on the origin of organic pollutants in the upstream of Miho-stream and management strategies for the corresponding small watersheds (I)*, NIER-RP2020-29, Geum-River Environment Research Center, 7-8. [Korean Literature]
- Murphy, K. R., Stedmon, C. A., Waite, T. D., and Ruiz, G. M. (2008). Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy, *Marine Chemistry*, 108(1-2), 40-58.
- Rahman, M. S. and Gagnon, G. A. (2014). Bench-scale evaluation of drinking water treatment parameters on iron particles and water quality, *Water Research*, 48, 137-147.
- Shamsaei, H., Jaafar, O., and Basri, N. E. A. (2013). Effects

- residence time to water quality in large water distribution systems, *Engineering*, 05, 449-457.
- Simard, A., Pelletier, G., and Rodriguez, M. (2011). Water residence time in a distribution system and its impact on disinfectant residuals and trihalomethanes, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 60(6), 375-390.
- Slavik, I., Oliveira, K. R., Cheung, P. B., and Uhl, W. (2020). Water quality aspects related to domestic drinking water storage tanks and consideration in current standards and guidelines throughout the world-A review, *Journal of Water and Health*, 18(4), 439-463.
- Solomon, C. T., Jones, S. E., Weidel, B. C., Buffam, I., Fork, M. L., Karlsson, J., and Saros, J. E. (2015). Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: Current knowledge and future challenges, *Ecosystems*, 18(3), 376-389.
- Stedmon, C. A. and Bro, R. (2008). Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial, *Limnology and Oceanography: Methods*, 6(11), 572-579.
- Stedmon, C. A. and Markager, S. (2005). Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis, *Limnology and oceanography*, 50(2), 686-697.
- Tanaka, K., Tani, Y., Takahashi, Y., Tanimizu, M., Suzuki, Y., Kozai, N., and Ohnuki, T. (2010). A specific Ce oxidation process during sorption of rare earth elements on biogenic Mn oxide produced by *Acremonium* sp. strain KR21-2, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(19), 5463-5477.
- Torrey, J. D. (2013). *Effect of chlorine vs. chloramine treatment techniques on materials degradation in reclamation infrastructure*, Technical Memorandum No. MERL-2013-57, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Colorado, 3-7.
- Trueman, B. F. and Gagnon, G. A. (2016). Understanding the role of particulate iron in lead release to drinking water, *Environmental Science and Technology*, 50(17), 9053-9060.
- Woo, D. S., Park, H. B., Chae, S. K., Yum, K. T., and Lee, H. S. (2014). A study on the variation of heavy metals in water distribution pipeline systems, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 22(5), 85-91. [Korean Literature]
- Xu, X., Kang, J., Shen, J., Zhao, S., Wang, B., Zhang, X., and Chen, Z. (2021). EEM - PARAFAC characterization of dissolved organic matter and its relationship with disinfection by-products formation potential in drinking water sources of northeastern China, *Science of The Total Environment*, 774, 145297.
- Yang, L., Hur, J., and Zhuang, W. (2015). Occurrence and behaviors of fluorescence EEM-PARAFAC components in drinking water and wastewater treatment systems and their applications: A review, *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6500-6510.
- Zhang, X., Xiao, K., Dong, C., Wu, J., Li, X., and Huang, Y. (2011). In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl^- and SO_4^{2-} , *Engineering Failure Analysis*, 18(8), 1981-1989.
- Zhang, Y., and Lin, Y. P. (2015). Leaching of lead from new unplasticized polyvinyl chloride (uPVC) pipes into drinking water, *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11), 8405-8411.
- Zhang, Y., Shi, B., Zhao, Y., Yan, M., Lytle, D. A., and Wang, D. (2016). Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution system: Effect of aluminum speciation, *Journal of Environmental Sciences*, 42, 142-151.