

## 수리적 굴착손상영역에서의 지하수유동 특성에 관한 연구

박종성<sup>1)\*</sup>, 류동우<sup>2)</sup>, 류창하<sup>3)</sup>, 이정인<sup>4)</sup>

### Groundwater Flow Analysis around Hydraulic Excavation Damaged Zone

Jong-Sung Park, Dong-Woo Ryu, Chang-Ha Ryu and Chung-In Lee

**Abstract** The excavation damaged zone (EDZ) is an area around an excavation where in situ rock mass properties, stress condition, displacement, groundwater flow conditions have been altered due to the excavation. Various studies have been carried out on EDZ, but most studies have been focused on the mechanical behavior of EDZ by in situ experiment. Even though the EDZ could potentially form a high permeable pathway of groundwater flow, only a few studies were performed on the analysis of groundwater flow in EDZ. In this study, the 'hydraulic EDZ' was defined as the rock zone adjacent to the excavation where the hydraulic aperture has been changed due to the excavation. And hydraulic EDZ (hydraulic aperture changed zone) estimated by two-dimensional DEM program was considered in three-dimensional DFN model. From this approach the groundwater flow characteristics corresponding to hydraulic aperture change were examined. Together, a parametric study was performed to examine the boundary conditions that frequently used in DFN analysis such as constant head or constant flux condition. According to the numerical analysis, hydraulic aperture change induced by the hydraulic-mechanical interaction becomes one of the most important factors influencing the hydraulic behavior of jointed rock masses. And also from this study, we suggest the proper boundary condition in three-dimensional DFN model.

**Key words** Excavation damaged zone, Hydraulic aperture, Discrete fracture network, Distinct element method, H-M coupling

**초 록** 굴착손상영역(EDZ)은 굴착으로 인해 현지 암반이 역학적으로 손상을 입게 되어 응력상태, 변위상태, 암반의 안정성, 지하수의 흐름상태 등에 변화가 일어나는 영역을 의미한다. EDZ의 역학적 특성과 관련한 많은 연구들이 수행되었지만, EDZ에서의 지하수 유동 특성에 관한 연구는 아직 부족한 수준이다. 본 연구에서는 굴착으로 인한 수리-역학 상호작용(coupling)에 의해 굴착면 주변의 수리적 간극값이 변하는 영역을 수리적 굴착손상영역이라 정의하고, 이를 3차원 분리단열망(DFN)에 적용시켜 보았다. 이를 통해 수리적 간극변화가 3차원 불연속 망에서의 전반적인 지하수 유동에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 3차원 DFN 지하수 유동 해석 시 주로 이용되는 수두 조건과 유량 조건의 적용성을 고찰하였다. 해석 결과 수리-역학적 상호작용에 의해 발생하는 굴착면 주변의 수리적 간극변화는 터널 내부로 유입되는 유량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 DFN 해석 시 다양한 경계조건에 따른 상이한 결과를 토대로 보다 합리적인 경계조건 설정에 대한 방향을 제시하였다. 마지막으로 실제 현장에서 수리해석을 실시한 자료를 바탕으로 수리적 간극 값의 변화를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 유입유량 차이를 통해, 3차원 지하공동의 지하수 유동 해석 시 수리적 간극 값의 변화를 고려하는 것이 보다 더 보수적인 결과를 나타내주는 것을 확인하였다.

**핵심어** 굴착손상영역(EDZ), 수리적 간극, 분리단열망(DFN), 개별요소법(DEM), 수리-역학적 상호작용(coupling)

<sup>1)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사  
<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 선임연구원  
<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원 책임연구원  
<sup>4)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 명예교수  
\* 교신저자 : jpsda@rockeng.snu.ac.kr  
접수일 : 2007년 3월 28일  
심사 완료일 : 2007년 4월 16일

## 1. 서 론

굴착손상영역(excavation damaged zone; EDZ)은 굴착으로 인해 현지 암반이 역학적으로 손상을 입게 되어 응력상태, 변위상태, 암반의 안정성, 지하수의 흐름상태 등에 변화가 일어나는 영역을 의미한다(정용훈, 2007).

EDZ의 역학적 특성과 관련한 많은 연구들이 수행되었지만, 공동의 굴착으로 인해 발생하는 불연속면 간극의 변화가 굴착면 주변의 수리적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 수준이고, 특히 3차원 불연속망에서의 지하수 유동에 관한 특성은 연구해야 할 여지가 많이 남아 있다. 터널이나 공동이 굴착되었을 때 굴착면 주변의 작은 범위에 새롭게 생성되는 균열을 제외하면, 굴착면 주변의 투수성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 수리간극(hydraulic aperture)의 변화라 생각할 수 있다. 암반에서의 지하수의 유동은 대부분 불연속면의 간극을 따라 발생하기 때문이다. 일반적으로 EDZ의 범위는 발파, TBM 굴착 등으로 인해 새로이 불연속면이 생성되거나 원래 암반이 가지고 있던 투수성이 커지고, 강도가 낮아지는 등에 대한 현장 시험 데이터를 통해 산정하지만, 본 연구에서는 박종성 외(2007)의 연구를 바탕으로 수리적 EDZ를 '수리-역학 상호작용 해석을 수행했을 때 수리적 간극이 굴착전의 값보다 상대적으로 커진 영역'이라고 정의하였다. 수리적 EDZ를 정의하면, 굴착으로 인해 새롭게 생성되는 불연속면에 대한 고려는 할 수 없지만, 지하수 유동 특성에 영향을 미칠 수 있는 가장 큰 요인인 수리적 간극의 변화가 나타나는 영역에 초점을 맞출 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 3차원 불연속망에서의 지하수 유동 해석이 가능한 분리단열망(discrete fracture network; DFN)을 이용하였다. DFN의 경우 Eulerian code를 사용하기 때문에 초기 균열망은 굴착 이후 응력의 변화나 시간경과에 따라 변하지 않고, 격자변화가 없는 상태로 해석이 수행되기 때문에 지하수 유동해석의 단순 모니터링으로만 이용된다는 단점을 갖고 있다. 이는 계산시간이 짧고 효율적이라는 장점이 있지만 실제 지하구조물의 굴착 시 역학적인 거동과 수리적 거동이 상호작용(coupling)을 일으킴으로써 발생하는 불연속면 망의 변화 등의 복잡한 문제에 적용할 수 없다는 한계가 있다.

따라서 이러한 점을 보완하기 위해 2차원 개별요소법 해석법을 이용한 수리-역학적 상호작용 해석 결과로 얻어진 굴착면 주변의 간극변화 양상(박종성 외(2007))을 3차원 불연속망에서의 지하수 유동 해석이 가능한 DFN에 연동시켜보았다.

## 2. 터널굴착으로 인한 수리적 간극의 변화

### 2.1 수리적 간극변화 영역

굴착 이전 초기 상태의 지하심부 암반은 역학적, 수리적으로 평형상태를 유지하고 있으나 굴착이 진행됨에 따라 이러한 평형상태는 깨어지고 수리적 요소와 역학

적 요소는 상호작용을 주고 받으면서 새로운 평형상태를 이루게 된다. 즉, 굴착으로 인해 굴착 단면 주변에 응력이 재분배되고 이는 투수성 및 지하수위의 변화를 야기한다. 또한 수리유동의 변화는 다시 역학적 변화를 일으킨다(Sato, 1998).

지하수 유동에 대한 고려를 하는지, 하지 않는지에 따라 불연속면의 간극에는 차이가 존재한다. 수리-역학 상호작용 해석을 통해 불연속면 간극 변화 정도를 수치화 할 수 있게 되면 수리적 간극 변화가 투수성과 유입 유량에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

박종성 외(2007)는 2차원 개별요소법 해석프로그램을 이용하여 수리-역학 상호작용 해석을 실시하였고 절리각도, 절리간격, 절리의 초기 수리적 간극, 축압비 등의 변수를 변화시켜가며 굴착 이후 굴착면 주변의 수리적 간극변화 양상에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 1은 이 논문에서 수행한 해석의 한 예시이다.

Fig. 1의 결과에서 알 수 있듯 수리적 간극의 변화 양상은 Fig. 2와 같이 불연속면 군의 방향에 수직인 방향으로 분포하는 특성을 갖는다. 이같은 특성은 불연속면의 연속성이나 불연속면 군의 수, 불연속면의 간격에 거의 영향을 받지 않는다(박종성 외, 2007). 따라서 간극의 변화가 발생하는 영역을 가장 합리적으로 표현할 수 있는 타원형의 영역으로 모델링하였고, 이를 수리적 EDZ라 정의하였다. 타원형으로 간극변화 영역을 정의하게 되면 불연속면 군의 방향과 타원의 장-단축의 길

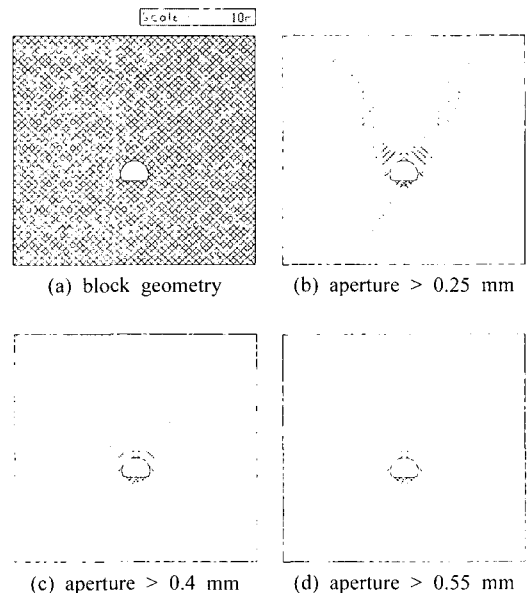


Fig. 1. Hydraulic EDZ (initial aperture: 0.2 mm) [K: 0.5, joint spacing: 2 m, dip of joint: 45°] (after Park, 2007)

이, 타원의 중점 정보만 가지고도 수리적 EDZ를 표현할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 이 선행연구를 바탕으로 DFN에 수리적 간극변화를 반영시켰다.

굴착이 발생하면 불연속면의 간극이 오히려 줄어드는 부분도 발생하게 되는데, 이같은 폐쇄영역은 K값의 변화와 불연속면 균의 각도에 영향을 많이 받는 변수이며, 수리-역학 상호작용 해석을 수행했을 때에는 간극수압(pore pressure)의 영향에 의해 그 크기는 매우 미소하게, 범위는 매우 넓게 발생했기 때문에 의미 있는 영역으로 다루지 않았다(박종성 외, 2007).

### 3. 분리단열망을 이용한 수리해석

#### 3.1 기본 개념

불연속면의 간극분포는 지하수 흐름에 매우 중요한 변수이지만 정량적인 평가가 무척 어렵다. 실제 노두나 시추공에서 관찰되는 간극은 여러 가지 요인으로 교란된 경우가 많고, 응력분포에 따라 크게 영향을 받으며 이외에도 여러 가지 불확실성들이 내재되어 있어 흐름을 지배하는 수리 간극으로 직접 나타내기 힘들다. 따라서 삼승법칙(cubic law)을 이용해, 현장에서 패커시험이나 양수시험을 통해 실제 균열의 간극을 역으로 산정하는 경우가 많고, 이 균열 간극과 수리전도도의 선형관계에 대한 연구도 이루어진 바가 있다(Attewell, 1976). Fracman/MAFIC 프로그램 등의 DFN 수치해석 프로그램을 이용해 지하수 유동 해석을 수행할 때 간극 분포는 일정한 초기값으로 입력하거나 공간적인 변이를 고려하는 경우 대수정규분포(Log normal distribution)로 가정하는 것이 일반적이다. 하지만 이 경우 굴착으로

교란되는 지반의 응력상태를 현실적으로 묘사하지 못하게 된다. 이러한 이유로 개별요소법의 상호작용해석을 통해 얻어진 굴착 이후 수리간극의 변화 값을 이용하여, 굴착면 주변에서의 수리적 간극 변화를 DFN 프로그램에 반영시켜 수치실험을 수행하였다.

#### 3.2 불연속망 발생

절리, 층리, 열극과 같은 불연속면의 분포 특성을 결정하기 위해서는 통계적 접근법을 이용해야 한다(Kulatilake, 1993). Fracman 패키지 중 FracworksXP를 이용하면 불연속면의 분포특성을 통계적으로 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 불연속 균열망을 생성하였다.

100 m×100 m×100 m의 육면체 해석영역을 설정한 뒤, 그 안에 2개의 불연속면 균을 발생시켰다. 불연속면망 생성모형은 Enhanced Baecher모형(uniform probability in space)을 이용하였고, 불연속면의 밀도는 면적으로 밀도를 표현(areal intensity)하는  $P_{32}$  방법을 이용하였다. 불연속면 균의 방향 분포는 Fisher분포를 따르고, 그 분산은 10으로 주었다. 불연속면의 크기(fracture size)의 확률밀도함수(Probability density function)는 평균 30 m, 표준편차 10 m인 로그 정규분포로 가정하였다. 불연속면의 형태는 계산상의 편리함과 암반면에 나타난 절리선(joint trace) 길이의 관찰 결과를 근거로 하여 원판형을 가정하는 경우가 많기 때문에, 원형에 근접한 12각형의 다각형으로 설정하였다. 불연속면의 밀도는 계산상의 효율성을 생각해 임의로 0.24로 가정하였다.

MAFIC 프로그램에서 지하수 유동 해석을 위해 입력되는 불연속면의 물성치는 투수량계수(transmissivity)와 저류계수(storativity), 간극(aperture)의 3가지이다. 이 값들은 수압시험이나 양수시험, BIPS 혹은 BHTV 등을 이용해 현장에서 파악해야 하지만, 본 연구에서는 실제 현장 시험을 수행하지 않았기 때문에 이정호 외(2005), 한정성(1998) 등의 문헌을 참고해 아래의 Table 1과 같은 입력치를 이용하였다.

위의 과정을 거쳐 만들어진 불연속면 균의 형상과 터

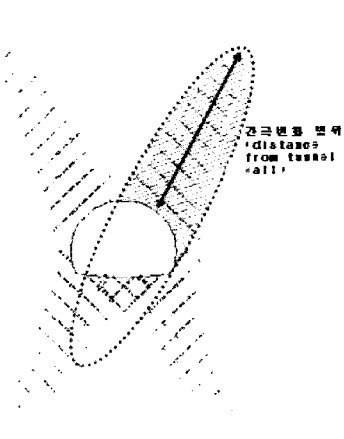


Fig. 2. Determination of the range of aperture changed zone (EDZ) [ellipse model]

Table 1. Parameters for fracture generation by DFN program

Properties	Unit	Value
Transmissivity	m <sup>2</sup> /sec	4.8×10 <sup>-6</sup>
Storativity	-	0.0001
Aperture	mm	0.2

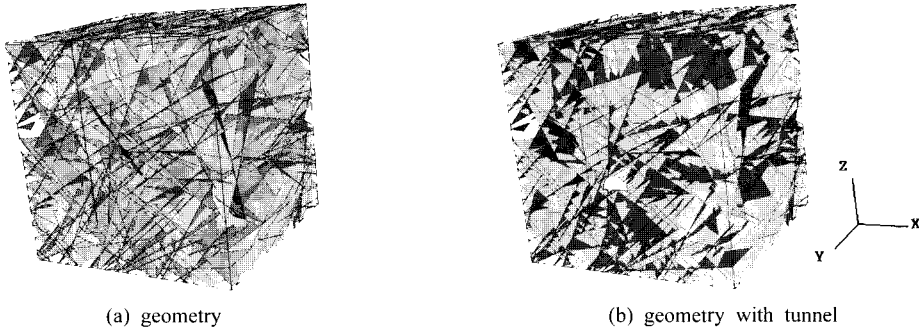


Fig. 3. 3D block geometry generated by FracworksXP

Table 2. Parameters for hydraulic boundary conditions (unit: m)

Location	Boundary condition
Top	$H_0 = 100$
Bottom	$H_0 = 0$
East	$H_0 = 40, H_z = 1$
West	$H_0 = 40, H_z = 1$
South	$H_0 = 40, H_z = 1$
North	$H_0 = 40, H_z = 1$
Tunnel boundary	$H_0 = 0$

널의 형상은 Fig. 3과 같다.

MAFIC에서 경계조건의 입력방법은 매우 제한적이다. 유체의 흐름은 경계부에서 안쪽, 바깥쪽 중의 한 방향으로 결정되고, 경계부에서의 수두값을 지정해 주거나, 유량값을 지정해 주는 것으로 경계조건을 입력한다. 수치 해석은 경계조건에 따라 그 결과가 크게 달라지기 때문에 경계조건은 무척 신중하게 입력해야 한다. 수두와 유량은 (1)과 같은 방법으로 경계부에 부여된다.

$$\begin{aligned}
 H(x, y, z) &= H_x X + H_y Y + H_z Z + H_0 \text{ [m]} \\
 Q(x, y, z) &= Q_x X + Q_y Y + Q_z Z + Q_0 \text{ [m/s]}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

여기서  $H_x, H_y, H_z$ 는 각각  $x, y, z$ 방향의 수두 gradient 값,  $Q_x, Q_y, Q_z$ 는 각각  $x, y, z$ 방향의 유량 gradient 값을 의미하는데, 이 값은 직접 입력해야 한다.

본 연구에서는 경계면의 조건을 고정수두 조건, 고정유량 조건으로 바꾸어가며 해석을 수행하였다. 현실적인 해석이 되기 위해서는 자유 지하수면을 모사하는 것이 바람직하지만, 본 해석에 사용한 DFN 해석 프로그램인 Fracman/MAFIC의 경우 자유 지하수면을 모사하는 것이 힘들고, 경계조건의 입력방법이 제한적이다.

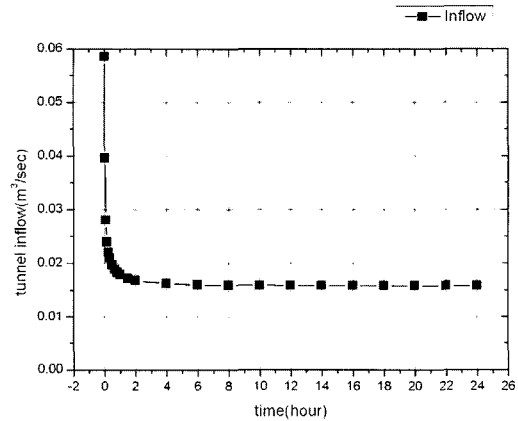


Fig. 4. Variation of inflow flux into tunnel after excavation without considering aperture change

### 3.3 고정수두조건 해석 - 중력방향 흐름

경계면의 수두값이 일정한 고정값이라고 가정하고 Table 2와 같이 경계조건을 주었다. 전술한 바와 같이 초기 간극은 0.2 mm이고 그 밖의 다른 조건은 앞 절에 설명한 바와 같다. 터널의 중심을 기준점으로 상부의 자유면에 100 m의 수두, 하부에 0 m의 수두 경계값을 입력하고 동서남북 방향의 측면에도 깊이에 따라 동일한 수두 값이 입력될 수 있도록  $z$ 축 방향의 gradient 값을 입력하였다. 그리고 터널 벽면에는 수두를 0 m로 두어, 터널 공동으로 지하수가 유입될 수 있도록 하였다.

#### - 수리적 간극변화를 고려하지 않은 해석

굴착면 주변의 수리적 간극 변화를 적용하지 않은 상황에서 해석을 수행하였다. 시간에 따라 전체 터널 내부(100 m 길이)로 유입되는 지하수의 유량은 Fig. 4와 같다.

굴착 후 30일 경과시까지 부정류 해석을 실시하였으

며, 약 2~3시간이 경과되었을 때 전체 터널 내부로 유입되는 유량이  $1.582 \times 10^{-2.3}$  m/sec로 수렴하면서 평형 상태에 이르렀다.

생성시킨 불연속면의 밀도가 높은 편이고 굴착면의 보강이 고려되지 않았다 하더라도, 지하수위가 터널 상부 60 m라는 점에 비추어 볼 때, 다소 많은 지하수가 유입된 것으로 볼 수 있다. 이는, 경계조건을 고정수두로 할 경우 전체 해석영역의 경계부 수두가 고정되어 있기 때문에 터널 굴착 이후, 경계부의 수두를 유지하기 위해 터널 안쪽으로 유입되는 유량이 다소 과도하게 산정될 수 있기 때문이다. 이같이 고정수두 경계조건인 경우 굴착 후 평형에 이르기까지 터널 내부로 유입되는 유량이 과도하게 산정될 수 있으므로 실제 현장에서는 이 경계 조건을 신중히 적용해야 할 것으로 판단된다.

- 수리적 간극변화를 고려한 해석

2차원 개별요소법 해석 프로그램인 UDEC에서 계산된 수리 간극 변화를 MAFIC의 입력자료에 반영시키기 위하여 Visual Basic 6.0을 이용하여 변환 프로그램을

작성하였다. 굴착으로 인하여 불연속면의 수리적 간극이 변화하는 영역은 Fig. 5와 같이 타원형으로 모사하는 것이 합리적이다. 따라서 장축의 길이와 단축의 길이, 타원의 중심, 그리고 주 불연속면 군의 방향을 입력하면 불연속면 군의 방향에 수직인 방향으로 타원형 범위를 산정하고, MAFIC 해석의 입력파일의 불연속면 간극치를 타원형의 범위내에서 원하는 값으로 변화시켜주도록 프로그래밍하였다.

UDEC에서  $K=2.5$ , 초기간극 = 0.2 mm인 경우에 수리-역학 상호작용 해석에 의해 얻어진 수리적 간극의 변화 범위는 Table 3과 같다. 이 결과를 토대로 불연속면의 수리간극 값을 변화시켰다.

Table 3에 산정된 범위를 통해 Fracman/MAFIC 프로그램의 3차원 불연속면 망에서 수리적 간극 값을 각각 0.22 mm, 0.25 mm, 0.3 mm, 0.35 mm의 순서로 변화시켜 주었고, Fig. 6에서와 같이 DFN에서 원하는 범위의 수리적 간극값 변화가 이루어졌음을 확인하였다.

위와 같이 수리-역학 상호작용에 의해 터널 주변에 변화되는 수리적 간극 값을 DFN모형에서 모사한 뒤,

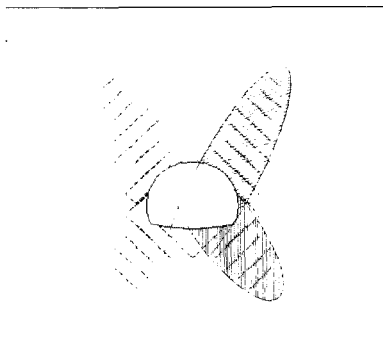


Fig. 5. Example of hydraulic EDZ [spacing: 2 m, angle: 45°, initial aperture: 0.2 mm] [hydraulic aperture > 0.22 mm]



Fig. 6. Aperture distribution in DFN model after coupling analysis [initial aperture: 0.2 mm] [red: 0.35 mm, green: 0.3 mm, blue: 0.2 mm, soft blue: 0.22 mm]

Table 3. Range of hydraulic EDZ

Aperture	Upper part of tunnel	Lower part of tunnel
0.2 mm to 0.22 mm	Major axis : 17.2 m	Major axis : 12.1 m
	Minor axis : 12.5 m	Minor axis : 15.5 m
0.2 mm to 0.25 mm	Major axis : 11.8 m	Major axis : 10.3 m
	Minor axis : 12.1 m	Minor axis : 13.3 m
0.2 mm to 0.3 mm	Major axis : 8.8 m	Major axis : 8.3 m
	Minor axis : 10.7 m	Minor axis : 11.2 m
0.2 mm to 0.35 mm	Major axis : 6.0 m	Major axis : 6.5 m
	Minor axis : 10.5 m	Minor axis : 10.5 m

MAFIC 프로그램을 통해 지하수유동 해석을 실시하였다.

MAFIC 프로그램은 지하수 유동 해석을 실시 할 때 수리적 간극 값을 포함하여 계산된 투수량계수(transmissivity)를 이용하기 때문에 간극의 변화치는 투수량계수를 역산한 뒤, 이 값을 변화시켜 반영하였다. 수리적 간극 값 변화 이외의 모든 조건은 간극변화를 고려하지 않은 해석과 동일하였고 그 해석 결과는 전체 터널 영역(100 m) 내부로 유입되는 유량은 Fig. 7과 같다.

전체 터널 면을 통해 유입되는 유량의 수렴값은  $5.78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 수리 간극의 변화를 반영하지 않았던 경우의 해석결과보다 약 3.7배 큰 값으로 나타났다. 유량이 수렴에 이르는 시간은 약 3시간 ~ 4시간으로 간극변화를 고려하지 않은 경우와 큰 차이가 발생하지 않았다.

해석 결과 굴착으로 인해 터널 주변의 수리적 간극이 증가하게 되면, 그렇지 않은 경우보다 유입유량이 3배 이상 증가하여 터널의 수리적 불안정성이 더 커진다는 사실을 알려준다. 이는 DFN모형을 이용해 지하공동의 지하수유동 해석을 실시할 때 수리-역학적 상호작용에 의한 간극의 변화를 고려하지 않을 경우, 공동 내부로 유입되는 유량이 과소평가될 수 있음을 의미한다.

또한, 굴착면 주변의 미세한 간극 변화로 인하여 3배 이상의 유입유량 변화를 나타내는 것으로 미루어 볼 때, 고정수두 경계조건 하에서는 경계부의 수두를 유지시키기 위해서 터널 내부로 유입되는 유량이 다소 크게 나타나도록 해석될 수 있으므로 수치해석 시 이 경계조건은 신중히 적용되어야 할 것이다.

**3.4 고정유량조건 해석 - 중력방향 흐름**

경계면에 작용하는 유량이 일정하다는 가정 하에, Table 4와 같이 경계조건을 주었다. 경계조건을 제외하면 다른 조건은 3.3절의 해석과 동일하다.

**- 수리적 간극변화를 고려하지 않은 해석**

수리적 간극 값을 변화시키기 전의 상황에서 해석을 수행하였다. 시간이 지남에 따라 전체 터널 내부로 유입되는 유량의 변화는 Fig. 8과 같다.

위의 그림에서 알 수 있듯이, 고정 유량조건에서 지하수계의 평형이 이루어지는데 걸리는 시간은 약 20일 정도이며 터널 전체 영역 내부로 유입되는 지하수의 양은 약  $1.48 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 수렴한다.

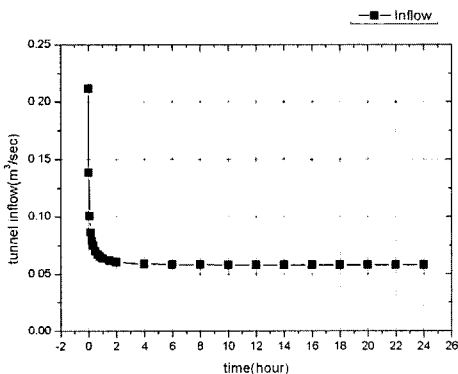
해석영역 상단 경계부의 균열을 통해 유입되는 전체 유량이 약  $5.17 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$ 이므로 약 28.7%정도의 유량이 터널 내부로 유입되고, 나머지 유량은 하부 경계면을 통해 빠져나간다. 즉, Fig 3의 (b)와 같은 해석 영역에서 윗면을 통해 유입된 유량 중, 아랫면을 통해 다시 빠져나가는 유량은 71.3%가 되는 것으로 해석되었다.

**- 수리적 간극변화를 고려한 해석**

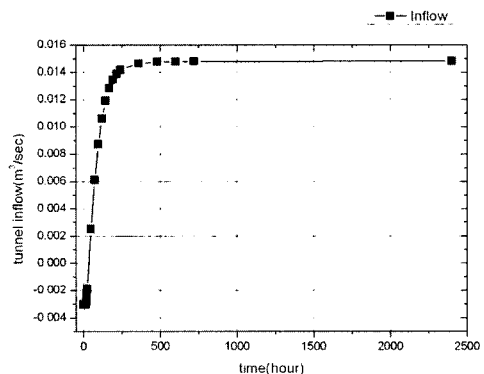
3.3절과 마찬가지로 방법으로 터널 주변의 수리적 간극 값을 변화시켰다. 간극변화를 고려한 해석 결과는 Fig. 9와 같다.

**Table 4.** Parameters for hydraulic boundary conditions

Location	Boundary condition
Top	$Q_0 = 9.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$
Bottom	$Q_0 = -9.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$
East	$Q_0 = 0$
West	$Q_0 = 0$
South	$Q_0 = 0$
North	$Q_0 = 0$
Tunnel boundary	$H_0 = 0$



**Fig. 7.** Variation of inflow flux into tunnel after excavation with considering aperture change



**Fig. 8.** Variation of inflow flux into tunnel after excavation without considering aperture change

위의 그림에서 알 수 있듯, 불연속면의 간극을 변화시킨 경우에도, 지하수계의 평형이 이루어지는데 걸리는 시간은 간극의 크기를 변화시키지 않은 경우와 동일한 20일 정도이며 평형에 이르렀을 때 터널 전체영역에서 유입되는 지하수의 양은  $1.48 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 간극 값을 변화시키지 전과 거의 유사하다. 이는 경계부의 지하수 조건이 상하방향의 흐름만 존재하는 상황에서, 동일한 유량이 상부에서 가해지기 때문에 시간이 흘러 평형상태에 이르렀을 때 전체 터널에 흘러드는 유량은 결국 같은 값으로 수렴할 수밖에 없기 때문이다.

고정 유량 조건에서 전체 터널 내부로 유입되는 유량은 간극변화를 고려하기 전에  $1.481 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 간극변화를 고려했을 때는  $1.482 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 유량의 최종 수렴 값은 거의 차이가 없다. 이는 해석 영역의 경계조건을 유량의 유입과 유출 값으로만 주었기 때문에 터널 내부로 유입되는 유량의 수렴 값은 간극값에 영향을 받지 않기 때문이다. 이는 고정 유량 조건이 현실을 정확히 반영하지 못한다는 것을 의미한다. 따라서 유량을 경계조건으로 이용하기 위해서는 굴착 후 경계부에서 유입되는 유량의 시간적 변화를 현실적으로 모사할 수 있는 방법이 필요하다고 판단된다.

수리적 간극 값의 변화를 모사한 경우와 그렇지 않은 경우의 해석결과를 비교하여 보면, 수렴에 이르기까지의 시간별 유입량에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 굴착 후 10일간, 간극변화 전후에 전체 터널 내부로 유입되는 유량을 비교하면 Fig. 10과 같다.

최종적으로 수렴한 유입수량은 같았지만, 수리적 간극 값의 변화를 모사한 경우가 더 빠른 시간에 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 LPG, LNG 비축기

지, 터널 등의 지하공동 주변 암반에 갑작스럽게 유량이 유입되는 상황이 발생했을 때, 수리적 간극 값의 변화를 고려하지 않는다면, 예상보다 빠른 시간 내에 공동 내부로 많은 유량이 유입될 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 현장 적용성 판단

본 연구에서 얻어진 결과를 검증하기 위해 실제 현장 자료에 간극변화를 고려한 해석법을 적용해보았다. 이를 위해 충남 청양군 운곡면 소재 삼광탄광에서의 자료를 이용하였다. 이번 해석은 지표 및 갱내 단열조사, 시추공 공내 Televiewer검층, 구간별 수리시험을 토대로 쓰여진 논문을 바탕으로 하였다(배대석 외, 1996).

이를 토대로 100 m×100 m×100 m 규모의 암반 내에 폭 2 m, 높이 2 m, 길이 100 m의 반원형 갱도를 설치하는 것으로 해당지역을 모델링 하였다. 경계조건은 x, y, z축을 따르는 수두의 선형변화로 입력하였으며, 이중 공극모델인 TRAFRAP을 이용하여 다공성 매질개념 하에 경계조건에 해당되는 지점의 potential head 및 수두경사를 추정하여 x, y, z축의 계수를 적용하였다(김계남 외, 1996). 이에 따른 경계조건과 불연속면의 물성치는 각각 Table 5와 6에 정리하였다.

위 조건을 바탕으로 FracworksXP를 이용해 정상상태(steady state)해석을 실시하였다.

삼광광산 현장의 자료는 불연속면의 크기가 해석영역의 크기에 비해 무척 작기 때문에, 연결되지 않은 불연속면을 인식하지 못하는 UDEC 프로그램에서 이 정보를 이용하면 불연속면의 밀도가 매우 낮아져 현실적인 해석 결과를 얻어내기 힘들다. 따라서 수리-역학적 상

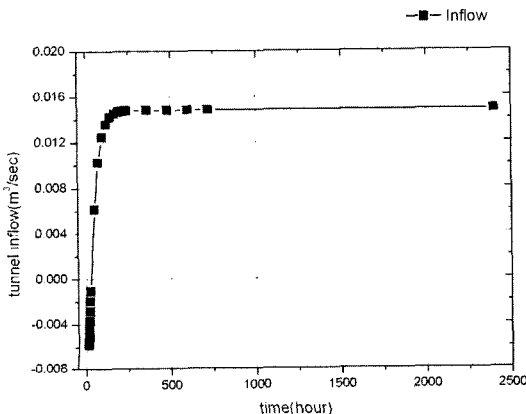


Fig. 9. Variation of inflow flux into tunnel after excavation with considering aperture change

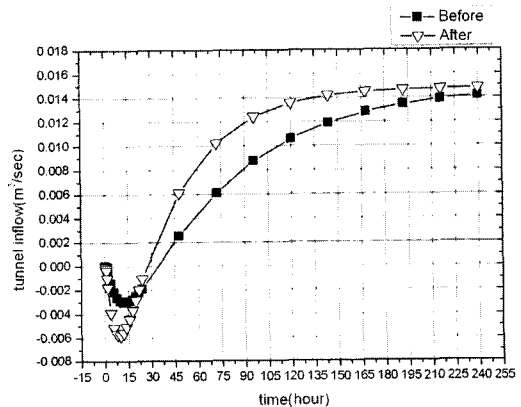
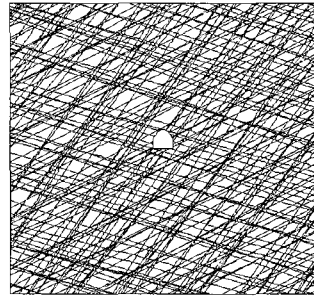


Fig. 10. The comparison of inflow rate into tunnel between before changing aperture and after changing aperture

**Table 5.** Parameters for hydraulic boundary conditions (unit: m)

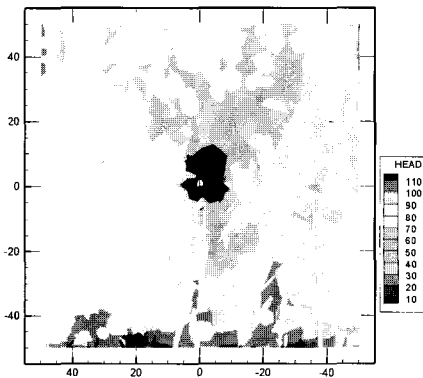
Location	$H_x$	$H_y$	$H_z$	$H_0$
Top	0.28	0	0.35	45
Bottom	0.23	0	0.27	114
East	0.26	0	0.31	80
West	0.26	0	0.31	80
South	0.35	0	0.13	60
North	0.14	0	0.23	95
Tunnel boundary	0	0	1	0



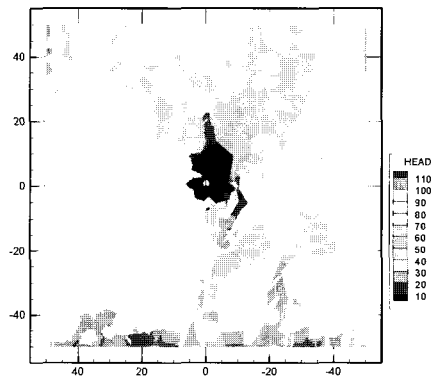
**Fig. 11.** Block geometry for UDEC [mean spacing: 0.6 m]

**Table 6.** Input parameters for DFN modelling at Sam-Kwang cavern

Parameters		Set 1	Set2	Set 3
Fracture orientation (degree)	Mean dip direction	342	255	244
	Mean dip	11	4	75
	Dispersion	12.28	17.88	2.61
Fracture radius (m)	Distribution	Log normal	Log normal	Log normal
	Mean	2.97	2.16	3.19
	Standard deviation	3.82	1.39	1.28
Fracture transmissivity (m <sup>2</sup> /s)	Distribution	Log normal	Log normal	Log normal
	Mean	$3.6 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$
	Standard deviation	$5.6 \times 10^{-6}$	$9.9 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$
Fracture intensity		0.1457	0.1647	0.0565



(a) without considering aperture change



(b) with considering aperture change

**Fig. 12.** Comparison of head distribution between two cases

호작용에 의해 발생하는 굴착면 주변의 간극변화 영역의 산정은, 불연속면 균을 연속이라 가정하고 그 방향과 분산정도를 단순화시켜 해석하였다. 현장에서 얻어진 불연속면균의 방향은 위경사로 변환하였고, 이를 통해 생성시킨 2차원 불연속 망은 Fig. 11과 같다.

UDEC을 이용한 수리-역학 상호작용 해석 결과를 이

용해, 프로그램을 통해 갱도 주변의 수리적 간극의 변화를 3차원 불연속망 내에 적용시켰다.

수리적 간극변화를 고려하기 전에 지하수 유동해석을 실시한 경우와, 간극 변화를 반영시킨 이후 지하수 유동해석을 실시한 경우의 수두 분포는 Fig. 12와 같이 다른 결과를 나타내었다.



간극 변화를 고려하기 전에 해석한 결과 100 m 길이의 전체 터널 내부로 유입되는 유량은  $5.18 \text{ m}^3/\text{day}$ 였다. 간극 변화를 고려한 해석에서 갱도 전체 내부로 유입되는 유량은  $6.86 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 이를 하루 단위로 환산하면 약  $5.93 \text{ m}^3/\text{day}$ 가 된다. 이 값은 간극 변화를 고려하기 전의 해석에서 내부로 유입되었던 유량보다 약 14.48%가 증가한 값이다.

실제 약 5200 m 길이의 삼광광산 갱도로 유입되는 지하수는 펌프가동으로 약  $220 \text{ m}^3/\text{day}$ 을 배수시키고 있다고 한다. 갱도 내에 환기장치 가동으로 인한 증발량 10% 정도에 기타 채굴적을 감안할 경우  $250\sim 300 \text{ m}^3/\text{day}$ 를 초과하는 지하수가 갱도내로 유입될 것이라 추정된다(배대석 외, 1996).

Fracman/MAFIC 등의 불연속체 해석법을 이용한 지하수 해석은 일반적으로 쓰이는 연속체 모델링과는 달리 주변 매질을 불투수성이라 가정하고 불연속면의 투수특성만을 고려한다. 따라서 연속체 해석의 경우 터널의 축 방향에 따라 대체적으로 고르고 대칭적인 지하수 유입량 결과가 나타나는데 반해, MAFIC에서는 터널과 만나는 불연속면의 개수와 방향에 따라 구간별로 지하수 유입량이 다르게 산정된다. 이로 인해 일반적으로 불연속체 해석 방법은 불연속면 특성이 충분히 고려되기 때문에 연속체 해석법 등에 비해 지하수 유입량이 다소 크게 산정된다(이정호 외, 2005).

이번 해석에서 이용한  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 의 해석 영역에서 계산된 100m 길이의 갱도 내로 유입된 유량은 간극 변화를 고려하지 않은 경우  $5.18 \text{ m}^3/\text{day}$ , 간극 변화를 고려한 경우  $5.93 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 수치해석 결과를 실제 현장에 적용하기 위해서는 해석 결과를 실제 영역으로 외삽하는 과정이 포함되어야 한다. 하지만 삼광광산에서 단층과 같은 대규모 불연속면이 발견되지 않았고 또한 불연속체 해석 방법이 일반적으로 다소 많은 지하수 유입량을 나타내기 때문에 해석 결과인 100 m 구간을 5200 m 길이로 단순 연장되었다고 가정하였다. 이에 따라 유량 값을 52배 하게 되면 각각  $269.3 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $308.3 \text{ m}^3/\text{day}$ 가 된다. 이는 실제 전체 갱도로 유입되는  $250\sim 300 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 비교했을 때 큰 차이가 없는 값으로, 간극변화를 고려하여 해석을 수행한 경우에 좀 더 현실과 근접한 유입수량을 모사할 수 있다는 점을 알 수 있다.

수치해석을 이용한 설계와 해석은, 시공 시의 안정성을 보장하기 위해 되도록 보수적인 결과를 요구한다는 점을 고려하면, 굴착 후 수리적 간극변화를 고려한 모델은 지하공동이나 터널설계 시 실제 현장에 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 분리단열망(DFN) 모델을 이용하여 굴착 전후 굴착으로 인해 수리적 간극값이 변화된 영역을 모사하고 이 영역에서의 수리적 특성을 파악하였다. 이 연구에서 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) DFN을 이용한 수치모델링에서 주로 적용하는 수두와 유량의 경계조건에 대하여 고찰하였다. 그 결과 경계부의 수두를 고정 값으로 사용하는 것은 실제 현장에서 입력 조건의 측정이 용이하지만, 해석 시 터널 내부로 유입되는 유량이 과도하게 산정될 가능성이 있다. 경계부에서 유입되는 유량을 고정 값으로 사용하면 실제 현장에서의 입력조건의 측정이 어렵고, 해석 결과는 현실을 정확하게 반영하지 못하였다. 그러므로 해석 경계부에서 시간에 따른 유입 유량의 변화를 모사할 수 있는 해석 기법에 대한 연구가 차후 수반되어야 한다.
- (2) 3차원 분리단열망(DFN)에 수리적 간극변화 영역을 적용시켜 지하수 유동해석을 실시한 결과, 굴착으로 인해 터널 주변에 발생하는 간극의 변화가 터널의 수리적 안정성에 상당한 영향을 미치는 요인이 될 수 있다는 사실을 관찰하였다. 수리적 간극변화 영역을 고려한 경우, 수두 값을 고정시킨 경계조건에서는 공동 내부로 유입되는 유량이 증가하였고, 유량 값을 고정시킨 경계조건에서는 공동 내부로 유입되는 유량이 평형에 이르는 시간이 단축됨을 확인하였다.
- (3) 위의 연구결과를 토대로 현장에의 적용성을 판단하였다. 삼광터널에서의 각종 자료를 바탕으로 지하수 유동해석을 실시한 결과, 수리적 간극변화 모델을 이용한 경우 그렇지 않은 경우에 비해 갱도 내부로 유입되는 유량이 약 14.48% 증가하였으며, 이 값은 실제 유입되고 있는 지하수의 측정값과 큰 차이를 보이지 않았다. 보수적인 해석 결과를 통하여 지하공동 설계의 안정성을 확보할 수 있다는 점을 감안하면, 굴착으로 인한 공동 주변의 수리적 간극변화를 산정하는 방법은 실제 현장에서도 이용할 수 있다.
- (4) 이번 연구를 통해 얻어진 굴착면 주변의 간극변화 범위와, 수리적 특성에 대한 정보는 추후 불연속 균열 망을 통해 이동하는 특정 매질(mass)의 이동 양상 해석에도 이용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “고심도 지하연구실�험실(URL) 구축 및 실증실험연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김계남, 김천수, 김길정, 강일식, 1996, 삼광광산 주변에 분포한 열극대가 지하수 유동 체계에 미치는 영향 분석, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 571-582.
2. 배대석, 송무영, 1996, 분리단열막개념의 지하수유동해석을 위한 단열투수량계수의 정량화 연구, 대한지질공학회지, Vol. 6, No. 1, 1-13.
3. 박종성, 류동우, 류창하, 이정인, 2007, 수리적 간극변화

를 고려한 수리적EDZ의 정의에 관한 연구, 한국터널공학회 논문집(투고 중).

4. 이정호, 이영준, 이수재, 2005, 터널로 인한 지하수 저감방안 연구, 한국환경정책 평가연구원, 연구보고서.
5. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교.
6. 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사.
7. Attewell, P. B., Farmer, I. W., 1976, Principles of engineering geology, Chapman and Hall, 1045p.
8. Kulatilake, P. H. S. W., 1993, Joint network modelling with a validation exercise in Stripa Mine, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 30, 503-526.
9. Sato, T., 1998, In-situ experiment on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono Mine, Central Japan, Engineering Geology, Vol. 56, 97-108.

**박 종 성**

2005년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사  
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학석사

Tel: 02-880-9307  
E-mail: pjsda@rockeng.snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학석사

**류 창 하**

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1979년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1989년 University of Utah(in USA) 공학박사

Tel: 042-868-3236  
E-mail: cryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 지하공간연구실장, 책임연구원

**류 동 우**

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099  
E-mail: dwryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 선임연구원

**이 정 인**

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과, 공학사  
1965년 서울대학교 대학원 광산학과, 공학석사  
1974년 일본 도호쿠대학(東北大学) 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel: 02-880-7221  
E-mail: cilee@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 명예교수

