

분리단열망개념의 지하수유동해석을 위한
단열투수량계수의 정량화 연구
Characterization of Fracture Transmissivity
for Groundwater Flow Assessment using DFN Modeling

배 대 석 (Bae, Dae Seok)	한국원자력연구소
송 무 영 (Song, Moo Young)	충 남 대 학 교
김 천 수 (Kim, Chun Soo)	한국원자력연구소
김 경 수 (Kim, Kyung Su)	한국원자력연구소
김 중 렬 (Kim, Jung Yul)	한국원자력연구소

요약/Abstract

단열암반(fractured rock mass)에서 분리단열망(Discrete Fracture Network;DFN)개념을 적용한 지하수유동해석 과정 및 결과에 가장 크게 영향을 미치는 인자 중의 하나는 단열투수량계수(fracture transmissivity; T_f)이다. T_f 는 단열특성 즉, 방향성(orientation), 단열틈(aperture), 크기(size), 조도(roughness) 및 충전물질(filling material) 등에 크게 좌우된다.

본 연구에서는 DFN모델링 과정에서 가장 민감성을 나타내는 인자중 하나인 T_f 의 도출을 위해서 초음파주사검층(Borehole Acoustic Scanning;Televiwer)과 구간별 정압주입시험(Fixed Interval Length test in constant head;FIL)을 이용하였다.

이 값을 이용하여 해석한 결과, 연구지역의 지하수유동모델링 과정의 신뢰성은 물론 단열투수량계수, 터널내 지하수유입량등, 해석 전반에 걸쳐 상당한 신뢰성을 부여할 수 있었다. 따라서, DFN모델에 의한 지하수유동해석시 Cubic law의 기본전제를 만족하는 단열특성의 경우, televiwer와 FIL시험과의 결과분석을 통하여 도출한 단열조별 T_f 는 지하수유동 해석결과에 대한 신뢰성을 한 단계 제고할 수 있는 방법으로서 의의가 있다.

The fracture transmissivity(T_f) is the most important parameter of fracture in assessing groundwater flow in fractured rock masses by using the DFN(Discrete Fracture Network) modeling. T_f , the most sensitive parameter in DFN modeling, is dependent upon aperture, size and filling characteristics of each fracture set. In the field test, the accuracy of T_f can be increased with Borehole Acoustic Scanning (Televiwer) and Fixed Interval Length(FIL) test in constant head.

T_f values measured from FIL test was modified and estimated by each fracture set on the basis of the Cubic Law and the information of aperture and filling characteristics obtained from Televiewer. The modified T_f results in the increase of confidence and reliability of modeling results including the amount of tunnel inflow.

And, this approach would reduce the uncertainty of the assessment for groundwater flow in fractured rock masses using the DFN modeling.

서 언

단열암반에서의 지하수유동해석을 위한 수치 및 수학적 모델링에 대한 예찬론과 비판론의 공존에도 불구하고, 모델링의 기능은 자연현상을 설명(interpretation)하고 미래를 예측(prediction)하기 위한 수단으로 많은 연구 및 산업분야에서 선호되고 있다. 모델링을 통한 해석과정에서 야기되는 가장 큰 불확실성은 개념모델의 불확실성, 입력인자의 수집과 처리(분석등)과정에서의 불확실성 그리고, 모델링과정에서의 수리적인 불확실성 등으로 구분할 수 있다(Fig.1). 즉, 자연현상을 최대한 반영할 수 있는 해석수단으로서 idea와 이를 충족시킬 수 있는 information의 도출과정에서 모든 불확실성이 야기되는 것이다.

다공성연속체개념에서 출발한 지하수유동해석을 위한 idea의 발전은 Stripa의 방사성폐기물지하처분 연구시설(Sweden)에 적용한 결과, 상당히 긍정적인 평가를 받은(OECD, 1993) 분리단열망(Discrete Fracture Network : DFN)모델링에 의한 해석방법(Grindrod et al., 1992 ; Golder, 1992)으로 발전하였다. 그러나, 이들 모델의 개념을 구체화시켜줄 수 있는 입력인자에 대하여 정량화를 위한 품질향상 노력 없이는 자연현상에 근접하는 평가에 도달할 수 없는 것이다.

DFN모델의 입력인자중 단열투수량계수는 지하수 유동해석에 가장 큰 영향을 미치는 요소중 하나이며, 단열투수량계수의 정량화과정에서 단열크기, 단열틈 및 단열충전물질 등의 특성이 계수의 불확실성을 유발한다.

단열을 통한 지하수유동 연구는 임의의 틈을 갖는 평행판을 이용하여 유동이론을 제시하였다(Huitt, 1955; Snow, 1965; Sharp et al., 1972 ; Witherspoon et al., 1980). 여기서, 이론적인 기본개념은 평행판 사이에서 물의 흐름이 층류라는 전제하에 접근하는 것이다. 즉, 단열면은 전체가 평탄하고 단열방향과

단열간격이나 틈의 두께는 모두 일정한 균일분포 특성을 전제로 하는 소위, Cubic law(Snow, 1965)에 의한 접근이다. 층류의 가정은 유량율(flow rate)이 매우 낮고 단열틈의 규모에 비해서 표면의 조도가 매우 낮은 단열저류체(fractured reservoir)내에서 유효하다(Parsons, 1966). 그러나, 양수 등으로 인한 유속의 증가는 난류상태(turbulence flow)를 유발한다. 이 경우, 수리전도도의 도출을 위한 Parsons의 식은 보다 더 복잡한 관계식이 필요하지만, 단열암반에서 지하수의 이동에 적용 가능한 단순화된 식이라 할 수 있다.

시추코아분석 및 주입시험결과 유동체계의 거동현상은 이질성체계의 유동특성이 기하평균(geometric mean) 값을 갖는 균질성 체계의 수리전도도 값에 거의 접근한다는 결론에 도달했다(Long et al, 1982; Nelson, 1985). 그리고, 단열암반은 암피의 크기가 $1m^2$ 이하의 소규모이고 매질의 수리전도도 역시 $1 \times 10^{-10}m/s$ 이상의 경우 균질다공성 매질로 간주할 수 있으며, 상당한 실득력을 갖는다(Warren & Price, 1961; Parsons, 1966; Long et al, 1982). 또한, 패커 시험에 의해 실제 단열틈의 폭과 수리전도도와와의 선형관계를 도출한 바 있는데(Attewell & Farmer, 1976), 이와 같은 모든 접근방법은 근본적으로 Cubic law의 기본개념을 전제로 하는 것이다.

현재까지 DFN모델링에 적용하는 단열조별 투수량계수는 총 투수량계수를 단열조의 수에 따라 균등 배분하여 적용할 수 밖에 없었다. 본 연구에서는 DFN개념에 의한 지하수유동해석시 단열투수량계수에 가장 큰 영향을 미치는 단열조별 틈의 크기에 대한 정량화를 통하여 모델링에 대한 민감도분석(sensitivity analysis)차원에서 접근하여, DFN모델에 의한 평가의 신뢰성을 제고하는데 목적을 두었다.

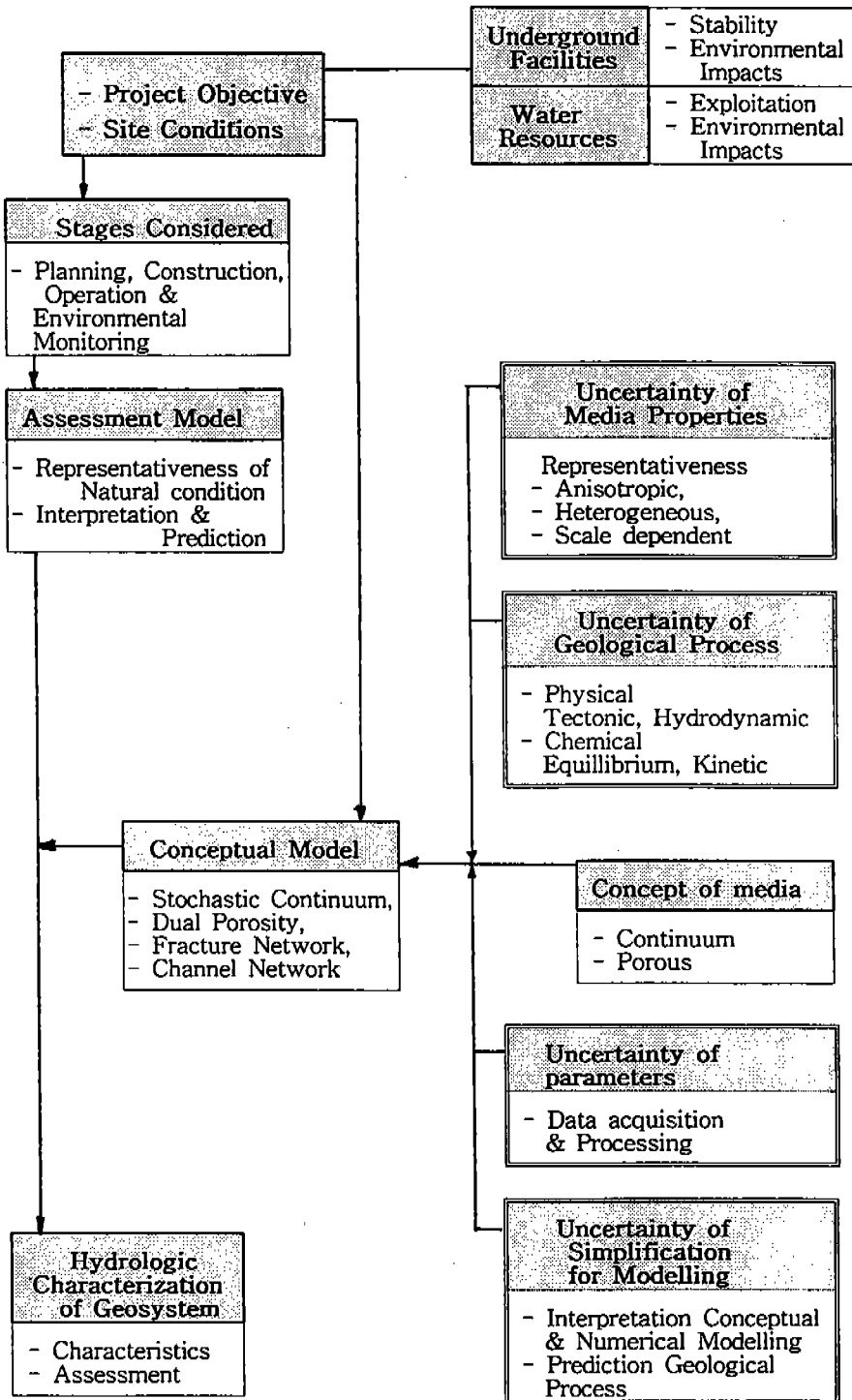


Fig. 1. Uncertainties to be solved for groundwater flow assessment in rock mass

연구 방법

DFN모델에서 요구하는 입력인자 중에서 단열투수량계수 값을 좌우하는 단열틈에 대한 정량화를 위하여, 충남 청양군 운곡면 소재 삼광광산에서 지표 및 갱내 단열조사(한국원자력연구소, 1989), 공내 Televiewer검층(김중렬외, 1993 & 1995) 및 시추공에서 구간별 수리시험을 실시하였다(한국원자력연구소, 1994). 시추공내 단열틈은 Televiewer에 의한 공내검층으로 역학적 단열틈을 추정하고, 정압주입시험 결과로부터 각 단열조별 단열투수량계수를 모사 재현하여 단열망모델에 적용하였다. 최종모델에서 갱도내로의 지하수유입량을 추정한 후 실측 유입량과 비교 검토하였다.

지형 및 지질

연구지역은 차령산맥의 서남측 연장단에 위치하며 북측으로 부터 차령고개(EL.235m), 국사봉(EL.489) 및 칠갑산(EL.561m)으로 연결되는 남남서방향의 긴 능선을 형성한다. 능선의 서측 5km 지점에는 북북동방향으로 흐르는 신양천(EL.60m)과 동측 10km 지점에 유구천(EL.50m)이 각각 남남서 방향으로 흐른다.

연구지역의 지질은 선캠브리아기의 다양한 변성암류와 이를 관입한 백악기의 맥암류 및 이들을 부정합으로 피복하는 제4기 충적층으로 구성된다. 선캠브리아기의 변성암류는 준편마암에 속하는 운모편암, 호상편마암 및 흑운모편마암과 이들을 관입한 정편마암에 속하는 화강암질 편마암으로 세분된다. 백악기의 맥암류는 페그마타이트, 염기성맥암 및 석영맥암 등으로 구성되어 있다(한국원자력연구소, 1989). 한편, 연구지역 주변의 주구조선 방향은 NNE 및 NS로 특징지워진다(Kang, 1979).

단열분포특성

조사지역내의 지표 및 향내의 단열조사는 축선법(Priest & Hudson, 1976;1981)을 적용하였으며 불연속면 추적길이가 50cm 이상되는 것을 기재대상으로 하였다. 지표 39개 지점에서 1,203개 및 지하갱도 53개 지점(level 0, 2, 5 및 6)에서 3,637개등, 총 4840개 단열에 대하여 각각 방향성(orientation), 간

격(spacing), 추적길이(trace length), 종식형태(termination), 충전물, 그리고 유출량(seepage) 등에 대하여 조사하였다. 또한, 시추공(신대리등 300m/3개소)에서는 Televiewer에 의한 단열의 방향성과 단열틈의 크기 등을 측정하였다(한국원자력연구소, 1989;1994).

방향성: 지표, 갱내 및 시추공내 Televiewer 등에 의한 연구지역의 단열의 주방향은 130~200/40~90(set 1), 210~280/50~90(set 2) 및 010~060/60~90(set 3)이다(Fig. 3). 전체적으로 볼때, 지표 및 갱내에서 취득한 단열의 방향성특성은 지표의 페그마타이트 분포지역 이외에는 큰 변화가 없으며, 크게 3개의 단열조로 분류된다. 이들 3개 단열조를 중심으로 각 조별 빈도, 간격, 단열길이 및 단열틈 등의 대표치를 도출하였다.

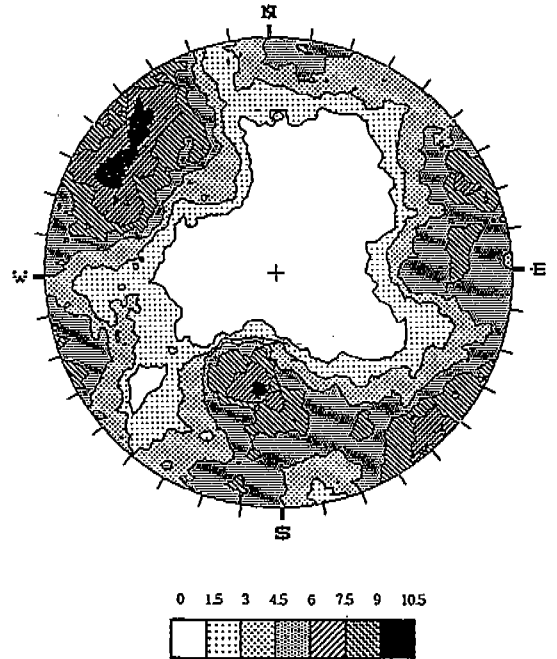


Fig. 2. Stereographic plot of the poles of fractures measured on the surfaces(Lower hemisphere, equal angle)

단열간격 및 크기: 단열의 간격은 각 단열조의 수선방향에 대한 간격으로 보정하였으며(Priest & Hudson, 1976), 대수정규분포를 나타내는 간격치의

확률분포함수는 측정치와 이론치의 누적분포함수 (Koch & Link, 1971)를 이용하여 분석하였다(한국 원자력연구소, 1994). 단열간격은 옴의 지수함수 분포특성을 나타내며, 평균간격은 set 3가 가장 크고 (2.25m), set 1이 가장 작으며(0.78m), 단열발달빈도는 set 1이 1:28/m, set 2는 0.9/m, set 3는 0.44/m이다.

단열크기를 추정하는 인자로서 단열추적길이의 측정과정에서 발생하는 censoring 및 truncation 오차에 관하여 아직까지 정확하게 보정하는 방법이 알려져 있지 않지만, 불확실성을 개략적으로 보정하는 방법은 여러차례 시도된 바는 있다(Pahl, 1981; Einstein & Baecher, 1983;Rouleau & Gale, 1985). 추적길이의 대표치는 단열간격과 같은 방법으로 도출하였으며, 각 set별 길이 분포의 대표값은 set3(3.19m) > set1(2.97m) > set2(2.16m)의 순이다.

단열틈: 지표 및 갱내에서 관측되는 단열틈의 크기는 지표노출 및 갱도굴착시 다양한 역학적인 작용으로 원래의 크기가 변화는 특성을 가지고 있다. 더우기 육안 식별에 의한 갱내에서의 관측은 신뢰성에 한계가 있다.

Televiwer 검층시 빔(beam)은 시추공경의 크기에 따라서 초점거리가 조정되며, 최소 0.5mm이하까지도 측정가능하다(김중렬외, 1993). 여기서는 측정된 틈의 규모를 1mm 단위로 구분 처리하였다. Televiwer 검층결과, set 2의 경우 단층으로 인한 대표값의 영향이 있으나, 하부 신선한 암반에서 단열조별 평균 단열틈의 크기는 set 1, 2, 3가 각각 2.2, 2.3, 2.2mm이다(Table 1).

종식형태 및 연결성: 단열의 종식형태는 단열선단(fracture front)이 종식되는 모양(termination type)이 노두에서 인지되는 현상에 의해 I, L, T, H, 및 X형 등으로 구분하여 기재하였다. 종식형태는 단열전파이론(Griffith, 1921;Irwin, 1958; Kulander et al., 1979)에 의하여 선후생성 단열을 암시하는 지시자가 될 수 있다. set 1은 set 2보다 자료수가 적음에도 불구하고 본 연구지역의 단열체계 내에서 가장 systematic하고, set 2는 sub-systematic, 그리고 set 3는 non-systematic하다.

불연속면의 상호 연결성은 단열의 길이와 간격에 의해 좌우되는 인자로서 연결성지수(interconnectivity index;I_i) 값이 커질 수록 수리화적인 중요성이 증가한다. 단열조 i의 단열조 j에 대한 연결성지수(Rouleau & Gale, 1985)에 의해 도출한 상대적인

Table 1. Mechanical aperture widths in the borehole SK-2 by fracture sets using Televiwer(40-100m in depth)

Aperture (mm)	Set 1	Set 2	Set 3	Total	Remark
1	82	53	20	155	
2	25	30	17	72	
3	37	36	8	81	
4	6	3	4	13	
5	4	-	2	6	
6	1	2	-	3	
7	-	-	2	2	
8	1	-	-	1	
10	1	-	-	1	
12	1	-	-	1	
15	-	1	-	1	
20	-	1	-	1	
30	-	1	-	1	Fault
35	-	1	-	1	Fault
40	-	1	-	1	Fault
65	-	1	-	1	Fault
75	-	1	-	1	Fault

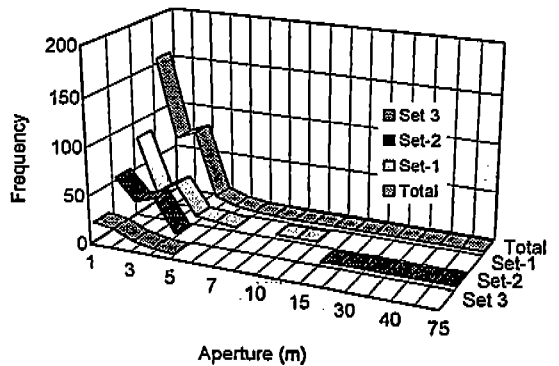


Fig. 3. Distribution of the fracture apertures in each fracture set.

연결성 지수는 set 1(6.82), 2(5.44) 및 3(2.22) 순으로서, set 1의 연결성 정도가 가장 높게 나타났다.

수리지질특성

자연수위 및 지하수압 : 세계의 시추공에서 측정 한 자연수위는 지표하 4~5m(EL.143m)에서 형성되어 있다. 한편, 삼광광산의 level 0(EL.208m)의 입구로부터 1,300m 거리에 위치한 지점에서 갱내의 벽면에 대하여 법선방향으로 100m 길이의 수평시추공에 단일패커를 설치하여 우기와 건기동안 지하수압을 측정하였다.

압력계 설치 약 10일 경과후 지하수압은 안정상태를 유지하였으며, 갈수기의 평균수두는 약 60m로 추정할 수 있다. 따라서, level 0편에서 hydraulic head(해수면 기준)는 약 268m로 간주할 수 있다.

수리시험 및 수리전도도 : 수리시험 및 해석법은 정압주입 및 FIL시험방법(Doe & Geier, 1990; 김천수의, 1993)을 사용하였다. 정압시험은 수리특성을 규명하기 위하여 매 3m 간격, 하향식으로 정압주입하였다. 정압상태는 높이 약 60m 상부에 물탱크를 설치·유지하였으며, 주입시간은 1시간 이상으로 하였다. 이중패커의 팽창부분의 길이는 cross flow를 방지하기 위하여 80cm의 패커를 사용하였으며, 측정기기는 압력계(눈금, 0.1psi; 최대, 60psi)와 유량계(Rotameter, Gilmont USA; range 0.01~ 30 l/min)를 사용하였다.

정상류 해석법으로 도출된 수리전도도의 범위는 $1 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 로 분포되며 30m 상부구간의 평균 수리전도도는 $2 \sim 3 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 로 매우 높은 값을 나타냈다. 한편, 수리전도도는 심도 30~40m를 중심으로 상부 구간에서 높은 투수성을 나타냈다(Fig. 4).

단열투수량계수 : DFN모델에서 각각의 단열조별 투수량계수의 구분 적용을 전제로 하지만, 아직까지 단열조별 수리특성을 구분할 수 있는 방법이 불투명할 뿐만 아니라 이를 분리하여 적용한 사례는 보고된 바 없다. 최근, 개별단열(single fracture)에 대한 flow logging 방법을 시도하고 있지만(Doe, 1995) 시험조건이 제한적이어서 범용적인 적용이 곤란하다. 여기서는, Televier 검층을 통하여 측정된 단열틈의 물리적인 두께를 근거로 크기를 추정하여 단열조별 투수량계수를 구분·도출하였다.

단열에서 지하수의 유동은 임의의 틈을 갖는 평행판으로 가정할때 기본방정식은,

$$Q/A = e^3 \rho g / 12 D \mu \text{ dh/dl} \dots\dots\dots(1)$$

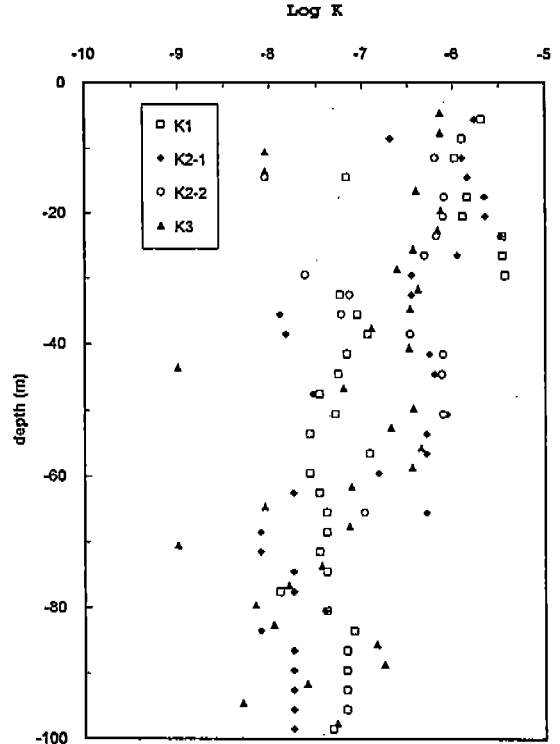


Fig. 4. Hydraulic conductivities in the borehole SK-1. 2 & 3.

- 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

상기 식의 기본개념은 단열틈의 크기가 일정하고 평탄한 단열면 사이에서 물의 흐름은 층류라는 전제하에 접근하는 것이다. 따라서, 단열투수량계수는 단열틈의 두께를 근거로 주입시험구간에서 각각의 단열조별 투수량계수의 합으로 정의하였다(Nelson, 1985).

$$T_f = T_{f1} + T_{f2} + T_{f3}, \dots\dots\dots(2)$$

여기서, $T_f = K_f b = (K_{f1} + K_{f2} + K_{f3}) b$
 $= (e_1^3 \cos \alpha_1 / 12 D_1 + e_2^3 \cos \alpha_2 / 12 D_3)$

$$+e_3^3 \cos \alpha_3 / 12 D_3) b$$

$$K_{fn} = \text{단열조 set n의 수리전도도}$$

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

$$\alpha = \text{수두경사 축과 단열면 사이각}$$

따라서, 위식에 근거하여 단열조별 틈의 체적(e^3)과 투수량계수와와의 관계를 도시한 결과, 약간의 분산현상을 나타내지만 대체로 양의 상관관계를 나타내는 사실을 발견할 수 있다(Fig. 5). 분산현상의 원인은 조별로 단열충진, 조도, 응력 및 유로유동현상 등으로 야기된 것으로 판단된다. 즉, 단열투수량계수 T_f 는 단열틈의 크기인자 이외에도 식(3)과 같이 기타 다른 인자들에 의해서도 크게 영향을 미치고 있

음을 의미한다.

$$T_f \propto f(\text{aperture, size, roughness, infillings etc.}) \dots\dots\dots(3)$$

비록, 약간의 분산현상을 보이더라도 이러한 상관관계에 의해 단열조별 투수량계수는 Cubic law에 상당히 근접한다고 판단되므로 각 단열조의 투수량계수로 구분하여(Fig. 6), DFN모델의 simulation을 위한 인자로 적용하였다.

FracMan(Golder, 1994)의 OxFilet simulation을 거친 각 단열조별 투수량계수는 Cubic law를 근거로 한 경우, set 1, 2, 3가 $3.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 각각 추정하였으며, 전체 단열투수량계수는 $5.76 \text{ E}^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 산출하였다. 한편, 단순균등 배분에 의해 처리한 경우 각 단열조별 투수량계수는 $1.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 동일하게 설정할 수 있다(Table 2).

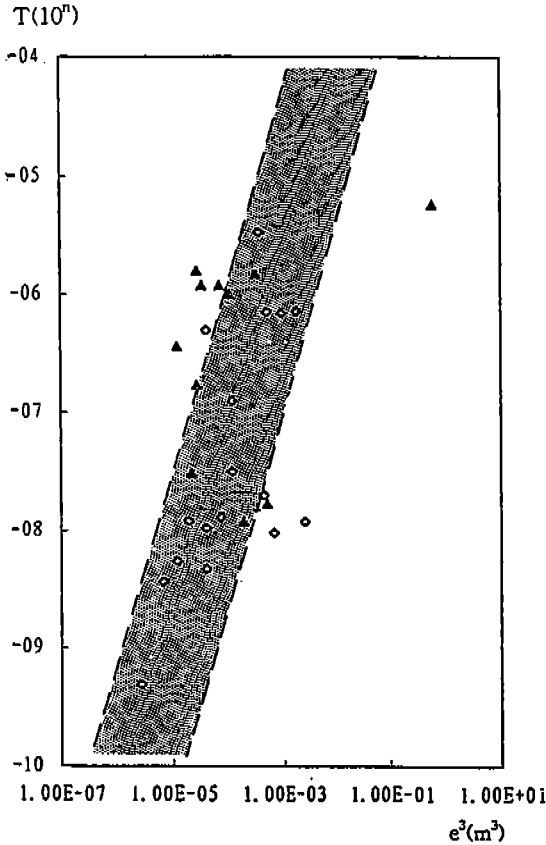


Fig. 5. Relationship between the aperture volume and fracture transmissivities (▲; 0~40m in depth, ◇; 40~100m in depth of borehole)

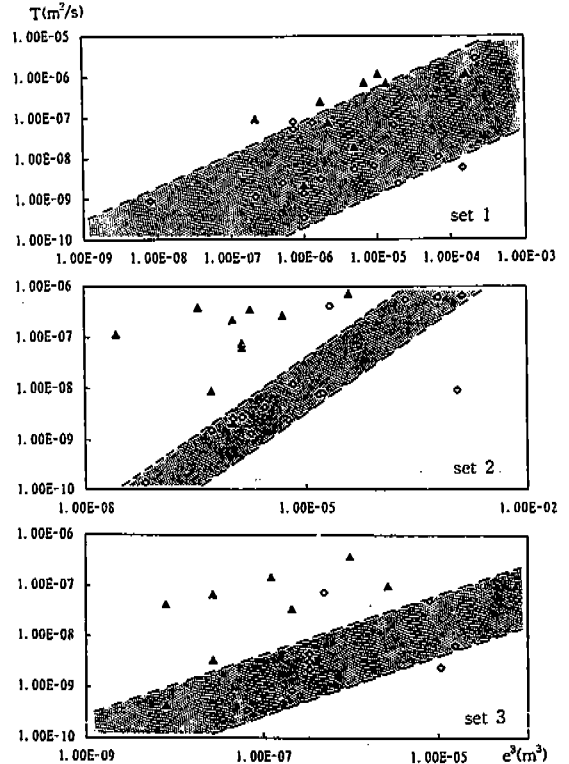


Fig. 6. Relationship between the aperture and fracture transmissivities in each fracture set (a;set 1, b;set 2, c;set-3). (▲; 0~40m in depth, ◇; 40~100m in depth of borehole)

Table 2. Fracture transmissivity in each fracture set.

Set		Cubic law	equal T_n
Set 1	$e_{n1}(m)$	0.0177	1.46×10^{-7}
	T_{n1}	3.62×10^{-7}	
Set 2	$e_{n2}(m)$	0.029	1.46×10^{-7}
	T_{n2}	2.0×10^{-7}	
Set 3	$e_{n3}(m)$	0.0059	1.46×10^{-7}
	T_{n3}	1.42×10^{-7}	
Total	$e_f(m)$	0.052	4.38×10^{-7}
	T_f	5.76×10^{-7}	

투수성단열밀도 : 임의의 단열조에 대한 투수성단열밀도(P_{32c})는 시추공내 투수성단열 빈도(f_c)로부터 구할 수 있는데(Geier et al., 1990), FracMan module의 FracWorks를 이용하여 OxFilet과 일치시키는 반복과정을 통하여 계산된다.

$$P_{32c} = (f_c/f) P_{32} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, P_{32} : 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

이들 각각의 경우의 파라미터를 적용하여 각 set 별 투수성단열밀도 값으로 환산하면 Table 3과 같다.

Table 3. Conductive fracture intensity.

Set	Strength	Estimated $P_{32c}(m^2/m^3)$	
		Cubic law	equal $T_{n,23}$
1	0.397	0.1457	0.1410
2	0.449	0.1647	0.1594
3	0.154	0.0565	0.0547
Total	1.000	0.3669	0.3551

분리단열망모델의 구성 및 결과분석

본 연구에 적용된 모델은 FracMan(Version 2.306)으로서 이 프로그램은 지하수유동해석 모델인 MAFIC(Golder, 1994)과 패키지로 운용하도록 되어 있다.

DFN모델링 과정은 반복적인 실행을 통하여 부지의 고유특성에 맞게 접근하는 forward modeling과정이라 할 수 있다. 예비타당성 검토과정에서 수행되는 자료분석은 DFN개념모델을 설정하기 위하여 필요한 단계이며, 개략적인 방법으로 단열의 통계적 분포특성을 잘 나타내는 작업모델을 설정하게 한다. DFN모델링의 입력자료는 3개 단열조별로 단열투수량계수를 균등 배분하여 적용하는 방안과 Cubic law에 근거한 각 set의 단열투수량계수를 적용하는 경우로 구분하여 입력인자의 적정성을 비교 검토하였다.

단열체계 모델링

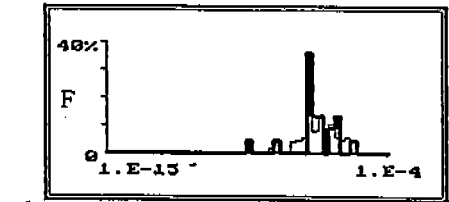
단열체계의 모델링을 위한 입력자료는 FracMan module의 FracSys를 이용하여 기존자료를 재분석 도출되었으며(Table 4), 이를 바탕으로 한 단열체계 모델은 Fig. 7과 같다. 이 단열체계모델의 규모 100m × 100m × 100m내에서, Cubic law에 근거하여 재현된 단열의 총 수는 12,339개로 구성된다. 단열 체계모델링의 목적은 현장조사 자료와 가능한 한 유사한 분포특성을 갖도록 수정 및 보완하는 데 있으므로, 재현된 모델의 중앙에서 수직방향으로 100m 시추공에서 sampling한 결과(Fig. 8)의 통계치는 Table 5와 같다. 또한 모델 전체의 단열이 갖는 pole 방향성은 Fig. 9와 같다. 따라서, 도출된 단열 체계모델은 실제 현장조사 결과에 근접하는 예비모델이 될 수 있음을 시사한다.

Table 4. Input data for discrete fracture network modelling based on the equal $T_{f(1,2,3)}$ and Cubic law.

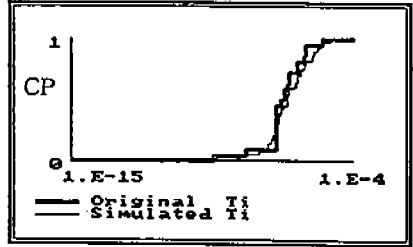
Parameters	Set 1		Set 2		Set 3	
	equal $T_{f(1,2,3)}$	Cubic law	equal $T_{f(1,2,3)}$	Cubic law	equal $T_{f(1,2,3)}$	Cubic law
Orientation Pole Azimuth Pole Inclination Dispersion	Fisher 342 11 12.28		Fisher 255 4 17.88		Fisher 244 75 2.61	
Fracture Radius Mean Radius(m) Standard Deviation	LogNormal 2.97 3.82		LogNormal 2.16 1.39		LogNormal 3.19 1.28	
Fracture Transmissivity Mean (m ² /s) Standard Deviation	LogNormal 1.46×10^{-7} 1.75×10^{-6}	LogNormal 3.62×10^{-7} 5.64×10^{-6}	LogNormal 1.46×10^{-7} 1.75×10^{-7}	LogNormal 2.0×10^{-7} 9.9×10^{-6}	LogNormal 1.46×10^{-7} 1.75×10^{-6}	LogNormal 1.42×10^{-7} 2.0×10^{-6}
Conductive Fracture Intensity(P_{32c} , m ² /m ³)	0.1410	0.1457	0.1594	0.1647	0.0547	0.0565

Table 5. Statistics of discrete fracture network system

Concept	no. of fracture	simulated P_{32c} (m ² /m ³)	no. of fracture intersect	simulated $T_f \pm SD$ (m ² /s)
Cubic law	12,339	0.368	19	5.72×10^{-7} $\pm 5.99 \times 10^{-7}$
equal T_f	12,063	0.356	17	4.38×10^{-7} $\pm 7.51 \times 10^{-7}$



set 1



set 2

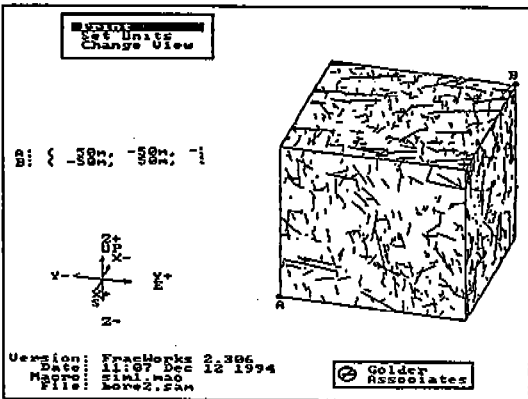
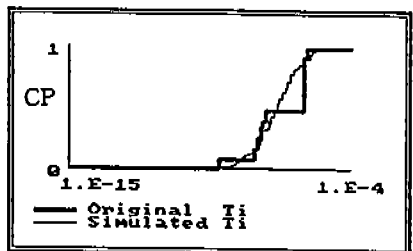
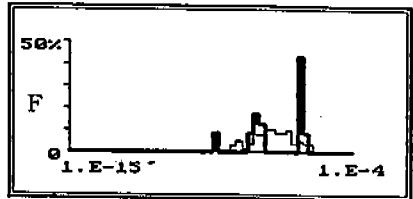


Fig. 7. Fracture system model

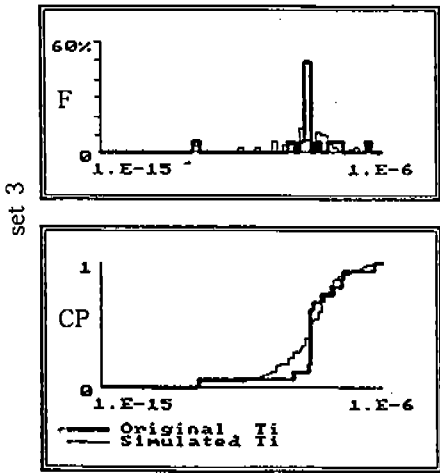


Fig. 8. Fracture transmissivity simulation in each set.(CP;Cummulative Probability, F;Frequency)

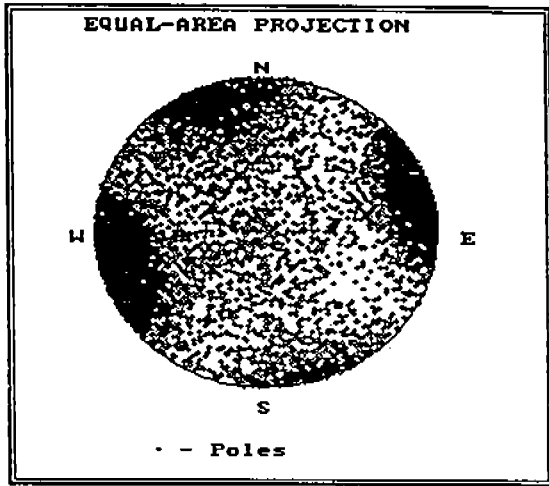


Fig. 9. Pole plot from fracture system model

지하수유동 해석 모델

지하수유동 모델링은 앞에서 구축한 단열체계의 지하학적 모델을 바탕으로 하여 FracMan의 Meshmaker module에서 유한요소망을 생성하고, MAFIG을 이용하여 유한요소망정식을 해석한다.

여기서는, 100m×100m×100m규모의 암반내에 갱도내로의 유입량을 예측하였다. 경계조건의 geometry는 개략적인 검증을 시도하기 위하여 현재 가행 중인 광산의 갱도규모를 감안하여, 단열체계모델 중심에 직경 폭 2m, 높이 2m, 길이 50m의 터널을 설치하는 것으로 설정하였다. 갱도 주위의 지하수위 강하에 기인하여 모델링 영역내에서는 총 수두값의 변화가 존재하게 된다. 이러한 조건은 모델의 경계조건을 이루는 각 면에 시간적으로 일정하고, 공간적으로 변화하는 수두값을 부여하는 것으로 표현된다. 좌표축 x,y,z에 따르는 수두의 선형변화는 다음의 식으로 표현된다.

$$H = H_x x + H_y y + H_z z + H_0 \dots\dots\dots(5)$$

모델링의 단순화를 위하여 outer boundary의 설정은 이중공극모델인 TRAFRAP을 이용하여 다공성 매질개념 하에 경계조건에 해당되는 지점의 potential head 및 수두경사를 추정하여 (한국원자력연구소, 1994), x, y, z 축의 계수를 적용하였다. 동-서 방향으로의 hydraulic gradient는 없고, 남측면의 수두는 측정치 60m로 설정하였다. cavern(inner boundary)의 계수값은 cavern의 bottom에서 계속적으로 pumping을 하기 때문에 0으로 설정하였다 (Table 6).

Table 6. Boundary condition coefficients for outer and inner boundaries.

Boundary	Face	H _x	H _y	H _z	H ₀ (m)
Outer boundary	east	0.26	0	0.31	80
	west	0.26	0	0.31	80
	north	0.14	0	0.23	95
	south	0.35	0	0.13	60
	top	0.28	0	0.35	45
	bottom	0.23	0	0.27	114
Inner boundary	(all)	0	0	1.0	0

전술한 경계조건으로 유한요소망을 구성하여 MAFIG을 실행한 결과(Table 7), steady-state 조건하에서 simulation한 결과로서 matrix inflow는 없다고 할 때 단열을 통해서 지하동굴로 유입되는 양은 Cubic law에 의한 단열투수량계수를 적용할 경우, 약 2.66m³/day로 추정된다. 또한, 갱도의 총 연장길이로 외삽하여 (약 5,200m) 추산한 갱도 내부로

예상유입량은 약 276m³/day로 추정된다.

Table 7. Simulation of fracture inflow(m³/sec)

Nodal Group	Modified by Cubic law (T _{n,23})	equal T _{n,23}	Remarks
1	6.377 × 10 ⁻⁵	1.227 × 10 ⁻⁵	east west north south top bottom cavern
2	3.707 × 10 ⁻⁷	3.432 × 10 ⁻⁶	
3	2.655 × 10 ⁻⁵	2.365 × 10 ⁻⁵	
4	-5.162 × 10 ⁻⁶	5.662 × 10 ⁻⁶	
5	-6.380 × 10 ⁻⁵	-2.295 × 10 ⁻⁶	
6	1.041 × 10 ⁻⁵	3.836 × 10 ⁻⁶	
7	-3.214 × 10 ⁻⁵	-2.590 × 10 ⁻⁵	

한편, 실제 가행증인 광산의 갱도로 유입되는 지하수는 펌프가동으로 약 220m³/day을 배수시키고 있다. 그러나, 갱도내에서의 환기장치 가동으로 인한 증발량을 10%정도 및 기타 체굴적을 감안할 경우, 약 250~300m³/day을 초과할 것으로 추정된다. 또한, 다공성매질개념에 근거하여 단열조별로 동일한 단열투수량계수를 적용한 결과 약 233(2.24)m³/day로 추정되며 이 예측치는 단열투수량계수 한개 인자의 평가방법 및 적용에 따라 해석결과는 약 30% 이상의 오차를 유발할 수 있다는 것을 의미한다.

토의 및 결론

본 연구는 편마암분포지역 단열암반에서 DFN개념에 의한 지하수유동 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소중의 하나인 단열투수량계수의 정량화를 통하여 모델링의 신뢰도 향상을 추구하고자 하였다.

1. 단열투수량계수와 틈의 크기와의 상관관계는 양의 상관관계를 나타내며 Cubic law의 이론에 대체로 일치한다. 따라서, 분산현상이 크지 않을 경우 Televiewer를 이용한 단열틈의 측정에 의한 단열조별 투수량계수는 DFN모델링의 해석결과에 상당한 신뢰성을 부여할 수 있다고 판단된다.

■ DFN개념에 의한 접근은 암반매질은 거의 불투수성으로 간주하고 단열면을 통한 유동만 고려하는 것이다. 그러나 실제로 지하수의 흐름은 일정한 속도와 수량으로 단열면 전체를 통과하는 것이라기 보다는, 단열면 내의 특정 유로를 따라서 이동한다는 유로유동(channeling)현상(Tsang & Tsang, 1987)의 견해가

지배적이다. 따라서, 유로유동 현상에 대하여 아직까지 이론적인 설득력을 확보하지 못한 현 여건하에서 Cubic law를 만족할 경우, Televiewer 검층결과를 근거로 산출한 T_r는 실제 자연상태의 단열분포 특성을 반영하므로 상당한 신뢰성이 있다.

2. 단열틈의 경우, 지표에서 관측의 한계로 측정치에 대한 신뢰성이 미흡하지만, 시추공내 Televiewer 검층에 의해서 0.3~0.5mm 이하까지도 측정 가능하다. 다만, 신뢰성을 확보하기 위해서는, 수리 단열틈(hydraulic aperture)에 영향을 미치는 크기, 단열충진물 및 조도특성 등의 다양한 변화의 영향에 대한 우선적인 확인이 바람직하다.

■ fault로 확인되는 구간은 틈의 규모가 큰 반면 단층점토 및 방해석 등으로 충전되어있으나 정압주입시험 결과의 분산현상에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 현상이 투수량계수와 틈의 규모 사이의 관계에 있어서 분산현상을 초래한 것으로 추정되며, 이 부분은 향후 연구를 통하여 정량화에 치중하여야 할 분야이다.

3. Simulation 및 갱도내 유입량예측 등의 결과로 볼 때, 단열조별 T_r를 근거로 구성된 분리단열망모델은 현장 여건에 근접하는 해석결과를 도출하는 예비모델이 될 수 있다.

□ 지하수유동해석을 위해서는 idea와 information 사이에 유기적인 상호관계가 유지되어야 한다. 이 두가지 부분의 발달정도는 어느 한쪽에 치우쳐져서는 정확하고 신뢰성 있는 결과를 도출할 수가 없으며, idea를 충족시킬 수 있는 동등한 수준의 information과 조화를 이루어야 한다. 근래에 이르기까지 지하수유동 해석을 위한 아이디어는 다공성연속체개념에 의존해 왔으나, forward modelling 접근방법을 기초로 하는 DFN 모델링개념은 암반 지하수유동해석에 상당한 설득력이 있다.

참 고 문 헌

김종렬, 장형삼, 김유성, 현혜자, 김기석(1993) : Geotomography에 의한 암반구조 연구(Ⅲ), KR-93(T)-1, 한국자원연구소, 266p.
 김종렬, 김유성, 현혜자(1995) : Geotomography에 의한 암반구조 연구(V), KR-93(T)-17, 한국

- 자원연구소, 392p.
- 김천수, 이은용, 배대석, 김경수(1993) : 정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석, J. of Korean Society of Engineering Geology, Vol.2, No.2, 149-165p.
- 한국원자력연구소(1989) : 구조거동 및 지질·수문특성연구-편마암지역의 불연속면 체계 특성, KAERI/RR-894/89/GE, 1989.
- 한국원자력연구소(1994) : 자연방벽안전성연구, KAERI-NEMAC/RR-124/94.
- 한국원자력연구소(1995) : 방사성폐기물처분기술개발, 자연방벽특성평가기술개발, KAERI-NEMAC/RR-154/95.
- Attewell, P. B. & Farmer, I. W.(1976) : Principles of Engineering Geology, Chapman and Hall, London.
- Dershowitz, W.S. & Roberd, W.J.(1990) : "Methodology for evaluation of exploration strategies : Golder Associates report 883-1577 prepared for NAGRA, Baden, Switzerland.
- Doe, T.W.(1995) : Personnel communication
- Doe, T.W. & Geier, J.E.(1990) : Interpretation of fracture System Geometry Using Well Test Data, Stripa Project 91-03, SKB, Stockholm.
- Einstein, H.H. & G.B.Baecher, (1983) : "Probabilistic and statistical methods in engineering geology-Specific methods and examples(Part I : Exploration)", Rock Mech. & Rock Eng., Vol. 16, pp.39-72.
- Geier, J.E., Lee, K., Dershowitz, W.S. and Sharp, G (1990) : Strip Project-Prediction of Inflow into the D-hole at the Strip mine, TR 90-44, Golder Associates Inc.
- Golder Assoc. (1992) : FracMan Version 2.3 "Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation", Golder Assoc. Redmond Washington.
- Golder Assoc.(1994) : "FracMan-Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation(Version 2.306)".
- Griffith, A.A.(1921) : The phenomena of rupture and flow in solids : Phil. Trans. Royal Soc. London, A221, 163-198.
- Grindrod P, Herbert A W., Roberts D L, & Robinson P C(1992) : NAPSAC Technical Document. AEA D & R report 0270.
- Huitt, J. A. & Priest, S. D.(1955) : "Fluid Flow in Fractures", Amer. Inst. Chem. Eng. Jr., Vol.2, pp.259-264.
- Irwin, G.R.(1958); Fracture, in Flugge, S., ed., Encyclopedia of physics, Springer-Verlag, Berlin, 551-590.
- Kang, P.C(1979) : "Geological analysis of landsat imagery of South Korea (1)", J. Geol. Soc. Korea, Vol.15, pp.109-126, pp.181-191.
- Koch, G.S.Jr. & R. F. Link(1971) : "Statistical analysis of geological data", Dover Pub., Inc., New York, 375p.
- Kulander, B.R., Barton, C.C, & Dean, S.L.(1979); The application of fractography to core and outcrop fracture investigation, rep. to U.S.D.O. E., Morgantown Energy Technology Center, METC/SP-79/3, 174pp.
- Nelson, R. A.(1985) : Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs, Gulf Pub. Co., Book Division, Huston, Teaxas, 320p.
- OECD(1993) : OECD/NEA INTERNATIONAL STRIPA PROJECT, OVERVIEW VOLUME 2, NATURAL BARRIERS, Paul Gnirk.
- Pahl, P.J.(1981) : "Estimating the mean length of discontinuity traces", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.221-228.
- Parsons, R. W.(1966) : "Permeability of Idealized Fractured Rock", Soc. Petrol. Eng. Jr., June, 1966, pp.126-136.
- Priest, S.D. & J.A.Hudson(1976) : "Discontinuity spacings in Rock", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135-148.
- Priest, S.D. and J.A.Hudson(1981) : "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.183-197.
- Rouleau, A. & J.E.Gale(1985) : "Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, pp.353-367.

Sharp, J. S., Maini, Y. N. T., & Brekke, T. (1972) : "Evaluation of Hydraulic Properties of Rock Masses", 14th U.S. Symposium on Rock Mech., Pennsylvania, pp.481-500.

Snow, D. T.(1965) : "A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media", Ph.D. Dissertation, Univ. of California.

Tsang, Y.W. & Tsang, C.F.(1987) : Channel Model of Flow Through Fractured Media, Water Resources Research, Vol.23, pp.467-489.

Warren, J.E. and Price, H.S.(1961) : "Flow in Heterogeneous Porous Media," Soc. Petrol. Eng. Jour., September 1961, pp.153-169.

Witherspoon, P.A., Wang, J.Y.S., Iwai, K & Gale, J.E.(1980) : Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resour. Res., 16(6), pp.1016-1024.

배대석, 김천수, 김경수
한국원자력연구소 부설원자력환경관리센터
대전광역시 유성구 덕진동 150번지, 305-353
TEL : 042) 868-2030, 2062, FAX : 042) 861-4824

송무영
충남대학교 자연과학대학 지질학과
대전광역시 유성구 궁동 220번지, 305-764
TEL : 042) 821-6423, FAX : 042) 823-3722

김중렬
한국자원연구소
대전광역시 유성구 가정동 30번지, 305-350
TEL : 042) 868-3178, FAX : 042) 861-9720