

화강암지역 암반블록규모의 단열체계특성과 유효수리전도도 해석

김 경 수
김 천 수
배 대 석
고 용 권

한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소

1. 서론

국내 고준위방사성폐기물 처분연구를 위하여 2000년부터 2002년까지 3년 간에 걸쳐 우선 연구대상매질인 화강암에 대하여 연구지역을 대상으로 제반 지질환경특성을 조사하도록 계획되었으며, 이로써 생산되는 지질, 수리지질, 지화학, 암반역학 자료들은 기준처분시스템 개발 및 방사선적 안전성 해석자료로 이용되도록 되어 있다.

본 연구는 2개 연구지역 (강원도 고성, 대전 유성; Fig. 1)에 설치된 조사시추공에 대하여 초음파 텔레뷰어 (BHTV)를 이용하여 암반블록규모(rock block scale)에서의 단열체계의 분

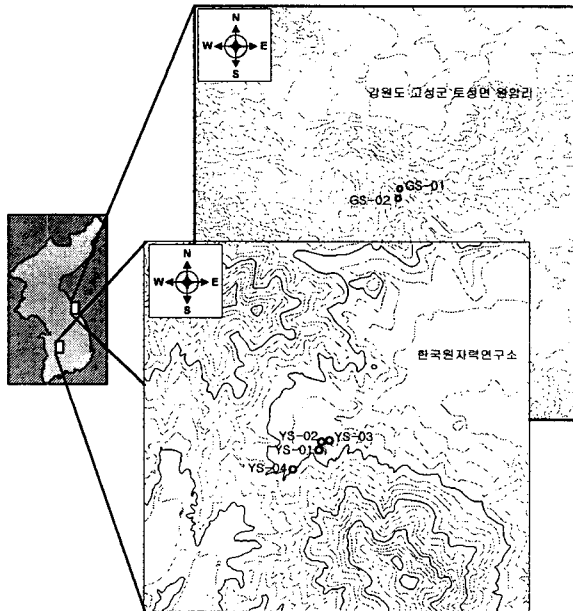


Fig. 1. Location of the study sites and boreholes.

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

Study Site	Borehole No.	Depth (m)	Elevation (m)
Goseong	GS-01	500	105
	GS-02	350	105
Yuseong	YS-01	500	82
	YS-02	300	81
	YS-03	200	81
	YS-04	350	91
Total		1,650	

포특성을 해석한 결과와 일정구간별 정압시험을 통하여 얻어진 유효수리전도도 해석결과에 관한 것이다. 본 연구의 결과는 고준위방사성폐기물의 처분 동굴과 처분공(deposition hole) 배열의 설계와 방사선적 안전성 해석코드의 입력자료로 이용될 것이다.

고성지역의 지질은 쥬라기 중립질 흑운모화강암으로 부분적으로 약 1m 이내의 폭을 갖는 aplite가 점이적으로 발달되어 있으며, 충전물질이 전혀 없는 신선한 단열들이 aplite에만 발달된 특성을 보인다 (김경수의, 2001). 한국원자력연구소 부지 내에 위치하는 유성연구지역의 지질은 쥬라기 중립질 복운모화강암으로서 국지적으로 미약한 편상조직을 보이거나 연구지역 남서부에 분포하는 편상화강암과의 관계는 불명확하다 (이상만 외, 1980).

2. 연구방법

심부지질환경 해석 및 장기적 모니터링을 목적으로 모두 6개의 NX 크기의 수직 조사공을 설치하였다 (Table 1; Fig. 1).

가. 단열조사

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

나. 수리시험

수리시험은 이중패커를 이용한 일정구간(3m~10m)별 단기 주입/강하시험 방법(short term injection/fall-off test)으로 시행되었다 (Fig. 2). 시험은 주입단계(injection phase)와 주입후 단계(fall-off phase)로 구분하여 각각 20분 내외로 계속되었다. 주입수는 연구지역의 지표수를 이용하였으며, 주입압력의 안정화를 위하여 약 20m~30m의 정압이 걸리도록 상부 표고에 물탱크를 임시로 설치하였다.

주입호스 선상에 설치되는 압력계는 0.1 kg/cm^2 까지 판독 가능한 유압 압력계를 사용하였다. 주입량의 정밀한 계측에 가장 중요한 유량계는 Gilmont Instruments 사의 rotameter를 계측범위별로 중첩하도록 제작되었다. 피압구간에서의 역류 현상을 방지하기 위하여 유량계 각각의 연결라인에 체크밸브가 설치되었다. 제작된 유량계의 사진은 Fig. 3과 같으며, 부착된 5개 조의 유량계 계측범위는 최대 22 l/min , 최소 1.0 ml/min 이다.

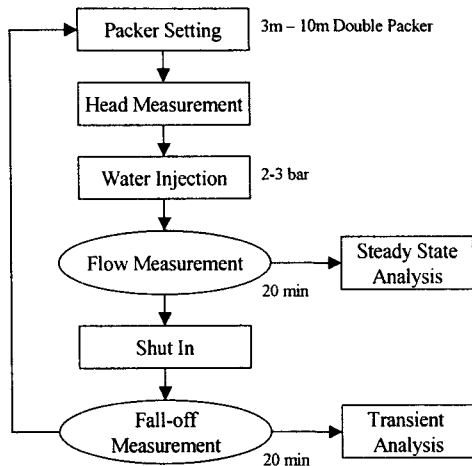


Fig. 2. Procedure and activities for the hydraulic tests.

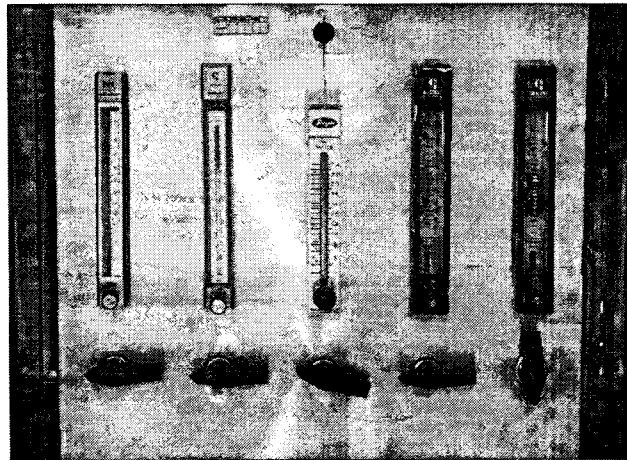


Fig. 3. Photograph of the rotameters implemented in hydraulic test.

3. 단열체계 특성

가. 수평적 특성

조사자료들이 동일 불연속면구의 구조적 특성을 반영하는지를 파악하기 위하여 각 조사공에서 얻어진 방향성 자료를 스테레오망에 투영하여 그 유사성을 검토하였다. 고성지역의 단열은 1개 조의 고경사군과 2개 조의 저경사군으로 분류된다. 유성지역은 NS와 NW 주향의 고경사군과 무작위 방향을 보이는 저경사군으로 분류된다. 특히, NS 주향의 고경사군은 동일한 주향을 가지면서 경사각이 동쪽과 서쪽으로 양분되는 특성을 보인다.

나. 수직적 특성

연구지역의 심도에 따른 단열빈도의 변화양상은 Fig. 4와 같다. 고성지역의 경우는 단열의 발달이 거의 없는 피상의 암반으로 단열빈도는 심도 300m 부근에서 급격히 감소하지만, 조사방향에 의한 오차를 보정한다해도 자료의 수가 워낙 적기 때문에 이를 근거로 수직적 영역을 구분하기란 불가능하다. 따라서, 고성지역은 지표부에서 지하 500m 까지를 동일한 영역으로 보는 것이 타당하다고 사료된다.

유성지역의 심도에 증가에 따른 단열빈도의 감소경향은 뚜렷하지는 않다. 전체 자료를 볼 때, YS-02, YS-03, YS-04공의 자료가 200m ~ 350m 까지인 점을 간과하면 일견 감소하는 것으로 보이나, YS-01공을 보면 104m ~ 120m 부근에서 교차되는 단열대와 그 주변의 damaged zone에서의 단열의 발달 양상을 대변한다. 4개 공에서 검출된 전체적인 단열빈도의 수직적 분포양상을 토대로 할 때, 상하부의 영역은 지표로부터 약 160m를 기준으로 구분할 수 있다.

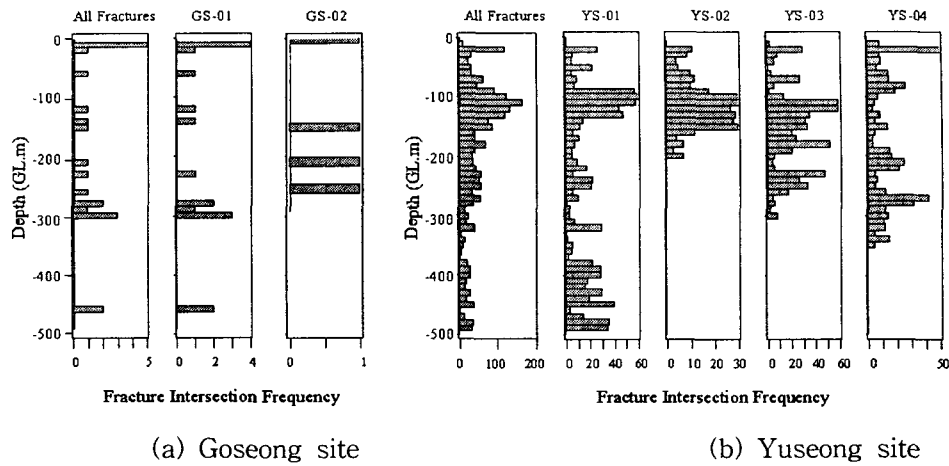


Fig. 4. Variation of the fracture frequency along the depth in the study site.

다. 유성지역 심부영역의 투수성 단열

전체 2,212개 단열의 방향은 NNE 주향과 NW 주향의 고경사군과 무작위의 저경사군으로 분류된다 (Fig. 5). 조사방향에 따른 보정결과, 단열 개수는 약 53% 증가 (3,384개)하였는데, 이것은 고경사군의 단열조가 우세하게 분포하기 때문이다. 투수성단열이 차지하는 비중은 약 10.5%로서, 단열조별로 비중은 Set 1 (13%), Set 2 (9%), Set 3 (8%)의 순이다.

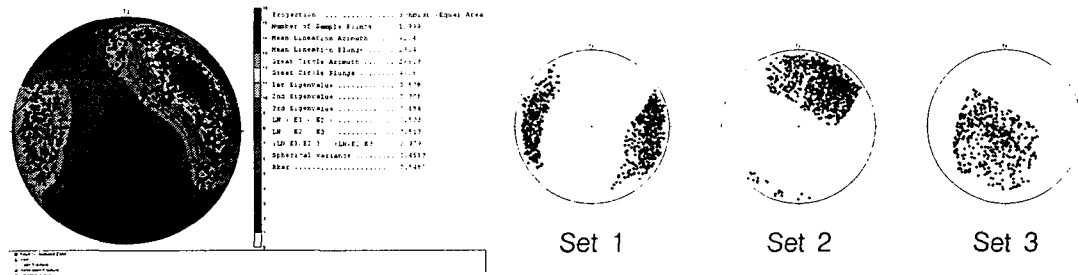


Fig. 5. Fracture set identification in the Yuseong study site.

Table 2. Statistics of the conductive fractures from lower zone in the Yuseong site.

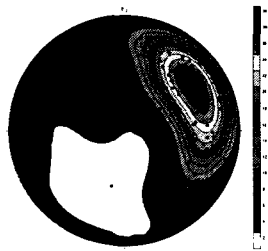


Fig. 6. Stereographic pole of the conductive fractures from lower zone in the Yuseong study site.

		Set	1	2	3	Total
Raw data	Fracture type (%)	Opened	5 (12.8)	6 (13.0)	2 (40.0)	13 (14.4)
		Semi-opened	34 (87.2)	40 (87.0)	3 (60.0)	77 (85.6)
	Proportion (%)		39 (43.3)	46 (51.1)	5 (5.6)	90 (100)
	Mean attitude	Dip direction	279.7	214.4	102.5	
		Dip angle	70.3	58.6	17.7	
Fisher k		7.68	11.66	11.08		
Modified Terzaghi corrected data	Corrected number of data (%)		74 (51.7)	64 (44.8)	5 (3.5)	143 (100)
	Mean attitude	Dip direction	280.5	213.5	102.5	
		Dip angle	75.7	62.1	17.7	
Fisher k		7.44	11.85	11.08		

심부영역 (160m 하부)에 분포하는 투수성 단열 (open 및 semi-open 유형)의 방향성은 Fig. 6과 같다. 특징적으로 준수평단열군인 Set 3이 급격히 감소한 것을 알 수 있다. Table 2에서 투수성단열의 빈도는 Set 1과 Set 2가 상대적으로 우세함을 보인다. 전체 투수성단열 중 semi-open 유형의 비중이 약 86%에 달한다.

투수성 단열 간격은 빈도 보정값의 역수로부터 9.6m (Set 1), 11.0m (Set 2), 142m (Set 3)로 상당히 낮은 밀도를 갖는 것으로 계산된다.

텔레뷰어 진폭이미지로부터 계산된 단열틈의 간격은 lognormal 분포로 수렴된다 (Fig. 7). 전체자료의 기하평균 (산술평균)은 0.835mm (2.34mm)이고, 투수성 단열의 틈은 Set 1과 Set 2의 기하평균이 약 4.5mm이다.

단열계의 기하학적 분포특성을 이용하여 처분공동이 건설되는 방위각에 따라서 단열의 빈도를 예측하였다 (Fig. 8). 즉, 임의의 선(line)이 수평인 상태에서 방위각을 달리 했을 경우, 단열 교차빈도의 계산을 통하여 터널 설계/시공시 그 layout에 따라 확률적으로 나타날 수 있는 평균적인 단열빈도를 사전에 예측할 수 있다. 유성지역은 trend 60° 방향을 따라서 최대값을 가지며, 10° 와 120° 부근에서 최소값을 보인다. 이 때, 하부 영역의 최대 단열빈도값은 2개/m 미만이고, 하부 영역의 투수성단열만을 고려할 때는 0.5개/m 미만이다.

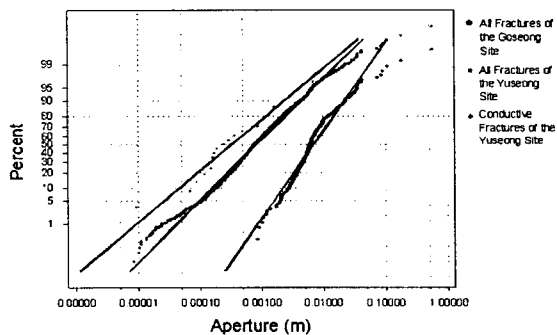


Fig. 7. Lognormal probability plot for the aperture size.

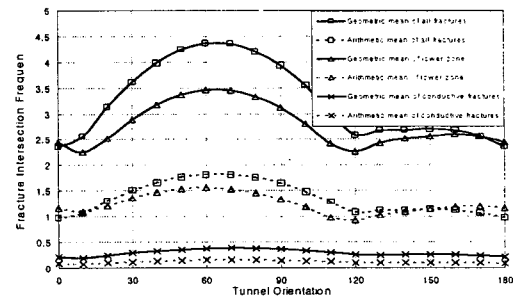


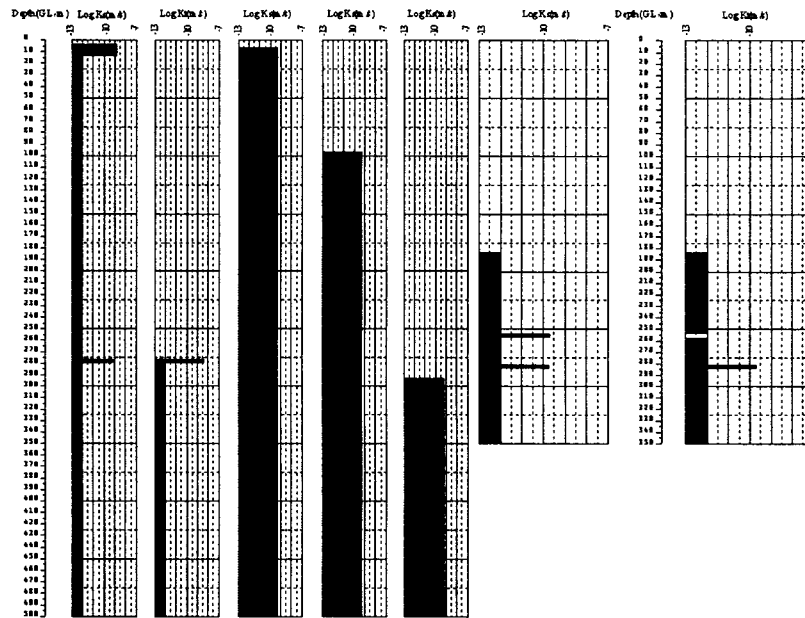
Fig. 8. Probabilistic fracture frequency intersected by tunnel layout in the Yuseong study site.

4. 유효수리전도도

가. 고성지역

GS-01 공에서 단열이 분포하는 구간의 수리전도도는 $1E-9 \sim 1E-8$ m/s의 범위를 가지며, 기타 단열이 분포하지 않는 구간의 유량계 측정 한계치인 $1E-12$ m/s으로 가정하였다. 장구간 시험의 결과에서 보면, $1E-10 \sim 1E-9$ m/s의 범위를 가지는데, 이것은 소수의 투수성 단열이 전 시험구간의 투수성을 반영하기 때문이다. GS-02 공의 상부구간에는 단열이 분포하지 않으며, 하부 일부 구간에 한정되어 분포한다. 단열이 분포하는 시험구간의 수리전도도는 $1E-10 \sim 1E-9$ m/s의 범위에 있다 (Fig. 9).

시추공 GS-01과 GS-02는 동일 표고에 위치하며, 이격거리는 약 100m로서 이들은 암반 블록 규모 내의 동일한 수리지질 특성을 반영하는 것으로 간주할 수 있을 것이다. Fig. 9에서 이들 두 개공의 수리전도도를 비교하면, 지표로부터 약 -300m 하부에는 불투수성 암반이 분포하는 것을 알 수 있다. 즉, 고성지역에서는 상부 단위층을 지표부터 -300m 까지, 그리고, 하부 단위층은 -300m부터 공저까지 설정할 수 있다.



(a) Borehole GS-01

(b) Borehole GS-02

Fig. 9. Hydraulic conductivity distribution in the Goseong study site.

나. 유성지역

유성지역은 고성지역에 비하여 상대적으로 단열의 발달이 우세하며, 투수성도 큰 특성을 갖는다. 심도의 증가에 따라 수리전도도의 감소 경향은 아주 미약하게 나타나고, 투수성 구간은 주로 상부 지표부와 파쇄대 구간에 집중되지만, 심부의 투수성 구간은 소규모 open type의 단열에 의하여 지배되는 경향을 보인다. 유성지역도 고성지역과 같이 전혀 주입이 되지 않는 불투수성 구간이 다수 존재하며, 투수성 구간은 최대 $1E-7$ m/s의 수리전도도값을 갖는다.

기존의 연구사례를 살펴 보면, 정상류 시험 결과는 부정류 시험에 비하여 3 ~ 11배 가량 크게 계산되는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 본 연구에서는 $1E-8$ m/s 부근을 기준으로 투수성이 큰 영역에서는 정상류 시험이 더 크게 계산되었고, 저투수성 구간에서는 부정류 시험 결과가 더 크게 해석되는 결과를 보였다 (Fig. 10a). 이것은 시험 시간이 충분치 않거나, 2차원 방사상 흐름의 가정을 벗어나는 fractional dimension 흐름을 갖는 경우에 기인하는 것으로 판단된다. 4개 공 전체 시험자료에 대한 정상류와 부정류의 기하평균은 각각 $3.47E-10$

m/s, 7.23E-10 m/s으로 부정류 해석결과가 약 2배 가량 크게 계산되었다 (Fig. 10a).

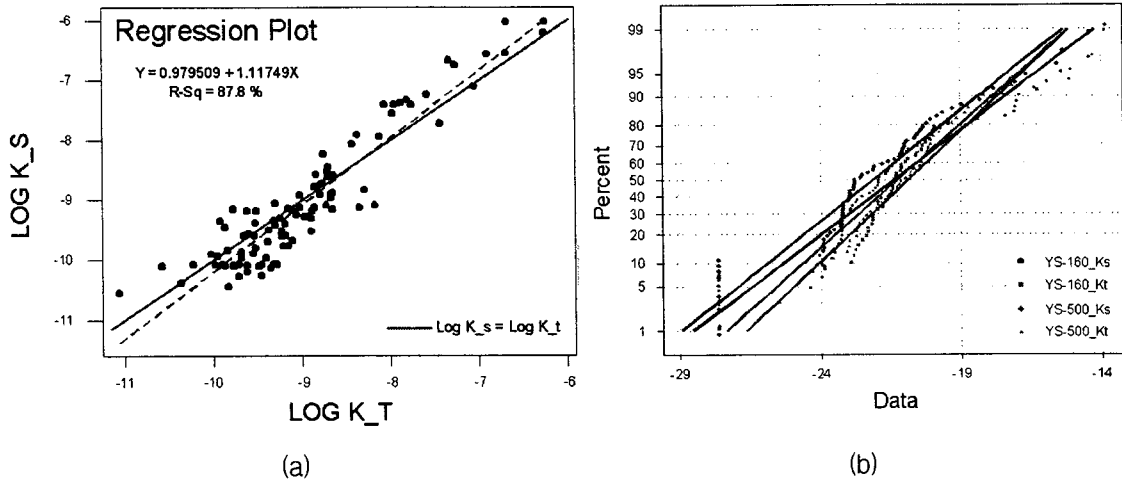


Fig. 10. Linear regression of the logarithmic hydraulic conductivity between the steady and transient state analysis (a) and the effective hydraulic conductivity of the hydrogeologic units in the Yuseong study site (b).

수리전도도의 수직적 분포로부터 지표부를 포함하는 상부 수리지질 단위층은 약 -160m 까지로 설정할 수 있다. -160m 하부는 상부 영역에 비하여 약간 낮은 투수성을 보인다. 따라서, 유성 연구지역의 경우 상부 수리지질 단위층은 지표 영역을 포함하여 -160m 까지, 그리고 그 이하를 하부 영역으로 설정할 수 있으며, 이것은 앞서의 수직적 단열체계 특성과 일치한다. 유효수리전도도 산출결과, 상부 영역은 5.27E-10 m/s ~ 8.61E-10 m/s, 하부 영역은 2.45E-10 m/s ~ 5.96E-10 m/s 의 범위를 갖는다 (Fig. 10b; Table 3).

Table 3. Effective hydraulic conductivity of the Yuseong study site (LN K m/s).

All Data	Upper Zone (0 ~ -160m)		Lower Zone (-160 ~ -500m)	
	Steday state	Transient state	Steday state	Transient state
LN Mean	-21.3642 (5.27E-10)	-20.8725 (8.61E-10)	-22.1282 (2.45E-10)	-21.2412 (5.96E-10)
Standard Deviation	3.1077	2.5067	2.9490	2.6604
Minimum	-27.6310	-27.6310	-27.6310	-27.6310
Median	-21.9055	-21.3797	-22.7723	-21.0506
Maximum	-13.8412	-14.3676	-13.8288	-15.3592

5. 결론

고준위방사성폐기물 처분연구를 위하여 우선 연구대상매질인 화강암에 대하여 연구지역을 대상으로 제반 지질환경특성 조사가 진행되고 있다. 본 연구는 중장기 연구의 일환으로 고성지역과 유성지역에 6개의 조사공을 설치하여 암반블록규모에서의 단열체계의 분포특성과 수리지질 단위층의 유효수리전도도를 도출하였다.

조사공에서 검출된 단열자료는 수평적으로는 암반블록규모의 단일 불연속면구의 구조적 특성을 가지며, 수직적으로는 상, 하부 영역으로 구분 가능하였다. 고성지역은 특징적으로 단열이 거의 발달되지 않은 괴상암체이고, 유성지역은 전형적인 단열암반에 해당된다.

수리시험에 이용된 유량계의 계측한계가 $1.00E-12$ m/s임을 고려할 때, 고성지역의 유효수리전도도는 단열이 분포하지 않는 background 값에 크게 지배될 수 밖에 없다. 지표로부터 -300m까지의 상부 영역의 유효수리전도도는 $1.12E-12$ m/s이고, 그 하부 영역은 background 값($1.00E-12$ m/s) 이하로 대표된다. 유성지역은 단열의 발달이 상대적으로 두드러지나 대부분이 2차 광물로 충전되어 있어 이들의 투수성이 크지는 않다. 다만, 독립적 혹은 단열대 주변의 소규모 open fracture가 투수성을 지배하는 특성을 갖는다. 지표로부터 -160m까지의 상부 영역의 유효수리전도도는 $5.27E-10$ m/s ~ $8.61E-10$ m/s, 그 하부 영역은 $2.45E-10$ m/s ~ $5.96E-10$ m/s 의 범위를 갖는다.

참고문헌

- 김경수, 배대석, 김천수, 박병윤, 고용권, 2001, 고성 및 유성지역 중생대 화강암의 단열체계 분포특성, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1817-01.
- 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 한국지질도 대전도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서, 자원개발연구소, 26p.

김경수	kskim@kaeri.re.kr	042-868-2365	
김천수	ncskim1@kaeri.re.kr	042-868-2063	대전광역시 유성구 덕진동 150
배대석	ndsbae@kaeri.re.kr	042-868-2030	한국원자력연구소 심부지질환경특성연구
고용권	nykkoh@kaeri.re.kr	042-868-8159	
