

유도침투량의 정량화를 위한 해석모형과 수치모형의 분석

Analysis of Analytical Models and Numerical Model for Evaluating Induced Infiltration Rate

이 도 훈* / 이 은 태**

Lee Do-Hun / Lee Eun-Tae

Abstract

In this paper a numerical model and two analytical models in the hydraulically connected stream-aquifer system were analyzed to compare the induced infiltration rate curves derived from each model. And we also examined the effects of anisotropy of hydraulic conductivity and the direction of the ambient ground water flow on the quantification of the induced infiltration rate. The induced infiltration rate curve determined by models is very simple and useful for estimating the induced infiltration rate since it contains only four physical variables such as the induced infiltration rate, the pumping rate, the distance between the pumping well and the stream, and the ambient ground water flow rate. Under the conditions tested in this paper the induced infiltration rate curves resulted from the Wilson's analytical model and FEWA numerical model were in good agreement, and the anisotropic ratio of hydraulic conductivity was evaluated as a physical factor which influences the behaviour of the induced infiltration rate curve. The methods and results of the paper might lead to improve the understanding of the induced infiltration phenomenon and can be applied to the planning and design of pumping well and the optimal determination of the induced infiltration rate and pumping rate for water quality management of the water supply wells.

Keywords: Induced Infiltration, Stream-Aquifer System, Water Supply Well, FEWA Model

요 지

본 연구에서는 하천-대수층 계에서 수치모형과 두 종류의 해석모형을 적용하여 유도침투량 곡선을 유도하여 비교하였으며, 투수계수의 이방성비 및 지하수 유입 방향이 유도침투량 산정에 미치는 영향을 평가하였다. 유도침투량 곡선은 단순한 그래프 형태로 표시되며, 유도침투량, 양수량, 하천과 우물사이의 거리, 유동 지하수 유입량 등의 4가지 인자만을 포함하기 때문에 유도침투량의 결정에 유용하게 적용될 수 있다. 검토된 조건 아래에서 Wilson 해석모형과 FEWA 수치모형의 유도침투량 곡선은 근사적으로 일치하였으며, 투수계수의 이방성비는 유도침투량에 큰 영향을 미치는 인자로 평가되었다. 본 연구에서 적용된 방법과 도출된 결과들은 유도침투 현상을 이해하는데 도움이 되며, 양수우물의 계획 및 설계, 용수공급 우물의 수질관리에 필요한 유도침투량과 양수량의 최적 결정에 적용될 수 있다.

핵심용어 : 유도침투, 하천-대수층 계, 용수공급 우물, FEWA 모형

** 경희대학교 토목·건축공학부 조교수

Asst. Prof., School of Civil and Architectural Engrg., Kyung Hee Univ., Yongin, 449-701, Korea

** 경희대학교 토목·건축공학부 교수

Prof., School of Civil and Architectural Engrg., Kyung Hee Univ., Yongin, 449-701, Korea

1. 서 론

최근 우리나라에서는 지표수의 취수여건이 악화됨에 따라서 하천과 수리적으로 연결되어 있는 대수층으로부터 지표수를 간접 취수하는 방안에 대한 조사·연구가 수행되었다(한국수자원공사, 1995). 이처럼 하천과 대수층이 수리적으로 상호 연결된 시스템에서 양수를 하게 되면, 대수층으로 지표수가 침투하는 유도침투현상이 발생되며 양수량에 따라서 다양한 흐름 특성을 나타낸다.

그림 1에서 우물에서의 양수량(Q_w)과 한계양수량(Q_c)의 크기에 따라서 3종류의 흐름이 나타나게 된다. 그림 1(a)에서는 양수량(Q_w)이 한계양수량(Q_c)보다 작아서 하천으로부터 침투가 발생되지 않기 때문에 우물에서 양수되는 물은 전부 주변의 유동지하수로 구성되며, 그림 1(b)에서는 한계양수량으로 양수를 하게 되면, 하천으로부터 대수층으로 침투가 발생하기 시작하며, 유일한 정체점 A가 존재한다. 이 정체점에서 지하수 유속이 0으로 정의된다. 그리고 그림 1(c)처럼 한계양수량을 초과하여 양수를 하게 되면, 정체점 A와 A' 사이의 하천구간에서 하천의 물이 대수층으로 침투하므로 유도침투 또는 유도함양이 발생하게 된다.

이처럼 유도침투는 인위적인 양수에 의해 지하수 흐름방향이 변화되어서 지표수가 대수층으로 침투하는 현상으로 생각할 수 있다. 유도침투가 발생될 경우에 유도침투율은 대수층의 수리적 특성, 대수층의 기하학적 특성, 양수량, 하천과 대수층의 수리적 연결상태,

주변 유동지하수의 유입방향과 유입량, 양수우물의 위치 등 여러 인자들과 관계된다. Newsom과 Wilson(1988)은 정상흐름 및 무한대수층(infinite aquifer) 조건에서 주변 유동지하수의 유입방향을 고려하여 유도침투량을 산정하는 해석모형을 개발하였다. 이 연구자들은 대수층 조건이 동일한 상태에서는 유동지하수의 유입방향이 하천과 평행하게 될수록 유도침투량은 증가하게 됨을 보였다. 그리고 Wilson(1993)은 등각사상 접근방법을 이용하여 유도침투량을 정량화하는 해석모형을 제시하였다. Wilson의 해석모형은 Newsom과 Wilson(1988)의 연구처럼 유동지하수의 방향성을 고려하지는 않았지만, 유동지하수는 하천과 수직인 방향으로 유입한다고 가정하고 하천과 수직방향의 대수층 길이가 제한된 반무한 대수층(semi-infinite aquifer)으로 가정하여 양수우물이 하천과 폐쇄층 사이에 존재하는 경우와 양수우물이 하천과 하천 사이에 존재하는 경우에 대하여 각각 해석모형을 유도하였다. Newsom과 Wilson(1988) 및 Wilson(1993)의 해석모형에서는 대수층의 투수계수는 모두 등방성, 균질성으로 가정되었다. Newsom과 Wilson(1988) 및 Wilson(1993)의 해석모형은 간단한 관계식 또는 그래프로부터 유도침투량을 결정할 수 있으므로 실제 적용에서 유용하고 편리하며, 각종 용수의 공급을 위해 장기적으로 일정한 양을 양수하는 용수공급우물의 계획·설계 및 수질관리에 필요한 유도침투량, 양수량 및 유동지하수 유입량사이의 관계를 결정하는데 유용하게 적용될 수 있다.

본 연구에서는 수치모형 및 해석모형들을 적용하여

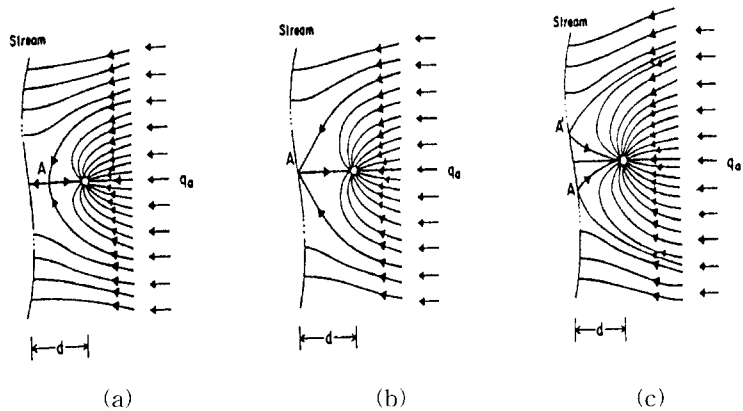


그림 1. 양수량의 변화에 따른 흐름분포((a) $Q_w < Q_c$, (b) $Q_w = Q_c$, (c) $Q_w > Q_c$; J.L. Wilson, 1993)

유도침투량을 정량화하고, 수치모형과 해석모형을 비교하여 해석모형의 유도침투량 산정에 대한 적용범위를 평가하였으며, 해석모형에서 고려되지 않은 대수층의 규모비, 투수계수의 이방성비, 다중우물 등의 변화가 유도침투량에 미치는 영향을 분석하여 유도침투현상을 이해하고자 하였다.

2. 해석모형

이 절에서는 Wilson(1993) 및 Newsom과 Wilson(1988)이 제시한 해석모형에 관하여 간단히 설명하며, 편의상 주 연구자의 이름을 따라 Wilson 해석모형, Newsom 해석모형으로 각각 명명하였다. 두 해석모형에서는 다음의 가정들이 공통적으로 적용된다: ① 대수층은 균질하며, 등방성이다. ② 하천과 양수우물은 대수층 바닥까지 완전하게 침투된다. ③ 하천과 대수층은 수리적으로 상호 연결되어 있으며, 하천의 경사는 무시된다. ④ 지하수흐름은 Dupuit 근사법칙이 성립된다. ⑤ 온도 효과는 무시된다.

두 해석모형의 기본 가정의 차이점은 해석에서 고려되는 대수층의 규모와 지하수의 유입방향이다. Wilson 해석모형은 그림 2에 보여진 것처럼 하천과 평행한 x 방향의 대수층의 길이는 무한(infinite)하다고 가정하며, 하천과 수직인 y 방향의 대수층은 길이 L로 제한되고, 유도지하수는 유입량 $q_L [L^2/T]$ 로 하천에 수직방향으로 유입된다고 가정한다. 반면에 Newsom 해

석모형에서는 하천과 수직 및 수평방향의 대수층 길이는 모두 무한하다고 가정하지만, 유도지하수는 유입량 q_L 로 임의 방향으로 유입될 수 있다고 가정된다.

본 논문에서는 그림 2에 표시된 변수들을 다음과 같이 정의하였다. 양수우물과 하천사이의 거리는 d, 양수량은 $Q_w [L^3/T]$, 폐쇄층(barrier)은 대수층의 범위를 나타내는 경계면을 의미하며 폐쇄층을 통과하는 유도지하수의 유입량은 $q_L [L^2/T]$ 로서 단위폭당 유량을 나타내며 대수층의 수위강하에 관계없이 일정하게 유입된다고 가정한다. 그리고 지표면을 통하여 균일하게 침투되는 함양률은 $N [L/T]$ 으로 정의하며, 하천에서의 수두는 h_0 로 표시되었다.

2.1 Wilson 해석모형

Wilson(1993)은 1차원 Poisson 방정식으로부터 수두포텐셜을 유도하고, 양수로 인해 발생하는 수위저하는 Schwarz-Christoffel 변환을 이용한 등각사상 방법에 기초하여 수두포텐셜을 결정한 다음에 중첩원리를 적용하여 수두포텐셜 함수 및 유선함수를 유도하였다. 우물에서 한계양수량을 초과하여 양수할 경우에 하천으로부터 대수층으로 침투되는 유도침투량은 수두포텐셜을 하천경계면을 따라서 미분한 다음에 유도침투에 기여하는 하천구간을 적분구간으로 하여 적분을 통하여 유도침투량을 유도하였다. 그리고 유도침투량 (Q_s)과 양수량 (Q_w)의 비인 $\frac{Q_s}{Q_w}$ 를 세로축으로 정의

하고, 무차원 양수량 $\beta = \frac{Q_w}{\pi d q_a}$ 를 가로축으로 정의하여 그래프로 도시하여 유도침투량 곡선을 제시하였다. 만약 함양률(N)이 존재하는 경우에는 $q_a = q_L + N \cdot L$ 로 정의하면, $q_a [L^2/T]$ 는 유도지하수 유입량 (q_L)과 함양률($N \cdot L$)의 합을 의미하게 된다. 그리고 Wilson은 그림 2의 barrier 대신에 하천이 존재하는 경우에 대한 해석해도 유도하여 유도침투량 곡선을 제시하였다.

2.2 Newsom 해석모형

그림 2에서 x, y 방향 모두 무한대수층의 경우에 포텐셜 흐름 이론과 중첩원리를 적용하여 Newsom과 Wilson(1988)은 포텐셜함수 $\phi [L^3/T]$ 와 유선함수 $\psi [L^3/T]$ 를 각각 유도하였다. 그리고 정체점의 좌표

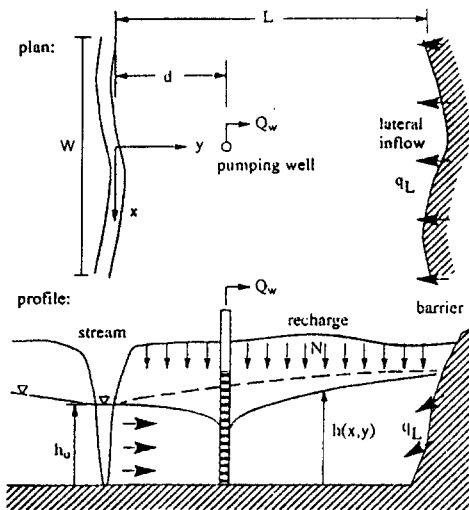


그림 2. 양수우물이 하천과 barrier 사이에 존재하는 하천-대수층 시스템 (J.L. Wilson, 1993)

및 유도침투량에 기여하는 하천구간의 상·하류단 좌표점을 결정한 다음에, 정체점을 통과하는 유선함수의 값과 유도침투에 기여하는 하천구간의 상류단 좌표점을 통과하는 유선함수 값과의 차이에 대한 절대값을 산정하여 유도침투량을 계산하였다.

3. FEWA 수치모형

그림 2의 양수우물이 하천과 barrier사이에 존재하는 하천-대수층 계에서 투수계수의 이방성 및 균질성, 우물같은 지점 유입/유출을 고려할 경우에 지하수의 정상흐름 조건에 대한 지배방정식은 연속방정식과 Darcy 법칙을 결합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \sum \frac{Q_w}{A_i} \delta(x-x_i, y-y_i) = 0 \quad (1)$$

이 식에서 h 는 수두를 나타내며, T_x 는 x방향의 투수량계수, T_y 는 y방향의 투수량계수를 각각 의미한다. 등방성의 대수층에서는 $T_x = T_y$ 가 되며, 균질 대수층에서는 T_x 와 T_y 는 위치에 관계없이 일정한 값을 나타낸다. 그리고 투수량계수는 비피압대수층에서는 투수계수와 포화대 두께와의 곱으로 나타내며, 피압 대수층에서는 투수계수와 비피압대수층의 두께와의 곱으로 주어진다. (x_i, y_i)는 우물이 위치한 지점들의 좌표이고, Q_w 는 i 우물지점의 양수량, A_i 는 i 우물지점 주변의 미소면적, $\delta(\)$ 는 Dirac delta 함수를 각각 의미한다.

유한요소법을 적용하여 개발한 FEWA(Yeh 등, 1993) 프로그램을 이용하여 편미분방정식 (1)를 해석하였으며, 해석시에 대상영역은 사변형요소로 분할하였고 문제의 규모에 따라서 5,000 ~ 20,000개의 요소를 적용하였다. FEWA(Finite Element Model of Water Flow through Aquifers) 프로그램은 2차원 정상상태 또는 동적상태의 지하수흐름 해석을 수행할 수 있으며, 다음과 같은 여러 선택기능들이 있다: ① 이방성 및 비균질성의 대수층에 대한 해석, ② 지점 유입/유출 및 공간적으로 분포한 유입/유출의 시·공간적 변동 특성을 반영, ③ Dirichlet 경계조건 및 Neumann 경계조건의 동적 변동에 대한 고려, ④ 선형 및 비선형 연립방정식을 해석하기 위한 다양한 선택기능, ⑤ 4변형 요소 및 삼각형 요소를 이용한 유한

요소 격자망 구성, ⑥ 비피압대수층, 피압대수층, 또는 비피압대수층과 피압대수층이 혼합된 대수층에 대한 고려, ⑦ 질량보존을 계산하는 기능 등을 적용하여 복잡한 대수층 조건에 대한 모의가 가능하다.

3.1 경계조건 및 모형변수의 설정

그림 2의 기하학적 조건에 대한 지배방정식 (1)을 해석하기 위해서는 대상영역을 적당한 유한요소 격자망으로 분할하여야 하며, 경계조건을 설정하여야 한다. 그림 2의 좌측 경계면인 하천 경계면을 따라서는 수두가 일정하게 주어지는 Dirichlet 경계조건을 설정하였으며, 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$h(x_d, y_d) = h_o$$

여기서 (x_d, y_d)는 하천경계면의 좌표값이고, h_o 는 하천경계면의 수두값을 나타내며, $h_o/L=0.1$ 로 설정하여 수치모형을 모의하였다. 그리고 그림 2의 우측 경계면인 barrier 경계면을 따라서는 유입지하수의 흐름률이 주어지는 Neumann 경계조건을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$-n \cdot T \cdot \nabla h = q_L(x_b, y_b)$$

여기서 (x_b, y_b)는 barrier 경계면의 좌표이며, q_L 는 경계면을 통과하는 흐름률을 의미한다. 만약 barrier층을 통과하는 지하수 흐름이 없으면, barrier층은 no flow 경계조건으로 설정될 수 있으며 이 때의 흐름률 q_L 는 0으로 주어진다. 수치모형의 해석에서는 모의영역인 그림 2의 x축 방향의 양쪽 경계면에 no flow 경계조건을 설정하였다.

하천-대수층 시스템의 기하학적 차원(W/L) 및 우물위치(d/L)가 주어지면, 수치모형의 해석에는 투수계수, 양수량(Q_w), 지하수유입량(q_a) 등의 변수값이 필요하다. 유도침투량 곡선은 무차원 변수인 $\beta = Q_w/\pi d q_a$ 값의 함수로 표현되기 때문에, 다음 절에서 각각의 유도침투량 곡선에 제시된 $\beta = Q_w/\pi d q_a$ 값의 변화에 따른 양수량(Q_w)과 유입량(q_a) 값을 설정하여 모의할 수 있다. 그리고 투수계수도 분석자가 어떤 임의의 토양에 대한 투수계수 값을 선택하여 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 편의상 loam 토양의 투수계수 값인 1.04 cm/hr를 선택하여 등방성·균질성 대수층에 적용하였다.

3.2 유도침투량의 계산

수치모형에서는 주어진 모의영역 및 경계조건에 대하여 지배방정식 (1)을 해석하게 되면 모의영역의 모든 절점에서 수두(h)를 계산하게 된다. 따라서 임의의 하천경계지점에서 하천으로부터 대수층으로 침투되는 유량은 Darcy 법칙을 적용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$q(x, 0) = -T_y \left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2)$$

그러므로 유도침투에 기여하는 하천구간의 범위를 (A, A')라 하면 (그림 1 참조), 유도침투량 (Q_s)은 식 (2)을 다음과 같이 적분하여 결정할 수 있다.

$$Q_s = \int_A^{A'} q(x, 0) dx$$

그리고 유도침투에 기여하는 하천구간의 범위 (A, A')는 절점에서의 유속벡터의 부호를 파악하거나 또는 유선망으로부터 결정할 수 있다.

4. 분석결과와 고찰

4.1 해석모형과 수치모형에 대한 유도침투량 곡선의 비교

대수층의 수리 특성이 등방성 및 균질성의 조건에서 우물위치의 변화에 따른 해석모형과 수치모형의 유도침투량의 차이를 이해하기 위하여 수치모형을 모의하고 해석모형을 분석하였다. 유동지하수가 barrier층을 통하여 하천에 수직방향으로 유입하는 그림 2의 특수 하천-대수층 시스템에서 하천과 평행한 방향의 길이 (W)와 하천과 수직인 방향의 길이(L)의 비를 대수층의 규모비(W/L)로 정의할 때, 이도훈 등(1998)은 하천으로부터 우물까지의 거리가 고정된 경우에 대하여 대수층 규모비의 변동에 따른 Wilson의 해석모형과 FEWA 수치모형에 대한 유도침투량을 비교하였다. 대수층 규모비가 약 2이상인 조건에서는 Wilson 해석모형과 수치모형의 유도침투량곡선은 서로 일치함을 알 수 있었다. 대수층 규모비가 2 이하인 경우에는 수치모형의 x 축 방향(하천과 평행한 방향)에 설정된 no flow 경계조건 효과로 인하여 Wilson 해석모형과 FEWA 수치모형의 유도침투량은 차이가 있는 것으로

판단되었다.

본 연구에서는 우물과 하천사이의 거리의 변화에 따른 해석모형과 수치모형의 유도침투량 곡선을 비교하기 위하여 대수층 규모비를 $W/L=2, 8$ 을 선택하고, 우물과 하천사이의 무차원 거리($\frac{d}{L}$)는 각각 0.1, 0.2, 0.4로 변화시켜 수치모형을 해석하였다. 해석모형은 앞에서 소개된 것처럼 Wilson 모형과 Newsom 모형을 적용하였는데, 두 모형의 기본가정의 차이점은 Newsom의 해석모형은 하천과 수평 및 수직방향의 대수층 규모가 모두 무한대수층으로 가정되고, Wilson의 해석모형은 하천과 수직방향의 대수층은 제한적이고 하천과 평행한 방향은 무한대수층으로 가정된다는 것이다.

그림 3과 그림 4는 해석모형과 수치모형의 유도침투량 곡선을 비교하고 있다. Wilson 해석모형과 Newsom 해석모형의 유도침투량 곡선은 매우 유사한 경향을 보이지만, 우물위치($\frac{d}{L}$)의 변동에 따라서 두 해석모형의 유도침투량 곡선은 차이를 나타내었다. 그리고 Newsom의 해석해와 Wilson의 해석해는 하천과 평행한 방향의 길이가 모두 무한하다고 가정하였기 때문에 두 해석모형의 유도침투량 곡선은 W/L 비에 관계없이 동일하다.

대수층 규모비가 작은 경우($W/L=2$)에는 수치모형의 유도침투량 곡선이 해석모형의 유도침투량 곡선보다 약간 크게 산정되었으며, 특히 $\frac{d}{L}$ 비가 증가할수록 수치모형과 Wilson 해석모형사이의 유도침투량의 차이는 증가하였다. 그리고 Newsom 해석모형보다는 Wilson 해석모형이 수치모형에 좀 더 일치함을 알 수 있었다. 따라서 대수층 규모비(W/L)가 작은 경우에는 유도침투량을 평가하는데 있어서 적용되는 모형 및 양수우물의 위치에 따라서 유도침투량의 차이가 있음을 알 수 있었다. 대수층 규모비가 큰 경우($W/L=8$)에서는 수치모형과 Wilson 해석모형사이의 유도침투량 곡선은 우물위치($\frac{d}{L}$)의 변동에 관계없이 거의 일치하였다.

4.2 지하수 유입 방향의 변화에 따른 유도침투량

전 절에서는 barrier 층을 통과하는 지하수의 유입 방향이 하천과 수직인 특수하천 시스템에 대하여 해석모형과 수치모형을 비교하였다. 지하수 유입 방향의 변

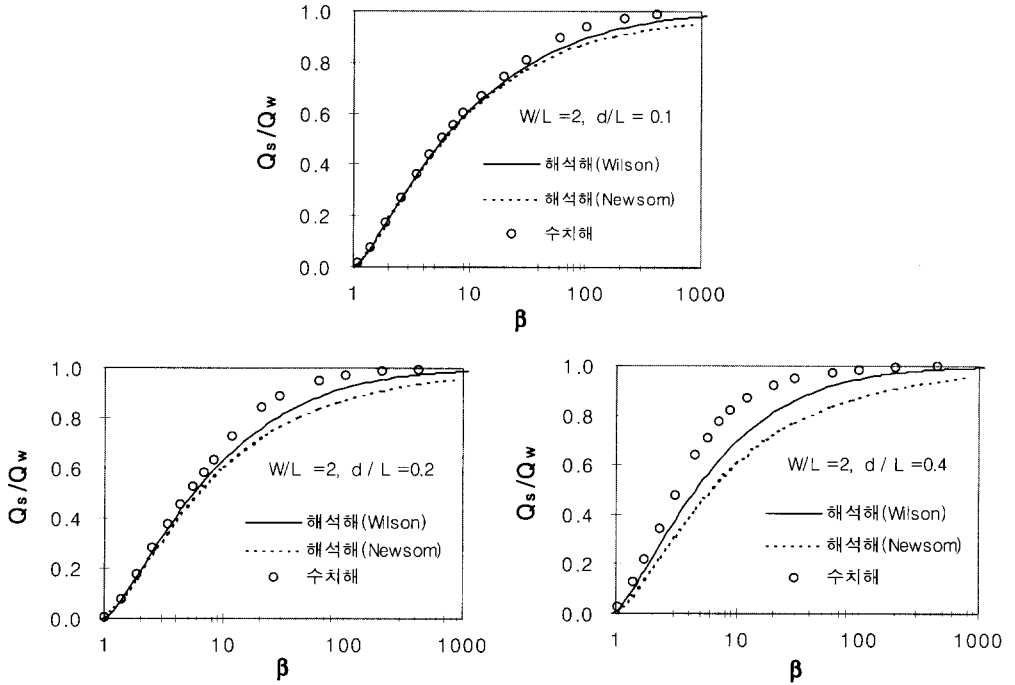


그림 3. 해석모형과 수치모형의 유도침투량 곡선($\beta = Q_w / \pi d q_a$).

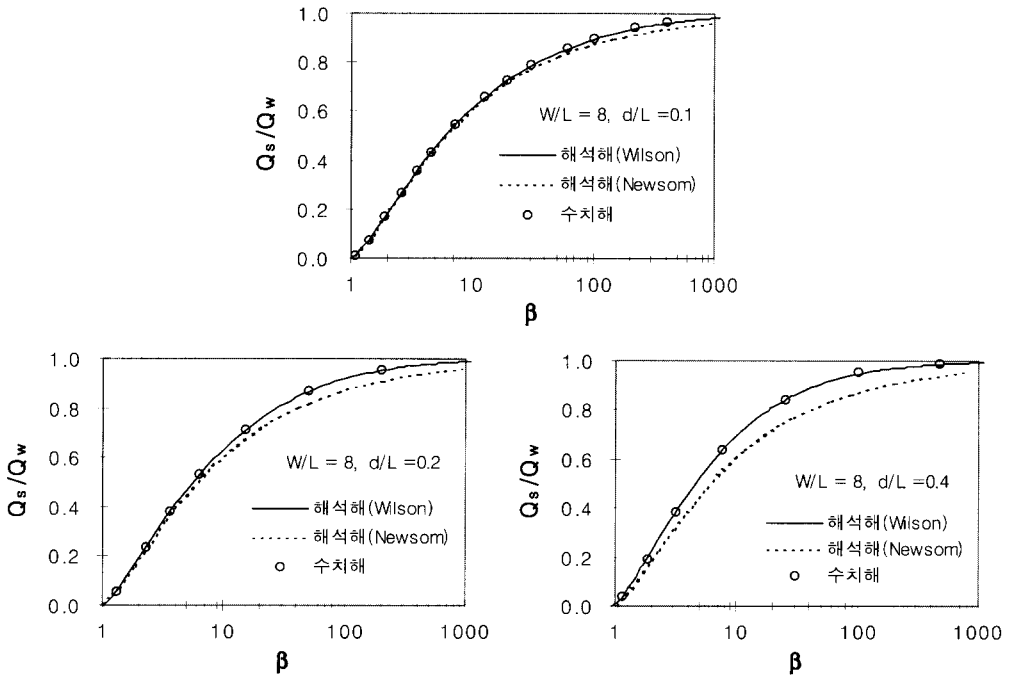


그림 4. 해석모형과 수치모형의 유도침투량 곡선($\beta = Q_w / \pi d q_a$).

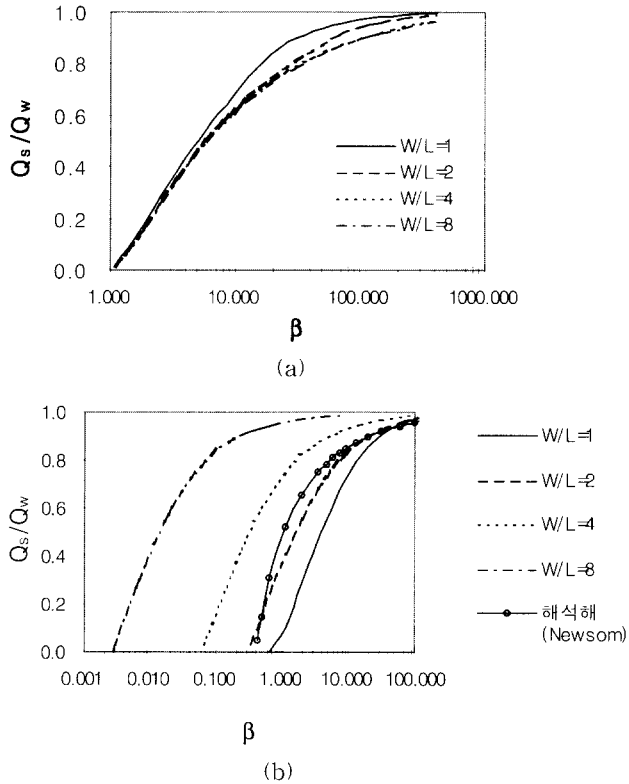


그림 5. 유도침투량 곡선((a) 지하수 유입방향이 하천과 수직인 경우, (b) 지하수 유입방향이 하천과 평행한 경우)

등을 고려하여 유도침투량을 결정할 수 있는 Newsom의 해석해에 의하면 지하수 유입방향은 유도침투량 곡선에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 지하수 유입방향이 하천과 평행한 경우에 대수층 규모비의 변화에 따른 유도침투량을 비교하기 위하여 FEWA 수치모형을 적용하였다. 수치모형의 해석에서는 대수층의 규모비(W/L)를 각각 1, 2, 4, 8인 4가지의 경우를 고려하였고, 하천과 우물사이의 무차원 거리($\frac{d}{L}$)는 0.1로 고정하였으며, 대수층의 투수계수는 등방성이며 균질하다고 가정하였다. 그림 5(a)는 유동지하수가 하천에 수직인 방향으로 유입되는 대수층-특수하천 시스템에서 대수층 규모비의 변화에 따른 유도침투량 곡선을 나타낸다. 이 그림에 주어진 수치모형의 유도침투량 곡선은 대수층의 규모비에 관계없이 거의 유사한 경향을 나타내며, 무차원 양수량 β 값이 10이상의 범위에서는 대수층의 규모비에 따라서

유도침투량 곡선은 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 그림 5(b)의 경우처럼 지하수 유입방향이 하천과 평행할 경우에는 대수층의 규모비에 따라서 유도침투량 곡선은 현저한 차이를 나타내고 있으며, 유도침투가 발생되기 시작하는 무차원 한계양수량 β_c 의 값은 W/L=1인 경우에 0.6, W/L=2인 경우에 0.3, W/L=4인 경우에 0.06, W/L=8인 경우에 0.003으로 대수층 규모비의 증가에 따라서 감소하고 있다. 그리고 하천에 평행한 방향으로 지하수가 유입하는 경우에는 Newsom 해석모형의 유도침투량 곡선은 그림 5(b)에 나타난 것처럼 W/L=2인 경우의 수치해의 유도침투량 곡선과 가장 근접하였다.

4.3 투수계수의 이방성 효과 및 다중우물에 대한 유도침투량 곡선

실제 대수층은 방향에 따라서 투수계수가 변화하는 이방성 대수층의 특성을 나타낼 수 있으므로 투수계수의

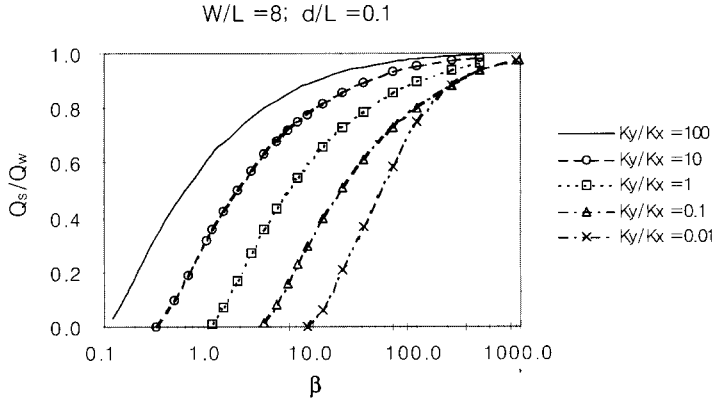


그림 6. 이방성비의 변화에 따른 유도침투량 곡선($\beta = Q_w / \pi d q_a$)

이방성비가 유도침투량 곡선에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치모형을 적용하였다. 대수층의 규모비(W/L)는 8로 가정하여 지하수가 하천에 수직방향으로 유입하는 득수하천-대수층 시스템을 고려하였다. 그림 6은 우물의 위치가 $d/L=0.1$ 로 고정된 조건에서 투수계수의 이방성비가 유도침투량 곡선에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 K_y 는 하천에 수직인 방향의 투수계수를 의미하며, K_x 는 하천과 평행한 방향의 투수계수를 의미한다. 그리고 $K_y/K_x > 1$ 은 모든 방향의 투수계수가 같은 값을 가지는 등방성 대수층을 의미한다. 투수계수의 이방성비($K_y/K_x > 1$)가 감소함에 따라서 무차원 한계양수량 β_c 값이 0.1, 0.3, 1, 3, 10으로 각각 증가하게 되며, 유도침투량은 감소하게 된다. 투수계수의 주방향이 하천과 수직인 이방성 대수층의 경우($K_y/K_x > 1$)에는 유도침투량 곡선은 등방성 대수층에 대한 유도침투량 곡선보다 큰 값을 나타내며, 반대로 투수계수의 주방향이 하천과 평행한 이방성 대수층의 경우($K_y/K_x < 1$)에는 등방성 대수층 경우의 유도침투량 곡선보다 작은 값을 나타내었다. 본 연구에서는 이방성 조건에서 지하수 유입방향, 우물위치, 대수층 규모비 등의 변화에 대한 유도침투량 곡선의 변동 특성을 평가하지는 않았지만, 본 연구에서 검토한 수치모형을 적용하여 이들 인자들의 변화가 유도침투에 미치는 영향을 분석할 수 있으며, 물리적 인자들의 변화에 따른 현장 상황에 상응하는 유도침투량 곡선을 결정할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 7의 하천-대수층 시스템에서 여러 개의 우물

이 설치되었을 경우에 대한 Wilson 해석모형의 적용성을 검토하기 위하여 $W/L=8$ 및 $\frac{d}{L}=0.1$ 인 등방성, 균질성 대수층 조건에서 수치모형을 모의하여 Wilson 해석모형의 유도침투량 곡선과 비교하였다. 그림 7의 좌측 시스템은 하천과 평행한 x축 방향으로 dx 간격을 두고 2개의 우물이 설치된 경우이며, 우측은 x 및 y축 양방향으로 dx와 dy의 간격으로 4개의 우물이 설치된 형태이다. 그림 8(a)는 두 개의 우물이 존재하는 경우의 유도침투량 곡선을 나타내며, 그림 8(b)는 4개의 우물이 존재하는 경우에 대한 유도침투량 곡선이다. Wilson이 제시한 해석해는 다중우물의 경우에는 적용할 수 없지만, 본 논문에서는 가상우물이 여러 우물군의 중심점에 있다고 가정하고, 개개 우물 양수량의 합을 가상우물의 양수량으로 적용하여 Wilson 해석모형의 유도침투량을 산정하였다. 그림 8에 제시된 것처럼 수치모형과 해석모형사이의 유도침투량 곡선은 거의 일치된 반응을 보이고 있다. 두 개의 우물이 존재할 경우에는 수치모형의 무차원 한계양수량 값이 해석모형의 한계양수량 값보다 약간 큰 값을 보이며, β 값이 작은 범위에서는 수치모형과 해석모형사이의 유도침투량 값은 약간의 차이가 있지만, β 값이 3 이상의 범위에서는 수치해와 해석해는 일치된 반응을 나타내고 있다. 따라서 등방성, 균질성의 대수층-득수하천 시스템에서 다중 우물군이 존재할 경우에도 우물군의 중심점에 가상우물이 설치된다고 가정하여 Wilson의 해석방법을 적용하여 유도침투량을 평가할 수 있음을 암시한다.

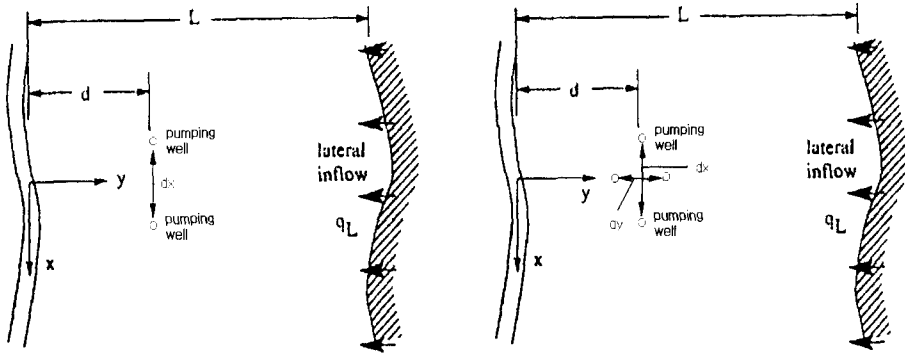


그림 7. 다중우물이 존재하는 하천-대수층 계 ($dx/L=0.2, dy/L=0.1$)

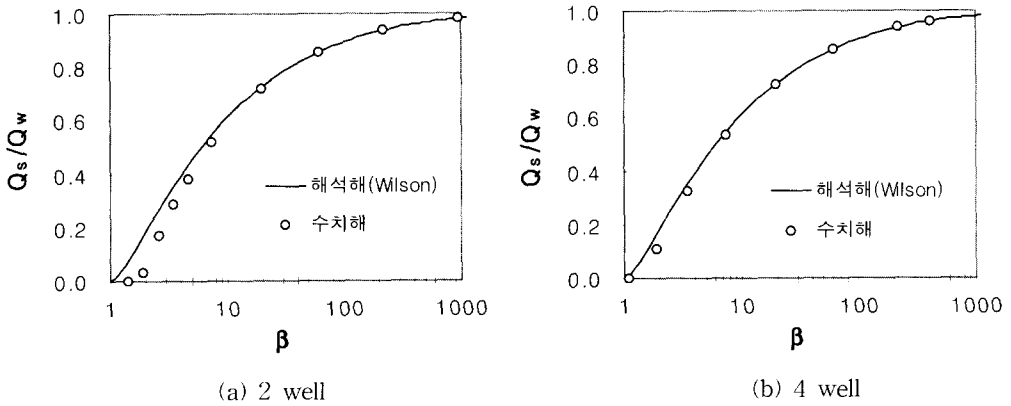


그림 8. 다중우물 경우의 유도침투량 곡선 ($\beta = Q_w / \pi d q_a ; W/L=8, d/L=0.1$)

5. 결론 및 토의

하천과 대수층이 수리적으로 상호 연결된 계에서 유도침투량의 정량화에 적용될 수 있는 해석모형과 수치모형을 비교하여 대수층의 규모비, 양수우물의 위치, 유동지하수의 유입방향 등의 변화에 따른 해석모형의 적용성과 수치모형의 타당성을 검토하고, 투수계수 이방성비의 변화에 따른 유도침투량 곡선의 변동특성을 평가하였다. Wilson 해석모형의 유도침투량 곡선은 Newsom 해석모형의 유도침투량 곡선보다 약간 큰 값을 나타내며, 두 모형사이의 유도침투량 곡선에 대한 차이는 하천으로부터 양수우물까지의 거리 증가에 비례하여 증가하였다. 그리고 Wilson 해석모형과 FEWA 수치모형 사이의 유도침투량 곡선은 대수층의 규모비에 따라서 오차의 정도가 다르게 평가되었다. 대

수층의 규모비가 작은 경우에는 두 모형사이의 유도침투량의 차이는 하천으로부터 양수우물까지의 거리 증가에 비례하여 증가하였지만, 대수층의 규모비가 큰 경우에는 두 모형사이의 유도침투량은 거의 일치하였다. 한편 Wilson의 해석모형은 단일우물의 경우에만 적용이 가능하지만 다중우물이 규칙적으로 배열된 경우에 다중우물군의 중심점에 가상우물을 위치시키고 다중우물군의 총 양수량을 가상우물의 양수량으로 가정하여 Wilson 해석모형을 적용하여 유도침투량을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 다중우물사이의 거리분포가 밀집된 경우로 제한되었지만, 추후 연구에서는 우물사이의 거리, 우물의 개수 및 다른 주요 인자들을 고려하여 제안된 방법에 대한 세부적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

유동지하수의 유입방향과 투수계수의 이방성비는 유

도침투량에 큰 영향을 미치는 인자로 평가되었다. 유동 지하수의 유입방향이 유도침투량 곡선에 미치는 효과는 대수층의 규모비가 증가함에 따라서 크게 나타났으며, 유동지하수의 유입방향을 고려하여 유도침투량을 해석적으로 결정할 수 있는 Newsom 모형은 등방성·균질성 대수층에서 $W/L=2$ 인 경우의 수치모형으로부터 결정된 유도침투량 곡선과 가장 근접한 반응을 나타내었다. 본 연구에서 평가되지는 않았지만 본 연구의 접근방법을 적용하여 투수계수 이방성비의 변화에 따라 지하수 유입방향, 우물위치, 대수층 규모비 등의 변화를 고려하여 유도침투량 곡선을 결정할 수 있다.

본 연구에서 검토된 유도침투량에 영향을 미치는 여러 인자들의 변화에 따른 해석모형과 수치모형의 비교는 모형사용자가 개개 모형의 제한성 및 적용성을 파악하여 적절한 모형을 선택하여 적용할 수 있게 된다. 그리고 검토된 해석모형과 수치모형의 유도침투량 곡선은 정상상태의 흐름만을 고려하였기 때문에 장기적으로 용수공급에 사용되는 양수우물의 계획 및 설계, 양수우물의 수질관리 등에 활용될 수가 있다. 즉, 하천의 수질이 양호하고 지하수의 수질이 나쁠 경우에는 유도침투량이 증가하게 되면 양수우물에서는 수질이 불량한 지하수가 회색될 수 있으며, 반대로 하천의 수질이 유동지하수의 수질보다 불량할 경우에는 유도침투량이 감소되면 양수우물의 수질이 개선될 수 있게 된다. 그리고 유도침투량 곡선은 대수층의 수리적 변수가 포함되지 않은 유도침투량, 양수량, 우물위치, 지하수 유입량 등의 4개 변수만을 이용하여 무차원화된 곡선형태로 유도되었기 때문에 복잡한 실제 조건에서 유용하게 적용될 수 있다. 해석모형의 가정에 적합하지 않은 현장조건에서는 본 연구에서 검토된 수치모형을 적용하여 현장 조건에 상응하는 유도침투량 곡선을 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 검토되지 않은 비균질성 효과, 3차원 효과, 하천과 우물의 부분

적 관통 효과 등은 추가적인 연구를 필요로 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 연구비(과제번호 : 971-1205-020-1) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

- 이도훈, 김인호, 이희철 (1998). “하천-대수층 시스템에서 유도침투량의 결정.” 대한토목학회 1998년도 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 53-56.
- 한국수자원공사 (1995). 하상퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범조사 보고서, IDP-95-1, p. 133.
- Newsom, J. M. and Wilson, J. L. (1988). “Flow of ground water to a well near a stream - effect of ambient ground-water flow direction.” *Ground Water*, Vol. 26, No. 6, pp. 703-711.
- Wilson, J. L. (1993). “Induced infiltration in aquifers with ambient flow.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 10, pp. 3503-3512.
- Yeh, G. T. and Chang, J. R. (1993). *User's Manual: A finite element model of water flow through aquifers: Version 2.0*. Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.
- (논문번호:99-005/접수:1999.01.29/심사완료:1999.05.13)