

## 암반대수층 지하수 인공함양 시험에 대한 열-수리 모델링

박대희<sup>1</sup> · 구민호<sup>1\*</sup> · 김용철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

### Hydro-thermal Numerical Simulation for an Artificial Recharge Test in a Fractured Rock Aquifer

Daehee Park<sup>1</sup> · Min-Ho Koo<sup>1\*</sup> · Yongcheol Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

#### ABSTRACT

An artificial recharge test aimed at investigating transport characteristics of the injected water plume in a fractured rock aquifer was conducted. The test used an injection well for injecting tap water whose temperature and electrical conductivity were different from the groundwater. Temporal and depth-wise variation of temperature and electrical conductivity was monitored in both the injection well and a nearby observation well. A highly permeable fracture zone acting as the major pathway of groundwater flow was distinctively revealed in the monitoring data. A finite element subsurface flow and transport simulator (FEFLOW) was used to investigate sensitivity of the transport process to associated aquifer parameters. Simulated results showed that aperture thickness of the fracture and the hydraulic gradient of groundwater highly affected spatio-temporal variation of temperature and electrical conductivity of the injected water plume. The study suggests that artificial recharge of colder water in a fractured rock aquifer could create a thermal plume persistent over a long period of time depending on hydro-thermal properties of the aquifer as well as the amount of injected water.

**Key words :** FEFLOW, Artificial recharge, Sensitivity analysis, Model calibration

#### 1. 서 론

최근 국내 수변 지역 충적대수층에서의 시설재배 및 수막재배면적이 늘어가고 있으며 그로 인한 지하수 이용량이 증가하고 있다. 지하수 조사 연보에 의하면 2008년 농업용수(전작, 답작, 원예)로 사용된 지하수의 양은 연간 약 15억 4364만 톤이었으며, 2013년도에는 연간 약 17억 9943만 톤으로 2008년 대비 약 16.5% 증가하였다(MOLTMA, 2008; MOLIT, 2013a). 수막재배는 지하수의 열을 이용해 비닐하우스를 난방하기 때문에 겨울철 다량의 지하수를 이용하게 되어 수막재배 농가의 밀도가 높은 지역에서의 동절기 지하수 고갈문제를 초래하고 있다(Kim et al.,

2012; Lee et al., 2014; Chang and Chung, 2014). 이와 같이 충적대수층의 지하수가 고갈됨에 따라 관정 개발 심도가 증가하여 암반대수층에까지 이르고 있으며, 암반대수층 내에 발달한 단층은 유체, 에너지, 용질 등이 이동하는데 있어서 중요한 역할을 하게 된다(Lopez and Smith, 1995).

대수층의 지하수가 고갈됨에 따라 지하수자원의 적극적인 확보 방법들이 주목받고 있다. 토양의 자정능력에 의해 오염물질이 여과 및 제거된 물을 취수하는 방법인 강변여과(River bank filtration), 인공적인 차수벽 시설을 통해 지하수를 저장하는 지하수댐(Ground water dam), 수처리된 물을 우물을 통해 대수층으로 직접 주입하여 지하

\*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

Received : 2015. 2. 16 Reviewed : 2015. 2. 25 Accepted : 2015. 2. 25

Discussion until : 2015. 4. 30

수 저장량을 증대시킨 후 필요 시 다시 회수하여 이용하는 방식인 인공함양 또는 ASR(Aquifer storage and recovery)이 있다. 그중 가장 적극적인 지하수자원 확보 방법인 인공함양 기법은 풍수기의 풍부한 수자원을 대수층에 인공적으로 주입하여 추가적으로 수자원을 확보하는 기술이다 (Bouwer, 2002). 그동안 많은 연구자들에 의해 인공함양 기법의 다양한 연구가 수행되어 왔다. Kim et al.(2005)은 균열 암반대수층에 대하여 지하수 인공함양 주입시험을 통해 주입압과 주입물의 상관관계에 의한 인공함양 주입 가능성을 평가하였고, Oh et al.(2011)은 MODFLOW를 이용하여 제주도 소재 한천유역을 대상으로 3차원 지하수 모델링을 통해 인공함양 평가 모델을 개발하였다.

최근 국내에서는 사용된 수막재배용수를 인공함양하여 재사용하는 기술이 개발되고 있다. 인공함양기법은 설치된 관정을 통해 물을 인위적으로 주입하여 지하수위를 유지·회복하기 때문에 최적의 주입정배치와 적정 주입량을 산정하는 것이 중요하다. 최근 Lee et al.(2014)은 지하수 모델을 이용해 인공함양정의 최적 위치를 평가하였으며, Oh(2014)는 저온의 지하수가 대수층에 인공함양되었을 경우 대수층의 온도변화를 모의하여 각 모델 인자들의 영향을 평가하였다. 이처럼 모델을 통하여 인공함양이 대수층에 미치는 영향을 평가하는 연구는 많이 이루어져 있지만 실제 현장에서 온도가 다른 물을 주입하였을 때 대수층에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 잘 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 암반대수층에 지하수와 다른 조건의 물을 주입하여 암반대수층에서의 심도별 수온 및 전기전도도 변화를 관측하였으며, 그 결과를 FEFLOW에 적용하여 수치모의를 수행하였다. 수치모델의 입력자료 중 불확실 변수를 조절하여 모델보정을 실시하였고, 보정된 모델을 통해 민감도 분석을 수행하여 인공함양 시 각 변수가 대수층에 미치는 영향에 대해 분석하고자 하였다.

## 2. 지하수 인공함양 시험

### 2.1. 연구 지역

공주대학교 자연과학대학 서쪽에 위치한 암반관정 2개소를 대상으로 인공함양 시험을 실시하였다. 시험 대상 관정은 공주지역 지하수 기초조사 사업을 목적으로 설치된 암반관정으로 주입정과 관측정간의 이격 거리는 약 5.4 m이며, 지하수위는 약 31 m 정도이다. 굴착 시 지질 검층 자료에 의하면 지표로부터 매립층(0~0.8 m), 풍화토(0.8~1.8 m), 풍화암(1.8~3.7 m 편마암), 기반암(3.7~100 m 편마

암 및 화강암) 순으로 분포하는 암반 대수층이다. 또한, 시추공 영상촬영 자료에 의하면 시험 대상 암반 대수층의 37.4 m, 45.2 m, 49.1 m, 70.6 m 심도에 파쇄대가 발달하여 지하수가 산출될 수 있는 구간이 존재하는 것으로 파악되었다(MOLIT, 2013b).

### 2.2. 시험 방법

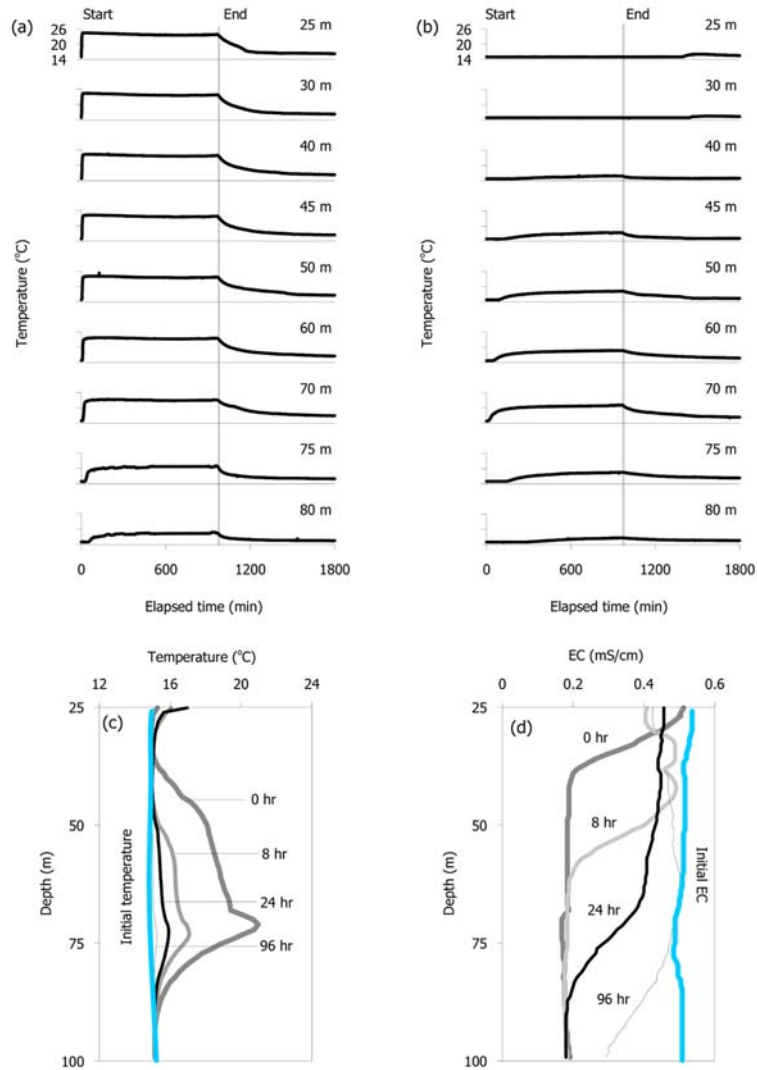
암반 대수층에 지하수와 조건이 다른 물이 주입되는 경우를 모의하기 위해 하절기와 동절기 총 2회에 걸쳐 인공함양 시험을 실시하였다. 지하수에 비해 상수도를 통해 공급되는 수돗물은 기온에 영향을 많이 받아 계절적 온도변화가 뚜렷하다. 따라서 시험 기간을 하절기(8월)와 동절기(2월)로 선정하여 대수층에 온수와 냉수가 주입되도록 하였다. 또한, 대수층 내부의 심도별 온도변화를 관측하기 위해 자동 계측기를 관정의 내부에 설치하여 시험을 수행하였다. 하절기의 경우 주입정과 관측정 모두 25 m부터 5 m 간격으로 자동 계측기를 설치하였다. 동절기의 경우 주입정은 40 m부터 5 m 간격으로, 관측정은 36 m부터 5 m 간격으로 자동 계측기를 설치하였으며, 관측정의 69 m와 73 m 심도에서는 전기전도도를 추가적으로 측정할 수 있도록 CTD DIVER를 설치하였다. 수돗물 주입이 중단된 후 회복되는 동안 검층을 실시하여 관정 내부의 수온 및 전기전도도 분포를 측정하였다.

지하수 인공함양 시험을 실시하기 전에 대수층의 전체적인 수온과 전기전도도의 분포를 알아보기 위해 검층을 수행하였다. 그 결과 수온은 약 15°C, 전기전도도는 약 0.5 mS/cm로 거의 모든 구간에서 일정한 값으로 나타났다. 검층 후 관정 내부에 자동 계측기를 설치한 뒤 수위가 안정되도록 충분히 기다린 후 하절기에는 약 24.5°C, 0.16 mS/cm의 수돗물을 51.2 m<sup>3</sup>/day로 주입하였으며, 동절기에는 약 7.6°C, 0.16 mS/cm의 수돗물을 49.5 m<sup>3</sup>/day로 주입하였다. 하절기의 경우 2013년 8월 28일부터 9월 2일까지 계측하였고, 동절기의 경우 2014년 2월 5일부터 2월 10일까지 계측하였다.

### 2.3. 시험 결과

#### 2.3.1. 하절기

Fig. 1a, b는 수돗물이 대수층에 주입되었을 때 각 심도별 시간에 따른 수온 및 전기전도도 변화이다. 주입정의 경우 약 70 m 심도까지 주입수에 의한 영향이 직접적으로 발생하여 수온의 변화가 크게 나타났다. 한편 심도 75 m부터는 수온 변화가 비교적 작았으며, 주입 초기의 수온 변화 경사가 완만하였다(Fig. 1a). 관측정의 경우



**Fig. 1.** Results of an artificial recharge test (summer): (a) temperature variations in the injection well and (b) in the observation well, (c) temperature logging, and (d) EC logging in the observation well.

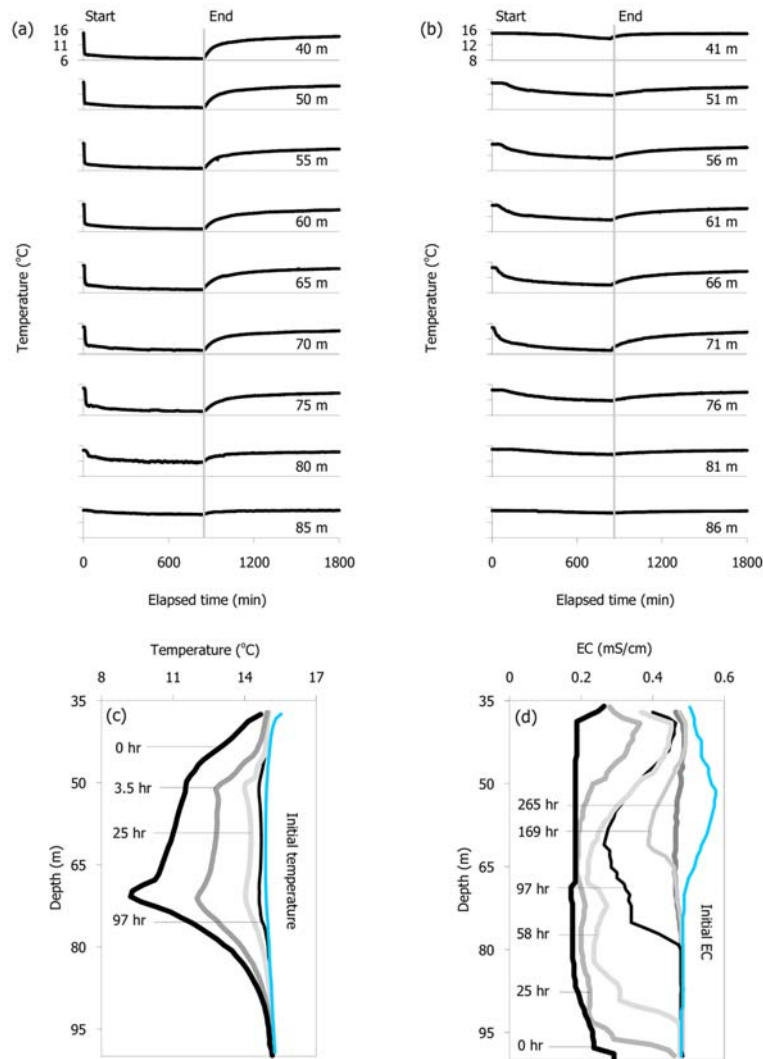
70 m 심도에서 가장 먼저 수온 변화가 관측되었으며, 70 m 심도에서 시작된 수온 변화는 주로 70 m 하부보다는 상부에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 1b).

Fig. 1c와 d는 수돗물 주입이 중단된 시점을 기준으로 8, 24, 96시간이 경과하였을 때 실시한 검층 결과이다. 온도 경우 약 71 m 심도에서 수온의 변화가 가장 컸으며, 추가적으로 50 m 부근에서 수온 변화가 비교적 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 공주지역 지하수 기초조사 보고서에 기재된 4개의 파쇄대 중 49.1 m, 70.6 m에 해당하는 심도로 사료된다. 전기전도도의 경우 수돗물 주입 중단 직후 실시한 검층 결과 거의 전 구간에 주입수에 의한 영향이 나타났다. 한편, 8시간이 지난 후 약 35 m와 43 m 부근에서 전기전도도의 회복이 빠르게 진행되는

것을 볼 수 있는데, 이는 주입 중단 직후 두 지점에서 공내로 지하수가 빠르게 유입되어 발생한 것이다. 따라서 이 두 심도는 앞서 언급된 4개의 파쇄대 중 37.4 m, 45.2 m에 해당하는 심도로 추정된다.

### 2.3.2. 동절기

Fig. 2a, b는 동절기 지하수 인공함양 시험 결과 각 심도별 시간에 따른 수온 및 전기전도도 변화이다. 주입정의 75 m 심도까지 주입수에 의한 수온 변화가 빠르게 발생하였으며, 그 하부로는 비교적 영향이 적었다(Fig. 2a). 관측정에서는 주입수에 의한 영향이 71 m 심도에서 가장 먼저 나타났으며, 수온 변화 또한 가장 컸다. 또한, 하절기 시험 결과와 마찬가지로 관정의 하부보다 상부에 더



**Fig. 2.** Results of an artificial recharge test (winter): (a) temperature variations in the injection well and (b) in the observation well, (c) temperature logging, and (d) EC logging in the observation well.

많은 영향을 미쳤다(Fig. 2b).

Fig. 2c, d는 수돗물 주입 중단 시점부터 검층을 7회 실시하여 도시한 것이다. 온도의 경우 71 m 부근에서 가장 큰 수온 변화를 보이며, 약 50 m 부근에서 수온 변화가 뚜렷한 구간이 추가적으로 존재한다. 이 심도는 하절기에 파악된 49.1 m, 70.6 m의 파쇄대로 사료된다(Fig. 2c). 전기전도도의 경우 수돗물 주입 시작 후 관정의 전 구간에 주입수의 영향이 발생했다. 시간이 지날수록 약 71 m와 39 m 부근에서 전기전도도의 회복이 시작 되는 것을 볼 수 있었는데, 이는 대수층의 지하수가 관정 내부로 유입되는 구간이다(Fig. 2d). 이 두 구간은 공주지역 지하수 기초조사 보고서에 언급된 70.6 m와 37.4 m의 파쇄대로 추측된다.

### 3. FEFLOW를 이용한 지하수 인공함양 시험 모의

#### 3.1. 개념 모델

##### 3.1.1. 모델 영역

동절기 지하수 인공함양 시험 결과를 바탕으로 개념 모델을 개발하였다. 균질 및 등방성의 저투수성 암반과 암반의 중심부를 수평으로 관통하는 고투수성의 파쇄대로 구성된 암반 대수층을 가정하였다(Fig. 3). 3차원 모델 영역의 크기는 열수리 모델에서는 100 m × 100 m × 13 m로 설정하였으나, 용질 거동 모델링 시 주입된 물의 영향이 모델의 좌우 경계에까지 영향을 미치는 것으로 확인되어 모델의 영역을 500 m × 200 m × 13 m로 확장하였다. 모델

영역에서 수직 방향의 크기 13 m는 임의로 선정된 값이며, 인공함양 시 모델영역의 중앙부 고투수성의 파쇄대 영역에서 발생하는 열-수리 흐름 또는 용질 거동의 영향이 암반에서 흡수되기에 충분한 거리이다. 모델의 좌우 경계에는 일정수두경계(Constant head boundary)로 설정하여 수두차가 발생하도록 하였다.

3.1.2. 대수층의 수리 및 열물성

연구 지역의 관정 굴착 시 수행된 장기 양수 및 회복 시험 결과(MOLIT, 2013)를 Jacob법에 적용하여 수리물성(투수량계수(T), 저유계수(S))을 산출하였다. 양수시험의 해석 결과  $T = 30.86 \text{ m}^2/\text{day}$ ,  $S = 0.039$ 로 나타났으며 회복 시험의 경우  $T = 42.84 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 나타났다. 모델의 입력 변수로는 두 값의 평균을 사용하였으며, 본 연구에서는 지하수의 주 이동 경로를 균열대로 가정하였기 때문에  $K = T/b$ 로 균열대의 두께(b)가 변화하면 수리전도도(K) 또한 변화하도록 설정하였다. 한편 균열대 상하부 암반의 경우 지하수 흐름이 거의 발생하지 않을 것으로 판단되어 매우 낮은 수리전도도와 저유계수를 가정하였다.

열물성의 측정을 위해 연구 지역의 시추코아 중 암종의 구분이 뚜렷한 3종류의 코아 샘플을 대상으로 2014년 4월 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 열물성 측정을 실시하였다. 코아 샘플의 경우 완전 포화시켜 대수층의 조건을 반영하였고, 측정에 용이하도록 세로로 절단하였다. 측정 장비는 미국의 Anter사에서 제작한 반매질 측정 장비인 Quickline-30으로 측정하였다.

열물성을 측정하기 전에 측정기기의 오차를 검증하였다. 표준 샘플을 이용하여 측정기기의 오차를 검증한 결과 5% 이내였기 때문에 측정 결과에 대한 문제가 없다고 판단된다.

열물성 측정에 있어 주의할 점은 샘플의 단면과 probe의 표면을 밀착시키는 과정에서 샘플과 probe의 사이에 열물성이 매우 낮은 공기가 들어가게 되면 측정값에 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서 공기가 들어가지 않도록 샘플과 probe 사이에 증류수를 뿌린 뒤 밀착시켜 측정하였다. 또한, 열물성 측정값의 정확도를 높이기 위해 총 3회

씩 측정하여 평균값을 사용하였다(Table 1).

열물성 측정 결과 편마상 화강암인 KJ-56시료와 KJ-99 시료에 비해 편마암인 KJ-85시료는 열전도도가 높게 측정되었다. 모델의 입력 변수를 결정하기 위해 주 균열대인 71 m 부근의 시추코아와 가장 유사한 암종으로 보이는 KJ-56(56 m), KJ-99(99 m)의 열물성을 선정하였다. 비교적 다른 암종으로 보이는 KJ-85(85 m)의 열물성은 제외하였다.

3.1.3. 초기조건과 경계조건

열-수리 모델에서는 초기 온도, 용질 거동 모델에서는 초기 염 농도를 모델의 초기조건으로 입력하였다. 열-수리 모델의 경우 측정된 지하수의 온도인 15°C를 전 구간에 입력하였으며, 용질 거동 모델의 경우 측정된 지하수의 전기전도도(0.5 mS/cm)의 값을 염농도값이라 가정하고 0.5 mg/l로 입력하였다. 실제 0.5 mS/cm의 지하수가 나타내는 염농도는 0.5 mg/l보다 훨씬 크다. 하지만 단위 변환에 따른 환산값을 사용하지 않더라도 모델링 해석 결과에는 영향을 주지 않으므로 현장에서 측정한 전기전도도 값을 그대로 사용하였다. 또한, 전체적인 수두분포를 초기값으로 입력하기 위해 좌우 경계에 수두차를 발생시킨 뒤 정류모형을 모사하여 그 결과를 부정류모델의 초기수두로 설정하였다.

모델의 좌우 경계면은 수두차가 존재하는 일정수두경계로 설정하였다. 모델의 위, 아래 경계는 물이 흐르지 않도록 불투수경계(No Flow Boundary)로 설정하였으며, 모델의 중심에 주입정을 설치하고 하류로 5.4 m 이격시켜 관 측정을 설치하였다. 50 m<sup>3</sup>/day로 0~0.6일간 7.5°C, 0.17 mg/l의 물이 균열대가 위치한 층에 주입되도록 하였으며, 0.6~5일까지 회복되도록 하였다(Fig. 3).

3.2. 모델 보정

개발된 개념 모델을 이용하여 모델 보정을 실시하였다. 보정은 불확실한 입력 변수인 균열대의 공극률(n), 균열대의 두께, 수두구배(dh/dl) 및 분산지수( $\alpha$ )를 변화시키며 관

Table 1. Thermal properties of core samples

Thermal property	Samples	1	2	3	Mean ± Std Error
$K_T$ (W/mK)	KJ-56	3.51	3.42	3.39	3.44 ± 0.04
	KJ-85	4.54	4.23	4.16	4.31 ± 0.12
	KJ-99	3.73	3.61	3.59	3.64 ± 0.04
C (MJ/m <sup>3</sup> K)	KJ-56	2.36	2.35	2.35	2.35 ± 0
	KJ-85	2.39	2.39	2.39	2.39 ± 0
	KJ-99	2.33	2.30	2.27	2.30 ± 0.02

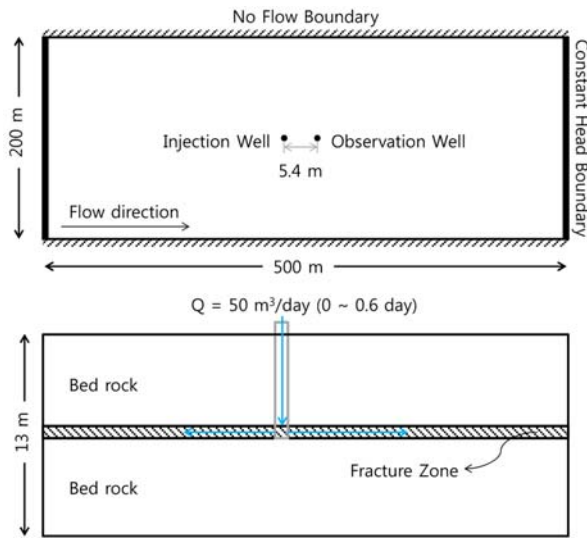


Fig. 3. Plan cross section views of the conceptual model.

측값에 모델링 결과를 일치시키는 과정으로 시행착오법을 이용하였다. 모델 보정에 사용된 관측값은 온도의 경우 주입정의 70 m와 관측정의 71 m, 전기전도도의 경우 관측정 69 m 심도의 데이터를 이용하였다.

3.2.1. 균열대의 두께 및 공극률

본 연구에서는 앞서 산출된 투수량계수를 균열대의 수리물성으로 가정하였기 때문에 균열대의 두께가 변화함에 따라 균열대의 수리전도도가 변화하도록 하였다. 균열대의 두께와 공극률의 경우 모델링 초기값으로 임의의 값을 입력하여 보정을 실시하였다. 열-수리 모델의 경우 0.002 m의 두께와 1의 공극률로 보정되어 약 0.002 m의 빈 공간으로 보정되었다. 용질 거동 모델의 경우 0.2 m의 두께와 0.05의 공극률로 보정되었다.

균열대를 기준으로 상하부에 위치하는 암반의 두께 설정 또한 중요한 변수 중 하나로 작용하였다. 수치모델링의 경우 반복적인 계산을 통하여 결과를 도출하게 되는데, 암반을 구성하는 각 층(layer)의 두께가 너무 두껍거나 두께의 차이가 급격하게 커지면 계산과정에서 오차가 발생하기 쉽다. 따라서 등 간격으로 설정하는 방법보다 점진적으로 두께가 증가하도록 설정하는 방법이 계산과정에서의 오차를 줄일 수 있는 방법이라고 판단하여 암반을 구성하는 층의 두께가 점진적으로 변화하도록 하였다.

3.2.2. 수두구배

수두구배의 경우 지하수 인공함양 시험 전 측정된 주입정과 관측정의 수두차와 두 관정간의 이격 거리로부터 산

Table 2. Calibrated parameters from the hydro-thermal model

Hydraulic properties				
	Bed rock		Fracture zone	
K (m/s)	$1 \times 10^{-12}$		0.182	
Storativity	0.005		0.039	
Storage compressibility ( $m^{-1}$ )	$1 \times 10^{-4}$		$1 \times 10^{-4}$	
Thermal properties				
Porosity	0.01		1*	
$\alpha_L$ (m)	10		10*	
$\alpha_T$ (m)	1		1	
	Solid	Fluid	Solid	Fluid
Heat capacity ( $MJ/m^3K$ )	2.33	4.18 <sup>(1)</sup>	4.18	4.18 <sup>(1)</sup>
Thermal conductivity ( $W/mK$ )	3.54	0.59 <sup>(1)</sup>	0.6	0.59 <sup>(1)</sup>
Hydraulic gradient			0.08*	
b (m)			0.002*	

(1) Banks(2008)

\* : Calibrated parameters

출하여 초기값으로 입력하였다. 두 관정간의 수두차는 0.02 m, 이격 거리는 5.4 m로 수두구배는 약 0.0037이었다. 하지만 열-수리 모델 보정 시 수두구배가 너무 작아 관측값과 잘 맞지 않았다. 따라서 수두구배를 점차 증가시키며 보정을 수행한 결과 0.08로 보정되었다. 한편, 용질 거동 모델의 경우 열-수리 모델과는 반대로 수두구배가 작아야 모델값이 관측값에 가까워져 0.004로 보정되었다.

3.2.3. 분산지수

분산지수는 규모 의존성에 의해 용질의 이동거리가 커질수록 분산지수가 증가하게 된다. Gelhar et al.(1992)에 의하면 중분산지수는 실험규모 또는 용질 이동 거리의 약 1/10이며, 횡분산지수는 중분산지수의 약 1/10 정도이다. 따라서 본 연구에서는 시험의 규모 또는 모델 영역의 크기를 고려하여 모델 보정의 초기값으로 중분산지수와 횡분산지수를 각각 50 m와 5 m로 가정하였다. 분산지수의 경우 모델 결과의 세밀한 부분을 조절하는데 있어서 용이하였기 때문에 균열대의 두께와 균열대의 공극률 및 수두구배로 전체적인 모델 보정을 실시하고 분산지수로 세밀한 부분을 보정하였다. 열-수리 모델의 경우 중분산지수 10 m, 횡분산지수 1 m로 보정되었으며, 용질 거동 모델의 경우 중분산지수 5 m, 횡분산지수 0.5 m로 보정되었다. 모델 보정 결과는 Table 2, 3 및 Fig. 4와 같다.

3.3. 민감도 분석

보정된 모델을 이용하여 불확실 변수인 균열대의 두께,

**Table 3.** Calibrated parameters from the solute transport model

Hydraulic properties		
	Bed rock	Fracture zone
K (m/s)	$1 \times 10^{-12}$	$1.82 \times 10^{-3}$
Storativity	0.005	0.039
Storage compressibility ( $m^{-1}$ )	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
Solute transport properties		
Porosity	0.01	0.05*
$\alpha_L$ (m)	5	5*
$\alpha_T$ (m)	0.5	0.5
Hydraulic gradient		0.004*
b (m)		0.2*

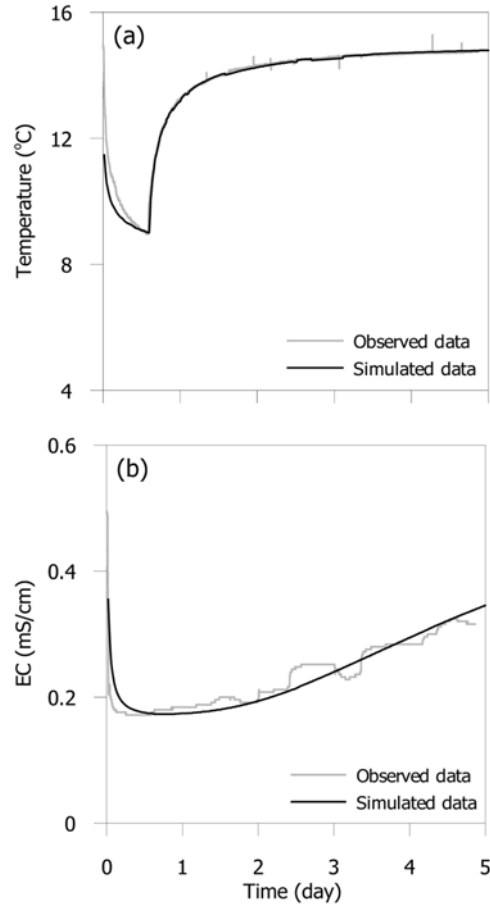
\* : Calibrated parameters

균열대의 공극률, 수두구배 및 분산지수에 대하여 민감도 분석을 실시하였다(Table 4).

3.3.1. 온도

Fig. 5는 열-수리 모델의 불확실 변수에 대한 민감도 분석 결과이다. 균열대의 두께를 감소시킨 경우와 수두구배가 증가한 경우 회복되는 속도가 증가하였으며, 주입기간 동안 주입수에 의한 온도 변화가 컸다(Fig. 5a, b). 한편, 균열대의 공극률을 변화시킨 결과 주입정과 관측정의 온도변화에는 영향이 거의 없었다(Fig. 5c). 또한, 분산지수가 증가할수록 주입된 물의 영향이 덜 발생하였고, 회복되는 속도가 빠른 것으로 나타났다(Fig. 5d).

Fig. 6은 균열대 심도에서 주입정과 관측정이 위치한 지점의 수온 분포 단면도이다. 0 m에는 주입정이 위치하며, 지하수의 흐름 방향은 왼쪽에서 오른쪽이다. Fig. 6a, c, e, g는 주입 중단 시점인 0.6일이며, Fig. 6b, d, f, h는 주입 중단 후 2.4일이 경과한 시점이다. 균열대의 두께가 감소함에 따라 주입수가 퍼져나간 거리가 증가하였으며, 이는 균열대의 공간이 감소하여 동일한 양의 물이 주입되



**Fig. 4.** Results of the model calibration: (a) temperature in the observation well and (b) EC in the observation well.

었을 경우 빠른 속도로 멀리 퍼져나갔기 때문이다(Fig. 6a). 수두구배가 증가함에 따라 지하수의 유속( $v$ )이 증가하여 주입수가 하류로 비대칭하여 흘러간 것을 볼 수 있다(Fig. 6c). 또한, 지하수의 유속은 두께에 반비례하고 수두구배에 정비례하여 균열대의 두께가 얇아질수록, 수두구배가 커질수록 증가하게 된다. 따라서 균열대의 두께가 감소하고, 수두구배가 증가함에 따라 지하수의 유속이 증

**Table 4.** Model parameters used in the sensitivity analysis

	b (m)	n	dh/dl	$\alpha_L$ (m)
Hydro-thermal model	0.002, 0.01, 0.1	1	0.08	10
	0.002	0.1, 0.5, 1	0.08	10
	0.002	1	0.02, 0.04, 0.08	10
	0.002	1	0.08	1, 10, 20
Solute transport model	0.1, 0.2, 0.4	0.05	0.004	5
	0.2	0.05, 0.1, 0.5	0.004	5
	0.2	0.05	0.004, 0.02, 0.04	5
	0.2	0.05	0.004	1, 5, 10

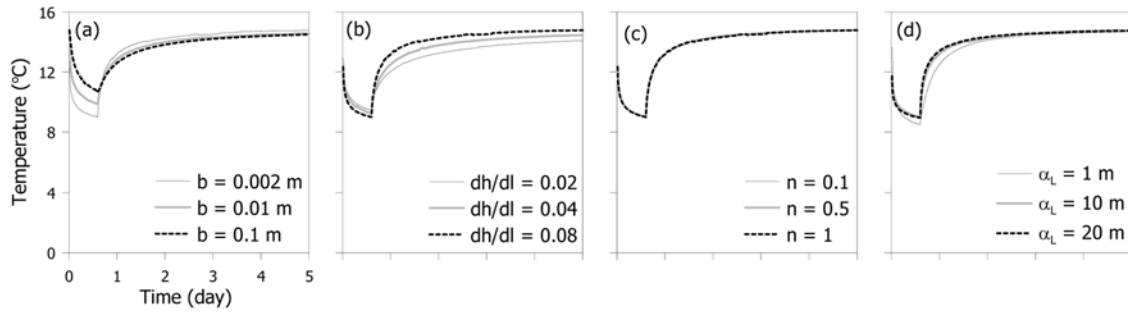


Fig. 5. Variations of groundwater temperature in the observation well: effects of (a) thickness of fracture zone, (b) hydraulic gradient, (c) porosity of fracture zone, and (d) longitudinal dispersivity.

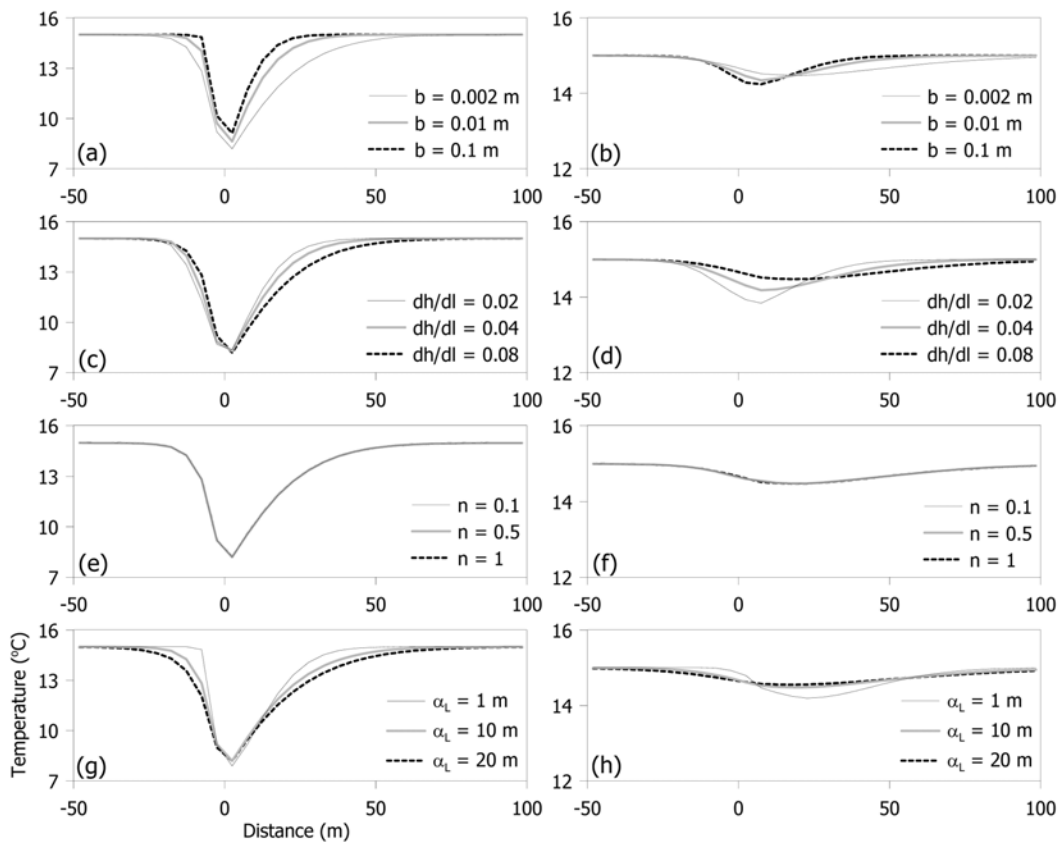


Fig. 6. Cross sectional views of groundwater temperature: effects of (a) thickness of fracture zone ( $t = 0.6$  day), (b) thickness of fracture zone ( $t = 3.0$ ), (c) hydraulic gradient ( $t = 0.6$ ), (d) hydraulic gradient ( $t = 3.0$ ), (e) porosity of fracture zone ( $t = 0.6$ ), (f) porosity of fracture zone ( $t = 3.0$ ), (g) longitudinal dispersivity ( $t = 0.6$ ), and (h) longitudinal dispersivity ( $t = 3.0$ ).

가하여 회복되는 속도가 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6b, d). 한편, 균열대의 공극률이 변화하여도 수온 분포의 변화에는 영향을 미치지 않았다(Fig. 6e, f). 분산지수가 증가할수록 주입수가 퍼져나간 거리가 증가하였고, 회복되는 속도 또한 증가하였다(Fig. 6g, h).

### 3.3.2. 전기전도도

Fig. 7은 용질 거동 모델에서 불확실한 변수를 변화시키며 실시한 민감도 분석 결과이다. 균열대의 두께와 공극률을 감소시킨 경우와 수두구배를 증가시킨 결과 주입수에 의해 변화한 전기전도도가 빠르게 회복되었다(Fig. 7a, b, c). 또한, 분산지수를 증가시킨 결과 주입수의 영향



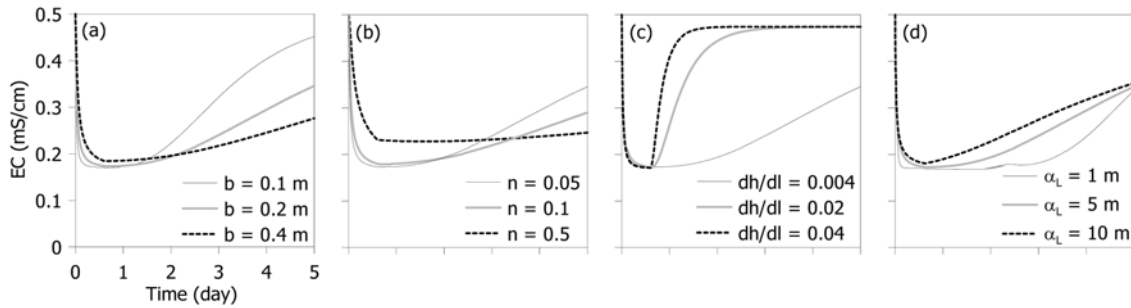


Fig. 7. Variations of EC in the observation well: effects of (a) thickness of fracture zone, (b) porosity of fracture zone, (c) hydraulic gradient, and (d) longitudinal dispersivity.

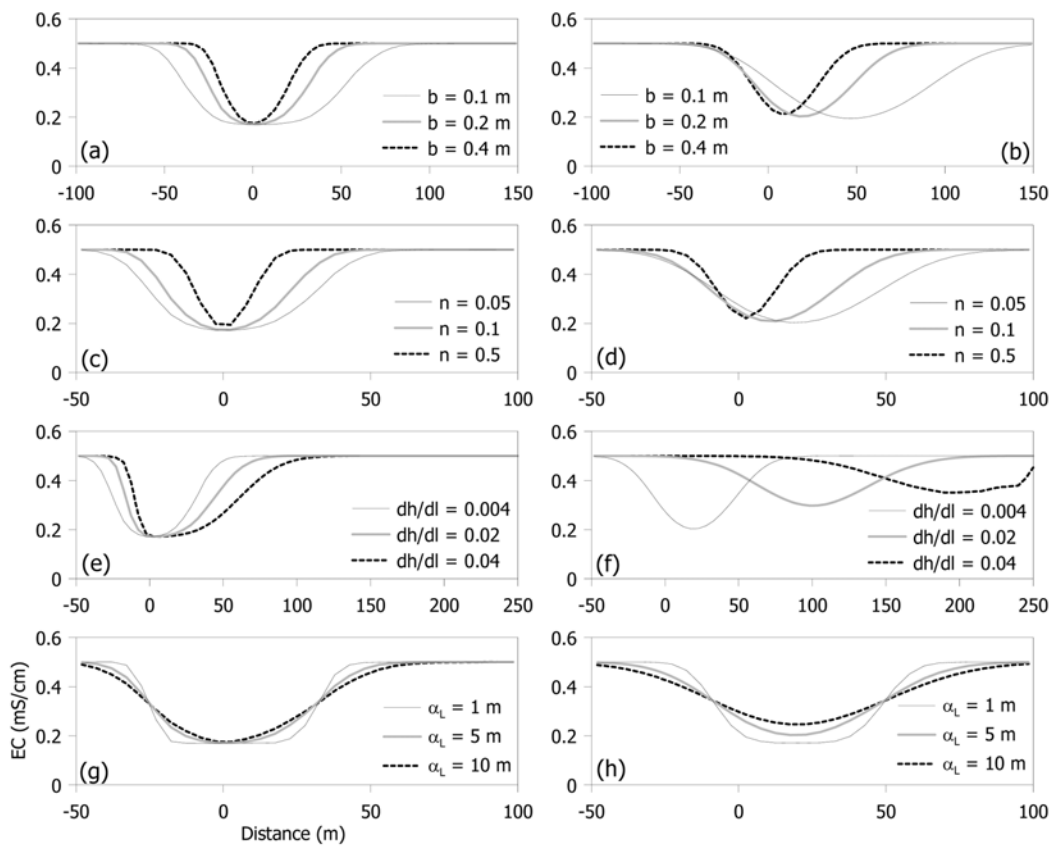


Fig. 8. Cross sectional views of EC: effects of (a) thickness of fracture zone ( $t = 0.6$  day), (b) thickness of fracture zone ( $t = 3.0$ ), (c) porosity of fracture zone ( $t = 0.6$ ), (d) porosity of fracture zone ( $t = 3.0$ ), (e) hydraulic gradient ( $t = 0.6$ ), (f) hydraulic gradient ( $t = 3.0$ ), (g) longitudinal dispersivity ( $t = 0.6$ ), and (h) longitudinal dispersivity ( $t = 3.0$ ).

이 덜 발생하였으며, 주입 중단 후 회복되는 속도가 증가하였다. 한편, 종분산지수가 1 m일 때 2일과 3일 사이에 그래프가 매끄럽지 못한 부분이 있는데, 이는 분산지수가 매우 작아 모델링 계산과정에서 발생한 오차인 것으로 추정된다(Fig. 7d).

Fig. 8은 균열대 심도에서 주입정과 관측정이 위치한 지점의 전기전도도 분포 단면도이다. 균열대의 두께와 공극

률이 감소함에 따라 주입수에 의한 영향 범위가 크게 나타나는 것을 볼 수 있었으며(Fig. 8a, c), 수두구배가 증가함에 따라 지하수의 유속이 증가하여 주입수에 의한 영향이 비대칭적으로 하류 방향으로 크게 나타났다(Fig. 8e). 균열대의 두께와 공극률은 반비례, 수두구배는 정비례하여 지하수의 유속에 영향을 미친다. 이에 따라 균열대의 두께와 공극률이 감소하고 수두구배가 증가할수록 지하수

의 유속이 증가하여 주입수에 의해 변화한 지하수가 하류로 빠르게 이동하였다. 또한, 용질의 거동에 있어서 지하수의 유속이 증가함에 따라 분산지수와 지하수 유속의 곱으로 이루어진 역학적 분산과 확산계수의 합인 분산계수가 증가하는 효과가 발생한다. 따라서 지하수의 유속이 증가함에 따라 주입수에 의해 변화한 대수층의 지하수가 하류로 빠르게 이동함과 동시에 전기전도도 분포가 넓은 범위에 높은 농도로 퍼지게 된다(Fig. 8b, d, f). 한편, 분산지수가 증가할수록 용질이 매질을 통해 더 많이 퍼져나가기 때문에 주입된 물의 영향이 완만한 경사로 넓게 퍼지며, 회복속도 또한 빠르다(Fig. 8g, h).

#### 4. 결론 및 고찰

지하수와 수온, 수질이 다른 수돗물을 관정에 주입하고 균열암반 대수층에서의 수온 및 전기전도도 변화를 관측하는 인공함양시험을 수행하였다. FEFLOW를 이용하여 열-수리 및 용질거동 모델을 개발하였으며 현장시험 결과를 적용하여 모델 보정을 실시하였고, 보정된 모델을 이용하여 민감도 분석을 수행하였다.

##### 4.1. 인공함양 시험

하절기 시험 결과 주입정의 70 m와 75 m 사이에 주입된 물이 대수층으로 빠져나가는 구간이 존재하였으며, 대수층을 통해 관측정으로 유입되는 구간이 약 70 m 부근에 존재하였다. 동절기 시험 또한 마찬가지로 주입정의 75 m 심도에서 대수층으로 유출되는 구간을 파악하였으며, 관측정의 71 m 심도에서 주입된 물이 관정 내부로 유입되었다. 검증 결과를 분석해 보면 관측정의 35 m, 39 m, 43 m, 50 m, 71 m의 심도에서 수온 및 전기전도도가 크게 변화하였거나 빠르게 회복되는 것을 볼 수 있었다. 이는 공주지역 지하수 기초조사 보고서에 기재된 4개의 파쇄대와 근사한 심도로 판단되며, 특히 71 m 심도는 지하수의 유동이 가장 활발한 주 균열대로 사료된다. 이처럼 지하수 인공함양 시험을 통하여 암반 대수층에서 관정과 관정 사이의 연결성과 그 심도를 간편하고 정확하게 파악할 수 있었다.

##### 4.2. 민감도 분석

지하수 인공함양 시험 결과를 바탕으로 생성된 모델을 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과 균열대의 두께와 공극률은 균열대 내부의 공간과 지하수의 유속에 영향을 미치기 때문에 인공함양에 의한 영향 범위와 회복되는 속도에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한,

수두구배의 경우 지하수의 유속에 정비례하여 영향을 미치기 때문에 인공함양에 의해 변화한 대수층의 영역이 이동하는 속도와 수리분산에 의해 퍼져나가는 정도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 분산지수의 경우 인공함양에 의한 영향 범위와 전체적인 모양을 결정하는 것으로 나타났다. 한편, 열-수리 모델의 경우 균열대의 공극률 변화에 민감하지 않은 것으로 나타났다. 이는 균열대의 두께가 매우 얇게 보정되어 공극률의 변화에 의한 영향이 매우 적으며, 전기전도도와는 달리 열은 주변 암석과의 교환으로 인해 열이 전도되기 때문인 것으로 사료된다.

모델 보정 과정에서 열-수리 모델과 용질 거동 모델이 동일 변수로 보정되지 않고 서로 다른 변수로 보정되었다. 그 이유는 두 가지로 추정해 볼 수 있었는데 첫 번째로 열-수리 모델의 경우 71 m 심도의 수온 변화 데이터를 기준으로 모델 보정을 실시하였고, 용질 거동 모델의 경우 69 m 심도의 전기전도도 변화 데이터를 기준으로 모델을 보정하였기 때문인 것으로 추측된다. 두 번째로 관정 내부에 갇혀있는 물 때문인 것으로 사료된다. 일단 관정 내부로 들어온 물은 관정 안에 갇히게 되어 균열대를 통해 쉽게 빠져나가지 못하게 된다. 하지만 모델에서는 이러한 점을 모사할 수 없었기 때문에 실제 현장을 완벽히 반영하지 못했다. 따라서 주 균열대로 추정되는 71 m 심도의 전기전도도 데이터와 관정과 관정 내부의 물 흐름을 모델로 모사할 수 있었다면 더욱 정확한 모델 보정 결과가 도출되었을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Banks, D., 2008, An introduction to thermogeology : Ground source heating and cooling, Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 339.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater : Hydrogeology and engineering, *J. Hydrogeol.*, **10**, 121-142.
- Chang, S. and Chung, I., 2014, Analysis of Groundwater Variations using the Relationship Between Groundwater use and Daily Minimum Temperature in a Water Curtain Cultivation Site, *J. of Engineering Geol.*, **24**(2), 217-225.

- Gelhar, L.W., Welty, C., and Rehfeldt, K.R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, **28**(7), 1955-1974.
- Kim, H., Kim, M., and Suk, H., 2005, Assesment of storage property of fractured rock aquifer by the artificial recharge method, *J. of the Geological Society of Korea*, **41**(3), 415-426.
- Kim, N., Lee, J., Chung, I., and Kim, C., 2012, Change of Groundwater-Streamflow Interaction according to Groundwater Abstraction in a Green House Land, *J. Korea Water Resources Association*, **45**(10), 1051-1067.
- Lee, H., Koo, M., and Kim, Y., 2014, Determining Optimal Locations of an Artificial Recharge Well using an Optimization-coupled Groundwater Flow Model, *J. Soil & Groundwater Env.*, **19**(3), 66-81.
- Lopez, D.L. and Smith, L., 1995, Fluid flow in fault zones : Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow, *Water Resour. Res.*, **31**(6), 1489-1503.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2013a, Annual report for groundwater development, utilization, and monitoring, 136 p.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2013b, Report on groundwater basic survey of Kongju area.
- MOLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2008, Annual report for groundwater development, utilization, and monitoring, 154 p.
- Oh, J., 2014, Modeling groundwater temperature in the artificial recharge system: Sensitivity analysis, Master thesis, Kongju National University, Korea.
- Oh, S., Koo, M., and Kim, Y., 2011, Modeling the artificial recharge in reservoir of Hanchun drainage area, Jeju island in Korea, *KSEG Conference*, **16**(6), 34-45.