

정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석 Flow Dimensional Analysis for Constant Pressure Injection Test

김천수(Kim, Chun Soo)

한국원자력연구소

이은용(Lee, Eun Yong)

배대석(Bae, Dae Seok)

김경수(Kim, Kyung Su)

요약/Abstract

지하매질의 유동특성을 알기 위한 직접적인 방법은 아직도 현장수리시험에 의존하고 있다. 열극암반에서 유동모델의 개념정립을 위하여는 열극체계분포와 특히, 수리시험해석결과가 중요시되고 있다. 국내에서 수행되고 있는 수리시험은 조사공구간별에 따른 수리전도도를 방사상의 정상류로 가정하여 결과를 해석하고 있다. 또한 시험대상 매질을 균질한 대수층 또는 단순한 기하학적 형태의 매질로 간주하며 구간별 투수량계수는 시험구간을 가로지르는 각 열극의 투수량계수의 합과 같다고 가정한다.

국내 기존의 수리시험 및 해석방법으로는 수리학적 경계면의 영향(boundary effects)이나 유동로의 기하학적 형태(flow geometry)에 대한 자료를 얻기가 힘들며, 일정한 조사공 주변을 벗어나면 투수성열극의 연결성에 대한 정보를 구할 수 없다. 열극특성을 고려한 지하수유동 해석을 위하여 단일공 정압주입시험을 실시하였으며, 비정상류해석방법을 통하여 유동차원(flow dimension)에 대한 분석을 시도하였다. 시추시에는 단일패커시험을 일정구간별로 시행하였으며, 조사공의 시추후에는 이중패커에 의한 구간별 시험을 실시하였다.

비정상류해석으로 구한 수리전도도값은 정상류해석의 결과와 큰 차이(10배 이내)는 없었으나, 정압하에서 도출된 유동량변화곡선에서 유동차원분석이 가능하였다. 상부구간(<10m 깊이)의 단일 및 이중패커시험결과는 모두 정상류의 유동차원이 나타났으며, 이는 영향반경의 경계면이 open system임을 알 수 있다. 15m 깊이에서 도출된 유동량변화곡선은 1차원 유동상태에서 3차원

(구상유동)으로 변화하였다. 하부구간(25m 깊이)의 시험결과는 closed system 특성이 관찰되었으며, 이는 조사구간에 연결된 열극이 수리적으로 격리되어 있음을 알 수 있다.

현장수리시험으로부터 보다 많은 자료를 도출하기 위하여는 무엇보다도 수리시험장비의 보완이 필요하다. 특히 조사구간을 완벽하게 분리할 수 있는 패키장비와 미세한 유동량변화를 계측할 수 있는 유량계의 확보가 필수적이며, 조사구간의 압력변화를 자동기록할 수 있는 계측기기가 필요하였다.

Nowadays, the field hydraulic test is still an only method to evaluate groundwater characteristics in subsurface. The results of hydraulic test are very important for the concept model of fracture hydrogeology as well as the geometric pattern of fractures. The hydraulic tests performed in Korea are generally analysed under such assumption as steady radial flow in homogeneous aquifer or along simple geometry of fractures. Also the transmissivity measured in a fixed interval length is equivalent to a sum of individual fracture transmissivities in test length.

The boundary effects of well hydraulics and the geometry of flow paths are hardly obtained from the test results analysed by a steady flow method. To circumvent this problem, the flow dimensional analysis was attempted from the results of constant pressure injection test carried out in a fractured granite area.

A comparison of the hydraulic conductivity values from the transient and steady analysis shows that the latter is about a factor of 2~3 higher than the former. However, it was possible to analyse a flow dimension of each test interval from flow rate variation with time. The upper part of the bedrock(<10m deep) indicates an open boundary and the flow dimension shows nearly steady states, while the lower part of the bedrock(>25m deep) is characterized as sublinear flow dimension with a closed boundary. In one of the test sections(15m deep), the flow dimension was changed from linear flow to spherical flow.

From the experience of this study, one of the immediate problems to be solved is to enhance the field testing equipments, i.e., an accurate flowmeter with autorecording and a pressure detecting device to be able to install in the test section.

서 언

현재 이용되고 있는 암반지하수유동에 대한 개념모델은 연속체개념과 열극개념으로 크게 양분할 수 있다. 고전적인 연속체개념(classical continuum)은 다공성매질의 수리전도도,

공극율, 지하수압 등 수리상수들을 공간에 분포하는 연속적인 함수로 가정하고 있다. 평균유속은 일정한 매질의 체적에서 평균수두의 변화율에 선형적으로 비례하며, 비례상수인 수리전도도는 매질을 대표하는 평균치를 사용하고 있다. 이러한 가정은 암반의 수리

학적인 복잡한 특성을 무시하였으며, 분석을 위주로 하는 가상적인 연속체이다. 또한 매질의 수리학적 특성인 체적크기에 따르는 변화를 고려하지 않았다.

추계론적 연속체개념(stochastic continuum)은 대상체적의 평균치나 수리상수의 불확실성을 줄이기 위하여 통계학적인 방법(residual analysis, cross-validation, kriging 등)을 사용하여 고전적인 연속체개념을 보완하고 있다. 부지고유성 수리상수는 대표체적과 평균수리전도도에 의하여 대표된다.

또 하나의 개념은 열극망(fracture network) 개념으로 지하수유동은 수두구배, 열극망의 연결성, 그리고 각 열극의 수리특성에 의하여 지배된다고 가정한다. 이러한 개념의 적용을 위해서는 열극의 기하학적 특성과 공간적 분포에 대한 자료가 필수적이다. 그리고 열극의 개구성(hydraulic aperture)과 수리전도도에 대한 이론적인 관계가 설명되어야 한다. 따라서 열극망개념에서 요구되는 부지고유성 수리특성은 수리전도도값 뿐만 아니라, 열극기하특성에 대한 결정론적 또는 통계학적 자료가 요구된다. 현재의 조사방법으로는 열극망모델에 필요한 열극기하특성의 도출이 불충분하며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수리학적 특성을 분석하여 열극 분포 특성을 유추할 수 있는 유동차원해석 방법이 개발되고 있다(Barker, 1988 ; Doe and Geier, 1990). 유동차원을 규명하려는 궁극적인 목표는 저투수성암반에 분포하는 열극의 기하학적 특성과 수리특성의 상호 비교를 통하여 지하수유동경로를 가능한 한 지질학적 특성을 고려하여 해석하는데 있다.

본 논문은 기본조사 항목인 현장수압시험의 결과를 이용한 지하수유동차원의 해석방법을

소개하고, 단순히 상대적인 수리전도도 도출에만 한정되어 온 단일공수리시험에 대한 제고를 통하여 열극망모델에서 요구되는 자료도출을 시도하고자 한다.

단일공수리시험의 해석방법

기본해석방법

지하매질의 지하수유동특성을 알기 위한 직접적인 방법은 아직도 현장수리시험에 의존하고 있다. 수리시험결과는 대상매질이 균질하고 등방성이며, 지하수유동은 Darcy 법칙에 지배된다는 가정하에 해석되어지고 있다.

$$Q = \frac{T}{C} \Delta P$$

여기서 C는 유동형태 및 유동로의 기하학적 분포를, T는 지하수의 물리적특성과 지하매질의 수리특성을 대표하는 상수가 된다. 상기 상수들은 단일공수리시험을 통하여 계측되고 있다. 단일공시험은 지하수체계의 압력변화에 따른 조사공의 반응을 관찰하므로써, 암반의 수리상수를 계측하게 된다. 가장 대표적인 방법으로는 정류시험(constant flow-rate)과 정압시험(constant pressure)방법이 있다.

정류시험법은 1930년대부터 석유공학과 지하수개발분야에서 사용되어 온 방법으로서 일정량의 물을 주입/양수할 때, 공내에서의 시간경과에 따르는 수압(수위)를 측정하므로써 암반의 수리특성을 알아내는 방법이다. 시험결과 해석은 유동방정식 $\nabla^2 h = K \partial h / S \partial t$ 에서 물 주입/양수시 공 주변매체에서의 지하수흐름은 방사상유동(radial flow), 수평흐름을 유지하며 Darcy의 법칙($v=ki$)을 따른

다는 가정하에 Theis(1935)의 해인

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi t} [-E_i(-u)], \quad u = \frac{r_w^2 S}{4Tt}$$

로부터 구하게 된다. 또한 Theis는

$$\Delta h = \left(\frac{Q}{4\pi t}\right) W(u), \quad \frac{r^2}{t} = \left(\frac{4T}{S}\right)u$$

의 well function(W(u))에 대한 표준곡선과 실측치 Δh vs t 의 중첩법으로서 수리상수를 구하는 방법을 제시하였고, Jacob(1950)은 근사해로서

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi t} [-0.5772 - \ln u]$$

과 같은 관계식을 이용하여 수리상수를 구하는 방법을 제시하였다.

석유공학 분야에서는 압력과 시간을 무차원(dimensionless)항으로 변환하여 해를 사용하고 있다. 무차원 압력은 시간, 위치, 체계의 형태 등의 함수로 이루어지며 비정상류에서는 항상 무차원 시간의 함수로 나타난다. 또한 실제압력(real pressure)에 대하여 선형적인 관계를 갖는다. 무차원 시간은 조사공의 반경과 수리전도도, 공극율이 포함되어 있으며, 실질적인 시간에 함수대의 특성과 관련된 scale factor의 곱으로 얻어진다.

$$\begin{aligned} P_D(t_D, r_D) &= -\frac{1}{2} E_i\left(-\frac{r_D^2}{4t_D}\right) \\ &\approx \frac{1}{2} [\ln(t_D/r_D^2) + 0.80907] \\ t_D &= \frac{Kt}{S_s r_w^2}, \quad r_D = r/r_w \end{aligned}$$

무차원 압력의 수치는 방정식, 도표 또는 표에서 얻을 수 있다(Earlougher, 1977).

유동차원해석방법

정압주입시험에 대한 이론은 토목공학, 지하수학, 석유공학 등에서 독립적으로 개발되어 압력시험, 패커시험, Lugeon시험 등으로 알려져 있으며, 주로 토목공학 분야에서 투수성이 낮은 암반을 대상으로 사용되고 있다. 결과해석은 전통적인 정상류해석방법을 사용하고 있다. 정압시험의 비정상류해법은 지하수학과 석유공학에서 각각 개발되었다. Jacob과 Lohman(1952)은 자분정(flowing well)에서 얻은 자료를 근거로 무한대의 경계면을 갖는 대수층에 대한 flow-rate curve(유량곡선)을 제시하였으며, 비정상류의 유량곡선은 Theis의 압력곡선의 역과 유사하다는 것이 인지되었다. Hantush(1959)는 정압경계면(open boundary)과 무유동경계면(closed boundary)에 대한 해석법을 제시하였다. 암반에서의 수리전도도는 일반적으로 방사상유동이라는 가정하에 반대수도표(semilog diagram)의 직선법에 의하여 얻어지며, 만약에 방사상유동을 벗어나는 선형유동은 Log-scale의 표준곡선에서 중첩법에 의하여 구한다.

단일공에서 정압시험의 비정상류해석은 아직도 다공성매질의 연속체개념의 접근방법을 벗어나지 못하고 있으나 다음과 같은 장점 때문에 보다 깊은 관심대상이 되고 있다. 정압시험은 시험구간에서 정압상태를 유지하므로서 공내 저류효과를 고려하지 않아도 되며, 저투수성암반에서 초기의 정압상태를 유지하기가 용이하여 시험초기치를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 한편 정류시험에서는 일정유량(constant flow-rate)을 결정하기 위하여 시험전 암반의 개략적인 수리전도도 값을 알 수 있어야 한다. 주입유량의 크기가 작을 경우 만족스러운 결과를 도출하기가

어렵고, 반대로 너무 많은 주입량은 수압과 쇄현상을 유발시켜 실제의 수리특성을 오도할 수 있는 경우가 있다.

비정상류해석법은 유동영역(flow regime)의 형태와 경계면(boundary effect)에 대한 자료를 도출할 수 있다. Barker(1988)는 최근 이러한 유동상해석을 조사공에서 거리에 따른 유동체적변화를 기본으로 각 유동상의 일반 방정식을 유도하였다(Appendix 1). Doe와 Geier(1990)는 Barker의 방정식을 활용하여 Fig. 1에서와 같이 공 주변매체에서의 지하수유동영역의 형성에 따라 선형유동(1차원), 방사상유동(2차원), 구상유동(3차원)으로 구분되는 개념을 도입하여 이를 지하수유동의 차원으로 정의하였고, 스웨덴의 Stripa Project에서 수행한 정압시험결과에 대한 유동상 분석을 하였다.

Doe와 Geier(1990)는 Barker(1988)에 의한 비정상류변화에 대한 Laplace transform space solution,

$$\bar{Q}(p) = h_{w0} k b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-2} \frac{\phi v r_w \sqrt{(p/\eta)}}{p}$$

에 무차원유동량(Q_D)과 무차원시간(t_D)를 사용하여 무차원항으로 간결히 한 후, Stehfest algorithm을 사용하여 수치역산을 수행하므로써 t_D 에 따른 Q_D 의 표준곡선을 제시하였다(Fig 2). 이 표준곡선은 모든 차원의 유동상에 적용되며, 1차원 유동상은 기울기를 1/2로 갖는 직선으로 나타난다. 3차원유동상은 정상류와 유사하게 나타나며, 3차원보다 높은 차원의 유동상은 3차원유동과 유사하나 초기에 1/2의 기울기를 갖는 것이 특징이다. 정압주입시험의 수리상수분석은 표준곡선중첩법에 의하여 구할 수 있으며, 정수차원상의 유동($n=1,2,3$)

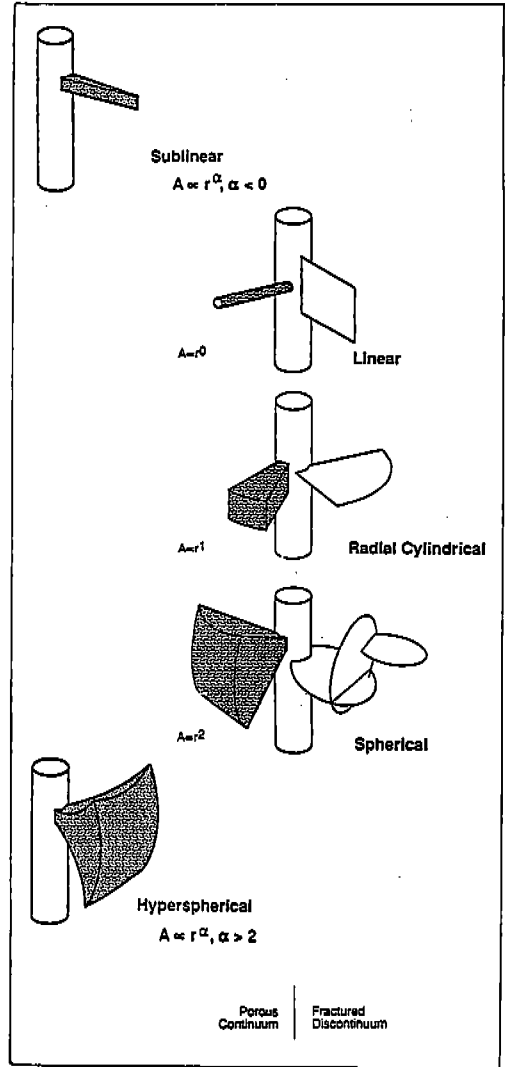


Fig. 1 Cases of flow dimension

인 경우는 각 직선도표상에 나타난 기울기에 의하여 쉽게 도출될 수 있다.

유동상형태를 결정하는 수리지질학적 요소는 열극의 기하학적 분포와 방향성 수리전도도를 들 수 있다. 각 유동차원은 각각의 유동형태(flow pattern)와 유동방정식을 갖게 된다. 차원을 정의하는 기하학적 특성은 주

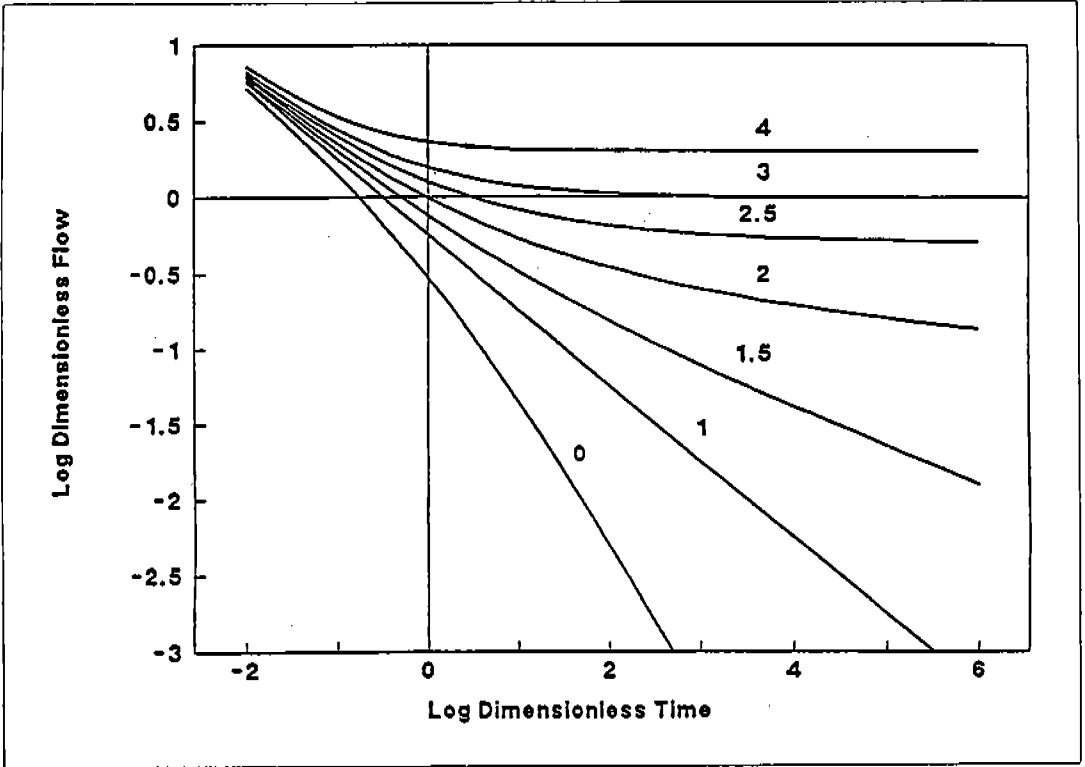


Fig. 2 Constant pressure type curves, dimension 0 to 4

입점(source point)으로부터 거리에 따라서 유동면적(conduit area)의 변화를 나타낸다. $n=1,2,3$ 의 선형, 방사상 및 구상류의 경우 상기 식의 선형방정식은 아래와 같이 정의된다.

$$\log Q = -\frac{1}{2} \log t + \frac{\sqrt{(K \cdot S_s)}}{Ah_{wo} \sqrt{\pi}} \quad (n=1)$$

$$1/Q = \frac{0.813}{h_{wo} T} \log t + \log\left(\frac{2.25T}{Sr_w^2}\right)^m \quad (n=2)$$

$$Q = 4hr_w^2 \sqrt{\pi K S_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + 4\pi Kh_{wo} r_w \quad (n=3)$$

또한 정수값사이의 분할차원(fractional dimension)은 subcylindrical flow($1 < n < 2$), subspher-

ical flow($2 < n < 3$) 및 Hyperspherical flow($3 < n$)로 각각 정의된다(Doe & Geier, 1990). 분할차원에 대한 해석은 표준곡선일치법에 의해 분석가능하다.

정압시험의 비정상류해법은 유량의 변화가 각 차원에서 직선으로 나타나도록 한 표준좌표를 선정하여, 각 차원에 맞는 수리상수(K, S)를 도출해 낸다. 즉, 선형유동은 Log Q와 Log t를 축으로 하는 도표에서 여러가지 기울기를 갖는 직선으로 나타난다(Fig. 3a). 기울기가 1:2를 이루는 유동형태는 열극을 따른 유동으로 해석하며, 기울기가 1:4를 이룰 때는 암반매질과 열극 모두를 통하여 유동하는 지하수의 특성으로 해석한다. 방사

상유동은 현장시험에서 가장 많이 관측되는 유동상으로, 즉, 수평열극이 조사공을 관통하였을 경우, $1/Q$ 와 $\text{Log } t$ 을 축으로 하는 도표에서 직선을 나타내게 된다(Fig. 3b). 구상의 유동상은 조사공 주변에 교차하는 열극이 잘 발달되어 있는 지역에서 나타나며, Q 와 $1/\sqrt{t}$ 의 도표에서 직선을 나타낸다(Fig. 3c).

선형유동인 경우는 1:2인 직선의 연장선에서 $Q(t_b=1)$ 를 알아 내며 수리전도도와 저류계수의 곱인 수리상수를 구할 수 있다. 이 경우에 저류계수를 가정하고 수리전도도값을

구할 수 있다. 방사상유동($n=2$)에서는 반대 수근사치방법인 기울기와 절편으로 투수량계수와 저류계수를 산출해 낸다. 구상유동에서 시간에 따른 유동량의 변화는 Q vs $1/\sqrt{t}$ 에서 직선을 나타내며, 선형유동의 경우와 달리 원점을 지나지 않고 절편을 갖게 된다. 구상유동에서도 방사상유동과 같이 기울기와 절편의 값으로부터 수리전도도와 저류계수의 값을 얻게 된다.

조사 및 시험방법

조사지역은 충북 음성군 봉곡리에 위치한 금봉광산내의 중생대 화강암지대에 3개 조사공을 5m거리를 두고 시추하였다. 본 논문에서는 35m의 수직공에서 실시한 정압주입시험결과만을 분석하였다. 단일패커에 의한 주입시험은 5m간격으로 시행하였으며, 열극의 분포가 많은 구간은 2m의 시험구간에 이중패커를 이용하여 주입시험을 수행하였다.

단일패커시험은 5m구간 시추후, 시추공상부를 단일패커로 차단하고 펌프에 의한 2~6 kg/cm^2 의 압력을 심도에 따라 조정하였으며, 각 시험구간의 유량변화를 측정하였다. 2m구간의 이중패커시험은 일정압을 유지하기 위하여 조사공보다 12m 높은 지점에 저수조를 설치하여 자연낙하에 의한 수압을 이용하였다. 이중패커는 2 $^{1/2}$ -Modular Test Tool (TAM : 250-MT)을 주문제작하였다(Fig. 4). 본 Test Tool은 shut-in-valve를 통하여 물을 주입할 수 있으며, 동시에 시험구간은 물론 시험구간 상부와 하부의 압력을 기록할 수 있다. 패커의 팽창구간은 50cm이상으로 주입수의 누수를 최대한으로 방지할 수 있었다.

단일패커시험과 이중패커시험은 한달 간격

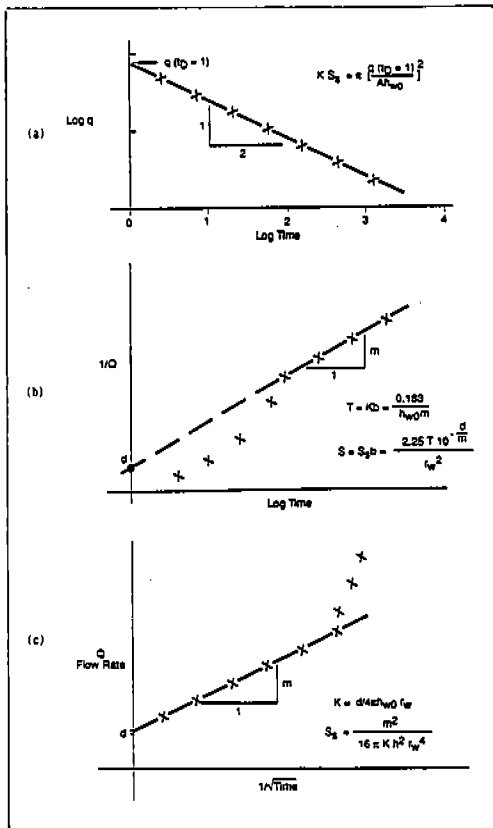


Fig. 3 Analysis of flow data
(a) Linear flow (b) Cylindrical flow
(c) Spherical flow

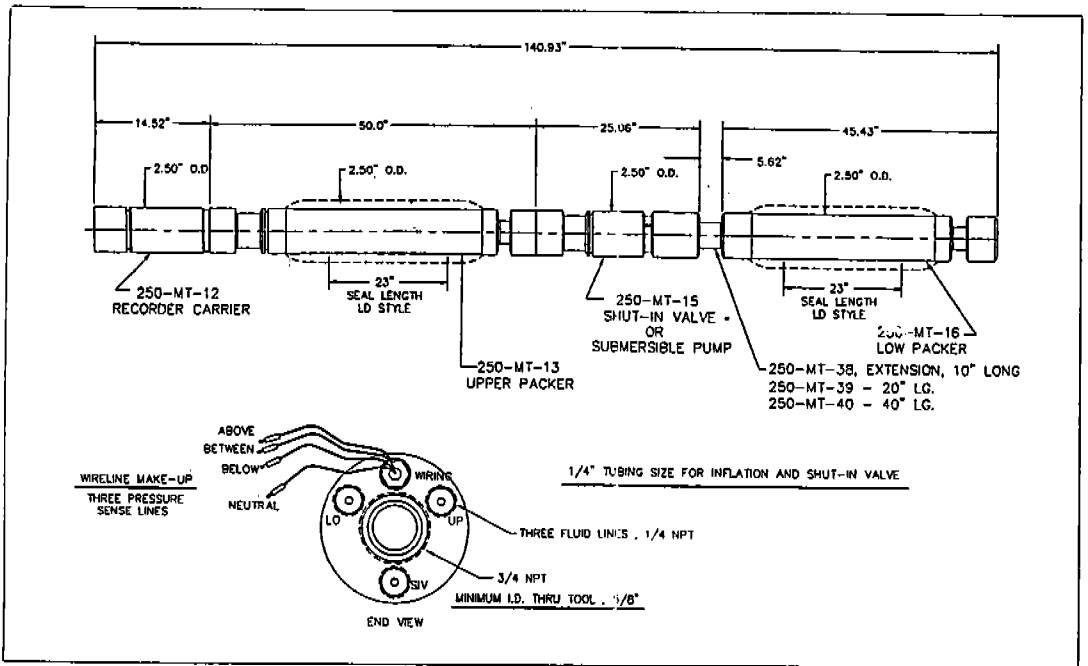


Fig. 4 Double packer system (TAM : 250-MT)

으로 수행되었으며, 자연수위변화는 단일패커시험시 지표면하 2.1~2.5m에서 측정되었으며, 이중패커시험시는 2.9m를 기록하였다. 자연수위변화는 장마기의 강우에 의한 변화에 기인되었다.

결과 및 해석

유동차원분석

단일패커시험결과는 시간에 따른 유동량변화의 수치가 분산된 형태를 보였다. 따라서 유동상의 분석을 할 수 있는 자료는 제한되었으며, 분석가능한 자료는 대부분 구상유동이나 정상류의 특성인 open boundary 영향을 나타내었다. 심도에 따른 주입수압은 15m 상부구간에 2kg/cm², 15~25m 구간은 4kg/cm², 그리고 25m하부는 6kg/cm²로 변화 주입하였

다. 6kg/cm²의 압력하에서 계측된 결과는 심하게 분산되어 유동차원을 해석할 수 없었다. 시험구간 10~15m에서 계측된 자료는 분산된 수치를 보이나 초기치를 제거하면 방사상유동보다 높은 차원이나 구상유동보다는 작은 차원의 특성을 보인다(Fig. 5).

같은 조사공에서 실시한 이중패커시험결과는 대체적으로 안정된 자료의 분포를 보인다. 이중패커시험은 4개의 시험구간에서 같은 압력하에서 시행하였다. 시험당시 자연지하수위는 2.9m로 기록되었으며, 시간에 따른 유동량의 변화는 심도에 따라 유동차원의 변화를 보였다(Fig. 6).

3~5m시험구간에서는 정상류의 유동상태를 나타냈으며, 5~7m 구간에서는 1/Q vs Log t 도표에서 concave upward의 형태를 나타내는 것으로 보아, 유동차원은 선형차원에서

정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석

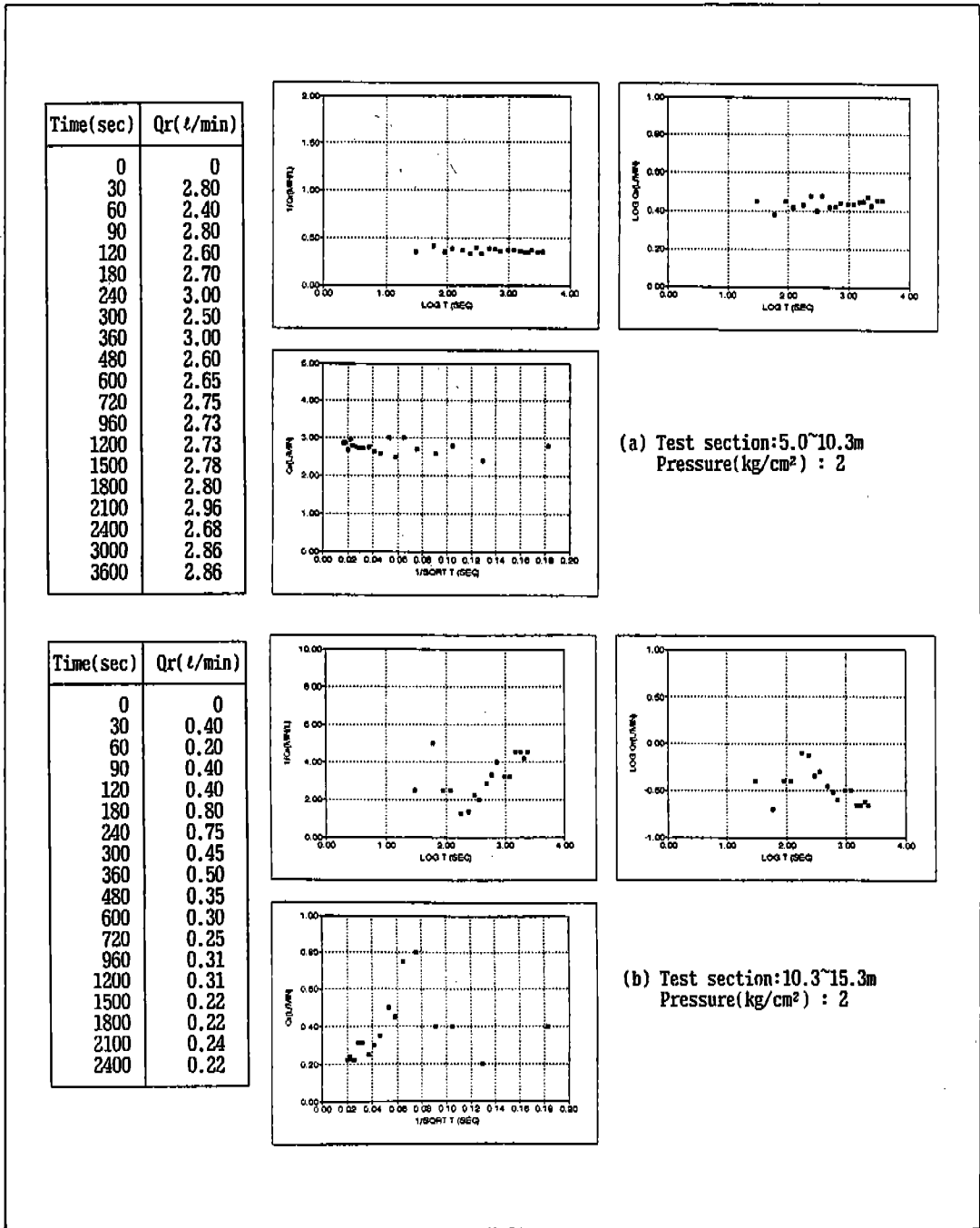
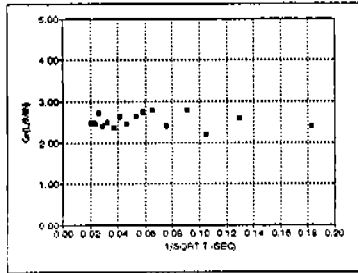
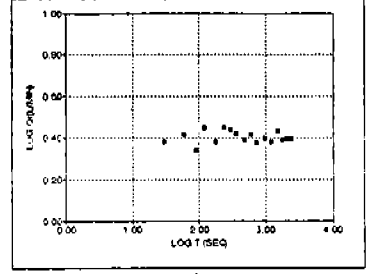
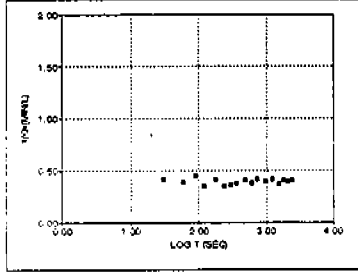


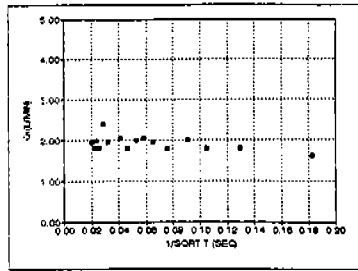
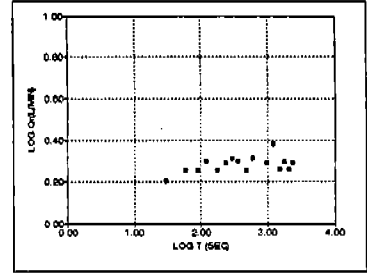
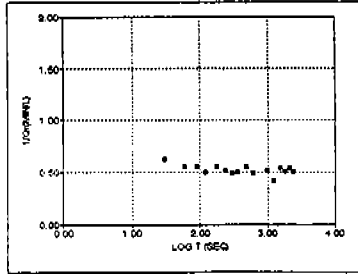
Fig. 5 Well test data obtained from borehole KB-2(single packer)

Time(sec)	Qr (t/min)
0	0
30	2.40
60	2.60
90	2.20
120	2.80
180	2.40
240	2.80
300	2.75
360	2.65
480	2.45
600	2.63
720	2.38
960	2.50
1200	2.41
1500	2.72
1800	2.45
2100	2.50
2400	2.48



(c) Test section: 15.3~20.0m
Pressure(kg/cm²) : 4

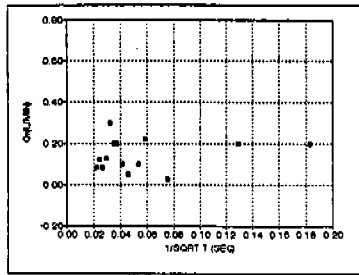
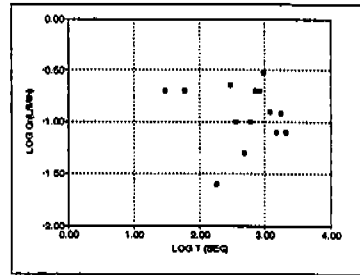
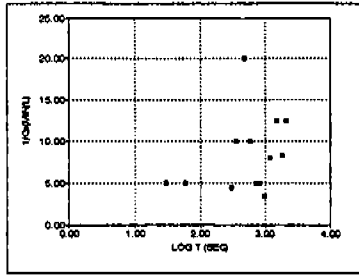
Time(sec)	Qr (t/min)
0	0
30	1.60
60	1.80
90	1.80
120	2.00
180	1.80
240	1.95
300	2.05
360	2.00
480	1.80
600	2.05
960	1.95
1200	2.40
1500	1.82
1800	1.98
2100	1.82
2400	1.96



(d) Test section: 20.0~25.0m
Pressure(kg/cm²) : 4

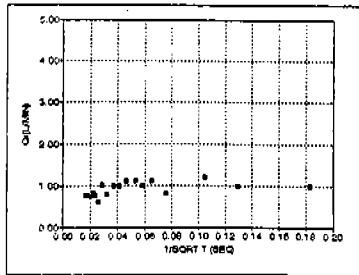
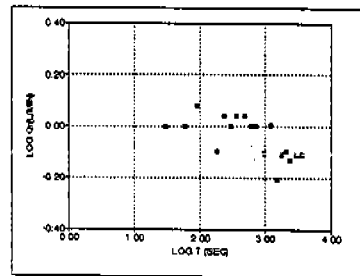
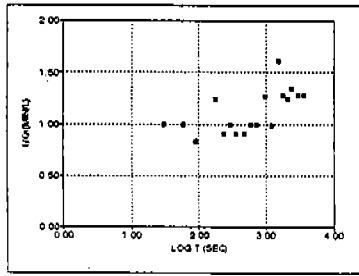
Fig. 5 (Continued)

Time(sec)	Qr(ℓ /min)
0	0
30	0.20
60	0.20
180	0.03
300	0.23
360	0.10
480	0.05
600	0.10
720	0.20
840	0.20
960	0.30
1200	0.13
1500	0.08
1800	0.12
2100	0.08



(e) Test section: 25.0~30.0m
Pressure(kg/cm²) : 6

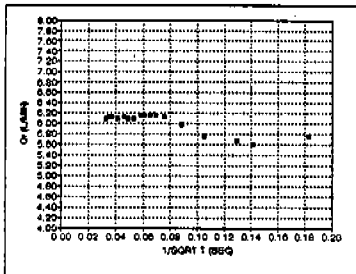
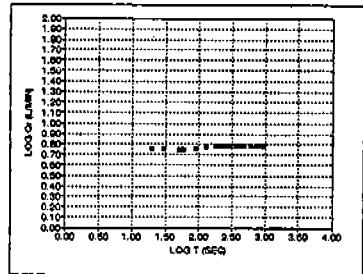
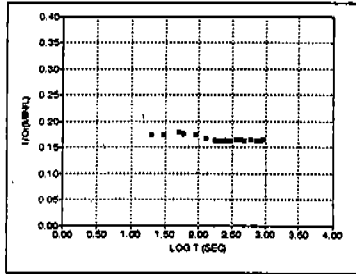
Time(sec)	Qr(ℓ /min)
0	0
30	1.00
60	1.00
90	1.20
180	0.80
240	1.10
300	1.00
360	1.10
480	1.10
600	1.00
720	1.00
960	0.79
1200	1.01
1500	0.62
1800	0.78
2100	0.80
2400	0.74
3000	0.78
3600	0.78



(f) Test section: 30.0~35.6m
Pressure(kg/cm²) : 6

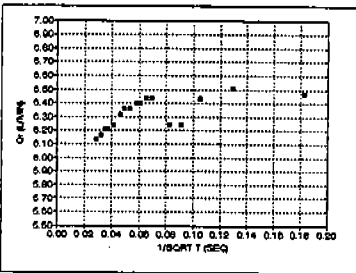
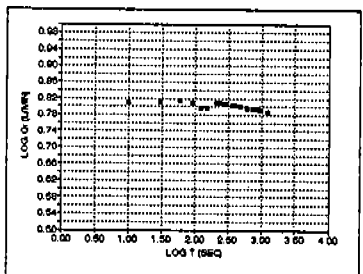
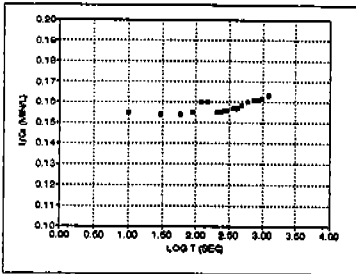
Fig. 5 (Continued)

Time(sec)	Qr(ℓ/min)
0	0
20	5.754
30	5.754
50	5.602
60	5.678
90	5.754
130	5.981
180	6.132
210	6.170
240	6.170
270	6.170
300	6.170
360	6.094
420	6.094
480	6.132
600	6.094
720	6.132
840	6.132
900	6.094
960	6.094
1200	6.094
1500	6.056
1800	6.019



(a) Test section:3.0*5.0m
Pressure(kg/cm²) : 2

Time(sec)	Qr(ℓ/min)
0	0
10	6.435
30	6.473
60	6.511
90	6.435
120	6.246
150	6.246
210	6.435
240	6.435
270	6.397
300	6.397
360	6.359
420	6.359
480	6.321
600	6.246
720	6.208
840	6.208
960	6.170
1200	6.132

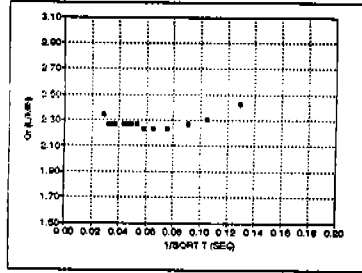
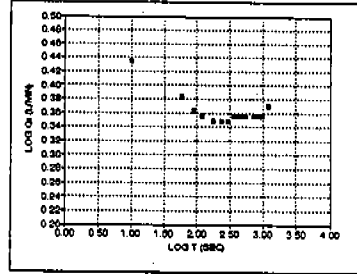
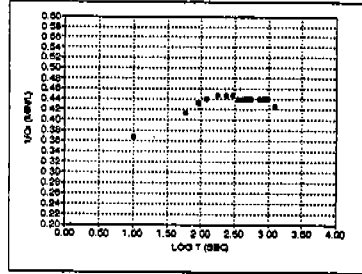


(b) Test section:5.0*7.0m
Pressure(kg/cm²) : 2

Fig. 6 Well test data obtained from borehole KB-2(double packer)

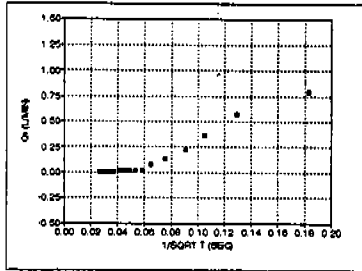
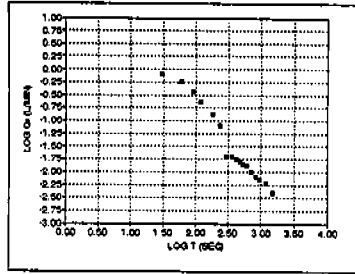
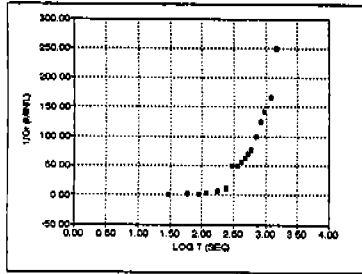
정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석

Time(sec)	Qr(t/min)
0	0
10	2.725
60	2.423
90	2.309
120	2.271
180	2.233
240	2.233
300	2.233
360	2.271
420	2.271
480	2.271
540	2.271
720	2.271
840	2.271
960	2.271
1200	2.347



(c) Test section: 14.85~16.8m
Pressure(kg/cm²) : 2

Time(sec)	Qr(t/min)
0	0
30	0.797
60	0.574
90	0.365
120	0.227
180	0.134
240	0.081
300	0.020
360	0.020
420	0.018
480	0.016
540	0.014
600	0.013
720	0.010
840	0.008
960	0.007
1200	0.006
1500	0.004



(d) Test section: 23.5~25.5m
Pressure(kg/cm²) : 2

Fig. 6 (Continued)

방사상차원의 중간적인 특성을 나타낸다. 15~17m 구간에서의 결과는 동일시험구간에서 유동차원의 변화를 나타냈다. 초기(<178초)에는 선형차원을 보이거나 후기에는 보다 고차원의 유동으로 변환되었다. 23~25m 시험구간은 전형적인 closed boundary의 특성(no flow condition)을 나타낸다. 유동차원의 해석은 Log Q vs Log t 좌표에서 직선을 나타내나, 기울기가 1/2보다 큰 점으로 보아 유동차원이 n=1보다 작은 것으로 사료된다.

단일패커와 이중패커시험결과와 차이가 시험구간의 차이에 의한 것인지를 알기 위하여, 100m 수평공에서 전구간으로 수행된 주입(injection)과 배수(withdrawal) 시험결과를

같은 방법으로 해석하여 보았다. 1/Q vs Log t 좌표에서 분석된 결과는 일부 자료가 분산되기도 하지만 대부분 concave upward 곡선을 나타냈다(Fig. 7). 이는 방사상유동(n=2)보다 작은 차원임을 알 수 있다. Log Q vs Log t 좌표에서 시간에 따른 유동의 변화는 1/2에서 1/4의 기울기를 이루고 있으며, PH-1은 1/2보다 큰 기울기를 보이는 closed boundary 특성을 나타냈다.

주입시험과 배수시험의 시간에 따른 유량 변화는 다소 차이점을 보였다. 두 시험방법의 해석상 가정과 이론은 동일하기 때문에 상이한 결과는 암반의 수리학적 특성의 차이로 해석된다. 일반적으로 주입시험은 지하수압이 작은 지역, 즉, 투수성이 낮은 암반이 분포된 지역에서 시행되고, 배수시험은 지하수압이 높은 지역에서 주로 실시된다. 지하수량이 풍부한(지하수압이 높은) 지역에서는 보다 정확한 유량의 변화가 예측되었다. 지하수량이 적은 지역에서 예측되는 분산된 분포는 예측기기의 문제점에 기인된 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 수행된 단일패커시험의 분산된 결과도 예측기기의 정확성과 관련된 것으로 생각된다.

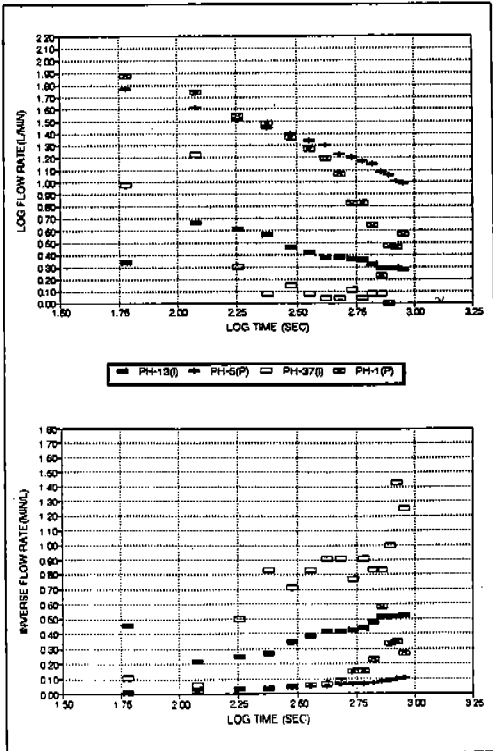


Fig. 7 Well test data obtained from OO project site

수리전도도

조사구간의 수리전도도는 정상류해석방법과 비정상류해석방법으로 구하였다(Table 1). 정상류해석은 Moye의 방정식(Ziegler, 1976)을 사용하였고, 비정상류해석은 기울기를 도출하여 각 유동차원에 맞는 방정식을 사용하였다.

수리전도도값은 비정상류해석결과가 정상류해석결과와 큰 차이는 없었다. 따라서 국내에서 현재 수행하고 있는 단일공에 의한

Table 1 Hydraulic conductivity obtained from constant pressure injection test in the borehole KB-2

Test Section(m)	Packer	K_s (m/sec)	K_t (m/sec)
3~5	Double	2.3×10^{-6}	—
5~7	Double	2.3×10^{-6}	6.5×10^{-6}
14.9~16.9	Double	8.4×10^{-8}	1.2×10^{-6}
23.5~25.5	Double	3.7×10^{-9}	1.5×10^{-8} (1.5×10^{-9} *)

K_s = Steady-State analysis
 K_t = Transient analysis
 * = Analysis from fall-off phase

수리전도도의 도출은 해석방법의 차이보다는 계측기와 시험과정에서 발생하는 불확실성을 최대한 줄이므로써 보다 정확한 값이 유도될 수 있다.

결 언

암반지하수의 유동특성을 알기 위하여는 부지고유특성에 맞는 개념모델설정이 필요하며, 분석을 위하여는 모델에서 요구되는 input parameter의 현장계측이 수반되어야 한다. 이러한 지하수유동해석 과정에서 발생하는 불확실성은 지하매질의 불균질성에 기인되며, 모델의 가정에 따른 불확실성과 현장계측시 발생하는 불확실성을 들 수 있다.

지하매질의 수리적 특성을 알기 위하여 수행되는 직접적인 방법은 단일공시험과 조사공간의 간섭시험을 들 수 있다. 현재 단일공시험은 정상류해석방법에 따라 시험구간의 상대적 수리전도도를 도출하는데 그치고 있으며, 이는 시추공설치와 시험에 소요되는 경비를 감안하면 너무도 보잘것 없는 결과에 만족하고 있는 현실이다. 암반지하수해석에

있어서 열극망개념의 도입과 함께 열극망의 수리적 특성을 도출하기 위한 방법으로 단일공시험에 의한 유동차원해석방법이 개발되고 있다. 이는 분리열극망 개념모델에서 필요로 하는 자료에는 아직 미치지 못하지만, 열극망 특성을 수리학적 특성으로 나타내는 (translation) 수단으로 단일공시험을 통하여 보다 많은 자료를 도출해 낼 수 있다.

본 연구의 결과에 의하면, 유동차원의 분석방법은 시험구간의 길이가 2m부터 100m에 까지 적용 가능하였다. 수리전도도값의 도출에 따르는 정상류와 비정상류 해석방법의 차이는 정상류해석방법이 2~3배 높게 측정되었다. 하지만 유동차원의 해석은 열극망유동모델에 적용하여 보다 사실에 가까운 저투수성암반에서의 지하수유동해석 가능성을 제시하였다. 상기 목적을 위하여는 계측기기(유량계와 유압계)의 정밀도, 주입압의 변화 등 현장시험시에 발생하는 불확실성을 최대한 제거하려는 노력이 무엇보다도 중요하다.

참고문헌

Barker, J.A., 1988, A Generalized Radial Flow Model for Pumping Tests in fractured Rock. Water Resources Research. V.24, pp. 1796-1804.

Doe, T.W. and Geier, J.E., 1990, Interpretation of Fractures System Geometry using Well Test Data. Golder Associates Inc., 222pp.

Earlougher, R.C.Jr., 1977, Advances in Well Test Analysis. Monograph V.5, Society of Petroleum Engineers, AIME, Dallas, Texas, 264pp.

Hantush, M.S., 1959, Nonsteady flow to Flowing

Wells in Leaky Aquifers. J. of Geophysical research, V.64(8), pp.1043-1052.

Jacob, C.E., 1950, Flow of Groundwater in Engineering Hydraulics. ed. H. Rouse, N.Y., pp.321-386.

Jacob, C.E. and Lohman, S., 1952, Nonsteady Flow to a Well of Constant Drawdown in an Extensive Aquifer. Transaction of AME, Geophy. Union, V.33(4), pp.559-569.

PEDCO, 1988, O O Project, Report of Hydrogeological Data Analysis. unpublished.

Theis, C.V., 1935, The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and Rate and Duration of Discharge of a Well using Groundwater Storage. Trans. of AME, Geophy, V.16, pp.519-524.

Ziegler, T., 1976, Determination of Rock Mass Permeability. US Army Engineers Waterways Experiments Station, Technical Report S-76-2, Vicksburg, Mississippi, 88pp.

Appendix 1

1. Theis Method of Solution

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi T} [-E_i(-u)] = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{Sr_w^2}{4Tt}$$

W(u) = well function

2. Jacob's Method

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi T} [-0.5772 - \log_e u + u \dots]$$

$$= \frac{Q}{4\pi T} [\log_e \frac{1}{u} - \log_e 1.78]$$

(u < 0.01)

3. Barker's general solution of flow

$$\bar{Q}(p) = h_{w0} k b^{3-n} \alpha_n r_w^{n-2} \frac{\phi v(r_w \sqrt{s/\eta})}{s}$$

b = length of fracture

$\alpha_n = 2\pi v^{n/2} / \xi(n/2)$

n = flow dimension (n=1,2,3)

$\phi v(z) = z k_{v-1}(z) / k_v(z)$

k_v = modified Bessel function

η = hydraulic diffusivity

Appendix 2 : Notation

Q	= Flow Rate	[L ³ /T]
Q _D	= Dimensionless Flow Rate	[-]
t	= Time	[T]
t _D	= Dimensionless Time	[-]
T	= Transmissivity	[L ² /T]
S	= Storativity	[-]
S _s	= Specific Storage	[-]
s	= Laplace-Space Variable	[-]
r	= Radial distance	[L]
r _D	= Dimensionless Radius	[-]
r _w	= Radius of Well Bore	[L]
K	= Hydraulic Conductivity	[L/T]
n	= Dimension of Flow	
ϕ	= Porosity	
α_n	= $2\pi v^{n/2} / \Gamma(n/2)$	[L]
Δh	= Drawdown	[L]
A	= Cross Sectional Area of Conduit	[L ²]

h_{w0} = Initial Head at the Well Bore [L]

m = Slope of Line [-]

김천수, 이은용, 배대석, 김경수 :

한국원자력연구소부설

원자력환경관리센터

대전시 유성구 덕진동 150

305-353

TEL : (042) 868-2062

FAX : (042) 861-4824