

결정질암반에서의 지하수유동 연구경향

Groundwater Flow Characteristics in Crystalline Rock : Review

김천수(Kim, Cheon Soo)

한국원자력연구소 부설 원자력 제2연구소

요 약

열극암반에서의 유동특성은 석유산업, 지열수탐사, 지하수의 오염문제, 지하 동굴건설 등 많은 공학적 분야에서 선결되어야 하는 중요성을 갖고 있다. 암반을 통한 지하수의 유동은 연속체 개념과 불연속열극 개념에 의하여 수치모형화 되고 또한 해석되고 있다. 불연속 열극체계 개념은 국지적인 각 열극의 특성을 강조하는 반면, 다공성매질 개념은 수리학적 파라메타의 평균값을 쓰기 때문에 각 열극의 특성은 무시하게 된다.

지하동굴에서 관찰된 지하수 유입특성에 의하면, 지하수는 channel 형태로 유동한다고 해석되어지고 있다. 이러한 channel 현상은 복합적인 열극의 기하학적 특성에 따른 열극틈의 변화에 의하여 이루어 진다.

Abstract : Groundwater flow in fractured rocks generates many challenging problems to scientist and engineers in the projects related to oil and geothermal reservoirs, subsurface contaminations and underground openings. To circumvent these problems, the numerical simulation of groundwater system is used as an established tool in these days. Discrete modelling approach emphasizes geometric parameters, aperture and transport properties of fracture. On the other hand, continuum modelling approach uses the parameters formulated in a way of average hydraulic property.

In recent years, the results of field observations from underground opening indicate that groundwater in rock mass flows in a channel form. The channel flow is postulated as the result of the combined effects of geometric pattern and aperture variation.

1. 서 론

암반에 불규칙하게 발달된 열극을 통한 지하수유동은 최근 Porous Flow Physics 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 열극암반에서의 유동특성 파악은 석유산업, 지열수 탐사, 지하수의 오염문제, 지하동굴 건설 등 많은 공학적 분야에서 선결되어야하는 중요성을 갖고 있다.

열극암반에서의 지하수유동 연구중에서 제기되는 근본적인 문제점은 다음 두가지를 들

수 있다. 첫째, 열극체계의 수리전도도를 대표할 수 있는 값을 어떻게 정할 것인가? 그리고 열극체계를 포함한 암반을 다공성 매질로 간주할 수 있는가? 이와같은 의문에 대하여는 아직도 만족한 해답을 얻지 못하고 있다. 예를 들면 암반에서의 용질이동 연구에서도 오염확산의 중앙부나 확산방향이 등방체에서 예측된 수두구배에 따른 이동로와 상이한 이방성 양상을 나타내고 있다.

30년전만 해도 수리지질실험실에 Sand

Tank model만 갖추고 있어도 현대적인 시설로 간주되었다. 실험실에서 다루는 매질은 주로 등방성이고 균질한 모래를 사용한 물리적 모델을 이용하였기 때문에 지하수 체계에 대한 실험은 극히 제한적이었다.

지하수학에서 수학적 방정식(exact mathematical equation)이 사용된 것은 1940년부터이며, 지하수유동에 대한 수치모델(numerical model)은 1962년에 소개되었고, 광역적인 지하수 유동체계의 해석에 사용된 것은 1966년부터 이다. 그러므로 지하수 유동체계의 해석을 위하여 유동(flow)이나 용질이동에(solute transport) 대한 실질적인 모델이 사용된 것은 20여년에 지나지 않는다. 1980년에 들어와 수치모델은 지하수와 관련하여 매우 중요한 도구(tool)로서 자리를 잡아가고 있으며, 이러한 모델의 사용으로 인하여 현장에서 관측된 수두분포에 따른 지하수체계의 특성을 알아내는 역접근법(Inverse Problem)들을 쉽게 해결해 나가고 있다.

정확한 모델의 사용을 위하여는 복잡한 수리지질학적 상태를 단순화한 개념모델의 확립이 필요하며, 신빙성 있는 수치모델의 결과는 설정된 개념모델이 얼마만큼 자연상태에 가깝게 만들어지는가에 달려있다. 본 논문에서는 최근에 수행된 결정질암반에서의 지하수유동 연구의 현황을 소개하고, 지금까지 고려 되어 온 열극암반에서의 지하수유동에 대한 개념화 과정을 통하여 이론적, 실질적 문제점을 요약하였다.

2. 결정질암반에서의 최근 지하수유동 관찰

2.1 Stripa 광산 (Sweden)

방사성 폐기물의 지하심부처분을 위한 암반에서의 안전성 연구의 일환으로 1976년부터 7개국에 참가하여 결정질암으로 구성된 Sweden의 Stripa 폐광을 대상으로 연구가 진행되었으며 동굴로의 지하수 유입상태를 다음과 같이 정리하였다. 자연지하수면하의 360m에 위치한 연구 동굴(700m³)에서 관찰된 지하수

유입분포는 Fig. 1과 같다. 지하수 유입량은 1장의 크기가 2m²인 Plastic Sheet 375개를 사용하여 3년동안 측정되었다. 현장에서 관찰된 결과에 의하면 지하수는 일부지역에 한하여 유입되고 있음이 밝혀졌다. 3%의 관찰된 면적에 약 50%의 유입이 집중되었고 총유입량은 647.7ml/h로 계측되었다.

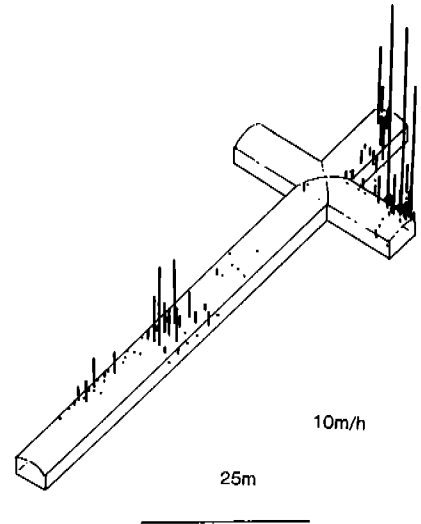
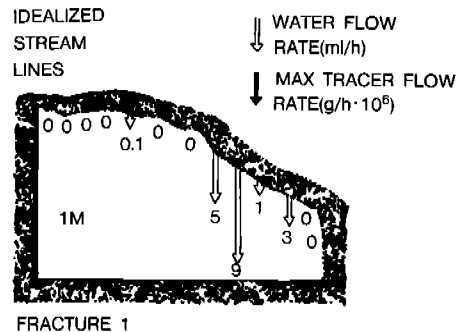
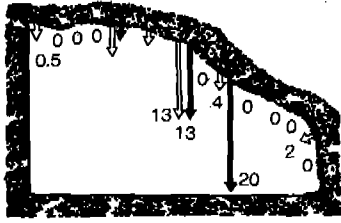


Fig. 1. Flow rate distribution in the experimental drift of the Stripa Mine. (after Neretnieks et al. 1989)

또한 다른 실험동굴을 가로지르는 2개의 열극면에서 관찰된 지하수유입은 Fig. 2와 같다. 화살표의 길이는 유입량의 상대적 크기를 표시하며 수치는 유입량을 나타낸다. 90%의 유입량은 27개의 측정지점 중 5개 장소를 통하여 유입되고 있다.





FRACTURE 2

Fig. 2. Experimental drift intersecting the plane of the fracture. (after Neretnieks et al. 1989)

2.2 SFR 처분장 (Sweden)

해저 60m의 하부, 결정질암반에 건설된 4개의 처분동굴에서 관찰된 총유입량은 164개의 동굴천정에 위치한 유입구에서 관측한 결과 30 l/min ($180 \times 10^4 \text{ ml/h}$)로 밝혀졌다. 이중 41개소는 열극의 교차점이나 작은 개공(開孔)으로 구성되어 있었고, 14000 m^2 의 면적에서 관찰된 일반적인 유출양상은 다음 6가지로 구분할 수 있었다.

Type 1 : 수평이나 수직열극중 한 지점(point)을 통한 유입

Type 2 : 열극의 전면을 통한 유입

Type 3 : 수직열극의 하부를 통한 유입

Type 4 : 두 열극의 교차점을 통한 유입

Type 5 : 표면을 따라 흐르는 확산유동 형태(diffuse flow type)

Type 6 : 열극충전물질이 씻겨나간 개공(開孔)을 통한 유입

그리고, 각 유출양상에 따른 관찰지점의 분포는 Fig. 3과 같다. 관찰된 유입량을 분석한 결과 전체유입량의 50%가 18개 지점에서 일어나며 이중 7개지점이 Type 4와 Type 6에 속하는 Point Spot으로 알려졌다.

SFR의 전 구간을 통해 유입되는량은 53 l/min ($318 \times 10^4 \text{ ml/h}$)로 측정되었으며 이것은 바닥(floor)으로부터의 유입량을 포함한 것이고, 통풍에 의한 손실은 고려하지 않았다.

수리학적 열극(conductive fracture)은 85 m^2 당 평균 1개로 계산되면 일반적으로 물이 흐르는 열극의 폭(wetted width)은 1-3m에 지나지 않는다. 높은 유입량을 보이는 수로(channel)는 주로 작은 지점을 통하여 흐르고 있다.

2.3 Kymmen 수로터널 (Sweden)

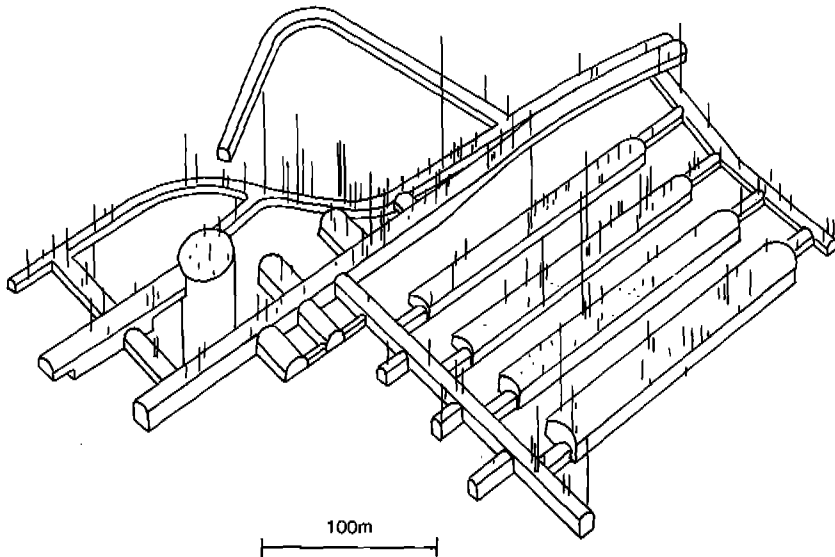


Fig. 3. Flow rate distribution in the SFR site. (after Neretnieks et al. 1989)

지표에서 80m 하부의 화강암과 편마암질암반에 건설된 4.5km 길이와 4.6m 폭을 갖는 수로터널에서 관찰된 열극대는 63개에 이르고 있다. 구성암반은 편마화강암, Amphibolite와 세립석영반암으로 구성되어 있다. 지하수는 열극중 제한된 장소를 통하여 유입되며 대부분 유입구의 폭이 몇 cm에서 수십 cm에 불과하였다. 1m보다 큰 폭을 갖는 유입구는 거의 관찰되지 않았으며 이러한 유입구는 대개 1-5m의 폭을 갖는 구역이나 집합체(cluster)로 나타났다. 그리고 각 집합체 간의 거리는 50-100m에 달하고 있다. 열극대의 폭은 총 터널 길이(4494m) 중 672m에 이르며, 207m의 파쇄대(crushed zone)는 concrete를 주입하여 유입량을 감소시켰다. 이것은 63개의 열극대 중 11개에 이르고 있다. 일반적인 열극대에 따른 유입량은 $0.005-3\ell/\text{min}$ 이며 파쇄대에 따른 가장 많은 양은 $10\ell/\text{min}$ 에 달한다.

2.4 Kamlunge 시추공 (Sweden)

지하 200m에서 700m 사이의 암반에서 측정된 수리전도도의 분석에 의하면 1개의 측정 구역에서 50%의 유동이 관측되었으며 3개의 측정구역에서 전체 75%의 유동량이 관측되었다.

2.5 Bottsten 시추공 (Switzerland)

주입시험(injection test)과 core logging 결과에 의하면 약 1m 폭을 갖는 전단대(shear zone)가 100m의 간격으로 관측되었으며 이 구역의 공극율은 3-5%로 변질받지 않은 화강암에 비하여 10배 이상이다. 그리고 전단대에서 관찰된 공극은 1cm 직경을 갖는 원형이나 slitlike 모양을 보이고 있었다.

3. 열극암반의 수리학적 개념화

지하암반을 통한 지하수의 유동은 일반적으로 確定論的 접근방법으로 유동과정을 설정하고 推計論的 방법으로 Distributed Parameter 을 정하여 수치적으로 유동체계를 모사(simu-

lation)한다. 確定論的인 수치모델의 근본적인 원리는

- 1) 지하수체계에서 유동과정을 파악하고,
- 2) 설정된 유동과정을 통하여 지하수체계의 반응을 알아내고,
- 3) 이러한 인과관계(cause-effect relations)을 통하여 주어진 조건에 맞게 지하수유동변화를 예측할 수 있다는 점이다.

이러한 접근방법에서 가장 중요한 것은 유동과정을 얼마나 현실에 맞게 설정하는가에 달려있다.

일반적으로 열극암반을 통한 지하수유동은 크게 나누어 2가지 개념으로 요약된다. 즉 대응 다공성 개념(Equivalent Porous Concept)과 분리 열극개념(Discrete Fracture Concept)이 그것이다. 암반에 발달된 열극의 수가 많고 열극의 교차정도가 양호한 경우에 다공성 매체로 고려될 수 있으며 수리적 특성(hydraulic property)은 평균 수리전도도 텐서(hydraulic conductivity)나 분산지수 텐서(disperivity tensor)로 대표될 수 있다. 수치모델에서 고려되는 여러가지 과정과 mechanism은 Fig. 4에 요약하였다.

그러나, 암반에 발달된 열극의 수가 적은 경우는 열극체계의 수리전도도 값이 전체암반의 수리적 특성을 대표할 수 없기 때문에 각각의 열극이나 또는 열극군의 수리적 특성으로 암체의 특성을 표시한다. 이 경우에 열극은 일정한 크기의 폭을 갖는 평행판(parallel plate)으로 고려된다.

1980년 후반에 이르러 현장에서의 지하수유동 관찰과 실험을 통한 결과는, 지하수의 유동이나 용질이동은 쏠열극면(entire fracture plane)보다는 선택된 통로나 channel 형식을 통한다는 개념을 새로이 도입하고 있다.

3.1 연속체 개념(Continuum Approach)

지금까지 수리지질학에서 대수층을 대상으로 사용해온 다공성 매질개념은 열극암반에서도 사용되고 있으나, 최근의 연구결과에 의하면 다공성 매질개념의 한계점이 점차 지적되고

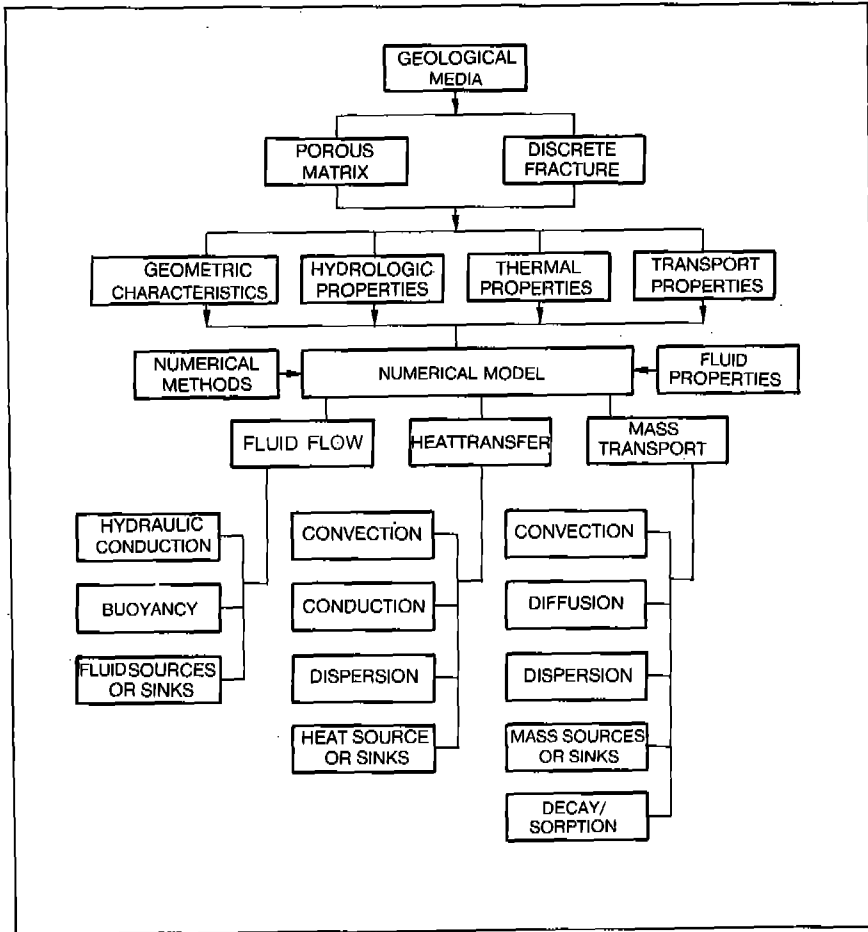


Fig. 4. Overview of the numerical modelling in groundwater flow and mass transport.

있다.

다공성 매질에 대한 연속체의 접근방법은 다공질이 고형물질(solid matrix)과 공극으로 구성되어 있으며, 이 공극은 유체나 공기가 채워진 것으로 보는 경우와 또 다른 경우는 매질에 solid matrix가 분포되어 있다고 보는 경우이다. 대수층에서 공극이나 유동유로(channel)을 통해 유동하는 지하수는 미세 규모(microscopic level)의 유체영역(fluid domain)에서 연속체로 간주한다. 이러한 규모의 공극을 채우고 있는 유체는 뉴턴의 제2법칙에 근거를 둔 Navier-Stoke 공식을 사용하여 유동특성을 정의한다. 미세 규모에서의 문제점은 경계면의 복잡성과 함께 상태변수(state variables)를 계

측할 수 없고, 수학적 방법으로 결과를 검증할 수가 없다.

수리적 대표파라메타(representative parameter)는 미세 형태의 고체-유체접촉부(solid-fluid interface)의 복잡한 형태에 대한 특성을 대표할 수 있을 경우에만, 이 대표파라메타가 실험대상이 되는 매체의 크기내에서 일정한 값을 갖는 연속함수로 생각될 수 있다. 다른 특성에 따른 파라메타도 마찬가지이다. 그러나 포화상태, 간극수압(pore pressure), 수두구배 등은 주어진 매질의 부피 내에서 일정한 값으로 표시되며, 미세한 특성이나 복잡성은 무시하고 분석의 목적을 위하여 가상의 연속체로 고려하는 것이다. 그리고 이러한 대표 파라메

타는 실내실험이나 현장시험을 통하여 고려되는 매질에서 직접 구하여야 한다. 따라서 수리학적 parameters를 계속할 수 있는 거시적 규모(macroscopic level)의 연속체 개념을 도입하여 매질에서의 유동현상을 다루고 있다.

열극암반에서의 수리전도도 측정은 다만 몇 개의 열극이 교차하는 암반에서 이루어지기 때문에, 측정수치가 일정하지 않고(erratic), 또한 계속되는 암반의 크기에 따라 민감하게 변한다. 그러므로 열극암반의 연구에서는 거시적인 규모에서 보는 대응 다공성 매질(Equivalent Porous Medium : EPM)과 또는 대표 미소체적(Representative Elementary Volume : REV) 개념을 도입하고 있다. 이 개념은 열극암반에서 각 열극에 따른 방향성 유동을 상쇄할 만큼의 충분한 열극들이 교차되는 부피를 갖는 암체의 크기를 말하며, 지하수 유동은 2차 대칭 투수계수텐서(2nd symmetric permeability tensor)를 사용한 Darcy 법칙을 따른다고 가정한다. 또한 Darcy의 법칙은 각 열극을 따른 유속이 수두구배와 선형관계를 가지고(linear), 주어진 REV내에서 설정된 이방성유동의 한계를 벗어나지 않는 경우에만 유효하다. 다시 말하면 교차정도(connectivity)나 방향성 유동(directional flow)을 도입하게 되면 이 개념의 유효성에 한계가 있게 된다.

첫번째 문제점은 "REV"를 선정하기가 쉽지 않으며, 만약 REV를 선정하였다 하더라도 일정한 단일 대표값을 갖기 위하여는 parameter 계속의 대상물이 큰 부피이어야 한다. 특히 열극빈도가 적은 암체에서는 단순함수의 값을 갖기에는 너무나 실험대상이 커지게 된다. 따라서 암체의 크기가 커지면 실질적인 수리전도도 값을 얻기가 현실적으로 어려워진다. 이러한 경우에 고전적인 연속체 접근방법은 실패하게 되며 Sub-REV의 규모에서 유동체계를 해석하는 방법이 개발되고 있다.

두번째 문제점은 REV내에서 대응 수리전도도(equivalent hydraulic conductivity)를 결정하는 것이다. 이를 가능하게 하는 두가지 방법은 기하학적 형태에 따른 계산방법과 현장시

험으로부터 계속하는 방법이 있다. 기하학적인 방법(geometrical approach)은 암반에 발달된 열극이 무한한 길이를 갖는다고 가정하며 따라서 열극체계의 교차정도가 중요한 파라메타가 된다. 현장에서 관찰된 대표값이 암반의 다른 부분에서도 같은 상태로 분포되어 있다는 가정하에, 열극틈(aperture), 주향, 경사, 밀집도(density)등에 의하여 몇 개의 열극군을 선정하고, 각 열극군에 따른 방향성 수리전도도를 계산하고, 그 결과를 종합하여 REV의 평균 수리전도도를 구하게 된다. 이 방법은 열극이 무한한 길이를 갖고 있다는 가정에는 한계가 있고, 현장에서 측정된 열극틈은 신빙성이 매우 낮다는 한계성을 지니고 있다. 따라서 현장 주입시험 방법을 통하여 각각의 열극이나 또는 열극군의 대응수리열극틈(equivalent hydraulic aperture)의 값을 상기 기하학적 방법의 입력자료로 사용한다. 그러나 현장시험은 단일 열극을 선정, 측정하기가 쉽지않고 또한 많은 양의 시험이 요구된다는 단점이 있다.

또 다른 방법은 전구간에 대한 단일공의 수리전도도를 측정하거나 교차공시험에 의하여 광역적인 수리전도도를 측정하는 방법이다. 현장수리시험은 시험 구간이 REV의 필요한 부피를 대표한다는 가정하에 결과를 해석하게 된다.

세번째 방법은 대수성시험에 의하여 열극의 수리학적 파라메타를 계속하는 방법이다. 표준 곡선(standard type curve)를 이용하여 조사공 주변의 수리특성을 알아낼 수 있지만, 이 방법은 REV의 존재를 고려하지 않고 주요 열극의 수리적 특성만을 대표하게 된다.

3.2 분리열극 개념(Discrete Approach)

열극암반에서 REV의 크기와 수리전도도 측정에 어려움이 많기 때문에 열극망에 따른 유동특성을 분리열극 접근 방법으로 해결하는 것이 각광을 받고 있다. 이 방법은 기본적으로 열극의 크기와 분포에 대한 상세 자료가 요구되며, 또한 각 열극틈과 수리전도도의 관계에 대한 이론적 설명이 요구되고 있다. 가장 기본

적인 가정은 열극을 불투수성 경계를 갖고 있는 평행판(parallel plate)으로 고려하고 그 열극틈은 수리적인 틈(hydraulic aperture)으로 표시한다.

단일열극을 통한 유동에서 수두구배 및 유속과 관련하여 Snow(1969)에 의하여 경험식이 발표되었다. Stoke의 공식에 의하면 열극을 통한 평균유속은 열극틈의 자승에 비례하고 수리전도도는 열극틈의 삼승에 비례하게 된다.

$$V = - \frac{1}{12\mu} \cdot b^2 \cdot \nabla P$$

$$Q = \frac{1}{12\mu} \cdot b^3 \cdot \frac{\partial P}{\partial L}$$

V : Darcy velocity

μ : dynamic fluid viscosity

P : fluid pressure

Q : volumetric flow

L : length

b : width of the parallel plate normal to flow direction

대부분의 분리열극 접근방법은 열극망의 모델과 상기 이론식(cubic law)에 근거하여 열극체에 대한 수리학적 관계를 도출한다. Cubic law는 현장에서 유동량을 직접 측정하지 않고 암반의 수리전도도를 구할 수 있는 편리한 점이 있지만 아직도 cubic law의 적합성에 대하여는 논란의 대상이 되고 있다.

Caldwell(1972)이 cubic law을 이용하여 열극망에 따른 2차원의 유동을 분석한 이래, 3차원의 유동분석과 용질이동에도 이 법칙이 사용되었다(Neuman, 1988). 이러한 연구결과, 열극암반을 통한 지하수유동은 대상암체의 크기가 평균열극간격보다 적은 경우에는 연속체 개념으로 분석한 결과와 상이하게 거동하고 있고, 정량적으로 자연상태에서 열극은 불규칙한 조도특성(roughness)을 가지고 있기 때문에 단순한 cubic law로 수리특성을 얻기 힘들다는 사실이 밝혀졌다.

Gale et al.(1985)이 수행한 여러가지 법선

응력(normal stress)에 따른 실험결과에 의하면 열극면 조도의 수정만으로는 단일열극의 왜곡된 유동로와 유동특성을 정의할 수 없었고, 실제 열극틈의 기하학적 형태(actual aperture geometry)가 열극을 통한 유동속도를 얻는데 가장 중요한 제한요소가 된다고 하였다. 또한 단일열극에 따른 열극틈의 분포경향은 전단변형(shear strain)에 매우 민감하며, 다만 1mm의 변이가 발생해도 수리전도도의 값은 2-3배의 변화를 보인다. 따라서 평행판 모델은 관찰된 열극틈의 수치로는 유동량을 계산할 수 없다. 특히 frequency와 amplitude가 심한 조도면을 갖고있는 열극에 대하여는 Stokes 공식에 의한 유동현상은 일부에 지나지 않는다. Tsang과 Witherspoon(1985)은 평행판의 가정은 낮은 normal stress 상황에서는 유효하다고 결론을 내렸다. 그러나 normal stress가 증가함에 따라 접촉면은 증가하게 되고, 열극틈의 접촉부가 30% 커지면 유체의 실질적인 유동율은 평행판 모델에서 예측된 수치보다 2-3배 적게 나타났다. 열극틈이 10 μ m까지는 cubic law가 불규칙한 결과를 보이나, 10-100 μ m의 틈을 갖고 있는 열극에서는 cubic law의 결과와 일치되었다(Witherspoon et al., 1980).

이러한 평행판 모델의 유효성에 대해서는 여러 현장시험결과와 비교해 볼 때 많은 의문이 제기되고 있다. Canada의 Chalk river 근처 편마암체에서 시행된 실험결과는 열극대를 통한 추적자(tracer)의 속도는 Darcy 법칙이나 평행판 모델에서 계산된 값보다 20배나 느리게 나타났다. 수리시험 결과로부터 계산된 열극틈과 추적자 시험에서 구한 열극틈의 수치는 cubic law의 유효성을 의심하게 한다.

3.3 수로현상(Channeling) 개념

최근 관찰된 결정질암반에서의 지하수 유입 상태와 Stripa에서 수행된 추적자 실험결과에 의하면, 열극암반에서의 지하수유동과 용질이동은 제한된 유로를 통하여 이루어 지고, 이러한 수로는 몇 m보다 적은 폭을 가지고 있고 대부분 작은개공(small hole)에 의한 유입이

도변화곡선(Breakthrough curve)이 겹치게 나타나는 결과를 보였다(Fig. 5).

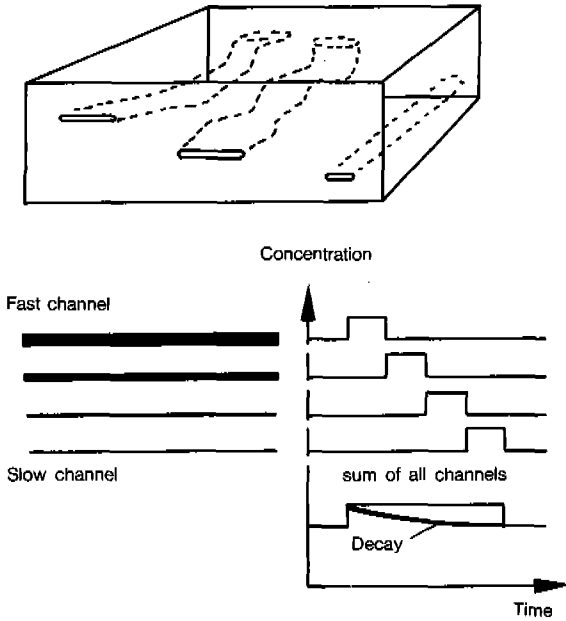


Fig. 5. Plausible interpretation of channel model.
(after Neretnieks et al. 1989)

전체 암반을 대표하는 것으로 설명되고 있다. 전체 유동량의 90% 이상을 지배하는 유로의 빈도는 Stripa인 경우 $1/20(\text{ch}/\text{m}^2)$, SFR의 경우 $1/150(\text{ch}/\text{m}^2)$, 그리고 Kamlunge의 시추공에서는 $1/250(\text{ch}/\text{m}^2)$ 로 조사되었다.

실험실에서 관찰된 바에 의하면 결정질암반에 인공적으로 만든 열극을 통한 유동현상은 개구상(open portion)으로 연결된 유로들을 통하는 흐름의 특성을 나타냈다. 또한 높은 압력하에서도 열극은 완전히 닫히지 않고 물의 이동은 계속되고 있었다. 자연적인 열극을 포함한 암석시료($20\text{cm D} \times 30\text{cm L}$)를 통한 추적자 실험결과도 수로현상을 보였으며 빠른 속도의 통과를 통한 추적자 때문에 2번째 농

이러한 수로 현상은 현장시험에서도 관찰되고 있다. Stripa에서 수직에 가까운 열극을 통한 추적자 시험결과는 각 열극의 출구에서 매우 불규칙한 추적자의 농도와 도달시간을 나타냈다. 그리고 총 지하수 유입량의 30%가 전

체면적중 2%에 불과한 면적에서 관측된 사실은 각 열극면의 분리유로(discrete channel)을 통하여 지하수 유동과 용질이동이 일어남을 잘 보여준다.

수로 현상을 고려한 새로운 개념모델은 Tsang과 Tsang(1987)에 의하여 제시되었다. 열극암반의 지하수유동과 용질이동은 제한된 유로에 의하여 지배되며 이 유로의 특성은 열극틈 밀도분포함수(aperture density distribution function)와 spatial correlation length에 따라 결정된다.

한편 Stripa project에 나타난 불규칙한 측정결과와는 지하동굴 건설에 따른 응력의 이완에 의한 수리전도도의 변화에 기인된 것으로 보며, 수로현상에 대한 개념은 아직까지 근거가 희박하다는 주장도 있다.

4. 결 론

추계적 수치모델 방법은 분리 열극체계 개념(discrete model)의 발달을 뒷받침하고 있다. 열극의 위치 및 크기와 방향성은 확률적인 분포로 표현되며, 분포특성에 따른 열극의 틈과 수리학적 파라메타(hydraulic parameter)를 결정하게 된다. 불연속 열극체 개념의 문제점은 계산으로 구하여진 열극의 틈을 자연상태의 열극틈의 크기로 가정하는 것과 지하수 유동을 고려하는 영역의 크기에 한계가 있는 점이다.

다공성매질 개념은 암반의 수리학적 파라메타를 평균하여 얻은 값을 사용하기 때문에 열극의 기하학적 분포특성이나 교차정도의 중요성을 무시하게 된다. 따라서 상대적으로 작은 규모의 열극특성(local variability)를 강조하는 분리 열극체계의 개념과는 상이한 결과를 도출하게 된다.

단일 열극을 통한 지하수유동에 대한 이해 증진은 열극의 기하학적 특성 파악에 대한 새로운 접근방법이 강조되고 있다. 또한 Darcy 법칙 대신에 Navier-Stocke 공식을 사용하는 방법도 제시되고 있다. 하지만 Navier-Stocke 공식을 이용하는데 부수적인 문제점은 복잡한

유동로의 기하학적 분포 파악과 열극 내의 압력을 측정하는 두가지 문제점이 있다.

현장에서 관찰된 단일열극의 틈은 열극면의 곡선적인 특성, 광물의 침전 및 암반의 압력에 의한 틈의 변화 등 복합적인 과정에 의하여 열극틈을 변하게 되며, 열극체계 내의 지하수는 유로 형태로 유동하게 된다는 자연적인 결론을 얻고 있다.

REFERENCES

- Caldwell, J.A., 1972. The theoretical determination of the permeability tensor for jointed rock, Proc.Symp. on Percolation through Fissured rock, ISRM and IAEG, Stuttgart.
- Gale, J.E., Rouleau, A. and Atkinson, L.C., 1985. Hydraulic properties of fractures, Proc. Memoirs of the 17th Int. Cong. of Int. Ass. of Hydrologists, vol. XVII, Int. Ass. Hydrologists, pl-16
- Neretnieks, I., Abelin, H. and Birgersson, L., 1989. Some recent observations of channeling in fractured rocks-Its potential impact on radionuclide migration, Proc. Conf. on Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty methods for groundwater flow and radionuclide transport modeling, 87 DOE/AECL, Battelle Press, p387-410.
- Snow, D.T., 1969. Anisotropic permeability of fractured media, Water Resour. Res., v.5, n.6, p 1273-1289
- Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A., 1985. Effects of fracture roughness on fluid flow through a single deformable fracture, Proc. Memoirs of the 17th Int. Cong. of Int. Ass. of Hydrologists, v. XVII, Int. Ass. Hydrologists, p683-694.
- Tsang, Y.W and Tsang, C.F., 1987. Channel model of flow through fractured media, Water Resour. Res. v.23, n.3, p467-479.
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, D. and Gale, J.E., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable fracture, Water Resour. Res. v.16, n.6, p1016-1024.