

분리열극개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동해석 Fracture Network Analysis of Groundwater Flow in the Vicinity of a Large Cavern

강병무(Kang, Byung Moo)
김천수(Kim, Chun Soo)
배대석(Bae, Dae Seok)
김경수(Kim, Kyung Su)

한국원자력연구소

기정석(Ki, Jeong Seok)

(주)선경건설연구소

요약/Abstract

암반지하수유동 해석의 복잡성은 열극과 공극간의 유동관계, 응력의 영향, 열극체계의 복잡한 지하학적 분포상태에 기인한다. 열극체계의 불규칙한 발달로 인한 규모종속과 이방성 특성은 지금까지의 해석방법으로는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없다.

분리열극망(Discrete Fracture Network) 모델은 암반 지하수가 근본적으로 분리된 열극을 통하여 유동한다는 가정하에서 출발한다. 유동경로(flow path)는 열극의 지하학적 분포 및 상호간의 연결형태에 의하여 결정되며, 열극분포 및 수리특성은 현장조사자료의 통계학적 처리에 의한 접근방법을 시도하고 있다.

본 모델을 적용한 연구지역은 평택군 포승면 원정리 일대 1km²지역으로서, 열극자료 분석은 등면적투영도로부터 6개의 set를 도출하였으며, 열극의 크기는 lognormal분포를 나타냈다. 6개 열극 set가 차지하는 총투수성열극확률밀도(conductive fracture intensity)는 1.52로 나타났으며, set 1의 투수성열극밀도가 0.37로 가장 높게 나타났다.

지하공동으로의 유입량(inflow) 계산은 열극투수량계수(fracture transmissivity)를 10⁻⁸m²/s로 하였을 경우 29ton/일로 산출되며, 10⁻⁷m²/S로 하였을 때 약 22배가 큰 651ton/일로 계산되었다.

본 모델은 지하공동건설시 부지특성조사나 평가시에 해석도구(working tool)로 사용될 수

있으며, 정량적인 자료뿐만 아니라 정상적인 자료도 해석 및 평가과정에 응용될 수 있는 반복적인 실행을 통한 Forward 모델링방법을 사용하는 장점이 있다.

Groundwater flow in fractured rock masses is controlled by combined effects of fracture networks, state of geostatic stresses and crossflow between fractures and rock matrix. Furthermore the scale dependent, anisotropic properties of hydraulic parameters results mainly from irregular patterns of fracture system, which can not be evaluated properly with the methods available at present.

The basic assumption of discrete fracture network model is that groundwater flows only along discrete fractures and the flow paths in rock mass are determined by geometric patterns of interconnected fractures. The characteristics of fracture distribution in space and fracture hydraulic parameters are represented as the probability density functions by stochastic simulation.

The discrete fracture network modelling was attempted to characterize the groundwater flow in the vicinity of existing large caverns located in Wonjeong-ri, Poseung-myon, Pyeungtaek-kun. The fracture data of 1km² area were analysed. The result indicates that the fracture sets evaluated from an equal area projection can be grouped into 6 sets and the fracture sizes are distributed in longnormal. The conductive fracture density of set 1 shows the highest density of 0.37.

The groundwater inflow into a cavern was calculated as 29ton/day with the fracture transmissivity of 10⁻⁸ m²/s. When the fracture transmissivity increases in an order, the inflow amount estimated increases dramatically as much as fold, i.e 651 ton/day.

One of the great advantages of this model is a forward modelling which can provide a thinking tool for site characterization and allow to handle the quantitative data as well as qualitative data.

서 언

지하공동내의 원유, LPG 등의 유류를 저장하는 원리는 암반내에 자연 혹은 인위적인 지하수압을 이용하여 저장류가 지하공동으로부터 누출되는 것을 방지하는 것이다. 기술적인 측면에서는 가능한 한 자연상태의 저류환경(oil trap)과 유사한 상태로 저유공동 주변암반의 조건과 지하수의 기능을 유지하는 것이 지하유류비축시설사업에 있어서 가장 중요한 과제이다.

한편, 지하암반을 이용하는 방사성폐기물의

처분개념은 방사능준위가 붕괴되어 그 유해성이 감소될 때까지 자연환경으로부터 폐기물을 격리시키는 것이다. 따라서 방사성폐기물처분사업에 있어서 처분장 주변암반의 열극을 통한 지하수유동체계 파악이 중요한 과제로 대두되고 있다.

지하유류비축시설과 방사성폐기물처분시설에 있어서 기본적인 개념상의 차이점은, 전자는 지하수를 이용하여 저장물질에 대한 confinement를 제공하는 것이고, 후자는 처분장 주변암반의 지하수유동 현상을 규명함으로써 방사성물질의 격리 및 지연효과를 최

대함으로써 보장할 수 있는 장소를 확보하는데에 있다. 지하공간이용 사업의 공통점으로는 시설의 운영에 영향을 미치는 암반의 지하수유동체계를 해석하고, 나아가 광역적인 영향범위까지 고려해야 한다는 것이다.

따라서, 궁극적으로 암반내에 발달된 열극체계를 통한 지하수유동특성을 정확히 파악하는 것이 두 시설의 효과적인 설계, 건설 및 운영을 위한 가장 근본이 되는 기술적 요구사항이다.

최근 지하수유동관련 연구는 해석학적 분석방법보다는 복잡한 자연상태와 다양한 물성을 쉽게 다룰 수 있는 수치모형화 쪽으로 진행되고 있다. 수치모델의 사용을 위하여는

복잡한 수리지질학적 현상을 단순화한 개념모델의 확립이 필요하며, 그 결과의 신뢰성은 설정된 개념모델이 얼마만큼 자연상태에 가깝게 만들어지는가에 달려 있다. 일반적으로 현재의 지하수유동 해석은 확정론적(deterministic) 방법으로 유동과정을 설정하고, 추계론적(stochastic)방법으로 파라미터를 정하며, 수치적으로 유동체계를 모사한다. 그러나 무엇보다도 이론적인 유동해석은 지질학적으로 그 배경설명이 충분히 뒷받침되어야 하므로, 타당성있는 설명을 위하여는 정확한 개념모델의 설정이 필요하다. 암반지하수유동평가의 현안문제는 3차원적인 지질구조에 따른 복잡한 유동현상을 대표할 수 있는 보편

Table 1. 암반지하수의 개념비교

특 성	다 공 성 매 질	분리열극체계
균 질 성	- 다공성 매질로 간주 - 평균 수리지질특성 인자 방향성 수리전도도 tensor	- 수개의 큰 Throughgoing 열극면을 따라 유동 - 열극대의 수리지질특성 인자
유동로와 유동방향	- 다공성 매질로 간주 - 유동체계는 암반의 분포형태, 경계조건 및 수리전도도로 결정된다.	- 유동은 분리열극망을 통하여 이루어진다. 유동방향은 상기 열극체계의 기하학적 분포에 의한다.
계 측 방 법	- 전구간 양수시험으로 수리지질 특성을 구한다. - 조사공의 위치는 시험결과에 영향이 없다.	- 시험결과는 조사공의 위치에 좌우되며, 열극대에서 조사된 결과만이 유효하다.
지하수 유동속도	- 평균 유동속도	- 열극공극율의 불확실성 때문에 유동속도는 과대평가 되기 쉽다.
수리전도도의 변화	- 암반응력과 온도변화에 따르는 수리전도도 값의 변화는 크지 않다.	- 기존 열극의 변형은 수리전도도 값의 변화를 가져온다.
기 타	- 암반의 대표체적(REV)을 평균하므로 수리인자를 연속장변수로 대표한다. - 암반의 대표체적이 정의되어야 하며, 정의된 대표체적은 대상암반 보다 적어야 한다. - Darcy 법칙 사용	- 열극체계는 대상암반보다 크다. 따라서 대표체적의 정의가 어렵다. Darcy 법칙이 항상 유효하지 않다.

적인 수치모델이 없다는 것이다.

개념적인 측면에서는 열극암반에 연속체개념을 적용하여도 큰 문제는 없다. 열극암반에 대한 두 가지의 극단적인 견해는 다공성매질에 열극이 없는 것으로 가정되는 경우와, 연결된 열극들에 의하여 지하수유동이 이루어진다고 가정하는 경우이다(Table 1). 중간적인 접근방법은 지하수는 매질에 저유되어 있고 암반의 투수성은 연결된 열극의 분포 특성에 지배를 받는다는 가정이다. 이러한 열극암반에서의 지하수유동과 관련된 모델의 구분은 Discrete Fracture Network(DFN)모델(Dershowitz et al., 1990)을 이용한 2차원유동(Karasaki et al., 1985) 및 3차원유동(Doe & Geier, 1990), Stochastic-Continuum(SC) 모델(Dverstrop & Andersson, 1990), Channel-Network(CN) 모델(Moreno & Neternieks, 1991; Long et al., 1990) 및 Dual-Porosity Stream Tube(DPST) 모델(Norman & Kiellbart, 1990) 등이 있다.

본 연구는 열극체계를 고려한 지하수유동 모델에 관한 기술개발 현황을 검토하고, 이중 가장 발전적인 개념의 모델을 실제 현장에 적용해 봄으로써 열극암반에서의 지하수유동 해석을 위한 최신기술을 도입하는 데에 목적이 있다.

이를 위하여 기술현황 분석, 모델링을 위한 기존 조사자료의 분석, 열극체계의 기하학적 모델링과 지하수유동모델링을 수행하였으며, 입력자료는 현재 운영중인 지하유류비축시설 부지의 기존조사자료를 기초로 하여 프로그램의 실행시에 요구되는 파라미터를 도출(또는 수정 보완)하였다. 한편, 연구를 통하여 도출된 제반 문제점을 검토하여 향후의 개선방안을 제시하였다.

분리열극개념

지하공동으로의 지하수유입과 공동으로부터의 개스의 이동을 정확히 예측하기 위하여는 암반을 통과하는 유동경로에 대한 불연속특성을 보다 정확하게 대변할 수 있는 모델을 확보하는데 있다. 본 연구에서는 미국의 Golder Associates Inc.에서 DFN 개념을 도입하여 개발한 FracMan 소프트웨어를 선정하였다(Dershowitz et al., 1992). 선정이유는 분리열극매질의 특성을 잘 표현하며 무엇보다도 방사성폐기물처분사업에서의 적용연구(PNC, SKB, NAGRA, OECD/NEA Stripa Project, DOC 등)가 활발한 점이 고려되었다.

DFN모델은 유동경로의 분포현상을 뚜렷하게 나타내는 방법을 제시한다. DFN모델에서 유동 및 이동과정은 근본적으로 분리열극망을 통하여 진행된다는 가정하에서 출발한다. 열극들 상호간의 연결형태는 열극의 위치 및 발달방향으로 결정하게 되는데, 열극의 통계학적 자료는 시추공, 공동굴착면 및 지표노두 등으로부터 직접적인 조사에 의해 구해진다. 따라서, DFN모델에서 유동로는 수리간섭시험(hydraulic interference test) 결과에 의존하기 보다는 측정된 열극분포특성에 따라서 결정된다. 일반적으로 간섭시험은 오로지 제한된 영역 내에서만 유효하여 자료의 이용이 극히 제한되기 때문에 DFN모델에 의한 접근방법이 유리하다(Geier & Axelsson, 1991).

모델의 개요

FracMan은 다섯개의 주요 모듈(FracSys, FracWorks, MeshMaker, FracView 및 FracSimile)로서 이루어진 상호작용기능을 가진 분

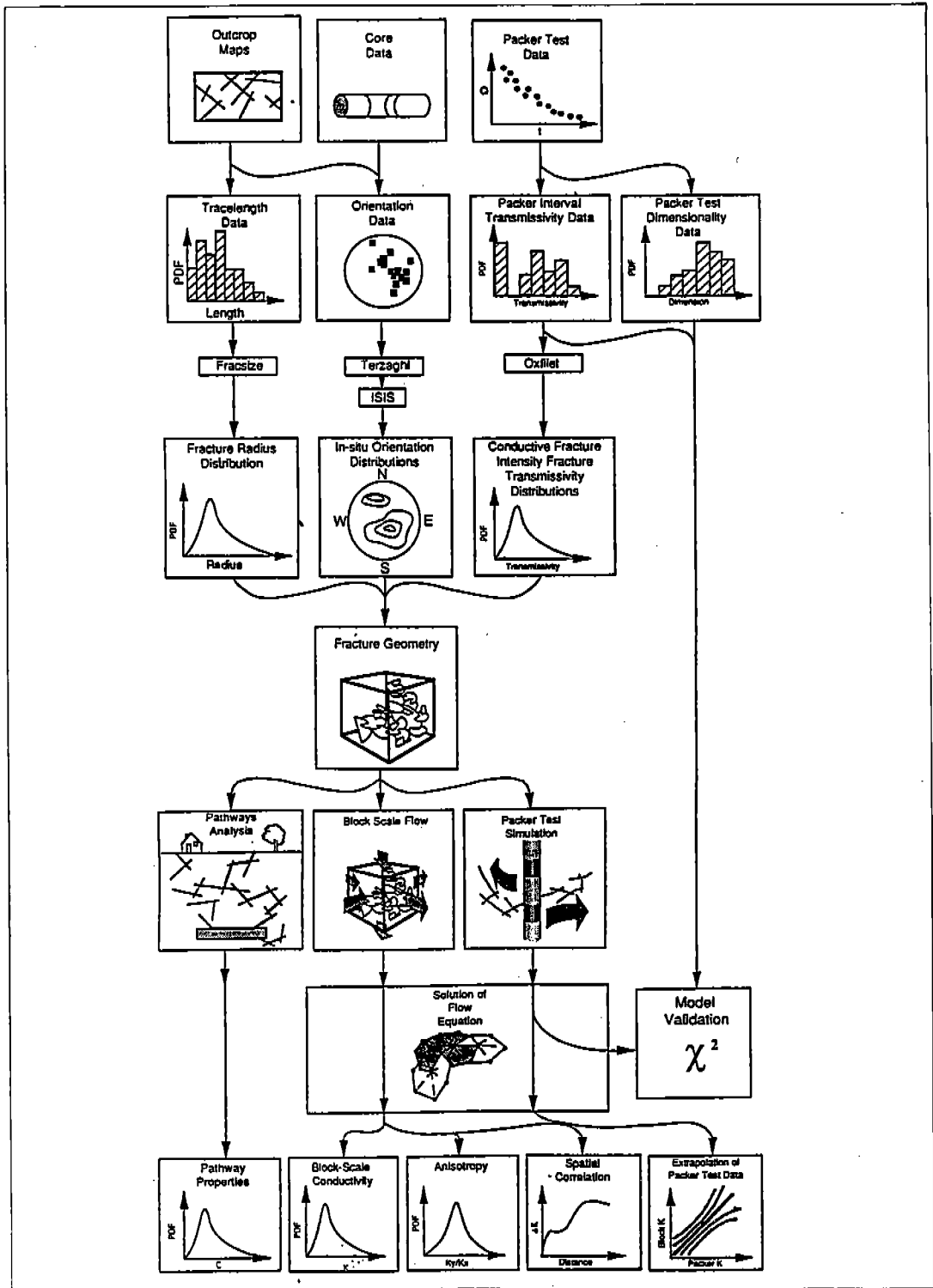


Fig.1 Discrete Fracture개념을 이용한 지하수유동해석 흐름도

리열극분석 패키지이다.

열극체계의 기본적인 4개 개념모델은 공간적 불균질성과 선행열극조와의 교차점에서 열극의 종식형태를 기초로 하여 정의될 수 있으며, 그들이 형성하는 열극체계의 공간적 구조에 의해 구분된다. 가장 간단한 것으로서, Enhanced Baecher 모델은 열극의 중앙이 3차원내에서 일정한 밀도를 가지면서 무작위로 분포된다. Levy-Lee 모델에서는 열극중심이 fractal 과정에 의해 생성된다. Nearest Neighbor 모델에서는 새로운 열극이 선행열극과 인접하는 점에서 우선적으로 생성된다. War Zone 모델에서는 대규모이면서 거의 평행을 이루는 선행열극조의 영역내에서 새로운 열극들이 우선적으로 생성된다. 이러한 개념을 바탕으로 기존자료로부터 정리, 수정 및 추정 도출한 인자를 적용하여 적절한 기하학적 열극체계를 모델화한다. DFN 모델링의 전개 과정은 Fig. 1과 같다.

DFN 모델의 분석방법

DFN 모델에 적용되는 열극에 대한 분포 및 수리특성은 현장조사자료로부터 구해진다. 모든 열극의 위치 등 제반특성을 도출하기 위한 실제적인 측정방법은 완벽할 수 없으므로 파라미터별 통계학적 처리에 의한 접근방법이 사용된다. 분리열극개념모델에서 사용되는 열극의 기하 및 수리특성은 위치(location), 형태(shape), 방향성(orientation), 크기(size), 투수성열극확률밀도(conductive fracture intensity), 투수량계수(transmissivity : single-fracture) 및 저류계수(storativity) 등의 인자로 정의된다. 여기에서 모든 열극특성은 추계론적 분석과정에 의해 검토되며, 이 결과는 확률분포함수로 표시되므로 자료의 제한된 양으로 야기되는 확률분포에 대한 어느 정도의 불확실성은 항상 수반된다.

모델의 검증은 구간별 투수량계수, 유동차원(flow dimension), 수리간섭시험(crosshole hydrological test) 등과 함께 열극체계의 종합적인 특성을 근거로 하여 수행된다.

Table 2. DFN 모델링을 위한 자료요건

CLASS	FRACTURE PROPERTY	DATA SOURCE
Structural Geology	-Set Classification 및 Orientation -Conductive Fracture Intensity -Location 및 Size -Spape	-Lineament 및 Fracture Maps, Core Logs -Core Logs 및 Packer Tests -Lineament 및 Fracture Maps -Fracture Maps, Generic Information
Hydrologic Parameters	-Transmissivity -Dimensionality -Storativity -Transmissivity Variability	-Steady 및 Transient Packer Test Data -Transient Packer Test Data -Transient Packer Test Data, Generic Information -Generic Information
Transport Parameters	-Lateral Dispersion -Longitudinal Dispersion -Transport Porosity	-Tracer Experiments, Generic Information

DFN모델링을 위한 자료는 광역물收支, 구조지질(광역구조, 열극기하), 단일공시험, 간섭시험 및 추적자시험 등에 관한 정보로부터 직접적으로 도출한다(Table 2).

방향성

열극의 방향성은 열극면의 극(pole)이나 경사방향으로 표시되는데, 방향에 관한 분포는 인자성평가방법과 선정된 분포함수(Fisher, Bivariate Bingham, Bivariate Fisher)로 입력되거나 현장자료를 직접 입력시키는 비인자성평가방법인 Bootstrap 방법으로 구해질 수 있다. 불확실한 방향성자료는 확률분포특성과 부지지질특성에 따른 가정에 의하여 해석된다.

열극크기

열극크기에 대한 확률분포함수는 열극의 추적길이로부터 도출된다. 추적길이(trace length)는 임의의 형태를 갖는 열극과 측정면과의 교차선을 의미한다. 열극의 크기와 추적길이는 아직도 해석학적 상관관계가 알려져 있지 않기 때문에 추적길이 자료로부터 열극의 크기를 도출하기 위한 분석은 다음과 같이 전제조건을 단순화함으로써 가능해진다.

- 열극크기의 확률분포함수는 일반적으로 lognormal 분포
- 방향성분포형태는 球상에서 constant 혹은 uniform분포
- censoring형태는 조사시에 규명되지 않는 최소추적길이로 추정
- 조사면의 경계부위에서의 truncation형태는 조사면이 유한의 폭을 갖는 것으로 가정

구간별 수리시험

수리시험에 의해 도출되는 열극의 밀도, 투수량계수 및 저류계수 등에 관한 자료는 DFN모델을 검증할 수 있는 열극체계의 거동에 관한 자료를 제공한다. FIL(Fixed Interval Length)시험법(Osnes et al., 1988)은 열극모델인자의 통계처리에 필요한 자료를 도출한다. 자료의 해석은 패카시험 중 단일공에서 정압주입시험에 의해 수행되는데, 패카구간에서 측정된 시간에 따른 유량이나 유압에 대한 분석이다. 가장 단순한 접근방법은 Moye공식(Moye, 1967)과 같은 정상류해석법에 의해 분석하는 것이다.

저투수성 열극암반에서의 시험시 다양한 流型(flow geometry)이 예상되며(Karasaki, 1986; Doe & Geier, 1990), 유동차원은 유량-시간기록에 대하여 표준곡선(type curve) 분석을 하므로써 규명될 수 있다. 유동차원은 열극망의 상호연결성을 반영하므로 DFN모델의 검증에 또한 중요하다. 양호한 연결성을 보이는 열극망에 대한 패카시험 결과(Karasaki, 1986)와 연결성이 보통인 열극망의 경우 및 연결성이 매우 불량한 열극망의 경우(Doe & Geier, 1990) 각각 특징적인 현상을 나타낸다.

FIL시험은 관측된 패카구간투수량계수분포의 특성을 구하기 위하여 예상되는 流型에 따라서 해석된다. 시험구간당 열극의 수는 Poisson분포로 가정되며, 간섭열극투수량계수분포의 초기값 및 구간투수량계수분포에 대한 분포특성 인자가 가정된다. 다수의 수리시험 구간이 모사재현되며, 각 구간의 투수량계수는 공내투수량계수의 총합으로 계산된다. 또한 투수성열극확률밀도(conductive fracture intensity)는 투수성열극빈도(conductive frac-

ture frequency)로부터 구할 수 있다.

저류계수

저류계수의 실제적인 값은 본 모델의 검증에 위한 구간별 수리특성을 모사하는데 중요한 역할을 한다. 그러나 단일공에서 측정한 결과로부터 단일열극의 저류계수를 도출하기란 불가능하다. 간섭시험은 시추공 간의 열극망에 대한 저류계수의 정보를 제공하는 것이지만, 많은 열극에 의한 영향으로 단일열극에 대한 저류계수의 해석은 어려움이 많다. 이상적인 평면열극의 경우에는 투수량계수와 저류계수와 상호관계로 도출할 수 있다. 또한 단일열극의 법선stiffness와 투수량계수의 조합으로도 가능하지만, 취득가능한 부정류시험자료의 양과 질은 매우 제한적이어서 적정화하는 데는 한계가 있다. 보다 높은 투수성을 갖는 열극은 보다 많은 물을 함유하기 때문에 물의 압축성으로 인한 저류계수는 보다 높은 값을 보일 것으로 예상된다.

열극형태

본 모델에서는 열극의 모양을 평면의 다각형으로 간주한다. 일반적으로 열극이 인접 열극과 교차할때 교차확률이 증가할수록 그 형태는 다각형에 가까워진다. 열극형태는 열극종식유형에 대한 통계분석에 의해 결정되므로 기하개념모델을 적절하게 모사재현하기 위하여는 종식유형 및 열극교차밀도를 기재할 필요가 있다.

위치

이 모델에서 각 열극의 위치는 열극중앙점을 확률분포함수로 나타내는데, Uniform

Poisson Process, Poisson Point Process 또는 Fractal Point Process에 의하여 그 위치가 정해진다. 이러한 방법은 모델의 통계학적인자가 공간적으로 균질하더라도 열극밀도가 국지적으로 불균질한 분포를 갖도록 한다. 한편 대규모 열극들은 결정론적인 방법으로 그 위치를 정할 수 있다.

개념모델의 교정 및 검증

전술한 절차를 적용하여 도출된 예비DFN 모델의 교정 및 검증은 현장수리시험결과와 이를 모델에 적용한 결과를 비교하므로써 가능하며, 이의 수행과정은 다음과 같다.

- 열극면상에서 열극투수량계수의 변화(channeling현상)를 포함하는 DFN모델의 복수실험은 Monte Carlo모사로서 이루어진다.
- 정압 FIL시험은 이러한 복수실험 내에서 모사된다.
- 모사 FIL시험은 임의차원(arbitrary-dimension) 流型에 따라 분석된다. 패카시험 분석을 통하여 시험구간 L에 대하여 해석된 유동차원과 구간투수량계수의 모사분포특성을 얻을 수 있다.
- 모사분포특성을 동일한 방법으로 실제 FIL시험자료로부터 취한 유동차원과 구간투수량계수의 분포특성과 비교한다.
- FIL시험결과에 대한 모사분포특성과 실제자료의 분포특성이 적절하게 일치하면 이 모델은 검증이 된 것으로 간주된다. 만약 일치하지 않는 경우, 모델은 교정을 필요로 하는데, 투수성열극확률밀도와 열극투수량계수를 반복적인 방법으로 수정, 보완하여 일치시킨다.

연구지역

지형 및 지질

연구지역은 남양호와 접하는 경기도 평택군 포승면 원정리에 위치한 봉화재(111.5m) 북측사면과 남양호 남단의 호안지대를 포함한 약 1km² 지역이다(Fig. 2).

연구지역의 지질은 화강암질편마암 혹은 흑운모호상편마암, 석영운모편암이 주를 이루고 흑연편암 및 석회질 편암이 소규모로 분포한다. 이들의 상호관계와 전반적인 층서 관계는 아직까지 확인되지 않고 있다(김동학 외, 1979).

지질구조

이 지역에서 편리의 대표적인 주향은 EW 방향이고 30° SW경사를 나타내며 지역에 따

라 주향이 WNW와 ENE로 변하기도 한다.

습곡구조는 서부지역에서 관찰된 것 외에는 아직 파악되고 있지 않다. 서부지역의 향사축 방향은 EW이고 plunge는 20°~30°이다.

30×30km 영역내에서의 구조선은 N°30~50°E가 가장 우세하고, 10×10km 영역인 아산만과 남양호 일대지역에서는 N50°E와 EW 방향의 구조선이 우세하다(한국전력주식회사, 1978 ; Samlim Consultants Co., 1992).

봉화재 남측과 북측에 위치하는 두개소의 채석장에서 관측된 단층은 대체로 N55°~75°W와 N20°~30°E의 두 방향이 우세하였다. 북서부지역에서의 시추조사결과에 의하면 N60°~70°W/70° NE 방향의 단층이 확인되었으며 이는 기존 지하공동건설시 확인된 N70°~80°W의 단층과 연관되는 것으로 사료된다. 또한 남양호 인근에서의 시추조사 결과 4개 방향의 구조대가 인지되었다.

지표에서 관찰된 절리의 주방향은 N10°~40°W가 가장 우세하고, 그 다음이 N70°~80°E, N40°~70°W와 N20°~40°E이고, 경사는 대부분 50~80°이다.

지하에서 관찰된 투수성절리 및 열극대를 방향별로 구분하면 다음과 같이 5개조로 분석되었다(한국석유개발공사, 1985).

- SET A : N60°~70°W/60°~90°NE, 주단층대와 일치
- SET B : N10°~20°E/60°~80°SW
- SET C : Subhorizontal(10°~40°E), 주향은 분산
- SET D : NS/E, 주향과 경사가 분산
- SET E : N50°W/50°~90° SW, 주향분포는 분산

이 중에서 가장 지하수유입이 많은 것은 10~40ℓ/분(15~60m³/일)의 유입량을 보이는 SET

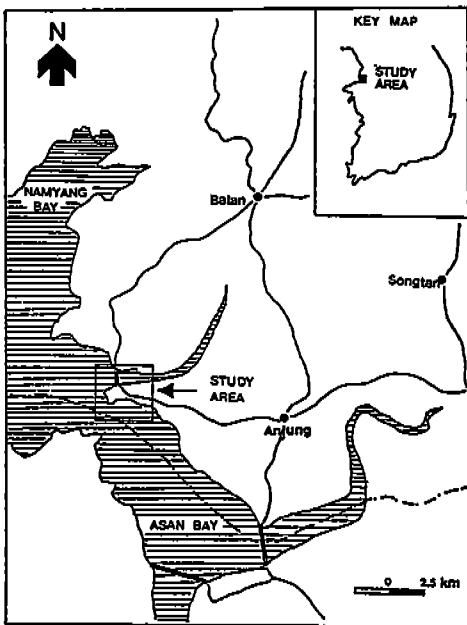


Fig.2 연구지역 위치도

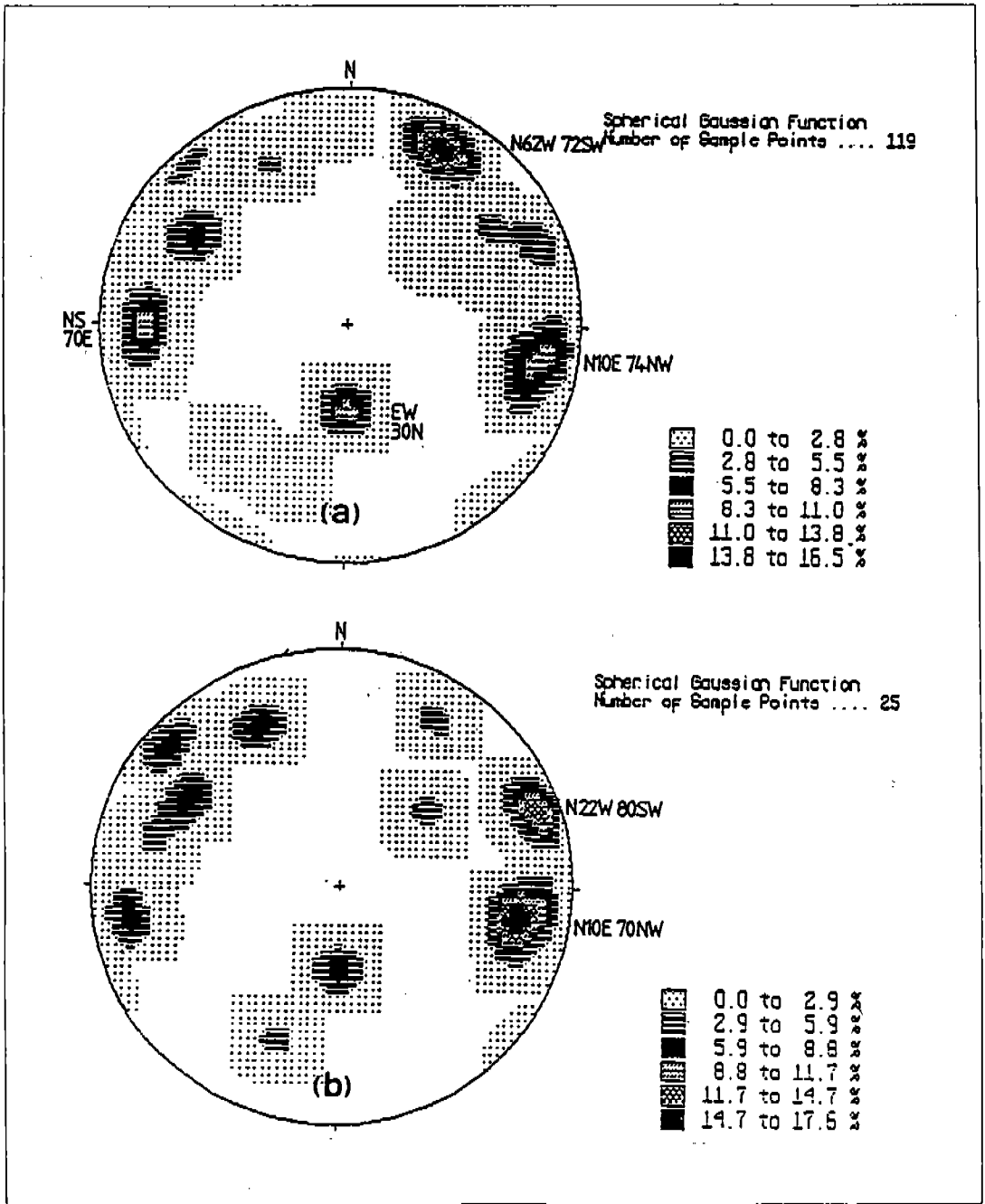


Fig.3 지하공동 (-60m MSL)의 절리계 분포
(a) 절리계 분포 (b) 투수성절리 분포

A,CD이며, 다른 조는 평균 0.1~0.5ℓ/분(0.1~0.7m³/일)의 유입량이 측정되었다(PEDCO, 1988).

지하공동건설시 조사된 자료에 의하면 편마암의 매질을 통한 지하수의 유입은 실제 무시할 만하며, 지하수의 주유동로가 되고 있는 것은 주절리의 교차점, 대소규모의 단층, 그리고 전단대와 백암의 접촉부 등이었다. 반면에 지역에 따라서는 심히 파쇄된 곳이나 절리가 발달된 지역에서도 지하수의 유입은 없었다. 지하공동의 일부지역(-60mL)에서 재평가한 절리조 중 투수성절리조는 N10° E/70°NW와 N22° W/80°SW의 주유동절리조와 소규모 투수성절리조로 구분되었다. 전체 절리 중 투수성 절리는 21%에 해당하였다(Fig. 3).

지표수문

이 지역의 30년간 평균강수량은 1200mm/년이며, 이 중 약 70%가 6월에서 9월 사이에 집중된다. 한반도의 평균 증발산량을 강수량의 27%, 지표유출량을 55%로 추정할 때 지하침투량은 약 18%에 이르며, 연구지역의 집수지역으로 침투되는 강수량은 평균 183,600m³/년으로 추산된다. 이는 지하수체계 상부로 충전되는 수량으로 가정할 수 있다.

강수량 중에서 암반으로 함양되는 지하수의 양은 아직은 연구된 바가 없으나 약 7~9%로 가정할 때, 암반으로 함양되는 양은 20,400m³년으로 추정된다.

지하수문

지하수위 분포 : 이 지역의 지하수위는 지형적인 영향으로 비교적 높은 편이며 지형의 고저와 유사하다. 지하공동 건설시 소량의

지하수가 누수되는 경우 지하수위는 급격히 하강할 것으로 예상되나 이 지역에 지하공동건설시 22개의 관측공에서 측정된 수위는 뚜렷한 강하가 일어나지 않았다.

연구지역의 지하수유동은 봉화재에서 계측된 지하수위에 의하여 특징지워지며, 남양호 쪽의 동수구배는 0.16이고 아산만 쪽의 동수구배는 0.08이다. 함양지역에 위치하는 열극대는 이러한 이론적인 유동로를 교란시키게 되며, 배출지역에 존재하는 열극대는 지하수의 주유동로가 된다.

지하공동건설시 지하수체계 변화를 파악하기 위하여 기존 조사시추공외에 7개의 지표 관측공을 추가하였으며(Table 3), 지하수압의 분포를 알기 위하여 수압계(pore pressure cell)를 설치한 관측공의 수압분포는 Table 4와 같다(PEDCO, 1988).

본 연구에서 추구하는 자연상태의 지하수압 분포는 알 수 없으나 상부와 하부의 수압특성을 추정할 수 있다. 일반적으로 지하공동 주변의 수압분포는 약 70%이상이 이론적인 수위(Hydrostatic Pressure Distribution)보다 낮게 나타났다. 이는 지하매질의 불균질성과 열극체계의 분포에 따른 영향으로 보이며, 투수성 파쇄대를 관통한 관측공에서는 높은 수압을 나타내고 있다.

수리전도도 분포 : 본역의 수리전도도는 단공시험, 수벽공시험 그리고 양수시험에 의하여 계측되었다. 봉화재 북측사면에서 시행된 1차 수압시험결과에 의하며 상부 풍화대는 10⁻⁶~10⁻⁷m/s이며, 기반암은 3×10⁻⁷~5×10⁻⁸m/s로 나타났다. 투수계수의 변이대는 지표부에서 약 30~50m 깊이에 해당한다.

1차조사에서 산출된 수리전도도의 값은 남양호부근의 2차조사에서 계측한 수치보다

Table 3. 지표관측공(지하수위, 지하수압) 현황, ()는 87.10의 수위 (단위 : MSL)

시추공	표 고	공저표고	상부수위 측정구간	하부수압 측정구간	조기 지하 수위('85.8)	상부 지하 수위('88.1)	하부 지하 수압('89.6)
A1	6.21	-84	-30	-60	4.6	4.9	1.5
A2	33.99	-81	-30	-60	24.2	20.6	17
A3	79.17	-69	0	-30	45.5	46.3	-
A4	94.85	-26	-	-	61.3	74.5	-
A5	4.87	-87	-10	-30	OVERFLOW	-	-
A6	30.02	-47	0	-30	14.3	4	-
A7	55.42	-81	-20	-50	40.7	36.6	6
A8	47.41	-85	-	-	42.8	42.9	-
A9	29.80	-84	-	-	25.2	24.91	-
A10	6.51	-83	-40	-70	5.65	5.6	5
A11	76.62	-38	-	-	65.5	64.1	-
A12	19.96	-84	-30	-60	9.3	9.2	-
A13	1.51	-145	-	-	0.5	0.9	-
BA14	5.91	-15	-	-	(5.5)	4.5	-
BA16	85.73	-15	30	0	(35.2)	30.5	13
BA17	84.37	-30	30	0	(38.5)	33.3	9
PA18	43.81	-70	-20	-50	(34.8)	31.8	7
PA19	6.54	-70	-30	-60	(4.6)	4.2	4
PA21	28.56	-85	-20	-50	(28.5)	27.0	-
PA22	7	-138	-	-60	-	-	8

(지하수압 : m of water)

10~100배 이상의 높은 값을 나타나며, 이는 1차조사의 간이양수시험이나 양수간섭시험의 결과보다 10배 이상 높은 수치임을 알 수 있다.

간이양수시험에서 얻어진 시추공 주변부의 수리상수는 전구간시험으로 실시하였기 때문에 투수성이 높은 상부풍화대와 열극대의 영향을 구분할 수가 없다. 간이시험에서 얻어진 투수량계수는 일반적인 결정질기반암의 투수량계수인 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 의 범위를 벗어나지 않으나 비교적 작은 값인 $1.4 \times 10^{-7} \sim 6.5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 를 나타냈다. 저류계수는 $6.5 \times$

$10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ 인 피압대수층의 저류계수를 갖고 있다.

남양호 일대에서 실시한 각 시추공별 수리시험결과는 일반적으로 심도 50m까지 높은 투수계수를 나타낸다. 특히 상부 -40m MSL까지는 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 의 수리전도도 값을 나타내며 하부기반암은 $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 의 낮은 수리전도도를 보인다. 수압시험시에 실시한 수위강하시험에서도 낮은 수리전도도 값이 산출되었다. 2차시험 결과는 상부 10~20m층이 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 20~50m 구간이 $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 이고 하부기반암은 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 의 구간으로 구분된

Table 4. 지하수압 관측현황(pore pressure cell)

측정공	지하심도 (m)	지하수압 (88.2)	지하수압 (89.5)	이론적수압	비 고
BC 1	-30	65	5	50	
BC 2	-30	19	45	50	
BC 3	-30	-	40	30-50	
BC 4	-30	22	10	30-50	
BC 5	-30	10	10	30	
BC11	-30	-	27	10-20	
BC12	-30	-	30	50-60	
PC 6	-85	65	80	-	
PC 7	-85	47	45	60-100	
PC 8	-85	75	12	60-100	
PC 9	-85	-	38	60-100	
PC10	-85	18	-	-	
PC15	-85	-	66	10-30	
PC16	-85	-	108	80-107	

(지하수압 : m of water)

다.

지하수위변화와 수리전도도의 매우 불규칙한 분포를 토대로 볼때 이는 암반에서 지하수유동이 유동로에 의하여 지배를 받는 것으로 해석된다. 양수시험시 수위의 변화율은 N30°E 선상에 위치한 관측공에서 가장 빠른 변화율을 보였고, NW방향의 관측공에서는 다소 늦은 변화율을 나타냈다.

암반열극에 대한 정량적인 해석은 투수성이 높은 상부층의 영향을 배제할 수 없기 때문에 불가능하나 유동방향에 대한 정성적인 해석은 가능하였다. 이 지역의 지하수는 N30°~40°E와 N60°~70°W의 주유동방향을 갖고 있는 것으로 판단된다.

연구지역의 개념모델

본 개념모델은 연구지역에 분포하는 지질

구조 중 수리학적으로 가장 중요한 구조를 선별하고, 구조의 특성을 알아내는 것이다. 제 1단계는 본 지역의 항공사진 판독으로 나타난 구조선을 파악하였다. 연구지역은 지형상으로 북측의 남양호와 남측의 아산만으로 경계를 이루고 있어, 구조선의 연결성 확인이 이루어지고 않고 있다. 따라서, 본역 중역권의 경계선(subregional boundary)은 남양호와 아산만의 발달방향과 중심선으로 설정하였다. 주 발달방향은 N70°~80°W선과 N30°~50°E선으로 이루어졌다.

제2단계는 지표지질조사, 육상 및 해상 탄성파탐사와 전기탐사의 결과 분석으로 본 지역에 분포된 구조선을 예상하였다. 지표조사에 의하여 예상된 구조선의 분포는 시추조사결과 A-2, A-5 위치에 N60°W 방향의 구조선이 추가되었다.

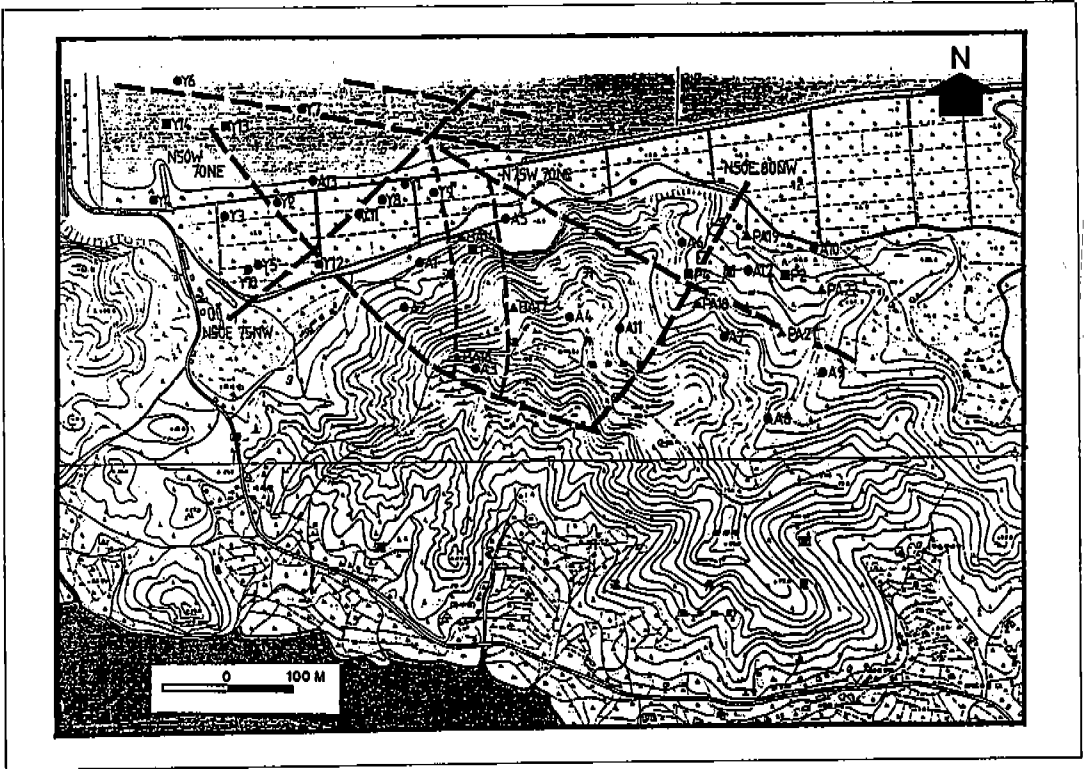


Fig.4 연구지역의 주열극대 분포도

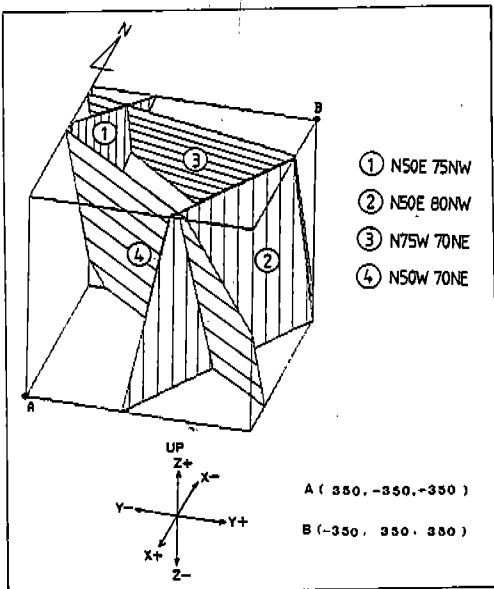


Fig.5 연구지역의 3차원적 지질구조 개념모델

제3단계는 시추공과 지하공동에서 확인된 열극대를 선정하였으며(Fig. 4), 확인된 일부 열극대는 지표조사에서 추정된 구조선의 방향과 대부분 일치하였으나 분포위치는 다소간의 차이는 있었다.

이를 종합하여 연구지역의 주열극대를 3차원적으로 도시하면 Fig. 5와 같다.

분리열극모델 입력인자 도출

연구지역일대의 유류비축공동시설 주변 암반에 대한 DFN모델을 도출할 수 있는 취득 가능한 조사자료는 충분하지 못하였다. 활용 가능한 기존자료로는 현재 운영 및 확장공사 중인 비축시설건설을 위한 기본조사보고서

(Samlim consultants Co., 1992) 및 유공개스 비축시설 부지조사보고서(PEDCO, 1989) 등이다. 이들 보고서로부터 취득가능한 자료는 지표지질도, 시추주상도, 수압/양수시험 및 공동내부의 열극조사도 등이다. 이들 자료중 열극의 방향성에 관한 자료로서 시추주상도는 거의 불확실하며(class-B 혹은 class-C), 공동내부 열극조사자료 또한 DFN모델 도출을 위한 열극의 추적길이 및 빈도를 추정하는 데는 한계가 있다. 이러한 전반적인 자료의 제한성을 감안하여 기존 조사자료를 근거로 이론적인 배경과 현황을 바탕으로 외삽 및 추정에 의해 수정, 보완하였다. 모델링에 필요한 파라미터의 도출과정은 다음에 기술하는 바와 같고, 그 대표값은 Table 5에 종합 정리하였다.

열극체계

열극자료의 데이터베이스 구축을 위한 기초자료는 기존의 자료가 모델에서 요구하는 수준에 미치지 못하므로 가능한 한 자료수집의 편의를 최소화하는 방법을 취하였다. 열극체계의 모델링을 위한 자료의 기본요건은 적어도 3차원 직교좌표축의 방향으로 측정된 것이어야 한다. 이의 요건을 만족시키기 위해 325° 방향의 저장 cavern과 이에 직교하는 연결터널의 향내열극조사도에서 열극체계자료 118개를 취하였다.

방향성자료의 통계적인 처리과정에서 발생하는 오차는 측정방향에 따른 발생확률이다. 즉, 열극면의 법선방향과 측정방향의 교차각이 커질수록 표본집단에서 취해질 수 있는 열극수는 적어지게 된다(Terzaghi, 1965). 이를 보정하기 위해서 각각의 열극에 대해서 Terzaghi보정을 한 결과 총 118개의 자료가

Table 5. 열극체계 모델링을 위한 입력자료

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
Orientation distribution	Bootstrap	Bootstrap	Bootstrap	Bootstrap	Bootstrap	Bootstrap
Mean Pole Azimuth	27.5	102.2	180.1	268.0	309.3	42.7
Mean Pole Inclination	17.2	18.8	59.4	18.5	28.7	14.6
Dispersion Parameter	50	50	50	50	25.4	6.0
Fracture Radius	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal
Mean Radius (m)	20.6	15.6	22.4	16.6	16.5	10.5
Standard Deviation (m)	6.59	4.44	5.19	7.49	4.82	3.15
Fracture Transmissivity	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal	lognormal
Mean (m ² /s)	5.75E-07	5.75E-07	5.75E-07	5.75E-07	5.75E-07	5.75E-07
Standard Deviation(m ² /s)	9.41E-07	9.41E-07	9.41E-07	9.41E-07	9.41E-07	9.41E-07
Minimum Transmissivity (m ² /s)	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	1.00E-10	1.001E-10
Maximum Transmissivity (m ² /s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Storativity	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.001E-08
Conductive Fracture Intensity P _{32c} (m ² /m ³)	0.37	0.27	0.21	0.24	0.17	0.26

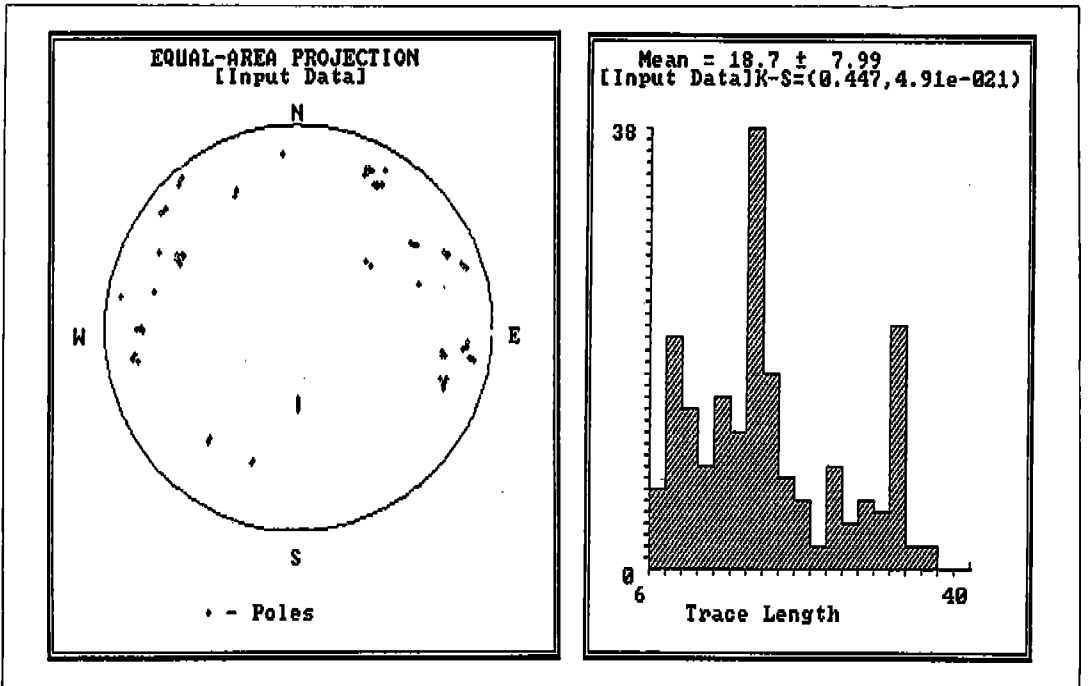


Fig.6 현장자료의 방향성 등면적투영도 및 추적길이 빈도그래프

207.2개로 증가하였으며, 등면적투영도와 열극길이 빈도그래프는 Fig. 6과 같다.

열극조 도출

열극체계의 모델링을 위해서는 조사자료의 분석을 기초로 하여 유사한 집중도(clustering)을 이루는 조별로 세분시켜야 한다. 이를 위해서는 조사자료를 직접 이용하는 Bootstrap resampling 방법이 사용되는데, 시각적으로 동일한 방향을 갖는 군에 대해서 임의의 초기값을 입력하여야 한다. Fig. 6의 등면적투영도로부터 Fisher 확률분포함수로 대표되는 6개 set를 도출해 낼 수 있다.

열극투수량계수의 모사

열극투수량계수는 공내수압시험자료로부터

추출할 수 있다. 연구지역에서는 주열극대내의 지하공동주위에 위치하는 8개의 공(A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, Y-1, Y-8, Y-9)에서 행한 구간별 수리전도도값을 이용하여 열극투수량계수를 모사하였다.

그러나, 기존자료의 분석결과 A계열과 Y계열의 투수량계수값이 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 8개 공 전체의 평균투수량계수값을 모사하여 이를 입력자료로 결정하였다(Fig. 7). 모사결과를 보면 확률밀도함수는 lognormal 분포로서 열극투수량계수는 $10^{-7}m^2/s$ 범위내에 있다.

투수성열극확률밀도

임의 열극조에 대한 투수성열극확률밀도(P_{32})는 시추공내에서의 투수성열극빈도로부터

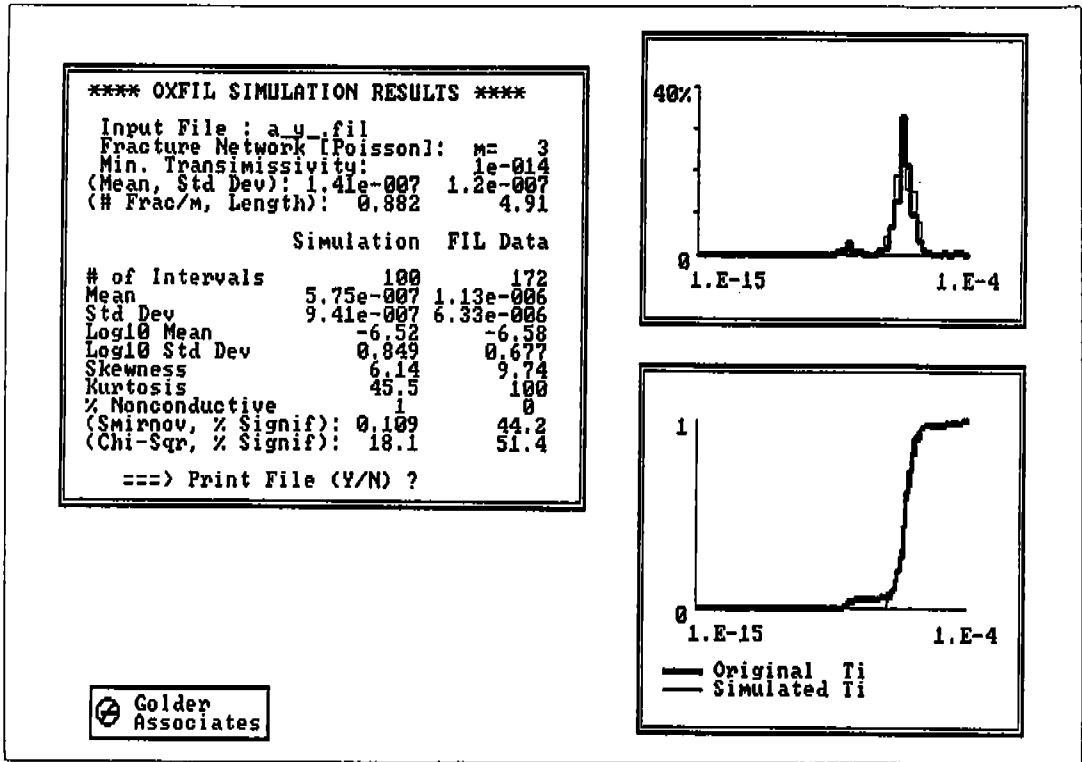


Fig.7 Oxfilet module을 이용한 전체 시험공의 Transmissivity Simulation

구해질 수 있는데, 열극의 방향성, 시추공의 방향과 길이의 조합에 의하는 편의의 실제 효과를 결정하기 위하여 FracMan module의 FracWorks를 이용하여 OxFile과 일치시키는 반복적인 과정을 통하여 계산된다. P_{32} 를 계산하기 위해 필요한 파라미터는 다음과 같으며 계산결과는 $1.52m^2/m^3$ 이다. 이 값은 6개 열극 set가 차지하는 총투수성열극확률밀도이므로 열극체계모델링을 위해서는 각 set에 해당되는 확률밀도값을 결정하여야 한다.

$$P_{32} = (f/f)P_{32}$$

P_{32} : total area of fracture per unit volume of rock

f : the number of fractures per meter

of borehole length

f : the number of conductive fracture per meter in OxFile simulation

모델의 구축 및 결과분석

열극체계 모델링

열극체계의 모델링을 위한 입력자료는 전술한 과정을 따라 FracMan module FracSys에서 분석, 도출되었다(Table 5). 여기서는 이들 파라미터별 분석결과를 입력자료로 하여 열극체계를 모델링한다. 이들의 파라미터의 대표값을 입력하여 구성한 열극체계모델은 Fig. 8과 같다. 이 열극체계모델을 구성하는

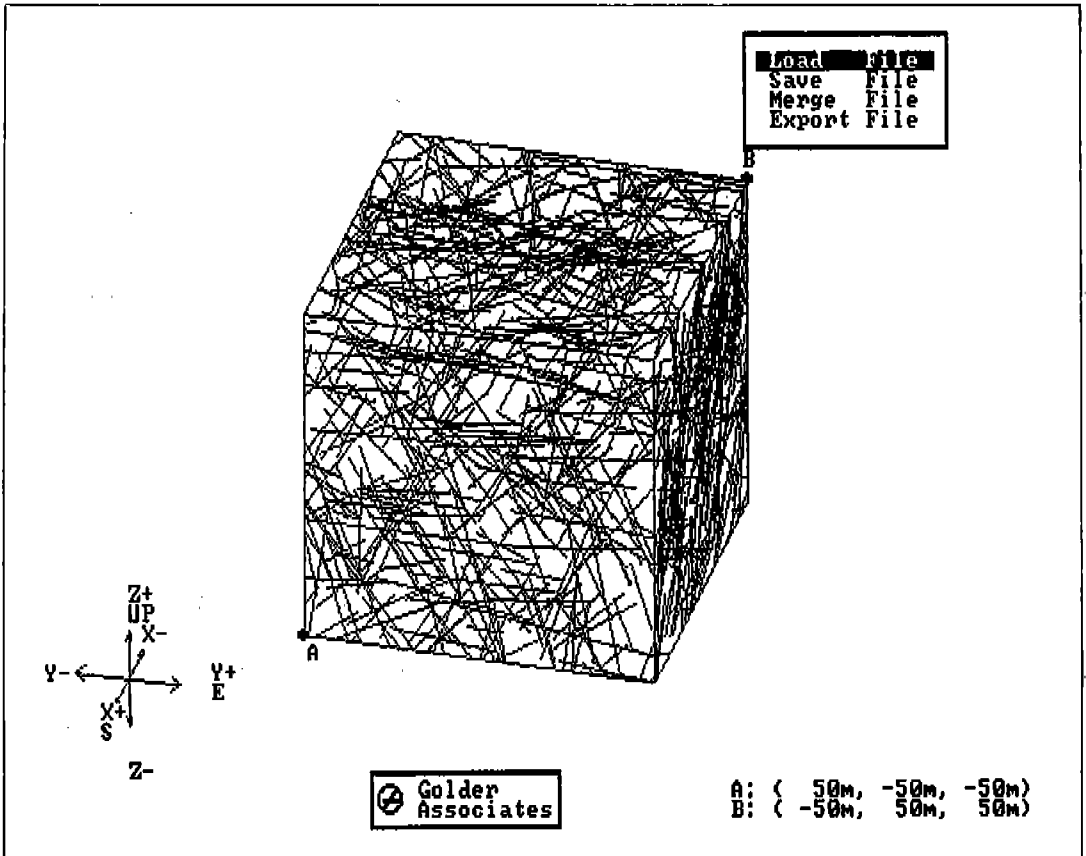


Fig.8 연구지역의 분리열극체계 모델

총 열극의 수는 2,218개이다. 열극체계모델링은 현장조사자료와 가능한 한 유사한 분포 특성을 갖도록 구축하는 것이 목적이므로, 입력자료를 취득한 위치에서의 모델의 분포 특성을 검토하여 조사자료와 비교하는 과정을 거쳐야 한다.

대상동굴과 동일한 좌표를 갖는 sampling plane에서 추출한 방향성 분포(Fig. 9)를 실제자료(Fig. 6)와 비교하면 6개 set의 균집체를 중심으로 유사한 분포특성을 갖는 것을 알 수 있는데, 모델에서 취한 방향성의 분산이 커지는 이유는 입력자료가 도면에서 취한

값이기 때문에 이론적인 Fisher PDF(Probability Density Function)로 변환하는 과정에서 자연상태와 유사한 분산을 갖도록 하였기 때문이다.

추적길이의 분포는 수집자료와 약 5.9m의 차이를 보이면서 작은 크기의 분포가 증가하는데, 이것은 추적길이의 자료가 항내를 관통하는 열극을 truncation(측정 하한치)으로 하였기 때문이다. 따라서, truncation limit를 갖지 않는 lognormal PDF인 경우 작은 크기의 빈도수가 증가하기 때문이며, 이것은 열극의 발생수에도 직접 영향을 미치게 된다.

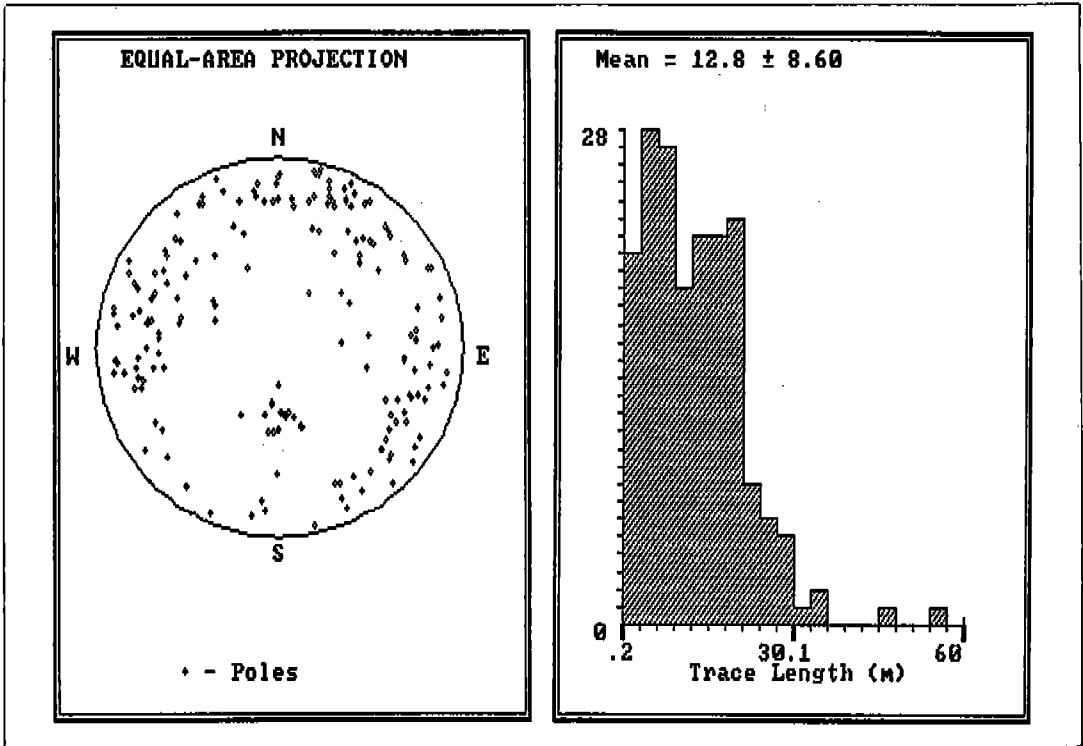


Fig.9 동굴천정에 교차되어 발생하는 열극의 방향성과 추적길이

한편 항내열극조사도와 모델내에서의 2차원적 열극분포도를 비교한 결과 그 분포양상이 유사한 것으로 밝혀졌다(Fig.10). 천정에서 교차되어 나타나는 열극에 대한 분석 결과는 Table 6에 정리하였다. 분석결과를 살펴보면 열극의 수에 있어서, 취득자료의 수는 118개 였는데, 모델에서는 186개가 발생한 것은 전술한 바와 같이 Terzaghi보정의 효과와 추적길이의 truncation limit를 설정하지 않음으로 인한 효과가 중첩되어졌기 때문이다. 이 효과는 평균열극크기와 열극밀도(P_{2D})를 증가시키는 것으로도 알 수 있다. 열극체계모델링이 자연상태와 유사하게 이루어졌는지를 판단하는데 가장 중요한 지시자 역할을 하는 파라미터는 열극투수량계수 값이다. 모델의 동굴천정에서 투수량계수값의

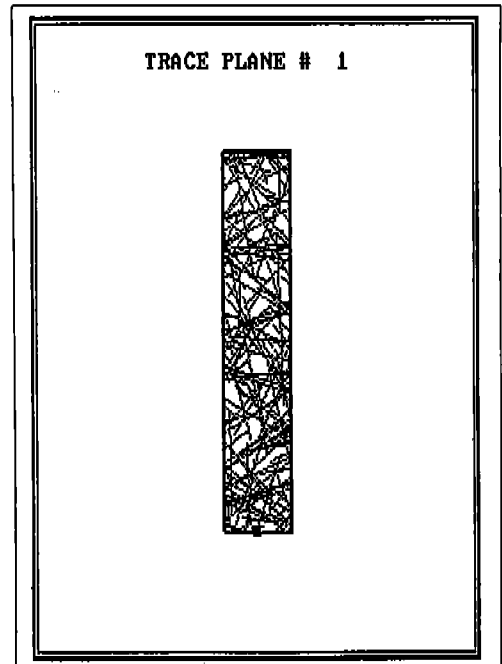


Fig.10 동굴천정에 교차되어 발생하는 2-D 열극망

Table 6. 등굴천정에서의 Trace Map Sub-region Analysis

Total number of traces	= 186
Total length of all traces	= 2,384m
Mean trace length	= 12.82m
Trace length standard deviation	= 8.597m
Region dimensions	= 100m×18m
Number of non-terminating intersections (X_6)	= 926
Number of terminating intersections (T_s)	= 52
Fracture intensity (P_{22})	= 1.325/m
Fracture intensity (P_{21})	= 0.1033/m ²
Intersection intensity (C_{21})	= 0.5433/m ²
Termination probability($P(T/I)$)	= 5.317%
Termination percentage($T\%$)	= 13.98%

도출한 값(5.75E-7)의 약 94%에 달하므로 비교적 유사한 분리열극모델이 구축되었다고 할 수 있다.

지하수유동 모델링

지하수유동 모델링은 앞에서 구축한 분리 열극체계모델을 바탕으로 하여 FracMan의 MeshMaker module에서 유한요소망을 생성하고, MAFIC을 이용하여 유한요소방정식을 해석하는 과정이다. 세계의 모듈(MeshMonster, EdMesh, MAFIC)로 구성된 MAFIC은 분리열극망과 암괴내에서의 포화된 열극의 부정류유동해석을 위한 Galerkin 유한요소코드이다.

지하수유동해석을 위한 선처리과정으로서 유한요소망을 구성하여야 하는데, 이를 위해서는 모사의 목적에 맞는 경계조건을 설정하여야 한다. 연구지역에서는 저장동굴의 운영에 직접적으로 영향을 미치는 수벽터널과 지하공동사이를 모델링하였다. 수벽터널은 해수면하 70m level에 위치하는 지하공동으로부터 40m상부에 위치하므로 Talbe 7과 같은 기하를 구성할 수 있다.

지하공동 주위의 수위강하에 기인하여 모델링 영역내에서는 총 수두값의 변화가 존재하게 된다. 이러한 조건은 모델의 경계조건을 이루는 각 면에 시간적으로 일정하고, 공간적으로 변화하는 수두값을 부여하므로써 가능해진다. 좌표축 x, y, z에 따르는 수두의 선형변화는 다음의 식으로 표현된다.

$$H = H_{xx} + H_{yy} + H_{zz} + H_0$$

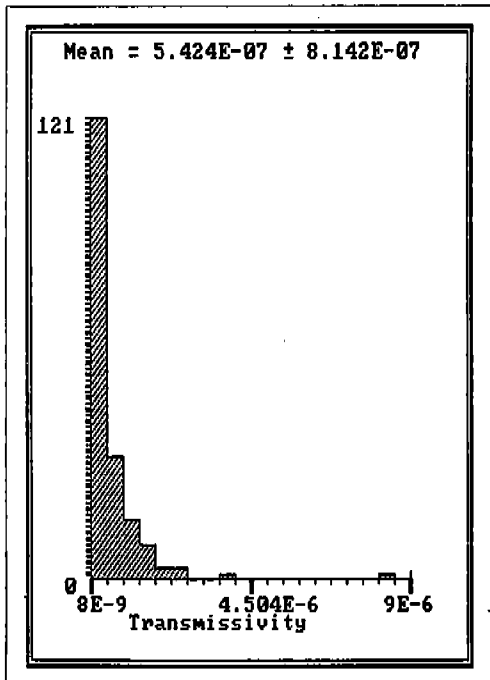


Fig.11 등굴천정에서의 Fracture Transmissivity

분포는 lognormal PDF일 때, Fig.11과 같은 빈도분포를 갖는다. 이 값은 모사를 통하여

Table 8은 외부경계와 내부경계의 각 면에 대한 H_x , H_y , H_z 및 H_0 의 계수이다. H_z 계수값은

Table 7. 경계조건의 Geometry

	Coordinates (x,y,z)	Orientation (trend, plunge)	Region size (m)	Length (m)
Outer Boundary	65, 50, 0	325, 0	W100×H80	150
Inner Boundary	40, 30, 0	325, 0	W00×H20	100

Table 8. Outer 및 Inner Boundary에 대한 Boundary Condition Coefficients

Face	H _x	H _y	H _z	H ₀ (m)
East	-0.216	0	1.0	58.2
West	-0.001	0	1.0	41.0
Outer North	0	0	1.0	49.6
Boundary South	0	0	1.0	49.6
Top	-0.108	0	1.0	49.6
Bottom	-0.108	0	1.0	49.6
Inner Boundary(All)	0	0	1.0	0

Table 9. Nodal Group Data

Nodal Group	Inflow(m ³ /sec)		Remarks
	Trial 1	Trial 2	
1	4.149E-02	1.421E-03	East
2	1.689E-02	3.181E-04	West
3	8.388E-04	1.822E-04	North
4	2.216E-05	3.831E-07	South
5	5.480E-02	4.247E-03	Top & Bottom
6	-7.537E-03	-3.421E-04	Cavern

정수두구배(hydrostatic gradient)로 가정한 것이고, 지하공동의 계수값은 지하공동하부에서 계속적으로 양수하기 때문에 0으로 설정하였다.

전술한 경계조건으로 유한요소망을 구성한 결과는 Fig.12이다. 이를 바탕으로 MAFIC을 실행한 결과는 Table 9와 같다. Nodal group 6는 지하공동인데, 실행결과만을 보면 유입량은 약 651ton/일에 달한다(Trial 1). 이와 같은 결과는 분리열극모델 또는 투수량계수

값이 과대산정되었기 때문이다. 이를 보정하는데 가장 유력한 오차의 원인은 앞에서 언급한 바와 같이 투수량계수값이 될 것이다. A계열과 Y계열의 투수량계수값이 약 10배의 차이가 나므로 최근에 실시한 시험결과인 Y계열의 투수량계수값(10⁻⁸)을 대입하여 다시 해석하였다. 정상류 조건하에서 10회 모사시킨 결과에 의하면 유입량은 29ton/일이 되는 것을 알 수 있다(Trial 2).

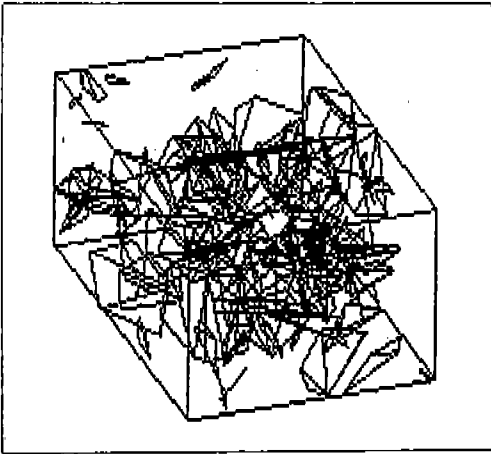


Fig.12 경계조건하에서의 Mesh Generation

토의 및 결론

본 연구는 지하공동 주변암반에서의 지하수유동 해석을 위하여 수행되었다. 본 연구에서는 지하수유동 해석기술에 대한 최근의 연구동향 및 해석방법을 검토하였으며, 가장 최신기술에 해당하는 분리열극모델을 확보하여 기 조사자료를 기초로 분리열극체계 개념의 지하수유동 해석을 수행하였다.

해석결과를 정리하면, 열극투수량계수값을 $10^{-8}m^2/s$ 로 하였을 경우 지하공동으로의 유입량은 약 29ton/일로 해석되었다. 반면에 열극투수량계수값을 1 order 높은 $10^{-7}m^2/s$ 으로 할 경우 유입량은 약 651ton/일로 전자의 경우보다 약 22배 큰 것으로 계산되었다. 여기에서 우리는 현장수리시험의 중요성과 입력자료의 정확성을 실감할 수 있다. 분석된 지하공동으로 유입되는 양에 가장 크게 영향을 미치는 외부경계는 east face(nodal group 1)와 top & bottom face(nodal group 5)인 것으로 밝혀졌다. 이것은 지형에 따른 수두의 변화가 직접적으로 지하수유동량에 영향을 미친 것으로

해석될 수 있다.

더우기 경계조건 설정시 지표관측공의 지하수위를 이론적인 수두로 간주하였으나 실제 관측결과는 크게 상·하부 지하수영역으로 구분하여 접근하는 것이 바람직하다(Table 3, 4). 하부 지하수영역의 수두는 10mMSL 정도로 추정할 수 있으며, 이 수치를 고려할 경우 공동내부로 유입량은 더욱 낮은 수치로 계산될 것이다. 이 결과는 비록 한개의 공동($W20m \times H20m \times L100m$)에 한하여 해석한 결과이지만 입력자료의 신뢰성과 한계성을 감안한다면 현 단계에서는 최선의 도출결과라고 할 수 있겠다.

본 연구를 수행하는 과정에서 도출된 문제점을 정리하면, 먼저 분리열극개념의 지하수유동 해석을 위해서는 모델에서 요구하는 정확한 입력파라미터를 도출하기 위한 조사 지침이 수립되어야 하며, 최소한 열극체계 및 수리 파라미터에 대한 조사가 완벽하여야 한다.

열극체계파라미터를 정량적으로 도출하기 위해서는 지표와 항내에서의 cell mapping, scanline mapping, 그리고 borehole scanline mapping이 요구되지만 이 부문에 있어서 가장 불확실성이 높은 인자인 열극의 크기, 연장성 등에 대하여 가능한 한 자연상태에 근접하는 값을 도출해 내는 것이다. 이 부문에 관한한 국내수준은 아직까지 과거 수십년 전에 비해서 크게 발전되지 못하고 있는 실정이다.

수리파라미터를 도출하기 위해서는 일정구간의 정압주입시험, 조사공간섭시험 등이 필요하다. 이 분야 또한 과거의 조사기기를 포함한 조사기술 수준으로 자연현황특성을 정확하게 반영하는 인자를 도출한다는 것은 국내여건이 외국의 선진기술수준과 너무 큰

격차를 피부로 느끼게 하는 부문이다.

현장조사기술의 품질향상은 해석기술의 발달과 그 보조를 항상 함께 하여야 한다. 정보(information)과 해석기술(idea)은 항상 상호 보완적, 유기적인 관계를 유지하면서 발전해 나가야 하는 것이다. 수리시험방법은 조사의 목적에 따라서 다양한 종류의 시험법을 선택할 수 있으나 slug test나 pulse test는 경계효과 및 차원에 민감하지 못하기 때문에 지속성(sustained) 수리시험으로서 정압/정량수리시험을 우선적으로 수행하는 것이 바람직하다. 특히, 정압시험은 공내저류효과를 무시할 수도 있으며, 저투수성암반에서 초기에 정압상태를 유지할 수 있는 장점이 있으므로 이에 대한 비중을 높이는 것이 바람직하다(Doe, 1990). 정량시험과 slug test, pulse test는 현실여건이 허락하는 한 보조수단으로 시행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

암반지하수유동의 조사기술과 해석기술은 부지특성평가에서와 마찬가지로 동전의 양면과 같은 입장이다. 해석기술이 아무리 발달하였다고 해도, 분석자료의 도출이나 조사기술이 못따르면, 조사자료 이외에 추가적으로 자료가 요구되는 해석기술은 활용할 수가 없게 된다. 따라서 조사기술과 해석기술은 동시에 같은 심도로 개발되어 나가야 한다. 해석기술도 각 사업에서 요구되는 성능목적(performance objectives)에 맞게 설정되어야 하며, 설정된 목적에 부합하는 자료도출을 위하여 조사기술개발이 수반되어야 할 것이다.

본 연구를 발판으로 하여 향후 수행하여야 할 과제로서는 분리열극개념의 지하수유동모델에서 요구하는 입력자료의 생산 및 데이터베이스화, 연속체개념 및 등불연속체개념

모델과의 비교연구, 그리고 산업현장에서의 적용 등이다.

감사의 글

본 연구는 선경건설주식회사 연구소의 지원으로 이루어졌다. 연구수행 중 여러가지 도움을 주신 석유개발공사의 송승호과장님과 범양엔지니어링의 이승순과장님께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김동학, 최위찬, 및 오인섭(1979), 아산도폭, 자원개발연구소, 34pp.
- 한국전력주식회사(1978), 아산화력본관지역 세부지질조사 보고서, 64pp.
- 한국석유개발공사(1985), 비축사업조사설계 용역, 기본조사보고서.
- Barker, J.(1988), A Generalized Radial Flow Model for Hydrologic Tests in Fractured Rock, Water Resources Research, Vol.24, pp.1796-1804
- Dershowitz, W.S. (1984), Rock joint systems, Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge, Mass, 764 pp.
- Dershowitz, W.S., Lee, G., Geier, J., Hitchcock, S. and La Pointe, P.(1992), FracMan Version 2.3 Interactive Discrete Fracture Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation. User Documentation, Golder Associates Inc., Redmond, WA.
- Doe, T.W. and Geier, J.E.(1990), Interpretation of fracture System Geometry Using Well Test Data, Stripa Project Technical Report

- 91-03, SKB, Stockholm.
- Dverstrop B. and Andersson, J.(1990), Estimation of effective transport parameter for predictive Use in fractured rock, Water Resonres Res., 1990
- Geier, J.E, C-L Axelsson(1991). Discrete fracture modelling of the Finnsjön rock mass, Phase 1, SKB TR 91-13
- Karasaki, K.(1986), Well Test Analysis in Fractured Media, Ph.D.thesis, Univ. of California, Berkely.
- Karasaki, K., Long, J.C. & Bodvarsson, (1985), A new fracture and matrix mesh generator, in Annual report 1985 Earth Science Division Lawrence Berkely Laboratory, Berkeley, California.
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wison, C.R. & Witherspoon, P.A.(1982), Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resour. Res., 18(3), pp.645-658
- Long, J.C.S., Karasaki K, Davey A., & Paterson J.E.(1990), Preliminary of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL 27182
- Moreno, L., and Neretniek, I.(1991), Fluid and solute transport in a network of channels, SKB TR91-44, SKB, stockholm
- Moye, D.G.(1967), Drilling for Foundation Exploration, Civil Engineering Transactions, pp.95-100
- 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, pp.387-410
- Norman, S. and Kiellbart, N. (1990), FARF 31 -- A far field radionuclide migration code for Use with the PROPER package, SKB TR 90-001
- Osnes, J.D., Winberg, A. & Anderson, J.(1988), Analysis of Well Test Data Application of Probabilistic Models to Infer Hydraulic Properties of Fractures, Topical Report RSI-0338, RE/SPEC Inc., Raapid City, South Dakota
- PEDCO(1988), 0-0 Project, Report of Hydrogeological Data Analysis, unpublished, 1988
- PEDCO(1989), 0-0 Project, Hydrogeological Situation Review, unpublished
- Samlim Consultants, Co., Ltd.(1992), YuKong 2nd LPG Storage Basic Investigation Report, 1992
- Terzaghi, R.(1965), Source of error in joint surveys, Geotechnique, Vol. 15, pp.287-304
-
- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수 :
한국원자력연구소부설
원자력환경관리센터
대전시 유성구 덕진동 150
305-353
TEL : (042) 868-2062
FAX : (042) 861-4824
- 기정석 :
선경건설주식회사 연구소
서울시 종로구 관훈동 192-18
TEL : (02) 738-2222(교2249)
FAX : (02) 736-7040