

우리나라 지질의 수리지질특성

Hydrogeologic Aspects in Engineering Geology

김 천 수
배 대 석

한국원자력연구소
한국원자력연구소

1. 배경

지하수를 사용하고 있는 기간은 수 천년이지만 지하수는 용천 이나 착정공 외에는 눈으로 볼 수 없기 때문에, 비전문가는 지하수유동, 산출, 근원에 대하여 아직도 이해하기가 힘들다. 국내 지하수 조사의 역사는 길지만, 체계적이고 과학적인 조사방법에 의하여 수행된 경우는 중요 지하공간 건설사업 등 일부에 지나지 않으며, 조사방법의 타당성이나 조사자의 능력 및 결과의 신뢰도 등에 대하여 평가된 적이 먹는샘물 개발사업 이전에는 없었다. 또한 지하수에 대한 특성도 조사자의 경험한도 내에서 이해되어 왔으며 이에 따라 조사자료가 이용되었다. 지하수체계 해석결과에 대한 확인 및 검증은 아직도 체계적으로 시도되지 않고 있다. 이러한 예로 연간 지하수 함양율을 고려한 적정취수량의 개념 대신 펌프용량에 의하여 결정되는 최대양수량이 그 지역의 지하수취수량으로 간주되기도 하였다. 현재는 지하수에 관하여 보다 체계적이고 과학적인 개발 및 관리를 위하여 지하수 기초자료(수문지질도)의 생산이 진행되고 있다. 수문지질도는 주로 대상지역에서 수리지질학적 단위설정과 이들에 대한 분포 및 대표적인 수리특성, 그리고 조사지역의 물 수지분석과 지하수 보전/개발구역 도출을 위한 기본자료로 활용될 수 있다. 그러나 공학적으로 요구되는 수리지질특성 자료도출은 해당지역에서 사업수행자의 정밀조사를 통하여 조사되고 보완되어야 한다.

현재 수리지질 전문가들은 지하수를 수문순환계의 일부로 설명하고 있다. 수문순환계는 대기권, 지표수, 지하수의 복합적인 관계를 설명하게 되며 지하수의부존과 유동상태를 이해하는데 매우 유용한 개념이지만 정량적으로 표시하기는 쉽지 않다. 지질학적으로 해수의 양은 5억년동안 일정하게 유지되는 것으로 나타났으며 이는 수문순환계에 속하는 물의량은 거의 일정하다고 해석되고 있다 (Cleary et al.1991). 수문순환에 대한 기본적인 정량적 관계는 수문평형 방정식으로 제시되고 있다.

지표수와 비교하여 고유한 지하수특성은 유동속도로 대변된다. 지표수의 유속이 1 m/초 일 때 지하수는 1 m/일로 비교될 수 있다. 이러한 느린 유속은 지하수 유동이 층류를 이루게 되고 긴 체제기간을 갖게 된다. 현재까지 알려진 가장 오래된 지하수는 5000년에서 2백 만년으로 측정되고 있다. 또한 지하수의 느린 유속은 지하수 함양량보다 많은 지하수 개발량은 지하수체계의 고갈 현상을 가져오게 되고, 한번 오염된 지하수부존 체계의 정화 작업

에도 많은 문제점을 발생시키며, 미고결층의 기초공학특성이나 사면의 불안정성, 지하공동으로의 지하수유입량 평가에도 어려움을 유발하게 된다.

지하수유동과 지하수압에 대한 이해는 댐, 터널, 유로 (water conveyance channels) 건설 그리고 광산 및 기타 토목구조물 안전성과 사면안정성에 필수적이다. 또한 지하수 배출로 인한 지반침하(settlement)와 subsidence에 필히 고려되어야 된다. 지하수와 관련된 지반공학적 문제들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 사면붕괴해석을 위한 수리지질조사와 사면안정성을 위한 배수로 설계
- 지하수과다 채수로 인한 지반붕괴,
- 연약지반(간척지 등)의 간극수변화에 의한 토질변형(지반강화)
- 심부터널이나 굴착공사시 지하수조사와 유입량제어
- 도심개발에 따른 지하수체계 변화
- 수리-역학적인 coupling 문제점

상기 지질공학적 문제해결을 위하여 국내지하수의 부존체계 분류(안)제시, 미고결층과 암반층의 수리지질특성을 요약하였으며, 지질공학에 적용될 수 있는 일반적인 수리지질 요소와 수리인자특성을 제시하였다.

2. 국내지하수부존특성

국내 지질환경은 지하수체계 분류의 기본적 요소인 지질구조, 암종, 지형특성을 종합적으로 분류하기가 매우 어려운 조건을 갖고 있다. 지질구조대는 대규모의 N30~50E의 방향으로 발달되어 있으며, 지형발달은 동고서저를 이루고 있고, 암종분포는 26억년(2.6 Ga)전의 암석으로부터 최근 퇴적층까지 다양한 분포를 나타내고 있다. 따라서 구조, 지형, 암종 중 한가지를 우선하게 되면, 다른 요소는 2차적인 요소로 반영하게 된다. 이는 지형적인 특성이 비교적 유사한 지질조건을 반영하는 북미대륙과는 상이한 점이다. 우리나라의 경우 중생대의 화강암과 화산암은 모든 지체구조구역에 널리 분포되어 있다. 또한 한반도의 척량산맥인 태백산맥은 모든 기반암이 분포하며, 기 분류된 지체구조구역과는 특별한 상관관계를 나타내고 있지 않다.

지하수 유동체계는 부지고유특성(site specific data)에 따라 좌우되며, 투수성과 저류성 등의 수리인자로 대변되는 암질은 지하수 유동체계의 매질로 고려되어야 한다. 따라서 우선적으로 고려되어야 할 요소는 지하수의 유동력을 발생시키는 지형에 의하여 구분되는 것이 타당하다. 또한 국내 지질환경의 특성을 감안하여 지체구조 특성을 고려하여야 할 것이다.

현재 제시할 수 있는 분류(안)으로는 구조적 생성시기와 암석학적 공통성을 갖고 있는 지체구조구를 근거로

- 경기 Massiff 지역

- 옥천습곡대
- 영남 Massiff 지역(경상분지 포함)

의 3개 지하수 권역으로 분류하고, 지형적인 조건에 따라서

- 고산지대 (>EL.500 m)
- 중산지대 (EL.200-500 m)
- 준평원지대 (EL.100-200 m)
- 평야지대 (<EL.100 m)

의 4개 지하수유역으로 구분할 수 있다.

대부분의 지하수유동체계에서 뚜렷한 수리동력학적인 경계조건은 지하수위에 의하여 정해지며, 지하수위 분포는 강수에 의한 함양량과 지하수체계로부터의 배출량에 따라 지속적으로 변하고 있다. 지하수체계의 동력학적 에너지를 최소화 하기 위하여 지하수 유동은 지형상으로 높은지역에 위치하는 함양지역에서 낮은 지형의 배출지역으로 지하수 유동방향이 설정된다. 즉 지하수유동력의 기본요소는 수리경사 이며, 이때 고려되어지는 수리경사는 동일한 지하수유동체계 내에서 계측되어야만 기본이론이 적용될 수 있다. 지하수위의 변화기간은 지하수압 변화과정의 특성에 따라 수 분에서 수 백년까지의 범위를 갖고 있다. 피압대수층의 단기적 수위변화는 대기압변화, 지진발생, 조석간만등이 원인이 되나, 이러한 변화는 자유면 대수층에서는 감소되기 때문에 인지되기 어렵다. 연간 강수변화는 지하수 함양량과 밀접한 관계가 있으며 주기적인 변화로 나타난다. 지하수위 변화는 대수층의 수리특성과 지하수유동력의 복합적인 관계로 결정된다.

지하수부존과 유동특성은 지질학적 구성을 이해하지 않고서는 밝혀질 수 없다. 지하수 조사의 잘못된 해석이나 오류는 지질학적 특성의 미흡한 평가나 지하수유동에 미치는 지질학적 영향에 대한 이해부족에 기인된다. 지하수 체계는 지질학적 조건으로부터 다음과 같은 특성이 결정된다.

- 지하수체계의 기하학적 구성
- 지하수유동방향의 이방성
- 수리전도도 값의 현저한 차이
- 지하수위의 분포양상

지하에 분포되어 있는 지하수는 지표수계와 평형을 이루고 있으며 하나의 연결체로 구성되기 때문에, 특히 지형 및 층서 그리고 구조지질학적인 특성에 대한 이해 없이는 지하수의 부존 및 이동, 화학성분 등 지하수체계특성의 해석이 불가능하다. 일반적인 지하수의 부존상태는 상부에 발달된 충적층과 암반풍화대등의 미고결층에서 산출되는 상부지하수대와 암반에 부존하는 암반지하수대로 구분될 수 있다. 국지적규모의 지하수부존체계는 그림 1과 같이 수리지질학적 개념모델로 제시될 수 있다. 미고결층은 제4기지층의 공간적분포특성을

바탕으로 유사한 지질학적 특성을 갖는 층들을 합하여 soil domain (HSD)으로 설정한다. 암반층은 일반적으로 파쇄대의 기하학적특성에 따른 투수성구조 domain(HCD)과 암반 domain (HRD)로 구분하고있다. 또한 지질학적으로 구분되는 domain내에 수리특성이 현저히 차이가 나면, 2 3개 sub-domains으로 세분 될 수 있다.

3. 미고결층의 수리지질특성

상부지하수대는 구성물질의 투수성이 높을 경우, 지표수나 강우가 직접 지하수로 유입되어 양호한 대수층을 이룬다. 화강암질의 풍화대는 최고 30~40 m에 이르는 곳이 많으며, 선택적 풍화가 이루어지는 특징을 갖고 있는 편마암의 풍화심도도 약 30 m이상에 달한다. 화산암에서는 접촉부에 발달된 파쇄성 단열과 기존 암반의 풍화대와 연계하여 대수층을

Hydrogeological description

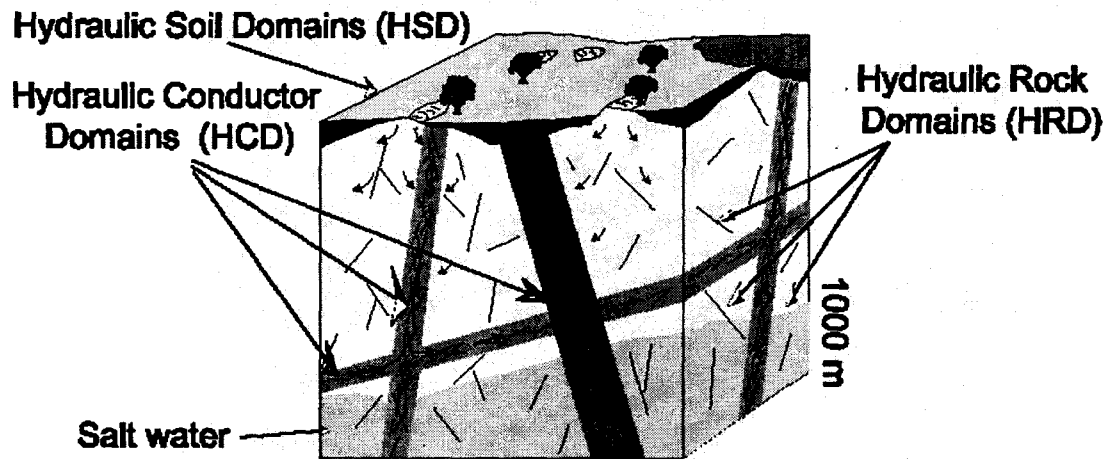


그림 1 수리지질 개념모델의 주요구성요소 (after SKB TR-02-19)

형성하고 있는 경우가 많다. 제4기에 형성된 지층은 70%가 산지로 구성된 한반도에서는 산록의 하부지역이나 계곡 그리고 평야지대에 한정되어 나타난다. 홀로세에 형성된 지층은 넓은 계곡내의 충적층으로 발달하고있다.

상부지하수체를 구성하고있는 미고결층과 파쇄/풍화가 심한 암반상부는 높은 수리투수성을 갖게 되며, 이는 지표면과 평행하게 일어나는 2차원 유동특성을 발생시키는 요인으로 작용한다. 따라서 지표면을 침투한 강수는 미고결층과 비포화대를 통하여 재분배되고, 상부 지하수대는 일반적으로 지하수와 지표수의 상호작용에 의한 수리동력학적 과정을 형성하게 된다.

4. 암반의 수리지질특성

각종 암반내에 부존된 지하수는 해당지역의 대수층 수리지질특성에 따라 다소 차이는 있으나, 산출자료에 의하면 기반암에서 상당량의 지하수가 부존되어 있는 것으로 알려져있다. 많은 암반에서 매질자체의 투수성은 매우 낮으며, 암반 지하수는 절리, 파쇄대, 단층등의 단열체계 내에 부존되어 있다. 일반적으로 파쇄대는 단층에 형성되거나 층상단층, 습곡축 부근에 발달하는 것이 보통이다. 또한 암반에 발달된 절리 및 균열형 대수층은 규모는 적으나 지하수의 주요 통로가 된다. 암반에 분포하는 단열체계는 지구조적 운동에 의해 분포특성이 결정되며 수리지질학적으로 불규칙한 지하수유동로의 역할을 한다.

어느 지역의 지하수 부존체계의 해석을 위해서는 단열체계의 기하학적 분포에 따른 불규칙한 함수대의 분포특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 상부지하수대 특성은 단순한 균질 등방의 다공성연속체 매질이라는 가정 하에 별문제 없이 해석, 평가 될 수 있으나, 하부의 암반지하수대 특성은 상기가정의 적용에 대한 부적합성 및 한계성이 알려지고 있다.

암반내에 발달된 단열체계는 지구조적 운동에 의하여 복잡한 특성이 결정되며, 지하수 체계의 유동경계면을 설정하거나 체계내의 불규칙한 유동로를 형성하게 된다. 암반의 단열 체계가 지하수 부존상태에 미치는 영향은 다음과 같은 결과를 나타낸다.

- 단열체계의 기하학적 특성에 따른 불규칙한 함수대 분포
- 지표수 집수유역과 지하수 유역과의 차이
- 양수시험시 거리와 지하수위 강하의 불규칙성
- 시공간에 따른 수리경사/수리전도도 등 수리인자의 불규칙한 분포
- 국부적인 현장계측결과 및 수리인자의 불확실성
- 단열폭과 크기, 단열면의 접촉면적 변화에 따른 지하수 유동로의 복잡성

이러한 지질학적 과정에 의하여 형성된 지하수 체계의 공간적 변화는 일부구간의 지하수 유동체계 파악만으로는 전지역의 유동체계해석을 불가능하게 만든다.

암반에서의 수리지질에 대한 특성은 INTRAVAL 국제연구그룹에 의하여 다음과 같이 요약 되고 있다.

- 지질매체는 공간적인 특성변화와 시간적인 복합적 특성을 갖는 자연매체로 다양한 규모에서 연속적, 개별적인 현상과 특성을 동시에 갖고 있다.
- 위와 같은 규모종속성 때문에 국지적인 현장시험결과는 대상암반체에 대한 신뢰성 있는 예측이 보장되지 않는다. 이러한 문제점 해결을 위하여 규모에 따른 다중지점에서 계측, 현장시험, 관찰 등이 이루어져야 한다.
- 지하수 유동로와 오염물질 이동로는 모든 규모에서 파악될 수 없으므로 현장조

사자료에 대한 multiple 해석과 개념화가 이루어져야 한다.

- 암반에서 지하수의 주요 유동로 형성은 암반 내 발달한 단열 체계와 외부/내부의 지하수 유동력에 따른 동력학적변화에 지배된다. 따라서 유동량과 유동시간은 geosphere의 고유 특성이 아닌 대상 규모의 수리동력학적 조건에 의하여 결정된다.
- 현장시험 및 조사결과의 해석은 주로 모델에 의하여 수행되고 있다. 모델이 복잡해지면 최적모델의 효율성은 급속히 감소되기 때문에, 사용되는 모델은 단순하기도 복잡하지도 않아야 된다.
- 지금까지의 모든 현장시험 결과에 의하면 오염물질 이동은 불균질성에 의하여 형성된 다른 유동로를 따라 advection으로 이루어지고 있다. 따라서 규모별, 공간적 변화요건(불균질성과 이방성)은 주요 불확실성 요인으로 명백히 제시하여야 할 것이며, 분산과정에 대한 불확실성도 중요하게 취급되어야 한다.
- 오염물질의 매질확산(matrix diffusion) 현상은 석회암에서 중요하게 인식되었으나, 결정질암에서는 아직 중요성이 확인되지 않고 있다.
- 지질조사 자료중 정량적으로 생산될 수 있는 고유자료(intrinsic quantities)는 통계학적으로 특성이 파악되고 추계론적(stochastically)으로 분석될 수 있다. 이러한 자료는 모델의 설계, 교정, 검증 등에 활용되며, 특히 예측되는 불확실성의 정량화에 매우 중요하다. 이를 위하여 규모에 따른 여러 지점에서 많은 계측과 관찰자료가 도출되어야 한다.
- 암석, 지하수유동, 오염물질 이동 등에 대한 거동특성은 관찰할 수 있는 암반표면과 암반 내부사이에 많은 차이점이 있기 때문에 지표에서 관찰되는 결과를 내부까지 연장하여 해석하기에는 많은 문제점이 수반된다.
- 상기 기술된 지질환경의 복합적 특성파악을 위하여 모델, 이론, 실험분야 사이에는 밀접한 의사교환이 이루어져야 한다.

5. 지질공학적 특성

지하수와 관련된 지질공학적 문제들은 표 1과 같이 분류하였으며, 이에 따른 수리지질학적 요소를 제시하였다. 또한 설계 및 안정성평가에 필수적으로 사용되는 수리인자의 값은 국내수리지질특성자료에 근거를 두어야 하나 아직까지 database의 미비로 일반적으로 적용되는 각 수리인자 예제를 기재하였다.

표 1. 지질공학분야와 관련된 수리지질인자

지질공학분야	수리지질요소	수리인자범위
<p>지상구조(Surface Structures)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 댐/ Embankments <ul style="list-style-type: none"> - Seepage/Leakage flows - Uplift pressure • 기초(Foundations) <ul style="list-style-type: none"> - Bearing Capacity - Consolidation/settlements - Vertical movement/Uplift/ Heave • 사면 (Earth/Rock slopes) <ul style="list-style-type: none"> - Seepage forces - Boundary water forces • Earth retaining walls <ul style="list-style-type: none"> - Pore pressure development - Horizontal hydrostatic pressure <p>지하공간(Underground opening)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 터널/광산 <ul style="list-style-type: none"> - Water inflow - Groundwater pressure - Ground Upheaval/ upward seepage force - Groundwater cliff (high hydraulic gradient) - Massive groundwater inflow • 지하유류저장시설 <ul style="list-style-type: none"> - 저장공동 심도/ 간격 - 수벽터널 심도 - 수벽공 직경/간격/주입압/주입량 - 공동 유입량 - 공동주변 지하수압 분포/flux • 지하공간시설 <ul style="list-style-type: none"> - 공동 유입량 - 공동주변 지하수압 분포 및 flux - massive groundwater inflow <p>지하수자원</p> <ul style="list-style-type: none"> • 수자원개발 <ul style="list-style-type: none"> - 적정취수량 - 지하수체계 변화 - 지반침하 <p>지하수환경</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염방지 및 복구 <ul style="list-style-type: none"> - 오염원의 특성 - 오염영역의 범위 	<p>Generic 요소</p> <ul style="list-style-type: none"> • 광역규모 <ul style="list-style-type: none"> - 지하수 함양/배출지역 - 수두경사 분포 - 주요 유동로/유동량 분포 - 수리경계특성 • 지역규모 <ul style="list-style-type: none"> - 지하수유동로/유동량 분포 - 유동방향 - 수리경사 • Block 규모 <ul style="list-style-type: none"> - 유동로 구조적 특성 - 수리적 불균질/이방성 - 국지적 수두경사 - 유동로에 따른 유동량 <p>Specific 요소</p> <ul style="list-style-type: none"> • 수리지질조건 <ul style="list-style-type: none"> - 수리경계조건 - 지하수 유동심도 • 지하수 유동체계 <ul style="list-style-type: none"> - 지하수 유동력 - Active flow zone - Stagnant flow zone - 지하수 저류체 특성 - 수리단위 및 방벽 특성 • 지하수 수리특성 <ul style="list-style-type: none"> - 투수성: 수리전도도, 투수량계수 - 저류성: Flow porosity, 저류계수 - 공간적 수두경사 분포: (지하수위, 피조메터 level, hydrostatic pressure) • 지하수 유동로 특성 <ul style="list-style-type: none"> - 유동로 수, 빈도, 길이 - 유동로의 투수성/저류성 - 유동로의 단면적 - 유동로의 수두경사 - 수리적 연결성 • Volumetric Flux 특성 <ul style="list-style-type: none"> - 대상지역의 평균 수리경사 - 유동로 규모(면적 3D; 폭 2D) - 수리특성(K in 3D, T in 2D) • 지하수 유동시간 <ul style="list-style-type: none"> - 주유동로 위치 - 유동로의 수두경사 - 투수성 및 저유성 • 수리화학적 특성 <ul style="list-style-type: none"> - 화학·동위원소의 수평/수직적 분포특성 - 수리화학 특성에 따른 지하수 유동조건 	<p>투수계수 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> • 분류 <ul style="list-style-type: none"> - $< 10^{-9}$ m/s: Practically impermeable - $10^{-5} \sim 10^{-8}$ m/s: low discharge/poor drainage - $1 \sim 10^{-4}$ m/s: high discharge /free drainage. • Grouts <ul style="list-style-type: none"> - Sand cement: $> 10^{-3}$ m/s - Clay cement: $> 10^{-5}$ m/s - Sodium silicate: $> 10^{-6}$ m/s - Resins: $> 10^{-8}$ m/s • Transport Process <ul style="list-style-type: none"> - Advection: $10^{-5} \sim 10^{-7}$ m/s - Dispersion and Advection: $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m/s - Diffusion: $< 10^{-9}$ m/s <p>지하공동의 유입량</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coal mines <ul style="list-style-type: none"> - 1~2.4t(물)/1t(암석) <p>방사성폐기물처분장(Preferences)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 수리인자 <ul style="list-style-type: none"> - Transport resistance: 10^4 y/m - K(암반): $< 10^{-8}$ m/s - T(단열대): 10^{-5} m²/s - 수두경사: < 0.01 • 수리화학 <ul style="list-style-type: none"> - TDS: < 100g/ℓ - PH: 6~10 - DOC: 20 mg/ℓ - Colloids: < 0.5mg/ℓ - Ca+Mg: > 4mg/ℓ

