

암반분류변수를 이용한 침하에 따른 수리전도도 변화 해석

윤용균^{1)*}, 김장순²⁾, 김종우³⁾

Hydraulic Conductivity Changes Due to Subsidence Using Rock Mass Classification Parameters

Yongkyun Yoon, Jangsoon Kim and Jongwoo Kim

Abstract The change of strain-dependent hydraulic conductivity around mined panels due to subsidence is examined where normal and shear strains, modulus reduction ratio and joint spacing are major factors controlling the changes of hydraulic conductivity. Modulus reduction ratio and joint spacing are defined through RMR and RQD, respectively. Utilizing these two empirical parameters, changes of hydraulic conductivity values of a full gamut of rock mass conditions are determined. The change of hydraulic conductivity is not apparent in the near surface area and more significant change takes place in the area around mined panels. A zone of strong influence from the subsidence extends to a height of approximately 20m above mined panels. The shear strain does also play the role of increasing a hydraulic conductivity around mined panels. As RMR of rock mass decreases, a hydraulic conductivity is found to be increased and this means that subsidence in a poor rock with low RMR has a great effect on a hydraulic conductivity field.

KeyWords: subsidence, strain-dependent hydraulic conductivity, RMR, RQD

초 록 채굴적 붕괴에 따른 침하에 의해 발생하는 변형을 의존 수리전도도 변화를 조사하였다. 수직 및 전단 변형을, 탄성계수감소비, 절리간격 등은 수리전도도 변화를 좌우하는 주요 인자들이다. 탄성계수감소비는 RMR에 의해 절리간격은 RQD로 표현함으로써 심하게 파쇄된 암반에서부터 무결암까지의 모든 조건을 나타내는 현저암반의 수리전도도 변화를 결정할 수 있다. 지표 부근에서의 수리전도도 변화는 별로 나타나지 않으며 채굴적 주변에서의 변화가 큰 것으로 나타났다. 침하에 의해 수리전도도가 1보다 커지는 지역은 채굴적 상부 약 20m 구간까지 인 것으로 조사되었다. 전단변형률도 채굴적 주변에서의 수리전도도 증가에 큰 역할을 하는 것으로 나타났다. RMR이 감소함에 따라 채굴적 주변의 수리전도도는 증가하는 것으로 나타났는데 이는 RMR이 낮은 불량 암반에서의 침하가 수리전도도에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

핵심어: 침하, 변형을 의존 수리전도도, RMR, RQD

1. 서 론

지하 암반에 공동을 굴착하면 초기 응력이 교란되어 응력 재분배가 발생하게 된다. 응력 재분배에 의해 공동 주변 암반에 변형이 발생하는 경우 암석 블록 자체가 아주 연약하지 않다면 변형은 암반 내에 존재하는 절리에 집중되어 나타나게 되고, 절리에 나타나는 변형

에 의해 절리 간극(joint aperture)의 변화가 발생하면 공동 주변 암반의 수리전도도가 변화하게 된다. 수리전도도의 변화는 지하수 유동 체계에 영향을 미쳐 공동의 안정성이나 주변 환경에 영향을 미치게 된다. 방사성 폐기물 처분장의 경우 열-역학적 상호작용(thermo-mechanical coupling)에 의한 폐기물 주변 암반의 수리전도도 변화는 핵종의 이동에 영향을 주게 되고, 터널 굴착의 경우에는 응력 집중으로 인해 터널 주변 암반의 수리전도도가 증가하는 경우 터널 내로 지하수 유입이 증가하여 터널 안전성에 영향을 미칠 수 있다.

폐광된 광산의 경우에는 미충진된 채굴적 붕괴로 인한 영향이 채굴적 주변에만 미치는 것이 아니고 지

¹⁾정회원, 세명대학교 자원환경공학과 부교수

²⁾정회원, (주)지오제니컨설턴트

³⁾정회원, 청주대학교 지구환경시스템공학과 교수

*교신저자(Corresponding Author): yoon63@semyung.ac.kr

접수일: 2003년 7월 15일

심사 완료일: 2003년 8월 19일

표 침하의 형태로 지표까지 영향을 미치는 경우가 있다. 지표 침하는 채굴적 상부 암반의 파괴가 지표까지 전이되면서 발생하는 현상으로서 채굴적 상부 지층에 상당한 변형을 유발하게 된다. 지표에는 도로, 철도, 주택, 학교, 농경지 등이 있을 수 있기 때문에 지표 침하가 발생하는 경우 인명 및 재산상의 피해를 유발할 수 있다. 국내의 경우에도 폐석탄광이 존재하는 철암, 통리, 고한, 고사리, 화전, 구절리, 연화, 신림, 옥동, 성주, 화순, 문경 지역 등에 지표 침하 현상이 나타나고 있어 석탄산업합리화사업단에서는 이들 지역을 침하 방지 우선 지역으로 선정하여 지표 침하에 따른 인명 피해 및 경제적 손실을 최소화하기 위한 방안으로 지반 안전성 조사, 계측조사, 보강공사 등을 수행하고 있다¹⁾. 채굴적의 붕괴에 따라 침하가 발생하는 경우 채굴적 주변 암반의 수리전도도 분포에도 영향을 주게 되어 지하수계가 변하게 된다. 터널 굴착에 따른 이완대의 형성이나 폐광산 채굴적의 붕괴에 따른 침하대의 확장에 의한 주변 암반의 수리전도도 변화는 피할 수 없는 현상이기 때문에 응력 재분배에 따른 수리전도도의 변화 양상을 정확히 파악하는 것이 필요하다.

지하수가 상호 연결된 절리를 통하여 주로 이동하고 절리간의 상호 연결이 암반 전체에 걸쳐 충분히 분포한다고 가정하면, 절리가 발달한 현지 암반을 등가다공질체(equivalent porous medium)로 고려하는 것이 가능하다²⁾. 절리면은 평탄하지도 않고 일차적 평면도 아니며 미시적으로 보면 수많은 돌출점(asperities)들이 분포되어 있고 거시적으로는 만곡상태를 나타내지만, 절리를 평탄하고 평행한 일차적 평면으로 가정하여 3승 법칙(cubic's law)을 적용함으로써 절리의 수리전도도를 계산할 수 있다³⁾. 3승 법칙에 따라 절리의 수리전도도는 절리 간극의 변화에 의해 달라지게 되는데, 절리에 인장응력이 작용하면 절리가 개구됨으로 인해 수리전도도가 증가하고, 반대로 압축응력이 작용하게 되면 절리가 폐쇄되어 수리전도도가 감소하게 된다. 전단응력도 절리의 수리전도도 변화에 영향을 미치게 되는데 절리 팽창을 유발하여 수리전도도를 증가시키게 된다⁴⁻⁶⁾.

본 연구에서는 폐석탄광 지역에 존재하는 채굴적이 붕괴됨에 따라 발생하는 지반 침하가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 2차원 유한요소법을 이용하여 침하 과정을 해석하였으며, 지반의 변형 거동은 선형, 탄성으로 가정하였다. 채굴적 상부 지층의 파괴에 따른 변형 거동이 수리전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 현지 암반을 일정한 간격과 간극을 갖는 직교절리가 분포한 등가다공질체로 가정하고, 암석 블록 및 절리에 발생하는 변형률이 수리전도도에 미치

는 영향을 해석하기 위하여 변형률 의존 수리전도도 구성방정식을 유도하였다. 암반의 상태를 가장 잘 표현하는 지질공학적인 변수로서 널리 알려져 있는 RMR과 RQD를 고려할 수 있도록 구성방정식을 수정함으로써 무결암에서부터 완전히 파쇄된 암반 조건에 대한 수리전도도 변화를 결정할 수 있도록 하였다. 본 연구에 사용된 모델의 적용성을 검토하기 위하여 지표 침하가 발생한 강원도 삼척군 심포리 지역을 해석 대상 지역으로 선정하였다. 채굴적 수의 증가에 따른 지표 침하 변화 양상을 해석하였으며, 채굴적 상부 암반에서의 수리전도도 변화 양상을 평가하였다. 또한, 암반의 RMR이 변하는 경우 수평 및 수직 수리전도도 변화를 분석하여, 암반의 상태가 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 암반분류변수를 고려한 변형률 의존 수리전도도 변화 구성방정식

2.1 응력 재분배에 따른 수리전도도 변화

현지 암반은 많은 절리를 포함하고 있으며, 암반의 역학적, 수리학적 거동은 절리에 의해 좌우되게 된다. 유체가 상호 연결된 절리를 통해서만 이동하고, 절리간의 상호 연결이 충분히 발달한 경우에는 현지 암반을 직교절리로 이루어진 등가다공질체체로 가정할 수 있다²⁾. 절리를 통한 유체의 유동이 3승 법칙에 따른다고 가정하면 절리 암반에 발생하는 응력 재분포에 의해 절리 간극이 변하게 되어 절리의 수리전도도가 변하게 된다. 절리와 암석 블록의 변형이 선형적이라면 간극의 변화를 일으키는 인자로는 절리에 수직인 방향으로의 변형과 전단방향으로의 변형을 들 수 있다. 압축응력에 의한 절리의 폐쇄는 수리전도도의 감소를 유발하고, 인장응력에 의한 절리의 개구는 수리전도도를 증가시키게 된다. 또한, 전단응력에 의한 절리면의 팽창은 수리전도도를 증가시키게 된다. 절리를 통한 유체의 이동에 영향을 미치는 수직변형률과 전단변형률을 고려하여 응력 재분포에 따른 수리전도도의 변화량을 무차원으로 나타내면 다음과 같이 표시할 수 있다^{4,7,8)}.

$$\frac{K}{K_0} = \left(1 + \Delta\epsilon \left[\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right] + \Delta\gamma \left[\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right] \tan \phi_d \right)^3 \quad (1)$$

여기서, K_0 는 초기 수리전도도, $\Delta\epsilon$ 는 수직변형률, $\Delta\gamma$ 는 전단변형률, s 는 절리 간격, b 는 절리 간극, ϕ_d 는 팽창각, R_m 은 탄성계수감소비(elastic modulus reduction

ratio)로서 $R_m = E_m/E$ (여기서, E_m 은 현지 암반의 탄성계수, E 는 무결암의 탄성계수를 나타낸다)로 표현할 수 있고, R_{ms} 는 전단탄성계수감소비(shear modulus reduction ratio)로서 $R_{ms} = G_m/G$ (여기서, G_m 은 현지 암반의 전단탄성계수, G 는 무결암의 전단탄성계수이다)의 관계가 있다. $R_m = R_{ms} = 1$ 인 경우 변형률은 절리와 암석블록에 일정하게 분포하게 되어 수리전도도의 변화가 가장 작게되고, $R_m = R_{ms} = 0$ 인 경우 변형률은 절리에 집중되어 발생함으로 인해 수리전도도의 변화가 가장 크게 된다.

초기 수리전도도의 분포가 등방성이라 할지라도 응력 재분배 이후에 발생하는 절리 간극의 변화가 방향에 따라 달라지면 수리전도도는 이방성을 나타내게 된다. x, y방향으로의 수리전도도 변화량은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{K_x}{K_0} &= \left\{ 1 + \Delta \varepsilon_y \left(\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right) + \Delta \gamma_{xy} \left(\frac{s}{b} (1 - R_{ms}) + 1 \right) \tan \phi_d \right\}^3 \\ \frac{K_y}{K_0} &= \left\{ 1 + \Delta \varepsilon_x \left(\frac{s}{b} (1 - R_m) + 1 \right) + \Delta \gamma_{xy} \left(\frac{s}{b} (1 - R_{ms}) + 1 \right) \tan \phi_d \right\}^3 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, K_x , K_y 는 각기 x, y 방향으로의 수리전도도를 나타낸다.

2.2 RMR을 이용한 암반 변형의 표현

R_m 은 절리로 인한 현지 암반의 변형계수의 감소 정도를 나타내는 변수로서 절리발생빈도와 밀접한 관계를 가지고 변하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. RMR은 6가지 변수들의 함수로서 현지 암반의 상태를 정의하게 되는데 그 중에서도 절리발생빈도는 강도와 더불어 암반의 상태에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 관계로 RMR을 이용하여 R_m 을 정의하는 것이 가능하다. 여러 연구자들은 기존에 얻어진 현지 암반의 변형계수 측정값을 이용하여 RMR과 R_m 과의 여러 관계식을 제시하였다^{10,11)}. 본 연구에서는 RMR이 20 이하인 경우에는 탄성계수의 감소가 과대한 것으로 나타나지만 RMR이 20보다 큰 범위에서는 합리적인 값을 제시하는 것으로 알려진 Mitri 등이 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다¹¹⁾.

$$R_m = R_{ms} = 0.5 \times \left\{ 1 - \cos \left(\pi \cdot \frac{RMR}{100} \right) \right\} \quad (3)$$

(3)식은 원래 R_m 과 RMR간의 관계를 나타내는 식이

나, 무결암의 포아송비(ν)와 현지 암반의 포아송비(ν_m)를 같다고 가정하면 R_m 과 R_{ms} 는 다음 식에서와 같이 동일한 것으로 나타나 (3)식에서와 같이 R_{ms} 와 RMR간의 관계식으로 쓰는 것이 가능하다.

$$R_{ms} = \frac{G}{G_m} = \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \frac{(1 + \nu_m)}{E_m} = \frac{E}{E_m} = R_m \quad (4)$$

(3)식을 (1), (2)식에 대입하면 다양한 조건의 암반 상태를 갖는 현지 암반의 수리전도도 변화를 평가할 수 있게 된다.

2.3 RQD에 의한 절리간격의 표현

(1), (2)식에서 보는 바와 같이 절리간격도 수리전도도에 영향을 미치게 되는데, 절리간격은 RQD로부터 구할 수가 있다. RQD는 RMR, Q-system등에 사용되는 암반분류요소 중의 하나로서 암반 내 존재하는 절리의 발생빈도를 나타내는 지수로 자주 사용되고 있다.

Priest & Hudson(1976)은 다음과 같은 절리발생빈도(joint frequency, λ)와 RQD간의 관계식을 제시하였다¹²⁾.

$$RQD = 100(1 + 0.1\lambda)e^{-0.1\lambda} \quad (5)$$

여기서, λ 는 조사선 길이 1 m당에 나타나는 절리 개수 (개/m)이다. (5)식은 음함수(implicit function)의 형태로 표시되어 있어 절리발생빈도를 종속함수로 하는 형태로 바꿀 수가 없는 관계로 (1), (2)식에 있는 절리간격에 직접적으로 대입하여 사용할 수는 없다. Priest & Hudson(1976)은 $6 < \lambda < 16$ 의 범위에서 (5)식에 의한 값과 근사한 값을 주는 다음과 같은 선형식을 제시하였다¹²⁾.

$$RQD = 110.4 - 3.68\lambda \quad (6)$$

본 연구에서는 (6)식을 이용하여 주어진 RQD로부터 절리발생빈도를 계산하여 이를 초기값으로 하고, (5)식에 Newton-Raphson 반복법을 적용하여 주어진 RQD에 해당하는 절리발생빈도를 계산하였다. 절리발생빈도를 계산하는 과정을 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_0 = \frac{110.4 - RQD_0}{3.68} \quad (7)$$

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n - \frac{RQD(\lambda_n) - RQD_0}{\frac{dRQD(\lambda_n)}{d\lambda}} \quad (8)$$

(7)식에서 RQD₀는 주어진 RQD 값이고, λ_0 는 주어

진 RQD 값으로부터 구한 절리발생빈도의 초기값, $RQD(\lambda_n)$ 은 (5)식을 나타낸다. (7)식으로 부터 구한 절리발생빈도 초기값을 (8)식에 대입하여 반복 계산을 수행하고 λ_{n+1} 과 λ_n 값의 차가 일정한 오차 안에 들어가면 계산을 중지한다. 절리간격은 절리발생빈도의 역수임으로 절리발생빈도를 구하면 절리간격을 구할 수가 있다.

3. 해석 대상 지역 특성 및 요소망

본 연구에서는 지표 침하가 발생한 강원도 삼척군 심포리의 한양탄광 광구 중 철도가 지나가는 한양3갱 부근을 해석 대상 지역으로 선정하였다. 지표지질조사 결과 지배적인 절리군의 방향은 N8W/89SW, N8W/31SW, 부수적인 절리군의 방향은 N10E/6SE로 나타났으며, 절리 간격은 약 27 cm였다. 탄층 심도는 약 30~40 m이며, 탄층 경사는 15~30°, 탄층 두께는 평균 1.2 m정도이다. 탄층의 주향이 철도 노선과 평행한 관계로 철도 하부에서 광범위하게 채탄이 진행되었으며, 이로 인해 채굴적의 붕괴로 인한 침하가 광범위하게 발생한

것으로 조사되었다. 침하는 철도부 우측 22 m지점에서 19.31 cm, 철도부에서는 18.84 cm 발생한 것으로 나타났다¹³⁾. Fig. 1에는 해석단면지층에 대한 지층발달 상태가 표시되어 있으며, 채탄이 완료된 채굴적은 8개가 존재한다. Table 1에는 각 층의 물성이 표시되어 있다¹³⁾. 채굴적이 붕괴된 후 채굴적의 충진된 상태가 채굴적 상부 및 하부 지층의 변형에 영향을 미치지 못하도록 하기 위하여 채굴적을 충진하는 물질의 탄성계수는 아주 낮게, 포아송비는 상대적으로 크게 하였다. Fig. 2에는 유한요소망이 표시되어 있다. 요소망의 크기는 가로는 210 m, 세로는 80 m로 설정하였으며 요소수는 774개, 절점수는 837개이다. 변위 구속 조건으로는 요소망의 좌, 우 경계는 수평변위를 고정하였으며, 바다는 수직변위를 고정하는 것으로 하였다. 하중 경계 조건으로는 채굴적이 채탄되기 전의 응력 상태를 나타내기 위하여 채굴적 상부 자중이 등가절점력으로 채굴적 주위에 작용하는 것으로 하였다.

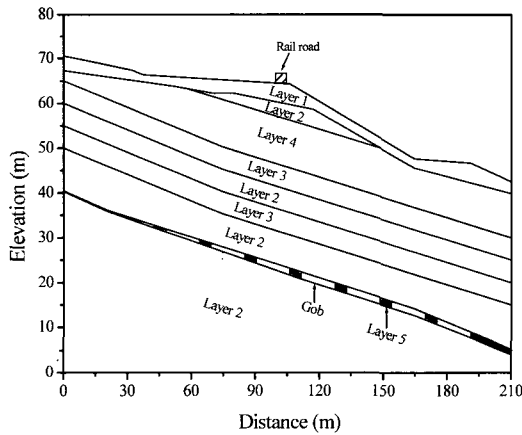


Fig. 1. Strata lithology.

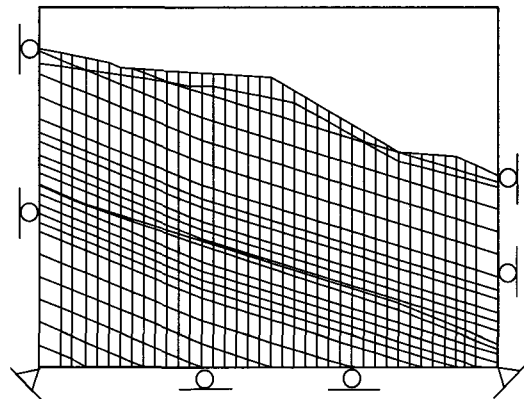


Fig. 2. Finite element mesh layout.

Table 1. Input parameters.

Layer No.	Young's modulus(kg/cm ²)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)	RQD(%)	RMR
1 : surface material	100	0.35	1,800	0	0
2 : sandstone	1,000	0.27	2,600	22	26
3 : shale	6,600	0.25	2,600	36.4	46
4 : sandstone	10,000	0.23	2,600	57.0	64
5 : coal	400	0.33	2,000	0	0
Gob	0.001	0.40	2,000	0	0

4. 결과 및 검토

해석 단면 지층에는 8개의 채굴적이 존재하며 채탄은 경사 탄층의 상부에서 하부로 진행된 것으로 하여, 각 채굴적을 좌측으로부터 1차, 2차, 3차, 4차, 5차, 6차, 7차, 8차 채굴적으로 하였다.

Fig. 3에는 채굴적의 증가에 따른 지표 침하량의 변화가 나타나 있다. 굴착이 우측으로 진행됨에 따라 최대 지표 침하량이 발생하는 지역도 우측으로 이동함을 볼 수 있다. 채굴적이 모두 굴착된 경우 최대 지표 침하량은 29.5 cm가 되고, 5차 채굴적 상부인 철로 우측 약 20 m 지점에서 발생하였다. 철로에서의 지표 침하량은 28.8 cm로 나타났다. 철로에서 측정된 침하량이 18.84 cm라는 점을 고려하면 앞으로 약 10 cm 정도의 잔류 침하가 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 채굴적 수의 증가에 따른 암반 내 수직변위의 변화를 나타낸다. 해석 위치는 철로가 지나가는 부분의 직하부로 하여 지표에서부터 요소망의 바닥까지를 대상으로 하였다. 그림을 보면 1, 2차 채굴적을 굴착하는 경우에는 수직변위의 변화량이 작은 것으로 나타났는데, 이는 철로가 4차 채굴적 상부를 지나가는 관계로 해석위치가 1,2차 채굴적으로부터 멀리 떨어져 있기 때문인 것으로 생각된다. 4차 이상의 채굴적을 굴착하는 경우에는 약 24 m 깊이에 위치하는 4차 채굴적 천반의 침하량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 철로 하부의 침하량 증가는 6차 채굴적 굴착 때까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 7, 8차 채굴적은 4차 채굴적에서 멀리 이격되어 있는 관계로 수직변위에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 4차 이상의

채굴적을 굴착하는 경우 수직변위의 최대 변화는 약 24-31(m) 구간에서 발생하는 것으로 나타났으며, 그 구간 상부에서부터 지표까지는 침하량이 일정한 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 채굴적의 붕괴에 따른 지반 침하가 수리전도도 변화에 미치는 영향이 가장 크게 나타나는 지역은 채굴적 천반에서부터 상부 7 m지점에 이르는 구간까지일 것으로 예상된다.

Fig. 5에는 8개의 채굴적이 모두 굴착된 경우 채굴적 주변 암반에서의 수평방향 및 수직방향 수리전도도비의 변화가 나타나 있다. 수리전도도 변화는 (2)식을 사용하여 구하였으며, 전단팽창각(ϕ_0)은 15°, 절리간극은 10^{-4} m로 가정하였다. 그림에서 수리전도도비의 크기가 1보다 큰 경우에는 인장변형률과 전단변형률에 의해 암반 내 존재하는 절리의 간극이 증가함을 나타내며, 1보다 작은 경우에는 압축변형률이 작용하여 절리의 간극이 원래보다 감소됨을 의미한다. 그림을 보면 지표 부근에서는 수리전도도의 변화가 별로 없으며, 최대 수리전도도 변화는 채굴적 주변에서 주로 발생하는 것으로 나타나는데, 이는 채굴적의 붕괴에 따른 지층의 변형이 채굴적 주변에서 가장 크다는 Fig. 4의 결과와 잘 일치한다. 채굴적 상부 지층이 보(beam)와 같이 거동한다고 가정하면 자중에 의해 처짐이 발생하는 경우 최대 처짐은 지층의 중앙부에서 발생하여 층과 층간의 이격을 증가시키고, 최대인장응력은 지층이 채굴적의 양 끝단과 만나는 지점에서 발생하여 이 부근에서 수직방향의 균열이 형성되게 된다. 따라서, 채굴적 상부 지층의 붕괴에 따른 수직방향의 인장변형률은 수평방향의 인장변형률보다 상대적으로 더 클 것으로 예상되며 이러한 변형률 발생 특성은 수리전도도 변화에도 영향을 미치게

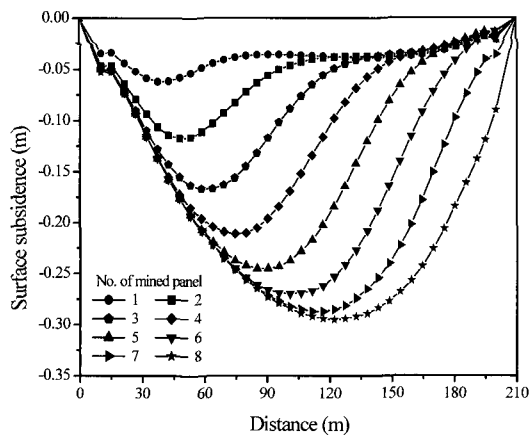


Fig. 3. Changes of surface subsidence with the increase of mined panel.

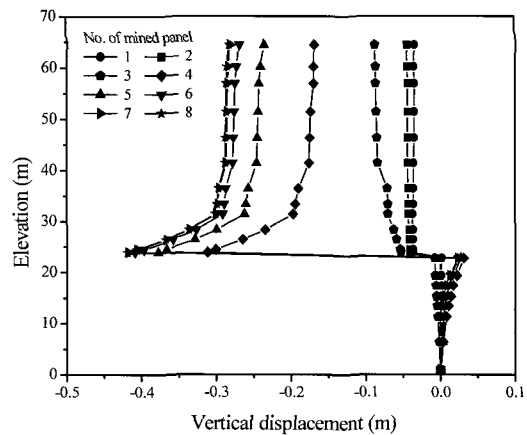


Fig. 4. Variations of vertical displacement with the increase of mined panel.

된다. 수평수리전도도의 경우 수리전도도 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 수직방향 수직변형률이기 때문에 채굴적 상부에서 수평방향 수리전도도비가 증가한다는 것은 이 부분에서 침하에 의한 인장변형률과 전단 변형률이 크게 나타난다는 것을 의미하며, 지표 부근으로 갈수록 수평방향 수리전도도의 비가 1보다 작아지는 것은 지표 부근에서는 압축변형률이 발생한다는 것을 나타낸다. 수직방향 수리전도도의 변화에는 수평방향 수직변형률의 영향이 가장 크게 작용한다. 중앙에 있는 채굴적 상부 지표 부근에서는 수직방향 수리전도도의 비가 1보다 작은 것으로 나타나는데, 이는 이 부분에 발생하는 수평방향 수직변형률이 압축영역에 있다는 것

을 나타낸다. 수평방향 수리전도도는 수직방향 수리전도도에 비해 3배 이상 큰 것으로 나타났는데, 이는 채굴적의 붕괴에 따른 침하가 지반의 수평방향 수리전도도에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 채굴적의 붕괴가 지반의 수리전도도 증가에 영향을 미치는 범위는 채굴적 상부 약 20 m 정도까지 인 것으로 나타나 이 구간 내에서는 상당한 지하수계의 교란이 있을 것으로 예상된다.

Fig. 6에는 채굴적의 증가에 따른 철로 하부에서의 수리전도도의 변화가 나타나 있다. 그림을 보면 2차 채굴적까지를 굴착할 때까지는 수리전도도의 변화가 거의 없는 것으로 나타나나, 4차 이상의 채굴적을 굴착하는

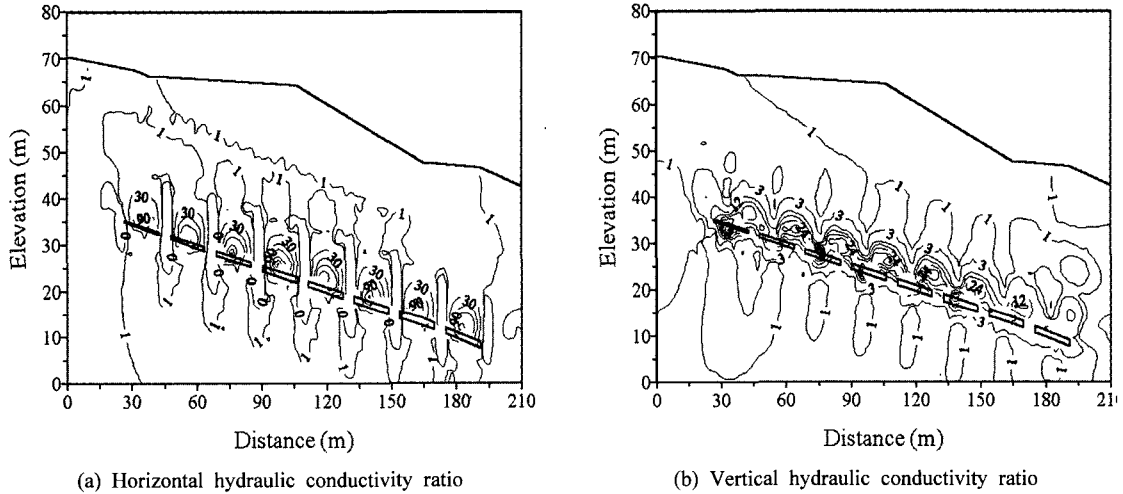


Fig. 5. Distribution of hydraulic conductivity ratio around mined panels.

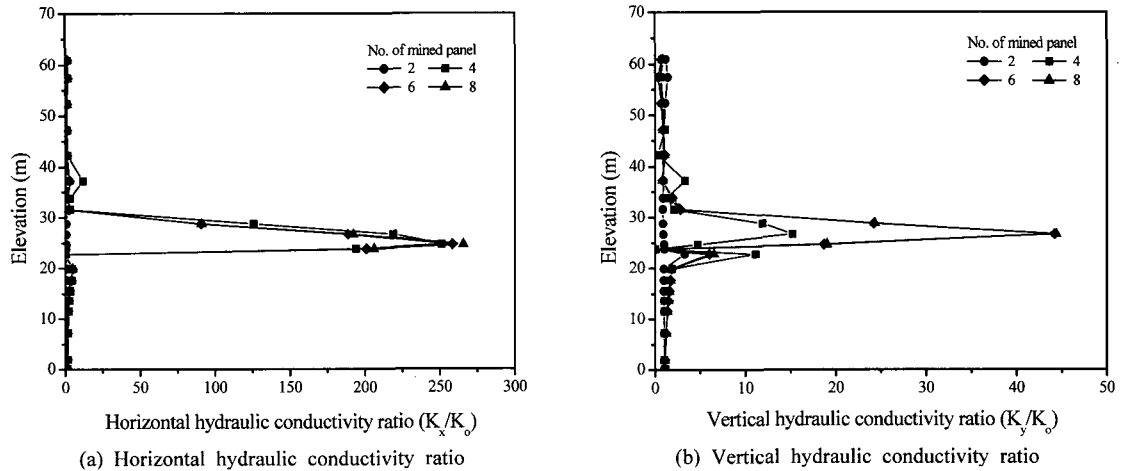


Fig. 6. Variations of hydraulic conductivity ratio with the increase of mined panel.

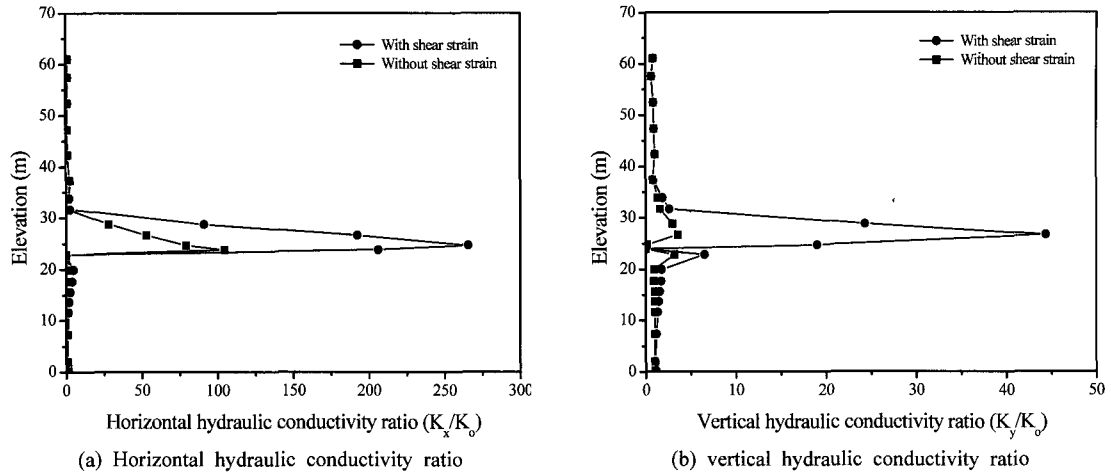


Fig. 7. Changes of hydraulic conductivity ratio for the model without considering shear strain and with shear strain.

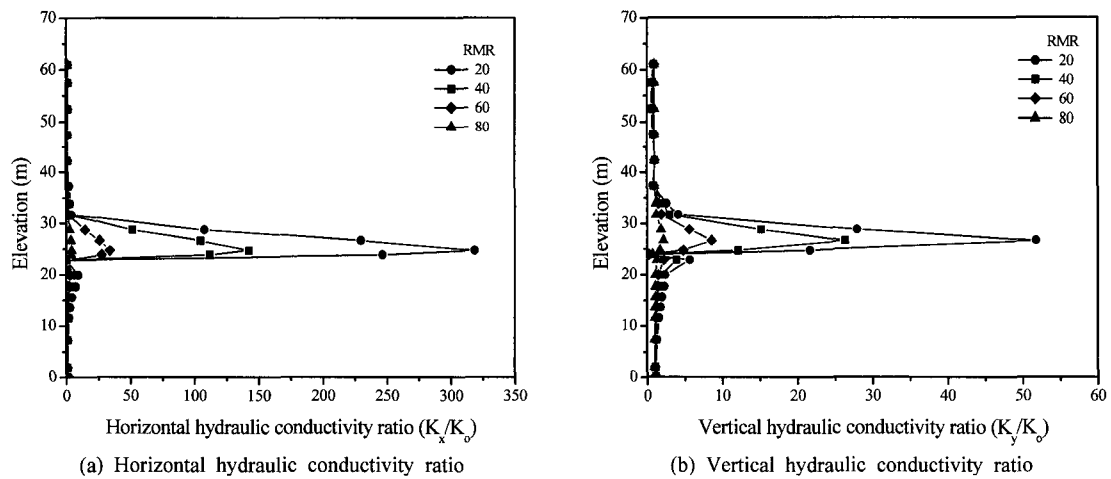


Fig. 8. Variations of hydraulic conductivity ratio with the increase of RMR.

경우에는 수리전도도의 변화가 급격히 발생하는 것을 알 수 있다. 채굴적 상부에서 수리전도도의 변화가 가장 크게 발생하는 지역은 Fig. 4의 결과와 유사하게 채굴적 천반에서부터 약 7 m 상부구간 까지 인 것으로 나타난다. 수평방향 수리전도도의 경우에는 채굴적 바닥부에서의 변화가 거의 없는 반면에 수직방향 수리전도도의 경우에는 바닥부에서 수리전도도의 변화가 발생하는데 이는 채굴적이 붕괴되는 경우 바닥을 통하여 채굴적 내부로 지하수의 유동이 급격히 증가할 가능성이 있음을 나타낸다.

Fig. 7에는 전단변형률이 수리전도도 변화에 미치는 영향이 나타나 있다. 그림에서 보듯이 채굴적 붕괴에 따른 변형이 가장 크게 나타나는 채굴적 상부 7 m 구간

내에서 전단변형률이 수리전도도에 미치는 영향도 가장 큰 것으로 나타났는데, 이는 이 구간 내에서 발생하는 전단변형률이 수직변형률보다 크다는 것을 나타낸다. 나머지 구간에서는 전단변형률의 영향이 별로 없는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 RMR이 수리전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 RMR을 20, 40, 60, 80으로 증가시키면서 수리전도도의 변화를 해석한 결과를 나타낸다. 이때, 모든 지층은 동일한 RMR을 갖는 것으로 하여 해석을 실시하였다. 해석 위치는 철로 하부로 하였다. 그림을 보면 방향에 관계없이 수리전도도의 변화는 채굴적 상부에서 급격히 변하는 것으로 나타났는데, RMR이 감소함에 따라 수리전도도비는 증가하는 것으로 나타났다.

수리전도도의 변화가 가장 크게 발생한 위치에서 RMR이 80일 때를 기준으로 하여 RMR이 60, 40, 20일 때의 수리전도도비의 증가비를 계산하면 수평방향 수리전도도의 경우에는 8배, 33배, 73배로 증가하는 것으로 나타났으며, 수직방향 수리전도도비의 경우에는 2배, 7배, 14배로 증가하는 것으로 나타나, RMR이 낮은 암반의 경우 침하가 수리전도도 변화에 미치는 영향이 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 암반이 불량한 지역에서 공동을 굴착하는 경우 공동 주변의 이완대 형성에 따른 수리전도도의 변화에 대해 주의를 기울여야 될 것으로 생각된다.

5. 결 론

폐석탄광의 채굴적이 붕괴되는 경우 채굴적 상부 지층의 파괴가 지표까지 전파되면서 침하가 발생하고, 이로 인해 채굴적 주변 암반의 수리전도도가 변하게 된다. 본 연구에서는 침하가 암반의 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 암반을 직교절리가 분포한 등가다공질체로 가정하였다. 변형률에 따른 수리전도도의 변화를 해석할 수 있는 구성방정식을 제시하였으며, 구성방정식이 현장성을 갖도록 하기 위하여 RMR과 RQD를 고려할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모든 채굴적이 굴착된 경우 29.5 cm의 최대 지표 침하량이 발생하였으며, 발생 위치는 철로 우측 약 20 m되는 지점이고, 철로에서는 28.8 cm의 지표 침하가 발생하였다.
- 2) 지표 부근에서는 수리전도도의 변화가 크지 않고 채굴적 주변부에서 수리전도도의 변화가 큰 것으로 나타났다. 수리전도도의 변화가 가장 크게 나타나는 구간은 채굴적 상부 7 m 까지 인 것으로 나타났으며, 수평방향 수리전도도가 수직방향 수리전도도보다 3배 이상 큰 것으로 해석되었다.
- 3) 전단변형률도 수리전도도의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 특히 채굴적 주변부에서는 수직 변형률보다 전단변형률에 의한 수리전도도의 증가가 더 큰 것으로 나타났다.
- 4) RMR을 80, 60, 40, 20으로 감소시키면서 수리전도도의 변화를 해석한 결과 RMR이 감소함에 따라 수리전도도는 상당히 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 편재절리가 발달한 암반 내 공동을 굴착하는 경우 응력 재분배가 공동 주변의 수리전도도

변화에 미치는 영향을 정성적으로 평가하는 데에는 상당한 도움이 될 것으로 예상된다. 그러나, 입력변수로 사용되는 절리 간극이나 팽창각과 같은 절리 특성을 모든 절리에 일률적으로 적용함으로써 인해 발생하는 신뢰성 저하를 극복하기 위하여 입력자료의 통계적 분포 특성을 고려할 수 있는 방안을 마련하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 개별절리해석 모델이나 연속체 모델을 사용하는 상업용 프로그램과의 비교를 통한 지속적인 모델의 검증도 필요한 작업이라고 판단된다. 본 연구에서는 절리 방향성을 고려하지 않고 직교절리가 발달한 것으로 해석하였으나 앞으로의 연구에서는 절리의 방향성을 고려할 수 있도록 모델을 수정함으로써 모델의 적용성을 향상시킬 예정이다.

감사의 말

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

참고문헌

1. 석탄산업합리화사업단, 1997, 사업단십년사, 석탄산업합리화사업단, 628p.
2. Bai, M., 1991, Numerical models of fluid flow and solid deformation in fluid saturated media, Ph.D Thesis, The Pennsylvania State University, 184p.
3. Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability enhancement of blocky rocks, Water Resour. Res. 5.6, 1273-1289.
4. Liu, J., D. Elsworth, B.H. Brady and H.B. Mulhaus, 2000, Strain-dependent fluid flow defined through rock mass classification schemes, Rock Mech. Rock Engng. 33.2, 75-92.
5. 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 공학박사학위논문, 282p.
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 joint, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 36.5, 641-650.
7. 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.
8. 윤용균, 2003, RMR에 따른 변형률 의존 수리전도도 변화 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 13.1, 44-51.
9. Pande, G.N., G.Beer and J.R.Williams, 1990, Numerical methods in rock mechanics, John Wiley & Sons, 327p.
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. 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.
 12. Priest, S.D. and J. Hudson, 1976, Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 135-148.
 13. 석탄산업합리화사업단, 1999, 심포리지역 지반안정성 정밀 조사, 석탄합리화사업단, 333p.

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 자원환경공학과 부교수

김장순



2000년 세명대학교 자원환경공학과 공학사
 2003년 세명대학교 자원환경공학과 공학 석사
 Tel: 02-3472-2261
 E-mail: kim_js@geogeny.com
 현재 (주)지오제니컨설턴트 대리

김종우



1986년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 043-229-8471
 E-mail: jwkim@chongju.ac.kr
 현재 청주대학교 지구환경시스템공학과 교수