

해 설

지하유류비축시설 수리안정성 평가방안 Hydrogeological Performance Assessment for Underground Oil Storage Caverns

김 천 수 (Kim, Chun-Soo)
배 대 석 (Bae, Dae-Seok)
김 경 수 (Kim, Kyung-Soo)
고 용 권 (Koh, Yong-Kwon)
송 승 호 (Song, Seung-Ho)

한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국석유개발공사

요약 / ABSTRACT

대규모의 암반 공동을 이용하는 대표적 시설인 지하유류비축시설과 방사성폐기물처분시설은, 공히 암반이 갖는 천연적인 방벽기능과 안전성 확보를 위한 보장 조치로서 인공방벽시설을 설치한다는 공통점이 있다. 지하유류비축시설의 설계, 건설 및 운영의 각 단계에서 모암에 분포하는 지질구조와 그들의 수리학적 특성이 시설의 안전성 및 성능에 가장 중요한 역할을 한다. 시설 설치가 가능한 규모의 암반 block 내에 분포된 단열체계는 고유의 지하학적 특성과 수리적 특성이 혼재되어 복합적인 수리체계를 형성하고 있기 때문에 이에 대한 정확하고 정량적인 조사·평가가 지하비축시설의 수리적 안정성을 좌우하게 된다. 본 논문은 지하유류비축시설의 성능평가에서 요구되는 자연방벽의 수밀성 기능을 평가하기 위하여 지하수문체계의 해석과정에서 고려되어야 할 문제점들을 우선 검토하고, 시설의 안전한 운영을 위하여 다루어져야 할 수리안정성관련 파라미터에 대한 조사 및 평가방법을 다룬다.

There are common aspects between the underground oil storage cavern and the radioactive waste disposal facility. Both facilities use appropriately the intrinsic natural barrier characteristics of the rock mass and additionally the engineered barrier system for the long term safety. The geological structures and their hydrogeological characteristics in a fractured rock mass act a major role in the safety and performance of the underground oil storage facility through the design, construction and the operation stages. Because the fracture system distributed in a fractured rock block is complicated owing to their own geometrical and hydrogeological attributes, the hydrogeological performance of the facility would depend mainly upon the understandings of their characteristics. This study reviews the uncertainties and key issues which have to be considered to analyse the groundwater flow system in a fractured rock mass and proposes the techniques applicable to characterize the hydrogeological parameter.

서 언

대규모의 암반 공동을 이용하는 대표적인 시설로는 유류비축시설과 방사성폐기물처분시설이 있다. 이들은 공히 암반이 갖는 천연적인 방벽(natural barrier system)의 기능, 즉, 물리화학적 및 역학적 특성의 완충능력이 매우 양호하고, 천연의 기밀성을 보장할 수 있다는 기능을 최대한으로 활용하는 시설이라는 점에서 공통점이 있다(Table 1). 그러나 인간의 접근 한계성으로 인한 암반이 갖는 특성에 대한 평가의 불확실성 때문에 최종적인 안전성 확보를 위한 조치로서, 전자의 경우에는 수벽공, 후자는 완충재 등의 인공방벽시설(engineered barrier system)을 설치한다는 점에서는 양자의 방법이 다르다고 할 수 있다. 즉, 유류비축시설은 수동력학에 의한 수밀성이, 방사성폐기물처분시설은 지하수유동으로부터의 격리조건 확보가 시설에 대한 성능평가(performance assessment)의 기본요건인 것이다.

암반 공동내에 원유나 LPG 등의 유류를 비축하는 방법은 공동 주변에 작용하는 지하수압을 자연적 또는 인위적으로 유류 저장압보다 항상 높게 유지시킴으로써 이들 유류의 지표누출을 방지하는 원리를 이용하는 것이다. 이러한 저장원리의 지질학적인 요건으로서는 크게 매질자체의 균질성과 지하수압의 균형적인 분포를 고려할 수 있다. 암반 매질의 균질성은 암석학적인 측면과 지질구조적인 측면에서 다루어 질 수 있다. 지하수학적 관점에서 풍화대 하부의 신선한 암반에서 지하수유동체계는 단열망(fracture network)에 지배되고, 수리학적적으로 연결되지 않는 암반매질은 불투수성 영역의 역할을 하기 때문에 함수대를 포함하는 암반 전체가 연속체로 정의될 수 없다. 물론 지하수 흐름의 통로 역할을 하는 단열(대)(fracture (zone))은 그 규모에 따라 정도의 차이가 있을 수 있으며, 반드시 규모와 유량과의 비례관계가 성립되지 않는다.

따라서 지하유류비축시설의 설계, 건설 및 운영의 각 단계에서 모암에 분포하는 지질구조와 그들

Table 1. Comparison between the underground cavern for oil storage and the radioactive waste disposal.

구분	지하유류비축시설	방사성폐기물처분시설
Life Time	• 50 yrs	• 300 - 100,000 yrs
Natural Barrier System	<ul style="list-style-type: none"> • Fractured Rock Mass • Groundwater Table • Piezometric Pressure • Hydraulic Gradient • Infiltration Rate 	<ul style="list-style-type: none"> • Fractured Rock Mass • Groundwater Flow Pathways • Flow Time • Flow
Engineered Barrier & Control System	<ul style="list-style-type: none"> • Grouting • Water Curtain 	<ul style="list-style-type: none"> • Canister • Buffer & Backfill
Integrated Performance Assessment	<ul style="list-style-type: none"> • Performance Analysis - Groundwater Pressure Distribution - Inflow Rate - Outflow Rate - Gas Leakage 	<ul style="list-style-type: none"> • Pathway Analysis • Scenario Analysis • Uncertainty Analysis • Safety Analysis (Dose Rate)

의 수리학적 특성이 시설의 안전성 및 성능에 가장 중요한 역할을 한다. 공동배치가 가능한 규모의 암반 내에 투수성 단열대(conductive fractures)가 존재하지 않을 경우 이론적으로는 가장 이상적인 격리 기능을 갖게 될 것이지만, 실제로 암반에 분포된 단열은 고유의 기하학적 특성과 수리적 특성이 혼재되어 복잡한 수리체계를 형성하고 있기 때문에 이에 대한 정확하고 정량적인 조사·평가가 지하비축시설의 수리적 안정성을 좌우하게 된다.

본 논문은 지하유류비축시설의 성능평가에서 요구되는 자연방벽의 수밀성 기능을 평가하기 위하여 지하수문체계의 해석과정에서 고려되어야 할 문제점들을 우선 검토하고, 시설의 안전한 운영을 위하여 다루어져야 할 수리안정성관련 파라미터에 대한 조사 및 평가방법을 다루고자 한다.

수리안정성 평가를 위한 현안과제

지하비축시설 주변 모암에서의 지하수체계 해석을 위한 현안과제는 첫째, 투수성단열대의 기하학적인 분포형태 및 상호연결성, 둘째, 단열체계의 수리특성, 그리고 셋째는 지하수압의 분포특성을 파악하는 것이다. 일반적으로 결정질암반에서의 지하수유동 형태는 투수성 단열대의 수리성에 우선 지배되므로 결국 단열체계의 기하학적 분포특성과 수리적 특성을 정확히 파악하는 것이 가장 중요하다고 볼 수 있다.

이러한 현안과제는 암반지하수체계의 해석을 요구하는 모든 사업에서 공통적으로 대두되는 문제이며, 이의 해결을 위한 노력이 세계 여러나라에서 꾸준히 추진되고 있으나, 아직까지도 만족할 만한 수준에 도달하지 못하고 있다. 그 중에서도 가장 중요하게 다루어져야 할 문제점들은 다음과 같다.

지하수체계 해석의 불확실성

암반에 분포하는 단열체계는 지구조적 운동에 의해 그 복잡한 특성이 결정되고, 수리지질학적으로 불규칙한 유동로의 역할을 한다. 지하수유동체계를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 다음과 같은 불확실성이 규명되어야 한다(Fig. 1).

(1) 단열체계의 기하학적 분포특성에 따른 불규

칙한 함수대 분포

- (2) 지표수 집수유역과 지하수 함양지역과의 불일치
- (3) 시공간에 따른 수리경사/수리전도도 등 수리인자의 불규칙한 변화
- (4) 제한적 현장조사로 인한 수리인자의 대표성에 대한 불확실성
- (5) 단열 폭, 크기, 상호연결성 정도 및 단열면의 접촉면적에 따른 지하수유동로의 복잡성

복잡한 지질학적 과정에 의하여 형성된 지하수체계의 공간적 변화는 일부 유동영역(flow regime)의 지하수흐름 파악만으로는 전 지역의 유동특성 해석을 불가능하게 만든다. 지금 국내에서 수행되고 있는 지하수체계 평가는 대부분 가장 단순한 균질 등방성의 다공성연속체 매질이라는 가정 하에서 이루어지고 있으며, 조사경험의 축적과 시행착오를 거쳐 현재의 평가방법에 대한 부적합성 및 제한성이 점차 인식되고 있다.

개념모델의 신뢰성

수리지질학적 개념모델은 지하수유동체계의 분석에 기초가 되는 수리지질학적 체계의 포괄적인 이해정도를 나타내는 것이다. 개념모델은 지하수체계 내의 유동과정과 경계조건을 모사하는데 요구되는 파라미터에 대하여 단순하여야 하고, 모호하지 않아야 한다. 초기 지하수조사 단계에서는 부지고유성 자료 또는 전문가의 견해에 상응하는 다양한 개념모델을 설정하는 것이 이상적이다. 개념모델은 조사가 진행되면서 계측결과와 모델에 의한 예측과의 비교에 의하여 수정 보완되어야 한다. 이론적으로는 하나의 개념모델을 정의하는데 이용되는 모든 자료가 부지조사 단계에서 얻어져야 하지만, 실제적으로는 이것이 항상 가능한 것만은 아니다. 따라서 모델에 입력되는 모든 자료를 완전하게 도출하기 위해서는 치밀한 조사계획이 우선 수립되어야 하고, 기타 현장에서 직접적으로 생산해 낼 수 없는 자료에 대하여는 별도의 대책이 준비되어야 한다. 모델의 신뢰성 증진 (building-of-confidence)은 모델예측과 현장계측치 및 지구화학특성 분포자료와의 종합적인 해석을 통하여 허용되는 수준까지 이루어져야 한다.

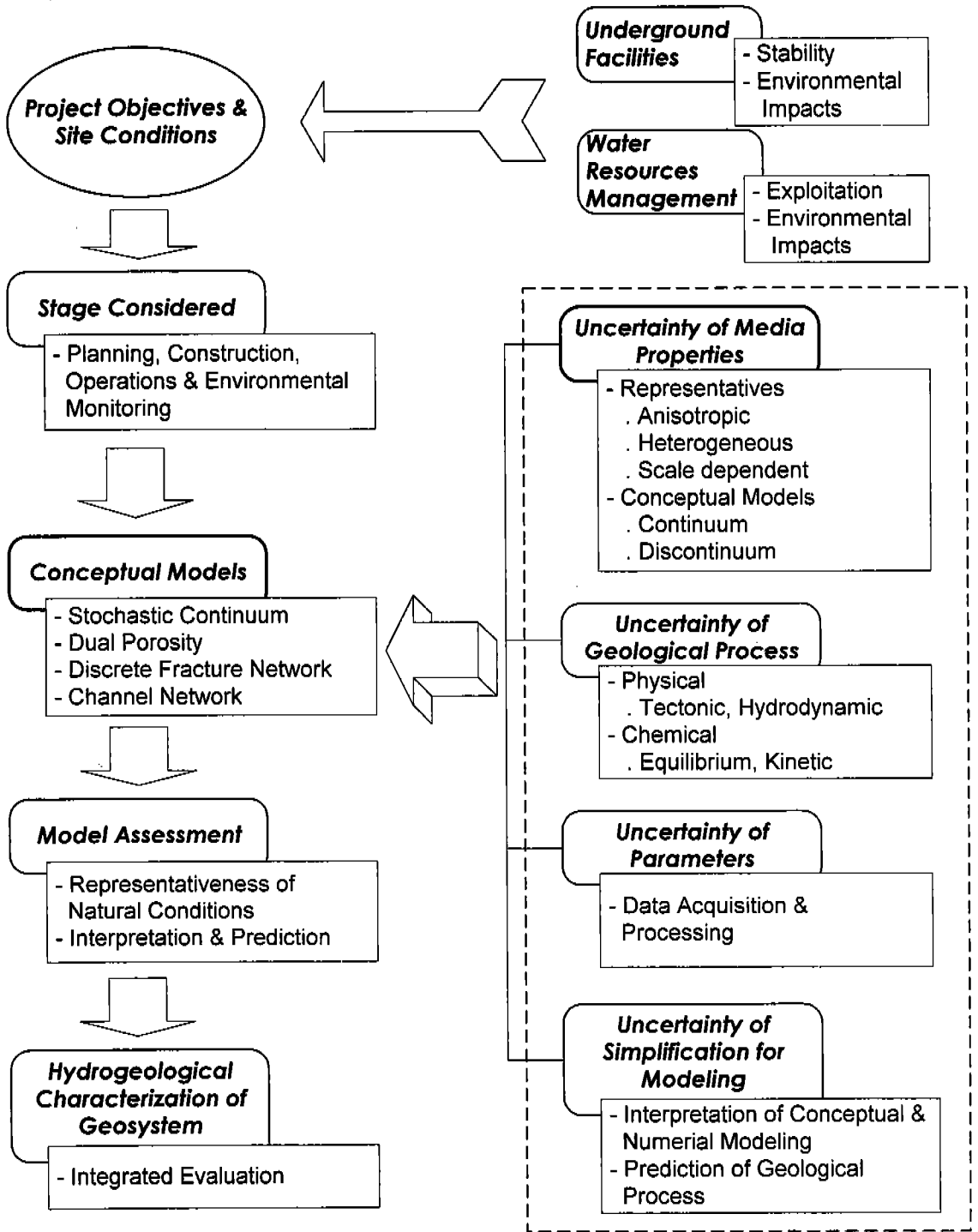


Fig. 1. Uncertainties to be solved for groundwater flow assessment in a fractured rockmass.

지하매질의 불균질성

암반내의 수리지질학적 특성은 독립된 부존체계의 위치(site-specific)마다 다르다. 예를 들면 하나의 단열내에서 발생하는 불균질성으로 인한 유로현상(channeling flow)은 단일 단열의 단열면 내에서 수 센티 내지 수 미터규모로 관측되기도 하며 주요 단열대에서는 수 백미터의 규모로 관측되기도 한다.

단열망내에서의 불균질성은 소수의 개구성 단열을 통해서만 지하수유동이 이루어지는 것으로서 확인된다. 예를 들면 영국 Sellafeld지역의 Borrowdale 화산암층군에서의 수리시험결과 개구성 단열중에서도 3%만이 뚜렷한 유동현상을 갖는 것으로 확인되었다(Armitage et al., 1996). 어떤 단열체계 내에서는 이러한 투수성 단열대와 특정 지질구조와의 대비가 가능한 경우가 있으나, 아직도 많은 경우 전혀 대비가 이루어지지 않고 있다.

수리인자의 규모종속성

수리지질학적 특성 중 수리인자의 규모종속성은 널리 인식되어져 온 문제이다. 현장에서 수행 가능한 수리시험은 제한된 위치에서 수십 내지 수백미터 이내의 심도로 제한된다. 그러나 전체적인 지하수체계의 평가단계에서는 심하게는 지표하 수 천미터까지의 예측이 요구되는 경우가 있다. 따라서 우리가 수행하는 현장시험에서 얻을 수 있는 자료보다 더 큰 규모의 암반에 대한 수리지질학적 특성을 도출해내야 할 필요가 있다. 이러한 과정을 “upscaling”이라 하며, 현재 이 분야에 대한 국제적인 연구 (INTRAVAL, GEOTRAP Programme)가

진행 중이다 (NEA/SKI, 1994). Upscaling계산을 행하기 위해서는 주요 지하수유동 통로가 되는 단열대에 대한 대규모 수리시험을 통해서 수리특성을 평가하여야 한다.

수리안정성 평가방안

단열체계특성 평가

단열체계의 분류 : 단열체계는 근본적으로 기하학적 규모와 수리적 특성으로 분류 가능하며, 특별히 사업의 목적 상 이들의 특성이 시설의 안전성에 미치는 영향 정도에 따라 분류기준이 달라질 수 있다. 단열은 수리적 역할이 클수록 그 빈도가 적어지고, 수리적 역할이 작은 소규모의 단열은 빈도가 높은 것이 일반적인 분포특성이다. 단열체계는 지질조건에 따라, 그리고 수치해석에 이용되는 모델의 개념에 따라 분류기준이 달라지지만 일반적으로 적용될 수 있는 정성적 분류기준은 Table 2와 같으며 Fig. 2에 도식적으로 제시하였다.

이 분류기준은 고도의 안전성을 요구하는 방사성폐기물처분시설과 유사한 규모를 갖는 지하유류비축시설부지에서도 적용 가능하다. 물론 이것은 정성적인 기준이기 때문에 범용으로 적용할 수는 있지만 특정 부지에 대한 단계별 조사가 진행된다면 고유의 지질학적 특성을 근거로 정량적으로 분류할 수 있다(Table 3).

Table 2. Generalized qualitative classification criteria for the fracture system.

구분	분포특성
Order 1	• Unit를 가로지르지 않고 시설이 입지하는 Rock Block의 경계역할을 하는 주요 광역 선구조선 (major regional lineaments)
Order 2	• Unit를 둘 이상으로 나눌 수는 있지만 그 빈도가 많지 않은 주요 단열대 (major fracture zones)
Order 3	• Cavern을 가로지를 수 있는 주요 단열체계 (major fractures) 및 국지단열대 (local fracture zones)
Order 4	• 통상 암반에 분포되어 있는 철리 등의 단열체계 (fracture system)

Table 3. Fracture classification criteria from the site-specific data.

Pusch Rock Structure(Pusch, 1994)		SKB Frame Work(SKB, 1996)	
Order	특 성	Order	특 성
1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광역단열대 ○ 간격 : 2~3km, 연장 : 40~60km 폭 : 200~300m ○ 투수계수 : $10^{-7} \sim 10^{-5}$m/s 	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주 광역구조선대(major regional lineaments) ○ 처분장 암반불력의 경계면 ○ 처분장지역을 관통할 수 없는 크기
2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국지 단열대 ○ 간격 : 300~500m 연장 : 4~6km 폭 : 10~100m ○ 1st order와 비슷한 특성이나 폭과 단열빈도가 적음 ○ 투수계수 : $10^{-8} \sim 10^{-6}$m/s 	2	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주 단열대(major fracture zone) ○ 처분장 암반불력을 구분 할 수 있으나 처분 동굴을 통과할 수 없는 크기
3	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소규모 국지 단열대 ○ 간격 : 30~300m 연장 : 100~1000m 폭 : 1~20m ○ 단열대 교차정도가 낮음 ○ 투수계수 : $10^{-9} \sim 10^{-7}$m/s 	3	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주 단열체계/소규모 단열대(zone) ○ 처분동굴을 관통할 수 있으나 처분 Hole을 통과할 수 없음
4	<ul style="list-style-type: none"> ○ 암반내 수리화적으로 우세한 분리단열체계 ○ 간격 : 2~10m(평균 5m) ○ Equidimensional fracture surface ○ 투수계수 : $10^{-11} \sim 10^{-9}$m/s ○ Interval : $1/25 \sim 100m^2$ 	4	<ul style="list-style-type: none"> ○ 나머지 단열체계
5	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1~3 order 단열대 사이의 암반 불력 중 눈으로 식별되는 단열체계 ○ 수리화적으로 기여정도 미미, 암반역학적인 약선으로 작용 ○ 간격 : 0.2~1m ○ Healed 또는 filled fractures 		
6	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현미경하에서 특성관찰이 가능한 단열체계 ○ 광물의 orientation 또는 zone enrichment ○ 암석구조의 특성 		
7	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광물입자내의 불연속면 (crystal contact, inter-intra crystalline) ○ 암반역학적인 Griffith cracks 		

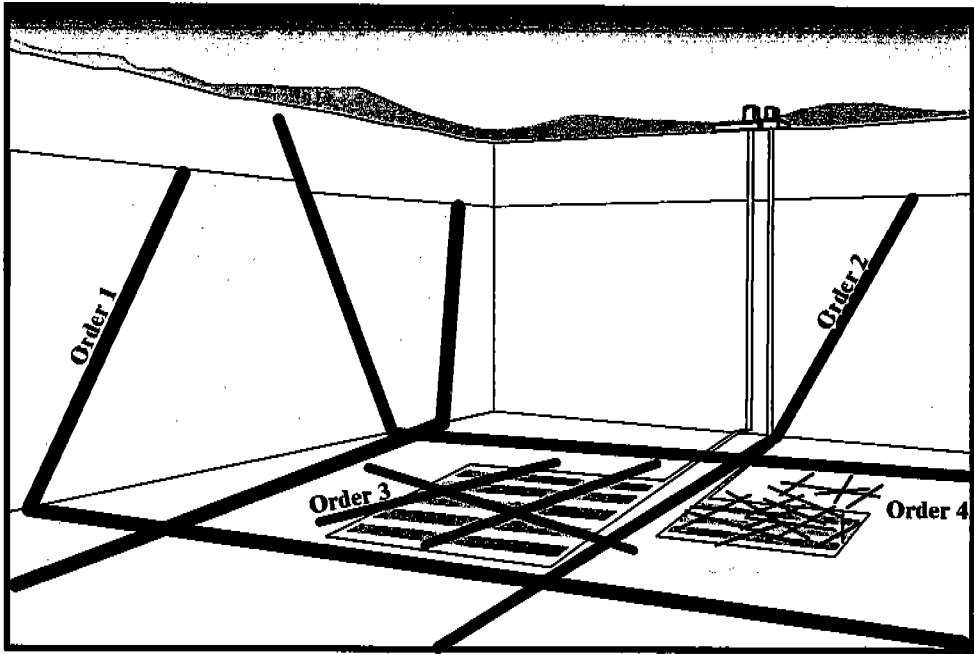


Fig. 2. Classification of the fracture system in a fractured rock mass around storage cavern.

단열대 특성조사 : 조사단계별 단열체계의 특성 조사방법은 Table 4와 같다. 광역조사단계에서는 Landsat image, 항공물리탐사(자력, 중력), DEM (Digital Elevation Model) 등의 해석과 현장 확인 조사를 통하여 Order 1, 2에 대한 분포자료를 얻을 수 있다. 시설이 입지하게 될 암반 block 선정단계에서는 현장지질조사 및 지구물리탐사를 통하여 Order 1, 2의 위치와 규모를 확인하고, 예비시추조사 등을 통하여 Order 3, 4에 대한 분포특성 자료를 얻을 수 있다. 설계를 위한 기본조사 단계에서는 선정된 암반 block 주변 및 내부에 분포하는 Order 1~4에 해당하는 단열대에 대한 기하학적 특성 및 수리학적 특성이 모두 평가되어야 하며 종합 분석이 이루어져야 한다.

단열대의 폭(width)이나 투수성을 정량적으로 분류하기 위하여는 해당 부지에서 고유의 값을 도출한 다음 적절한 범위로서 세부 분류기준이 설정되어야 한다. 조사 초기단계에서부터 확인되는 단열대에 대하여는 그의 수리적 특성이 평가되어야 하며, 각 단계에서 도출되는 Order별 단열(대)의 기하학적 분포특성과 수리적 특성을 기초로 개념모델을

설정하고, 수치해석을 수행하여야 한다. 개념모델과 수치해석은 조사가 진행되면서 부지조건에 부합하도록 사실적으로 수정 보완되어야 한다. 최종 목표는 시설이 설치되는 적정 암반 block의 지하수체계에 대한 특성평가와 운영조건에 따른 변화에 대하여 예측이 이루어져야 하며, 이 때 선정된 개념모델은 건설 및 운영과정에서 반드시 신뢰도가 확인되어야 한다.

이를 위해서는 초기 광역조사단계부터 기본조사 단계에 이르기 까지 지표조사 및 시추조사, BHTV 검층 등을 통하여 단열자료를 취하여 통계적으로 해석한 다음 3차원 단열망을 구성하여야 한다. 물론, 초기 단열망모델은 공동 굴착전의 지표자료만으로 구성될 수밖에 없으므로 후속되는 수벽터널 공사시 정밀 mapping이 이루어져야 하고, 여기에서 얻어지는 자료로서 기존의 단열망모델을 수정하여 다시 정밀하게 재평가되어야 한다.

단열망모델의 구성에 필수적으로 요구되는 파라미터로서는 방향성(orientation), 간격(spacing), 크기(size), 틈(aperture), 종식형태(termination type), 조도(roughness), 충전물(filling materials) 등이 있

Table 4. Identification of the fracture distribution through the site investigation stage.

부지조사단계	단열(대) 평가
1. 광역조사	<ul style="list-style-type: none"> • 대상지역내의 시설입지 가능성을 평가하기 위한 전체 Order 1 및 주요 선구조선의 확인 • Order 2 단열대에 대한 빈도 및 분포특성 조사·평가
2. Rock Block 선정	<ul style="list-style-type: none"> • Order 1 단열대의 위치 확인 • 선정된 Rock Block내에 분포하는 Order 2 단열대의 위치 확인 • Order 3 및 4 단열에 대한 빈도 및 분포특성 조사·평가
3. 기본조사	<ul style="list-style-type: none"> • Rock Block 주변 및 내부에 분포하는 Order 1 및 2 단열대의 위치 확인 • Order 3 및 4 단열에 대한 빈도 및 분포특성 확인
4. 굴착조사	<ul style="list-style-type: none"> • Cavern 굴착을 통한 단열체계분포특성 확인

으며, 지표 노두조사 및 시추조사, 그리고 BHTV점층 및 터널 mapping을 통하여 정밀 분석되어야 한다.

단열파라미터 중에서 단열크기는 3차원적인 분포에 의해 불확실성이 가장 큰 반면에 수리적 상호연결성에는 절대적인 역할을 하기 때문에 이에 대하여는 심도있는 분석이 요구된다. 이의 해결방안으로서 현재까지 단열크기 추정방법을 가장 설득력 있게 제시한 La et al.(1993)의 방법이 적용 가능하다. 이 방법은 자연상태의 단열분포특성을 실제와 근사하도록 모사(simulation)가 가능하고, 재현된 모사 내에서 시추공, 터널 등 임의 단열자료의 추출(sampling)이 허용된다면 단열과 추출면(sampling plane)과의 교차확률을 이용하여 실제 단열크기를 추정할 수 있다. 이들이 제시한 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

단열크기는 단열흔적길이 자료로부터 forward modeling (Dershowitz, 1992)을 이용하여 추정될 수 있다. 단열크기는 통상적으로 단열과 동일한 면적을 갖는 단열반경으로 가정한다. 첫 번째 단계는 단열크기에 대한 최적의 PDF(Probabilistic Density Function)유형과 이에 상응하는 평균과 표준편차의 추측이 요구된다. 이 값이 타당한 것인지를 검증하기 위하여 대상지역 내에서 단열흔적길이를 취할 수 있는 터널이나 노두와 동일한 기하학적 위치를 갖는 평면을 추계적 단열모형에 투입한다. 이러한 모사평면 상에서 단열이 교차되는 확률과 실제 측

정자료와의 비교는 통계학적인 방법 (Cheeney, 1983)을 이용하여 평가된다. 일반적으로 시추공의 방향성에 따라 단열빈도가 변하므로 교차확률 역시 추출면과 어떤 상관관계를 갖을 것으로 예상된다. 따라서, 실제 적용에 앞서 이 부분에 대한 모사적 검증은 거친다면 효과적인 방법이 될 수 있다.

수리인자 도출

투수량계수 : 단열(대)의 투수량계수를 측정하기 위한 방법으로는 일정구간별 정압주입시험(constant pressure fixed interval length test)방법(Doe & Geier, 1990; 한국원자력연구소, 1993; 김천수외, 1993)과 보조수단으로 Pulse시험법을 주로 사용한다.

정압은 수압과쇄를 방지하기 위하여 3kg/cm² 내외의 범위가 적당하며, 정압을 유지하기 위하여 물 저장조를 설치하거나 압력펌프를 사용할 수 있다. 이중패커의 고무길이는 약 100cm 이상이어야 패커 장착주변을 통하여 상하부 시추공내로 발생하는 cross flow를 감소시킬 수 있다. 시험에 사용되는 계측기기는 저투수성암반(<10⁻⁸m/s)의 수리인자에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 0.005kg/cm² 측정단위의 압력계(최대 5.0kg/cm²)와 정밀유량계(예 : Rotameter ; range 0.001~30 l/min)가 추천된다.

구간별 정압주입시험 결과는 정상류와 부정류해석 방법으로 수리인자를 구할 수 있다. 정상류 해

석법에 의한 수리전도도는 균질 등방성매질에 수직인 시험공에서 층류현상(laminar flow)이 일어날 경우를 가정하고 있으며 현재까지 사용되고 있는 공식들은 시험공 주변에서 지하수의 흐름형태를 시험공의 축에 대칭을 이루는 방사상 유동체로 가정하여 유도한 것이다. 그 중 Moye의 공식(Moye, 1967)은 시추공 주변에서는 방사상유동이 일어나며, 시추공으로 부터 거리가 $L/2$ 인 지점부터 구상유동으로 전환된다는 가정하에서 해석하는 것이다.

표준곡선을 이용한 부정류해석은 정압조건에서 부정류유동 표준곡선(Golder Associates, 1994; Doe and Geier, 1990)인 CH-QP프로그램이 이용된다. 표준곡선 중첩법은 $Q-t$ 의 곡선과 표준곡선의 Q_D-t_D 비교하여 곡선이 일치되는 지점에서 Q_D, Q, t_D, t 의 값을 도출하며, 수리상수는 무차원시간 및 무차원 유량을 정의함으로써 계산될 수 있다 (Fig. 3). 또한, 부정류해석 방법은 유동차원 분석에서 사용되는 공식을 사용할 수 있다.

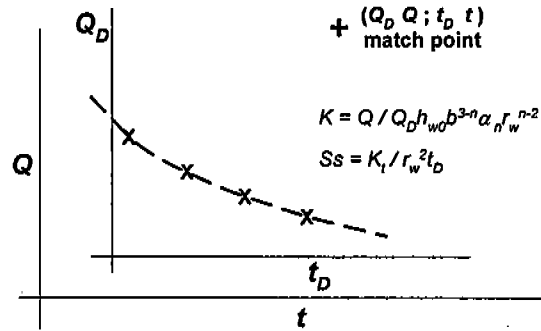


Fig. 3. General type curve analysis for transient flow phase (from Doe & Geier, 1990).

유동차원 : 구간별 정압시험결과와 하나로 투수량계수에 유동차원 (flow dimension)을 해석할 수 있는데 (Doe & Geier, 1990; 한국원자력연구소, 1993, 1994; 김천수의, 1993) 유동차원 해석결과는 유동영역의 형태와 경계효과에 대한 자료 및 시추공 주변에 발달된 단열체계의 특성자료를 유도해 낼 수 있다. 각 유동차원은 각각의 유동형태와 유동방정식을 갖게 된다. 차원을 정의하는 기하학적 특성은 주입지점으로부터 거리에 따라서 변하는 유

동면적을 나타내며, 수리전도도와 저류계수가 도출될 수 있다. 유동차원 해석은 표준곡선중첩법에 의하여 분할차원(fractional dimension)을 구하고, 곡선 비교시 일치되는 지점에서 무차원 Q_D, Q, t_D 및 t 의 값을 도출한다. 또 하나의 간이적이거나 실질적인 방법은 시험결과를 양대수곡선(선형유동; linear flow), 반대수곡선(방사상유동; radial flow)과 대수곡선(구상유동; spherical flow)의 각기 다른 좌표에 도시하여 각 좌표상에서 직선변화 특성을 관찰하므로써 1, 2 및 3 등의 정수차원(integer dimension)으로 구분하고, 수리인자를 도출하는 직선법이 있다(Fig. 4).

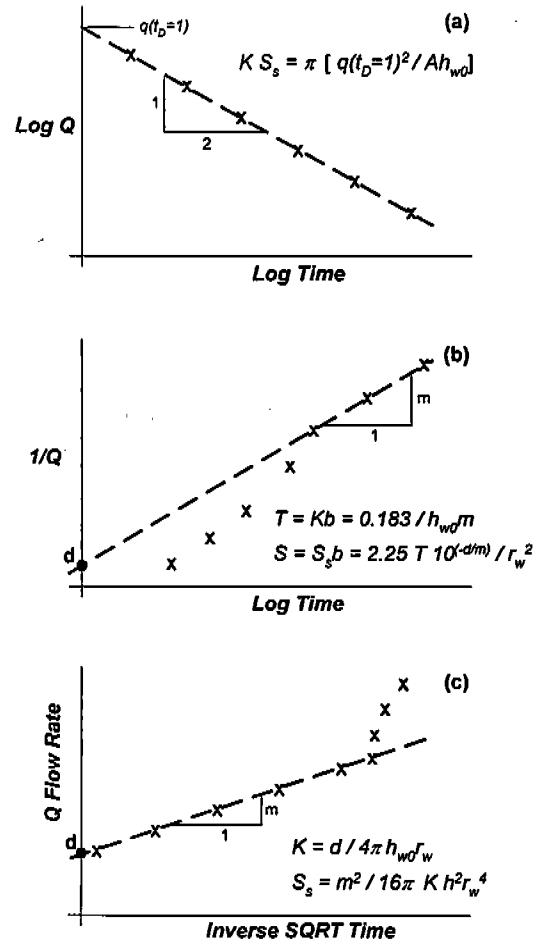


Fig. 4. Analysis of linear (a), cylindrical (b) and spherical flow (c) (from Doe & Geier, 1990).

단열조별 투수량계수 : 분리단열망모델에서 지하수유동해석은 각각의 단열조별 수리특성을 구분하여 적용하여야 한다. 단열틈이 투수량계수에 미치는 요인은 Cubic law에 근거하여 접근할 경우 (Louis, 1969), 단열틈에서 충전물질, 조도특성, 및 응력분포를 고려하지 않은 일정한 방향성 및 균일 두께를 갖는 평탄성단열을 전제로 하며, 단열면에서 유로유동 (channelling flow) 현상이 아닌 단열전면을 흐르는 유체로 가정한다. Cubic law의 적용에 있어서 Parsons(1966)은 유동율이 매우 낮고 단열틈의 규모에 비해서 표면의 조도가 매우 낮은 지하수 저류체 내에서 유효하다고 제한하였다. 한편, 각 구간별 단열투수량계수(T_f)와 동구간의 단열조별 투수량계수는 아래와 같이 정의될 수 있다 (Nelson, 1985).

$$T_f = T_{f1} + T_{f2} + \dots + T_{fn}$$

여기서,

$$T_f = K_f b = (K_{f1} + K_{f2} + \dots + K_{fn}) b$$

$$= (e_1^3 \cos \alpha_1 / 12D_1 + e_2^3 \cos \alpha_2 / 12D_2 + \dots + e_n^3 \cos \alpha_n / 12D_n) b$$

K_{fn} : 단열조 set n 의 수리전도도

α_n : 수두경사 축과 단열면 사이각

상기 식에 근거하여 시추공에서 단열틈의 체적과 투수량계수와와의 관계를 도시하면 대체로 양의 상관관계를 나타낸다 (배대석의, 1996).

지하수압 분포 : 지하공동 상부에서 부하되는 지하수압은 저장공동의 기밀성을 최종적으로 보장하고, 나아가 수치해석의 검증에 위한 기본적인 자료이기 때문에 사전에 가장 정밀하게 조사되고, 평가되어야 한다. 암반에서의 지하수압 분포특성은 매질의 특성에 전적으로 좌우된다. 즉, 강수에 의한 충전율을 지배하는 공극을 및 투수성 단열체계의 상호연결성 정도가 중요한 파라미터이다.

현장지하수압 분포는 현재 지상관측공에 piezometer를 설치하여 지하수위를 계속하는 방법과 단순히 공동내의 관측공에 manometer를 설치하여 계속하는 방법을 이용하고 있다. 향후 지하수압의 분포를 정확히 파악하기 위해서는 multi-packer

system이나 multi-completion, 또는 각기 심도를 달리하는 관측공을 설치하여 불투수성 매질과 투수성 단열대 분포구간에서의 시공간에 따른 지하수압 분포를 계속하여야 할 것이다.

지하수충전율 : 충전량은 하나의 수리적 경계조건 내에서 지하수의 배출이 이루어질 경우 균형적인 물수지 (water balance)를 결정하는 중요한 파라미터이다. 특히 수문순환계에서 meteoric water의 충전특성은 강수의 장기적인 특성에 지배되므로, 변화하는 자연환경에 대한 장기적이고도 반복적인 방법으로 접근하여야 한다. 현재까지 충전량에 대한 접근방법은 거의 기존자료, 단기간의 수위변화 혹은 토양함수특성 등으로 추정하거나, 증발산량 경험식으로부터 간접적으로 계산하는 방법에 의존하고 있다.

강수에 의한 충전은 비축시설에 있어서 1차적으로 지하수압을 유지시키는 근원이 되기 때문에 천연적인 방벽의 기능여부를 평가할 수 있다. 안전성 측면에서 인공적으로 수벽공을 설치하지만 강수의 충전이라는 기능 없이는 독립적으로 최종적인 누출시나리오를 만족시킬 수 없다. 특히, 국지적 및 부지특성에 좌우되는 충전특성은 공동의 layout 결정시 공학적 평가기준과 더불어 중요한 요소가 된다. 실례로 스웨덴의 Äspö project 연구결과, 충전특성은 암반 block내에서 균일하게 분포되지 않으며, 공동굴착 전후의 충전율의 차이는 10배 이상으로 나타났다. 이러한 불균질한 분포특성은 투수성단열대의 분포 및 수리특성에 지배되기 때문인 것으로 밝혀졌다(SKB, 1996).

충전량 추정을 위한 업무는 먼저 함수층, 비함수층 및 수리학적 경계조건 등 지하수체계를 분류하고 정의하는 것이다. 다음 단계에서는 정의된 지하수체계 내에서의 충전, 이동 및 배출현상을 결정하고, 각각의 수리지질단위 또는 이들 상호간의 지하수두 및 수리경사를 파악하여야 한다. 최종적으로는 수치해석을 통하여 진술한 과정을 종합적으로 평가하여야 하며, 이 과정에서는 신뢰도 증진을 위하여 장기적인 현장 계속자료와의 비교가 이루어져야 한다.

특정지역에서의 충전 및 배출특성을 파악하기 위해서는 적어도 일년 이상의 장기관측관리가 수반

되어야 한다. 충전특성은 국지적인 지형, 토양, 식생 및 지질특성과 함께 수리경계조건에 따라 결정되며, 이에 앞서 계절적인 강수량의 변동 등 기상변화 특성에 비중을 두어야 한다. 계절적인 강수현상은 기존자료의 부족으로 현장 측정에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 따라서, 충전특성의 규명은 최소한 4계절에 걸친 일년간의 자료를 근거로 직접 측정 및 도출하는 것이 바람직하다.

실제로 심부지하수와 천부지하수의 유동체계는 규모에서 상당한 차이가 나타나므로 암반지하수에 미치는 지하수충전량은 토양층에 침투된 강수의 배출(through flow)로 인하여 정확하게 정의하는 데는 한계가 있다. 충전량은 지하공간 건설 등으로 인한 지하수분환경의 변화와 함께 변하기 때문에 환경감시관리망 운영업무의 한 부문으로서 지속적으로 계측되어야 한다.

충전을 추정을 위하여는 환경동위원소를 이용한 방법과 지하수압의 변화를 이용하는 방법을 추천한다. 두 가지 방법 모두 1년 이상의 장기적인 계측을 필요로 한다.

해수침투

임해지역에서 광역적인 지하수의 흐름은 수리경사를 따라 해수영역으로 배출된다. 그러나, 해안 인접지역에서 지하수를 취수하거나 공동을 굴착하게 되면 해수영역으로 향하는 평형상태의 수리경사가 역전됨에 따라 지하수의 배출량이 감소되고, 동시에 해수가 내륙부의 대수층으로 침투하게 된다. 담수와 해수체간의 평형적인 경계면에 변화를 초래하는 이러한 인위적 행위가 있는 한 해수침투 문제는 당연한 개연성이 있으면서도 심도있게 다루어지지 않고 있다.

지하유류비축시설의 경우에 있어서는 해수침투시 지하수질의 저하 또는 지하공동내의 시설부식을 초래할 수 있다. 공동내부로 해수가 침투되면 공동으로의 유입수는 지하수, 수벽공 주입수와 해수가 혼합되어 염소이온 농도가 증가되므로 공동내에 설치되는 유류의 입출하 관련 시설이 부식될 가능성이 있다.

설계 당시에는 해수침투에 의한 영향을 충분히 고려하여 공동의 layout을 결정하고 시설의 안전성을 극대화시키기 위하여 보수적인 방법으로서 해안

선과 공동 간에 수직수벽공을 설치하고 있다. 이 수직수벽공의 역할은 원위치에서 해수영역보다 더 높은 수두를 유지시킴으로써 해수의 침투를 억제 또는 염소이온농도를 희석시키는 데에 있다.

국내의 경우, 지하공동의 건설과정에서 해수침투 현상이 인지되어 후속조치가 이루어졌었다(김천수의, 1997; 한국석유개발공사, 1996a, 1996b). 따라서, 해안에 인접하는 공동의 경우 해수침투에 의한 영향을 감소시키기 위해서는 기존의 Ghyben-Herzberg 이론(Hubbert, 1940)이나 Glover(1964)이론을 따르기보다는 이와 더불어 부지지질특성을 고려하여 해안으로부터 내륙방향으로 조사공을 설치한 다음 심도에 따른 염소이온농도의 분포를 분석하고, 더불어 투수성 단열대의 유무에 따라 공동 layout을 검토하여야 할 것이다.

수문화학

수문지화학적 접근방법은 기존의 지하수의 화학특성을 해석하여 현상을 진단하는 차원을 넘어 이제는 지하수체계의 개념모델 설정과 지하수유동모델의 일관성 및 신뢰도를 제고하는데 활용되어지고 있다. 이 분야는 지하수유동체계의 이해에 대한 기대성과에 비해 국내기술력과 기초자료의 축적이 미비하고 지하수체계 평가에서 소외되었던 분야이지만, 조사설계부터 운영단계에 걸쳐 지속적으로 감시관리할 경우 수리화학적 자료와 함께 지하수체계 변화의 미시적, 거시적 현상을 추적하는데 매우 효과적일 것으로 기대된다.

지하수의 화학적 특성 : 지하수내 용존된 주요 양이온과 음이온, 미량원소, 용존기체의 특성은 기본적으로 지하수의 유형과 지하수가 부존된 지질의 특성을 일차적으로 설명하여 주기 때문에 지하수의 화학적 진화과정과 지하수-지하수 혼합, 해수의 침투와 같은 현상에 대한 심도있는 이해를 증진시킬 수 있다. 광화대나 오염지역과 같은 특정 지질환경 조건에서 지하수는 pH의 변화, 특정원소(미량원소 포함)의 이상치를 보이며, 이들을 지시자(indicator)로 이용할 경우 지하수의 유동경로와 같은 지하수체계를 해석할 수 있는 도구가 되고 있다. 또한 지하수의 용존산소함량과 Eh(산화환원전위)는 지하수계의 지화학적 환경뿐만 아니라 지표환경의 영향

권에 대한 해석도 가능하게 한다.

환경동위원소 특성: 환경동위원소 중 수소 (^2H , ^3H), 산소 (^{16}O , ^{18}O), 질소 (^{14}N , ^{15}N), 탄소 (^{13}C , ^{14}C), 염소 (^{36}Cl , ^{37}Cl) 동위원소는 강수의 지하수 충전특성, 지하수의 유동, 지하수의 체재기간, 지하수와 지표수의 상관관계, 지하수의 기원 및 지하수와 해수와의 혼합 등의 규명에 유용한 정보를 제공하여 왔다. 이들 중 oxygen-18, deuterium, tritium은 물의 구성분자로서 지하수에 대한 물의 거동 그 자체를 반영한다. 환경동위원소 분포특성은 지하수의 충전지역에 대한 정보, 지표수-지하수 상관관계, 해수침투와 같은 문제해석에 결정적인 정보를 제공한다.

거제 및 여수지역에서의 환경동위원소 특성(한국석유개발공사, 1996a, 1996b)을 적용한 결과에서는 (1) 수벽공의 피압지하수와 수벽공 주입수의 산소 동위원소 분포로부터 공동내 유입수 중의 주입수 역할을 정량적으로 추정함으로써 시설주변의 전반적인 물수지를 추정하였고, (2) 염소이온과 동위원소 함량비로서 공동으로 침투되는 해수의 혼합비율을 추정하였다.

특히, 암반의 단열대를 따라 유동하는 지하수에 대한 연구에서는 수리학적 특성 해석을 위한 현장 시험에 많은 한계를 갖고 있으므로 환경동위원소의 연구결과는 매우 유용하게 활용되고 있다. 이 분야에 대한 적용은 수리지질학 분야의 정량화에 혁신적인 변화의 계기가 될 것이다.

물-암석 상호반응: 지하수의 화학적 조성은 이동경로에 따라서 또는 접촉하는 암석과의 상호반응에 의하여 시간에 따라 진화해 간다. 즉, 지하수의 수질특성 변화는 접촉하는 모암의 광물특성과 용해도, 온도, 산화환원조건, CO_2 분압 등에 따라서 지배된다. 물-암석 상호반응에 대한 해석은 지하수의 지하화학적 환경변화와 예측 뿐만아니라 지하수 유동 체계에 대한 정보를 얻는데도 매우 중요하다. 또한 특정 단열대를 통과하는 지하수의 성분으로부터 유동경로를 추정할 수 있는 간접적인 자료로서 충분한 활용가치가 있다.

국내에서도 물-암석 상호반응에 대한 연구가 수행되어 왔는데 주로 물의 화학적 조성으로부터 광

물의 용해 및 생성환경을 열역학적 평형관계로 설명하는 수준이었으나, 현재까지 개발된 컴퓨터 프로그램 (Wolery & Daveler, 1992; Plummer et al., 1991; Nordstrom & Ball, 1991)을 이용한 물-암석 상호반응에 대한 모델링 해석은 궁극적으로 지하수 유동체계와 접목하여 정량적인 해석이 암반지하수의 유동로 파악에 활용되고 있다.

수치해석 및 신뢰도증진

개념모델 설정: 지하수문체계에 대한 평가는 지질환경의 복잡성 때문에 Darcy이론의 조심스러운 적용이 요구되며, 평가시 발생하는 가정에 대한 검증방안을 필요로 하고 있다. 이의 현실적인 해결방안은 수리학적인 이론의 정확한 활용과 경험에 의한 통찰력을 바탕으로 이루어져야 할 것이다.

지하수저류체(groundwater reservoir)의 특성은 지하공동의 위치선정과 성능평가 뿐만 아니라 시설의 운영중 또는 폐쇄후 환경감시관리가 요구되는 경우, 대상지역의 고유특성에 의해 절대적으로 좌우되는 요소이다.

지하수유동체계 해석을 위하여 어떠한 방법을 적용하더라도 효율적인 수리학적 조사를 위하여 우선적으로 지하수 부존체계를 지배하는 주요 지질구조의 분포특성이 확인되어야 한다. 다음 단계는 이러한 부지특성에 맞는 수리학적 체계개념의 설정과 개념모델에 맞는 입력자료가 도출되어야 한다. 수리시험의 목적은 여러 가지 개념모델 중 실제의 자연현상을 적절하게 반영하고 있는 개념모델을 도출하기 위하여 수행되어야 하며, 수리시험자료의 실용화를 위하여 optimization방법으로 도출되어야 한다. 시험결과에 따라 어떤 개념은 제외될 수 있고, 반면에 어떤 개념은 더욱 확실해질 수 있다. 수리시험의 목적은 단순히 수리인자를 얻는 것 뿐만아니라 개념모델의 타당성을 검증하는데 있다는 것을 명심하여야 한다. 또한, 시험방법, 시험장비, 조사자의 능력 등에 대한 QA/QC 제도 도입은 불확실성을 최소화시킬 수 있는 중요한 수단이 될 수 있는 것이다.

모델선정 및 수치해석: 근래에 이르기까지 지하수유동해석을 위한 고전적인 방법은 균질등방성

(isotropic, homogeneous) 다공성연속체(porous continuum)를 전체로 한 유동개념(Hubbert, 1940; Tóth, 1963; 1968)에 의존해 왔다. 이 개념은 지하수자원 보전/관리 뿐만 아니라 오염방지를 위한 광역적 유동해석 등, 전 분야에 걸쳐 주로 적용해 온 개념이다. 연속체개념에서 적용되는 암반 지하수유동에 관한 개념은 다공성매질에 대한 수리전도도, 공극률, 지하수압등 수리상수들이 공간적으로 분포하는 연속함수에 근거를 둔다. 또한, 이때 사용하는 수리상수들은 산술적인 평균치를 사용하고 있다. 이러한 가정은 암반의 복잡한 수리지질학적 특성을 반영하는 데 한계가 있으며, 단순해석을 위한 가상적인 연속체일 뿐이다. 더우기 연속체개념은 지하매질의 수리특성에 있어서 체적크기에 따라 변하는 규모효과에 있어서 한계를 나타낸다.

한편, 방사성폐기물의 심부지층처분(deep geologic disposal)개념에 대한 비중이 커지면서, 현재까지 지질학에서 심도있게 다루지 않았던 분야의 정량화와 불확실성의 감소를 위한 많은 기술들이 개발되고 있다. 이 과정에서 다공성매질개념의 신뢰성에 대한 의문이 제기되면서 분리단열망(discrete fracture network)을 통한 유동개념이 심도있게 다루어졌다. 여기서, 유체유동은 한정된 투수성 단열을 통하여 이루어진다는 것이 일반적인 사실이며, 이는 스웨덴의 Stripa에서 실측으로도 확인되었다(Neretnieks et al., 1989). 그리고 유동량은 수리경사, 단열망의 연결성 및 단열수리특성 등에 의하여 지배된다고 전제한다. 또한, 석유 및 지하수자원개발을 위한 단열저류체(fractured reservoir)개념에 대한 관심이 커지면서 암반내에 분포된 단열특성에 대한 새로운 시각이 필요하게 되었다. 이러한 개념의 적용을 위해서는 단열(대)의 기하학적 특성과 공간적 분포 및 지하수의 수리·화학적 특성에 대한 자료가 필수적이다.

단열암반매질의 지하수와 관련된 개념적인 구분은 추계론적 연속체(Stochastic Continuum; Abelin et al., 1990), 분리단열망(Dershowitz et al., 1990), 유동로망(Moreno & Neretnieks, 1991) 및 이중공극유로(Dual-porosity Streamtube; Norman & Kjellbert, 1990)개념으로 분류할 수 있다.

분리단열망개념에 따라, 각 단열의 기하학적 분포에 근거를 둔 지하수유동해석 방법들이 시도되고

있다(Long et al., 1982; Dershowitz, 1984; Dershowitz & Einstein, 1988; Grinrod et al., 1992). 이와 같은 최근의 연구들은 해석학적 분석방법보다 복잡한 자연상태와 다양한 물성을 쉽게 다룰 수 있는 수치모델화 쪽으로 진행되고 있다. 수치모델의 사용을 위하여는 복잡한 수리지질학적 현상을 단순화한 개념모델의 확립이 필요하며, 신뢰성있는 수치모델링의 결과는 설정된 개념모델이 얼마만큼 자연상태에 가깝게 모사되었는가에 좌우된다. 일반적으로 지하수유동해석은 확정론적인 방법으로 유동현상을 설명하고 추계론적으로 파라미터를 정하며 수치적으로 유동체계를 모사한다.

세계적인 기술수준의 조기 점목을 위하여는 조사기술의 신뢰성 향상과 더불어 해석코드의 실제 적용이 요구된다. 등다공성매질(equivalent porous medium)로 간주될 수 있는 암반의 규모 결정과, 이 규모내에서 등다공성매질의 특성과 시추공내 시험결과와의 상호관계를 도출하기 위한 대안으로 DFN개념의 FracMan/MAFIC (Golder Associates, 1994) 또는 CONNECTFLOW(AEAT, 1996) 등의 프로그램을 통한 검증이 수행될 수 있다. 이들 코드는 암반 block 규모에서 유용한 도구로 이용될 수 있다. 특히, 상기 코드는 Stripa project에서 적용성 연구에 대한 OECD/NEA(1993)의 평가결과 타 모델에 비해 상당한 신뢰성을 인정 받은 바 있다.

선정된 모델을 이용하여 수치해석을 필요로 하는 기술적 사항은 다음과 같다.

- (1) 공동 단면상에서의 수리 안정성
- (2) 저장공동 침도
- (3) 시공중 및 운영중 공동주변 potential 분포
- (4) 저장 공동간 수리간섭
- (5) 굴착 단계별 공동내 인근 기지와의 수리간섭
- (6) 지하수 유입량
- (7) 굴착단계별 지하수위강하량
- (8) 수벽공 설치 필요성, 설치 심도, 주입수압
- (9) 지형경사, 공동 및 수벽공 layout, 주입수압의 변화에 따른 주입수 누출현상
- (10) 운영압에 따른 기준수위 설정

Confidence Building : 개념모델의 수정보완과 검증단계, 뿐만 아니라 수치해석에 의한 예측결과에

대한 신뢰성 확보는 경계조건내의 물리적인 지하수 유동특성과 이를 수치적으로 모사한 모델만으로 평가하기는 불가능하다. 즉, 부지고유의 지하수체계와 부합되는 수치모델의 검증은 수문화학적인 진화과정을 고려한 지하수의 화학적 특성 자료에 의하여 이루어질 수 있다. 지하수의 진화과정과 유동특성을 지시하는 수문화학적 요소기술로는 전술한 바와 같이 (1) 지하수의 화학적 분포특성에 의한 유동로 추정, (2) 환경동위원소를 이용한 충전지역 평가 및 지하수체류시간 결정, (3) 물-암석 상호반응 해석을 통한 진화과정 해석 등이 있다.

상기 해석과정의 적정성과 신뢰도를 높이기 위하여 무엇보다도 복잡한 지질환경 하에서 형성되고 있는 지하수의 물리적 유동과정과 화학적 거동에 대한 이해가 필수적이며, 지하수체계에 대한 해석 능력의 증진만이 평가결과에 대한 신념을 줄 수 있다.

수리학적 성능평가

지하유류비축시설의 운영 안전성은 공동에 저장되는 유류의 종류에 관계없이 경제성과 안전성 측면에서 기밀성이 완전하게 확보되어야 한다. 저장 유류의 최대 운영압이 정해져 있을 때, 개스의 누출은 공동 주변의 지하수압 분포특성에 의해 좌우되며, 이와 관련된 key issues는 다음과 같다.

- (1) 개스누출을 방지할 수 있는 안전운영기준지하수위
- (2) 지하수면 하 공동의 최소심도
- (3) 운영중 수벽공 최소 주입압

위의 문제점 중에서 가장 중요하게 다루어져야 할 사항으로는 공동주변의 기준 지하수위이다. 이 문제에 관하여는 과거 20년 동안 지하수 수리경사 또는 지하수압분포에 근거를 두었는데, 수직방향의 수리경사가 1보다 커야 한다는 이론 ($I_v > 1$; Åberg, 1977)이 가장 널리 이용되어 왔다. 이후 Goodall et al.(1988)은 공동으로부터의 모든 개스누출 경로들을 따라 지하수압이 어느 정도 증가되는 한 개스가 누출되지 않는다는 단순한 기준을 제시하였고, 최근에 Liang & Lindblom (1994)은 지하수두와 저장

공동에서 개스누출이 일어나지 않는 허용 최대 개스압(임계개스압)과의 관계는 거의 선형의 비례관계가 있는 것으로 제시하였으며, 다음과 같이 수벽공 시설의 유무에 따른 임계개스압을 계산하였다.

$$P_g = a + bH$$

여기서, P_g : 수벽공시설이 없을 경우의 공동 임계개스압

H : 자연지하수두

a, b : 공동의 수, 형태, 크기, pillar간격 등과 관련된 상수

$$P_g = p_o + c \cdot p_{wc}$$

여기서, P_g : 수벽공시설이 있을 경우의 공동 임계개스압

p_{wc} : 수벽공 주입압

p_o, c : 공동 및 수벽공 배치, 공동심도 등과 관련된 상수

Söder(1994)는 실제 비축시설에서 자연지하수위와 공동주변의 지하수압을 알고 있는 상태에서 공기의 주입압을 단계적으로 상승시키면서 누출량을 측정하였다. 그의 연구결과 수벽공 시설이 없는 경우 주변 지하수압보다 낮은 개스압 조건에서도 공기가 누출되는 것으로 밝혀 졌는데, 이는 공동주변의 단열 및 운영터널 등에 의하여 부분적으로 지하수압 강하가 발생할 수 있는 것으로 해석하였다. 한편, 수벽공시설이 설치된 경우에는 공동상부와 수벽공간의 수두 차이가 5m이상되면 거의 누출이 발생되지 않는 것으로 밝혀졌다.

이와 같은 연구결과를 종합해 보면 기준수위에 대한 문제는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 공동상부의 potential은 최대 공동임계개스압보다 커야 한다.
- (2) 공동상부의 자연지하수압 또는 수벽공 주입압은 부지고유의 투수성단열 분포특성에 좌우되므로 수벽공과 공동간의 암반 block내에 분포하는 투수성 단열에 대하여는 수밀성이 보장되도록 수벽공간의 수리간섭이 이루어져야 한다.

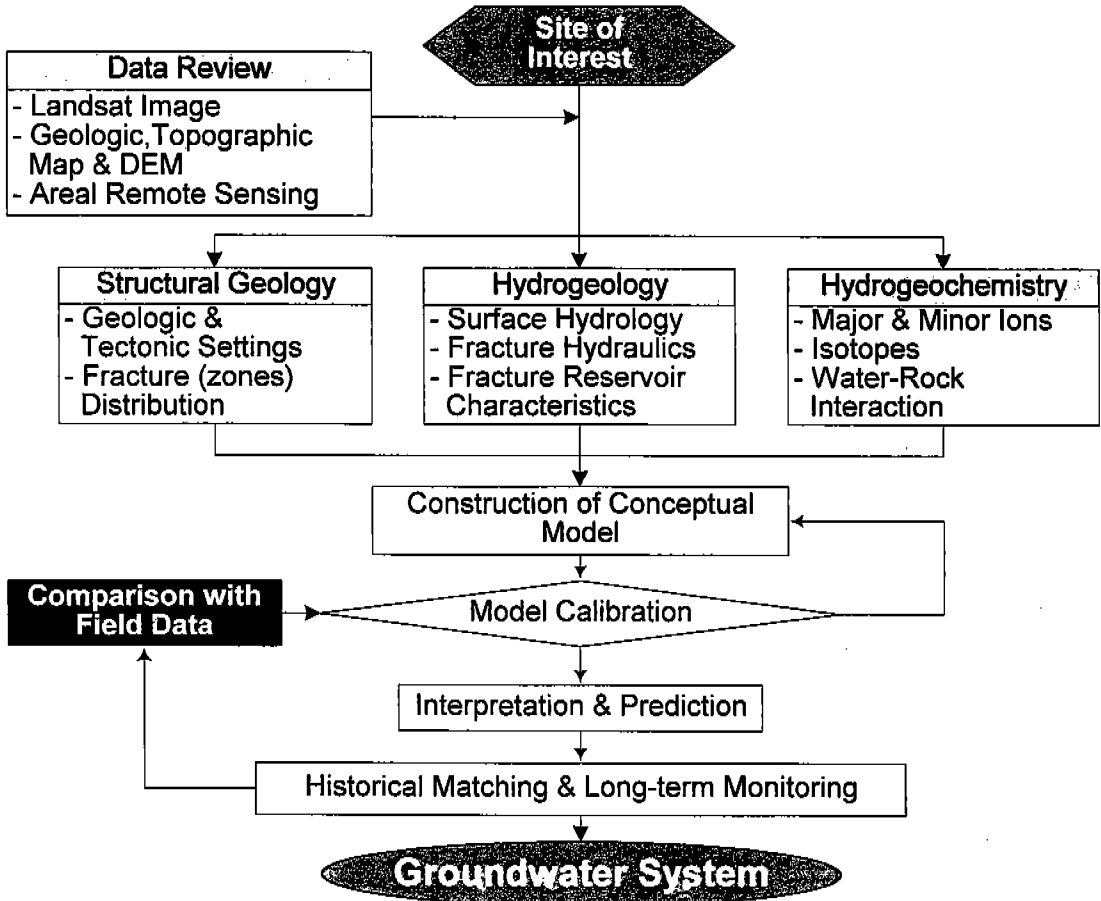


Fig. 5. Integrated approaches for the hydrogeological and hydrogeochemical assessment.

결론

지하유류비축시설 부지의 지하수체계 평가를 위해서는 지질구조적, 수리학적, 수문화학적 자료가 종합적으로 검토되어야만 하며, 그 중에서도 hydrodynamic한 지하수흐름은 일차적으로 지형과 투수성 단열대에 지배된다는 사실을 강조하고자 한다. 거제지역과 여수지역의 지하수체계를 종합적으로 평가한 결과 (한국석유개발공사, 1996a, 1996b)에서도 자연지하수위와 수벽공의 압력은 영역별로 불균질한 분포를 보였는데, 이는 공동 주변의 암반에 분포하는 투수성단열(대)의 불규칙한 분포특성에 기인한 것으로서 이를 뒷받침한다. 따라서, 단열

(대)에 대한 부지고유의 기하학적 분포특성 및 수리특성의 정량화에 대한 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다 하겠다.

결론적으로 대상지역의 지하수체계를 자연현상과 유사한 수준으로 평가하고, 이를 바탕으로 장기적으로 신뢰성있는 성능평가를 위해서는 지질구조, 수리지질 및 수문화학적 특성을 종합적으로 평가하는 체계 (Fig. 5)를 도입하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 한국지하수환경학회지,

- 제4권 제2호, 61-72.
- 김천수, 이은용, 배대석, 김경수, 1993, 정압주입시험을 이용한 지하수유동차원 해석, 대한지질공학회지, 제2권 제2호, 149-165.
- 배대석, 송무영, 김천수, 김경수, 김중렬, 1996, 분리단열망개념의 지하수유동해석을 위한 단열투수량계수의 정량화 연구, 대한지질공학회지, 제6권 제1호, 1-13.
- 한국석유개발공사, 1996a, U-2E 지하원유비축시설 수리안정성 종합 검토, 벽산엔지니어링(주), 한국원자력연구소.
- 한국석유개발공사, 1996b, U-1-1 지하원유비축시설 수리안정성 종합 검토, 선경건설(주), 엘지건설(주), 한국원자력연구소.
- 한국원자력연구소, 1993, 부지특성 및 구조물의 안전성 평가연구 제5권 수리지질 특성조사 기술개발, KAERI-NEMAC/RR-86/93.
- 한국원자력연구소, 1994, 자연방벽안전성 연구, 수문환경평가 기술개발, KAERI-NEMAC/RR-85/94, 66p.
- Abelin, H., Birgersson, L., Widen, H., Agren, T., Moreno, L., and Neretneik, I., 1990, Channeling experiment, Stripa Project TR 90-13, SKB, Stockholm.
- AEA Technology, 1996, CONNECTFLOW User Guide, AEAT-0527, Release 1.0.
- Armitage, P., Holton, D., Jefferies, N.L., Myatt, B.J. and Wilcock, P.M., 1996, Groundwater flow through fractured rock at Sellafield, European Commission Report EUR 16870 EN.
- Åberg, B., 1977, Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, The 1st Int'l Symp. on storage in excavated rock caverns, ROCKSTORE 77, Stockholm, Sweden.
- Cheaney, R. F., 1983, Statistical methods in geology for field and lab decisions, George Allen & Unwin, 169p.
- Dershowitz, W. S., 1984, Rock joint systems, Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, Mass, 764p.
- Dershowitz, W. S. and H. H. Einstein, 1988, Characterizing rock joint geometry with joint system models, Rock Mechanics and Engineering, 21-51.
- Dershowitz, W. S., J. E. Geier and G. Lee, 1990, FracMan Interactive Discrete Fracture Simulator : User Documentation. Version Beta 2.3, Golder Associates Inc., Redmond W/A.
- Dershowitz, W., 1992, Interpretation and synthesis of discrete fracture orientation, size, shape, spatial structure and hydrological data by forward modeling, In Proceedings, Fractured and Jointed Rock Masses. Tahoe, NV.
- Doe, T. W. and Geier, J. E., 1990, Interpretation of fracture system geometry using well test data, Stripa Project 91-03, SKB.
- Glover, R. E., 1964, The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1613-C, 32-35.
- Golder Associates Inc., 1994, FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation (Version 2.306).
- Goodall, D. C., Åberg, B. and Brekke, T. L., 1988, Fundamental of gas containment in unlined rock caverns, Rock Mech. Rock Eng., Vol.21, 235-258.
- Grindrod, P., Herbert, A. W. Roberts, D. L., and Robinson, P. C., 1992, NAPSAC Technical Document, AEA D & R report 0270.
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion, J. Geol., 785-944.
- La, P., Paul, R., Peter, C., Wallmann and William S. Dershowitz, 1993, Stochastic estimation of fracture size from simulated sampling, Proceedings of the 34th U.S. Symposium on Rock Mechanics.
- Liang, J. and Lindblom, U., 1994, Critical pressure for gas storage in unlined rock caverns, Int'l Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 31, No.4, 377-381.
- Long, J. C. S., Remer J. S., Wison, C. R., and Witherspoon, P. A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resour. Res., Vol. 18,

- 645-658.
- Louis, C., 1969, A study of the groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Rock Mech. Res. Report No.10, Imperial College, London.
- Moreno, L. and Neretnieks, I., 1991, Fluid and solute transport in a network of channels, SKB TR 91-44, SKB, Stockholm.
- Moye, D. G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, Civil Engineering Transactions, Institution of Engineers, Australia, Vol. CE9, No.1, 95-100.
- NEA/SKI, 1994, The International INTRAVAL Project, Phase 1 Summary Report, OECD.
- Nelson, R. A., 1985, Geologic analysis of naturally fractured reservoir, Gulf Pub. Co., Book Division, 320p.
- Neretnieks, I, Avelin, H, and Birgersson, L., 1989, Some Recent observations of channeling in fracture rocks, Pro. Conf. Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty Methods for Groundwater flow, 87 DOE/AECL, Battle Press, 387-410.
- Nordstrom, D. K. and Ball, J. W., 1991, User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, trace and redox elements in natural waters, U. S., Geol. Surv., Open File Rep., 91-183, 189p.
- Norman, S. and N. Kjellbert, 1990, FAR 31-A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package, SKB TR 90-01.
- OECD, 1993, OECD/NEA International Stripa Project, Overview Vol.2, Natural Barriers, Paul Gnirk.
- Parsons, R. W., 1966, Permeability of idealized fractured rock, Soc. Petrol. Eng. Jr., 126-136.
- Plummer, L. N., Prestemon, E. C. and Parkhurst, D. L., 1991, An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH: U.S. Geol. Surv. Water-Resources Investig. Rep. 91-4078, 227p.
- Pusch, R., 1994, Waste Disposal in Rock, Elsevier, 400p.
- SKB, 1996, Äspö hard rock laboratory (10 years of research), 88p.
- Söder, C-O, 1994, Water curtains in gas storage (An experimental study), Ph D thesis, Chalmers Univ. of Tech., Sweden, 201p.
- Töth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins in central Alberta., J. Geophys. Res., 68, 4795-4812.
- Töth, J., 1968, A hydrogeological study of the Three Hills area, Alberta. Research council of Alberta., Geol. Div., Bull., 24.
- Wolery, T. J. and Daveler, S. A., 1992, A computer program for reaction path modeling of aqueous geochemical systems : Theoretical manual, user's guide, and related documentation (Ver. 7), Lawrence Livermore National Laboratory, 338p.

김천수, 배대석, 김경수, 고용권
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
 대전광역시 유성구 덕진동 150 (우 : 305-353)
 TEL : (042) 868-2030, -2063, -8159
 FAX : (042) 868-2063
 Homepage : <http://www.kaeri.re.kr/~geoenv>
 e-mail : ncskim1@nanum.kaeri.re.kr
 ndsbae@nanum.kaeri.re.kr
 kskim@nanum.kaeri.re.kr
 nykkoh@nanum.kaeri.re.kr

송승호
 한국석유개발공사
 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14
 (우 : 440-060)
 TEL : (0343) 80-2883