

수평 방사형 집수정 활용 강변여과 취수 수치 분석

김형수 · 정재훈*

한국수자원공사 수자원연구원

Numerical Analysis of Horizontal Collector Well in Riverbank Filtration

Hyoung-Soo Kim · Jae-Hoon Jeong*

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

Groundwater flow due to intake of horizontal collector well in riverbank filtration site was analyzed by use of numerical groundwater modeling program (FEFLOW 5.1). Drawdowns of groundwater table nearby collector well were evaluated according to variations of several conditions; pumping rate, thickness of aquifer, offset distance from well to shore line of stream, conductance of streambed. It is observed that the drawdowns of groundwater table are clearly changed according to the variations of these conditions. The results of sensitive analysis shows that the thickness of alluvial aquifer and the offset distance are more sensitive than the conductance of streambed in evaluation of drawdown. This result implies that hydrogeological conditions, as like thickness of aquifer and its distribution in the site are important factors in site selection and evaluating the availability of riverbank filtration intake using horizontal collector well system. It is also revealed that numerical modeling using FEFLOW with 1-D discrete element feature can give efficient quantitative evaluation of horizontal collector well and estimation of availability of riverbank filtration site.

Key words : Riverbank filtration (RBF), Horizontal collector well, Groundwater numerical modeling, Sensitivity analysis, Availability of groundwater, Riverbed conductance, FEFLOW.

요 약 문

지하수 유동 수치 모사 프로그램(FEFLOW 5.1)을 이용하여 수평 방사형 집수정 취수에 따른 강변여과 지역의 지하수 유동을 분석하였다. 양수량, 대수층 두께, 취수정과 하천 사이의 이격거리, 하천 바닥의 투수 능력(Conductance) 등의 조건 변화에 따른 집수정 인접 대수층의 수위강하가 계산되었다. 이들 조건 변화에 따라 지하수위 강하는 뚜렷한 변화를 보여주었다. 민감도 분석 결과, 대수층의 두께와 취수정과 하천 사이의 이격거리가 하천 바닥의 수리 전도에 비해 지하수위 강하에 더 민감하게 영향을 주는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 수평 방사형 집수정을 통한 강변여과 취수 가능지역을 선정하고 그 개발량을 추정할 때, 총적 대수층의 두께와 분포 특성이 중요한 요소임을 시사한다. 또한 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 수치 모사는 효과적으로 수평 방사형 집수정의 정량 평가와 강변여과 현장의 개발 가능량 추정을 할 수 있는 도구임이 밝혀졌다.

주제어 : 강변여과, 수평 방사형 집수정, 지하수 수치 모델링, 민감도 분석, 지하수 개발 가능량, 하천 바닥 수리 전도 능력, FEFLOW.

*Corresponding author : jaehoon76@kwater.co.kr

원고접수일 : 2008. 3. 26 심사일 : 2008. 4. 10 게재승인일 : 2009. 1. 16

질의 및 토의 : 2009. 4. 30 까지

1. 서 론

강변여과(Riverbank filtration)는 하천 인접에서 정호의 양수를 통해 자연 지층을 통과한 하천수와 배후의 지하수를 취수하는 방식이다(김형수 등, 1999; 김형수와 석희준, 2004). 이러한 취수 과정을 통해 하천수는 자연 지층에 의한 물리, 화학적 여과, 흡착을 통해 정화되며 일반적으로 정수 과정에서 처리되기 힘든 오염 물질들도 부분적으로 처리되는 것으로 알려져 있다. 특히, 최근 들어 지아디아(Giardia), 크립토포리디움(Cryptosporidium) 등 지표수에서 발견되는 병원성 원생동물들도 강변여과 방식으로 취수된 원수에서는 나타나지 않는 것으로 보고되고 있다(Gollnitz et al., 2004; Berger, 2002). 뿐만 아니라 하천수의 다양한 유기 미량 오염인자들도 (organic micropollutants) 강변여과 과정을 통해 제거되는 것으로 알려져 있다(Sacher and Brauch, 2002). 이러한 여러 장점 때문에 유럽, 미국 등 선진국에서는 오래 전부터 강변여과 방식을 통해 상수 원수를 확보하고 있다(정재열 등, 2003).

한편, 우리나라의 상수도는 대부분 수질 오염에 취약한 하천 지표수나 댐의 저류수를 취수원으로 활용하고 있다. 그러나 산업의 발달과 인구증가 등에 따라 지표수 오염이 날로 심각해지고 있고 이에 수반된 정수 비용이 증가되고 있어 새로운 취수원을 확보하기 위한 노력이 필요한 실정이다. 또한 기후 변화와 같은 지구적인 환경변화 요인으로 인해 홍수와 가뭄의 영향으로 수량 및 수질의 변동이 심한 지표수를 직접 사용하기에는 많은 어려움이 수반되고 있어 강변 여과와 같은 간접적인 취수 방법의 활용을 최근 적극적으로 검토하고 있는 실정이다. 우리나라에서는 1990년대부터 5대강을 중심으로 강변여과수 개발타당성 조사 혹은 연구가 시작되었으며(한국수자원공사, 1995; 환경부 등, 1996; 백건하 등, 1996; 김형수 등, 1999, 한국수자원공사, 2002, 과학기술부 등, 2004; 과학기술부 등, 2007), 2008년 현재 창원시, 함안군 등에서 강변여과 방식으로 취수한 물을 정수하여 공급하고 있다. 또한 김해시에서도 1일 18만 m³의 용량으로 강변여과수 취수 사업을 계획하고 현재 공사를 진행 중이다.

이와 같이 국내외적으로 강변 여과 방식을 활용한 상수원 확보에 대한 관심이 고조되면서 강변여과 와 관련된 다양한 기술 개발이 요구되고 있다. 이중, 강변여과수의 대규모 취수를 위해서는 기존의 수직 정호 방식이 아닌 수평 방사형 집수정의 개발이 요구되고 있으나, 수평 방사형 집수정의 개발과 취수량 평가에 대한 국내 연구는

아직 미흡한 실정이다. 수평 방사형 집수정 취수량 산정을 위해 경험식에 대한 검토(최병수 등, 1996; 정지훈 등, 2004)와 방사형 집수정을 다수의 수직정이 균집한 형태인 우물군으로 가정하여 수치 모사하는 방식(정지훈 등, 2004; 과학기술부 등, 2007)이 수행된 바 있으나 이러한 접근은 실제 수평 방사형 정호 취수에 따른 지하수 흐름을 정량적으로 평가한 것으로 간주하기는 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 김형수(2008)는 수평 정호에 대한 평가를 위해 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 사용하는 방법을 제시 하였으며, 그 결과를 기존의 해석해와 비교 검증하여 그 효용성을 확인하였다. 또한 이러한 비교 검증을 통해 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 사용하여 손쉽게 수평 방사형 집수정에 취수를 모사할 수 있음을 보여주었으며, 창녕군 증산리 현장에 수평 방사형 집수정을 통한 취수를 가정하여 대수층 내의 지하수 흐름과 수위 강하를 모사하였다.

본 연구는 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용하여, 수평 방사형 집수정과 같은 특수한 형태 정호 취수 시의 지하수 유동을 효율적으로 모사하기 위한 목적과 수평 방사형 집수정을 활용한 강변 여과 취수 시, 취수량에 영향을 줄 수 있는 요소인 대수층 두께, 취수정과 하천 사이의 이격 거리, 하천 바닥의 투수 능력 등의 변화에 따른 지하수 흐름과 수위강하를 정량적으로 평가하고, 이들 조건 중 강변여과수 개발 가능량에 상대적으로 많은 영향을 주는 요소를 규명하여, 추후 수평 방사형 집수정을 활용한 강변여과 개발 시 우선적으로 조사하여야 하는 대상을 제시하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 수평 방사형 집수정 활용 취수 수치 모사

2.1. 활용 수치 모사 프로그램

본 연구에서 강변여과수 취수를 수치 모사하기 위해 사용된 프로그램은 상용 지하수 모델링 시스템인 FEFLOW (Ver. 5.1, WASY)이다. 특히 수평 방사형 집수정을 모사하기 위하여 FEFLOW에서 제공하는 1차원 선형 불연속 특징 요소(1-D discrete element feature)를 활용하였다. FEFLOW의 1차원 선형 및 2차원 판형 불연속 특징 요소는 유한 요소법이 구현하기 힘든 지질 구조 혹은 시설물인 실폭 하천, 배수공, 단층면 등의 모사에 응용할 수 있는 것으로 알려져 있으나(Diersch, 2002a), 구체적인 실제 적용 사례 자료는 거의 발표되고 있지 않고 있다. FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 통한 수평 정호의 모사는 김형수(2008)에 의해 준 해석해와 비

교, 검증되었으며, 1차원 선형 불연속 특징 요소를 통해 강변 여과 취수 지역의 수평 방사형 집수정과 같은 특수한 형태의 정호 시설을 쉽게 구현할 수 있을 것으로 발표된 바 있다.

2.2. 모델 영역과 집수정 배치

수평 방사형 집수정을 활용한 강변여과수 취수를 모사하기 위해서 $5300\text{ m} \times 3000\text{ m}$ 크기의 가상 모델 영역을 설정하였으며, 모델 영역 내부에 폭 300 m의 하천 부지를 가정하였다. FEFLOW에서는 모델을 영역별로 정의하고 모델 영역별 사용자 정의에 의한 요소 개수를 기본으로 유한 요소망을 생성하게 된다. 모델의 영역별 생성된 유한 요소망은 수정 또는 정교한 요소망으로 세분화 할 수 있으며, 주어진 임의의 구조물이나 지층의 경계를 요소의 경계와 일치 시킬 수 있다. 따라서 본 연구의 모델에서는 강변여과수 취수를 위한 방사형집수정의 수평 정호가 요소 경계로 설정되게 유한 요소망을 생성하였으며, 관심 영역인 집수정 인접 부분과 하천 영역을 다른 영역에 비해 보다 정밀하게 세분하였다. Fig. 1은 방사형 집수정의 수평 정호를 1차원 선형 불연속 특징 요소로 지정할 수 있고 관심 부분을 보다 정밀한 유한 요소망으로 구분한, 본 연구 모델 영역의 평면도와 하천 근접부의 단면도를 보여준다.

강변여과수 취수를 위한 방사형집수정은 직경 10 m의 우물통을 모델의 최하층인 기반암까지 설치하고, 기반암

으로부터 1 m 상부로 이격된 직경 120 mm, 길이 40 m 인 수평집수정을 Fig. 1과 같이 방사형으로 8개를 설치한 것으로 설정하였다. 우물통 내부의 유한 요소는 매우 큰 수리 전도도를 가정하여 우물통 내에서 수위가 위치에 상관없이 거의 동일하게 유지될 수 있게 하였다. 한편, 강변여과수 취수를 위한 방사형집수정의 중심은 하천 부지의 경계선을 기준으로 20 m, 50 m, 100 m, 200 m 이격시켜 설치된 것으로 설정하였다. 하천의 수위는 절대 고도 -3 m로 설정하였으며 하천의 최심부 바닥을 -5m로 가정하여 하천의 최대 심도가 2m가 되도록 하였다. 하천 부지 경계 지점의 고도를 0 m로 설정하였으며, 하천 부지 경계 지점부터 하천부지 경사면에 형성되는 물가 선(shore line)까지의 거리는 60 m이다(Fig. 1 참조).

2.3. 대수층 두께 및 특성

설정된 모델의 주대수층의 두께는 5 m, 10 m, 20 m의 3가지 조건이 가정되었으며, 방사형 집수정의 수평 정호는 모두 주대수층의 최하부로부터 1 m 상부에 설치되는 형태로 가정되었다. 설정 모델의 주대수층은 모래자갈층으로 가정하고 주대수층의 상부는 상대적으로 낮은 투수성을 갖는 충적층, 하부는 매우 낮은 투수성을 갖는 기반암층으로 구성하였으며, 주대수층의 상부 충적층은 주대수층의 두께를 고려하여 각각 2 m, 5 m, 10 m로 Fig. 2와 같이 가정되었다.

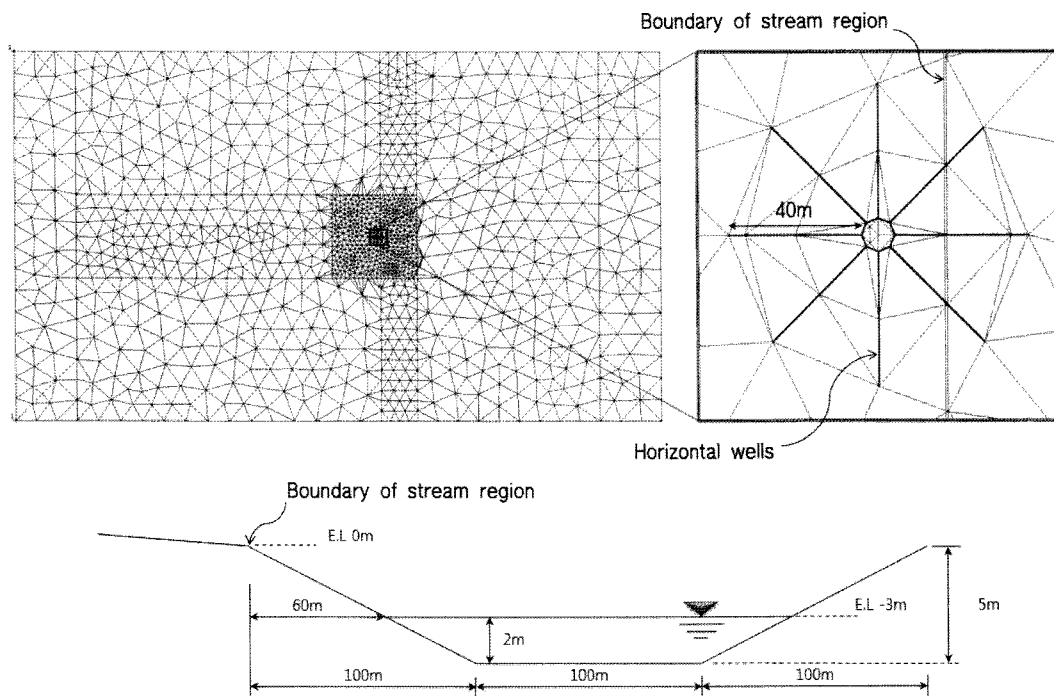


Fig. 1. Design of a FEM element and horizontal collector wells (upper part : plan view, lower part : vertical cross section near stream).

본 연구에서 모델의 영역에 유한 요소망을 생성시키고, 3차원의 고도자료를 부여한 결과 중 주대수층 두께가

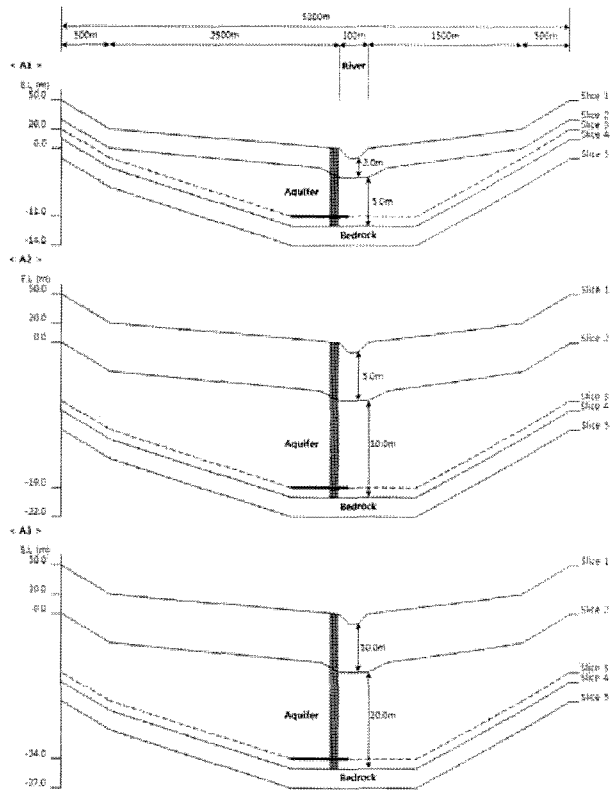


Fig. 2. Three cases of vertical cross sections of aquifer structure for numerical model study.

10 m로 가정된 모델의 3D 형상은 Fig. 3과 같다.

모델의 지하 지층에 대한 수리 상수는 수리전도도(k)와 비산출율(Sy), 비저류계수(Ss)로 구분되어 부여되었으며, 수리전도도는 상부 충적층(실트질 모래)과 주대수층(모래 자갈층) 그리고 기반암층(결정질암)으로 구분하여 각 층에 해당하는 수리 지질 특성에 따라 지하수 유동 모델에서 주로 사용되는 보편적인 수리전도도를 적용하였다(Table 1).

수평 정호는 모래 자갈층의 주대수층에 설치하는 것으로 가정하였으며, 그 설치 심도는 일괄적으로 기반암 상부 1 m로 설정하였다. 따라서 수평 정호의 설치 심도는 주대수층의 두께에 따라 변화한다. 상부 실트모래층 및 주대수층의 비산출율과 비저류계수는 자유면대수층의 일반적인 수치(Fetter, 2001)인 0.2와 1.0×10^{-4} 을 적용하였으며, 하부 기반암층은 0.05와 1.0×10^{-5} 을 적용하였다. 또한 강우에 의한 함양은 연간 200 mm로 일정하게 유지되는 것으로 단순하게 가정하였다.

2.4. 하천의 경계조건

강변 여과 취수는 표류수를 대수층으로 침투시켜 취수 하므로, 하천과 지하수의 연관성이 중요한 요소이다. 따라서 이러한 하천수와 지하수가 연계되는 하천의 경계 조건은 실제 강변 여과 취수를 모사하는 데 있어 매우 중요한 경계 조건이다. 특히 하천수가 대수층으로 얼마나 유입될 수 있는지를 정량적으로 평가하는 방안이 요구된다.

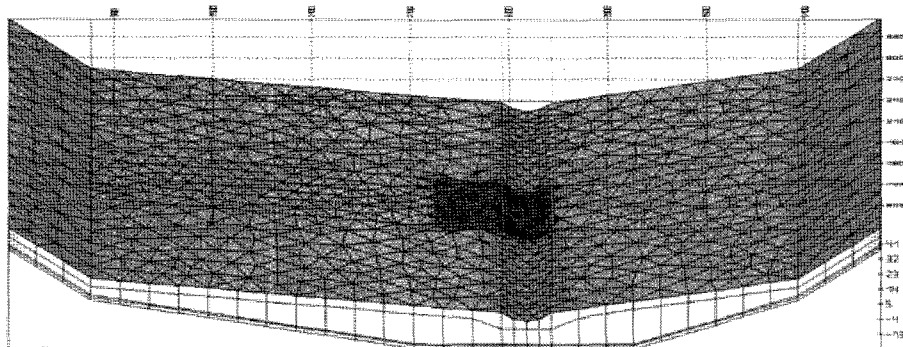


Fig. 3. Three dimensional shape of modeling domain.

Table 1. Hydraulic conductivity of modelling layer

Layer # (Physical)	Layer # (modelling)	Geologic layer	Hydraulic conductivity (m/sec)			Remarks
			Kx	Ky	Kz	
1	1	Silt & Sand	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	Horizontal wells are located at the slice between modelling layer #2 and #3
2	2	Sand/Gravel	1.4×10^{-3}	1.4×10^{-3}	1.0×10^{-3}	
3	3					
3	4	Bedrock	3.6×10^{-7}	3.6×10^{-7}	1.0×10^{-7}	
	5					

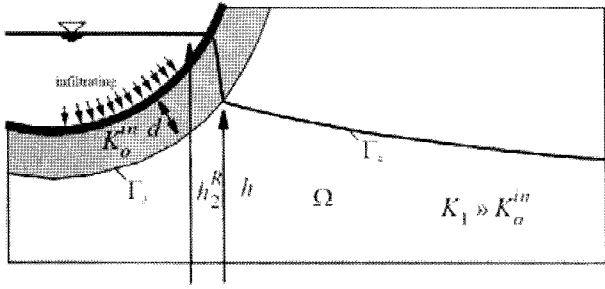


Fig. 4. Infiltration condition of a stream bed (Diersch, 2002b).

일반적으로 하천의 바닥은 부유 물질의 침전과 퇴적 작용으로 생성된 얇은 점토 혹은 실트층으로 피복된다. 이러한 점토 혹은 실트층은 표류수가 지하 대수층으로 침투되는 현상을 방해하며 주대수층의 수리전도도에 비해 매우 낮은 수리전도도를 갖는다. 따라서 실제 하천수가 지하로 침투하는 현상을 정량화하기 위해서는 우선적으로 하천 바닥 퇴적물의 침투능을 조사하고 하천과 지하 대수층의 수두차이에 따라 얼마만큼의 하천수가 대수층으로 침투할 수 있는지를 평가하여야 한다. FEFLOW는 이러한 하천과 대수층 사이의 연계성을 모사할 수 있는 경계 조건을 전달 경계 조건(transfer boundary condition)으로 설정할 수 있게 하여 주며, 하천 바닥 퇴적물의 수리 전도도와 두께를 고려한 정량적인 값을 입력할 수 있다. 하천수위가 대수층의 주변 지하수위보다 높은 손실 하천일 경우 Fig. 4와 같은 내부 전달(transfer in) 조건으로, 반대로 하천수위가 주변 대수층 지하수위보다 낮은 이득 하천일 경우에는 Fig. 5의 외부 전달(transfer out) 조건으로 값을 줄 수 있다. 또한 하천 바닥의 이러한 전달 조건은 하천수가 대수층으로 유입되는 경우(내부 전달)와 지하수가 하천으로 유입되는 경우(외부 전달) 동일한 층을 통과함에도 불구하고 동일 수두차 조건에서 실제 관측되는 통과 수량의 차이를 보이는 현상을 유념하여야 한다. 일반적인 하천의 경우, 하천수의 대수층 침투에 비해 지하수의 하천으로의 배출 능력이 2배 내지 4배 큰 것으로 간주되고 있으며, 이러한 현상은 대부분의 기간 동안 이득 하천의 형태를 보여주는 일반 하천의 경우, 장기간 하천으로 지하수가 배출되면서 형성된 흐름 경로에 따라 하천 바닥의 침전 혹은 퇴적물의 입자가 이러한 배출 조건에 유리하게 배치되기 때문인 것으로 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 손실과 이득하천 상태에서의 하천 바닥 점토 혹은 실트층의 수리 전도능력(conductance)이 강변여과 취수에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요 변수로 작용될 것으로 판단되어 이에 대한 다양한 조건을 부여하여 지하수 흐름과 수위 강하를 모사하였다. 내부전

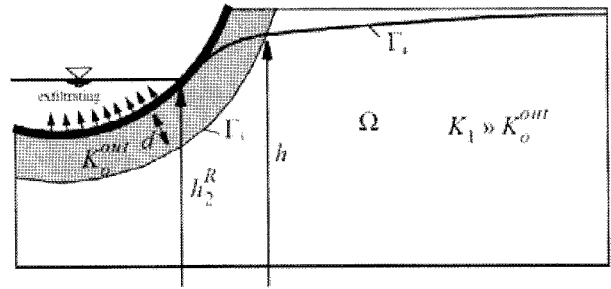


Fig. 5. River discharge condition of a stream bed (Diersch, 2002b).

달/외부전달(transfer in/out)의 수리 전도능력(단위 day⁻¹)은 1.0/4.0, 0.5/2.0, 0.25/1.0 및 0.05/0.2의 4가지 조건을 설정하였으며, 전술한 바와 같이 외부 전달 조건이 내부 전달 조건에 비해 4배 큰 것으로 가정하여 수리 전도능력 값을 부여하였다.

3. 모사 결과 분석 및 민감도 평가

본 연구에서 강변여과수 취수를 모사하기 위해 대수층의 두께, 방사형집수정과 하천의 이격거리, 하천의 침투/배출 경계 조건 및 1일 취수량 조건 등을 다양하게 변화시키면서 수평 방사형 집수정 내부의 지하수위 강하를 분석하였다. 또한 이들 조건에 따라 가장 지하수위 강하에 많은 영향을 주는 요소를 평가하기 위한 민감도를 분석하였다. 민감도 분석은 입력 변수들의 독립성과 실측된 값에 근거한 통계 분석을 통해 입력 변수 영역의 신뢰 수준을 검증하여야 하지만 국내 현장에서 위의 조건들에 대한 실측 값이 거의 확보되어 있지 못하고 이격거리와 같이 인위적인 요인 때문에 개별 입력 변수에 대한 평가를 수행하지 못하였다. 따라서 본 연구의 민감도 분석은 수치 모사에서 가정된 입력 변수 범위 내의 민감도로 이해되어야 한다.

3.1. 대수층 두께 및 정호 이격 거리에 따른 수위 강하 분석

강변여과 방식 취수 시 발생하는 지하수위 강하를 분석하기 위해 16,000 m³/day로 10년간 일정하게 취수할 경우 대수층 두께와 우물통의 이격거리에 따른 지하수위 변화를 모사하였다. 이 때 하천구역부터 수평 방사형 집수정의 중심까지의 이격 거리는 Well-1 = 20 m, Well-2 = 50 m, Well-3 = 100 m, Well-4 = 200 m 4가지 조건으로, 주대수층의 두께는 5 m, 10 m, 20 m인 3가지 조건으로 설정하여 지하수위 변화를 모사하였다. 주대수층 두께별로 비교된 지하수위 변화는 Fig 6, Fig 7 및 Fig 8에 보여진다.

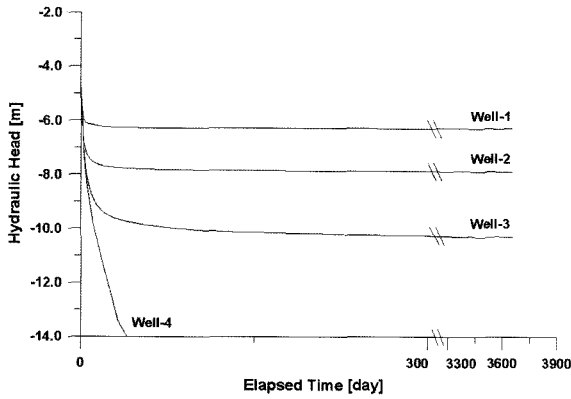


Fig. 6. Changes of groundwater table with 5 m thick aquifer.

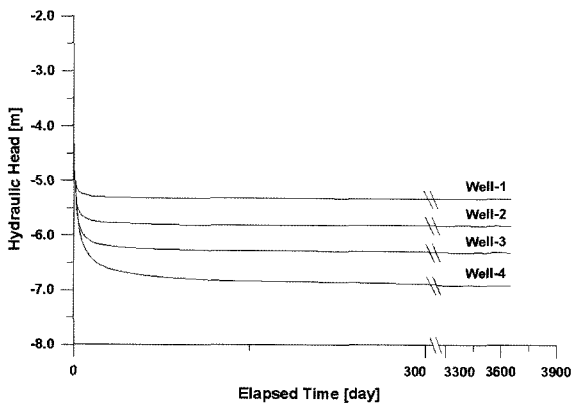


Fig. 7. Changes of groundwater table with 10 m thick aquifer.

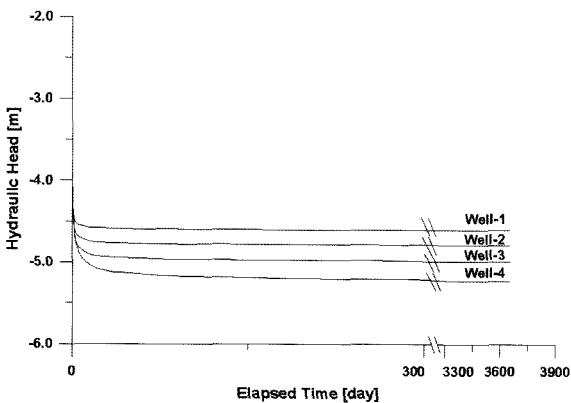


Fig. 8. Changes of groundwater table with 20 m thick aquifer.

Fig. 6의 결과에서는 Well-4의 경우 양수 약 40일 이후 지하수위가 주대수층 이하로 강하되면서 더 이상 취수가 불가능한 것으로 분석되었다. 다시 말해 주대수층의 두께가 충분하지 못하고 하천으로부터 멀리 떨어진 경우, 방사집수정을 통한 대규모 양수가 제한적임을 보여준다. 또한 각 경우에 대하여, 지하수위 변화가 일일 1 cm 이하인 시점을 안정수의 상태에 도달한 것으로 가정하여 평가하였다. Table 2는 안정수위 도달 시점과 최대 수위강하 값을 정리하여 보여준다.

Table 2에서 알 수 있듯이, 주대수층의 두께가 두꺼울수록 안정수위에 도달하는 시간이 짧고 수위 강하량이 작은 현상을 볼 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 대수층 두께 변화와 집수정 이격 거리에 따른 지하수위 강하를 정리하여 보여준다. 지하수위 강하는 전술한 바와 같이 집수정 우물통의 중심에서 평가되었다.

3.2 하천의 경계조건에 따른 지하수위 강하 분석

하천 바닥에 피복된 점토질 혹은 실트질 퇴적물을 통한

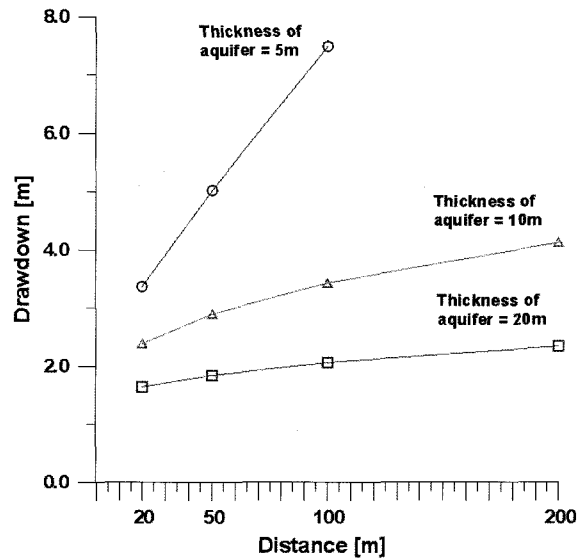


Fig. 9. Drawdowns vs. offset distances according to changing thicknesses of main aquifer.

Table 2. Drawdowns (s) and the time to reach steady state according to offset distances and thicknesses of main aquifer because of horizontal collector well pumping (rate = 16,000 m³/day)

Thickness of aquifer (m)	Well-1		Well-2		Well-3		Well-4	
	Steady state time (day)	s (m)	Steady state time (day)	s (m)	Steady state time (day)	s (m)	Steady state time (day)	s (m)
5	100	3.369	244	5.021	284	7.487	-	-
10	80	2.382	122	2.896	250	3.429	447	4.125
20	62	1.641	100	1.838	200	2.062	249	2.340

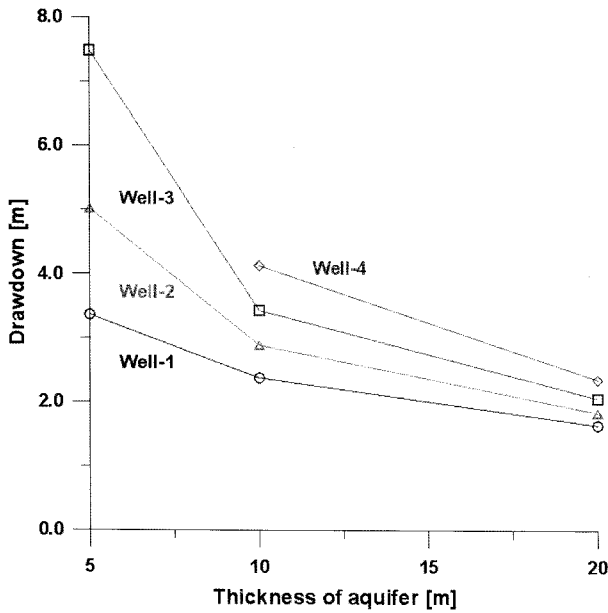


Fig. 10. Drawdowns vs. thicknesses of aquifer according to offset distances of collector well.

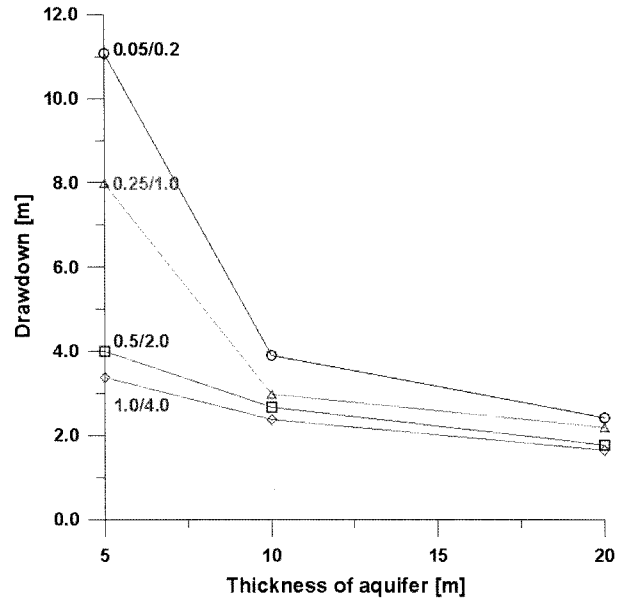


Fig. 12. Drawdowns vs. thicknesses of aquifer according to in/out transfer conductance.

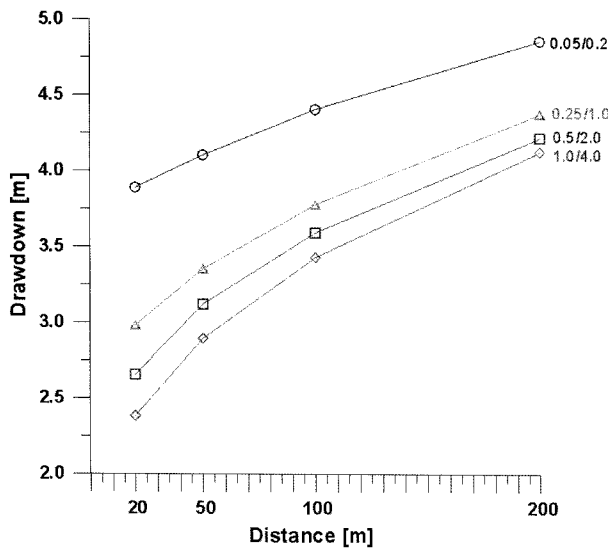


Fig. 11. Drawdowns vs. offset distances according to in/out transfer conductance.

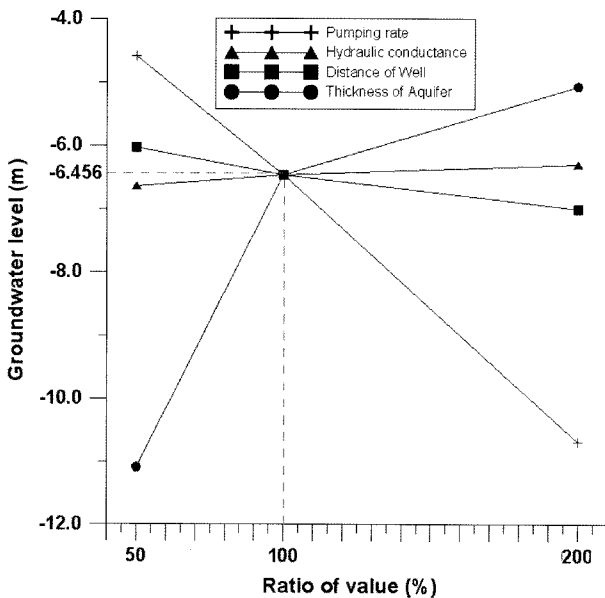
하천과 대수층간의 침투/배출 조건이 강변 여과 취수에 어떠한 영향을 줄 수 있는지를 분석하였다. 내부 전달/외부 전달 수리 전도 능력을 1.0/4.0, 0.5/2.0, 0.1/0.4, 0.05/0.2(transfer in/out, 단위:1/day)의 4가지 조건으로 가정하였으며, 취수량은 16,000 m³/day로 일정하게 설정하였다. Fig. 11은 주대수층의 두께가 10 m인 경우, 정호 설치 이격거리에 따른 수위 강하를 보여주며, Fig. 12는 정호 설치 이격 거리가 20 m인 경우, 주대수층의 두께에 따른 지하수위 강하를 보여준다.

3.3. 민감도 분석

주 대수층의 두께, 수평 방사형 집수정과 하천까지의 이격거리, 하천 바닥의 수리 전도 능력 등이 지하수위 변동에 얼마나 영향을 주는 지를 정량적으로 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 실질적인 민감도 분석을 위해서는 이들 개별 입력 요소들의 분포 특성을 분석하여 변화량을 선정하여야 하지만 이들 입력 요소들에 대한 자료가 부족하고, 일부 요소는 인위적으로 결정되므로, 일반적인 상황을 고려하여 입력 요소의 적용 범위를 결정할 수밖에 없었다. 주 대수층의 두께는 정봉일(1971)에 의해 분석된 국내 충적층 두께와 한국수자원공사(1993)의 조사 결과를 참조하여 5 m, 10 m 및 20 m로 설정하였다. 수평 방사형 집수정과 하천까지의 이격거리는 인위적으로 결정되는 요인이지만 현재 국내의 강변여과 현장을 고려하여, 50 m, 100 m 및 200 m로 설정하였으며, 하천 바닥의 수리 전도 능력은 관련 자료를 확보하기 어려워 하천 바닥 퇴적물의 투수 계수를 0.1 m/day, 두께를 0.2 m로 가정하여 0.5 day⁻¹로 가정하고 이 값을 하천수가 대수층으로 침투할 때(transfer in)의 수리 전도 능력으로 가정하였으며, 지하수가 하천으로 배출될 때는 이보다 4배 큰 값을 갖는다고 가정하여 2 day⁻¹로 설정하였다. 또한 입력 요소의 물리량은 서로 동일한 차원을 갖거나, 유사한 범위 내에서 변화하는 값이 아니므로 이에 대한 표준화를 위해 기준이 된 입력 변수에 대한 백분율로 환산하여 지하수위 변화 값의 영향을 분석하였다. 충분한 입력 변수에 대한 분포 특성 등이 고려되지 못하였으므로, 본 민감도 분석

Table 3. Result of sensitivity analysis about parameters; thickness of aquifer, offset distance, conductance and pumping rate.

Sensitivity item	Value of Simulated	Ratio of value (%)	Groundwater level (m)
Thickness of aquifer (m)	5	50	-11.092
	10	100	-6.456
	20	200	-5.063
	50	50	-6.035
Distance of wells (m)	100	100	-6.456
	200	200	-7.006
Hydraulic conductance In/Out (1/day)	0.25/1.0	50	-6.644
	0.5/2.0	100	-6.456
	1.0/4.0	200	-6.295
	8,000	50	-4.592
Pumping rate (m ³ /day)	16,000	100	-6.456
	32,000	200	-10.693

**Fig. 13.** Sensitivity analysis of the effect of four factors (hydraulic conductance, offset distance from collector well to stream, thickness of aquifer and pumping rate) on groundwater level.

결과는 본 연구에서 가정된 조건 범위 내에서 의미가 있는 민감도로 이해되어야 할 것이다.

Table 3은 이들 입력 변수들 변화에 따른 지하수위 변화를 보여주며, 취수량의 변화는 예상대로 선형 비례관계를 뚜렷이 보여주고 있다. 비교된 대수층의 두께, 이격 거리 및 하천 바닥의 수리 전도 능력에 따른 지하수위 변동 현상을 관찰해 보면, 대수층의 두께 변화에 따라 지하수위 변화가 가장 민감하게 반응하며, 그 다음으로 이격 거리 그리고 하천 바닥의 수리 전도 능력이 상대적으로 둔감한 것으로 평가되었다.

따라서 수치 모사를 활용한 민감도 분석 결과, 비교된 3가지 인자 중 가장 지하수위 강하에 큰 영향을 미치는 요소는 대수층의 두께이며 그 다음은 이격거리 그리고 하천 바닥의 수리 전도 능력의 순인 것으로 나타났다.

3.4. 수평 방사형 집수정 활용 강변여과수 개발가능량 평가

주어진 수리 지질조건과 수평 방사형 집수정 위치에 따른 강변여과수 개발 가능량을 수치적으로 평가하였다. 개발 가능량 평가는 취수량 조건을 달리하여 수평 정호가 설치된 주 대수층 구간 내에서 안정 지하수위에 도달하는 경우와 주대수층 이하로 수위가 강하하여 취수가 불가능한 경우를 구분함으로써 주어진 조건에서 최대 개발 가능량을 추정하는 방식으로 수행되었다. 다시 말해, 주대수층 구간 내에서 안정 지하수위에 도달한다는 것은 취수량만큼 개발이 가능한 것이고, 주대수층 이하로 지하수위 강하한다는 것은 지속적인 취수가 곤란한 것으로 이때의 취수량은 실제 주어진 조건에서 지속적으로 취수 할 수 없는 양에 해당되는 것으로 간주되었다. 개별 조건에 따른 취수 가능량 평가 결과는 Table 4와 같이 정리된다.

Table 4에서 알 수 있듯이 대수층의 두께가 10 m 이상이고 이격거리가 100 m 이내이면 수평 방사형 집수정에서 대부분의 경우, 20,000 m³/day 이상의 취수가 가능할 것으로 평가된다. 또한 대수층의 두께가 20 m 이상이면 200 m 이내의 이격거리에서 30,000 m³/day의 개발도 대부분 가능할 것으로 평가되었다. 이와 같이 FEFLOW를 사용한 수평 방사형 집수정에 대한 취수량 평가는 실제 개발 예정지의 강변여과 개발 가능량을 평가하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Availability of collector well intake in riverbank filtration site according to assumed conditions (○ : Available, × : Not available)

Case		Pumping rate (m ³ /day) (Transfer In/Out = 1.0/4.0)				Hydraulic conductance of transfer In / Out (m/day) (Pumping rate = 16,000 m ³ /day)			
Thickness of aquifer (m)	Offset distance (m)	8,000	16,000	24,000	32,000	0.05/0.2	0.1/0.4	0.5/2.0	1.0/4.0
5	20	○	○	○	×	×	○	○	○
	50	○	○	○	×	×	○	○	○
	100	○	○	×	×	×	×	○	○
	200	○	○	×	×	×	×	×	○
10	20	○	○	○	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	×	○	○	○	○
	100	○	○	○	×	○	○	○	○
	200	○	○	○	×	○	○	○	○
20	20	○	○	○	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○	○	○	○
	100	○	○	○	○	○	○	○	○
	200	○	○	○	○	○	○	○	○

4. 결 론

수치 모사를 통해 수평 방사형 집수정으로 취수되는 강변여과수에 대한 지하수 유동을 분석하였다. 지하수 유동 수치 모사 상용 프로그램인 FEFLOW는 수평관 같은 특수한 형태의 취수를 모사하기 용이한 1차원 선형 불연속 특징 요소를 제공하며 이를 이용하면 수평 방사형 집수정과 같은 특수한 형태의 정호를 모사할 수 있다.

양수량, 대수층 두께, 취수정과 하천 사이의 이격거리, 하천 바닥의 투수 능력 등의 조건 변화에 따른 집수정 인접 대수층의 수위강하가 계산되었으며, 이들 조건 변화에 따라 지하수위 강하는 뚜렷한 변화를 보여주었다. 대수층의 두께, 취수정과 하천 사이의 이격거리 및 하천 바닥의 수리 전도능력 중 지하수위 강하에 민감한 영향을 주는 정도를 확인하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 주어진 입력 변수의 범위 내의 민감도 분석 결과, 위의 3가지 입력 조건 중 지하수위 강하에 가장 큰 영향을 주는 요소는 대수층이 두께인 것으로 평가되었으며, 그 다음은 이격 거리, 하천 바닥의 수리 전도능력의 순서로 지하수위 강하에 민감한 것으로 나타났다.

수치 모사를 통해 대수층의 발달 상태, 투수 계수, 하천 바닥의 수리 전도능력 등의 수리지질조건과 수평 방사 집수정의 개발 위치, 개발 형태에 따른 강변여과수 개발 가능량을 산정할 수 있었으며, 가상의 조건에 대한 강변여과수 개발 가능량을 산정하였다. 수리전도도 10^{-3} m/sec, 대수층 두께 10 m 이상, 하천과 집수정의 이격 거리 100 m 이내인 경우, 강변여과수 개발 가능량은 20,000

m³/day 이상이 될 것으로 평가되었다. 또한 대수층의 두께가 20 m 이상인 경우 이격거리 200 m 이내까지에서는 30,000 m³/day의 강변여과수 개발이 가능한 것으로 평가되었다. 그러나 실제 다수의 수평 방사형 집수정이 설치되어 강변여과수 취수가 진행될 경우는 이들 집수정간의 간섭으로 개발량의 감소가 발생할 가능성이 있으므로 이들 집수정의 개발 위치와 방식을 고려한 별도의 수치 모사 평가가 요구된다.

FEFLOW의 1차원 선형 개별 특징 요소를 활용한 지하수 흐름 수치 모사는 효과적으로 수평 방사형 집수정의 정량 평가와 강변여과 현장의 개발 가능량 추정을 할 수 있는 훌륭한 도구인 것으로 평가된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(과제번호 3-4-3)과 한국수자원공사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부, 건설교통부, 한국수자원공사, 2004, 지속가능한 지하수 개발 및 인공함양, 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서: 과제번호 3-4-1.
- 과학기술부, 건설교통부, 한국수자원공사, 2007, 대수층 활용 상수도 공급시스템 개발, 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서: 과제번호 3-4-2.

- 김형수, 2008, 수치 모사를 활용한 수평 혹은 경사형 특수 정화 지하수 흐름 특성 평가, *지하수도양*, **13**(2) 54-61.
- 김형수, 석희준, 2004, 지속가능한 지하수 개발 및 인공함양, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, TR2004-04, p. 66.
- 김형수, 한찬, 유정아, 1999, 지하수 함양 및 활용 증대방안 연구, WRRI-GG-99-1, 한국수자원공사 연구보고서, p. 198.
- 백건하, 한찬, 유정아, 1996, 하상퇴적층 여과방식에 의한 금강수도 취수개선 방안 조사렛II³, WRRI-GG-96-2, 한국수자원공사 연구보고서.
- 정봉일, 1975, 남한의 층적층의 통계학적 지질연구, *광산지질*, 제 **8**(3), 125-134.
- 정재열, 함세영, 김형수, 손건태, 차용훈, 장성, 백건하, 2003, 창원시 대신면 강변층적층의 지하수위 변동 특성, *지질학회지*, **13**(4), 457-474.
- 정지훈, 박재현, 박창근, 양정석, 김대근, 정교철, 최용선, 부성안, 2004, 방사형 집수정에 의한 강변여과수 산출량 산정에 관한 연구, *지질공학회지*, **14**(4), 417-427.
- 최병수, 정형재, 이기철, 김정희, 1996, 소유역 지하댐 개발에 관한 기술개발 연구, 농어촌진흥공사, 농림부 연구보고서.
- 한국수자원공사, 1995, 하상퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범조사 보고서. 한국수자원공사 조사보고서.
- 한국수자원공사, 1996, 전국 층적층 지하수 조사 보고서. 한국수자원공사 조사보고서.
- 한국수자원공사, 2002, 강변여과수 개발가능지점 및 개발가능량 조사 보고서, 한국수자원공사 조사보고서.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희, 2004, 창원시 북면 낙동강 주변 하상퇴적층의 지하수유동 모델링 연구, *자원환경지질*, **37**(5), 499-508.
- 환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996, 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수 개발 타당성 조사 보고서.
- Berger, P., 2002, Removal of Cryptosporidium using bank filtration, *Riverbank filtration: Understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*, C. Ray(ed), Kluwer Academic Publishers, p. 85-121.
- Diersch, H.-J G., 2002a, Discrete feature modeling of flow, mass and heat transport processes by using FEFLOW, WASY Software, FEFLOW White Papers, **1**, 149-196.
- Diersch, H.-J G., 2002b, WASY Software FEFLOW Reference Manual
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall.
- Gollnitz, W.D., Whitteberry, B.L., and VOGT, J.A., 2004, Riverbank filtration: Induced infiltration and groundwater quality, *Journal AWWA*, **96**(12), 98-110.
- Sacher, F. and Brauch, H.-J., 2002, Experiences on the fate of organic micropollutants during riverbank filtration, *Riverbank filtration: Understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*, C. Ray(ed), Kluwer Academic Publishers, p. 135-151.