

## 인공함양 지역의 물리적 및 화학적 클로깅 가능성 평가

황찬익<sup>1</sup> · 최명락<sup>2</sup> · 한일영<sup>3</sup> · 홍진우<sup>4</sup> · 김규범<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>대전대학교 산학협력단

<sup>2</sup>대전대학교 일반대학원 방재학과

<sup>3</sup>(주)비룡 기술연구소

<sup>4</sup>대전대학교 건설안전방재공학과

### 요 약

충청남도 홍성군 갈산면은 유역 상류의 소분지로서 상습 가뭄지역에 해당하며, 물 부족 문제를 해결하기 위하여 미고결층과 풍화대를 대상으로 인공함양 시스템을 구축하고 있다. 본 연구에서는 인공함양의 원수로 사용될 하천수의 주입시 물리적 및 화학적 클로깅의 가능성에 대하여 평가하였다. 하천수의 탁도가 지하수의 탁도보다 낮아 입자간의 bridging 가능성이 낮으나, 주입정의 설계시 상부 미립분의 유입이 발생되지 않도록 상부 구간 무공관 설치가 필요하다. Pilot site에 설치된 11개 주입정의 현장 실험 자료(주입량, 수리전도도 등)와 물 시료에 대한 MFI (Membrane filtration index) 분석 결과를 활용하여 클로깅 속도를 평가하였다. 현재 하천수의 평균 MFI인 250.5 sec/L<sup>2</sup> 조건에서는 0.763 m/y이나, 하천수 주입시 전처리를 통하여 3.0 sec/L<sup>2</sup> 이하로 낮춘다면 0.009 m/y로 줄일 수 있는 것으로 평가되었다. 이온 분석 자료로부터 SAR (Sodium adsorption ratio) 및 SP (Sodium percentage)를 산정하여 점토질 분산에 의한 클로깅 가능성을 진단한 결과, 각각 평균 0.68%과 25%의 값을 보여 클로깅 가능성은 거의 없는 것으로 평가되었다. 화학적 산화물의 형성 여부를 파악하기 위하여 포화지수를 산정한 결과, 철의 광물종인 적철석(Hematite), 침철석(Geothite), 자철석(Magnetite) 등은 0.5보다 큰 과포화 상태로서 침전 가능성이 존재하는 것으로 나타났다. 이와 같이 평가인자에 따라 클로깅의 가능성에 차이가 존재하나, 물리적 및 화학적 클로깅을 최소화하기 위해서는 주입수인 하천수에 대한 전처리 시스템이 요구된다.

**주요어:** 인공함양, 클로깅, 브리징, MFI, 포화지수

**Chan-Ik Hwang, Myoung-Rak Choi, Il-Yeong Han, Jin-Woo Hong and Gyoo-Bum Kim, 2021, Analysis on the physical-chemical clogging possibility in the groundwater artificial recharge area. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 6, p. 841-853**

**ABSTRACT:** The study area, Galsan-myeon, Hongseong-gun, Chungcheongnam-do, is a drought-prone area located in the upstream region. An artificial recharge system for the unconsolidated and weathered layers is being built to solve the drought problem of water shortage. In this study, the possibility of physical and chemical clogging that occurs when injecting stream water, which is a source of artificial recharge, is evaluated. Because the turbidity of stream water is lower than ambient groundwater, the possibility of bridging between particles is low. But, it is necessary to install a non-perforated casing in the uppermost layer not to allow the inflow of fine particles. The clogging rate is calculated using field test data (injection rate, hydraulic conductivity, etc.) of 11 injection wells as well as MFI (Membrane filtration index) of water samples. It is 0.763 m/y under the present MFI condition of stream water, 250.5 sec/L<sup>2</sup>, but it will be 0.009 m/y if it is lowered to 3.0 sec/L<sup>2</sup> through pre-treatment. The average values of SAR (Sodium adsorption ratio) and SP (Sodium percentage) indicating clay dispersion are 0.68% and 25%, respectively, indicating that the possibility of clogging is very low. Saturation index indicates that hematite, goethite, and magnetite, which are mineral species of iron, are supersaturated with a value of greater than 0.5 and have the possibility of precipitation. Although there is a difference in the possibility of clogging depending on the evaluation factors, pre-treatment system for stream water is required to minimize such physical and chemical clogging.

**Key words:** artificial recharge, clogging, bridging, MFI, saturation index

\* Corresponding author: +82-42-280-4574, E-mail: [geowater@dju.kr](mailto:geowater@dju.kr)

(Chan-Ik Hwang, Industry-Academic Cooperation Foundation, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea; Myoung-Rak Choi, Department of Disaster Prevention, Graduate School of Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea; Il-Yeong Han, Technical Research Center, Biryong Corporation, Seongnam 13567, Republic of Korea; Jin-Woo Hong and Gyoo-Bum Kim, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea)

## 1. 서 언

MAR (Managed aquifer recharge)에 의한 인공 함양 기법은 가뭄 발생 지역에서의 중요한 용수 확보 수단으로 고려되며, 전세계적으로 그 활용이 증가될 것으로 예상하고 있다(Zhang *et al.*, 2020). 지난 수십년간 인공함양 기술에 대한 지속적인 연구가 이루어져 왔으며 이를 통하여 대수층내 물의 저장에 대한 다양한 기법들이 개발되어 왔다. 한편, 인공함양 과정에서 발생하는 클로킹에 대한 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다.

인공함양 지역에서의 클로킹은 함양 원수, 대수층 매질 및 기존 지하수 등의 상호 물리적, 화학적 및 생물학적인 기작에 의하여 발생하게 되는데, 공기의 유입, TSS (Total suspended solid)의 침전, 생물학적 성장, 지화학적 반응, 입자의 재배열 등의 과정을 통하여 이루어진다(Pyne, 2005; Maliva, 2020a; 표 1). 공기의 유입은 주입정 케이싱 내부로 빠른 유동 저항으로 공기가 붙잡히면서 공기 방울이 형성되고, 이는 산화-환원 포텐셜을 증가시키게 되어 미생물 활동 및 지화학적 반응을 유발하게 된다. 한편, 함양 원수의 주입시 유기물이나 부유성 무기 물질이 축적된다면 주입 구간 지층의 투수성을 떨어뜨리는 현상

을 발생시키게 된다(Bouwer, 2002; Youngs *et al.*, 2010). 미생물에 의한 클로킹은 지층내에 미생물의 성장과 생물막의 형성과 관련이 있는데, 함양원수내에 유기탄소, 질소 및 인 등이 높은 경우 생물학적 클로킹을 가속화시킨다고 알려져 있다(NWQMS, 2009). 생물학적 클로킹 현상은 계절별 수온 및 점성에 따라 변화하나 그 기작에 대해서는 다양한 의견이 존재한다(Schuh, 1990; Pyne, 2005). 산화-환원 환경의 변화는 다양한 화학적 반응은 주입정 주변에 광물의 침전을 야기시키고 대수층의 투수성을 떨어뜨리게 된다. 탄산칼슘, 석고, 인산염, 철, 망간 등의 침전이 가장 흔히 발생되고 있으며, 박테리아 축매 작용 등으로 생물학적 클로킹과 화학적 클로킹이 공존하게 된다. 주입정 주변에서의 입자의 재배열에 의한 투수성 저하는 주입과 배출의 반복적인 작용에 의하여 주로 발생되는데, 클로킹의 핵심 기작은 아니나 클로킹에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Pyne, 2005).

전세계적으로 인공함양이 활발해 짐에 따라, 인공함양시 클로킹의 발생 가능성과 범위에 대한 예측, 발생 원인에 대한 평가, 클로킹과 주입정 구조의 관계, 주입수의 전처리 방법 연구 등이 활발히 이루어지고 있다. 모로코 준건조 지역에서의 인공함양시 부유물질(suspended solid, SS)의 축적과 수리전도

**Table 1.** Summary of clogging types and processes (modified from Martin, 2013).

Clogging type	Clogging process
Chemical	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Precipitation of minerals e.g. iron oxides, calcium carbonate</li> <li>· Aquifer matrix dissolution</li> <li>· Ion exchange or adsorption</li> <li>· Oxygen reduction</li> <li>· Formation dissolution</li> </ul>
Physical	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Accumulation of organic and inorganic suspended solids</li> <li>· Velocity reduced by interstitial fines such as illite or smectite</li> <li>· Clay swelling or deflocculation</li> <li>· Invasion of drilling fluids</li> </ul>
Mechanical	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Entrained air/gas binding</li> <li>· Hydraulic loading causing formation failure</li> </ul>
Biological	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Algae growth and accumulation of biological flocs</li> <li>· Microbiological production of polysaccharides</li> <li>· Bacterial entrainment and growth</li> </ul>

도의 감소로부터 물리적 클로킹의 가능성을 평가한 바 있다(Zaidi *et al.*, 2020). 물 속의 영양분과 SS가 존재하는 경우에, 박테리아(*Pseudomonas aeruginosa*)와 SS의 결합으로 생물학적 클로킹이 발생함을 연구하여 인공함양 과정에서 유의해야 한다고 제시한 바 있다(Cui *et al.*, 2021). 인공함양 지역에서 주입수의 전처리로는 클로킹 발생을 감소시키고, 주입수의 법적 조건을 충족하며, 공공의 건강을 보호하기 위하여 필요한데, 이를 위해서는 경제적인 평가가 필요함을 제시한 바 있다(Maliva, 2020b).

국내에서 클로킹에 대한 연구는 주로 강변여과 및 양수정을 대상으로 수행된 바 있는데, 강변여과수 수직 관정에서의 에어서징과 서지블록을 활용하여 철 및 망간 산화물에 의한 클로킹 제거 효과를 평가한 바 있으며(Kim *et al.*, 2010, 2012), 장기 및 단계 양수시험 과정에서의 주변 관측정에서의 용존 철과 망간의 침전 산화는 양수량의 급변에 따른 공기 접촉 등에 의하여 촉진되는 것으로 평가된 바 있다(Kim *et al.*, 2013). 금정산 일대의 지하수 관정에서 나타난 클로킹에 대하여 입도분석, 광물분석, XRD 및 SEM 등을 통하여 관련 발생 물질을 규명한 바 있으며(Choo *et al.*, 2012), 강변여과 수평 집수정 주변의 세립질 지층의 분포와 철산화물의 형성이 클로킹을 야

기하여 취수량을 감소시키는 것으로 연구된 바 있다(Kim *et al.*, 2017).

본 연구는 국내 상류 소하천 유역에서 지하수 인공함양을 실시할 경우, 주입 원수와 대수층내 지하수의 이화학적 및 물리적 특성을 토대로 클로킹 가능성을 진단하고 주입 원수의 전처리 효과를 평가하는데 목적을 두었다.

## 2. 연구지역

연구지역은 충청남도 홍성군 갈산면 신곡마을로서 농번기인 4월부터 6월까지 상시적으로 용수가 부족한 지역이다(그림 1). 본 지역 내에는 지표수를 저장할 수 있는 저수지가 존재하지 않을 뿐 아니라 관정 개발의 성공률이 매우 낮아 수위 확보에 어려움이 있으며, 연구지역내 신곡천은 연장이 짧아 갈수기 평균 하천 유량이 2,831 m<sup>3</sup>/day에 불과하며 가끔시에는 이 보다 훨씬 작은 유량이 흐른다(Kim *et al.*, 2020). 연구지역의 북동쪽은 산악지형, 남서쪽은 저지대로 이루어진 분지 형태이며, 지질은 신생대 4기 충적층과 화강편마암으로 구성되어 있다. 하천 폭은 약 5.0 ~ 15.0 m이며, 토지 이용은 대부분 밭농사 및 논농사의 농경지로 이루어져 있다.

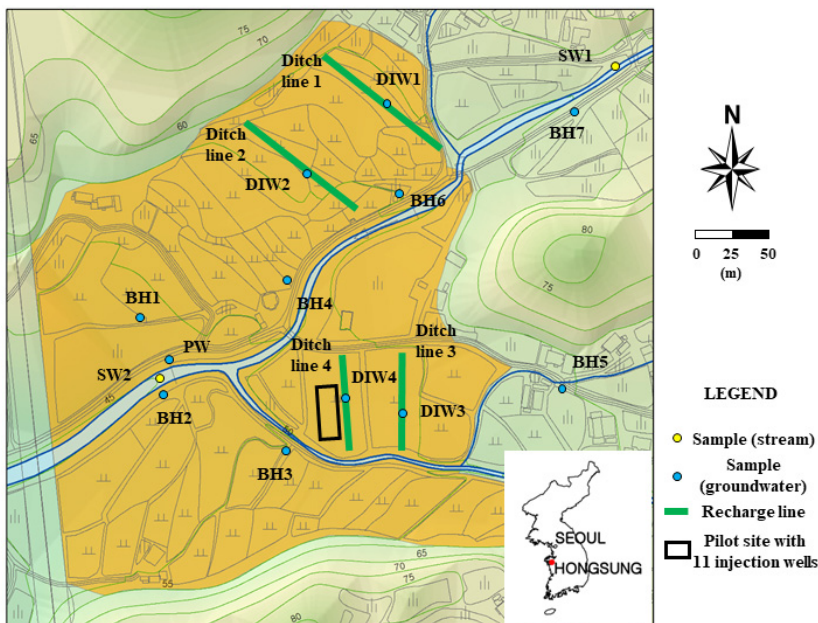


Fig. 1. Location of the study area, planned recharge lines and sampling sites.

기존의 전기비저항탐사 및 시추조사 자료에 의하면, 연구지역내 층적층의 두께는 5~15 m 정도이며, 하부에 풍화대가 5~10 m 두께로 발달하는 것으로 나타났다. 현장 투수시험에 의하면, 상부의 층적층에는 투수성이 낮은 지층이 포함되어 있으나, 풍화대를 포함하는 하부 구간은 투수성이 상대적으로 양호한 것으로 분석되었다(Lee *et al.*, 2019).

연구지역의 층적층 및 풍화대 구간을 대상으로 지하수 인공함양 실증 실험을 계획하였는데, 인공함양에 필요한 원수는 하천수, 암반지하수 및 재사용수 등을 고려하고 있으며, 상부에 비하여 하부 지층의 투수성이 양호한 점을 고려하여 주입 방법은 Pond 보다는 1.5 m 하부의 지중에 설치하는 함양정과 Ditch를 활용하는 것으로 결정한 바 있다(Lee *et al.*, 2019).

**3. 시료 채취 및 주입 시험**

클로깅과 관련된 특성을 평가하기 위하여, 지표수 및 지하수에 대한 이화학 분석, 물 시료에 대한 MFI (Membrane filtration index, 멤브레인 필터 지수) 분석, 분포 암석의 구성 광물을 파악하기 위한 토양에 대한 광물조성 분석, 토양의 입도 특성 분석 등을 실시하였다(그림 1).

물 시료는 인공함양 구간에 설치된 주입정(구경 50 mm, 심도 10 m) 4개 지점, 연구지역 전역에 설치된 관측정(구경 50 mm, 심도 10 m) 7개 지점, 함양수의 취수를 위하여 하류부에 설치된 양수정(구경 250 mm, 심도 30 m), 주입 원수로 고려되고 있는 함양 상류 하천수 2개 지점 등에서 채취하였다. 물 시료는 셀룰로스 질산염 막필터를 이용하여 0.45 µm 이하로 여과하여 불순물을 제거하고 현장 간이 수질 분석과

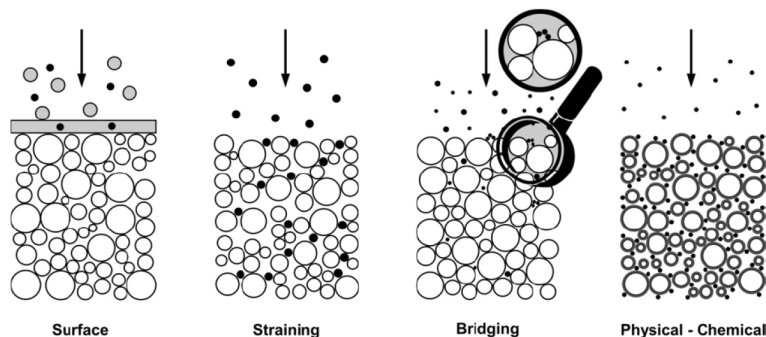
양이온과 음이온 등에 대한 실내 분석을 실시하였으며, 여과하지 않은 원수에 대하여 MFI 분석을 실시하였다. 현장간이수질 분석은 수온(T), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP)에 대하여 Hach HQ40d 휴대용 계측기를 이용하여 수행하였다. 또한, 주입정 4개 지점에 대해서는 시추시 채취된 토양 시료에 대하여 체 분석 및 침강 분석을 실시하였으며 콜로이드 성분 구성을 분석하였다. 지하수 시료는 지표하 약 3 m 지점, 토양 시료는 지표하 1.5 m 지점에서 채취하였다.

한편, 10 m 깊이의 11개 주입공(내부 50 mm 구경)을 설치한 pilot site에서 실제 주입 시험을 실시하였으며, 이로부터 주입량, 수위상승량, 수리상수, 영향범위 등에 대하여 평가하였다(그림 1). 공별 개별 주입시험은 2020년 9월 4일부터 5일까지 DI-1부터 DI-11까지 순차적으로 실시하여 공별 주입량과 수리전도도 등을 산정하였으며, 전공 동시 주입시험은 2020년 9월 18일부터 21일까지 모든 주입정에 대하여 동시에 주입하여 인접 공간의 간섭이 고려된 공별 주입량과 총 주입량을 구하였다. 두 경우 모두 지하수위가 일정하게 유지되는 시점의 정류상태 주입량을 파악하였다.

**4. 물리적·기계적 클로깅 인자 평가**

**4.1 탁도의 영향**

주입정의 스크린 및 그 부근에서 발생하는 물리적·기계적 클로깅은 미립자가 관정 주변에서의 유동 속도의 변화 등으로 인하여 입자 사이를 연결, 결합하는 브리징(Bridging)이나 끌어당김(Straining) 등에 의하여 발생하게 된다(그림 2).



**Fig. 2.** Filtration mechanisms of particles suspension injected in porous media (from McDowell-Boyer *et al.*, 1986).

**Table 2.** Analysis results for the physical clogging factors, turbidity and MFI.

Type	Site	Date	Time	Turbidity (NTU)	MFI (sec/L <sup>2</sup> )
Ambient ground_water	DIW1	21.05.01	15:28	525.2	-
	DIW2	21.05.01	17:59	10.3	860
	DIW3	21.04.30	15:40	323.1	-
	DIW4	21.05.01	11:00	286.5	-
	BH1	21.05.02	9:23	2.6	25
	BH2	21.05.02	10:14	5.5	62
	BH3	21.05.02	11:07	231.8	269
	BH4	21.05.02	15:40	56.1	1,519
	BH5	21.05.02	16:50	34.6	744
	BH6	21.05.02	15:02	56.6	257
	BH7	21.05.02	13:47	12.1	158
	PW	21.05.02	11:56	4.3	1019
	Average	-	-	129.1	545.9
Stream water	SW1	21.05.02	13:53	2.8	175
	SW2	21.05.02	9:45	3.1	326
	Average	-	-	2.9	250.5

함양 원수로 고려되는 하천수와 함양 대상 대수층내 지하수가 갖고 있는 미립자의 특성을 비교해보면, 대부분의 지하수 탁도가 하천수보다 높은 값을 보이며, 지하수의 탁도가 평균 129.1 NTU로서, 하천수는 평균 2.9 NTU로 나타났다(표 2). 지하수의 탁도가 상대적으로 높게 나타난 것은 시료 채취 과정에서 일부 측정공에서 침전물이 유입되었을 가능성도 배제할 수 없으나, 시료 채취 지점이 지표하 3 m로서 상부 지층의 실트~점토질의 영향을 받는 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2021). 4개 지점(DIW1 ~ DIW4)의 토양 시료에 대한 입도 분석 결과, 0.074 mm 이하의 세립분의 비율이 8.7~32%, 0.005 mm 이하의 점토 비율도 4.9~11.0% 정도를 보이는데, 이와 같이 일부 높은 세립분 비율이 탁도와 연관성이 있는 것으로 보인다.

한편, 하천 시료 채취 지점 상류에는 하상에 암반이 노출되는 등 탁도를 유발시킬 요인이 거의 없는 것이 특징이다. 이와 같이 함양 원수인 하천수의 탁도가 지하수 보다 낮다는 점은 하천수 주입시 대수층 및 우물 주변의 입자들 사이의 물리적 브리징이 추가적으로 발생될 가능성이 크지 않다는 점을 지지한다. 네덜란드와 영국의 경우 주입수의 탁도가 2 ~

5 NTU 이상인 경우에는 허용하지 않고 있으며, 5 이하인 경우는 물리적 클로킹이 희박한 것으로 알려져 있다(Holländer *et al.*, 2005). 이와 같은 점을 고려할 때, 함양원수로 하천수의 물리적 클로킹 가능성은 크지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2 MFI (Membrane filtration index) 및 클로킹 속도

MFI는 물리적인 클로킹의 가능성을 평가하는 지수로 많이 활용되고 있다. MFI는 0.45 μm 공극을 가진 멤브레인 필터의 클로킹을 실험실 규모에서 평가하는 방법이다(Dillon *et al.*, 2001). MFI 실험은 ASTM D4189-95에 의하여 수행되며, 500 ml의 물이 여과되는 동안 매 30초 마다 여과량을 기록하여 시간에 따른 여과량 변화와 비교하는 방식으로서 Cake층이 형성되어 선형 관계를 보일 때의 기울기를 의미한다. 지표수 및 지하수에 대한 MFI 실험 결과, 지표수는 평균 250.5 sec/L<sup>2</sup>로서 지하수 평균 545.9 sec/L<sup>2</sup> 보다 낮은 값을 보여 탁도의 경향과 유사하다. 이는 멤브레인 필터 통과시 지하수가 지표수 보다 많은 부착이 발생하여 클로킹의 가능성이 높음을 의미한다. 네덜란드의 경우, 세립질 모래에 주입할 경우

**Table 3.** Estimation of clogging rate at the injection wells.

Well	MFI <sub>ori</sub> <sup>1)</sup> (sec/L <sup>2</sup> )	MFI <sub>tre</sub> <sup>2)</sup> (sec/L <sup>2</sup> )	$u_{eq}$ (h)	$Q_{IN}$ (m <sup>3</sup> /h)	$r_B$ (m)	$L$ (m)	$v_b$ (m/h)	$k$ (m/d)	$v_{v(ori)}$ <sup>1)</sup> (m/y)	$v_{v(tre)}$ <sup>2)</sup> (m/y)
DI-1	250.5	3	753.9	0.078	0.025	10	0.050	1.13	0.328	0.004
DI-2	250.5	3	753.9	0.478	0.025	10	0.305	9.21	0.997	0.012
DI-3	250.5	3	753.9	0.054	0.025	10	0.034	0.17	1.539	0.018
DI-4	250.5	3	753.9	0.030	0.025	10	0.019	1.67	0.031	0.000
DI-5	250.5	3	753.9	0.163	0.025	10	0.103	1.15	1.397	0.017
DI-6	250.5	3	753.9	0.374	0.025	10	0.238	2.82	2.524	0.030
DI-7	250.5	3	753.9	0.002	0.025	10	0.001	0.07	0.004	0.000
DI-8	250.5	3	753.9	0.121	0.025	10	0.077	1.98	0.405	0.005
DI-9	250.5	3	753.9	0.010	0.025	10	0.006	0.82	0.007	0.000
DI-10	250.5	3	753.9	0.220	0.025	10	0.140	6.78	0.306	0.004
DI-11	250.5	3	753.9	0.396	0.025	10	0.252	7.66	0.852	0.010
Ave.	-	-	-	0.175	-	-	0.111	3.04	0.763	0.009

Remark: <sup>1)</sup>original stream water, <sup>2)</sup>pre-treated stream water

MFI가 최소 3~5 sec/L<sup>2</sup> 정도의 조건을 요구하고 있어 본 지역의 함양원수로 고려되는 하천수의 MFI가 여전히 높음을 알 수 있다(Olsthoorn, 1982).

한편, MFI를 사용하여 실제 함양 대수층내에서의 클로킹 속도를 평가할 수 있는데(Olsthoorn, 1982; Pyne, 1995; Buik and Snijders, 2006), MFI 지수와 우물 제원 및 수리지질학적 특성 인자 등을 활용하여 함양 우물에서의 클로킹 속도를 예측해 보았다. MFI에 의한 클로킹 속도는 아래 경험식에 의하여 추정할 수 있다(Buik and Willemsen, 2002).

$$v_v = 2 \times 10^{-6} MFI_{mea} u_{eq} \frac{v_b^2}{\left(\frac{k}{150}\right)^{1.2}}$$

$$v_b = \frac{Q_{IN}}{(2\pi r_B L)}$$

여기에서,  $v_v$ 는 클로킹 속도(m<sub>w</sub>/year),  $MFI_{mea}$ 는 표준 멤브레인 필터(0.45 μm)에 의하여 측정된 MFI 지수 값(sec/L<sup>2</sup>),  $u_{eq}$ 는 연간 총주입에 의한 부하 작용 시간(연간 침투된 양(m<sup>3</sup>)을 시간당 최대 유량(m<sup>3</sup>/h)으로 나눈 값, h),  $v_b$ 는 주입정을 통한 평균 침투 속도(m/h),  $k$ 는 수리전도도(m/day),  $Q_{IN}$ 은 인공 주입시 우물을 통한 평균 주입량(m<sup>3</sup>/h),  $r_B$ 는

주입정의 반경(m),  $L$ 은 스크린의 총길이(m)에 해당한다.

Pilot site에서 실시한 11개 주입정에 대한 실험 결과를 토대로 클로킹 속도를 평가해 보았다(표 3). Pilot site의 실험 결과를 토대로 주입정 설계를 수행하기 때문에 이들 지점의 클로킹 속도를 토대로 주입원수의 처리 방안을 고려하였다. 11개 주입정의 주입량은 현장에서 실시한 전공 동시 주입시험을 통하여 구해진 공별 주입량 값을 사용하였으며,  $v_b$ 는 주입정의 제원과 주입량으로부터 산정하였다. 공별 수리전도도는 각 공의 주입시험에 의한 수리전도도를 사용하였다. Pilot site내 11개 주입정의 주입량과 수리특성 조건은 실제 인공함양 라인상의 다양한 주입량과 수리특성을 대변할 수 있다고 보고, 클로킹 속도를 평가해 보았다. 인공함양정의 운영 조건은 갈수기 20일간 연간 총 925 m<sup>3</sup>을 주입하는 것으로 가정하였다.

평균 MFI 250.5 sec/L<sup>2</sup>인 하천수를 전처리 없이 주입할 경우, 클로킹 속도는 평균 0.763 m/year 정도인 것으로 평가되었으나, 전처리를 통하여 MFI 3.0 sec/L<sup>2</sup> 이하로 떨어뜨린 후 주입한다고 가정할 경우에는 평균 0.009 m/year로 매우 낮아짐을 알 수 있다. 수리전도도가 큰 지층은 작은 지층에 비하여 보다 많은 수량이 주입되게 되므로 클로킹 속도도 더 크게 된다. 클로킹 속도( $v_v$ )는 침투속도( $v_b$ )와

**Table 4.** Result of water quality analysis.

Well	T (°C)	pH	EC (µS/cm)	ORP (mV)	DO (mg/L)	Concentration (mg/L)												SAR	SP (%)
						Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>		
DIW1	13.8	6.03	212.8	202.2	5.57	17.3	4.33	20.0	6.03	9.97	6.8	19.8	4.46	0.13	68.65	0.016	0.159	0.87	32
DIW2	11.6	5.29	187.5	318.5	5.96	14.9	2.95	17.3	4.66	10.80	18.1	13.0	9.09	0.07	51.87	0.012	0.003	0.82	33
DIW3	11.3	6.03	345.0	358.2	6.70	24.6	6.48	35.6	8.82	6.10	33.3	33.8	28.70	0.12	74.75	0.308	0.125	0.96	29
DIW4	12.9	6.27	421.0	262.3	4.43	23.0	6.95	59.6	9.53	7.82	28.8	25.2	19.30	0.10	161.70	0.077	0.733	0.73	20
BH1	12.7	6.00	250.0	193.0	2.69	16.9	4.05	25.7	6.67	5.68	26.5	27.3	3.53	0.11	73.22	0.001	0.396	0.77	28
BH2	14.9	6.35	167.1	307.8	5.49	13.7	3.05	15.5	3.40	7.06	16.1	15.9	8.77	0.16	39.66	0.004	0.003	0.82	34
BH3	15.5	5.99	237.0	252.2	4.20	16.6	2.95	26.7	5.89	9.70	21.1	20.2	18.20	0.09	59.49	0.006	0.013	0.76	28
BH4	15.8	5.67	184.4	334.4	6.13	15.4	2.66	18.5	4.11	11.40	16.8	12.7	8.65	0.47	54.92	0.024	0.005	0.84	33
BH5	14.7	6.62	360.0	255.0	5.64	19.5	6.45	50.4	5.76	10.50	26.8	20.6	36.20	0.09	106.79	0.005	0.003	0.69	21
BH6	16.0	6.15	208.8	202.1	6.99	15.2	2.09	22.6	4.63	10.90	17.1	16.2	23.20	0.10	39.66	0.014	0.007	0.76	30
BH7	15.6	6.08	252.0	122.8	6.60	12.5	2.83	31.5	5.34	9.22	17.5	22.8	46.30	0.11	38.14	0.015	0.002	0.54	21
PW	16.2	7.14	332.0	-36.7	2.21	16.0	3.00	59.8	6.09	14.50	17.5	0.2	0.02	0.12	202.89	0.008	0.743	0.53	16
SW1	15.8	6.31	245.0	138.2	9.63	15.3	3.31	31.4	5.36	8.93	17.4	18.8	32.40	0.22	61.02	0.007	0.005	0.66	24
SW2	13.9	6.63	231.0	217.2	5.67	15.5	3.61	30.5	5.44	8.56	16.5	14.6	13.00	0.17	70.17	0.046	0.191	0.68	25

는 제곱, MFI와는 선형의 관계를 보이기 때문에 수리전도도가 큰 지층에서 보다 빠른 클로킹이 발생한다. 연구지역의 클로킹 속도를 떨어뜨리기 위해서는 함양원수인 하천수의 MFI를 전처리를 통하여 저감하고 주입량을 적절히 유지하는 것이 필요해 보인다.

## 5. 화학적 클로킹 인자 평가

### 5.1 물시료의 화학적 특성

현장 수질 분석 결과를 보면, 지하수 시료는 천부 지하수에서 나타나는 일반적 특성을 잘 보여주는데, 온도는 11.3~16.2°C로서 하천 인근 지점이 약간 높은 특성을 보이며, pH는 5.29~7.14, 산화환원전위는 하류의 양수정(PW)을 제외하고 122.8~358.2 mV로서 천부 지하수의 높은 산화환경을 보여주고 있다(표 4). 함양 원수로 고려하는 하천수의 경우는 지하수와 유사한 수질 특성을 보이고 있는데, 이는 연구지역이 3 km<sup>2</sup> 이내의 작은 유역으로서 중간유출 또는 기저유출에 의하여 하천수 흐름이 형성되는 특성에 기인한다.

철과 망간 이온의 농도는 일반적인 국내 하천변 충적층 지하수내의 농도보다 낮는데(Kim *et al.*, 2013), 철은 평균 0.04 mg/L로서 먹는물 수질기준(0.3 mg/L)보다 낮으며, 망간은 평균 0.17 mg/L로서 수돗물 수질기준(0.05 mg/L)보다 높은 편으로서, 극히 일부 지점에서 예외적으로 다소 높은 특성을 보인다. 그

러나, 화학적 클로킹 가능성에 대한 철 농도의 권장 기준인 0.01 mg/L 보다 큰 값을 보여 클로킹 가능성이 존재한다(Olsthoom, 1982).

### 5.2 점토질 분산에 의한 클로킹

SAR(Sodium adsorption ratio)는 점토질 물질에 대한 응집 또는 분산 상태를 평가하는 지수로 사용된다. 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). SAR는 물 속의 현탁액내 점토질 콜로이드 성분의 안정성을 결정하는 인자로 사용된다.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

여기에서, 각 농도는 meq/liter 단위를 사용한다. 주입 대수층내 점토의 팽창과 분산이 야기된다면 클로킹이 발생하게 되어 주입량 감소 등을 야기하게 된다. 일반적으로 원 대수층내 지하수의 SAR가 3 이하인 경우 클로킹 가능성이 없으며, 3~5인 경우 일부 클로킹이 발생하고, 5 이상인 경우 클로킹의 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Krone, 1970; Huisman



**Table 5.** Result of saturation index for water samples.

Site	Adularia	Albite	Annite	Anorthite	Birnessite	Bixbyite	Chalcedony	Chlorite 14A	Chlorite 7A	Cristobalite	Diaspore	Goethite	Hausmannite
DIW1	-0.91	-2.76	-4.30	-6.22	-17.6	-20.3	0.24	-21.9	-25.4	0.29	2.30	2.98	-26.0
DIW2	-2.58	-4.41	-9.31	-9.73	-19.4	-23.7	0.27	-28.9	-32.4	0.34	0.96	1.24	-30.6
DIW3	0.75	-1.26	0.53	-2.87	-15.1	-16.6	0.18	-15.0	-18.5	0.24	3.45	4.48	-20.9
DIW4	-0.73	-2.68	-2.89	-5.64	-16.4	-18.2	0.15	-20.6	-24.1	0.20	2.49	3.44	-22.9
BH1	-2.88	-4.64	-8.22	-9.10	-17.1	-19.4	0.02	-25.4	-28.9	0.08	1.15	2.23	-24.5
BH2	-1.68	-3.49	-5.44	-6.94	-17.7	-20.8	0.08	-21.6	-25.1	0.13	1.88	-3.33	-26.9
BH3	-1.73	-3.40	-7.07	-7.17	-18.4	-21.7	0.21	-22.3	-25.8	0.26	1.70	2.37	-28.0
BH4	-2.64	-4.33	-8.20	-9.40	-20.2	-24.5	0.28	-28.6	-32.1	0.34	1.02	0.97	-31.8
BH5	0.21	-1.70	0.06	-3.91	-15.5	-17.5	0.27	-13.9	-17.4	0.32	2.45	4.82	-22.4
BH6	-2.01	-3.60	-6.79	-7.74	-18.8	-22.3	0.26	-23.3	-26.8	0.31	1.41	2.55	-29.0
BH7	-2.15	-4.02	-8.35	-7.92	-19.1	-23.2	0.18	-23.7	-27.1	0.24	1.33	2.06	-30.2
PW	-1.14	-2.96	-2.99	-6.13	-15.8	-17.6	0.28	-17.6	-21.0	0.33	1.45	3.95	-22.3
SW1	-1.35	-3.14	-4.80	-6.33	-11.5	-10.4	0.16	-8.86	-12.3	0.22	1.84	6.05	-12.3
SW2	-1.23	-3.08	-0.51	-5.41	-17.5	-20.4	-0.07	-19.6	-23.1	-0.01	2.30	3.27	-26.4

and Olsthoorn, 1983). 또 다른 연구에서는, EC와 SAR의 조건에 따라 물의 주입시 점토질 물질에 의한 클로킹 문제 발생을 평가하기도 하였는데, 분산된 점토 현탁액에 염분이 추가되면 현탁액의 EC가 증가하여 점토입자가 응집하게 된다(Ayers and Westcot, 1985). 연구지역의 모든 물 시료의 SAR는 1 미만으로서 점토질 분산에 의한 클로킹 가능성은 낮으며, 배경 지하수보다 주입원수인 하천수 SW1의 SAR가 낮아 주입 원수로 사용하기에 적절한 것으로 보인다(표 4). 또한, SW1의 SAR는 0.66이며 EC는 245  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 상기 두 기준에 의한 클로킹 가능성도 거의 없음 또는 어느 정도 발생 가능한 영역에 해당한다.

SAR와 병행하여 점토질의 클로킹을 평가하는 인자로서 SP(Sodium percentage)를 사용하기도 한다.

$$SP = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$$

SP가 50% 이하인 경우는 클로킹의 문제가 발생하지 않으나 65%를 넘는 경우 클로킹 가능성이 큰 것으로 평가되는데(Krone, 1970), 연구지역의 지하수는 최대 34% 정도로서 점토 분산에 의한 클로킹 가능성은 낮은 것으로 나타났다(표 4).

### 5.3 광물 포화지수

주입정에서 발생하는 화학적 클로킹의 대표적인

기작은 용존 이온의 반응에 의한 침전현상과 산화환원전위에 따른 수산화물로의 침전 현상에 의하여 주로 발생한다. 물 시료에 대한 물리화학적 분석 결과를 이용하여 광물들의 포화지수를 PHREEQC (ver. 3.3.8)를 활용하여 계산하였다(표 5). 포화지수(Saturation index, SI)는 수질에서 이온 활성도와 평형상수의 비교를 통하여 구해진다(Garrels and Mackenzie, 1967).

$$SI = \log_{10} \left( \frac{IAP}{K} \right)$$

여기에서, SI는 포화지수, IAP는 이온활성도, K는 평형상수를 의미한다. 만약에 SI=0이면 이 광물은 용액과 평형상태에 존재하고 있으며, IAP가 K보다 크면(SI>0) 과포화되어 있으며 해당 광물은 침전을 하게 된다. 한편, 지하수에 있어서 평형상태에 대한 실질적인 범위는  $-0.5 \leq SI \leq 0.5$ 로 알려져 있다.

포화지수 산정 결과를 보면, 대부분의 성분은 물 시료에서 음의 값을 보이고 있어 불포화 상태임을 알 수 있으나, 대표적으로 클로킹을 발생시킬 수 있는 철의 광물종인 적철석(Hematite), 침철석(Geothite), 자철석(Magnetite) 등은 0.5 보다 과포화 상태로서 침전이 가능한 것을 알 수 있으며, 이들 성분에 의한 클로킹 가능성이 존재한다. 망간의 광물종인 Birnessite, Bixbyite, Hausmannite, 수망간석(Manganite), 연망간석(Pyrolusite) 등은 거의 대부분 -0.5보다 작아

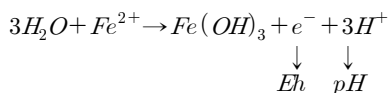


Table 5. continued.

Site	Hematite	Illite	K-mica	Maghemite	Magnetite	Manganite	Nsutite	Phlogopite	Pyrolusite	Quartz	Silicagel
DIW1	7.91	0.82	6.87	-1.63	5.26	-9.37	-16.6	-18.2	-17.2	0.70	-0.31
DIW2	4.09	-2.60	2.54	-3.68	0.93	-10.8	-18.4	-22.2	-19.4	0.75	-0.27
DIW3	10.9	3.93	10.9	1.52	9.31	-7.37	-14.1	-13.5	-15.0	0.65	-0.37
DIW4	8.83	-0.05	5.93	-0.64	6.59	-8.25	-15.4	-17.2	-16.2	0.61	-0.40
BH1	6.42	-2.70	2.63	-3.00	3.11	-8.76	-16.0	-20.3	-16.9	0.49	-0.53
BH2	8.15	-0.56	5.27	-1.44	5.38	-9.66	-16.6	-18.0	-17.2	0.54	-0.47
BH3	6.70	-0.72	4.85	-2.95	3.41	-10.2	-17.3	-18.6	-17.7	0.67	-0.34
BH4	2.92	-2.55	2.58	-1.92	1.24	-11.6	-19.2	-22.6	-19.6	0.74	-0.26
BH5	11.6	2.16	8.28	2.01	10.0	-8.01	-14.5	-12.6	-15.0	0.73	-0.28
BH6	7.05	-1.34	3.98	-2.63	3.96	-10.5	-17.7	-19.3	-18.1	0.72	-0.29
BH7	6.08	-1.67	3.69	-3.55	2.50	-10.9	-18.1	-19.3	-18.5	0.64	-0.37
PW	9.87	-0.37	4.95	0.22	7.64	-8.11	-14.8	-14.6	-15.2	0.73	-0.27
SW1	14.1	1.70	5.52	4.40	13.2	-4.56	-10.5	-16.8	-10.8	0.62	-0.38
SW2	8.51	-0.18	6.57	-1.17	5.85	-9.57	-16.5	-14.8	-16.8	0.40	-0.61

망간 산화물의 침전 가능성은 매우 낮다. 포화지수를 근거로 기타 클로킹을 야기할 수 있는 성분으로서 수산염 광물종인 Diaspore도 있다. 한편, 주입수로 사용될 하천수 SW1의 적철석(Hematite), 침철석(Geothite), 자철석(Magnetite)의 포화지수는 주변 지하수보다 높은 값을 보여, 일부 주입 지점에서는 침전의 가능성이 존재한다.

클로킹을 발생시키는 대표적인 산화물은 철과 망간으로서, 연구지역의 경우 망간 보다는 철 산화물의 침전 가능성이 존재하며, 철은 부유성 입자의 표면에 흡착되는 경향이 있는 것으로 알려져 있다(Srisuk *et al.*, 2013). 철의 에너지 변화에 대한 정량적인 척도는 산화-환원전위에 의하여 구하는데, 자연상태의  $Fe^{2+}$ 는 용존상태로 존재하며  $Fe^{3+}$ 는 불용성으로 쉽게 침전되어 철산화물 형태로 존재한다. 물 속의  $Fe^{2+}$ 는 전자를 하나 내놓으면서  $Fe^{3+}$ 가 되어 수산화이온과 결합, 침전하여 수산화물을 만든다. 아래 식에서 보는 바와 같이 Eh 변화와 pH 변화가 철의 화학 반응에 중요한 변수로 작용하며, Eh와 pH 변화에 따른 철의 용존 및 침전의 상변화가 발생하게 된다.



위 식에서 보듯이, 지하수내 pH의 변화, 철과 망

간 이온의 농도, 용존산소의 농도 등이 산화물 형성에 영향을 미치는데, 연구지역내 물 시료에 대하여 철에 대한 pH-Eh diagram을 작도해 보았다(그림 3). 대부분의 시료가 철산화물의 형성 경계부에 위치하고 있으며, 특히, 주입원수로 고려되는 SW1 지점의 지표수는 현재 용존상태를 유지하는 것으로 나타났다. SI 분석 결과 산화물 침전이 가능한 것으로 평가되었다. 따라서, 산화작용의 속도에 영향을 미칠 수 있는 pH 조절, 알칼리도 유지, 산소 농도, 온도 조절 등을 통하여 산화물 침전에 의한 클로킹을 조절할 필요가 있다.

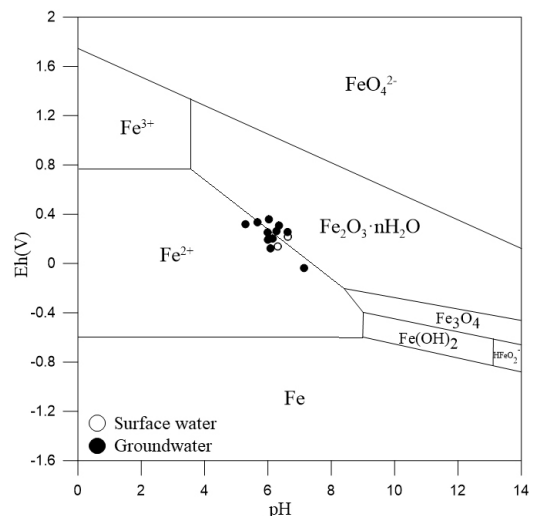


Fig. 3. Iron pH-Eh diagram for water samples.

6. 하천수 전처리 효과 검토

하천수의 전처리를 통하여 물리적 클로킹을 유발하는 탁도가 어느 정도 저감될 수 있는지 실내 모형 실험을 실시하였다. 탁도에 영향을 미치는 인자로는 무기, 유기 부유물, 미생물 및 점토질 등이 존재하는데, 본 연구에서는 부유물질인 SS(Suspended solid)의 저감 능력을 평가하였다. 실내 모형 실험은 자갈접촉산화수로와 식생수로 모형을 제작하여 실시하였다(그림 4).

자갈접촉산화수로는 입경 0.75 cm의 자갈을 채운 70 cm 길이의 모형을 사용하여 유량 2.08 mg/L, 유입수의 SS는 100 mg/L로 설정하였으며, SS meter

(KRK)로 측정된 유출부의 SS의 농도는 223 mg/L로서 10.8%의 저감능을 보였다. 한편, 식생수로는 모형의 총용량 1.75 m<sup>3</sup>에 0.7 cm의 모래를 50 cm 두께로 채운 뒤 갈대(Reed, Phragmites communis)와 아다지오(Miscanthus-Adagio)를 식재하여 구성하였으며, SS의 농도 20 mg/L의 유입수를 사용하였다. 실험 결과, SS의 농도는 약 1주일 이후에 거의 완벽히 제거되는 것으로 나타났다(표 6). 이와 병행하여, 하천수의 수질 오염 저감능을 보고자 BOD, TP, TN에 대하여 분석한 결과 약 1주일 경과 후 현저히 감소하는 것으로 나타났다. BOD는 수질오염공정시험기준, TP와 TN은 Spectrophotometric analysis (Hach DR300)에 의하여 분석하였다.

Table 6. Result of pollutant removal test by a physical model experiment.

Date	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	pH	Temp (°C)
2020/09/04	20	14.2	11	0.49	6.81	24.5
2020/09/05	20	19.3	18	0.53	6.86	23.4
2020/09/06	20	23.2	24	0.6	6.91	22.5
2020/09/07	10	24.2	26	0.61	6.94	22.4
2020/09/08	10	21.1	22	0.53	7.06	22.3
2020/09/09	10	19.2	2	0.42	7.12	22.9
2020/09/10	10	15.5	2.8	0.46	7.12	22.4
2020/09/11	0	4.1	0.2	0.45	7.16	21.5
2020/09/12	0	4.2	1.2	0.48	7.18	21.6
2020/09/13	0	5	1.9	0.52	7.2	21.4
2020/09/14	0	6.1	2.6	0.57	7.21	21.2



Fig. 4. Pre-treatment system of stream water.

하천수에 대하여 자갈접촉산화수로 및 식생수로 를 활용하여 전처리할 경우, 물리적 클로킹의 요인 인 탁도와 관련한 요소를 최대한 억제할 수 있는 것으로 나타났으며, 실제 현장에서 하천수의 전처리 시설을 구축하고 실증 실험을 통하여 주입원수로의 활용성을 검증한다면, 보다 클로킹으로부터 안전한 주입원수를 확보할 수 있을 것이다.

## 7. 토 의

주입원수인 하천수의 탁도는 주변 지하수보다 낮아 인공함양시 클로킹을 우려할 수준은 아닌 것으로 평가되나, MFI에 의한 클로킹 속도를 보면 하천수의 전처리가 필요한 것으로 평가되었다. 실제 인공함양정 주변 지층의 수리전도도 다양성을 파악하고 주입수에 대한 MFI 등을 정확하게 산정하는 것은 어려움이 존재하므로 보다 안전한 수준의 원수 확보가 요구된다. MFI를 활용한 클로킹 속도에 의한 평가는 유의하여 사용되어야 하는데, 네덜란드에서 500개 지열주입공에 대한 클로킹 속도를 측정한 바 있으며 신뢰성 높은 데이터를 검토한 결과, 20% 주입정에서만 클로킹 현상이 나타났고, 이는 계산에서 추정된 클로킹 발생보다 현저히 낮은 결과를 보인 바 있다(Buik and Willemsen, 2002). 반대로, 낮은 MFI에도 불구하고 높은 클로킹 사례를 보이는 경우도 다수 존재하는 것으로 알려져 있다(Schippers *et al.*, 1995). 본 연구에서 제시된 클로킹 속도는 클로킹 발생시 속도를 보여주는 것으로서 발생 시점과 여부에 대한 판단으로는 부족한 것으로 알려져 있어 다양한 클로킹 인자에 대한 종합적인 검토를 통하여 발생 가능성을 평가하여야 한다.

한편, 본 연구현장에서 미립분에 의한 물리적 클로킹을 최소화 하기 위해서는, 주입수의 전처리 뿐 아니라, 주입정 상단부의 세립분을 보유한 지층으로부터의 세립분 유입을 방지할 수 있도록 주입정의 구조를 설계, 시공하는 것이 필요하다. 주입정의 상부 구간에 대해서는 무공관에 의한 케이싱을 설치하고 일정 깊이 이하에 스크린을 설치하는 방안이 검토되어야 한다.

클로킹의 발생 인자는 주입수의 탁도 등 물리화학적 성분 뿐 아니라 주입시 발생하는 압력과 관련된 주입량 및 속도 등과도 밀접한 관련이 있다. 압력

의 변화는 주입수에 포함된 입자의 침전을 가져올 수 있으며, 박테리아의 성장에 필요한 시간을 제공하기도 한다. 따라서, 주입량 및 속도의 조절도 클로킹의 방지에 중요한 역할을 하게 된다. 현장에 주입정이 설치되면, 다양한 형태의 실험(주입량, 주입속도 등)을 통하여 최적 주입 시나리오를 도출할 필요가 있다.

철의 산화는 pH의 영향을 많이 받는데, 일반적으로 pH가 1 정도 증가할 때 철의 산화 속도는 100배 정도 빠르며, 알카리도, 물의 온도, 유기물 함량 및 일부 이온 등이 철의 산화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 낮은 알카리도에서는 산화작용이 느리게 진행되어 철의 산화 및 제거가 용이하지 않는데, 알카리도는 철의 산화작용 시 pH 과다 감소 및 Floc 형성을 억제하는 역할을 한다(Hult, 1973). pH와 산소 농도가 일정하다면 온도가 15도 증가할 때 산화작용의 속도는 10배 정도 증가하는 것으로 알려져 있다(Stumm and Lee, 1961). 한편, 이온 성분 중에서는  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  및  $H_2PO_4^-$  등은 산화작용에 촉매 역할을 하고  $SO_4^{2-}$  및  $Cl^-$ 는 억제하는 역할을 하는 것으로 밝혀진 바 있다(Sung and Morgan, 1980). 이와 같이 주입수의 조건으로서 철과 망간의 농도가 낮은 것이 요구되며, 하천수내에 포함된 철과 망간 이온은 전처리 과정(산화, pH 및 온도 조건 등을 고려)을 통하여 농도를 낮추는 방안이 고려될 필요가 있다.

이상과 같이, 클로킹에 대한 평가는 평가 인자에 따라 다양한 예측 결과를 제공하고 있다. 클로킹을 정확히 진단하기 위해서는 주입 전후의 주입량과 수위 상승량에 어떤 변화가 발생하는지 평가하는 것으로서, 실제 현장 실험을 통하여 보다 수행되어야 한다. 본 연구지역에서는 추후 현장 실험을 통하여 연속 주입 이전의 초기 주입속도와 일정 기간 운영 이후의 초기 주입속도의 변화에 대한 평가를 통하여 클로킹에 대한 재평가를 실시할 예정이다.

## 8. 결 언

클로킹은 주입수의 부유입자, 물 속의 기체상, 우물 주변의 박테리아의 증식, 주입수와 우물 사이의 화학적 침전물, 토양내의 화학적 침전물, 점토의 팽창과 분산, 기타 등 다양한 원인에 의하여 발생한다.

본 연구에서는 대표적으로 미립분에 의한 물리적 클로킹, 점토 분산과 용존 이온의 산화과정 등에 의한 화학적 클로킹을 검토하였다. 하천수를 주입수로 사용할 경우 일부 인자(MFI 및 포화지수)는 클로킹을 지시하나 일부(탁도, SAR 및 SP)는 클로킹 발생이 낮을 것이라 정보를 동시에 제공해 주고 있다. 본 연구지역의 수질 및 토양 특성을 종합해 보면, 주입원수인 하천수내의 미립분을 제거하여 MFI를 낮추고, 철 산화물의 대수층내 침전을 최소화할 수 있도록 용존 철의 함량을 저감시킬 수 있는 전처리 시스템을 갖출 필요가 있다.

지하수 인공함양 시스템에서 클로킹의 발생은 시설의 수명을 단축시키고 유지관리 비용을 증가시키는 주 요인으로 작용하고 있어 실제 사업화에 장애요소가 되고 있다. 본 연구를 기반으로 클로킹 발생 가능성과 저감 기법 등에 대한 다양한 기술을 개발함으로써 지하수 인공함양 시스템이 물 부족 지역의 물 문제 해결에 기여하길 기대해 본다.

## 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

- Ayers, R.S. and Westcot, D.W., 1985, Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper, 29, ISBN 92-5-102263-1.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10, 121-142.
- Buik, N. and Snijders, A.L., 2006, Clogging rate of recharge wells in porous media. *Proceedings Megastock*, Pomona, NJ, USA.
- Buik, N.A. and Willemsen, G., 2002, Clogging rates in recharge wells in porous media. *Proceedings* (Ed. P.J. Dillon), 4th International Symposium on Artificial Recharge, Adelaide, Australia, 195-198.
- Choo, C.O., Hamm, S.Y., Lee, J.H., Lee, C.M., Choo, Y.W., Han, S.J., Kim, M.J. and Cho, H.N., 2012, Characterization and formation mechanisms of clogging materials in groundwater wells, Mt. Geumjeong Area, Busan, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 67-81 (in Korean with English abstract).
- Cui, R., Ye, X. and Du, X., 2021, Coupled effects of bacteria and suspended solids on clogging during managed aquifer recharge. *Journal of Hydrology*, 600, 126543, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126543>.
- 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.
- Garrels, R. and Mackenzie, F., 1967, Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. In: *Groundwater* (ed) Equilibrium concepts in natural water systems. American Chemical Society Publications, Chapter 10, 222-242.
- Holländer, H.M., Hinz, I., Boochs, P.W. and Billib, M., 2005, Experiments to determine clogging and redevelopment effects of ASR-wells at laboratory scale. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Managed Aquifer Recharge ISMAR 5*, Berlin, Germany, June 10-16, 611-616.
- Huisman, L. and Olsthoorn, T.N., 1983, *Artificial groundwater recharge*. Pitman, London.
- Hult, A., 1973, Filtration of iron during and after oxidation. *Effluent Water Treatment Journal*, 209-215.
- Kim, B.W., Kim, G.B. and Kim, G.Y., 2012, Change of hydraulic characteristics due to well drilling and well development in an unconsolidated aquifer. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 27-37 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Hwang, C.I. and Choi, M.R., 2021, Assessment of the need and potential for groundwater artificial recharge based on the water supply, water demand, and aquifer properties in a water shortage region of South Korea. *Environmental Earth Sciences*, 80, 115, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09445-5>.
- Kim, G.B., Kim, B.W. and Kim, S.Y., 2010, Improvement of well efficiency through well development in a pumping well. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15, 39-49 (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, G.B., Shin, S.H., Kim, B.W. and Park, J.H., 2013, Geochemical characteristics of groundwater during the constant and step-drawdown pumping tests at the river bank filtration site. *Journal of the Korean GEO-environmental*

- Society, 14, 11-21 (in Korean with English abstract).
- Krone, R.B., 1970, Borehole recharge: the compatibility of recharge water with the aquifer. In: Proceedings in the International Conference of Groundwater Recharge, AREA, London, England.
- 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).
- Martin, R., 2013, Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia. p. 212.
- Maliva, R.G., 2020a, Clogging. In: *Anthropogenic aquifer recharge*. Springer Hydrogeology, Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0_11).
- Maliva, R.G., 2020b, MAR pretreatment. In: *Anthropogenic aquifer recharge*. Springer Hydrogeology, Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0_12).
- 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>.
- NWQMS, 2009, Australian guidelines for water recycling: Managing health and environmental risks: Managed aquifer recharge. National Water Quality Management Strategy (NWQMS), No. 24.
- Olsthoorn, T.N., 1982, The clogging of recharge wells. Main Subjects, Kiwa communication No. 72, Rijswijk, 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).
- Pyne, R.D.G., 1995, Groundwater recharge and wells: A guide to aquifer storage recovery. Lewis publishers, CRC Press, USA.
- Pyne, R.D.G., 2005, Aquifer storage and recovery: A guide to groundwater recharge through wells. ASR Press, Florida, USA.
- Schippers, J.C., Verdouw, J. and Zweere, G.J., 1995, Predicting the clogging rate of artificial recharge wells. *Water SRT-Aqua*, 44, 18-28.
- Schuh, M., 1990, Seasonal variation of clogging of an artificial recharge basin in a Northern climate. *Journal of Hydrology*, 121, 193-215.
- Srisuk, K., Grischek, D.T., Pavelic, P., Archwichei, L., Pholkern, K., Wiegand, T., Schafer, S., Soares, M.B. and Bartak, R., 2013, Pilot and demonstration activity for Thailand: Assessment of riverbed clogging at potential riverbank filtration for securing safe. Low-Cost Potable Supplies, RETA 6498: Knowledge and Innovation Support for ADB's Water Financing Program, The Asian Development Bank, 58 p.
- Stumm, W. and Lee, G.F., 1961, Oxygenation of ferrous iron. *Industrial Engineering and Chemistry*, 53, 143-146.
- Sung, W. and Morgan, J.J., 1980, Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous systems. *Environmental Science and Technology*, 14, 561-568.
- Youngs, J., Willis-Jones, B., Greenhalgh, D., Mcphee, A. and Brown, D., 2010, Cloudbreak: The critical role of MAR in a major Pilbara mine water management scheme. Proceedings of the 7th Annual International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR), Abu Dhabi, 9-13.
- Zaidi, M., Ahfir, N-D., Alem, A., El Mansouri, B., Wang, H., Taibi, S., Duchemin, B. and Merzouk, A., 2020, Assessment of clogging of managed aquifer recharge in a semi-arid region. *Science of The Total Environment*, 730, 139107, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139107>.
- 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 : October 17, 2021

Revised : November 24, 2021

Accepted : November 29, 2021