

## 지하수위 변화에 따른 지하공동 주변의 지하수 유동특성 해석

강재기<sup>1)\*</sup>, 양형식<sup>2)</sup>, 김경수<sup>3)</sup>, 김천수<sup>3)</sup>

### Groundwater Flow Characterization in the Vicinity of the Underground Caverns by Groundwater Level Changes

Jae Gi Kang, Hyung-Sik Yang, Kyung-Su Kim and Chun-Soo Kim

**Abstract** Groundwater inflow into the caverns constructed in fractured rock mass was simulated by numerical modeling, NAPSAC (DFN, discrete fracture network model) and NAMMU (CPM, continuous porous media model), a finite-element software package for groundwater flow in 3D fractured media developed by AEA Technology, UK. The input parameters for modeling were determined on surface fracture survey, core logging and single hole hydraulic test data. In order to predict the groundwater inflow more accurately, the anisotropic hydraulic conductivity was considered. The anisotropic hydraulic conductivities were calculated from the fracture network properties. With a minor adjustment during model calibration, the numerical modeling is able to reproduce reasonably groundwater inflows into cavern and the travel length and times to the ground surface along the flow paths in the normal, dry and rainy seasons.

**KeyWords** Three-dimensional fracture network model, Anisotropic hydraulic conductivities, DFN model, CPM model, Groundwater inflows, Pathway, Travel time

**초 록** 본 논문은 지하공동이 건설되는 지역을 대상으로 공동내 지하수 유입량을 계산하기 위하여 영국의 AEA Technology에서 개발한 NAPSAC과 NAMMU를 이용하여 수치 모델링을 실시하였다. 이것은 3차원의 파쇄된 매질에서 지하수 유동에 대하여 아주 유효한 유한요소 소프트웨어 패키지이다. 모델링에 사용된 입력자료는 지표조사, 시추조사, 단일공 수리시험 자료 등을 이용하여 산출하였다. 공동내 지하수 유입량을 보다 정확히 산출하기 위하여 이방성 수리전도도를 고려하였으며 이방성 수리전도도값은 연구지역에 분포하는 균열체계의 확률적 분포특성이 반영된 균열망에서 역산되었다. 연속체 개념의 수치모델링을 통하여 평수기, 갈수기와 풍수기시의 지하공동내 유입량, 유동시간, 유동경로의 변화를 계산하였다.

**핵심어** 3차원 균열망, 이방성수리전도도, DFN 모델, CPM 모델, 유입량, 유동경로, 유동시간

## 1. 서 론

지하에 건설되는 지하원유비축시설의 저장 원리는 원유가 물보다 가볍고 서로 혼합되지 않는다는 특성을 이용하여 공동주변 지하수압이 공동의 저장압력보다 높게 유지하도록 하여 저장물이 저유공동 주변의 암반이나 생태계로 유출되는 것을 방지하는 것이다. 이를 위해 암반절리를 따라 이동할 수 있는 기포형태의 가스가 저유공동 쪽으로 이동하도록 수두분포가 형성되어

야 하며 이의 만족조건은 수직동수구배가 1보다 커야 한다는 것이다(Åberg, 1977). 즉, 지하심부 암반에서 건설되는 비축시설의 안정성은 저장물의 수밀성 유지가 관건이 된다.

본 논문은 기존 논문(박병윤, 2000)의 자료중 시추공 텔레뷰어(BHTV) 검층을 통한 불연속면 자료 도출과정부분을 재해석하여 불연속면 자료를 도출하였다. 이를 토대로 균열망을 작성하였으며 작성된 균열망을 이용하여 상부지하수두의 변화에 따른 지하공동내 지하수 유동특성을 해석하였다.

암반에서 지하저장 공동의 안정성은 지하저장 시설 주변의 불연속면의 상태에 따라 결정된다. 특히, 누출된 저장유의 유동경로와 유동시간의 예측은 시설물의 성능 평가에 있어서 가장 중요한 주제중의 하나이다.

또한 공동내로의 지하수 유입은 공동의 안정성에 대

<sup>1)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학부 박사과정

<sup>2)</sup> 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup> 정회원, 한국원자력연구소

\*교신저자(Corresponding Author): 71001423@hanmir.com

접수일: 2003년 11월 13일

심사 완료일: 2003년 12월 10일

한 잠재적인 위험요소일 뿐만 아니라 공동 건설시 굴착 속도에도 중요한 역할로 작용한다.

본 연구에서는 박병윤(2000)의 접근방법과 현장데이터를 이용하여 균열망을 작성하였다. 3차원 연속체 수치모델을 이용하여 지하수 유동 경로를 보다 정확히 예측하기 위하여 그 지역을 대표하는 이방성 수리전도도를 고려하였다. 연속체 수치모델에 입력된 이방성 수리전도도 값은 연구지역에 분포하는 균열체계의 확률적 분포특성이 반영된 균열망 모델에서 역산되었으며, 연속체 개념의 수치모델링을 통하여 상부지하수위의 변화(평수기, 갈수기와 풍수기)에 따른 지하공동내 유입량, 유동시간, 유동경로를 계산하였다.

3차원 균열망을 작성하기 위하여 CONNECTFLOW를 이용하였다. CONNECTFLOW(Hartley, 1996; continuum and Network Contaminant Transport and FLOW)는 다공성 매질과 이산균열망 개념을 통합하는 방법을 이용한 지하수 유동 소프트웨어이다. 이것은 영국 AEA Technology에서 개발한 NAMMU(CPM, continuous porous media model) 다공성 매질 프로그램과 NAPSAC (DFN, discrete fracture network model) 이산균열망 프로그램 두 개를 합한 소프트웨어이다. NAPSAC (Hartley et al, 1996; Hartley 1998)은 파쇄된 암반을 통한 유동과 용질이동을 모델링하기 위한 프로그램이다. NAMMU(Hartley et al, 1996; Numerical Assessment Method for modeling Migration Underground)는 다공성 매질에서 지하수의 흐름과 용질이동을 모델링하는 프로그램이다.

현장 조건에 맞는 3차원 균열망을 작성하기 위하여 지표조사, 시추조사, 텔레뷰어(BHTV; BoreHole TeleViewer) 검층을 통하여 연구지역에 대한 불연속면 자료를 수집하였다. 이렇게 수집된 불연속면 자료를 이용하여 균열망 작성에 필요한 불연속면의 통계적인 물성치를 도출하였다. 균열망 작성에 필요한 매개변수로는 불연속면의 방향성, 틈새크기, 간격 또는 밀도, 크기, 종식형태, 연결성, 충전물질 그리고 거칠기 등을 들 수 있다. 이들은 모두 암반내 지하수유동에 영향을 미치는 중요한 변수들이다.

## 2. 연구지역의 수리지질학적 특성자료

### 2.1 연구지역

연구지역은 전남 여수반도의 북동부에 위치하고 있으며 그 면적은 3.0 km×5.0 km이다. 이 지역의 암반유형은 유천층군 화산암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있다.

본 연구지역은 기상청 자료에 의하면 지난 30년간 연평균강수량은 1393 mm, 월평균 강수량은 116.3 mm이고, 갈수기(12, 1, 2월)의 월평균강수량은 28.71 mm, 풍수기(6, 7, 8월)의 월평균강수량은 239.6 mm, 그리고 갈수기와 풍수기를 제외한 시기(이하 “평수기”)의 월평균강수량은 98.49 mm이다. 이들을 비교해 보면 평수기의 월평균강수량을 100%로 하였을 때 갈수기때는 30%, 풍수기때는 240%로서 상당히 큰 강수량 차이를 보이고 있다. 그러나, 연구지역의 지형과 풍화대 발달 특성상 강수량의 상당량이 지하로 스며들지 못하고 계속이나 바다로 직접 유출되고 있는 것으로 평가된다. 이를 고려하여 본 논문에서는 갈수기와 풍수기때의 상부지하수위의 변화량을 평수기에 비하여 약 ±10%로 가정하고 3차원 연속체 수치모델링을 실시하였다.

### 2.2 지표조사

지표조사 자료는 기존 논문(박병윤, 2000)을 이용하였다. 연구지역의 노두면에서 총 30개 지점에서 스캔라인법을 이용하여 누적조사길이 447 m, 935개의 불연속면 자료를 수집하였다. 불연속면 자료로부터, Terzaghi 보정(Terzaghi, 1965)을 실시한 후에 FracMan(Golder Assoc. Inc., 1998)을 이용하여 4개의 불연속면 세트

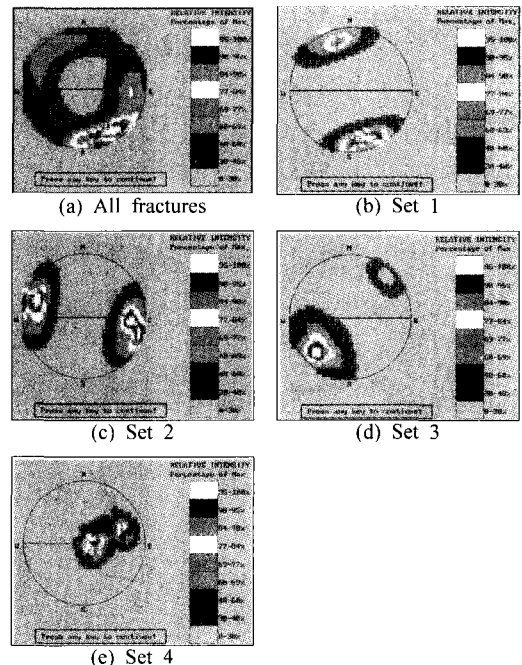


Fig. 1. Identification of the fracture sets from the surface fracture data

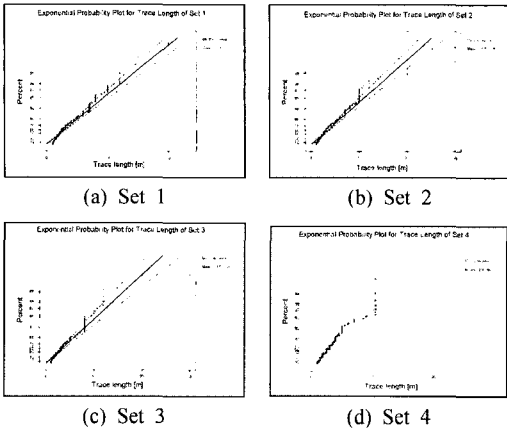


Fig. 2. Trace length distributions of the fracture sets

구분하였다. 이 불연속면의 극점들을 스테레오네트에 투영하면 Fig. 1과 같다. 방향성 자료에 대한 확률분포 함수는 Fisher 분포(Priest, 1993)를 따르는 것으로 해석되었다. 불연속면의 길이는 노두조사로부터 얻은 불연속면의 추적길이에 기초하여 순산모델링(Dershowitz, 1995) 기법을 이용하여 추정하였다. 연구지역에 분포하는 4개의 불연속면 세트에 대한 추적길이 분포는 Fig. 2와 같이 대부분 지수분포를 보임을 알 수 있었다.

2.3 시추조사

불연속면의 수직적인 분포특성을 조사하기 위하여 16개의 NX규격 시추공을 천공하였다. 천공한 시추공의 전체 길이는 3290.03 m이다(Fig. 3). 시추공의 위치와 방향은 선구조 해석 및 지구물리 탐사를 기초로 하였다(엘지엔지니어링(주), SK건설(주), 1999). 시추공내의 보다 자세한 불연속면 데이터를 얻기 위하여 텔레뷰어

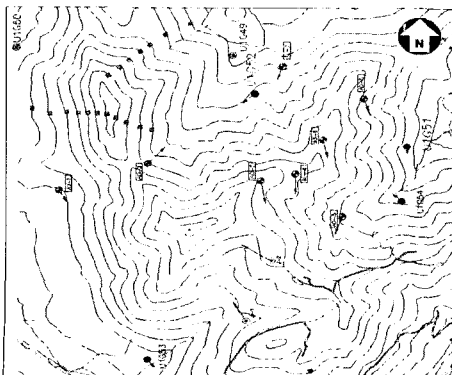


Fig. 3. Location and drilling azimuth of the boreholes

(BHTV) 검층을 수행하였다.

2.3.1 불연속면의 유형

본 연구의 목적은 지하수 유동을 예측하는 것이므로 지하수는 암반내에서 단지 열린 균열(open fracture)을 통해서만 유동한다고 가정하였다. 불연속면의 유형 분류는 텔레뷰어 검층에 나타난 모든 불연속면에 대하여, 진폭이미지(amplitude image)와 주시이미지(travel time image) 모두에 나타난 불연속면을 물이 흐를 수 있는 열린 균열(Type 1; open fracture)로, 진폭이미지에서만 나타나면 역학적으로는 불연속면 역할을 하나 물이 흐르지 못하는 닫힌 균열(Type 3; closed fracture)로 구분하였다.

Fig. 4의 심도에 따른 시추공과 불연속면의 교차빈도에서 보는바와 같이, GL.0~40 m에서 현저하게 높은 빈도를 보임을 알 수 있다. 이는 지표근처의 풍화대의 영향으로 볼 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 16개의 시추공에 나타난 모든 Type 1 불연속면에서 GL.0~40 m에 있는 불연속면을 제외한 불연속면으로 균열망을 작성하였다. 16개 시추공에서 GL.0~40 m까지에서 나타난 불연속면을 제외하면 총 694개의 불연속면이 포착되었다.

2.3.2 불연속면의 방향성

GL.-40 m 이하의 불연속면에 대하여 스테레오네트에 투영하면 Fig. 5와 같다. FracMan을 이용하여 불연속면을 3개의 Set로 분리하면 Fig. 5b, c, d와 같다. 방향성 자료에 대한 확률분포함수는 Fisher 분포(Priest, 1993)를 따르는 것으로 해석되었다. 각 Set별 경사, 경사방향의 평균값 그리고 Fisher Dispersion(K)은 Table 1에 정리하였다. 각 Set별 우세 발달 방향은 155.2/87.6,

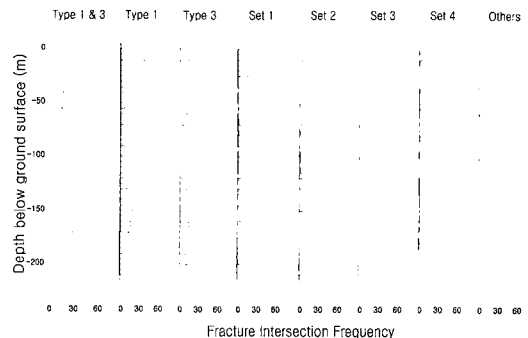


Fig. 4. Variation of the fracture frequencies in 16 boreholes along the depth

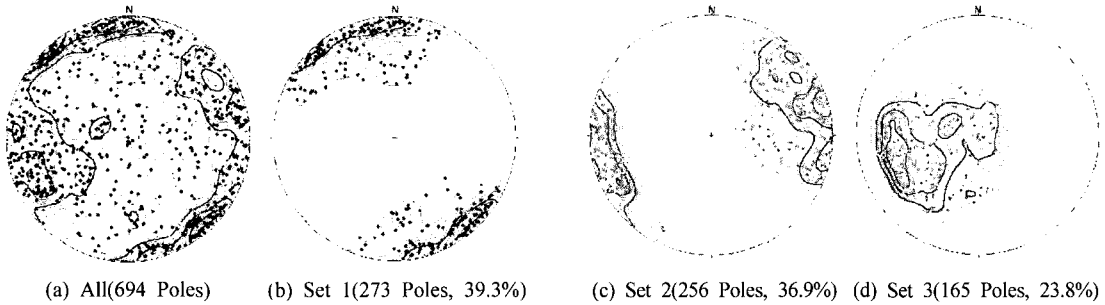


Fig. 5. Stereographic projection of the poles for the fractures below GL.-40 m

Table 1. Mean of the orientation and Fisher dispersion for each fracture set

Item	Unit	Set 1	Set 2	Set 3
Mean(Dip Direction)	Deg.	155.2	253.7	72.7
Mean(Dip Angle)	Deg.	87.6	78.3	35.7
Fisher Dispersion(K)		8.4	7.4	7.7

253.7/78.3 그리고 72.7/35.7이다. Set 1과 2는 거의 수직에 가까운 불연속면들로 구성되어 있고, Set 3은 저경사 불연속면들로 구성되어 있다.

2.3.3 불연속면의 추적길이

불연속면의 길이는 시추조사만으로 알 수 없으므로 지표조사 자료를 근거로 시추조사 자료와 비교하여 Set 별로 가장 유사한 Set가 거기에 해당하는 불연속면의 길이라고 간주하였다. Fig. 1과 Fig. 5를 비교하면 시추조사 자료 Set 1은 지표조사 자료 Set 1과 관련지를 수 있고, 시추조사 자료 Set 2는 지표조사 자료 Set 3과, 시추조사 자료 Set 3은 지표조사 자료 Set 4와 관련지를 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 Set 1의 추적길이 분포는 대부분 지수분포를 갖으며 이 분포함수를 찾기 위해 추적길이 L을 독립변수로 하는 지수분포식을 설정하고 이에 상응하는 상수 C와 λ를 결정해야 한다.

$$f(L) = C \cdot L^{-\lambda} \tag{1}$$

여기에서 L은 trace length (m), C와 λ는 상수이다. 본 논문에서 사용한 균열망 작성 소프트웨어인 NAPSAC의 지수분포에 대하여 Truncated Power-Law Distribution을 적용하였다. 지표조사 자료로부터 계산된 분포함수에 해당하는 상수 C와 λ는 Table 2와 같이 계산된다. 3차원 균열망을 작성하는데 필요한 NAPSAC에 입력할 변수는 불연속면 추적길이의 최대 및 최소길

Table 2. C and λ for each fracture set

Item	Set 1	Set 2	Set 3
Mean (L <sup>2</sup> ) (m <sup>2</sup> )	16.497	22.970	13.005
L <sub>max</sub> (m)	20.0	30.0	10.5
L <sub>min</sub> (m)	1.0	1.0	1.0
λ	2.147	2.164	1.747
C	1.185	1.186	0.903

이에 상응하는 지수값 λ이다.

2.3.4 불연속면의 밀도

불연속면의 밀도는 지표에서 수행한 현장 불연속면 분포조사로부터 스캔라인을 따른 불연속면의 간격이나 시추공에 포착된 불연속면 간격으로부터 구할 수 있다. NAPSAC에서 사용한 등가의 접근법은 단위체적당 불연속면의 중심점이 몇 개가 있는가로 정의되어 진다. 또한 해석오차를 최소화하기 위하여 해석영역 이외의 범위(즉, 중심점은 외부에 있지만 상당한 부분이 모델링 범위에 속한 경우)에 대한 밀도도 계산하여 모델링을 수행하였다.

만약 불연속면의 간격(s), 길이(L) 그리고 불연속면의 길이에 상응하는 불연속면 경사(cosD) 모두가 무작위적(random)이라면, 이 불연속면들에 대한 밀도는 각각의 평균값을 구해 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{1}{\text{mean}(s) \cdot \text{mean}(L^2) \cdot \text{mean}(\cos D)} \tag{2}$$

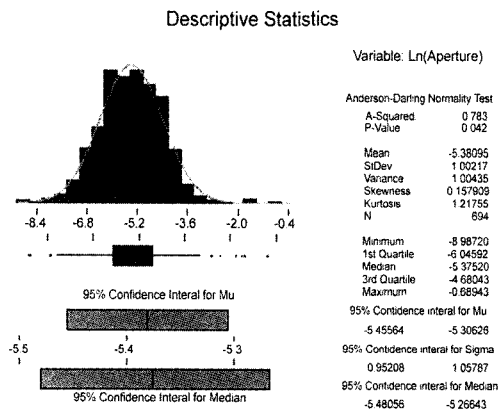
Fig. 5에 투영된 이 연구지역에서 계산된 불연속면의 밀도는 Table 3에 정리하였다. 16개 시추공의 수직거리는 전체 총 거리 3290.03 m에서 상부 풍화대 40 m를 제외한 후에 얻어진 값 2787.06 m이다.

**Table 3.** Fracture density of each fracture set

Item	Unit	Set 1	Set 2	Set 3
Number of Fractures		273 (39.3%)	256 (36.9%)	165 (23.8%)
Total vertical length of 16 boreholes	m	2787.06	2787.06	2787.06
Average fracture spacing (s)	m	10.21	10.89	16.89
Average fracture area (l <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>	16.497	22.970	13.005
Average cos(D)		0.222	0.302	0.707
Fracture Density	/m <sup>3</sup>	0.027	0.013	0.006

**2.3.5 불연속면의 틈새크기**

각 시추공의 텔레뷰어 이미지를 대상으로 AperSa프로그램(KAERI & KIGAM, 1999)을 이용하여 균열에 대한 틈새 크기를 계산하였다. AperSa프로그램은 텔레뷰어의 진폭 및 주시 이미지로부터 관찰되는 모든 균열의 틈을 자동으로 계산하는 기능을 가진 프로그램으로서 이를 이용하여 유형별(open, semi-open, closed)로 불연속면의 수선방향으로의 틈의 크기를 계산할 수 있다. 불연속면의 틈새크기 자료중 GL.-40 m를 제외하고 해석을 수행한 결과 3개의 Set 모두 로그정규분포합수를 하고 있음을 알 수 있다(Fig. 6). 이들에 대한 각 Set 별 통계처리 값들은 Table 4에 정리하였다.



**Fig. 6.** Histogram for fracture aperture distribution

**Table 4.** Statistics of the fracture aperture of the type 1 fractures below GL.-40 m (unit: m)

Item	Set 1	Set 2	Set 3
Mean(Aperture)	6.903E-03	9.221E-03	1.009E-02
STD(Aperture)	1.224E-02	3.478E-02	1.934E-02
Mean(Ln(Aperture))	-5.450	-5.462	-5.142
STD(Ln(Aperture))	0.905	1.054	1.041

**2.4 수리특성자료**

연구지역의 수리지질 특성을 파악하기 위하여 조사 시추공 8개 공과 양수정 2개 공에서 수압시험과 장기양수시험을 실시하였다. 또한 9개월에 걸쳐서 이들 조사공들의 지하수위를 계측하였다(김경수, 2000).

지표관측공에서 수행된 수리전도도 산출을 위한 수압시험은 이중패커(double packer)에 의한 방법으로, 압력 1 kg/cm<sup>2</sup>에서 7 kg/cm<sup>2</sup>까지 단계별로 최소한 10분간 정압을 유지하는 상태에서 물을 주입하는 방법으로 수행되었다. 시험 패커간격은 해수면까지는 9 m, 해수면 이하의 심도는 6 m로 수행하였다. 주입시험이 끝나면 주입구를 폐쇄하여 시간에 따른 압력 강하를 측정하였다.

정상류 해석에 있어 Moye(1967)는 방사상 흐름과 구상 흐름의 경계가 시험구간 1/2거리에 형성된다고 가정하므로써 다음과 같은 관계함수를 유도하였으며 이 관계식으로부터 수리전도도를 산출하였다.

$$K = \frac{q}{H_0} \left[ -\frac{1}{2\pi} (1 + \ln(\frac{l}{r_w})) \right] \quad (3)$$

여기에서 q는 주입량 [m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>], l은 시험구간 길이 [m], H<sub>0</sub>는 주입압 [m], r<sub>w</sub>는 공경 [m]이다.

측정오차를 최소화하기 위하여 각 시험 구간 계산 결과의 최소값과 최대값을 제외한 수리전도도의 평균값을 그 구간에서의 대표 수리전도도 값으로 정하였다. Fig. 7은 각 시추공에서 측정된 수리전도도를 누적분포곡선으로 나타내고 이를 직선화하여 반대수지에 그린 것이다.

공동이 들어설 기반암의 유효수리전도도를 보수적인 관점에서 수리적 암반 영역의 수리전도도와 투수성 균열대 영역의 수리전도도를 종합하여 이들의 기하평균을 계산한 결과 5.05 × 10<sup>-9</sup> m/s를 산출하였다. 마찬가지로 유사한 방법으로 수평수벽공에 대하여도 수리시험을 실시한 결과 수평수벽공에 대한 유효수리전도도는 8.56 × 10<sup>-9</sup> m/s로 산출되었다.

### 3. 3차원 균열망의 작성

#### 3.1 균열망 모사

연구지역 3.0 km×5.0 km 범위의 NAPSAC 해석 모델은 공동주위에 직접적으로 분포하는 균열망을 작성하기에는 컴퓨터 용량의 한계 때문에 계산이 불가능하였다. 공동을 포함한 연구지역 전체를 NAPSAC으로 모델링 할 수는 없지만 연구지역에 대해 확률적으로 대표할 수 있는 이방성 수리전도도의 6성분(Kxx, Kyy, Kzz, Kxy, Kyz, Kzx)을 이용하여 연속체 모델링에 입력하면 이방성이 고려된 연구지역의 지하수 유동해석이 가능해진다.

균열망을 작성하는데 필요한 변수는 앞에서 언급한 바와 같이 불연속면 방향성, 간격, 밀도, 길이, 틈새크기 등이 있다. 이 중에서 실제적으로 균열망 작성에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 불연속면의 길이이다. 불연속면 길이는 직접 접근해 얻기는 불가능한 데이터이기 때문에 지표조사에 의한 불연속면 추적길이로부터 유추할 수밖에 없다.

Table 2의 지수분포를 결정하는 변수 중 불연속면 길이의 최소값 및 최대값은 직접 지표로부터 얻은 데이터이므로 영향 변수에서 제외하면 지수분포형태를 결정짓는 지수  $\lambda$ 가 균열망 작성에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 된다. 그러므로 본 연구에서는 각 절리군의  $\lambda$  값을 변경시켜 가면서 현장 자료와 유사한 불연속면 분포특성을 갖는 균열망으로 수정해 나갔다. 지수분포함

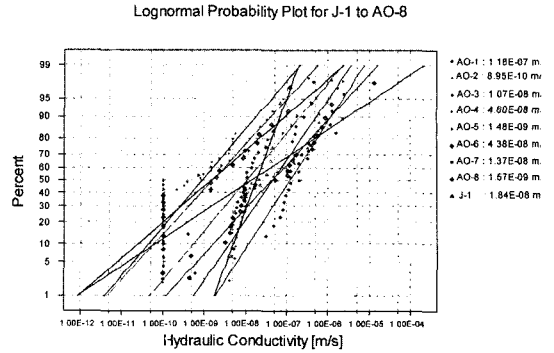


Fig. 7. Log-normal probability plot of the hydraulic conductivities in the boreholes

수 Eq. (1)의 상수 C도 지수  $\lambda$ 의 함수이므로  $\lambda$  값을 조절하면 각 Set별 분포형태를 조절할 수 있다.

초기 균열망은 이전에 확률적으로 대표성이 검증된 seed number(박병윤, 2000)와 NAPSAC에 현장자료를 입력하여 한 변이 100 m인 정육면체 균열망을 구축하였다. 그 다음 수직성분 길이가 100 m인 9개의 코어로깅 선을 설정하고 이 선과 형성된 균열망의 불연속면이 교차된 극점을 스테레오네트에 도시하여 다시 현장 스테레오네트인 Fig. 5와 Set 별로 비교하여  $\lambda$ 를 수정한다. 이러한 과정을 반복하여 최종적으로 작성된 균열망의 스테레오네트는 Fig. 8과 같이 된다.

검층구간 중 고려한 현장 시추공 길이의 수직성분 합계는 2787.06 m이고 여기에서 포착된 스테레오네트에

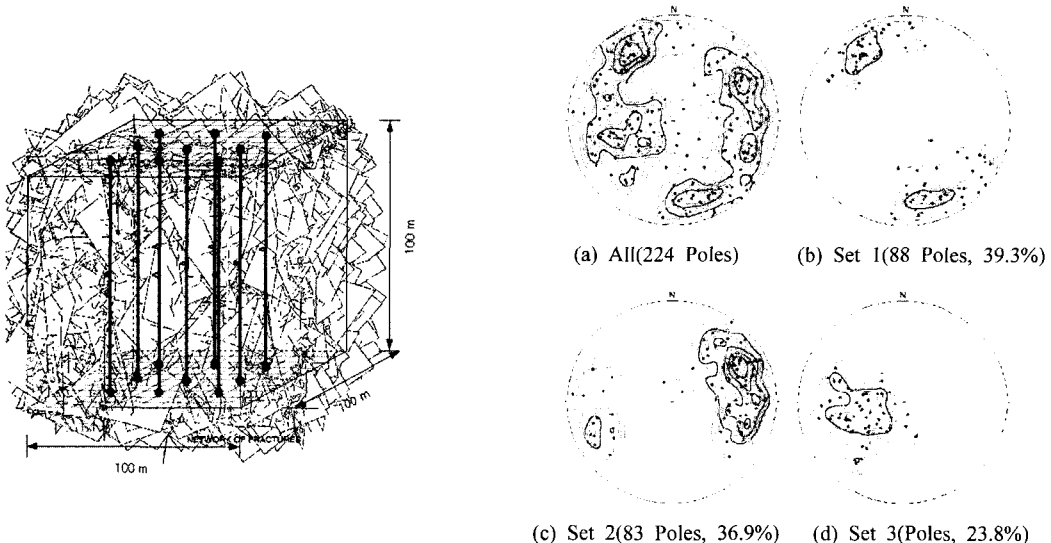


Fig. 8. Stereographic projection of the poles for the fractures of the fracture network generated from in situ fracture data

있는 극점의 수는 694개이다(Fig. 5). 반면에 균열망에 형성된 코어로깅 선 전체길이의 수직성분에 대한 합계는 900 m이고 여기에 포착된 스테레오네트에 있는 극점의 수는 총 224개로 나타났다(Fig. 8). Set 별 극점 수의 비율이 같고 전체적으로 Fig. 5와 유사한 분포를 보이고 있으므로 생성된 균열망은 연구지역 전체를 기하학적인 측면에서 확률적으로 대표한다고 할 수 있다.

### 3.2 이방성 수리전도도의 역산

#### 3.2.1 수리전도도와 투수량계수

기하학적으로 일치된 균열망 암반 블록에 대한 수리전도도를 구하기 위하여 한 변이 50 m인 균열망 블록을 통하여 6성분의 수리전도도를 계산하였다.

NAPSAC에서는 수리전도도를 계산하기 위한 변수로 수리틈새(hydraulic aperture)나 투수량계수(transmissivity) 중 하나의 값을 사용한다. 본 연구에서는 현장에서 계측된 수리전도도를 이용해 투수량계수를 구한 다음 이를 다시 역으로 하여 물리적인 틈새 크기와 수리적인 틈새 크기 사이의 상관성을 이용하여 현장조건에 알맞은 6성분의 수리전도도를 구하였다(박명운, 2000).

유효수리전도도( $K_e$ : effective hydraulic conductivity, [m/s])와 투수량계수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$K_e \cong \frac{T}{s} \quad (4)$$

여기에서  $T$ 는 불연속면들에 대한 투수량계수의 기하평균 [ $m^2/s$ ],  $s$ 는 물이 흐르는 투수성 균열 간격 [m]이다.

유효수리전도도의 기하평균으로부터 투수량계수의 기하평균을 구하기 위하여 로그스케일을 이용하였다. 로그스케일에서는 산술평균과 기하평균 값이 같으므로 측정된 수리전도도 자료에 모두 자연로그를 취하여 산술평균을 구하고 투수량계수 역시 자연로그를 취하여 산술평균을 구하였다. 이 값을 NAPSAC의 입력 자료로 사용했으며, 투수량계수에 대한 분포 옵션은 로그정규분포를 사용하였다. Eq. (4)는 이중패커(double packer)의 간격과 불연속면의 크기가 비슷할 때(즉, 1 fracture/interval) 잘 맞는다고 보고되었다(Hartley, 1998).

#### 3.2.2 이방성 수리전도도와 투수계수

연구지역에서 수행한 수리시험의 이중패커 간격과 불연속면의 크기가 비슷하게 하기 위하여 시추공과 수벽공의 수리전도도 계산결과를 입력조건으로 하는 반복 계산을 수행하여 보정하였다. Table 5는 현장에서 측정

**Table 5.** Finally modified six components of hydraulic conductivity and principal hydraulic conductivities [unit: m/s]

Components (m/s)	Borehole Data	Water curtain hole data
Kxx	4.37E-09	8.19E-08
Kyy	5.11E-09	7.82E-08
Kzz	6.31E-09	1.11E-08
Kxy	-7.12E-10	-1.16E-09
Kyz	-1.36E-09	-1.44E-09
Kxz	-4.44E-10	-7.02E-11
GeoMean(K)	5.0485E-09	8.56E-09

한 유효수리전도도와 일치하도록 반복 계산을 수행하여 최종적인 6성분의 수리전도도를 보인 것이다. 그러므로 이 값을 적용한 균열망은 기하학적 및 수리학적으로 현장조건과 일치한다고 할 수 있다. 각 성분별 수리전도도 값에 상온(20°C)의 중력과 동점성계수의 비 ( $g/\nu$ )  $1.0224 \times 10^{-7} m^2/s$ 를 나누어주면 각 성분별 고유투수계수를 구할 수 있으며, 이 값은 3차원 연속체 모델링 NAMMU의 입력자료로도 사용되었다.

## 4. 광역규모 다공성 연속체 모사

3차원 균열망으로부터 계산된 6성분의 수리전도도를 이용하여 연구지역의 복잡한 산악지형의 특징이 반영된 연속체 모델링을 수행하였다. 모델링을 통하여 상부 지하수위 변화에 따른 지하공동에서 지표까지 지하수의 유동경로, 유동거리 및 소요시간을 계산하였다.

### 4.1 연속체 모델 개요

공동이 굴착될 위치를 기준으로  $6.0 km \times 5.0 km \times 1.3 km$ 의 해석영역(Fig. 9)을 설정하였으며 경계조건 문제를 해결하기 위하여 바다쪽으로 북쪽과 동쪽 경계 범위를 확장하여 설정하였다. 해석모델에는 6개의 지하공동을 포함시켰으며, 공동의 폭은 20 m, 높이는 30 m, 길이는 400 m로 하였고 모든 지하공동의 심도는 EL.-30 m에서 EL.-60 m에 위치하도록 하였다. 격자의 수는  $56 \times 57 \times 14$ 개로 총 요소(element)수는 44,688개이며, 총 노드(node)수는 49,590개이다(Fig. 10).

모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 이미 건설된 인접한 지하공동시설로부터 계측된 지하수 유입량과 해석 모델로부터 계산된 공동으로의 유입량을 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였다.

상부지하수위 변화에 따른 유입량의 변화를 파악하기

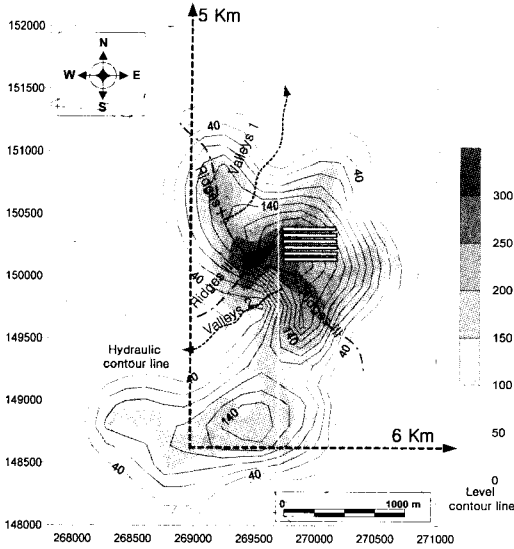


Fig. 9. Area for the modeling

위하여 일반적인 평수기 수두조건에 의한 지하공동내 유입량과 갈수기와 풍수기에 의한 유입량의 변화를 분석하였으며 이를 위하여 상부수두조건을  $\pm 10\%$ 로 가정하고 이를 상부지하수두에 적용하였다. 이는 2.1 절에서 언급한 바와 같이 연구지역의 지형 및 수계조건을 고려하여 가정한 것이다.

4.2 계산 결과

4.2.1 평수기의 유입량 예측

Table 6은 공동굴착후의 일반적인 상태 즉, 평수기때 공동으로 흘러드는 지하수 유입량을 계산한 결과이고 Fig. 11은 공동굴착후의 지하수위 변화 양상을 보인 단면이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체공동을 중심으로 북쪽으로 그리고 서쪽으로 갈수록 상부지하수두가 높기 때문에 상부지하수두가 높은 공동으로 갈수록 더 많은 지하수가 유입되고 있다. 이는 연속체 모델링에 사

Table 6. Calculated total inflow into the caverns at normal season

Caverns	Total inflow (m <sup>3</sup> /day)	
	Borehole	Water curtain hole
Cavern 1	97.31	102.17
Cavern 2	103.63	108.81
Cavern 3	106.86	112.21
Cavern 4	107.69	113.07
Cavern 5	108.62	114.06
Cavern 6	113.47	119.14

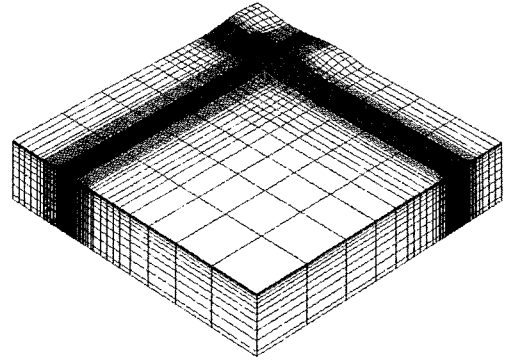


Fig. 10. Finite element model mesh

용된 해석 프로그램인 NAMMU의 지배방정식에서 수두압력과 유입량이 비례관계에 있기 때문이고, 이러한 지배방정식이 모델링에 잘 반영되었다고 할 수 있다.

4.2.2 갈수기의 유입량 예측

Table 7은 공동굴착후의 연구지역의 지형 및 수계조건을 고려하여 갈수기시의 지하수 유입량을 계산하기 위하여 상부지하수두를 전체적으로 10% 하향조정하여 모델링을 실시한 결과이다. 여기에서도 마찬가지로 전체공동을 중심으로 상부지하수두가 높은 공동으로 갈수록 더 많은 지하수가 유입되고 있다. 평수기시의 공동내 지하수 유입량과 갈수기시의 공동내 유입량을 비교해 보면 평균적으로 대략 9%의 유입량의 차이를 보이고 있다. 이는 상부 지하수두의 변화인 10%와 거의 유사한 차이임을 알 수 있다.

4.2.3 풍수기의 유입량 예측

풍수기 역시 갈수기와 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다. Table 8은 공동굴착후의 연구지역의 지형 및 수계조건을 고려하여 풍수기시의 지하수 유입량을 계산하기 위하여 상부지하수두를 전체적으로 10% 상향

Table 7. Calculated total Inflow into the caverns at dry season

Caverns	Total inflow (m <sup>3</sup> /day)	
	Borehole	Water curtain hole
Cavern 1	88.55	92.97
Cavern 2	94.30	99.01
Cavern 3	97.26	102.11
Cavern 4	98.00	102.90
Cavern 5	98.85	103.79
Cavern 6	103.25	108.41



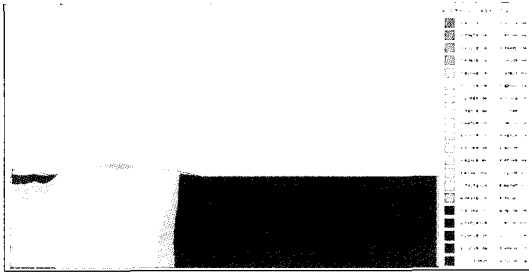


Fig. 11. Variation of hydraulic head after the cavern excavation

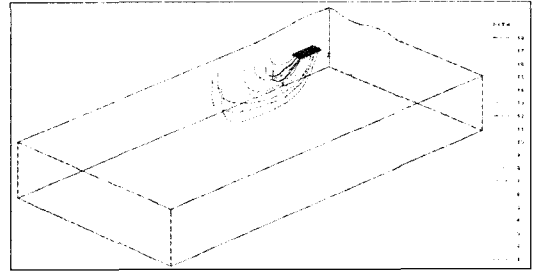


Fig. 12. The six flow paths from the caverns floor to the surface

조정하여 모델링을 실시한 결과이다. 여기에서도 마찬가지로 전체공동을 중심으로 상부지하수두가 높은 공동으로 갈수록 더 많은 지하수가 유입되고 있다. 펌수기시의 공동내 지하수 유입량과 풍수기시의 공동내 유입량을 비교해 보면 평균적으로 대략 13%의 유입량의 차이를 보이고 있다. 이는 상부 지하수두의 변화인 10%와 유사한 차이임을 알 수 있다.

4.2.4 유동거리 및 시간

3차원 다공성 연속체 모델로부터 지하공동에서 상부 지표까지 지하수의 유동경로, 유동길이 및 소요시간을 계산하여 그 결과를 해석하였다. 유동경로는 6개 공동의 양쪽 막장과 중앙 3지점씩 총 18지점을 선택하여 공동바닥에서 상부지표까지의 유동경로, 유동길이 및 소요시간을 계산하였다. 모델링은 그라우팅에 의한 차수효과를 감안하지 않고 실시하였다.

이러한 과정을 통하여 산출된 지하공동 바닥에서 상부 지표까지 지하수의 소요시간을 정리하면 Table 9와 같다. 여기에서도 유입량의 변화와 마찬가지로 유사한 변화를 보임을 알 수가 있는데, 서쪽으로 갈수록 그리고 북쪽으로 갈수록 지하수의 유동시간은 길어지고 있다. 이는 서쪽으로 갈수록 북쪽으로 갈수록 상부지하수두가 높기 때문이다. 공동에서 상부지표까지 유동시간

을 비교해 보면 펌수기에 비해 갈수기에는 약 8.7%, 풍수기에는 약 12.5%의 유동시간 차이를 보였다. 이는 상부지하수두를 ±10% 상·하향 조정한 것과 거의 유사한 변화를 보임을 알 수 있다.

각 공동별 지하공동 바닥에서 상부지표까지의 유동경로에 따른 유동길이를 계산하여 정리하면 Table 10과 같다. 유동길이의 변화 역시 유사한 변화를 보임을 알 수가 있었다. 마찬가지로 서쪽으로 갈수록 북쪽으로 갈수록 유동길이는 커지고 있다. 이도 역시 상부지하수두의 차이 때문인 것으로 파악할 수 있다. 공동에서 상부 지표까지 유동길이를 비교해 보면 펌수기에 비해 갈수기에는 약 8.6%, 풍수기에는 약 13%의 유동길이의 차

Table 8. Calculated total Inflow into the caverns at rainy season

Caverns	Total inflow (m <sup>3</sup> /day)	
	Borehole	Water curtain hole
Cavern 1	109.96	115.45
Cavern 2	117.10	122.95
Cavern 3	120.76	126.80
Cavern 4	121.68	127.76
Cavern 5	122.74	128.88
Cavern 6	128.21	134.61

Table 9. Travel time(years) of each caverns at each seasons

Path	Normal Season		Dry Season		Rainy Season	
	Borehole	Wct_H	Borehole	Wct_H	Borehole	Wct_H
1	27514	29001	25312	26681	31090	32771
2	4099	4320	3771	3975	4632	4882
3	148	156	136	144	168	177
4	34567	36436	31802	33521	39061	41172
5	6115	6446	5626	5930	6910	7284
6	175	185	161	170	198	209
7	39179	41297	36045	37993	44273	46666
8	9339	9843	8592	9056	10553	11123
9	729	768	671	707	824	868
10	44652	47065	41080	43299	50456	53183
11	11082	11681	10195	10746	12522	13199
12	1042	1098	959	1010	1177	1241
13	47803	50387	43978	46356	54017	56937
14	12214	12874	11237	11844	13802	14548
15	2533	2670	2330	2456	2862	3017
16	46984	49523	43225	45561	53092	55961
17	11497	12119	10577	11149	12991	13693
18	2158	2274	1985	2092	2438	2570

**Table 10.** Path length (m) of each caverns at each seasons

Path	Normal Season		Dry Season		Rainy Season	
	Borehole	Wct_H	Borehole	Wct_H	Borehole	Wct_H
1	4542	4788	4179	4405	5132	5410
2	2184	2302	2010	2118	2468	2602
3	880	928	810	853	994	1048
4	4749	5006	4369	4605	5366	5656
5	2501	2636	2301	2425	2826	2979
6	933	983	858	905	1054	1111
7	4922	5188	4528	4773	5562	5862
8	2838	2991	2611	2752	3207	3380
9	1283	1352	1180	1244	1450	1528
10	5032	5304	4629	4880	5686	5994
11	2979	3140	2740	2888	3366	3548
12	1354	1428	1246	1314	1531	1613
13	5044	5317	4641	4891	5700	6008
14	3055	3220	2811	2963	3452	3639
15	1655	1744	1523	1605	1870	1971
16	4974	5243	4576	4824	5621	5925
17	2992	3154	2753	2902	3381	3564
18	1530	1613	1408	1484	1729	1823

이를 보였다. 역시 상부지표수두를  $\pm 10\%$  상·하향 조정 한 것과 거의 유사한 변화를 보임을 알 수 있다.

Fig. 12는 각 공동에서 상부지표까지의 유동경로의 형상을 보여주고 있다. 각 유동경로는 일반적인 지하수 유동경로 형상인 U모양을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 지하원유비축시설지구를 중심으로 지표조사, 시추조사, 수리시험 자료 등을 기초로 3차원 균열망 모델을 모사하고 이를 통하여 이방성 수리전도도를 역산하였으며 역산된 이방성 수리전도도를 다공성 연속체 수치 모델링에 입력하여 모델링을 수행하였다. 이를 통해 현장에서 구해진 수리전도도와 모델에서 구해진 수리전도도를 비교 분석함으로써 수리전도도의 신뢰성을 검토하였고, 교정된 모델을 이용해 수리전도도와 상부지표수두의 변화에 따른 지하공동내 유입량을 예측하고 지하공동에서 상부지표까지의 유동시간과 유동경로를 예측하였다.

1) 3차원 균열망 모사를 통하여 해석대상 부지에 대한 기하학적 측면에서 확률적으로 해석영역 전체를 대표할 수 있는 균열망을 작성하였다. 3차원 균열망 모델을 통하여 역산된 6성분의 이방성 수리전도도는

현장의 수리전도도를 비교 분석함으로써 산출하였다.

- 2) 조사 시추공의 유효수리전도도 값은  $5.05 \times 10^{-9}$  m/s 이었으며 3차원 균열망 모델을 통하여 시행착오법으로 역산된 6성분의 이방성 수리전도도값은 각각  $4.37 \times 10^{-9}$  m/s,  $5.11 \times 10^{-9}$  m/s,  $6.32 \times 10^{-9}$  m/s,  $-7.12 \times 10^{-9}$  m/s,  $-1.36 \times 10^{-9}$  m/s,  $-4.44 \times 10^{-9}$  m/s 이었다. 그리고 수평 수벽공의 수리전도도값은  $8.56 \times 10^{-9}$  m/s 이었으며 3차원 균열망 모델을 통하여 시행착오법으로 역산된 6성분의 이방성 수리전도도는 각각  $8.19 \times 10^{-8}$  m/s,  $7.82 \times 10^{-8}$  m/s,  $1.11 \times 10^{-7}$  m/s,  $-1.16 \times 10^{-8}$  m/s,  $-1.44 \times 10^{-9}$  m/s,  $-7.02 \times 10^{-11}$  m/s 이었다.
- 3) 정상류 상태(평수기)의 지하수 유동과 우리나라의 기상여건을 고려하여 상부지표수두를  $\pm 10\%$  상·하향 조정하여 갈수기와 풍수기시의 지하수 유동에 대한 수치모델링을 실시한 결과 평수기, 갈수기, 풍수기때의 지하공동내 지하수 유입량은 전체적으로 비례관계에 있음을 알 수 있었다. 이는 연속체 모델링에 사용된 해석 프로그램인 NAMMU의 지배방정식에서 수두압력과 유입량이 비례관계에 있기 때문이고, 이러한 지배방정식이 모델링에 잘 반영되었다고 할 수 있다.
- 4) 지하공동에서 오염물이 누출되었을 경우를 가정하여, 지하공동 바닥에서 상부지표까지의 오염물의 유동시간 및 유동경로를 평수기, 갈수기, 풍수기로 분리하여 해석을 실시하였다. 여기에서도 역시 마찬가지로 평수기, 갈수기, 풍수기시의 오염물의 유동시간 및 유동경로는 서로 비례관계에 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 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.
2. Dershowitz, W., 1995, Interpretation and synthesis of discrete fracture orientation, size, shape, spatial structure and hydrologic data by forward modeling in fractured and jointed rock masses. In: Myer, L.R., Tsang, C.F. (Eds), Proceedings of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, California, USA, June 3-5, 1992. A.A. Balkema, Rotterdam, 579-586.
3. Hartley, L.J., 1996, CONNECTFLOW (Release 1.0) User Guide, AEA Technology, Waste Environmental Group, AEAT-0527.
4. Hartley, L.J., Herbert, A.W., Wilcock, P.M., 1996, NAPSAC

(Release 4.0) Summary Document, AEA Technology, AEA-D&R-027.

5. Hartley, L.J., 1998, NAPSAC (Release 4.1) Technical Summary Document, AEA Technology, AEA-D&R- 0271.
6. Hartley, L.J., Jackson, C.P., Watson, S.P., 1996, NAMMU (Release 6.3) User Guide, AEA Technology, AEA-ES-0138.
7. Golder Assoc. Inc., 1998, Fracman-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation (Version 2.603).
8. Moye, D.G., 1967, Diamond Drilling for Foundation Exploration, Civil Eng. Trans., Institution of Eng., Australia, Vol. CE9, No.1, 95-100.
9. Priest, S.D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, First Edition, Chapman & Hall.
10. Terzaghi, R., 1965, Source of Error in Joint Surveys, Geotechnique, Vol. 15, 287-304.
11. 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 충남대학교대학원 박사학위 논문, 212p.
12. 박병운, 2000, 화산암질 암반에서의 공동굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 3차원 수치모델 해석, 서울대학교대학원 박사학위 논문, 250p.
13. 엘지엔지니어링(주), SK건설(주), 1999, U-1 추가비축기지 조사설계용역 지질조사보고서.
14. KAERI & KIGAM, 1999, AperSa-Aperture Size Analysis Program(등록번호 99-01-12-4266).

**강재기**



2001년 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사  
2003년 전남대학교 대학원 자원공학과 석사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: 71001423@hanmir.com  
현재 전남대학교 대학원 자원공학과 박사과정

**양형식**



1979년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

**김경수**



1986년 충남대학교 이과대학 해양학과 이학사  
1989년 충남대학교대학원 지질학과 이학석사  
2000년 충남대학교대학원 지질학과 이학박사

Tel: 042-868-2365  
E-mail: kskim@kaeri.re.kr  
현재 한국원자력연구소  
심부지질환경특성연구분야 책임연구원

**김천수**



1972년 서울대학교 이과대학 지질학과 이학사  
1977년 Univ. Missouri-Rolla 이학석사  
1984년 McGill Univ. 이학박사

Tel: 042-868-2063  
E-mail: ncskim1@kaeri.re.kr  
현재 한국원자력연구소  
심부지질환경특성연구분야 책임연구원