

## 산악 지역 내 터널 굴착 시 단열 암반 내 지하수 유동 분석

김형수<sup>1)\*</sup>, 이주현<sup>2)</sup>, 안주희<sup>3)</sup>, 안규천<sup>4)</sup>, 윤운상<sup>5)</sup>

### Numerical Analysis of Groundwater Flow through Fractured Rock Mass by Tunneling in a Mountainous Area

Hyoung-Soo Kim, Ju-Hyun Lee, Ju-Hee Ahn, Gyu-Cheon Ahn and Woon-Sang Yoon

**Abstract** Intake of groundwater by tunneling in a mountainous area mostly results from groundwater flow through fractured parts of total rock mass. For reasonable analysis of this phenomenon the representative joint groups 1, 2, and 3 have been selected by previous investigations, geological/geophysical field tests and boring works. Three dimensional fractures were generated by the FracMan and MAFIG which is a three dimensional finite element model has been used to analyse a groundwater flow through fractured media. Monte Carlo simulation was applied to reduce the uncertainty of this study. The numerical results showed that the average and deviation of amounts of groundwater intaked into tunnel per unit length were  $5.40 \times 10^{-1}$  and  $3.04 \times 10^{-1}$   $m^3/min/km$ . It is concluded that tunnel would be stable on impact of groundwater environment by tunneling because of the lower value than 2.00~3.00  $m^3/min/km$  as previous and present standard on the application of tunnel construction.

**Key words** Intake of groundwater, Mountainous areas, Fractured rock mass, Uncertainty

**초 록** 산악 지형 내 터널 굴착에 따른 지하수 유입은 실제 암반 내 발달한 절리 및 파쇄구간을 따라 유동하는 지하수에 의해 발생한다. 이러한 현상을 보다 합리적으로 분석하기 위해 정밀 지반조사, 물리탐사 및 시추 탐사 등의 분석 결과를 토대로 모델영역을 선정하고 대표 절리군 1, 2 및 3을 선택하였다. 3차원 절리망을 생성하기 위해 프로그램(FracMan)을 이용하였고 불확실성을 줄이기 위해 확률적 통계기법 중 하나인 Monte Carlo Simulation을 적용하였다. 수리특성을 파악하기 위해 실시한 불연속면 수리특성 시험, 양수시험 및 수압시험 결과 대표 절리군 1, 2 및 3의 투수량 계수(T)는 각각  $9.60 \times 10^{-6}$ ,  $7.35 \times 10^{-6}$  및  $1.01 \times 10^{-5}$   $m^2/s$ 이었다. 모델 영역의 수리적 초기조건을 파악하기 위해 지하수 연속체 프로그램(Visual MODFLOW)을 병행하여 적용하였다. 지하수 불연속체 프로그램(MAFIC)을 이용하여 해석한 결과, 터널내부의 단위 길이 당 유입량은 평균  $5.40 \times 10^{-1}$   $m^3/min/km$ , 표준편차  $3.04 \times 10^{-1}$   $m^3/min/km$ 로 예측되었다. 이 결과를 토대로 터널 굴착에 따른 광역적인 지하수계 변화를 분석한 결과  $8.64 \times 10^{-2} \sim 2.30 \times 10^{-1}$   $m^3/min/km$ 로 기존 및 본 설계 적용 기준인 3.00 및 2.00  $m^3/min/km$ 의 값보다 낮은 범위로 예측되어 터널 굴착 시 지하수 유입에 따른 공극수압의 변화에 따른 응력 변화가 적어서 터널 구조의 안정성에 미치는 영향이 적을 것으로 분석되었다.

**핵심어** 지하수 유입, 산악 지형, 균열 암반, 불확실성

## 1. 서 론

산악 지형에서 터널 굴착에 따른 주변 지하수계의 변화 양상을 예측하기 위해 다양한 지하수 모델링을 적용하여 수위강하 및 터널 내 유입량 등을 추정한다. 일반적으로 연구지역 전체를 하나의 연속체로 가정하고 지하수 유동을 모의할 수 있는 3차원 유한 차분 모형인 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)를 많이

<sup>1)</sup> (주)넥스지오 지하수 환경팀 팀장

<sup>2)</sup> (주)넥스지오 지하수 환경팀 과장

<sup>3)</sup> (주)넥스지오 지하수 환경팀 사원

<sup>4)</sup> (주)넥스지오 지하수 환경팀 대리

<sup>5)</sup> (주)넥스지오 대표 이사

\* 교신저자 : hskim@nexgeo.com

접수일 : 2006년 4월 20일

심사 완료일 : 2006년 6월 19일

적용하고 있다. 그러나 터널 예상 구간에 분포하는 압반에 대규모 불연속면이 존재하면 연속체만을 고려하는 모델링으로 지하수 유동을 분석하는 데는 한계가 있다. 입력 수리상수를 통한 불연속면의 구현이 어느 정도 가능하나 압반 균열의 크기, 간격, 방향성 등을 정확히 묘사할 수 없기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 터널 예상지역 특정구간 내 대규모 불연속면을 통한 지하수 유동을 분석하기 위해 불연속체를 상세히 묘사할 수 있는 모델링을 적용하였다(이정호 외, 2005).

불연속면과 지하수 유동의 정확한 관계를 분석하기 위해서는 지표면에서의 상세 지표지질조사뿐만 아니라 가능한 많은 시추공에서 터널 심도까지 수직별 암종 상태를 분석 평가하고 구간별 수리 시험 등을 통해 압반 균열의 분포와 균열의 수리적 균열 특성 자료 획득이 필요하나 현실적 한계로 인한 적용성의 한계를 내포하고 있다. 그러나 이러한 한계에도 불구하고 특정지역의 수리적 균열(불연속면)의 특성을 파악할 수 있다.

## 2. 현장 분석

### 2.1 모델영역 선정

연구 지역 내 지표지질조사, 시추주상도, 공내시험 등 불연속면 특성결과를 토대로 앞산터널 시점부(STA. 4 km 800~6 km 800)에 존재하는 N80W/75SW, N40W/70SW의 주향/경사를 보이는 추정단층을 포함하는 영역을 모델영역으로 선정하였다(Fig. 1 참조). 불연속체 모델링 영역은 소류지와 터널 예상 구간을 포함한 100(N-S)×100(E-W)×100(수직) m<sup>3</sup>의 정육면체로 선정하였다. 모델영역은 지표지질조사결과 안산암질류 관입암체가 분포하며 부분적으로 암맥이 협재되어 있었다.

### 2.2 불연속면을 통한 지하수 유동

균열을 통한 지하수의 유동에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 균열의 인장(length), 간극 크기(aperture) 및 분포수(density) 등이 있다. 지하 압반 균열을 통한 지하수 유동은 큰 규모의 단층대나 또는 단층에 의해 주변에 발생하는 인장 균열대를 통해 주로 이루어지나 많은 수의 균열들 중 이러한 지하수 유동이 발생하는 투수성 균열들은 극소수이다. 균열압반을 통한 지하수 유동이 다공질 매질에서의 지하수 유동과 가장 큰 차이점은 다공질 매질이 전체를 통해 이루어지나 불연속체 매질에서는 생성된 균열간의 연결도(connectivity) 측면에서 유동이 발생한다는 점이다. 따라서, 다공질 매질에서는 터널 굴착 등에 따른 인위적 배출 시 대칭적인 수위강하 양상을 나타내지만 불연속면 분포지역에서는 비대칭적이고 불규칙적인 수위강하 결과를 보인다. 일반적으로 다공질 매질 내에서 지하수 유동은 수리구배에 비례하는데 이를 Darcy's law라고 하고 이를 토대로 지하수의 유동속도 식은 다음과 같다(Freeze & Cherry, 1977)

$$V = K \nabla h \quad (1)$$

단,  $K$ 는 수리전도도,  $\nabla h$ 는 수두 구배 차

균열을 통한 지하수의 유동 해석에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 균열의 간극이라고 할 수 있으며 균열을 통한 지하수 유동은 틈새의 3승에 비례한다는 cubic law를 적용한다(Long et al, 1996). 이를 통해 투수량 계수(transmissivity, T)는 다음과 같다.

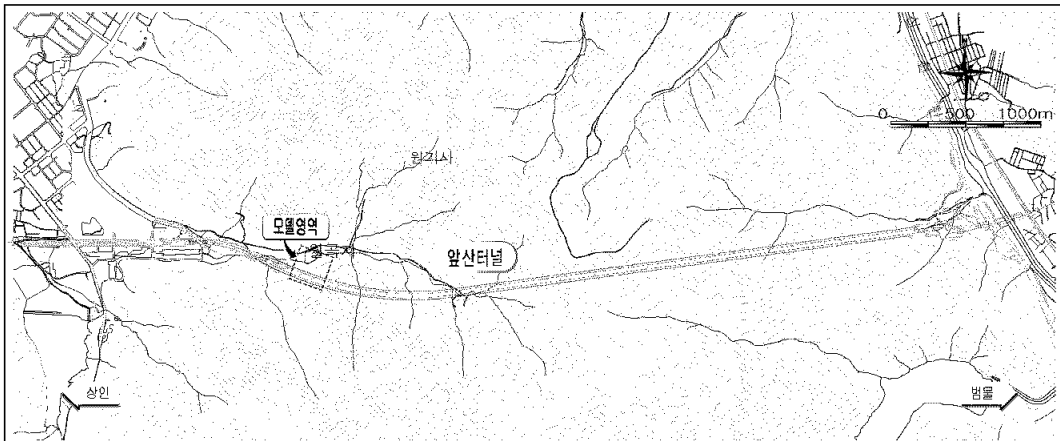


Fig. 1. Model site

$$T = K_f e = k \frac{\rho g}{\mu} e = \frac{e^2}{12} \frac{\rho g}{\mu} e = \frac{\rho g}{12} e^3 \quad (2)$$

$$K_f = \frac{\rho g}{12\mu} e^2 \rightarrow e = \sqrt{\frac{12\mu K_f}{\rho g}} \quad (3)$$

단,  $k$ 는 intrinsic permeability,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성률,  $g$ 는 중력가속도,  $e$ 는 균열의 틈새

틈새는 역학적으로 중요할 뿐만 아니라 지하수 유동에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 틈새는 절리면의 거칠기를 야기하는 굴곡과 이에 따른 틈새 정도의 차이에 의해 일정한 값을 얻기가 어렵고 실제 지하수의 흐름이 존재하는지를 파악하기 어렵다. 따라서, cubic law에서 각 구간별 투수량 계수를 파악하여 역으로 틈새를 구하는 법을 사용한다. 다공질매질에서와는 달리 균열 암반에서는 대수층 두께의 의미

가 유일한 지하수 통로 역할을 하는 균열의 간극이 그 역할을 대신한다. 그런데 실제 현장에서 수리적 균열 간극을 측정하는 작업은 매우 어려운 일이다. 따라서 균열에서는 수리전도도 보다는 시험에 의한 투수량 계수를 많이 이용한다.

### 2.3 불연속면 특성

본 연구지역의 상세 지표지질조사를 실시한 위치는 Fig. 2와 같다. 현장에서 조사된 불연속면 특성 결과 대규모 단층의 방향은 N80W/75SW, N40W/70SW로 나타났고, 대표 절리군(J1, J2, J3)은 N1E/76SE, N53E/39SE, N63W/78SW를 나타내고 있다. 그 외 조사된 다른 결과들을 포함하여 적절한 확률밀도 함수를 선정하고 분석하였다. 각 확률밀도 함수들에 대한 요약 설명은 Table 1과 같다.

본 연구지역 내 암종별 대표적인 수리상수를 획득하

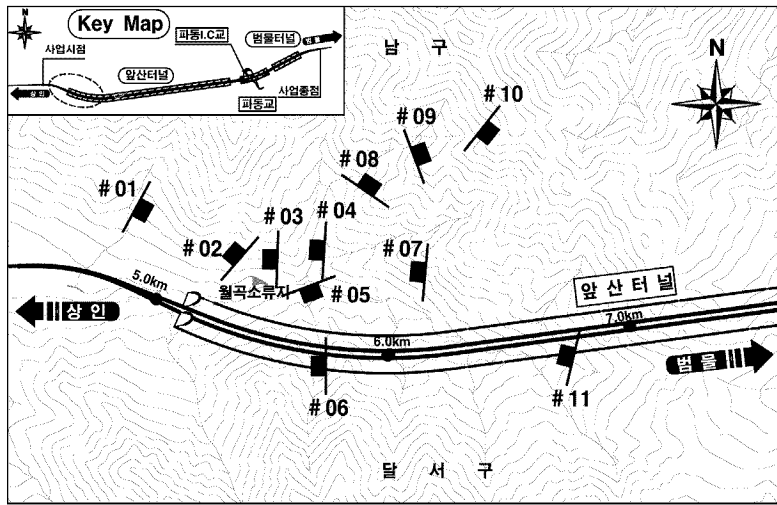


Fig. 2. Scanline survey region

Table 1. Geotechnical properties of representative joints

Contour Diagram		Rose Diagram	
	<p>Orientation</p> <p>J1 : N1E/76SE</p> <p>J2 : N53E/39SE</p> <p>J3 : N63W/78SW</p>		<p>Fisher coefficient K</p> <p>J1 : 46.70</p> <p>J2 : 81.23</p> <p>J3 : 100.34</p>

기 위해 현장투수시험, 수압시험, 순간충격시험, 양수 시험 및 양수 유발 유속 시험(Young et al, 1998)을 실시하였다. 대수층 내 전체적인 지하수 유동 특성을 파악하기 위하여 일반적으로 장기 양수 및 순간 충격시험을 실시하는데 본 연구지역은 절리 암반의 수리적 특성이 중요하므로 각각의 시추공에서 수압시험 및 양수 유발 유속 시험을 실시하였다. 유효공극률 및 전체공극률 자료는 문헌값을 이용하였다(Freeze & Cherry, 1979). 과업지역의 대수층에 대한 수리상수는 지질 층서를 중심으로 현장시험결과 및 참고문헌을 고려하여 결정하였다(Table 2 참조).

### 3. 수치해석 분석

#### 3.1 해석프로그램(MAFIC)

일반적으로 지하수 유동에 쓰이는 연속체 모델링(Visual MODFLOW)과 달리 MAFIC은 매질(matrix) 내 분포하는 단열에서의 지하수 유동 특성을 분석하는 프로그램이다. 다공질 매질을 가정하는 지하수 연속체 모델링은 터널 내 지하수 유입량의 분포가 터널 전체구간에서 일정한 형태를 보이는 반면 지하수 불연속체 프로그램 MAFIC에서는 터널과 만나는 절리들의 개수와

크기에 따라 그 양이 결정되어진다. 따라서, 연속체 모델링이 과업구간 전체를 포함하는 광역적인 지하수 영향평가가 가능한 반면에 MAFIC은 터널구간 중 특정 세부구간에서 불연속체의 수리특성을 파악하는데 이용된다.

#### 3.2 해석 과정

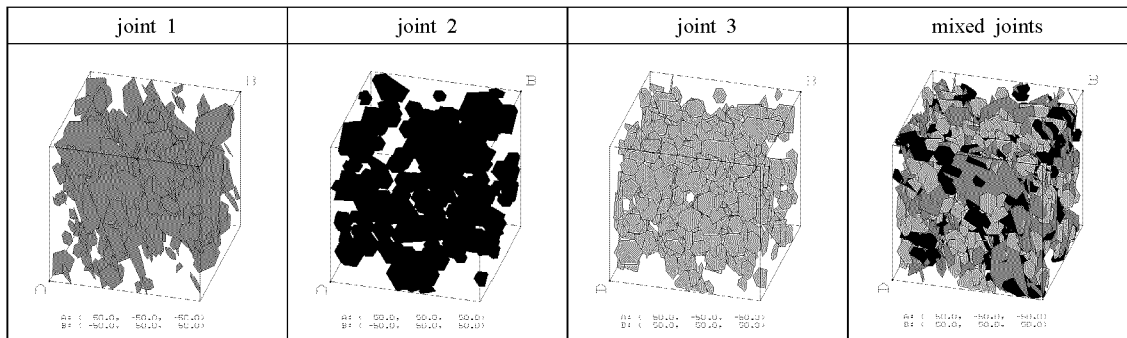
위에서 얻어진 절리 측정 자료를 토대로 3차원 절리망을 생성한 결과는 Fig. 3과 같다.

터널 구간을 설정하고 각각 선정된 지역의 수리적 초기 및 경계조건을 대입하여 Fig. 4와 같이 해석모델을 생성하였다. 해석지역의 크기는 가로×세로×높이가  $100 \times 100 \times 100 \text{ m}^3$ 이다. 수리적 경계조건은 프로그램 Visual MODFLOW의 모델링 결과 값을 토대로 선정하였다(Table 3 참조).

위의 결과로 생성된 절리망과 구축된 경계조건을 상호 고려해서 해석모델의 요소망을 프로그램(MeshMaster)을 이용해서 생성하였다. 생성된 요소망들 중 불연속면의 수리특성에 불필요한 세밀한 요소들(infinite clusters) 및 각 불연속면의 연결에 불필요한 요소들을 제거하고 적절한 요소망을 생성하였다. 생성된 요소망은 삼각요소(triangular element)로 구성되어져 있고, 절리는 각 삼각요

**Table 2.** Hydraulic properties of distributed soil and rocks

Zone	layer	hydraulic conductivity (cm/sec)		storativity	porosity
		$K_x=K_y$	$K_z$		
1	saturated soil	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.15
2	very weathered rock	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.02
3	weathered rock	$6.0 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.04
4	hard rock	$3.0 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.02
5	very hard rock	$3.0 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.02



**Fig. 3.** Generation of three dimensional fractures

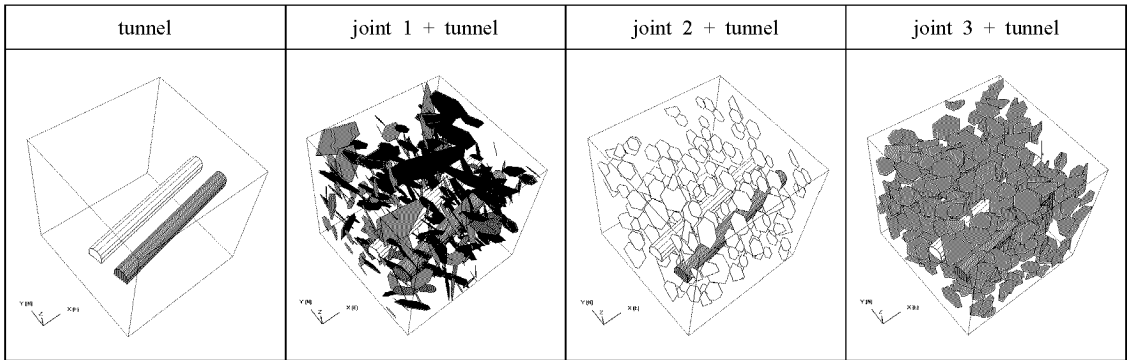


Fig. 4. The types of three dimensional models including both joints and tunnels

Table 3. Hydraulic properties and boundary condition

model	Hydraulic properties	hydraulic conductivity (K)		1.50×10 <sup>-5</sup> cm/sec
		Transmissivity (T <sub>f</sub> )	joint 1	9.60×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /sec
			joint 2	7.35×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /sec
			joint 3	1.01×10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /sec
Boundary condition	Top	Constant Head		
	Bottom	Constant Head		
	East	Constant Head		
	West	Constant Head		
	South	Constant Head		
	North	Constant Head		

소의 면들이 서로 만나는 접선을 1차원 파이프 요소(pipe element)로 고려하여 나타내었다(Fig. 5 참조).

### 3.3 해석 결과

불연속면 생성 시 통계적 방법을 적용하므로 각 단계 별 하나의 모델이 전체를 대표할 수 없다. 각각의 생성된 절리들의 연결성과 분포가 다르기 때문에 그에 따른 터널 내 유입량에도 차이가 클 수 있다. 따라서, 난수적으로 많은 수의 모델샘플들을 생성하는 확률통계학적 기법 중 하나인 Monte Carlo Simulation을 통해 평균 및 표준편차를 획득하는 것이 실제 발생할 수 있는 결과에 근접할 수 있다. 본 분석에서는 1000회 이상의 모델들을 생성하여 터널 내 유입량을 예측하였다. 해석모델 영역은 지하수위 하부에 위치하고 있으며, 터널 굴착 시에도 완전 포화상태를 유지할 것으로 판단되므로 시간에 따른 지하수위의 변화가 없다고 가정하고 정류상태를 고려해서 모델링을 실시하였다. 모델링 분석 결과 터널내부의 단위 길이 당 유입량은 Fig. 6과 같이 대

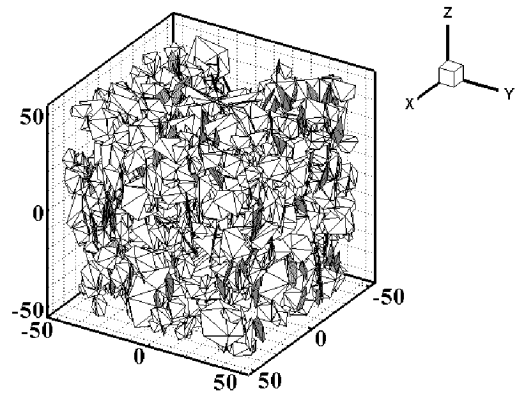


Fig. 5. Mesh generation

수정규(Lognormal)분포를 나타내며, 평균 5.40×10<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>/min/km, 표준편차 3.04×10<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>/min/km로 예측되었다.

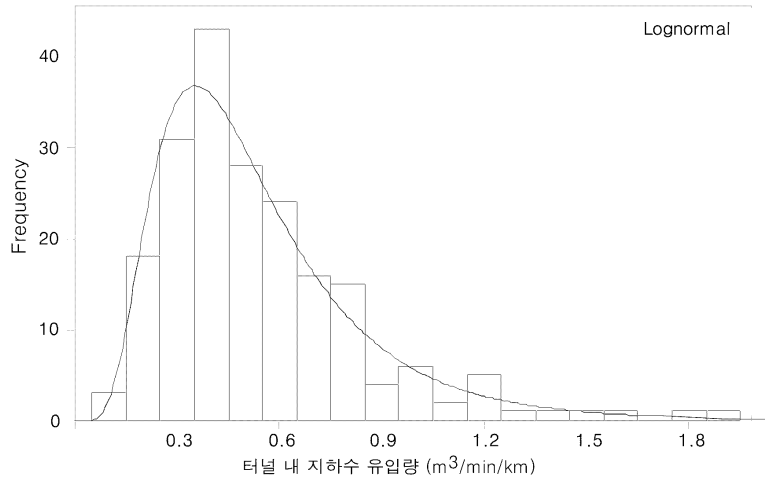


Fig. 6. The distribution of amounts of groundwater intaked into tunnel by Monte Carlo Simulation

#### 4. 결 론

터널 예상 구간에 대해 터널 굴착 시 지하수 환경 영향을 예측하기 위해 선행 조사들(광역/상세 지표지질조사, 물리탐사, 정천현황/지하수 이용 실태조사 등)을 실시하여 관심 대상 지역 선정한 후 지하수 현장 시험들과 장기 수위 관측 및 정기 수량/수질 분석을 실시하였다. 이러한 조사 결과들을 이용하여 불연속면이 발달되어 있는 영역에서 단층 및 대표 절리군 특성을 고려하여 지하수 불연속체 프로그램 MAFIC을 이용한 모델링 분석을 실시하였다. 분석결과 터널 굴착 시 터널 내부로의 단위 길이 당 유입량은  $5.40 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 예측되었다. 해석 결과 기존 설계 및 본 설계 적용 값인 3.0 및 2.0 보다 적은 값을 나타내었다. 따라서, 터널 굴착 시 특정 구간 내 발달한 단층 및 절리군을 통해 유입된 지하수는 유효응력 분포의 변화에 미치는 영향이 미미해 터널 안정성에 미치는 영향 또한 거의 없을 것으로 예측된다. 그러나, 본 연구에서 실시되었던 현장조사 및 시험은 실제 분포되어 있는 암반 내 수리적 특성 단열들의 상태를 정확히 파악하기에는 양과 종류가 한정적이었다. 따라서, 이러한 제한을 극복하여 보다 정밀한 조사 자료들을 얻을 수 있다면 불확실성을 줄일 수 있고 보다 적합한 결과를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 사 사

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널 시공 기술 개발(과제번호 : C105A1020001-05A0502-00410)”의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh, 1988, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations*, U.S.G.S
2. 이정호, 이영준, 이수재, 2005, 터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, p50~58.
3. Freeze, R.A., and J.A. Cherry, 1979, *GROUNDWATER*, Prentice-Hall, Inc, p26~28.
4. Long, J.C, Chair, 1996, *Rock Fractures and Fluid Flow; Contemporary understanding and applications*, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., USA
5. Young, S.C., H.E. Julian, H.S. Pearson, F.J. Molz, and G.K. Boman, 1998, *Application of the electromagnetic borehole flowmeter*, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection Agency.

**김형수**



1998년 서울 대학교 자연과학대학 지질·해양학과 이학사  
2000년 서울 대학교 대학원 자연과학대학 지구환경과학부 이학석사  
2005년 서울 대학교 대학원 자연과학대학 지구환경과학부 이학박사과정

Tel: 02-448-6954  
E-mail: hskim@nexgeo.com  
현재 (주)넥스지오 지하수환경팀 팀장

**이주현**



2001년 공주 대학교 자연과학대학 지질환경과학과 이학사  
2003년 공주 대학교 대학원 자연과학대학 지질과학과 이학석사  
2005년 서울 대학교 대학원 자연과학대학 지구환경과학부 이학박사과정

Tel: 02-448-6954  
E-mail: alls@nexgeo.com  
현재 (주)넥스지오 지하수환경팀 과장

**안주희**



2004년 공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과 이학사

Tel: 02-448-6954  
E-mail: kara0721@nexgeo.com  
현재 (주)넥스지오 지하수 환경팀 사원

**안규천**



2003년 공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과 이학사  
2005년 공주대학교 일반대학원 지질학과 이학석사

Tel: 02-448-6954  
E-mail: an9000@nexgeo.com  
현재 (주)넥스지오 지하수환경팀 대리

**윤운상**



1991년 서울대학교 자연과학대학 지질학과 이학사  
1994년 서울대학교 대학원 자연과학대학 지질학과 이학석사  
2003년 서울대학교 대학원 자연과학대학 지구환경과학부 이학박사

Tel: 02-448-6954  
E-mail: gaia@nexgeo.com  
현재 (주)넥스지오 대표이사