

공동주택 지하저수조의 수질변화 및 부식성 특성

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

¹서울과학기술대학교 환경공학과 · ²(주)케이원테크

Water Quality Variation and Corrosion Index Characteristics of Underground Reservoir in Apartment

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

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

²K-1ecotech Co., Ltd.

(Received 18 August 2022, Revised 17 October 2022, Accepted 25 October 2022)

Abstract

To maintain water quality after water treatment, monitoring whether the quality of treated tap water quality changes is essential. However, current investigations are insufficient to prevent secondary contamination in drinking water supply systems. This study investigated Gyeonggi's e apartment where a red water problem occurred and monitored the water quality and corrosiveness of the overall water supply system to the apartment from June 2021 to April 2022. In a comparison of drinking water quality after water treatment and the influent of the reservoir, turbidity and heavy metal concentrations were increased and residual chlorine was decreased due to increases in temperature. Correlation analysis and principal component analysis (PCA) indicated that a low level of residual chlorine may cause the abscission of Mn^{2+} and Fe^{2+} through microorganism activation, which also causes a high level of turbidity. The corrosion index (LI) in the influent of the reservoir tank was increased due to Ca^{2+} and temperature. These results indicate that the corrosiveness of drinking water and the deterioration of drinking water quality were mainly increased between the drinking water treatment plant and the reservoir tank's influent. The findings provide clear evidence that it is essential to manage water supply systems and reservoir tanks to prevent the secondary contamination of drinking water.

Key words : Corrosion index, Drinking water, Turbidity, Underground reservoir, Water quality

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

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

^{1c} 교수(Professor), yhhwang@seoultech.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4013-3989>

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

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

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

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

1. Introduction

최근 지속적으로 수도물 적수 사고 및 유출 검출 사고 등 수질 사고가 발생하여 수도물 사용에 대한 불신은 해소되지 못하고 불안감이 확대되고 있다. 시민들의 생활 수준이 높아짐에 따라 깨끗하고 고품질의 수도물에 대한 요구는 점점 높아지고 있기 때문에, 상수도 시설의 유지관리의 중요성 또한 더욱 강조되고 있다.

정수장에서 먹는물 수질기준에 적합하게 처리하여 공급하고 있지만, 급·배수 과정에서 수도물에 포함되어 있는 미생물, 금속원소 및 미세 현탁물질 등이, 급·배수 관망에서 물리·화학적 반응이 일어나 관 벽에 침전되어 통수능력의 저감, 펌프 압력증가, 미생물 재성장으로 인한 맛, 냄새 등의 2차 수질 문제를 일으키는 원인이 되기도 한다(Dietrich and Burlingame, 2015). 또한, 노후화된 배수관과 급수관을 부식시켜 탁도를 증가시키거나, 급·배수관에서의 중금속 용출로 인해 적수가 발생되어 인간의 건강을 위협하고 있기 때문에, 2차 오염의 방지를 위해 수도관 부식을 미리 방지하는 것이 중요하다(Dargahi et al., 2016).

환경부 2020년도 상수도통계 자료에 의하면 매설된 지 20년이 지난 상수관이 전국에 79,641km로, 전체의 34.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 경기도의 경우 아연도강관, 동관 등 비 내식성 배관의 비중은 정수처리 이후 송수관, 배수관, 급수관에서 각각 3.7%, 7.3%, 0.7%로 높지 않았으나, 20년 이상 지난 경년관의 비율은 정수처리 이후 송수관, 배수관, 급수관에서 각각 14.5%, 7.3%, 16.8%를 차지하였다(ME, 2020).

특히 20년 이상 사용된 노후된 급·배수관은 철 및 망간과 같은 중금속 및 미량유해물질이 많이 축적되어 있어 부식이 심해 통수능력이 저하시키는 것으로 알려져 있으나(Geldreich, 2020), 관리는 미흡한 상태이다.

급·배수관을 부식시키는 주요한 요인으로는 수온, 관내 압력 및 유속 등의 물리적 요인, 알칼리도의 감소, 잔류염소 등 화학적 요인 등이 있다(Cynthia and James, 2012; Hoseinzadeh et al., 2013). 정부에서는 2011년 수도물 부식성 특성과 관련된 물의 안정도를 파악하기 위해 탄산칼슘 포화지수인 Langelier Index (LI)를 수도물 수질 감시항목으로 설정하였다(Park et al., 2014).

수도물의 안전한 수질 확보 및 식수 공급을 위해 소석회 등 약품 주입을 통한 배관 부식성 저감 방안(Hwang and Woo, 2011) 및 정기적인 관 세척, 교체와 같은 유지관리, 방청제 주입 등에 관한 연구가 진행되어 왔다(Qiu et al., 2018). 급·배수관의 내식성 재질인 Poly vinyl chloride (PVC), Polyethylene (PE), Stainless steel (STS) 활용을 의무화하는 상수도 배관 부식을 방지하는 정책도 실행되고 있다.

수도권 일부 지역에서는 고층 공동주택에 지하저수조가 아닌 정수장으로부터의 직결급수 방식을 활용하는 공동주택도 늘어나고 있다. 직결급수는 정수장에서의 깨끗한 수질을 유지하기가 편리하지만, 노후 관망에서 탈리된 부식성 물질이나 이물질 등이 곧바로 시민들의 수도꼭지로 유출될 수 있으

며, 수도물 단수 등 비상시 대책 마련이 어렵고, 20층 이상의 대규모 공동주택에서는 적용시키기 어렵다는 단점들이 있어, 현재까지도 많은 공동주택이 지하저수조를 통한 수도물 공급 방안을 채택하고 있다(Lee, 2015). 수도물을 안전하게 공급하기 위하여 공동주택 저수조를 수도법 제21조와 수도시설의 청소 및 위생 등에 관한 규칙 제6조에 의거하여 저수조 내부 청소를 6개월에 1회 이상 실시할 것을 의무화하고 있으나 관리·감독이 미흡한 실정이다. 지하저수조의 효율적인 유지관리를 위해서는 수도물의 정수 이후 송수, 배수, 혹은 급수 과정에서 노후된 관의 부식 및 공동주택 저수조에서의 물리·화학적 수질 변화 및 수질오염 인자에 대해 파악하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 2020년에 적수 사고 발생 및 대장균 항목이 먹는물 수질 기준치를 초과한 바 있는 경기도 소재 공동주택을 대상으로, 해당 공동주택으로의 수도물 공급시스템에 대해 월 1회 이상 수질 모니터링을 수행하여, 정수장에서 가정으로 공급되기까지의 수도물의 수질특성 및 부식성을 평가하였다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상 지하저수조 및 시료채취

본 연구대상 공동주택 지하저수조는 경기도 소재 2014년에 건축되었으며 재질은 Polyethylene Double Frame (PDF)이고, 용량은 760톤이다. 공동주택 수도물 공급시스템의 수질 및 부식성 평가를 위한 시료 채취지점을 Fig. 1에 나타내었다. 2021년 6월부터 2022년 4월까지 매월 지하저수조 유입수(Sample B), 유출수(Sample C), 가정으로 공급된 수도물(Sample D)을 먹는물 수질공정시험기준(Korea Law Information Center, 2021)에 근거하여 1~5분간 배출시킨 후 무균 폴리에틸렌 용기에 2L 채취하였다. 공동주택 지하저수조 유입 원수(Sample A)의 수질 정보는 안양·청계 통합정수장의 월별 수질검사결과(Anyang Water Service, 2022)를 활용하였다.

2.2 수질분석

공동주택 지하저수조 유입 및 유출수, 그리고 가정에 공급된 수도물의 수질특성을 조사하기 위하여 현장에서는 pH, 수온, 탁도(2100P, HACH), 전기전도도, 잔류염소(CL-2006, Lutron)를 측정하였다. 그리고 실험실에서는 ICP-MS (Agilent 7900, Agilent)를 이용하여 Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} 등 중금속 농도를 측정하였다. 모든 수질인자의 측정은 먹는물 수질공정시험기준(2021.02.08. 改)에 의거하여 측정하였다.

2.3 부식성 지수 평가

가정으로 공급되는 수도물의 적수 발생원인을 중 하나는 배관의 부식으로 인한 수도물로의 중금속 용출이다(Hu et al., 2018). 본 연구에서는 급수 배관의 부식성을 평가하는 지표인 부식성 지수(Bae et al., 2015)를 활용하여 수도물의 부식 경향을 파악하였다. 부식성 지수의 산정 방식은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 가장 범용적으로 활용되는 부

Table 1. Summary of corrosion index values (pH: pH when CaCO₃ is saturated to water)

	Usage	Formula	Corrosion Range
Langelier Saturation Index (LI)	Most Universal	LI = pH-pHS	LI > 0 : Incorrosive LI = 0 : Equilibrium to CaCO ₃ saturation LI < 0 : Corrosive
Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP)	Theoretical mass of CaCO ₃	CCPP = Alk(i)-Alk(eq)	CCPP > 0 : CaCO ₃ precipitated. CCPP < 0 : CaCO ₃ does not precipitated.
Aggressiveness Index (AI)	Mainly for Cement pipe	AI = pH+log[Ca ²⁺][Alk]	AI > 12 : Incorrosive AI 10~12 : Corrosive AI < 10 : Highly Corrosive
Ryznar Stability Index (RI)	Mainly for Steel pipe	RI = 2pHs-pH	RI < 6.2 : Incorrosive 6.2 < RI < 6.8 : Stable RI > 6.8 : Corrosive
Larson's Ratio (LR)	Mainly for Stainless pipe	LR = $\frac{[Cl^-]+[SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]}$	LR < 0.5 : Incorrosive LR > 0.5 : Corrosive

식성 지수인 LI, 연구지점 공동주택의 급수 배관이 스테인레스(SUS-303) 재질로 이루어져 있어, 스테인레스 배관의 수돗물 부식성을 측정하는데 주로 활용되는 LR을 산정하였다.

LI의 산정을 위해 먹는물 수질공정시험기준에 의거 총용존고형물(Bante901P, Bante)과 ISO-9963의 수질 알칼리도 측정법에 의거하여 적정법으로 알칼리도(Alkalinity)를 측정하였으며, ICP-MS를 이용하여 측정된 Ca²⁺ 농도를 측정하였다. LR을 산정하고자 이온크로마토그래피(Dionex Aquion Ion Chromatography System, Thermo Scientific™)를 이용하여 저수조 유입수, 유출수 및 가정 수도꼭지 시료의 염소이온(Cl⁻), 황산이온(SO₄²⁻)농도를 측정하였다. 정수장 처리수의 경우, 경기도 물정보시스템(Gyeonggi Water Information System, 2022)의 정수장 수질 분석결과 자료에 나타난 LI를 활용하였고, Larson's Ratio (LR)값은 월별 수질검사결과의 염소이온, 황산이온농도를 활용하여 산정하였다.

3. Results and Discussion

3.1 지하저수조 유입 및 유출수 수질특성

경기도 소재 공동주택 내 지하저수조의 수질모니터링 결과를 Fig. 1, Table 2에 나타내었다. 탁도의 경우 Fig. 1에 나타난 바와 같이 법적기준인 0.5NTU 기준치 이내로 나타났으나, 저수조 유입 전(Sample B)이 정수장 처리수(Sample A)보다 탁도가 높아지는 경향을 나타내었다. 이는 의 연구에 의하면 급·배수관에 누적되었던 오염원 혹은 중금속이 탈리되어 탁도 증가의 원인이 되었다고 판단된다(Li et al., 2019). 그리고 겨울철보다는 여름철에 탁도가 높아지는 경향을 나타낸 것은 여름철 기온이 상승함에 따라, 배관 내부 자연유기물(Natural Organic Matter, NOM)에 의하여 환원 용

해가 가속되어 급·배수관의 부식성이 상승하였기 때문이다 (Masters et al., 2016). 2021년 8월에는 지하저수조 유입수 대비 유출수에서 일시적으로 탁도가 0.91 NTU로 법적 수질 기준치(0.5 NTU)를 초과하는 사례가 나타나, 이는 유출수 시료 채취 시 기존에 저수조 바닥에 침전된 입자성 물질이 일시적으로 유출되어 영향을 미친것으로 판단된다.

잔류염소농도의 경우(Fig. 1) 정수처리시설에서 공동주택 지하저수조 유입 및 시민들이 음용하는 수돗물까지 공급되

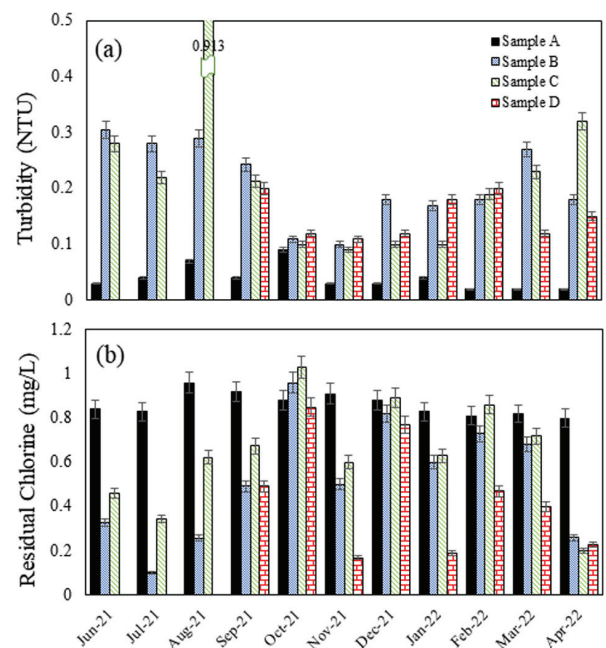


Fig. 1. Changes in water quality. (a) turbidity and (b) residual chlorine in the sample sites.

Table 2. Water quality characteristics of influent and effluent in the underground reservoir

Parameters	Sample A (Finished water)		Sample B (Influent of reservoir)		Sample C (Effluent of reservoir)		Sample C (Tap water)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
pH (-)	8.00	7.10	7.48	6.95	7.46	6.93	7.46	6.98
Residual Chlorine (mg/L)	0.96	0.80	0.96	0.10	1.03	0.20	0.85	0.17
Turbidity (NTU)	0.09	0.02	0.31	0.10	0.91	0.09	0.20	0.11
Al ³⁺ (mg/L)	0.060	N.D.	0.050	0.009	0.057	0.009	0.053	0.008
Mn ²⁺ (mg/L)	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	0.001	N.D.	0.000	N.D.
Fe ²⁺ (mg/L)	N.D.	N.D.	0.000	N.D.	0.006	N.D.	0.001	N.D.
Cu ²⁺ (mg/L)	N.D.	N.D.	0.007	N.D.	0.006	N.D.	0.007	N.D.
Zn ²⁺ (mg/L)	0.010	N.D.	0.009	N.D.	0.012	N.D.	0.018	N.D.

는 시스템을 지나면서 잔류염소가 감소되는 것을 알 수 있었다. 잔류염소농도 기준치 0.1 mg/L 이상을 유지하고 있었으나, 정수장 처리수(Sample A)에서 저수조 유입 전(Sample B) 잔류염소농도 손실은 가을-겨울철보다 봄-여름철에 감소하는 것으로 나타났다. 이는 급수배관 내에서 잔류염소의 손실, 수체(bulk water)내 반응, 벽체 흡착 및 여름철 수온상승으로 인해 잔류염소 증발 및 분해속도가 증가되었기 때문이다(Lee et al., 2004; Noh et al., 2016).

또한, 지하저수조 유출수와 가정 수도꼭지(Sample D)간의 잔류염소 손실이 크게 나타났는데, 이는 건물 높이에 따른 수돗물 공급 시 압력 및 배관 체류시간 동안의 손실의 가능성이 있다(Proctor et al., 2020). 그리고 선행연구들에 따르면 저수조 내 수돗물 저장 시 잔류염소가 감소하는 것으로 보고되었으나(Jun and Kim, 2015), 본 연구에서 저수조 유입수보다 유출수의 잔류염소농도가 높은 측정값은 시료채취관의 환경, 유량 및 유속으로 인해 잔류염소가 휘발되는 문제와 더불어 저수조 유입수, 유출수 간의 수온 차에 의한 영향으로 판단된다(Ahn et al., 2007). 2021년 6월에서 8월 간 저수조 유입수의 수온은 27.3~29.4℃로 외부의 높은 기온과 비례하는 반면, 저수조 유출수는 15.4~17.9℃로 지하저수조 주변 환경으로 인해 수온 또한 낮게 측정되었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 전반적으로 수질인자의 차이는 저수조 유입수, 유출수 간 차이보다 정수장 처리수, 저수조 유입수 간 차이에서 크게 나타났다. 탁도나 용존 중금속의 경우 저수조 유입수와 유출수 간 차이가 거의 관측되지 않았다. 이는 과거에 비해 급수관 및 저수조 설비가 내식성 재료로 이루어져 있어, 저수조 유입수와 유출수 간 잔류염소의 흡착 및 중금속 용출 등 수질 변화가 거의 일어나지 않는 것으로 판단된다. 그러나 정수장에서 송·배수관의 경우 노후관이나 비내식성 관의 비중이 10% 정도로, 배관의 부식 및 정수처리된 수돗물의 수질변화를 일으킬 수 있다(Cho et al., 2020; ME, 2020).

또한 지하저수조 유입과 유출, 가정으로 공급된 수돗물의 중금속 농도는 Table 2에 나타난 바와 같이 모두 먹는물 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 정수장 처리수(Sample A)에서 Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺는 미검출(N.D.) 되었으나

저수조 유입 전(Sample B)부터 가정 수도꼭지(Sample D)에서는 중금속 성분이 미량 검출되었다. 수도관 내 미량 중금속은 급·배수관 재질에서 중금속 용출, 관 부식에 따른 스케일(scale) 이탈 물질의 영향으로 판단된다(Li et al., 2019).

조사대상 공동주택 지하저수조의 변수 간의 관계를 통한 수질특성 파악을 위해 중금속 및 수질인자 항목들에 대해 상관분석을 하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Pearson 상관분석 결과, 탁도와 Mn²⁺, Fe²⁺은 각각 r=0.48(p<0.05), 0.74(p<0.05)로 양의 상관관계를 보였으며, 다른 항목들과는 음의 상관관계를 보였다. 잔류염소는 Mn²⁺(-0.61, p<0.05), Zn²⁺(-0.26, p<0.05)와는 음의 상관관계를 나타내었다. 그리고 Cu²⁺와 Zn²⁺은 0.69(p<0.05)로 양의 상관관계를 나타냈다. 해당 분석을 통해 미량이지만 정수장 배수관 및 공동주택 급수관을 거쳐 지하저수조 유입 전 배관까지 부식성 물질이 탈리되어 수질에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

수질 오염물질 및 중금속 용출원인 관계를 파악하기 위하

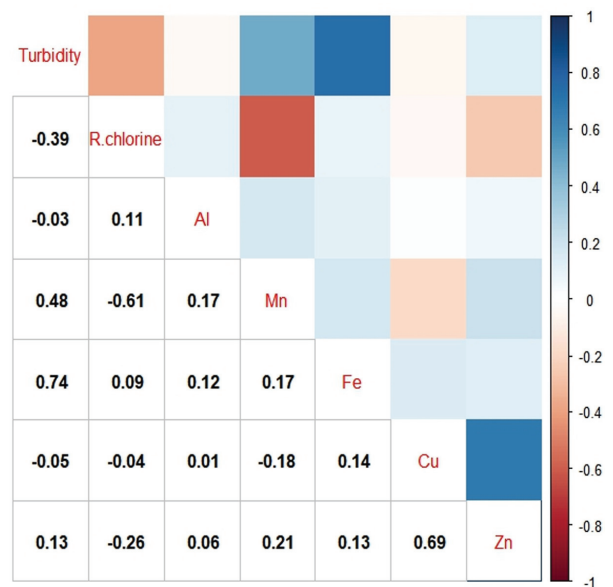


Fig. 2. Pearson's correlation of turbidity, residual chlorine, and heavy metals.

Table 3. PCA results of heavy metals and relative factors in the water samples

Items	PC1	PC2	PC3
Variance(%)	27.9	24.3	23.3
Cumulative variance(%)	27.9	52.2	75.6
Turbidity	0.555	-	0.755
Free chlorine	-0.897	-0.151	0.182
Al ³⁺	-	-	0.254
Mn ²⁺	0.869	-	0.150
Fe ²⁺	-	-	0.767
Cu ²⁺	-0.149	0.931	-
Zn ²⁺	0.239	0.895	-

여 상관관계에 근거한 주성분 분석을 하였으며, 수질항목의 요인에 대한 고유치와 수질에 미치는 기여율을 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서는 Cl₂ 등 소독제의 투여량이 감소되면 미생물 활성도가 증가해 각종 상수도 배관의 망간 코팅이 부식되어 수중에 용해성 망간이 증가하며, 배관 내 침전물 이어질 수도 있기 때문에(Kim et al., 2013; Li et al., 2019) 잔류염소, 탁도, 그리고 망간이온(Mn²⁺)을 요인1로 하였다. 수중의 중금속 중 구리이온(Cu²⁺), 아연이온(Zn²⁺) 농도의 연관성은 급·배수관의 재질 중 아연도강관 등 주요성분이 구리와 망간으로 구성된 급·배수관의 용출의 영향일 것으로 판단되어(Lee et al., 2017; ME, 2020) 요인 2로 하였다. 탁도와 철이온(Fe²⁺)을 요인3으로 구분하고, 요인부하량의 크기에 따라 강(>0.75), 중(0.75-0.50) 및 약(0.5-0.3)으로 나누어 요인부하 요인을 해석하였다(Liu et al., 2003).

조사대상 지하저수조에 대하여 3개의 수질변화 요인이 추출되었으며, 요인1은 27.9%, 요인 2는 24.3%, 요인 3은 23.3%의 기여율을 보였다. 3개의 요인은 전체 수질 변화 특성의 75.6%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 요인1에서 탁도와 망간이온은 강한 정도의 요인부하량을 나타내었고, 잔류염소와는 중간 정도의 음의 요인부하량을 보였다. 요인2에서 구리와 아연이 강한 요인부하량을 나타내었고 요인3에서는 탁도와 철이온에 강한 요인부하량을 보였다.

3.2 부식성 평가

수도관의 부식에 영향을 줄 수 있는 요인은 관의 재질, 유속, 수온 등 물리적 인자, pH, 알칼리도, 경도, 잔류염소농도, 황산이온 등 화학적 인자, 생물막에 의한 금속 산화 등 여러 요인이 존재한다. 특히 내식성 재질의 배관도 이음부, 접합부 등이 노후화될 경우, 부식이 진행되어 적수 사고, 탁도 유발 물질 발생 등 수질 악화 등의 문제를 일으킬 수 있다. 부식성 지수는 수돗물의 부식성 평가 지표로 활용되고 있으며, 주로 탄산칼슘(CaCO₃)의 침전 원리, 또는 Cl⁻, SO₄²⁻ 농도에 근거하고 있다(Kim and Lee, 2014; Kim et al., 2018).

공동주택 수돗물 공급과정에 따라 시료를 채취하여 수온, 알칼리도, Total dissolved solids (TDS), Cl⁻, SO₄²⁻를 측정하여 부식성지수 LI와 LR를 계산한 결과 Fig. 3와 같다. LI는

수치가 0 미만일 경우 부식성이 높으며, 0 이상일 경우 배관 내 스케일 형성 가능성이 높음을 의미한다. 정수장 처리수(Sample A)의 경우 부식의 정도가 크지 않았으나, 저수조 유입 전·후와 수도꼭지에서는 부식성 지수가 LI<0, LR>0.5로 ‘부식성 높음’을 나타내었다. 부식성 지수의 T-test 분석을 통하여 부식성 지수는 정수장 처리수와 공동주택 지하저수조의 유입수 간 유의미한 차이가 존재함(p<0.01)을 확인할 수 있었다. 반면, 공동주택 지하저수조의 유입수 및 유출수 간 부식성 지수에는 유의미한 차이가 도출되지 않았다. 따라서 배관 부식으로 인한 녹물 등 수질 문제는 저수조 내부에서의 부식성 증가가 아닌, 정수처리 이후 공동주택 저수조로 수돗물이 공급되는 과정에서 주로 발생한다는 것을 확인하였다(Kim et al., 2017).

또한, 계절 별 부식성 지수를 살펴보면, LI는 계절 별 차이가 크지 않으나, LR 항목은 여름과 겨울 간 부식성 지수가 큰 차이를 보였다. 본 연구에서 가장 높은 변동성을 보인 인

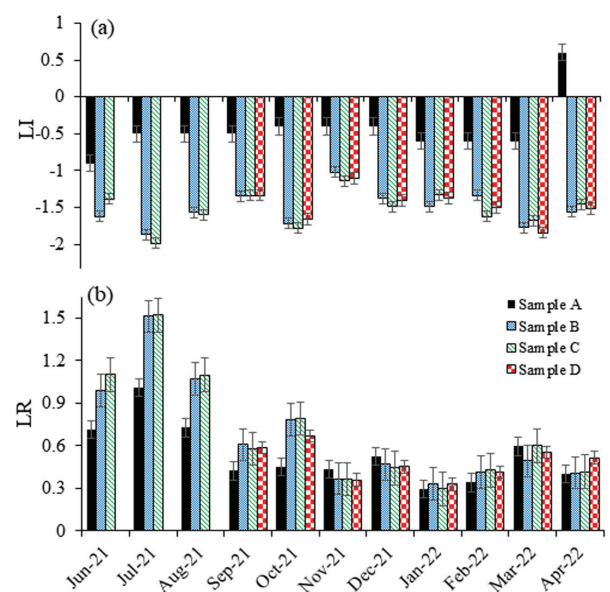


Fig. 3. Changes in corrosion index. (a) LI and (b) LR in the sample sites.

자는 HCO_3^- 로, 이는 알칼리도가 계절별 영향에 따라 변동될 수 있음을 의미한다. 여름에 비교적 많은 강우량은 pH 저하 및 알칼리도의 저하가 일어날 수 있는 원인이 된다(Gaspar et al., 2018).

부식성 지수(LI, LR) 및 수질인자 간(pH, 알칼리도, 수온, Ca^{2+} , TDS, Cl^- 및 SO_4^{2-}) 상관분석 결과, 알칼리도와 Ca^{2+} 는 0.66($p < 0.05$)의 상관관계를 보였다. 높은 Ca^{2+} 는 수도관 내 스케일을 형성하여 상수도 분배 시스템에 압력 손실을 유발할 수 있으므로, 배관 부식을 방지하기 위해 탄산칼슘 등 알칼리도 조절을 위한 약품 첨가 방안(Han et al., 2018; Wong and Stenstrom, 2018) 및 급·배수관 청소 등을 주기적으로 수행할 필요가 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 정수장과 녹물 사고가 발생한 공동주택 지하저수조의 현장조사 및 부식성 지수 연구를 통해 정수된 수돗물의 수질 및 부식성 변화 추이와 관련된 정보를 확보할 수 있었다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 경기도 소재 공동주택 지하저수조의 유입수·유출수 수질분석 결과, 여름철에 잔류염소는 기준치보다 낮게 나타났고, 탁도는 기준치보다 높게 나타났다. 여름철 높은 기온으로 인해 휘발되는 잔류염소는 미생물 활동을 효과적으로 억제하지 못해, Mn^{2+} 등 배관 내 중금속 성분이 수돗물로 탈리되어 탁도를 유발하였다. 따라서 정수처리 이후에도 안전한 수돗물 공급을 위해서는 산소 또는 미생물 작용으로 인한 탁도 등 수돗물의 2차적인 오염을 제어하기 위한 시스템 도입이 필요하다.

2) 연구지점별 부식성 지수 LR과 LI값을 산정하여 비교한 결과, 정수장 처리수질에서는 부식성이 높지 않으나, 저수조 유입 전 급·배수 과정에서 부식성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 정수처리 이후에도 pH, 알칼리도, 잔류염소 등 배관 부식에 영향을 줄 수 있는 수질 인자들에 대한 관리가 필요하다.

3) 정수처리 이후 상수도망에서 수돗물의 2차 오염을 방지하기 위해서는 정수장에서 부식성 수질을 개선하거나 탁도를 유발하는 중금속 및 입자성 물질을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 그리고 수돗물 공급시스템에서의 관 접합부 결합 관리, 노후된 급·배수관 교체 및 저수조 청소를 의무적으로 실시하여, 수돗물이 2차오염 되지 않도록 철저히 관리해야 할 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

- Ahn, J. C., Lee, S. W., Rho, B. S., Choi, Y. J., Choi, J. H., Kim, H. I., Park, T. J., Park, C. M., Park, H., and Koo, J. Y. (2007). Modeling residual chlorine and THMs in water distribution system, *Journal of Korean Society Environmental Engineer*, 29(6), 706-714. [Korean Literature]
- Anyang Water Service. (2022). *Water quality test results for Anyang city*, <https://water.anyang.go.kr/> (accessed May, 2022).
- Bae, S. M., Kim, D. H., Son, H. J., Choi, D. H., Kim, I. S., and Kim, K. A. (2015). The monitoring of corrosive water quality in water distribution system by corrosion characteristics of raw and tap water, *Journal of Environmental Science International*, 24(7), 907-915. [Korean Literature]
- Cho, Y. M., Seo, Y. W., Meng, S. K., and Hong, I. S. (2020). *Improving the safety of tap water in Gyeonggi-do*, GRI publication No. 2020-50, Gyeonggi Research Institute (GRI), 1-16. [Korean Literature]
- Cynthia, A. S. and James R. M. (2012). Effect of storage tank material and maintenance on household water quality, *Journal of American Water Works Association*, 104(9), 521-529.
- Dargahi, A., Shokri, R., Mohammadi, M., Azizi, A., Tabandeh, L., Jamshidi, A., and Beidaghi, S. (2016). Investigating of the corrosion and deposition potentials of drinking water sources using corrosion index: a case study of Dehloran. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 974, 2115.
- Dietrich, A. M. and Burlingame, G. A. (2015). Critical review and rethinking of USEPA secondary standards for maintaining organoleptic quality of drinking water, *Environmental Science & Technology*, 49(2), 708-720.
- Gaspar, F. L., Pinheiro, B. R., Noriega, C. E. D., Araujo, M., Lefèvre, N., and Montes, M. D. J. F. (2018). Alkalinity, inorganic carbon and CO_2 flux variability during extreme rainfall years (2010-2011) in two polluted tropical estuaries NE Brazil, *Brazilian Journal of Oceanography*, 66, 115-130.
- Geldreich, E. E. (2020). *Microbial quality of water supply in distribution systems*, CRC Press, Boca Raton, 1-22.
- Gyeonggi Water Information System. (2022). *Water quality monitoring data*, <https://water.gg.go.kr/> (accessed Jun, 2022).
- Han, K. S., Park, J. H., Park, Y. B., Kim, S. J., Kim, H. D., Choi, Y. J., Choi, I. C., and Hong, S. H. (2018). Effect of residual chlorine concentration on water pipe corrosion and corrosion control plan, *Corrosion Science and Technology*, 17(1), 12-19. [Korean Literature]
- Hoseinzadeh, E., Yusefzadeh, A., Rahimi, N., and Khorsandi, H. (2013). Evaluation of corrosion and scaling potential of a water treatment plant, *Archives of Hygiene Sciences*, 2(2), 41-47.
- Hu, J., Dong, H., Xu, Q., Ling, W., Qu, J., and Qiang, Z. (2018). Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy, *Water Research*, 129, 428-435.
- Hwang, B. G. and Woo, D. S. (2011). Corrosion control technique

- for pipeline system through injecting water stabilizer, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12(1), 545-551. [Korean Literature]
- Jun, M. H. and Kim, D. H. (2016). A study on water quality variation of tap water in drinking water distribution systems, *Annual Report of Gyeongsangnam-do Government Institute of Health and Environment*, 14, 272-283. [Korean Literature]
- Kim, D. H., Kim, Y. J., Son, H. J., Ryou, D. C., Ahn, J. Y., Kim, C., and Hwang, I. S. (2018). Effect of corrosive water quality control and corrosion index monitoring in pilot scale pipeline simulator, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 32(2), 183-192. [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]
- Kim, J. and Lee, J. (2014). Improvement of tap water corrosivity by lime and carbon dioxide, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 28(6), 725-733. [Korean Literature]
- Kim, M., Hyun, S., Lee, W. S., and Loretta, Y. L. (2017). The regulations and guidelines for management of corrosive water and pipe corrosion in drinking water distribution system in North America, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(3), 359-369. [Korean Literature]
- Korea Law Information Center. (2021). *Standard for drinking water test*, <https://www.law.go.kr/LSW/main.html> (accessed Jun. 2022).
- Lee, C. (2015). Energy-saving and environmental evaluation of water supply system on replacing water storage installed booster pump system by direct connecting booster pump system, *Journal of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy*, 11(3), 7-12. [Korean Literature]
- Lee, H. D., Hwang, J. W., Bae, C. H., and Kim, S. J. (2004). Assessment of variable characteristics in water quality of the supply systems in the building, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(4), 313-320. [Korean Literature]
- Lee, J. W., Noh, Y. R., and Park, J. H. (2017). Influences of pH on Heavy Metal Leaching in Water Supply Pipelines, *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 37(1), 73-82. [Korean Literature]
- 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, C. W., Lin, K. H., and Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan, *Science of the Total Environment*, 313(3), 77-89.
- Masters, S., Welter, G. J., and Edwards, M. (2016). Seasonal variations in lead release to potable water, *Environmental Science & Technology*, 50(10), 5269-5277.
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Statistics for water supply in 2020*, <http://www.me.go.kr/search/totalSearch/search.jsp> (accessed Jun. 2022).
- Noh, Y. R., Kim, S. H., Choi, S. U., and Park, J. H. (2016). A review study on major factors influencing chlorine disappearances in water storage tanks, *Journal of Korean Society of Disaster & Security*, 9(2), 63-75. [Korean Literature]
- Park, J. H., Chung, H. M., Huh, Y. J., Choi, I. C., Ahn, K. H., Min, B. D., Yang, M. H., Shin, H. J., Park, Y. B., Choi, Y. J., Im, H. T., Song, M. S., and Lee, E. S. (2014). *Corrosion control of distribution system in drinking water*, NIER-RP2014-307, National Institute of Environmental Research, 1-2. [Korean Literature]
- Proctor, C. R., Rhoads W. J., Keane, T., Saleh M., Hamilton, K., Pieper, K. J., Cweirtny, D. M., Prévost, M., and Whelton, A. J. (2020). Considerations for large building water quality after extended stagnation, *Journal of American Water Works Association*, 2(4), e1186.
- Qiu, W., Li, W., He, J., Zhao, H., Liu, X., and Yuan, Y. (2018). Variations regularity of microorganisms and corrosion of cast iron in water distribution system, *Journal of Environmental Sciences*, 74, 177-185.
- Wong, E. Y. and Stenstrom, M. K. (2018). Onsite defluoridation system for drinking water treatment using calcium carbonate, *Journal of Environmental Management*, 216, 270-274.