터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제20권 제3호, 2010년 6월, pp. 225~232
TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 20, No. 3, 2010, pp. 225-232
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

GSI 및 절리의 방향이 수리전도도 변화에 미치는 영향

윤용균[1)*]

Effects of GSI and Joint Orientation on the Change of Hydraulic Conductivity

Yong-Kyun Yoon

Abstract In this study, a newly modified 3-dimensional strain-dependent hydraulic conductivity modification relation which incorporates the influences of normal deformation and shear dilation is suggested. Since rock mass is simulated as a orthogonally jointed medium, an anisotropic hydraulic conductivity field can be evaluated using that relation. The empirical relationship on the basis of GSI and disturbance factor has been used to estimate the value of a modulus reduction ratio (ratio of rock mass deformation modulus to rock matrix elastic modulus). Principal hydraulic conductivity directions is not generally coincident with the global coordinate due to the inclining of joint and the influence of joint inclination is evaluated under strain rotation. Result shows that change of hydraulic conductivity does decreases with the increase of GSI and disturbance factor has much effects on the hydraulic conductivity of rock mass getting GSI value above 50. It is found that the inclination of joint impacts on the variation of hydraulic conductivity.

Key words 3-dimensional strain-dependent hydraulic conductivity modification relation, GSI, Disturbance factor

초 록 본 연구에서는 절리에 작용하는 수직변형과 전단 팽창을 고려할 수 있는 수정된 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 제안하였다. 현지 암반을 직교절리가 발달한 매질로 가정하기 때문에 제시된 방정식을 사용하여 수리전도도의 이방성을 평가할 수 있다. 현지암반의 변형계수를 필요로 하는 탄성계수감소비를 손쉽게 결정하기 위하여 GSI와 교란계수를 기초로 하는 경험식을 사용하였다. 현지 암반 내에 존재하는 절리는 일반적으로 전체좌표계와 평행하지 않고 기울어져 있는 경우가 많기 때문에 기울어진 방향에서의 수리전도도를 구하기 위하여 변형률 회전식을 사용하였다. 해석 결과 GSI가 증가함에 따라 수리전도도는 감소하는 것으로 나타났다. 교란계수는 수리전도도의 변화 거동에 영향을 미치는 것으로 나타났는데 특히 GSI가 50 이상인 암반의 수리전도도 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 절리의 경사도 수리전도도 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심어 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 구성방정식, GSI, 교란계수

1. 서 론

흙의 경우에는 흙 입자 간의 간극을 통해 지하수가 흐르지만, 암반에서는 풍화가 아주 심하게 진행되거나 공극률이 아주 큰 암석으로 구성된 암반을 제외하고는 절리를 통해 지하수가 유동하게 된다. 평행판 사이로 흐르는 층류의 유출량을 Navier-Stokes 유동방정식으로부터 유도하면 평행판 간극의 3승에 비례하는 것으로 나타나기 때문에(하재현 외, 2008) 절리면을 평행판으로 가정하는 경우 절리 간극을 통하여 유동하는 지하수의 유출량도 간극의 3승에 비례하게 된다. 절리의 거칠기도 절리의 수리전도도에 영향을 미치지만 절리에 작용하는 수직응력이 아주 크지만 않다면 3승 법칙이 유효하게 적용될 수 있는 것으로 알려져 있다(Witherspoon 외, 1980).

터널을 굴착하는 경우 초기응력이 교란됨으로 인해 응력의 재분포가 발생하고 응력 재분포에 따른 변위장의 변화에 따라 절리 간극이 확대되거나 축소되어 터널 주변 암반의 수리전도도에 변화가 발생하게 된다. 절리

1) 세명대학교 소방방재학과 교수
* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr
접수일 : 2010년 6월 14일
심사 완료일 : 2010년 6월 25일
게재 확정일 : 2010년 6월 25일

간극의 변화는 절리에 작용하는 수직 및 전단변형률에 좌우되기 때문에 절리 간극의 변화에 영향을 미치는 변형률을 고려한 3승 법칙을 적용하면 응력 재분포에 따른 수리전도도의 변화를 평가할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. Bai(1991)는 3승 법칙을 이용하여 절리에 작용하는 수직변형률만을 고려한 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 제시하였으며, Bai & Elsworth(1994)는 절리에 작용하는 수직응력이 작은 경우 전단변형에 따른 팽창이 절리 간극을 증대시킨다는 점을 고려하여 수직변형률과 전단변형률을 고려한 변형률 의존성 수리전도도 변화 구성방정식을 제안하였다. 상기의 연구자들은 암반을 직교절리가 발달한 등가다공질매질로 고려하여 수리전도도의 이방성을 고려할 수 있게 하였다. Liu(1996)는 2차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 구성방정식을 변환하여 수직변형률과 탄성계수감소비(Modulus reduction ratio)를 고려할 수 있는 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 제시하였으며, Bai 외(1999)는 변형률 대신 절리에 작용하는 수직응력과 전단응력을 고려하고 암석의 탄성계수와 전단탄성계수 및 절리 강성을 이용한 3차원 응력 의존성 수리전도도 변화 방정식을 제시하였다.

본 연구에서는 Liu(1996)와 Bai 외(1999)가 제안한 3차원 수리전도도 변화 방정식을 수정하여 탄성계수감소비 및 전단탄성계수감소비(Shear modulus reduction ratio)를 포함하고 수직변형률 및 전단변형률을 고려한 일반적인 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 개발하였다. 탄성계수감소비를 평가하기 위해서는 현지암반의 변형계수가 필요하기 때문에 탄성계수감소비를 직접 이용하는 대신 불량한 암반부터 무결암까지의 전 범위에 걸친 암반 상태를 고려할 수 있는 GSI (Geological strength index)를 이용하여 탄성계수감소비를 계산할 수 있는 GSI-탄성계수감소비 관계식을 사용하였다. 현지 암반을 직교절리가 발달한 등가다공질매질로 가정한 후 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식과 GSI-탄성계수감소비 관계식을 이용하여 GSI 및 교란계수(Disturbance factor)가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 절리가 전체좌표계와 평행하지 않고 기울어져 있는 경우가 많기 때문에 절리의 방향이 수리전도도 변화에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 구성방정식

절리의 수리전도도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 절리 간극이고 절리 간극은 수직응력과 전단응력에 의해 달라진다. 압축 수직응력은 절리 간극을 감소시키고 인장 수직응력은 반대의 결과를 유발한다. 전단응력의 경우 수직응력이 크지 않다면 작은 전단변위에서도 팽창에 따른 수리전도도 증가가 발생하게 된다(Makurat 외, 1990). 절리에 작용하는 수직응력과 전단응력에 의해 절리 간극이 변한다는 결과를 고려할 수 있다면 응력 재분포에 의해 발생되는 수리전도도의 변화를 평가할 수 있다.

현지 암반이 직교 절리로 구성되어 있고 지하수 유동은 절리를 통해서만 발생한다고 가정하면 평행판모델을 적용하여 수직 및 전단변형률을 고려한 2차원 등방성 수리전도도 변화 방정식을 다음과 같이 표시할 수 있다(Bai & Elsworth, 1994, 윤용균, 2003).

$$\frac{K}{K_o}=\left\{1+\frac{\Delta\varepsilon}{b}\left(\frac{sE}{sk_n+E}\right)+\frac{\Delta\gamma}{b}\left(\frac{sG}{sk_s+G}\right)\tan\phi_d\right\}^3 \qquad (1)$$

여기서 K_o는 응력 재분포가 발생하기 전의 초기수리전도도, K는 응력 재분포가 발생한 이후의 변화된 수리전도도, $\Delta\varepsilon$와 $\Delta\gamma$는 수직변형률 및 전단변형률, ϕ_d는 절리의 팽창각, b와 s는 절리 간극 및 절리 간격, E 와 G는 암석의 탄성계수 및 전단탄성계수, k_n과 k_s는 절리의 수직 및 전단강성이다. 상기 식은 매질의 역학적, 기하학적특성이 매질 내에서 동일하여 수리전도도가 등방성인 경우를 가정한 경우이다. x, y 방향에 따라 절리 간격, 절리 간극, 수직응력, 전단응력 및 팽창각을 달리하면 수리전도도의 이방성을 평가할 수 있다.

식 (1)을 탄성계수감소비($R_m = E_m/E$, 여기서 E_m은 암반의 탄성계수이다)와 전단탄성계수감소비($R_{ms} = G_m/G$, 여기서 G_m은 암반의 전단탄성계수이다)를 이용하여 이방성 무차원 수리전도도비로 다시 쓰면 식 (2)~(3)과 같이 표시된다.

식 (1) 대신에 식 (2), (3)을 사용하는 경우 실험적으로 구하기가 까다로운 절리의 강성을 사용하지 않아도 되고, 식에 탄성계수감소비와 전단탄성계수감소비를 도입함에 따라 암반의 모든 변형 상태를 고려할 수 있다

$$\frac{K_x}{K_{ox}}=\left\{1+\Delta\varepsilon_y\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{yx}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right\}^3 \qquad (2)$$

$$\frac{K_y}{K_{oy}}=\left\{1+\Delta\varepsilon_x\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{xy}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right\}^3 \qquad (3)$$

는 장점이 있다.

현지암반의 기하학적, 역학적특성이 이방적임을 고려하여 식 (2), (3)을 3차원 이방성 변형률 의존성 수리전도도 변화 구성방정식으로 일반화하면 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.여기서 $i,j,k=x,y,z;\ i\neq j\neq k$인 관계가 있다. Fig. 1에는 2차원 및 3차원 기하학적 모델이 표시되어 있다.

식 (4)에서 절리의 간격 및 간극이 동일하고 역학적특성인 탄성계수감소비, 전단탄성계수감소비 및 절리 팽창각이 등방성이라 가정하면 x,y,z 각 방향에서의 무차원 수리전도도비를 식 (5)~(7)과 같이 표시할 수 있다.

3. GSI와 절리의 방향을 고려한 수리전도도 변화

3.1 GSI를 고려한 수리전도도 변화

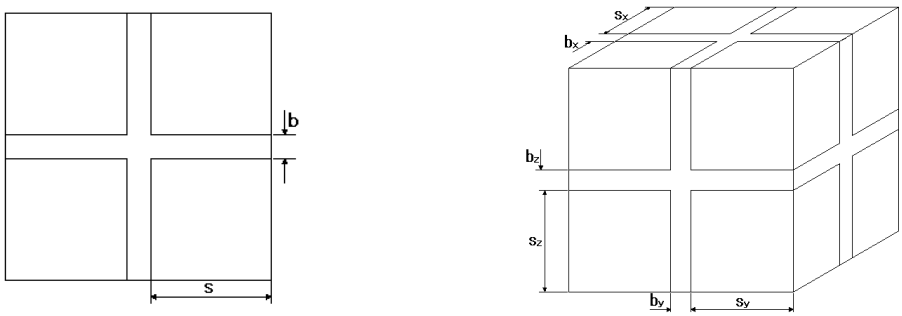
상기 식들에서 보는 바와 같이 응력 재분포에 따른 수리전도도의 변화는 암반의 변형특성에 좌우된다는 것을 알 수 있다. 현지암반과 무결암의 포아송비가 같다고 가정하면 R_m과 R_{ms}는 동일하게 되어 무결암의 탄성계수와 현지암반의 변형계수를 측정하면 R_m과 R_{ms}를 계산할 수 있다. 현지암반의 변형계수를 측정하는 것은 많은 비용과 시간뿐만 아니라 실험 절차상의 어려움을 내포하고 있기 때문에 암반분류법을 이용하여 간접적으로 R_m과 R_{ms}를 평가하기 위한 시도가 이루어져왔다. RMR을 이용하여 R_m을 구하기 위한 경험식들이 제시되었으나(Nicholson & Bieniawski, 1990, Kayabasi 외, 2003), RMR은 RMR<23인 대단히 불량한 암반을 평가할 수 없다는 제한을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 GSI를 사용하여 R_m을 평가할 수 있는 식 (8)과 같은 경험식을 사용하였다(Hoek & Diederichs, 2006). GSI는 암석학적인 특징, 구조지질학적인 요소와 불연속면의 상태와 관련된 요소로 구성되어 있으며 터널 벽면, 절개면, 노두 등에서 육안 관찰을 통해 결정할 수 있다. GSI는 매우 견고하게 결합된 암체에서부터 전단된 암

$$\frac{K_i}{K_{oi}}=\left\{\frac{1}{(b_j)^3+(b_k)^3}\right\}\left\{\begin{array}{l}(b_j)^3\left[1+\Delta\varepsilon_j\left(\frac{s_j}{b_j}(1-(R_m)_j)+1\right)+(\Delta\gamma_{jk}+\Delta\gamma_{ji})\left(\frac{s_j}{b_j}(1-(R_{ms})_j)+1\right)\tan(\phi_d)_j\right]^3\\+(b_k)^3\left[1+\Delta\varepsilon_k\left(\frac{s_k}{b_k}(1-(R_m)_k)+1\right)+(\Delta\gamma_{kj}+\Delta\gamma_{ki})\left(\frac{s_k}{b_k}(1-(R_{ms})_k)+1\right)\tan(\phi_d)_k\right]^3\end{array}\right\} \tag{4}$$

$$\frac{K_x}{K_{ox}}=\frac{1}{2}\left\{\begin{array}{l}\left[1+\Delta\varepsilon_y\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{yz}+\Delta\gamma_{yx})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\\+\left[1+\Delta\varepsilon_z\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{zy}+\Delta\gamma_{zx})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\end{array}\right\} \tag{5}$$

$$\frac{K_y}{K_{oy}}=\frac{1}{2}\left\{\begin{array}{l}\left[1+\Delta\varepsilon_z\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{zx}+\Delta\gamma_{zy})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\\+\left[1+\Delta\varepsilon_x\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{xz}+\Delta\gamma_{xy})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\end{array}\right\} \tag{6}$$

$$\frac{K_z}{K_{oz}}=\frac{1}{2}\left\{\begin{array}{l}\left[1+\Delta\varepsilon_x\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{xy}+\Delta\gamma_{xz})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\\+\left[1+\Delta\varepsilon_y\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+(\Delta\gamma_{yx}+\Delta\gamma_{yz})\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\end{array}\right\} \tag{7}$$



(a) 2-dimensional model (b) Generalized 3-dimensional model

Fig. 1. Geometry of the model

반까지 다양한 형태의 암반 형태에 적용될 수 있다.

$$R_m = R_{ms} = \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right) \quad (8)$$

여기서 D는 교란계수(Disturbance factor)로서 현지 암반이 발파에 의한 손상과 응력 해방에 의해 받게 되는 교란 정도에 따라 달라지는 지수로서 TBM에 의해 굴착된 불교란 암반에 대해서는 D=0, 대규모 발파를 수행하는 노천 채광 광산과 같이 매우 심하게 교란된 암반에 대해서는 D=1의 값을 갖는다(Hoek 외, 2002). 식 (7)을 사용하여 수리전도도의 변화를 계산하는 경우 암반이 본래부터 가지고 있는 불연속면의 영향뿐만 아니라 발파에 의한 파쇄의 영향도 고려할 수 있다는 장점이 있다.

3.2 절리의 방향을 고려한 수리전도도 변화

식 (2), (3)의 경우 매질 내 발달한 수직절리의 방향이 x-y 전체좌표계와 평행한 것으로 가정하지만 실제적으로는 절리의 방향이 전체좌표계와 일정한 각을 이루는 것이 일반적이라 할 수 있다. 절리의 방향이 전체좌표계와 평행하지 않고 기울어져 있는 경우 수리전도도의 변화를 평가하기 위해서는 기울어진 수직절리의 방향과 평행한 x'-y' 국부좌표계를 도입한 후 전체좌표계에서의 변형률 $\Delta\varepsilon_x$, $\Delta\varepsilon_y$, $\Delta\gamma_{xy}$를 국부좌표계에서 변형률 $\Delta\varepsilon_{x'}$, $\Delta\varepsilon_{y'}$, $\Delta\gamma_{xy'}$로 전환하는 것이 필요하다.

$$\begin{aligned}
\Delta\varepsilon_{x'} &= \frac{\Delta\varepsilon_x + \Delta\varepsilon_y}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y}{2}\cos 2\theta + \frac{\Delta\gamma_{xy}}{2}\sin 2\theta \\
\Delta\varepsilon_{y'} &= \frac{\Delta\varepsilon_x + \Delta\varepsilon_y}{2} - \frac{\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y}{2}\cos 2\theta - \frac{\Delta\gamma_{xy}}{2}\sin 2\theta \\
\Delta\gamma_{xu'} &= -(\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_u)\sin 2\theta + \gamma_{xu}\cos 2\theta
\end{aligned} \quad (9)$$

여기서 θ는 시계반대방향으로 측정된 전체좌표계와 국부좌표계의 사잇각이다.

4. 변수 연구

4.1 GSI 및 교란계수가 수리전도도 변화에 미치는 영향

Fig. 2에는 교란계수와 GSI에 따른 탄성계수감소비의 변화가 나타나 있다. 그림을 보면 교란계수가 0인 경우에 GSI에 따른 탄성계수감소비의 변화가 교란계수가 1인 경우보다 더 큰 것으로 나타난다. GSI가 50보다 큰 경우에 탄성계수감소비에 미치는 교란계수의 영향이 더 큰 것으로 나타나기 때문에 GSI가 50보다 큰 암반의 변형특성을 평가하는 경우 교란계수를 정확히 평가하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이상과 같은 결과를 통해 암반이 양호한 경우 교란계수가 클수록 터널 주변 암반의 수리전도도 변화에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다.

Fig. 3에는 식 (5)을 적용한 3차원 x 방향으로의 수리전도도비(hydraulic conductivity ratio) K_x/K_{ox}가 표시되어 있다. 식 (5)~(7)에서 보듯이 기하학적, 역학적 등방성을 가정하는 경우 x, y, z 방향으로의 수리전도도비는 모두 같기 때문에 대표적으로 x 방향의 수리전도도비만 평가하였다. 여기서 s=0.2 m, b=10^{-4} m, $\phi_d = 20^o$, $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_y = \Delta\varepsilon_z = 10^{-4}$, $\Delta\gamma = \Delta\gamma_{yz} = \Delta\gamma_{yx} = \Delta\gamma_{zy} = \Delta\gamma_{zx} = 10^{-4}$로 가정하였다. 이하 해석하는 결과는 상기와 동일한 자료를 이용하였다. 수직변형률은 절리의 간극을 증가시키는 인장변형률이 작용하는 것으로 하였다. 그림을 보면 GSI가 25보다 작은 경우 암반의 변형성이 큼으로 인해 수리전도도 변화는 상대적으로 크지만 교란

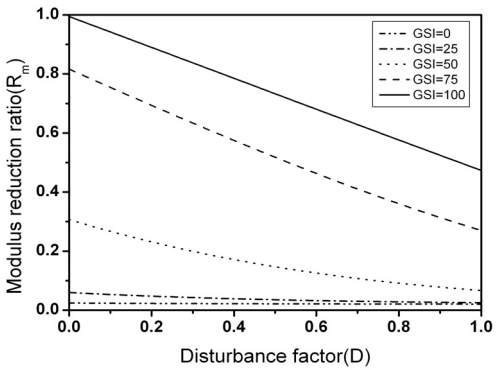


Fig. 2. Relationship between modulus reduction ratio and disturbance factor with GSI

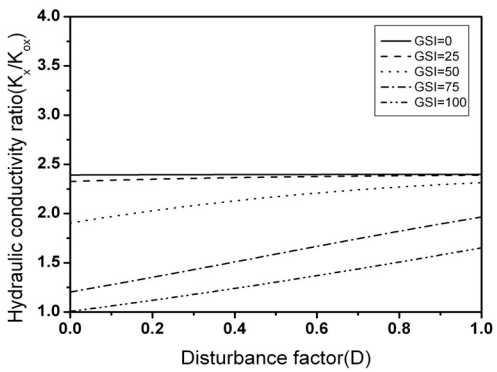
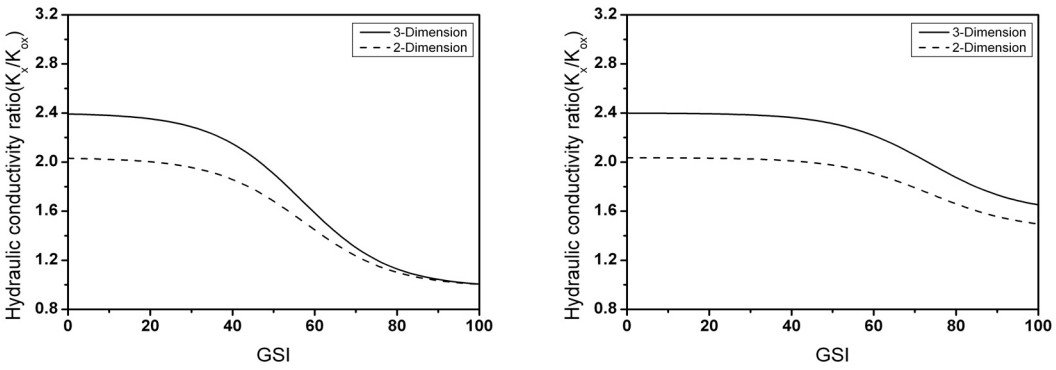


Fig. 3. Variation of hydraulic conductivity ratio as a function of disturbance factor with GSI

계수에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 GSI가 50보다 큰 경우 교란계수에 따른 수리전도도의 변화가 큰 것으로 나타났다. GSI가 100인 경우 현지 암반과 무결암의 탄성계수가 같기 때문에 교란계수가 0이라면 수리전도도의 변화가 없는 것으로 나타나지만 교란계수가 1인 경우 수리전도도는 60% 정도 증가하는 것으로 나타나 암반이 양호할수록 교란계수의 평가가 중요하다는 것을 알 수 있다.

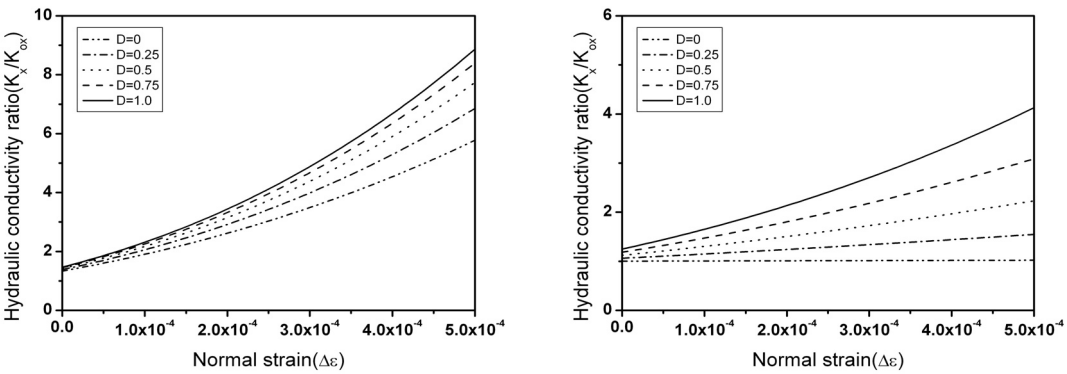
Fig. 4에는 GSI에 따른 2차원 및 3차원 수리전도도비의 변화가 표시되어 있다. Fig. 4(a)는 교란계수가 0인 경우, Fig. 4(b)는 교란계수가 1인 경우이다. 그림을 보면 교란계수의 크기에 상관없이 GSI에 따른 3차원 수리전도도비가 2차원에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 교란계수가 0인 경우 2차원 및 3차원 수리전도도비의 차가 GSI가 20일 때부터 감소하기 시작하여 GSI가 100인 경우에는 두 값이 동일한 것으로 나타나지만, 교란계수가 1인 경우에는 GSI가 증가함에 따라 2차원 및 3차원 수리전도도비의 차가 감소는 하지만 GSI가 100인 경우에도 두 값의 차는 여전히 존재한다는 것을 알 수 있다. 3차원 수리전도도비가 2차원 수리전도도비 보다 큰 이유는 3차원인 경우 2방향의 전단에 의해 발생한 전단팽창이 누적되어 나타나지만 2차원 전단팽창은 1방향으로만 작용하는 전단응력에 의해 발생하기 때문이다. 수리전도도비의 변화 거동을 보면 교란계수가 1인 경우 GSI가 30보다 커지면 수리전도도비가 완만하게 줄어드는 것으로 나타나지만 교란계수가 0 인 경우에는 GSI가 0일 때부터 수리전도도비가 감소하는 것으로 나타나며 특히 GSI가 40 이상부터는 수리전도도비의 감소가 급격히 발생한다.

Fig. 5에는 절리에 작용하는 수직인장변형률의 증가에 따른 수리전도도비의 변화가 나타나있다. Fig. 5(a)는 GSI=50, Fig. 5(b)는 GSI=100인 경우이다. 그림을



(a) D=0 (b) D=1

Fig. 4. Variation in hydraulic conductivity ratio as GSI increases for 2-dimensional and 3-dimensional flow



(a) GSI=50 (b) GSI=100

Fig. 5. Change of hydraulic conductivity ratio with normal strain

보면 수직변형률이 증가함에 따라 수리전도도비도 증가하는 것으로 나타나지만 GSI의 크기에 따라 변화 거동은 다른 것으로 나타난다. GSI가 50인 경우 수리전도도비의 증가 정도가 GSI가 100인 경우보다 큰 것으로 나타나지만 각 교란계수에 따른 수리전도도비의 차이는 더 작은 것으로 나타났다. 상기와 같은 결과로 부터 암반이 불량할수록 수리전도도는 암반 내 발생하는 응력 재분포에 더 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 D=1, GSI=50인 경우의 수직변형률 또는 전단변형률이 수리전도도비의 변화에 미치는 영향이 표시되어 있다. 절리에 작용하는 변형률이 아주 작은 경우를 제외하고는 수직변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향이 전단변형률의 영향보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 수직응력의 경우 직접적으로 절리 간극의 변화에 영향을 미치지만 전단응력의 경우에는 전단에 따른 팽창에 의해 절리 간극이 변하는 간접적인 영향 때문인 것으로 판단할 수 있다. 만일 절리면이 거칠어 팽창각이 26.5^o보다 커서 $\tan\phi_d$가 0.5보다 큰 경우 식 (5)에서 보는 바와 같이 전단변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향이 수직변형률의 영향보다 증가하게 된다. 따라서 수직변형률 또는 전단변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향은 전단에 따른 팽창 정도에 따라 달라지게 된다.

4.2 절리 방향이 수리전도도 변화에 미치는 영향

수평적으로 긴 터널을 2차원으로 해석하는 경우 평면변형률조건을 적용하기 때문에 터널 축이 z 방향과 평행하다고 가정하면 $\Delta\varepsilon_z = 0$, $\Delta\gamma_{xz} = \Delta\gamma_{yz} = 0$이 되어 식 (5)~(7)을 2차원 평면변형률조건식으로 다시 쓰면 식 (10)~(12)와 같이 표시된다.

본 연구에서는 2차원 평면변형률조건에서 절리의 경사에 따른 수리전도도의 변화를 해석하였다. Fig. 7에는 D=1.0, GSI=50인 경우의 전체좌표계와 절리 방향의 사잇각에 따른 국부좌표계에서의 수리전도도의 변화가 표시되어 있다. 여기서 $K_{x'}/K_{ox'}$, $K_{y'}/K_{oy'}$, $K_z'/K_{oz'}$는 전체좌표계에 대해서 기울어진 절리의 방향과 평행한 국부좌표계에서의 각 방향에 따른 수리전도도비를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 절리의 경사가 증가

$$\frac{K_x}{K_{ox}} = \frac{1}{2}\left\{\left[1+\Delta\varepsilon_y\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{xy}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3+1\right\} \quad (10)$$

$$\frac{K_y}{K_{oy}} = \frac{1}{2}\left\{\left[1+\Delta\varepsilon_x\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{xy}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3+1\right\} \quad (11)$$

$$\frac{K_z}{K_{oz}} = \frac{1}{2}\left\{\begin{array}{l}\left[1+\Delta\varepsilon_x\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{xy}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3 \\ +\left[1+\Delta\varepsilon_y\left(\frac{s}{b}(1-R_m)+1\right)+\Delta\gamma_{xy}\left(\frac{s}{b}(1-R_{ms})+1\right)\tan\phi_d\right]^3\end{array}\right\} \quad (12)$$

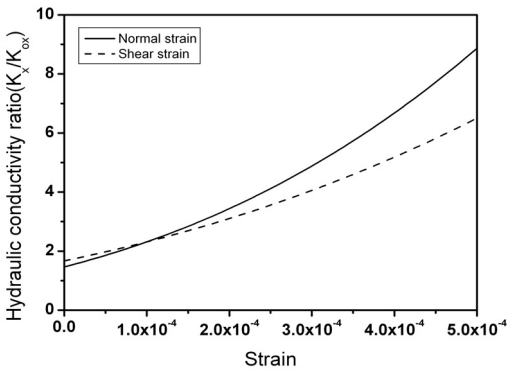


Fig. 6. Effect of normal or shear strain on hydraulic conductivity ratio

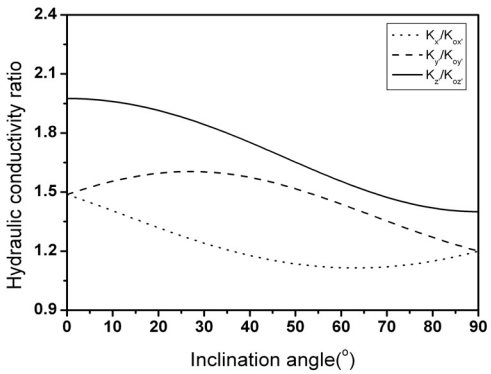
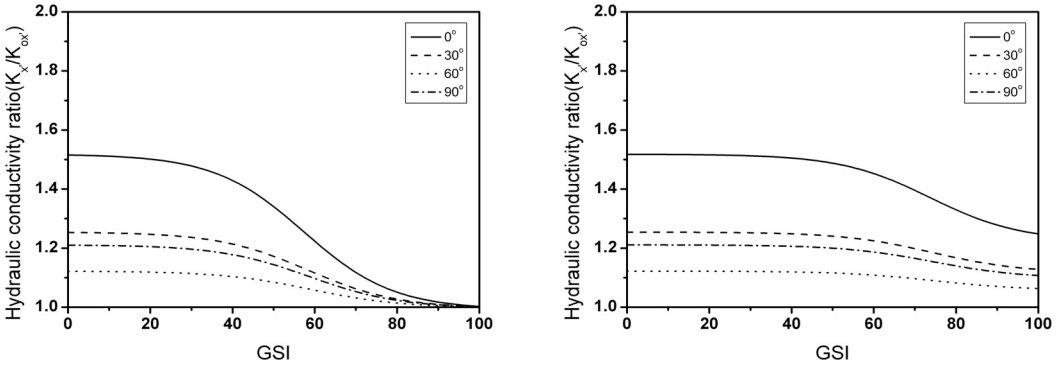


Fig. 7. Variation of hydraulic conductivity ratio in a local coordinate with the inclination angle of joint



(a) D=0 (b) D=1

Fig. 8. Variation in hydraulic conductivity ratio with GSI for the selected inclination angle of joint

함에 따라 수리전도도비는 변하는 것으로 나타났으며 특히 주수리전도도의 방향이 기울어짐에 따라 전체좌표계와 평행할 때보다 수리전도도는 감소하는 것으로 나타난다. 터널 축과 평행한 방향의 수리전도도비($K_z'/K_{oz'}$)가 터널 단면에 수직한 수리전도도비($K_{x'}/K_{ox'}$와 $K_{y'}/K_{oy'}$) 보다 큰 것으로 나타나기 때문에 2차원 평면변형률 해석을 하는 경우 터널 축과 평행한 방향으로의 수리전도도 변화도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 GSI에 따른 수리전도도비의 변화가 절리 경사각 $0^o, 30^o, 60^o, 90^o$에 대해서 표시되어 있다. Fig. 8(a)는 D=0, Fig. 8(b)는 D=1인 경우이다. 교란계수가 0인 경우 GSI가 100으로 증가함에 따라 절리 경사각에 따른 수리전도도비의 차가 감소하여 절리의 기울어짐 정도가 미치는 영향이 줄어듬을 알 수 있다. 교란계수가 1인 경우에는 GSI가 100으로 증가함에 따라 절리의 경사에 따른 수리전도도비의 차이가 감소는 하지만 교란계수가 0인 경우에 비해 감소 정도는 미약한 것으로 나타난다.

5. 결 론

절리가 발달한 현지 암반의 경우 지하수는 절리를 통해서만 유동하는 것으로 생각할 수 있으며 이 경우 암반의 수리특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 절리 간극이다. 절리 간극은 절리에 발생하는 수직 변형과 전단 팽창에 의해 변하기 때문에 이들을 고려한 수리전도도의 평가가 필요하다. 본 연구에서는 기존에 제시된 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 수정하여 전단 팽창 및 탄성계수감소비와 전단탄성계수감소비를 고려할 수 있는 일반화된 3차원 변형률 의존성 수리전도도 변화 방정식을 제시하였다. 3차원 모델은 직교 절리가 발달한 것으로 하여 수리전도도의 이방성을 고려할 수 있도록 하였다. 탄성계수감소비를 계산하기 위하여 필요한 현지 암반의 변형계수를 측정하는 것이 용이하지 않다는 점을 고려하여 GSI와 교란계수를 이용하여 탄성계수감소비를 평가하는 경험식을 사용하였다. 현지 암반에 나타나는 절리군은 전체좌표계와 평행하지 않고 일정한 경사각을 가지고 기울어져 있는 경우가 일반적이기 때문에 절리의 경사에 따른 수리전도도의 변화를 2차원 평면변형률 조건 하에서 평가하였다. 해석 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) GSI가 증가함에 따라 수리전도도는 감소하는 것으로 나타났다. 교란계수는 수리전도도의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타나는데 특히 GSI가 50 이상인 암반의 수리전도도 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 해석되었다.
2) 2차원 모델과 3차원 모델에 대한 해석 결과 3차원 모델의 수리전도도가 2차원 모델의 수리전도도 보다 큰 것으로 나타났으며 변화 양상은 교란계수에 따라 달라졌다.
3) 수직인장변형률에 따른 수리전도도의 변화 거동으로부터 암반이 불량할수록 수리전도도는 응력 재분포에 더 많은 영향을 받지만 교란계수가 미치는 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
4) 절리의 팽창각이 26.5^o 보다 작으면 수직변형률이 수리전도도에 미치는 영향이 전단변형률에 비해 더 큰 것으로 나타났다.
5) 절리군이 전체좌표계에서 기울어진 경우 절리의 경

사가 증가함에 따라 수리전도도는 변하는 것으로 나타났으며 그 크기도 감소하는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 윤용균, 2003, RMR에 따른 변형률 의존 수리전도도 변화 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 13.1, pp. 44-51.
2. 하재현, 김양수, 권혁칠, 2008, 유체역학, 문운당, 서울, pp. 183-185.
3. Bai, M., 1991, Numerical models of fluid flow and solid deformation in fluid saturated media, Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, pp. 13-17.
4. Bai, M. and D. Elsworth, 1994, Modeling of subsidence and stress-dependent hydraulic conductivity for intact and fractured porous media, Rock Mech. Rock Engng. 27.4, pp.209-234.
5. Bai, M., F. Meng, D. Elsworth and J.-C. Roegiers, 1999, Analysis of stress-dependent permeability in non-orthogonal flow and deformation fields, Rock Mech. Rock Engng. 32.3, pp. 195-219.
6. Liu, J., 1996, Numerical studies toward a determination of longwall mining impacts on ground water resources, Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, pp. 33-37.
7. Makurat, A., N. Barton and N.S. Rad, 1990, Joint conductivity variation due to normal and shear deformation, Proceedings of The International Symposium on Rock Joints, Norway, pp. 535-540.
8. Kayabasi, A., C. Gokceoglu and M. Ercanoglu, 2003, Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40, pp. 55-63.
9. Nicholson, G.A. and Z.T. Bieniawski, 1990, A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification, Int. J. Min. Geo. Eng. 8, pp. 181-202.
10. Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, pp. 267-273.
11. Hoek, E. and M.S. Diederichs, 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, pp. 203-215.
12. Witherspoon, F.A., J.S. Wang, K. Iwai and J.E. gale, 1980, Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resour. Res. 16.6, pp. 1016-1024.

윤 용 균

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 043-649-1318
E-mail: yoon63@semyung.ac.kr
현재 세명대학교 소방방재학과 교수