

자연형 수처리시스템을 통과한 하천수의 물리 화학적 특성 변화

최명락¹ · 김수한² · 김규범^{3,†}

¹대전대학교 일반대학원 방재학과

²부경대학교 지속가능공학부 토목공학전공

³대전대학교 건설안전공학과

Changes in physical and chemical properties of stream water passing through natural-type water treatment system

Myoung-Rak Choi¹ · Su-Han Kim² · Gyoo-Bum Kim^{3,†}

¹Department of Disaster Prevention, Graduate School of Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea

²Department of civil engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

³Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea

요 약

지하수 인공함양을 위하여 하천수를 주입 원수로 사용할 경우 상대적으로 수질이 불량한 하천수의 전처리 과정이 필요하게 된다. 본 연구에서는, 충청남도 홍성군 갈산면에 설치된 인공함양 분지 상류의 소하천에 자갈 접촉, 토양, 식생 등이 복합적으로 구성된 자연형 하천수 수처리 시스템을 설치하여 시스템 통과 전후의 물의 물리화학적 특성 변화를 분석하였다. 수처리 시스템으로 유입되는 물에 비하여 시스템을 거쳐 하류로 유출되는 물에서의 미립자(<60 μm)의 개수가 22.7~34.9% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 물시료에 대한 MFI 분석 결과는 82~99% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 유출수의 이화학적 특성을 보면 수처리 시스템을 통과한 이후 지하수 특성이 증가되는 경향을 보이는데, 이는 하천 하부 약 1.5 m에 설치된 집수관으로 하천수와 인 근의 기저유출수가 일부 혼합되기 때문으로 보인다. 함양 원수내 미립분의 현저한 감소는 인공함양 주입정의 물리적 클로킹을 억제할 수 있으며 함양 시설의 장기적인 운영에도 기여할 것이다.

주요어: 인공함양, 하천수 수처리 시스템, 입자 카운터, MFI, 클로킹

ABSTRACT: When surface water is used as source water for artificial groundwater recharge, a pretreatment process of stream water is required to improve water quality. In this study, a natural-type treatment system for surface water composed of gravel contact zone, soil zone, vegetation zone is installed in the upper stream of the recharge basin in Galsan-myeon, Hongseong-gun, Chungcheongnam-do and the changes in physical and chemical properties of stream water before and after passing through the treatment system are analyzed. The number of particulates (<60 μm) in the water passed through the system decreases by 22.7~34.9% compared to the upstream water and the MFI value also shows a reduction of 82 to 99%. On the other hand, the geochemical characteristics of the water passed through the system shows that the groundwater characteristics tend to be increased. This change can be produced by mixing of surface water and baseflow hydraulically connected to nearby groundwater due to the depth of drain pipe (screen), about 1.5 m depth below the stream. Significant reduction of particulates in the recharge source water can suppress the physical clogging of the recharge wells and also contribute to the long-term operation of the artificial recharge facility.

Key words: artificial recharge, stream water treatment system, particle counter, MFI, clogging

[†]Corresponding author: +82-42-280-4574, E-mail: geowater@dju.kr

1. 서 언

하천은 일반적으로 지표수가 주 성분을 차지하고 있으나, 갈수기에는 주변의 지하수가 유입되는 복류수가 혼합되기도 한다. 특히, 유역 상류지역은 계곡 형상을 많이 나타내므로 하천 주변의 지하수가 하천으로 모인 후 유출되는 현상이 일반적이다. 한편, 전 세계적으로 MAR (Managed aquifer recharge)에 의한 지하수 인공함양 기법이 가뭄 지역에서의 중요한 용수 확보 수단으로 활용되고 있으며(Zhang *et al.*, 2020), 국내에서도 제주도 하천유역 및 충청남도 홍성군 등에서 인공함양 시설에 대한 연구를 수행한 바 있다(Oh *et al.*, 2011; Cha *et al.*, 2021). 유역 상류 지역에서 지하수 인공함양을 실시하기 위해서는 함양 원수의 확보가 필요한데, 동절기 및 갈수기의 하천수 및 기저유출수가 함양 원수로 활용될 수 있다. 지표수는 지하수에 비하여 수질이 상대적으로 불량하기 때문에 적절한 수처리를 통하여 함양 원수로 사용될 필요가 있다.

또한, 유역 상류의 농촌 지역은 하수 처리 및 축산 분뇨 처리 등이 부실할 수 있으며, 이로 인한 지하수 및 하천수의 오염이 나타나기도 한다. 우리나라의 경우 제한된 농경지 내에서 단기간에 높은 생산력을 얻기 위하여 집약적 영농 방식을 추구하고 있으나, 이러한 방식은 하천과 지하수원 오염의 원인이 되며, 농경지 토양 및 수질을 악화시키고 있다(Kang *et al.*, 2010). 과거 농촌 지역에서 발생하는 하수는 오염부하량이 작아 자정작용만으로도 정화가 될 수 있었으나, 최근 생활하수량이 증가함에 따라 하수의 오염 농도가 증가하여 적절한 수처리를 하지 않을 경우 하천수의 수질뿐만 아니라 주변 지하수와 혼합되어 인근 농경지에도 악영향을 미치게 된다(Seo *et al.*, 2009). 농촌 지역의 비점오염물질 저감 및 수질 개선을 위한 방법으로 상류 지역의 비료 등 오염물질 사용 제한, 인공습지, 생태저류지, 여과형 습지, 식생 수로 등과 같은 자연정화 시설이 적용되고 있다(Moreno-Mateos *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2021). 이와 같은 다양한 대책 중에서 자연정화 기법을 하천수에 적용한다면 양질의 지하수 인공함양 원수를 확보하는데 보다 효과적일 뿐 아니라 하류 하천의 정화에도 기여할 것이다.

본 연구에서는 유역 상류 농촌지역에서의 지하수 인공함양 시설에서 함양원수로 사용하는 하천수의 수질 개선을 위하여 자연형 하천수 수처리 시스템을 설치 운영하였으며, 시스템 적용 전후의 수질 변화를 비교 분석하여 인공함양 원수로서의 효용성을 평가하였다.

2. 연구 방법

지하수 인공함양 시설이 설치된 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리에서 함양 원수로서 하천수를 활용하는 방안을 수립하였으며, 소하천의 갈수 유량 및 기저유출수를 최대한 취수하면서도 양질의 수질을 확보할 수 있도록 소하천 내 자갈접촉, 토양, 식생 등으로 구성된 자연형 전처리시스템을 설치하였다(MOE, 2021).

전처리시스템은 자갈접촉 산화수로, 식생 수로의 정화시설, 집수관, 취수관, 송수관, 집수조의 취수시설, 돌망태 보, 호안 개비온 매트리스 등의 보호시설 등으로 이루어져 있다(그림 1a, 1b). 자갈접촉 산화수로리는 지면에 부직포를 부설한 후 강자갈을 채운 후 돌망태 매트리스 구조로 구성하였다. 식생수로는 하천 바닥에 5 cm의 점토를 포설하여 하천 하부로 물의 배수를 방지하고, 그 위에 식생토를 약 65 cm 쌓은 후 식생을 식재하였다. 이와 같은 수로 하부에는 처리 과정을 거친 물을 집수하기 위하여 직경 150 mm (하류는 200 mm)의 pvc 유공관을 설치하고 주변에 자갈을 설치하였다. 또한, 식생 수로를 보호하기 위한 가로, 세로 1 m의 개비온을 다단으로 설치하였으며, 하천 사면 보호 및 쇄굴 방지를 위한 개비온 매트리스를 설치하여 시설의 안정성을 증대시켰다(MOE, 2021). 한편, 하천수의 수질 정화 과정은 상류의 하천수가 삼각 위어를 통과하여 전처리시스템으로 유입되면, 15 m 구간의 자갈접촉 산화수로를 통과하면서 하천수 오염물질의 자갈 접촉 및 침전, 미생물을 이용한 BOD 산화 분해가 진행되는 원리로 진행된다. 이후 약 36 m 구간의 다단식 식생 수로를 통하여 식생에 의한 TN, TP 정화가 이루어지도록 설계되었으며, 기존 연구에서 본 시설에 의한 TN 및 TP 저감 효과는 최대 약 91%, 5.8%인 것으로 분석된 바 있다(MOE, 2022).

이와 같은 정화과정을 거친 물은 집수탱크로 보

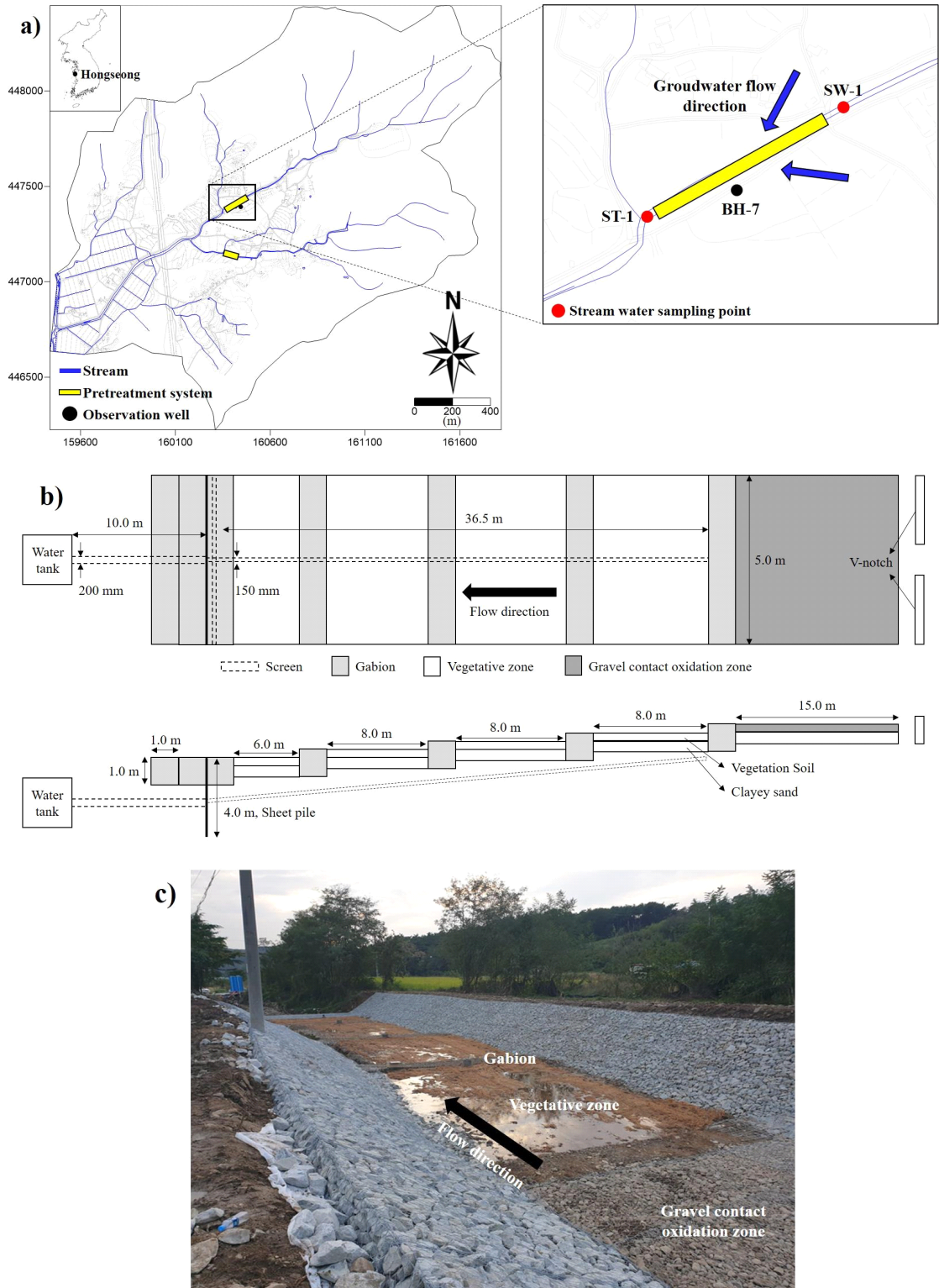


Fig. 1. a) Location map of the study area, b) Design of stream water pretreatment system, and c) Installation view.

내진 후 하류에 설치된 인공함양 주입정 및 Ditch 시설을 통하여 지중으로 자연 유입되도록 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2019; Cha *et al.*, 2021).

본 시설의 수질정화 효과를 평가하기 위하여 2021년 12월 20일부터 2022년 2월 21일까지 3차례의 시료 채취가 수행되었으며, 강우의 영향을 배제하기 위하여 무강우시 수질 조사를 수행하였다. 이 때, 하천수가 전처리시스템으로 유입되기 전 및 후에 물 시료를 채취하여 온도, pH, 전기전도도, 산화환원전위, 용존산소, 중탄산 함량, 양음이온 분석, 철, 망간, 탁도, membrane filtration index (MFI), particle counter 분석 등을 수행하였다. 간이수질 측정기는 Hach사 HQ40d 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산(HCO_3^-)의 함량은 0.05 N 농도의 HCl을 이용하여 산중화 적정법으로 측정하였다. 주요 양이온 및 음이온 분석을 위하여 원수를 0.45 μm 공극의 멤브레인 필터를 통과시켜 부유물질을 제거한 후 폴리에틸렌 용기에 담아 양이온 흡착 및 침전 방지를 위하여 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다(Greenberg *et al.*, 1992). 철과 망간 농도는 시료를 채취한 후 현장에서 Hach사 DR1900으로 측정하였다.

3. 수질 특성 변화

총 3차례에 이루어진 물 시료에 대한 수질 분석 결과는 다음과 같다(표 1, 2). 전처리시스템의 수질 개선 효과를 평가하기 위하여 전처리 시스템의 직상류에서 유입수(SW-1)의 수질분석을 실시하였다. 간이수질분석 결과, pH는 7.26~7.34, 전기전도도는 181.7~223.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 산화환원전위는 126.9~239.0 mV, 용존산소는 10.7~12.2 mg/l, HCO_3^- 는 50.34~146.45 mg/l, 탁도는 0.84~4.28 NTU로 나타났다. 전처리를 통과한 유출수(ST-1)의 경우, pH는 6.0~7.41, 전기전도도는 178.1~209.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 산화환원전위는 191.5~254.9 mV, 용존산소는 9.2~12.1 mg/l, HCO_3^- 는 51.87~67.12 mg/l, 탁도는 0.95~1.72 NTU의 범위로서 전처리 이후 하천수의 간이 수질은 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다.

주요 양이온 성분인 나트륨 이온(Na^+)의 경우, 유입수 11.12~11.33 mg/l에서 유출수 12.19~13.22 mg/l로 증가하였으며, 칼륨 이온(K^+)은 1.42~1.57 mg/l에서 1.58~1.74 mg/l로 증가, 칼슘 이온(Ca^{2+})은 19.08~

19.92 mg/l에서 20.43~20.98 mg/l로 증가, 마그네슘 이온(Mg^{2+})은 3.10~3.46 mg/l에서 3.59~3.72 mg/l로 증가하여 주요 양이온 함량은 증가한 것으로 나타났다. 음이온의 주성분인 중탄산 이온(HCO_3^-)은 유입수 50.34~146.45 mg/l에서 유출수 51.87~67.12 mg/l로 감소하는 특성이 나타났으며, 염소이온(Cl^-)은 13.70~14.55 mg/l에서 14.92~16.80 mg/l, 황산염(SO_4^{2-})은 14.20~16.44 mg/l에서 14.48~17.30 mg/l, 질산염 이온(NO_3^-)은 14.18~16.99 mg/l에서 16.92~20.59 mg/l로 중탄산 이온을 제외한 음이온 모두 증가하는 특성이 나타났다. 이와 같은 현상은 하천수가 전처리시스템내의 매질과의 광물질 반응에 의한 결과라기 보다는 주변의 기저유출수가 혼합되는 것으로 보인다(그림 1). 이는 하천 바닥 약 1~1.5 m 하부(56.7 El.m)에 물을 집수하는 유공관이 설치되어 있는 점, 전처리시스템 인근 관측공 BH-7의 지하수위가 높아(57.7 El.m) 하천 방향으로의 흐름이 작용하는 점 등을 종합해 보면 주변의 지하수가 기저유출로 유입, 혼합되는 것으로 보인다.

한편, Na^+ 과 인위적 오염으로 부화되는 NO_3^- 의 상관 관계를 보면 0.77로 높고, HCO_3^- 와의 상관관계는 0.14 정도로서(그림 2a, 2b), 지질 특성보다는 인위적 오염의 영향이 반영된 것으로 판단된다(Lee and Choi, 2012). 전처리시스템의 직 상류에 규모가 작은 측사 1개소와 농경지가 분포하고 있으며, 전처리시스템 인근 BH-7 관측공의 지하수위 및 지하수 유동 방향을 고려할 때, 상류의 농업 활동의 영향을 받는 것으로 보인다. Piper diagram에서 보면, 전처리 시스템을 경과한 물은 NO_3^- 와 Cl^- 의 증가에 의한 성분 변화를 보여 상류 오염원 영향을 받는 주변 지하수가 기저유출로 유입됨을 보여준다(그림 3).

SAR (Sodium adsorption ratio)는 점토질 물질에 대한 응집 또는 분산 상태를 평가하는 지수로 사용된다(표 1). 나트륨과 칼륨 이온은 점토 입자의 분산을 촉진하는 반면 칼슘과 마그네슘은 응집을 촉진한다. 이와 같은 점토질 물질의 거동은 토양내 투수성에 영향을 미치게 되어 함양수의 침투에 영향을 미치게 된다(Phien-Wej *et al.*, 1998). 유입수 및 유출수의 SAR 변화는 매우 미미한 것으로 나타났으며, 값도 1 미만으로서 3 보다 작아 클로킹 가능성이 거의 없음을 보여준다. SP (Sodium percentage)는 점토질의 클로킹을 진단하는 인자로 사용되는데, 전처

Table 1. Results of ion analysis for water samples (SW-1: upstream site of pretreatment system, ST-1: after pretreatment).

Date	No.	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	ORP (mV)	DO (mg/L)	Turbidity (NTU)	Concentration (mg/L)										SAR	SP (%)		
								Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻			Fe ²⁺	Mn ²⁺
2021-12-20	SW-1	10.7	7.3	181.7	126.9	10.7	4.28	11.33	1.45	19.56	3.10	5.31	14.38	16.44	16.31	0.33	146.4	0.0005	0.0004	0.63	28
	ST-1	10.3	6.0	178.1	191.5	9.2	1.15	13.22	1.74	20.98	3.60	5.79	16.80	17.30	20.59	0.31	67.1	0.0022	0.0031	0.70	29
2022-02-03	SW-1	12.3	7.3	196.8	256.4	12.2	1.75	11.12	1.42	19.08	3.32	7.36	13.70	14.20	14.18	0.29	50.3	0.0067	0.0031	0.87	43
	ST-1	12.9	7.2	209.7	235.2	11.5	1.72	12.19	1.58	20.43	3.72	8.25	14.92	14.48	16.92	0.27	51.9	0.0059	0.0024	0.92	43
2022-02-21	SW-1	10.1	7.3	223.0	239.0	11.8	0.84	11.32	1.57	19.92	3.46	7.54	14.55	15.05	16.99	0.25	98.9	0.0038	0.0023	0.87	42
	ST-1	10.2	7.4	206.6	254.9	12.1	0.95	12.28	1.65	20.54	3.72	8.72	15.67	14.82	19.79	0.24	67.1	0.0052	0.0019	0.93	43

Table 2. Analysis of particles in water samples (SW-1: upstream site of pretreatment system, ST-1: after pretreatment).

Date	No.	Particle size (μm) estimated by particle counter											MFI (sec/L ²)	
		1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~30	30~60		>60
2021-12-20	SW-1	1,711	251	77	90	54	40	32	26	22	71	4	1	22.8
	ST-1	5,310	846	266	280	135	93	57	42	30	94	8	1	671.3
2022-02-03	SW-1	41,004	7,625	2,288	2,590	1,385	1,117	820	710	543	2,111	137	19	2,502.1
	ST-1	29,298	4,493	1,064	1,224	664	554	378	308	204	975	127	12	19
2022-02-21	SW-1	18,922	3,595	347	243	121	120	83	74	53	284	51	12	104.4
	ST-1	14,072	2,959	532	548	205	68	23	9	7	39	5	1	18.3

리 전후 모든 경우가 28~43%로 클로킹 문제를 야기하지 않는 50% 미만의 범위에 해당한다.

4. 철망간 클로킹 인자 변화

물 시료의 철, 망간, 탁도 등은 물리 화학적 클로킹을 발생시키게 된다. 이러한 클로킹은 원수 내 미립자가 입자와 입자 사이를 연결하는 브리징(Bridging), 끌어당김(Straining) 등에 의하여 발생하게 된다(McDowell-

Boyer *et al.*, 1986; Hwang *et al.*, 2021). 클로킹 현상은 미립자 및 산화물 형성에 따라 대수층의 투수성을 감소시키고 취수량 감소가 발생하게 된다(Kim *et al.*, 2017). 따라서, 하천수의 전처리를 통하여 수질을 개선하고, 클로킹의 발생 가능성을 감소시킬 필요가 있다. 기존 연구에 따르면, 클로킹을 발생시키는 대표적인 산화물은 철과 망간으로, 원수 내 pH의 변화, 철, 망간 이온의 농도, 용존 산소 등이 산화물 형성에 영향을 미치게 된다(Kim *et al.*, 2017).

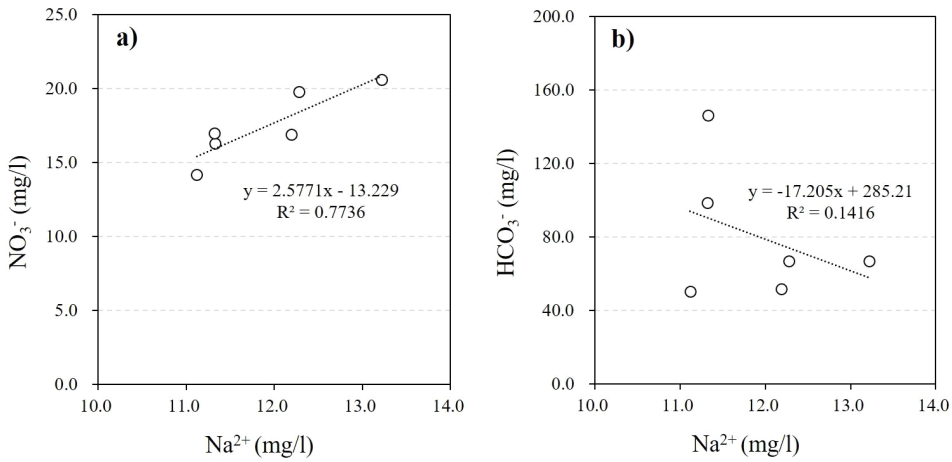


Fig. 2. Correlation between a) nitrate, b) bicarbonate and sodium.

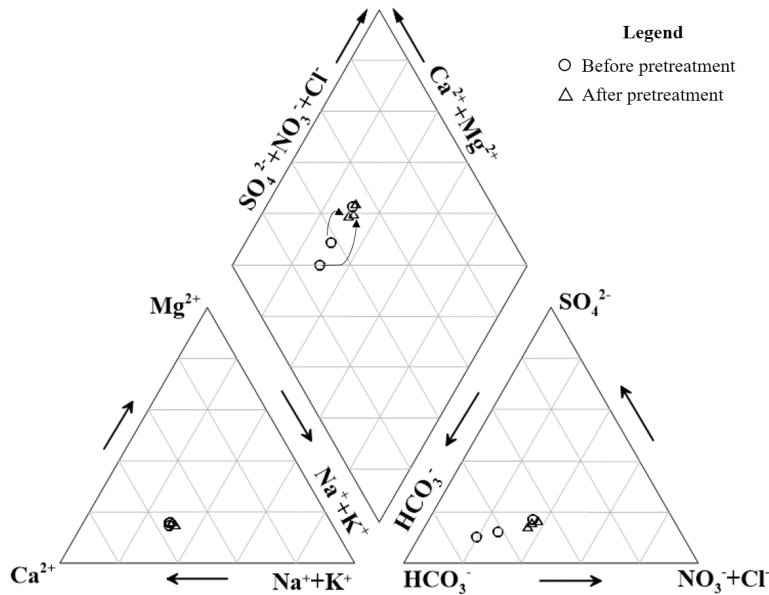


Fig. 3. Changes in water quality types before and after stream water pretreatment.

상류 유입수의 철과 망간의 농도는 0.0005~0.0067 mg/l 및 0.0004~0.0031 mg/l로서, 낙동강 상류인 내성천의 복류수에 대한 분석 값인 약 0.2 mg/l 및 약 0.8 mg/l 보다 훨씬 낮은 값을 보이고 있다(Shin *et al.*, 2013). 이는 연구지역 상류가 화강편마암으로 구성되어 있고 유역이 작고 하천이 짧아 물-암석 반응이 미미하기 때문으로 보인다. 물 시료에 대한 pH-Eh diagram을 작성한 결과 유입수의 경우 철산화물 형성 영역에 있는 반면에, 유출수의 경우 용존상태와 산화물 형성 영역에 걸쳐 있어 주변 지하수 기원의 복류수가 혼합되었을 가능성을 암시한다(그림 4). 한편, 전처리시스템을 통과한 유출수의 철 이온 농도가 0.0022~0.0059 mg/l, 망간 이온 농도가 0.0019~0.0031 mg/l로서 전처리 이전 유입수의 철, 망간 이온 농도

에 비하여 큰 변화를 보이지 않아 짧은 전처리 경로 상 반응에 의한 변화는 거의 없는 것으로 보인다. 함양 원수인 전처리시스템을 통과한 물의 두 성분 농도는 여전히 낮은 값을 나타내고 있어 산화물 침전의 가능성은 낮은 것으로 보이나 실제 운영과정을 통하여 변화를 평가할 필요가 있다(그림 5).

5. 물 시료의 물리적 특성 변화

탁도는 물 시료 내 미립자 등의 부유물질, 박테리아 등에 의해 빛이 산란되는 양을 측정된 것으로 원수 내 미립자의 특성을 반영하며, 탁도가 높은 경우 미립자에 의한 함양 우물의 클로킹이 발생할 수 있다. 하천수의 탁도를 분석한 결과, 유입수에서 0.84~4.28 NTU, 유출수에서 0.95~1.72 NTU로 전처리시스템을 통과한 후 전처리 시스템을 통과하면서 탁도 저감이 뚜렷한 것으로 나타났다.

원수 내 미립자는 입자 카운터인 PAMAS사의 S4031 장비를 이용하여, 1~60 μm의 입자 크기에 대하여 분석하였다. 분석 결과, 2021년 12월 20일 1차 조사 시 시공 이후 안정화가 이루어지지 않은 시점을 제외하면 2차 조사시에는 유입수의 입자수 60,349개/ml에서 유출수 입자수 39,301개/ml로 감소하였으며, 3차 조사시에는 23,905개/ml에서 18,468개/ml로 현저한 감소를 보였다. 즉, 수처리시스템을 통과하면서 미립자의 개수가 약 22.7~34.9% 감소하는 효과가 발생하였다(그림 6; 표 2). 특히, 1~3 μm 크기의 입자 수가 가장 많이 줄어든 것으로 나타나 인공함양 원수로 사용시 미립분에 의한 토양 공극 채움의 가능성을 낮춘 것으로 볼 수 있다.

또한, 물리적인 클로킹을 평가하는 지수로서 MFI

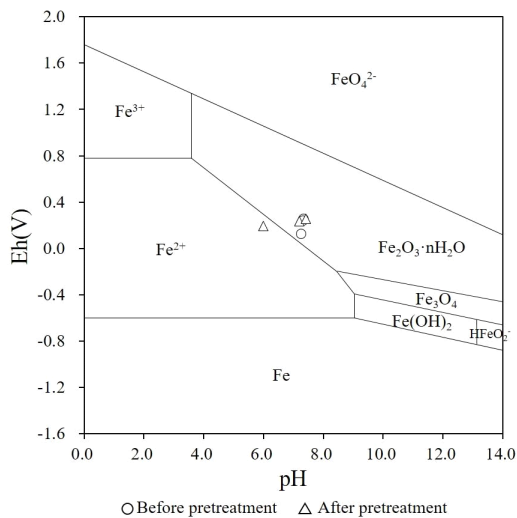


Fig. 4. pH-Eh diagram.

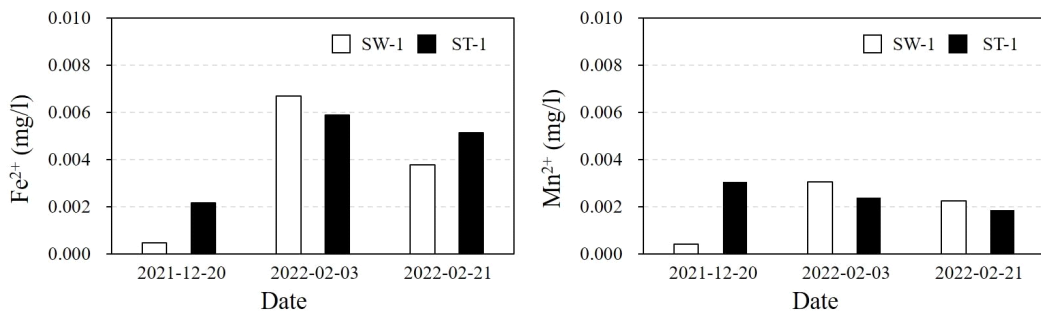


Fig. 5. Contents of dissolved iron and manganese ions in stream water.

가 사용되는데, MFI는 0.45 μm 의 멤브레인 필터의 클로깅을 실험실 규모에서 평가하는 방법이다(Dillon *et al.*, 2001). MFI는 ASTM D4189-95에 의해 수행되며, 500 ml의 물이 여과되는 동안 시간에 따른 여과량을 기록하여 여과량의 변화를 비교하는 방식으로, Cake 층이 형성되어 선형관계를 보일 때의 기울기를 의미한다(Hwang *et al.*, 2021). MFI 분석 결과, 유입수에서 104.4~2,502.1 sec/L^2 , 유출수에서 18.3~19.0 sec/L^2 로 약 82~99%의 현저한 감소를 보였다(표 2). 전처리시스템을 통하여 MFI의 현저한 감소가 수반되었으나, 인공함양수로 사용되기 위한 최적의 조건인 3~5 sec/L^2 정도의 MFI를 충족하진 못하고 있다(Olsthoom, 1982). 이와 같은 결과는 전처리 시스템에 사용된 모래 입자의 크기가 유량을 확보하기 위하여 비교적 큰 크기로 설계된 것에 기인한 것으로 보이나, 1차 분석에 비하여 2차 및 3차 분석에서 처리 후의 MFI가 매우 작아졌다는 점을 고려할 때 시스템 안정화가 이루어진다면 MFI 값은 더 낮아질 것으로 예상된다.

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 자연형 하천수 수처리시스템을 하천에 설치할 경우 상류로부터의 유입수 및 유출수의 수리화학적 변화 특성을 분석하고, 이 특성으로부터 하천수가 인공함양 원수로 사용하기에 적합한 수처리 과정을 거치게 되는 것인지 검토하였다. 하천수 전처리 시스템을 거쳐 나온 물의 이화학적 특성을 보면 지표수에서 지하수 성분으로의 미세한 변화가

나타났으며, 이는 하천 표류수 뿐 아니라 전처리 시스템 하부를 따른 복류수가 혼합된 결과로 보인다. 또한, 유출수에서 나타난 NO_3^- 의 증가 특성은 직상류의 농경지 및 축사의 영향을 받는 지하수가 하천으로 유입되었기 때문으로 추정된다.

주입 원수가 물리 화학적 클로깅을 발생시킬 가능성과 관련하여, 수처리시스템을 거쳐 나온 유출수에서 점토질 물질이 현저히 감소함에 따라 대수층의 공극 채움의 가능성이 줄어들게 되는 효과를 기대할 수 있으며, 이는 하천수의 수처리 시스템의 효율성을 보여주고 있다. 한편, 이 지역의 모암의 특성 및 상류 분지의 규모 등을 고려할 때 하천수내 철 망간 이온 함량이 높지 않아 산화물에 의한 클로깅을 최소화할 수 있어 인공함양 주입 원수로서의 역할도 가능한 것으로 평가되었다.

한편, 본 실험 기간 동안은 전처리 시스템의 식생수로 식재된 식생이 완전히 성장하지 않은 단계로서 식생에 의한 실제 저감 효과는 평가할 수 없었다. 추후 식생의 성장 이후 자정 작용에 의하여 유기물, TN 및 TP 등의 인자가 어떻게 변화하는지 분석한다면 수처리 효율의 평가가 보다 정확하게 이루어질 수 있을 것이다.

최근 기후변화로 인하여 가뭄의 빈도와 규모가 증가하고 있다. 특히, 유역의 상류지역은 빠른 유출, 작은 집수구역, 기존 용수원의 부재 등으로 가뭄에 취약한 지역에 해당한다. 따라서, 지하수 인공함양과 같은 자체 용수확보 체계를 갖출 필요가 있으며, 함양에 필요한 원수 확보가 가능한지 평가되어야 한다. 함양 원수 확보의 평가는 충분한 양을 확보할 수

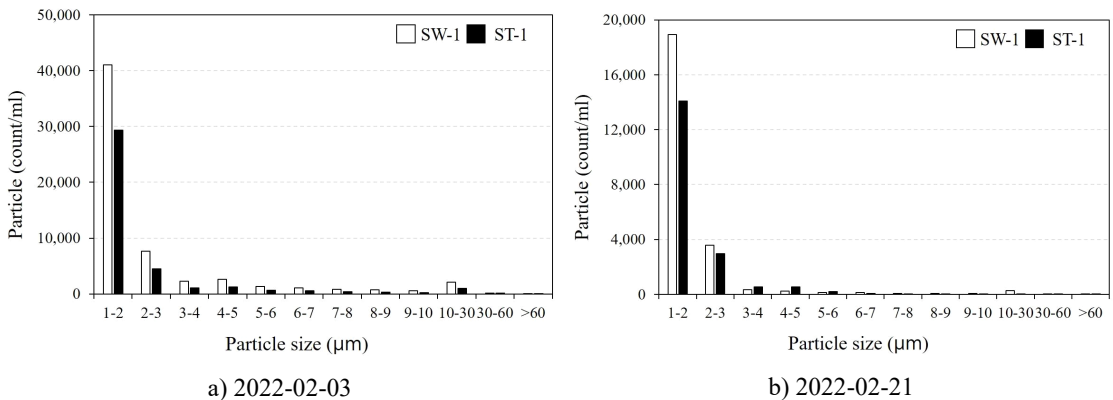


Fig. 6. Particle counter analysis of water samples before and after pretreatment.

있는 기술의 개발도 필요하지만, 대수층에 주입되는 물이라는 점을 고려할 때 수질의 상태, 클로킹의 발생가능성 등에 대해서도 철저히 분석하여 설계, 시공이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 가뭄지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146523)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cha, J.H., Kim, G.B. and Lee, J.Y., 2021, Preliminary evaluation of the optimal injection rate and injection efficiency of groundwater artificial recharge site using numerical model. *The Journal of Engineering Geology*, 31, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Dillon, P., Pavelic, P., Massmann, G., Barry, K. and Correll, R., 2001, Enhancement of the membrane filtration index (MFI) method for determining the clogging potential of turbid urban stormwater and reclaimed water used for aquifer storage and recovery. *Desalination*, 140, 153-165.
- Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.D., 1992, Standard methods for the examination of water and waste water. The American Public Health Association, Washington DC, 4-55.
- Han, I., Lee, J. and Kim, G.B., 2020, Experimental study on non-linear throughflow characteristics of rockfill gabion weir. *Journal of Korea Water Resources Association*, 53, 861-870 (in Korean with English abstract).
- Han, S.J., Kim, B.G., Kim, D.S., Kang, S.H., Lee, S.J., Yu, H.W., Jo, Y.J. and Kim, H.S., 2021, Long term evaluation of river water quality improvement by eco-friendly water treatment technology. *Journal of Korea Society of Water Science and Technology*, 29, 3-14 (in Korean with English abstract).
- Hwang, C.I., Choi, M.R., Han, I.Y., Hong, J.W. and Kim, G.B., 2021, Analysis on the physical-chemical clogging possibility in the groundwater artificial recharge area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 841-853 (in Korean with English abstract).
- Kang, C., Maniquiz, M., Son, Y. and Kim, L., 2010, Analysis of water purification in the FWS wetland for agriculture area. *Journal of wetlands research*, 12, 39-47 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Lee, C.H. and Oh, D.H., 2017, Cause of groundwater yield reduction in a collector well considering sediment's composition and hydrogeochemical characteristics. *The Journal of Engineering Geology*, 27, 439-449 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H., Kim, H.C., Park, J.H., Ryu, S.K., Kang, S.W., Cho, J.S. and Seo, D.C., 2018, Effect of phosphorus removal by oyster shell on longevity of constructed wetlands. *The Korean Society of Environmental Agriculture*, 37, 66-72 (in Korean with English abstract).
- Lee, I.G. and Choi, S.H., 2012, Hydro-geochemical nature and nitrates contamination characters of groundwater in the Youngdong, Chungbuk province. *Economic and Environmental Geology*, 45, 23-30 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.D., Shin, D.M., Kim, B.J. and Kim, G.B., 2019, Selecting aquifer artificial recharge methods based on characteristics of the target aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 29, 483-494 (in Korean with English abstract).
- McDowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R. and Sitar, N., 1986, Particle transport through porous media. *Water Resources Research*, 22, 1901-1921, <https://doi.org/10.1029/WR022i013p01901>.
- Ministry of the Environment (MOE), 2021, Report of Development of Artificial Recharge and Well Network System based on IoT Technology for Optimal Groundwater Supply Management in Drought Prone Area (4th year report on Developing a Water Resource Secure Technique based on Hybrid Artificial Recharge Method in Alluvial Area). Sejong, 692 p (in Korean).
- Ministry of the Environment (MOE), 2022, Report of Development of Artificial Recharge and Well Network System based on IoT Technology for Optimal Groundwater Supply Management in Drought Prone Area (5th year report on Developing a Water Resource Secure Technique based on Hybrid Artificial Recharge Method in Alluvial Area). Sejong (in Korean).
- Moreno-Mateos, D., Pedrocchi, C. and Comín, F.A., 2010, Effects of wetland construction on water quality in a semi-arid catchment degraded by intensive agricultural use. *Ecological Engineering*, 36, 631-639.
- Oh, S.H., Kim, Y.C. and Koo, M.H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 34-45 (in Korean with English abstract).
- Olsthoorn, T.N., 1982, The clogging of recharge wells. Main Subjects, KiWA communication, 72, Rijswijk, The Netherlands, 136 p.
- Phien-Wej, N., Giao, P.H. and Nutalaya, P., 1998, Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control. *Engineering Geology*,

- 50, 187-201, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00016-7).
- Seo, D.C., Jo, I.S., Lim, S.C., Lee, B.J., Park, S.K., Cheon, Y.S., Park, J.H., Lee, H.J., Cho, J.S. and Heo, J.S., 2009, Evaluation of pollutant removal efficiency in environmentally friendly full-scale constructed wetlands for treating domestic sewage during long-term monitoring. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 28, 97-105, <https://doi.org/10.5338/KJEA.2009.28.2.097> (in Korean with English abstract).
- Shin, K.H., Cha, E.J., Son, Y.C., Lee, S.H. and Kim, G.B., 2013, Hydrogeochemical assessment of groundwater quality security in the collection conduit area, Naeseong-Cheon. *The Journal of Engineering Geology*, 23, 1-17, <https://doi.org/10.9720/KSEG.2013.1.1> (in Korean with English abstract).
- Zhang, H., Xu, Y. and Kanyerere, T., 2020, A review of the managed aquifer recharge: historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 118-119, 102887, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>.
-

Received : February 10, 2023

Revised : February 21, 2023

Accepted : February 21, 2023