

하이브리드 Funnel and Gate 지하수 흐름제어를 통한 반응벽체 설치 연구

김태영¹ · 천정용¹ · 이명재¹ · 차용훈¹ · 신선호¹ · 장명도² · 김정우^{1*}

¹(주)지오그린21
²건국대학교 신기술융합과

A Study on the Installation Method of PRB by Controlling Groundwater Flow in Hybrid Funnel and Gate

**Tae Yeong Kim¹ · Jeong Yong Cheon¹ · Myeong Jae Yi¹ · Yong Hoon Cha¹ · Seon Ho Shin¹
Meong Do Jang² · Jeongwoo Kim^{1*}**

¹GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea
²Dept. of advanced technology fusion, Konkuk University

ABSTRACT

Permeable reactive barrier (PRB) is a prominent *in-situ* remedial option for cleanup of contaminated groundwater and has been gaining increasing popularity in recent years. Funnel-and-gate systems, comprised of two side wings of impermeable walls and a central gate wall, are frequently implemented in many sites, but often suffers from bypassing of groundwater due to the progressive clogging of the gate wall over extended period of time. This study investigated technical feasibility of a hybrid funnel-and-gate system designed to address the flow deterioration in the gate wall. The key attribute of the proposed hybrid system is the operation of drainage units at the barrier walls and rear end of the gate wall. A conceptual modeling with MODFLOW indicated the groundwater inside the barrier was maintained at appropriate level to be guided toward the gate wall, yielding constant discharging of groundwater from the gate.

Key words : Groundwater, PRB, Hybrid Funnel and Gate, Barrier

1. 서 론

최근 현장에 자주 적용되는 지하수 정화기술 동향을 살펴보면, Fig. 1과 같이 지중정화 공법이 증가하는 추세이다(US EPA, 2020). 지중정화 공법이 자주 적용되는 이유는 지하수 정화가 정화목표 도달하기까지 소요되는 많은 시간과 비용으로 정화기간 내내 적극적인 정화공법을 유지하기가 어렵기 때문이다(Zhang, 2020). 여러가지 오염 지하수 지중정화 기술 중에서 반응물질 특성과 수리지질학적 성질을 활용하여 오염물질의 확산방지는 물론 지중

정화 공법으로 적용 가능한 공법이 투수성 반응벽체(PRB, permeable reactive barrier)이다(Powell et al., 1998). 정화대상 부지 특성에 맞게, 다양한 형태로 경제적이면서 효율적으로 지중에서 처리되므로 부지의 지상 공간은 원래 목적으로 활용하면서 지하수를 정화를 할 수 있다는 큰 장점이 있다.

PRB 공법은 전통적인 양수처리 공법 등과는 다르게 수동적인 처리 방법이다(Courcelles, 2014). 그리고 인위적으로 처리 시스템과 오염물질을 접촉시켜 처리하는 것이 아니라 지하수의 수리경사(hydraulic gradeint)를 이용해 오염지하수가 반응벽체와 접촉하도록 유도하여 분해, 흡착 및 침전 등의 기작으로 오염물질을 제거한다(Blowes et al., 1995). 적용 가능한 PRB 형태(configuration)는 연속벽(CW, Continuous Wall), 퍼널앤게이트(FG, Funnel and Gate), 케이슨(CC, Caisson Configuration), 배수형(DG, Drain and Gate) 등 다양하다(Courcelles, 2014; Naidu and Birke, 2015; Zhang, 2020). 여러 가지 PRB 형태

주저자: 김태영, 팀장
공저자: 천정용, 대표; 이명재, 대표; 차용훈, 실장; 신선호, 팀장, 장명도, 연구원
*교신저자: 김정우, 부사장
Email: wjddnkim@geogreen21.com

Received : 2023. 02. 05 Reviewed : 2023. 02. 20
Accepted : 2023. 05. 25 Discussion until : 2023. 08. 31

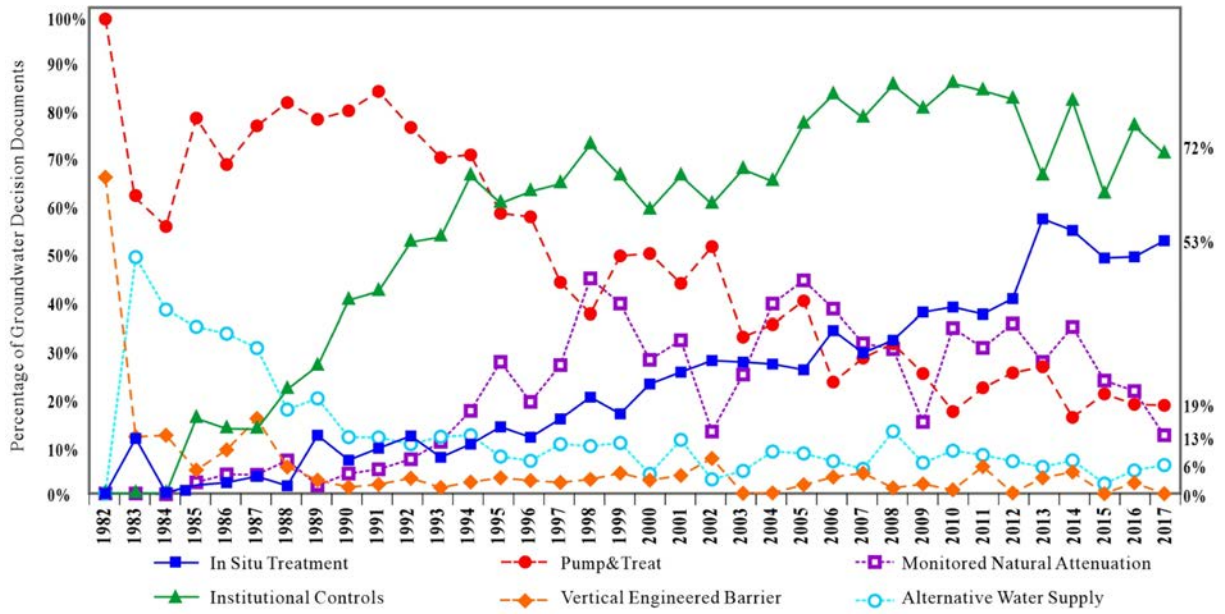


Fig. 1. Selection trends (1982~2017) for decision documents with groundwater remedies (US EPA, 2020).

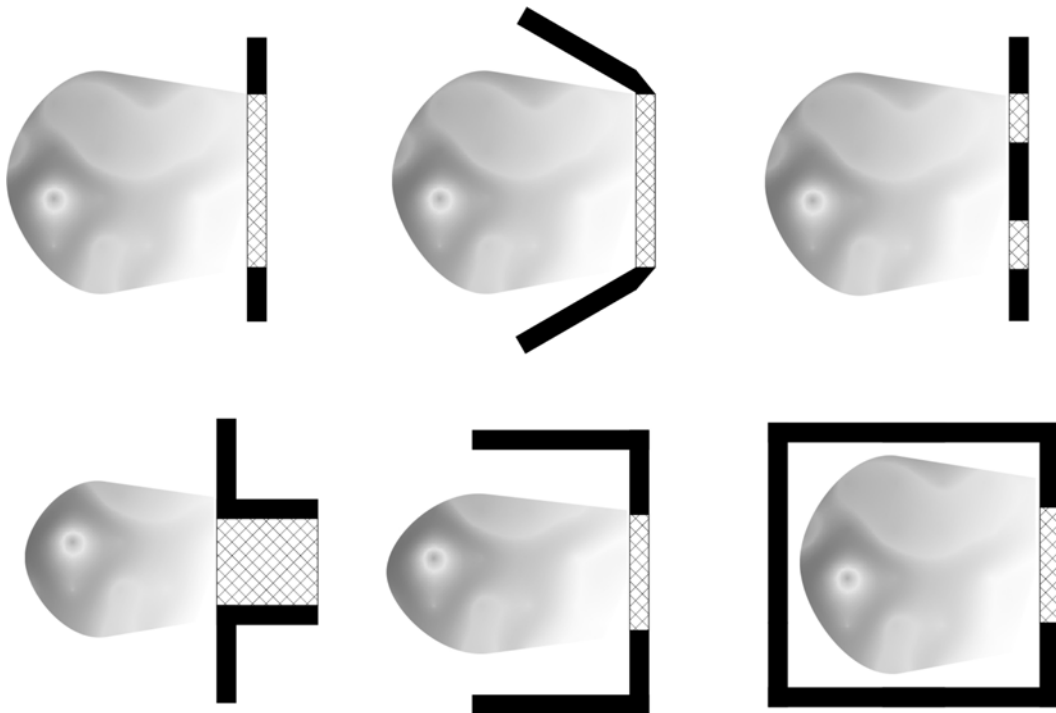


Fig. 2. Various configurations of funnel and gate PRBs (Starr and Cherry, 1994).

중에서 하나를 선택하는 과정은 오염물질을 제거하는데 필요한 체류시간과 지하수 흐름과 밀접한 관계가 있다(Powell et al., 1998; Gavaskar 1999). 그 중에서 FG PRB 경우는 가장 많은 연구가 진행되었고, Fig. 2와 같이 적용 가능한 많은 형태가 제시되었다(Starr and Cherry, 1994).

대수층 특성 및 오염물질 분포의 불균질성 때문에 오염 지하수가 모두 PRB를 지나쳐 간다고 보장할 수 없다. 지하수 오염구역을 전체를 포획해서 오염지하수가 유출되는 넓은 구간에 걸쳐서 PRB를 설치하는 것은 설치비용 및 유지관리와 지상 공간의 제약 때문에 불가능한 경우가 많다.

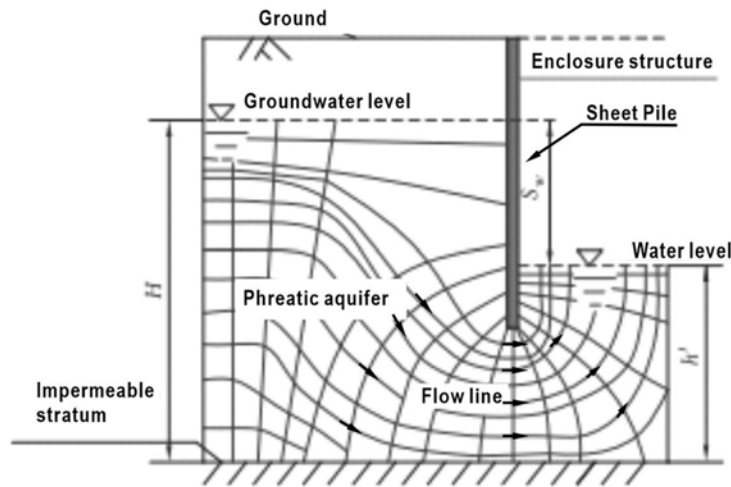


Fig. 3. Concept model of seepage field distribution around a sheet pile (Zhang et al., 2020).

따라서, 특정 구역에 PRB를 설치하고 그 특정구역으로 오염지하수가 유입되도록 모두 유도하기 위한 방법이 funnel and gate 방식(FG)이다(Zhang, 2020). Funnel을 설치 방법으로 백호(backhoe), 케이슨(caisson), 크렘셸(clamshell) 장비를 이용한 연속 트랜치법, 지하연속벽(slurry wall), 쉬트파일(sheet pile) 공법이 있다(Naidu and Birke, 2015; Zhang, 2020).

FG 방식을 적용할 때, 반응벽체와 오염지하수가 접촉할 수 있도록 지하수 흐름을 유도하는 Funnel 설계 방법에 대한 연구가 많이 진행되었다(Klammler and Hatfield 2009; Klammler et al., 2010a; 2010b). Funnel의 효과적인 설계를 위해서는 지하수 흐름방향, 속도, 계절적 변화 등 다양한 현장 특성을 이해해야 한다(Richardson and Nicklow 2002). Funnel이 자연적인 지하수 흐름을 인위적으로 변형시키기 때문이다. 그 예로 차수벽 내부에 많은 지하수 유량이 모이면 차수벽 내부 주변에는 지하수위가 상승할 수 있다. 지하수위가 상승하게 되면 Fig. 3과 같은 환경으로 지하수가 외부로 유출될 수 있다(Zhang et al., 2020).

Fig. 3과 같은 유출현상으로 막기 위해서는 차수벽(sheet pile) 설치 바닥심도에 aquiclude 역할을 하는 불투수 경계층이 있어야 한다(Lai et al., 2006). 만약 Fig. 3과 같이 차수벽이 불투수 경계층까지 설치되지 않았다면, 수리지질학적 접근을 통해 유출될 수 있는 조건을 제거하여야 한다. Anderson과 Mesa(2006)의 연구 결과에 따르면, 지하수 흐름을 막는 수직벽 주변 상류에서, 적절한 양수정 가동을 통해 유량을 조절하는 방식으로 수직 차단벽 하부로 유출량을 줄일 수 있음을 보여주었다. 따라서, PRB

구역에서 수렴된 지하수 유량을 원활히 배수된다면 차수벽 내부 주변의 지하수위 상승을 막을 수 있으며, 계획한 지하수 흐름을 더욱더 원활히 유도할 수 있다.

본 연구에서는 PRB를 설치할 때, 지하수 흐름이 원활하도록 전통적인 물리적 차수벽 설치와 수리지질학적으로 수위를 조절하는 하이브리드 방식, 즉, 차수벽 + 선택적 배수시설의 가동으로 지하수 흐름 제어하는 기법을 연구하였다.

본 연구는 특정 지역에서 현장조사 결과를 기반으로 수행한 것이 아니라, 우리나라에서 PRB가 설치될 현장을 가상으로 설정하여 개념모델로 연구하였다. MODFLOW를 활용하여 하이브리드 방식의 PRB 설치 기법을 소개하였다. 개념모델에 입력되는 자료는 본 연구자들이 참여한 현장연구에서 획득한 대수층 구성, 대수층 심도, 투수계수, 지하수위 및 기타 지질 자료 등 현장자료를 기반으로 우리나라에서 일반적으로 나타날 수 있는 데이터를 선별해서 활용하였다.

2. 연구 방법

2.1. 개념모델 구성

PRB를 설계하는 과정에서 수치 모델링 과정을 거치는 것은 꼭 필요하다. 그 모델링을 상용프로그램인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh 1988)를 많이 사용하고 있다(Gavaskar et al., 2000; Courcelles, 2014). 본 연구에서도 동일 프로그램을 사용하였다. 모델 구축을 위하여 우리나라 160개의 지하수 및 지질 현장조사 사이트에서 생성된 919개 지점 데이터와 우리나라 국가지하

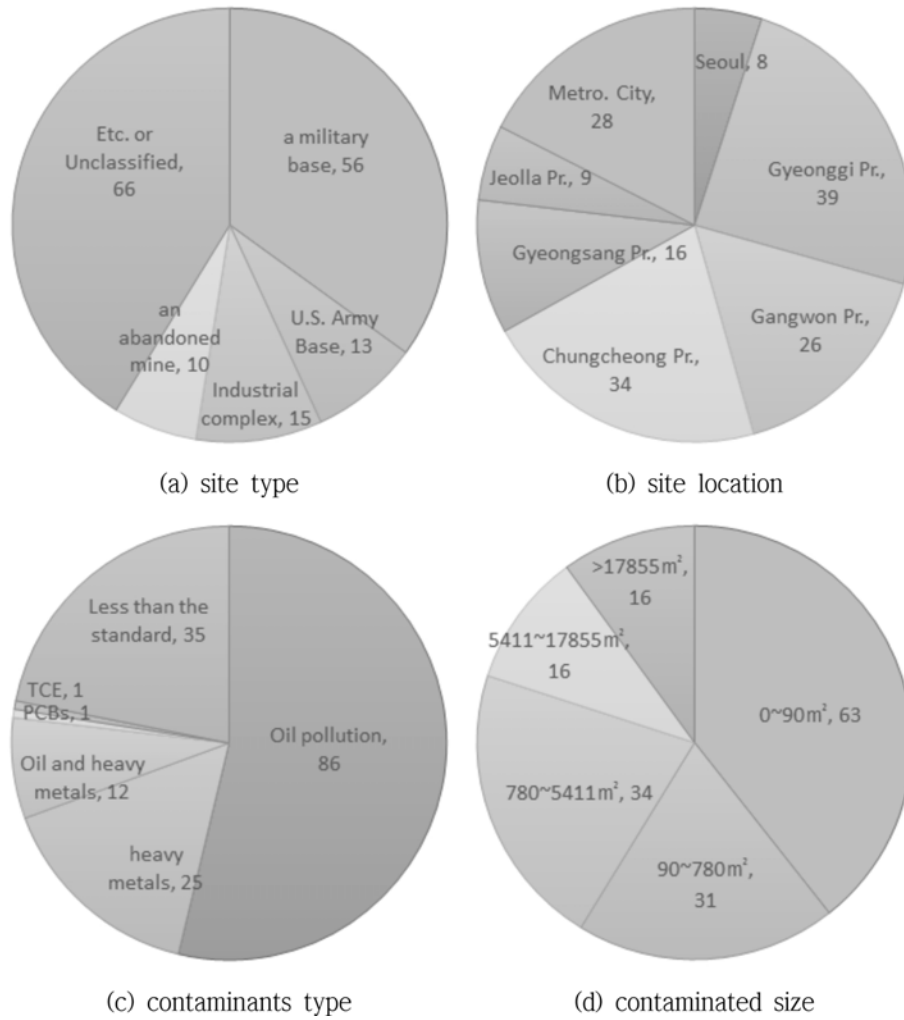


Fig. 4. The site status used to derive input factors necessary for the conceptual model simulation.

Table 1. The hydrogeologic data fo national groundwater management monitoring network (GIMS, national groundwater information center)

Statistics	Alluvial			Bedrock		
	Thickness (m)	Depth to water (m)	Hydraulic Conductivity (cm/sec)	Thickness (m)	Depth to water (m)	Hydraulic Conductivity (cm/sec)
Min	6.0	0.6	2.41E-06	17.0	0.0	2.16E-07
Max	40.0	50.3	2.19E+00	490.0	72.4	7.13E-01
Average	12.7	6.4	2.76E-02	81.3	7.3	5.87E-03
Geomean	12.0	5.2	9.20E-04	77.6	-	8.67E-05
Median	10.0	5.1	7.46E-04	80.0	5.4	6.03E-05

수관리측정망 자료를 활용하였다. 160개 현장부지 현황은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)처럼 대부분 군 부대와 같은 군사시설과 철도, 공원, 도시지역으로 분류된 기타 지역이 많은 지역을 차지하고, Fig. 4(b)처럼 부지 위치가 전국에 고루 분포하고 있어 우리나라 특성을 반영할 수 있는 자

료로 판단된다. Table 1에 본 연구에 활용된 국가지하수 관리측정망의 수리지질 정보를 정리하였다.

각 부지별 오염물질별로 분류 해보면 Fig. 4(c)와 같이 유류 오염부지가 많이 있다. 919개 지점의 오염자료들은 토양오염에서 시작해서, 충적층 지하수 오염으로 이어지

Table 2. The summary of conceptual model condition

Condition	Description	Condition	Description
Model Size	100 m × 150 m × 80 m	Bondary Condition	Constant head boundary North: GL -6.1 m South: GL -6.6 m
Grid Size	1 m × 1 m	Condition at the funnel part	Wall boundary Thickness: 1 m K: 1.00E-07 cm/sec
Alluvial (1st layer)	GL(-) 0 ~ 12 m K: 9.20E-04 cm/sec	Condition at the gate part	Drain boundary K: 1.00E-03 cm/sec Drain Conductance: 1.00E02 m ² /day
Bedrock (2nd layer)	GL(-) 12 ~ 80 m K: 8.67E-05 cm/sec	Contaminant	Constant concentration boundary C: 100 mg/L 4 m × 4 m

GL: ground level, K : hydraulic conductivity, C: concentration

는 자료들이었다. 암반층 조사자료 개수는 충적층에 비해 상대적으로 부족하지만, 모두 오염정도가 검출기준 이하이거나 오염도 극히 낮았다. 따라서 개념모델은 충적 대수층에서 오염이 발생하는 것으로 가정하여 만들었다. 개념모델의 크기는 160개 현장부지에서 조사된 오염면적의 크기(Fig. 4(d))가 모두 포함될 수 있도록 100 m × 150 m 크기로 설정하였다. 그 외 모델 구성 조건은 Table 2에 요약하였다.

Table 2처럼 개념모델은 충적 대수층과 암반 대수층으로 구성하고 그 심도는 각각 GL. 12 m와 80 m로 설정하였다. 그리고 수리전도도는 기하평균값을 활용하였다. 북쪽에서 남쪽으로 지하수가 흐른다는 것으로 개념으로 모의영역 상부와 하부에 일정수두경계(constant head boundary)를 설정하고 그 수위 값은 Table 1의 충적층 수위 값을 고려해서 북측에 GL -6.1 m 남측에 GL -6.6 m로 설정하였다.

2.2. 초기조건 및 지하수 흐름 특성

Fig. 5는 개념모델의 구성내용과 현재 오염범위 및 지하수 흐름 방향을 나타내고 있다. Fig. 5(a)와 같이 사방위로 오염이 확산되는 형태로 모의되도록 오염이 시작된 지역 4 m × 4 m 구간에 고정농도경계(constant concentration boundary)로 임의의 오염물질 100 mg/L(수질기준 1 mg/L로 정함)를 입력하였다. 지하수 오염물질은 특정하지 않았으며, 흡착 및 반응은 없이 확산에 의한 거동특성만 반영하였다.

개념모델을 실행시킨 오염물질 초기조건 및 지하수 유동모의 결과는 Fig. 5(b), (c)와 같다. 지하수 흐름은 경계 조건에 의해 모델의 북쪽에서 남쪽 방향으로 형성되었으

며, 1층 충적층에서 평균 유속 2.04E-05 m/sec로 유동하는 것으로 모의되었다. 2층 암반층에서 지하수 흐름 방향이 1층과 동일하게 북쪽에서 남쪽으로 향하지만 지하수 흐름속도는 1.93E-06 m/sec로 충적층에 약 10배 이상 느리게 나타났다. 오염물질은 1년간 유출된 시점의 오염범위를 초기조건으로 가정하고 지중정화를 공법인 PRB를 설계하는 것으로 모의하였다.

개념모델에서 continuous wall type PRB를 설치한다면 오염 지하수를 완전히 포획할 수 있는 구역에 PRB를 넓게 설치해야 하는데 지상에서 그런 광범위한 조건이 마련되기 어렵다고 가정하였고, 그래서 FG 방식으로 PRB를 모의하였다. 이때, Fig. 5에서 보여준 오염물질 초기조건 및 지하수 유동특성 모의결과를 기초로 해서 FG PRB 형태를 2가지로 구분해서 개념모델을 구성하였다.

첫 번째 Case 1은 지상과 지중에서 허용된 구간에서 PRB를 설치하고 나머지 오염 구간을 포획할 수 있는 funnel을 설치해서 PRB 구역으로 오염지하수가 유도되도록 일반적인 FG PRB 방식을 적용한다(Fig 6(a)).

두 번째 Case 2는 본 연구에서 제안하는 배수장치를 함께 가동하는 하이브리드 지하수 흐름 제어인 경우로써 개념모델에서 PRB 후단에 배수 경계(drain boundary) 조건을 설정하였다(Fig. 6(b)). FG 구역의 입력조건은 Table 2에 나타내었다. 두 가지 경우 모두 Fig. 6과 같이 funnel 내·외부에 가상의 관측정을 설정하여 수위 및 오염물질 농도의 변화를 확인하였다.

각 개념모델을 모의해서, 지하수 흐름방향, 지하수위 변화, 오염물질 확산 등 지하수 흐름 제어 효과를 비교하였다. 하이브리드 지하수 흐름제어의 가동이 필요할 경우에는 PRB 후단에서 배수장치가 일정 유량을 유지하면서 안

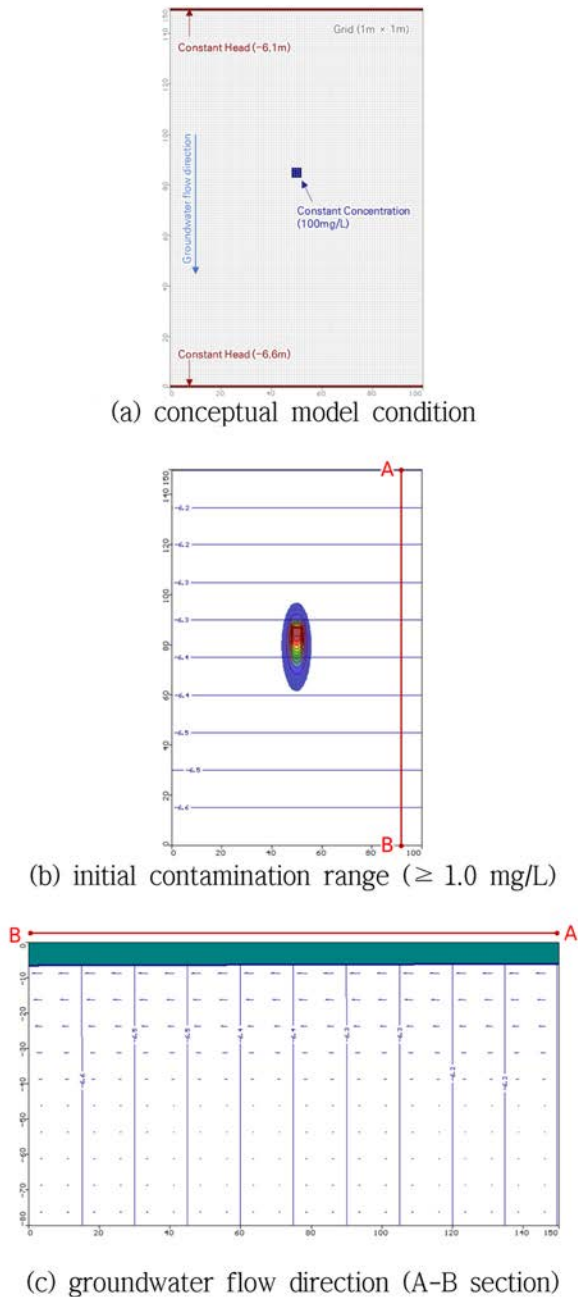


Fig. 5. Conceptual model condition and the results of steady-state simulation.

정적인 가동이 요구될 것이다. 그 배수장치는 안정적으로 계획된 지하수위 유지와 함께 계획된 지하수 수량을 배출 시켜야만 반응벽체가 정확하게 가동하게 될 것이다. 그러한 능력이 발휘될 수 있도록 단순 기계설비의 펌프 성능에 의존하는 것이 아니라 특별히 고안된 유량 조정조를 제안하였다.

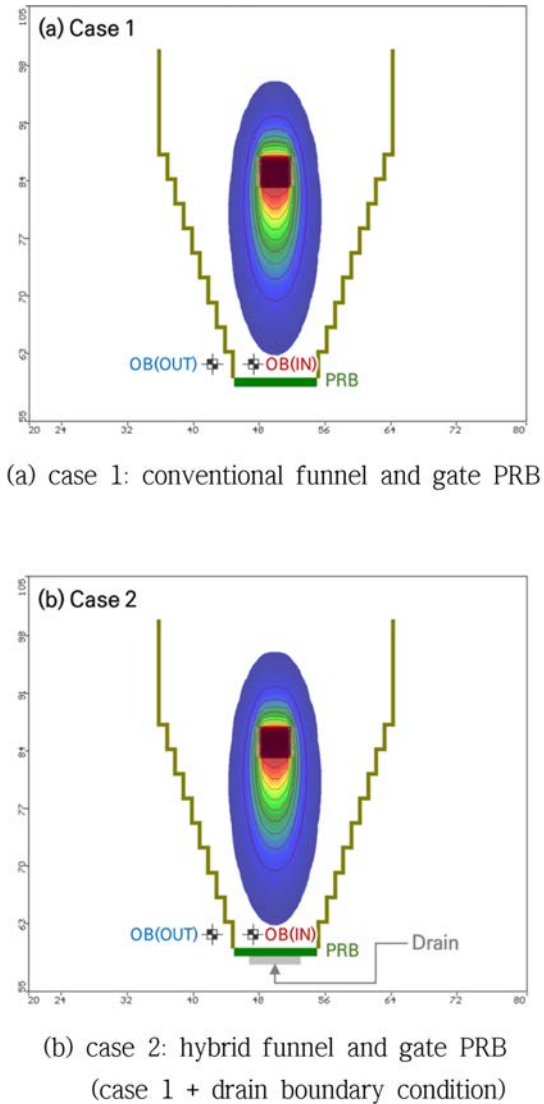


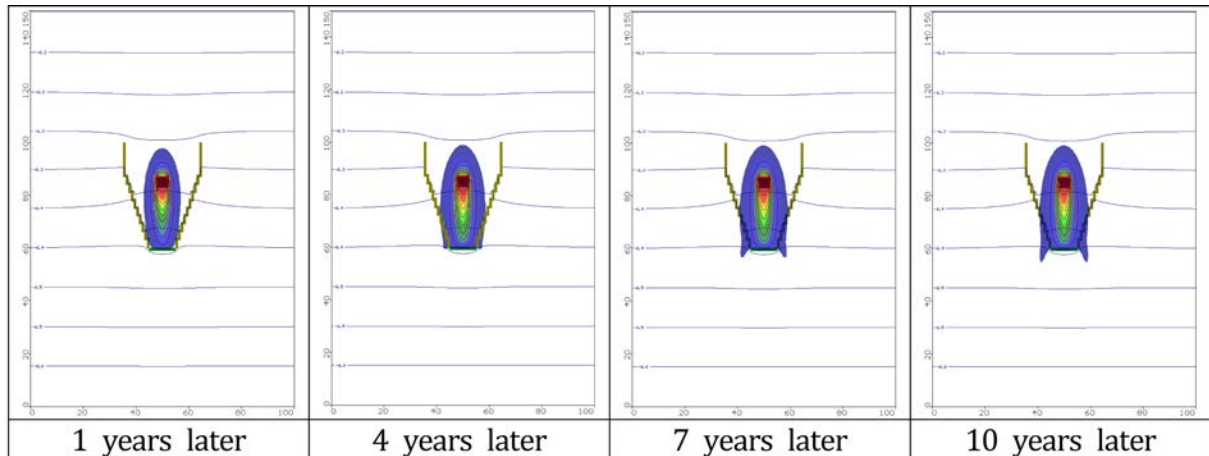
Fig. 6. Conceptual model type and monitoring well location.

3. 연구 결과

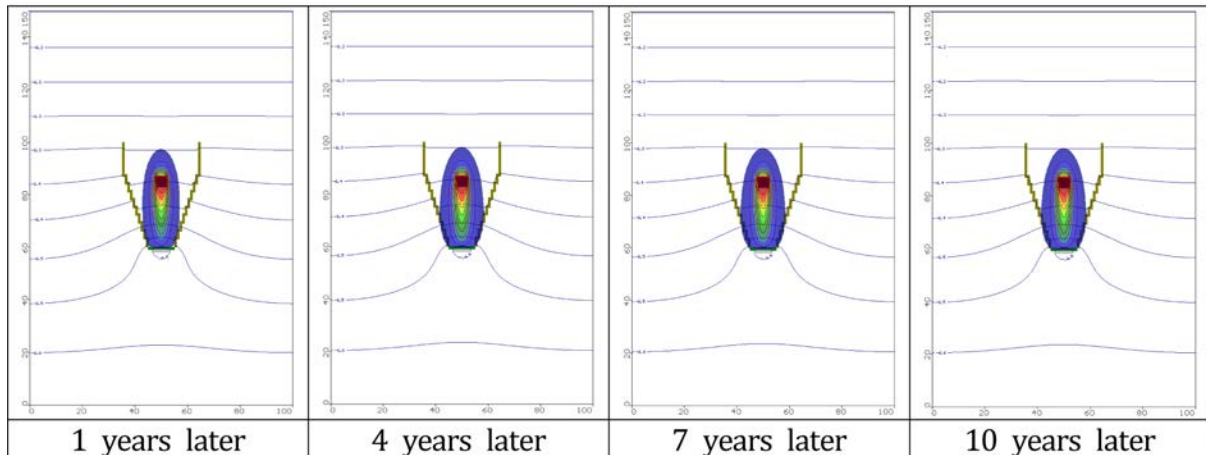
3.1. Case 1: conventional funnel and gate PRB

지하수 흐름 제어를 funnel에만 의존하는 일반적인 FG 방식으로 개념모델을 실행한 결과는 Fig. 7(a)과 같다. Funnel이 설치되고, PRB가 가동되기 시작하는 시점에서는 설계대로 오염지하수가 유도가 원활하고 확산방지가 제대로 진행되고 있다. 그러나 4년 이후부터 funnel 구역 일부에서 오염지하수가 유출되기 시작하는 것을 확인할 수 있다.

이렇게 funnel 일부 구역에서 유출되는 것은 funnel에 의해서 집수된 지하수의 유입 유량이 gate PRB에서 처리되고 배출되는 유량보다 많기 때문에 funnel 내부의 지하



(a) contaminants transport for Case 1



(b) contaminants transport for Case 2

Fig. 7. The simulation results of contaminants transport.

수위가 다소 상승한다. 그 결과로 앞서 제시된 Fig. 3과 같은 외부로 지하수가 유출되는 조건이 형성되는 것이다 (Fig. 8(b)).

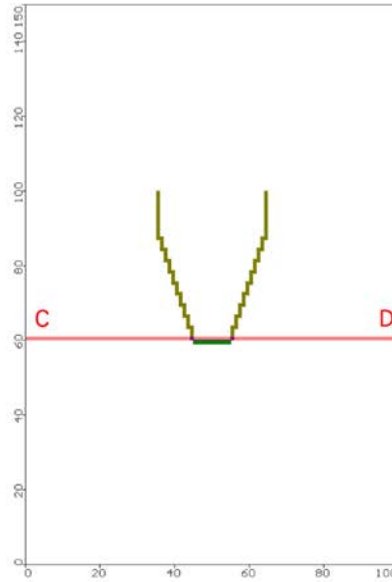
Funnel 주변 내부 및 외부에 관측정의 수위 및 오염물질 농도 변화를 나타낸 결과는 Fig. 9(a), Fig. 9(b)와 같다. 앞서 언급한 바와 같이 funnel 내부의 관측정은 PRB 가동 처음부터 지하수위가 상승하여 지속적으로 유지되는 것으로 나타났다. 앞서 언급한 funnel 외부로 오염된 지하수가 유출되는 조건에 따라 외부 관측정에서의 오염물질 농도는 약 4년 이후부터 수질기준으로 설정된 1 mg/L를 초과하여 최대 1.7 mg/L까지 검출되는 것으로 모의되었다.

만약 funnel을 통해 유도되는 유량이 gate 후단의 배수

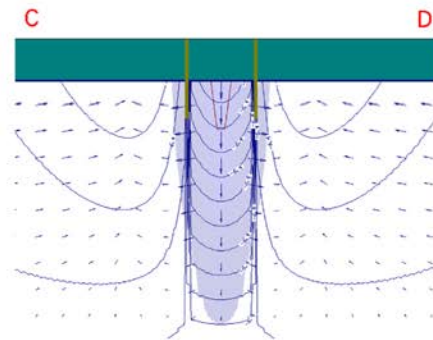
능력보다 훨씬 크거나 gate의 투수능력이 저하되어 배수 능력이 현저하게 줄어들 경우 funnel 내부의 지하수위 상승 속도가 가속화 되어 외부 유출되는 시점이 더 빨리 출현할 것이다. Gate의 투수능력이 저하되는 경우 반응벽체 내부에서 반응 후 발생하는 부산물에 의해 침전 또는 흡착으로 인해 발생할 수도 있다. 그래서 반응벽체 내부의 수위, 수질 관측을 통해 투수 능력을 관리하여야 한다 (Powell et al., 1998; Naidu and Birke, 2015; Zhang, 2020).

3.2. Case 2: Hybrid funnel and gate PRB

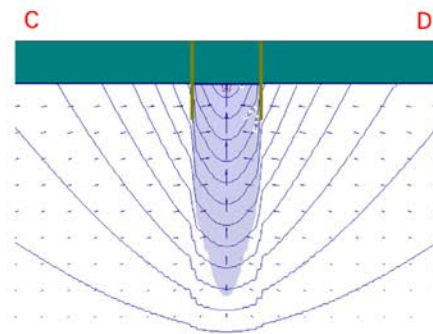
Gate 후단의 배수 능력은 자연적인 원지반의 특성이기



(a) The cross-section (C-D) of the groundwater flow direction



(b) The distribution of groundwater flow after 4 years for case 1



(c) The distribution of groundwater flow after 4 years for case 2

Fig. 8. The displacement of groundwater flow around funnel and gate.

때문에, 배수 능력을 인위적으로 키울 수는 없다. 더구나, 자연적인 원지반이 점토와 같은 배수능력이 아주 작은 지역을 회피하기 위해서 Drain Gate 방식의 연구가 진행되

기도 하였다(Naidu and Birke, 2015). Gate 배수 능력을 키우는 방법은 Gate의 규모를 키우는 것이다. 그러나 앞에서 설명한 것과 같이 연속형 반응벽체(continuous wall)

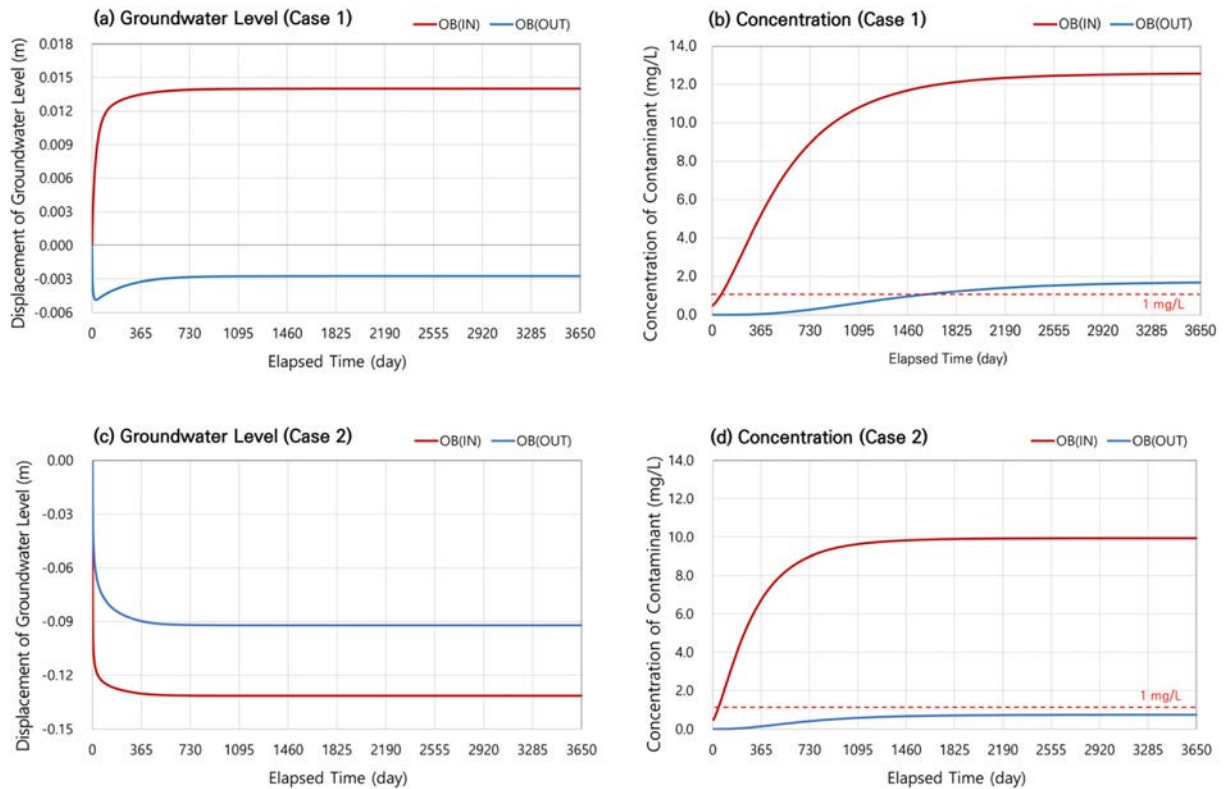


Fig. 9. The Change of groundwater level and contaminant concentration at the monitoring well located inside and outside the funnel.

형태의 시공이 현장에서 제약을 많이 가지는 것처럼 gate 규모를 무작정 키울 수는 없다. Gate 후단에서 수리전도도가 높은 배수층이 자연적으로 존재하는 것 외 gate 배수 능력을 키우는 또 다른 방법은 인위적으로 배수시키는 것이다. 그것이 본 연구에서 제안하는 Hybrid FG 방식이다. PRB 반응 매체 후단에 집수조를 만들어서 계획된 유량으로 선택적으로 배수시켜줌으로서 funnel 내부의 지하수위를 낮게 유지시켜 주는 것이다.

Fig. 7(b)는 funnel이 설치되고, PRB가 가동되기 시작하는 시점부터 모의기간 10년 동안 오염지하수가 원활하게 유도되고 처리되고 있음을 보여주고 있다.

PRB 설치 후 내부 관측정 및 외부 관측정의 수위 및 오염물질 농도 변화를 나타낸 결과는 Fig. 9(c), Fig. 9(d)와 같다. Drain 설정에 따른 지하수 배수로 인해 funnel 내·외부의 관측정에서의 지하수위는 PRB 운영 즉시 하강하여 지속적으로 유지하는 것으로 보여준다. 특히, 내부의 지하수위가 외부의 지하수위보다 더 낮게 유지되어 funnel 외부로의 오염지하수 유출을 억제하는 것으로 나타났다. 이에, funnel 외부 관측정에서 오염물질 농도는 수질기준으로 설정된 1 mg/L 이내(최대 0.75 mg/L)로 지속 유지되는 것으로 모의되었다.

Fig. 8(c)는 Case 1 Fig. 8(b)와 비교되는 결과로써 지하수 흐름 단면에서 오염지하수가 funnel 외부로 유출되지 않고, 안정적으로 gate로 유도되어 처리되는 것으로 모의되었다. PRB 공법이 수동적인 정화공법으로서, 오염지하수가 비오염지하수와 서로 섞이지 않으면서 흐름 제어하는 공법임을 고려하면 배수능력을 조절하는 Hybrid FG PRB 방식이 효과적임을 강조하고 싶다. 인위적으로 배수되는 지하수는 부지 내 적절한 장소까지 배관을 따라 배출하여도 좋고, 간섭받지 않는 특정 지역 지하에 다시 재주입하여도 된다.

4. 고 찰

본 연구에서는 인위적으로 배수시설을 갖춘 hybrid FG는 결국 gate의 배수능력을 키우는 방법으로서 선택적으로 가동하는 것이다. 여기서 배수시설이라 함은 양수정이 그 역할을 수행할 수 있다. 그러나 단순 양수정만의 가동은 PRB 내부에서 가동되기 위험요소가 많이 동반될 것이다. 왜냐하면 오염물질과 반응매질의 접촉 시간을 방해할 수도 있고, pH, DO, 지하수위 등 안정적인 접촉 환경을 제공하지 않는다면 PRB의 성능을 저해할 수 있다.

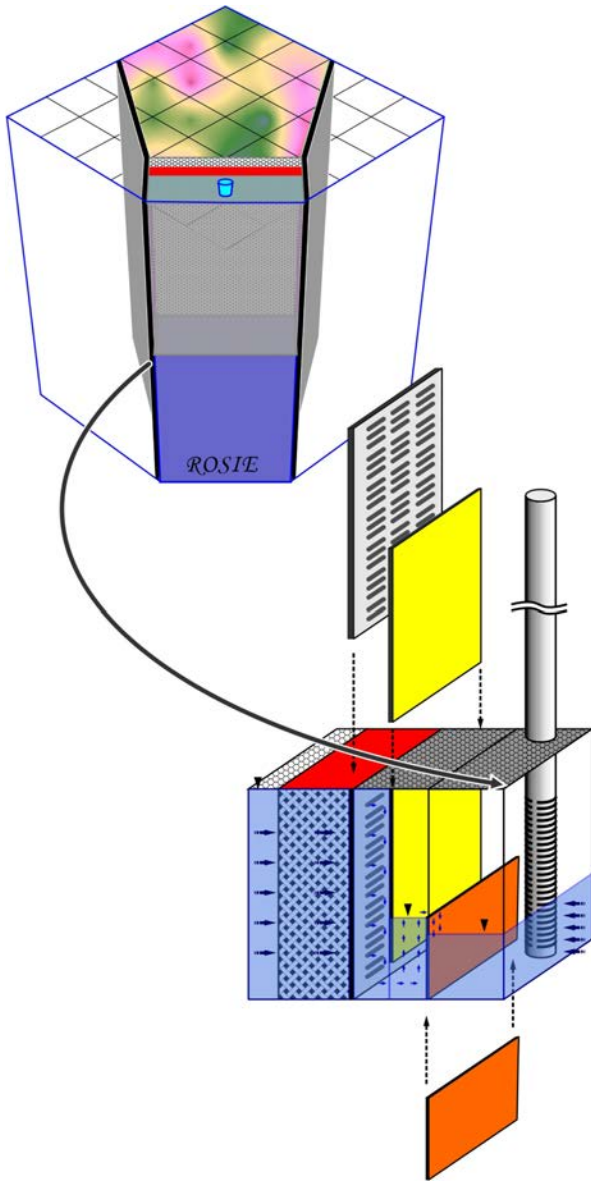


Fig. 10. Drainage device with continuous water level maintenance, sufficient residence time and drainage capacity.

PRB가 수동적인 정화공법임을 고려하면, 24시간 연속 지속적인 수위 유지와 체류시간 확보 및 원활한 배수능력을 갖추어야 한다. 따라서 본 연구에서 현장에서 안전하면서도 기계적 성능에 무리가 가지 않도록 배수장치를 Fig 10에 제안하였다. Fig. 10에서 제안한 배수장치의 특징과 장점은 아래와 같다.

- 월류를 이용한 일정 지하수위 유지
- 집수조를 이용하여 집수된 지하수를 양수하는 시스템
- 집수조를 이용하여 PRB 반응매질 및 오염물질에 연

결되지 않고 독립적인 배수장치

- 지중 매립시설로서 안전하게 관리될 수 있는 시설
- 대기 노출(산화 환경)을 차단한 시스템

본 연구에서 최종 제안된 배수시설의 활용도는 PRB 시스템 뿐만 아니라 다른 지하수 처리 시스템에도 접목될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어 양수를 통해 수리적 방벽(hydraulic barrier)을 설치하여 오염물질 확산을 유도하고자 할 때 다수의 양수정을 설치하는 것이 아니라 funnel을 설치한 다음 특정 구역으로 집수된 지하수를 양수할 때 적용할 수도 있다고 판단된다. 본 연구가 현장에서 적용되어 효율적인 오염지하수 정화 설계가 진행되기를 기대한다.

5. 요약 및 결론

최근 오염지하수 정화현장에서 적용되는 기술 동향을 살펴보면 in-situ 공법이 많이 적용되고 있고 그 중에서 PRB 공법이 주목받고 있는 기술이다. PRB 공법이 적용되는 형태는 여러 가지 있지만 그 중에서 지하수 흐름제어를 통하여 반응벽체와 접촉을 유도하는 FG 공법을 본 연구의 주제로 다루고 있다. Funnel 역할을 담당하는 차수벽 시공은 여러 가지 공법이 적용될 수 있는데 공통점은 지하수 흐름방향과 속도 등 수리지질학적 특성을 이용해서 반응매질이 위치한 gate 쪽으로 유도해야 한다는 것이다. 이 때 gate 쪽으로 유도된 지하수 유량이 원활하게 배출되지 않는다면 차수벽 내부에서 지하수위 상승이 유발될 수 있고, 그 상승된 지하수위는 차수벽 하부로 오염수가 유출될 수 있는 조건을 제공하게 된다. 따라서 물리적 차단 기능인 차수벽에만 의존하는 것이 아니라 gate 후단부에 위치한 배수시설을 가동하여 차수벽과 배수시설이 함께 작동하는 하이브리드형 FG 방식이 지하수 흐름 제어에 효과적인 것으로 확인되었다. 이 성능을 확인하기 위하여 MODFLOW를 통한 개념모델을 구축하였다. 그 개념모델에 입력되는 인자들은 우리나라 전국에 위치한 160개 오염부지 자료와 국가지하수관리측정망 특성인자들을 활용하였다. 개념모델을 실행한 결과, 차수벽만으로 지하수 흐름을 제어할 경우 gate에서 충분히 배출시키지 못한 경우 차수벽 내부에서 지하수위가 상승하였고, 그것과 함께 오염지하수가 차수벽 하부로 유출되는 것이 모의되었다. 하지만, gate에서 배수시설을 가동할 경우에는 차수벽 내부의 지하수위 상승현상도 없었고, 결국 오염지하수가 모두 반응벽체로 유도되면서 모두 처리되는 효과를 확

인하였다. Gate 후단부에 위치하는 배수시설은 지속적으로 일정한 유량으로 배수시킬 수 있도록 고안된 시스템이 본 연구에서 제안되었다. 본 연구에서 최종 제안된 배수 시설의 활용도는 PRB 시스템뿐 만 아니라 다른 지하수 처리 시스템에도 접목될 수 있기 때문에 효율적인 지하수 정화 설계에 활용되기를 기대한다.

감사의 글

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

References

- Anderson, E.I. and Mesa, E., 2006, The effects of vertical barrier walls on the hydraulic control of contaminated groundwater, *Advances in Water Resources*, **29**(1), 89-98.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Cherry, J.A., Gillham, R.W., and Robertson, W.D., 1995, Passive remediation of groundwater using in situ treatment curtains, *Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*, **2**(46), 1588-1607.
- Courcelles, B., 2014, Guidelines for preliminary design of funnel-and-gate reactive barriers, *Proceedings of the 4th international conference on environmental pollution and remediation*, Paper No. 81.
- Gavaskar, A.R., 1999, Design and construction techniques for permeable reactive barriers, *Journal of Hazardous Materials*, **68**(1-2), 41-71.
- Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., and Hicks, J., 2000, Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation, Battelle, Columbus, OH.
- Klammler, H. and Hatfield, H., 2009, Analytical solutions for the flow fields near funnel-and-gate reactive barriers with hydraulic losses, *Water Resources Research*, **45**(2), W02423, doi:10.1029/2008WR007452.
- Klammler, H., Hatfield, H., and Kacimov, A., 2010a, Analytical solutions for flow fields near drain-and-gate reactive barriers, *Ground Water*, **48**(3), 427-437.
- Klammler, H., Hatfield, H., and Kacimov, A., 2010b, Capture flows of funnel-and-gate reactive barriers without gravel packs, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, **69**, 319-330.
- Lai, C.K., Lo, I.M.C., and Surampalli, R., 2006, Configuration and construction of zero-valent iron reactive barriers, In Zero-Valent Iron Reactive Materials for Hazardous Waste and Inorganics Removal, *American Society of Civil Engineers*, Virginia, 224-242.
- McDonald, M. and Harbaugh, A., 1988, Techniques of Water-Resources Investigations Reports, A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model, Book 6, Chap A1., US Geological survey.
- Naidu, R. and Birke, V., 2015, Permeable Reactive Barrier: Sustainable Groundwater Remediation, CRC Press, Boca Raton, FL, Chapter 3.
- Powell, R.M., Blowes, D.W., Gillham, R.W., Schultz, D., Siva-vec, T., Puls, R.W., Vogan, J.L., Powell, P.D., and Landis, R., 1998, Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation. US EPA, Office of Research and Development Washington DC 20460, EPA/600/R-98/125.
- Richardson, J.P. and Nicklow, J.W., 2002, In situ permeable reactive barriers for groundwater contamination. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **11**(2), 241-268.
- Starr, R.C. and Cherry, J.A., 1994, In situ remediation of contaminated ground water: The funnel-and-gate system. *Ground Water*, **32**(3), 465-476.
- US EPA, 2020, Superfund Remedy Report 16th edition, EPA-542-R-20-001, Office of land and emergency management, July 2020.
- Zhang, L., Zhou, X., Pan, Y., Zeng, B., Zhu, D., and Jiang, H., 2020, Design of groundwater extraction in open cut foundation pit and simplified calculation of ground subsidence due to dewatering in sandy pebble soil strata, *Advances in Civil Engineering*, **2020**, ID 1046937.
- Zhang, C., 2020, Soil and Groundwater Remediation: Fundamentals, Practices and Sustainability, John Wiley & Sons, Inc., NJ, Chapter 12.