

## 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출

### Estimation of the Effective Hydraulic Conductivity in the Granite Area as an Equivalent Continuum Medium

김 경 수 (Kyung Su Kim)

한국원자력연구소

김 천 수 (Chun Soo Kim)

한국원자력연구소

배 대 석 (Dae Seok Bae)

한국원자력연구소

#### 요약 / ABSTRACT

본 연구는 화강암이 분포하는 연구지역을 대상으로 수리지질 단위층을 등연속체매질로서 설정하고, 각 단위층의 유효수리전도도를 산출하기 위한 것이다. 이를 위하여 3"직경의 4개 시추공과 다중패커시스템을 설치하였으며, 단열분포특성조사, 정압주입/수위강하시험, 전공 순간충격시험, 그리고 격리구간 내 펄스시험이 수행되었다. 수리지질 단위층을 정의하기 위하여 단열분포특성을 기초로 하여 일차적으로 상하부 단위층의 경계설정을 시도하였고, 수리전도도 변화특성을 이차적인 요소로 대비하였다. 연구에 적용된 수리시험 결과의 차이와 효과적인 암반 투수성 평가방법에 대한 논의도 이루어졌다. 상부 수리지질 단위층의 유효수리전도도는 정압주입/수위강하시험의 경우  $5.27E-10$  m/s~ $7.57E-10$  m/s의 범위를 가지며, 하부 영역에서는  $2.45E-10$  m/s~ $6.81E-10$  m/s의 범위를 갖는다.

**주요어** : 단열암반, 등연속체매질, 정압주입/수위강하시험, 전공 순간충격시험, 펄스시험, 유효수리전도도

This study is focused on the characterization of an effective hydraulic conductivity in each hydrogeologic unit assumed as an equivalent continuum medium in the granitic area. Four boreholes of 3" diameter were installed and a Multi-packer system was facilitated in the selected borehole. Various in-situ tests including the fracture logging, constant injection and fall-off tests, slug and pulse tests were carried out. A hydrogeologic unit was defined into the upper and lower zones based on the variation of fracture properties and hydraulic conductivities. The difference of the result obtained by the various hydraulic tests and the effective characterization techniques on rock mass permeability are also discussed. The effective hydraulic conductivity of the upper unit was measured by two times( $5.27E-10$  m/s~ $7.57E-10$  m/s) that of the lower unit( $2.45E-10$  m/s~ $6.81E-10$  m/s) through the constant injection and fall-off tests.

**Key Words** : fractured rock mass, equivalent continuum medium, constant injection/fall-off test, slug test, pulse test, effective hydraulic conductivity

## 서 론

결정질암류에서의 지하수유동은 일반적으로 투수성 단열체계의 분포특성에 지배되며, 단열암반의 수리특성을 모사하는 방법으로는 개념적으로 두 가지가 있다. 첫째는 분리단열망모델(discrete fracture network model)로서 암반을 투수성 단열과 불투수성 매질로 표현하는 개념이다. 이때 수치모델 내에 개개의 단열을 모두 포함할 수 없으므로 수리적으로 중요한 단열만을 고려하는 것이 핵심이다. 둘째는 등연속체모델(equivalent continuum model)로서 암반을 등방성 또는 이방성의 균질한 연속체 매질로 표현한다. 이 개념에서는 실제 암반의 지하수가 유동하는 것으로 모사되는 연속체 매질에 대한 수리전도도의 대표값을 정의하는 것이 중요하다.

시추공 내 수리시험에서 얻어지는 수리전도도에 대한 대표값은 다음의 식과 같은 평균값으로 표현되는데, 매질의 특성과 대표값의 활용목적에 따라서 어떻게 선택할 것인가에 대하여 많은 연구가 있었다.

$$\text{산술평균}(K_A) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_i \quad (1)$$

$$\text{조화평균}(K_H) = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{K_i}} \quad (2)$$

$$\text{기하평균}(K_G) = \left( \prod_{i=1}^m K_i \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

Freeze(1975)는 균질 매질에서의 수리전도도가 빈도분포로 정의될 때 1차원 지하수유동의 거동을 연구하였다. 여기에서 수리적으로 균질 매질이라 함은 수리전도도가 공간적으로 상수인 것을 말한다. 수리시험으로부터 도출된 수리전도도에 대한 확률밀도함수로서 시종 나타나는 것은 대수정규(lognormal)분포였다. Freeze(1975)는 규모의 중요성을 강조하였으며, 또한 자신의 연구결과는 광역 규모에서 적용 가능하며, 소규모 영역에서는 관심 대상의 인자에 대하여 단일의 값을 제시할 수 없다고 하였다. 또한, 층상의 매질을 가로지르는 1차원에서 수리전도도가 대수정규분포를 갖고 정상류 흐름일 때, 유효수리전도도( $K_E$ )는 조화평

균( $K_H$ )임을 확인하였다.

Carlsson et al.(1990)은 지하수가 매질의 층과 평행하게 흐를 경우의  $K_E$ 는 산술평균( $K_A$ )이라고 주장하였다.

3차원의 정상류 흐름에서의  $K_E$ 는 기하평균( $K_G$ )이 가장 적절하다고 보고하였다(Freeze, 1975).

Dagan(1979)은 통계적으로 균질한 층의  $K_E$ 는 다음 식으로 표현됨을 확인하였다. 2차원의 문제에서 식 (4)는  $K_E = K_G$ 로 단순화된다.

$$K_E = K_G \left\{ 1 + \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{m} \right) c^2 \sigma_y^2 \right\} \quad (4)$$

$m$  = 유동차원 ( $m=1, 2$  또는 3)

$\sigma_y$  = 수리전도도  $K$ 에 대하여  $\log_{10}K$ 의 표준편차,  $c = \ln 10$

Gustafson(1986)은 수리전도도 빈도분포가 대수정규분포를 갖는 2차원 문제에 대한 수치연구에서 2차원 흐름에 대한 최적의 평가는 기하평균임을 밝혔다. 그리고, 팩커시험을 이용하여 단열 암반의 대표체적(REV)의 규모를 추정하는 방법을 제시하였는데, 단열암반에서 연속체모델을 적용할 때는 모델 영역이 크고 시험자료가 충분하지 않은 한 상당한 주의가 요구된다고 하였다.

Broch and Kjörholt(1993)는 Torpa 압축공기저장시설에서 400개의 수리시험 자료의 결과를 수벽공의 주입수량의 계측으로부터 역으로 계산된 투수성과 비교한 결과를 제시하였다. 그는 수벽공 주입수량을 기초로 계산된 수리전도도 값은 수리시험에 의해 계산된 기하평균값과 중앙값 사이에 있다는 결론을 제시하였다.

본 연구는 연구지역(대전광역시 유성구 덕진동 한국원자력연구소 내; Fig. 1)에 설치된 시추공에서 이루어진 여러 가지 수리시험을 통하여 수리지질 단위층(hydrogeologic unit)을 정의하고, 단위층 별로 유효수리전도도를 산출하기 위한 것이다. 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 일부이다. 연구 프로그램에서 획득되는 지질, 수리지질, 지구화학, 암반역학 자료들은 기준처분시스템

개발 및 방사선적 안전성 해석 업무에 이용하도록 되어 있다.

### 연구 지역

연구지역은 대전광역시 유성구 덕진동 한국원자력연구소 부지 내로서 시추위치의 지질은 중립질 복운모화강암으로 국지적으로는 미약하나마 편상조직을 보이기도 하며, 연구지역 남서부에 분포하는 편상화강암과의 관계는 불명확하다(Fig. 1). 대전도폭에서는 편상화강암을 슈라기의 편상화강암으로 보았고 복운모화강암과는 동일 마그마에서 유래된 것으로 보았다(이상만 외, 1980). 이들은 중립질로서 편리의 방향이 주변의 변성퇴적암류의 편리방향과 일치한다.

시추지점의 복운모화강암에 대한 편광현미경 관찰 결과 주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모 등이며 녹니석, 녹염석, 백운모가 2차광물로 관찰되고, 퍼어다이트가 드물게 관찰되기도 한다. 사장석과 미사장석은 쌍정이나 입자 경계를 따라서 부분적으로 건운모화 되어 있는 양상을 보이기도 하며 운모류는 벽개면을 따라 녹니석화 되어 있기도 하다. 특징적으로 석류석, 저어콘 및 황철석 같은 광석광물들이 미량 존재한다(김경수 외, 2001). 대체적으로 연구지역 내 복운모화강암은 중립 내지 세립질이며 다수의 크고 작은 맥암류에 의해 관입을 당하였다. 이 외에 반암류들이 시추지점의 동남부에 분포하고 있으며 복운모화강암과는 상호 점이적 관계를 보인다.

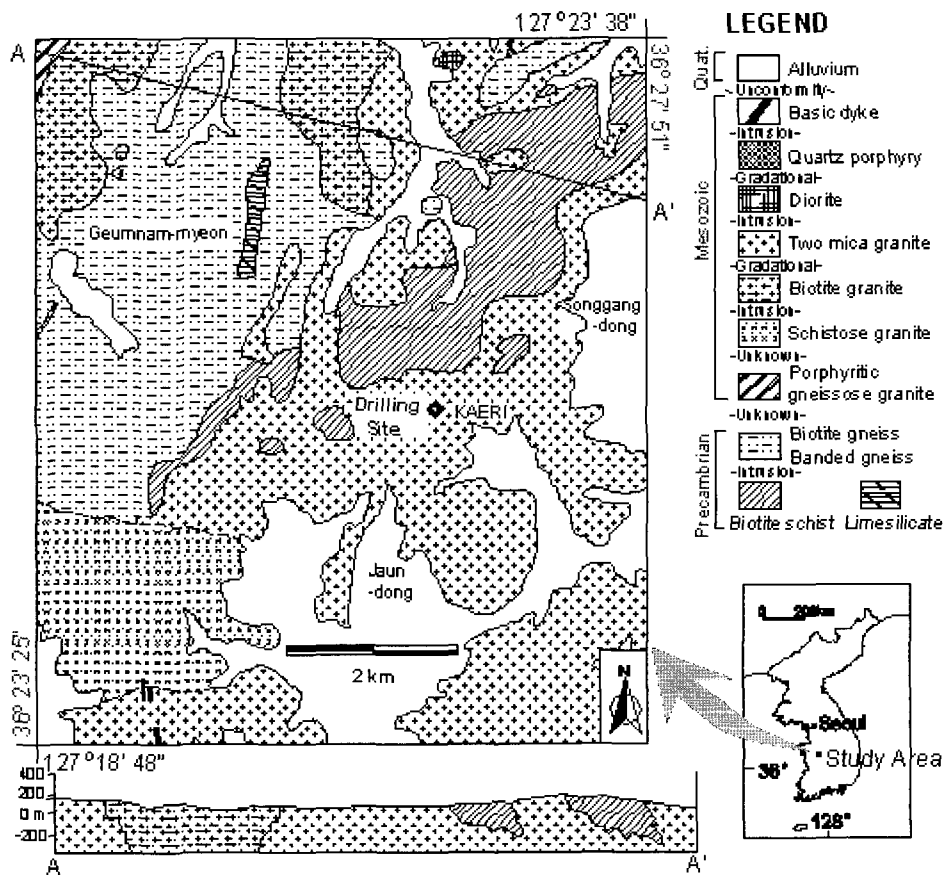


Fig. 1. Geologic map of the study site.

## 연구 방법

### 시추 및 단열조사

심부지질환경 해석과 지하수체계의 장기적 모니터링을 목적으로 모두 4개의 NX 크기의 수직 조사공을 설치하였다(Fig. 2; Table 1).

시추공 각각에 대하여 단열분포특성 조사를 위하여 초음파 텔레뷰어 검증을 실시하였다. 검증 자료는 암반블록규모 내의 조사지점에서 얻어진 단열의 방향성이 동일한 불연속면체(discontinuity domain)의 구조적 특성을 갖는지를 먼저 파악한 다음, 지표부와 심부 영역을 구분하기 위한 수직

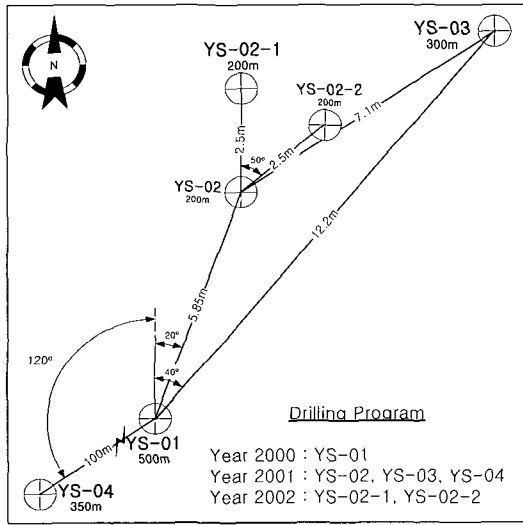


Fig. 2. Layout of the boreholes in the study site.

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

Borehole no.	YS-01	YS-02	YS-03	YS-04
Elevation(m)	82	81	81	91
Depth (m)	500	200.9	300.2	350.6
Borehole radius (m)	0.039			
Casing (m)	15.2	15.2	15.2	12.0
Weathered zone (m)	16.0	18.4	14.2	13.0
Groundwater table (m)	2.82	2.3	3.1	artesian

적 빈도변화 특성을 비교하였다. 즉, 지표 영역은 지질학적 변질, 변형, 풍화작용으로 인하여 단열체계 역시 심부환경과 다를 것이므로 고준위방사성 폐기물 처분시설의 예상 심도(약 500m)를 고려하여 지표부의 교란 영역을 제외한 심부 영역의 단열 파라미터에 대하여 그 확률분포특성을 해석하였다.

### 순간충격시험과 정압주입/수위강하시험

다중패커(multi-packer system, Westbay Co.) 설치 전 전공 순간충격시험(slug test)과 일정구간별 정압주입/강하시험을 실시하였다.

전공 순간충격시험은 배출 후 수위회복 방식(소위 bail down test)으로 이루어졌다. 고압 양수펌프를 이용한 공내 지하수 제거 전에 자동수위기록기(DI222, Eijkelkamp)를 설치하였다. 측정 시간은 1초 단위로 설정되었다. 공내 지하수위는 자연 지하수위 대비 약 93m 까지 강하되도록 공내 지하수를 배출시켰으며, 초기 수위까지 완전 회복되는 시점까지 시험이 이루어졌다. 전공 순간충격시험은 YS-01공에 한하여 시행되었다.

정압주입/수위강하시험(constant injection/fall-off test)은 이중패커를 이용하여 일정하게 10m 구간별로 별로 시행되었다. 시험은 주입단계와 주입후 수위강하 단계로 구분하여 각각 20분 내외로 계속되었다. 주입수는 연구지역의 지표수를 이용하였으며, 주입압력의 안정화를 위하여 약 30m의 정압이 걸리도록 상부 표고에 물탱크를 임시로 설치하였다. 주입호스 선상에 설치되는 압력계는 0.1 kg/cm<sup>2</sup>까지 판독 가능한 유압 압력계를 사용하였다. 주입량의 정밀한 계측에 가장 중요한 유량계는 Gilmont Instruments 사의 rotameter를 계측 범위별로 중첩하도록 자체 제작되었다. 피압 구간에서의 역류 현상을 방지하기 위하여 유량계 각각의 연결라인에 체크밸브가 설치되었다. 제작된 유량계는 Fig. 3과 같으며, 부착된 5개 조의 유량계 계측범위는 최대 22 l/min, 최소 1.0 ml/min이다.

### 다중패커시스템의 설치와 펄스시험

심부지하수체계의 장기적 모니터링을 목적으로 시추공 중 심도가 가장 깊은 YS-01공에 다중패커

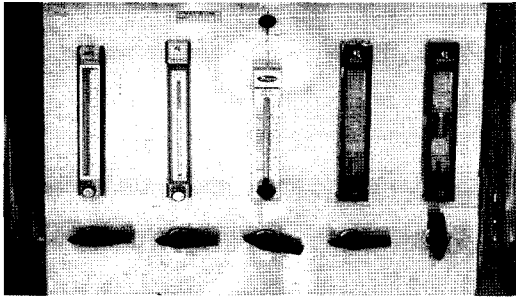


Fig. 3. Photograph of the rotameters implemented in the hydraulic test.

Table 2. Packed-off depth and interval of the Multi-packer system installed in the borehole YS-01.

Zone no.	Packed-off depth		Zone interval (m)
	GL-m	EL.m	
14	0.0 ~ 39.0	82.0 ~ 43.0	39.0
13	40.5 ~ 79.5	41.5 ~ 2.5	39.0
12	81.0 ~ 100.5	1.0 ~ -18.5	19.5
11	102.0 ~ 129.5	-20.0 ~ -47.5	27.5
10	131.0 ~ 142.5	-49.0 ~ -60.5	11.5
9	144.0 ~ 175.5	-62.0 ~ -93.5	31.5
8	177.0 ~ 232.5	-95.0 ~ -150.5	55.5
7	234.0 ~ 258.0	-152.0 ~ -176.0	24.0
6	259.5 ~ 307.5	-177.5 ~ -225.5	48.0
5	309.0 ~ 327.0	-227.0 ~ -245.0	18.0
4	328.5 ~ 373.5	-246.5 ~ -291.5	45.0
3	375.0 ~ 421.5	-293.0 ~ -339.5	46.5
2	423.0 ~ 456.0	-341.0 ~ -374.0	33.0
1	457.5 ~ 500.0	-375.5 ~ -418.0	42.5

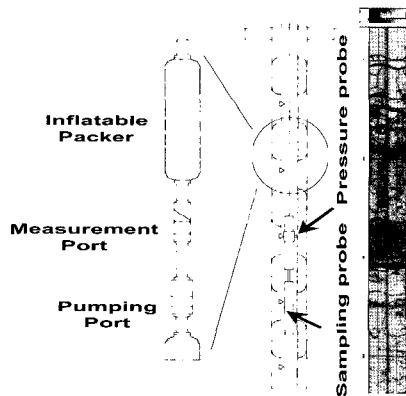


Fig. 4. Schematic view of the Multi-packer system.

시스템을 설치하였다. 다중패커시스템의 계측구간 설계는 공내 단열 검층을 위하여 수행된 텔레뷰어 검층 결과와 정압주입/수위강하시험 결과를 기초로 하였다.

YS-01 공은 GL.-104m 부근에서 폭 1m 내외의 단열대가 교차되었으며, 시추작업 후 단열대 교차구간의 붕괴로 인하여 부득이 GL.-103m ~ -127m 구간에 시멘트 그라우트를 실시하였다. 이 그라우트 구간을 포함하여 투수성 구간을 위주로 총 13개의 패커를 설치하여 14개의 격리구간을 확보하였다(Table 2). 각각의 격리구간에는 불교란 지하수시료 채취를 위한 계측구(measurement port)와 지하수시료의 다량 채취 및 수리시험을 위한 양수구(pumping port)가 1 조씩 부착되었다(Fig. 4).

다중패커시스템을 이용한 격리구간에서의 펄스 시험(pulse test)은 케이싱 내부의 수위를 Waterra 펌프를 이용해 최소 22m, 최대 60m 강하시키고, 자동수위기록기를 1초 단위로 설정하여 설치한 다음, 양수구를 개방하여 수위 회복을 계측하는 방식으로 진행되었다. 이 방법은 전공 순간충격시험과 동일한 원리로서 특별히 격리구간에서는 펄스시험이라 한다.

본 연구에 적용된 현장 조사 및 시험의 흐름도는 Fig. 5와 같이 정리된다.

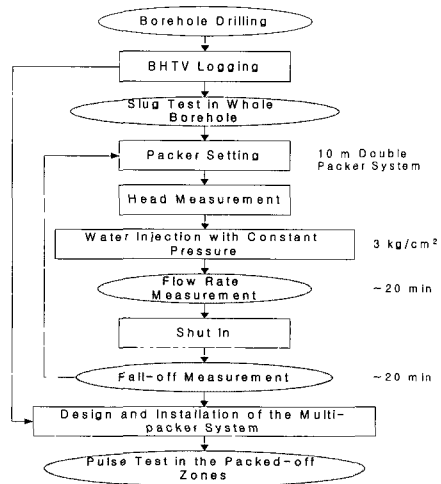


Fig. 5. Procedures for a series of the hydraulic test.

## 연구결과

### 단열분포특성

4개 시추공들의 수평적 범위가 동일 불연속면구(discontinuity domain)의 구조적 특성을 반영하는지를 파악하기 위하여 각 시추공에서 얻어진 방향성 자료를 스테레오망에 투영하여 그 유사성을 검토하였다(Fig. 6). 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 분석 대상의 시추공들은 동일 불연속면구에 위치하는 것으로 판단되며, 단열분포특성에 지배되는 지하수체계 역시 물리적으로 동일한 특성으로 대표되는 영역 내에 있다고 볼 수 있다.

수직적 변화양상은 단열빈도로서 가능할 수 있다(Fig. 7(a)). 연구지역에서 심도의 증가에 따른 단열빈도의 감소경향은 뚜렷하게 나타난다. 전체 자료를 볼 때, YS-02, YS-03, YS-04 공의 자료가 200m ~ 350m 까지인 점을 고려하면 감소 경향은 미약한 것으로 볼 수 있으나, 이들 시추공이 YS-01 공과 동일한 심도라면 상호 유사한 경향을 가질 것으로 판단된다. YS-01공에서는 104m 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.

전체 2,212개 단열의 방향은 NNE 주향(Set 1)과 NW 주향(Set 2)의 고경사군과 무작위의 저경사군(Set 3)으로 분류된다. 조사방향에 따른 Terzaghi 보정결과(Terzaghi, 1965; Golder Asso. 1994), 단열 개수는 약 53% 증가(3,384개)하였는데, 이것은 고경사군의 단열조가 우세하게 분포하기 때문이다. 개구상 또는 반개구상 유형의 단열은 투수성 단열로서의 잠재성이 있는데, 이들이

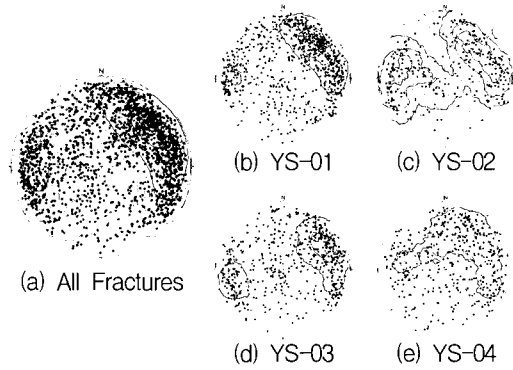
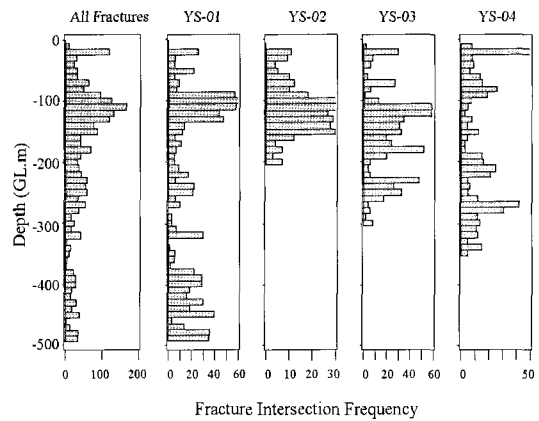
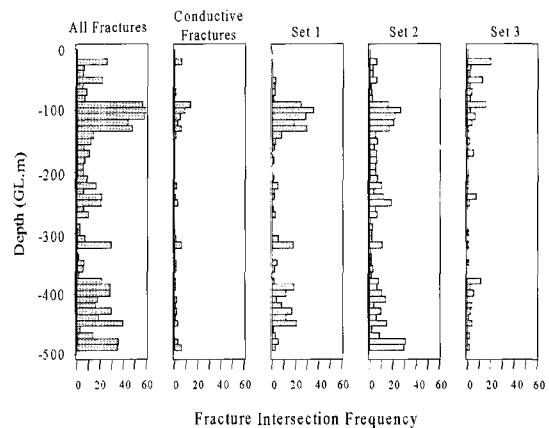


Fig. 6. Stereographic pole of the fractures from the boreholes.



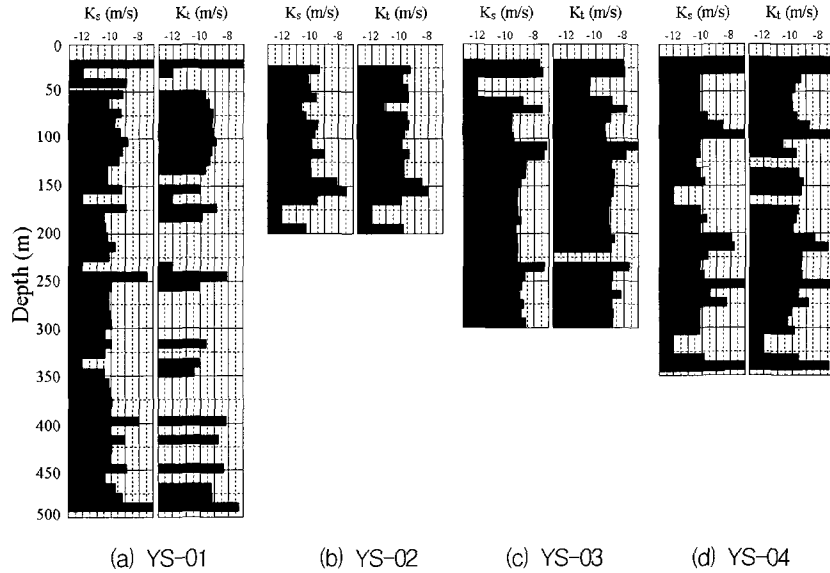
(a) All fractures and 4 boreholes



(b) Borehole YS-01

Fig. 7. Variation of the fracture frequency along the depth in the study site.





**Fig. 8.** Hydraulic conductivity distribution of the boreholes. The value of  $K_s$  and  $K_t$  was calculated from Eq. (5) and (6), respectively.

**Table 4.** Summary of hydraulic test results.

Borehole no.	No. of test interval	No. of analysis (No. of test failure)	
		Steady state	Transient state
YS-01	47	47	27 (20)
YS-02	18	18	18
YS-03	29	29	28 (1)
YS-04	36	36	32 (4)
Total	130	130	105 (25)

- 시험 시작부터 전혀 주입이 되지 않는 경우는 시험기기의 계측 한계치( $1E-12$  m/s)로 가정
- 초기 저류효과 이후 주입이 되지 않는 경우는 불투수구간( $1E-12$  m/s)으로 가정
- 주입압력보다 높은 수압이 작용하는 구간은 시험 불가로 가정(artesian zone)
- 수위강하가 전혀 계측되지 않는 구간은 불투수구간으로 가정

본 연구지역은 비교적 단열이 많이 발달된 지역으로서 암반의 투수성도 이에 상응하는 특성을 갖는다. 심도의 증가에 따라 수리전도도의 감소 경향은 아주 미약하게 나타난다. 주요 투수성 구

간은 주로 상부 지표부와 단열대 및 주변 파쇄구간에 집중되지만, 심부의 투수성 구간은 단일 혹은 수 개의 개구상 단열에 의하여 지배되는 경향을 보인다(Fig. 8).

4개 공의 수리전도도 분포를 비교해 보면, 대략 지표부, -100m 부근, -160m 부근, -250m 부근, -350m 부근, 그리고, -500m 부근에 투수성 구간이 분포하는 것을 알 수 있다. 그러나, 이들 투수성 구간은 시추공별로 투수성 단열이 분포하는 구간의 심도가 서로 다르므로 상호 일치하지는 않는다.

4개 공 전체 시험자료에 대한 정상류와 부정류 해석결과는 Fig. 9에 보이는 바와 같이 대수정규 분포를 따른다. 정상류와 부정류 해석결과의 기하평균은 각각  $3.47E-10$  m/s,  $7.23E-10$  m/s으로 부정류 해석결과가 약 2배 가량 크게 계산된다. 피압구간 외에도 불투수성 구간이 다수 존재하며, 정압주입/수위강하 시험에 의한 구간별 수리전도도의 최대값은 약  $1E-7$  m/s이다.

본 시험의 해석결과, 시험방법에 의한 수리전도도의 차이는 미미한 수준이나, 약  $1E-8$  m/s를 기준으로 투수성이 큰 영역에서는 정상류 시험이 더 높은 투수성을 나타냈고, 저투수성 구간에서는 부정류 시험 결과가 더 높게 해석되는 결과를 보



등연속채매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출

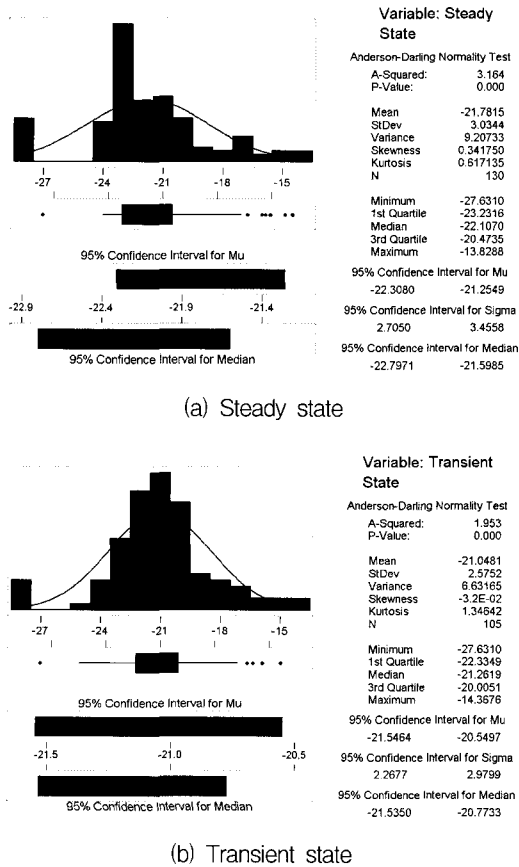


Fig. 9. Normal distribution statistics of the logarithmic hydraulic conductivity of the steady and transient state analysis.

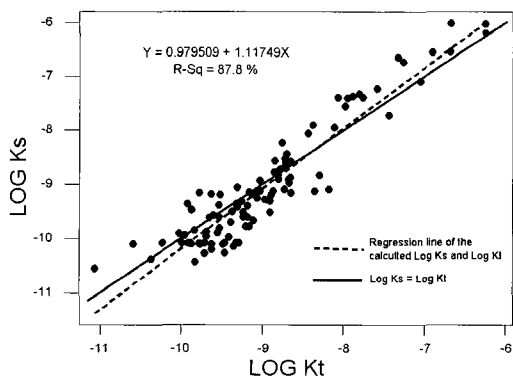


Fig. 10. Linear regression of the logarithmic hydraulic conductivity between state steady and transient state analysis.

였다(Fig. 10). 기존의 연구결과를 살펴 보면 (Andersson and Persson, 1985; Almén et al., 1986), 일반적으로 정상류 분석방법에 의한 수리 전도도 값이 부정류 해석에 의한 경우보다 3~10 배 가량 큰 것으로 알려져 있다. 본 해석결과의 차이는 시험 시간이 충분치 않았거나, 2차원 방사 상 흐름의 가정을 벗어나는 분할차원의 흐름을 갖는 경우에 기인하는 것으로 판단된다.

전공 순간충격시험과 펄스시험의 해석

전공 순간충격시험은 투수성의 범위가 넓은 포화 매질에 대하여 비교적 짧은 시간 내에 시험이 가능하고, 방법 또한 단순하여 암반 내 평형상태의 수두분포를 크게 교란시키지 않는다는 것이 장점이다. 가장 큰 단점은 시추공 주변 영역의 특성만 반영되어 시추공 주변 매질의 특성에 아주 민감하다는 것이며, 결국 대개의 경우 투수성이 큰 천부층의 특성에 크게 영향을 받는다.

펄스시험은 시추공 내 임의 격리구간에서 행하여지는 순간충격시험으로서 특별히 펄스시험이라 일컫는데, 전자의 시험법에 비하여 저투수성암반의 투수성 시험에 아주 유용하다. 가압 방식을 적용할 때 반응 압력은 시험장비의 압축성에 민감하지만, 본 연구에서처럼 배출 방식에 의한 경우에는 시험장비에 의한 영향이 제거될 수 있다.

전공 순간충격시험과 펄스시험의 결과는 Bower & Rice법(Bower and Rice, 1976)과 Hvorslev법(Hvorslev, 1951)을 이용하여 해석하였으며, 분석에 이용된 소프트웨어는 AQTESOLV (V.2.5)이다. 각각의 해석법에 관하여는 함세영 외(2001)에 상세히 정리되었으며, 본 논문에서는 이를 인용, 약술한다.

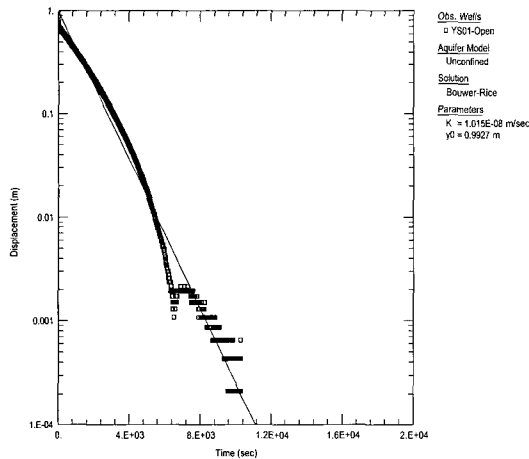
Bower & Rice법은 자유면대수층의 해석을 위한 방법이지만 스크린의 최상부가 상부 가압층으로부터 어느 정도 아래에 위치하는 조건에서는 피압대수층에도 적용이 가능하다. 수리전도도 해석식은

$$K = \frac{r^2 \ln(L_e/R)}{2L} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_t}{H_0}\right) \quad (7)$$

과 같다. 여기서,  $L_e$ 는 유효반경,  $R$ 은 우물 스크린 혹은 나공 구간의 반경,  $r$ 은 우물 케이싱의 반경,  $L$ 은 우물 스크린 또는 나공 구간으로서 물이 주입

**Table 5.** Hydraulic conductivities analysed by the slug and pulse test on the borehole YS-01.

Test method	Test zone	Test interval	Static groundwater level (m)	Initial displacement (m)	K (m/s)	
					Bouwer & Rice	Hvorslev
Slug	Open hole	0.0~500.0	2.82	93.10	1.02E-08	1.14E-08
	Zone 14	0.0~ 39.0	3.04	60.22	2.66E-08	3.16E-08
	Zone 13	40.5~ 79.5	3.49	22.22	2.51E-09	2.72E-09
	Zone 12	81.0~100.5	3.06	40.42	3.01E-09	3.02E-09
	Zone 11	102.0~129.5	3.22	39.92	2.61E-09	2.53E-09
	Zone 10	131.0~142.5	2.69	42.82	2.53E-11	2.35E-11
	Zone 9	144.0~175.5	2.43	41.02	3.62E-10	3.53E-10
	Zone 8	177.0~232.5	2.59	45.47	2.62E-10	2.58E-10
	Zone 7	234.0~258.0	4.18	40.95	2.41E-08	2.22E-08
	Pulse	Zone 6	259.5~307.5	2.46	35.25	1.99E-11
Zone 5		309.0~327.0	2.62	40.75	2.17E-10	1.92E-10
Zone 4		328.5~373.5	1.48	42.42	6.97E-11	6.44E-11
Zone 3		375.0~421.5	2.37	43.50	2.34E-09	2.14E-09
Zone 2		423.0~456.0	2.48	35.42	2.33E-09	2.07E-09
Zone 1		457.5~500.0	2.48	36.20	2.70E-08	2.41E-08
$K_A$ , Eq. (1)					6.53E-09	6.52E-09
$K_H$ , Eq. (2)					1.19E-10	1.12E-10
$K_G$ , Eq. (3)					1.02E-09	9.82E-10



**Fig. 11.** Slug test analysis by the Bouwer & Rice method at the borehole YS-01.

되는 구간, 그리고  $H_0$ 는 시간 0일 때의 수위강하,  $H_t$ 는  $H_0$  이후의 경과시간  $t$ 일 때의 수위강하이다.

Hvorslev법은 지하수면 아래의 천부의 모래층 또는 점토층에 적용되며 우물의 스크린이나 시추공이 대수층을 완전히 관통하지 않았을 경우에도

사용이 가능한 해석방법으로 수리전도도의 해석식은 다음과 같다.

$$K = \frac{A}{F(t_1 - t_2)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

여기서,  $A$ 는 시추공의 단면적,  $F$ 는 형상계수로서 시추공의 스크린 구간의 직경, 길이 그리고 모양에 좌우된다.  $h_1$ 과  $h_2$ 는 각각 시간  $t_1$ ,  $t_2$ 에서의 수위이다. 만약 스크린의 길이에 대한 반경의 비 ( $L/R$ )가 8이상인 경우에는 다음 식을 적용한다.

$$K = r^2 \frac{\ln(L/R)}{2L} \frac{\ln(h_1/h_2)}{(t_1 - t_2)} = r^2 \frac{\ln(L/R)}{2LT_0} \quad (9)$$

여기서,  $r$ 은 우물케이싱의 반경이며,  $T_0$ 는 최초 상승이나 최초 하강의 37%에 해당하는 수위에 도달하는데 걸린 시간으로서 원래의 유량을 유지하면서 수위가 평형상태로 되는데 걸리는 시간이다.

전공 순간충격시험과 펄스시험은 상호 시험방법에 의한 차이를 비교하기 위하여 다중패커시스템이 설치된 YS-01 공에 한하여 이루어졌으며,

해석결과는 Table 5에 정리하였다.

Fig. 11은 전공 순간충격시험에 대하여 Bouwer & Rice법으로 분석한 결과를 보이는 예이다. 이 시험 결과에 대하여 해석방법에 따른 수리전도도 값은 거의 유사한 수준을 보였으며, 수리전도도는 약  $1E-8$  m/s으로 투수성이 상당히 양호한 매질의 특성에 해당하는 값을 보였다.

심도에 따른 구간별 펄스시험에 의한 수리전도도의 범위는 최대  $3.16E-8$  m/s부터 최소  $1.88E-11$  m/s에 이른다.  $K_A$ 는 약  $6.5E-9$  m/s,  $K_H$ 는 약  $1E-10$  m/s, 그리고  $K_G$ 는  $1E-9$  m/s으로서, 이는 전공 순간충격시험에 의한 값에 비하여  $K_A$ 는 약 1.5배,  $K_H$ 는 약 100배, 그리고  $K_G$ 의 경우에는 약 10배 가량 투수성이 낮게 평가된 것이다.

### 수리지질 단위층의 설정과 유효수리전도도

4개 시추공에서 검출된 단열빈도의 수직적 분포양상(Fig. 7(a))과 특히, YS-01 공에서의 잠재 투수성 단열의 수직적 분포경향(Fig. 7(b)), 그리고 4개 공에서 해석된 수리전도도의 수직적 분포(Fig. 8)를 종합하면, 지표부를 포함하는 상부 수리지질 단위층과 하부 수리지질 단위층의 경계는 대략 -160m 부근으로 설정할 수 있다.

Fig. 12는 3가지 수리시험에 의한 결과를 종합 도시한 것으로서, 이 그림에서 펄스시험에 의한 수리전도도 역시 동일 구간에서 이루어진 정압주입시험의 결과와 유사한 경향을 보인다. 따라서, 앞서의 상하부 경계로 설정된 지점은 펄스시험의 해석결과와도 크게 다르지 않다고 할 수 있다.

한편, 전공 순간충격시험의 결과는 YS-01 공의 전 구간에 걸쳐서 가장 투수성이 높은 구간에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 관심의 대상이 되는 투수성 구간의 심도까지 케이싱과 완벽한 그라우팅이 전제되지 않는 조건에서는 이 시험방법 자체가 갖는 특성 때문에 주요 투수성 구조와 풍화대를 포함하는 천부 파쇄구간의 투수성에 지배될 수 밖에 없다.

본 연구의 목적에 따라 단열암반을 등연속체 매질 개념으로 평가하기 위해서는 화강암에 발달된

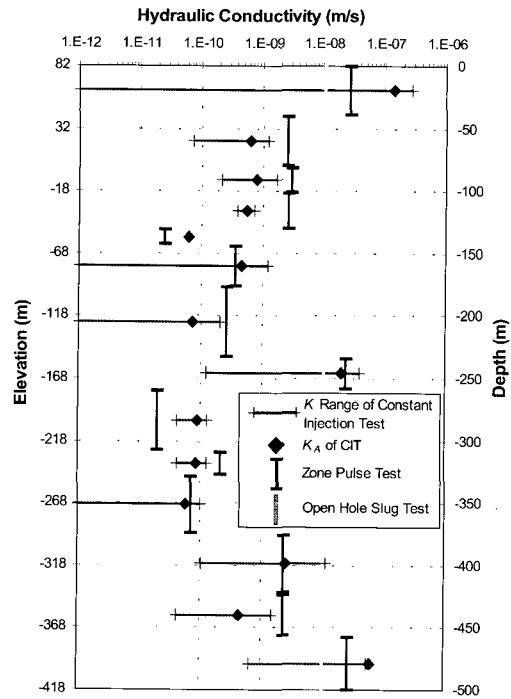


Fig. 12. Comparison of the hydraulic conductivities with the constant injection test, pulse test and open hole slug test result.

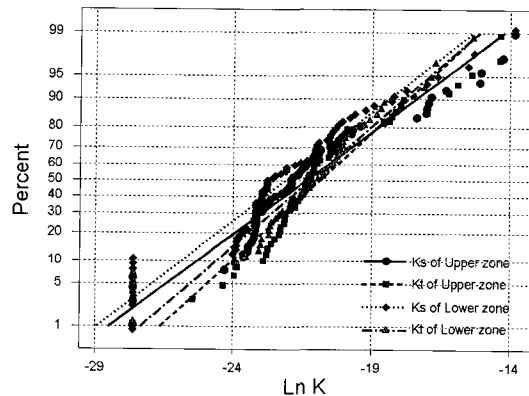


Fig. 13. Normal probability plot of the logarithmic hydraulic conductivity analysed from the constant injection test.

투수성 단열의 공간적 분포특성과 매질의 수리적 특성 측면에서 통계적으로 균질하다는 가정하에서 이루어질 수 있다. 이 가정은 Dagan(1979)에

**Table 6.** Summary of the effective hydraulic conductivities and statistics in the study site (m/s). ( $K_s$  and  $K_t$  :  $K$  by the steady state and transient state analysis, B & R: Bouwer and Rice method, H: Hvorslev method)

	All data		Upper zone		Lower zone		
	$K_s$	$K_t$	$K_s$	$K_t$	$K_s$	$K_t$	
Constant injection test & Fall-off test	$K_G = K_E$	3.47E-10	7.23E-10	5.27E-10	7.57E-10	2.45E-10	6.81E-10
	$K_A$	3.14E-10	2.01E-08	4.24E-08	3.03E-08	2.21E-08	8.79E-09
	$K_H$	1.02E-10	1.92E-11	1.37E-11	4.18E-11	8.41E-12	1.21E-11
	Median	2.51E-10	5.84E-10	3.07E-10	5.19E-10	1.29E-10	7.24E-10
	Max	9.87E-07	5.76E-07	9.74E-07	5.76E-07	9.87E-07	2.14E-07
	Min	1.00E-12					
	All data		Upper zone		Lower zone		
	B & R	H	B & R	H	B & R	H	
Pulse test	$K_G = K_E$	1.02E-09	9.82E-10	1.68E-09	1.73E-09	7.75E-10	7.17E-10
	$K_A$	6.53E-09	6.52E-09	6.95E-09	7.98E-09	6.30E-09	5.71E-09
	$K_H$	1.29E-10	1.12E-10	1.23E-10	1.14E-10	1.17E-10	1.10E-10
	Median	2.34E-09	2.11E-09	2.61E-09	2.72E-09	3.62E-10	3.53E-10
	Max	2.70E-08	3.16E-08	2.66E-08	3.16E-08	2.70E-08	2.41E-08
	Min	1.99E-11	1.88E-11	2.53E-11	2.35E-11	1.99E-11	1.88E-11

의한 식 (4)를 만족시키며, 2차원의 흐름에 대하여  $K_E = K_G$ 로 표현될 수 있다. 따라서, 상하부 수리지질 단위층의  $K_E$ 는 Fig. 13에 보이는 분석을 통하여 Table 6과 같이 정리된다.

상부 수리지질 단위층의  $K_E$ 는 일정구간별 정압 주입/수위강하시험의 경우 5.27E-10 m/s ~ 7.57E-10 m/s의 범위를 가지며, 펄스시험에 의한 경우에는 약 1.7E-9 m/s이다. 하부 수리지질 단위층에서는 전자의 경우 2.45E-10 m/s ~ 6.81E-10 m/s의 범위를 가지며, 후자에 의한 경우에는 7.17E-10 m/s ~ 7.75E-10 m/s의 범위를 갖는다. 한편, 심도 500m 까지를 하나의 균질한 단위층으로 가정한다면 정압주입시험에 의한 경우 3.47E-10 ~ 7.23E-10 m/s, 펄스시험의 경우에는 1.02E-09 ~ 9.82E-10 m/s의 범위를 갖게 된다.

이로써 상부 영역의  $K_E$ 가 하부 영역에 비하여 약 2배 가량 큰 것으로 계산됨을 알 수 있으며, 시험방법에 의한 차이를 살펴 보면, 펄스시험의 결과가 정압주입/수위강하시험 결과에 비하여 2~3배 더 크게 계산됨을 알 수 있다.

### 토의 및 결론

정압주입시험에 대한 펄스시험 결과의 차이를 검토해 보면, Fig. 12에서 보이는 바와 같이 약 1E-10 m/s 이하의 저투수성 구간에서는 더 낮게 계산되고, 1E-8 m/s부터 1E-10 m/s 구간에서는 비슷하거나 더 높게, 그리고 1E-8 m/s 이상인 구간에서는 비슷하거나 더 낮게 계산되는 것을 알 수 있다. 저투수성 구간에서 정압주입시험이 펄스 시험에 비하여 민감하지 못한 이유는 주입시험기의 호스와 주입수 자체의 압축성에 의한 영향을 고려해 볼 수 있다. 즉, 저투수성 매질의 경우, 주입시험에 영향을 줄 수 있는 상기의 요인들을 배제시킬 수 있는 펄스시험이 매우 민감한 방법인 것으로 사료된다. 그러나, 이들 양자간의 시험에 의한 수리전도도는 상호 약 0.9의 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되므로 신뢰도 측면에서는 만족할만한 수준인 것으로 사료된다.

한편, 전공 순간충격시험에 대한 해석법의 차이는 함세영 외(2001)의 연구결과에서처럼 큰 차이

를 보이지 않았다. YS-01 공에서 이루어진 시험의 결과를 살펴 보면, 전 구간에 걸쳐서 가장 투수성이 높은 구간에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 조사공 전 구간에 대한 조건에서는 이 시험 방법 자체가 갖는 특성 때문에 주요 투수성 구조와 풍화대를 포함하는 천부 파쇄구간의 투수성을 대변할 수 밖에 없다.

이러한 관점에서 단열암반의 투수성을 평가하기 위한 수리시험을 계획할 경우, 예를 들면, 천부의 풍화대를 포함하는 파쇄구간에서 이루어지는 사업이라면 전공 순간충격시험 혹은 현장조건이 갖추어진 경우 양수시험 등이 효과적일 것이며, 지하수부 터널 등의 지하공간시설물이 설치되는 사업이라면 이중 패커를 이용한 일정구간 정압주입/수위강하시험 또는 펄스시험이 고려될 수 있을 것이다.

단일 결정질암반이 분포하는 지역에서 등연속체매질 개념으로 수리지질 단위층을 정의하는 것은 간단한 일은 아니다. 국지적인 불균질한 특성을 갖는 지하수체계에 대하여 공간적으로 유사한 수리지질학적 단위층으로 구분하기 위해서는 지하수의 수리적, 화학적인 특성이 조사되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 암반의 지하수흐름을 지배하는 단열분포특성을 기초로 하여 일차적으로 크게 상하부 단위층의 경계설정을 시도하였고, 심도별 수리전도도 변화특성을 이차적인 요소로 대비하였다. 더불어 가장 바람직한 것은 공간적인 지하수화학 특성이 대비되어야 하나 본 논문에서는 다루지 않았다. 본 연구지역에 대한 지하수화학 특성 연구는 현재 진행 중에 있으며, YS-01 공에서의 삼중수소에 의한 지하수 연대측정 결과에 의하면 본 논문에서 설정한 경계부의 상부 영역에서는 약 10년, 하부 영역에서는 10~50년인 것으로 분석되었다. 또한, 하부영역에서의 Na와 F의 점진적 증가와 Ca와 K의 급격한 감소가 확인되었다. 따라서, 향후 지하수화학 자료를 포함한 종합적인 분석을 통하여 수리지질 단위층에 대한 향상된 개념모델이 제시될 수 있을 것이다.

본 논문의 결론은 다음과 같이 정리된다.

(1) 연구지역 내 4개 시추공에서 조사된 단열분포 특성을 근거로 할 때, 조사대상 영역의 암반은 수평적으로 단일 불연속면체의 구조적 특성을 가지

며, 수직적으로는 전체 단열빈도와 투수성 단열빈도의 변화양상으로부터 약 160m 심도를 기준으로 상하부 영역으로 구분할 수 있다.

(2) 연구지역은 단열이 비교적 많이 분포하는 암반이나 대부분 2차 광물로 충전되어 있어 전체적인 투수성은 크지 않고, 단열대 및 주변 파쇄구간, 그리고 소수의 개구상 단열이 투수성을 지배한다.

(3) 4개 시추공에 대한 정압주입/수위강하시험에 대한 정상류와 부정류 해석결과, 이들의  $K_G$ 는 각각  $3.47E-10$  m/s,  $7.23E-10$  m/s이다.

(4) YS-01 공에서의 전공 순간충격시험에 의한 수리전도도는 약  $1E-8$  m/s<sup>2</sup>으로 투수성이 크게 계산되었다.

(5) 격리구간별 펄스시험에 의한 수리전도도의 범위는 최대  $3.16E-8$  m/s<sup>2</sup>부터 최소  $1.88E-11$  m/s<sup>2</sup>이고,  $K_G$ 는  $1E-9$  m/s이다.

(6) 상부 수리지질 단위층의  $K_E$ 는 일정구간별 정압주입/수위강하시험의 경우  $5.27E-10$  m/s ~  $7.57E-10$  m/s의 범위를 가지며, 펄스시험에 의한 경우에는 약  $1.7E-9$  m/s이다. 하부 수리지질 단위층에서는 전자의 경우  $2.45E-10$  m/s ~  $6.81E-10$  m/s의 범위를 가지며, 후자에 의한 경우에는  $7.17E-10$  m/s ~  $7.75E-10$  m/s의 범위를 갖는다.

## 사 사

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

## 참 고 문 헌

- 김경수, 배대석, 김천수, 박병윤, 고용권, 2001, 고성 및 유성지역 중생대 화강암의 단열체제 분포특성, KAERI/TR-1817/2001, 한국원자력연구소, 80p.
- 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 한국지질도 대전도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서, 자원개발연구소, 26p.
- 함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격시험에 의한 화강암지역의 수리적 매

- 개변수 산출, 지질공학, 11권, 1호, 63-79.
- Almén, K. E., Anersson, J. E., Carlsson, L., Hansson, K., and Larsson, N. Å., 1986, Hydraulic testing in crystalline rock, A comparative study of single-hole test methods, SKB Technical Report 86-27, Stockholm.
- Andersson, J.E. and Persson, O., 1985, Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB Technical Report 85-19, Stockholm.
- Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resour. Res.*, v. 12, n. 2, 423-428.
- Broch, E. and Kjørholt, H., 1993, Verification of large scale permeability tests in hard rocks, Proc. of the XXIVth Conf. Int. Ass. of Hydrogeologists, Hydrogeology of Hard Rocks, Norway.
- Carlsson, A., Gustafson, G., Lindblom, U. and Olsson, T., 1990, Scale effects in the determination of hydraulic properties of rock masses, Proc. ISRM Rock Joint Conf., Scale Effects in Rock Masses, Pinto da Cunha(ed.), Balkema, Rotterdam.
- Dagan, G., 1979, Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations, *Water Resour. Res.*, v. 15, n. 1, 47-63.
- Freeze, R.A., 1975, A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, *Water Resour. Res.*, v. 11, n. 5, 725-741.
- Golder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation (Version 2.306).
- Gustafson, G., 1986, Prediction of gross permeability of fractured crystalline rock, Proc. Nordic Hydrological Conf., Reykjavik, 849-858.
- Horner, D.R., 1951, Pressure buildup in wells, Proc. of 3rd World Pet., The Hague, Sec. II, 503-523.
- Hvorslev, M.J., 1961, Time lag and soil permeability in groundwater observations, U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36.
- Moye, D.G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, *Civil Eng. Trans.*, Institution of Eng., Australia, .CE v. 9, n. 1, 95-100.
- Terzaghi, R., 1965, Source of error in joint surveys, *Geotechnique*, v. 15, 287-304.

투 고 일 2002년 7월 8일  
 심 사 일 2002년 7월 9일  
 심사완료일 2002년 8월 20일

---

김경수  
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구 분야  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 Tel : 042-868-2365  
 e-mail : kskim@kaeri.re.kr

김천수  
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구 분야  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 Tel : 042-868-2063  
 e-mail : ncskim1@kaeri.re.kr

배대석  
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구 분야  
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 Tel : 042-868-2030  
 e-mail : ndsbae@kaeri.re.kr