

화강암지역의 암반블록규모 단열체계 분포특성 연구

김경수¹⁾, 배대석²⁾, 김천수¹⁾

Characterization of the Spatial Distribution of Fracture System at the Rock Block Scale in the Granitic Area

Kyung-Su Kim, Dae-Seok Bae and Chun-Soo Kim

Abstract. To assess deep geological environment for the research and development of high-level radioactive waste disposal, six boreholes of 3" in diameter were installed in two granitic areas. An areal extent of the rock block scale in the study sites was estimated by the lineament analysis from satellite images and shaded relief maps. The characterization of fracture system developed in rock block scale was carried out based on the acoustic televiewer logging in deep boreholes. In the Yuseong site, the granite rock mass was divided into the upper and lower zones at around -160m based on the probabilistic distribution characteristics of the geometric parameters such as orientation, fracture frequency, spacing and aperture size. Since the groundwater flow is dependent on the fracture system in a fractured rock mass, the correlation of the fracture frequency and cumulative aperture size to the hydraulic conductivity was also discussed.

KeyWords: Fractured Rock Mass, Rock Block Scale, Lineament, Distribution Characteristics of Fracture System, Groundwater System

초 록. 고준위방사성폐기물 처분연구의 일환으로 대전 유성과 강원 고성 지역의 화강암 분포지역에 심부지질환경 조사용으로 6개의 시추공이 설치되었다. 연구지역 주변의 평균적인 암반블록규모는 위성영상과 음영기복도에서 추출된 선구조로서 산출되었으며, 암반블록규모 내의 단열체계 분포특성 해석은 시추공 내 초음파 텔레뷰어 검층을 통하여 이루어졌다. 동일 불연속면체 내에서 단열체계 기하학적 인자 중 방향성, 간격, 틈의 크기 등에 대한 수직적 변화 특성과 확률분포특성을 해석한 결과, 유성 지역의 경우 -160 m 부근을 경계로 상하부 영역으로 구분할 수 있었다. 단열암반에서 지하수의 흐름은 단열분포특성에 우선적으로 지배되므로 이에 대한 상관관계도 검토되었다.

핵심어: 단열암반, 암반블록규모, 선구조, 단열체계 분포특성, 지하수체계

1. 서 론

지하에 설치되는 각종 시설물의 안전성에 영향을 미치는 요인으로 수리지질학적인 특성이 우선적으로 고려되는 대표적인 시설에는 방사성폐기물처분시설과 지하유류비축시설을 들 수 있다. 전자는 주요 지하수유동으로부터 충분히 격리되어야 하는 조건, 후자는 안정적인 수동력학적 수밀성이 확보되어야 하는 조건이 시설 성능의 기본요건¹⁾이기 때문에 투수성 지질구조는 이들

시설의 안전성에 직접적인 영향을 미치게 된다.

괴상의 결정질암반에서 지하수의 흐름 특성을 부지 규모(site scale) 또는 암반블록규모(rock block scale)의 관점에서 볼 때, 그 흐름은 단열망(discrete fracture network)의 분포특성에 지배된다(이하 암반에 분포하는 모든 불연속면에 대하여 단열이라 한다). 이때 수리학적으로 연결되지 않는 암반매질은 불투수성 영역으로 간주되므로 투수성 단열(conductive fracture) 및 단열대(fracture zone)를 포함하는 암반 전체를 등가 다공성 매질(equivalent porous medium)로 정의하기에는 무리가 따른다. 이러한 자연현상을 수치적으로 모사, 해석하기 위하여 근자에 이르러는 단열망 유동 개념^{2,3)} 또는 이와 등가 다공성 매질 개념을 혼합된 형태로

¹⁾정회원, 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야 책임연구원

²⁾한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야 책임연구원

접수일: 2002년 8월 26일

심사 완료일: 2002년 9월 12일

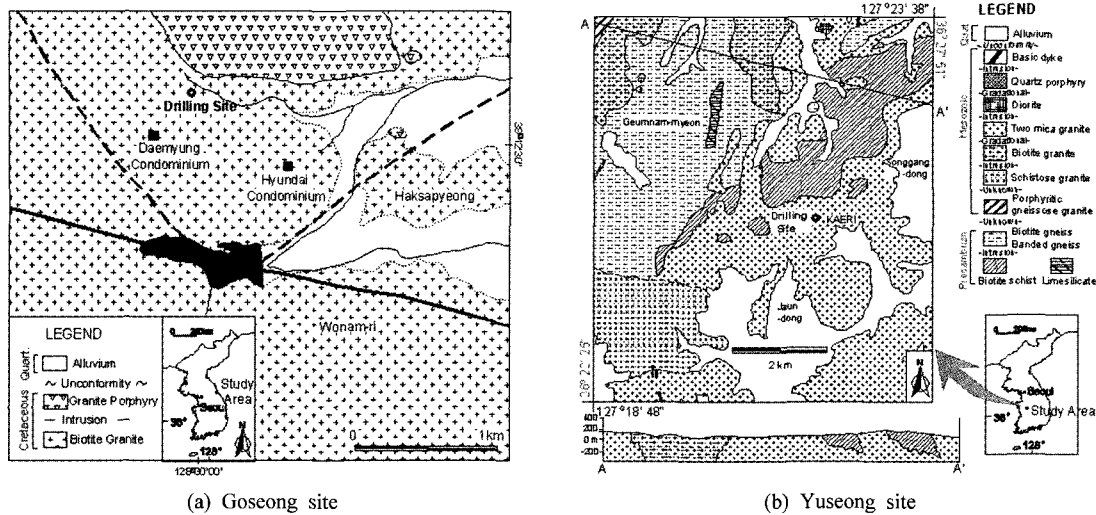


Fig. 1. Geologic map of the study sites.

모사할 수 있는 모델⁴⁾이 적용되고 있다. 이러한 수치모델이 적용되려면 대상부지에 분포하는 단열체에 있어서 위치와 규모를 정의할 수 있을 정도의 대규모 단열대에 대하여는 결정적 정보가, 중·소규모의 단열들에 대하여는 확실적인 대표값이 결정되어야 한다.

본 연구는 국내 고준위방사성폐기물 처분연구를 전담 수행하고 있는 한국원자력연구소가 2000년부터 2002년까지 3년 간에 걸쳐 우선 연구대상 매질인 화강암으로 구성된 연구지역을 대상으로 제반 지질환경특성을 연구하는 프로그램의 일부분으로, 화강암이 분포하는 2개 연구지역(강원도 고성, 대전 유성; Fig. 1)에 설치된 조사시추공에 대하여 초음파 텔레뷰어(BHTV)를 이용하여 암반블록규모(rock block scale)에서의 단열체계의 분포특성을 해석하는데 목적이 있다. 이 연구의 결과는 등연속체매질로서의 화강암 단열암반의 수리지질 단위원의 정의와 각 층에서의 유효수리전도도 산출⁵⁾을 위한 기초자료, 단열개념의 지하수유동 모델링을 위한 기초자료, 또한 고준위방사성폐기물의 처분 동굴과 처분공(deposition hole) 배열의 설계의 입력자료로도 이용된다.

2. 연구지역

연구지역은 강원도 고성과 대전광역시 한국원자력연구소 부지로서 모두 중생대의 화강암이 분포하는 지역이다.

고성 지역의 지질은 흑운모화강암으로 이루어져 있으며(Fig. 1(a)), 과거 석산으로 개발되었던 곳으로서 단열

의 발달이 거의 없는 괴상의 암반에 해당된다. 모양인 흑운모화강암은 조립질 및 등립질로서 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이며, 특징적으로 각섬석이 산출된다. 이 밖에 스피넬, 금홍석, 저어콘 및 적철석과 같은 광석광물들이 미량 존재하며, 흑운모의 녹니석화 작용과 장석류들의 견운모화 작용이 관찰된다. 흑운모화강암내 사장석은 전형적인 알바이트 쌍정을 보여주며 누대구조를 보여주기도 한다. 또한 지표상에서 풍화되어 산출되는 부분은 대부분의 장석이 부분적으로 견운모화 되고 있는 양상을 보이며 흑운모는 녹니석화 되어있고 흑운모 주위에 2차적으로 생성된 다수의 불투명광물이 존재한다⁶⁾. 흑운모화강암 이외에 시추지역의 서남부에는 흑운모편마암이 분포하기도 하며 흑운모화강암과의 경계는 점이적이다. 지표의 노두에서 채취한 흑운모화강암의 전암에 대한 XRD분석결과는 주로 석영, 흑운모, 사장석, 미사장석이 감정된 이외에 지표환경 하에서의 풍화산물로 보여지는 카올린 광물이 소량 확인되었다.

유성 지역내 시추위치의 지질은 중립질 복운모화강암으로 국지적으로는 미약하나마 편상조직을 보이기도 하며, 연구지역 남서부에 분포하는 편상화강암과의 관계는 불명확하다(Fig. 1(b)). 본 지역의 암반은 고성 지역에 비하여 단열이 많이 발달한 전형적인 단열암반의 특성을 갖는다. 대전도쪽에서는 편상화강암을 주라기의 편마상 화강암으로 보았고 복운모화강암과는 동일 마그마에서 유래된 것으로 보았다⁷⁾. 이들은 중립질로서 편리의 방향이 주변의 변성퇴적암류의 편리방향과 일치한다. 시추지점의 복운모화강암에 대한 편광현미경

Table 1. Description of the boreholes in the study sites.

Study site	Yuseong				Goseong		
	Borehole no.	YS-01	YS-02	YS-03	YS-04	GS-01	GS-02
Elevation (m)	82	81	81	91	105	105	
Depth (m)	500.0	200.9	300.2	350.6	500.0	351.8	
Borehole diameter (m)	0.078						
Casing (m)	15.2	15.2	15.2	12.0	1.5	4.1	
Weathered zone (m)	16.0	18.4	14.2	13.0	1.8	3.4	

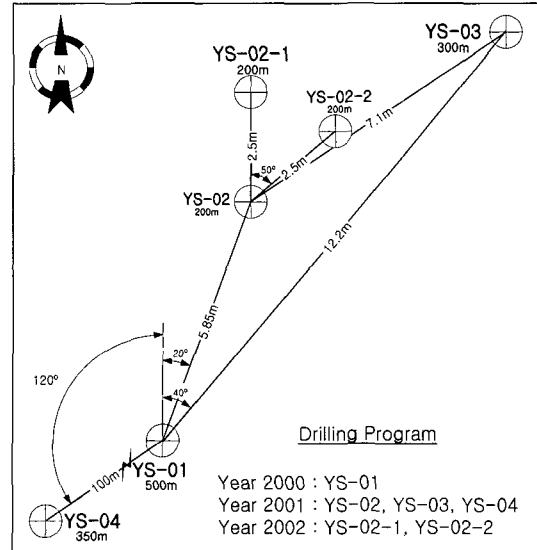
관찰 결과 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모 등이며 녹니석, 녹염석, 백운모가 2차광물로 관찰되고, 퍼어다이트가 드물게 관찰되기도 한다. 사장석과 미사장석은 쌍정이나 입자 경계를 따라서 부분적으로 견운모화 되어 있는 양상을 보이기도 하며 운모류는 벽개면을 따라 녹니석화 되어 있기도 하다. 특징적으로 석류석, 저어콘 및 황철석 같은 광석광물들이 미량 존재한다. 대체적으로 연구지역내 복운모화강암은 중립 내지 세립질이며 다수의 크고 작은 맥암류에 의해 관입을 당하였다. 이 외에 반암류들이 시추지점의 동남부에 분포하고 있으며 복운모화강암과는 상호 점이적 관계를 보인다.

3. 연구방법

3.1 선구조 분석

불연속면 조사는 통상 지질현장에서 절리 규모부터 단층대까지의 규모를 망라하여 이루어지고 있다. 조사된 자료는 규모에 따라 그 지질학적인 성격을 달리하기 때문에 그 모두를 확률론적 또는 결정론적으로 묶어서 표현할 수는 없다. 즉, 대상부지를 포함하는 주변지역에 분포하는 불연속면은 그 발달 규모에 따라서 나누어 기재되어야 하고, 그 결과 역시 독립적으로 설명되어야 한다.

이러한 배경에서 연구지역의 암반블록규모를 정의하기 위하여 주변지역에 분포하는 선구조를 분석하였다. 연구지역을 포함하는 광역지역에 대한 선구조 분석을 위하여 음영기복과 Landsat TM 위성영상을 이용하였다. 음영기복도를 이용한 선구조 분석은 태양 고도각을 45°로 고정시키고, 방위각을 0°에서부터 시계방향으로 45°씩 증가시키면서 음영대비에 의한 지형의 선형특성으로서 그 위치, 방향, 길이를 추출하였다. 위성영상을 이용한 선구조 분석은 밴드 필터링 기법과 공간강조 분석기법을 통하여 제작된 다양한 도면으로부터 이루어졌다.

**Fig. 2.** Layout of the boreholes in the Yuseong study site.

3.2 시추조사

단열체계의 분포특성을 포함하는 심부지질환경의 해석과 지하수체계의 장기적 모니터링을 목적으로 고성 지역에 2개, 유성 지역에 4개의 직경 3" 크기의 수직 조사공을 설치하였다(Table 1). 유성 지역의 YS-02-1/2 공은 2002년도 계획분으로 본 연구대상에서는 제외되었다(Fig. 2).

3.3 공내 단열 검증

시추공 각각에 대하여 단열분포특성 조사를 위하여 초음파 텔레뷰어(BHTV) 검층을 실시하였다. 검층 자료는 암반블록규모 내의 조사지점에서 얻어진 단열의 방향성이 동일한 불연속면체(discontinuity domain)의 구조적 특성을 갖는지를 먼저 파악한 다음, 지표부와 심부 영역을 구분하기 위한 수직적 진도변화 특성을 비교하였다. 즉, 지표 영역은 지질학적 변질, 변형, 풍화작용으로 인하여 단열체계 역시 심부환경과 다를 것이므로 고준위방사성폐기물 처분시설의 예상 심도(약 500 m)를 고려하여 지표부의 교란 영역을 제외한 심부 영역의 단열 파라미터에 대하여 그 확률분포특성을 해석하였다.

3.4 자료의 보정

임의 방향에 거의 평행하게 발달하는 하나의 단열조에서 단열빈도는 단열조의 수선 방향을 따라서 단위미터 당 교차되는 단열의 수이다. 그러나 시추조사에서 얻어지는 단열자료는 하나의 단열조에 대하여 수선 방향으로 조사된 것이 아니기 때문에 시추공의 굴진방향

에 따라 조사되는 자료의 수는 실제보다 적어지게 된다. 이러한 조사방향에 의한 표집편의(sampling bias)를 제거하기 위하여 적절한 보정을 하였다.

하나의 단열조와 시추공이 이루는 예각을 δ_i 라 하면 i 번째 단열조에 대한 가중측정수는 $1/\cos \delta_i$ 이 되므로, 이를 단일 단열에 적용하면 가중치(w)= $1/\cos \delta$ 로 간주될 것이다. 이때 X, Y 방향의 각각 동쪽(trend 90°)과 북쪽(trend 0°)에 수평이고 Z 가 이들에 수직방향(plunge 90°)인 3차원 직교좌표계에서 단열조 수선의 trend/plunge를 α_n/β_n , 시추공의 trend/plunge를 α_s/β_s 라 하면, 단열조 수선과 시추공과의 $\cos \delta$ 는 식 (1)로서 계산될 수 있다⁸⁾.

$$\begin{aligned} \cos \delta &= (\sin \alpha_n \cos \beta_n \sin \alpha_s \cos \beta_s) \\ &+ (\cos \alpha_n \cos \beta_n \cos \alpha_s \cos \beta_s) \\ &+ (\sin \beta_n \sin \beta_s) \\ &= | \cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s \\ &+ \sin \beta_n \sin \beta_s | \end{aligned} \quad (1)$$

가중치 계산을 위하여 상기의 방법을 이용할 경우 단열조 수선과 시추공이 이루는 예각이 거의 수직인 상황에서 공교롭게도 하나의 단열이 시추공과 교차할 경우 가중치는 매우 높아지게 될 가능성이 있다. 이론적으로 가중치는 1부터 50이상까지($\delta=89^\circ$ 일 때)의 범위를 갖게 되어 과대 해석되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 조사방향에 따른 오차의 보정은 Terzaghi(1965)에 의해 제안되었으며, 본 연구에서는 이 방법에서 발생하는 오류를 최소화하기 위해서 수정 Terzaghi 보정²⁾을 적용하였다.

$$N = \min([R/\cos \beta], U) \quad (2)$$

이때, R 은 0과 1 사이의 무작위 편차이고, β 는 단열조 수선과 시추공 간의 예각, 그리고 U 는 최대 보정계수로서 본 연구에서는 과도한 보정을 방지하기 위하여 7로 정의하였다.

시추공에서의 조사된 외견 단열간격(S_a)으로부터 실제 간격(S_i)은 식 (1)의 방향여현으로부터

$$S_i = S_a \cos \delta \quad (3)$$

와 같이 계산되었다.

3.5 접근방법

본 논문의 목적을 위하여 조사된 자료는 다음의 절차에 따라 해석되었다.

- (1) 선구조 분석에 의한 연구지역의 암반블록규모 정의
- (2) 단열 방향성 자료를 이용하여 조사공의 위치가 동일 불연속면체 내의 특성을 반영하는지를 확인
- (3) 수직적 빈도분포에 의한 심부 암반의 영역 결정
- (4) 단열유형별(closed type/open type) 파라미터의 확률적 분포특성 해석

4. 연구결과

4.1 선구조 분포특성

해석 영역 내에서 인지되는 선구조는 Fig. 3의 음영기복도에 도시하였다. 고성 지역 주변의 선구조의 주 방향은 ENE 방향이고, EW와 NS 방향계열의 선구조가 소수 분포한다. 전체 선구조의 평균 방향은 $N82^\circ E$ 이다. 이들의 평균 연장길이는 약 2.5 km이고 이웃하는 선구조 간의 분포간격은 약 0.9 km이다(Table 2).

유성 지역 주변의 선구조의 주 방향은 NNE 방향이고, ENE 방향계열의 선구조가 소수 분포한다. 전체의 평균 방향은 $N56^\circ E$ 이다. 이들의 평균 연장길이는 약 2.11 km이고 이웃하는 선구조 간의 분포간격은 약 1.1 km이다.

상기와 같이 연구지역 주변의 광역 선구조의 분포특

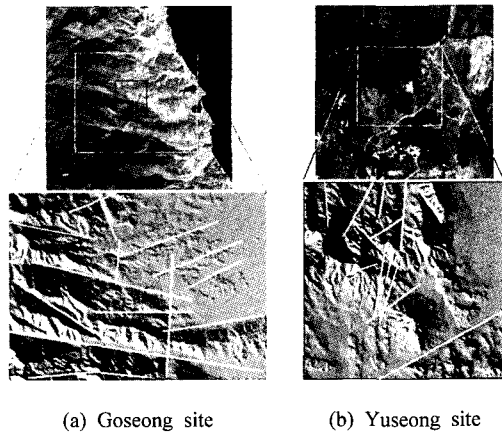


Fig. 3. Lineament analysis around the study sites.

Table 2. Statistics of the lineaments around the study sites.

Study site	Goseong	Yuseong
Interpretation area (km)	13 x 11	6.5 x 6
Population	15	14
Mean length (km)	2.5	2.1
Mean spacing (km)	0.9	1.1

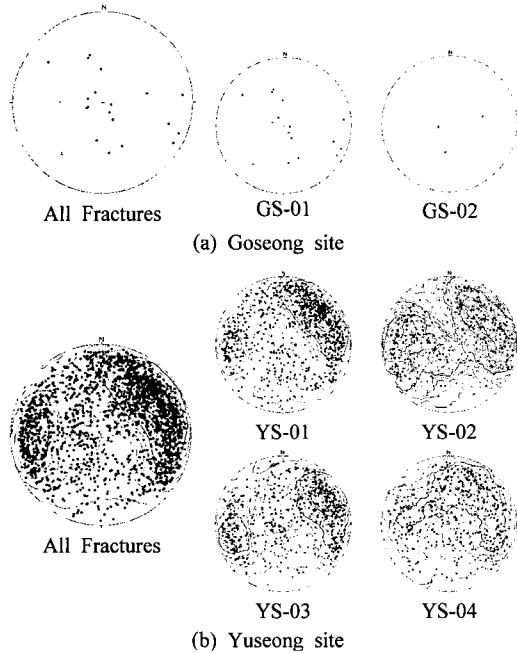


Fig. 4. Stereographic pole plot of the fractures from the boreholes.

성은 발달 방향을 제외하고는 연장길이나 분포간격에서 큰 차이를 보이지 않는다. 이들 선구조는 대부분 지형적인 계곡을 따라 선상으로 분포하는 것으로서, 분석영역 내에서 선구조로 경계를 이루는 암반블록규모는 약 1 km²이다.

4.2 단열의 수평적 분포특성

고성과 유성 지역에 설치된 시추공들의 수평적 범위가

각기 동일 불연속면체의 구조적 특성을 반영하는지를 파악하기 위하여 각 시추공에서 얻어진 방향성 자료를 스테레오망에 투영하여 그 유사성을 검토하였다(Fig. 4).

고성 지역의 전체 자료를 살펴 보면, 1개 조의 NNE 방향의 고경사군과 2개 조의 저경사군으로 분류된다. GS-01공은 심도 500 m까지의 자료로서 단열조가 뚜렷하게 구분된다. 이와 달리, GS-02공은 350 m까지의 자료가 투영된 것으로서 고경사군의 단열이 확인되지 않았다. 이것은 서로 다른 패턴을 보여주는 것이라기 보다는 조사 심도에 따른 자료의 수에 의한 차이일 뿐, 양 조사공이 동일한 패턴을 갖는 것으로 판단된다.

유성 지역의 경우 전체 단열의 방향군은 NNE와 NW 주향의 고경사군과 무작위 방향을 보이는 저경사군으로 분류된다. 특히, NNE 주향의 고경사군은 동일한 주향을 가지면서 경사각이 동쪽과 서쪽으로 양분되는 특성을 보이는 반면에 NW 주향의 고경사군에 속하는 단열들의 경사는 대부분 SW 방향으로 분포함을 알 수 있다. 4개 시추공에서의 단열 방향군은 전체 자료와 대동소이하다. 다만, YS-04 공은 그 분산도가 큰 것이 특징이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구 대상의 시추공들은 각기 지역에서 동일 불연속면체 내에 위치하는 것으로 판단되며, 단열분포특성에 지배되는 지하수체계 역시 물리적으로 동일한 특성으로 대표되는 영역 내에 있다고 볼 수 있다.

4.3 단열의 수직적 분포특성

단열체계의 수직적 변화양상은 단열빈도로서 가능할 수 있다. 고성 지역의 심도에 따른 단열빈도의 변화양상은 Fig. 5(a)와, 그리고 개구상 단열의 분포 양상은 Fig. 6과 같다. GS-01 공에서는 개구상 단열이 인지되

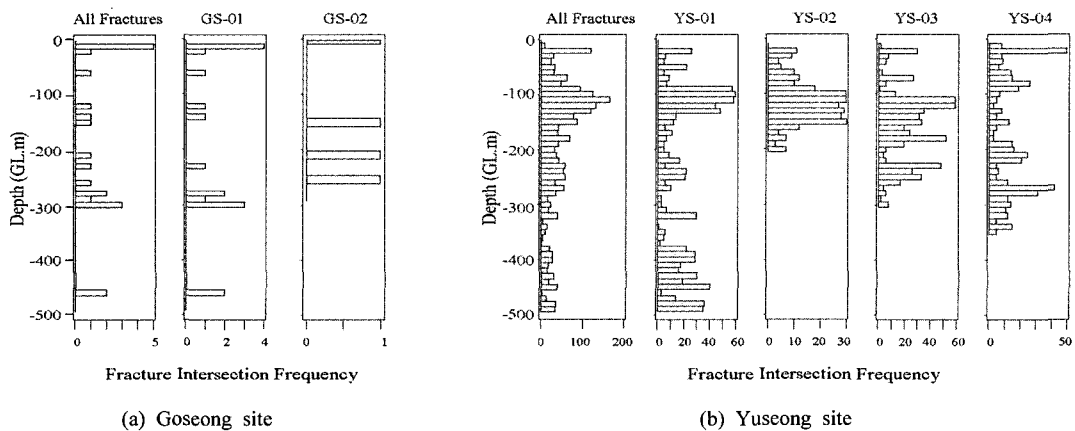


Fig. 5. Variation of the fracture frequency per every 10 m along the depth in the study sites.

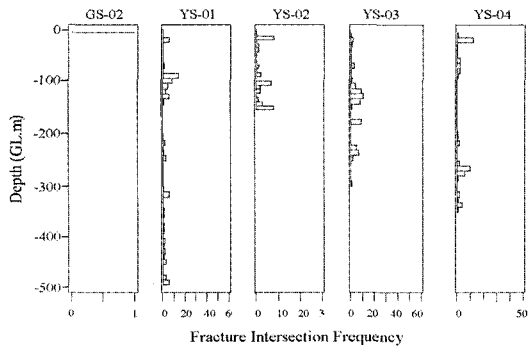


Fig. 6. Variation of the open and semi-open type fracture frequency along the depth in the study sites.

지 않았다. 전체 자료를 보면, 지표부에서 우세하게 분포하고, 하부로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 이 지

역은 과거 석산 개발이 이루어졌을 정도로 단열의 발달이 거의 없는 괴상의 암반이기 때문에 통계적 계산에 의미를 둘 수 없다. 전체적으로 심도 -300 m 부근에서 급격히 빈도가 감소하는 것을 알 수 있지만, 조사방향에 의한 오차를 보정한다해도 자료의 수가 워낙 적기 때문에 이를 근거로 수직적인 영역을 구분하기란 불가능하다. 따라서, 본 지역은 지표부에서 지하 -500 m까지를 동일한 영역으로 보는 것이 타당하다고 사료된다.

유성 지역에서 심도의 증가에 따른 단열빈도의 감소 경향은 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5(b)). 전체 자료를 볼 때, YS-02, YS-03, YS-04 공의 자료가 -200 m ~ -350 m 까지인 점을 고려하면 감소 경향은 미약한 것으로 볼 수 있으나, 이들 시추공이 YS-01 공과 동일한 심도라면 상호 유사한 경향을 가질 것으로 판단된다. 4개 시추공에서 인지된 개구상 단열들도 그 수는 많지 않지만 특히, YS-01 공에서 뚜렷한 감소경향을 보인다. YS-01 공

Table 3. Summarized statistics of the fracture sets in the study sites.

Study site	Set		1	2	3	Total	
Goseong	Raw data	Fracture type (%)	Fracture zone	-	-	-	-
			Opened	-	-	-	-
			Semi-opened	1 (8.3)	-	-	1 (4.8)
			Closed	9 (75.0)	5 (100)	4 (100)	18 (85.7)
			Aplite zone	2 (16.7)	-	-	2 (9.5)
	Proportion (%)		12 (57.1)	5 (23.8)	4 (19.0)	21 (100)	
	Mean attitude	Dip direction	23.9	281.9	153.3		
		Dip angle	17.5	69.4	45.0		
	Fisher k		9.77	15.44	19.03		
	Modified Terzaghi corrected data	Corrected number of data (%)		13 (48.1)	10 (37.1)	4 (14.8)	27 (100)
Mean attitude		Dip direction	27.1	285.9	153.3		
		Dip angle	20.9	74.9	45.0		
Fisher k		8.70	19.66	19.03			
Yuseong	Set		1	2	3	Total	
	Raw data	Fracture type (%)	Fracture zone	3 (0.4)	-	-	3 (0.1)
			Opened	17 (2.0)	9 (1.0)	15 (3.2)	41 (1.9)
			Semi-opened	89 (10.7)	75 (8.3)	23 (4.9)	187 (8.5)
			Closed	704 (84.5)	813 (89.3)	428 (91.3)	1,945 (87.9)
			Vein	20 (2.4)	13 (1.4)	3 (0.6)	36 (1.6)
	Proportion (%)		833 (37.7)	910 (41.1)	469 (21.2)	2212 (100)	
	Mean attitude	Dip direction	276.1	210.3	47.8		
		Dip angle	85.8	57.7	20.2		
	Fisher k		7.04	9.42	5.55		
Modified Terzaghi corrected data	Corrected number of data (%)		1,519 (44.9)	1,367 (40.4)	498 (14.7)	3,384 (100)	
	Mean attitude	Dip direction	274.9	208.4	49.8		
		Dip angle	87.3	63.5	23.1		
	Fisher k		7.67	9.17	5.95		

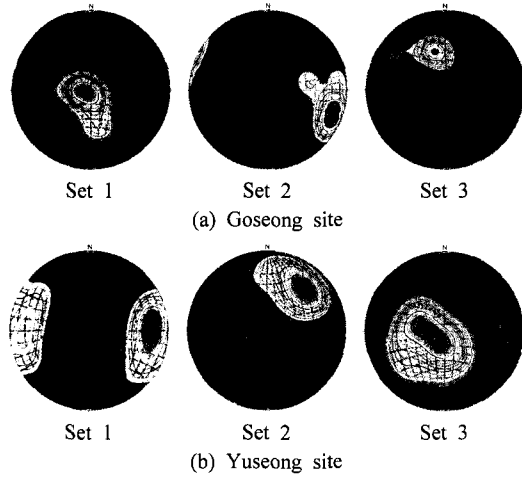


Fig. 7. Stereographic pole plot of each fracture set identified from FracMan ISIS module.

에서는 -104 m 부근에서 교차되는 단열대(N40°E/70°NE)와 그 주변의 파쇄구간에서의 단열특성이 가장 두드러진다. 이 단열대의 주향방향에 약간 우측으로 치우쳐 있는 YS-02와 YS-03 공에서도 단열대의 발달 양상을 보여주고 있다. 따라서, 유성 지역의 경우, 4개 시추공에서 검출된 단열빈도의 수직적 분포양상과 개구상 단열의 분포양상을 토대로 할 때, 상하부의 영역은 지표로부터 약 -160 m 지점을 기준으로 구분할 수 있다.

4.4 단열 파라미터의 확률적 분포특성

4.4.1 단열조

방향성 분석은 FracMan의 ISIS 모듈을 이용하여 분

석하였다²⁾. 고성 연구지역은 1개 조의 고경사군과 2개 조의 저경사군으로 분류되며, 모두 Fisher 분포를 따른다(Fig. 7(a); Table 3). 조사방향에 따른 Terzaghi 보정결과, 단열 개수는 약 29% 증가하였다. 투수성단열의 비중은 5% 미만으로 대부분이 닫힌 단열들로 구성되어 있다. 모암과 점이적 관계 관계를 보이는 세립질 aplite는 Set 1에 속하며, aplite 내에 발달하는 단열 역시 동일한 군에 속한다.

유성 연구지역의 경우, 전체 2,212개 단열의 방향은 NNE 주향(Set 1)과 NW 주향(Set 2)의 고경사군과 무작위의 저경사군(Set 3)으로 분류되며, 역시 Fisher 분포를 따른다(Fig. 7(b); Table 3). Terzaghi 보정결과, 단열 개수는 약 53% 증가(3,384개)하였는데, 이것은 고경사군의 단열조가 우세하게 분포하기 때문이다. 개구상 또는 반개구상 유형의 단열은 투수성 단열로서의 잠재성이 있는데, 이들이 차지하는 비중은 전체 중 약 10.5%로서, 단열조별로의 비중은 Set 1(13%), Set 2(9%), Set 3(8%)의 순이다. 분산지수 k는 밀집정도(clustering degree)를 지시하는 것으로 Set 2가 가장 높은 밀집정도를 보이고, 저경사군의 분산정도가 가장 크다.

유성 연구지역의 -160 m 하부 영역에 분포하는 단열들의 분석결과는 Table 4와 같다. 전체 단열자료(Fig. 7(b); Table 3)와 비교하면, Set 1의 빈도가 상대적으로 감소하는 특성을 보인다. 즉, Set 1은 상부 영역에서 우세하게 분포하고, 하부 영역에서는 오히려 Set 2군이 우세하게 분포하는 것을 알 수 있다. 특징적으로 준수평 단열군(Set 3)이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, Set 3는 지하 심부에서 화강암체 형성 이후 용기작용에 의한 응력제거 작용으로 형성된 단열군인 것으로 사료

Table 4. Summarized statistics of the fracture sets from lower zone in the Yuseong site.

Set		1	2	3	Total	
Raw data	Fracture type (%)	Fracture zone	-	-	-	-
		Opened	5 (1.4)	6 (1.2)	2 (1.3)	13 (1.3)
		Semi-opened	34 (9.5)	40 (7.9)	3 (1.9)	77 (7.5)
		Closed	310 (86.6)	454 (89.7)	154 (96.8)	918 (89.7)
	Vein	9 (2.5)	6 (1.2)	-	15 (1.5)	
	Proportion (%)		358 (35.0)	506 (49.5)	159 (15.5)	1,023 (100)
Mean attitude	Dip direction	281.6	207.3	58.8		
	Dip angle	78.8	59.8	27.7		
Fisher k		7.42	8.99	5.85		
Modified Terzaghi corrected data	Corrected number of data (%)		614 (38.9)	797 (50.5)	168 (10.6)	1,579 (100)
	Mean attitude	Dip direction	282.6	205.4	56.3	
		Dip angle	81.6	65.2	29.4	
	Fisher k		7.70	8.96	5.65	

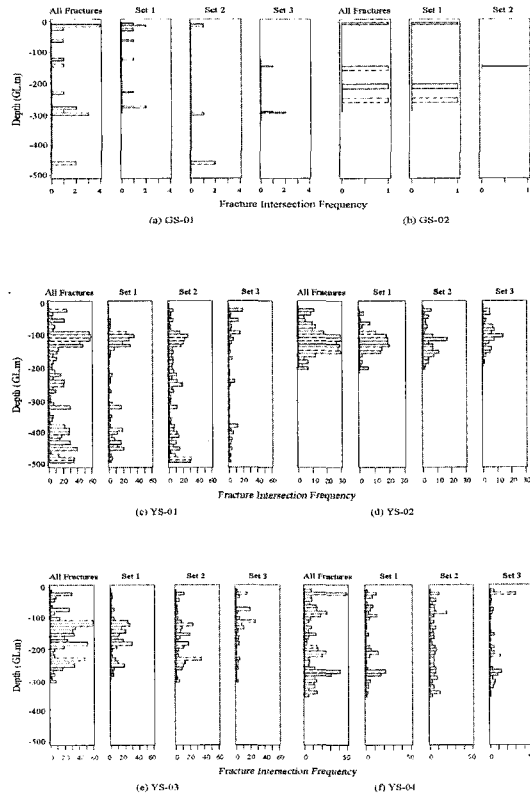


Fig. 8. Vertical variation of the fracture intersection frequency of each fracture set in the study sites.

된다. 개구상 단열의 비중도 10.5%에서 8.8%로 감소되

며, 단열조 중에서는 Set 1이 약 11%를 점하여 하부 영역에서도 전체 자료와 유사한 경향을 유지한다. 전체 잠재 투수성 단열 중 반개구상 유형의 비중은 약 85%에 달한다.

4.4.2 심도에 따른 단열조의 발달 빈도

고성 지역에서는 심도의 증가에 따라 단열빈도는 감소 추세이다. 고경사각 단열보다는 준수평단열들(Set 1과 Set 3)의 발달이 특징적이며, 이들 판상 절리는 -300 m 이하의 심도에서는 확인되지 않았다(Fig. 8(a,b)). 가장 굴착심도가 깊은 GS-01의 -300 m 하부에서는 Set 2의 단열만 분포한다. 심도에 따른 분포 양상도 규칙성이 없으며, 잠재 투수성 단열은 지표부에 한정되어 나타난다(Fig. 6).

유성 지역의 경우, 준수평단열조인 Set 3은 심도의 증가에 따라 감소 경향이 두드러지며, 고경사단열조인 1과 Set 2는 우열없이 비슷한 발달빈도를 보인다(Fig. 8(c,d,e,f)). 개구상 단열 역시 고성 지역과 유사하게 심도의 증가에 따라 점진적인 감소 추세를 갖는 특성을 보인다(Fig. 6). 유성 지역에는 -104 m 부근의 단열대 외에도 -200 m~-300 m 구간과, -500 m 부근에도 국부적으로 단열이 밀집되어 분포하는 것으로 사료된다. 한편, 유성지역에서 굴착심도가 가장 깊은 YS-01 공의 단열조별 빈도변화를 살펴 보면, 저경사군(Set 3)에 속하는 단열들의 감소경향이 가장 뚜렷하고, 고경사군의 Set 1과 Set 2가 전체적인 빈도변화를 주도하는 것을 알 수 있다.

4.4.3 단열 간격

식 (3)에 의해 보정된 간격치는 Fig. 9와 같이 확률그

Table 5. Corrected true spacing values in the Yuseong study site.

Data	Spacing (m)	Set 1	Set 2	Set 3
All data	$\mu \pm \sigma$ of Lognormal PDF (e^μ)	-2.72 ± 1.65 (0.07)	-1.37 ± 1.54 (0.25)	-0.52 ± 1.75 (0.60)
	Arithmetic Mean ± SD	0.29 ± 0.79	0.70 ± 1.15	2.55 ± 5.64
	(*) λ	1.13	1.01	0.37
	Min	0.001	0.001	0.004
	Median	0.07	0.26	0.52
	Max	8.76	10.29	50.7
Lower zone	$\mu \pm \sigma$ of Lognormal PDF (e^μ)	-2.49 ± 1.74 (0.08)	-1.32 ± 1.49 (0.27)	0.15 ± 1.71 (1.17)
	Arithmetic Mean ± SD	0.39 ± 0.97	0.70 ± 1.08	4.12 ± 7.47
	(*) λ	1.16	1.50	0.32
	Min	0.001	0.002	0.03
	Median	0.07	0.27	1.29
	Max	8.76	9.07	50.7

(*) λ means the fracture frequency calculated by FracMan ISIS module. See Table 3.

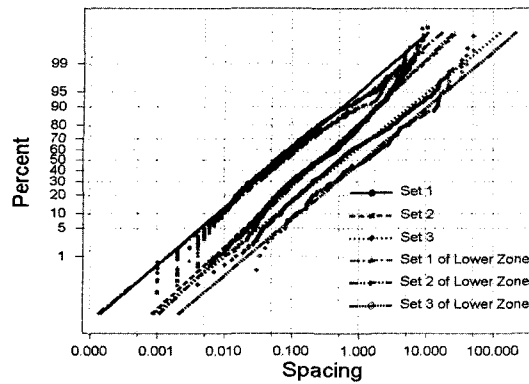


Fig. 9. Lognormal probability plot for the corrected spacing values in the Yuseong study site.

래프에 도시한 결과, 대수정규분포에 수렴되었다. 유성 지역의 경우 전체 자료와 하부 영역의 자료를 구분하여 분석하였다. Fig. 9에서 Set 1과 Set 2는 하부 영역에서 큰 차이를 보이지 않으나, Set 3는 간격이 더 커지는 것을 알 수 있다. Table 5에서 대수정규분포일 때 전체 단열 간격의 평균값은 단열조별로 0.07 m~0.6 m의 범위를 갖는다. 하부 영역은 0.08 m~1.17 m의 범위로 상부 영역보다 약간 넓게 계산된다. 산술평균에 의한 간격치는 전체자료가 0.29 m~2.55 m, 하부 영역이 0.39 m~4.12 m로 전자의 평균값보다 약 3배 이상 크게 계산된다.

그러나, 식 (2)에 의한 보정결과로서 단열빈도를 계산해 보면, 전체자료는 0.37/m~1.13/m, 하부 영역은 0.32/m~1.50/m로 앞서의 보정결과와 많은 차이가 난다. 단열빈도값을 산술적인 간격값으로 변환하면 전자는 0.89 m~2.71 m, 후자는 0.66 m~3.15 m로 계산되어 식 (2)에 의한 산술평균값보다 최대 3배까지 차이를 보인다. 즉, 식 (3)에 의한 보정 간격치는 인접 단열간의 이격거리 각각에 대하여 보정을 한 결과이므로 과다 보정을 초래할 수 있다는 것이다. 위 분석결과로서, 유성 지역의 단열 간격은 대수정규 확률밀도함수를 따르고, 이때

하부 영역에서 단열간격의 산술평균값은 Set 1이 0.86 m, Set 2는 0.66 m, 그리고 Set 3는 3.15 m이다. 그리고, 하부 영역에 분포하는 개구상 단열들의 단열조별 간격은 9.6 m(Set 1), 11.0 m(Set 2), 142 m(Set 3)로서 상당히 낮은 밀도를 보인다.

한편, 고성 지역의 자료는 모집단의 수가 작아 통계분석이 가능치 않은데, 산술평균 간격치는 65.4 m(Set 1), 85 m(Set 2), 212.5 m(Set 3)이다.

4.4.4 단열 틈의 크기

단열 틈(aperture)은 지하수의 포화 유무와 관계없이 개구상, 부분 충전된 단열면의 수직 거리를 말하므로⁹⁾, 단열면의 수직 이격거리를 계산하기 위하여 AperSa 프로그램¹⁰⁾을 이용하였다.

고성 지역은 -300 m 하부로 갈수록 급격히 작아지는 경향을 보이며, 유성 연구지역의 경우는 감소 경향이 뚜렷하지 않지만, -350 m 하부에서 약간 감소하는 경향을 보인다. 단열 틈의 크기의 확률밀도함수는 전형적으로 대수정규분포로 수렴된다 (Fig. 10). 고성 지역의 단열 틈의 크기는 대수정규분포 평균값이 약 0.33 mm, 산술평균은 약 1 mm이다.

유성 지역의 전체 단열, 하부 영역, 그리고 잠재 투수성 단열에 대한 대수정규분포의 평균값은 각각 0.84 mm, 0.75 mm, 6.94 mm이고, 산술평균값은 각각 2.34 mm, 1.49 mm, 13.1 mm이다. 하부 영역에 분포하는 단열 틈의 크기는 Table 6에 정리하였다. 유성 지역에서 심도에 따른 단열 틈의 크기 변화는 Fig. 11과 같다. 전체적인 경향은 심도의 증가에 따라 단열 틈의 크기가 뚜렷하게 감소하는 것을 보여 준다.

5. 토의 및 결론

2개 연구지역에서 조사된 단열체계의 분포특성은 단열암반의 투수성과 직접적인 관계를 갖게 될 것이며, 이와 민감한 인자로서 시험구간 내의 단열의 수와 단열 틈의 누적 크기를 고려할 수 있다. 고성 지역은 단열의 발달이 미약한 관계로 투수성 시험이 충분히 이루어지

Table 6. Summarized statistics of aperture size from lower zone in the Yuseong study site.

Aperture (mm)	All fractures	Set 1	Set 2	Set 3
$\mu \pm \sigma$ of Lognormal PDF (e^μ)	-7.20 ± 1.19 (0.75)	-7.33 ± 1.23 (0.66)	-7.20 ± 1.16 (0.75)	-6.85 ± 1.12 (1.06)
Arithmetic Mean ± SD	1.49 ± 2.48	1.43 ± 2.72	1.37 ± 1.88	1.97 ± 3.36
Min	0.01	0.01	0.02	0.03
Median	0.76	0.64	0.79	1.29
Max	28.50	28.50	22.40	25.9

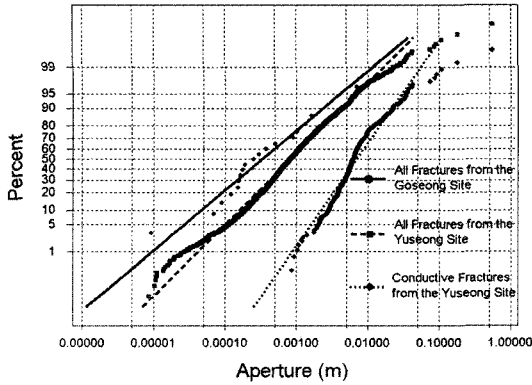


Fig. 10. Lognormal probability plot for aperture size from lower zone in the Yuseong study site.

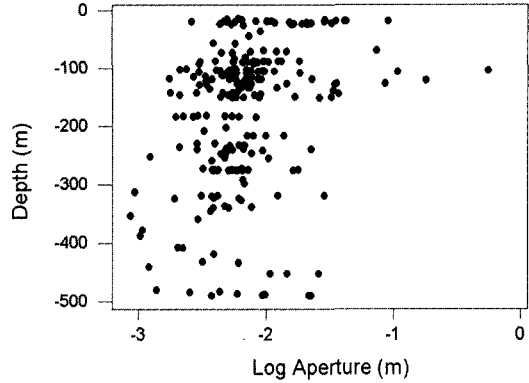
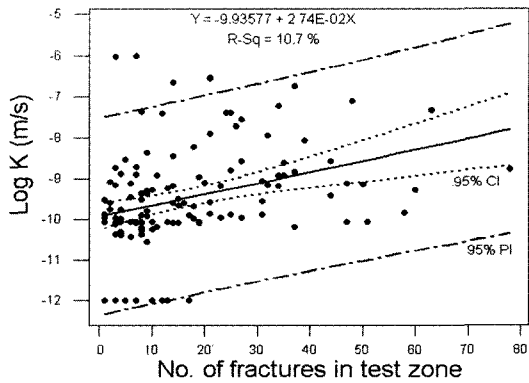
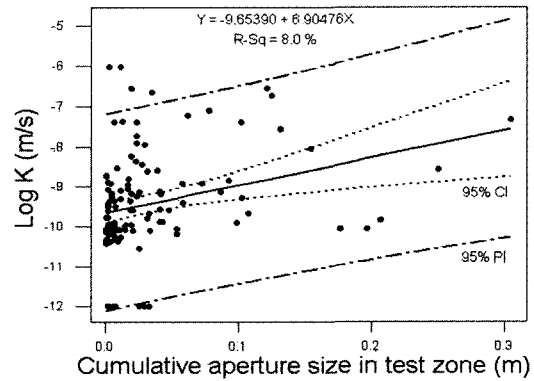


Fig. 11. Vertical variation of the conductive fracture's aperture size in the Yuseong study site.



(a) Log K vs. no. of fractures



(b) Log K vs. aperture size

Fig. 12. Relations of the hydraulic conductivity to the fracture intersection frequency(a) and the cumulative aperture size(b) in the test section.

지 않았으며, 유성 지역에서는 10 m 간격으로 정압주입/수위강하 시험이 이루어졌다⁵⁾.

전체 수리전도도 자료에 대한 시험구간별 단열의 수와의 누적 단열 틈의 크기의 직선 회귀분석 결과, 각각 10.7%와 8%의 미약한 상관관계를 보여 단열의 수가 투수성에 더 민감한 것으로 나타났다. 유성 지역에서 이렇게 투수성과 단열인자간의 상관관계가 적은 것은 첫째, 유성 지역에 발달한 단열들은 대부분 2차 광물로 충전되어 있으며, 둘째, 초음파 텔레뷰어 이미지를 이용하여 AperSa 프로그램⁹⁾으로 계산된 단열 틈의 크기는 시추 작업에 의한 스킨 효과에 크게 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 서론에서 언급한 바와 같이 본 단열체계의 분포 특성 연구결과는 등연속체매질로서의 화강암의 수리지질 단위층의 정의에 직접 이용된다. 이와 관련, 김경수

외⁵⁾는 유성 지역의 4개 시추공에서 해석된 수리전도도의 수직적 분포를 종합하여 지표부를 포함하는 상부 수리지질 단위층과 하부 수리지질 단위층의 경계는 대략 -160 m 부근으로 설정될 수 있음을 밝혀, 단열체계의 수직적 분포특성에 의한 결과를 뒷받침하는 것으로 사료된다. 즉, 본 암반블록규모의 단열체계는 동일 불연속면체 내에서의 지하수 흐름을 일차적으로 지배하는 요인임을 알 수 있다. 이것은 유성 지역에서 이루어진 10 m 일정 구간별 정압주입시험을 통한 수리전도도 산출결과와 해당 시험구간에 분포하는 단열의 빈도와 누적 틈의 크기에 대한 분석결과, 이들 각각은 양의 상관관계를 갖는 것에서도 뒷받침된다(Fig. 12). 유성 지역의 경우, 단열 빈도와 수리전도도 간의 상관관계가 누적 단열 틈의 크기와의 관계보다 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 이들 양자간의 상관계수가 비교적 낮은 이유

는 유성 지역처럼 단열광물이 풍부하게 충전된 암반의 투수성은 단열 빈도나 틈의 크기에 비하여 특정 개구상 단열의 투수성에 우선 지배되기 때문인 것으로 설명될 수 있겠다.

본 연구는 시추공에서 검출된 단열자료만을 대상으로 하였기 때문에 단열의 크기에 대한 정보는 파악되지 않았다. 단열의 길이 혹은 크기는 단열의 기하학적 인자 중에서 불확실성이 가장 크게 작용하는 것으로 향후 연구지역 주변 노두에 분포하는 단열을 대상으로 추가적인 조사가 필요하다.

고성 지역은 괴상의 화강암반으로 단열체계에 대한 확률적 해석이 어려웠으며, 전형적인 단열암반의 특성을 보이는 유성 지역의 화강암에 대하여는 충분한 연구가 가능하였다. 하나의 불연속면체의 구조적 특성을 반영하는 암반블록규모의 단열체계 분포특성에 관한 연구의 결론은 다음과 같이 정리된다.

- 1) 연구지역을 포함하는 주변지역에 분포하는 선구조는 위성영상과 음영기복도를 이용하여 도출되었으며, 분석 영역 내에서 선구조로 경계를 이루는 암반블록 규모는 약 1 km²이다.
- 2) 고성 지역의 2개 시추공에서 검출된 단열은 1개 조의 고정사군과 2개 조의 저정사군으로 분류되고, 유성 지역의 4개 시추공에서 검출된 단열은 NNE 주향과 NW 주향의 고정사군과 무작위 방향을 보이는 저정사군으로 구성되어, 연구지역 내의 조사위치는 암반블록규모 내의 동일 불연속면체 특성을 반영할 수 있다.
- 3) 수직적 단열빈도의 변화로부터 고성 지역의 경우, 지표부에서 지하 -500 m 까지를 동일한 영역으로 보는 것이 타당하고, 유성 지역의 상하부 영역은 지표로부터 약 -160 m를 기준으로 구분할 수 있다. 하부 영역에서는 준수평단열군이 급격히 감소하고, 개구상 단열의 빈도는 Set 1이 상대적 우세를 보인다.
- 4) 유성 지역의 단열 방향군은 모두 Fisher 분포를 따르며, 밀집도는 Set 2가 가장 크고, Set 3가 가장 작다. 상하부 영역에서 개구상 단열의 비중은 각각 10.5%, 8.8%이다.

- 5) 단열 간격과 틈의 크기는 모두 대수정규분포를 따른다. 유성 지역 하부 영역의 보정된 단열간격의 산술 평균은 Set 1이 0.86 m, Set 2는 0.66 m, Set 3는 3.15 m이다. 동 영역의 단열 틈에 대한 대수정규분포 평균은 Set 별로 각각 0.66 mm, 0.75 mm, 1.06 mm이다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기연구개발 프로그램에 의거하여 수행되었다. 공내 단열 검증에 참여한 조성일 박사과정 연구생에게 감사드린다.

참고문헌

1. 김천수, 배대석, 김경수, 고용권, 송승호, 1997, 지하유류비축시설 수리안정성 평가방안, 대한지질공학회지, 7.3, 229-245.
2. Golder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation (Version 2.306).
3. Cliffe, K. A., Morris, S. T. and Wilcock, P. M., 1994, NAPSAC (Release 3.0) User guide, AEA Technology.
4. Hartley, L. J., 1996, CONNECTFLOW (Release 1.0) User guide, AEA Technology.
5. 김경수, 김천수, 배대석, 2002, 등연속체매질로서의 화강암 지역의 유효수리전도도 산출, 대한지질공학회지, 12.3 (in press).
6. 김경수, 배대석, 김천수, 박병윤, 고용권, 2001, 고성 및 유성지역 중생대 화강암의 단열체계 분포특성, KAERI/TR-817/2001, 한국원자력연구소, 80p.
7. 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 한국지질도 대전도폭(1:50,000) 및 도폭설명서, 자원개발연구소, 26p.
8. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman and Hall, 473p.
9. ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr., 15, 319-368.
10. KAERI & KIGAM, 1999, AperSa - APERTure Size Analysis program.

김 경 수



1986년 충남대학교 이과대학 해양학과
이학사
1989년 충남대학교대학원 지질학과
이학석사
2000년 충남대학교대학원 지질학과
이학박사
Tel: 042-868-2365
E-mail: kskim@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소
심부지질환경특성연구분야 책임연구원

배 대 석



1976년 경북대학교 문리과대학
지질학과 이학사
1990년 충남대학교대학원 지질학과
이학석사
1996년 충남대학교대학원 지질학과
이학박사
Tel: 042-868-2030
E-mail: ndsbae@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소
심부지질환경특성연구분야 책임연구원

김 천 수



1972년 서울대학교 이과대학 지질학과
이학사
1977년 Univ. Missouri-Rolla 이학석사
1984년 McGill Univ. 이학박사
Tel: 042-868-2063
E-mail: ncskim1@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소
심부지질환경특성연구분야 책임연구원