

녹사평 암반의 단열특성과 지하수유동

김은진

농업기반공사 지하수사업처

1. 서론

우리나라의 경우 이미 1980년대부터 단열암반(fractured rock)의 지하수를 개발·이용하여 왔다. 서울시의 지하수 이용시설 중 지하 30m 이상의 개발심도를 나타내는 관정이 31.4%(4,677개소), 100m 이상의 개발관정도 7.2%(1,076개소) 존재하는 것으로 보고되었다(서울시, 1996, 12).

단열암반의 지하수 유동은 다공질매체 내의 지하수 유동과는 다른 흐름특성을 가짐에도 불구하고 근래에 이르기까지 지하수 유동해석 분야에서는 균질등방성 다공질매질을 전제로 한 유동개념에 의존해 오고 있다. 이 개념은 지하수자원 개발뿐만 아니라 지하수문환경 감시관리를 위한 유동해석 등 폭넓게 사용하고 있으나, 실제 지하매질이 갖는 불균질성과 이방성을 고려할 때 조심스러운 접근이 요구된다(김경수 등, 1998).

본 연구에서는 암반에 지하철 터널이 굴착되어 터널내로 유입되는 지하수를 배수·집수시스템에 의해 터널내 집수정에 집수하였다가 생활용수로 이용하는 서울시 지하철 6호선 녹사평역 주변지역을 연구지역으로 선정하여 암반지하수의 이동통로인 단열의 특성을 분석하고 암반지하수의 수리지질 특성을 분석하였다.

2. 연구방법 및 연구지역 개관

1) 연구방법

연구지역의 단열특성을 분석하기 위하여 지표상의 노두조사를 통해 지표에 발달하는 절리(joint)와 엽리(foliation)의 주향과 경사를 분석하였고, 지하의 단열특성 분석을 위해 시추공을 설치하고 시추코아에 대한 코아 로깅(core logging)과 시추공에 대한 디지털영상촬영(DOPTV, Digital Optical TeleViewer) 등을 통해 지하단열의 방향(direction), 간격(spacing), 밀도(density), 틈(aperture) 등의 단열인자를 분석하였다.

수리지질학적 특성을 분석하기 위하여 전기비저항쌍극자탐사, 수압시험(Packer test), 지하수 유량유속측정 등을 수행하였으며, 이를 통하여 연구지역의 2차원적인 전기비저항분포, 심도별 수리전도도(hydraulic conductivity)와 투수량계수(transmissivity), 시추공내 유향(flow direction)과 유속(flow velocity) 등을 분석하였다.

2) 연구지역 개관

연구지역으로 선정된 서울시 용산구 지하철 6호선의 녹사평역 주변지역은 이태원사거리를 중심으로 동쪽에 이태원역, 서쪽으로는 삼각지역과 연결되며, 남쪽으로는 한강, 북으로는 남산이 위치한다. 대부분의 지표가 도로나 건물에 의해 콘크리트 등으로 피복되어 있는 전형적인 도시지역이다. 이태원 사거리에 높이 약 5m의 지하차도가 남북방향으로 위치하며, 그 하부 지표로부터 약 40m에 녹사평역 역사를 중심으로 하는 서울시 지하철 6호선의 지하터널이 동-서방향으로 위치하는 등 지하구조물이 많이 분포하는 지역특성을 나타낸다.

전체적으로 완만한 구릉지를 형성하고 있으며, 국립지리원이 발행한 지형도에 의하면 녹사평역으로부

터 북동쪽으로 약 400m 부근에 해발 117m의 봉우리를 중심으로 북동방향의 능선이 발달되어 있고 녹사평역으로부터 남서쪽으로 약 200m 부근에 해발 65.5m의 봉우리가 발달되어 있다. 서울-남천점 1:250,000 지질도폭 (이병주 외, 1999)에 의하면 연구지역에는 석영-장석으로 구성된 우백질대와 흑운모로 구성된 우흑질대가 상호 교호하는 호상구조를 보이는 선캠브리아기의 호상 편마암이 주로 분포하는 것으로 기재되어 있다.

3. 연구결과

1) 지표단열 특성

본 연구지역은 분포암석과 지질특성상 노두발달이 미약하여 노두 확인이 어려운 지역으로 연구지역의 3개소(Site 1, 2, 3)에서 소규모 노두가 확인되었으며, 노두는 모두 호상흑운모편마암(banded biotite gneiss)으로 엽리와 절리가 발달하고 있었으며, 이 3개소를 제외하고 노두를 관찰할 수 있는 곳은 없었다.

Site 1에서는 N13°W/63°SW의 북북서 주향의 고각 절리가 우세하게 발달하며, 엽리는 N13°E/23°E으로 북북동 주향을 보이며 저각으로 발달한다. Site 2에서는 N67°W/81°SW의 서북서 주향의 고각 절리가 우세하게 발달하며, 엽리는 대체로 N47°E/34°SE의 방향을 보인다. Site 3에서는 N38°W/ 81°SW의 북서 주향의 고각 절리가 우세하게 발달하며, 엽리는 N42°E/36°E의 방향으로 나타난다. 전체적으로 지표에서 관찰된 단열은 북북서-북서 주향과 서북서 주향의 고각의 절리가 우세하게 발달하며, 엽리는 북북동-북동 주향을 가지며 저각으로 동경사하고 있다.

2) 지하단열 특성

연구지역 내에 8개 지점에 대해 지표면에서 -30.3m~-55.2m 심도까지 시추조사를 수행한 결과, 분포암석은 호상흑운모편마암으로 확인되었으며, 입자의 크기는 대체로 조립질이나 심도에 따라 입자가 세립질이며 주로 암색대가 교호되어 나타나기도 한다. 토양의 층후는 지점마다 다소 차이는 있으나 평균 3.8m로 대체로 얇게 나타나며, 상부풍화암이 지표면 기준 G.L-4.7~-7.5m까지 분포하며 평균 두께는 2.2m 이고 그 하부는 신선한 기반암이 분포한다. 시추코어를 정밀로깁한 결과 절리, 엽리, 파쇄대 등이 분포하며 절리의 발달이 가장 우세하게 나타났다.

각 시추공별로 나타나는 절리들의 주향과 경사를 분석한 결과 연구지역의 단열의 방향성은 크게 세 개의 세트(set)로 분포되어 나타났다. Set 1은 N52°E/30°SE 방향성을 나타내며, 가장 높은 집중도를 보이는 방향으로, 이는 지표의 노두에서 나타난 호상 편마암의 엽리와 평행한 절리들의 분포와 일치한다. 일반적으로 호상 편마암과 같이 엽리가 발달한 지층에서의 단열의 발달은 대부분 엽리와 평행한 방향으로 발달하고 있으며, 본 연구지역도 이와 같은 특성을 보여주고 있다. 시추공 영상자료에서 나타난 이 방향의 절리들은 분포 빈도수가 높은 반면, 틈새가 작은 것이 특징적이다. Set 2는 N33°W/57°SW의 방향으로 분포하는 불연속면으로, 높은 빈도수를 보이지는 않으나 시추공 영상자료의 분석결과 약 2개의 단층이 나타난다. Set 3은 N70°E/66°SE 방향으로 분포하는 불연속면으로, 이 방향으로 여러 개의 단층 또는 단층대가 관찰되며 특히 비교적 규모가 큰 단층대를 형성하고 있다.

단열의 간격과 밀도분석을 위하여 8개 시추공의 디지털영상촬영 방향, 즉 지표로부터 시추공의 공저 방향을 축선 방향으로 설정하고, 이 축선방향을 따르는 축선의 길이를 그 축선과 교차한 단열의 수로 나누어 평균단열간격을 산출하였으며 평균단열간격의 역수를 취하여 단열의 밀도를 산출하였다. 시추공별로 평균 간격과 단열밀도를 산출한 결과 단열간격 30~100cm로 실제 시추공별로 다양한 변화를 보였다. OW-1호공은 총 축선길이 3,030cm에 단열수 50개로 평균단열간격이 60.60cm, 단열밀도가 0.0165로 나타나 시추공중에서 평균단열간격이 가장 넓고 단열밀도가 가장 낮게 나타났으며, OW-5호공의 경우 총 축선길이 5,500cm, 단열수 182개로 평균단열간격 30.22cm, 단열밀도가 0.0330으로 평균 단열 간격이

가장 좁고 단열밀도가 가장 높은 시추공으로 나타났다. 지하철 터널로부터 시추공까지의 거리를 터널에서 가장 가까운 OW-5호공이 가장 높은 단열밀도를 나타내었으며, 그 다음 거리에 위치하는 OW-7호공도 0.0236으로 상대적으로 높은 단열밀도를 나타내었다.

단열의 틈 분석을 위하여 디지털영상촬영 결과 나타난 단열의 틈의 두께를 산출하고, 국제암반역학회(ISRM, 1978)에서 제시한 열린 단열(open features)로 평가하는 단열 틈의 두께 10mm 이상의 단열을 추출하였다. 그 결과 열린 단열의 대부분이 100mm 미만의 매우 넓은(very wide) 틈의 두께를 가지는 단열에 해당되며, OW-7 호공을 제외한 모든 시추공에서 극도로 넓은(extremely wide) 틈의 두께를 가지는 단열이 1~3개 분포한다. 각 시추공별로 단열 틈 10mm 이상의 열린 단열의 두께의 합은 지하철 터널에서 가장 가까운 OW-5호공이 1,588.4mm로 가장 크게 나타났으며 OW-6호공이 714.4mm, OW-4호공이 584.9mm, OW-8호공이 509.4mm 순으로 나타났다. 각 시추공별로 열린 단열의 빈도는 OW-5호공에서 14개로 가장 높게 나타났으며, OW-6호공과 OW-7호공이 7개로 나타났다.

3) 수리지질 특성

본 연구지역은 도심지역으로 아스콘이나 아스팔트 포장되어있고 지표하부 매설관로 및 지상의 고압선 등에 의한 간섭의 영향으로 효과적인 물리탐사 방법 또한 매우 제한적이다. 그러나 지하지질상태 및 지구구조적 특성을 2차원적으로 파악하기 위하여 전기비저항 쌍극자탐사(수평탐사)를 측정간격 10m와 5m로 실시하였다. 측정간격 10m의 탐사 결과는 연구지역의 전체적인 전기비저항 단면을 보여주며, 측정간격을 작게 하여 얻은 축선의 결과는 깊은 심도까지의 결과는 볼 수 없으나 얕은 심도에서 시추조사 결과와 잘 일치한다. 측정간격 5m의 탐사자료 해석결과 풍화암을 기반으로 볼 때 Station No. 110 이상인 구간을 제외하고는 200 Ω m 이하의 저비저항대가 약 10m 이내에 분포하고 있으며 그 하부는 비교적 500 Ω m 이상의 고비저항의 기반암이 분포하는 것으로 나타났다. 단면도에서 보면 Station No. 65~No.75 사이의 구간에 매우 낮은 (100 Ω m 이하의 전기비저항대인 이상대(anomaly)를 보이고 있어 이 부분이 주요 파쇄대를 이루고 있을 것으로 판단된다. 이 부근에 설치된 OW-6, 4, 8호공에서 OW-1, 2, 3호공에 비하여 단열의 발달이 양호하며, 시추코아에서도 일부 소규모 단층작용에 의한 단층점토를 확인할 수 있었다.

수압시험을 통해 8개 시추공에서 5m 간격으로 총 55회의 수압시험을 실시한 결과 수리전도도는 10-7cm/sec에서 10-4cm/sec의 범위를 나타내며 심도별로 수리전도도 값은 다양하여 이질성을 나타낸다. 수리전도도의 공간적 특성을 분석한 결과 8개 시추공은 A, B의 두 그룹으로 분류할 수 있으며, OW-6, 4, 8, 1, 2, 3호공이 A그룹으로 OW-5, 7호공이 B그룹으로 분류될 수 있다. A그룹은 2.18×10^{-7} cm/sec ~ 5.20×10^{-4} cm/sec의 수리전도도와 0~36 Lugeon 범위의 값을 나타내며, Flow Pattern은 Turbulent Pattern이 가장 우세한 형태를 보인다. Void filling pattern이 전혀 나타나지 않은 것이 특징적이며, 특히 OW-8호공의 경우 시추공의 전 구간에 걸쳐 Turbulent Pattern을 보이는 것도 특징적이다. B그룹은 1.51×10^{-7} cm/sec ~ 3.17×10^{-4} cm/sec의 수리전도도와, Lugeon값은 0~24의 범위를 나타내었으며, Flow Pattern은 Wash out 유형이 가장 많이 나타났으며 A그룹과는 달리 Turbulent type이 가장 적게 나타났으며, A그룹에서 나타나지 않은 Void filling type이 나타난 것이 특징적이다.

8개의 시추공에서 시추공영상촬영을 통해 측정된 단열 틈의 두께를 근거로 각각의 단열의 투수량계수의 합으로 정의되는 단열투수량계수(Tf)를 시추공의 구간별로 산출하였다. 투수량계수는 7.86×10^{-6} m²/day ~ 3.48×10^{-1} m²/day의 범위를 나타낸다. 시추공별로는 OW-4호공의 경우 2.32×10^{-2} m²/day로 최대치를 나타내었으며 OW-5호공이 1.85×10^{-2} m²/day로 최저치를 나타내었다. 이는 시추공 평균수리전도도가 OW-4호공이 최대치, OW-5호공이 최소치를 나타낸 것과 동일한 결과이다. 그러나 단열의 간격이 OW-5호공에서 평균 30.2cm로 최소치를 나타내며 단열밀도가 최대로 나타난 것과는 다른 결과를 나타낸다.

순간가열방식(heat-pulse type)의 지하수유향유속계를 활용하여 8공 35개 지점에 대해 해당 구간의 유향과 유속을 측정하였다. 지하수 유향은 NE와 NW가 가장 우세하나 SW방향의 흐름이 관측되기도

하였다. OW-1호공은 G.L-13.70m와 G.L-18.75m 에서 지하수 흐름방향은 NW 방향을 나타낸다. OW-2호공은 G.L-15.00m에서 SW방향을, 지하철 터널에서 가장 멀리 떨어져 있는 OW-3호공은 3개 심도에서 측정이 이루어 졌으며 모든 측정심도에서 SW의 지하수 흐름방향을 나타낸다. OW-4호공의 G.L-12.5m에서는 SW 방향을 나타내나 G.L-24.3m에서는 NW 방향을 나타낸다. 지하철 터널에서 가장 가까운 OW-5호공의 경우 G.L-23.20m, G.L-37.05m, G.L-48.60m에서 각각 SW, NW, SW의 흐름방향을 보였다. OW-6호공은 G.L-23.00m에서 NE의 흐름방향을 보였다. OW-5호공 다음으로 지하철 터널에 인접해 위치하는 OW-7호공의 경우 세 개 심도에서 지하수 유향을 측정된 결과 세 개 심도에서 모두 다른 시추공과는 달리 두 회의 측정치가 매우 차이나는 결과를 나타내었다. G.L- 22.00m에서 첫 측정치는 21.04°, 두 번째 측정치는 0.48°를 나타내 모두 NE방향을 나타내기는 하나 유향의 차이가 20.56°로 나타났다. 그보다 하부인 G.L-33.00m에서는 첫 측정치는 113.69°와 58.03°로 55.66°의 차이를 보였으며 방향도 SE와 NE로 달리 나타났다. G.L-44.00m에서는 첫 번째 측정치와 두 번째 측정치와의 차이가 76.06°로 매우 큰 차이를 보였으며 흐름방향도 NE와 SE로 다르게 나타났다. OW-8호공은 G.L-15.60m와 G.L-26.00m 두 심도에서 모두 NW방향의 지하수 흐름방향을 보였다. 연구지역의 지하수 흐름속도는 0.146m/day에서 1.219m/day의 범위를 나타낸다. 시추공별로 OW-2호공의 G.L-15.0m 지점에서의 유속이 1.219m/day와 1.122 m/day로 평균 1.17m/day로서 측정자료 중 최대치로 나타났다. OW-6호공의 G.L-23.0m 지점의 경우 지하수 유속이 가장 느린 것으로 나타났다.

4. 검토 및 결론

단열암반의 지하수 유동해석을 위해 서울시 녹사평역 주변지역을 연구지역으로 선정하고 단열특성과 수리지질특성을 분석하였다.

1) 연구지역은 소규모 능선이 발달한 구릉성 지형으로 토양과 풍화대 발달이 미약하여 평균 3.8m의 토양층과 평균 2.2m의 풍화대가 발달해 있으며, 풍화대 하부는 대체로 신선한 호상흑운모 편마암이 분포한다.

2) 지표에 절리와 엽리가 발달하고 있으며 전체적으로 지표상의 단열은 북북서-북서 주향과 서북서 주향의 고각의 절리가 우세하게 발달하며, 엽리는 북북동-북동 주향을 지니며 저각으로 동경사한다. 지하암반의 단열은 세 개의 주방향으로 분포하며 가장 집중도를 나타내는 방향은 주향 N52°E와 경사 30°SE로서 지표단열의 방향과 일치한다. 이와 같은 지표와 지하의 단열발달 방향은 지하수의 유동방향에 영향을 미친다.

3) 지하 단열 간격은 30.22~60.60cm, 단열 밀도는 0.0165~0.0330cm⁻¹으로 실제 위치별로 다양한 변화를 나타낸다. 지하철 터널과의 거리가 가까운 쪽에서 단열 간격이 좁고 밀도가 높게 나타나는 경향을 보이는데, 이는 터널 굴착의 영향으로 단열밀도가 증가하였을 것으로 판단되며, 터널과 다소 이격거리가 있는 시추공의 경우 인위적인 요인보다는 지질구조적인 단열상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 열린 단열의 빈도는 위치별로 다양하게 나타나나 지하철 터널 인근의 시추공이 그 빈도가 높게 나타나며 열린 단열 틈의 합도 크다. 이러한 지하철 터널 근처의 발달한 단열 틈의 증가는 터널로 유입되는 지하수 유동과 LNAPLs 거동의 추진력으로 작용하는 수리경사를 증가시키는 요인으로 분석된다.

4) 수리전도도는 10-7cm/sec~10-4cm/sec, 투수량계수는 7.86×10-6m²/day~3.48×10-1m²/day를 나타내며, 수리전도도의 이질성과 이방성이 나타난다. 단열 내의 국지적인 지하수 흐름방향은 NE, NW가 우세하며 지하철 터널쪽을 향하나 역방향을 나타내기도 한다. 이는 이차적인 구조에 의한 유동방향으로 판단된다. 지하수 유속은 7.6×10-2m/day에서 1.219m/day를 나타내며, 터널에 인접한 시추공에서 나타나는 심도별 유속의 큰 차이는 자동차의 동하중과 지하철 통과에 의한 진동의 영향을 받는 지역적 특성에 의한 것으로 볼 수 있다. 또한 단열암반대수층에서의 지하수의 흐름방향이 단열의 특성에 의해 광역적인 지하수흐름(macroscale 혹은 mesoscale)과 국지적인 흐름(microscale)이 다를 수 있다는 것이 U.S.G.S의 연구보고서에 제시된 바 있다.

상당한 수준의 정밀성이 요구되는 단열특성에 대한 분석과 단열 내를 유동하는 암반지하수의 유동에

대해서는 그 정량화 방법에 대한 계속적인 연구가 요구된다. 이러한 단열의 특성을 고려한 암반지하수의 유동 연구는 현재 암반지하수의 개발·이용과 지하수 환경을 감시하기 위한 유동해석에 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강병무·김천수·배대석·김경수·기정석, 1993, “분리열극개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동해석”, 지질공학회지, 3(2), 125~148.
- 김경수·김천수·배대석·김원영·최영섭·김중렬, 1998, “3차원 단열망모델링을 위한 단열수리인자 도출”, 지하수환경학회지, 5(2), 80~87.
- 서울시, 1996, 서울특별시지하수관리계획기본조사보고서, 1751.
- 최무웅, 1994, Multi-Fracture 암반에서의 지하수연대측정 모델개발, 건국대 환경과학연구소, 79.
- 한국동력자원연구소, 1982, 한국지질도 1:50000 서울도폭.
- EPA, 600/S-96/001, 1996, Hydrogeologic Characterization of fractured Rock Formation : A Guide for Groundwater Remediators, 11.
- Kabala, Z. J., 1994, Measuring distribution of hydraulic conductivity and specific storativity by the double flowmeter test, Water Resources. Research., 30(3), 685-690.
- Long, J. C. S., J. S. Remer, C. R. Wilson, and P. A. Witherspoon. 1982. Porous Media Reservoir Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources. Research. 18, 645-658.
- Parsons, R. W., 1966, Permeability of idealized fractured rock, Society of Petroleum Engineering Journal. 126-136.
- U.S.G.S., 99-4228, 1999, Ground-Water System, Estimation of Aquifer Hydraulic Properties, and Effects of Pumping on Ground-Water Flow in Triassic Sedimentary Rocks in and near Lansdale, Pennsylvania.