

## 용질이동모의프로그램(MT3DMS)에 의한 함수층열이동모의에 대한 연구

송규주, 전광수

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 지적하시였다.

《지질탐사부문에서는 앞선 탐사방법을 받아들일수 있도록 측량설비와 탐사작업설비, 실험분석설비를 최신설비로 갖추며 작업결과에 대한 분석처리와 자료화사업을 전자계산기화하기 위하여 적극 노력하여야 합니다.》(《김정일선집》 제14권 증보판 506페이지)

지하수모의체계(GMS)는 지하수흐름모의와 관련된 지질 및 수문지질학적문제들을 해결하는데 리용되는 소프트웨어로서 여기에는 용질이동모의프로그램(MT3DMS)을 비롯한 많은 프로그램들이 포함되어있다.

우리는 용질이동과 열이동사이의 수학적류사성을 밝히고 MT3DMS를 리용하여 함수층에서의 열이동특성을 모의하기 위한 한가지 방법을 제기하였다.

### 1. 다공성매질(함수층)에서 용질이동방정식과 열이동방정식[1, 2]

다공성매질에서 용질이동방정식은 다음과 같다.

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{n}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[(D_m + \alpha v_a) \text{grad} C] - \text{div}(v_a C) + \frac{q_k C}{n} \quad (1)$$

여기서  $K_d$ 는 분배계수,  $\rho_b$ 는 고체의 체적밀도,  $n$ 은 공극도,  $D_m$ 은 분자확산계수,  $\alpha$ 는 세로방향분산도,  $v_a$ 는 지하수흐름속도,  $q_k$ 는 단위시간동안에 단위체적의 함수층으로 들어오거나 빠져나가는 물량,  $C$ 는 용질의 농도이다.

식 (1)에서 오른쪽 첫번째 항은 류체동력학적분산(분자확산( $D_m$ ))과 기계적분산( $\alpha v_a$ )) 항, 두번째 항은 지하수흐름에 의하여 생기는 용질이류를 나타내는 항, 세번째 항은 원천모임항이다.

다공성매질에서의 열이동은 전도와 이류에 의하여 진행되므로 열이동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{\rho_m c_m}{n \rho_f c_f}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left[ \left( \frac{\lambda_m}{n \rho_f c_f} + \alpha v_\alpha \right) \text{grad} T \right] - \text{div}(v_\alpha T) + \frac{q_h}{n \rho_f c_f} \quad (2)$$

$$\rho_m c_m = n \cdot \rho_f c_f + (1-n) \cdot \rho_s c_s, \quad \lambda_m = n \lambda_f + (1-n) \lambda_s$$

여기서 첨자 f와 s는 각각 류체와 고체상을 의미하며  $\lambda_m$ 은 유효열전도도,  $c$ 는 비열,  $\rho$ 는 밀도,  $q_h$ 는 주입되거나 추출되는 에너지를,  $T$ 는 다공성매질의 온도,  $\rho_m c_m$ 은 다공성매질의 체적비열이다.

식 (2)의 오른쪽 첫번째 항에서  $\lambda_m/(n\rho_f c_f)$ 는 열확산률 혹은 온도전도도를 나타내는 항

표 1. 결수들사이의 관계

| 관계                              | 단위            | MT3DMS package         |
|---------------------------------|---------------|------------------------|
| $K_d = c_s/(\rho_w c_w)$        | $m^3/kg$      | Chemical reaction      |
| $D_m = \lambda_m/(n\rho_w c_w)$ | $m^2/s$       | Dispersion             |
| $\alpha = \alpha$               | m             | Dispersion             |
| $q_k C = q_h/(\rho_w c_w)$      | $^{\circ}C/s$ | Sink and source mixing |

으로서 식 (1)의 분자확산항과 대응되며 나머지 항은 기계적분산항에 대응된다. 그리고 두번째 항은 식 (1)의 용질이류항과, 마지막항은 원천모입항과 대응된다. 그러므로 함수층에서의 열이동모의에 MT3DMS를 리용하자면 식 (1)과 (2)의 결수들을 일치시켜야 한다.(표 1)

## 2. 열이동모의

우리는 러과결수가  $K=50m/d$ 이고 공극도가 0.26인 다공성매질(함수층)의 중심에 단일추공지하열교환기를 배치하고 그것을 중심으로 한 크기가  $300m \times 300m$ 인 등방성모형을 리용하여 열이동특성을 모의하였다. 이때 원천세포의 크기는 3m로 하였으며 모형의 서쪽경계수위 10m, 동쪽경계수위 8m, 서쪽경계에서의 온도  $T=12^{\circ}C$ 를 제1종경계조건으로 설정하였다. 그리고 함수층의 초기온도는  $12^{\circ}C$ 이고 단일추공지하열교환기의 능률은  $5.184 \times 10^6 J/d$ 으로 설정하였다.

열이동모의에서 리용한 파라메터들은 표 2와 같다.

표 2. MT3DMS에서 리용한 파라메터들

| 기 호           | 파라메터           | 값                     | 단위                              | MT3DMS package |
|---------------|----------------|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| $n$           | 공극도            | 0.26                  |                                 | BTN            |
| $\lambda_s$   | 고체의 열전도도       | 3                     | $J/(m \cdot s \cdot ^{\circ}C)$ | —              |
| $\lambda_f$   | 류체의 열전도도       | 0.65                  | $J/(m \cdot s \cdot ^{\circ}C)$ | —              |
| $\rho_f c_f$  | 물의 체적비열        | $4.2 \times 10^6$     | $J/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$       | —              |
| $\rho_s$      | 고체의 밀도         | 2650                  | $kg/m^3$                        | —              |
| $c_s$         | 고체의 비열         | 951                   | $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$        | —              |
| $\rho_b$      | 체적밀도           | 1981                  | $kg/m^3$                        | RCT            |
| $K_d$         | 분배결수           | $2.2 \times 10^{-4}$  | $m^3/kg$                        | RCT            |
| $\alpha_L$    | 가로분산도          | 5                     | m                               | DSP            |
| $\alpha_{th}$ | 수평가로분산도        | 0.5                   | m                               | DSP            |
| $\alpha_{tv}$ | 수직가로분산도        | 0.5                   | m                               | DSP            |
| $D_h$         | 열분산결수          | $2.18 \times 10^{-6}$ | $M^2/s$                         | DSP            |
| $T_u$         | 요란되지 않은 지층의 온도 | 12                    | $^{\circ}C$                     | BTN            |
| $R$           | 지연상수           | 2.7                   |                                 | RCT            |

MT3DMS에 의한 모의결과와 FEFLOW에 의한 모의결과를 비교하여보면 거의 일치하며 오차는 5%정도이다.(그림 1)

우리는 원천세포크기가 열이동모의에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 원천세포의 크기를 3, 5, 10m로 설정하고 열이동을 모의하였다.(그림 2)

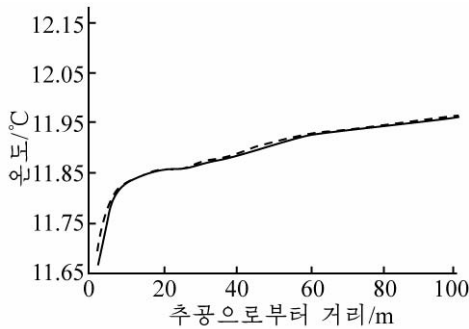


그림 1. MT3DMS와 FEFLOW에 의한  
수압모의결과  
— MT3DMS, ... FEFLOW

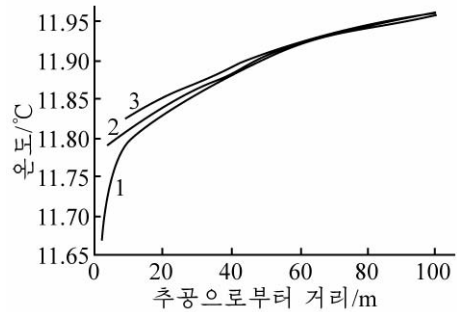


그림 2. 각이한 원천세포크기에  
따르는 수압풀이곡선들  
1-3m×3m, 2-5m×5m,  
3-10m×10m

그림 2에서 보는바와 같이 원천세포크기에 따르는 열이동에 대한 첫번째 관측점의 위치는 각각 2, 3, 7m로서 서로 각이하게 나타난다. 이로부터 원천세포의 크기를 작게 할수록 함수층에서의 열이동분포특성을 더 세밀하게 고찰할수 있다는것을 알수 있다. 그러나 원천세포의 크기를 작게 할수록 계산시간이 오래므로 원천세포의 크기를 연구지역 함수층의 수문지질학적조건들을 고려하여 합리적으로 설정하여야 한다.

### 맺 는 말

MT3DMS와 FEFLOW를 리용하여 다공성매질에서의 열이동모의를 진행하였다. 열이동모의프로그램(FEFLOW)과 용질이동모의프로그램(MT3DMS)을 리용한 결과는 비슷하며 그 오차는 5%이다. 그러므로 용질이동모의프로그램(MT3DMS)을 함수층의 열이동특성을 평가하는데 적용할수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. M. Jozsef et al.; Proceedings World Geothermal Congress, 25~29, 2010.
- [2] H. Fujii et al.; Geothermics, 36, 459, 2007.

주체103(2014)년 4월 5일 원고접수

## Use of MT3DMS for Heat Transport Simulation in Aquifers

Song Kyu Ju, Jon Kwang Su

We clarified advantage of the mathematical similarities between the description of heat and solute transport and simulated heat transport characteristics in aquifer by using mass transport model (MT3DMS) within Groundwater Modeling System (GMS).

The results have been taken by using heat transport model (FEFLOW) and mass transport model (MT3DMS) is similar and error is 5%.

Key words: geothermal systems, heat transport simulation, borehole heat exchanger