

3차원 단열망모델링을 위한 단열수리인자 도출

Determination of the Fracture Hydraulic Parameters for Three Dimensional Discrete Fracture Network Modeling

김경수(Kyung-Soo Kim)* · 김천수(Chun-Soo Kim)* · 배대석(Dae-Seok Bac)*

김원영(Won-Young Kim)** · 최영섭(Young-Sup Choi)** · 김종렬(Jung-Ryul Kim)**

요 약 : 지하수의 유동로가 시설의 성능에 미치는 영향이 큰 방사성폐기물처분시설에서는 암반블럭규모의 흐름은 단열망개념으로 해석하고 있다. 본 연구는 연구지역의 지하수유동 해석을 위하여 3차원 투수성단열망모델을 구축하기 위한 것으로서, 단열의 기하학적 인자 및 수리인자에 대한 확률분포함수를 도출하고, 3차원 단열망모델링과 수리시험 결과를 이용한 모델 교정까지의 과정을 포함한다. 구간별 정압주입 시험의 결과를 Cubic law로서 해석한 결과 단열투수량계수는 lognormal분포일 때 $6.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다. 부정류해석에 의한 유동차원은 주로 방사상 내지 구상유동 특성을 보인다. FracMan 코드를 이용해서 추정된 투수성단열밀도는 1.73이고, 이때 암반블럭규모(100 m×100 m×100 m)로 모사된 투수성단열의 수는 3,080개이다.

Abstract : Since groundwater flow paths have one of the major roles to transport the radioactive nuclides from the radioactive waste repository to the biosphere, the discrete fracture network model is used for the rock block scale flow instead of the porous continuum model. This study aims to construct a three dimensional discrete fracture network to interpret the groundwater flow system in the study site. The modeling work includes the determination of the probabilistic distribution function from the fracture geometric and hydraulic parameters, three dimensional fracture modeling and model calibration. The results of the constant pressure tests performed in a fixed interval length at boreholes indicate that the flow dimension around boreholes shows mainly radial to spherical flow pattern. The fracture transmissivity value calculated by Cubic law is $6.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ with lognormal distribution. The conductive fracture intensity estimated by FracMan code is 1.73. Based on this intensity, the total number of conductive fractures are obtained as 3,080 in the rock block of 100 m×100 m×100 m.

서 언

근래에 이르기까지 지하수유동해석 분야에서는 균질등방성 다공성매질을 전제로 한 유동개념에 의존해 오고 있다. 이 개념은 지하수자원 개발 뿐만 아니라 지하수문환경 감시관리를 위한 유동해석등 폭 넓게 적용되고 있으나, 실제 지하매질이 갖는 불균질성과 이방성을 고려할 때 이 개념은 조심스러운 접근이 요구된다.

지하수의 거동이 시설의 성능에 미치는 영향이 큰 방사성폐기물처분시설에서는 광역적인 흐름은 다공성매질개념으로, 암반블럭규모(rock block scale)의 흐름은 단열망(DFN: discrete fracture network)개념으로 해석하고 있다(Long *et al.*, 1982; Dershowitz, 1984, 1991; Grindrod *et al.*, 1992). 이러한 접근 방법은 시설주변에서의 지하수의 흐름은 지하지질구조의 수리적 특성에 의해 지배된다는 사실에서 비롯되는 것이다. 1980년대 중반부터 시작된 이 개념의 적용은 투수성단열의 기하학적

인 분포특성을 확률적으로 모사하여 경계조건내에서의 흐름을 해석하는 것이다. 근래 국내에서도 다공성연속체개념을 적용하는 지하수유동평가의 한계점이 점차 인식되어 지고 있는 실정 이므로 사업의 성격에 맞추어 적절한 해석코드를 활용하여야 할 필요성이 요구되고 있다.

본 연구는 연구지역 암반에 분포하는 질리규모의 단열체계에 대하여 DFN개념의 지하수유동 해석을 위한 3차원 투수성단열망모델을 구축하기 위한 내용을 다룬다. 연구범위는 단열분포 특성의 정량화, 단열의 수리특성 규명, DFN모델에서 요구되는 단열수리인자의 도출, 3차원 단열망모델링, 그리고 수리시험 결과를 이용한 모델 교정(calibration)까지의 과정을 포함한다 (Figure 1).

단열분포특성

Fracture Mapping

연구지역은 충남 청양군 운곡면 소재 삼광광업소 주변으로서, 분포암종은 선캠브리아기 편마암류(운모편암, 호상편마암, 흑운모편마암, 화강암질편마암)이다(Figure 2).

단열체계의 분류기준은 사업의 목적에 따라 다소 차이가 있

*한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-dong Yusong-gu Taejon 305-353, Korea)

**한국지질연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Materials, 30 Kajong-dong Yusong-gu Taejon 305-350, Korea)

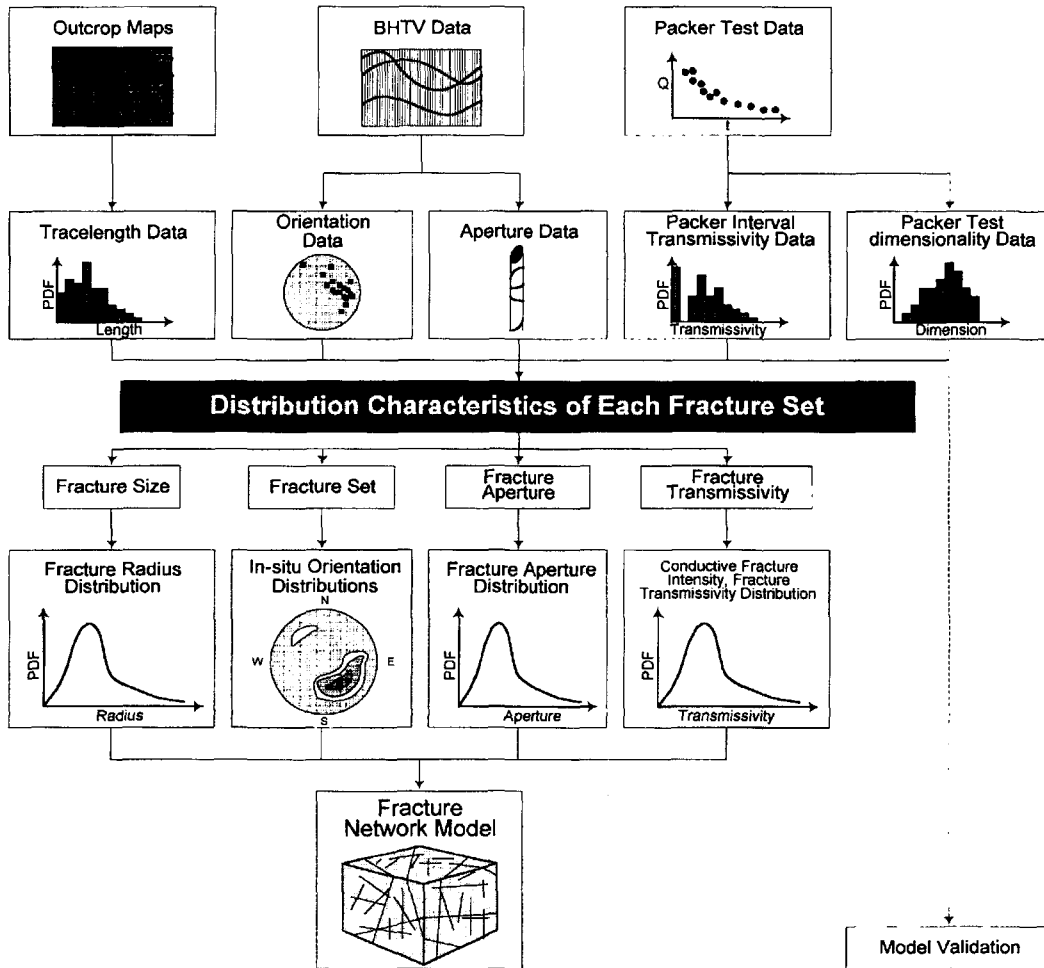


Figure 1. Procedures of the discrete fracture network modeling.

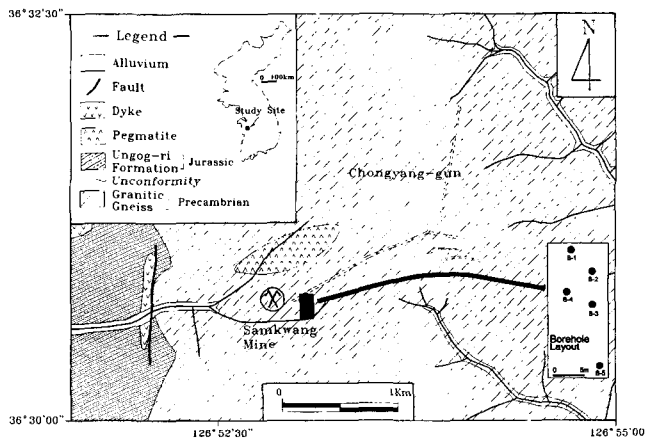


Figure 2. Geologic map of the study site and borehole layout.

는데, 예를 들면 방사성폐기물의 지하처분연구와 관련하여 Pusch(1994)는 단열체계를 7등급으로 분류하였으며, 스웨덴의 경우 4 tier 체계로 분류하였다(Black *et al.*, 1994; Table 1; Figure 3). 본 연구에서는 Order 4에 해당되는 단열체계에 대하여 그 분포특성을 해석하고, 이를 기초로 단열망모델 구축을 위한

Table 1. Generalized qualitative classification criteria for the fracture system

Classification	Distribution Characteristics
Order 1	시설이 입지하는 rock block의 경계역할을 하는 주요 광역구조선 (major regional structures)
Order 2	지하공동 unit간을 통과할 수 있는 주요 단열대 (major)
Order 3	지하공동을 통과하는 주요 단열체계 (major fractures) 및 국지단열대 (local fracture zones)
Order 4	통상 암반에 분포되어 있는 절리 등의 단열체계 (fracture system)

입력자료를 도출하였다.

단열망개념 지하수유동모델링의 해석영역은 다음과 같이 설정될 수 있다. 광역규모의 흐름에 대하여 단열망개념으로 해석코자 할 경우에는 Order 1부터 Order 2까지의 단열체계만을 고려하고, 부지규모의 해석을 위해서는 Order 2와 Order 3, 그리고 암반블럭규모의 해석을 위해서는 Order 3와 Order 4의 단열체계를 반영하는 것이 이상적이다. 본 연구에서는 암반블럭규모의 단열망모델을 구축하기 위하여 부지규모에 해당하는 영역, 즉, 광산주변 2 km에 해당하는 일대에서 단열분포특성

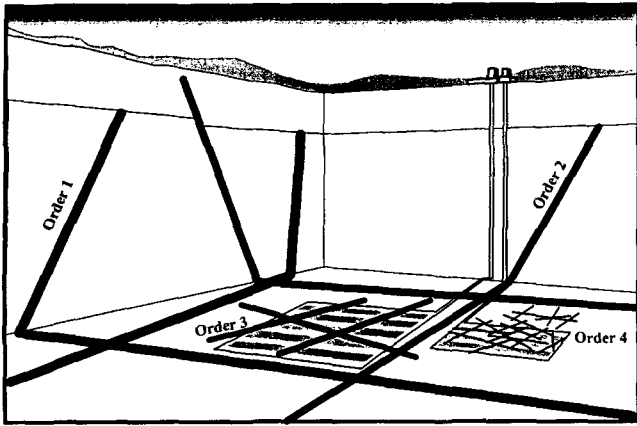


Figure 3. Classification of the fracture system in a fractured rock mass around underground cavern.

해석을 위한 자료를 취하였다.

조사영역내의 지표, 항내 및 시추코아에 대한 단열조사는 측선법(Priest & Hudson, 1981)을 적용하여 방향성(orientation), 간격(spacing), 틈(aperture), 추적길이(trace length), 종식형태(termination), 충전물(infillings) 등의 인자를 도출하였다. 이들 인자 중에서 방향성, 간격 및 단열틈 등에 관한 인자는 시추조사 및 초음파주사검층 결과로부터 단열조를 구분하고, 그 대표값을 도출하였다. 이외의 인자는 기존 연구자료(한국원자력연구소, 1989; 1994; 배대석, 1996)를 이용하여 대표값을 도출하였다. 시추조사는 삼광광산 입구 주변 총 5개소(B-1, -2, -3, -4, -5)에서 수행되었다(Figure 2 참조).

단열인자의 분포특성

지표조사와 5개 공의 초음파주사검층자료, 그리고 항내에서 기재된 총 837개의 단열을 분석한 결과, 지표의 단열분포특성은 소구역별로 방향성의 차이는 있으나 전체를 하나로 묶어서 크게 3개의 단열조로 구분 가능하였다. 주 단열조의 우세방향(preferred orientation)은 164/60이고, Set 2 및 3의 경우는 지표와 지하에서 약간의 차이는 있으나 전체적으로 볼 때 각각 044/66 및 283/08으로 정의할 수 있다(Table 2; Figure 4).

단열조별 실간격치(true spacing)는 외견단열간격치(apparent spacing)에 대하여 각 단열조 수선방향과 측선방향의 사이각을 이용하여 보정하였다(Priest & Hudson, 1976; 1981). 실간격치는 대수정규분포(lognormal distribution)를 나타내며, 평균간격

Table 2. Results of the fracture orientation analysis from surface, drift and borehole data(837 points).

Set	Range	No. of sample(%)	Preferred Orientation
1	130-200/40-90 (310-020/50-90)	421 (50.30)	164/60
2	030-130/50-90 (210-300/50-90)	220 (26.28)	044/66
3	200-330/00-30	196 (23.42)	238/08

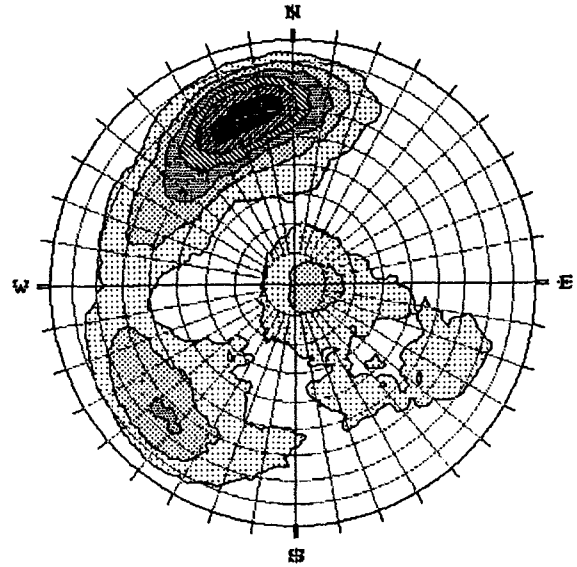


Figure 4. Stereographic plots of the poles of fractures measured from the boreholes(Low hemisphere).

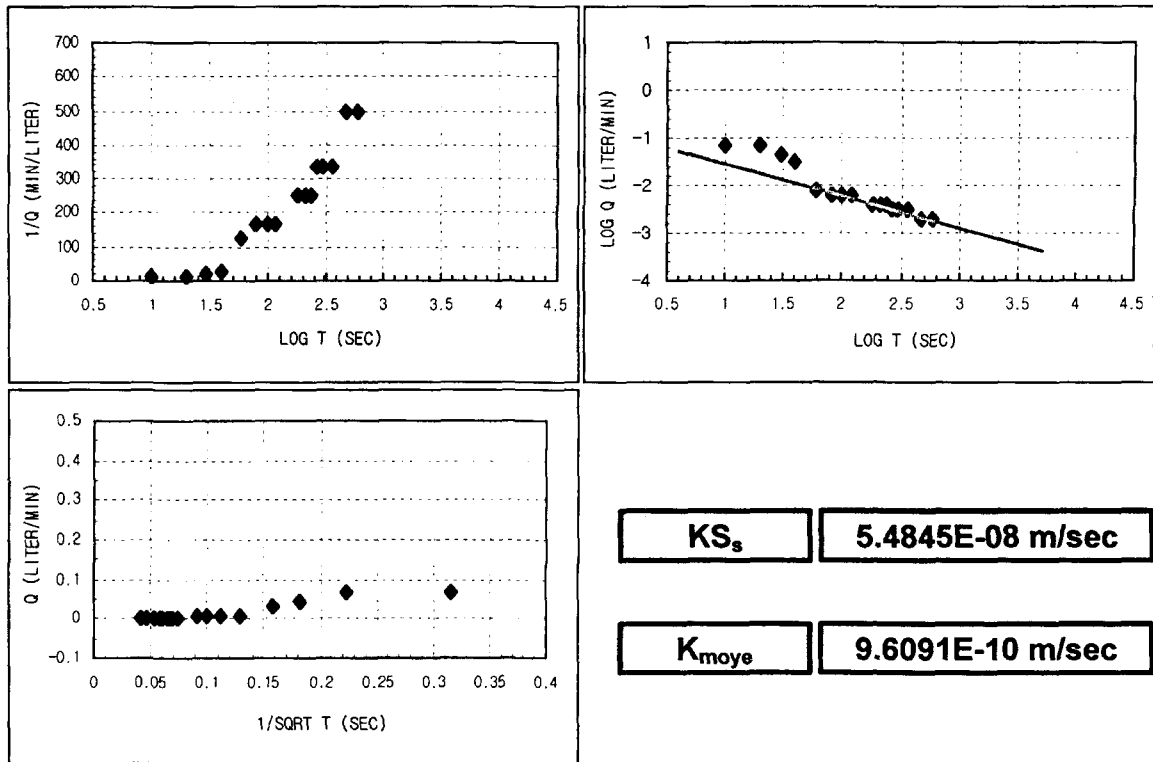
은 set 3이 가장 크고(1.03 m), set 1이 가장 작으며(0.48 m), set 2는 0.83 m로 계산된다. 단열빈도는 set 1이 2.08/m, set 2는 1.20/m, set 3는 0.97/m로서 단위미터당 평균 4.25개의 빈도를 나타낸다.

단열틈의 크기에 대한 자료는 비교적 교란이 적은 시추공내에서 초음파주사검층기기를 이용하여 효과적으로 취할 수 있다. 초음파주사검층기기는 초음파를 시추공벽에 주사하여 반사되는 초음파의 진폭 및 주시치를 영상화하는 기법을 이용한다(김중렬외, 1995). 시추공내 초음파주사검층 결과, 단열조별 평균단열틈의 크기는 set 1, 2, 3가 각각 5.22, 4.49, 4.79 mm로 분석되었다. 초음파주사검층에 의해 계측된 단열틈은 단열충전물의 특성에 관계없이 불연속면 자체의 규모를 의미하는 것으로서 모두 수리특성을 반영하는 것은 아니다. 따라서 수리적 단열틈의 실제 크기는 이보다 상당히 작을 것으로 판단된다.

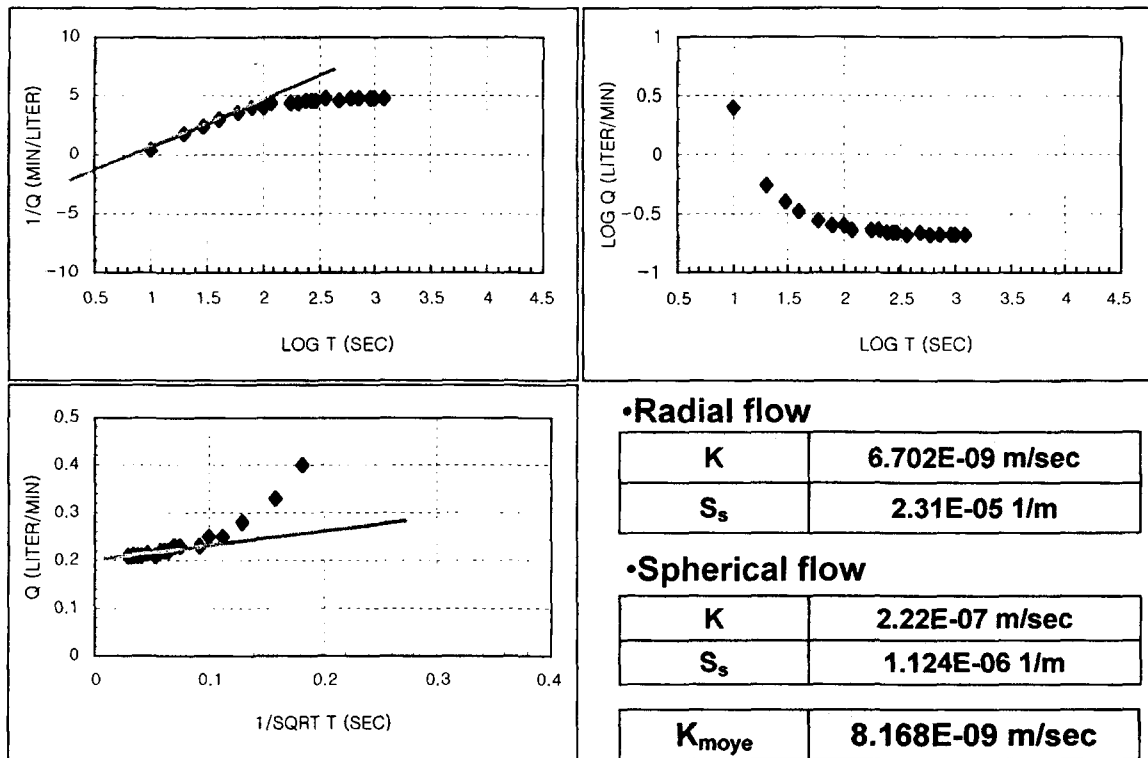
지표조사와 항내 mapping에서 취한 단열길이(trace length) 자료에 대하여 각 단열조별로 censoring 및 truncation 오차를 보정(Rouleau & Gale, 1985)하였다. 각 조별 대표치는 set 3(3.19 m)>set 1(2.97 m)>set 2(2.16 m)의 순이다.

단열이 종식되는 형상(termination type; Kikuchi, 1987)을 분석하였다. 다른 단열에 의해 잘려지는 형상(T형)의 비율이 클수록 sub- 혹은 non-systematic하다고 볼 수 있으며, 반대로 다른 단열을 자르는 형상(H형)이 많을수록 systematic set로 분류할 수 있다. 단열의 생성순서를 암시하는 지시자로서는 H형 및 다른 단열과 교차하는 형상(X형)은 단열전파이론(Griffith, 1921; Kulander & Dean, 1985)에 의하면 선행생성단열일 가능성이 높으며, T형의 종식형태는 후기 생성 단열을 암시한다. 연구지역내 구역별로 약간의 차이는 있으나, 전체적으로 볼 때 유형별로 특징적인 분포특성을 구별하기는 어려우며, set 1이 비교적 systematic하다고 추정된다.

시추코아의 단열충전물은 대부분이 방해석이며, 심도 20 m



(a) Linear flow



(b) Radial to spherical flow

Figure 5. Analyses of the flow dimension and hydraulic conductivity.

구간까지는 갈철석 혹은 적철석 등의 철성분으로 피복되어 있다. 하부로 내려 갈수록 열수변질물들에 의한 충전 혹은 피복현상이 두드러지며, 단열표면은 평탄하며 신선하다.

수리지질특성

구간별 유동차원 및 투수량계수

수리시험은 시추 후 B-1과 B-2공은 매 3.4 m 구간으로, B-3는 3.6 m 구간으로 정압(3 kg/cm²) 주입하여 주입율이 정상 상태에 도달할 때까지 수행하였다. 패키의 팽창길이는 80 cm 이고, 0.1 psi 단위의 압력계(최대 60 psi)와 0.001~30 l/min 계측범위를 갖는 유량계를 사용하였다.

구간별 정압주입 시험결과로부터 유동차원(flow dimension; Doe & Geier, 1990)을 해석하였다. 시험결과 대표적인 유동차원을 보이는 구간을 예로서 Figure 5에 제시하였다. Figure 5a는 전형적인 선형유동의 흐름형태를 보여주며, Figure 5b는 초기 방사상유동에서 구상유동으로 전이되는 형태를 보여준다. 이러한 경우의 수리전도도는 초기의 유동차원으로 해석하는 것이 방사상유동을 근거로 한 정상류 해석치와 유사함을 알 수 있으며, 후기의 유동차원은 실제적인 정상류상태를 대표하는 것으로 사료된다. 유동차원 분석에 의하면 대부분의 구간은 방사상~구상유동을 나타냈으며, 일부 구간은 주입후기에 유동차원이 bilinear 유동으로 감소되거나 또는 hyperspherical 유동으로 유동차원이 증가되었다.

수리전도도 계산을 위하여 정상류 해석은 Moye 공식(Moye, 1967)을, 부정류 해석에는 1~2유동차원 분석에서 사용되는 공식을 적용하였다. 각 구간별 투수량계수는 대수층의 두께(b)를 다공성매질의 경우 시험구간으로, 단열체계의 경우에는 단열층

의 합을 적용하여 계산하였다. Figure 6은 B-3번 공에 대하여 시험구간별로 단열층의 체적과 투수량계수, 그리고 단열빈도를 정리한 것이다. 지표부근 약 25 m까지는 투수량계수와 단열빈도에 관한 한은 뚜렷한 비례관계를 보이지 않지만 하부구간으로 갈수록 이들 인자들간에 대체적으로 비례적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 상부구간은 단열의 발달과 풍화의 진행으로 거의 다공성연속체개념으로 간주할 수 있고, 하부구간은 대체로 Cubic law를 적용할 수 있는 조건을 만족하는 것으로 판단된다.

한편, Moye 공식에 의한 정상류와 부정류해석에 의해 도출된 투수량계수와 단열층체적과의 관계(Figure 7)를 살펴보면, 부정류 해석에 의한 투수량계수가 대체로 양호한 상관관계를 보이므로 정상류에 의한 해석치보다 신뢰성이 크다는 것을 알 수 있다. 이들의 분산정도는 초음파주사검층 결과로부터 단열층의 해상도와 분해능을 높여 적용할 경우 보다 높은 상관관계를 나타낼 것으로 기대된다.

단열조별 투수량계수

단열망모델에서의 단열의 수리특성은 각각의 단열조별로 투수량계수를 사용하게 되어 있다. 전술한 바와 같이 투수량계수와 단열층과는 밀접한 관계가 있으므로 단열조별 투수량계수 역시 Cubic law에 상당히 근접한다고 가정할 수 있다.

단열층과 투수량계수와의 관계를 Cubic law에 근거할 경우, 충전물질, 조도특성 및 응력분포를 고려하지 않은 일정한 방향성 및 균일두께를 갖는 평탄성단열을 전제로 하며, 단열면에서 유로유동(channelling flow)현상이 아닌 단열 전면을 흐르는 층류로 가정한다. 단열에서 지하수유동에 대한 기본방정식은 다음과 같다(Parsons, 1966).

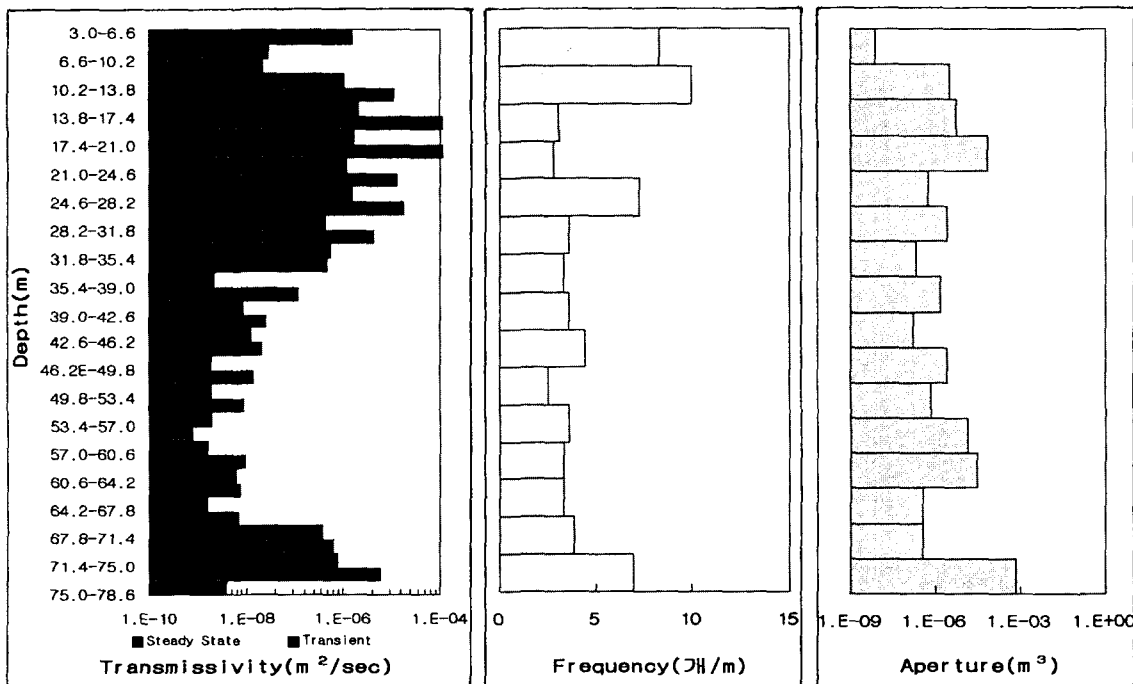


Figure 6. Variations of the fracture transmissivity, frequency and aperture in the borehole B-3.

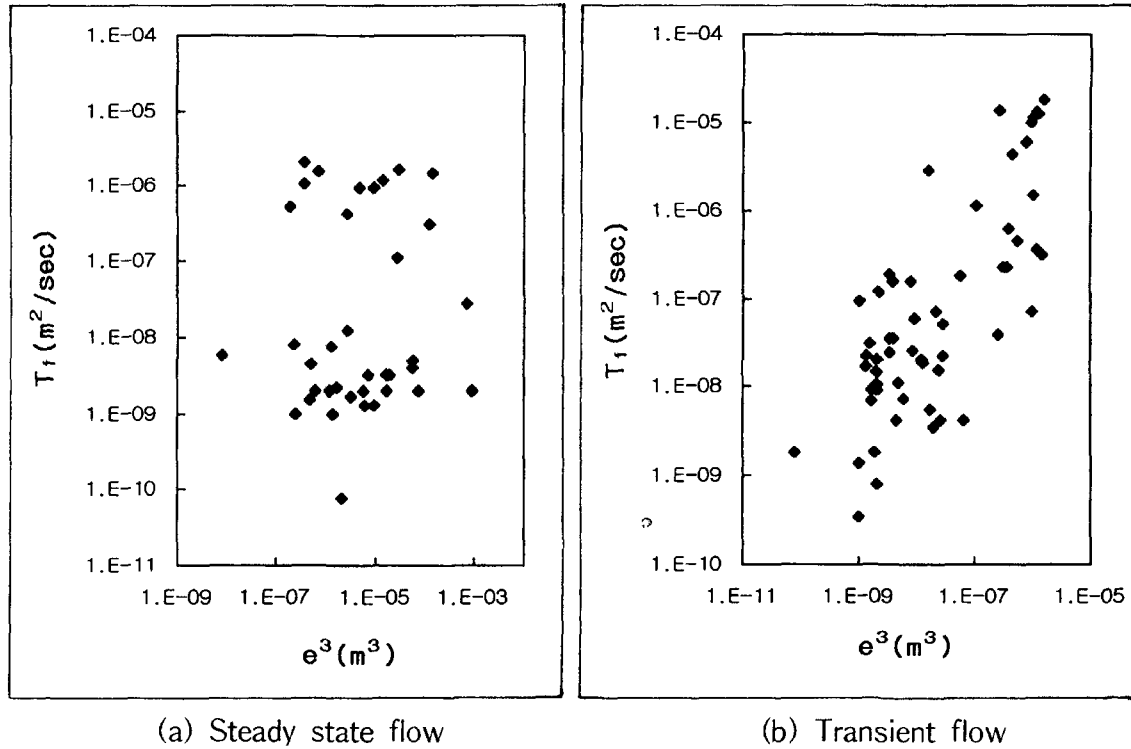


Figure 7. Relationship between aperture volume and transmissivity.

$$Q/A = e^3 \rho g / 12 D \mu dh/dl \quad (1)$$

여기서, Q=flow rate

A=area

e=aperture thickness

ρ =fluid density

g=acceleration of gravity

D=fracture spacing

μ =fluid viscosity

dh/dl=pressure gradient

한편, 각 구간별 단열투수량계수와 동구간의 단열조별 투수량계수는 아래와 같이 정의된다(Nelson, 1985).

$$T_f = T_{f1} + \dots + T_{fn} \quad (2)$$

여기서, $T_f = K_f b = (K_{f1} + \dots + K_{fn}) b$

$$= (e_1^3 \cos \alpha_1 / 12 D_1 + \dots + e_n^3 \cos \alpha_n / 12 D_n) b$$

K_{fn} = 단열조 n의 수리전도도($e_n^3 \cos \alpha_n / 12 D_n$ 혹은 $e_n^2 \rho g / 12 \mu$)

α_n = 수두경사 축과 단열면 사이각

위 식을 이용하여 매 3.4~3.6 m간격으로 정압주입시험을 통하여 도출한 단열투수량계수는 FracMan(Version 2.306; Golder Assoc., 1994)의 OxFilet 모사과정을 통하여 단열빈도가 고려된 단열투수량계수로 산출하고, 이를 다시 3개 단열조의 틸의 체적백분율로 구분하여 각 단열조별로 구분하였다. 평균 단열투수량계수는 lognormal분포일 때 $6.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$

Table 3. Fracture transmissivity in each fracture set

Set 1		Set 2		Set 3		Total	
cf1(m)	Tf1	cf2(m)	Tf2	cf3(m)	Tf3	cf(m)	Tf
(%)		(%)		(%)		(%)	
2.323	3.34×10^{-7}	0.951	1.36×10^{-7}	0.982	1.41×10^{-8}	4.256	6.12×10^{-7}
(54.6)		(22.3)		(23.1)		(100)	

이다(Table 3).

단열망모델링

본 연구에 적용된 코드는 FracMan으로서 이 프로그램은 지하수유동해석 모델인 MAFIC(Version β 1.4; Golder Assoc., 1994)과 패키지로 운용하도록 되어 있다.

단열망모델의 모사영역은 조사지역 지하 100 m \times 100 m \times 100 m 규모의 암반블럭을 대상으로 Order 1~Order 4의 단열대 중 Order 4에 해당하는 특성의 단열체계를 대상으로 하였다.

단열체계의 기하학적 분포특성인자와 수리특성인자는 앞서의 방법으로 도출하였다. FracMan에서는 3차원 단열망모델링을 위하여 투수성단열만을 모사하기 때문에 특별히 FracWorks module을 이용하여 OxFilet 모사결과와 최적화시키는 과정을 통하여 계산되었다. 임의의 단열조에 대한 투수성단열밀도(P_{32c})는 시추공내 투수성단열빈도(f_c)로부터 구할 수 있는데 (Geier *et al.*, 1990), 다음 식을 이용하여 계산된 단열조별 투수성단열밀도는 Table 4와 같다.

$$P_{32c} = (f_c / f) P_{32} \quad (3)$$

Table 4. Conductive fracture intensity

Set	Strength	Estimated P _{32c} (m ² /m ³)	Remarks
1	0.503	0.8719	
2	0.263	0.4555	
3	0.234	0.4059	
Total	1.000	1.7333	

Table 5. Input data for three dimensional discrete fracture network modeling

Parameter	Set 1	Set 2	Set 3
Orientation	Fisher	Fisher	Fisher
Pole Azimuth	344	224	58
Pole Inclination	30	24	82
Dispersion	12.28	17.88	2.61
Fracture Radius	LogNormal	LogNormal	LogNormal
Mean Radius (m)	2.97	2.16	3.19
Standard Deviation (m)	3.82	1.39	1.28
Fracture Transmissivity	LogNormal	LogNormal	LogNormal
Mean (× 10 ⁻⁷ m ² /s)	3.34	1.36	0.141
Standard Deviation (× 10 ⁻⁴ m ² /s)	2.69	1.1	1.14
Conductive Fracture Intensity (P _{32c} , m ² /m ³)	0.7819	0.4555	0.4059

Table 6. Statistics from the simulated borehole sampling.

No. of fracture	Simulated P _{32c} (m ² /m ³)	No. of fracture intersections	Simulated Tf ± SD (m ² /s)
3,080	1.72	83	6.23 × 10 ⁻⁷ ± 5.1 × 10 ⁻⁴

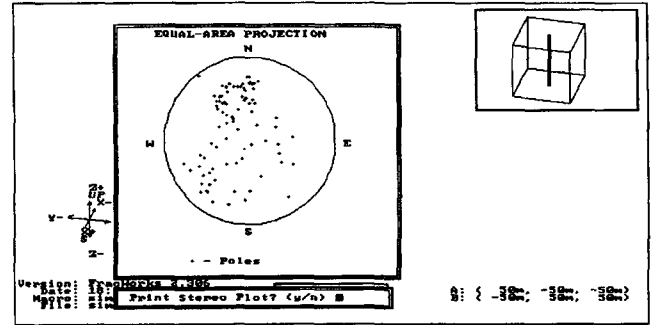


Figure 9. Pole plot from the simulated three dimensional discrete fracture network model.

서의 추출기법(sampling)을 통하여 얻은 모사자료와 현장조사 결과와 비교하는 과정을 거쳐야 한다. 모델의 중앙에서 수직방향으로의 100 m 시추공에서 임의 추출한 결과의 통계치는 P_{32c}의 값이 1.72, 시추공과 교차하는 투수성단열의 수는 83개, cross-fracture 투수량계수값은 6.23 × 10⁻⁷ m²/s 이다(Table 6). 또한 모델 전체의 단열이 갖는 극의 방향성은 Figure 9와 같다. 따라서, 도출된 단열체계모델은 실제 현장조사 결과에 근접하는 예비모델이 될 수 있음을 시사한다.

결 언

단열망개념의 지하수유동 해석에 요구되는 투수성단열망모델을 구축하기 위하여 단열분포특성의 정량화, 단열의 수리특성 규명, DFN모델에서 요구되는 단열투수량계수 등의 수리인자 도출, 3차원 단열망모델링, 그리고 수리시험 결과를 이용한 모델 교정을 수행하였다.

(1) 단열의 방향성, 크기, 틈 등의 기하학적 분포특성인자는 확률밀도함수로 표현 가능하다.

(2) 부정류해석에 의한 유동차원은 주로 방사상 내지 구상유동 특성을 보인다.

(3) 단열투수량계수와 단열틈과의 상관관계는 다소 분산되지만 대체로 Cubic law를 만족시키는 것으로 보여진다. Cubic law로서 추정된 평균적인 단열투수량계수는 lognormal 분포일 때 6.12 × 10⁻⁷ m²/s이다.

(4) 투수성단열밀도(P_{32c})는 1.73이고, 단열망모델의 규모 100 m × 100 m × 100 m 내에서 재현된 투수성단열의 총 수는 3,080 개이다.

상당한 수준의 정밀성이 요구되는 단열틈의 계측방법에 대하여는 그의 수리적 중요성을 감안하여 초음파주사검층기술을 이용한 개구성단열의 정량화방법을 계속적으로 보완할 예정이다. 추계적 방법을 이용한 단열크기 추정방법에 대하여도 후속 연구를 수행할 예정이다.

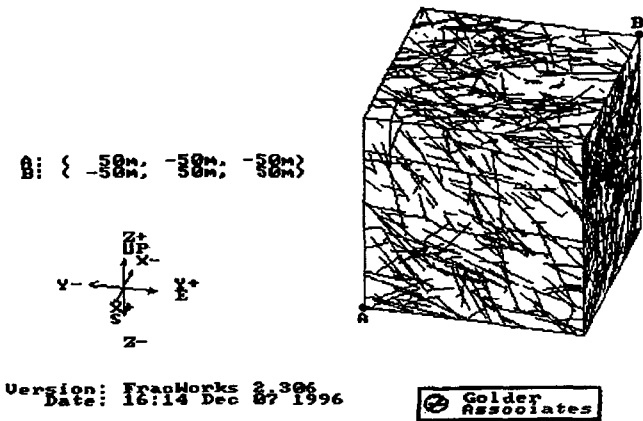


Figure 8. Simulated three dimensional discrete fracture network model.

여기서 P₃₂: total area of fracture per unit volume of rock
 f: the number of fractures per meter of borehole length
 f_c: the number of conductive fracture per meter in OxFilet simulation

위와 같이 3차원 단열망모델링에 입력되는 단열체계의 분포특성과 수리특성을 종합적으로 정리하면 Table 5와 같고, 이를 이용하여 단열망모델의 모사규모인 100 m × 100 m × 100 m 내에서 재현된 투수성단열의 총 수는 3,080개로 구성되었다(Figure 8).

단열망모델의 교정을 위하여 모사된 모델 내의 임의 위치에

사 사

본 연구의 연구지역으로 배려해 주신 삼광광업소 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김중렬, 김유성, 현혜자, 1995, Geotomography에 의한 암반구조 연구(V), 과학기술처, 392p.
- 배대석, 1996, 편마암지역 지하공동주변 단열암반의 지하수유동특성 연구, 박사학위논문, 충남대학교.
- 한국원자력연구소, 1989, 구조거동 및 지질.수문특성연구-편마암지역의 불연속면체계특성, KAERI/ RR-894/89/GE.
- 한국원자력연구소, 1994, 자연방벽안전성연구, KAERI-NEMAC/ RR-124/94.
- Black, J., Dershowitz, W., Axelsson, K-L., Doe, T. and Been, K., 1994, Review of SKB framework for the geoscientific characterization of sites for deep repositories with emphasis on the testing and numerical representation of fractured crystalline rock, PR44-94-001.
- Dershowitz, W. S., 1984, Rock joint systems, Ph. D. thesis, MIT, Cambridge, Mass, 764p.
- Dershowitz, W. S., Lee, G. and Geier, J. E., 1991, FracMan version β 2.3-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation user document, Report 913-1358, Golder Associate Inc., Redmond, Washington.
- Doe, T. W. and Geier, J. E., 1990, Interpretation of fracture system geometry using well test data, Stripa project 91-03, SKB, Stockholm.
- Geier, J. E., Lee, K., Dershowitz, W. S. and Sharp, G., 1990, Stripa project-Prediction of inflow into the D-hole at the Stripa mine, TR 90-44, Golder Associates Inc.
- Golder Assoc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation(version 2.306).
- Golder Assoc., 1994, MAFIC-Matrix/fracture interaction code with solute transport (version β 1.4).
- Griffith, A. A., 1921, The phenomena of rupture and flow in solids : Phil. Trans. Royal Soc. London, A221, p.163-198.
- Grindrod, P., Herbert, A. W., Roberts, D. L. and Robinson, P. C., 1992, NAPSAC technical document. AEA D & R report 0270.
- Kikuchi, K., Kuroda, H. and Mito, Y., 1987, Stochastic estimation and modeling of rock joint distribution based on statistical sampling. Proceedings of the 6th International Rock Mechanics, Montreal, Canada, p.425-428.
- Kulander, B. R. and Dean, S., 1985, Hackle plume geometry and joint propagation dynamics, Pro. of Int. Sym. on Fundamentals of Rock Joints, p.85-94.
- Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R. and Witherspoon, P. A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resour. Res., 18(3), p.645-658.
- Moye, D. G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, Civil Engineering Transactions, Institution of Engineers, Austria, CE9(1), p.95-100.
- Nelson, R. A., 1985, Geologic analysis of naturally fractured reservoirs, Gulf Pub. Co., Book Division, Huston, Texas, 320p.
- Parsons, R. W., 1966, Permeability of idealized fractured rock, Soc. Petrol. Eng. Jr., p.126-136.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacings in Rock, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, p.135-148.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, p.183-197.
- Pusch, R., 1994, Waste disposal in rock, Development in Geotechnical Engineering, Elsevier, 490p.
- Rouleau, A. and Gale, J. E., 1985, Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, p.353-367.