

단일공에서 정압주입시험을 이용한 단열투수량계수 산출

박준형, 박경우, 배대석, 김교원*

한국원자력연구소, 경북대학교

p94jacky@daum.net

요약문

방사성폐기물 처분연구의 일환으로 단열 암반지역의 지하수 유동에 있어서 각 단열조의 투수량계수를 알아보기 위하여 연구지역에 설치된 3기의 시추공에서 초음파 검증, 정압주입시험 및 유동차원 해석을 수행하였다. 단열은 방향성, 틈의 크기 등의 그 분포 특성으로 인해 각 시험구간내의 지하수 유동에 있어서, 유동형태 및 단열투수량계수를 좌우하므로 일반적으로 수리특성에 널리 이용되는 다공성매질의 연속체 개념을 통한 해석의 적용에 신중성을 고려할 필요가 있다.

주제어 : 지하수; 수리시험; 단열; 단열투수량계수; 유동차원해석

1. 서론

지하공간의 이용 또는 지하수자원 개발에 관하여 가장 먼저 접하는 현안문제는 지하매질 및 구조에 대한 정확한 수리지질학적 특성을 규명하는 것이다. 지하수유동에 있어서 암반의 수리특성은 단열의 크기, 간격, 그리고 연결성 정도가 공간적으로 균질하지 않기 때문에 다양하고 불규칙한 형태와 규모를 갖는 수 개의 수리학적 단위매질로 구성된다. 지하수의 주요 유동현상은 큰 규모의 단열틈과 연장성을 갖는 단열을 통해서 일어난다는 가정을 기초로 하며, 이러한 단열들이 암반 내의 수리전도도와 투수량계수를 좌우하게 된다. 이러한 단열암반 지역에서 지하수 유동로의 역할을 하는 단열의 투수량계수를 산출해 내고 이를 지하공간이나 지하수 자원 관리에 이용한다면 더 해석결과의 신뢰성 제고에 더욱 효과적일 것이다. 본 연구는 화강암질 암반에 3기의 시추공을 설치하고 초음파검증(BHTV검증, 텔레뷰어 검증), 정압주입시험, 유동차원분석을 통해 단열조별 단열투수량계수를 산출하여 단열암반의 수리지질적 특성을 고찰해 보고자 하였다.

2. 본론

가. 단열분포특성

본 연구는 편상화강암을 모암으로 하는 대전광역시 유성구에 소재한 한국원자력연구소 부지내에서 수행되었다. 연구지역에 500m, 200m, 300m의 심도의 시추공(YS-1,2,3)을 설치하고 단열분포 특성연구를 위한 기초자료 수집의 목적으로 실시되었던 초음파검증(BHTV검증, 텔레뷰어검증)의 결과로써 연구지역내 시추공을 중심으로 발달한 단열들의 방향성, 빈도, 간격, 틈의 기본 데이터를 이용하였다. 이 초음파검증의 결과자료는 보다 신뢰성 있는 단열분포 특성을 규명하기 위해 sampling bias를 제거하여 단열빈도를 구하는 등의 과정을 통해 연구지역의 단열분포 특성에 대해 최대한 근접하기 위

한 목적으로 김경수외(2002)에 의해 연구된 보정된 자료를 사용하였다. 모든 시추공에서 검증 된 2,212 개의 단열들의 방향은 NNE 주향(Set 1)과 NW 주향(Set 2)의 고경사군과 무작위의 저경사군(Set 3)로 분류하였다. 빈도면에서는 저경사군(Set 3)이 심도의 증가에 따라 감소 경향이 두드러지며, 고경사군의 Set 1과 Set 2가 전체적인 빈도변화를 주도함을 볼 수 있다. 단열들은 AperSa 프로그램을 이용하여 계산하였으며, 단열조별 기하평균값은 각각 0.84mm, 0.75mm, 6.94mm이며, YS-1에서는 구간내 누적률은 Set 2,3에 지배되고, YS-2,3에서는 Set 2가 각 시추공의 전체적인 누적률의 양상과 유사한 경향을 보였다.

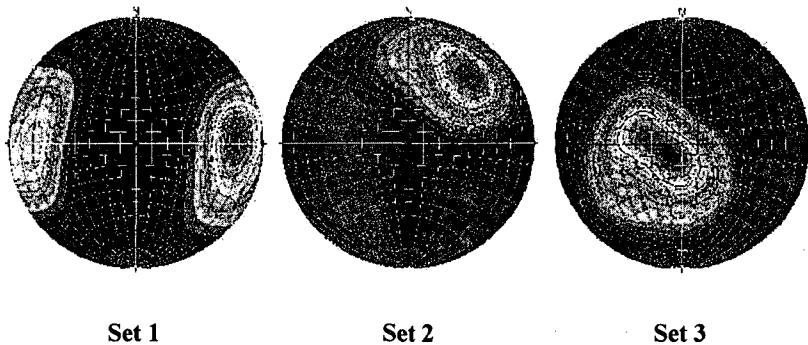


Fig. 1. Stereographic pole plot of each fracture set.

나. 유동차원과 단열투수량계수 산출

본 연구에서는 구간별(9.8m~10.8m) 수리전도도를 구하기 위하여 3개의 NX규격 시추공에 inflatable double packer를 이용하여 이중 패커시험(double packer test)을 실시하였다. 유동차원에 대한 필요성 및 해석방법은 Doe and Geier(1990), 김천수외(1993)의 방법을 이용하였다. 유동차원 해석결과는 단열모델에서 시추공모사를 통한 모델의 교정(calibration) 시에 사용하였고, 부정류해석에 의한 수리전도도값을 가능한한 유동로의 특성에 따라 도출해낼 수 있는 방법을 제공한다. 또한 유동영역의 형태와 경계효과에 대한 자료 및 시추공 주변에 발달된 단열체계의 특성자료를 유도해 낼 수 있다.

유동차원 해석은 표준곡선중첩법(type curve matching)에 의하여 분할차원(fractal dimension)을 구하고, 곡선 비교시 일치되는 지점에서 무차원 Q_D , Q , t_D , 및 t 의 값을 도출하였다. 간이적이나 실질적인 또 다른 방법으로 시험결과를 양대수곡선(선형유동; linear flow), 반대수곡선(방사상 유동; radial flow)과 대수곡선(구상유동; spherical flow)의 각기 다른 좌표에 도시하여 각 좌표상에서 직선변화 특성을 관찰함으로써 1, 2 및 3의 정수차원(integer dimension)을 구분하는 직선법을 이용하였다(Barker, 1988; 1991). 실시된 시험들 중, 주입 초기단계에서는 일정한 주입압력이 시험구간 내에서 일정하게 정압상태가 유지되지 않는 경우도 있다. 이러한 경우에 M-rate(multi-rate correction; Golder Associates Inc)프로그램을 이용하여 유동차원을 분석하였다.

일부구간에서 보이는 시간과 유량의 양대수그래프에서 수직인 단열의 특징으로 보이는 기울기 1/2, 1/4의 선형유동과 이중선형유동의 양상은 set 1, 2의 고각의 단열들로만 분포하는 구간중 일부구간에서 선형적인 특성을 보이며 띄고 있으나 수리인자 도출에 있어서 수리전도도(k)와 비저류계수(S_s)의 곱의 형태로 계산되어 따로 분리할수 없는 특성으로 인해 수리전도도 계산에 신뢰성 문제가 있다. 그래서, 시험구간의 투수량계수는 선형유동의 경향에서 방사상으로 전환되는 양상을 파악한 후, 2차원의 $1/Q - \log t$ 의 방사상유동의 투수량계수를 사용하였다. 텔레뷰어 검증결과로 투수성단열로 분류된 저각 및 고각의 단열들이 서로간의 교차성이 좋은 구간에서는 시험종반부에 구상유동으로 전환되는 모습

을 보여준다. 이는 $1/Q \cdot \log t$ 그래프에서 시험종료 전에 직선이 concave downward 양상으로 차원증가 유무를 판단하였다. 3기의 시추공에서 실시된 수리시험 자료로 유동차원분석을 행한 결과 방사상유동의 특징을 보이는 경우, 초기의 1차원의 유동에서 차원이 증가하는 경우 및 constant flow가 일어나는 경우, 등의 세가지 양상을 보인다.

연구지역의 대표적인 유동형태는 방사상유동의 성격을 띠며, 또한 모든 구간의 계산된 단열투수량계수의 확률밀도분포를 알아보기 위해 먼저 누적밀도함수에서 어떤 분포를 보이는지 확인하였다. Freeze(1975)는 균질 매질에서 지하수거동연구를 위해 수리시험을 실시하였다. 시험결과로 얻어진 수리전도도에 대한 확률밀도분포함수는 대수정규분포(lognormal)를 나타내었다. 본 연구에서도 시험 전 구간에서 계산된 단열투수량계수는 대수정규분포를 형태를 보였으며, 평균값은 $2.14 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다.

단열암반에서의 지하수는 단열의 틈사이로만 유동하므로 암반 내 발달한 전체 단열들의 누적틈에 대한 단열조별 누적틈의 비를 고려하였다. 단열조별 지하수 유동특성을 위해 각 Set별 단열투수량계수를 산출을 시도하였다. 텔레뷰어검출을 통해 구하여진 단열분포 자료를 토대로 정압주입시험을 실시하기 위해 나누어진 각 구간별로 투수성, 불투수성에 관계없이 모든 단열들의 누적단열틈값을 정하고 그에 대한 단열조별 누적단열틈의 크기를 모든 단열의 누적단열틈값에 대한 비율로 구간의 투수량계수를 곱하여 계산하였다.

$$T_t = T_1 + T_2 + T_3 \\ = \left(\frac{e_1}{e_t} + \frac{e_2}{e_t} + \frac{e_3}{e_t} \right) T_t$$

- Tt : Transmissivity of all fractures.
- Tn : Transmissivity of fracture set n.
- et : Cumulative aperture size of all fractures.
- en : Cumulative aperture size of fracture set n.

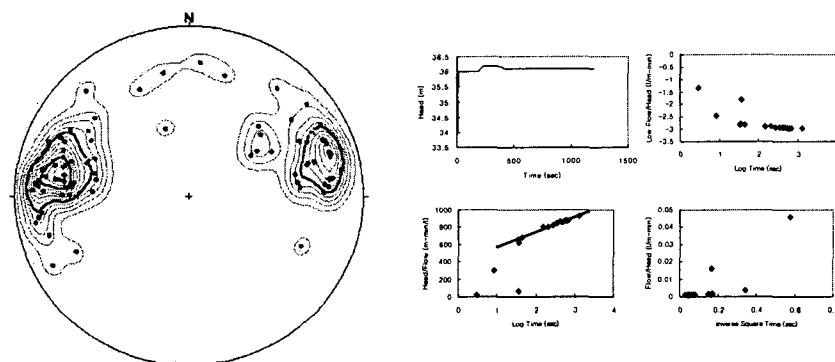


Fig. 2. An example of analysis of fracture distribution and hydraulic test results of the section, 98.40~108.40m: YS-01.

3. 결론

연구지역의 단열분포는 Set별로 평균배향이 274.9/87.3, 208.4/63.5, 49.8/23.1의 두 조의 고경사군 단열조와 하나의 저경사군 단열조가 분포하며, 단열틈의 기하평균값은 각각 0.84mm, 0.75mm, 6.94mm이다. 연구지역에 실시된 정압주입시험의 결과로부터 부정류 유동개념에 의한 유동차원을 분석

한 결과, 2차원의 방사상유동이 이 지역의 대표되는 유동형태이며, 주입 초기의 선형, 이중선형유동이 방사상유동으로 전환되거나, 시험초기의 정률상태로 주입되다가 방사상유동으로 전환하는 양상이 주류를 이루고 있다. 정압주입시험에 실시된 구간별 단열투수량계수는 확률분포함수는 대수정규분포형태를 나타내며, 평균값은 $2.14 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 계산되었으며, 상대적으로 높은 투수성 구간은 5.63×10^{-6} ~ $7.84 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 계산 되었다. 시험구간별로 계산된 단열조별 투수량계수의 확률밀도분포는 대수정규분포의 특성을 보이며, 그 기하평균 값은 단열조별로 각각 $5.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$, $7.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$, $6.16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다.

4. 참고문헌

- 1) 김경수, 김천수, 배대석, 2002, 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출, 대한지질공학회지, 12.3, 319-332.
- 2) 김천수, 이은용, 배대석, 김경수, 1993. 정압주입시험을 이용한 지하수유동차원해석, 대한지질공학회지, 3.2, 149-165
- 3) Barker, J. A., 1988. A generalized radial flow model for hydrologic tests in fractured rock, Water Resource Research, 24, 1796-1804
- 4) Doe, T. W and J. E. Geier, 1990. Interpretation of fracture system geometry wusing well test data, Stripa Project 91-03, SKB, Stockholm
- 5) Freeze, R. A., 1975, A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, Water Resourse Research, 11.5, 725-741.