

地下水 流動시스템 適用

崔倫榮*, 李舜鐸**

1. 서론

수자원에 있어 지하수를 관리, 활용하고 이를 수행하기 위한 계획을 수립하는데 있어서 이에 내포된 수문학적 불확실성을 제거하기 위해서는 대수층내에 발생하는 지형 및 지질 특성인자들의 정확한 상호 관련성의 규명과 이를 통한 함양-유동과정의 정확한 해석과 예측이 필요하다. 특히, 화산도서유역과 같은 다공질 매체에서의 지하수 유동특성을 분석하기 위하여는 정확한 지형 및 지질 특성을 파악하고 수리학적 특성 등에 관한 자료를 토대로 초기 매개변수 등을 추정하여 지하수 유동시스템 해석을 통한 화산도서유역에서의 적용 가능성을 파악함으로써 지하수 관리 및 이용을 극대화할 수 있다.

따라서, 한반도의 남쪽에 위치한 제주도의 경우는 국내에서 지하수개발이 가장 활발한 대표적인 지역이며, 용수이용량의 대부분이 관정과 용천수 등의 지하수에 의존하고 있는 실정이다. 그리고 향후 급증할 것으로 예상되는 용수수요를 충족시키기 위해서는 대규모의 지하수 개발이 필요하며 지하수에 의한 안정적인 용수확보를 위해서는 지하수에 대한 정확한 조사 분석이 따라야 할 것이다.

본 연구에서는 지하수 유동시스템내의 해석에서 모형 매개변수의 초기치는 지형·지질상에 전적으로 지배된다는 가정하에 유한차분법과 유한요소법을 이용한 수치 모형을 이용하여 실제함양량으로 적용하고 초기 매개변수들을 결정하여 관측 지하수위와 모의발생을 통하여 얻은 계산 지하수위의 계산치를 비교 분석하여 유역에 있어 수치해석 모형의 적용가능성을 검토하였다. 그러므로 본 연구에서는 화산도서유역에서의 지하수 유동특성을 분석하기 위하여 화산도서에서의 지형 및 지질 특성을 파악하여 수치해석에 의한 시뮬레이션을 위하여 매개변수 추정기법 등을 제시하고 수리학적 특성에 관한 자료를 토대로 유한차분법과 유한요소법을 이용한 지하수 유동시스템 해석을 통하여 적용가능성을 파악함으로써 지하수 관리 및 이용을 극대화할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 모형의 기본이론

2.1 유한차분모형

일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해 흐르는 3차원 지하수 유동은 다음의 식 (1)과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 수두(potential head), W 는 단위체적당의 체적 flux, S_s 는 비저류율 및 t 는 시간이다. 한편, S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, etc)이고, W 는 시간과 공간의 함수이며($W = W(x, y, z, t)$), 식 (1)은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름을 나타낸다.

한편, 식 (1)을 완전음해법으로 차분화하면 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & K_{xx} \frac{h_{i,j+1/2,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x_j^2} - K_{xx} \frac{h_{i,j,k} - h_{i,j-1/2,k}}{\Delta x_j^2} \\ & - K_{yy} \frac{h_{i+1/2,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta y_i^2} - K_{yy} \frac{h_{i,j,k} - h_{i-1/2,j,k}}{\Delta y_i^2} \\ & - K_{zz} \frac{h_{i,j,k+1/2} - h_{i,j,k}}{\Delta z_k^2} - K_{zz} \frac{h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1/2}}{\Delta z_k^2} \\ & - W_{i,j,k} = S_s \frac{h_{i,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

* 영남대학교 공업기술연구소 연구원

** 영남대학교 토목공학과 교수

여기서, Δx_j , Δy_i 및 Δz_k 는 각각 $x(j)$, $y(i)$, $z(k)$ 격자점간의 간격이고 h_{ijk} 는 수리수두의 계산치이며 $h_{i,j,k}$ 는 한 단계 전의 수리수두이고 Δt 는 시간간격, i, j, k 는 각 y, x, z 좌표의 지수이다.

2.2 유한요소모형

주수가 있는 비등방, 비균질 대수층에서의 2차원 지하수 흐름에 대한 지배방정식은 다음의 식 (3)과 같다.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + Q + \frac{K'}{B} (h_a - h) \quad (3)$$

여기서, $S = S(x, y, t)$ 는 대수층 저류상수, $h = h(x, y, t)$ 는 평균 피에조미터 수두 (Piezometric head)로 피압대수층에 대해 Φ 로 규정한다 [L]. 그리고 $T_{xx} = T_{xx}(x, y, t)$ 는 x 방향에서의 투수량 계수 [L^2/T], K_{xx} 는 투수계수 [L/T]이고 B 는 대수층 두께[L], z 는 대수층 바닥 표고이다. 한편 지배방정식의 Weak form은 다음 식 (4)와 같은 일반형으로 나타낼 수 있다.

$$L(h) - f = 0 \quad (4)$$

여기서, L 은 선형미분연산자, h 는 피에조미터 수두, 그리고 f 는 기지의 분포 유원, 유입, 그리고 누수의 함수이다. 대상영역 Ω 에서의 모든 점들에 있어서 방정식 (4)에 임의의 가중함수 w 를 곱하면 Ω 의 모든 점들에 대해 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w [L(h) - f] = 0 \quad (5)$$

또한, 모든 점들에서 피적분함수들이 동일하게 0이므로 다음 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega} w [L(h) - f] d\Omega = 0 \quad (6)$$

한편, 식 (6)은 h 가 식 (1)의 정확해일 때 식 (1)을 식 (6)에 대입하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega} w [S \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) - Q - \frac{K'}{B} (h_a - h)] d\Omega = 0 \quad (7)$$

3. 매개변수 추정기법

3.1 Theis의 해

Theis는 양수가 되는 피압대수층에 있어서의 수위변화를 예보하는 식을 다음의 식 (8)과 같이 유도하였다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (u = \frac{r^2 S}{4Tt}) \quad (8)$$

여기서, s 는 수두차, Q 는 양수량, T 는 투수량계수, y 는 적분변수, r 은 반경, S 는 저류계수 및 t 는 시간을 나타낸다. 이 때 $w(u)$ 의 우물함수로써 Theis방정식은 다음의 식 (9)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u) \quad (9)$$

3.2 Cooper-Jacob의 해

Cooper-Jacob해법에서 $w(u)$ 로 간결하게 표현된 Theis 우물함수의 값을 다음 식 (10)로 나타낼 수 있다.

$$w(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + K \quad (10)$$

여기서, K 는 투수계수이고 식 (10)을 다시 쓰면 식(11)과 같다.

$$w(u) \cong -0.5772 - \ln(u) \quad (11)$$

따라서, 수위차에 대한 Cooper-Jacob 방정식은 다음 식(12)와 같으며, 이 때 식 (12)를 재배열하면 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) \right) \quad (12)$$

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right) \quad (13)$$

3.3 Papadopulos-Cooper의 해

Papadopulos와 Cooper(1967)는 피압대수층서의 지름이 큰 양수정에 대한 해를 유도하였으며 Laplace 변환은 다음의 식 (14) 및 (15)를 이용하였다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F\left(u, \alpha, \frac{r}{r_w}\right) \quad (14)$$

$$F = \frac{8\alpha}{\pi} \int_0^\infty \frac{(1 - e^{-\beta^2 \rho^2 / 4u}) [J_0(\beta\rho)A(\beta) - Y_0(\beta\rho)B(\beta)]}{\{[A(\beta)]^2 - [B(\beta)]^2\} \beta^2} d\beta$$

$$A(\beta) = \beta Y_0(\beta) - 2\alpha Y_1(\beta)$$

$$B(\beta) = \beta J_0(\beta) - 2\alpha J_1(\beta) \quad (15)$$

이며, 이때

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad \alpha = \frac{r_w^2 S}{r_c^2}, \quad \rho = \frac{r}{r_w} \quad (17)$$

이며, 여기서 Y_0, Y_1, J_0, J_1 는 Bezzel 함수, r_w 는 우물반경 및 r_c 는 우물케이싱 반경이다.

4. 모형의 적용 및 분석

4.1 적용구역

본 연구에서는 화산도서구역에서의 지하수 유동해석에 대한 MODFLOW 및 AQUIFEMN 모형의 이론과 알고리즘을 실제 대상구역인 서귀포구역(281.3km²)에 적용하였다. 분석 대상구역인 서귀포 지역은 해수면에 접하여 최고 EL.1,950m까지 지형고도를 가지며, 지형고도 EL.0~400m사이의 평탄한 저지대 면적이 서귀포 전체 총면적의 약 58.03% (163.15km²)를 이루고 있다. 한편, 다음의 Fig. 1 및 Fig. 2는 대상구역에서의 지형과 지하수위의 평형성에 따른 대수층의 균질성(Gustafsson, 1968)을 파악하기 위하여 구역내의 관측공에 대한 자료를 토대로 경사 및 고도간의 관계를 분석하였으며, 관측공의 지반고와 지하수위 표고 및 지표면의 구배와 지하수면의 구배를 각각 횡축과 종축을 기준으로 도시하여 측사이에 45° 선을 작도하였다. 이 때 모든 관측점들은 선의 우측에 존재하게 되며 45° 선과의 거리는 관정의 깊이를 나타내게 된다. 본 연구대상구역인 제주도의 경우 아래에 도시한 Fig. 1 및 2에서 보는 바와 같이 각 관측공의 지반고 및 지하수위가 다소 분산되어 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 요인들은 서귀포 구역에 있어서 대수층들이 비교적 불균질하다는 것을 반영하고 있다.

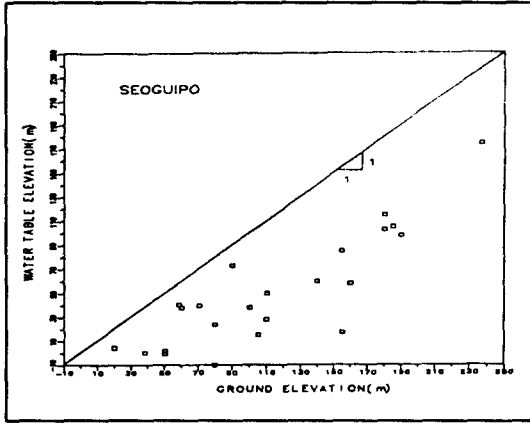


Fig. 1 Relation of Water Table Elevation and Ground Elevation

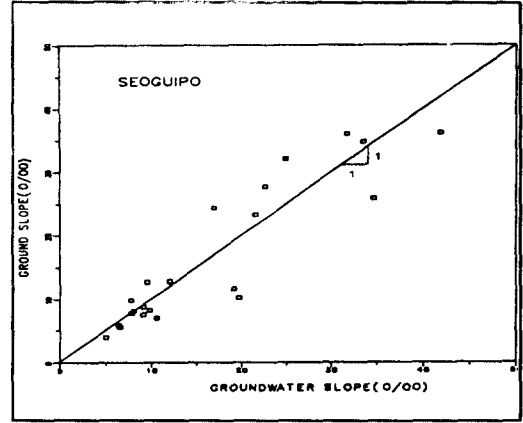


Fig. 2 Relation of Water Table Slope and Ground Slope

4.2 경계조건 및 매개변수 추정

본 연구에서 모의발생을 위한 서귀포지역의 경계설정에는 동측, 서측 및 북측지역은 분수계를, 남측지역은 해안부를 경계지역으로 설정하였고, 이에 따른 경계조건으로써 상부경계는 일정수두경계, 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. 그리고 MODFLOW 및 AQUIFEMN 모형에 적용할 투수량계수(T) 및 저류계수(S)의 초기치 결정을 위하여 서귀포시 중문에 위치한 회수지점(D-38, EL. 79.38m)의 양수측정치를 이용하였으며, 이러한 측정결과를 토대로 Theis방법, Cooper-Jacob방법 및 Papadopulos-Cooper방법에 의한 결과 중에서 본 분석에서는 Table 1의 결과에서 Theis 방법에 의해 산정된 투수량 계수 및 저류계수를 초기치로 하여 최종 매개변수를 산정토록 하였다.

Table 1 Initial Values of T and S

Equation \ Parameter	T(m ² /day)	S	Residual Statistics		
			Mean	Var.	S. E.
Theis	1559.8	0.1864	-0.0003708	6.00E-5	0.007747
Cooper-Jacob	1641.7	0.1620	-1.18E-11	0.0001098	0.010480
Papadopulos-Cooper	1118.5	0.1962	-0.0003341	7.001E-5	0.008367

4.3 모형의 적용

본 연구에서는 MODFLOW 및 AQUIFEMN 모형에 사용된 매개변수의 초기치를 서귀포유

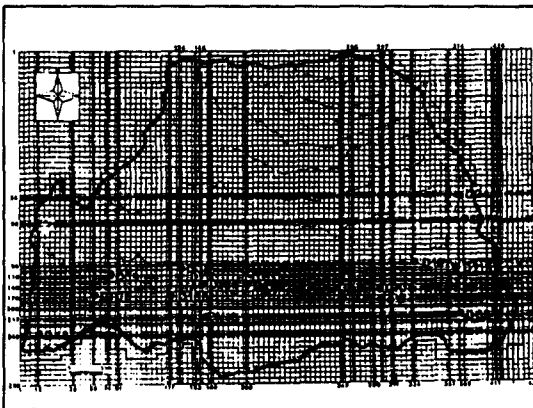


Fig. 3 Finite Difference Grid of Study Area

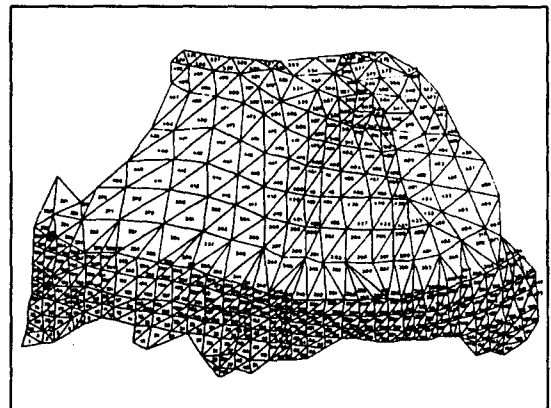


Fig. 4 Finite Element Grid of Study Area

역에서 관정개발 당시에 관측된 지하수 등수위선과 최대한 일치될 수 있도록 초기매개변수를 변화시키면서 각 층에 대한 최종매개변수의 최확치를 결정하였다. 먼저, 본 연구에서 유한차분법에 의한 3차원 지하수 유동해석과 유한요소법에 의한 2차원 지하수 유동해석을 위해 사용된 유역의 격자망 구성 및 정호의 위치는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

본 분석에 이용된 정호의 제원은 제주도지하수개발보고서(농림부, 1990)와 제주도 광역상수도 I 단계 기본 및 실시설계보고서(한국수자원공사, 1995)로 부터의 자료를 조사하여 이용하였으며, 이에 대한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Well Inventory of Cheju Volcanic Island

WELL No.	AREA NAME	GROUND EL. (m)	WELL DEPTH(m)	STATIC LEVEL(m)	PUMPING RATE(m ³ /D)	WATER LEVEL(EL. m)
W-4	Seohong	70.35	95.5	31.00	1,500	39.35
W-18	Wolpyung	58.38	35.5	17.70	1,339	40.68
D-24	Hachal	236.76	92.0	62.40	1,339	174.36
D-38	Hoesoo	180.00	122.0	77.40	1,088	102.60
D-39	Sakdal	140.00	150.0	80.20	1,070	59.80
D-48	Daepyung	20.00	94.0	15.60	1,200	4.40
D-63	Pomok	60.00	70.0	22.30	2,100	37.70
D-108	Seohong	90.00	100.0	17.00	2,030	73.00
D-111	Jungmoon	100.00	222.0	62.00	1,000	38.00
D-118	Yongheung	160.00	220.0	102.00	1,000	58.00
D-164	Hawon	155.00	144.0	70.00	1,500	85.00
D-168	Jungmun	110.00	130.0	60.00	2,000	50.00
D-177	Sinhyo	185.00	195.0	80.00	1,200	105.00
D-187	Donghong	190.00	172.0	92.00	1,300	98.00
D-215	Seohong	180.00	196.0	65.00	1,500	115.00

한편, 본 연구에서 적용된 3차원 지하수유동해석을 위한 유한차분망의 경우 격자망(X,Y)의 구성은 Fig 4.3.1에서 보는 바와 같이 종·횡축에 있어 격자요소는 266×437개이며, 격자간격은 0.5m~250m로서 정호 부근은 세격자(Finer Grid)로, 정호장에서 강제채수에 의한 영향이 적은 원거리 지점은 조격자(Coarser Grid)로 구성하였다. 또한, 2차원 지하수유동해석을 위한 유한요소망의 경우 Fig 4.3.2에서 도시한 바와 같이 격점수는 325개이고, 요소망은 578개로 구성하였으며 이에 이용된 도면 축척은 1 : 78,500이다. 유한차분 및 유한요소모형에 적용된 최종매개변수는 Table 3 및 4와 같다.

Table 3 Evaluated Parameters

Layer	Recharge (m ³ /day)	S	T(m ² /day)	(Kz/ Δz)
1	694, 653	0.0970	1062.0	1.10E-4
2		0.1220	1184.0	1.88E-5
3		0.1480	1281.0	4.01E-5
4		0.1891	1688.0	3.90E-6
5		0.1994	1891.0	1.08E-8
6		0.1858	1792.0	2.08E-7
7		0.2061	1834.0	-

Table 4 Evaluated Parameters

Layer	Recharge (m ³ /day)	S	T(m ² /day)	(Kz/ Δz)
1	694, 653	0.0950	1054.0	1.10E-5
2		0.1190	1184.0	1.00E-5
3		0.1470	1271.0	4.00E-5
4		0.1791	1688.0	3.90E-6
5		0.1824	1771.0	1.08E-8
6		0.1798	1792.0	-

4.4 유동경로 해석

본 분석에서 정류상태하에 있어 Fig. 5에 도시된 바와 같이 유한차분모형(a)과 유한요소모형(b)에 대한 초기수두분포에 대한 계산치를 이용하여 서귀포 지역의 지하수 유동경로 해석을 실시하기 위하여 유속벡터에 대한 분포도를 다음의 Fig. 6에 도시하였다. 그리고 유속벡터를 계산한 결과, 유속벡터가 크게 나타난 지역은 II, III, V 및 VI으로 분석되었으며, 유속이 가장 적게 나타난 지점은 I 지점인 것으로 분석되었다.

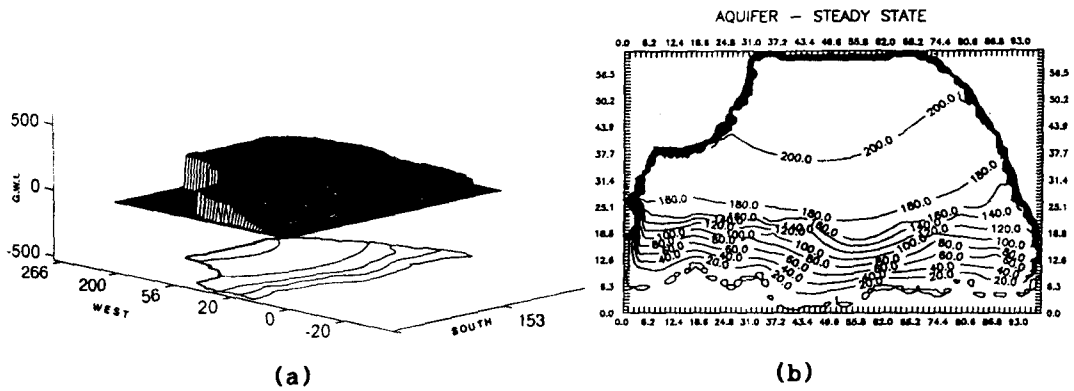


Fig. 5 Distribution of Groundwater Levels in Seoguiipo Area

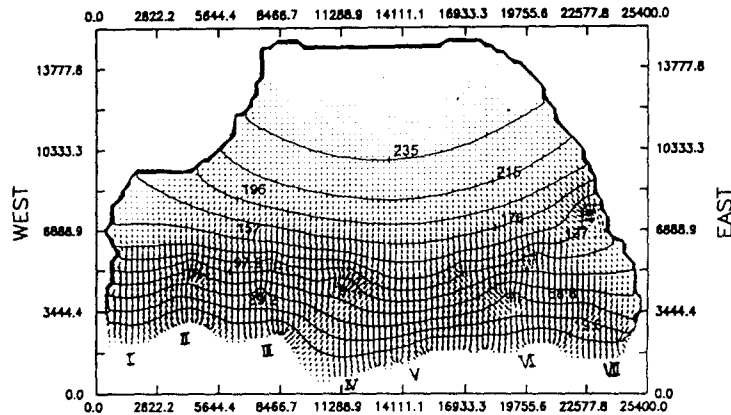


Fig. 6 Velocity Vector by Potential Distribution

5. 결론

지하수 유동시스템 해석을 위하여 실제 도서유역인 제주도 서귀포 유역을 대상으로 수치 해석을 실시한 결과 모의발생을 통하여 계산된 서귀포 유역의 수두분포는 먼저, 한라산을 정점으로 해안부로 EL. 300m이하에서 등분포하는 것으로 나타나 EL. 300m이하에 분포하는 용출수는 안정된 지하수 함양에 의한 용출인 것으로 분석되었다. 다음으로, 수두분포의 결과치를 이용한 지하수 유동경로 해석을 위하여 유속벡터로써 분석을 실시한 결과 유속벡터가 크게 나타난 지역은 II, III, V 및 VI지점이었으며, 유속벡터가 작게 나타난 지점은 I지점인 것을 알 수 있었다. 마지막으로, 본 분석에서 유한요소법 및 유한차분법에 의한 계산결과치는 추적자를 이용한 제주도지역의 지하수유동에 관한 연구(이순탁, 1996)에서 추정된 서귀포 지역에 대한 중산간지대에서의 단거리 지하수유동경로 및 각 방향으로 분산된 유동경로의 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bae Sang Keun : Study on the Three-Dimensional Groundwater Flow System in and Upland Area, 1986.
2. Bear, J., The Transition Zone between Fresh and Salt Waters in Coastal aquifers, Ph D Thesis, Univ. of California, Berkeley, California., 1960.
3. Breadhoeft, J.D. and Papadopulos, I. S. : Rates of vertical groundwater movement estimated from earth's thermal profile. Water Resour. Res., 1, 325-328, 1965.
4. Lee Soontak : Groundwater Movement in the Volcanic Island of Cheju, Korea, 1996.
5. Miyake, Y., Matsubaya, O. and Nishihara, C. : An isotopic study on meteoric precipitation. Pap. Meteorol. Geophys., 19, 243-266, 1968.