

〈論 文〉

열극암반에서의 지하수 유동 특성 분석  
Evaluation of the Groundwater Flow in Fractured Rock Masses

김 계 남\* · 김 재 한\*\* · 안 중 성\*\*\*  
Kim, Gye Nam · Kim, Jae Han · Ahn, Jong Sung

Abstract

For a detailed understanding of groundwater flow in rock mass, the effect of major fractures, topography and coefficient of permeability has been evaluated. The numerical model of GFFP-WT was used for the purpose. The results indicate that in the granite porphyry layer with a small permeability, the direction of flow path changes due to convergence of equipotential lines, while the travel time changes due to the presence of fractures in rock masses.

要 旨

본 연구에서는 암반에 분포된 열극이 미치는 영향을 고려하여 좁으므로써 암반에서의 지하수 유동 특성을 보다 더 정확하게 분석하였다. 이를 위하여 GFFP-WT 모형을 사용하여 암반에서의 지하수 유동 특성을 분석해 본 결과, 암반의 투수계수가 작은 화강반암 지층에서는 등수두선이 수렴하므로 지하수 유동로의 방향이 변화되며, 암반내에 분포한 열극은 유동지역의 수두분포값을 변화시키므로 지하수의 유동시간에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

\* 한국원자력연구소 수문기술실 연구원  
\*\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*\*\* 한국원자력연구소 수문기술실 실장

## 1. 서 론

방사성폐기물 처분장을 지중에 건설하였을 때, 처분장에서 누출된 방사성 오염물질은 지하수에 의하여 지층을 통해 생태계까지 이동하므로 방사성폐기물 처분에 따른 수문학적 안전성 평가가 요구된다. 지하수 유동은 자연방벽 내에서 방사성 핵종 이동에 중요한 추진력이 되기 때문에, 방사성 핵종의 이동을 예측하기 위해서는 암반에서의 지하수 유동 특성에 관한 연구가 필요하다.

지하수 유동 모형은 1960년대 중반부터 단일대수층에서의 지하수 유동을 해석하기 위해 사용되어 왔으며, 근래에는 방사성폐기물을 지중에 처분하였을 때 지하수를 통한 핵종의 이동을 예상하기 위한 지하수의 유동로와 유동시간 및 유출량을 해석하는 중요한 도구가 되었다.

우리나라의 경우 지하수 자원을 확보하거나 지하 유류 저장시설을 건설하기 위하여 지하수 유동에 대한 조사와 연구가 진행되어 왔다. 방사성폐기물과 관련하여서는 열극암반(Fractured rock)에서의 지하수 유동이 중요시 되고 있다. 그러므로 암반에서의 지하수 유동을 해석하기 위해서는 암반에 분포된 열극들의 특성이 반영되어야 한다.

본 연구의 목적은 다공성열극모형중의 하나인 TRAFRAP-WT 모형을 보다 더 광범위한 유동 지역에서 열극을 고려한 지하수 유동을 해석할 수 있는 GFFP-WT 모형으로 수정보완하고, 이 모형을 실제의 유동지역에 적용하여 유동지역의 지형과 암반의 투수계수 그리고 암반내에 분포한 열극들이 지하수유동에 미치는 영향을 분석하여, 이 결과와 분석방법을 앞으로 방사성폐기물 처분장의 수문학적 안전성을 평가할 때 활용할 수 있도록 하는데 있다.

## 2. 지하수 유동 모형의 비교

기존의 지하수 유동 모형들은 지층을 구성하고

있는 암반의 가정 형태에 따라서 크게 4가지 종류로 분류할 수 있다(표 1). 80년대 이전의 모형들은 지하수 자원을 확보하기 위한 단일대수층에서의 유동을 해석할 수 있는 단일대수층 모형(Single Layer Porous Media)에 관심을 가졌지만 방사성폐기물을 지중에 처분하면서부터 대수층이 아닌 불투수성 암반에서의 지하수 유동에 관심이 고조되기 시작하였다. 따라서 80년대 이후부터는 방사성폐기물을 지중에 처분하였을 때 처분장의 수문학적 안전성을 평가하기 위한 지하수 모형들이 활발하게 개발되기 시작했다. 80년대 초반에는 처분장 부지주변의 암반들을 다공성매질(Porous Media)로 가정하고 투수계수가 다른 여러종류의 암종으로 구성된 암반에서의 유동을 해석할 수 있는 다중지층 다공성모형(Multi-layer Porous Media)이 개발되었다. 그러나 실제로 방사성폐기물 처분장이 위치하는 암반에서의 지하수 유동은 매우 느리기 때문에 암반내에 위치한 열극의 분포형태가 지하수 유동에 상당한 영향을 미치리라고 예측할 수는 있지만 기존의 다공성모형으로는 이와 같은 열극에 의한 영향을 고려할 수 없기 때문에 많은 학자들은 열극이 지하수 유동에 미치는 영향을 지하수모형에 어떻게 고려하여 줄 수 있는 지를 연구하기 시작했다.

그리하여 80년대 중반부터는 열극분포형태가 지하수 유동에 미치는 영향을 고려할 수 있는 다공성열극모형(Fractured Porous Media)을 개발하였다. 이 다공성열극모형은 다공성모형의 지배방정식에 열극에 관한 항을 첨가시킨것으로 2차원 모형에서는 열극을 선요소로 표시한다. 그러나 이 다공성열극모형은 자연상태의 불규칙한 열극망은 다룰 수 없으며 컴퓨터 용량의 한계성 때문에 열극의 갯수에도 제한을 받는다. 이것을 보완한 모형이 열극모형(Fractured Media)인데, 이것은 자연상태의 불규칙한 열극망을 다룰 수 있는 반면에 컴퓨터 용량의 한계성 때문에 국부지역의 유량과 방향별 투수계수만을 구할 수 있는 모형으로 아직 개발단계에 있다.

표 1. 기존의 지하수 유동모형

모형의 종류	기존모형
단일대수층모형( Single layer Porous Media)	USGS(1976), PATHS(1980) FEMWATER(1980)
다중지층다공성모형 (Multilayer Porous Media)	VTT(1979), FE3DGW(1979) [ 1 ] GWHRT(1980), SWIFT(1981) TRUST(1982), FEWA(1983) [ 2 ] NETFLO(1983) [ 3 ], FEMWATER(1987) [ 4 ] GWHRT(1988) [ 5 ]
다공성열극모형 (Fractured Porous Media)	TRACER3D(1984) [ 6 ], SWIFT II (1986) [ 7 ] TRAFRAP-WP(1986) [ 8 ]
열극모형 (Fractured Media)	DISCEL(1986) [ 9 ]
비 고	SWIFT II (1986), GWHRT(1988), FEMWATER(1987)는 각각 SWIFT(1981), GWHRT(1980), FEMWATER(1980)을 수정보완한 모형이며, FEWA(1983)은 2차원의 USGS(1976)를 3차원으로 수정보완한 모형이다.

이상과 같이, 기존의 지하수유동모형은 방사성 폐기물 처분장에서의 지하수 유동을 해석하기 위하여 크게 다공성모형과 다공성열극모형으로 분류할 수 있다. 암반에서의 지하수 유동체계를 해석할 때, 다공성 열극모형은 열극을 고려하여 해석할 수 있는 모형이기 때문에 다공성모형보다 좀더 적합하다고 판단된다.

### 3. GFFP-WT 지하수 유동 모형

TRAFRAP-WP(Transport in Fractured Porous Media with Water Table Boundary Conditions)모형[8]은 Hydro Geologic Inc.와 Holcomb 연구소의 International Groundwater Modeling Center가 공동으로 개발한 모형이며, 다공성열극모형중의 하나로 방사성 핵종 이동을 해석할 수 있다. GFFP-WT(Groundwater Flow in Fractured Porous Media with Water Table Boundary Conditions)모형은 지하수 유동을 해석할 수 있도록 TRAFRAP-WP모형을 수정한

것이며, 좀더 넓은 유동지역에 적용할 수 있도록 경계조건의 Dimension을 2배로 늘려주었고, PC Version으로 된 프로그램을 기억용량이 크고 계산시간이 빠른 Cyber Version으로 변환시킨 것이다. 이 모형은 현재 2차원 모형이나 앞으로 3차원모형으로 수정보완하면 열극의 연결성을 보다 더 정확히 해석할 수 있을 것이다.

이 모형은 열극암반에서의 지하수 유동체계를 Dual-Porosity방법 혹은 Discrete-Fracture방법을 사용하여 해석한다. 즉, 규모가 작은 열극들을 포함하고 있는 교란지역(Disturbed Zone)에 대해서는 Dual-Porosity방법을 사용하는것이 적합하며, 반면에 규모가 큰 열극이나 단층(Fault)을 지닌 지역에 대해서는 Discrete-Fracture방법을 사용하는 것이 적합하다(그림 1). Dual-Porosity방법은 암반을 매질과 열극으로 분리하여 해석하는 방법으로 암반에 포함된 열극들을 따로 분리하여 하나의 열극변으로 개념화 시켜 표시한다. Discrete-Fracture방법은 암반에서의 매질과 열극을 하나의 연속체로 해석하는 방법으로 암반

에 포함된 각 열극을 개별적으로 표시한다.

3.1. 지배방정식

3.1.1 Dual-Porosity 방법

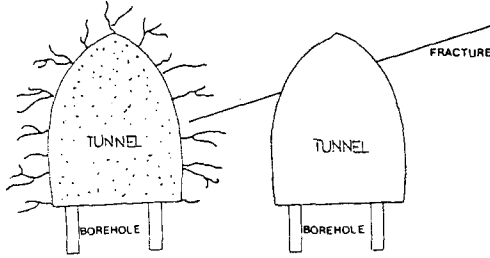


그림 1. 터널주변 암반의 열극분포형태

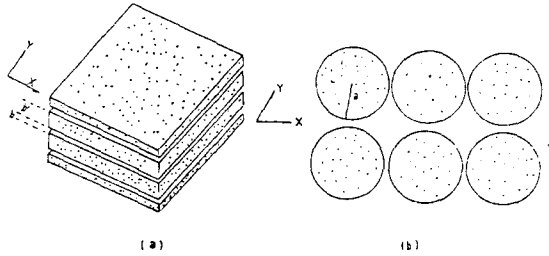


그림 2. 열극암반의 개념적 이상화

규모가 작은 열극을 포함하고 있는 교란지역에서는 Dual-Porosity 방법으로 해석하는 것이 적절하다. 이 방법에서는 암반의 매질을 그림. 2a와 같이 슬래브형이나 그림. 2b와 같이 구성으로 개념화시킨다. 열극을 지닌 피압대수층에서의 유동에 대해 생각할 때, 열극면에서의 유동에 대한 적분식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}] = S \frac{\partial h}{\partial t} - \Phi - q, \quad i=1,2 \quad (1)$$

- h : 열극에서의 수두
- $T_{ij}$  : 열극에서의 투수계수량계수텐서
- S : 열극에서의 저류계수
- $\Phi$  : 다공성매질블록으로부터 열극으로

의 단위면적당 유체유동량

q : 주입정호나 강수에 의한 단위면적당 유입량

식(1)의 해를 구하기 위한 초기조건과 경계조건은 다음식으로 주어진다.

$$h(x_1, x_2, t=0) = h_0 \quad (2)$$

$$h = \bar{h} \quad (B_1 \text{에서}) \quad (3)$$

$$-T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = q \quad (B_2 \text{에서})$$

여기서, B1, B2는 각각 수두나 유량으로 주어지는 경계지점이다.

식(1)에서  $\Phi$ 항은 다공성 매질과 열극사이의 상호작용을 나타낸다. 열극에서의 수두가 감소할 때, 유체는 매질에서 열극으로 흐른다. 유량  $\Phi$ 는 열극에서의 수두와 다공성매질에서의 수두와의 함수이다. 매질의 투수계수가 열극의 투수계수에 비해 작다고 가정한다면, 매질블록에서의 수두분포는 간단한 일차원의 부정류 문제를 풀어서 결정할 수 있다.

3.1.2 Discrete-Fracture 방법

규모가 큰 열극이나 단층에 대해서는 Discrete-Fracture 방법을 사용하며, 이 방법은 암반을 여러개의 개별열극들을 가진 단일연속체로 취급하며 (그림. 3), 연속체에서의 유동은 다음식으로 표시한다.

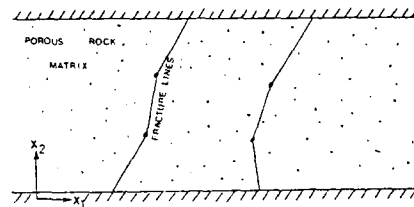


그림 3. 암반을 여러개의 개별열극 선요소로 가진 단일 연속체로 표시

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q \quad (4)$$

$K_{ij}$ : 투수계수텐서

$S_s$ : 연속체의 비저류계수

또한, 개별열극에서의 유동은 다음식으로 표시한다.

$$\frac{\partial^*}{\partial x_i^*} (K_{ij}^* \frac{\partial h}{\partial x_j^*}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q \quad (5)$$

$x^*$ : 열극선을 따르는 국부좌표

$K^*$ : 열극선 방향(Fracture Line)으로의 투수계수

$S_s$ : 열극의 비저류계수

$q$ : 단위부피의 암반에 대한 Source(또는 Sink)의 유량

### 3.2. 수치해석 방법

가중잔차법(Weighted Residual Procedure)을 사용하여 근사식을 유도하기 위해 Trial Solution을 가정한다.

$$h(x_1, x_2, t) = N_j(x_1, x_2) h_j(t) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$N_j$ : 기저함수(Basis Function)

$h(t)$ : 시간중속함수

Huyakorn과 Nilkuha(1979)[10]가 제시한 가중잔차법에 의하면 지하수 유동의 지배방정식(1)에 대한 가중잔차식은 다음과 같다.

$$\int_R W_i \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) dR - \int_R N_i (S \frac{\partial h}{\partial t} - \Phi - q) dR = 0 \quad (7)$$

$R$ : 유동지역

$W_i$ : 비대칭 가중함수

2차 도함수를 소거하기 위해 Green의 정리를

사용하고, 유한차분법을 사용하여 시간에 대해 적분하면 다음과 같은 2차원의 유한요소방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (\theta H_{ij} + \frac{G_{ij}}{\Delta t}) h_j^{k+1} - G'_{ij} \Phi_j^{k+\theta} + \theta \dot{Q} h_i^{k+1} + \\ & \theta G_{ij} h_j^{k+1} = F_i \end{aligned} \quad (8)$$

$i=1, 2, \dots, n$

$$H_{ij} : \int_R (T_{ij} \frac{\partial W_i}{\partial x_j} - \frac{\partial N_j}{\partial x_i}) dR$$

$$G_{ij} : \int_R S N_i N_j dR$$

$$\dot{Q} : \int_R N_i q dR$$

$$\begin{aligned} F_i = & (\theta - 1) H_{ij} h_j^k + \frac{G_{ij}}{\Delta t} h_j^k + (\theta - 1) (\dot{Q} h_i^k + \bar{G}_{ij} h_j^k) \\ & + \dot{Q} + \bar{G}_{ij} h_j^k \end{aligned}$$

$$\bar{G}_{ij} : \int_B \bar{q} W_i N_j dR$$

$\bar{q}$ : 경계면에서의 유동

$\theta$ : 시간가중요소

식(8)에 대한 해를 구하기 위해서는 먼저 행렬  $[H]$ 와  $[G]$  그리고 오른쪽의 벡터  $[F]$ 를 구해야 하므로 요소행렬  $[H]^e$ 와  $[G]^e$  그리고 요소벡터  $[F]^e$ 를 구하고 전체식에 조합시킨다. 각2차원 요소영역에 대한 적분은 Gaussian적분을 사용하여 구한다. 유한요소방정식은 미지수  $\Phi_j^{k+1}$ 뿐만 아니라 미지수  $h_j^{k+1}$ 를 포함하고 있기 때문에  $\Phi_j^{k+1}$ 를 소거해야 하며  $\Phi_j^{k+1}$ 는 1차원 Galerkin법을 사용하여 구한다.

### 3.3. 모형의 검증

하나의 양수시험 문제에 대해 해석적방법으로 구한 해석해와 GFFP-WT모형을 적용하여 구한 수치해를 비교하여 모형을 검증한다.

열극을 지닌 피압대수층에서 열극은 x축을 따라 대수층의 전폭을 관통하며, 피압대수층의 중앙에 위치한다. 이 대수층의 중앙에 위치한 양수

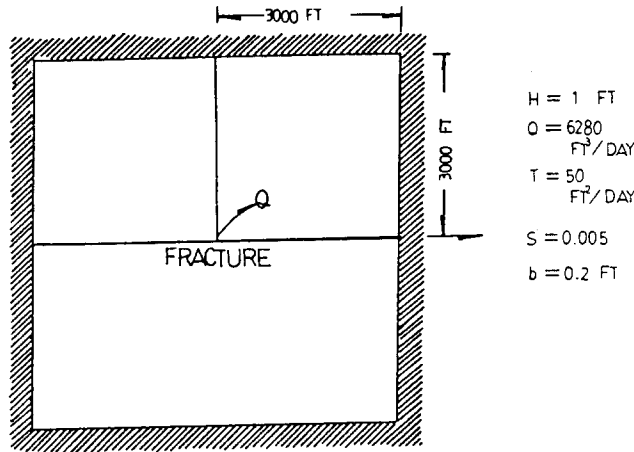


그림 4. 열극을 지닌 피압대수층에서 양수시험시의 수

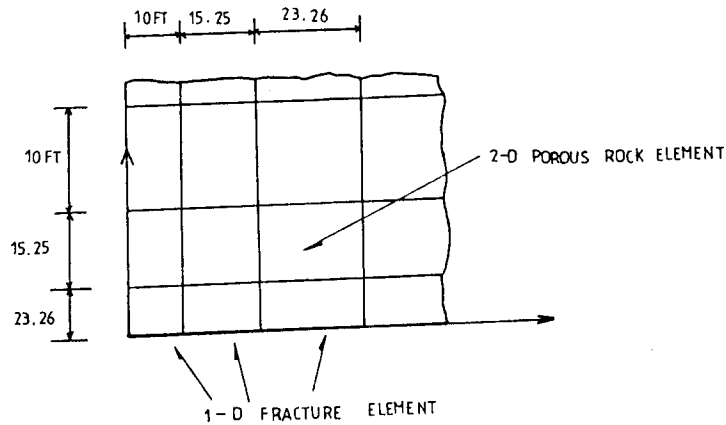


그림 5. 열극을 지닌 피압대수층에 대한 유한요소망

정에서  $6280\text{ft}^3/\text{day}$ 를 일정하게 채수할 때 양수 정에서의 시간별 수두강하를 계산한다. 대수층의 두께는 1ft이고, 다공성매질의 투수량 계수와 저류계수는 각각  $50\text{ft}^2/\text{day}$ 와 0.005이며, 열극의 폭은 0.2ft이다.

이 문제에 대한 해석해는 Gringarten et al. [11]이 제시했기 때문에, 모형을 사용하여 해석해를 구한후 이것을 수치해와 비교함으로써 모형을 검증한다.

유동지역은 x축과 y축에 대칭이므로, 전지역의 4분지 1에 대해서만 유한요소망을 만든다. 요소망은 다공성매질을 나타내는 144개의 직사각형

요소와 169개의 절점과 열극을 나타내는 12개의 선요소로 구성되며, 그림5와 같다.

이 문제는 30개의 시간단계에 대해 풀었고, 정호에서의 수두강하를 계산한 결과는 표2와 같다. 이 수두강하를 무차원화하여 무차원시간  $t_D = Tt/(x^2S)$ 에 대한 무차원 수두강하  $W_D = 4\pi TS_w/Q$ 를 도시하면 그림 6과 같다.

이 그림에는 Gringarten et al.의 해석해 곡선도 함께 도시했다. 이 두곡선을 비교해보면, 해석해와 모형에 의한 해는 상당히 일치하므로 이 모형은 지하수 유동을 해석하는데 유용하다고 판단된다.

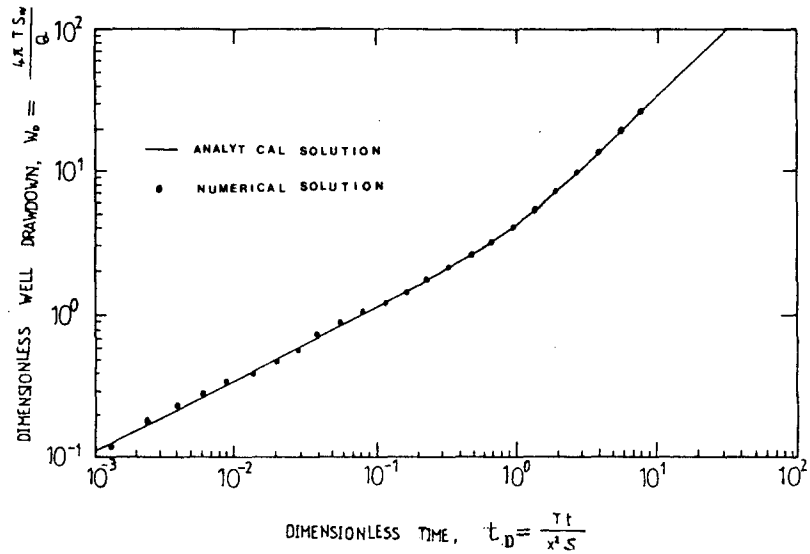


그림 6. 양수시험에 대한 해석해와 수치해의 비교

표 2. 양수정에서의 시간별 수두강하

경과시간 (day)	수두강하 (ft)	경과시간 (day)	수두강하 (ft)
0.50	0.81	1.21	1.29
2.21	1.75	3.62	2.24
5.62	2.79	8.45	3.41
12.44	4.13	18.09	4.97
26.08	5.96	37.38	7.12
53.36	8.48	75.95	10.10
107.90	12.03	153.10	14.33
216.90	17.14	307.20	20.69
434.90	25.37	615.50	31.79
870.80	40.76	1232.00	53.39
1742.00	71.25	2464.00	96.50
3485.00	132.20	4928.00	182.70
6928.00	252.70	8928.00	322.60
10930.00	392.60	12930.00	462.50
14930.00	532.50	16930.00	602.50

#### 4. 암반에서의 지하수 유동 특성 분석

GFFP-WT모형을 사용하여 암반에서의 지하수 유동 특성을 분석하기 위해 강원도 삼척군 가곡면 풍곡리에 위치한 제2연화광산주변으로 Fig.4에서 도시했듯이, 서쪽편에는 해발 900m의

산동성이가 위치하며, 중앙 동쪽편으로는 해발 약700m의 산봉우리 세개가 연결되어 있다. 유동 지역을 구성하고 있는 암종은 퇴적암과 화강편마암 그리고 퇴적암을 관입하고 있는 화강반암이다. 그리고 이 지역은 지표면으로부터 서쪽방향으로 암반심부까지 두개의 긴 열극대가 발달되어 있으며, 또한 이 열극대들 주변에 서너개의 열극대들이 함께 분포하고 열극대의 폭은 1m와 2m이다.

#### 4.1. 지형과 투수계수가 지하수 유동에 미치는 영향 분석

기존의 암종별 투수계수에 관한 자료를 참고하여 [12,13], 유동지역을 구성하고 있는 퇴적암과 화강편마암 그리고 화강반암의 투수계수를 일정하게 각각  $5.0 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ ,

$5.0 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ ,  $10^{-4} \text{m/sec}$ 로 가정하고 암반의 평균공극률을 5%로 가정하여 정상류상태에서 지형과 투수계수가 지하수 유동에 미치는 영향을 분석하였다. 이경우에 대해 GFFP-WT모형을 적용하여 해석한 결과, 유동지역에서의 수두분포와 유동로는 그림 8과 같다.

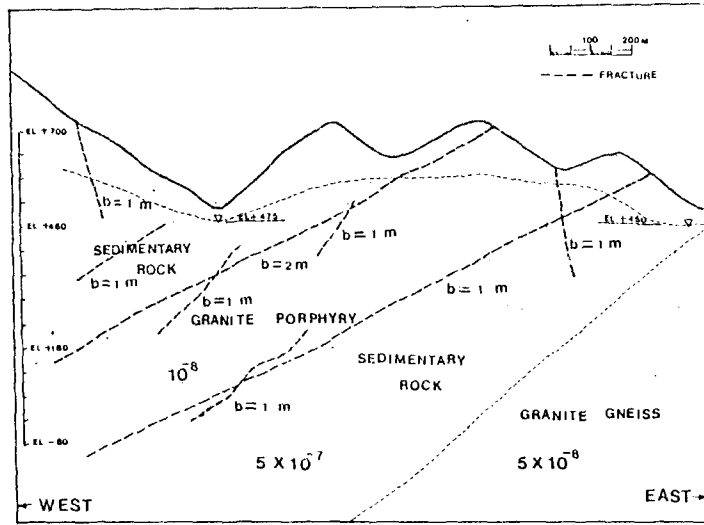


그림 7. 제2연화 광산 주변의 지질구조와 열극대의 분포형태

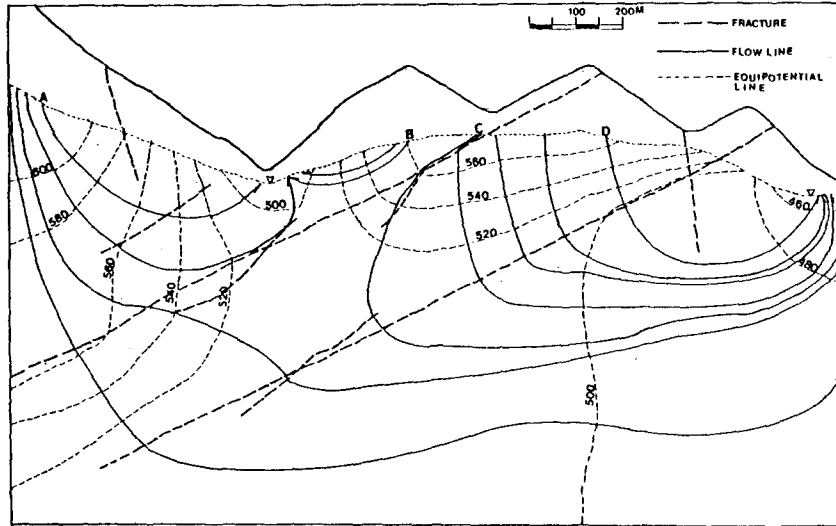


그림 8. 열극을 고려하지 않았을때의 유동길이와 유동로

유동지역의 서쪽편에서의 수두분포형태를 살펴보면, 투수계수가 큰암종 밑에 투수계수가 작은 암종이 위치할 때 등수두선은 분산되며 반대로 투수계수가 작은 암종 밑에 투수계수가 큰 암종이 위치할 때 등수두선은 수렴함을 알 수 있다. 또한 등수두선들은 아랫쪽의 긴 열극대에 평행하게 분포하므로 유동지역 서쪽 산등성이 상부구역으로 유입된 물은 암반심부를 거쳐 수두 +450m

의 동편끝의 골짜기로 유출한다.

유동지역 중앙의 화강반암 윗쪽구역에서는 투수계수가 큰 퇴적암이 화강반암 밑에 위치하므로 화강반암에서의 등수두선은 수렴하고, 화강반암 밑의 퇴적암 구역에서의 등수두선은 암종의 경계면에 평행한 방향으로 분산하므로, 동쪽끝으로부터 윗쪽 긴 열극대 부근까지의 지하수위면으로 유입된 물은 동쪽끝의 골짜기로 유출된다.



유동지역내의 유동로들 중에서 A,B,C,D지점으로 유입된 물의 유동로와 유동시간은 표3과 같다. 이것을 분석하면, A와 B의 유동로는 투수계수가 크고 지하수위의 등수경사가 큰 퇴적암 구역을 통과하므로 유동시간이 짧은 반면에, C와 D의 유동로는 투수계수가 작고 지하수위의 등수경사가 작은 화강반암과 화강편마암 구역을 통과하므로 유동시간이 매우 길다.

4.2. 열극이 지하수 유동에 미치는 영향 분석

기존의 자료를 참고하여 유동지역 내에 분포함

폭 1m와 2m의 열극대에서의 투수계수를 각각  $10^{-6}m/sec$ 와  $3.0 \times 10^{-4}m/sec$ 로 가정하고 열극대의 공극률을 30%로 가정할 때 이 열극을 고려하여 정상류 상태에서의 지하수유동을 모형을 적용하여 해석한다. 지하수 모형으로 해석한 결과, 유동지역에서의 수두분포와 유동로는 Fig.7과 같고 이것을 앞의 경우와 비교해 본다.

유동지역 서쪽편에서는 암반내에 분포한 열극대의 영향을 받아 수두분포값은 작아진다. 산동성이 구역에서 등수두선은 안쪽으로 수렴하고, 화강반암구역에서 등수두선은 열극대에 평행하게 분포하므로, 서쪽 산동성의 상부 아래구역

표 3. 열극을 고려하지 않았을때의 유동길이와 유동시간

유동로	통과한 요소 번호	유동길이	유동시간
A	9-20-19-29-41-40-51-52-64-75	620m	7.3년
B	120-110-109-98-99-88	298m	3.9년
C	131-130-129-128-127-126-136 145-155-165-174-173-182-183 192-200-201-202-203	1250m	528.6년
D	159-158-156-166-165-174-184 185-194-193-201-202-203	668m	119.3년

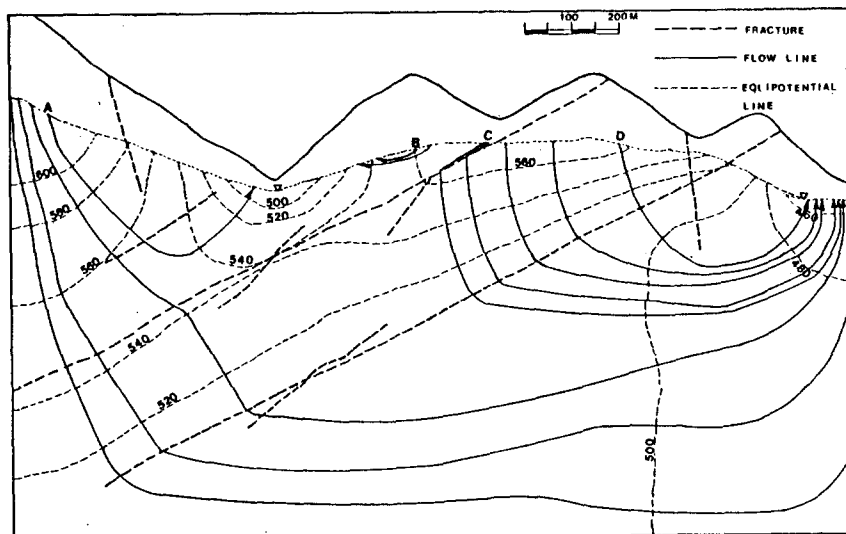


그림 9. 열극을 고려할 때의 수두분포와 유동로

표 4. 열극을 고려할때의 유동길이와 유동시간

유동로	통과한 요소 번호	유동길이	유동시간
A	9-20-19-18-29-40-51-63-64 75-76	685 m	10.2년
B	120-110	98 m	1.9년
C	131-130-129-128-137-136-145 135-165-174-182-192-200 201-202-203	1178 m	427.1년
D	159-158-157-167-166-165-174 184-185-194-195	617 m	85.3년

으로 유입된 물까지도 암반심부를 통해 동쪽끝의 골짜기로 유출된다. 반면에 유동지역 동쪽편에서는 열극대의 영향을 받아 전반적으로 수두분포값이 커지고 중앙에 위치한 화강반암 구역에서는 동수두선 경사가 급해지고 서쪽끝의 골짜기 주변에서의 동수두선은 좀더 안쪽으로 수렴되므로 C와 D로 유입된 물의 유동로와 유동시간은 짧아진다.

유동지역의 A,B,C,D지점으로 유입된 물의 유동로와 유동시간은 표 5와 같다. 이것을 앞의 경우와 비교하면 유동로의 A의 유동시간은 약 3년 길어지는 반면에 유동로 C와 유동로 D의 유동시간은 각각 100년과 35년 빨라진다. 그러므로 열극은 지하수의 유동로와 유동시간에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

암반에서의 지하수 유동형태를 암반에 포함된 열극을 고려하여 좀더 정확히 해석할 수 있는 다공성열극모형중의 하나인 GFFP-WP모형을 작성하고, 이 모형을 사용하여 암반에서의 지하수 유동 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 지하수 유동은 지형의 영향을 받기 때문에,

유동지역 서쪽편과 같이 지하수위의 동수경사가 큰 지역에서는 유동로가 짧지만 동쪽편과 같이 지하수위의 동수경사가 작은 지역에서는 유동로가 길다.

2) 지하수 유동은 암종에 따라 투수계수가 변할 때 상당한 영향을 받는다. 즉, 투수계수가 큰 암종 밑에 투수계수가 작은 암종이 위치할 때 동수두선은 분산되며, 반대의 경우는 수렴하므로 유동로의 방향과 거리에 영향을 미친다.

3) 지하수 유동은 열극에 의해 영향을 받아 유동지역에서의 수두분포가 변한다. 유동지역 서쪽편에서의 수두분포값은 전반적으로 작아지기 때문에 유동시간은 길어진다. 반면에 유동지역 동쪽편에서의 수두분포값은 전반적으로 커지기 때문에 유동시간은 짧아진다.

## 참 고 문 헌

- Gupta,S.K., Cole,C.R., and Bond,F.W.,(1979) *Finite-element three-dimensional groundwater(FE3DGW)flow model-formulation, program listing and user's manual*, Pacific Northwest Lab. Washington.
- Wong,K-F V. and Yeh,G.T.,(1986) *Application of the finite element groundwater model FEWA to three re-*

- gional aquifers*, Oak Ridge National Lab. ORNL/TM-9678.
3. INTERA Environmental Consultants Inc.(1983) *NETFLO: A network groundwater flow code*, ONWI-425, Battelle Memorial Institute.
  4. Yeh,G.T.(1987) *FEMWATER: A finite element model of water flow through saturated-unsaturated porous media-first revision*, Oak Ridge National Lab. ORNL-5567/RI.
  5. Thunvik,R. and Braester,C.(1988) *GWHRT: A flow model for coupled groundwater and heat flow, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*, SKBTR-88-10.
  6. Travis,B.J.(1984) *TRACR3D: A model of flow and transport in porousfractured media*, Los Alamos National Lab., Los Alamos, New Mexico, LA-9667-MS.
  7. Reeves,M., Ward,D.S., Johns,N.D., and Cranwell,R.M.(1986) *Theory and implementation for SWIFT* , Sandia National Lab. Albuquerque, New Mexico, NUREG/CR-3328.
  8. Huyakorn,P.S.(1987) *A two-dimensional finite element code for simulating fluid flow and transport of radionuclides in fractured porous media with water table boundary conditions*, Hydrogeologic, Inc.
  9. Gilmour,H.M.P., Billaux,D., and Long,J.C.S.(1986) *Models for calculating fluid flow in randomly generated threedimensional networks of disc-shaped fractures*, Lawrence Berkeley Lab. University of California, LBL-19515.
  10. Huyakorn,P.S., and Nilkuha,K.(1979) *Solution of transient transport equation using an upstream finite element scheme*, Applied Mathematical Modeling, Vol.3, pp.7-17.
  11. Gringarten,A.C., Ramey,H.I., and Raghaven,R.(1974) *Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture*, Society of Petroleum Engineering Journal, Vol.14, pp 347-360.
  12. Brace,W.F.(1980) *Permeability of crystalline and argillaceous rocks*, Int.J.Rock Mech.Min.Sci. Geomech. Abstr. Vol.17. pp.241-251.