

지하 굴착에 의한 침하와 수리전도도 증가에 관한 수치해석적 연구

윤 용 균¹⁾

Numerical Studies of Subsidence and Hydraulic Conductivity Enhancement Due to Underground excavation

Yong-Kyun Yoon

ABSTRACT This study investigates the changes of subsidence and hydraulic conductivity by underground mining. Coupling between post-mining induced strains and strain-dependent hydraulic conductivities is obtained by idealizing a jointed rock mass as an equivalent porous medium in which the hydraulic conductivity of a single joint is defined through parallel plate description. Results indicate that post-mining hydraulic conductivities are directly related to the strain field occurred by subsidence induced deformation. Maximum subsidence and hydraulic conductivity values increase as a panel width does widen. Joint spacing has an effect on the intensity of the changes in hydraulic conductivity.

Key words : subsidence, equivalent porous medium, strain-dependent hydraulic conductivity

초 록 지하 채굴에 따른 침하와 수리전도도의 변화 양상에 관하여 조사를 하였다. 채굴 후 암반내 발생하는 변형률과 변형률 의존 수리전도도와의 상호 관계를 나타내는 식을 얻기 위하여 절리 암반을 등가 다공질 매질로 고려하였으며, 단일 절리의 수리전도도는 평행판 이론을 적용하여 결정하였다. 해석 결과에 따르면 채굴 후 암반내 수리전도도의 변화는 침하에 의해 발생한 변형률에 직접적으로 연관이 있는 것으로 나타났다. 채굴적의 폭을 증가시킴에 따라 최대 침하량과 수리전도도의 크기가 증가하였다. 절리 간격은 수리전도도의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다.

핵심어 : 침하, 등가 다공질 매질, 변형률 의존 수리전도도

1. 서 론

지하 굴착에 의한 침하와 암반의 투수성 변화를 파악하는 것은 지하 토목 공사 및 광산 개발에서 매우 중요하다. 폐광된 광산의 경우 미충진된 채굴적이 붕괴되면서 지표침하가 발생하는 경우가 있다.^{1,2)} 지표 침하는 채굴적의 붕괴가 지표까지 영향을 미쳐 나타나는 현상으로, 이로 인해 상부지층에는 상당한 변형이 발생하게 된다. 상부지층에 발생한 변위장은 현지암반의 수리전도도 분포에 영향을 미쳐 지하수계도 변하게 된다. 수리전도도의 변화에 의해 지하수위가 저하되어 원래대로 회복하지 않는 경우, 상부지층에 존재하는 국부적인 대수층을 음용수나 농업용수로 사용하는 사람들에게 상당한 피해를 미치게 된다. 지하 토목 공사의 경우에는 지하 채굴에 의한 지표 침하가 발생하는 경우가 드물지만, 응력 재분포에 의해 공동 주변 암반이 이완되는 경우 암반의 수리전도도가 변하게 되어 시공중이나 시공 후 구조물 유지관리

에 영향을 미치게 된다.

지하수가 상호 연결된 절리를 통하여 주로 유동하고 절리간의 상호 연결이 암반 전체에 걸쳐 충분히 분포하며 지하수의 유동을 정상상태로 가정하는 경우, 절리가 발달한 현지암반을 등가 다공질 매질(Equivalent porous medium)로 고려할 수 있다. 등가 다공질 매질은 현지암반의 수리전도도를 절리 간격과 절리 간극에 의해 변화하는 등가 이방성 수리전도도로 표현하는데 적합하다. 이 모델을 사용하면 변형률 발생에 의한 절리 간극의 변화와 이로 인한 수리전도도의 변화를 평가하는 것이 가능하다.³⁻⁷⁾

본 연구에서는 지하 공동 굴착시 발생하는 침하 및 수리전도도의 변화를 해석하고자 유한요소법을 사용하였다. 현지 암반을 변형 가능한 절리 암반으로 고려하여 암반

1) 정희원, 세명대학교 자원환경공학과 교수
원고접수일 : 2000년 8월 7일
원고 심사 완료일 : 2000년 8월 28일

내 발생한 변형률이 수리전도도의 변화에 미치는 영향을 평가하였으며, 채굴적의 폭이 지표 침하와 수두 및 수리전도도 분포에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 절리 간격이 수리전도도 변화에 미치는 영향도 해석하였다.

2. 응력 재분포에 따른 변형률과 수리전도도와의 관계

정상상태하에서 절리를 통해서만 지하수가 유동한다고 가정하면, 평행한 절리군을 포함하고 있는 등가 다공질 암반의 수리전도도(K)는 평행판 이론을 적용하여 구할 수 있다.⁸⁾

$$K = \frac{gb^3}{12v_k S} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도, b 는 절리간극, v_k 는 유체의 동점성계수, S 는 절리간격이다.

응력 재분포에 의해 절리에 수직한 방향으로 Δu_x 의 변위가 발생하고, Δu_x 가 수리전도도에 영향을 미친다고 가정하면 식 (1)을 다음과 같이 쓸 수가 있다.^{3,9)}

$$\Delta K = \frac{g}{12v_k S} (b + \Delta u_x)^3 \quad (2)$$

$\Delta \sigma$ 에 의해 절리의 수직방향으로 발생하는 총 탄성 변위(Δu)는 암석매질 변위(Δu_x)와 절리 변위(Δu_y)의 합으로 표시된다.

$$\Delta u = \Delta u_x + \Delta u_y \quad (3)$$

암석매질 변위와 절리 변위를 각각 탄성계수(E)와 절리 수직강성(k_n) 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta u_x = \Delta \epsilon_x S = \frac{\Delta \sigma S}{E} \quad (4)$$

$$\Delta u_y = \frac{\Delta \sigma}{k_n} \quad (5)$$

여기서, $\Delta \epsilon_x$ 는 암석매질의 변형률이다.

평형조건이 만족되기 때문에 식 (4)와 식 (5)로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{\Delta u_x E}{S} = \Delta u_x k_n \quad (6)$$

절리 변위를 구하기 위하여 식 (3),(4),(6)을 이용하면

다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta u_x}{\Delta u} = \frac{\Delta u_x}{S \Delta \epsilon_x + \Delta u_y} = \frac{E}{S k_n + E} \quad (7)$$

식 (7)을 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta u_x = \frac{E \Delta u}{S k_n + E} = \frac{E(S+b) \Delta \epsilon}{S k_n + E} = \Delta \epsilon \left(\frac{k_n}{E} + \frac{1}{S} \right)^{-1} \quad (8)$$

여기서, $\Delta \epsilon$ 는 절리의 수직방향으로 발생하는 총 탄성 변형률이다. 절리 간극은 절리 간격에 비해 매우 작기 때문에 $S+b \approx S$ 로 가정한다.

식 (8)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta K &= \frac{g}{12v_k S} \left(b + \Delta \epsilon \left[\frac{k_n}{E} + \frac{1}{S} \right]^{-1} \right)^3 \\ &= \frac{gb^3}{12v_k S} \left(1 + \Delta \epsilon \left[\frac{k_n b}{E} + \frac{b}{S} \right]^{-1} \right)^3 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 보는 바와 같이 수리전도도의 변화는 $(k_n b/E)$ 와 (b/S) 에 의해 좌우되며, 이들 항이 대단히 커지면 변형률이 증가할지라도 수리전도도는 변하지 않게 된다. 식 (9)의 적용시 인장변형률은 양의 값으로, 압축변형률은 음의 값으로 대입하면 된다. 따라서, 인장변형률이 발생한 지역에서는 수리전도도가 증가하고, 압축변형률이 발생한 부분에서는 수리전도도가 감소하게 된다.

식 (9)에 사용되는 절리간극은 현지 수리전도도 측정치가 주어지는 경우 식 (1)을 다음과 같이 수정하여 구한다.

$$b = \left(\frac{12v_k S K}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

식 (10)에서 보는 바와 같이 다른 조건이 일정하고 절리간극만 증가하는 경우 절리간극도 커지게 된다. 식 (9)을 보면 절리간격이 증가하는 경우 (b/S) 은 감소하지만 $(k_n b/E)$ 이 더욱 증가하여 전체적으로 $((k_n b)/E + b/S)$ 는 커지게 된다.

식 (9)을 수평방향 수리전도도와 수직방향 수리전도도로 표시하면 다음과 같다.

$$\Delta K_x = \frac{gb^3}{12v_k S} \left(1 + \Delta \epsilon_y \left[\frac{k_n b}{E} + \frac{b}{S} \right]^{-1} \right)^3 \quad (11)$$

$$\Delta K_y = \frac{gb^3}{12v_k S} \left(1 + \Delta \epsilon_x \left[\frac{k_n b}{E} + \frac{b}{S} \right]^{-1} \right)^3 \quad (12)$$

3. 유한요소 정식화

암반은 탄성적으로 거동하고, 유체의 유동은 정상상태인 것으로 가정한다. 암반의 변형과 유체의 유동을 나타내는 지배 방정식에 유한요소 정식화를 수행한 후 이들 관계를 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{pmatrix} \quad (13)$$

여기서, $\mathbf{K}_s = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$ (14)

$$\mathbf{K}_f = \int_V \mathbf{A}^T \mathbf{K} \mathbf{A} dV \quad (15)$$

여기서, \mathbf{K}_s 는 암반의 강성행렬, \mathbf{K}_f 는 유체의 수리전도도 행렬, \mathbf{B} 는 변형률-변위행렬, \mathbf{D} 는 응력-변형률행렬, \mathbf{A} 는 형상함수의 도함수 행렬, \mathbf{K} 는 수리전도도행렬, V 는 해석 영역의 체적, \mathbf{d} 는 절점변위 벡터, \mathbf{h} 는 절점수두 벡터, \mathbf{F} 는 절점력 벡터, \mathbf{Q} 는 절점플럭스 벡터다. 식 (12)는 대각선 행렬의 형태를 나타내고 있기 때문에 상호작용 해석이 아니며, 해석과정에서는 변위와 수두를 동시에 구하는 것이 아니고 순차적으로 방정식을 풀게 된다. 변형률과 수리전도도의 상호작용은 식 (9)을 적용함으로써 구할 수가 있다.

4. 모델해석

4.1. 입력자료

채굴 후 발생하는 지반 침하와 수리전도도 변화를 정확히 예측하기 위해서는, 현지암반에 대한 탄성정수 및 수리전도도 측정 값이 필요하다. 국내에서는 탄전지역에 대한 체계적인 실측 자료가 없는 관계로 미국의 West Virginia 주에 있는 한 탄광에서 측정된 자료를 이용하였다.¹⁰⁾ 탄층의 평균 두께는 약 1.75 m 이고, 채굴 구간의 폭은 180 m, 길이는 2160 m 정도가 된다. 탄층은 지표에서 약 213 m 하부에 존재한다. 해석 영역에는 다양한 지층이 나타나고 있으며, Fig. 1에는 지층 발달 상태가 표시되어 있다. Table 1에는 각 지층의 물성이 나타나 있다. 도표에서 채굴적의 수리전도도는 채굴적이 완전히 붕괴된 후에 측정된 결과이고, 나머지 부분에서의 수리전도도는 채굴이 시작되기 전에 측정된 결과이다. 본 연구에서는 채굴적이 붕괴된 후 정적인 변위장이 형성된 것을 모사하기 위하여 채굴적이 붕괴되어 충전된 상태를 가정하였고, 채굴적 상부의 변형이 채굴적에 차 있는 물

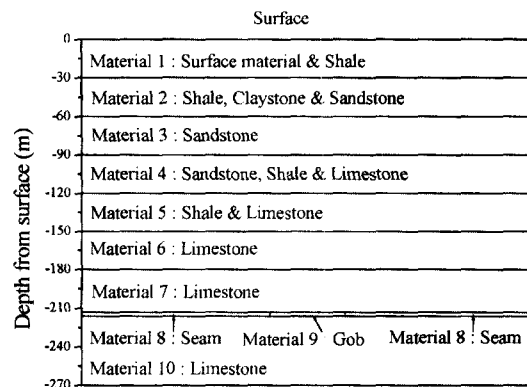


Fig. 1. Strata lithology.

Table 1. Input parameters for the finite element analysis.

Material No.	Hydraulic conductivity (10 ⁷ m/s)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
1	32.2	7.5	0.28
2	8.0	16.5	0.25
3	2.4	41.6	0.18
4	0.76	41.6	0.18
5	1.3	22.0	0.22
6	2.5	25.7	0.20
7	5.3	25.7	0.20
8	2.4	9.0	0.37
9	1.4	4.8 × 10 ⁻⁸	0.40
10	1.1	95.0	0.10

질에 의해 방해 받지 않도록 하기 위하여 채굴적의 탄성계수는 낮게, 포아송비는 크게 선택하였다. 각 지층에 대해 주어진 물성은 등방성인 것으로 가정한다.

4.2. 요소망

요소망은 Fig. 1에 나와있는 9개의 지층을 포함하는 것으로 하였으며, 해석 단면의 크기는 가로는 720 m, 세로는 270 m로 설정하였다. 채굴적의 폭은 60 m를 기준으로 하였으며, 공동의 크기가 침하 및 수리전도도 변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 채굴적의 폭이 120 m, 180 m 인 경우도 고려하였다. 채굴적의 높이는 3 m로 하였다. Fig. 2는 채굴적의 폭이 120 m 인 경우의 요소망으로서 요소수는 308개, 절점수는 348개이다.

변위 구속 조건으로는 모델의 좌, 우 경계는 수평변위를, 바닥은 완전 고정을 하는 것으로 하였다. 모델의 상부 표면과 좌, 우 경계 및 바닥에는 일정 수두 조건을

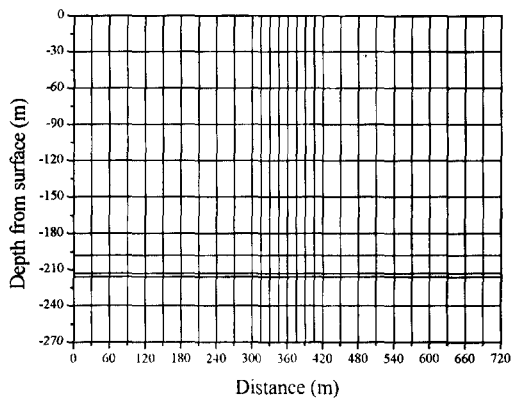


Fig. 2. Finite element mesh layout.

가하였다. 채굴적 주위로도 그 높이에 해당되는 일정 수 두가 작용하는 것으로 하여, 지하수가 채굴적내로 유동하도록 하였다. 하중 경계 조건으로는 공동 채굴전의 응력 상태를 나타내기 위하여 채굴적 상부 자중이 등가점점력으로 채굴적 주위에 작용하는 것으로 하였다.

4.2.1. 침하 해석

Fig. 3은 채굴적의 폭에 따른 지표침하의 변화 양상을 나타낸다. 그림에서 W는 채굴적의 폭을 나타낸다. 그림을 보면 채굴적의 폭에 관계없이 침하 형태는 전형적인 골형침하를 나타냄을 알 수 있다. 지표 침하의 최대량은 채굴적 폭이 60 m, 120 m, 180 m 인 경우, 각기 4.29 cm, 19.8 cm, 45 cm로 나타났다. 채굴적의 폭이 60 m 일 때의 최대 침하량으로 각 채굴적의 크기에 따른 최대 침하량을 나눈 무차원 값을 침하율로 하면 120 m 인 경우에는 침하율이 4.6, 180 m 인 경우에는 10.5가 되어, 채굴적의 크기가 증가함에 따라 지표 침하량은 선형적이라기

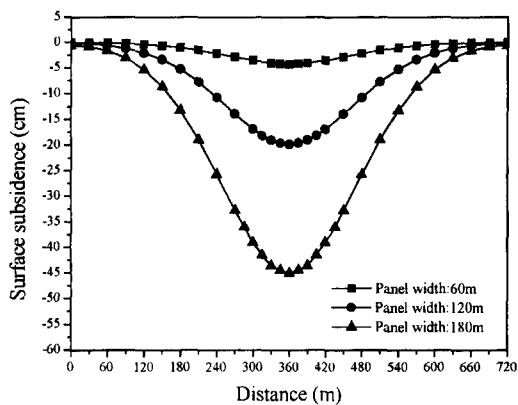


Fig. 3. Variations of surface subsidence with panel width.

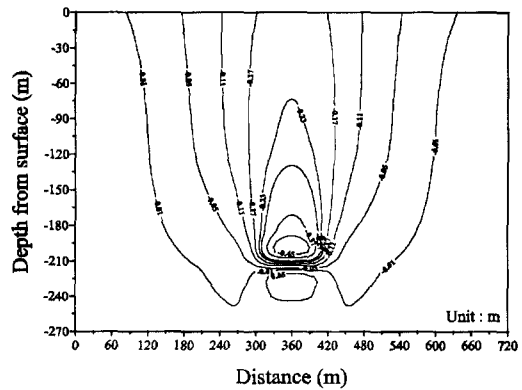


Fig. 4. Vertical displacement(W = 120 m).

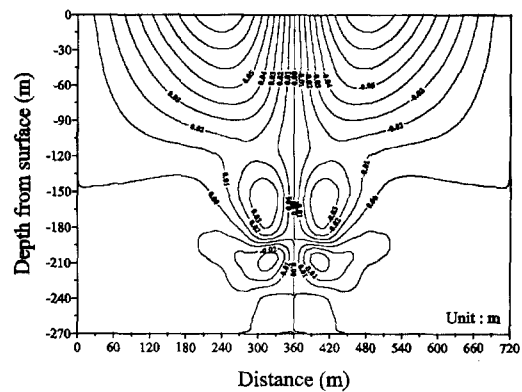


Fig. 5. Horizontal displacement(W = 120 m).

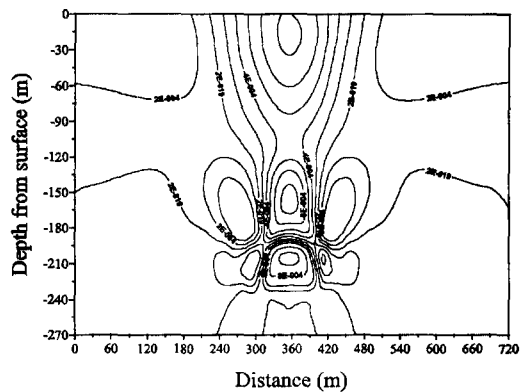


Fig. 6. Horizontal strain(W = 120 m).

보다는 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

채굴적의 폭이 120 m 인 경우의 수직변위와 수평변위 및 수평변형률의 변화 양상이 각각 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에 나와있다. 수직변위 변화 양상을 보면 채굴적 상부 지층의 붕괴가 지표까지 연속적으로 진행되는 것을 알 수

있으며, 최대 변위가 채굴적의 중심에 집중되는 것으로 나타나 지표침하 형태가 채굴적의 폭이 임계폭(Critical width) 보다 작은 임계이하(Sub-critical) 조건이라는 것을 예측할 수 있다.^{11,12)} Fig. 3에서 보는 바와 같이 지표 침하량의 최대치는 채굴적의 중심에서 나타나, 채굴적의 크기에 상관없이 지표침하 형태는 임계이하 조건을 나타낸다. 수평변위는 채굴적 부근과 지표에 근접할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 최대값은 채굴적 양 끝단 부근의 지표에서 발생하였다. 수평변형률의 경우 굴착한 체내에서는 압축변형률을 나타내고, 나머지 부분에서는 인장변형률을 나타내어 기존의 침하 이론에 잘 맞는 것으로 나타났다.¹²⁾

4.2.2. 수리전도도 및 수두변화 해석

침하에 따른 변형률에 의해 유발되는 수리전도도의 변화는 식 (9)를 이용하여 계산한다. 식 (9)에서 필요로 하는 주요 입력자료는 초기 절리간극과 절리 수직강성이다. 초기 절리간극은 Table 1에 주어진 현지 수리전도도 측정값을 식 (10)에 대입하여 구한다. 절리 수직강성의 경우에는 기존의 문헌을 참고하여 절리 수직강성 대 탄성 계수의 비 (K_v/E)를 0.4/cm로 하였다.^{10,13)} 수리전도도의 분포는 식 (1)에 의해 구한 채굴 전 수리전도도로 식 (11), (12)에 의해 계산한 채굴 후 수리전도도 값을 나누어 수평방향 수리전도도율(Horizontal hydraulic conductivity ratio, $\Delta K_x/K$)과 수직방향 수리전도도율(Vertical hydraulic conductivity ratio, $\Delta K_y/K$)로 표시하였다. 그림에서 S는 절리 간격을 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 채굴적의 폭이 120 m, 절리 간격이 1 m 인 경우의 수직방향 수리전도도율 및 수평방향

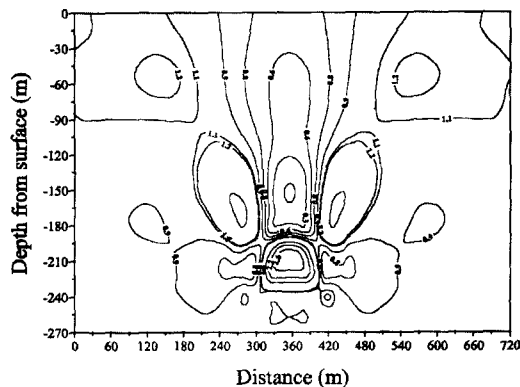


Fig. 7. Vertical hydraulic conductivity ratio($\Delta K_y / K$) (W = 120 m, S = 1 m).

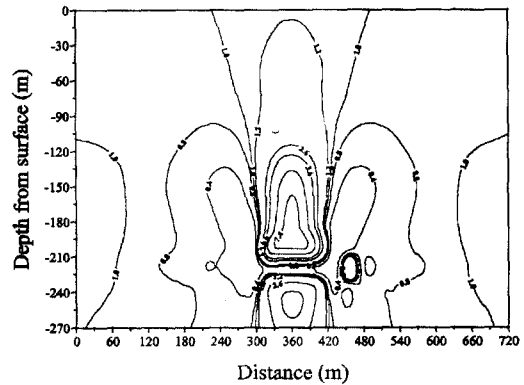


Fig. 8. Horizontal hydraulic conductivity ratio($\Delta K_x / K$) (W = 120 m, S = 1 m).

수리전도도율이 표시되어 있다. 그림을 보면 지표 부근에서는 수리전도도의 변화가 별로 없으며, 수리전도도가 가장 크게 변화하는 곳은 채굴적 주위인 것으로 나타났는데, 이는 지층의 변형이 채굴적 주위에서 가장 크다는 사실과 부합한다. 수직방향 수리전도도 분포를 보면 지표의 인장영역에서는 수리전도도가 증가하고 압축영역에서는 감소하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 수평방향 변형률 분포와 일치한다. 채굴적 부근에서 수평방향 수리전도도의 경우 수직방향 수리전도도보다 큰 것으로 나타났는데, 이는 침하가 수평방향 변형보다 수리전도도에 더 큰 영향을 미친다는 것을 뜻한다. 이러한 결과로부터 공동에 수평방향으로 존재하는 절리가 공동의 수리적 안정성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 절리 간격이 1 m로 동일하고 채굴적의 폭이 60 m, 180 m 인 경우의 수직방향 수리전

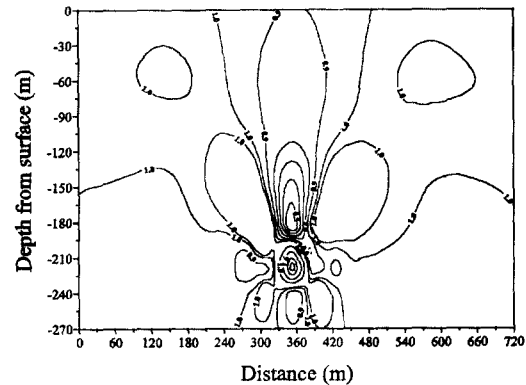


Fig. 9. Vertical hydraulic conductivity ratio($\Delta K_y / K$) (W = 60 m, S = 1 m).

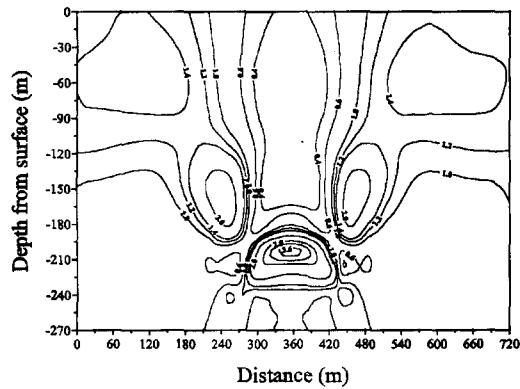


Fig. 10. Vertical hydraulic conductivity ratio($\Delta K_x / K$) ($W = 180 \text{ m}$, $S = 1 \text{ m}$).

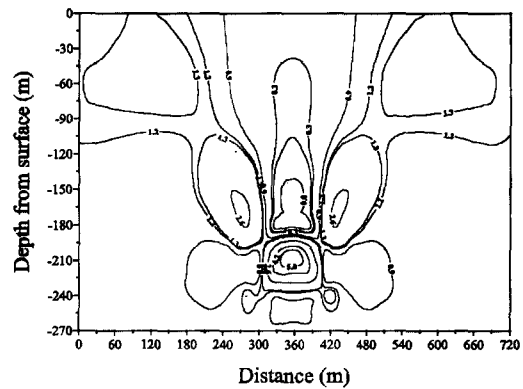


Fig. 11. Vertical hydraulic conductivity ratio($\Delta K_x / K$) ($W = 120 \text{ m}$, $S = 0.1 \text{ m}$).

도도 분포가 나와있다. Fig. 7과 비교해 보면 채굴적의 폭이 작은 경우에는 수리전도도의 변화가 채굴적 주위에 집중되는 반면에, 채굴적의 폭이 증가할수록 채굴적 부근 뿐만 아니라 지표에서도 수리전도도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 채굴적 폭이 증가할수록 채굴적 상부 지층의 파쇄 정도가 심해지고, 인장 파쇄 영역이 증가한다는 것을 나타낸다.

채굴적의 폭이 120 m로 동일하고 절리 간격이 0.1 m, 10 m 인 경우의 수직방향 수리전도도의 분포가 Fig. 11과 Fig. 12에 나와있다. 인장변형률이 발생하는 지역의 경우 식 (9)에서 보는 바와 같이 절리 간격이 좁을수록 수리전도도가 증가한다는 것을 예상할 수 있는데, Fig. 7과 비교해 보면 해석 결과도 같은 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 수리전도도의 가장 큰 변화는 채굴적 주위에서 발생하는 것으로 나타나, 절리 간격이 좁아질수록 채굴적 주변의 인장 파쇄 정도가 증가한다는 것을 예상할 수 있다. 지표와 가까운 채굴적 상부에서는 절리간격이 클수록 수리전도도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이러한 사실은 Fig. 6에서 보듯이 이 부분에 압축변형률이 발생하는 것과 관련이 있다. 인장변형률이 발생하는 경우에는 식 (9)에 따라 절리간격이 증가할수록 수리전도도는

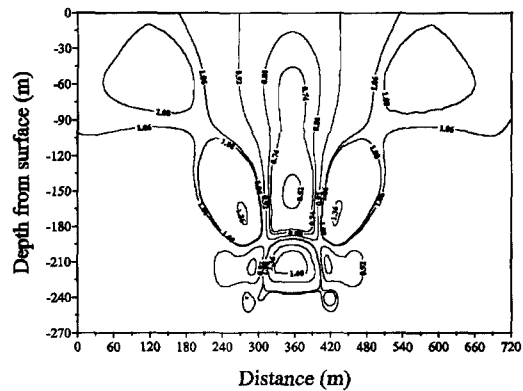


Fig. 12. Vertical hydraulic conductivity($\Delta K_x / K$) ($W = 120 \text{ m}$, $S = 10 \text{ m}$).

감소하지만, 압축변형률이 발생하는 경우에는 반대로 절리간격이 증가할수록 수리전도도도 증가하게 된다.

Table 2에는 채굴적 폭 및 절리 간격에 따른 최대 수리전도도율이 표시되어 있다. 도표를 보면 절리 간격의 감소에 따른 수리전도도의 증가율은 채굴적 폭이 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 수평방향 수리전도도의 증가율이 수직방향 수리전도도의 증가율보다 큰 것으로 조사되었다. 절리 간격이 일정한 경우 수리전도도의

Table 2. Variations of hydraulic conductivity ratio with panel width & joint spacing.

Panel width	Joint spacing					
	0.1 m		1.0 m		10.0 m	
	$\Delta K_x / K$	$\Delta K_y / K$	$\Delta K_x / K$	$\Delta K_y / K$	$\Delta K_x / K$	$\Delta K_y / K$
60 m	20.0	4.8	7.6	2.7	3.1	1.7
120 m	21.8	8.2	8.2	3.9	3.3	2.1
180 m	32.0	11.0	11.1	4.9	4.0	2.3

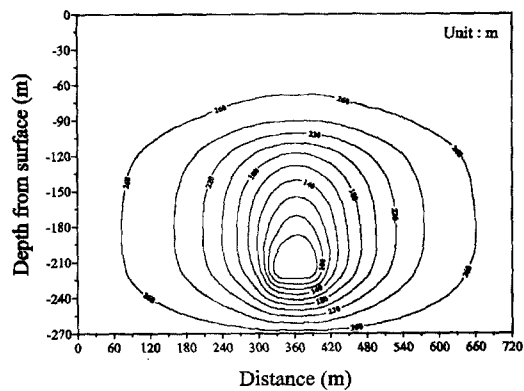


Fig. 13. Hydraulic head($W = 60$ m).

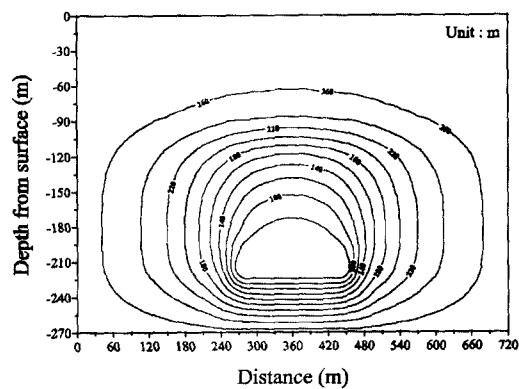


Fig. 14. Hydraulic head($W = 180$ m).

증가율은 절리 간격이 작아짐에 따라 증가하는 것으로 나타난다.

Fig. 13과 Fig. 14는 채굴적의 폭이 각기 60 m, 180 m 인 경우의 수리수두 변화양상을 나타낸다. 수두 계산시 수리전도도의 변화는 고려하지 않았다. 그림을 보면 등수두선이 채굴적을 중심으로 분포하는 것으로 나타나며, 이는 지하수의 유동이 채굴적을 향하고 있음을 보여준다. 채굴적 내로 유입되는 유량은 탄벽(Coal rib) 부근의 등수두선 분포가 가장 조밀한 관계로 탄벽 부근에서 가장 클 것으로 예상된다. 채굴적의 폭이 60 m 인 경우의 수두 분포가 180 m 인 경우보다 더욱 조밀한 것으로 나타났는데, 이는 채굴적 폭이 감소함에 따라 지층의 파쇄 정도가 감소된다 것을 뜻하는 것으로 생각된다.

5. 결 론

채굴적의 붕괴는 지반 내에 침하를 발생시키고, 수리

전도도의 변화를 유발시킨다. 본 연구에서는 채굴적의 크기에 따른 침하 양상을 해석하였으며, 채굴적의 크기 및 절리 간격이 수리전도도 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 지하수가 절리를 통해서만 유동하고, 절리간의 연결이 암반 전체에 걸쳐 충분히 분포한다는 가정 하에 현지 암반을 등가 다공질 매질로 가정하였으며, 단일 절리에서의 유동은 평행판 이론을 따르는 것으로 하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 채굴적의 폭이 증가함에 따라 지표침하의 최대량은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 채굴적의 크기에 관계없이 침하 형태는 임계이하 조건을 나타내었다.
- (2) 암반의 변형은 수리전도도의 변화에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 굴착 후 최대 변형률이 발생하는 채굴적 부근에서 수리전도도의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.
- (3) 채굴적의 폭이 증가할수록 수리전도도의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 채굴적의 폭이 작은 경우에는 수리전도도의 변화가 채굴적 주위에 집중되는 반면에, 채굴적의 폭이 커지면 채굴적 부근 뿐만 아니라 지표 부근에서도 수리전도도가 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 절리 간격이 작아질수록 수리전도도의 크기는 증가하는 것으로 나타나, 절리 간격이 수리전도도의 변화에 영향을 미치는 주요 인자중의 하나라는 것을 알 수 있다.

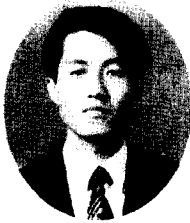
감사의 글

본 연구는 1997년도 하반기 해외 Post-Doc. 지원사업에 의해 연구된 것입니다. 연구비를 지원해 준 한국과학기술재단에 감사를 드립니다. 또한, 해외 체류를 허락해 준 학교 당국에도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 권광수, 박연준, 신희순, 신중호, 1994, 지하공동에 의한 지표침하지역의 지반 안정성 평가, 터널과 지하공간 (한국암반역학회지) 4(2), 170-185.
2. 김보현, 양형식, 장명환, 1998, 폐광산 상부의 지표침하 파라미터 해석 연구, 한국자원공학회지, 35(6), 576-581.
3. Ouyang, Z. and D. Elsworth, 1993, Evaluation of groundwater flow into mined panels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30(2), 71-79.
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), 209-234.

5. Liu, J., D. Elsworth and R.J. Matetic, 1997, Evaluation of the post-mining groundwater regime following longwall mining, *Hydrol. Process.* 11, 1945-1961.
6. Liu, J. and D. Elsworth, 1997, Three-dimensional effects of hydraulic conductivity enhancement and desaturation around mined panels, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34(8), 1139-1152.
7. Matetic, R.J., J. Liu and D. Elsworth, 1995, Modeling the effects of longwall mining on the ground water system, RI 9561, USBM, 14p.
8. Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resour. Res.* 5(6), 1273-1289.
9. Elsworth, D., 1989, Thermal permeability enhancement of blocky rocks: One-dimensional flows, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 26.3/4, 329-339.
10. Bai, M., 1991, Numerical models of fluid flow and solid deformation in fluid saturated media, Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University, 184p.
11. 지정배, 김종우, 2000, 원형공동의 점진적인 붕락에 따른 지표침하특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 10(1), 33-44.
12. Obert, L. and Duvall W.I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, 650p.
13. 김영근, 1993, 절리특성이 인공절리를 포함한 불연속 암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문, 261p.



윤용균

- 1985년 서울대학교 공과대학 자원공
학과 공학사
- 1987년 서울대학교 대학원 자원공학
과 공학석사
- 1992년 서울대학교 대학원 자원공학
과 공학박사

Tel : 043-649-1318

E-mail : yyk63@chollian.net

현재 세명대학교 자원환경공학과 조교수