

호수의 위치가 지하수 Flux에 미치는 영향 The Influence of Lake Position on Groundwater Fluxes

배 상 근*
Bae, Sang Keun

Abstract

The purpose of this study is to investigate the influence of the position of lake upon groundwater fluxes on a lake watershed, and to provide the guidance for the monitoring network design to survey the exchange relations between groundwater and lake water. Three kinds of hypothetical flow through lakes, which are located at the upper, middle, and lower portion of a watershed were considered. And groundwater flow for each case was numerically simulated under three-dimensional steady state conditions. As a result, it can be shown that: (1) The exchange between lake and groundwater in the case where a lake is located at lower portion on watershed shows more active than that for a lake located at upper portion. (2) The amounts of inflow from groundwater to a lake are less than the amounts of discharge to groundwater in a target lake watershed. (3) The rate of inflow and outflow of groundwater to a lake is increased as the lake is located at upper portion of a watershed. (4) The horizontal flux of groundwater occurred on the lake bed is more significantly active than the vertical flux.

요 지

호수지역에서, 호수의 위치가 지하수 flux에 미치는 영향을 파악하고 지하수와 호소수와의 교류관계를 관측하기 위한 감시망 설계에 대한 지침을 제공하기 위하여 호수의 위치를 달리하는 3종류의 가상 지하수 시스템을 설계하였다. 각각의 지하수 시스템에 대하여 3차원정상 모의발생을 행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다: (1) 호수의 위치가 지하수 시스템의 상류측에 위치할 때 보다 하류측에 위치하는 경우가 호소수와 지하수와의 교류가 활발하다. (2) 대상지역의 호수는 존재하는 위치에 상관없이 지하수가 호수로 유출되는 양보다 호소수가 지하수를 함양하는 양이 많다.(3) 호수의 위치가 유역의 상류측에 위치 할수록 지하수 유출입량의 비가 커진다. (4) 호수의 바닥부분에서 지하수의 수평방향 flux에 의한 교류는 연직방향 flux에 의한 교류 보다 훨씬 더 활발하다.

1. 서 론

미국의 Michigan주의 북부지역 일부, Minnesota주와 Wisconsin주에는 3만개를 넘는 대단히 많

* 계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수

은 호수들이 존재한다(Born 등, 1979). 이들 호수 지역에서는 지하수 유동에 호수가 큰 영향을 미치며 지하수 또한 호수에 큰 영향을 미친다. 따라서 이런 호수지역에서 호수에 대한 수문학적 현상을 파악하는데는 호수와 그 주변 지역의 지하수 flux를 정량화 하는 것이 대단히 중요하다. 수치모형을 이용한 정량화의 유용성 때문에 여러 학자들이 자료의 해석과 flux의 정량적 해석을 위해 다양한 수치기법을 통한 모형을 사용해 오고 있다.

Winter(1976, 1978)는 가상적인 지하수와 호수 시스템에 대한 모의발생으로 부터 호소수와 지하수와의 교류관계에 대한 연구를 하였고, 藪相根(1989, 1990)은 일본의 台島台地の 지하수와 Kasumigaura 호수와의 교류관계를 수질과 동위체 분석 자료를 해석하여 추정한 결과를 토대로(藪相根과 梶根, 1987) 3차원 지하수모형을 이용하여 규명하는 연구를 하였다.

최근에 Cheng과 Anderson(1994)은 호수의 위치에 따른 지하수 flux를 비교하여 호수의 위치가 지하수 flux에 미치는 영향을 파악하였다. 그들은 2차원 가상모형을 설계하여 호수의 위치별로 모의 발생을 행하여 호수지역에서의 지하수와 호소수와의 교류관계를 관측하기 위한 감시망설계에 대한 지침을 제공하는 등의 좋은 결과를 얻고있다. 그러나 그들의 연구는 호수바닥의 모양을 매우 단순화 시킴으로써 호수와 지하수와의 함양-유출 관계를 밝히는데 그 한계를 가지고 있어 호소수와 지하수와의 교류량을 정량화 하는 데는 미흡하였다. 본 연구에서는 Cheng과 Anderson(1994)의 기본개념을 3차원으로 확장하며 실제 호수의 바닥형상을 모형화하여 호수의 위치가 지하수 flux에 미치는 영향을 해석하고자 하였다.

2. 기초방정식과 모형설계

Darcy식과 연속방정식으로 부터 유도되는 3차원 지하수 유동방정식은 다음식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) = S_s$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, z, t) \quad (1)$$

여기서 h 는 수리수두; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 투수계수; x , y , z 는 좌표축; S_s 는 비저류율; W 는 단위 체적당의 flux; t 는 시간이다.

식 (1)을 완전음해법으로 차별화하면 다음식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & K_{xx} \Delta x_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) / \Delta x_i^2 - K_{xx} \Delta x_{i,j-1/2,k} \\ & \cdot (h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k}) / \Delta x_i^2 - K_{yy} \Delta y_{i+1,i,k} \cdot (h_{i,i,k} - h_{i,i,k}) \\ & / \Delta y_i^2 - K_{yy} \Delta y_{i-1/2,i,k} \cdot (h_{i,i,k} - h_{i,i,k}) \\ & / \Delta y_i^2 - K_{zz} \Delta z_{i,i,k+1/2} \cdot (h_{i,i,k+1} - h_{i,i,k}) \\ & / \Delta z_k^2 - K_{zz} \Delta z_{i,i,k-1/2} \cdot (h_{i,i,k} - h_{i,i,k-1}) \\ & / \Delta z_k^2 = S_{s,i,i,k} \cdot (h_{i,i,k} - \hat{h}_{i,i,k}) / \Delta t + W_{i,i,k} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 Δx_i , Δy_i , Δz_k 는 각각 $x(j)$, $y(i)$, $z(k)$ 격자점간의 간격; $h_{i,j,k}$ 는 수리수두의 새값; $\hat{h}_{i,j,k}$ 는 One Step 전의 수리수두; Δt 는 시간간격; i , j , k 는 각각 y , x , z 좌표의 지수이다. 식 (2)를 정리하여 재배열하면 다음식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Z_{i,i,k} h_{i,i,k-1} + B_{i,i,k} h_{i-1,i,k} + D_{i,i,k} h_{i,j-1,k} \\ + E_{i,i,k} h_{i,i,k} + F_{i,i,k} h_{i,j+1,k} + H_{i,i,k} h_{i+1,i,k} \\ + S_{i,i,k} h_{i,i,k+1} = q_{i,i,k} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서

$$Z_{i,i,k} = 2K_{zz} \Delta z_{i,i,k} \cdot K_{zz} \Delta z_{i,i,k-1} / (K_{zz} \Delta z_{i,i,k} \Delta z_{k-1} + K_{zz} \Delta z_{i,i,k-1} \Delta z_k) / \Delta z_k \quad (4)$$

$$B_{i,i,k} = 2K_{yy} \Delta y_{i,i,k} \cdot K_{yy} \Delta y_{i-1,j,k} / (K_{yy} \Delta y_{i,i,k} \Delta y_{i-1} + K_{yy} \Delta y_{i-1,j,k} \Delta y_i) / \Delta y_i \quad (5)$$

$$D_{i,i,k} = 2K_{xx} \Delta x_{i,i,k} \cdot K_{xx} \Delta x_{i,j-1,k} / (K_{xx} \Delta x_{i,i,k} \Delta x_{j-1} + K_{xx} \Delta x_{i,j-1,k} \Delta x_i) / \Delta x_i \quad (6)$$

$$F_{i,i,k} = 2K_{xx} \Delta x_{i,i,k} \cdot K_{xx} \Delta x_{i,j+1,k} / (K_{xx} \Delta x_{i,i,k} \Delta x_{j+1} + K_{xx} \Delta x_{i,j+1,k} \Delta x_i) / \Delta x_i \quad (7)$$

$$H_{i,i,k} = 2K_{yy} \Delta y_{i+1,i,k} \cdot K_{yy} \Delta y_{i,i,k} / (K_{yy} \Delta y_{i,i,k} \Delta y_{i+1} + K_{yy} \Delta y_{i+1,i,k} \Delta y_i) / \Delta y_i \quad (8)$$

$$S_{i,i,k} = 2K_{zz} \Delta z_{i,i,k+1} \cdot K_{zz} \Delta z_{i,i,k} / (K_{zz} \Delta z_{i,i,k} \Delta z_{k+1} + K_{zz} \Delta z_{i,i,k+1} \Delta z_k) / \Delta z_k \quad (9)$$

$$E_{i,i,k} = -(B_{i,i,k} + D_{i,i,k} + F_{i,i,k} + H_{i,i,k} + S_{i,i,k})$$

$$+Z_{i,j,k}+S_{i,j,k}/\Delta t) \quad (10)$$

$$q_{i,j,k}=W_{i,j,k}-(S_{i,j,k}/\Delta t) \hat{h}_{i,j,k} \quad (11)$$

식 (3)을 행렬식으로 표시하면 식 (12)와 같이 된다.

$$[M]\{h\}=\{q\} \quad (12)$$

과다한 계산시간을 줄이기 위하여 조정 행렬 [N]을 고려하면 식 (12)는 다음식과 같이 된다.

$$[M+N]\{h\}=\{q\}+[N]\{h\} \quad (13)$$

식 (13)을 반복식으로 나타내면, 다음식으로 표시된다.

$$[M+N]\{h\}^n=\{q\}+[N]\{h\}^{n-1} \quad (14)$$

여기서 n은 반복지수이다. 계산중의 반올림 오차를 줄여 정도(精度)를 유지하기 위하여 식 (14)의 우변에 $[M]\{h\}^{n-1}$ 을 더하고 뺄으로써 잉여형으로 표시하면 다음식과 같이 표시된다.

$$[M+N]\{\xi\}^n=\{R\}^{n-1} \quad (15)$$

여기서

$$\{\xi\}=\{h\}^n-\{h\}^{n-1} \quad (16)$$

$$\{R\}^{n-1}=\{q\}-[M]\{h\}^{n-1} \quad (17)$$

허용오차(ϵ)보다 ξ_{\max}^n 이 적을때 해가 얻어진다. 식 (14)와 (15)가 Strongly Implicit Procedure (SIP; Stone, 1968)의 기본방정식이다.

본 연구에서는 각각 한 개의 호수를 가진 3종류의 가상적인 지하수 유동 시스템에 대하여 해석하였다. 고려 대상은 미국 Wisconsin주 일원의 호수 지역으로 설정하였다. 고려 대상으로 삼고있는 이들 호수지역의 지형, 지질 및 호수의 양상등에 큰 차이는 없으며 Wisconsin주 북부의 Trout강 유역은 미국의 18개소의 장기 생태학적 연구(Long

Term Ecological Research) 지역 중 한곳인 North Temperate 호수지역내에 위치한다 (Magnuson과 Bowser, 1990). 그러므로, 이 지역에 대한 지하수 수문학적 연구가 장기간 진행되어 오고있어 지하수 연구에 필요한 많은 자료가 수집되어 있다. 따라서 본 연구에서 해석에 필요한 자료는 Trout강 유역의 자료를 사용하였다. 호수는 Trout강 유역에 위치한 Crystal 호수(그림 1)의 형상을 가지는 것으로 하였다.

각각의 지하수 유동 시스템별 호수의 위치는 다르나 호수의 크기 및 대수층의 투수계수는 동일하게 하였다. 호수 1은 호수의 중심부의 위치가 좌측 경계로 부터 유역길이의 0.75배인 곳으로 시스템의 지하수 함양역인 상류부에 위치하고 호수 2는 호수의 중심부의 위치가 좌측경계로 부터 유역길이의 0.5배인 곳으로 시스템의 중류부에 위치하고 호수 3은 호수의 중심부의 위치가 좌측경계로 부터 유역길이의 0.25배인 곳으로 지하수 유출역인 시스템의 하류부에 위치하게 하였다(그림 2-4).

유역의 크기는 i방향으로는 Crystal 호수의 유역 폭과 같이 2.6km, j방향으로는 Cheng과 Anderson(1994)이 정한 것과 같이 3.5km로 설정하였으며 격자간의 간격은 i방향으로는 200m로 하고 j방향으로는 100m로 하였다. Trout강 유역의 기반암의 깊이가 50m이므로(Attig, 1984) 대수층의 두께는 52m로 설정 하고 격자의 두께를 2m 씩으로 하였다. 따라서 i, j, k방향으로 13x35x26의 격자 점을 설정하였다.

대상지역의 대수층은 균질이나 이방성(異方性)을 가진다고 가정하였다(Krabbenhoft 등, 1990). 대수층의 투수계수는 1×10^{-4} m/sec로 설정하고 이 방성은 10으로 하였다(Krabbenhoft 등, 1990). 호수바닥의 퇴적물의 두께는 2m이며 투수계수는 2.9×10^{-10} m/sec로 하였다(Kenoyer, 1986). 4곳의 연직측면과 최하부의 밑바닥은 불투수 경계로 하였으며 지하수면 경계를 통하여 일정량의 지하수 함양이 일어나게 하였다.

연평균 강수량은 790mm/year, 증발량은 660mm/year, 그리고 연평균 강수의 지하수 함양량은 263 mm/year로 하였다(Cheng과 Anderson, 1994).

식(1)의 우변 첫항을 0으로한 지하수 유동방정

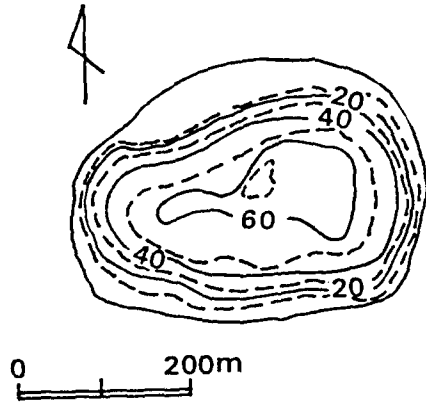


그림 1. Crystal호수의 호수바닥 형상.
(숫자는 깊이를 나타내며 단위는 ft)

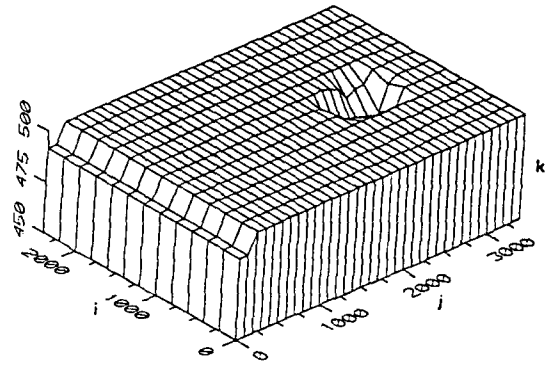


그림 2. 지하수시스템의 양상. 호수 1의 경우.
(단위: m)

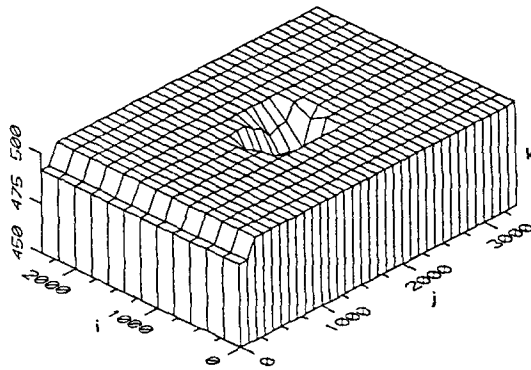


그림 3. 지하수시스템의 양상. 호수 2의 경우.
(단위: m)

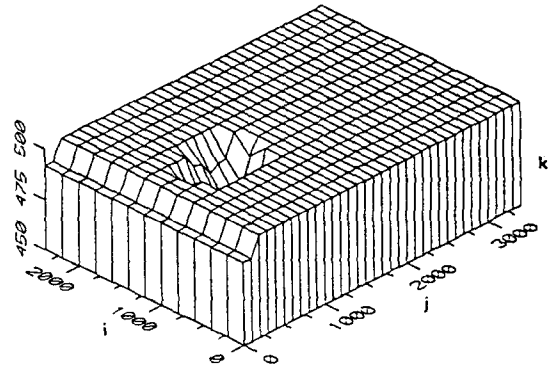


그림 4. 지하수시스템의 양상. 호수 2의 경우.
(단위: m)

식에 위의 자료들을 이용하여 3차원 정상 모의 발생을 행하였다. 모의발생에는 식 (15)를 SIP에 따라 Bae와 Kayane(1987)이 개발한 프로그램과 호수의 물수지를 3차원으로 계산할 수 있게 Cheng과 Anderson(1993)이 개발한 Lake Package를 사용하였다.

3. 결과와 고찰

모의발생 결과중 i 방향의 중앙 단면인 $i=7$ 의 연직 단면에서의 호수의 위치별 포텐셜 분포도가 그림 5-7에 나타나있다.

호수 1의 경우에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 호수의 위치가 상류에 위치하면 호소수와 지하수와 의 교류가 활발하지 않으며 호수의 상류부와 하류 부와의 유속차는 대단히 큼을 알 수 있다. 호수 상류부의 지하수유속은 대단히 느리나 호수 하류부의

I = 7

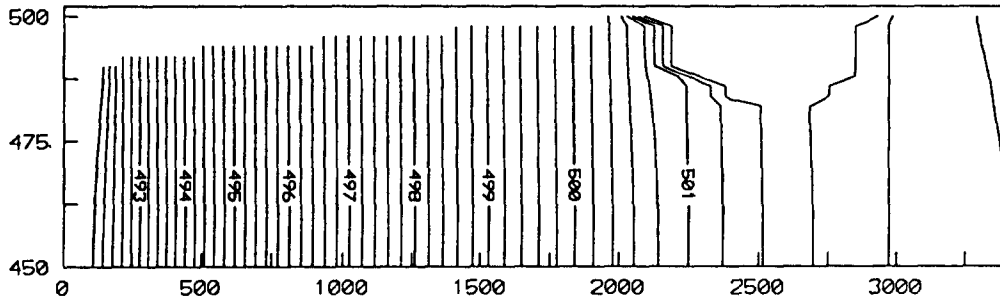


그림 5. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 연속 2차원 포텐셜 분포도. 호수 1의 경우. (단위:m)

I = 7

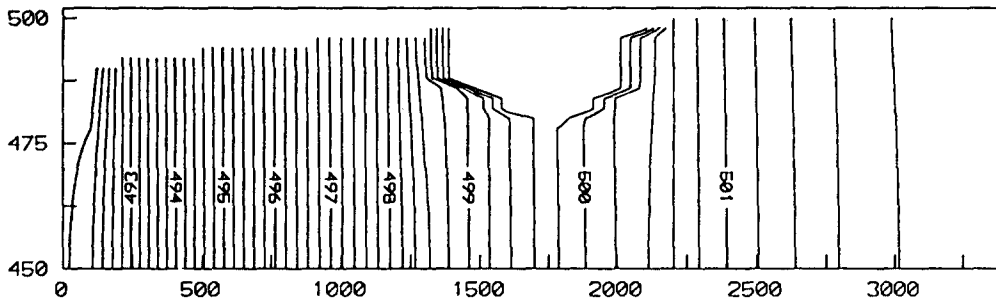


그림 6. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 연속 2차원 포텐셜 분포도. 호수 2의 경우. (단위:m)

I = 7

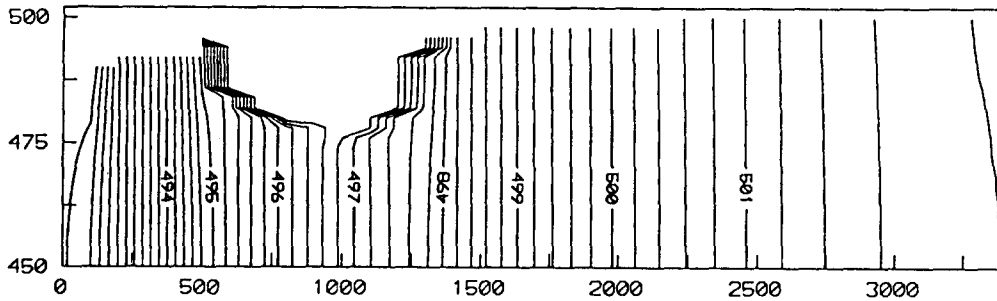


그림 7. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 연속 2차원 포텐셜 분포도. 호수 3의 경우. (단위:m)

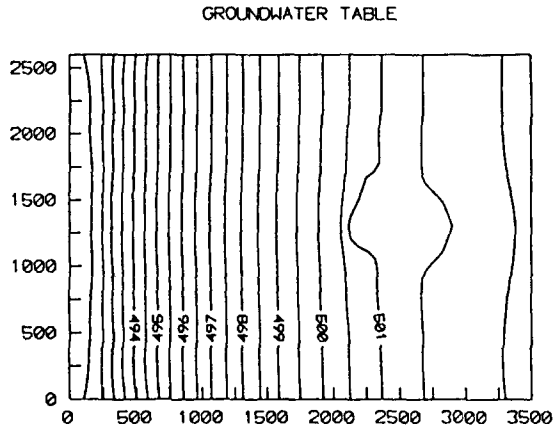


그림 8. 지하수수면도. 호수 1의 경우. (단위: m)

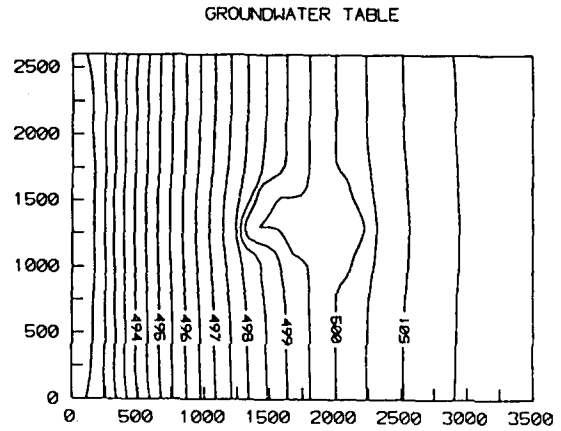


그림 9. 지하수수면도. 호수 2의 경우. (단위: m)

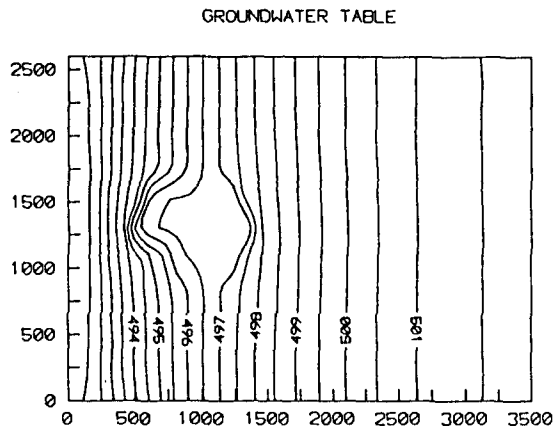


그림 10. 지하수수면도. 호수 2의 경우. (단위: m)

표 1. 호수의 위치별 지하수의 함양량과 유출량

Lake	inflow(m ³ /day)	outflow(m ³ /day)
Lake 1	221.92	367.27
Lake 2	527.64	657.22
Lake 3	771.57	923.83

I = 7

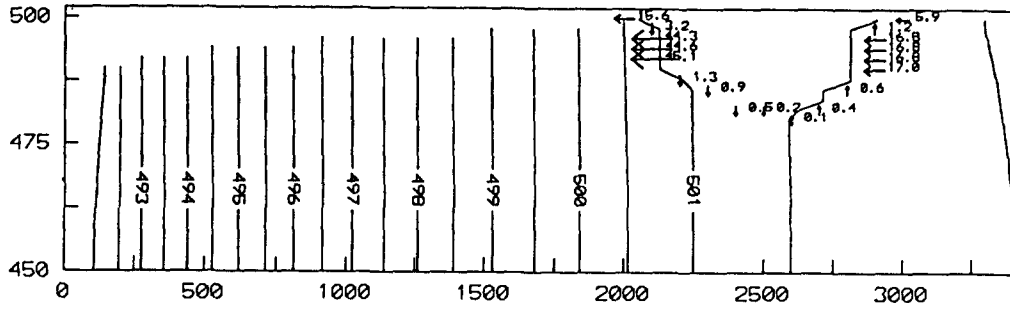


그림 11. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 호소수와 지하수와의 합양-유출. 호수 1의 경우. (단위: m³/day)

I = 7

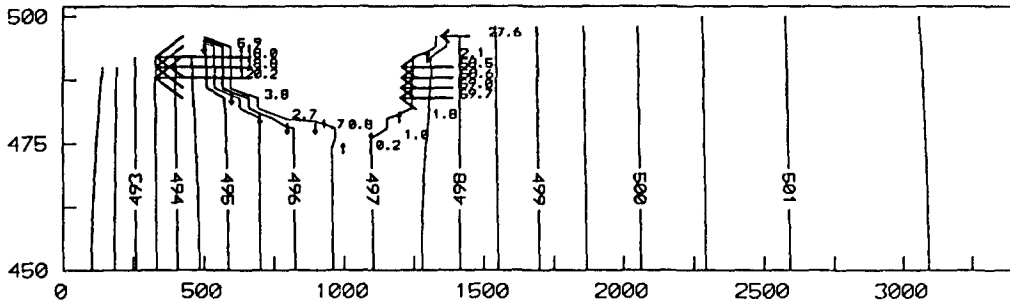


그림 12. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 호소수와 지하수와의 합양-유출. 호수 2의 경우. (단위: m³/day)

I = 7

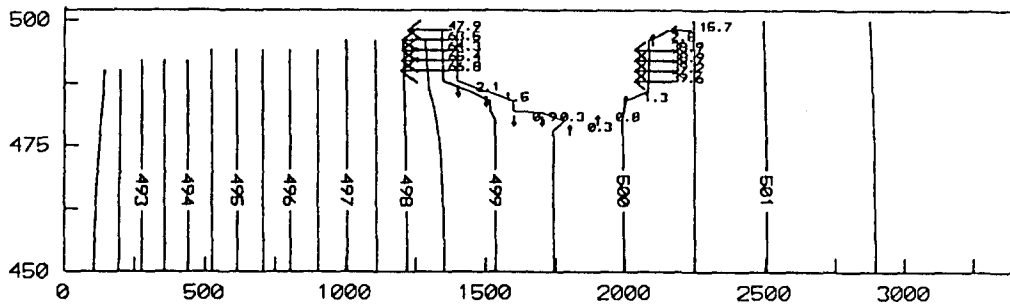


그림 13. i방향 중앙 단면인 i=7 단면의 호소수와 지하수와의 합양-유출. 호수 3의 경우. (단위: m³/day)

지하수유속은 하류부로 갈수록 점점 빨라지고 있으며 호수 인근 하류부의 지하수유속 보다 최하류부의 지하수유속이 많이 빠름을 알 수 있다. 그러나 호수부근 이외의 장소에서는 대수층의 심도에 따른 지하수 flux의 차이가 거의 없음을 나타내고 있다.

호수 2의 경우에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 호수의 위치가 중류부에 위치하면 호소수와 지하수와의 교류가 비교적 활발하며 호수 1의 경우 만큼 호수의 상류부와 하류부와 지하수유속 차이가 크지 않음을 나타내고 있다. 호수 상류부에서의 지하수유속은 호수에 멀리 떨어져 있을 때는 지하수유속이 대단히 느리나 호수에 가까와 질수록 더욱 빠르게 유동함을 알 수 있다. 호수의 하류에서는 지하수유속이 빠르며 호수로 부터의 거리에 따른 지하수유속 차이는 그리크지 않음을 나타내고 있다. 호수 1의 경우와 마찬가지로 호수 인근지역을 제외한 다른 곳에서는 대수층의 심도에 따른 지하수 flux의 차이가 거의 없음을 나타내고 있다.

호수 3의 경우에 대한 결과는 다음과 같다. 호수의 위치가 하류부에 위치하면 호소수와 지하수와의 교류가 대단히 활발하게 이루어짐을 알 수 있다. 호수 상류부에서의 지하수유속은 느리나 호수에 가까와 질수록 빨라져서 호수에 인접한 상류부에서의 지하수유속은 호수에 인접한 하류부의 지하수유속과 큰 차이를 보이지 않는다. 호수하류부의 지하수유속은 대단히 빠름을 알 수 있으며 다른 경우와 같이 호수주변 이외의 지역에서는 대수층의 깊이에 따른 지하수 flux의 차이가 적음을 나타내고 있다.

그림 8-10은 호수의 위치별 지하수수면도를 나타내고 있다. 이들 그림은 그림 5-7의 연직단면에 대한 포텐셜 분포도에서 알 수 있었던 지하수 유동상태를 보다 더 명확히 뒷받침하고 있음을 알 수 있다. 호수가 상류에 위치하면 호소수와 지하수와의 교류가 활발하지 않기 때문에 지하수 유동은 호수의 형상에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 호수의 위치가 중류에서 하류로 내려갈수록 호수주변에서의 지하수 유동 상태는 복잡해지고 호수의 형상에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 호수의 상류측 연변과 하류측 연변 주변의 지하수에 대해서는 호수의 영향이 크게 그리고 멀리까지 미치나 호수의 측면 연변부 주변의 지하수

는 호수의 영향을 작게 받으며 그 영향은 500m 이내로 제한 되게 미치는 것을 알 수 있다.

표 1은 모의발생 결과 중 호수로의 지하수 유동량과 호소수의 지하수 함양량의 크기를 호수의 위치별로 나타내고 있다. 본 표에 의하면 호수의 위치가 하류측에 위치 할수록 호소수와 지하수와의 교류가 활발함을 알 수 있다. 또한, 호수의 위치에 상관없이 지하수가 호수로 유출되는 양보다 호소수가 지하수를 함양하는 양이 많음을 알 수 있다. 이의 결과는 Kenoyer와 Anderson(1989), Anderson과 Cheng(1993)의 연구결과와 같은 경향을 나타낸다. 각각의 경우에 대한 지하수 유출입량의 비가 호수 1에서는 1.65, 호수 2에서는 1.25, 호수 3에서는 1.20으로 호수의 위치가 하류측에 위치 할수록 지하수 유출입량의 크기가 비슷하게 됨을 알 수 있다.

그림 11-13은 i방향의 중앙 단면인 $i=7$ 의 연직단면에 대한 호수의 위치별 호소수의 지하수 함양량과 호수로의 지하수 유출량의 크기를 나타낸 것이다.

호수 1의 경우에 대해서 살펴보면, 호수의 바닥 밑부분에서의 지하수 함양량이 $2.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 이고 유출량이 $1.1 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 그 양이 미미함을 알 수 있다. 반면에 호수의 측면부에서의 지하수 유출량은 $73.3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이고 지하수 함양량은 $149.6 \text{ m}^3/\text{day}$ 임을 나타내고 있다. 따라서 호수의 측면부에서의 지하수 유출입량은 호수의 밑바닥 부분에서의 지하수 유출입량의 55.7배에 달하고 호수 측면부에서의 지하수 함양량은 유출량보다 2.0배 많음을 알 수 있다. 호수 2의 경우에 대해서 살펴보면, 호수의 바닥 밑부분에서의 지하수 유출입량은 $7.2 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 적으며 호수의 측면부에서의 지하수 유출입량은 $172.3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이고 지하수 함양량은 $307.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 를 나타내고 있다. 따라서 호수의 측면부에서의 지하수 유출입량은 호수의 밑바닥 부분에서의 지하수 유출입량의 66.7배에 달하고 호수 측면부에서의 지하수 함양량은 유출량보다 1.8배 많음을 알 수 있다. 호수 3의 경우에 대해서 살펴보면, 호수의 바닥 밑부분에서의 지하수 유출입량은 $13.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 적으며 호수의 측면부에서의 지하수 유출입량은 $263.4 \text{ m}^3/\text{day}$ 이고 지하수 함양량은

357.0m³/day를 나타내고 있다. 따라서 호수의 측면부에서의 지하수 유출입량은 호수의 밑바닥 부분에서의 지하수 유출입량 보다 44.7배 많으며 호수 측면부에서의 지하수 함양량은 유출량의 1.4배에 달함을 알 수 있다.

이로써 호수 측면부에서의 지하수 유출입량은 호수 밑바닥에서의 지하수 유출입량의 수십배에 달하며 호수 밑바닥으로 부터의 지하수 유출입량은 적은 반면 측면부에서의 지하수 유출입량은 대단히 많음을 알 수 있다. 또한, 호수의 위치가 상류에서 하류로 변함에 따라 호수 측면부에서의 지하수 유출입량과 함양량의 비의 차이가 줄어들음을 알 수 있다.

4. 결 론

호수의 위치별 호소수와 지하수와의 함양-유출 관계를 정량화하여 호수의 위치가 호소수와 지하수와의 교류에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 호수 지역에서의 지하수와 호소수와의 교류관계를 관측하기 위한 감시망 설계 지침을 제공하기 위하여 3차원 정상 모의발생을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유역의 상류부에서 보다 하류부로 갈수록 지하수 flux는 크며 호수의 위치가 상류측에 위치할 때 보다 하류측에 위치하는 경우가 호소수와 지하수와의 교류가 활발하다.
2. 호수 주변을 제외한 다른 지역에서는 심도에 따른 지하수 flux의 차이가 크지 않다.
3. 대상지역의 호수는 존재하는 위치에 상관없이 지하수가 호수로 유출되는 양보다 호소수가 지하수를 함양하는 양이 많다.
4. 호수의 위치가 유역의 상류측에 위치 할수록 지하수 유출입량의 비가 커진다.
5. 호소수와 지하수와의 교류는 호수의 바닥부분에서의 지하수의 연직방향 flux에 의한 교류 보다 수평방향 flux에 의한 교류가 훨씬 더 활발하다.

감사의 글

본 연구를 함에 있어서 조언을 아끼지 않은 Wisconsin-Madison 대학의 M.P. Anderson 교수와 자료를 흔쾌히 제공해준 X. Cheng 박사에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- 裴相根 (1989). “三次元 定常 地下水模型에 의한 홍적대지의 地下水流動 解析.” 한국수문학회지, 제22권, 제1호, pp. 81-90.
- 裴相根 (1990). “三次元 非定常 地下水模型에 의한 홍적대지의 地下水流動 解析.” 대한토목학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 81-90.
- 裴相根, 榑根 勇 (1987). “洪積台地における地下水の三次元的流動-環境トリチウムと水質による地下水の循環と滯留時間.” 日本地下水學會誌, Vol. 29, No. 2, pp. 89-98.
- Anderson, M.P., and Cheng, X. (1993). “Long- and short-term transience in a groundwater/lake system in Wisconsin, USA.” *J. of Hydrology*, Vol. 145, pp. 1-18.
- Attig, J.W. Jr. (1984). “The Pleistocene geology of Vilas County, Wisconsin,” Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA.
- Bae, S.K., and Kayane, I. (1987). “A study of the three-dimensional groundwater flow system in an upland area of Japan.” *Hydrological Processes*, Vol. 1, No. 4, pp. 339-358.
- Born, S.M., Smith, S.A., and Stephenson, D.A. (1979). “Hydrogeology of glacial-terrain lakes with management and planning applications.” *J. of Hydrology*, Vol. 43, pp. 7-43.
- Cheng, X., and Anderson, M.P. (1993). “Numerical simulation of groundwater interaction with lakes allowing for fluctuating lake levels.” *Ground Water*, Vol. 31, No. 6, pp. 929-933.

- Cheng, X., and Anderson, M.P. (1994). "Simulating the influence of lake position on groundwater fluxes", *Water Resour. Res.* (in press).
- Kenoyer, G.J. (1986). "Groundwater/lake dynamics and chemical evolution in a sandy silicate aquifer in Northern Wisconsin," Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA.
- Kenoyer, G.J., and Anderson, M.P. (1989). "Groundwater's dynamic role in regulating acidity and chemistry in a precipitation-dominated lake." *J. of Hydrology*, Vol. 109, pp. 287-306.
- Krabbenhoft, D.P., Bowser, C.J., Anderson, M.P., and Valley, J.W. (1990). "Estimating groundwater exchange with lakes: 2. Calibration of a three-dimensional, solute transport model to a stable isotope plume." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 10, pp. 2455-2462.
- Magnuson, J.J., and Bowser, C.J. (1990). "A network for long-term ecological research in the United States." *Freshwater Biology*, Vol. 23, pp. 137-143.
- Stone, H.L. (1968). "Iterative solution of implicit approximations of multi-dimensional partial differential equations." *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 5-3, pp. 550-558.
- Winter, T.C. (1976). "Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater." *Professional Paper 1001*, U.S. Geological Survey, pp. 1-45.
- Winter, T.C. (1978). "Numerical simulation of steady state three-dimensional groundwater flow near lakes." *Water Resour. Res.*, Vol. 14, No. 2, pp. 245-254.

〈접수: 1994년 12월 27일〉