

양수처리 및 지중 정화(과황산염) 공법을 복합 적용한 지하수 정화 사례 연구

강동준¹ · 김정우¹ · 장현우¹ · 서지호¹ · 차용훈¹ · 신선호¹ · 권형표^{1,2*}

¹(주)지오그린21

²강원대학교 지질학과

A Case Study on Groundwater Remediation Using Combined Pumping and In-Situ Chemical Oxidation (Persulfate) Methods

Dong Jun Kang¹ · Jeongwoo Kim¹ · Hyeon Woo Jang¹ · Ji Ho Seo¹ · Yong Hoon Cha¹

Seon Ho Shin¹ · Hyung Pyo Kwon^{1,2*}

¹GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea

²Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

ABSTRACT

This work presents a case study of applying a combined remediation strategy using Pump-and-Treat (P&T) and In-Situ Chemical Oxidation (ISCO) to remediate phenol-contaminated groundwater. In 2020 and 2021, emergency containment actions were implemented with maximum pumping rates to reduce phenol concentration, which were measured at 356, 535, and 258 mg/L at W1R, EW1R, and EW3R, respectively. From 2022, planned pumping operations combined with persulfate (PS) injection were initiated to manage the rebound effect. As a result, all observation points maintained phenol concentrations below 1 mg/L from 2023 onward. By 2024, phenol concentrations at all sites reached non-detectable levels (<0.005 mg/L). The study confirms that optimizing pumping rates and capture zones was effective in achieving complete contaminant removal. Furthermore, it highlights the importance of swift initial responses in maximizing remediation efficiency with less costs, offering valuable insights to development of effective remediation strategies in similar contamination cases.

Key words : Groundwater remediation, Pump and treat, In-situ chemical oxidation, Persulfate

1. 서 론

산업화에 따른 급속한 발전과 더불어 다양한 유해 화학 물질들이 환경으로 배출되면서 지하수 오염 문제가 심각하게 대두되고 있다(Pradhan et al., 2023; Ravindran et al., 2023). 특히, 페놀은 화학산업 및 석유화학 공정에서 흔히 사용되는 물질로, 독성이 강하고 환경에 장기적으로 악영향을 미칠 수 있어 주요한 지하수 오염 물질로 인식되고

있다(Ramos et al., 2024; Panigrahy et al., 2022; Babich and Davis, 1981). 페놀 오염 지하수는 인체에 유해하며, 지속적인 노출 시 심각한 건강 문제를 유발할 수 있어 이에 대한 효과적인 정화 방안이 요구된다(Yand et al., 2020; Patel et al., 2024).

양수처리 공법은 오염된 지하수를 지상으로 추출하여 오염 물질을 직접 제거하는 방법으로, 오염 농도를 신속하게 저감시킬 수 있는 장점이 있다(Carroll et al., 2024; Wang et al., 2022; Mackay and Cherry, 1989; US EPA, 2021). 또한, 산화제 현장 주입은 오염 물질을 화학적으로 분해하여 지하수 내 페놀 농도를 감소시키는 효과가 있으며, 양수처리 공법과 병행할 경우 두 공법의 장점을 극대화할 수 있다(Wang et al., 2022; Thornton et al., 2014; Boal et al., 2015; Baciocchi et al., 2014; US EPA, 1998). 이러한 유기 오염물질을 제거하는 데 고도산화처리(Advanced

주저자: 강동준, 대리

공저자: 김정우, 부사장; 장현우, 대리; 서지호, 팀장;

차용훈, 본부장; 신선호, 팀장

*교신저자: 권형표, 실장

E-mail: asp07@geogreen21.com

Received : 2024. 10. 23 Reviewed : 2024. 11. 13

Accepted : 2024. 11. 27 Discussion until : 2025. 02. 28

oxidation process, AOP)는 매우 효과적인 기술로 알려져 있으며, 특히 과황산염(Persulfate, PS)과 Fe^{2+} 를 활성제로 사용하는 AOP 방법은 많은 관심을 받고 있다(Furman et al., 2010; Ji et al., 2014; Tsitonaki et al., 2010). 과황산염은 높은 산화 잠재력을 가지며, 활성 산소종을 생성하여 다양한 유기 오염물질을 효과적으로 분해할 수 있다. Fe^{2+} 는 과황산염의 분해를 촉진하여 반응성을 높이며, 이러한 조합은 지하수에서의 페놀 제거에 대한 효과를 극대화할 수 있다(Li et al., 2023; Ma et al., 2017; Ahmad et al., 2013; Jo et al., 2020). 본 연구에서는 이러한 복합 운영 정화 공법을 2년간 적용하여 페놀 농도 저감 효과를 평가하였다.

본 연구는 페놀로 오염된 지하수의 정화를 위해 복합 정화 공법을 적용한 연구 사례를 통해 해당 공법의 적정성을 검증하고, 효율적인 운영 결과를 제시하고자 한다. 지하수 오염 조사와 수리지질학적 특성 분석을 통해 오염 범위와 지하수 흐름 특성을 명확히 파악한 후, 현장 및 실내 실험 결과를 바탕으로 양수처리 공법(pump & treat)과 화학적 산화법(In-situ chemical oxidation, ISCO)을 결합한 최적의 정화 공법을 최종 선정하였다. 양수처리 공법은 오염된 지하수를 양수하여 처리하는 방식으로, 부지 전체 정화에 적합하며, 화학적 산화법은 지하수 내의 오염물질을 산화제로 분해하여 제거하는 방법으로 오염된 지역에 적합하다. 2년간의 운영 결과, 복합 정화 공법은 페놀 농도를 효과적으로 감소시키는 것으로 나타났으며, 향후 유사 사례에 대한 정화 공법 설계 및 적용에 유용한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1. 현장 개요

연구 부지는 산업단지 내 위치하고 있으며, 주변으로 공장들이 밀집해 있다. 조사지역 주변의 지형은 대체로 북동에서 남서방향으로 완만한 경사를 이루고 있고 주변으로 산지 또는 구릉지가 존재하며, 고도가 낮은 평지가 발달한 지역에 자리 잡고 있다. 지질은 중생대 쥐라기 화강암과 신생대 제4기 충적층이 분포하고 있다. 화강암은 조사지역 및 그 주변으로 넓게 분포하고 있으며, 충적층은 조사 지역 주변으로 낮은 저지대 또는 하천 주변 지역을 따라 분포한다(Fig. 1).

지하수 오염은 부지 내 공업용수로 이용하였던 암반 관정(PW)에서 페놀이 13.98 mg/L 검출되었다(Fig. 2). 현장 조사 등을 통해 확인된 오염원인으로는 인접한 노후 폐수 저장시설에서 오염수가 지하로 유출되어 주변 지하수가

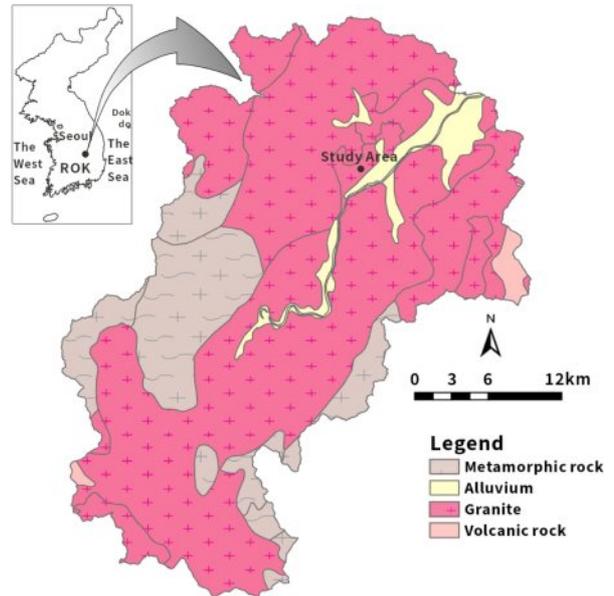


Fig. 1. Location and geological distribution of study area.

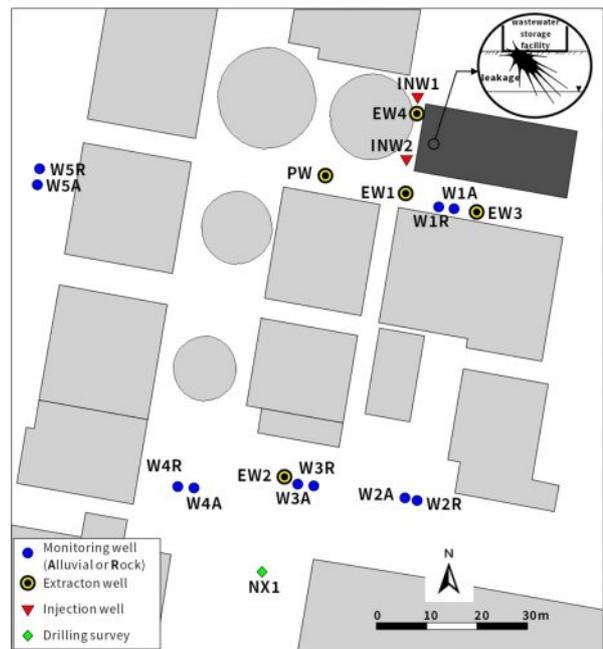


Fig. 2. Layout of monitoring wells, extraction wells, injection wells, and contamination source at the study site.

오염된 것으로 조사되었다. Table 1은 각 작업이 언제 시작되고 종료되었는지를 시간대별로 명확하게 보여주며, 연구 진행 상황을 시각적으로 이해할 수 있다. 지하수 오염방지 명령을 시작으로 해서, 지하수 오염평가 및 정화 계획을 수립하였고, 약 2년간 긴급확산방지와 함께 지하수 조사 및 정화 작업이 진행되었다. 그 과정에서 생성된 현장 자료를 수리지질학적으로 해석하였다. 지하수 오염평가는

Table 1. Summary of groundwater contamination investigation, remediation plan, emergency containment, and remediation work schedule

Type of work	2020		2021					2022					2023					2024											
	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
1. Site Assessment	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●																			
2. Remediation Plan																													
1) Field Test								●	●		●	●									●	●	●						
2) Lab Pilot Test																					●	●							
3. Remediation																													
1) Emergency Actions			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●																
2) Design and construction										●	●	●	●					●	●	●	●	●	●						
3) Pump & treat														●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
4) In-situ chemical oxidation																				●	●	●	●			●	●	●	
4. Monitoring																													
1) Sampling	●	●	●	●	●	●	●	●					●	●					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
2) water level monitoring		●	●	●																		●	●	●	●	●	●	●	

2020년에서 2021년까지 주로 진행되었으며, 이 기간 동안 오염 조사와 긴급확산방지 조치가 수행되었다. 정화 계획 수립 단계에서는 2022년과 2023년에 걸쳐 현장 실험과 실내 실험이 진행되었으며, 이 과정에서 제안된 정화 방법의 효과성을 평가하였다. 현장 실험은 단계양수시험, 적정양수량 산정 등의 양수처리 공법에 필요한 운영 인자를 도출하였으며, 실내 실험에서는 화학적 산화공법 운영 시 필요한 오염물질에 따른 산화제 제거 효율, 반응시간 등을 검토하였다. 지하수 정화 작업은 2022년에 설계 및 시공이 집중적으로 이루어졌으며, 특히 과황산염을 사용한 in-situ 화학 산화 공법이 2023년 후반부터 2024년 초까지 적용되었다. 모니터링 작업은 2021년부터 시작되어 장기적인 수질 및 수위 변화 추적을 위한 샘플링과 수위 측정이 꾸준히 이루어졌다.

2.2. 오염조사 및 긴급확산방지

연구 부지의 오염은 Fig. 2에서 표시된 폐수 저장시설에서 시작되었다. 오염 발생 후 관련 법령에 따라 지하수 오염 평가 및 현장 특성 조사가 수행되었다. 오염 발생시설에서 유출된 오염물질은 층적층을 거쳐 암반층으로 흘러 나가기 때문에 지하수 관측정을 층적층과 암반층을 하나의 세트에 설치하였다. 5개 지점에 설치된 관측정은 층적 관측정 W1~5A의 심도는 층적층 두께를 반영해서 10 m 내외이고, 암반 관측정 W1~5R의 심도는 풍화암을 지나서 연암층까지 약 50 m 착정하였다. 연구 부지 주변은

공장 생산시설이 밀집되어 있어서, 공간적으로 가능한 구간에서만 관측정이 설치되었다(Fig. 2). 조사 관측정에서 Table 1에서 표시된 시기마다 시료 채취를 하여 오염도 변화를 확인하였다. 지하수 시료 채취 및 수질분석을 2020년 12월, 2021년 1월, 2월에 총 3회에 걸쳐 실시하였으며, 오염확산 경계부 및 주요 검출지점에 대해서는 추가적으로 2021년 2월 ~ 6월, 2022년 6월에 조사하여 폐놀의 농도 변화 모니터링을 수행하였다. 지하수 관측정에서 지하수위 관측 및 현장특성 시험들이 진행되었다.

오염 발생 후 즉시 오염확산을 방지하기 위해서, 오염 지하수를 긴급으로 양수하였다. 양수처리 공법 초기에는 긴급확산방지 조치로 적용되었고, 현장 특성 조사 이후에는 지중산화 공법과 더불어 체계적으로 양수처리 공법이 적용되었다. 긴급확산방지 조치 단계에서는 가용할 수 있는 기존 이용 관정을 우선 가동하고 추가로 양수정을 설치하여 긴급 양수를 도모하였다. 기존 이용관정(PW)과 추가 설치된 양수정(EW1~4)의 위치는 Fig. 2와 같고 Table 2와 같이 운영되었다. 신규로 설치된 양수정은 지표로부터 무공관(casing)을 14 m, 그 이후로는 유공관(screen) 36 m로 관정 심도 50 m까지 설치해서 암반까지 최대한 확산되지 않도록 하였다. 긴급확산방지 조치 단계에서는 최대 양수량으로 모든 양수정이 가동되었지만, 현장 특성 인자를 파악하고 정화전략이 마련된 시기부터는 적정양수량(85 m³/day)과 포획구간(최대폭 약 70~130 m)을 고려해서 양수정이 가동되었다. 초기 2021년에는 양수정마다 최대 양수량으로

Table 2. Summary of extraction well operation results for contaminated groundwater in the study site

Time	PW		EW1		EW2		EW3		EW4	
	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)
2020										
Dec	419	41.9	815	81.5	158	79.0	41	41.0	-	-
Jan	1,448	46.7	1,871	60.4	939	30.3	2,086	67.3	-	-
Feb	1,613	57.6	1,873	66.9	3,017	107.8	1,439	51.4	-	-
Mar	1,397	45.1	2,372	76.5	3,144	101.4	1,370	44.2	916	91.6
Apr	1,292	43.1	1,797	59.9	2,550	85.0	1,613	53.8	3,237	107.9
May	1,304	42.1	1,860	60.0	2,576	83.1	1,688	54.5	3,180	102.6
Jun	1,202	40.1	913	30.4	1,555	51.8	1,436	47.9	2,635	87.8
2021										
Jul	1,073	34.6	1,298	41.9	1,058	34.1	1,414	45.6	2,310	74.5
Aug	709	22.9	293	9.5	231	7.5	1,632	52.6	1,892	61.0
Sept	1,070	35.7	1,313	43.8	882	29.4	1,528	50.9	2,609	87.0
Oct	1,000	32.3	1,047	33.8	325	10.5	1,199	38.7	2,588	83.5
Nov	673	22.4	698	23.3	167	5.6	437	14.6	2,172	72.4
Dec	437	14.1	653	21.1	0	0.0	177	5.7	1,754	56.6
Sum	13,218	36.2	15,988	43.8	16,444	45.1	16,019	43.9	23,293	81.7

Table 2. Continued

Time	PW		EW1		EW2		EW3		EW4		
	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	Pumping amount (m ³)	Daily average (m ³ /day)	
2022	Jan	228	7.4	0	0.0	1,230	39.7	465	15.0	1,790	57.7
	Feb	1,135	40.5	0	0.0	2,018	72.1	1,960	70.0	1,328	47.4
	Mar	773	24.9	0	0.0	1,353	43.6	801	25.8	2,549	82.2
	Apr	53	1.8	0	0.0	1,759	58.6	1,459	48.6	1,974	65.8
	May	20	0.6	0	0.0	1,299	41.9	816	26.3	502	16.2
	Jun	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Jul	0	0.0	0	0.0	0	0.0	910	29.4	865	27.9
	Aug	9	0.3	0	0.0	273	8.8	1,285	41.5	1,116	36.0
	Sept	13	0.4	0	0.0	496	16.5	1,190	39.7	1,012	33.7
	Oct	26	0.8	0	0.0	571	18.4	384	12.4	351	11.3
	Nov.	8	0.3	0	0.0	596	19.9	20	0.7	241	8.0
	Dec	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	133	4.3
Sum	2,265	6.2	0	0.0	9,595	26.3	9,290	25.5	11,861	32.5	
2023	Jan	0	0.0	0	0.0	433	14.0	0	0.0	427	13.8
	Feb	0	0.0	0	0.0	137	4.9	0	0.0	469	16.8
	Mar	5	0.2	0	0.0	904	29.2	134	4.3	350	11.3
	Apr	0	0.0	0	0.0	288	9.6	38	1.3	434	14.5
	May	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	155	5.0
	Jun	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	468	15.6
	Jul	0	0.0	0	0.0	89	2.9	0	0.0	57	1.8
	Aug	0	0.0	0	0.0	65	2.1	195	6.3	231	7.5
	Sept	31	1.0	0	0.0	144	4.8	801	26.7	589	19.6
	Oct	0	0.0	0	0.0	709	22.9	553	17.8	357	11.5
	Nov	33	1.1	0	0.0	26	0.9	463	15.4	246	8.2
	Dec	0	0.0	0	0.0	0	0.0	513	16.5	238	7.7
Sum	69	0.2	0	0.0	2,795	7.7	2,697	7.4	4,021	11.0	
2024	Jan	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Feb	2	0.1	0	0.0	0	0.0	418	14.4	342	11.8
	Mar	9	0.3	0	0.0	0	0.0	306	9.9	197	6.4
	Apr	0	0.0	0	0.0	0	0.0	180	6.0	130	4.3
	May	0	0.0	0	0.0	296	9.5	616	19.9	222	7.2
	Jun	0	0.0	0	0.0	57	1.9	0	0.0	0	0.0
	Jul	16	0.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Aug	0	0.0	0	0.0	1,283	47.5	0	0.0	0	0.0
Sum	27	0.1	0	0.0	1,636	6.8	1,520	6.3	891	3.7	
Total	15,998	11.9	16,803	12.5	30,628	22.9	29,567	22.1	40,066	31.9	

양수하였고, 그 이후에는 각 양수정마다 평균 25 m³/day 이하로 포획구간을 고려하면서 양수하였다. 양수정 운영은 PW가 가장 먼저 작동되었고, 평균 약 36 m³/day 양수하였다. EW4 양수정은 늦게 가동되었지만, 가장 많은 용량으로 가동되어 평균 81 m³/day를 기록하였다.

2.3. 현장특성조사

지질분포 특성을 확인하기 위해서 NX1 지점에서 시추 코어를 회수하여 성상을 확인하였다. 시추 코어의 확인된 성상을 기초로 하여 관측정과 양수정 착정 시 토출된 토사의 성상을 확인하여 연구부지 내 2개 지질 단면을

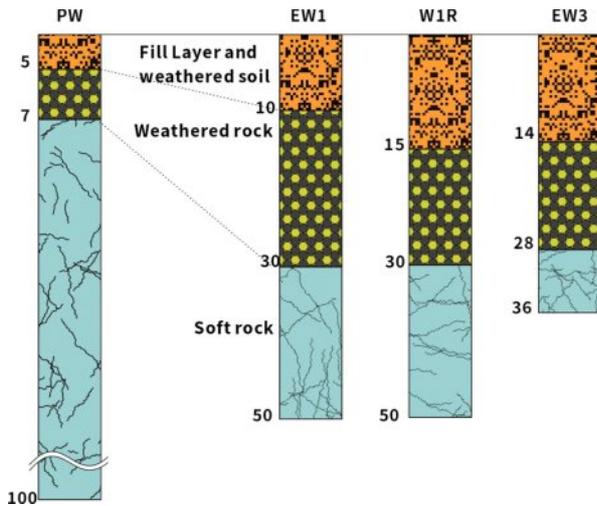


Fig. 3. Geological cross-section of wells in the study site (Based on the geological survey results in Table 3).

개념화하였다(Fig. 3).

연구 부지에서 공간적인 수리전도도의 분포를 확인하기 위해서 순간수위변화시험을 수행하였다. 베일러(bailer)를 이용하여 관정 내 지하수를 순간적으로 제거하거나 더미(dummy)를 주입 또는 추출하는 방식으로 수위 변화를 일으킨 후 수위 회복을 관찰하는 방법으로 관측정 11개(W1 ~ 5A, W1 ~ 5R, NX1)에서 수행하였다. EW1 양수정에서는 단계양수시험을 수행하여 적정양수량과 수리지질 인자를 도출하였다.

지하수위는 시료 채취 시 수위 심도(depth to water)를 관측하여 공간적인 등수위선 분포를 파악하였고, W1R, W3R, W4R 지점에서 2022년 12월부터 2024년 9월까지 약 20개월 동안 연속자동수위를 관측하여 지하수위 변동 특성을 조사하였다.

2.4. 정화전략

지하수 정화전략은 초기 단계에서 긴급확산방지, 현장 특성 평가, 그리고 모니터링으로 구분되어 진행되었다(Fig. 3). 오염 확산을 최소화하기 위한 긴급확산방지 조치가 먼저 시행되었으며, 이후 현장 특성 평가를 통해 지하수의 오염 원인과 확산 범위, 지질 및 수리학적 특성 등을 자세히 분석하였다. 이를 바탕으로 지속적인 모니터링이 이루어졌고, 수집된 데이터는 정화 전략 수립에 중요한 역할을 했다. 이러한 정화 전략은 현장의 특성과 오염물질의 발생 위치에 맞게 적용되었으며, 이후 장기적인 모니터링을 통해 정화 효과를 평가하고 추가적인 조치를 취하는 방향으로 진행되었다.

양수처리 공법 초기에는 긴급확산방지 수단으로 활용되

었지만, 현장 실증시험 결과를 통해, 적정양수량과 포획구간을 도출한 다음에 계획된 양수량과 운영 일정에 맞춰 가동하였다.

과황산염(Persulfate, $K_2S_2O_8$)을 이용한 고도산화처리(AOP)는 물 속의 난분해성 오염물질을 제거하기 위한 방법 중 하나로, 강력한 산화종을 생성하여 오염물질을 분해하는 기술이다. 본 연구에서 적용된 과황산염은 금속 촉매(주로 Fe^{2+})에 의해 활성화되어 황산 라디칼($SO_4^{\bullet-}$)을 생성하고, 이 라디칼이 오염물질과 반응하여 분해를 유도하였다. 아래 식과 같이 Fe^{2+} (철 이온)는 과황산염($S_2O_8^{2-}$)과 반응하여 황산 라디칼($SO_4^{\bullet-}$)과 황산이온(SO_4^{2-})을 생성한다. 이 과정에서 Fe^{2+} 는 Fe^{3+} 로 산화된다(Li et al., 2023; Furman et al., 2010; Tsitonaki et al., 2010). 본 연구에서는 오염된 대수층 주변으로 높은 산화제 전달률을 유도하기 위하여 지하수면 아래(지표로부터 3~4 m) 구간에 팩커(packer)를 설치하여 직접 압력을 가하여 과황산염을 주입하였다.

2.5. 실증시험

2.5.1. 산화제 성능시험

본 연구에서는 페놀로 오염된 지하수를 정화하기 위해 양수처리 공법과 함께 과황산염과 Fe^{2+} 를 활용한 고도산화처리(AOP) 방법을 적용하였다(Jo et al., 2020) 실증시험 목표는 과황산염/ Fe^{2+} 조합의 최적 조건을 설정하여 페놀 제거 효율을 극대화하는 데 있다.

먼저, 살내 실험에 사용된 오염물질은 페놀 혼합물(농도: 7.13 mg/L)로, 다양한 과황산염과 Fe^{2+} 농도를 설정하여 실험을 진행하였다. 구체적으로, 과황산염과 Fe^{2+} 의 주입 농도는 2.5/2.5 mM, 2.0/2.0 mM, 1.5/1.5 mM, 1.0/2.0 mM, 2.0/1.0 mM, 1.0/1.0 mM의 6가지 조건으로 설정하였다. 각 조건에서 60분간의 배치(batch) 실험이 수행되었으며, 실험 중 pH 제어는 이루어지지 않았다(초기 pH = 8.01). 실험 후, 페놀 혼합물의 제거율은 GC-MS 분석을 통해 평가되었고, 최적의 과황산염과 Fe^{2+} 조합을 도출하기 위해 각 농도 조건에서 제거율을 비교하였다.

2.5.2. 단계양수시험

양수처리 공법을 계획하기 위해서는 지하수 고갈, 오염물질 유입 등과 같이 대상 지역의 대수층 내에서 지하수 장해를 일으키지 않는 범위에서의 영향반경이 발생하도록 양수정에서 지하수위 강하를 가능한 범위 내에서 최대한 크게 하였을 때의 적정양수량을 설정해야 한다. 과잉양수가 이루어지면, 양수정에서의 지하수 고갈, 지하수위 강하로 인해 지속적인 양수의 어려움으로 효율적인 정화를

하지 못하기 때문이다. 적정양수량을 산정하기 위해 현장에서 단계양수시험을 수행하였다. 단계양수시험은 일정한 시간 간격으로 양수량을 증가시켜 가며 관측정의 수위 변화 혹은 수위강하를 관측함으로써 수리상수(투수량계수, 저유계수)와 함께 관정의 효율 및 생산성을 평가할 수 있다(Dawson and Istok, 1991; Hantush, 1964; Kruseman and de Ridder, 1991; Han, 1998). 수위 강하량과 양수량과의 관계식(Jacob, 1947, $S_w = BQ + CQ^2$, S: 수위강하량, Q, 양수량, B & C : 손실계수)을 통해 양수정에서 운영 가능한 양수량을 예측할 수 있다. 혹은 단계별 비수위강하량과 양수량의 그래프를 통해 평형 관계가 무너지는 한계양수량을 통해서 적정 양수량을 추정할 수 있다. 본 연구에서 두 번째 방법을 통해 적정양수량을 산정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 현장특성결과

3.1.1. 시추조사 및 지질(단면)

Table 3은 NX1지점에서 시추 코어링 결과를 정리한 것이다. 연구 부지는 다양한 지질층이 혼재되어 있으며, 주요 구성 요소로 충적층, 풍화암층, 그리고 연암층, 경암층으로 구분된다. 충적층을 구성하고 있는 매립층과 풍화토 구간은 길지 않지만, 오염물질 유출이 최초로 발생한 구간이다. 이 구간은 암편이 섞인 실트질 모래로 구성되어 있어서, 중력과 긴급확산방지 양수 작업에 의해 풍화암층을 신속하게 이동한 것으로 판단된다. 풍화암층은 심한 풍화가 발생한 구간으로 높은 투수성을 가지고 있어 지하수의

흐름과 오염물질의 이동이 원활하게 이루어질 수 있다. 풍화암층 바로 하부에는 물질 이동이 어려운 연암층이 존재하는데 이 층은 풍화암층에 비해 상대적으로 단단한 암석층이며, 지하수 이동이 제한적이다. 하지만 균열을 통해 일부 지하수가 흐를 수 있다. 연암층 하부에 위치한 경암층은 화강섬록암과 편마암이 혼재된 단단한 암반층으로 지하수의 흐름이 거의 발생하지 않으며, 오염물질의 이동도 제한된다. 풍화암층은 오염물질이 이동하는 주요 대수층이고, 일부 연암층도 오염되었다. 따라서 풍화암층과 일부 연암층을 중심으로 정화전략이 수립되었다.

Fig. 3은 시추 코어와 비교하여 개념화한 지질 단면이다. 충적층은 주로 모래와 자갈로 구성되어 있으며, 그 두께는 위치에 따라 약 5 m에서 15 m까지 다양하다. 풍화암층은 주로 풍화작용을 받은 암석 조각들로 구성되어 있으며, 높은 투수성을 가지고 있다. 이 층은 대략 심도 10 m에서 30 m 깊이까지 약 15 m의 두께로 존재한다. 암반층은 주로 견고한 암석으로 구성되어 있으며, 투수성이 매우 낮아 지하수의 이동이 작으므로 오염물질이 유입되더라도 확산 차단에 효과적일 것으로 판단된다.

3.1.2. 순간수위변화시험

Fig. 5는 지하수 정화 현장의 수리전도도(hydraulic conductivity) 분포를 나타내고 있다. 빨간색과 노란색으로 표시된 영역은 수리전도도가 상대적으로 높은 지역(3.69×10^{-3} m/s 이상)으로, 지하수 유속이 빠른 구역을 나타낸다. 반면, 파란색으로 표시된 영역은 수리전도도가 낮아 (5.85×10^{-4} m/s 이하) 상대적으로 지하수 유속이 낮은

Table 3. Geological survey results and core images of the study site

Geological layer	Depth (GL. m)	Composition	
Fill layer and weathered soil	0.0 ~ 12.0	Compacted silty sand This layer consists of artificial fill and weathered soil, providing a relatively permeable path for groundwater flow.	
Weathered rock	12.0 ~ 30.7	Severely weathered, disintegrated into compacted silty sand during drilling This layer may serve as an aquifer with moderate permeability, though its mechanical strength is reduced due to extensive weathering.	
Soft rock	30.7 ~ 58.8	Mainly composed of schist This solid rock layer has limited groundwater flow through fractures and cracks but provides structural strength.	
Hard rock	58.8 ~ 100.0	A combination of granodiorite and gneiss This deep bedrock layer has minimal permeability, effectively restricting both groundwater and contaminant movement.	

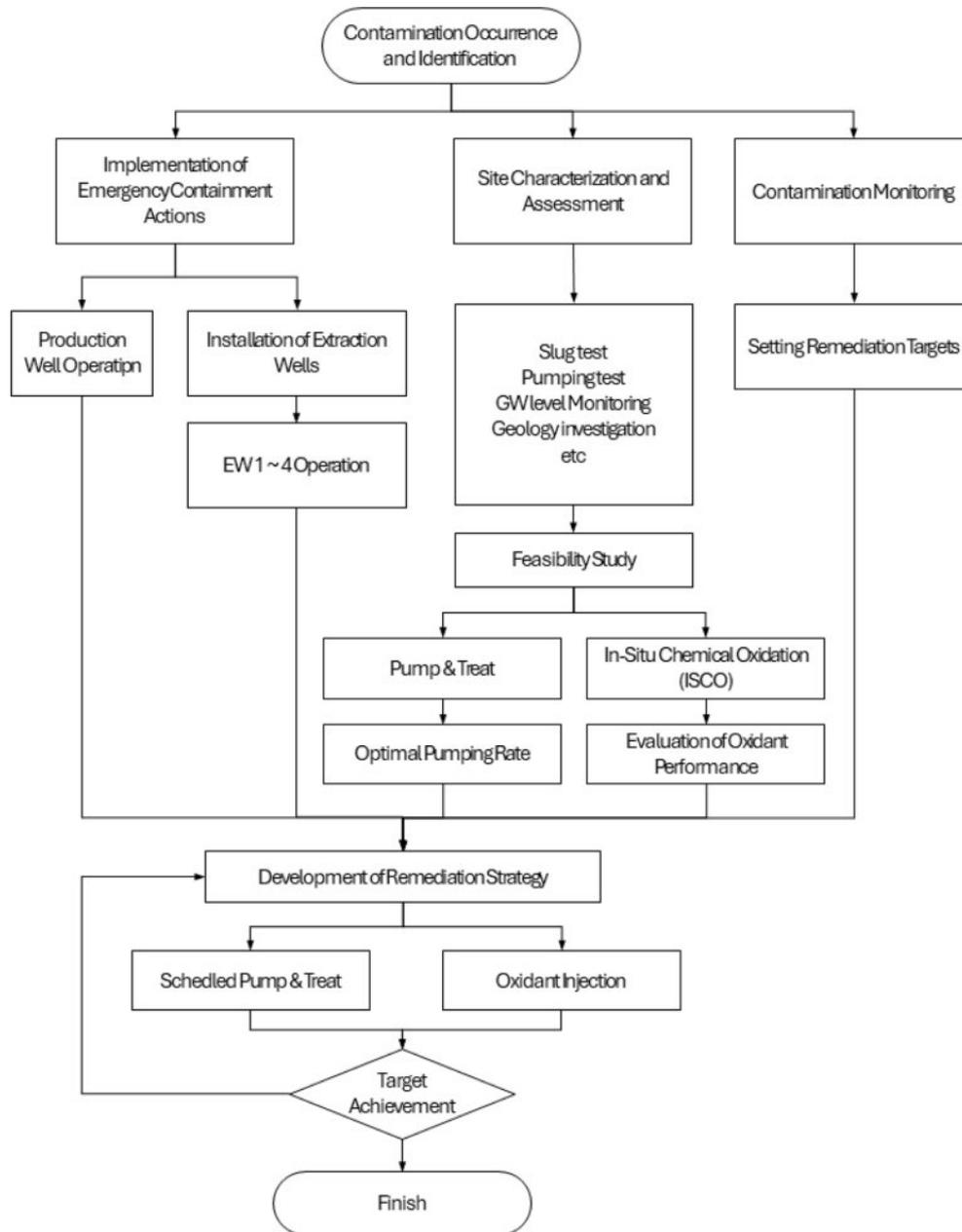


Fig. 4. Flowchart of the contaminated groundwater remediation strategy applied at the study site.

지역이다. W1R 주변은 오염이 발생한 지점으로서, 상대적으로 낮은 수리전도도를 보이고 있으며, 이는 지하수의 흐름이 상대적으로 느린 지역임을 나타낸다. 이에 따라 누출된 오염물질은 이 지역에서 확산 속도가 느려질 수 있으며, 한편으로는 오염물질이 공극 내 포화되어 장기적으로 주변 지하수 수질에 영향을 미칠 가능성도 존재한다. W4R 지역은 높은 수리전도도(2.40×10^{-3} m/s)를 보이고 있어, 오염물질이 빠르게 확산할 수 있는 위험이 크다.

긴급확산방지 조치는 Fig. 5의 공간적 수리전도도의

분포를 고려해서 설치/운영 계획을 마련하였다. 우선 W1R 주변 폐수저장시설에서 유출된 오염물질을 최대한 많이 추출할 수 있는 양수정 EW1, EW3, EW4를 운영하였다. 그리고, 수리전도도가 낮은 지역 W4R 주변으로 더 이상 확산되지 않도록 수리벽체(hydraulic barrier)를 형성하는 양수정 EW2를 운영하였다.

3.1.3. 지하수위 분포 지하수 흐름 특성

여름철인 6월(Fig. 6(a))은 강우량이 많아 지하수 충전이

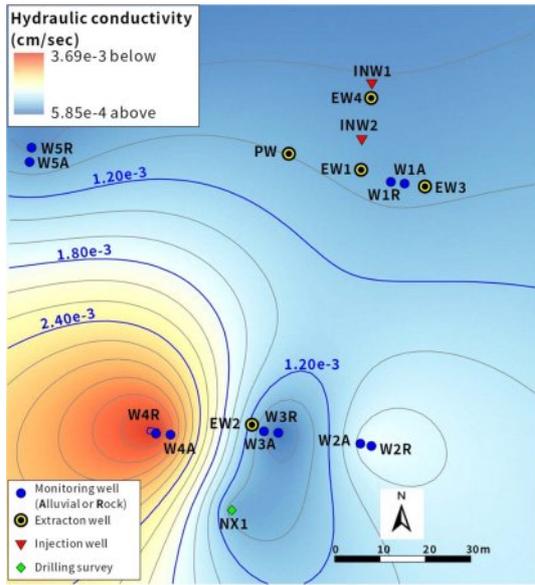


Fig. 5. Hydraulic conductivity distribution in the study site (Derived from slug test results).

활발히 이루어진 시기로, 전반적으로 지하수위가 높게 형성된 것을 확인할 수 있다. W1R 주변은 오염원이 위치한 지역으로, 이 주변에서는 지하수 흐름이 중요한데, 수리전도도가 상대적으로 높아 오염물질이 지하수 흐름을 통해 확산될 가능성이 있다. W1R 인근에서는 지하수의 빠른 이동과 더불어 오염물 확산에 대한 긴급확산방지 조치와 함께 지속적인 모니터링이 진행되었다. W4R은 수리전도도가 높은 지역으로, 지하수 함양이 빠르게 이루어지며 여름철 지하수위 상승이 두드러진다.

가을철에는(Fig. 6(b)) 여름철에 비해 강우량이 줄어들면서 지하수위도 다소 낮아지는 경향을 보인다. W1R 인근에서는 여전히 지하수의 흐름이 활발하며, 긴급확산방지 시설의 가동이 필요하다. 오염원의 위치로 인해 이 지역의 지하수 흐름 방향은 오염물 확산에 큰 영향을 줄 수 있다. W4R 주변에서도 지하수 흐름이 활발하지만, 가을철 강우량 감소에 따라 지하수위 하강이 나타난다. 수리전도도가

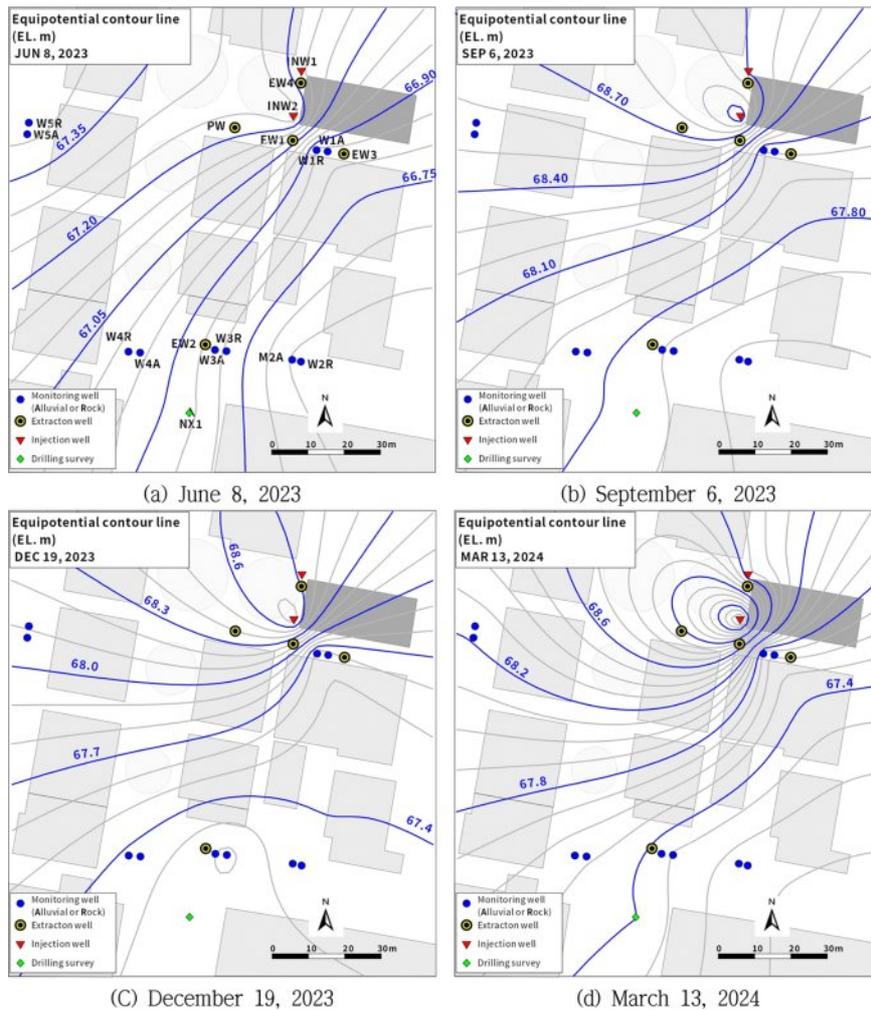


Fig. 6. Temporal distribution of groundwater levels with equipotential contour lines (June 2023 – March 2024).

높은 지역들은 지하수의 유동이 빠르지만, 가을철 전체적인 수위 하락이 지하수 흐름을 다소 둔화시킬 수 있다.

겨울철(Fig. 6(c))에는 지하수위가 전반적으로 낮아지며, 강우량이 적고 지하수 충전이 거의 이루어지지 않는다. 겨울철에는 지하수의 유동이 상대적으로 줄어들기 때문에 오염물 확산이 일시적으로 둔화할 수 있지만, 지하수 흐름 방향과 유동량은 지속적으로 관찰할 필요가 있다. W4R 근처에서도 관측된 지하수위가 낮아지지만, 수리전도도가 높은 지역이므로 지하수의 유동이 느리게 진행되고 있는 것으로 파악되었다.

봄(Fig. 6(d))에는 기온 상승과 더불어 강우량도 증가하기 시작하며, 지하수위가 점진적으로 회복되는 시기이다. W1R 주변에서는 지하수가 다시 함양되면서 오염물 확산 가능성이 높아질 수 있다. W4R 근처 역시 수리전도도가 높아 지하수 함양이 빠르게 이루어지며, 봄철에는 지하수위가 회복되는 양상을 보인다.

장기지하수위 변동 모니터링 결과는 Fig. 7과 같다. 정화부지 하류 약 50 m 지점에 있는 배경 지점(downstream background point)의 지하수위는 GL -3.8 m에서 -5.2 m 범위로 계절적 변동을 보였다. 이 지점에서는 주기적인 강우나 계절적 요인에 따라 안정적인 패턴의 수위 변동이 나타났다. 반면, W1R, W3R, W4R 관측점의 지하수위는 양수정 인근에 있어 양수정 가동에 따라 큰 변동폭을 보였다. W1R은 GL -5.0 m ~ -10.8 m, W3R은 GL -5.5 m ~ -11.2 m, W4R은 GL -6.0 m ~ -12.0 m 사이에서 수위 변동이 관측되었다. 이와 같은 변동은 양수정이 가동될 때마다 포획구간 내에서 지하수위가 하강하는 것을 의미하며, 이를 통해 양수정의 포획구간이 인근 관측점까지 효과적으로 포획되고 있음을 확인할 수 있다. 특히, W3R과 W4R

의 수위 변동폭이 큰 것은 해당 구역에서 양수정이 효율적으로 운영되어 주변 지하수의 흐름을 적극적으로 제어하고 있음을 나타내고 있다.

3.1.4. 오염조사 결과

Table 1에서 표현된 시료 채취 일정마다 오염조사가 수행되었다. 오염조사는 관측점뿐만 아니라 양수정, 관측정 등 시료 채취 가능한 모든 지점에서 조사되었다. 오염조사 결과, 충적층에 설치된 관측정(W1A ~ 5A)에서 폐놀은 모두 불검출되었고, 암반 관측정과 양수정 등 심부 관측은 검출되지 않았다. 오염조사 결과, 폐수저장시설에서 유출된 오염수는 투수성이 높은 충적층을 통과하여, 풍화암 등 암반 대수층까지 유입된 것으로 판단된다.

연구 부지의 오염은 EW1, W1R 주변에 있는 폐수 저장시설에서 시작되었다. 오염발생 초기인 2020년 12월 오염도(Fig. 8(a))에서 폐놀은 535 mg/L 농도로 확인되었다. 오염발생 주변에 설치된 양수정 최대 능력으로 가동하여, 초기의 오염 지하수가 확산되지 않도록 조치하였다.

Fig. 8(b)은 긴급확산방지 조치가 끝나고, 지하수 정화 전략이 수립되었던 시기의 오염도이다. Fig. 8(b)이 긴급 확산방지 조치의 효과로 폐놀 오염도가 축소된 오염도이고, 이때부터 계획된 양수량과 양수지점에서 양수정을 운영하였다. 2023년 7월부터는 양수뿐만 아니라 과황산염을 주입하는 화학적 산화 공법도 적용되었다. 복합 정화 방법을 8개월 운영한 결과, 2024년 2월에 Fig. 8(c)과 같이 오염도가 상당히 축소되었고, 2024년 4월부터는 폐놀 농도가 불검출로 오염 범위 내 오염물질이 대부분 제거된 것으로 판단되었다.

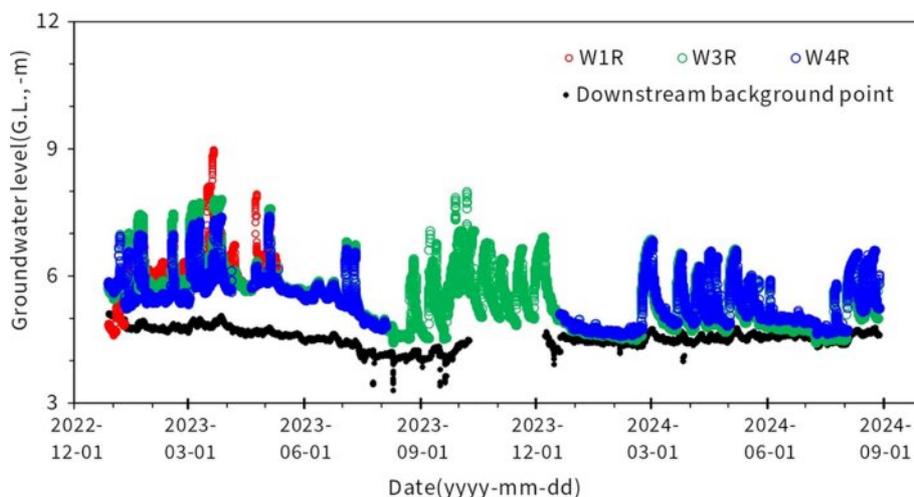


Fig. 7. Long-term monitoring of groundwater levels.

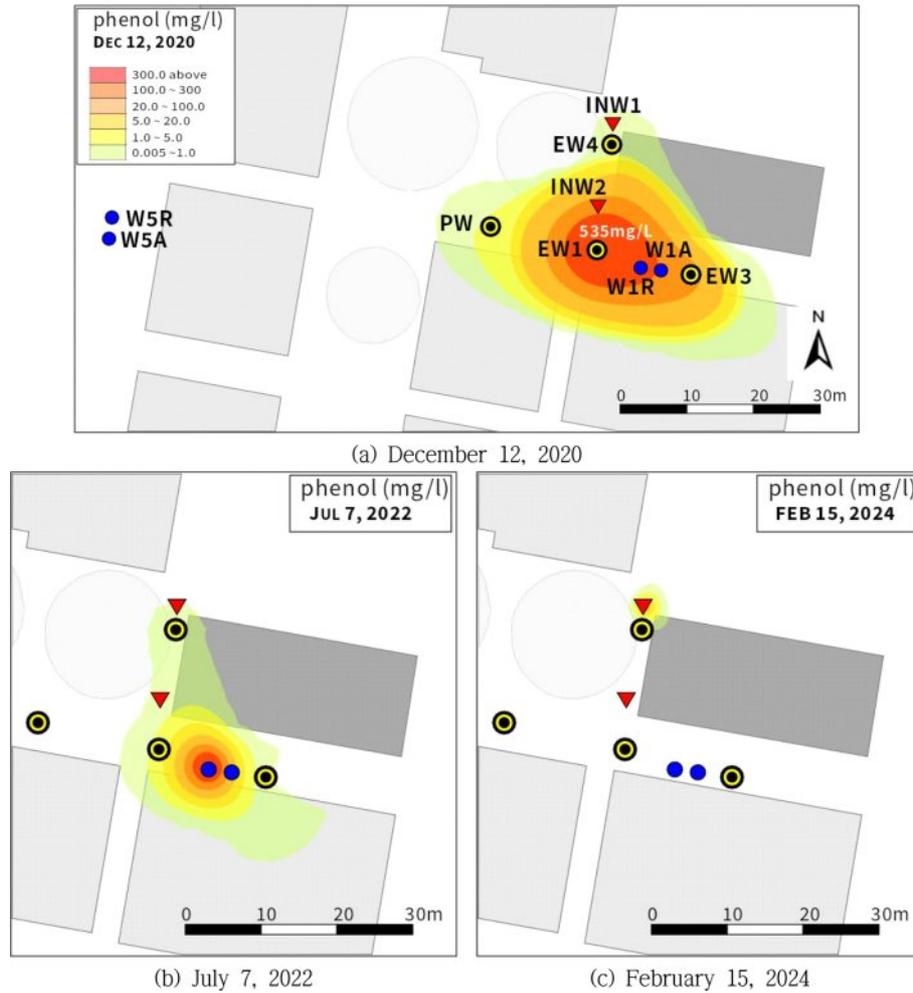


Fig. 8. Temporal distribution of phenol contamination (2020–2024). (a) shows the initial contamination event. (b) represents the period after emergency action, followed by scheduled pumping operations. (c) reflects the phase where a combined pump-and-treat strategy and in-situ chemical oxidation (ISCO) method were applied.

3.2. 실증시험 결과

3.2.1. 산화제 성능

실내 실험 결과, 과황산염과 Fe^{2+} 의 농도를 각각 2.5 mM로 설정한 조건에서 페놀 제거율이 가장 높게 나타났다. 구체적으로, 2.5/2.5 mM 농도 조건에서는 약 99%의 페놀 제거율을 보였으며, 이 조건이 가장 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 9). 이를 기반으로, 과황산염과 Fe^{2+} 의 농도를 2.5/2.5 mM로 고정하고 페놀 혼합물(농도: 6.284 mg/L)로 120분 동안 추가적인 kinetics 실험을 수행한 결과, 페놀 제거율은 100%에 도달하였고, 페놀 정점(peak)은 실험 시작 후 5분 이내에 완전히 제거되었다(Table 4). 또한, pH 제어 없이 진행된 실험에서 산화 후 최종 pH는 3.47로 낮아졌다. 이러한 결과는 과황산염/ Fe^{2+} 시스템이 pH 변화에도 불구하고 높은 페놀 제거 성능을 유지할 수 있음을 보여주고 있다. 실내 실험에서 얻어진 결과는 과황산

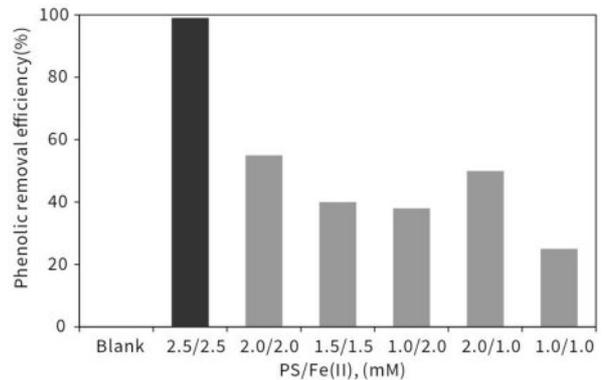


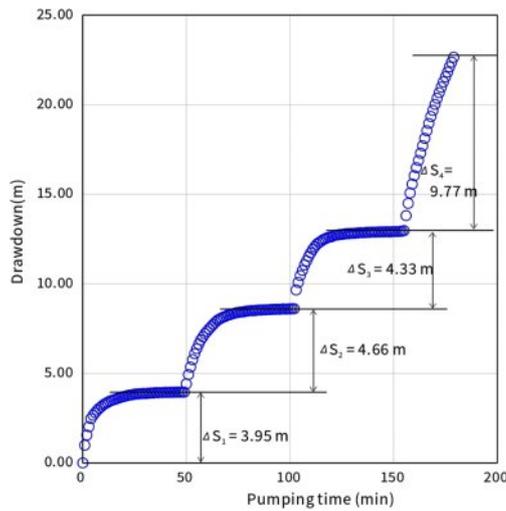
Fig. 9. Optimization of advanced oxidation process using PS/Fe(II) for phenolic contaminated groundwater remediation.

염과 Fe^{2+} 조합이 페놀로 오염된 지하수를 처리하는 데 있어 매우 효과적이라는 결과를 도출할 수 있었다. 또한

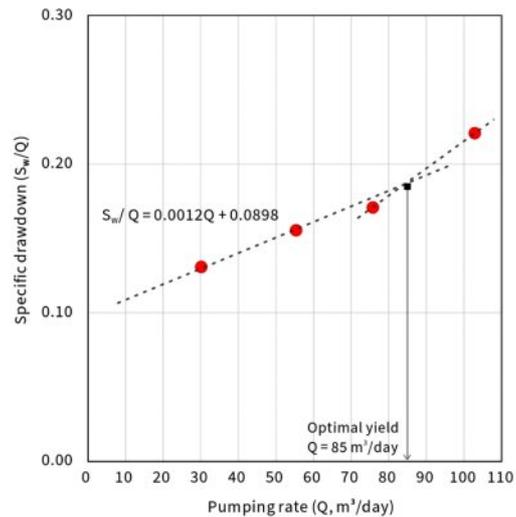
Table 4. Analysis of oxidant consumption for the optimization of advanced oxidation process using PS/Fe(II)

Persulfate (PS)			Phenolic Mixture (PM)		
$C_{0,PS}$	$C_{t,PS}$	ΔC_{PS}	$C_{0,PM}$	$C_{t,PM}$	ΔC_{PM}
2.492 mmol/L	1.758 mmol/L		0.0668 mmol/L	0 mmol/L	
0.0748 mmol PS (in 30 ml)	0.0527 mmol PS (in 30 ml)	0.0221 mmol PS	0.0220 mmol PM (in 30 ml)	0.0 mmol PM (in 30 ml)	0.002 mmol PM

$$\frac{\Delta C_{PS}}{\Delta C_{PM}} = \frac{0.0221 \text{ mmol Persulfate}}{0.002 \text{ mmol Phenolic Mixture}} = \frac{11.05 \text{ mmol Persulfate}}{1 \text{ mmol Phenolic Mixture}}$$



(a) Drawdown vs. Pumping time in step pumping test



(b) Specific drawdown vs. Pumping rate for determining optimal yield

Fig. 10. Drawdown and specific drawdown analysis from step pumping test for determining optimal yield.

Table 4와 같이 1 mM 페놀 혼합 용액(phenol mixture water)을 처리하기 위해 11.05 mM 과황산염(PS)이 필요한 것으로 계산되었다. 현장에서 과황산염을 사용할 시에는 분해 반응을 통해 pH가 산성 환경으로 변할 수도 있으므로, 현장 운영을 통해 적절한 주입량을 고려해야 한다.

3.2.2. 적정양수량 및 포획구간

단계양수시험 시 단계별 양수량은 1단계 30.2 m³/day, 2단계 55.4 m³/day, 3단계 75.8 m³/day, 그리고 4단계

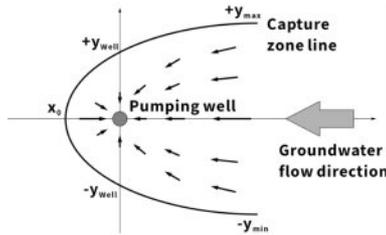
102.9 m³/day로 설정하여 양수시험을 수행하였다. 시험은 총 4단계로 진행되었으며, 수위 강하량을 도시한 것은 Fig. 10(a)과 같다. 각 단계에서 양수시간(pumping time), 양수량(pumping rate), 수위강하량(ΔS , drawdown), 비양수량(Q/S_w , specific capacity), 비수위 강하량(S_w/Q , specific drawdown) 결과를 Table 5에 정리하였다. Table 5의 양수량과 비수위강하량의 관계를 그래프로 도시한 것이 Fig. 10(b)이다. Fig. 10(b)에서 그래프의 선형 회귀 방정식은 $S_w/Q = 0.0012Q + 0.0898$ 로 나타났다. 이 식은 양수량(Q)과

Table 5. Specific drawdown derived from step pumping test results

Step	Pumping time (min)	Pumping rate (m³/day)	Drawdown		Specipic capacity Q/S_w (m²/day)	Specific drawdown S_w/Q (day/m²)
			ΔS	S_w (m)		
1	50	30.20	3.95	3.95	7.65	0.1308
2	50	55.40	4.66	8.61	11.89	0.1554
3	50	75.80	4.33	12.94	17.51	0.1707
4	30	102.90	9.77	22.71	10.53	0.2207

Table 6. Calculation method and results of the capture zone for the extraction well

Q (m ³ /day)	T (m ² /day)	i	X ₀ (m)	Y _{max} (m)	Y _{well} (m)	Remark
85.00	35.80	0.018	-21.00	65.95	32.98	Emergency action
45.00	35.80	0.018	-11.12	34.92	17.46	
25.00	35.80	0.018	-6.18	19.40	9.70	Scheduled pumping
10.00	35.80	0.018	-2.47	7.76	3.88	



$$y = \pm \left(\frac{Q}{2Ti} \right) - \left(\frac{Q}{2\pi Ti} \right) \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$$

$$X_c = \frac{-Q}{2\pi Ti} \quad Y_w = \frac{\pm Q}{2\pi Ti} \quad Y_{max} = \frac{\pm Q}{4\pi Ti}$$

Q : pumping rate
T : transmissivity
i : hydraulic gradient

비수위 강하량(Sw/Q) 간의 상관관계를 나타내며, 양수량이 증가할수록 비수위 강하량이 선형적으로 증가함을 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 비수위 강하량(Sw/Q)은 양수량이 70 ~ 100 m³/day 범위에서 약 0.13에서 0.22로 증가한다. 이는 양수량이 증가할수록 대수층에서 더 많은 지하수가 양수되어 수위 강하가 더 두드러지게 발생함을 의미한다(Fig. 10). Fig. 10에 표시된 적정 양수량은 85 m³/day이다. 이 값은 안정적으로 양수가능한 양으로, 대수층의 수리전도도 및 안정성을 유지하면서 최적의 지하수 이용을 보장할 수 있는 적정양수량을 의미한다. Table 2에서 정리된 일별 평균 양수량을 살펴보면 2022년부터는 포획구간과 적정 양수량은 85 m³/day를 초과하지 않는 범위에서 양수정을 운영하였다.

3.2.3. 양수정(PW) 운영에 따른 포획구간

양수처리 공법을 현장에서 적용할 때 오염된 지하수를 제어하기 위해 포획구간(capture zone)을 고려하면서 양수정의 위치와 양수량이 계획되어야 한다(US EPA, 2008). 포획구간은 양수정으로 지하수가 배출되는 대수층의 영역을 말하며, 시간이 지남에 따라 상류에 위치한 지하수가 양수정 방향으로 흘러 들어가기 때문에 포획구간 영역은 양수정의 좌우 가장 바깥쪽에 위치하는 지하수 유선의 폭과 함께 상류 방향의 영역까지 포함된다.

US EPA(2008)에 제시된 포획구간 범위 계산식(단공 양수정)을 통하여 본 대상지역의 포획구간 범위를 추정하는 관계식과 결과는 Table 6과 같다. Table 6과 같이 정화 대상부지에 대하여 각 구역별 현장수리시험을 통해 산출된 수리특성값인 투수량계수(T)와 수리경사(i)와 더불어 설계 양수량(Q) 값을 대입하여 구역별 포획구간을 산정하였다.

2021년 긴급확산방지 조치로 운영된 양수량은 약 45 ~ 85 m³/day였다. 이때 발생하는 포획구간의 최대폭은 약 70 ~ 130 m로 산출되었다. 이들 값들은 구역별 양수정 위치 선정 시 상류로부터 하류(외부)로 유출되는 오염물질 확산을 최소화하도록 운영되었다. 긴급확산방지 조치 이후부터는 적정양수량과 포획구간을 반영해서 양수정 운영계획을 마련하였다. 최대 양수량으로 양수하게 되면 수처리 비용이 과중하게 되어 지속적으로 운영에는 한계가 있기 때문이다. 오염원 주변 하나의 양수정이 약 10 ~ 20 m의 포획구간을 발생시키면 오염물질을 포획할 수 있다. 따라서, Table 6에 10, 25 m³/day의 포획구간을 계산하였고, 이 양수량이 양수처리 공법 운영 전략에 반영되었다.

3.3. 정화계획 및 현장 운영결과

본 연구에서는 지하수 오염 확산을 방지하기 위해 초기에는 긴급 확산 방지 조치로 양수정을 최대 용량으로 가동하였다. 2020년과 2021년 동안 양수정은 최적화된 운전 계획 없이 즉각적인 오염 확산 억제를 목적으로 운영되었기 때문에 최대 양수량으로 가동되었다.

2022년부터는 적정 양수량과 포획구간이 도출됨에 따라 운영 전략이 조정되었다. 이 시점부터는 에너지 효율을 고려한 부분적인 양수 운영으로 전환되었으며, 과도한 양수를 방지하면서도 정화 효과를 유지하고자 하였다. Fig. 11은 가동할 양수정 선택과 양수량 및 포획구간을 계획한 결과이다.

양수정은 EW2, EW3, EW4만 가동하는 것을 계획하였고, EW2는 수리전도도가 낮은 지역으로 확산을 방지하기 위해서 가동하였다. 오염된 지하수 정화를 위해 가동하는 양수정은 EW3과 EW4이다. 오염확산방지 조치 후 오염

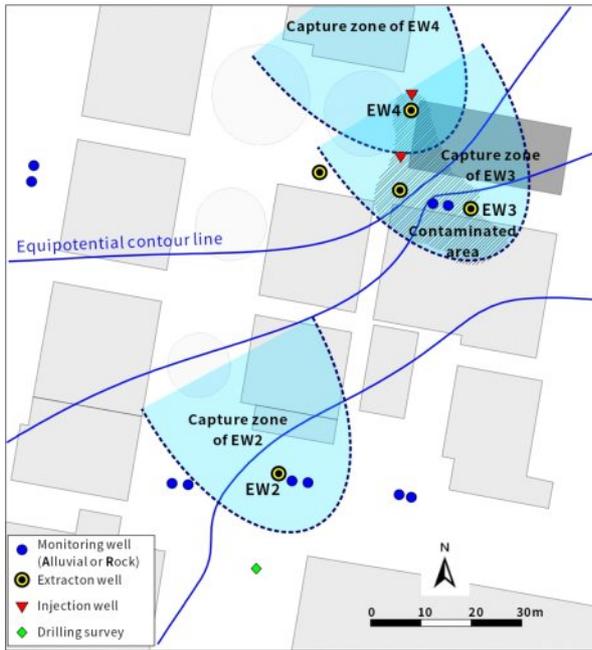


Fig. 11. Capture zones and contaminated area with equipotential contour lines.

운의 크기가 50% 이상 축소되었다(Fig. 8(a)→(b)). 따라서 Table 6에서 산출된 양수량 25 m³/day로 가동 시 약 40 m (≡ Y_{max} 19.40 × 2 = 38.8 m)의 포획구간이 발생하는 것을 반영해서 운영하였다. EW3 양수정을 중심으로 가동하지만, 바로 상류에 위치한 EW4 지점도 오염원과 같이 인접하고 있어 유사한 양수량으로 운영하였다. 하지만, EW1과 기존 이용관정 PW는 오염운을 포획하지 않고, 인근 양수정과 포획구간이 중첩되기 때문에 운영하지 않았다. PW 관정은 시설 점검 혹은 유지 관리 차원에서 간헐적으로 적은 양수량으로 운영되었다.

2023년 및 2024년에서 오염이 많이 제거되었기 때문에 오염운도 현격히 줄어들었다(Fig. 8(b)→(c)) 따라서, EW2, EW3, EW4 양수정을 가동하되, 최소의 양, 약 10 m³/day 이내로 운영하였다. Table 6과 같이 10 m³/day으로 양수할 경우 15 m (≡ Y_{max} 7.76 × 2 = 15.52 m)의 포획구간이 발생한다.

2023년 7월부터는 화학적 산화 공법과 양수처리 공법이 복합적으로 적용되었다. Fig. 12에 복합 적용 개념도를 나타내었다. 오염원이 인접하고 오염도가 상대적으로 높은 지역에서 화학적 산화 공법을 적용하였다. 왜냐하면, 대수층 공극에 잔류하는 오염물질을 양수로 추출하는데 한계가 있기 때문에 화학적 산화제를 주입하여 공극 사이에 스며들어 잔류 오염물질을 제거하는 것으로 계획하였다. 23년 8월부터 24년 5월까지 과황산염(S₂O₈²⁻) 주입을 약 2주 간격으로

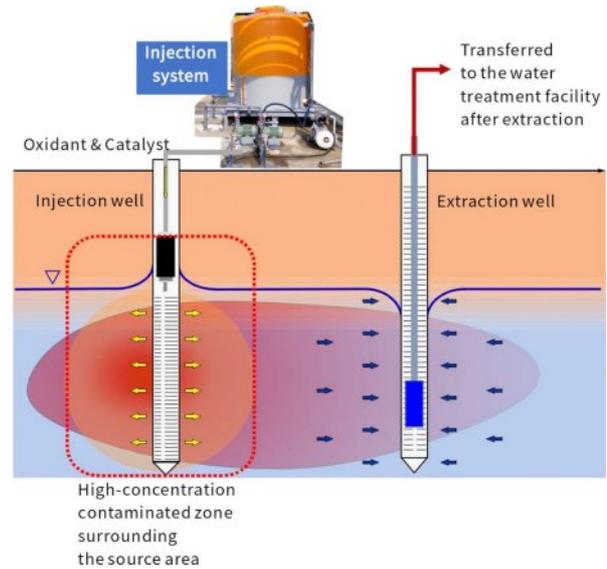


Fig. 12. Conceptual diagram of remediation strategy combining ISCO and pump-and-treat.

39회 주입하였다. 희수가 거듭될수록 주입 농도를 점차적으로 높이는 전략을 적용하였다. 1~6회 차는 3 mM, 7~12회 차는 6 mM, 13회 차 이후부터는 9 mM 농도로 주입하였다.

2020년과 2021년에는 긴급확산방지(emergency action) 조치로 양수정을 최대한 가동하여 W1R, EW1, EW3 지점에서 나타난 고농도 폐놀을 신속히 저감하였다. 초기 농도는 W1R에서 356 mg/L, EW1R에서 535 mg/L, EW3R 258 mg/L 까지 측정되었다. 양수정의 지속적인 가동을 통해 농도가 많이 감소하였고, 2022년까지 대부분 지점에서 1 mg/L 이하로 검출되었다(Fig. 13).

2022년 중반 이후 일부 지점에서 농도가 재상승(rebounding) 현상이 발견되었다. 특히 EW1 지점에서는 농도가 일시적으로 5 mg/L 이상까지 상승하는 경향이 나타났다. 이에 따라 과황산염을 이용한 화학적 산화 공법과 양수처리 공법을 복합 적용하여 잔류 오염물질을 제거하였다. ISCO 주입과 계획된 양수량 운영을 병행함으로써, 2023년부터 모든 관측 지점에서 불검출 수준(0.005 mg/L 이하)에 도달하였다. 최종적으로, 2024년까지 W1R, W3R, W4R 등 주요 관측 지점에서 오염물질이 대부분 제거되었으며, 이는 양수처리 공법과 화학적 산화 공법의 병행 적용이 효과적으로 수행되었음을 보여준다.

4. 고 찰

본 연구에서는 오염 지하수 정화에 있어 초기 대응과

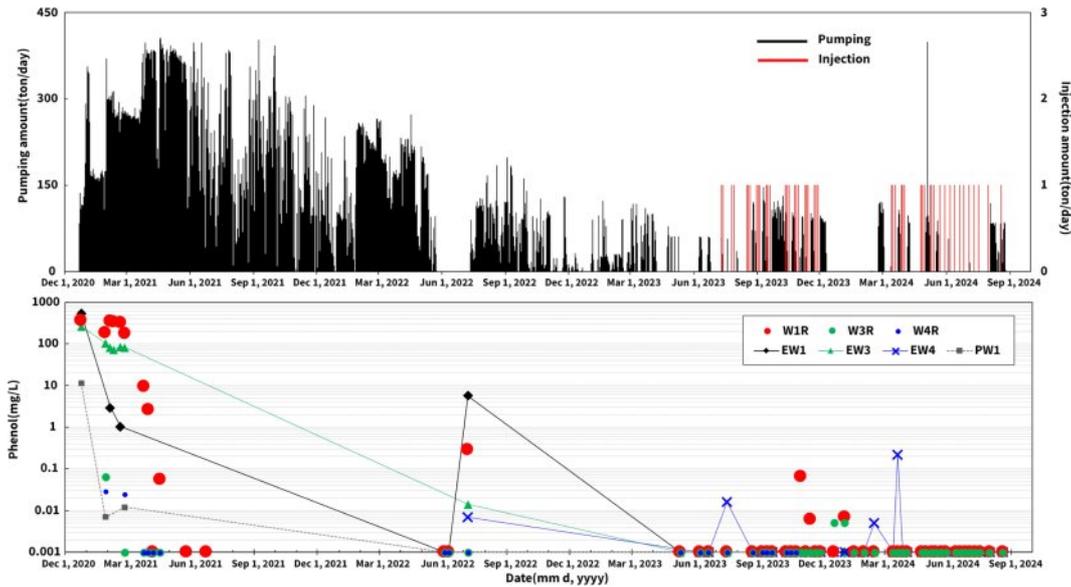


Fig. 13. Phenol concentration reduction through the combined application of pump-and-treat and ISCO.

적극적인 대처의 중요성을 강조하고 있다. 초기 오염 확산이 확인된 직후 즉각적인 긴급확산방지 조치를 통해 오염 지하수의 추가 확산을 방지하였으며, 기존 이용 관정과 추가 설치된 양수정을 활용하여 오염원을 효과적으로 제어할 수 있었다. 이러한 초기 대응은 정화 기간을 단축하고, 전체적인 정화 비용을 최소화하는 데 크게 기여하였다.

양수처리 공법과 화학적 산화(ISCO) 공법을 병행 적용한 결과, 약 2년간의 운영 기간 동안 오염도가 빠르게 감소하였으며, 최종적으로 오염물질이 대부분 제거되었다. 특히 과황산염과 Fe²⁺ 조합을 활용한 화학적 산화 공법은 잔류 오염물질을 신속하게 분해하여 정화 효과를 극대화할 수 있었다. 정화 공정 중 양수정의 적정 양수량 설정과 포획 구간 산출이 정화 효율을 높이는 데 중요한 역할을 하였으며, 이는 오염의 추가 확산을 예방하는 데도 기여하였다.

본 연구는 정화 초기에 적극적으로 대응할 경우, 최소의 운영 비용으로도 단기간에 오염 문제를 해결할 수 있음을 보여준다. 이와 같은 전략은 유사한 오염 사례에 대한 향후 정화 공법 선택과 운영 계획 수립에 유용한 사례가 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통해 오염 지하수의 정화에서 초기 대응의 신속성과 적극적인 대처가 얼마나 중요한지를 확인할 수 있었다. 초기 단계에서 긴급확산방지 조치와 양수정 운영을 통해 오염의 확산을 억제함으로써 신속한 정화가 가능하였다. 또한, 양수처리 공법과 화학적 산화(ISCO) 공법을

병행함으로써 화학적 산화와 물리적 제거의 장점을 극대화할 수 있었고, 이에 따라 정화 효율이 크게 향상되었다.

이번 연구 사례에서는 초기 오염 발생 이후 약 2년 동안 정화 공정을 시행한 결과, 오염된 페놀이 대부분 제거되었으며, 그 과정에서 최적의 양수량과 포획구간을 설정함으로써 정화 비용을 최소화할 수 있었다. 이러한 결과는 지하수 오염 발생 시 빠른 대응이 비용 절감과 효율적 정화를 위해 필수적임을 시사한다. 본 연구의 성공적인 정화 사례는 유사한 오염 문제를 해결하는 데 중요한 기준과 방법을 제공할 수 있을 것이다.

사 사

본 원고는 한국환경산업기술원 “지중 확산제어 시설의 설계 시공 및 운영관리 기술개발: 2021002470005”과제의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

Ahmad, M., Teel, A.L., and Watts, R.J., 2013, Mechanism of persulfate activation by phenols, *Environmental Science & Technology*, **47**, 5864-5871.

Babich, H. and Davis, D.L., 1981, Phenol: A review of environmental and health risks, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **1**(1), 90-109.

Bacocchi, R., D'Aprile, L., Innocenti, I., Massetti, F., and Verginelli, I., 2014, Development of technical guidelines for the appli-

- cation of in-situ chemical oxidation to groundwater remediation, *Journal of Cleaner Production*, **77**, 47-55.
- Boal, A.K., Rhodes, C., and Garcia, S., 2015, Pump-and-treat groundwater remediation using chlorine/ultraviolet advanced oxidation processes, *Groundwater Monitoring & Remediation*, **35**(2), 93-100.
- Carroll, K.C., Brusseau, M.L., Tick, G.R., & Soltanian, M.R., 2024, Rethinking pump-and-treat remediation as maximizing contaminated groundwater, *Science of The Total Environment*, **918**, 170600.
- Dawson, K.J. and J.D. Istok., 1991, *Aquifer Testing: design and analysis of pumping and slug tests*, Lewis Publishers, INC., Chelsea, Michigan 48118, 334 p.
- Furman, O.S., Teel, A.L., and Watts, R.J., 2010, Mechanism of base activation of persulfate, *Environmental Science & Technology*, **44**(16), 6423-6428.
- Furman, O.S., Teel, A.L., and Watts, R.J., 2010, Mechanism of base activation of persulfate, *Environmental Science & Technology*, **44**(16), 6423-6428.
- Han, J.S., 1998, *Groundwater Environment and Pollution*, Parkyoungsa.
- Hantush, M.S., 1964, "Hydraulics of wells", In: V.T. Chow (ed.), *Advances in Hydrosiences*, Vol. I, pp. 281-432, Academic Press.
- Ji, Y., Ferronato, C., Salvador, A., Yang, X., and Chovelon, J. M., 2014, Degradation of ciprofloxacin and sulfamethoxazole by ferrous-activated persulfate: Implications for remediation of groundwater contaminated by antibiotics, *Science of The Total Environment*, **472**, 800-808.
- Jo, J.H., Yoon, S.E., Kim, J.M., and Hwang, I., 2020, Feasibility study of activation of persulfate by Fe(II) for phenol contaminated sediment, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **25**(4), 77-86.
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1991, *Analysis and evaluation of pumping test data*, 2nd Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Li, Y., Liu, G., He, J., and Zhong, H., 2023, Activation of persulfate for groundwater remediation: From bench studies to application, *Applied Sciences*, **13**(3), 1304.
- Ma, J., Li, H., Chi, L., et al., 2017, Changes in activation energy and kinetics of heat-activated persulfate oxidation of phenol in response to changes in pH and temperature, *Chemosphere*, **189**, 86-93.
- Mackay, D.M., and Cherry, J.A., 1989, Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation, *Environmental Science & Technology*, **23**(6), 630-636.
- Panigrahy, N., Priyadarshini, A., Sahoo, M.M., Verma, A.K., Daverey, A., and Sahoo, N.K., 2022, A comprehensive review on eco-toxicity and biodegradation of phenolics: Recent progress and future outlook, *Environmental Technology & Innovation*, **27**, 102423.
- Patel, M., Patel, D., and Pillai, P., 2024, Comparison of different treatment methods which are used for phenol removal: A mini review, *Water Practice and Technology*, **19**(7), 2761-2773.
- Pradhan, B., Chand, S., Chand, S., Rout, P.R., and Naik, S.K., 2023, Emerging groundwater contaminants: A comprehensive review on their health hazards and remediation technologies, *Groundwater for Sustainable Development*, **20**, 100868.
- Ramos, R.L., Moreira, V.R., and Amaral, M.C.S., 2024, Phenolic compounds in water: Review of occurrence, risk, and retention by membrane technology, *Journal of Environmental Management*, **351**, 119772.
- Ravindran, G., Rajamanickam, S., Sivarethinamohan, S., Sathaiah, B.K., Ravindran, G., Muniasamy, S.K., and Hayder, G., 2023, A review of the status, effects, prevention, and remediation of groundwater contamination for sustainable environment, *Water*, **15**(20), 3662.
- Thornton, S.F., Baker, K.M., Bottrell, S.H., Rolfe, S.A., McNamée, P., Forrest, F., Duffield, P., Wilson, R.D., Fairburn, A.W., and Cieslak, L.A., 2014, Enhancement of in situ biodegradation of organic compounds in groundwater by targeted pump and treat intervention, *Applied Geochemistry*, **48**, 28-40.
- Tsitonaki, A., Petri, B.G., Crimi, M., Mosbæk, H., Siegrist, R.L., and Bjerg, P.L., 2010, In situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater using persulfate: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **40**(1), 55-91.
- U.S. Environmental Protection Agency., 2021, *Green remediation best management practices: Pump and treat systems (EPA 542-F-21-029)*, Office of Land and Emergency Management.
- United States Environmental Protection Agency., 1998, *Field applications of in situ remediation technologies: Chemical oxidation (EPA 542-R-98-008)*, Solid Waste and Emergency Response (5102G).
- Wang, B., Gao, C., Li, X., Zhang, Y., Qu, T., Du, X., and Zheng, J., 2022, Remediation of groundwater pollution by in situ reactive zone: A review, *Process Safety and Environmental Protection*, **168**, 858-871.
- Yang, Z.-H., Sheu, Y.-T., Dong, C.-D., Chen, C.-W., Chen, S.-H., and Kao, C.-M., 2020, Remediation of phenol-contaminated groundwater using in situ Fenton and persulfate oxidation: performance and mechanism studies, *Desalination and Water Treatment*, **175**, 359-368.