

수치 모사를 활용한 수평 혹은 경사형 특수 정호 지하수 흐름 특성 평가

김 형 수*

한국수자원공사 수자원연구원

Characterization of Groundwater Flow to Horizontal or Slanted Well Using Numerical Modeling

Hyoung-Soo, Kim*

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

The drawdown distribution due to pumping by horizontal or slanted wells is analyzed by numerical modelling. In the numerical modelling uses 1-D discrete element feature included in commercial groundwater modeling program FEFLOW (version 5.1) and the results are compared with the semi analytic solution which uses superposition of successive point sources proposed by Zhan and Zlotnik (2002). Results of the numerical modeling agree well with the semi analytic solution except for very near field region of sink sources. The drawdown distribution due to pumping in riverbank filtration(RBF) plan site can be evaluated quantitatively by the numerical modeling in this study.

Key words : Groundwater flow, Horizontal or slanted well, Collector well system, River bank filtration (RBF), Semi-analytic solution, FEFLOW

요 약 문

수평 혹은 경사 형태 특수 정호 양수량에 대한 시공간적 수위 강하를 지하수 수치 모델링을 활용하여, 평가하였다. 지하수 수치 모델링은 상용 프로그램인 FEFLOW(version 5.1)의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용하여 수행되었으며, 수치해의 검증에 위해 Zhan과 Zlotnik(2002)이 제안한 연속된 점 형태 배출원 배열 방식 준 해석해와 비교하였다. 비교 검증 결과, 수치해와 준해석해는 최대 수위 강하가 나타나는 양수 최인접부를 제외하고는 거의 일치한 형태를 보여주었다. 검증된 수치적 방법을 이용하여, 강변여과 방식 취수가 검토되는 현장에 대한 수위강하를 정량적으로 평가할 수 있었다.

주제어 : 지하수 흐름, 수평 혹은 경사 정호, 방사형 특수 집수정, 강변여과, 준 해석해, FEFLOW

1. 서 론

수자원의 수량과 수질의 문제가 국가적인 관심사로 대두되면서 양질의 수자원을 확보하기 위한 다양한 노력이 활발히 진행되고 있다. 강변여과 방식 취수는 상대적으로 하천수에 비해 양호한 수질을 확보할 수 있기 때문에 이미, 현재 국내 몇몇 지방자치단체에서는 강변여과 방식의

취수를 통한 용수공급과 하천수 수질 개선 사업을 진행 혹은 계획하고 있다. 강변 여과 방식은 정호를 통해 취수가 수행되며, 정호는 개발 형식에 따라, 크게 수직형, 수평형 그리고 경사형으로 구분된다. 이 중, 수직형은 전통적인 방식으로, 이미 착정 기술이 널리 보급되어 있고, 평가, 유지 및 재개발과 관련된 기술도 상대적으로 충분한 편이다. 한편, 수평 혹은 경사 정호는 하천 인접부에서 충

*Corresponding author : hskim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2008. 1. 14 게재승인일 : 2008. 2. 26

질의 및 토의 : 2008. 6. 30 까지

적층뿐만 아니라 하천의 하부로도 설치할 수 있다는 점과 대규모 취수를 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 구체적인 평가 방법은 물론, 이와 관련된 시공, 유지 및 재개발과 관련된 기술이 미흡한 상황이다.

수평 혹은 경사형의 정호는 수직 정호와 비교할 때, 여러 가지 장점을 가지고 있으며, 1930년대 Leo Ranny의 수평 방사형 집수정 개발(Todd 1959) 이후, 다양한 목적으로 활용되어 오고 있다. 특히 수평 방사형 집수정은 단일 시설물을 통해, 대규모 지하수를 양수할 수 있다는 장점 때문에 대규모 강변여과 혹은 지하수담과 연계한 취수 시, 주로 활용되고 있다(김형수 등, 1999). 국내의 경우, 수평 방사형 집수정은 지하수담 설치 지역(최병수 등, 1996)과 강변 여과 취수가 진행되거나 계획된 창원, 김해 등에서 활용되고 있거나 관련 공사가 진행 중에 있다(과학기술부 등, 2007).

수평 혹은 경사형 정호의 양수에 따른 시공간적 지하수 흐름 특성 평가는 오랜 동안 많은 학자들의 연구 대상이었으며, 이와 관련하여 다양한 대수층 조건에 따른 지하수 흐름 현상에 대한 분석과 평가가 수행되어왔다. 이러한 연구들은 크게 해석학적 접근과 수치 모사 방식의 접근으로 크게 나뉘어 질 수 있으며, 이들 연구 중 대표적인 연구들은 다음과 같이 정리가능하다.

최초의 3차원 수평정호에 대한 수위강하 해석에는 피압 대수층에 대해 선형 취수원에 일률적으로 유입되는 경우에 대하여 Hantush and Papadopoulos(1962)의 연구에 의해 주어졌다. 그 이후 경계 적분 방식을 이용한 연구(Bischoff, 1981), 해석 요소를 사용한 연구(Steward and Jin, 2001), 라플라스 변환을 이용한 준 해석해(semi-analytical) 방식(Zhan and Zlotnik, 2002; Zhan and Park, 2003) 등의 연구들이 수행되어졌다.

수치 모사와 관련하여서는 Ophorid and Farvolden (1985)는 유한 요소법을 이용한 하천 인접 집수정 평가가 최초의 발표된 연구인 것으로 알려져 있으며, 그 이후 유한 차분법을 이용한 Eberts and Bair(1990), Cunningham 등(1995) 및 Chen et al.(2003) 등의 연구가 수행되어졌다. 그러나 이러한 수치 모사 관련 연구들은 현장 적용 시, 수평 혹은 경사 정호에 대하여 일일이 요소 혹은 격자를 구성하여야 하는 어려움이 있으며, 특히 유한 차분법의 경우 구성된 격자의 영향이 전체 모사 구간 전역에 영향을 주게 되므로 실제적인 측면에서의 활용에 많은 어려움이 수반될 것으로 판단된다.

본 연구는, 현재까지 개발된 수평 혹은 경사형 정호에 대한 평가가 현장 적용 측면에서 한계를 가지고 있으므로,

상용 프로그램인 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소(1-D discrete element feature)를 활용하여 대수층내의 수평 혹은 경사 정호 양수에 의한 시공간적인 수위강하 분포를 모사하고 그 결과를 검증하며, 실제 강변여과 방식의 취수가 검토되는 현장에 적용하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 연구 방법 및 비교 검증

본 논문에서 사용된 방법을 검토하기 위해, 단순한 형태의 대수층에 대한 준 해석해와 수치 모사 결과를 시간과 공간에 대하여 비교하는 방식이 활용되었다. 비교 검증을 위해 사용된 대수층 모형은 20 m 두께의 자유면 대수층이 불투수층 위에 존재하는 단순한 형태로, 수평 정호의 경우 지하수면 하부 15 m 지점에 길이 10 m의 정호가 설치된 형태에 대한 수위강하가 계산되었으며(Fig. 1(a) 참조), 경사공의 경우, 역시 10 m 길이의 정호가, 지하수면 하부 12 m부터 18 m까지 비스듬하게 존재하는 경우에 대한 계산을 수행하였다(Fig 1(b) 참조). 모형에 사용된 대수층 특성은 투수 계수, 10^{-4} m/sec, 비저류계수 10^{-7} m, 비산출율 0.25이며, 양수량은 10 m 정호 구간에 대하여 172.8 m³/day이다.

본 연구의 준 해석해 계산은 자유면 대수층에 대한 수평 및 경사 정호의 지하수 흐름을 평가하는 기법인 Zhan and Zlotnik(2002)가 제안한 준 해석적 방법으로 이 방법은 점 형태 배출원(point sink)을 모사하고자하는 수직 정호 혹은 경사 정호에 연속적으로 배열하여 해를 구하는 방식이다. 이 방법은 관련 무차원 변수에 대한 지배 방정식과 경계 조건을 설정한 후, 이에 대한 해석 해를 라플라스 변환을 통해 구해내는 방식이다. 다시 말해, 라플라스 변환에 의한 지배 방정식은 수위 강하에 대한 무차원 변수를 조화 함수와 이중 영차 변형 베셀 함수 곱의 무한급수로 표현할 수 있게 되므로, 이 값을 역 라플라스 변환하여 실제 해를 구하는 방식이다. 그러나 이 방식에 의한 해석 해는 수위 강하가 대수층 두께에 비해 충분히 작아야 하는 조건이 만족되는 범위 내에서 유효하다. 실질적 계산의 경우에는 최대 수위강하가 대수층 두께의 절반 미만인 경우, 배출원의 최인접부를 제외한 지점에 대해 무난하게 적용할 수 있다고 알려져 있다. 한편, 본 논문에서의 검증용 대수층 모델에서의 실제 계산은, Zhan and Zlotnik(2002)의 방식을 활용하여 Hunt(2003)가 개발, 보급한 엑셀 VBA(visual basic application) 프로그램을 통해 수행되었다.

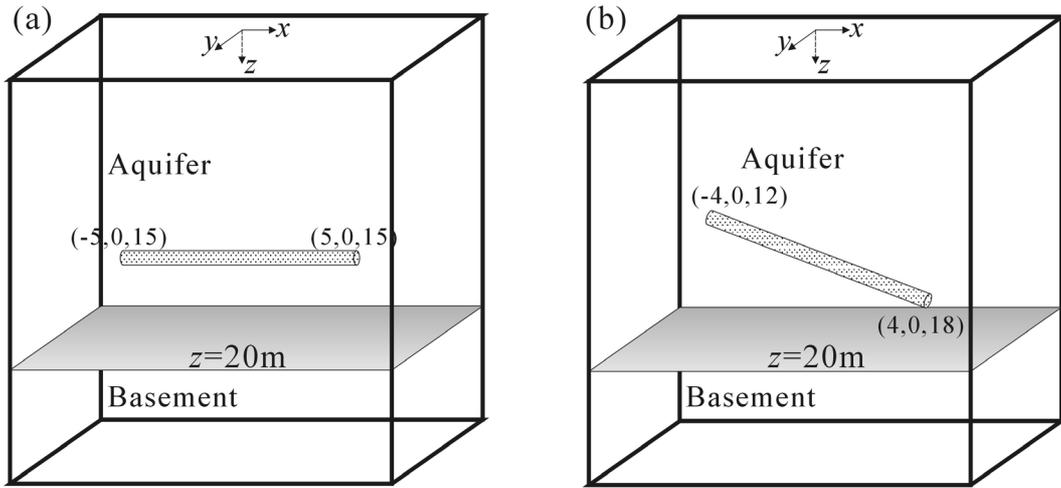


Fig. 1. The diagrams of (a) the horizontal well and (b) the slanted well used for comparing the drawdowns calculated from semi-analytic and numerical solutions.

수치적 계산은, 상용 지하수 모델링 프로그램인 FEFLOW(version 5.1)의 1차원 선형 불연속 특징 요소 (1-dimensional line discrete element feature)을 활용하여 수행되었다. 이 프로그램에서 제공하는 1차원 선형 및 2차원 판형 불연속 특징 요소는 유한 요소법이 구현하기 힘든 구조 혹은 시설물인 실폭 하천, 배수공, 단층면 등의 모사에 효율적이며, 특히 본 연구에서 적용된 수평 혹은 경사공은 1차원 선형 요소로 쉽게 구현할 수 있는 대상으로 기대된다. 또한 1차원 선형 요소의 특징을 고려하여, 이 선형 요소내의 흐름을 지배하는 방식을 Darcy, Hagen-Poiseuille, Manning-Strickler 중 선택할 수 있으며(Diersch, 2004), 이러한 선택은 실제 획득할 수 있는 정보와 해결하고자 하는 문제의 시안에 따라 선정된다. 그러나 실제 수치 계산 값의 검토 결과, 1차원 선형 불연속 특징 요소 내의 지배 방정식의 형태는 수평 혹은 경사공에 대한 수위강하 평가의 경우, 정호의 최인접 구간 이외 구역에서는 세 가지 방식 모두 거의 유사한 값을 보여주는 것으로 나타나므로, 크게 고려하지 않아도 되는 것으로 평가되었다.

전술한 해석해 방식과 수치 모사 기법으로 계산된, 수평 정호 평행 방향 변화에 따른 수위 강하량은 Fig. 2에, 양수 1일후와 양수 1000일후에 대해서 주어졌다. Fig. 2는 수평 정호에 직교하는 방향에 대한 수위 강하량을 보여준다. 이때, 관측지점의 심도는 수평정호 설치 지점인 지하 15m보다 4m 하부인 지표면 기준 심도 19m 지점이다.

Fig. 2와 3에서 볼 수 있듯이 준 해석적 방법에 의한

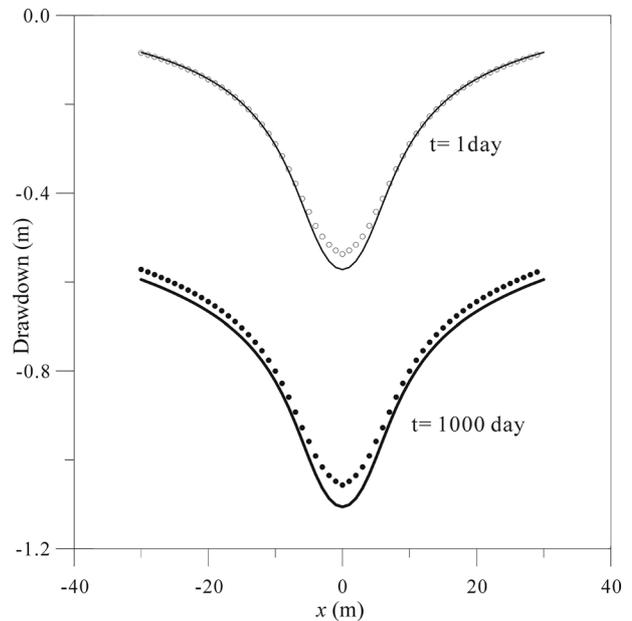


Fig. 2. The drawdown distribution along the axis of the horizontal well at the time, $t=1$ day and 1000 day after pumping (line : semi-analytic, circle : numerical).

수위 강하량과 지하수 모델링 프로그램 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 수위강하 값은 수평 정호 인접부를 제외하고는 실용적인 측면에서 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

경사 정호에 대한 준 해석적 방법과 지하수 모델링의 수위 강하량 비교는 Fig. 4과 5에 보여진다. 경사정호는 수평면에서 $36.9^\circ(\tan^{-1} 0.75)$ 기울어진 형태이며, 총 연장 길이는 10 m이며, 정호의 중심점은 (0, 0, 15)이다. 수평 정호와 마찬가지로 준해석적 방법에 의해 계산된 수위 강

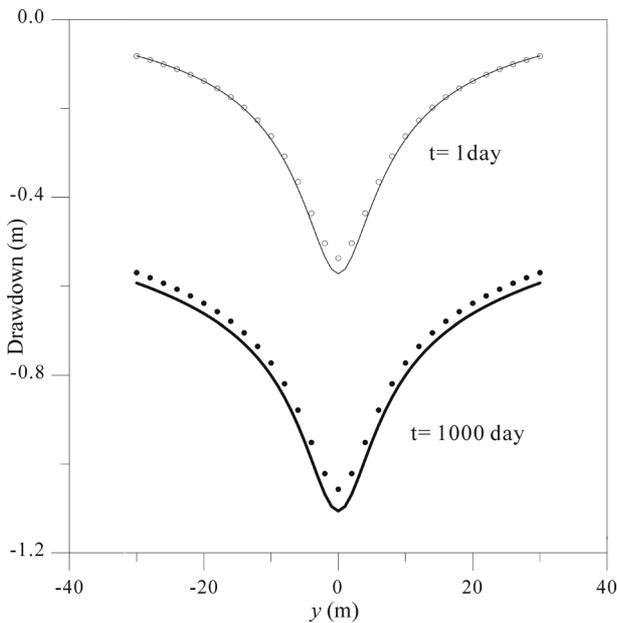


Fig. 3. The drawdown distribution cross the axis of the horizontal well at the time, $t=1$ day and 1000 day after pumping (line : semi-analytic, circle : numerical).

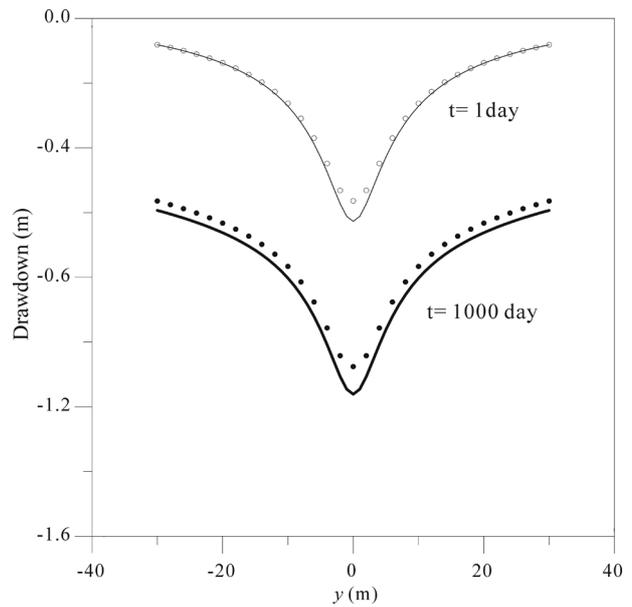


Fig. 5. The drawdown distribution cross the axis of the slanted well at the time, $t=1$ day and 1000 day after pumping (line : semi-analytic, circle : numerical).

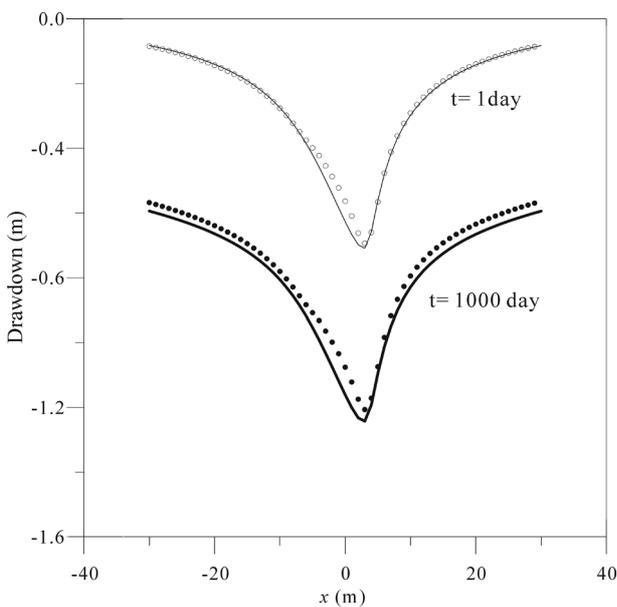


Fig. 4. The drawdown distribution along the axis of the slanted well at the time, $t=1$ day and 1000 day after pumping (line : semi-analytic, circle : numerical).

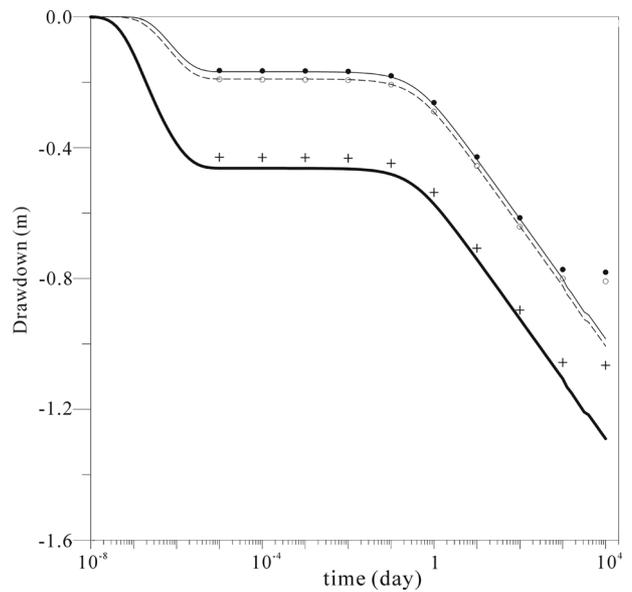


Fig. 6. The drawdown distribution along the axis of the horizontal well at observation positions A (0, 0, 19), B (10, 0, 19) and C (0, 10, 19) according to time (thick line = semi-analytic values and crosses at point A, dashed line = semi-analytic values and open circles at point B, thin line = semi-analytic values and solid circles at point C).

하와 지하수 모델링 프로그램 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 수위강하 값은 거의 일치한다.

Fig. 6은 수평 정호 양수에 의한 관측점(0, 0, 19), (10, 0, 19) 및 (0, 10, 19)에서의 시간별 수위 강하 값을 보여준다. 수평 정호 중심 직하부의 수위 강하는

FEFLOW를 사용한 수치적 계산이 준 해석적 방법에 의한 수위강하에 비해 다소 작게 평가되는 현상을 보여주고 있다. 준 해석해의 경우, 시간이 충분히 경과되어도 지속

적인 수위 강하가 나타나는데 반해 수치 모사에 의한 수위 강하는 양수 후, 2000일 정도 이후부터 거의 변화가 없다. 이러한 현상은 수치 모사의 경우, 모델 외각의 경계 조건을 일정 수두로 간주하였으므로, 경계부 유입에 따른 정류 상태 발생에 따른 것으로 해석된다.

결과적으로 기존의 준 해석적 방법과 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 수평 혹은 경사 정도 양수에 따른 수위강하는 거의 유사한 값을 보여준다. 따라서 실제 현장에 대한 평가를 위해서 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용하는 방식이 효율적이며 실질적임을 알 수 있다.

3. 수평정호 활용 강변여과 취수 모사

본 연구의 수치 모사 기법을 통해 강변여과 계획 지역에 대한 취수를 모사 평가하였다. 취수 정호의 형태는 수직 정호와 몇 개의 수평정을 갖는 방사형 집수정의 두 가지로 설정하여, 이 두 가지 방식의 취수에 따른 수위강하 차이를 비교할 수 있게 하였다. 대상 지역은 창녕군 증산리 일대 지역으로 강변여과 방식에 의한 취수 가능성이 검토되고 있는 지역으로, 현재 강변여과 방식의 취수가 수행되는 창원시 북면과 대산면 지역의 직상류 건너편에 해당되는 지역이다. 대수층의 수리특성과 분포, 자연적 강우 함양률 등은 기존의 연구/조사 자료(과학기술부 등, 2007)를 활용하여 가능한 한 실제 대상 지역의 지하대수층 특성과 구조를 반영하도록 설정하였다. 지하 지층의 물성은 기본적으로 4개층으로 구분하였으며, 주대수층은 3번째 층으로 층의 두께는 최소 15에서 최대 40 m로 설정하였다. 주대수층은 현장 시추 자료에 근거하여 하천에 인접할수록 두터워지게 배치하였다. 또한 고도 25 m 이상의 산지에 대해서는 층적 대수층이 이 지역에서는 일반적으로 존재하지 않으므로 표토 하부에 바로 기반암이 존재하도록 설정하였다. Table 1은 지하수 모사를 위해 활용된, 하천 인접 층적대수층 지역의 수리지질 물성 값을 보여준

다. 강우에 의한 연간 함양율은 200 mm로 계절에 상관없이 일정하게 함양되는 것으로 가정하였다.

한편, 수위강하에 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 하천의 경계 조건은 단순한 일정 수두 경계 조건을 설정하였다. 이러한 일정 수두 경계 조건은 실제 경우에 비해 하천 인접부 층적층 지하수의 수위 강하를 과소 평가할 것으로 예상되며, 따라서 다른 경계 조건에 비해 상대적으로 양적인 측면에서 강변여과 취수량을 과다하게 평가하게 될 것으로 판단되는 방식이다. 이러한 상대적 취수량 과다 평가를 최대한 방지하기 위하여 하천의 일정 수두는 갈수기 하천의 수위를 고려하여, 고도 5 m로 설정하였다. 경계 조건별 지하수 흐름평가는 별도의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 수치 모사를 위한 모델 영역과 경계 조건을 보여준다. 전술한 바와 같이 하천은 일정 수두(constant head) 경계 조건, 층적층을 둘러싼 산지의 능선에서는 불투수(no flux) 경계 조건을 설정하였다. 층적층이 존재하는 두 곳의 계곡부에서는 지표 고도를 반영한 일정 수두 경계 조건을 설정하였다. 이러한 설정에 의해 형성된 양수 이전 정류 상태 지하수의 대수층 수두 분포는 Fig. 7에 연구 지역과 함께 도시되어있다.

연구 대상 지역에 대하여, 수직 정호 방식과 수평 방사형 집수정에 대한 취수를 비교하였다. 수직정호 방식은 정호당 각 2,000 m³/day, 30개소, 총 60,000 m³/day의 양수를, 수평 방사형 집수정 방식은 개별 집수정(우물통)당 약 10,000 m³/day, 6개소, 총 60,000 m³/day의 양수를 가정하여 총 일일 양수량이 거의 동일하게 설정되도록 하였다. 개별 수평 방사형 집수정의 수평공의 총 연장 길이는 100 m 내외로 설정하였으며, 위치에 따라 보통 4개 혹은 5개의 수평정을 설치한 형태를 가정하였다. 따라서, 각개의 수평정 연장 길이는 20내지 25 m 내외이다. Fig. 8은 30개 수직정호에 대한 대수층 수두 분포를, Fig. 9는 6개 수평 방사형 집수정에 대한 대수층 수두 분포를 보여준다. 양수는 10년간 지속적으로 수행된 것으로 가정되었다.

Table 1. Hydrogeological parameters for groundwater modeling in the study area

	Horizontal Hydraulic Conductivity (10 ⁻⁴ m/sec)	Vertical Hydraulic Conductivity (10 ⁻⁴ m/sec)	Specific Yield S _y	Storativity S _s (1/m)	Thickness (m)
1 st Layer (Surface Soil)	6.00	0.60	0.20	0.0001	about 2
2 nd Layer (Confining Layer)	0.02	0.20	0.10	0.0001	10~13
3 rd Layer (Aquifer)	6.00	0.60	0.25	0.0001	20~30
4 th Layer (Basement)	5*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁴	0.02	0.0001	-

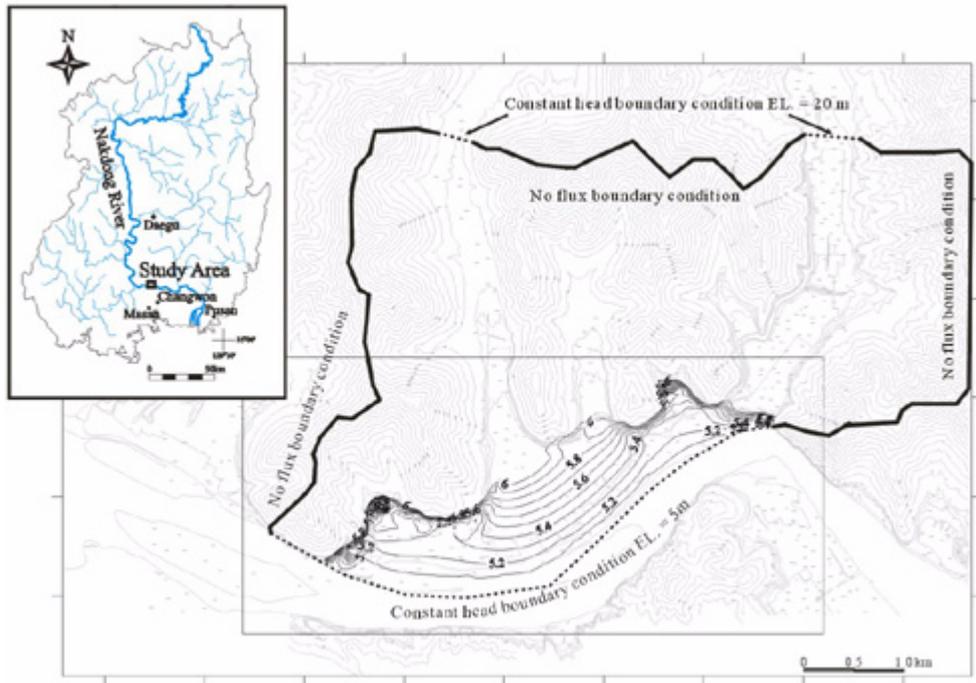


Fig. 7. Modeling domain and boundary conditions of the study area with head distribution of aquifer in steady state.



Fig. 8. Head distribution for 30 vertical wells in the study area.

수직 방식 정호 취수와 수평 방식형 집수정 취수에 대한 수위 강하 비교 결과, 모사된 수위 강하는 수평 방식형 집수정 중심 지점(우물통)의 지하수위 강하가 개별 수직 정호 위치의 지하수위 강하에 비해 더 크게 나타났으나 비양수량(specific capacity)은 수평 방식형 집수정 방식이 훨씬 큰 것으로 평가되었다.

Table 2은 수직 방식과 수평 방식형 집수정 취수에 대한 최대 수위 값, 비양수량 등에 대한 값을 비교하여 보

여준다. 전술한 비와 같이, 최대 수위 강하는 이러한 수평 방식형 집수정이 더 크게 나타나며, 이러한 현상은 수평 방식형 집수정의 중심부위는 상대적으로 많은 양수가 일어나는 현상으로부터 기인한다. 단위 수위강하에 대한 양수량인 비 양수량은 수평 방식형 집수정이 수직 정호보다 약 2.4배 크게 나타나 양수 측면에서는 보다 효율적인 취수 방식임을 알 수 있다.

한편 개별 수직정호 방식, 수평 방식형 집수정 방식 모



Fig. 9. Head distribution for 6 horizontal collector wells in the study area.

Table 2. Comparison of vertical well and radical collector well intake modeling in the study area

	Lowest head in aquifer (Mean sea level, m)	Groundwater table depth from surface (m)	Drawdown from initial condition (m)	Discharge from each facility (m ³ /day)	Specific Capacity (m ³ /day/m)
Vertical well intake system	4.09	3.91	0.91	2,000	2,218
Radical horizontal collecting well system	2.72	5.28	2.28	10,000	4,386

두 대수층의 심도와 두께에 비해 매우 적은 수위 강하만이 발생되어, 하천 인접부의 강변여과 방식은 실제 모사된 양수량 보다 훨씬 많은 개발 가능량을 가질 것으로 판단된다. 따라서 수위 강하를 약 15 m 전후로 가정하고 하천에서 100 m 내외의 인접 집수정 설치가 가능한 경우, 이 지역에서의 200,000 m³/day의 강변 여과 방식 취수는 무난할 것으로 평가된다. 모사된 수위 강하는 현장에 수직 정호에서 3,000 m³/day의 양수량으로 수행된 실제 양수 시험의 인접 관측정 수위 강하가 1 m 이내였던 현상(과학기술부 등, 2007)과도 대체로 부합하여 이 지역에서의 강변 여과 방식 취수의 개발 가능성을 뒷받침 해 준다.

4. 결론 및 토의

자유면 대수층에 설치된 수평 정호와 경사 정호에 대한 수위강하 값을, 준 해석해와 수치 계산을 통해 비교 평가하였다. 수치 계산은 상용 지하수 모델링 프로그램인 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 이용하여 수행되었다. 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용하는 수치 모델링 기법은 준 해석해와 거의 유사한 값을 보여 실용적 측면에서 방사형 집수정 등의 특수 형태 정호에 대한

평가에 적합한 것으로 평가된다.

본 연구의 수치 모사 기법을 통해 강변여과 취수 검토 지역인 창녕군 증산리 일대에 대한 강변여과 취수를 모사 평가하였으며, 수직 정호 방식 취수와 수평 방사형 집수정 방식 취수에 대한 개발 가능성을 비교 평가하였다. 모사 평가된 결과를 기초할 때, 연구 지역은 200,000 m³/day의 강변여과 방식 취수가 가능한 것으로 판단된다.

FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소를 활용한 수치 모델링은 방사형 집수정의 형태를 손쉽게 모사할 수 있는 장점을 갖는다. 다시 말해 다양한 형태의 수평 혹은 경사형 특수 정호를 모사하기 위한 복잡한 격자 혹은 요소 생성에 대한 노력을 줄여준다. 따라서 본 연구의 수치 모사 기법은 대용량 취수를 위한 방사형 집수정 등 특수 정호의 지하수 유동을 효율적으로 평가할 수 있다. 수치 모사에 따른 구체적인 평가 가능 대상은, 정호의 개발 가능량, 하천수/지하수의 유입비율, 하천수가 대수층을 통과하는 지체 시간 등 흐름 관련 대상은 물론 수질 변화, 열적 분포 등에 대한 평가도 가능할 것으로 판단된다. 이러한 평가는 특수 집수정을 활용하는 강변 여과 취수 방식 등의 타당성 조사는 물론, 실제 개발과 장기적 관리 등을 위한 다양한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

앞으로 대용량 특수 정호의 양수에 따른 지하수 유동의 정밀한 평가를 위해서는 정호 형태, 스크린 특성 등을 고려한 보다 발전된 지하수 모델링 기법의 개발과 더불어 현장에 대한 정밀한 수리지질특성, 특히 하천과 대수층의 연결성을 객관적이며, 정량적으로 조사하고 평가할 수 있는 기법 개발이 요구된다. 또한 강변여과 취수 타당성 결정에 주요 원인이 될 것으로 판단되는 하천 경계 조건별, 개발 위치별 개발 가능량에 대한 민감도 분석 등 다양한 수치 모사 결과를 활용한 평가가 수행될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-3)에 의해 수행되었으며 이에 감사드린다. 그리고 본 연구를 수행할 수 있도록 장기연구과전을 허락하고 지원해준 한국수자원공사와 미국 오레곤(Oregon)주, 포틀랜드 주립대학(PSU: Portland State University), 지질학과(Department of Geology)의 관계자들께도 감사드린다. 또한 세심한 교정과 좋은 의견을 개진해 준 강원대학교 이진용 교수와 익명의 심사자께도 감사드린다.

참 고 문 헌

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

김형수, 한찬, 유정아, 1999, 지하수 함양 및 활용증대방안 연구, WRR1-GG-99-1, 한국수자원공사 연구보고서.

최병수, 정형재, 이기철, 김정희, 1996, 소유역 지하댐 개발에 관한 기술개발 연구, 농어촌진흥공사, 농림부 연구보고서.

Bischoff, H., 1981, An intergral equation method to solve three dimensional flow to drainage systems, *Applied Mathematical modelling*, **5**, 399-404.

Chen, C., Wan, J., and Zhan, H., 2003, Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to horizontal well, *Journal of Hydrology*, **281**, 159-171.

Cunningham, W.L., Bair, E.S., and Yost, W.P., 1995, Hydrogeology and simulation of ground-water flow at the South Well Field, Columbus, Ohio, USGSWRI-95-4279.

Diersch, H.-J G., 2004, Discrete feature modeling of flow, mass and heat transport processes by using FEFLOW, WASY Software, FEFLOW White Papers, **1**, 149-196.

Eberts, S.M. and Bair, E.S., 1990, Simulated effects of quarry dewatering near a municipal well field, *Ground Water*, **28**(1), 37-47.

Hantush, M.S. and Papadopoulos, I.S., 1962, Flow of groundwater collector wells, Proceedings, American Society of Civil Engineers, *Journal of the Hydraulics Division*, HY5, 221-224.

Hunt, B., 2003, Groundwater analysis using function.xls (Last Update:23 August 2006, distributed by PDF), Civil Engineering Department, University of Canterbury.

Ophori, D.U. and Farvolden, R.N., 1985, A hydraulic trap for preventing collector well contamination: A case study, *Ground Water*, **23**(5), 600-610.

Steward, D.R. and Jin, W., 2001, Gaining and losing sections of horizontal wells, *Water Resources Research*, **37**(11), 2677-2685.

Todd, D.K., 1959, *Ground Water Hydrology*, New York: Wiley.

Zhan, H. and Park, E., 2003, Horizontal well hydraulics in leaky aquifers, *Journal of Hydrology*, **281**, 129-146.

Zhan, H. and Zlotnicki, V.A., 2002, Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer, *Water Resources Research*, **38**(7), 13-1-13-11.