

해안대수층에서 지하수-지표수 상호작용에 의한 지하수위 변화

김구영^{1*} · 이철우¹ · 김용제¹ · 김태희¹ · 우남철²

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²연세대학교 지구시스템과학과

Water-Level Fluctuation due to Groundwater-Surface Water Interaction in Coastal Aquifers

Kue-Young Kim^{1*} · Cheol-Woo Lee¹ · Yongje Kim¹ · Taehee Kim¹ · Nam-Chil Woo²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Earth System Sciences, Yonsei University

ABSTRACT

Analysis of water-level fluctuation due to groundwater-surface water interaction in coastal aquifers is carried out by numerical modeling. The conceptual model used in this study has a stream boundary and a tidal boundary that forms a right angle and the stream partially penetrates the aquifer. We analyzed the effect of each boundary and the simultaneous effect of the two boundary conditions. The area of influence caused by the stream boundary increased during the simulation, while the influence zone of the coastal boundary was relatively constant. The groundwater level near the zone where two boundaries meet may rise by the action of combined effect of the two boundaries or may not change by cancelling the effect of each boundary. Thereafter, care must be taken when hydraulic parameters are estimated using sinusoidal oscillations of hydraulic head in coastal aquifers. Sensitivity analysis is employed to develop insight into the controls on groundwater level fluctuations. In this study our analyses focused on the effect of conductance and the stream width to the aquifer nearby.

Key words : coastal aquifer, groundwater-surface water interaction, numerical modeling, hydraulic parameter

요 약 문

조석의 효과가 대수층에 미치는 해안대수층에서 지하수-지표수 상호작용에 관한 모사를 위해 수치모델링을 이용하였다. 모사에 사용한 모델은 하천경계와 해안경계가 서로 직교하며 하천은 대수층을 부분관통하고 있다. 해안경계와 하천경계에 의한 영향을 각각 살펴보고 두 경계조건에 의한 동시효과를 함께 모사하였다. 모사기간동안 해안경계에 의한 영향은 일정한 범위까지만 나타났으나, 하천경계에 의한 영향은 시간의 증가에 따라 영향범위가 넓어졌다. 하천경계와 해안경계조건이 만나는 부근에서는 해안경계에 의한 지하수위의 반복적인 상승과 하강으로 인해 두 경계조건에 의한 지하수위가 상호 상승작용을 일으키기도 하고 상호 상쇄되어 지하수위의 변화가 없는 영역이 나타나기도 한다. 따라서 이러한 하천과 해안경계조건이 상호 교차하는 주변 대수층에서의 수위를 측정하여 해안대수층에서의 수리상수를 추정하면 수리확산계수를 과대 혹은 과소평가하는 오류를 범할 수 있으므로 주의를 요한다. 하천바닥의 컨덕턴스(conductance)와 하천의 폭이 주변 대수층에 미치는 영향을 살펴보기 위해 입력인자를 변화시키며 모사한 결과, 하천폭의 증가에 의한 주변 대수층에서의 지하수위 변화는 하천바닥의 면적이 증가함에 따라 하천바닥 전체에서 대수층으로 유동하는 유량이 증가하기 때문이다.

주제어 : 해안대수층, 지하수-지표수 상호작용, 수치모델링, 수리상수

*Corresponding author : kykim@kigam.re.kr

원고접수일 : 2004. 3. 12 게재승인일 : 2004. 11. 8

질의 및 토의 : 2005. 2. 28 까지

1. 서론

산업의 발전과 인구의 증가로 인해 수자원에 대한 인식이 증가하고 있으며, 특히 지하수자원과 지표수자원의 효율적인 연계 및 관리의 필요성이 대두되고 있다. 지표수 주변의 대수층은 지하수와 지표수가 수리적으로 상호 연계되어 있으며, 이 부분에 관해서 해석학적인 방법(analytical method)¹⁻⁹과 수치적인 방법(numerical method)¹⁰⁻¹⁴을 이용해 많은 연구가 이루어졌다.

이 연구 외에 지하수자원의 효율적인 관리와 관련한 또 다른 흥미로운 주제는 해안대수층에서 해수와 지하수의 상호관계에 관한 연구이다. 해안에 접한 대수층의 경우 해수와 지하수가 수리적으로 상호 연결되어 있으며 조석의 효과에 의해 지하수위는 변동한다. 이러한 지하수위의 변동은 해안에 설치된 구조물의 안정성에 영향을 미치며, 따라서 환경 및 공학적 측면에서 조석의 효과에 의한 지하수위의 변동을 이해하는 것은 중요하다¹⁵⁻¹⁶.

지하수-지표수 상호연계에 관한 연구는 1940년대부터 이루어져왔다. Theis(1941)¹는 하천 주변의 대수층에서 양수시 하천수의 저감량을 계산하였으며, Hantush(1965)⁴는 이를 발전시켜 하천주변이 준투수성 물질(semipervious material)에 의해 둘러싸였을 때 하천수의 저감량을 계산하는 해를 구하였다. 그러나 위의 두 해 모두 하천이 대수층을 완전관통 했을때를 가정하여 구한 해법이며, 이를 보완하기 위해 Hunt(1999)⁶는 하천이 대수층을 부분관통했을때의 해를 구하였다. 이후 Fox 외(2002)⁹는 Hunt(1999)⁶의 해를 확장하여 하천의 폭을 고려한 해법을 발표하였다. Zlotnik와 Huang(1999)⁷은 하천수위의 변화에 따른 지하수위의 변동 모델을 제안하였다. 수치적인 방법을 이용한 해석은 Sophocleous 외(1995)¹⁰, Conrad와

Beljin(1996)¹¹, Chen과 Yin(1999)¹² 등에 의해 연구되어 왔으며, Chen과 Yin(2001)¹³은 수치모델링을 통해 계절에 따라 지하수 채수량이 변화할 때 하천수의 저감을 구성하는 성분들에 대해 분석하였다. 이러한 수치모델링은 많은 가정을 필요로 하는 해석학적인 방법에 비해 좀더 현실을 반영할 수 있는 장점이 있다¹⁴.

해안대수층에서 지하수와 해수의 관계에 관한 연구는 Ferris(1951)¹⁷에 의해 처음 발표된 이후 많은 학자들에 의해 활발한 연구가 이루어졌다¹⁷⁻²⁴. Sun(1997)¹⁹은 조석변화를 하는 하구의 경계조건을 가지는 2차원 피압대수층에 관한 연구를 수행하였으며, Jiao와 Jang(1999)²⁰은 해안대수층에서의 누수효과를 고려한 해석해를 발표하였다. Tang과 Jiao(2001)²²는 Sun(1997)¹⁹과 Jiao와 Jang(1999)²⁰의 해를 확장하여 2차원의 누수대수층에서의 해석모델을 제시하였으며, Kim 외(2003)²⁴는 자유면대수층에서의 지하수위가 해안대수층에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

그러나 현재까지 지하수-지표수 상호작용에 관한 연구와 해안대수층에서의 지하수-해수 상호작용에 관한 연구를 결합한 시도가 이루어진 바 없으며, 이에 본 연구에서는 수치모델인 MODFLOW(Mcdonald와 Harbaugh, 1988)²⁵를 이용하여 해안대수층에서의 지하수-지표수 연계에 관한 분석을 실시하였다.

2. 모델설정

본 연구에서는 해안대수층에서의 지하수-지표수 상호작용에 관한 분석을 위해 Fig. 1과 같은 개념모델을 설정하였다. 모델영역의 중앙을 하천이 북에서 남으로 관통하고 있으며 남쪽은 해안과 접하고 있다(Fig. 1(a)). 모델의 단

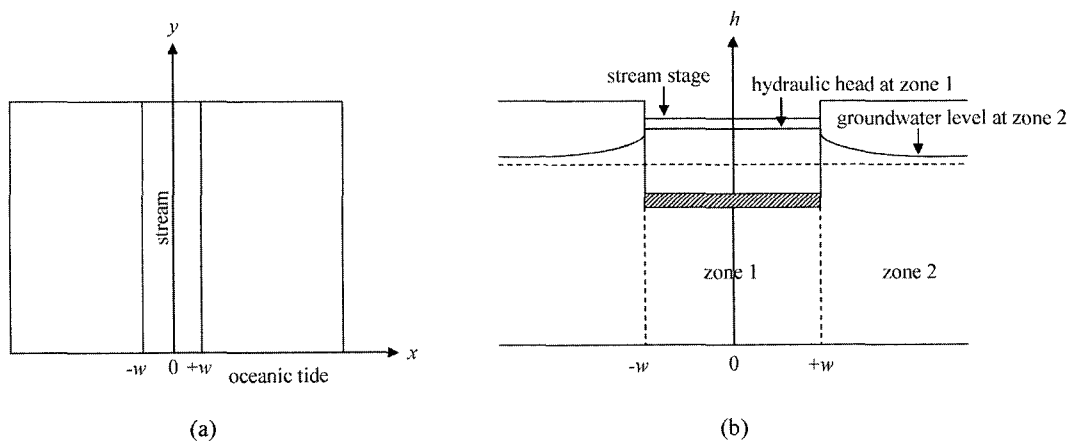


Fig. 1. Conceptual model for the problem considered in this paper; (a) plan view, (b) cross-sectional view.

면을 살펴보면 하천이 대수층을 부분관통하고 있으며, 1영역(zone 1)은 피압 상태이며, 2영역(zone 2)은 자유면 상태이다(Fig. 1(b)). 이때 하천의 중앙을 중심으로 서쪽과 동쪽은 대칭을 이루고 있으며, Fig. 1에서 하천의 중심축인 $x=0$ 인 지점에서의 경계조건은 무흐름경계조건($\partial h/\partial x=0$)으로 둘 수 있기에 본 연구에서는 $x \geq 0$ 인 영역만을 모사하였다.

수치모델을 통해 설정한 모델의 크기는 $1,000\text{m} \times 1,010\text{m} \times 20\text{m}$ 이며, x -방향의 격자 간격은 0~300m는 10m, 300~600m는 15m, 600~1000m는 20m 간격으로 설정하였다. y -방향으로는 해안선으로부터의 거리를 쉽게 계산하기 위하여 -10~0m까지를 해안 경계조건으로 설정하고 0~1000m까지는 x -방향의 격자 간격과 같이 설정하였다. 수직방향으로는 2개의 층으로 나누었으며 1층과 2층 모두 10m로 설정하였으며, 하천은 1층까지 관통되어 있다. 모델에 입력한 수리인자는 Table 1에 요약하였다. 경계조건의 경우 북쪽과 동쪽은 무흐름경계조건(no-flow boundary)을 주었으며, 이때 하천과 조석의 영향이 미치지 않을 만큼 충분히 먼 거리에 설정하였다($\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial h}{\partial x} = 0$, $\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{\partial h}{\partial y} = 0$) 서쪽은 river package를 이용하여 제3형 경계조건($\partial h/\partial n + ch = \text{const.}$)을, 남쪽은 제1형 경계조건($h = \text{const.}$)을 주었다. 이때 남쪽의 경계조건에 조석의 효과를 주기 위해 시간간격(time step)을 매 시간별로 식 (1)에 따라 입력하였다.

$$h(x,0,t) = h_{\text{msl}} + A \cos(\omega t + c) \quad (1)$$

위 식에서 h_{msl} 은 평균해수위, A 는 조석변화의 최대변화 범위, ω 는 조석의 속도(tidal speed)이며 $2\pi/t_0$ 이다. 여기서 t_0 는 조석의 주기²⁶⁾, c 는 상변화(phase shift)이다. 본 연구에서는 계산상의 편이를 위해 $h_{\text{msl}}=0\text{m}$, $A=1\text{m}$, $\omega s=2\pi/24 \text{ h}^{-1}$, $c=0$ 으로 두었다.

모든 영역의 초기수위는 평균해수위와 같은 0.0m를 주었으며, 하천수위(stream stage), 하천바닥(stream bed)의 두께 및 수리전도도의 변화에 의한 주변대수층에서의 수위변화 효과를 살펴보기 위해 이들 변수를 변화시켜가며 모사하였다.

3. 모사결과 및 토의

3.1. 조석의 효과

먼저 조석의 효과에 의한 지하수위의 변화양상을 살펴

보기 위해 하천에서의 수위변화는 없는 것으로 설정하고 1영역과 2영역에 대해 거리에 따른 지하수위 진폭(amplitude) 및 위상변화(phase delay)를 살펴보았다. Fig. 2(a)는 $t=3\text{hr}$ 일때 1영역과 2영역에 대한 거리별 지하수위 진폭이며, Fig. 2(b)는 1영역과 2영역에서의 위상변화 양상이다. 1영역과 2영역 모두 해안으로부터 거리가 멀어짐에 따라 지하수위 진폭은 감소하는 경향을 보인다(Fig. 2(a)). 1영역의 경우 조석의 효과가 약 700m까지 미치는 반면 2영역의 경우 약 500m 지점까지밖에 못미치며, 1영역에 비해 급격히 감소한다. 즉, 자유면상태인 2영역에 비해 피압상태인 1영역에서 조석의 효과가 더 먼 거리까지 미칠 수 있다. 또한 Fig. 2(b)를 살펴보면, 1영역에 비해 2영역에서 더 큰 지연시간(delay time)을 가지고 지하수위가 반응함을 알 수 있다. 이는 자유면 대수층의 경우 저류계수가 크기 때문에 조석효과가 대수층에 전달되는 것을 상대적으로 더 빨리 저감시키기 때문이다.

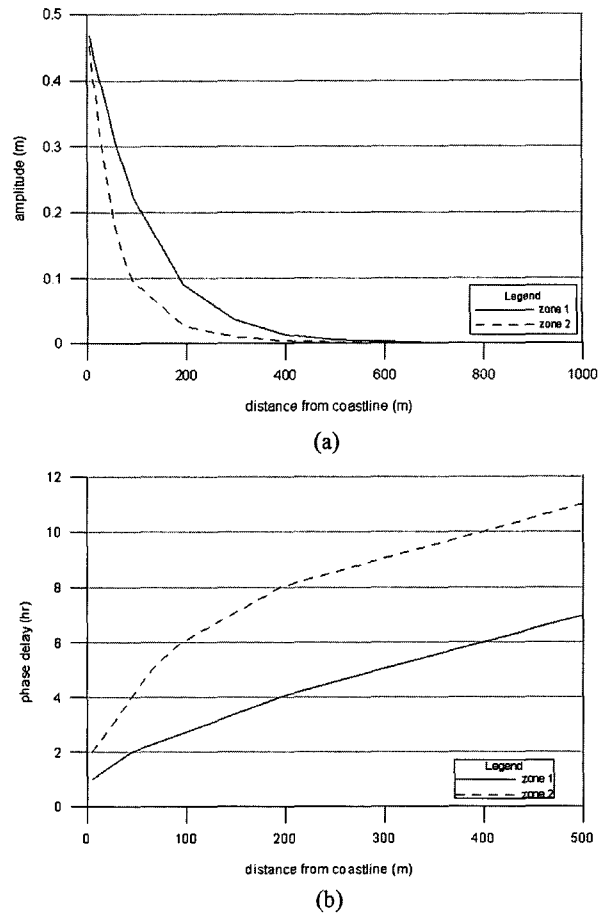


Fig. 2. Change of amplitude of groundwater level with distance from coastline at $t=3 \text{ hr}$ (a) and phase delay with distance (b) at zone 1 and zone 2 respectively.

3.2. 하천의 효과

하천의 효과에 의한 지하수위의 변화양상을 살펴보기 위해 모델 남쪽 경계에서 조석의 효과는 설정하지 않은 상태에서 하천 직하부지점(x=5m)부터 하천에서 x축 방향으로 95m, 195m, 295m, 400m 떨어진 지점에서의 시간별 수위변화를 살펴보았다. 하천수위는 t=0hr 일때 단위 수위(1m)만큼 상승시킨 결과, 하천 직하부의 경우 모사 시작후 초기에 지하수위가 급상승하여 약 30시간 후에는 0.5m까지 상승한다. 하천으로부터 거리가 멀어짐에 따라 하천수위의 변화가 미치는 영향은 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 하천으로부터 400m 떨어진 지점에서는 수

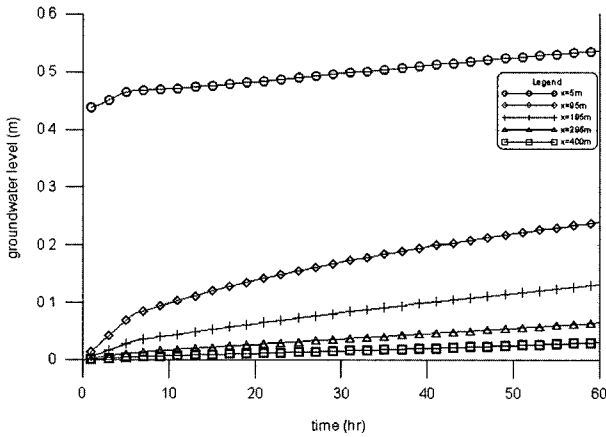


Fig. 3. Groundwater level with time at various distance from the center of the stream.

위변화가 거의 나타나지 않는다(Fig. 3).

3.3. 조석과 하천의 동시 효과

3.3.1 조석과 하천의 동시효과에 의한 영향

본 절에서는 조석에 의한 영향과 하천에 의한 영향이 동시에 대수층의 지하수위에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 모델 설정시 서쪽에는 하천경계, 남쪽에는 해안의 조석효과를 고려한 수두경계를 설정했으며, 입력인자는 Table 1과 같다. 두 경계조건이 대수층의 지하수위에 미치는 정도를 비교하기 위해 식 (1)의 조석의 크기 (amplitude) A와 하천의 수위변화 모두 1m로 설정하였다.

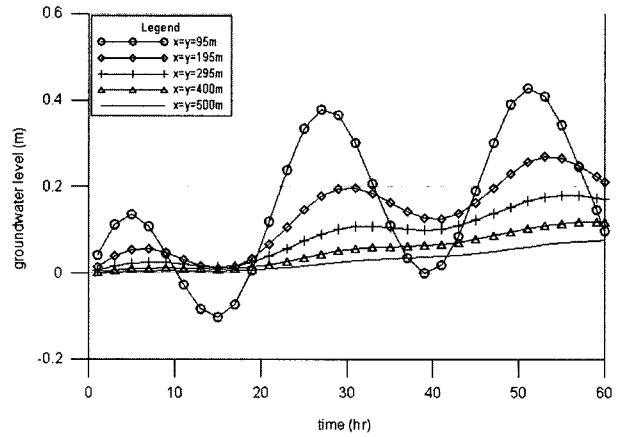


Fig. 4. Groundwater level with time at various distances from origin of the model.

Table 1. The dimension and input parameters for the hypothetical model

Dimension of model	
Size of model	1,000m in x direction (70 columns) 1,010m in y direction (71 rows) 20m in z directions (21 ayers)
spacing in x direction	10m, 15m, 20m
spacing in y direction	10m, 15m, 20m
spacing in z direction	10m, 10m
Input parameters	
horizontal hydraulic conductivity (K_x, K_y)	200md^{-1}
vertical hydraulic conductivity (K_z)	2md^{-1}
specific yield (S_y)	0.1
specific storage (S_s)	$1 \times 10^{-6} \text{m}^{-1}$
stream width	10m, 20m, 40m
conductance of streambed	5, 10, 20, 30, $40\text{m}^2\text{h}^{-1}$
Boundary condition	
North, East side	No-flow boundary
West side	Cauchy boundary
South side	Dirichlet boundary

모사기간은 60시간이며 하천경계와 해안경계가 교차하는 모델 원점으로부터 x, y 방향으로 95m, 195m, 295m, 400m, 500m 떨어진 지점에서의 시간별 수위변화는 Fig. 4와 같다. 여기에서 보면 수위변화는 하천 및 해안의 경계조건에 의한 결과가 중첩되어 나타나고 있으며, 조석에 의한 변화 및 하천에 의한 효과 모두 경계조건으로부터

떨어짐에 따라 지하수위 반응은 감소하고 있다.

하천경계와 해안경계가 교차하는 모델 원점으로부터 x, y 방향으로 95m 떨어진 지점에서 지하수위가 상승하는 시점과 하강하는 시점인 5, 13, 27, 39, 51, 60시간의 모델내 지하수위를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5(a), (c), (e)는 만조시 지하수위가 상승한 시점에서의 지하수위 분포

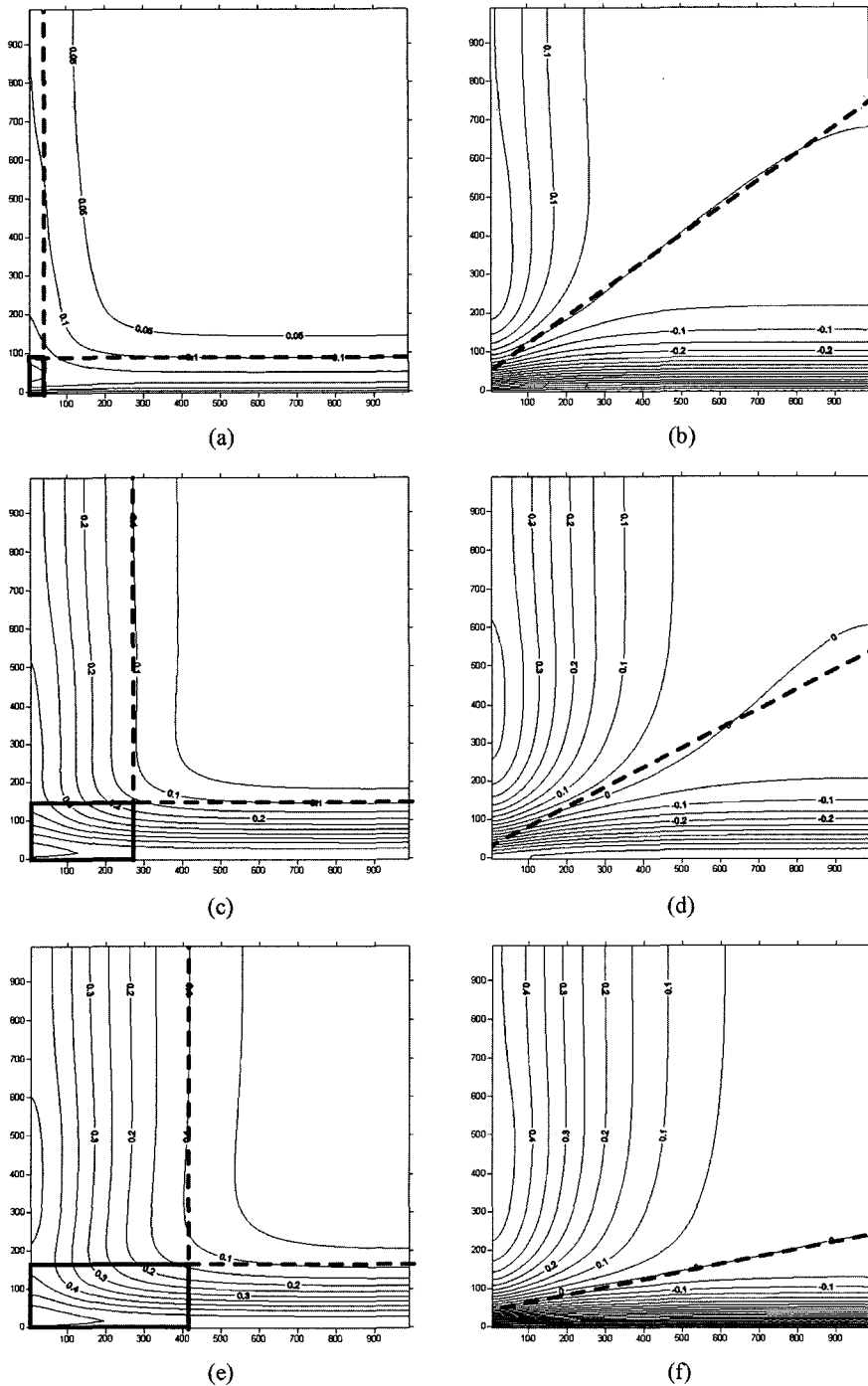


Fig. 5. Contour plot of groundwater level at $t=5\text{hr}$ (a), $t=13\text{hr}$ (b), $t=27\text{hr}$ (c), $t=39\text{hr}$ (d), $t=51\text{hr}$ (e), and $t=60\text{hr}$ (f), setting the stream stage to 1m at the start of simulation.

도이며, 경계조건에 의한 영향을 초기 크기의 10%인 0.1m까지로 본다면, 조석에 의해 영향이 미치는 범위는 $t=5hr$ 일때 약 100m, $t=27hr$ 일때 약 150m이며, 51hr일때 역시 약 150m로써 시간의 증가에 따라 큰 변화는 나타나지 않는다. 반면 하천에 의한 영향은 $t=5hr$ 일때 약 50m, $t=27hr$ 일때 약 250m, 51hr일때 약 400m까지로 계속 증가한다. Fig. 5(b), (d), (f)는 간조시 지하수위가 하강하는 시점에서의 지하수위 분포도이며, 상승하는 시점에서와 마찬가지로 조석에 의한 영향은 150m를 넘지 않으나, 하천에 의한 영향은 시간의 증가에 따라 $t=13hr$ 일때 250m, $t=39hr$ 일때 350m, $t=60hr$ 일때 450m까지로 계속 증가한다.

만조의 경우 두 경계가 교차하는 주변은 두 경계조건에 의한 영향이 상호 상승작용을 일으켜 지하수위가 더욱 상승하며 이 영역은 시간에 따라 증가한다(Fig. 5(a),(c),(e)). 반면 간조의 경우 두 경계가 교차하는 주변은 두 경계조건에 의한 영향이 상호 상쇄되어 지하수위 변화가 없는

영역이 나타난다. Fig. 5(b),(d),(f)에서 점선으로 표현한 이 영역은 시간에 따라 하천경계조건에 의한 영향이 커짐에 따라 x 축 방향으로 기운다. 이는 하천에서의 영향과 해안선에서의 영향에 대한 상관관계로서 하천과 해안경계가 직교하는 대수층에서 이 경계선의 변화를 해석하는 것은 중요한 의미를 가진다.

해안대수층에서 조석효과에 의한 수위변화 연구는 대수층의 수리상수를 추정하는 방법으로 이용되기도 하는데^{17,20}, 이러한 하천과 해안경계조건이 상호 교차하는 주변 대수층에서의 수위를 측정하여 해안대수층에서의 수리상수를 추정하면 수리확산계수(hydraulic diffusivity, T/S)를 과대평가(만조시) 하게 되거나 과소평가(간조시)하는 오류를 범할 수 있으므로 주의해야 할 것이다.

하천수위가 다시 하강할때의 주변대수층의 반응을 살펴 보기 위해 60시간 이후 하천수위를 0m로 낮추어 모사해 보았다. 두 경계조건에 의해 지하수위가 상승하는 시점과 하강하는 시점인 75, 87, 99, 111시간의 모델내 지하수위

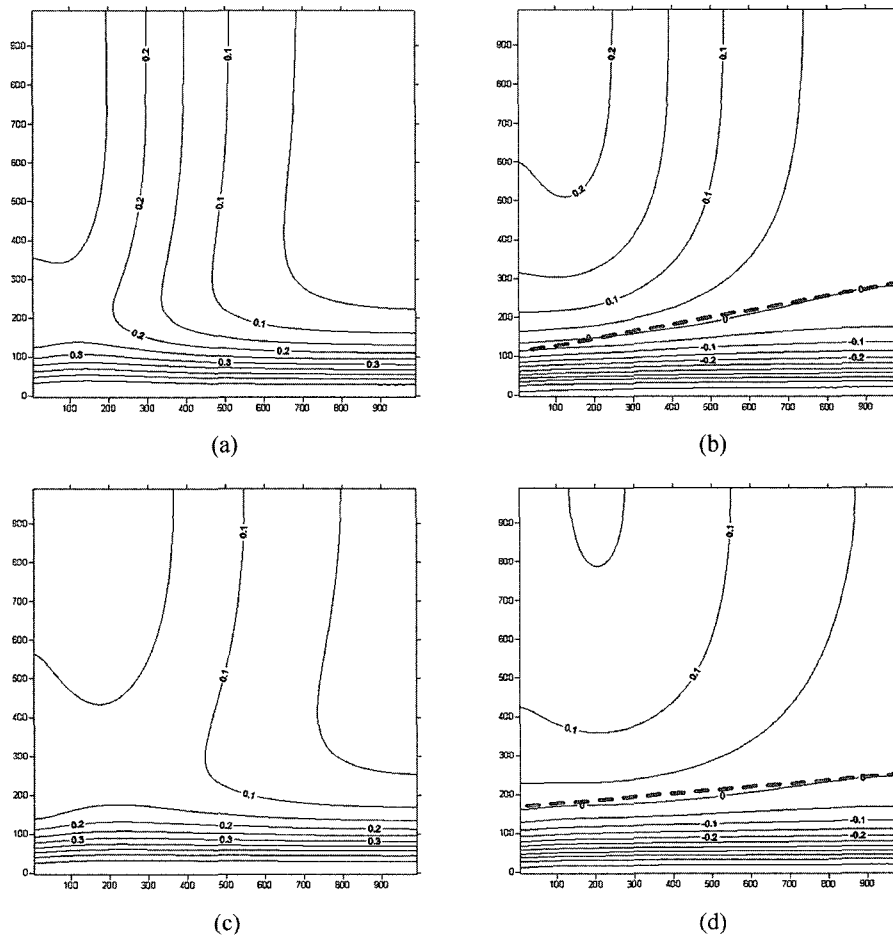


Fig. 6. Contour plot of groundwater level at $t=75hr$ (a), $t=87hr$ (b), $t=99hr$ (c), and $t=111hr$ (d), as a result of lowering the stream stage from 1m to 0m at $t=60hr$.

를 Fig. 6에 도시하였다. 시간이 증가함에 따라 하천은 점차 이득하천의 형태를 나타내고 있으며, 하천과 주변 대수층의 수리경사가 감소하는 경향을 보인다. 하천수위가 감소함에 따라 간조시 대수층의 지하수위가 0m를 나타내는 지점을 살펴보면 하천에서 먼 지점의 경우 시간의 증가에 따라 큰 변화가 없으나, 하천부근의 경우 조석에 의한 영향이 내륙쪽으로 더 전진해 있음을 볼 수 있다. 이는 하천수위의 감소로 인해 이득하천이 됨으로 인해 나타나는 현상으로써, 이 경우 역시 해안대수층에서의 지하수위를 이용하여 대수층의 수리인자를 추정시 주의를 요한다.

3.3.2 하천바닥의 컨덕턴스에 의한 영향

McDonald와 Harbaugh(1988)²⁵는 하천바닥(streambed)의 투수성을 표현하기 위해 컨덕턴스(conductance)를 이용하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{K_s WL}{M} \quad (2)$$

위 식에서 K_s 는 하천바닥의 수직수리전도도[LT^{-1}], W 는 하천의 폭[L], L 은 하천의 길이, [L], M 은 하천바닥의 두께[L]이다. 즉, 컨덕턴스 C 는 K_s , W , M , L 에 대한 함수이다. 즉, 하천의 길이 L 이 일정하다면, 하천의 폭이 증가하거나 하천바닥의 수직수리전도도가 증가하면 컨덕턴스 C 가 증가하는 반면, 하천바닥의 두께가 증가하면 컨덕턴스 C 는 감소한다.

본 절에서는 조석의 효과가 미치는 해안대수층에서 하천바닥의 컨덕턴스가 주변 대수층에 미치는 영향을 살펴 보았다. 모델 설정은 Table 1과 같으며 하천바닥의 컨덕턴스는 5, 10, 20, 30, 40 m^2h^{-1} 로 변화시켜가며 그 결과를 살펴보았다(Fig. 7). 먼저 하천바닥의 컨덕턴스가 하천으로부터 대수층으로 빠져나가는 누수율에 미치는 영향을 Fig. 6(a)에 도시하였다. 하천누수율(stream leakage)은 하천의 컨덕턴스(C)와 하천수위(stream stage)와 지하수위의 차($H-h$)에 의해 결정된다. 시간별 하천누수율을 살펴 보면 하천경계만 있을때의 양상과는 달리 누수량이 시간

에 따라 계속해서 감소하지 않고 증가와 감소를 반복하고 있다(Fig. 7(a)). 이는 조석의 효과에 의해 지하수위가 계속해서 상승과 하강을 반복하여 변동하기 때문이다. 하천의 컨덕턴스를 5단계로 변화시키며 모사한 결과 하천바닥의 컨덕턴스가 클수록 하천의 누수율의 상승과 반복 변화 정도가 크며, 반대로 컨덕턴스 값이 작을수록 조석에 의한 효과가 미비하다.

또한 하천바닥의 컨덕턴스 변화에 의한 지하수위 변동 양상을 Fig. 7(b)에 도시하였다. 모델 원점으로부터 100m

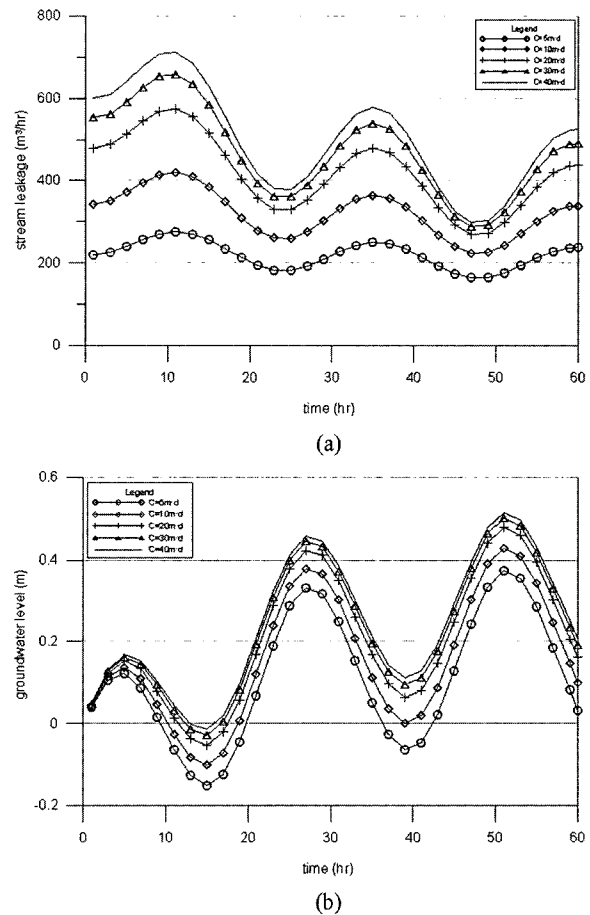


Fig. 7. Variations of river leakage(a) and groundwater level(b) with time at $x=y=100m$ for various conductance values.

Table 2. Stream leakage and groundwater level for different conductance of streambed at $t=60hr$

$C[m^2h^{-1}]$	percent change of C [%]	w [m]	stream leakage [m^3h^{-1}]	percent change of leakage [%]	groundwater level [m]	percent change of level [%]
5	0.0	10	237.2	0	0.03	0
10	100	10	338.8	43	0.10	233
20	300	10	437.9	85	0.16	433
30	500	10	491.1	107	0.19	533
40	700	10	526.1	122	0.21	600

떨어진 지점($x=y=100m$)에서의 지하수위 변화를 살펴보면 조석에 의하여 변화하는 수위변동폭(A)은 같으나 하천바닥의 컨덕턴스가 클수록 하천수위의 영향으로 인해 수위가 증가하는 경향을 보인다

하천바닥의 컨덕턴스의 변화에 대한 누수율과 지하수위의 변화는 Table 2와 같다. 컨덕턴스를 100%에서 700%까지 변화시켰을때 누수율은 43~122%, 지하수위는 233~600%까지 변화하였으며, 컨덕턴스의 변화에 대해 지하수위가 더 민감하게 반응하였다.

3.3.3 하천의 폭에 의한 영향

지하수-지표수 상호작용에 대한 연구와 관련하여 많은 학자들이 해석학적인 해를 발전시켰으며¹⁻⁹⁾, 개선된 점 중 하나로써 Zlotnik와 Huang(1999)은 초기 하천의 폭을 고려하지 않은 해³⁻⁵⁾를 확장하여 하천폭에 대한 영향을 평가하였다⁷⁾. Zlotnik와 Huang(1999)은 해석학적인 모델을 이용하여 하천이 단위수위만큼 변화할 때 하천의 폭이 증가하면 주위 대수층에서의 지하수위 반응이 더 크다는 결과를 내었다. 이때 사용한 수식(Zlotnik와 Huang, 1999, equation¹⁴⁾)에는 입력인자로서 누수율(leakance)인 K_s/M 이 입력되며, 다른 변수는 고정시킨채 하천의 폭(w)만 증가시키며 그 결과를 살펴보았다. 이 경우 하천의 폭이 증가함에 따라 전체 하천바닥의 컨덕턴스 값도 증가하게 되며, 하천으로부터 대수층으로의 누수량도 자연히 증가하게 될 것이다. 즉, 하천의 폭이 증가함에 따라 주변 대수층의 지하수위의 변동폭이 커지는 영향이 단순히 하천의 폭에 의한 영향인지 전체 하천바닥의 컨덕턴스의 증가에 의한 영향인지 판단하기 어렵다. 따라서 본 절에서는 하천의 폭은 증가시키면서 동시에 하천바닥의 단위면적당 컨덕턴스를 감소시켜 하천으로부터 대수층으로 빠져나가는 수량을 일정하게 하면서 지하수위의 변화를 살펴보았다.

하천의 폭(w)은 10m, 20m, 40m로 증가시켰으며, 하천으로부터 대수층으로 빠져나가는 수량을 일정하게 해주기 위해 하천바닥의 단위면적당 컨덕턴스는 40, 16.6, $6.6m^2h^{-1}$ 으로 감소시켰다. 그 결과 시간별 누수량은 세 경우 모두 거의 일정하였다(Fig. 8(a)). 하천 폭의 증가에 따라 $x=y=100m$ 지점에서의 지하수위 변화를 살펴보면 하

천폭이 20 m로 2배 증가하였을때 최대 변동은 0.6 cm이고, 40m 로 4배 증가하였을때 최대변동은 1.7 cm로써 하천 변동폭에 비해 무시할만한 변화이다(Fig. 8(b)). 즉, 하천 폭의 증가에 따라 지하수위의 변화는 결국 하천폭이 증가함에 따라 컨덕턴스가 함께 증가하여 나타난 결과이다. 본 모사결과에 의하면 하천에서 대수층으로 빠져나가는 수량을 일정하게 하고 단순히 하천폭만 증가하면 지하수위 변화에는 큰 영향을 못미치며, 단순히 하천이 관측점과 가까워짐으로 인해 지하수위가 소폭 상승할 뿐이다. 모사후 60시간후 하천폭의 증가에 따른 누수율과 지하수위를 Table 3에 요약하였다.

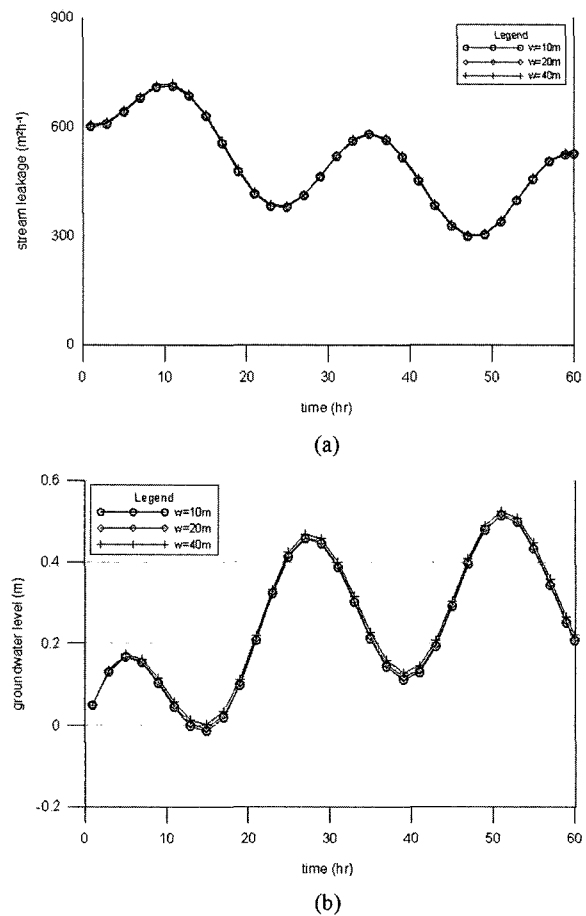


Fig. 8. Variations of river leakage(a) and groundwater level(b) with time at $x=y=100m$ for various conductance values.

Table 3. Stream leakage for different width of stream at $t=60hr$

W [m]	percent change of C [%]	C [m^2h^{-1}]	stream leakage [m^3h^{-1}]	percent change of leakage [%]	groundwater level [m]	percent change of level [%]
10	0	40	526.1	0.0	0.21	0.0
20	100	16.6	528.6	0.5	0.21	0.0
40	300	6.6	530.0	0.7	0.22	4.8

4. 결 론

해안대수층에서의 지하수-지표수 상호작용에 관한 분석을 위해 수치모델을 이용하였으며, 모델은 하천경계와 해안경계가 서로 직교하게 설정하여 각각의 경계가 주변 대수층에 미치는 영향과 두 경계가 상호작용을 일으켜 지하수위에 미치는 영향을 살펴보았다. 이때 하천은 대수층을 부분관통하게 설정하였으며 하천이 설정된 부분의 아래 대수층은 피압대수층이며 이외 지역은 자유면 대수층이다. 해안경계와 하천경계에 의한 동시효과를 모사한 결과 각각의 경계조건에 의한 결과가 합성되어 나타났다. 조석에 의한 변화 및 하천에 의한 변화 모두 두 경계조건으로부터 멀어짐에 따라 지하수위 반응은 감소하였다. 모사기간동안 해안경계에 의한 영향은 일정한 범위까지만 나타났으나, 하천경계에 의한 영향은 시간의 증가에 따라 영향범위가 넓어졌다. 또한 해안 경계에서의 두 경계조건이 교차하는 주변 대수층에서 시간에 따른 지하수위분포를 살펴보면 만조시에는 두 경계의 상호상승작용으로 지하수위가 더욱 상승하고 간조시에는 두 경계의 영향이 상호 상쇄되어 지하수위 변화가 없는 영역이 나타났으며, 이 영역은 시간이 지남에 따라 하천경계에 의한 영향범위가 커짐에 따라 하천경계에서 멀어지고 해안경계쪽에 가까워졌다. 이러한 하천과 해안경계조건이 상호 교차하는 주변 대수층에서의 수위를 측정하여 해안대수층에서의 수리상수를 추정하면 수리확산계수(hydraulic diffusivity, T/S)를 과대평가(만조시) 하게 되거나 과소평가(간조시)하는 오류를 범할 수 있으므로 주의해야 할 것이다.

해안대수층에서 하천바닥의 컨덕턴스가 주변대수층에 미치는 영향을 살펴보기 위해 컨덕턴스를 변화시켜가며 하천바닥으로부터 주변대수층으로 흘러들어가는 누수율과 지하수위를 살펴본 결과 시간별 하천 누수율은 해안 경계가 없는 경우와는 달리 누수율이 증가와 감소를 반복하였다. 즉, 해안대수층에서는 하천바닥을 통하여 유입되는 지하수량은 하천수위가 고정되어 있는 경우에도 계속 변화한다. 하천바닥의 컨덕턴스 변화에 대한 누수율 및 주변대수층에서의 지하수위의 민감도를 분석한 결과 지하수위가 더 민감하게 반응하였다. 또한 하천폭이 주변 대수층에 미치는 영향을 살펴본 결과 하천의 폭이 증가함에 따라 주변 지하수위 변화가 증가하는 것은 결국 전체 하천바닥의 면적이 커짐에 따라 누수량의 증가에 의한 것이며 단순히 하천폭이 미치는 영향은 미미하였다.

사 사

본 연구는 “미래 제주도 청정지하수 안정적 공급시스템 구축 사업”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Theis, C.V., “The effect of a well on the flow of a nearby stream”, *Trans. Am. Geophys. Union*, **22**(3), pp. 734-738 (1941).
2. Glover, R.E., and Balmer, G.G., “River depletion resulting from pumping a well near a river”, *Trans. Am. Geophys. Union*, **35**, pp. 468-470 (1954).
3. Ferris, J.F., Knowles, D.B., Brown, R.H., and Stallman, R.W., “Theory of aquifer tests”, U.S. Geological Survey, Water Supply Paper, 1536-E, pp. 126-131 (1962).
4. Hantush, M.S., “Wells near stream with semi-pervious beds”, *J. of Geophys. Res.*, **70**(12), pp. 2829-2838 (1965).
5. Hall, F.R., and Moench, A.F., “Application of the convolution equation to stream-aquifer relationship”, *Water Resour. Res.*, **8**(2), pp. 487-493 (1972).
6. Hunt, B., “Unsteady stream depletion from ground water pumping”, *Ground Water*, **37**(1), pp. 98-102 (1999).
7. Zlotnik, V.A., and Huang, H., “Effect of shallow penetration and streambed sediments on aquifer response to stream stage fluctuations (analytical model)”, *Ground Water*, **37**(4), pp. 599-605 (1999).
8. Butler Jr., J.J., Zlotnik, V.A., and Tsou, M.-S. “Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream”, *Ground Water*, **39**(5), pp. 651-659 (2001).
9. Fox, G.A., DuChateau, P., and Surnford, D.S., “Analytical model for aquifer response incorporating distributed stream leakage”, *Ground Water*, **40**(4), pp. 378-384 (2001).
10. Sophocleous, M.A., Koussis, A., Martin, J.L., and Perkins, S.P., “Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration”, *Ground Water*, **33**(4), pp. 579-588 (1995).
11. Conrad, L.P., and Beljin, M.S., “Evaluation of an induced infiltration model as applied to glacial aquifer systems”, *Water Resources Bull.* **32**(6), pp. 1209-1220 (1996).
12. Chen, X., and Yin, Y., “Evaluation of stream depletion for vertical anisotropic aquifers”, *J. of Environ. Sys.*, **27**(1), pp. 55-70 (1999).
13. Chen, X., and Yin, Y., “Streamflow depletion: modeling of reduced baseflow and induced stream infiltration from seasonally pumped wells”, *J. of American Water Resour. Assoc.*, **37**(1), pp. 185-195 (2001).
14. Chen, X., and Shu, L., “Stream-aquifer interactions: Evaluation of depletion volume and residual effects from groundwater pumping”, *Ground Water*, **40**(3), pp. 284-290 (2002).

15. Pontin, J.M.A., "Prediction of groundwater pressures and uplift below excavations in tidal limits", In *Groundwater in Engineering Geology*, Cripps JC *et al.* (eds). Engineering Geology Special Publication No.3, Geological Society of London: London, pp. 333-366 (1986).
16. Liu, K.F., "Tide-induced ground-water flow in deep confined aquifer", *J. of Hydraulic Eng.*, **122**, pp. 104-110 (1996).
17. Ferris, J.G., "Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility", *Inter. Assoc. of Hydro. Sci. Publ.*, **33**, pp. 148-155 (1951).
18. Li, G., and Chen, C., "Determining the length of confined aquifer roof extending under the sea by the tidal method" *J. of Hydrology*, **123**, pp. 97-104 (1991).
19. Sun, H., "A two-dimensional analytical solution of groundwater response to tidal loading in an estuary", *Water Resour. Res.*, **33**, pp. 1429-1435 (1997).
20. Jiao, J.J., and Tang, Z., "An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer", *Water Resour. Res.*, **35**(3), pp. 747-751 (1999).
21. Li, L., Barry, D.A., Cunningham, C., Stagnitti, F., Parlange, J.-Y. "A two-dimensional analytical solution of groundwater response to tidal loading in an estuary and ocean", *Adv. in Water Resour.*, **23**, pp. 825-833 (2000).
22. Tang, Z., and Jiao, J.J., "A two-dimensional analytical solution for groundwater flow in a leaky confined aquifer system near open tidal water", *Hydrological Processes*, **15**, pp. 573-585 (2001).
23. Li, H., and Jiao, J.J., "Influence of the tide on the mean watertable in an unconfined, anisotropic, inhomogeneous coastal aquifer", *Adv. in Water Resour.*, **26**, pp. 9-16 (2003).
24. Kim, K.-Y., Kim, Y., Lee, C.-W., and Woo, N.C., "Analysis of groundwater response to tidal effect in a finite leaky confined coastal aquifer considering hydraulic head at source bed", *Geosciences Journal*, **7**(2), pp. 169-178 (2003).
25. McDonald, J.M., and Harbaugh, A.W., "Modular three-dimensional finite-difference ground water flow model", *Techniques of water resources investigations of U.S. Geological Survey*. Book 6, CH.A1 (1988).
26. Fetter, C.W., "Applied Hydrogeology", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 376 (1994).