

RMR에 따른 변형을 의존 수리전도도 변화 해석

윤 용 균¹⁾

Modification of Strain-dependent Hydraulic Conductivity with RMR

Yongkyun Yoon

Abstract. Changes of the hydraulic conductivity resulting from the redistribution of stresses by underground excavation are examined using the strain-dependent hydraulic conductivity modification relation, where the modulus reduction ratio and induced strain are the major parameters. The modulus reduction ratio is defined in terms of RMR(Rock Mass Rating) to represent the full gamut of rock mass condition. Though shear dilation has the effect on the modification of hydraulic conductivity, the extent of it depends on RMR. When the extensional strain is applied to a fracture, the hydraulic conductivity increases with the decrease of RMR. Loading configuration has the effect on the modification of hydraulic conductivity, where the differential stress mode with a magnitude of the minimum principal stress (σ_x) fixed and a magnitude of the maximum principal stress (σ_y) varied is found to exert the greatest effect on the change of hydraulic conductivity.

KeyWords: Strain-dependent hydraulic conductivity modification, RMR, Modulus reduction ratio

초 록. 응력 재분포에 의해 발생하는 수리전도도의 변화를 평가하기 위하여 변형을 의존 수리전도도 변화 방정식을 사용하였다. 주요 입력 변수는 탄성계수 감소비와 응력 재분포에 의해 발생한 변형률이다. 무결암에서부터 완전히 파쇄된 암반조건을 나타내기 위하여 탄성계수 감소비 대신에 탄성계수 감소비와 RMR간의 상관관계를 이용하였다. 전단 변형에 따른 팽창이 수리전도도의 증가에 영향을 미치지만 그 영향 정도는 RMR에 따라 달라졌으며, 인장변형률이 절리에 작용하는 경우 암반의 RMR이 감소함에 따라 수리전도도는 증가하는 것으로 나타났다. 암반에 작용하는 응력 상태에 따라 수리전도도의 변화도 다른 것으로 나타났는데, 수평응력 대 수직응력의 비가 다른 이방성 응력 상태가 수리전도도의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심어: 변형을 의존 수리전도도 변화 방정식, 탄성계수 감소비, 수리전도도

1. 서 론

수리전도도(Hydraulic conductivity)는 암반 내에서 이동하는 유체의 유동속도를 결정하는 중요한 수리학적 특성 중의 하나이다. 공동 굴착에 따른 응력 재분포에 의해 암반의 수리전도도가 변하는 경우 그것의 변화 정도를 적절하게 평가하는 것은 암반 중에 건설하는 여러 목적의 토목구조물 설계 및 시공에 매우 중요하다. 발파에 의해 발생한 균열도 수리전도도 변화에 영향을 미치지만 발파에 의한 영향은 한정된 범위에서만 발생하고, 넓은 지역에 걸쳐 수리전도도 변화에 영향을 미치는

것은 응력 재분포라 할 수 있다(Pusch, 1989; Pusch & Stanfors, 1992). 응력 재분포에 의해 공동 주변 암반의 수리전도도가 커지는 경우 공동 내로 지하수의 유입이 증가하여 작업 안정성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 굴착속도를 저하시킬 수도 있다.

절리를 통한 유체의 유동은 3승 법칙(Cubic's law)에 따라 절리 간극에 좌우되게 된다(Snow, 1969). 거친 절리 시험편에 대한 실험 및 수치해석 결과에 따르면 절리면 거칠기가 수리전도도에 영향은 미치지만 수직응력이 아주 큰 경우를 제외하고는 3승 법칙은 유효한 것으로 나타났다(Witherspoon 외, 1980; Brown, 1987). 절리 간극은 절리에 작용하는 수직응력과 전단응력에 의해 변하게 된다. 절리에 인장응력이 작용하면 절리가 개구됨으로 인해 수리전도도는 증가하고, 압축응력이 작용하게 되면 절리가 폐쇄되어 수리전도

¹⁾정회원, 세명대학교 자원환경공학과 교수
접수일: 2002년 11월 20일
심사 완료일: 2003년 1월 20일

도가 감소하게 된다. Makurat 외(1990)는 경암과 연암 시험편에 대한 수리-전단시험을 통하여 전단변형동안 절리의 팽창이 발생하여 수리전도도가 증가함을 보여 주었다. 또한 이희석(1999), Esaki 외(1999) 등의 직접 전단시험장치를 이용한 수리-전단시험 결과에 따르면 최대 전단응력에 도달하면 팽창이 증가하기 시작하고, 수리전도도도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 잔류 전단변형이 지속되면 팽창은 지속적으로 증가 할지라도 절리내에 gouge-물질이 형성되어 수리전도도의 증가율이 감소하고 일정한 값에 도달하는 것으로 나타났다.

Ouyang & Elsworth(1993)는 편재 절리가 발달한 암반을 직교 절리로 구성된 등가다공질매질(Equivalent porous medium)로 가정하여 수직변형률이 절리 간극에 미치는 영향을 고려한 변형률 의존 수리전도도 변화 구성방정식을 제시하였다. 또한, 구성방정식에 나타나는 절리의 수직강성을 측정하기 어렵다는 점을 고려하여 수직강성 대신에 탄성계수 감소비(Modulus reduction ratio)를 이용하여 구성방정식을 표현하였다. Bai & Elsworth(1994), Liu 외(2000) 등은 전단변형에 따른 팽창이 절리 간극증가에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 상기 구성방정식을 수정하였다.

본 연구에서는 현지 암반을 일정한 간격과 간극을 갖는 직교 절리가 발달한 등가다공질매질로 가정하여 응력 재분포가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 현지 암반의 탄성계수 감소비는 RMR과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있기 때문에(Mohammad 외, 1997), 무결암에서부터 완전히 파쇄된 암반 조건에 대한 수리전도도 변화를 결정할 수 있도록 하기 위하여 RMR을 사용하였다. 수직변형률 및 전단변형률 크기가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하였으며, RMR이 수리전도도 변화에 미치는 영향도 계산하였다. 또한, 암반에 작용하는 응력 상태의 변화가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 변형률 의존 수리전도도 변화 구성방정식

2.1 변형률과 수리전도도 변화

수리화적인 연속체로 간주될 만큼 무수히 많은 절리가 발달하고, 절리간의 연결이 매질 전체에 걸쳐 충분히 분포한 경우에는 암반을 일정한 간격을 갖는 직교 절리군으로 구성된 등가다공질암반으로 간주할 수 있다(Fig. 1 참조).

암석블록은 거의 불투수성이고, 유체 유동이 상호 연결된 절리를 통해서만 발생한다고 가정하면 절리의 수

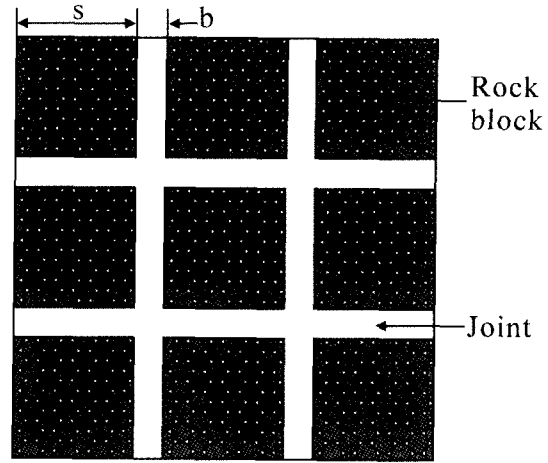


Fig. 1. Schematic diagram of idealized model (s : Spacing, b : Aperture).

리전도도 변화는 평행판이론을 적용하여 계산할 수 있다. 평행판이론에 따르면 절리 간극의 변화가 수리전도도의 변화를 지배하게 된다. 응력 재분포에 따라 절리의 수직방향으로 발생하는 암반의 변형에 의한 절리의 폐쇄나 개구가 수리전도도 변화의 주 요인이거나 가정하면 평행 절리군에 대한 변형률 의존 수리전도도 변화(K)는 다음 식을 통해 구할 수 있다(Elsworth, 1989; Ouyang & Elsworth, 1993; Bai 외, 1999).

$$K = \frac{g}{12\nu s} (b + \Delta u_n + \Delta u_s)^3 \quad (1)$$

여기서, g는 중력가속도, ν 는 유체의 동점성계수(Kinematic viscosity), s는 절리의 간격, b는 응력 재분포가 발생하기 이전의 절리의 초기간극, Δu_n 은 수직변형률에 의한 절리 수직방향으로의 변위, Δu_s 는 전단변형률에 의한 절리 수직방향으로의 변위를 나타낸다.

다음 식들을 유도함에 있어 절리 간극은 간격에 비해 매우 작기 때문에 $s + b \approx s$ 로 가정한다. 수직응력 변화량($\Delta\sigma$)에 의해 발생하는 절리 수직방향으로의 총 변위(Δu_n)는 다음 식과 같이 암석블록 변위(Δu_m)와 절리 수직변위의 합으로 표시할 수 있다.

$$\Delta u_n = \Delta u_m + \Delta u_{m'} = \frac{s\Delta\sigma}{E} + \frac{\Delta\sigma}{k_n} \quad (2)$$

여기서, E는 암석블록의 탄성계수이고, k_n 은 절리의 수직강성(Normal stiffness)이다. 수직응력 변화량에 의해 발생하는 절리 수직방향으로의 암반의 변형률을 $\Delta\epsilon$ 이

라 하면 암반의 등가 탄성계수 (E_m)는 다음 식과 같이 표시된다.

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{(s+b)}{\Delta u_n} \Delta\sigma = \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{sk_n} \right)^{-1} \quad (3)$$

(2), (3)식으로부터 수직변형률에 의해 발생하는 절리 수직변위는 다음 식과 같이 표시될 수 있다.

$$\Delta u_{nm} = \Delta\epsilon \left(\frac{sE}{sk_n + E} \right) \quad (4)$$

전단응력 변화량 ($\Delta\tau$)에 의한 전단방향으로의 총 변위 (Δu_s)는 암석블록의 전단변위 (Δu_{rs})와 절리의 전단변형 (Δu_{ss})에 의해 발생한다.

$$\Delta u_s = \Delta u_{rs} + \Delta u_{ss} = \frac{s\Delta\tau}{G} + \frac{\Delta\tau}{k_s} \quad (5)$$

여기서, G 는 암석블록의 전단탄성계수이고, k_s 는 절리의 전단강성(Shear stiffness)이다. 암반에 발생한 전단 변형률을 $\Delta\gamma$ 라 하면 암반의 등가 전단탄성계수 (G_m)는 다음과 같이 표시된다.

$$G_m = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} = \frac{(s+b)}{\Delta u_s} \Delta\tau = \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{sk_s} \right)^{-1} \quad (6)$$

(5), (6)식으로부터 절리의 전단변형을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta u_{ss} = \Delta\gamma \left(\frac{sG}{sk_s + G} \right) \quad (7)$$

절리면은 거칠기를 가지고 있는 관계로 전단변형이 진행됨에 따라 팽창이 발생하게 되고 이로 인해 절리 수직방향으로 변위가 생겨나 절리의 간극을 증가시키게 된다. 전단변형이 발생함과 동시에 팽창이 일어난다고 가정하면 절리 전단변위에 의한 절리 수직방향으로의 변위는 팽창각(Dilation angle, ϕ_d)을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta u_{sn} = \Delta u_{ss} \tan \phi_d = \Delta\gamma \left(\frac{sG}{sk_s + G} \right) \tan \phi_d \quad (8)$$

(4)식과 (8)식을 (1)식에 대입하면 수직변형률과 전단 변형률을 고려한 변형률 의존 수리전도도 변화 구성방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} K &= \frac{g}{12\nu s} \left\{ b + \Delta\epsilon \left(\frac{sE}{sk_n + E} \right) + \Delta\gamma \left(\frac{sG}{sk_s + G} \right) \tan \phi_d \right\}^3 \\ &= \frac{gb^3}{12\nu s} \left\{ 1 + \frac{\Delta\epsilon}{b} \left(\frac{sE}{sk_n + E} \right) + \frac{\Delta\gamma}{b} \left(\frac{sG}{sk_s + G} \right) \tan \phi_d \right\}^3 \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 탄성계수 감소비와 전단탄성계수 감소비

암반의 탄성계수는 절리가 존재함으로 인해 암석블록의 탄성계수보다 작은 값을 나타낸다. 암반의 탄성계수에 대한 암석블록의 탄성계수 비는 탄성계수 감소비라 불리며 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$R_m = \frac{E_m}{E} \quad (10)$$

(3), (4), (10)식으로부터 수직변형률에 의한 절리 수직방향 변위를 탄성계수 감소비로 나타내면 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta u_{nm} = \Delta\epsilon (s(1 - R_m) + b) \quad (11)$$

탄성계수 감소비와 유사하게 암반의 전단탄성계수에 대한 암석블록의 전단탄성계수 비를 전단탄성계수 감소비(Shear modulus reduction ratio, $R_{ms} = G_m/G$)라 하며, (11)식을 유도하는 과정과 유사한 과정을 적용하면 전단변형률에 의한 절리 수직방향 변위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta u_{sn} = \Delta\gamma (s(1 - R_{ms}) + b) \tan \phi_d \quad (12)$$

암반에 응력 재분포가 발생하기 전의 초기 수리전도도를 $K_0 = \frac{gb^3}{12\nu s}$ 라하고, 탄성계수 감소비와 전단탄성계수 감소비를 매개변수로 하여 (9)식을 무차원으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{K}{K_0} &= \\ &\left\{ 1 + \Delta\epsilon \left(\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right) + \Delta\gamma \left(\frac{s}{b} (1 - R_{ms}) + 1 \right) \tan \phi_d \right\}^3 \end{aligned} \quad (13)$$

2.3 RMR을 이용한 탄성계수 감소비와 전단탄성계수 감소비의 결정

탄성계수 감소비는 암반 내에 존재하는 절리에 의한 탄성계수 감소를 나타내며 절리의 특성과 절리 간격에 따라 달라지게 된다. 무결암에 대한 탄성계수는 평균적으로 암반에 대한 탄성계수보다 2.5배 정도 큰 것으로 나타나나, 대부분의 암반 탄성계수는 무결암의 0.2-

0.6배 정도인 것으로 알려져 있다(Bieniawski, 1984).

탄성계수 감소비는 원위치 시험을 통하여 결정할 수 있지만 시험방법 및 시험 대상 암반의 크기 등에 따라 달라지게 된다. 절리발생빈도(절리 수/m)에 따른 탄성계수 감소비를 측정된 연구 결과에 따르면 절리발생빈도가 1-10 사이의 값을 가질 때 탄성계수 감소비의 변화가 가장 큰 것으로 나타나는데, 대부분의 지질공학적 문제들은 상기의 절리발생빈도 범위에서 발생하게 된다(Pande 외, 1990). 원위치 시험을 통해 암반의 탄성계수를 정확히 결정하는 것은 매우 어렵기 때문에 여러 연구자들이 암반분류법을 통해 암반의 탄성계수를 결정할 수 있는 식들을 제안하였다. 본 연구에서는 여러 식들 중에서 좀더 현실적인 것으로 평가받고있는 Nicholson & Bieniawski(1990)가 제시한 식을 사용하였다.

$$R_m = R_{ms} = 0.000028 RMR^{22.82} + 0.009e \quad (14)$$

상기 식은 원래 탄성계수 감소비(R_m)와 RMR의 관계를 표현한 식이나, 일반적으로 현지암반과 무결암의 포아송비를 같다고 가정하기 때문에 전단탄성계수 감소비에 대해서도 같은 관계가 성립하는 것으로 볼 수 있다. (14)식을 사용하면 심하게 파쇄된 암반조건에서부터 무결암 상태의 암반조건에 대해 수리전도도의 변화를 해석할 수 있게 된다.

3. Parameter 변화에 따른 수리전도도 변화

전단변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전단변형률의 크기가 다른 경우의 압축변형률에 따른 수리전도도의 변화 양상을 Fig.2에 표시하

였다. (13)식을 사용함에 있어 압축변형률은 음의 부호를 갖는 것으로 하여 수리전도도를 감소시키는 것으로 하였으며, 전단에 의한 팽창은 간극을 증가시키는 방향으로 작용하기 때문에 전단변형률은 항상 양의 값을 갖는 것으로 하였다. 여기서, $s = 1m$, $b = 10^{-4}m$, $RMR = 50$, $\phi_d = 15^\circ$ 로 가정하였다. 절리 간격, 절리 간극, 팽창각에 대한 수치는 다른 그림에 대해서도 동일하게 적용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전단변형률이 증가함에 따라 수리전도도가 증가하는 것으로 나타나 전단응력에 의한 팽창이 수리전도도 증가에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, 전단변형률의 크기가 증가할수록 압축변형률에 따른 수리전도도 감소율이 커지는 것으로 나타났다. 압축변형률이 작은 경우에는 전단변형률

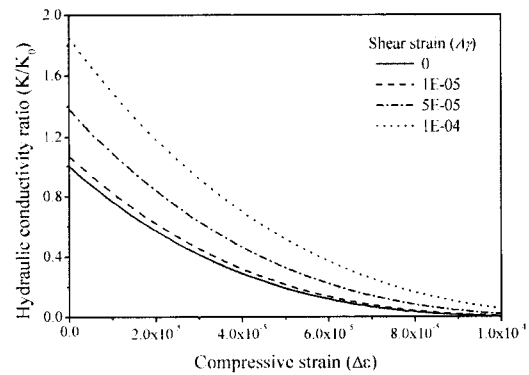
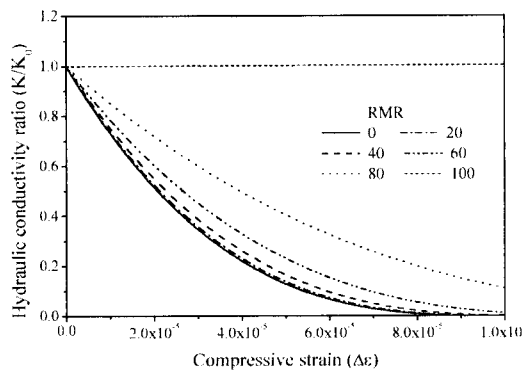
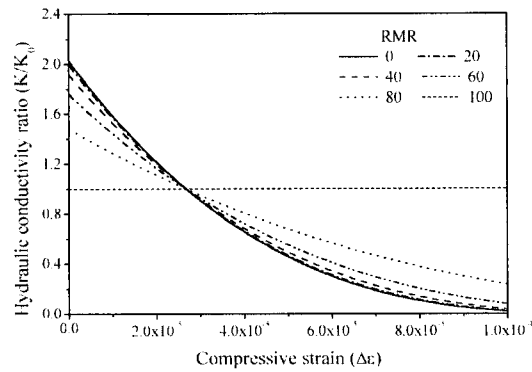


Fig. 2. Variation of hydraulic conductivity ratio as a function of compressive strain with shear strain ($s = 1m$, $b = 10^{-4}m$, $\phi_d = 15^\circ$, $RMR = 50$).



(a) Without shear strain



(b) With shear strain ($\Delta\gamma = 10^{-4}$)

Fig. 3. Hydraulic conductivity ratio vs. compressive strain ($s = 1m$, $b = 10^{-4}m$, $\phi_d = 15^\circ$).

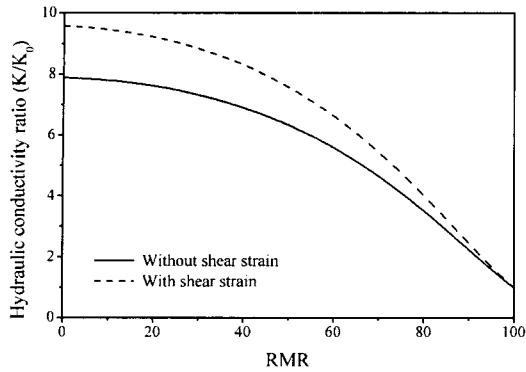


Fig. 4. Hydraulic conductivity ratio vs. RMR
($s = 1\text{m}$, $b = 10^{-4}\text{m}$, $\phi_d = 15^\circ$).

에 따른 수리전도도의 차가 상대적으로 크게 나타나고 팽창이 수리전도도 변화에 큰 영향을 미치지지만, 압축변형률이 증가함에 따라 그 차는 감소하였으며 팽창이 수리전도도에 미치는 영향도 미미해 지는 것으로 나타났다. 따라서, 전단응력이 압축응력에 비해 상대적으로 크게 발생하는 지역에서는 수리전도도의 증가에 주의를 기울여야 될 것으로 생각된다.

Fig. 3은 RMR이 변하는 경우 압축변형률에 따른 수리전도도의 변화를 나타내는 그림으로서, Fig. 3(a)는 전단변형률을 고려하지 않은 경우이고, Fig. 3(b)는 전단변형률($\Delta\gamma = 10^{-4}$)을 고려한 경우이다. 본 연구에서는 암반에 발생하는 변형이 절리에 집중되는 것으로 가정하였기 때문에 RMR=100 즉, 암반이 무결암의 상태를 나타내는 경우에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 압축변형률에 관계없이 수리전도도는 변화가 없는 것으로 나타났으며, RMR=0인 심하게 파쇄된 암반의 경우에는 압축변형률에 따른 수리전도도의 변화가 대단히 큰 것으로 나타났다. Fig. 3(a)를 보면 RMR이 60 이하인 보통 이하의 암반에서는 압축변형률이 증가함에 따라 수리전도도의 감소도 큰 것으로 나타났는데, 이는 절리 발생 빈도가 큰 불량암반에서는 절리가 수리전도도에 미치는 영향이 크다는 것을 나타낸다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 전단변형률을 고려한 경우에도 수리전도도 변화 양상은 Fig. 3(a)의 수직변형률만을 고려한 경우와 비슷한 거동을 보인다. 그림에서 보는 바와 같이 전단변형률이 수리전도도에 미치는 영향도 암반이 불량할수록 더욱 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 전단변형률로 인해 압축변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향을 어느 정도 약화시키는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 수직변형률 및 전단변형률을 고려한 경우와

수직변형률만을 가정한 경우의 RMR에 따른 수리전도도의 변화를 나타낸다. 이 그래프에서는 절리에 작용하는 변형률을 인장으로 가정하였기 때문에 수리전도도 변화량은 1보다 큰 것으로 나타난다. 암반에 발생한 인장 변형률과 전단변형률은 각기 $\Delta\epsilon = 10^{-4}$, $\Delta\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 RMR이 감소할수록 수리전도도는 증가한다는 것을 알 수 있다. RMR이 20 이하인 경우에는 수리전도도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났는데 이는 본 연구에 사용된 탄성계수 감소비와 RMR과의 관계식이 RMR이 20 이하인 경우에는 거의 일정한 탄성계수 감소비를 보이는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 전단변형률도 수리전도도 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났지만 그 영향 정도는 RMR에 따라 달라지며, RMR이 증가할수록 전단변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향은 감소하는 것으로 나타났다.

4. 응력 조건의 변화에 따른 수리전도도 변화

매질에 작용하는 응력 상태의 변화가 수리전도도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 수리전도도의 이방성을 분석하는 것이 필요하다. (13)식으로부터 x, y 방향에 대한 수리전도도의 변화 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{K_x}{K_{ox}} &= \left[1 + \Delta\epsilon_x \left(\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right) + \Delta\gamma_{xy} \left(\frac{s}{b} (1 - R_{ms}) + 1 \right) \tan \phi_d \right]^3 \\ \frac{K_y}{K_{oy}} &= \left[1 + \Delta\epsilon_x \left(\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right) + \Delta\gamma_{xy} \left(\frac{s}{b} (1 - R_{ms}) + 1 \right) \tan \phi_d \right]^3 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, K_x , K_y 는 각기 x 및 y 방향의 수리전도도 변화, K_{ox} , K_{oy} 는 각기 x, y 방향의 초기 수리전도도를 나타낸다.

Fig. 5는 수평응력(σ_x) 대 수직응력(σ_y)의 비가 증가하는 경우의 RMR에 따른 수리전도도의 변화를 나타낸다. (14)식은 변형률의 항으로 되어 있기 때문에 응력을 변형률로 전환하기 위하여 Hooke의 변형률-응력 관계식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \Delta\epsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \end{aligned} \quad (15)$$

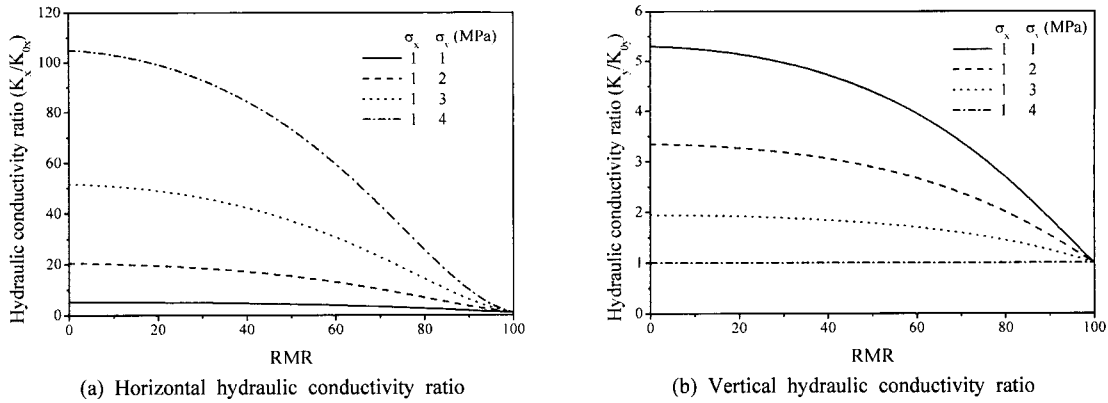


Fig. 5. Variation of hydraulic conductivity ratio with RMR at different applied stress ratios ($s = 1m, b = 10^{-4}m$).

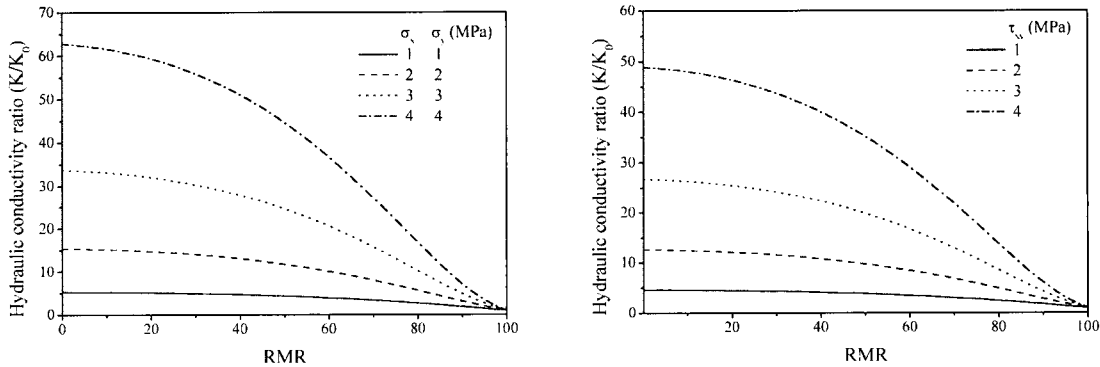


Fig. 6. Variation of hydraulic conductivity ratio with RMR at different applied stress ratios where the horizontal stress is compressive ($s = 1m, b = 10^{-4}m$).

Fig. 7. Variation of hydraulic conductivity ratio with RMR at different hydraulic stresses ($s = 1m, b = 10^{-4}m$).

(15)식을 사용함에 있어 탄성계수(E)는 10 GPa, 포아송비(ν)는 0.25로 하였으며, 전단탄성계수(G)는 $G = E/2(1 + \nu)$ 의 관계로부터 4 GPa이 된다. Fig. 5(a)는 수평방향 수리전도도의 변화를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 수직방향으로 인장응력이 작용함으로 인해 절리가 개구되어 수직방향 응력이 증가함에 따라 수리전도도도 증가함을 알 수 있다. RMR=0인 경우 수평응력 대 수직응력의 비가 4배로 증가함에 따라 수리전도도는 약 21배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 응력비가 증가할수록 수리전도도의 증가는 지수적으로 증가하는데 이는 수리전도도가 절리 간극의 3승에 비례하기 때문이다. Fig. 5(b)는 수직방향의 수리전도도 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 수직방향 응력이 증가함에 따라 수리전도도는 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 수직방향으로의 인장응력이 수직방향으로 존재하는 절리를 인장시키면서 절리를 폐쇄시키는 작용을 하기 때문이다. 응력비가 4배로 증가하는 경우 절리 간극의 변

화가 없어 RMR에 따른 수리전도도의 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 6은 수직방향으로는 인장응력이 수평방향으로는 압축응력이 작용하는 경우의 수평방향 수리전도도 변화를 나타낸다. 그림을 보면 수평방향으로 작용하는 수직응력이 압축방향으로 작용함으로 인해 수평방향 절리를 개구시키는 역할을 하여 Fig. 5(a)의 경우보다 수리전도도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 매질에 정수압이 작용하는 경우의 RMR에 따른 수리전도도의 변화를 나타낸다. 정수압이 작용하는 관계로 수직방향 수리전도도와 수평방향 수리전도도는 동일하게 나타난다. RMR=0인 경우에 정수압의 크기가 4배로 증가함에 따라 수리전도도는 약 12배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 순수전단을 받고 있는 매질의 수리전도도 변화를 나타낸다. 수리전도도의 변화 양상은 앞의 결과와 유사하다. 전단응력이 4배로 증가함에 따라 수리전도도

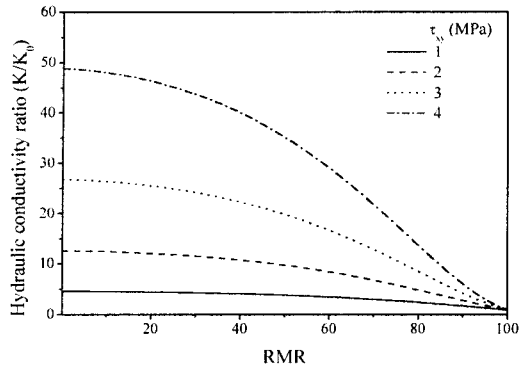


Fig. 8. Variation of hydraulic conductivity ratio with RMR at different shear stresses ($s = 1\text{m}$, $b = 10^{-4}\text{m}$, $\phi_d = 15^\circ$).

는 약 10배 정도 증가하는 것으로 나타나, 이방성 응력과 정수압 상태의 경우와 비교하여 순수전단의 경우가 수리전도도 변화에 미치는 영향이 가장 작음을 알 수 있다.

5. 결 론

응력 재분포에 의해 공동 주변 암반에 변형이 발생하는 경우 수리전도도가 변하게 된다. 본 연구에서는 변형률의 변화에 따라 달라지는 수리전도도의 변화를 평가하기 위하여 변형률 의존 수리전도도 변화 구성방정식을 사용하였으며, 암반의 상태를 무결암에서부터 완전히 파쇄된 암반을 고려할 수 있도록 RMR을 이용하여 구성방정식을 표현하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 전단변형률이 증가함에 따라 수리전도도는 증가하는 것으로 나타났다. 절리에 작용하는 압축변형률이 작은 경우에는 전단변형률이 수리전도도에 미치는 영향이 상대적으로 크지만 압축변형률이 증가함에 따라 그 영향 정도는 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 절리에 압축변형률이 작용하는 경우 RMR이 감소할수록 수리전도도는 감소하는 것으로 나타났는데, RMR이 60이하인 경우에 압축변형률의 증가에 따른 수리전도도의 감소가 큰 것으로 나타났다.
- 3) 전단변형률이 수리전도도에 미치는 영향 정도는 RMR에 따라 달라지며 RMR이 증가할수록 전단변형률이 수리전도도에 미치는 영향은 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 매질에 작용하는 응력 상태를 달리함에 따라 수리전

도도의 변화도 다르게 나타났다. 수평응력 대 수직응력의 비가 4배로 증가함에 따라 수리전도도는 약 21배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 정수압의 크기를 4배로 증가시키는 경우에는 수리전도도가 약 12배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 매질에 전단응력만이 가해지는 순수전단 상태에서 전단응력을 4배로 증가시키는 경우 수리전도도는 약 10배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01374-0)지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원해주신 재단에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 공학박사학위논문, 282p.
2. 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, 209-234.
3. Bai, M., F. Meng, D. Elsworth and J.-C. Roegiers, 1999, Analysis of stress-dependent permeability in nonorthogonal flow and deformation fields, *Rock Mech. Rock Engng.*, 32, 3, 195-219.
4. Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock mechanics design in mining and tunneling*, Rotterdam, A.A.Balkema, 272p.
5. Brown, S.R., 1987, Fluid flow through rock joints: The effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, 92, B2, 1337-1347.
6. Esaki, T., S. Du, Y. Mitani, K. Ikusada and L. Jing, 1999, Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 5, 641-650.
7. Liu, J., D. Elsworth, B.H. Brady and H.B. Muhlhaus, 2000, Strain-dependent fluid flow defined through rock mass classification schemes, *Rock Mech. Rock Engng.* 33, 2, 75-92.
8. Makurat, A., N. Barton, N.S. Rad and S. Bandis, 1990, Joint conductivity variation due to normal and shear deformation, *Proc. Int. Symp. on Rock Joints*, Loen, Norway, 535-540.
9. Mohammad, N., D.J. Reddish and L.R. Stace, 1997, The relation between in situ and laboratory rock properties used in numerical modelling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 2, 289-297.
10. Nicholson, G.A. and Z.T. Bieniawski, 1990, A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification,

- Int. J. Min. & Geological Engng., 8, 181-202.
11. Ouyang, Z. and D. Elsworth, 1993, Evaluation of groundwater flow around a mined panels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 30.2, 71-79.
 12. Pande, G.N., G. Beer & J.R. Williams, 1990, Numerical methods in rock mechanics, Chichester, John Wiley & Sons, 327p.
 13. Pusch, R., 1989, Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 26.1, 79-83.
 14. Pusch, R. and R. Stanfors, 1992, The zone of disturbance around blasted tunnels at depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29.5, 447-456.
 15. Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability enhancement of blocky rocks, Water Resour. Res., 5.6, 1273-1289.



윤용균

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 환경안전시스템공학부 자원환경공학과 부교수