

熱흐름을 同伴한 定常地下水의 흐름解析 數值模型

A Numerical Model for Analysis of Groundwater Flow with Heat Flow in Steady-State

왕수균* · 조원철** · 이원환***

Wang, Soo Kyun · Cho, Won Cheol · Lee, Won Hwan

Abstract

In this study, a numerical model was established and applied to simulate the steady-state groundwater and heat flow in an isotropic, heterogeneous, three dimensional aquifer system with uniform thermal properties and no change of state. This model was developed as an aid in screening large groundwater-flow systems as prospects for underground waste storage. Driving forces on the system are external hydrologic conditions of recharge from precipitation and fixed hydraulic head boundaries. Heat flux includes geothermal heat-flow, conduction to the land surface, advection from recharge, and advection to or from fixed-head boundaries.

The model uses an iterative procedure that alternately solves the groundwater-flow and heat-flow equations, updating advective flux after solution of the groundwater-flow equation, and updating hydraulic conductivity after solution of the heat-flow equation. Direct solution is used for each equation.

Travel time is determined by particle tracking through the modeled space. Velocities within blocks are linear interpolations of velocities at block faces.

Applying this model to the groundwater-flow system located in Jigyung-ri, Songla-myun, Youngil-gun, Kyungsangbuk-do, the groundwater-flow system including distribution of head, temperature and travel time and flow line, is analyzed.

要 旨

本 研究는 一定均等한 熱의 特性을 가지고 있으며 相變化 없는 等方·異質性의 3次元 帶水層系의 熱흐름과 定常狀態의 地下水흐름을 模擬發生할 수 있는 有限差分 模型을 確立한 것이다. 이 模型은 大規模 地下水 흐름體系에서 廢棄物의 地下貯溜時 地下水 흐름과 發生 혹은 注入된 熱의 흐름을 豫測·分析하기 위하여 確立된 것이다. 이러한 帶水層系의 地下水 흐름에 作用하는 條件으로는 降雨注入으로 인한 水文學的 條件과 固定된 水理水頭 境界條件 등이 包含되고, 熱흐름에는 地熱의 흐름, 地表面으로의

* 정희원 · 연세대학교 토목과 수공학연구소 연구원

** 정희원 · 연세대학교 토목과 교수

*** 정희원 · 연세대학교 토목과 교수

傳導, 注入에 의한 移流, 固定 水頭境界로 向한 또는 固定水頭境界로 부터의 移流 등이 包含된다.

本 模型에서는 地下水흐름과 熱흐름 方程式을 번갈아 푸는 交代反復過程을 使用하고, 兩 方程式의 計算에는 直接解法을 使用한다. 移動時間은 模型空間에서 粒子追跡으로 決定되며, 分轄된 區域內的 地下水 流速은 區域面의 流速을 線形으로 補間하여 計算한다.

本 模型을 慶尙北道 迎日郡 松羅面 地境里 一帶의 地下水系에 適用하여 이 一帶 地下 岩盤層의 水頭分布, 流動路, 移動時間 및 地下水溫分布를 計算하여 地下水 流動體系를 分析하였다.

1. 基本理論

1.1 序 論

이 모형의 구조와 내용은 본 연구의 목적을 수행하기 위한 것으로, 모든 지하수 문제를 해결할 수 있는 것은 아니다. 사용하고 있는 기법들은 모형화 과정에서 보편화 되어 있는 기존의 기법들을 본 모형의 목적에 맞도록 수정한 것들이며, 이 모형의 기본구조는 Trescott, *et al.* (1976), Konikow and Bredehoeft(1978), Faust and Mercer(1977), Bennett(1976), 그리고 조원철(1988) 등의 참고문헌에서 자세하게 찾아볼 수 있겠다. 여기서는 간략하게 수학적인 것만 정리하기로 한다.

이 모형은 지하수 흐름방정식과 대류확산형 열흐름 지배방정식을 각각 유한차분 근사법으로 구성하여 모형화한 것이다. 지하수흐름 모형과 열흐름 모형은 상호 종속적이다. 왜냐하면 지하수흐름 모형에서의 수리전도율은 온도의 함수이며, 열흐름 모형에서의 대류흐름은 지하수 흐름의 함수이기 때문이다. 이 모형은 두 가지 방정식 사이를 반복적으로 연결하고 있다. 즉 물흐름식과 열흐름식의 해가 교대로 구해지며 이에 따라서 구획면을 통한 물흐름은 지하수흐름 방정식의 해가 구해진 후에 다시 계산되어지며 열흐름 방정식의 해를 구한 후에는 수리전도율이 다시 계산되어 진다. 온도에 따른 수리전도율의 변동은 기본적으로 점성의 변화에 기인하기 때문에 밀도는 일정한 것으로 가정할 수 있다. 본 모형은 等溫模型, 즉 지하수흐름 단일모형으로도 사용될 수 있다.

1.2 地下水흐름 支配方程式

x, y, z방향의 3차원 지하수흐름 支配方程式을 구하기 위해서 질량보존의 법칙에서 유도되는 연속방정식을 적용한다. x, y, z방향의 유속을 각각 u,

v, w라 하고, 미소체적으로 dt시간 동안 유입·유출하는 유체의 질량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{유입질량} : I = \rho(u dy dz + v dx dz + w dx dy + R dx dy) dt$$

$$\text{유출질량} : O = \rho \left[\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \right) dy dz + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dz + \left(w + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy \right] dt$$

여기서, R은 강우 등으로 인한 주입량[L/T]이다. 미소체적 내의 암석이 포화되어 있고 암석과 지하수가 비압축성이라고 가정하면, 저류량 S는 0이 되고, I=0로 되어 양변을 정리하면 다음 식 (1)과 같이 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{R}{dz} = 0 \quad (1)$$

이 식에 Darcy의 법칙을 적용하면, 다음과 같은 등방성 대수층의 3차원 정상상태 지하수 흐름 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W_s = 0 \quad (2)$$

여기서 K는 수리전도율[L/T], h는 수리수두[L], W_s는 -R/dz로서 단위깊이당 강우주입량[L/T]이다.

1.3 熱흐름 方程式

x, y, z방향의 3차원 열흐름 지배방정식을 구하기 위하여 에너지 보존법칙으로부터 유도되는 연속방정식을 적용한다. 미소체적 dx · dy · dz에 대한 에너지 평형식을 적용하면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & (q_x + q_y + q_z) + q_i(dx dy dz) + h_o(dx dy) \\
 & \text{流入熱量 内部熱源の 外部熱源の} \\
 & \quad \text{發熱量 發熱量} \\
 & = (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) + cp(dx dy dz) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3) \\
 & \text{流出熱量 内部에너지의} \\
 & \quad \text{變化量}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{cases}
 q_x = q_{k,x} + q_{s,x} \\
 q_y = q_{k,y} + q_{s,y} \\
 q_z = q_{k,z} + q_{s,z}
 \end{cases}
 \text{단위시간당 } x, y, z \text{방향의 유입열량} \quad [E/T]$$

여기서,

- $q_{k,x}$; 암석의 열전도율에 의한 x방향 유입열량
- $q_{s,x}$; 지하수 유입에 수반되는 x방향 유입열량
- q_i ; 단위시간 동안 내부 열원에 의한 단위체적당 발열량 $[E/L^3 \cdot T]$
- h_o ; z방향의 외부 열원항 $[E/L^2 \cdot T]$
- c ; 비열 $[E/M \cdot \text{Deg.}]$
- ρ ; 물의 밀도 $[M/L^3]$
- T ; 온도 $[\text{Deg.}]$
- t ; 시간 $[T]$

단위시간 동안 x방향의 유입열량 $q_{k,x}$ 와 $q_{s,x}$ 는 다음과 같다.

$$q_{k,x} = \left\{ -K_t \frac{\partial T}{\partial x} \right\} dy dz, \quad q_{s,x} = (S_t \cdot q \cdot T) dy dz \quad (4)$$

- K_t ; 물로 포화된 암석의 열전도율 $[E/(L \cdot T \cdot \text{Deg.})]$
- S_t ; 유체의 체적비열 $[E/(L^3 \cdot \text{Deg.})]$
- q ; 한점에서 단위흐름면적당의 지하수의 比流量 $[L/T]$.

유출되는 열량 q_{x+dx} 는 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 q_{x+dx} = & \left[\left\{ -K_t \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -K_t \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \right] dx \\
 & + S_t \cdot q \cdot T + S_t \frac{\partial}{\partial x} (q \cdot T) dx \quad dy dz \quad (5)
 \end{aligned}$$

간류열량을 계산하기 위하여 각 방향에 대한 유입열량에서 유출열량을 빼고, 이를 에너지 평형식에 대입하여 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_t \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_t \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_t \frac{\partial T}{\partial z} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + S_t \frac{\partial (qT)}{\partial x} + S_t \frac{\partial (qT)}{\partial y} + S_t \frac{\partial (qT)}{\partial z} \\
 & + q_i + \frac{h_o}{dz} = cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)
 \end{aligned}$$

암석층 내부에 열원이 존재하지 않고, 지하수 흐름과 열흐름이 정상상태이며, 격자내부의 열전도율이 일정하다고 가정하면, 다음 식 (7)과 같은 Poisson 방정식이 되는데, 이 식이 열전도율과 비열이 일정한 조건하에서 정상상태의 대류-확산성 열흐름 지배방정식이다.

$$\begin{aligned}
 & K_t \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + S_t \left\{ \frac{\partial (qT)}{\partial x} + \frac{\partial (qT)}{\partial y} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial (qT)}{\partial z} \right\} + H_t = 0 \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서 H_t 는 지열흐름을 포함하는 단위깊이당 열원항 $(h_o/dz)[E/L^3 \cdot T]$ 이다.

2. 數値模型

지하수흐름 지배방정식과 열흐름 지배방정식의 해를 구하기 위해서 본 연구에서는 3차원 선형 Implicit 유한차분법을 사용하였다. 이 방법에서 관심영역에 적용되는 유한차분식은 N개의 미지수두와 미지온도에 대한 N개의 선형방정식계를 이루고 이 선형방정식계를 반복계산하여 미지값을 계산한다. 본 모형에서 사용하는 구역중심(block centered) 유한차분법에 관해서는 참고문헌 2와 3에 자세하게 설명되어 있으며, 구역의 좌표축은 그림 1과 같다.

2.1 地下水흐름 有限差分方程式

등방대수층의 3차원 정상상태 지하수흐름 방정식을 3차원 선형 Implicit법에 의하여 유한차분방정식으로 변환하면 다음 식 (8)과 같다(그림 1 참조).

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{K_{i,j+1/2,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{(D_{x_{i+1}} + D_{x_i})/2} - \frac{K_{i,j-1/2,k}(h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k})}{(D_{x_i} + D_{x_{i-1}})/2} \right\} / D_{x_i} \\
 & + \left\{ \frac{K_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{(D_{y_{j+1}} + D_{y_j})/2} - \frac{K_{i,j-1/2,k}(h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k})}{(D_{y_j} + D_{y_{j-1}})/2} \right\} / D_{y_j} \\
 & + \left\{ \frac{K_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{(D_{z_{k+1}} + D_{z_k})/2} - \frac{K_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1})}{(D_{z_k} + D_{z_{k-1}})/2} \right\} / D_{z_k}
 \end{aligned}$$

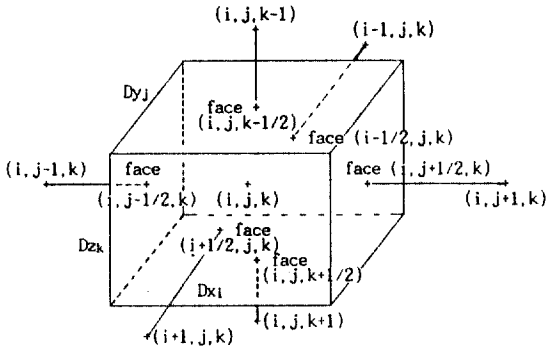


그림 1. 3차원 모형을 위한 유한차분 구역(block)

$$+W_{S_{ijk}}=0 \quad (8)$$

이 유한차분식에서 격자면의 수리전도율은 인접 격자에 대한 수리전도율에 격자의 길이를 가중한 조화평균을 사용하며, x방향 격자면에 대한 수리전도율을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{i-1/2,j,k} &= \frac{K_{i-1,j,k}K_{i,j,k}(Dx_i + Dx_{i-1})}{K_{i-1,j,k}Dx_i + K_{i,j,k}Dx_{i-1}} \\ K_{i+1/2,j,k} &= \frac{K_{i+1,j,k}K_{i,j,k}(Dx_i + Dx_{i+1})}{K_{i+1,j,k}Dx_i + K_{i,j,k}Dx_{i+1}} \end{aligned} \quad (9)$$

y와 z방향의 격자면의 수리전도율도 같은 방법으로 유도될 수 있다.

한 격자에 대한 유한차분식에 구역의 체적 $Dx_i \cdot Dy_j \cdot Dz_k$ 를 곱하면 구역의 유입 또는 유출량을 나타내는 항을 가진 평형방정식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{K_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{(Dx_{i+1} + Dx_i)/2} - \frac{K_{i-1/2,j,k}(h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k})}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2} \right] \cdot Dy_j Dz_k \\ & + \left[\frac{K_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{(Dy_{j+1} + Dy_j)/2} - \frac{K_{i,j-1/2,k}(h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k})}{(Dy_j + Dy_{j-1})/2} \right] \cdot Dx_i Dz_k \\ & + \left[\frac{K_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{(Dz_{k+1} + Dz_k)/2} - \frac{K_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1})}{(Dz_k + Dz_{k-1})/2} \right] \cdot Dx_i Dy_j \\ & + W_{S_{ijk}} \cdot Dx_i Dy_j Dz_k = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 수두에 대해 정리하면, 선형 대수방정식 (11)이 된다.

$$\begin{aligned} & A_{i,j,k}h_{i-1,j,k} + B_{i,j,k}h_{i,j-1,k} + C_{i,j,k}h_{i,j,k-1} + D_{i,j,k}h_{i,j,k} + E_{i,j,k} \\ & h_{i,j,k+1} + F_{i,j,k}h_{i,j+1,k} + G_{i,j,k}h_{i+1,j,k} + W_{S_{ijk}}Dx_i Dy_j Dz_k = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \frac{K_{i-1/2,j,k} \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2}, & B &= \frac{K_{i,j-1/2,k} \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_j + Dy_{j-1})/2}, \\ C &= \frac{K_{i,j,k-1/2} \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_k + Dz_{k-1})/2}, & E &= \frac{K_{i,j,k+1/2} \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_{k+1} + Dz_k)/2}, \\ F &= \frac{K_{i,j+1/2,k} \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_{j+1} + Dy_j)/2}, & G &= \frac{K_{i+1/2,j,k} \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_{i+1} + Dx_i)/2}, \\ D &= -(A_{i,j,k} + B_{i,j,k} + C_{i,j,k} + E_{i,j,k} + F_{i,j,k} + G_{i,j,k}) \end{aligned}$$

지하수흐름의 평균유속은 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$V = \frac{Q}{n \cdot A} = \frac{K \cdot i}{n} = \frac{K}{n} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (12)$$

여기서 n은 공극율, A는 단면적, i는 동수경사이다. 임의의 격자점 i, j, k에서 x방향의 두격자면, (i-1/2, j, k), (i+1/2, j, k)에 대한 식을 유한차분식으로 변환하면 식 (13)과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} V_{i-1/2,j,k} &= \frac{K_{i-1,j,k}K_{i,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{(K_{i-1,j,k}Dx_i + K_{i,j,k}Dx_{i-1})/2 \cdot n_{i,j,k}} \\ V_{i+1/2,j,k} &= \frac{K_{i,j,k}K_{i+1,j,k}(h_{i,j,k} - h_{i+1,j,k})}{(K_{i,j,k}Dx_{i+1} + K_{i+1,j,k}Dx_i)/2 \cdot n_{i,j,k}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

여기서, Δh 는 각각 $h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}$ 와 $h_{i,j,k} - h_{i+1,j,k}$, Δl 은 $(Dx_i + Dx_{i-1})/2$ 와 $(Dx_i + Dx_{i+1})/2$, n은 $n_{i,j,k}$ 을 사용한다. y, z방향에 대해서도 같은 방법으로 유속에 대한 유한차분식을 유도할 수 있다.

지하수 이동시간은 모형을 통하여 물입자가 움직여 감으로써 격자 내에서 계산된다. 임의의 구역면의 x방향 유속은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{i-1/2,j,k} = \frac{q_{i-1/2,j,k}}{n_{i,j,k}}, \quad V_{i+1/2,j,k} = \frac{q_{i+1/2,j,k}}{n_{i,j,k}} \quad (14)$$

여기서, q는 비유량[L/T], n은 공극율이다. 구역내에서 임의 방향의 유속은 마주보는 두 구역면의 유속을 선형보간하여 계산된다.

$$V_x = a_x + b_x \cdot x \quad (15)$$

여기서, V_x 는 x방향의 유속이고, a_x 와 b_x 는 선형함수를 정의하는 계수이다. (i-1/2, j, k)면에서 x가 0이고, (i+1/2, j, k)면에서 x가 Dx_i 인 구역에서 국지좌표계를 사용하면, 두 계수는 각각 다음과 같다.

$$a_x = V_{i-1/2,j,k}, \quad b_x = \frac{V_{i+1/2,j,k} - V_{i-1/2,j,k}}{Dx_i} \quad (16)$$

다른 두 방향의 유속도 같은 방법으로 계산된다.

이동시간 $Dt_{x_{i,j,k}}$ 는 구역내의 한점 x_0 에서 구역면의 한점 x_i 까지 x 방향 운동성분을 따라 가는데 걸리는 시간으로 식 (17)으로 계산된다.

$$Dt_{x_{i,j,k}} = \int_{x_0}^{x_i} \frac{1}{a_x + b_x \cdot x} dx = \frac{1}{b_x} \ln \frac{a_x + b_x \cdot x_i}{a_x + b_x \cdot x_0} \quad (17)$$

y, z 방향에 대한 이동시간도 x 방향과 같은 방법으로 계산된다.

임의 구역을 통과하는데 걸리는 시간은 세 좌표축 방향으로 계산된 최단시간이며, 전체 대상지역을 통과하는데 걸리는 총이동시간은 유체입자가 각각의 구역들을 통과하는데 걸리는 시간의 합으로 계산된다.

2.2 熱 흐름 支配方程式의 有限差分方程式

열전도율과 비열이 일정한 조건하에서 정상상태의 대류-확산성 열흐름 지배방정식을 유한차분식으로 변환하면 식 (18)과 같다.

$$K_i \left[\frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}}{(Dx_{i+1} + Dx_i)/2} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2} \right] \\ + \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}}{(Dy_{j+1} + Dy_j)/2} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k}}{(Dy_j + Dy_{j-1})/2} \\ + \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{(Dz_{k+1} + Dz_k)/2} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{(Dz_k + Dz_{k-1})/2} \\ + S_i \left[\frac{q_{i+1/2,j,k} T_{i+1/2,j,k} - q_{i-1/2,j,k} T_{i-1/2,j,k}}{Dx_i} \right. \\ + \frac{q_{i,j+1/2,k} T_{i,j+1/2,k} - q_{i,j-1/2,k} T_{i,j-1/2,k}}{Dy_j} \\ \left. + \frac{q_{i,j,k+1/2} T_{i,j,k+1/2} - q_{i,j,k-1/2} T_{i,j,k-1/2}}{Dz_k} \right] + H_{i,j,k} = 0 \quad (18)$$

比流量 q 는 x 방향에 대해 식 (19)로 계산된다.

$$q_{i-1/2,j,k} = \frac{K_{i-1/2,j,k}(h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k})}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = \frac{K_{i+1/2,j,k}(h_{i,j,k} - h_{i+1,j,k})}{(Dx_i + Dx_{i+1})/2} \quad (19)$$

y, z 방향에 대한 격자면에서의 비유량도 같은 방법으로 유도된다.

대류성 흐름의 유효온도는 격자면의 온도가 그 면에 인접한 두 격점 중 온도가 높은 격점의 온도와 같다고 가정하는 상향가중법(upgradient weighting)을 적용하여 나타낸다.

대류-확산성 열흐름 방정식의 유한차분식에 구역 체적을 곱하고, 온도에 대해 항들을 정리하면 식 (20)과 같은 선형대수방정식이 된다.

$$A_{i,j,k} T_{i-1,j,k} + B_{i,j,k} T_{i,j-1,k} + C_{i,j,k} T_{i,j,k-1} + D_{i,j,k} T_{i,j,k} \\ + E_{i,j,k} T_{i,j,k+1} + F_{i,j,k} T_{i,j+1,k} + G_{i,j,k} T_{i-1,j,k} + H_{i,j,k} \cdot Dx_i Dy_j Dz_k = 0 \quad (20)$$

여기서,

$$A_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_t \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2} - S_t q_{i-1/2,j,k} \cdot Dy_j Dz_k, & \text{if } q_{i-1/2,j,k} > 0 \\ \frac{K_t \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_i + Dx_{i-1})/2} & \text{if } q_{i-1/2,j,k} < 0 \end{cases}$$

$$B_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_t \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_j + Dy_{j-1})/2} - S_t q_{i,j-1/2,k} \cdot Dx_i Dz_k, & \text{if } q_{i,j-1/2,k} > 0 \\ \frac{K_t \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_j + Dy_{j-1})/2} & \text{if } q_{i,j-1/2,k} < 0 \end{cases}$$

$$C_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_t \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_k + Dz_{k-1})/2} - S_t q_{i,j,k-1/2} \cdot Dx_i Dy_j, & \text{if } q_{i,j,k-1/2} > 0 \\ \frac{K_t \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_k + Dz_{k-1})/2} & \text{if } q_{i,j,k-1/2} < 0 \end{cases}$$

$$D_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_t \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_k + Dz_{k+1})/2} & \text{if } q_{i,j,k+1/2} > 0 \\ \frac{K_t \cdot Dx_i Dy_j}{(Dz_k + Dz_{k+1})/2} - S_t q_{i,j,k+1/2} \cdot Dx_i Dy_j, & \text{if } q_{i,j,k+1/2} < 0 \end{cases}$$

$$F_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_t \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_j + Dy_{j+1})/2} & \text{if } q_{i,j+1/2,k} > 0 \\ \frac{K_t \cdot Dx_i Dz_k}{(Dy_j + Dy_{j+1})/2} - S_t q_{i,j+1/2,k} \cdot Dx_i Dz_k, & \text{if } q_{i,j+1/2,k} < 0 \end{cases}$$

$$G_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{K_i \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_i + Dx_{i+1})/2} & \text{if } q_{i+1/2,j,k} > 0 \\ \frac{K_i \cdot Dy_j Dz_k}{(Dx_i + Dx_{i+1})/2} - S_i q_{i+1/2,j,k} \cdot Dy_j Dz_k & \text{if } q_{i+1/2,j,k} < 0 \end{cases}$$

$$D_{i,j,k} = -(A_{i,j,k} + B_{i,j,k} + C_{i,j,k} + E_{i,j,k} + F_{i,j,k} + G_{i,j,k})$$

2.3 行列式の計算

지하수흐름과 열흐름의 지배방정식의 유한차분방정식을 3차원 등방·이질성의 다공성 매질에 대해 계산하기 위하여, 대상 영역을 매질의 물리적 특성이 일정하다고 가정되는 소영역으로 세분한다. 각각의 소영역의 중심에 위치한 격점에 대해서 지하수흐름과 열흐름의 지배방정식을 유한차분근사식으로 나타내면 N개의 미지수를 가진 N개의 선형방정식계로 대상영역이 수학적으로 표시된다.

지하수흐름 방정식을 행렬식으로 표시하면 식 (21)과 같다.

$$[B] \{h\} = \{-(W+H)\} \quad (21)$$

여기서, B는 수리수두의 계수행렬이고, h는 미지수 수리수두의 벡터(n×1행렬)이며, -(W+H)는 기지항들의 벡터이다. 식 (21)을 잔차방정식으로 쓰면, h가 초기의 수리수두 h_i와 계산된 수리수두의 변화값 Dh로 분리되고, 기지항을 우변으로 이항하면 식 (22)와 같이 된다.

$$[B] \{Dh\} = -([B] \{h_i\} + \{W+H\}) = \{R\} \quad (22)$$

여기서 R은 모든 기지항들이 포함된 벡터이다.

열흐름 방정식도 같은 방법으로 정리하면 식 (23)이 된다.

$$[B] \{DT\} = -([B] \{T_i\} + \{H'+T'\}) = \{R\} \quad (23)$$

여기서, B는 온도의 계수행렬이고 T는 미지온도의 벡터이다. 또, (H'+T')는 열흐름(H')과 일정온도(T')로 이루어지는 기지값들의 벡터이다. DT는 온도변화량이고 T_i는 초기의 온도, R은 기지항들의 벡터이다.

이 두 식은 다음 식 (24)와 같은 형태의 행렬식이므로 그 계산방법은 같은 과정을 거치게 된다.

$$[B] \{U\} = \{R\} \quad (24)$$

여기서 U는 온도나 수두의 변화량을 나타내는 미지벡터이다. 그런데 격점번호를 부여하는 방법에 따라 모형의 변수의 차원을 최소화할 수 있다. 계수행렬 [B]는 지하수흐름문제에서는 대칭행렬이지만 열흐름문제에서는 그렇지 않다. 이 미지벡터를 계산하기 위해 계수행렬 B를 상·하로 분할하고, 다시 좌·우의 부행렬로 분할하면 B를 식 (25)로 나타낼 수 있다.

$$[B] = \frac{[DU] \mid [AU]}{[AL] \mid [DL]} \quad (25)$$

여기서, 부행렬 DU와 DL은 모두 대각행렬이다. 미지벡터 U와 기지벡터 R은 각각 UU와 UL, RU와 RL의 상·하 두 벡터로 분할된다. DU의 몇 배수를 더함으로써 AL의 항들을 소거하면 식 (26)과 같이 된다.

$$[B'] \{U\} = \{R'\} \quad (26)$$

여기서, R'는 RU와 RL'로 이루어지며, B'는 식 (27)과 같다.

$$[B'] = \frac{[DU] \mid [AU]}{[O] \mid [A]} \quad (27)$$

여기서, [O]은 영행렬이고, 행렬 A는 DL에 AU의 몇 배수를 더하여 만들어지고, RL' 벡터는 RL에 앞에서와 동일한 RU의 몇 배수를 더하여 만들어진 것이다.

방정식의 하부 분할행렬은 다음과 같다.

$$[A] \{UL\} = \{RL'\} \quad (28)$$

이 식은 Gauss의 해법을 이용해서 그 해를 구할 수 있다. 그런데 A의 주대각선 아래의 항들을 소거하면, 식 (29)가 된다.

$$[A'] \{UL\} = \{RL''\} \quad (29)$$

여기서, A'는 상삼각행렬이고 RL''는 소거에 의해서 새로 생긴 기지벡터이다. 따라서 UL은 후진대입법에 의해서 계산된다.

나머지 방정식은 [DU]{UU} = {RU} - [AU]×UL로 표시되며, DU가 대각행렬이므로 각 방정식은 하나의 미지수를 가지며, UU는 직접 계산된다.

3. 模型의 檢定과 適用

3.1 模型의 檢定

본 연구에서 확립된 모형의 검정은 다음과 같이 하였다. 첫번째의 검정은 가상 대수층에 대한 검정으로 HST3D모형⁽¹⁶⁾의 결과와 비교 검정하였으며, 실제 대수층에 대한 검정은 열극모형인 GFFP-WP (Groundwater Flow in Fractured Porous Media with Water Table Boundary Condition)모형⁽¹⁷⁾에서 사용한 검정자료를 이용하였다. 검정과정은 참고문헌 2에 상세하게 기술되어 있다.

검정결과는 앞의 두 모형보다 계산정밀도와 입력 자료의 준비과정, 그리고 계산결과의 해석에 있어서 훨씬 효율적임을 확인할 수 있었다.

3.2 模型의 適用

본 연구에서 확립된 모형을 경상북도 영일군 송라면 지경리 일대의 지하수흐름 체계⁽¹⁷⁻¹⁹⁾에 적용하여 결과를 분석하였다(그림 2 참조).

대상지역은 해안에 인접한 해발 233.5m의 독립된 화산체로서, 암체의 서쪽에 태백산맥의 줄기가 남북방향으로 분포되어 있으며, 북쪽으로 부경동의 200.1m 고지, 남쪽으로 천마산(170m)과 봉화산(110.2m)이 있으며, 동쪽으로 1:50의 바닥경사를 가진 해안이 위치하고 있다. 분석지역의 지질은 주로 화산암류(지경동 화산암류)가 넓게 분포하고 있는데 서쪽에는 지질연대상 제3기에 속하는 친북역암이

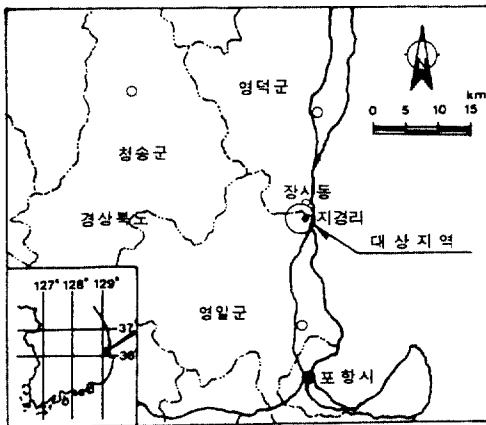


그림 2. 지하수흐름 체계 분석지역

남북방향으로 대상분포를 이루고 있으며 저지대에는 상부에 제4기 충적층이 분포되고 있다. 그림 3에 분석지역의 지질상황이 나타나 있는데, A-B 지질단면을 보면 하부로부터 결정질응회암, 이암, 유문암, 질응회암, 화산력을 협재한 래필리응회암, 응회암질 사암, 친북역암의 순으로 지층이 형성되어 있다.

지질구조의 하부에 위치한 결정질응회암은 대부분 암체 남부와 중남부에서 남북방향으로 분포되어 있다. 이것은 암적색 석기에 석영과 장석 등이 반상조직을 보이며, 암질은 치밀·견고한 편이다. 이 암종은 계속 쌓이는 화산물질의 열과 상부하중으로 인하여 화산회와 유리편이 용결신장된 것이며 이로 인하여 주위의 견고한 결정편들을 용식시킨 것으로 판단된다.

분석지역 중서부에는 이암이 소규모로 분포하는데 흑색 내지 암회색을 띠며 절리는 인지되지 않는다. 또한 유문암질응회암은 하위의 결정질응회암과 상위의 래필리응회암 사이에 불연속적으로 협재되어 있다. 래필리응회암은 암체의 중동부 대부분을 점하는데 구성 화산암류 중 가장 넓게 분포되어 있다. 이것의 매질은 화산회와 유리질편으로 구성되어 있는데 결정질응회암과는 달리 용결조직의 발달이 극히 미약하다.

또한 열극체계는 서쪽의 결정질응회암 지층에서

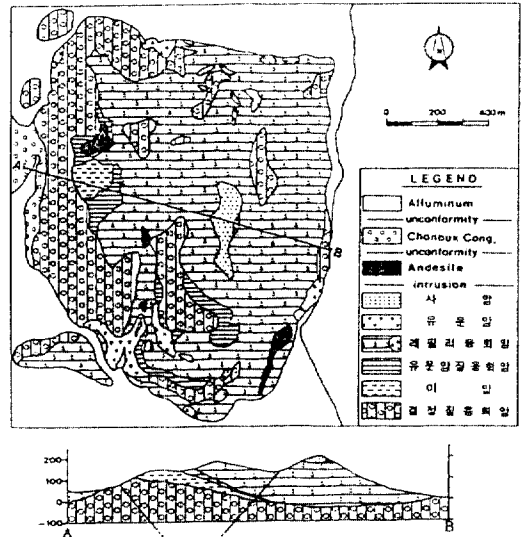


그림 3. 지경리 화산암체의 지질도

동쪽방향으로 비스듬하게 폭이 10 cm 되는 열극이 발달되어 있으며, 래필리옹회암 지층에는 반대로 서쪽방향으로 비스듬하게 폭이 30 cm 되는 열극이 발달되어 있다.

3.3 入力資料의 決定

지하수면의 높이는 보통 지형의 높이에 비례하므로 평지에서는 지표면으로부터 10~20m 깊이에 지하수면이 위치하고 산지처럼 동수경사가 급한 지역에서는 30~40m 깊이에 위치한다고 가정하였다. 또한 기존 문헌의 값들을 참고하여 암종별 수리전도율 및 열극의 수리전도율을 가정하였다. 즉 결정질응회암, 천북역암, 이암, 유문암질응회암, 래필리옹회암, 응회질사암의 수리전도율을 각각 2×10^{-9} m/sec, 3×10^{-6} m/sec, 3×10^{-9} m/sec, 3×10^{-9} m/sec, 2×10^{-7} m/sec, 5×10^{-7} m/sec로 가정하였고, 암반의 평균공극률을 5%로 가정했다. 또한 대상영역 서쪽에 위치한 열극의 수리전도율은 2×10^{-7} m/sec로, 중앙에 위치한 폭 30 cm인 열극의 수리전도율은 10^{-6} m/sec로 가정했고 열극의 평균공극률은 30%로 가정하였다(그림 4 참조).

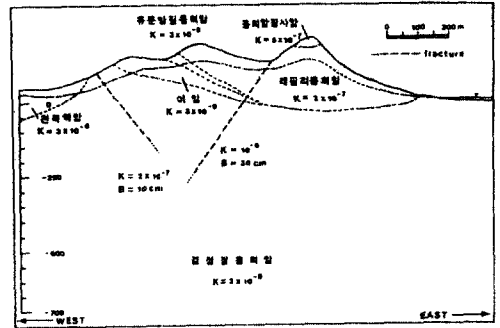


그림 4. 지하수면 및 암종별 수리전도율

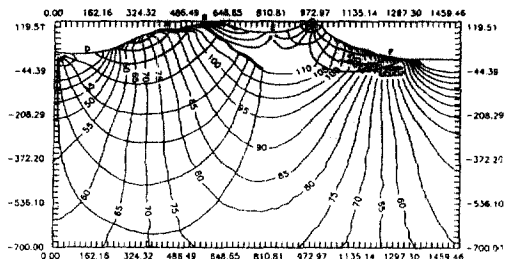


그림 5. 지점리 일대의 수두분포 및 유동로

3.4 結果分析 및 比較考察

3.4.1 地下水 흐름體系 分析

본 모형에서 사용한 지점리 일대의 유한격자망은 70×25개의 격자로 구성하였으며, 각 격자의 크기는 기본적으로 20m×20m이고, 열극부근에서는 그보다 작은 크기의 격자(최소 1m×1m)를 사용하고, 지하 심부의 암반에서는 최대 100m×100m의 격자를 사용하였다. 경계조건으로 지하수면의 수두는 평균해수면에서의 높이를 사용하여 지하수면에 위치한 격자에 수두값을 지정하였다. 지하 심부의 깊이 750 m되는 지점은 불투수층으로 가정하였고, 조사 대상 지역의 동쪽은 수리전도율이 작고 동수경사도 작으므로 흐름이 존재하지 않는다고 가정하였다. 지하수면을 정수위로 가정하여 정류상태하에서 모형을 적용하여 지하수 흐름을 계산한 결과, 대상지역의 수두분포 및 유동로는 그림 5와 같다.

그림 5에 나타난 수두분포 및 유동로를 분석하면, A지점은 결정질응회암 지층을 기반암으로 하고 그 위에 유문암질응회암 지층과 이암 지층이 놓여있는

지층구조로서 대체로 수리전도율이 작은 지역이다. 이 지점으로 유입되는 지하수는 암종의 수리전도율이 매우 작기 때문에 서쪽 산기슭으로 비교적 빠른 시간 동안에 유출된다. B지점은 수리전도율이 큰 래필리옹회암 지층의 서쪽 끝으로, 이 지점으로 유입된 지하수는 수리전도율이 작은 유문암질응회암 지층으로 침투하여 지하 심부로 흘러들어가 오랜 시간이 지난 후에 D지점 서쪽의 천북역암 지층의 유출지역을 통하여 유출된다. B지점 동쪽과 C지점의 양 산봉우리 지점으로 유입된 지하수는 산봉우리 사이의 골짜기로 유출되는데, 이 지역은 수리전도율이 큰 유문암질응회암 지층과 열극이 혼존하는 지역으로 통수성이 매우 커서 이 때의 유동길이와 이동시간은 매우 짧다. F지점은 유문암질응회암 지층 밑에 결정질응회암이 놓여있는 지역의 지표면으로서, 이 지점으로 유입된 물은 수리전도율이 큰 상부의 유문암질응회암 지층을 통하여 서쪽 산기슭으로 유출되어 동해로 흘러간다.

그림 6은 대상지역의 지하 각 지점에서 유출지

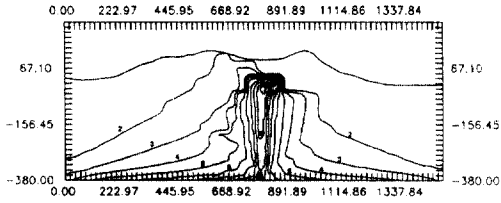


그림 6. 지경리 일대의 지하 각 지점에서의 이동시간 (단위 : 1000년) (좌표축 단위 : m)

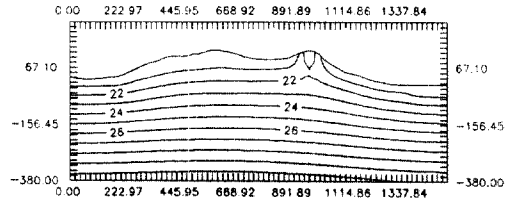


그림 7. 지경리 일대의 지하수 온도분포(단위 : °C) (좌표축 단위 : m)

점까지의 이동시간을 나타낸 것이다.

3.4.2 熱 흐름體系 分析

지경리 일대에는 지하에 대규모의 열흐름이 존재하지 않으므로 열유입은 강우주입으로 발생한다고 가정하고, 강우주입의 대부분이 하절기에 발생하므로 유입되는 지하수의 평균온도를 20°C로 가정하였다. 지경리 일대에서 열흐름에 대한 분석을 실시한 결과는 그림 7과 같다.

그림 7에 나타난 지경리 일대의 지하수 온도분포를 분석하면, 이 일대에 대규모의 열유입이 발생하지 않으므로 온도분포는 지하심도에 따라 대체로 일정하게 증가하는 경향을 나타낸다. 대상지역 중앙의 양 산봉우리 중 오른쪽 산봉우리에서 온도가 보다 높게 나타나는 것은 이 지역이 수리전도율이 큰 래필리용회암 지층으로 많은 지하수 유입이 일어나기 때문으로 판단된다.

3.4.3 比較考察

본 연구에서의 모형(GWHF)을 적용한 지경리 일대의 지하수흐름 체계자료를 모형 GFFP-GT에 입력하여 분석한 결과를 그림 8에 나타내었다.⁽¹⁷⁾

두 모형의 적용결과에서 나타난 수두분포를 비교하면 적용대상지역에서 전체적으로 GFFP-GT 모형의 수두값이 낮게 나타났으나 수두분포형태는 거의 유사한 형태를 나타내었다. 따라서 지하수 유동로는 두 모형에서 비슷한 경로를 거치지만, 지하의 임의 장소에서 지표면의 배출장소까지 이동시간은 본 모형의 경우가 더 큰 값을 나타낼 것으로 판단된다.

두 모형의 비교에 있어서, 본 모형이 FEM 모형인 GFFP-GT 모형보다 계산과정과 입력자료의 형태가 간단하고 짧은 계산시간을 요구하는 장점을 가지고 있으며, 두 모형에서 계산된 수두값의 차이가 전체 대상지역에서 볼 때 비교적 작은 값을 나타내어

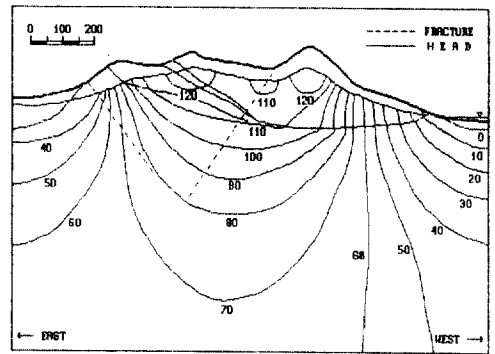


그림 8. GFFP-GT 모형을 적용한 지경리 일대의 수두 분포(단위 : m)

필요한 정밀도를 유지하므로, 본 모형이 열흐름을 동반하는 지하수 흐름을 분석하는데 적절한 것으로 판단된다.

4. 結 論

본 연구에서는 지하수흐름 방정식과 열흐름 방정식을 지배방정식으로 하고 선형 Implicit 유한차분법을 사용하여 대수층에서의 지하수흐름과 열흐름에 관한 모형을 확립하여, HST3D 모형과 다중 열극 모형인 GFFP-GT와 비교하여 검정을 실시하였으며 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 본 연구에서는 열흐름을 동반하는 지하수 흐름 모형을 확립하였다.
2. 본 모형은 FEM을 사용한 GFFP-GT 모형과 FDM을 사용한 HST3D 모형에 비해, 필요한 정밀도를 유지하면서도 계산방식과 자료입력의 용이성, 계산시간의 절약 등의 장점이 있음을 확인할 수 있었으며, 열흐름을 동반한 지하수흐름 체계 분석에

적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1990년도 연세대학교 학술연구비에 의하여 작성된 것으로 연세대학교 당국에 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 조원철, "정상상태에서 열흐름을 동반한 지하수의 흐름해석(기본이론)", 1990년도 학술발표회 개요집, 대한토목학회, pp.220-224, 1990. 10.
2. 왕수균, 「정상상태에서 열흐름을 동반한 지하수의 흐름해석」, 연세대학교 토목공학과 석사학위논문, 1991. 12.
3. 조원철, 「지하다공질매체 속에서의 지하수 이동과 오염물질 이동에 관한 컴퓨터 모형 개발」, 한국과 학재단 연구보고서, 1988.
4. Faust, C.W. and J.W. Mercer, Finite Difference Model of Two Dimensional Single and Two Phase Heat Transport in a Porous Medium, Version I, U.S.G.S. Open File Report, pp.77-234, 1977.
5. Konikow, L.F. and J.D. Bredehoeft, Computer Model of Two Dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater, U.S.G.S. Tech. of WRI, Book 7, Chapt. C2, 1978.
6. Mercer, J.W. and C.R. Faust, Groundwater Modeling, GeoTrans, Inc., 1981.
7. Trescott, P.D., Pinder, G.F., and S.P. Larson, Finite Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions, with Results of Numerical Experiments: U.S.G.S. Tech. of WRI, Book 7, Chapt. C1, 1976.
8. Appel, C.A., "A Note on Computing Finite Diffe-

- rence Interblock Transmissivities", *Water Resources Reserch*, 12(3), pp.561-563, 1976.
9. Cho, Woncheol, *Linear Dynamic System Approach to Groundwater Solute Transport Equation*, Ph.D. Thesis, Drexel Univ., 1983.
10. Sorey, M.L., Numerical Modeling of Liquid Geothermal System, U.S.G.S. Professional Paper, 1044-D, 1978.
11. Larson, S.P., Direct Solution Algorithm for the Two Dimensional Ground-Water Flow Model, U.S.G.S. Open File Report, pp.79-202, 1978.
12. Wang, H.F. and M.P. Anderson, *Introduction to Groundwater modeling finite element and finite difference methods*, W.H. Freeman and Company, pp. 41-64, 1982.
13. Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Cambridge Univ. Press, 1986.
14. Hoffmann, K.A., *Computaional Fluid Dynamics for Engineers*, E.E.S., pp.135-157, 1989.
15. Kreith, F., *Principles of Heat Transfer*; 3rd Ed., IEP, New York, pp.81-90, 1976.
16. Kipp, K.L. Jr., HST3D: A Computer Code for Simulation of Heat and Solute Transport in Three-Dimensional Groundwater Flow System, U.S.G.S.-Water Resources Investigations Report 86-4095, 1986.
17. 김계남, 「수치모형을 이용한 암반에서의 지하수 유동 분석」, 한국원자력연구소, 1990.
18. 김규환 외, 「한국의 지질과 광물자원, 김옥준교수 정년퇴임 기념논문집」, 연세대학교 지질학과, 1982.
19. 윤석규, 「한국지질도 창성도폭」, 국립지질조사소, 1967.
20. Bennett, G.D., Introduction to Ground-Water Hydraulics, U.S.G.S. Tech. of WRI, Book 3, Chapt. B2, 1976.

(접수 : 1991. 10. 2)