

## 통계적 접근법에 의한 불연속암반의 지하수 유동해석\*

장현익<sup>1)</sup> · 장근무<sup>2)</sup> · 이정인<sup>3)</sup>

### Groundwater flow analysis of discontinuous rock mass with probabilistic approach

Hyun-Ick Jang, Keun-Moo Chang and Chung-In Lee

**ABSTRACT** A two dimensional analysis program for groundwater flow in fractured network was developed to analyze the influence of discontinuity characteristics on groundwater flow. This program involves the generation of discontinuities and also connectivity analysis. The discontinuities were generated by the probabilistic density function (P.D.F.) reflecting the characteristics of discontinuities. And the fracture network model was completed through the connectivity analysis. This program also involves the analysis of groundwater flow through the discontinuity network. The result of numerical experiment shows that the equivalent hydraulic conductivity increased and became closer to isotropic as the density and trace length increased. And hydraulic head decreased along the fracture zone because of much water-flow. The grouting increased the groundwater head around cavern. An analysis of groundwater flow through discontinuity network was performed around underground oil storage cavern which is now under construction. The probabilistic density functions(P.D.F.) were obtained from the investigation of the discontinuity trace map. When the anisotropic hydraulic conductivity is used, the flow rate into the cavern was below the acceptable value to maintain the hydraulic containment. But when the isotropic hydraulic conductivity is used, the flow rate was above the acceptable value.

## 1. 서 론

지속적인 경제성장에 따른 에너지의 안정적인 공급을 위해서 국내에서도 이미 세계적 규모의 원유 및 LPG 지하비축 시설이 건설 또는 운영 중에 있으며 현재 10기의 원자력발전소가 운영 중에 있는 만큼 중저준위 방사성폐기물 지하처분시설의 건설과 고준위 방사성폐기물 처분장의 안정적인 운영을 위한 본격적인 연구가 기대되고 있다. 이러한 구조물은 지하수 유동에 매우 민감한 특성을 가지고 있으므로 시설의 안정적인 운영을 위해서는 구조물의 역학적 안정성에 대한 연구뿐만 아니라 암반의 수리공학적 측면에서의 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

지하수 흐름에 대한 연구는 주로 석유공학, 수리지질

학 분야에서 진행되어 왔으며 최근 들어서는 실험실 및 현장실증실험을 통해서 불연속면의 밀도, 간격, 길이, 틈새크기, 거칠기 등의 역학적 특성을 고려한 암반공학적 측면에서의 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.<sup>1-3)</sup> 이와 더불어 수치해석을 통한 공동주위 암반의 지하수 유동 연구도 활발히 진행되고 있다. 현재까지의 수치해석 방법에 의한 지하수 유동연구는 암반을 등가다공성 매체(Equivalent Porous Media), 이중공극 매체(Dual Porous Media), 그리고 불연속면 연결망(Discrete

\* 이 연구는 한국학술진흥재단 '94신진연구인력 연구장려금지원사업에 의한 것이다.

1) 학생회원, 서울대학교 자원공학과 박사과정

2) 정회원, 한국원자력연구소 환경관리센터 구조공학실 선임연구원

3) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

Fracture Network)을 모델화하는 세 가지 모형으로 분류할 수 있다.<sup>7-9)</sup>

이 연구에서 사용한 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석 방법은 결정질 암반의 지하수 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 불연속면이라는 개념에 근거하여 먼저 불연속면의 방향, 간격, 길이, 간극을 표현할 수 있는 확률밀도함수를 설정하고 이에 근거하여 불연속면을 발생시키고 불연속면 연결망을 구성한다. 지하수 유동해석은 해석적인 방법이나 유한요소법, 경계요소법 등을 이용한다.<sup>7,11)</sup> Samaniego 등<sup>4)</sup>은 2차원 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석 프로그램을 개발하여 불연속면 특성인자가 지하수 유동에 미치는 영향과 불연속면의 등가수리전도도 계산에 적용하였다. 그리고 J. C.S Long, J.P. Chiles 등<sup>5)</sup>은 2차원 해석에서의 불연속면의 연결성 해석의 제약을 극복하기 위해 불연속면을 원형평판으로 간주한 3차원 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석을 수행하였다. 최근에는 보다 실제에 근접한 불연속면 연결망을 구성하기 위해 토모그래피 결과를 이용한 불연속면 연결망 구성이나 파쇄대의 표현 기법에 대해서도 다양한 연구<sup>6)</sup>가 진행되고 있다.

이 연구에서는 불연속면이 지하수의 유동에 미치는 영향을 규명하기 위해 일정한 분포를 가지는 불연속면의 특성인 발생빈도, 추적길이, 방향, 틈새의 크기를 통계적 방법으로 발생시켜서 불연속면들을 임의로 만들고 연결도해석을 한 후 불연속면연결망을 형성하여 지하수유동해석을 실시하는 프로그램을 만들었다. 이 프로그램을 이용하여 각 불연속면의 특성을 변화시켜가면서 등가수리전도도의 변화양상을 살펴보고 지하수 유동해석을 실시하여 공동으로 유입되는 유량을 계산하였으며 원유비축기지의 불연속면자료를 이용하여 수리안정성 해석을 실시하였다.

## 2. 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석 방법

이 연구에서는 개개 불연속면의 특성중에서 중요한 변수가 되는 것을 통계적 해석을 통하여 분석하고 이것을 바탕으로 컴퓨터 프로그램으로 재현하였다. 여러 연구자들의 연구에 의하여 불연속면이 가지는 특성을 분석해 본 결과 일정한 분포를 가진다는 것이 알려져 있다. 암반벽면이나 보어홀벽면의 불연속면을 조사해본 결과, 불연속면이 생성되는 중심은 포아송 분포를 이루

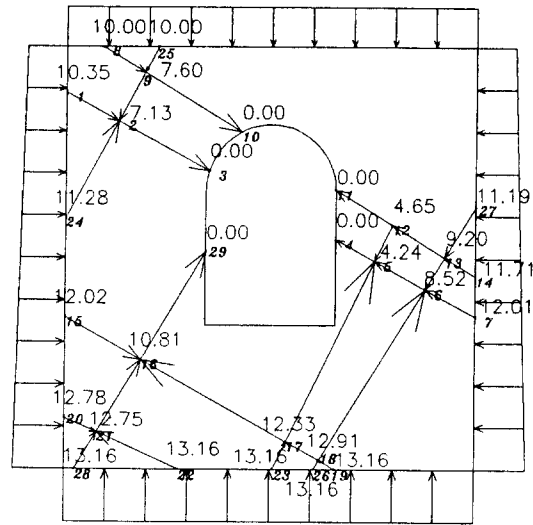


Fig. 1. View of discontinuities, flow direction and boundary head.

Table 1. Properties of two discontinuity sets in Fig. 1

Set number		set 1	set 2
Properties			
Density		0.4	0.4
Trace Length(m)	average	2.5	2.2
	variance	0.1	0.09
Orientation (degree)	average	150	60
	variance	2.5	2.5
Aperture (nm)	average	0.7	0.51
	variance	0.04	0.04

면서 발생하고 불연속면의 추적길이는 음지수적인 분포 또는 로그-정규분포를 가지면서 발생하며 불연속면의 방향은 정규분포나 fisher분포를 가지고 발생하고 불연속면의 틈새의 크기는 일반적으로 정규분포를 따르는 것으로 조사되었다. 불연속면의 특성 중에서 중요한 변수는 앞에서 언급한 불연속면의 중심의 위치, 추적길이, 방향, 틈새의 크기이며 이를 바탕으로 각 분포함수를 이용하면 불연속면을 임의로 생성시킬 수 있다. 이렇게 발생한 불연속면을 이용하여 지하수 유동해석을 하기 위해 연결도 해석을 하게 되는데 연결도 해석은 먼저 불연속면간의 교차점을 찾고 교차점이 존재하지 않거나, 교차점이 하나뿐이거나 경계와 만나지 않는 불연속면을 제거함으로써 이루어진다.

Fig. 1은 Table 1의 조건을 가지고 폭 1 m, 높이 1.5

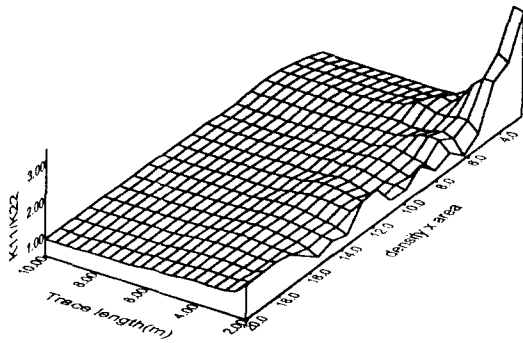


Fig. 2. Influence of trace length and density  $\times$  area on K11/K22.

m인 공동이 있는 가로, 세로 3.16 m의 영역에 불연속 면들을 발생시킨 다음 연결도 해석을 하고 적당한 경계 조건을 설정하여 구한 각 점의 수두를 보여준다.

### 3. 불연속면 연결망 모델의 수리특성에 영향을 미치는 인자 고찰

수리전도도는 불연속면의 길이, 불연속면의 발생 빈도, 영역의 크기 등에 의해서 영향을 받는다. 이 장에서는 여러 가지 인자들이 수리전도도에 어떤 영향을 주는 가를 알아 보기 위해 인자들을 변화시켜가면서 수리전도도의 변화를 알아보았다.

#### 3.1 불연속면의 밀도와 추적길이에 의한 영향

불연속면의 추적길이와 밀도(Areal Density)와 해석대상지역 넓이의 곱을 변화시켜가면서 K11/K22의 변화 양상을 알아보았다. 여기서  $K_{ij}$ 는 j방향으로 수두의 차이가 있을 때 i방향의 수리전도도를 나타내며 1은 수평방향, 2는 수직방향을 가리킨다. 결과를 보면 Fig. 2에서와 같이 추적길이와 밀도와 해석대상지역 넓이의 곱이 작은 값일때는 K11/K22의 값이 3이상이지만 추적길이가 4m이상, 밀도와 해석대상지역 넓이의 곱이 약 8이상일때는 K11/K22값이 1로 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 추적길이와 밀도와 해석대상지역 넓이의 곱이 증가하면 연결도가 증가하므로, 연결도가 증가하면 K11과 K22의 값이 같아진다는 것을 알수있다.

#### 3.2 해석영역의 크기에 의한 영향 (REV)

REV란 대표요소체적(Representative Elementary

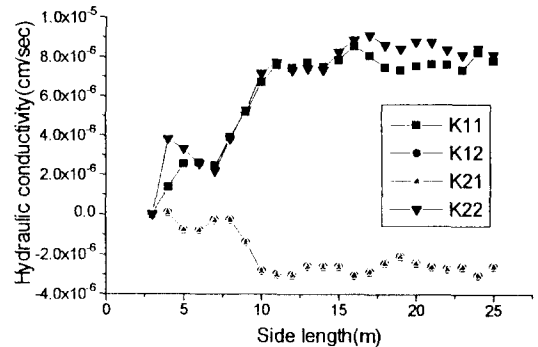


Fig. 3. Influence of volume on hydraulic conductivity tensor.

Volume)으로 체적(2차원의 경우는 넓이)을 증가시키면서 등가수리전도도를 계산할 때 더 이상 전도도의 변화가 없어지기 시작하는 체적(또는 넓이)을 말한다. 그러므로 REV이하의 체적이나 넓이에서 구한 수리전도도의 값은 해석대상지역의 넓이를 크게 하여 구한 수리전도도값과 큰 차이를 보이므로 믿을 만한 것이 되지 못한다. 현장적용을 위해서는 REV를 구하여 계산에서 구한 수리전도도의 값이 신뢰감을 줄 수 있게 해야 한다.

해석방법은 밀도와 추적길이를 일정값으로 하고 해석대상지역의 넓이를 증가시키면 된다. 이 연구에서는 밀도를 0.1, 추적길이를 4 m로 고정한 다음 해석지역 가로, 세로의 길이를 3 m에서 25 m까지 증가시키면서 해석을 하였다. Fig. 3에서와 같이 K11, K12, K21, K22가 일정한 넓이에서 수렴하는 경향을 보이는데 10 m부근에서 K11이  $8.0 \times 10^{-6}$  m/sec으로 수렴하였다.

#### 3.3 그라우팅과 파쇄대에 의한 영향

터널공사중 공동으로의 유입유량이 많으면 공사하기도 어려운 뿐만 아니라 다른 여러 가지 문제를 일으킬 수 있다. 이때 그라우팅을 실시하여 공동부근의 불연속면의 틈새를 작게 하여 유입량을 줄이는 방법을 사용한다. 그러므로 현장적용을 위해서는 그라우팅을 모사하는 것이 필요한데 본 프로그램에서는 그라우팅을 모사하기 위해 공동과 만나는 불연속면을 찾아서 틈새를 감소시키는 방법을 사용하였다. 다른 논문<sup>10)</sup>에 의하면 그라우팅을 실시할 때 수리전도도가 1/30-1/70으로 줄어들므로, 본 프로그램에서는 그라우팅을 실시할때 불연속면의 수리전도도를 1/30로 줄이는 것으로 모사했다. 수리전도도는 불연속면 틈새크기의 세제곱에 비례하

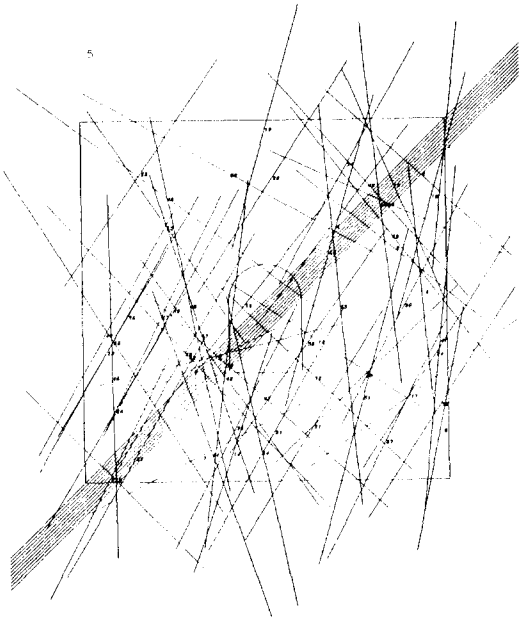


Fig. 4. Generation of fracture network including fracture zone.

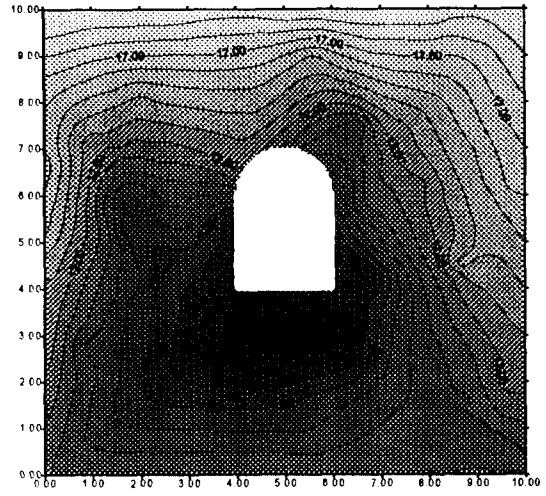
로 그라우팅이 적용되는 불연속면의 틈새가 1 mm이면 1/30의 삼승근인 0.322 mm로 줄어들게 된다.

파쇄대는 물의 흐름에 큰 영향을 미친다. 실제 현장에서 공동으로 유입되는 물의 상당부분은 파쇄대를 통하게 된다. 파쇄대를 고려하기 위해서 틈새가 3 mm인 불연속면 10개를 추가하여 해석하였다. 파쇄대는 공동의 중심을 지나고 수평축과 45°의 각도를 이룬다(Fig. 4).

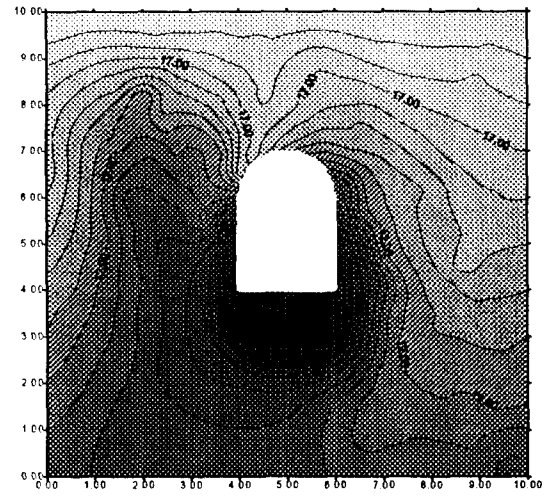
결과를 보면 그라우팅을 하면 파쇄대가 존재하지 않을 때 공동으로 유입되는 유량은 약 60~70% 감소하였고 파쇄대가 있을 때는 약 80~90%가 감소하였으며, 파쇄대가 있을 때가 없을 때보다 40~80배정도 더 많은 물이 유입된다. Fig. 5는 파쇄대가 있을 때 그라우팅을 하기 전과 후의 수두분포를 보여준다. 파쇄대가 있을 때와 없을 때를 비교해 보면 파쇄대 방향으로 물을 많이 통과시키므로 같은 지점에서 수두가 작아지고 파쇄대방향으로 수두구배가 작아진다.

#### 4. 불연속면 연결망 지하수유동 해석모델의 현장적용

##### 4.1 해석대상지역의 설계재원 및 암반공학적 특성이 연구에서 만든 프로그램을 이용하여 해석한 지역



(a)



(b)

Fig. 5. Distribution of groundwater head around the cavern when fracture zone is present (a) before grouting (b) after grouting

은 원유를 저장하는 대규모 지하공동이며 주저장공동, 공사용터널, 연결터널, 수벽터널과 수벽공으로 이루어져 있고, 주저장공동은 6개이다. 3개의 공동씩 2개의 단위로 이루어져 있으며 단위간의 간격은 81m이며 각 단위에서의 공동간의 간격은 35 m이고 해수면기준 -30~-60 m의 심도에 위치하고 있다. 공동상부 30 m에는 인위적인 지하수위 조절을 위하여 수평 수벽공이 설치되어 있다. 지표조사와 갱내 지질도 조사에 의하여 이 지역에서 우세한 불연속면군의 주방향은 N20-40°E와 N70-80°W인 것으로 판명되었다. 경사는 거의

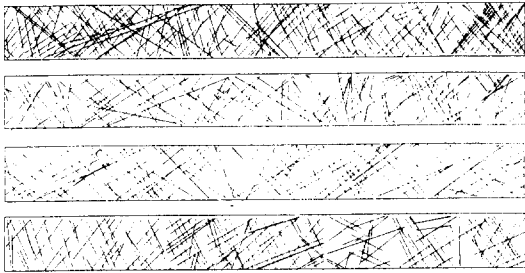


Fig. 6. Discontinuity trace map (Length:93 m, Width: 10 m).

수직한 것으로 나타났으며 자유공동의 방향은 N30°W이다.

#### 4.2 해석모델의 입력변수 및 경계조건 설정

##### 4.2.1 불연속면 군의 방향

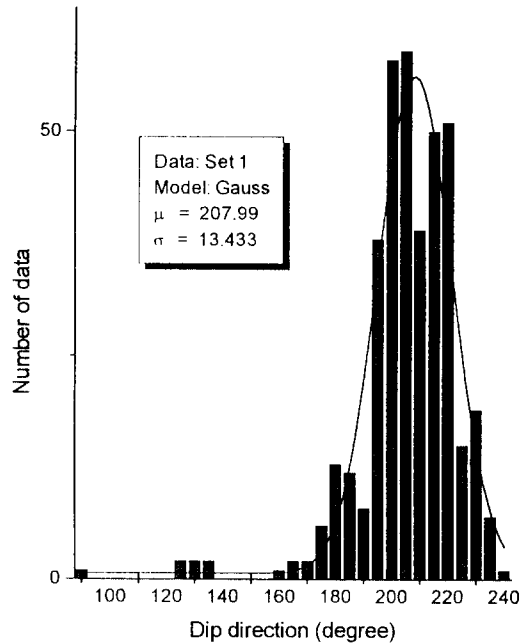
불연속면을 이용한 수리해석에 있어서 가장 먼저 구해야 할 입력변수는 군의 개수를 구하는 것이며 이 연구에서는 Fig. 6과 같이 공동굴착후에 작성한 절리도를 이용하여 군을 나누고 여러 가지 입력변수를 추정하였다.

Fig. 7 (a)는 Set 1의 경사방향을 뿔수분포표로 나타낸 것이며 Fig. 7 (b)는 Set 2의 경사방향을 뿔수분포표로 나타낸 것이다. 경사방향의 평균을  $\mu_{or}$ 라하고 표준편차를  $\sigma_{or}$ 라 하면 Set 1의  $\mu_{or}$ 은 207.99°,  $\sigma_{or}$ 은 13.433°, Set 2의  $\mu_{or}$ 은 113.33°,  $\sigma_{or}$ 은 8.7098°이며 프로그램을 위한 입력변수는 공동의 방향을 고려하여 정한다.

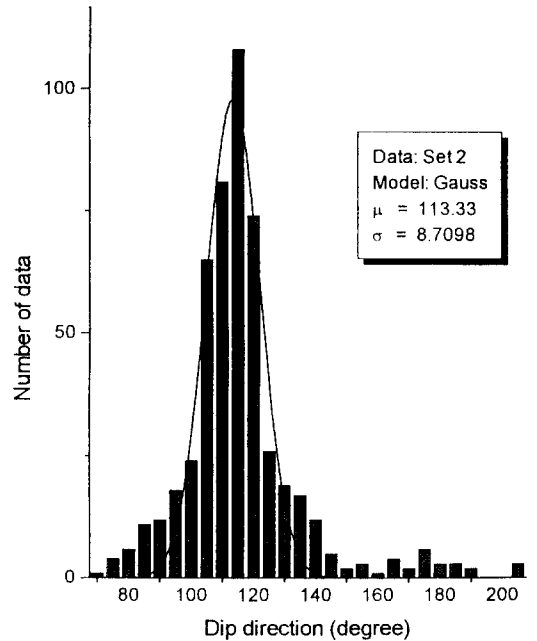
일반적인 2차원 해석에서는 경사를 입력할 필요가 없지만 이 연구에서는 3차원의 불연속면을 만든 다음 그것을 공동축방향을 따라서 절단하여 이 2차원 형상을 가지고 수리해석을 하기 때문에 경사의 입력이 필요하다. 경사의 분포에 대한 조사결과는 알려진 것이 없으므로 분포는 경사방향과 동일하게 정규분포로 가정하였다. 앞에서 설명한 것과 같이 각 군의 경사는 거의 수직으로 각 군에 대해서 경사의 평균을  $\mu_{dip}$ , 표준편차를  $\sigma_{dip}$ 이라 할 때, 2개의 군 모두  $\mu_{dip}$ 은 90°,  $\sigma_{dip}$ 은 10°로 가정하였다.

##### 4.2.2 불연속면 군의 추적길이

Fig. 8은 4.2.1에서 구한 각 군별로 불연속면의 길이를 구하여 히스토그램으로 나타내고 특정한 분포로 추정한 것이다. 결과를 보면 Set 1과 Set 2 모두 음지수 분포인  $\lambda_{exp}(-\lambda_x)$ 로 추정할 수 있으며  $\lambda$  값은 각각 0.06648과 0.08227로 구해진다.  $\lambda$  값의 의미는 불연속



(a)



(b)

Fig. 7. Estimation of mean and variance of dip dir by normal.

(a) for Set 1 (b) For Set 2

면의 길이의 역수이고 추적길이는 불연속면의 길이의 절반이므로 프로그램에서 입력변수로 사용되는 값은

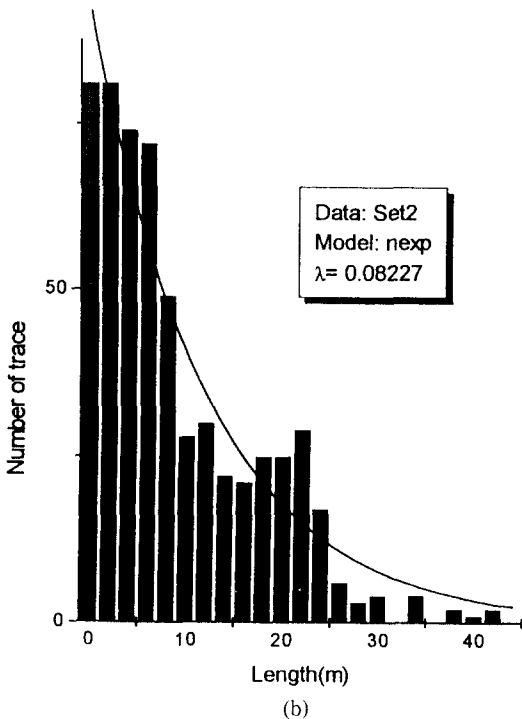
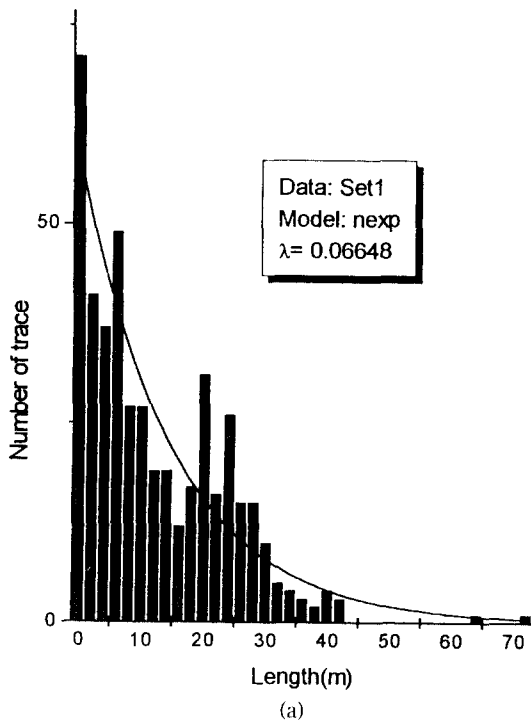


Fig. 8. Histogram and negative exponential fitting curve of trace length  
 (a) For Set 1 (b) For Set 2

Set 1에 대하여  $\lambda$ 는 0.13296, Set 2에 대하여  $\lambda$ 는 0.16454가 된다.

#### 4.2.3 불연속면 군의 밀도

밀도는 면적밀도이므로 각 군을 이루는 불연속면의 개수를 전체면적으로 나누면 얻을 수 있다. Fig. 6에서 구한 불연속면의 개수는 모두 900개인데 Set 1의 개수는 388개이며 Set 2의 개수는 512개이다. 전체면적이  $12928 \text{ m}^2$ 이므로 Set 1의 밀도는 0.03이고 Set 2의 밀도는 0.0396이다.

#### 4.2.4 불연속면 군의 틈새 크기

틈새의 크기를 추정하기 위해서 사용한 방법은 해석대상지역의 밀도와 추적길이를 이용하여 틈새를 변화시켜가면서 해석대상지역에서 양수시험에 의해서 측정된 투수계수에 맞는 적당한 틈새를 찾는 방법을 사용하였다.

양수시험에 의해 측정된 수리전도도 값은 이방성을 나타낸다는 가정에서는 가로방향이  $3.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ , 세로방향은 가로방향의  $1/6$ 크기이다. 앞의 값을 나타내는 2개 군의 틈새크기를 추정한 결과, 틈새의 크기는 로그-정규분포를 따른다고 가정할 때 평균을  $\mu_{ap}$ , 표준편차를  $\sigma_{ap}$ 라 하면 Set 1의  $\mu_{ap}$ 은 0.08 mm, Set 2의  $\mu_{ap}$ 는 0.01 mm로 계산되었다. 표준편차는 추정할 근거가 없기 때문에 틈새크기의 10%값으로 하였으며,  $\sigma_{ap}$ 은 0.008 mm,  $\sigma_{ap}$ 은 0.001 mm로 가정하여 입력변수로 사용하였다. 수리전도도가 등방성을 나타낸다고 가정한다면 가로, 세로방향 모두  $3.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 이고 이때의 틈새크기는 Set 1의  $\mu_{ap}$ 은 0.06 mm, Set 2의  $\mu_{ap}$ 는 0.065 mm로 계산되었다. 표준편차는 10%로 취하였다.

Table 2에는 앞절에서 까지 구한 모든 변수가 나타나 있다.

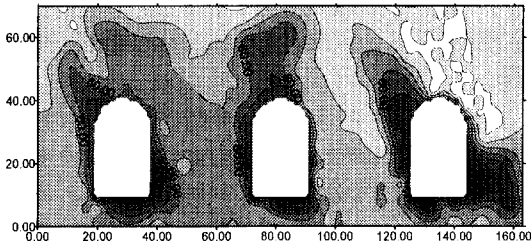
#### 4.2.5 경계 조건

수리해석에서는 경계조건의 문제가 중요한데 경계조건의 형태에는 수두를 직접 주는 것과 물의 흐름이 없는 경계로 줄 수 있는데 이 연구에서 만든 프로그램에서 경계조건은 모두 수두로 주어야 한다. 그러므로 해석대상지역의 상하좌우 모두의 수두를 알아야 한다. 지하수위 값들은 해석대상지역에서 연속체모델을 이용하여 해석한 연구<sup>10)</sup>를 이용하여 해석경계위치에서의 값을 대입하였다. 해석조건은 공동상부 30 m위에 수벽공으로 2 bar의 압력을 주고 공동내부의 압력을 0.5 bar, 1.0 bar, 2.0 bar일 때 3가지 경우에 대하여 계산하였

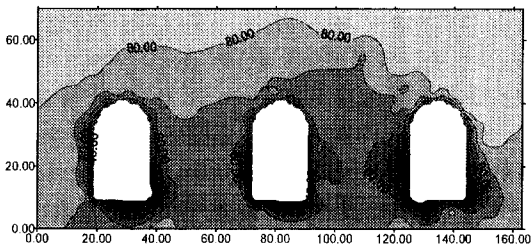
Table 2. Input variables for groundwater flow analysis

	Set 1	Set 2	
Dip Direction (degree)	$\mu_{or}$	207.99	113.33
	$\sigma_{or}$	13.433	8.7098
Dip (degree)	$\mu_{dit}$	90	10
	$\sigma_{dit}$	90	10
Density	0.03	0.0396	
Trace length (m)	$\lambda$	0.13294	0.0396
Aperture (mm)	$\mu_{ap}$	0.08" & 0.06"	0.01" & 0.065"
	$\sigma_{at}$	0.008" & 0.006"	0.001" & 0.0065"

a: anisotropic hydraulic conductivity  
i: isotropic hydraulic conductivity



(a)

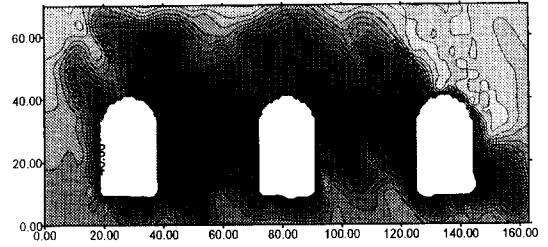


(b)

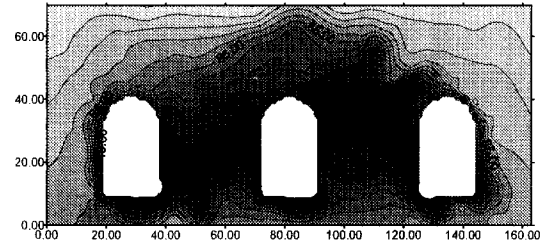
Fig. 9. Distribution of groundwater head around cavern when fracture zone is absent (internal pressure  $P_i=0.5$  bar)

(a) anisotropic (b) isotropic

다. 해석은 공동 6개 가운데 오른쪽 3개의 공동에 대해서 하였고 해석대상지역은 가로 163 m, 세로 70 m이고 하부경계는 공동의 바닥으로부터 10m, 상부경계는 공동의 천장으로부터 30m, 좌우의 경계는 공동과 15m의 거리로 하였다. 파쇄대의 경우 현장보고서에 의하면 N20°E~N70°W방향으로 12개의 단층이 있는 것으로 되어있으나 정확한 위치와 길이에 대한 정보는 없으므로 최악의 경우로 12개의 단층이 3개의 공동을 모두 통과하는 것으로 가정하였으며 틈새의 크기는 1



(a)



(b)

Fig. 10. Distribution of groundwater head around cavern when fracture zone is present (internal pressure  $P_i=0.5$  bar)

(a) anisotropic (b) isotropic

mm로 사용하였다.

#### 4.3 해석 결과 및 분석

Fig. 9는 공동의 내부압력( $P_i$ )이 0.5 bar일 때 파쇄대가 지나가지 않는 단면에서의 수두분포이다. 그림에서 열게 나타나는 부분의 수두가 높다. (a)는 수리전도도가 이방일때이고 (b)는 등방일때의 경우이다. (a)는 등수두선의 분포가 수평면과 평행하지 못하고 많은 변화를 보이는데 이것은 등수두선의 변화가 큰 방향으로 틈새가 다른 것보다 큰 불연속면이 발달했기 때문에 물이 많이 흘러 수두를 많이 낮추기 때문이다. 이와는 다르게 (b)에서는 두 불연속면군의 틈새크기가 비슷하기 때문에 등수두선의 변화가 한 쪽으로 치우치지 않고 공동 주위를 제외한 부분에서 수평면과 평행하게 나타난다 공동주위에서는 양쪽 모두 공동면과 평행한 수두분포를 보이며 공동에서 멀어질수록 수두가 증가한다.

Fig. 10은 공동의 내부압력이 0.5 bar일 때 파쇄대가 지나가는 단면에서의 수두분포이다. 파쇄대는 공동 3개를 모두 통과하고 수평면과 15°의 각도를 이루고 있다. (a)의 경우 Fig. 9(a)와 같이 틈새가 큰 불연속면을 따라서 수두변화가 심하지만 파쇄대의 영향으로 파쇄대 주

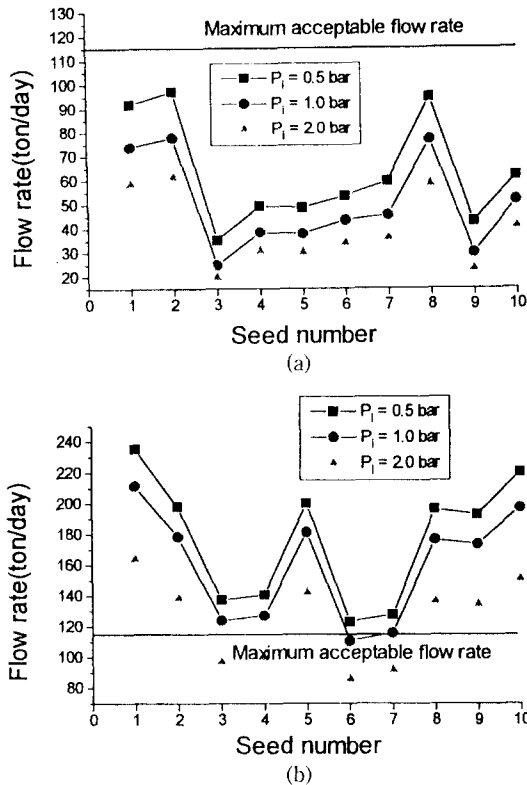


Fig. 11. Flow rate with internal pressure( $P_i$ ) varies, after grouting (a) anisotropic hydraulic conductivity (b) isotropic hydraulic conductivity

위로 아주 많은 물이 흐르므로 파쇄대가 없을 때보다 수두가 낮아졌으며 등고선도 파쇄대를 주위로 형성된다. (b)의 경우 역시 파쇄대 주위로 수두가 낮아지고 파쇄대를 주위로 등고선을 형성하지만 역시 (a)와는 다르게 수두분포가 공동주위를 제외하고 수평면과 평행하다.

Fig. 11은 그라우팅을 했을 때 공동의 내압이 변화에 따라 공동으로 유입되는 유량이 어떻게 변하는가를 보여준다. Fig. 11에서 Seed Number는 난수발생을 위한 초기값을 말하는데 이 값을 바꾸면 계산되는 유량이 변하게 된다.

(a)는 수리전도도가 이방성일 경우이며 (b)는 등방성일 경우이다. (a)의 경우 공동의 내압이 증가함에 따라 공동으로 유입되는 유량은 줄어들었으며 내압이 2.0 bar일 때가 0.5 bar일 때 보다 약 40%정도 유량이 감소했다. 공동의 내압이 다른 세 가지 경우 모두 지하비축기지의

설계단계에서 계산된, 해석부지지역의 수리지질상태가 안정을 잃지 않는 허용누수량인 115 ton/day에 못 미치므로 이 경우는 공동이 안정하다고 할 수 있다. Seed Number를 다르게 하여 10번 경우의 평균을 계산해 보면 내압이 0.5 bar일 때는 65 ton/day, 1.0 bar일 때는 50 ton/day, 2.0 bar일 때는 40 ton/day로 계산되었다. (b)의 경우는 수리전도도가 등방성일 경우이다. 내부압이 증가함에 따라 공동으로 유입되는 유량이 감소하는 것은 (a)와 같지만 계산수량이 내압이 증가함에 따라 각각 180 ton/day, 160 ton/day, 125 ton/day로 허용누수량보다 많은 것으로 계산되었다.

## 5. 결 론

이 연구에서 이루어진 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 불연속면 연결망 모형에서 불연속면의 길이와 밀도가 수리특성에 영향을 미치는 인자에 대한 해석결과, 길이와 밀도가 증가함에 따라서 연결도가 커져서 등방성이 강하게 나타났다.
- (2) 불연속면 연결망 모델에서 그라우팅과 파쇄대가 지하수 유동에 미치는 영향에 대한 해석결과 파쇄대가 존재하는 경우에는 파쇄대를 통한 지하수 유입이 증가하며 파쇄대를 따른 수두변화가 크게 나타났다. 공동주위 암반에 대한 그라우팅은 공동으로 유입되는 유량을 감소시키며 지하수두를 증가시키는 것으로 해석되었다.

(3) 건설 중인 지하원유비축기지의 현장 불연속면에 의한 분석결과, 불연속면 군은 두 개의 군으로 나눌 수 있으며 불연속면 군의 방향에 대한 분포특성은 정규분포를 따르며 추적길이는 음지수분포를 따르는 것으로 해석되었다.

(4) 불연속면의 틈새 분포특성은 로그-정규분포로 가정하고 수리전도도가 등방성과 이방성의 특성을 가진다고 가정하여 현장측정치에 근거하여 각각의 경우에 대하여 계산하였다. 수리전도가 등방성일 경우에 두 불연속면군의 틈새크기는 0.06, 0.065 mm이며, 수리전도도가 이방성일 경우에는 두 불연속면의 틈새의 크기가 0.08, 0.01 mm로 계산되었다.

(5) 공동 상부 30 m에 2 bar의 수벽공이 운영되는 조건에서 공동내부로의 지하수 유입량 계산결과 분석을 통해서 수리전도도가 이방성일 경우에는 유입량이 허용유입량 이하로 계산되어 안정적인 운영이 가능할 것



으로 판단된다. 그러나 수리전도도가 등방성인 것으로 가정할 경우에는 지하수유입량이 허용누수량 이상인 것으로 계산되었다.

(6) 불연속면 연결망 모델은 컴퓨터의 용량한계로 광역의 모델링이 어렵다는 단점을 가지고 있으므로 공동주위의 영역만을 모델링할 수 있다. 그러므로 경계조건의 설정이 대단히 중요한 문제가 되며 시추공내의 압력계이지를 통해서 측정된 수두를 경계조건으로 설정하는 것이 필요하며 이러한 조건이 불가능하다면 등가다공질 매체개념을 이용한 해석을 실시하여 원하는 경계면의 수두를 계산하고 이를 경계값으로 설정하는 것이 유용한 방법으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. C. R. Wilson *et al.*, 1983, Large scale hydraulic conductivity measurements in fractured granite, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 20, No. 6, pp. 269-276
2. A. Makurat, N. Barton *et al.*, 1990, Joint conductivity variation due to normal and shear deformation, *Proc. of the Int. Symp. on rock joints.*
3. Raven, K.G., Novakoeski *et al.*, 1986, Interpretation of field tracer tests of a single fracture using a transient solute storage model, *Water Resources Research*, Vol. 24, pp. 2019-2032
4. J.A. Samaniego, 1985, Simulation of fluid in fractured rock; a probabilistic approach, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology
5. D. Billaux, J.P. Chiles, *et al.*, 1989, Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass- An example from the fanay-Augeres mine, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 26, pp. 281-299
6. Long, J.C.S, K. Karasaki, *et al.*, An inverse approach to the construction of fracture hydrology models conditioned by geophysical data, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 28, pp. 121-142
7. S.D. Priest, 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall
8. J.C. Long, J.S. Remer, C.R. Wilson, P.A. Witherspoon, 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 645-658
9. J.C. Long, 1983, Investigation of equivalent porous medium permeability in networks of discontinuous fractures, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley
10. 장근무, 1995, 지하원유저장 공동주위 암반의 변형거동에 따른 투수계수 변화, *한국자원공학회지*, Vol. 32, No. 2, pp. 103-115
11. 송명규, 1994, 암석절리와 균열망 내에서의 채널흐름에 관한 이론적 수치해석적 연구, *터널과 지하공간*, Vol. 4, pp. 1-16