

수리적 간극변화를 고려한 수리적 굴착손상영역의 정의에 관한 연구

박종성¹, 류동우^{2*}, 류창하³, 이정인⁴

Defining the hydraulic excavation damaged zone considering hydraulic aperture change

Jong-Sung Park, Dong-Woo Ryu, Chang-Ha Ryu, 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 processes induced by the excavation. Various studies have been carried out on EDZ, but most studies have 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 by using H-M coupling analysis. Fundamental principles of distinct element method (DEM) were used in the analysis. In the same groundwater level, the behavior of hydraulic aperture near the cavern was analyzed for different stress ratios, initial apertures, fracture angles and fracture spacings by using a two-dimensional DEM program. We evaluate the excavation induced hydraulic aperture change. Using the results of the study, hydraulic EDZ was defined as an elliptical shape model perpendicular to the joint.

Keywords: Excavation damaged zone, hydraulic aperture, distinct element method, H-M coupling

요 지 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. 따라서 본 연구에서는 굴착으로 인해 굴착면 주변의 수리적 간극이 늘어나는 영역을 산정하여 '수리적 굴착손상영역'이라 정의하고 이를 위해 수리-역학적 상호작용(coupling)해석을 수행하였다. 이는 개별 불연속면 땅의 생성을 통한 역학적, 수리적 변화의 모사가 가능한 개별요소법(discrete element method; DEM)을 이용하여 수행하였다. 이를 통해 EDZ에서 지하수의 흐름에 영향을 미치는 각종 조건들(불연속면의 간극, 불연속면 균의 방향, 불연속면 균의 길이, 불연속면의 각도 등)의 변화와, 응력분포, 지하수의 유동 등으로 인해 수리적 간극 값이 어떻게 변화하는지를 파악하였다. 이 결과를 토대로 수리적 간극이 커지는 영역, 수리적 EDZ를 공동 주변의 불연속면 방향에 수직 방향으로 존재하는 타원형의 형태로 모델링 하였다.

주요어: 굴착손상영역(EDZ), 수리적 간극, 개별요소법(DEM), 수리-역학적 상호작용(coupling)

1. 서 론

지하공간의 개발을 위한 설계 및 시공과정에서 현지 암반의 거동을 정확히 이해하는 것은 대단히 중요하다. 현지 암반은 초기 생성 시부터 단층, 절리, 층리 등의 불연속면을 포함하고 있으며, 이들 불연속면은 역학적으로 취약하고 지하수 유동의 통로가 됨으로 암반의 역

학적, 수리적 거동을 좌우한다.

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, 2006). EDZ의 역학적 특성과 관련한 많은 연구들이 수행되었지만, EDZ에서의 지하수 유동 특성에 관한 연구는 아직 부족한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 수리-역학적 상호작용 해석을 통해 수리적 굴착손상영역(hydraulic excavation damaged zone; H-EDZ)을 정의하였다. 터널이나 공동이 굴착되었을 때 굴착면 주변의 작은 범위에 새롭게 생성되는 균열을 제외한다면, 굴착면 주변의 투수

¹서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

²한국지질자원연구원 선임연구원

³한국지질자원연구원 책임연구원

⁴서울대학교 지구환경시스템공학부 명예교수

*교신저자: 류동우(dwryu@kigam.re.kr)

성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 수리간극(hydraulic aperture)의 변화라 생각할 수 있다. 지하수 유동은 대부분이 불연속면의 간극을 따라 발생하기 때문이다. 수리간극 변화의 범위를 산정하고 정량화하기 위해 2차원 개별요소해석 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element Code) 4.0을 이용하였다.

2. 수리적 굴착손상영역

2.1 굴착손상영역의 정의

굴착손상영역(EDZ)이란 역학적, 열적, 수리적 그리고 화학적 과정들을 포함한 다양한 과정 중에 발생한, 터널 주변의 암반이 원래의 암반과 다른 특성을 나타내는 영역을 의미한다. 일반적으로 EDZ는 굴착으로 인해 새로이 불연속면이 생성되는 정도, 원래 암반이 가지고 있던 투수성이 커지고, 강도가 낮아지는 것 등에 대한 현장 시험 데이터를 통해 그 범위를 산정하지만(Sato, 1998), 이번 연구에서는 수리적 EDZ를 ‘수리-역학 상호작용 해석을 수행했을 때 수리적 간극이 굴착전의 값보다 상대적으로 커진 영역’ 이라고 정의한다.

이 때 주의해야 할 점은 역학적 간극과 수리적 간극의 차이를 정확히 인지하는 것이다. 역학적 간극은 불연속면 양쪽의 점과 점 사이의 평균 거리를 의미한다. 즉, 이 값은 몇 개의 지점에서 실제로 측정된 간극 값의 평균치를 이용하거나, 여러 지점에서 얻어진 간극 정보를 통계 처리해서 구할 수 있고 수치적으로 산정될 수 있다. 이에 반해 수리적 간극은 지하수의 흐름이 일어날 수 있는 간극 거리를 의미하며, 현장에서의 양수시험이나 실험실에서의 투수시험을 통해 투수계수나 수리전도도를 구한 뒤 그 값을 역산해서 얻어낸다. 불연속면을 매끈하다고 가정할 경우 수리적 간극은 식 (1)로 결정할 수 있다(Olsson & Barton, 2000).

$$Q = \frac{g}{v} \frac{we^3}{12} \frac{dP}{dy} \quad (1)$$

여기서 w 는 유체 흐름 경로의 폭이고, v 는 운동학적 점성계수(kinetic viscosity)이고, e 는 수리적 간극을 의미한다.

불연속면의 거칠기까지 모사할 수 있는 불연속면의 구성방정식으로는 Patton, Barton-Bandis 등이 개발한 불연속면 모형이 있지만, 이들 구성방정식을 이용한 수치해석

프로그램은 해석의 안정성이 떨어지기 때문에 이번 연구에서는 Mohr-Coulomb 불연속면 모형을 이용하였다.

2.2 역학적 간극과 그 변화 영역

Shen & Barton(1997)은 개별요소법을 이용한 수치실험을 통해 EDZ를 다음의 세 가지 영역으로 정의하였다. 첫 번째는 파괴영역(failure zone)으로 굴착으로 인해 블록의 낙반이 발생하거나 파괴가 일어나는 영역을 말한다. 이는 원래 존재하던 암반의 불연속면과 새로 생긴 굴착면이 교차하면서, 위험 방향의 블록이 중력으로 인해 낙반하는 영역을 말한다. 두 번째는 전단영역(shear zone)으로 굴착 이후 불연속면에 전단변형이 발생하는 영역이다. 불연속면은 매끈한 형태가 아니라 거칠기를 갖고 있기 때문에 전단변위가 발생하게 되면 불연속면에 법선 방향으로 수직변위가 발생하게 된다. 세 번째는 열림영역(open zone)으로 굴착으로 인해 응력이완이 발생하면서 불연속면 사이의 간극이 불연속면의 법선 방향으로 확대된 영역을 말한다. 이번 연구에서는 이 같은 세 가지 영역 이외에 닫힘영역(closure zone)을 확인해 보았는데, 이 영역은 터널의 굴착 후 오히려 불연속면의 폐쇄가 일어나는 영역으로 주위의 수압을 증가시키기 때문에 수리 간극과 지하수 유동의 방향을 변화시킬 수 있다.

굴착으로 인해 발생하는 손상영역을 이같이 네 가지로 나누어 정의한 뒤, 개별요소법을 이용한 해석 프로그램인 UDEC 4.0을 이용하여 간단한 형태의 지질조건 하에서 위에서 정의한 굴착손상영역의 크기와 형태를 확인하였다. 본 연구에서 중요한 점은 역학적인 EDZ의 정의나 범위산정이 아니라, 수리-역학적 상호작용 해석 시 굴착에 의한 굴착면 주변 수리적 간극 변화 양상을 통해 수리적 EDZ의 범위를 산정하는 것이다. 따라서 2.2절에서는 간단한 지질 구조상에서 해석을 수행함으로써, 어떤 역학적 원리에 의해 불연속면의 개구현상이 일어나는지 만을 확인하였고, 자세한 해석결과는 생략하였다.

해석 단면은 그림 1과 같이 100 m×100 m의 2차원 해석영역에, 60 m깊이에 터널이 지나간다고 가정하였고, UDEC 해석에 사용한 입력변수들은 표 1과 같다.

해석 결과, 파괴영역은 불연속면의 밀도, 불연속면의 마찰각, 암반 블록의 형상, 불연속면의 연장성에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 불연속면의 간극이 굴착으로 인해 벌어지는 현상의 원인은 굴착으로 인한 응력이완과 그에 따른 불연속면의 개구현상, 전단변형으

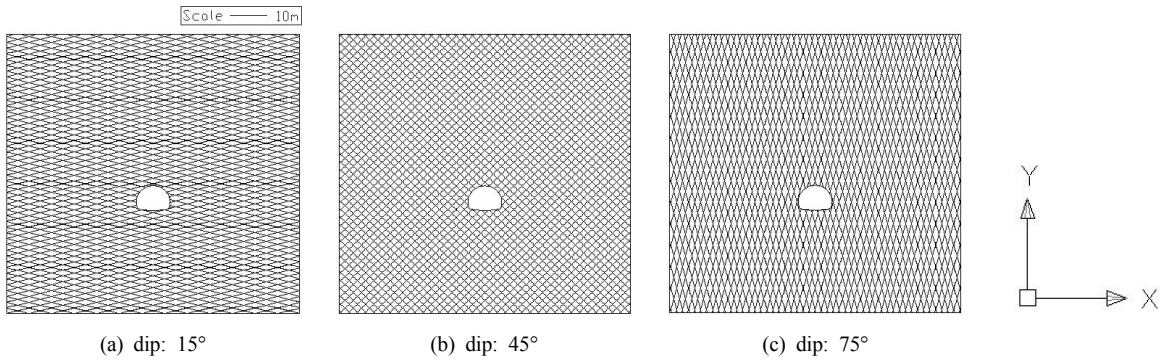


그림 1. DEM block geometry

표 1. Parameters for mechanical analysis of jointed rock mass

Mechanical properties	Unit	Value
Young's modulus (E)	GPa	30.4
Poisson's ratio (ν)	-	0.23
Density (ρ)	kg/m^3	2,660
Joint normal stiffness (K_n)	GPa/m	1.5
Joint shear stiffness (K_s)	GPa/m	0.8
Joint friction angle (ϕ)	Degree	40
Joint dilation angle (ϕ_d)	Degree	5
Joint cohesion (c)	MPa	0.01
Gravity	m/s^2	10
Horizontal stress ratio (K)	-	0.25
Bulk modulus (K_b)	GPa	18.8
Shear modulus (G_s)	GPa	12.4

로 인한 수직팽창, 불연속면의 마찰각과 같은 물성치의 영향 등 복잡적이라는 사실도 알 수 있었다. 닫힘영역은 축압비(K)가 1보다 작은 경우, 즉 수직응력이 수평응력에 비해 큰 조건에서 불연속면 균의 각도가 작은 경우에 터널의 측벽부에 넓게 발생하였다. 반대로, 축압비(K)가 1 이상으로 커져 수평응력이 수직응력에 비해 큰 경우에는 불연속면 균의 각도가 큰 경우에, 측벽부에 닫힘영역이 넓게 발생하게 된다는 사실도 알 수 있었다. 닫힘영역은 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 발생하기 때문에 본 연구에서는 의미 있는 영역으로 다루지 않았다.

역학적 간극변화 양상을 수치실험을 통해 확인해본

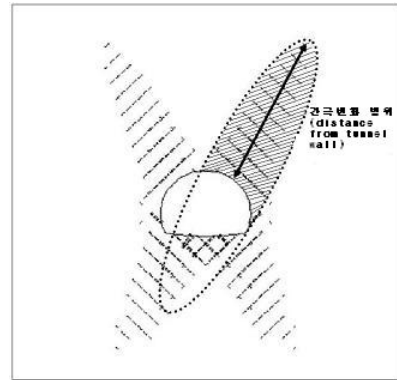


그림 2. Determination of the range of aperture changed zone (EDZ) [ellipse model]

결과 역학적, 수리적 간극의 변화가 발생하는 범위를 모델링 할 때는 타원형의 모델을 이용하는 것이 가장 합리적이라고 판단하였다. 그림 2와 같이, 불연속면 균의 각도와 타원의 중심좌표, 장축의 길이, 단축의 길이만 알 수 있다면 타원형의 모델링은 불연속면 간극변화의 범위를 형상화하는데 있어 효율적이다. 타원형의 간극변화 영역은 굴착면 윗부분에 2개, 아랫부분에 2개가 X자 형태로 교차하는 형태로 나타난다.

2.3 수리적 간극과 그 변화 영역

굴착 이전 초기 상태의 지하심부의 암반은 역학적, 수리적으로 평형상태를 유지하고 있으나 굴착이 진행됨에 따라 이러한 평형상태는 깨어지고 수리적 요소와 역학적 요소는 서로 상호작용을 주고 받으면서 새로운 평형상태를 이루게 된다. 즉, 굴착으로 인해 굴착 단면 주변

에 응력이 재분배되고 이는 투수성 및 지하수위의 변화를 야기한다. 또한 수리유동의 변화는 다시 역학적 변화를 일으킨다(김택곤, 1994).

따라서 지하수 유동에 대한 고려를 하는지, 하지 않는지에 따라 불연속면의 간극에는 차이가 존재한다(Min, 2004). 굴착면 주변에 새로이 생성되는 불연속면에 대한 영향은 고려할 수 없지만 수리·역학 상호작용 해석을 통해 불연속면 간극의 변화 정도를 수치화 할 수 있게 되면 수리적 간극 변화가 투수성과 유입유량에 미치는 영향을 파악할 수 있는 것이다.

이번 해석에서도 2.2절과 동일한 해석단면을 가정하였다. 60 m 깊이에서의 암반 지층이 터널에 수직응력으로 작용하고, 수평방향의 응력은 K값을 변화시켜가며 축압비에 따른 수리적 간극의 변화 양상을 파악하였다. 불연속면은 해석영역 내에서 무한하도록 하였고, 절리 각도는 15도, 30도, 45도, 60도, 75도로 각각 대칭절리를 생성하였다. 지하수위는 지표면과 평행한 상태라고 가정하였고, 수리해석의 알고리즘은 능률적인 계산을 위해 정상상태(steady-state) 해석을 실시하였다. 터널과 같은 구조물이 설계될 때에, 지하수위에 변동을 줄 만큼 투수성이 큰 다공질 암반이나, 대규모 불연속면을 포함하지 않은 경우는 지하수의 흐름 상태를 정상상태라 가정해도 무방하다. 이 같은 가정과 초기조건 하에, UDEC 해석에 사용한 입력변수들은 표 2와 같다.

상호작용으로 인한 수리적 간극의 변화 양상을 확인할

표 2. Parameters for H-M coupling analysis of jointed rock mass

Properties	Unit	Value
Young's modulus (E)	GPa	30.4
Poisson's ratio (ν)	-	0.23
Density (d)	kg/m^3	2,660
Joint normal stiffness (K_n)	GPa/m	3
Joint shear stiffness (K_s)	GPa/m	1.6
Joint friction angle (ϕ)	Degree	40
Joint dilation angle (ϕ_d)	Degree	5
Joint cohesion (c)	MPa	0.01
Gravitational acceleration	m/s^2	10
Initial aperture (at zero stress)	mm	0.2~4
Residual aperture	mm	0.01~0.1
Joint permeability constant	$1/(Pa \cdot sec)$	238
Bulk modulus (K_b)	GPa	18.8
Shear modulus (G_s)	GPa	12.4

때, 이에 영향을 미칠 수 있는 요인들은 매우 다양하다. 이번 연구에서는 축압비, 불연속면의 초기간극, 불연속면 균의 각도, 불연속면의 간격, 이렇게 네 가지 변수에 따른 수리적 간극의 변화양상에 대해 고찰하였다. 이번 해석 역시 간극변화 영역은 그림 3과 같이 타원형으로 모델링하였다.

2.3.1 축압비의 변화에 따른 수리적 간극변화 영역

축압비를 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3으로 각각 변화시켜가며 수리적 간극의 변화 양상을 살펴보았다.

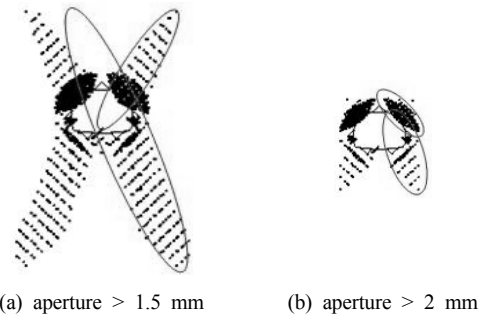


그림 3. Determination of hydraulic EDZ by ellipse model [joint spacing: 2 m, dip: 45°, initial aperture: 1 mm]

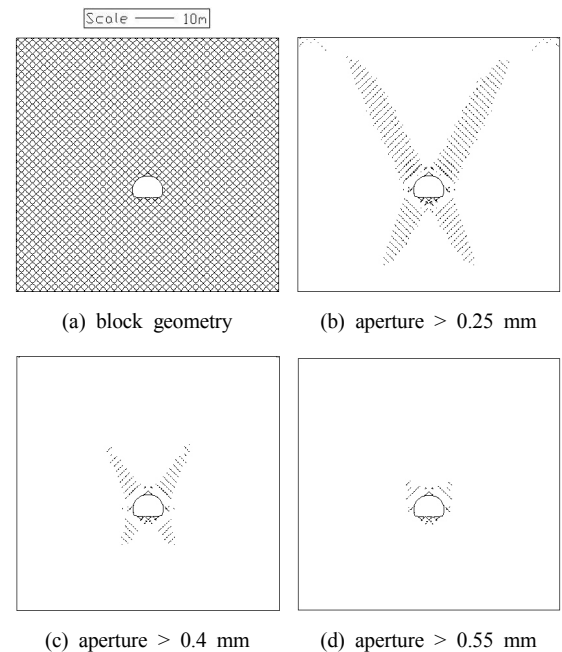


그림 4. Hydraulic EDZ (initial aperture: 0.2 mm) [K: 0.5, joint spacing: 2 m, dip of joint: 45°]

불연속면 균의 초기 수리적 간극 값은 0.2 mm로 고정하였고, 불연속면 균의 각도는 45도로 하였다. 그 밖의 물성치는 표 2와 동일하다.

대표적인 해석결과로써 $K=0.5$ 인 경우의 상호작용(coupling)에 의해 굴착면 주변의 수리적 간극 값의 변

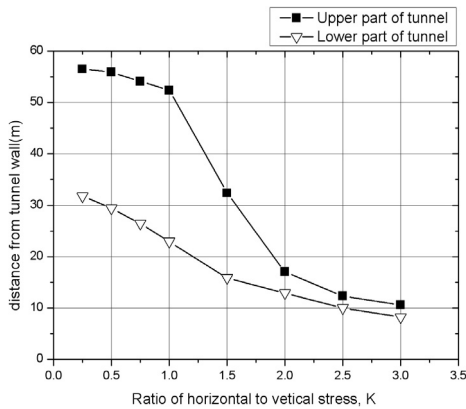


그림 5. Variation of hydraulic EDZ according to various K [initial hydraulic aperture: 0.2 mm]

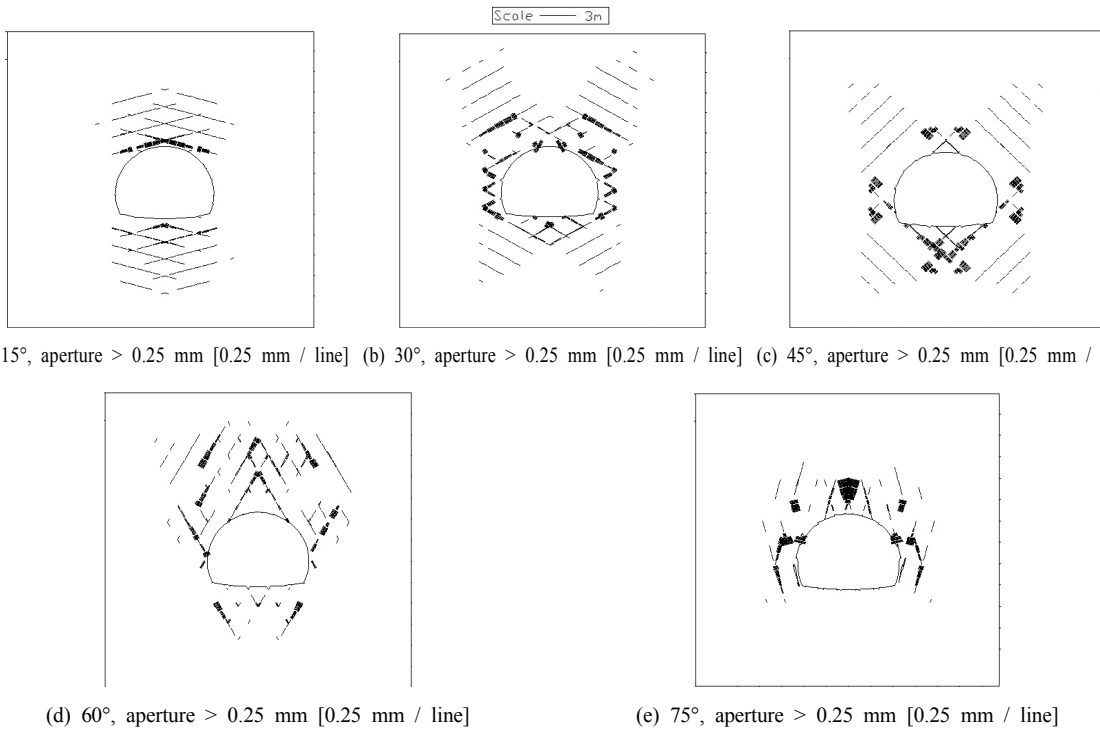
화양상을 그림 4에 나타내었다.

측압비가 변화함에 따라 불연속면의 수리적 간극이 초기 0.2 mm에서 0.25 mm 이상으로 늘어난 영역을, 터널 벽면으로 부터의 거리로 표현하면 그림 5와 같다.

측압비(K)가 커지면 불연속면의 수리적 간극이 넓어지는 영역이 점점 줄어든다. 이는 암반 자중과 중력에 의한 수직응력의 값이 고정된 상태에서 측압비가 커지면 암반에 가해지는 구속력이 커지기 때문에 불연속면의 전단변위에 의한 팽창정도가 작아지고, 간극에 작용하는 간극수압(pore pressure)에 의한 불연속면의 개구 현상이 일어나는 범위가 작아지기 때문이다. 실제로, 동일한 조건에서는 $K=0.25$ 일 때가 $K=3$ 일 때보다 전단변위가 발생하는 영역이 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

2.3.2 불연속면 균의 각도변화에 따른 수리적 간극변화 영역

불연속면 균의 각도를 각각 15도, 30도, 45도, 60도, 75도로 변화시켜가며 수리적 간극변화가 일어나는 범위



(a) 15°, aperture > 0.25 mm [0.25 mm / line] (b) 30°, aperture > 0.25 mm [0.25 mm / line] (c) 45°, aperture > 0.25 mm [0.25 mm / line]

(d) 60°, aperture > 0.25 mm [0.25 mm / line]

(e) 75°, aperture > 0.25 mm [0.25 mm / line]

그림 6. Hydraulic EDZ with various joint angle [K: 2.5, joint spacing: 2 m, initial aperture: 0.2 mm]

를 확인하였다. 초기 수리적 간극 값은 0.2 mm, 축압비 (K)는 2.5, 불연속면 간격은 2 m로 고정시킨 상태에서 불연속면 균의 각도를 변화시켜가며 수리적 간극 값이 0.2 mm에서 0.25 mm로 늘어난 영역을 도시하면 그림 6과 같다.

간극의 변화 영역은 불연속면의 방향에 수직 방향으로 발달하며, 동일한 크기의 간극변화가 일어난 영역은 불연속면 균의 각도에 따라 큰 차이가 없었다. 불연속면 균의 각도가 60도 이상으로 커졌을 때 간극 변화가 생기는 영역이 터널 상단부에 넓게 발생하는 이유는, 마찰각 이상의 불연속면 각도에서는 중력에 의해 상단부의 블록이 터널 안쪽으로 낙반이 발생하는 등 큰 변위를 갖기 때문이다.

2.3.3 불연속면의 간격변화에 따른 수리적 간극 변화 영역

불연속면의 초기간극 0.2 mm, 축압비(K) 2.5, 불연속면 각도를 45도로 고정시킨 상태에서 불연속면 간격을 2 m, 3 m, 4 m로 변화시켰을 때, 굴착 후 수리적 간극이 0.2 mm에서 0.25 mm로 커지는 영역의 범위를 살펴보았다. 그 결과는 그림 7과 같다.

그림 7에서는 불연속면의 간격이 커져도, 전반적인 불연속면 간극 변화 영역의 범위는 크게 달라지지 않는다는 것을 보여준다. 이는 불연속면 균의 간격에 상관없이, 한 절점(node)에서의 응력 상태는 동일하기 때문에 그 위치에 불연속면이 존재하는지 여부에 따라

간극변화 영역이 표현되는지 여부가 결정된다는 것을 의미한다.

2.3.4 불연속면 균의 초기간극에 따른 수리적 간극변화 영역

불연속면의 초기 수리적 간극(initial hydraulic aperture) 값을 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm로 각각 변화시켜가며 굴착 이후 수리적 간극의 변화를 살펴보았다.

대표적인 해석결과로서 초기간극이 1 mm인 경우, 상호작용(coupling)에 의한 굴착면 주변의 수리적 간극 값 변화양상을 그림 8에 나타내었다.

해석 결과, 모든 경우에 있어 간극의 변화가 최종적으로 약 0.18 mm에서 0.22 mm정도까지 늘어나는 영역을 확인할 수 있었으며, 그 범위는 초기 간극 값에 영향을 받지 않고 초기 간극이 작던, 크던 거의 흡사하게 나타났다는 사실을 알게 되었다. 이는 전반적인 수리적 간극 변화의 양상이 초기 간극 값보다는 축압비, 불연속면 균의 각도, 입력 물성치에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 알려준다.

초기 간극 값의 변화에 따른 최대 유입유량은 아래의 그림 9와 같이 나타났다. 이 결과는 불연속면의 초기 간극 값이 커짐에 따라 최대 유량값이 커진다는 것과, 특히 불연속면의 간극이 1 mm이상으로 커지게 되면 삼승근 법칙에 따라 터널 내부로 유입되는 유량이 급격히 많아진다는 사실을 알려준다.

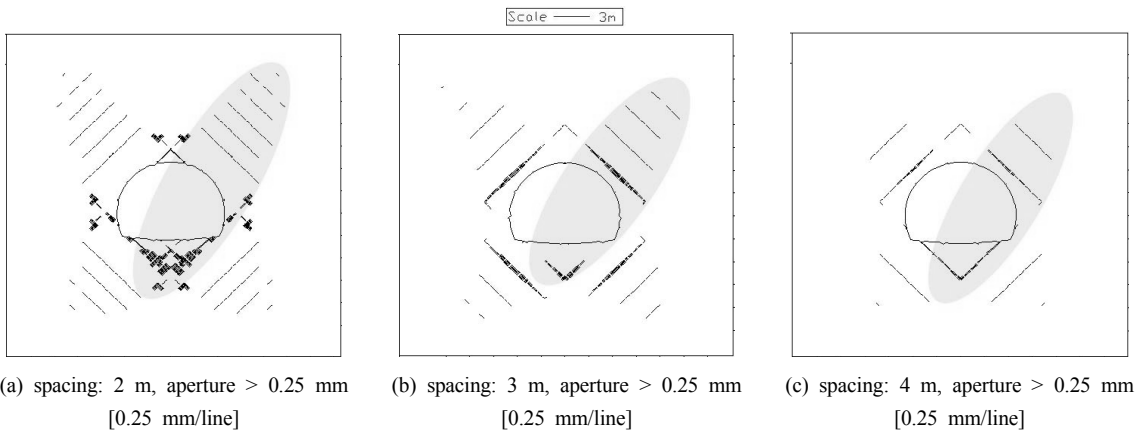


그림 7. Hydraulic EDZ according to various joint spacing [K: 2.5, dip of joint: 45°, initial aperture: 0.2 mm]

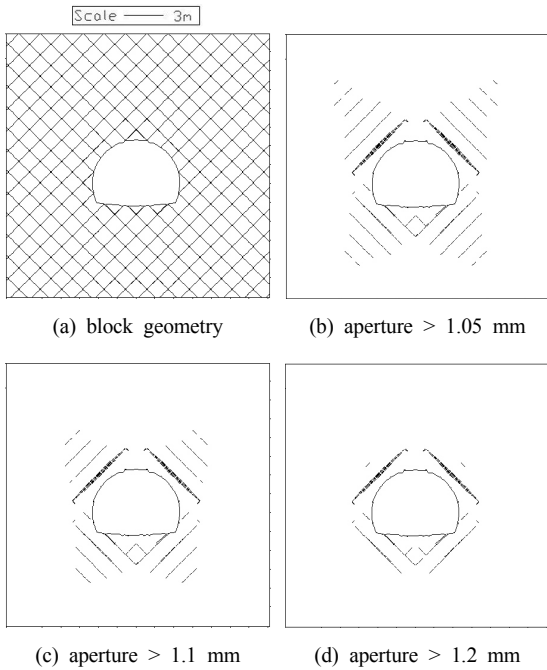


그림 8. Hydraulic EDZ (initial aperture: 1 mm) [K: 2.5, joint spacing: 2 m, dip of joint: 45°]

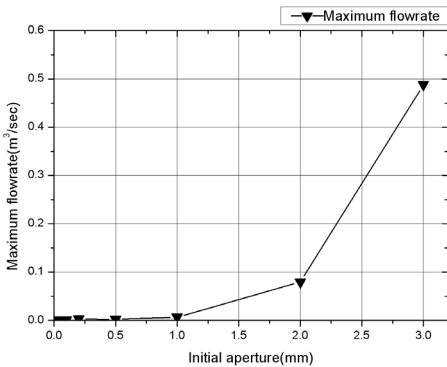


그림 9. Variation of maximum flow rate according to various initial aperture [K: 2.5, joint spacing: 2 m, dip of joint: 45°]

3. 분리단열망을 이용한 수리적 간극변화 영역의 검증

지금까지는 단순히 가정된 불연속면 구조에서 측압비, 초기 불연속면 간극, 불연속면 각도, 불연속면 간격을 변화시켜가며 굴착 이후의 굴착면 주변 수리적 간극의 변

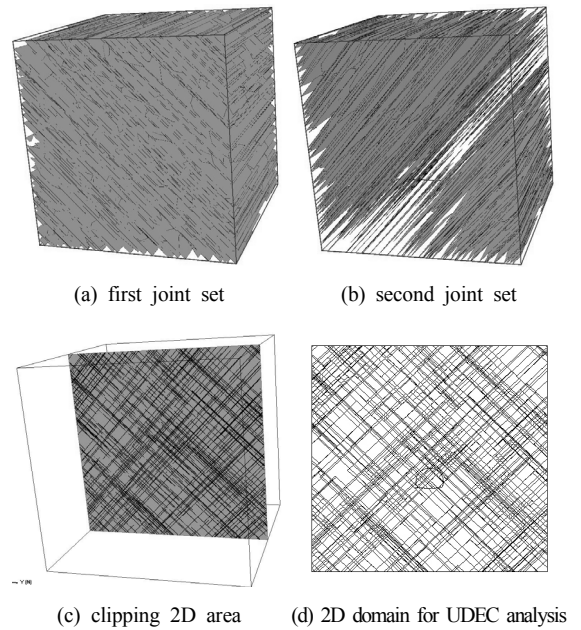


그림 10. Discrete fracture networks and clip region

화 양상을 살펴보았다. 이같은 과정을 통해 얻어낸 수리적 EDZ의 범위 산정 방식이 타당성이 있는지를 확인해보기 위해 분리단열망(discrete fracture network; DFN)을 이용해 통계학적으로 불연속면 망을 발생시켜 수리적 EDZ를 검증해보았다. 주향/경사(strike/dip)값과 불연속면 방향, 불연속면의 밀도, 불연속면의 크기 분포 값을 입력하여 3차원 불연속 균열 망을 생성시킨 뒤, 이를 임의의 2차원 단면으로 잘라내 그 불연속면 군 정보를 다시 UDEC 프로그램 내로 가져와 연동 해석을 실시하였다.

DFN 수치해석 프로그램인 FracworksXP를 이용하였고, 불연속면 밀도는 0.2357(불연속면 군의 면적/전체부피)을 입력변수로 사용하였다. 불연속면의 형상은 가장 보편적으로 사용되는 Enhanced Baecher 모형을 이용한 원형 디스크를 사용하였으며 불연속면의 중심은 포아송 분포를 따르는 것으로 모사하였다. 해석 대상의 크기는 불연속 터널 단면 해석을 위해 100 m×100 m×100 m의 정방형 영역을 설정하였다. 불연속면 군의 방향은 동일한 특정값(constant)분포이며, 그 값은 경사각이 45도인 대칭값으로 입력하였다. 불연속면의 크기는 로그 정규 분포를 가지며 크기의 평균값은 30 m, 표준편차는 10.0로 하였다. 그림 10은 생성된 2개의 DFN 불연속 망과,

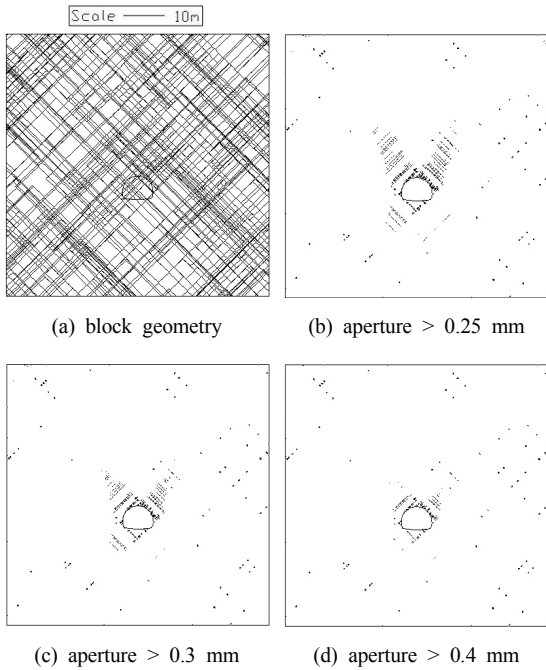


그림 11. Hydraulic EDZ [K: 2.5, joint spacing: random, dip of joint: 45°, initial aperture: 0.2 mm]

터널 축 방향으로 잘라낸 2차원 불연속면 망의 모습, 그리고 UDEC 해석에 이용된 해석 단면이다.

생성된 2차원 불연속면 망을 UDEC 프로그램으로 가져와, 불연속면 균의 초기 수리적 간극을 0.2 mm, K=2.5로 가정하고 수리-역학 상호작용 해석을 수행하였다. 해석 결과는 그림 11과 같다.

위의 결과를 보면 알 수 있듯, 불연속면 균의 진정사각을 알 수 있다면 분포의 편차가 큰 불연속면 균에서도 수리적 간극이 변하는 범위는, 단순화시킨 경우와 비교해볼 때 큰 차이가 없다는 사실을 알 수 있다. 이 결과를 통해, 수리적 간극값의 변화를 산정하는 방법은 다양한 불연속면 각도와 크기, 분산 정도를 갖는 경우에도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 개별요소법(DEM)을 이용하여 굴착 전후 굴착으로 인해 역학적, 수리적 특성이 변화된 수리적 굴착손상영역(H-EDZ)을 정의하였다. 연구에서 얻어진

주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 지하 암반의 굴착 시 불연속면의 방향과 간격에 따라 낙반, 전단변형, 수직변형, 불연속면의 폐쇄 현상이 발생했으며 이는 굴착면 주변에 존재하는 불연속면의 역학적 간극을 변화시킨다.
2. 굴착으로 인해 불연속면의 수리적 간극이 변하는 영역을 타원형으로 모델링하였고, 이 영역은 불연속면 균의 방향에 수직 방향으로 나타난다. 수리적 간극변화 영역을 타원형의 모델로 산정할 경우, 굴착면 주변에 간극변화가 나타나는 영역을 손쉽게 표현할 수 있다.
3. 굴착으로 인해 굴착면 주변 기존 불연속면의 수리적 간극 값이 커진 영역을 수리적 굴착손상영역이라 정의하고, 개별요소법 해석 프로그램을 이용해 수리-역학 상호작용(coupling)에 의한 굴착면 주변의 수리적 간극변화 범위를 산정하였다. 해석 결과, 축압비가 커짐에 따라 수리적 EDZ는 줄어드는 양상을 나타냈다. 초기 불연속면 간극은 굴착 이후 최종적인 불연속면의 간극값에 영향을 주지 못했지만, 터널 내부로 유입되는 유량에 영향을 주었다. 불연속면 균의 각도, 불연속면 간격은 수리적 EDZ의 범위에는 큰 영향을 미치지 않았지만 타원형으로 모델링한 수리적 EDZ의 형상에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
4. 분리단열망(DFN)을 이용해, 3차원 영역에서 임의로 발생시킨 절리망의 정보를 2차원 개별요소법 해석 프로그램으로 가져와 연동해석을 실시한 결과, 수리적 간극값의 변화를 산정하는 방법은 불연속면의 형태가 복잡한 경우에도 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인하였다.
5. 이번 연구를 통해 얻어진 굴착면 주변의 간극변화 범위와, 수리적 특성에 대한 정보는 이후 3차원 불연속체 해석법에 이용될 수 있을 것이다.

사 사

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

참고문헌

1. 김택곤 (1994), 불연속 암반내 지하수유동과 공동거동의 상호작용에 관한 수치해석적 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교.
2. 정용훈 (2006), 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교.
3. Min, K. B. (2004), "Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1191-1210.
4. Olsson, R., Barton, N. (2000), "An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 317-329.
5. 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, pp. 97-108.
6. Shen, B., Barton, N. (1997), "The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 34, pp. 117-125.



박 종 성

서울대학교
지구환경시스템공학부
석사과정

E-mail: pjsda@rockeng.snu.ac.kr



류 동 우

한국지질자원연구원
선임연구원

E-mail: dwryu@kigam.re.kr



류 창 하

한국지질자원연구원
책임연구원

E-mail: cryu@kigam.re.kr



이 정 인

서울대학교
지구환경시스템공학부
명예교수

E-mail: cilee@snu.ac.kr

