

다층-대수층 시스템의 지하수 해석

김민환^{1*} · 전일권² · 정재성³

¹호남대학교 토목환경공학과

²담양대학 토목공학과

³순천대학교 토목환경공학부

An Analysis of Groundwater Flow in the Multi-aquifer System

Minhwan Kim^{1*} · Irkweon Ceon² · Jaesung Jung³

¹Department of Civil & Environment Engineering, Honam University

²Department of Civil Engineering, Damyang College

³School of Civil & Environment Engineering, Sunchon National University

ABSTRACT

The multi-aquifer system separated by semipervious leaky beds was analyzed. The finite difference scheme of the Crank-Nicolson method is applied to obtain the solution for this system. The solution of this scheme was compared with the analytical solution for two-layer aquifer systems with one-dimensional steady state. The results showed a good agreement between analytical and numerical solution for two-layer aquifer systems. So, the numerical scheme can be extended to multi-aquifer system. When the pumping is tried for single or multi aquifer, the computation of the groundwater heads was possible for each aquifer in the multi-aquifer with two-dimensional system. So, it might be helpful for the effective groundwater management.

Key words : multi-aquifer, FDM, leaky aquifer

요 약 문

본 연구의 목적은 누수대수층으로 분리된 다층-대수층에 대한 지하수 해석이다. Crank-Nicolson 방법에 의한 유한차분법을 적용하여 1차원이며 정상상태인 2층 대수층 구조에 대해 해석해와 비교하였다. 수치해와 해석해는 거의 일치하였으므로 수치해를 2차원의 확장된 다층-대수층 구조에 적용하였다. 이는 한 개 또는 여러 개의 대수층에서 양수하는 경우에 각 대수층에서의 수두값을 계산할 수 있게 하였다. 본 연구는 지하수의 효율적인 운영에 도움이 될 것이다.

주제어 : 다층-대수층, 유한차분법, 누수층

1. 서 론

산업의 발전, 생활수준의 향상, 농업 생산량의 확대 등으로 용수 수요는 날로 증가하고 있다. 이와 더불어 강우의 불균형이 수자원 확보와 관리에 어려움을 증대시키고 있으며 매년 갈수기에 물부족으로 인해 고통을 받고 있는 실정이다. 또한 댐 개발 적지 감소, 댐 개발 저지, 댐 개

발 비용의 증대 등으로 수자원의 확보는 더욱 어려움이 가중되고 있는 현실이다. 이에 대한 대안으로 지하수의 개발이 증가하고 있으나 무분별한 개발은 지하수 오염, 지반침하, 농작물의 고사 등으로 더 큰 피해가 예상된다. 특히 지표수가 부족할 때 지하수는 대체 수원으로서 역할을 하고 있으며 그 중요성을 아무리 강조해도 지나치지 않을 정도로 수자원의 일부를 차지하고 있다. 지하수의 효율적인 이용을 위해 지하수 해석을 위한 여러 가지의 지배방정식과 그 해가 소개되어 이용되고 있다. 그러나 지하구조가 복잡하며 한정된 지하수자원을 효율적으로 개발하고

*Corresponding author : kimmh@honam.ac.kr

원고접수일 : 2002. 5. 15 게재승인일 : 2002. 10. 21

이용하기 위해서는 복잡한 대수층의 이해가 필요하다. 본 연구에서는 대수층의 구조가 다층으로 이루어진 경우에 한하여 수행한다.

자연수위가 지표면 부근에 가깝게 위치해 있을 때 자유면대수층에서의 지하수 양수는 부근의 물수지에 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요하다. 또한 과도한 양수로 인한 지하수위의 급강하는 식물의 물공급을 중단시킬 수 있다. 이와 같은 양수는 지역의 생태계뿐만 아니라 경제적으로도 심각한 악영향을 야기시킬 수 있다. 자유면대수층과 피압대수층으로 이루어진 경우에 대부분 피압대수층에서 양수하기 때문에 그와 같은 영향을 감소시킬 수 있다. 이런 영향의 평가는 자유면대수층과 피압대수층의 사이에 놓여진 누수층의 투수계수에 달려있다. 피압대수층에서만 양수를 한다고 할지라도 양수는 상부의 비피압대수층에 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 시스템을 Linder¹⁾는 2층-대수층 시스템(two-aquifer systems)이라고 하였으며 이 시스템에 대한 최적운영에 대한 연구를 수행하였다. 김민환²⁾은 논문에서 이 시스템을 누수대수층이라고 하였으며 이 시스템에 대한 수리특성변수를 결정하는 방법과 양수하는 경우에 상부대수층과 하부대수층에서의 수두분포에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Bakker³⁾은 3층-대수층 시스템에 대한 지하수 흐름에 관하여 해석적, 그리고 수치적 Dupuit-모형에 대해 모의실험을 실시하여 제시하였다. 이 연구에서는 상부층인 자유면 대수층의 수두가 불투수벽에 의해 계단 형식으로 수두차가 이루어진 경우에 각 대수층에서의 지하수 흐름을 해석하였으며 이와 같은 해석은 간척지에서 활용될 수 있다.

본 논문에서는 다층-대수층 시스템에 대한 지배방정식을 제시하고 각 층에서 혹은 일부 층에서 양수하는 경우에 지하수 흐름 변화에 대한 해석을 위해 유한차분법을 적용하여 수치해를 구하고 수치해의 타당성을 검증하기 위해 해석해와 비교하였다.

2. 다층-대수층의 지배방정식

대수층의 구조는 단순한 자유면대수층, 혹은 피압대수층으로 이루어진 경우와 이들이 복합적으로 이루어진 다층-대수층 시스템으로 구분할 수 있다. 일반적으로 다층-대수층은 상부에 자유면대수층과 하부에 여러 층의 피압대수층으로 이루어져 있으며 그 사이에는 누수대수층으로 경계가 이루어져 있다. 이와 같은 다층-대수층 시스템의 구성도를 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

다층-대수층 시스템은 2층 이상으로 구성된 대수층 시

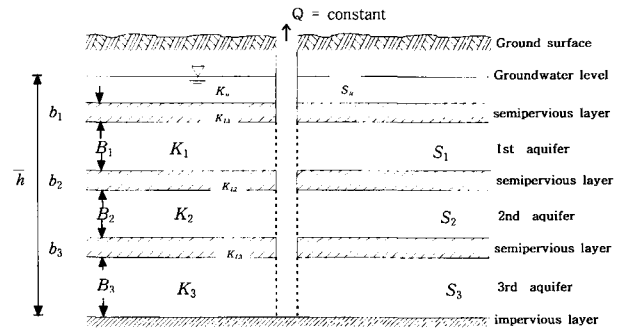


Fig. 1. Schematic diagram of multi-aquifer systems.

스템으로 여러 개의 대수층과 누수압층(leaky confining layers)으로 이루어져 있으며 각 대수층에서의 흐름을 수평방향에 대해서만 고려하고 수직적 흐름을 무시한다(Dupuit-Forchheimer 근사화). 그러므로 흐름을 수평면에서 2차원 흐름에 대한 수식으로 나타낼 수 있다. 대수층과 대수층 사이의 흐름은 누수층(leaky layer)을 통해 발생된다. 누수층에서 흐름은 오직 연직방향이며 연직 누수층을 통한 수두 차에 의해 결정된다. Fig. 1은 대수층이 일반적으로 n개로 이루어진 것을 3개층만 나타낸 것이다.

Huisman⁴⁾과 Bear⁵⁾는 Fig. 1과 같이 대수층이 자유수면대수층 아래 제 1대수층(1st aquifer)과 제 2대수층(2nd aquifer)로 이루어진 경우에 대한 해석해를 제시하였다. 이들은 (1) 제 1대수층에서만 양수하는 경우와 (2) 제 2대수층에서만 양수하는 경우로 구분하여 해석해를 제시하였다.

이 경우에 대한 1차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 s_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_1}{\partial r} = \frac{s_1}{\lambda_{11}^2} + \frac{s_1 - s_2}{\lambda_{12}^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 s_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_2}{\partial r} = \frac{s_2 - s_1}{\lambda_{22}^2} \quad (2)$$

여기서 $\lambda_{ij}^2 = K_i B_j \sigma_j' = T_j \sigma_j'$ 이고 s 는 수두강하량이다. 이 지배방정식에 대한 해가 양수하는 대수층에 따라 2가지로 구분하여 제시되었다.

(1) 제 1대수층에서 Q로 양수하는 경우에 각 층에서의 수두는 바다면을 기준으로 다음과 같다.

$$h_1 = \bar{h} - s_1 = \bar{h} - \frac{Q}{2\pi T_1} \frac{1}{\chi_1^2 - \chi_2^2} [(\chi_1^2 - \alpha_{22}^2) K_0(\chi_1 r) + (\alpha_{22}^2 - \chi_2^2) K_0(\chi_2 r)] \quad (3)$$

$$h_2 = \bar{h} - s_2 = \bar{h} - \frac{Q}{2\pi T_1} \frac{\alpha_{22}^2}{\chi_1^2 - \chi_2^2} [-K_0(\chi_1 r) + K_0(\chi_2 r)] \quad (4)$$

이 때 적용된 경계조건은 다음과 같다.

$$r \rightarrow \infty, s_1 = 0, s_2 = 0$$

$$r \rightarrow r_0, Q_1 = Q, Q_2 = 0$$

(2) 제2대수층에서 Q로 양수하는 경우에 각 층에서의 수두는 바닥면을 기준으로 다음과 같다.

$$h_1 = \bar{h} - s_1 = \bar{h} - \frac{Q}{2\pi T_2} \frac{\alpha_{12}^2}{\chi_1^2 - \chi_2^2} [-K_0(\chi_1 r) + K_0(\chi_2 r)] \quad (5)$$

$$h_2 = \bar{h} - s_2 = \bar{h} - \frac{Q}{2\pi T_2} \frac{1}{\chi_1^2 - \chi_2^2} [(\alpha_{22}^2 - \chi_2^2)K_0(\chi_1 r) + (\chi_1^2 - \alpha_{22}^2)K_0(\chi_2 r)] \quad (6)$$

이 때 적용된 경계조건은 다음과 같다.

$$r \rightarrow \infty, s_1 = 0, s_2 = 0$$

$$r \rightarrow r_0, Q_1 = 0, Q_2 = Q$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} \chi_1^2 \\ \chi_2^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[(\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{12}^2) \pm \left\{ (\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{12}^2)^2 - 4\alpha_{11}^2 \alpha_{22}^2 \right\}^{1/2} \right]$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{\lambda_{ij}}, \sigma_j' = b_j / K_{Lj}$$

$K_0(\)$ 는 제1종 0차 수정 벡셀함수이다. Huisman⁴⁾과 Bear⁵⁾에 의해 주어진 해석해가 다층-대수층에 대한 수치해의 검증을 위해 사용된다. 단순히 상부 대수층인 자유면대수층과 하부대수층인 제 1대수층으로 이루어진 누수대수층에 대한 해는 김민환²⁾의 논문에 제시되어 있다.

신뢰할만한 지하수 관리를 위해 물리적 현상과 수문학 적, 지질학적 조건뿐만 아니라 지하수 유역에서 이들 상호작용에 대한 모의실험이 필요하다. Fig. 1에서와 같이 누수층을 통과하는 누수항은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$q_{Lj} = K_{Lj} \frac{h_{upper} - h_{lower}}{b_j} = \sigma_j (h_{upper} - h_{lower}) \quad (7)$$

여기서, q_{Lj} 는 각 누수층에 대한 단위면적당 누수율 [L^3/TL^2], $\sigma_j (= K_{Lj}/b_j)$ 는 각 누수층의 누수계수 [T^{-1}], K_{Lj} 는 각 누수층의 투수계수(hydraulic conductivity) [L/T], b_j 는 누수층의 두께 [L], h_{upper} 는 누수층을 기준으로 윗 대수층의 수두 [L], h_{lower} 는 누수층을 기준으로 아래 대수층의 수두 [L]이다.

n층으로 이루어진 다층대수층에 대한 2차원 지배방정식을 상부의 자유면대수층, 중간 피압대수층(이 대수층을 기준으로 위와 아래는 누수층임), 하부 대수층으로 구분하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 상부의 대수층

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_u (\bar{h} - H) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_u (\bar{h} - H) \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \right] + \sigma_1 (h - \bar{h}) + \sum q_u = S_u \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (8)$$

여기서, $H = \sum_{i=1}^n B_i + \sum_{j=1}^n b_j$ 이고 B_i 는 각 피압대수층의 두께, b_j 는 누수대수층의 두께이다.

(2) 상부와 하부가 누수층으로 이루어진 중간 대수층 [i=1~(n-1)]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_i \frac{\partial h_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_i \frac{\partial h_i}{\partial y} \right] + \sigma_i (h_{i-1} - h_i) + \sigma_{i+1} (h_{i+1} - h_i) + \sum q_i + \sum q_{i+1} = S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} \quad (9)$$

(3) 상부의 누수층과 하부의 불투수층으로 이루어진 최하부 대수층(i=n)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_n \frac{\partial h_n}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_n \frac{\partial h_n}{\partial y} \right] + \sigma_n (h_{n-1} - h_n) + \sum q_{n-1} = S_n \frac{\partial h_n}{\partial t} \quad (10)$$

여기서, K_u 는 상부 대수층의 투수계수 [L/T], S_u 는 상부 대수층의 저류계수(storage coefficient or storativity)[dimensionless], S_i 는 각 대수층의 저류계수 [dimensionless], $\sum q_u$ 는 각 대수층에서 단위 면적당 상부 대수층의 유입과 유출(sink and source, 침투 혹은 역침투) [L/T], $\sum q_i$ 는 각 대수층에서 단위 면적당 하부 대수층의 유입과 유출(sink and source, 침투 혹은 역침투) [L/T], $T_i (= K_i B_i)$ 는 각 대수층의 투수량계수 [L^2/T], B_i 는 각 대수층의 두께이다.

식 (8)에서 $K_u(\bar{h} - H)$ 항은 변화가 가능한 전달계수로서 다음과 같이 바꾼다.

$$T_u = K_u (\bar{h} - H) \quad (11)$$

식 (8)에서 저류계수도 다음과 같이 변화가 가능하다.

$$S_u = (\bar{h} - H) S_u'' + S_u \quad (12)$$

여기서 S_u'' 는 상부 대수층의 비저류계수(specific storage)이다. 상부 대수층의 저류계수(storativity)는 특정한 시간 간격에 대해 일정한 값으로 근사화할 수 있다. 자유면대수층에서 물은 토양의 공극을 통해서 대부분 배수되기 때문에 상부 대수층의 저류계수 S_u 는 토양의 비산출율(S_u)로 근사화할 수 있다¹⁾. 그러므로 식 (12)에서 $(\bar{h} - H) S_u''$ 항을 무시할 수 있다.

다층-대수층에 대한 수치해를 위해 식 (8), (9), (10)을

유한차분화하였으며 다음 장에서 수치실험을 수행하였다.

3. 수치실험

수치실험을 위해 다층-대수층에 대한 지배방정식 (8), (9), (10)의 차분화는Clank-Nicolson식을 이용하여 수행하였다⁷⁾. 이 식을 상부 대수층, 중간 대수층, 하부 대수층으로 구분하고, 모형을 차분화($\Delta x = \Delta y = a$)하여 다음과 같이 제시한다.

상부 대수층:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{ij}^{m+1} = \frac{1}{[(a^2 S_u / 4T_u \Delta t) + \alpha]} & \left[\alpha \bar{h}_{ij}^{m+1} + \frac{a^2 S_u}{4T_u \Delta t} \bar{h}_{ij}^m \right. \\ & \left. + (1-\alpha)(\bar{h}_{ij}^m - \bar{h}_{ij}^m) + \frac{\sigma_s a^2}{4T_u} (h_{ij1}^m - \bar{h}_{ij}^m) + \frac{a^2}{4T_u} \Sigma q_u \right] \end{aligned} \quad (13)$$

중간 대수층:

$$\begin{aligned} h_{ijk}^{m+1} = \frac{1}{[(a^2 S_k / 4T_k \Delta t) + \alpha]} & \left[\alpha h_{ijk}^{m+1} + \frac{a^2 S_k}{4T_k \Delta t} h_{ijk}^m \right. \\ & \left. + (1-\alpha)(\bar{h}_{ijk+1}^m - h_{ijk+1}^m) + \frac{\sigma_s a^2}{4T_k} (h_{ijk-1}^m - h_{ijk}^m) \right. \\ & \left. + \frac{\sigma_{sk+1} a^2}{4T_{k+1}} (h_{ijk+1}^m - h_{ijk}^m) + \frac{a^2}{4T_k} \Sigma q_{lk} + \frac{a^2}{4T_{k+1}} \Sigma q_{lk+1} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 k는 상부 대수층인 자유면대수층의 아래 층부터 차례로 부여되는 번호로서 1부터 (n-1)까지이며 (n-1)층 아래에 다음의 하부 대수층(k=n)이 있는 것으로 하였다.

하부 대수층:

$$\begin{aligned} h_{ijn}^{m+1} = \frac{1}{[(a^2 S_n / 4T_n \Delta t) + \alpha]} & \left[\alpha h_{ijn}^{m+1} + \frac{a^2 S_n}{4T_n \Delta t} h_{ijn}^m \right. \\ & \left. + (1-\alpha)(\bar{h}_{ijn}^m - h_{ijn}^m) + \frac{\sigma_{sn} a^2}{4T_n} (h_{ijn-1}^m - h_{ijn}^m) + \frac{a^2}{4T_n} \Sigma q_{ln} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 T_n 는 상부 대수층의 투수량계수 [L^2/T], m 은 시간을 나타내는 지수이고, \bar{h}_{ij}^{m+1} 은 절점(i, j)에 대한 주변 4절점의 평균 수두를 나타낸다. 즉,

$$\bar{h}_{ij}^{m+1} = \frac{h_{i-1,j}^{m+1} + h_{i+1,j}^{m+1} + h_{i,j-1}^{m+1} + h_{i,j+1}^{m+1}}{4} \quad (16)$$

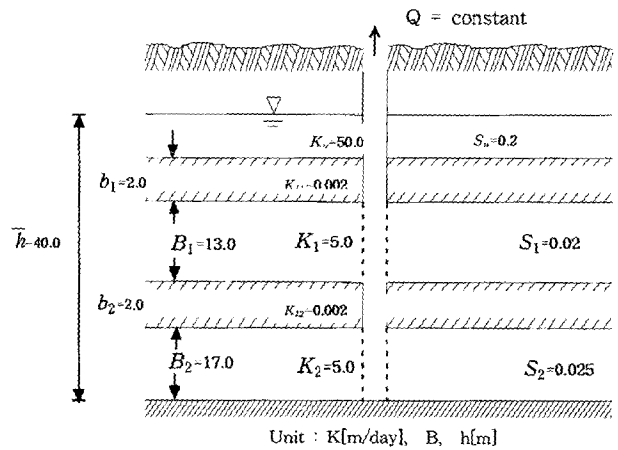
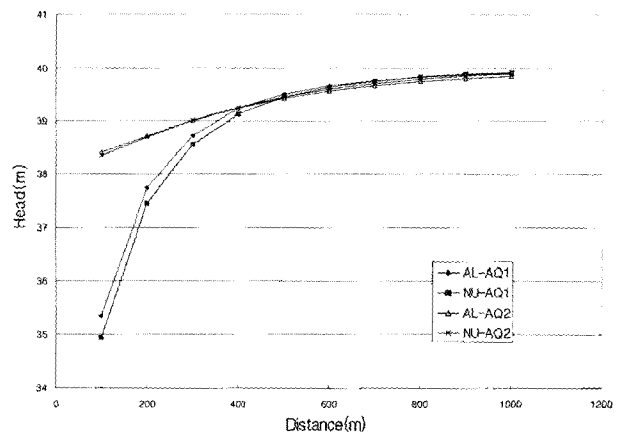
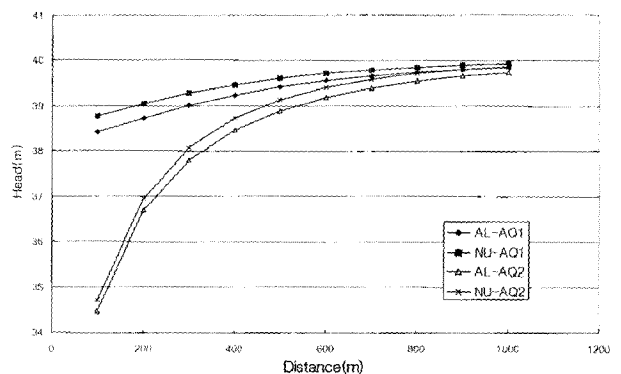


Fig. 2. Example for numerical and analytical model.

식 (13), (14), (15)를 이용해서 상부, 중간 그리고 하부 대수층의 수두를 구할 수 있으며 다층-대수층에서 양수를 하는 경우에 지하수의 거동을 관찰할 수 있다. 우선 수치해가 정상적으로 운영되는가를 검증하기 위해서 수치해와



(a) Pumping $Q_1 = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ at 1st aquifer (AQ1)



(b) Pumping $Q_2 = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ at 2nd aquifer (AQ2)

Fig. 3. Comparison of analytical (AN) and numerical (NU) solution.

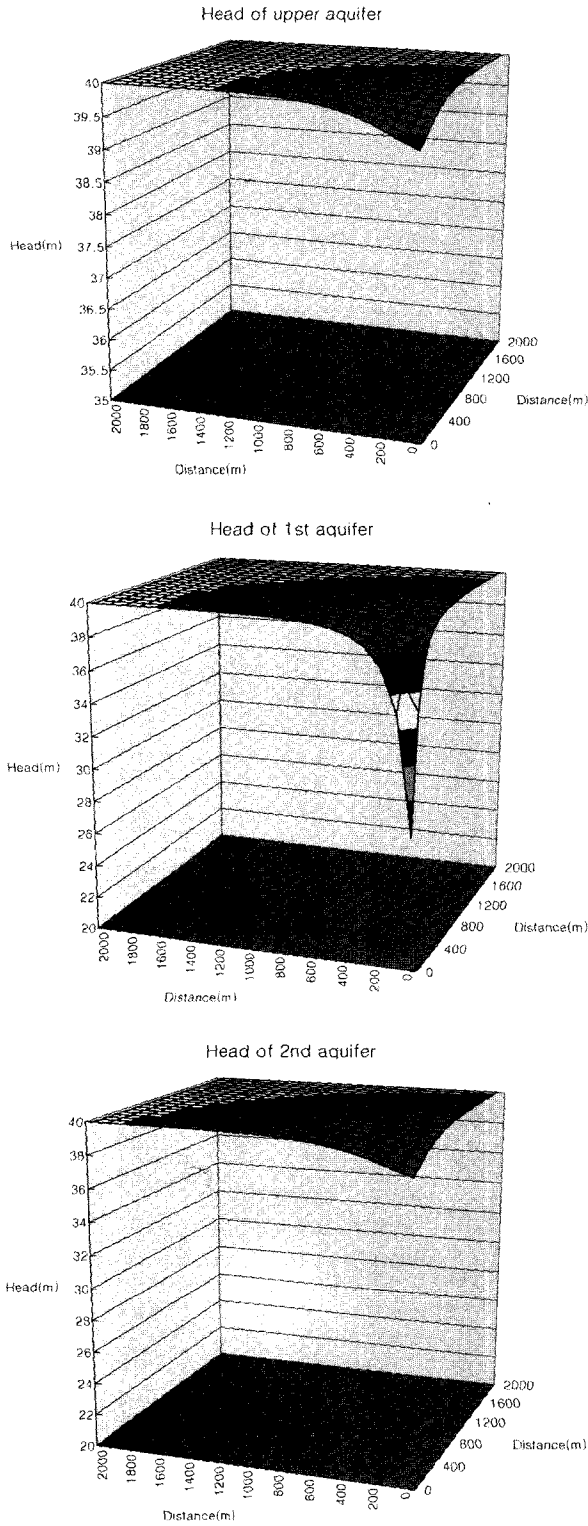


Fig. 4. Head variation by $Q_1=2000.0$ $Q_2=0.0$ (m^3/day).

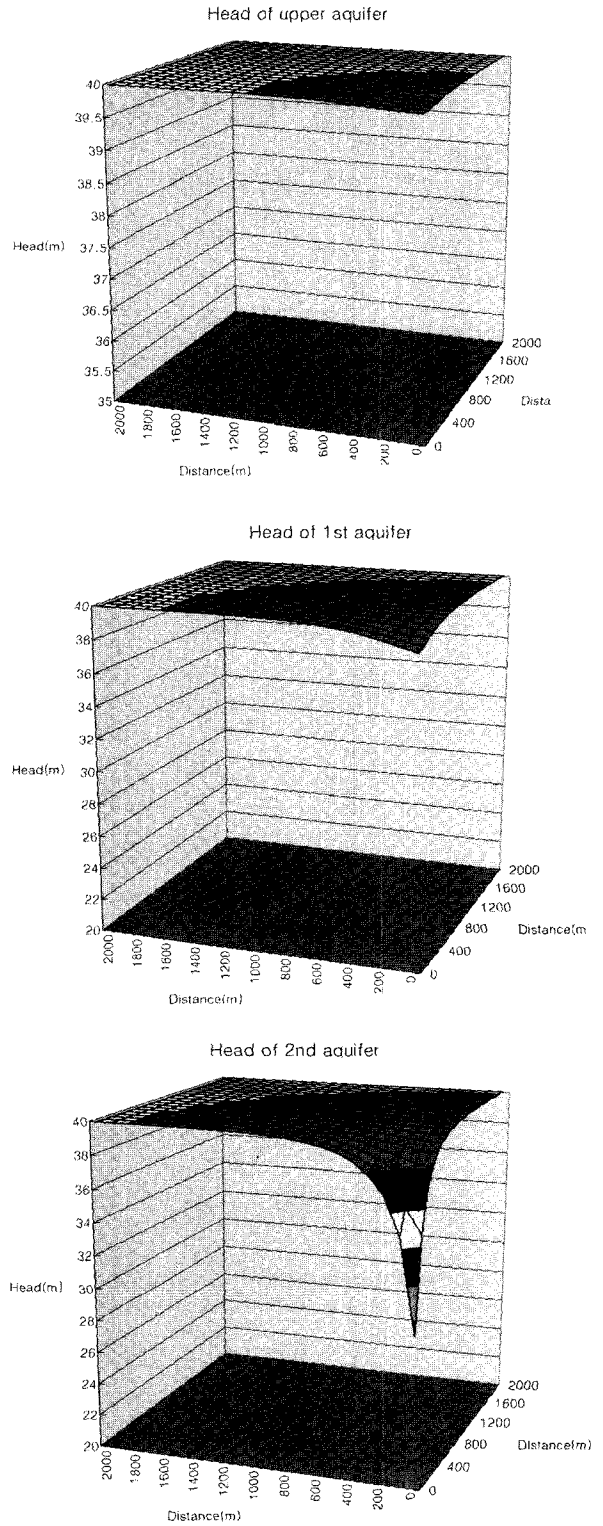


Fig. 5. Head variation by $Q_1=0.0$ $Q_2 = 2000.0$ (m^3/day).

해석해를 비교하였다. 대상 대수층의 구조는 Fig. 1에서 제1대수층과 제2대수층이 존재하는 경우에 대해 수행하였

다. 여기에서 사용된 각 변수의 값은 Fig. 2와 같다. 수치해를 수행할 때 수평방향에 대한 대상영역은 우물을 중

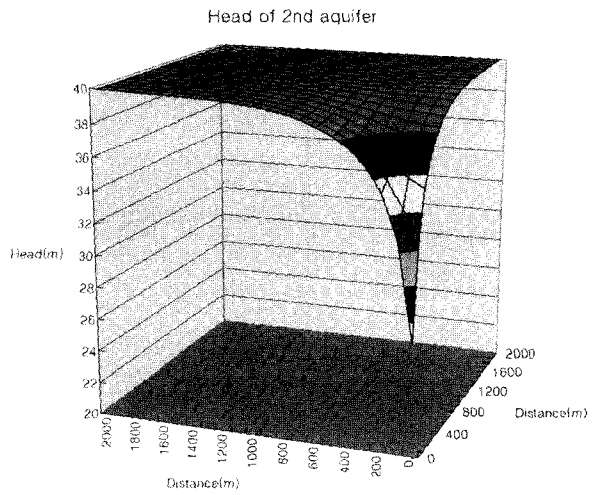
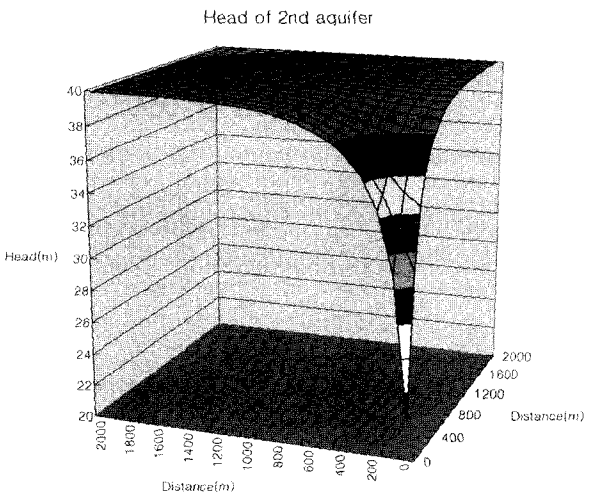
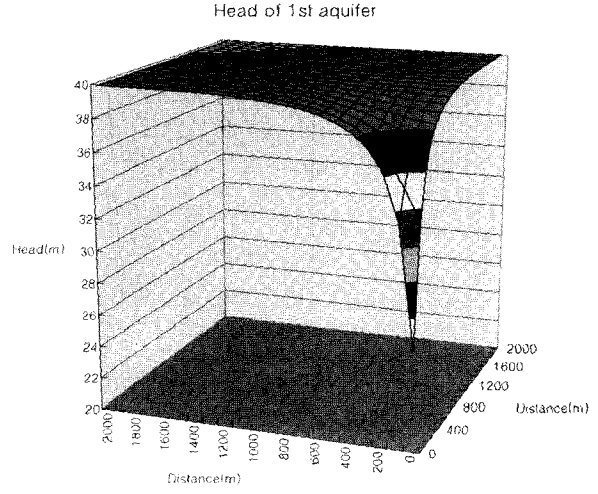
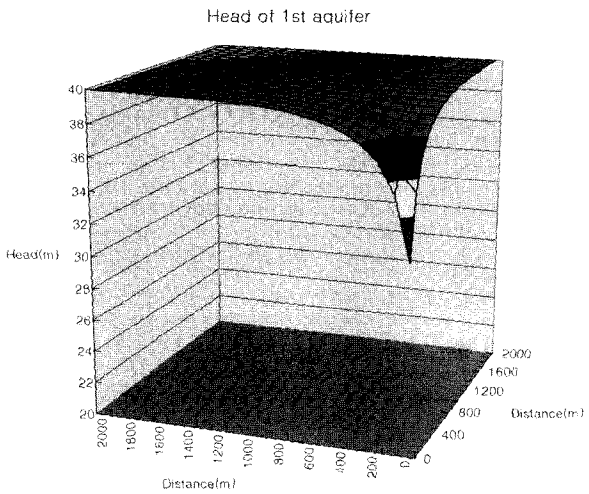
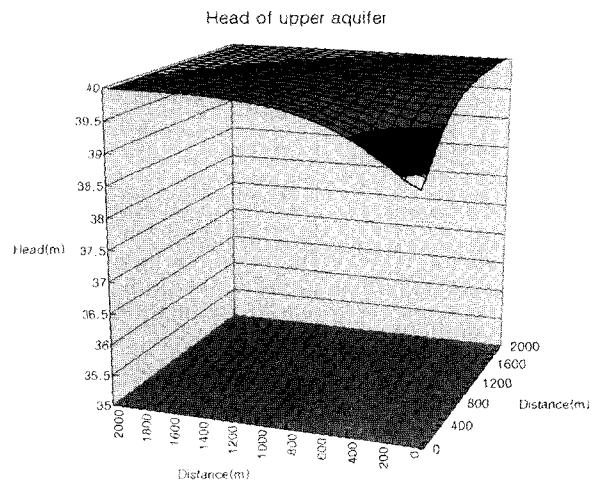
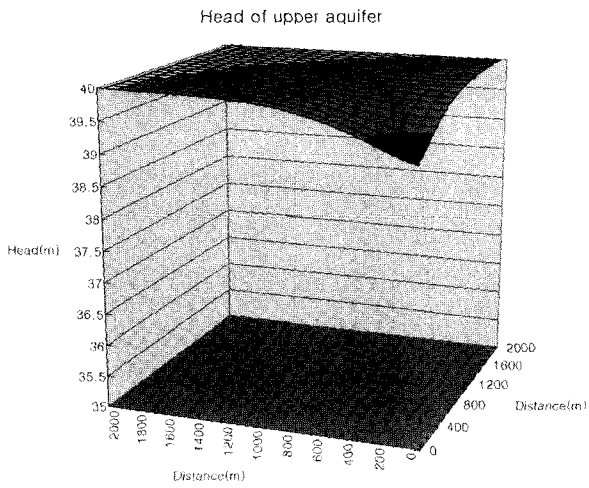


Fig. 6. Head variation by $Q_1=1000.0$ $Q_2=3000.0$ (m^3/day).

Fig. 7. Head variation by $Q_1=2000.0$ $Q_2=2000.0$ (m^3/day).

심으로 2,000 m로 하였으며, 우물로부터 이 거리이상까지 영향을 미치지 않는다는 의미이며 이는 수치해의 경계조

건으로 이용된다. 그리고 이에 대한 타당성은 해석해를 이용하여 판단할 수 있다. 해석해와 수치해를 비교하기 위

해 제1대수층에서만 $Q_1 = 2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수하는 경우와 제2대수층에서만 $Q_2 = 2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수하는 경우에 대한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 수치해에서는 상부 대수층인 자유면대수층, 그리고 제1대수층과 제2대수층에서의 수두 변화가 계산되지만 해석해에서는 제1대수층과 제2대수층에서의 수두변화만 계산된다. Fig. 3의 (a)는 제1대수층에서 $Q_1 = 2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로, (b)는 제2대수층에서 $Q_2 = 2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수하는 경우의 수두변화를 보여준다. 이 그림으로부터 해석해와 수치해의 수두를 비교하면 거의 비슷한 양상임을 알 수 있다. 즉, 수치해가 정상적으로 운영되고 있음을 알 수 있다. 수치해에서의 수렴조건은 제1대수층에서 양수하는 경우는 제1대수층에 수렴조건을, 제2대수층에서 양수하는 경우는 제2대수층에 수렴조건을 부여하였으며 그 조건은 정상상태가 되는 것으로 전단계와 현단계의 수두차가 0.01 m 보다 작을 때로 하였다. 수치해에서 각각 93.1 days와 88.1 days에서 정상상태가 되었다. 수치해와 해석해에서 약간의 차이는 식 (3), (4), (5), (6)에서 나타낸 해석해에서와 같이 상부 대수층인 비피압대수층의 수위가 반영되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이 때 수치해에 대한 해를 2차원으로 계산하였으며 우물을 중심으로 1/4부분만 Fig. 4와 5에 제시하였다. 이 때 정상상태가 각각 93.1 days와 88.1 days에서 나타났다.

이를 토대로 양수량을 제1대수층과 제2대수층에서 각각 $Q_1 = 1000 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $Q_2 = 3,000 \text{ m}^3/\text{day}$, 그리고 $Q_1 = 2,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $Q_2 = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수하는 경우에 대한 결과를 각각 Fig. 6과 7에 도시하였다. 각각 143.1 days, 153.1 days에서 정상상태가 되었다. 제1대수층과 제2대수층에서 동시에 양수하는 경우에는 수렴조건을 제2대수층에 부여하였다.

이상과 같이 다층-대수층에서 양수하는 경우에 수두의 거동을 관찰하였다. 이를 위하여 n 개의 다층-대수층으로 이루어진 대수층에서 양수하는 경우에 지하수의 거동을 알 수 있는 Fortran 프로그램을 작성하여 수행하였다. 현재 우리나라는 강우의 불균형과 지표수의 부족으로 지하수의 사용이 증가하고 있는 상황이며 대수층이 단순하지 않고 복합적으로 이루어진 대수층이 대부분이다. 그러므로 본 논문에서 제시된 수치해는 다층-대수층에서 지하수의 효율적인 이용에 기여할 것으로 판단된다. 또한 이러

한 연구는 다층 구조로 이루어진 대수층에서의 최적 양수를 위한 기초적인 작업의 과정이라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다층-대수층 구조로 이루어진 대수층에서 양수하는 경우에 지하수의 거동을 관찰하기 위해 지배 방정식을 제시하고 유한차분법을 적용하여 수치해를 제시하였다. 수치해의 검증은 위해 간단한 구조의 대수층에 대해 해석해와 비교하였다. 본 논문에서 제시된 수치해는 정상적으로 운영됨을 알 수 있었으며 이를 토대로 다층 구조로 이루어진 대수층에서 여러 가지 형태로 양수하는 경우에 대해 모의실험하여 수두의 거동을 살펴보았다. 즉, 누수대수층으로 이루어진 대수층에서는 누수층의 영향을 고려하여 지하수 해석을 수행해야한다는 것을 보여주고 있다.

이를 다층 구조로 이루어진 대부분의 대수층에 적용함으로써 지하수자원의 효율적인 운영에 도움이 될 것으로 기대되며 지하수의 최적 운영이 가능하도록 기여할 것이다.

사 사

본 연구는 호남대학교 교내연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Lindner, W., Lindner, K., and Karadi, G. "Optimal ground water management in two-aquifer systems", *Water Resources Bulletin*, **24**(1), pp. 27-33 (1988).
2. 김민환, "누수대수층에 대한 수리상수 추정과 해석", *대한지하수환경학회지*, **5**(3), pp. 123-128 (1998).
3. Bakker, M., "Simulating groundwater flow in multi-aquifer systems with analytical and numerical Dupuit-models", *Journal of Hydrology*, **222**, pp. 55-64 (1999).
4. Huisman, L., *Groundwater Recovery*, MacMillan, London, pp. 90-94 (1972).
5. Bear, J., *Hydraulics of groundwater*, McGraw Hill, pp. 107-109 (1979).
6. Gupta, R., *Hydrology and hydraulic systems*, Prentice Hall, pp. 174-177 (1989).
7. 김민환, 이재형, *지하수 모형, 도서출판 새론*, pp. 68-91 (1995).