

대규모 노천 석탄광산의 사면 안정화를 위한 지하수 유동 체계 분석

류동우¹⁾, 김형목^{1)*}, 오준호¹⁾, 선우춘¹⁾, 정용복¹⁾

Field Tests and Analysis of Groundwater System for Stabilization of Slope in Large Open-Pit Coal Mine

D.W. Ryu, H.M. Kim, J.H. Oh, C. Sunwoo, Y.B. Jung

Abstract With regard to oversea mineral resources development, recent trend has been changed from a simple capital investment to a direct development of the resources. In relation to the stability of a slope in large open-pit coal mine, groundwater system was investigated and the validity of horizontal drainage hole was evaluated in Pasir coal mine, Indonesia. In this work, various field tests were carried out for a characterization of groundwater system, which included in-situ permeability measurement, tracer test and monitoring of groundwater levels. Especially, the influence of SM river on the characteristics of the groundwater flow system was mainly inspected. For the permeability measurement, Guelph permeameter was employed, and was found that sandstone was more permeable than mudstone and coal seam. From a comparison of lithological structure and the results of groundwater level monitoring, sandstone and thin coal seam with fractures were found to be a main channel for groundwater flow. In the results of tracer tests, the effect of SM river on the groundwater system depends on the geological structure of its base. To identify the effect of horizontal drainage holes, 2-D groundwater modeling was performed. Four different cases were tested, which are different from the length of drainage hole and the existence of pond on top of the slope. To enhance the drainage effect and slope stability, the drainage hole should be drilled to the depth of coal seam layer, which provides a main pathway of groundwater flow and embedded by sandstone. For this purpose, correct identification of surrounding geology should be preceded.

Key words Open-pit mine, Tracer test, Guelph permeameter, 2-D groundwater modeling

초 록 직접 개발 형식의 해외자원개발과 관련하여 단순 자본 투자에서 직접 개발로 변화하고 있다. 대규모 노천 석탄광산에서의 사면 안정성과 관련하여 지하수 유동 체계 분석과 사면 보강공으로서의 수평 배수공 타당성을 인도네시아 Pasir 탄광을 대상으로 검토하였다. 본 연구에서는 지하수 체계를 특징짓기 위해 지하수 수위 분석, 현장 투수 시험, 추적자 실험 등 다양한 현장 실험 및 계측을 수행하였다. 특히, 중부 지역의 상부에 위치한 SM강과의 연계성을 분석에 중점을 두었다. Guelph 투수계수를 활용하여 투수계수를 측정하였으며, 사암이 이암이나 탄층보다 투수성이 매우 높은 것으로 나타났다. 지하수 수위 분석 결과 사암층과 협재되어 많은 균열을 포함한 얇은 탄층이 주된 지하수 유동 경로 역할을 하는 것으로 나타났다. 추적자 시험 결과 SM강이 인근 지하수계에 미치는 영향은 강 바닥의 지층구조에 따라 다른 것으로 파악되었다. 수평 배수공의 효과를 파악하기 위한 2차원 지하수 유동 해석 결과는 폭이 좁은 탄층이 협재되어 있는 지층과 사암층이 주된 지하수 유동 경로이며, 충분한 심도로 수평 배수공 시공시 사면 안정화에 효과가 있는 것으로 파악되었다. 따라서 수평 배수공의 시공 위치와 시공 심도의 결정을 위해서는 지층 구조의 파악이 선행되어야 한다.

핵심어 노천광산, 추적자 실험, Guelph 투수계, 2차원 지하수 유동 해석

1. 서론

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부

* 교신저자 : kimh@kigam.re.kr

접수일 : 2009년 6월 12일

심사 완료일 : 2009년 6월 22일

게재 확정일 : 2009년 6월 23일

해외 자원 개발 방식이 단순 투자에서 직접 개발로 전환되고 있으며, 이에 국내에서는 석회석 광산을 제외하고는 그 사례가 드문 대규모 노천채광(open pit mining)

방식에 대한 다양한 공학적 문제와 그 해법에 대한 체계적 연구가 요구되고 있다.

인도네시아 깔리만탄섬에 위치하며, 16년간 가행되면서 채광규모의 확대 및 심부화에 따라 높이 150m 이상의 대규모 사면이 형성되어 있는 파시르탄광은 다양한 공학적 사례를 살펴볼 수 있는 기회를 제공해 준다. 대규모 노천채광과 관련하여 광산 안정성 확보 및 경제성 제고를 위해 파시르탄광을 대상으로 한 사면설계, 운송로 설계, 집수지 제어, 채광 발파 등 광산 공학적 문제 해결 위한 다양한 연구 결과들이 보고된 바 있다(정소걸 외 2000; KIGAM, 2003; 최병희 외 2008; Sunwoo et al., 2008; 정용복 외, 2008).

노천광산에서의 사면 설계는 경제성을 고려한 구매 결정과 함께 안정화를 위한 적절한 보강공의 선택과 적용을 포함한다. 파시르탄광의 사면 안정화를 위한 지하수 조절공에 대한 기초 연구로서 수리 특성 실험 및 분

석 그리고 사면 배수공의 효과 예측을 위한 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 현장에서 수행한 각종 수리 실험 및 분석 결과 그리고 사면에서의 지하수 유동 해석 및 결과에 대해 논의하고자 한다.

2. 현장 지질 및 사면 현황

파시르탄광은 크게 북부, 중부 및 남부 구역으로 구분되며 남부는 Fig. 1과 같이 A, B, C(1~4), D(1~2), E(1~2) 그리고 F구역으로 구분된다. 암종의 구성은 대략적으로 이암이 80%, 사암이 15% 그리고 석탄이 5%정도로 구성되어 있다(KIGAM, 2003). 각 암종들의 강도는 50 MPa이하로 매우 낮다. 탄층은 향사구조의 한 날개부에 속하며, 탄층의 경사는 75°에서 수직까지 지역으로 변하고 있으며, 15개의 다른 탄층이 서로 평행하게 부존하며 탄폭은 1m에서 25m까지 다양하다.

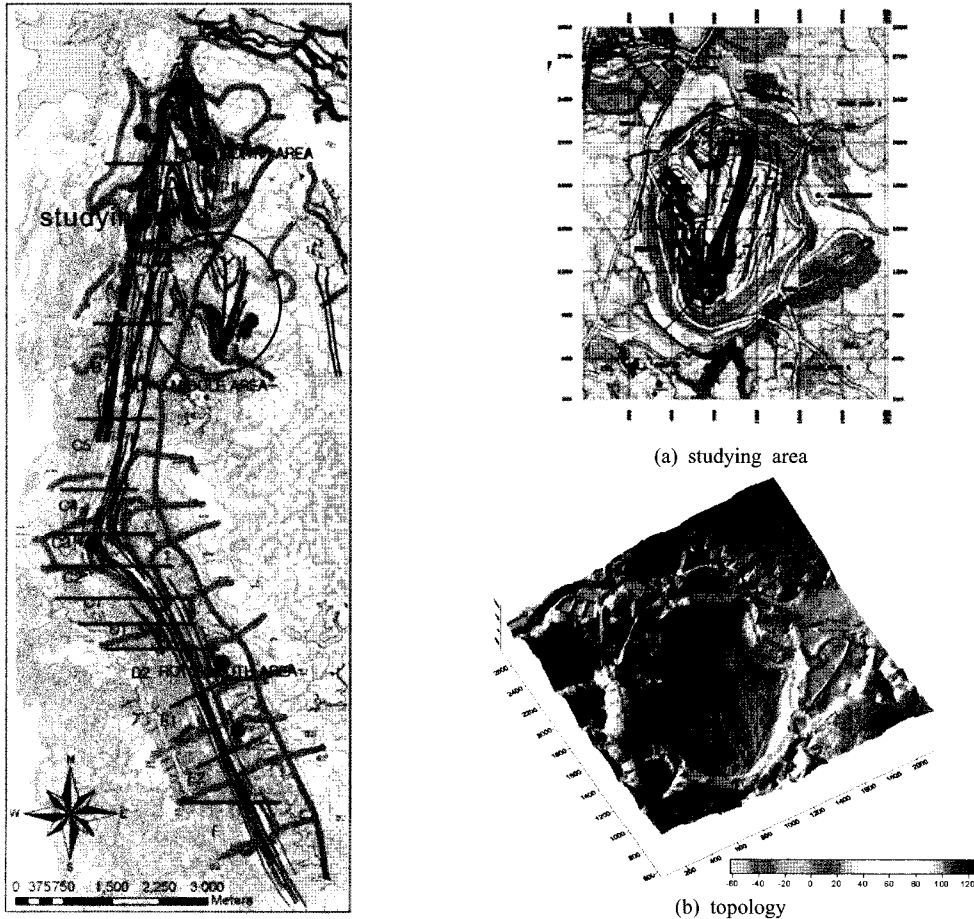


Fig. 1. Studying area and its topology.

현재 사면은 8m 높이의 소단과 6m의 berm, 그리고 운반로의 경우 35m폭으로 구성되어 있으며, 전체 사면 구배는 27°로 운영되고 있다.

파시르탄광에 형성된 사면의 경우 구성암석이 연약하며 지역 특성상 주기적인 강우와 사면 상부에 형성된 많은 집수지, 주기적인 발파 등 사면 안정성에 불리한 여건들이 다수 존재하며, 특히 지하수 문제는 사면 안정성에 직간접적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 현장 투수시험

3.1. Guelph 투수계를 이용한 현장투수시험법

Guelph 투수계는 Fig. 2와 같이 Mariotte 사이폰 원리를 적용하여, 원통 우물구멍에서 불포화 토양으로 충전되는 물의 정상류유를 측정하는 정수위 투수계이며, 투수계수 측정범위는 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ 이며, 원통우물의 직경은 6.0cm이다 (Soil Moisture Corp., 1991).

Reynolds 등(1987)은 우물의 정상류 흐름 해석을 위한 Richards 방정식을 식(1)과 같이 풀이하였다. 식 (1)의 우변의 2개 항은 우물에서 흘러나오는 현장포화성분으로 고려할 수 있고, 세 번째 항은 흐름의 불포화 혹은 모세관성분으로 고려할 수 있다.

$$Q_s = \frac{2\pi H^2}{C} K_{sat} + \pi r^2 K_{sat} + \frac{2\pi H}{C} \psi_m \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 우물의 밖으로 흐르는 정상류량(m^3/s), H 는 우물 안의 일정수두(m), r 는 우물 반지름(m), K_{sat} 는 현장포화투수계수(m/s), ψ_m 는 토양수분흐름흡입력(m^2/s), 그리고 C 는 우물의 반경과 수두높이, 즉 H/r 에 지배받는 무차원 형상계수이다.

우물의 반경을 3.0cm, 우물의 일정수두 높이를 5cm, 10cm를 유지하여 측정하게 되면 아래 표준식 (2)식으로 포화 수리전도도를 산정할 수 있다(Soil Moisture Corp., 1991; 정재훈 외 2008).

$$k_{sat} = 0.0041(X \text{ or } Y)R_2 - 0.0054(X \text{ or } Y)R_1 \quad (2)$$

여기서, X 는 외측 집수통의 단면적(35.22cm^2), Y 는 내측 집수통의 단면적(2.16cm^2), R_1 은 5cm 일정수두의 정상침투율(cm/s), R_2 는 10cm 일정수두의 정상침투율(cm/s)이다.

현장 토양의 투수성이 매우 좋거나 나쁠 경우 우물의 일정수두를 각각 낮추거나 높게 된다. 이러한 경우에는 Guelph 투수계의 C-factor(우물형상계수)를 적용하

여 다음 식들을 이용하여 산정한다(Soil Moisture Corp., 1991; 정재훈 외, 2008).

$$k_{sat} = C_2 Q_2 - C_1 Q_1 \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{H_1 C_1}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (4)$$

$$C_1 = C_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]} \quad (5)$$

$$Q_1 = XR_1 \text{ or } YR_1 \quad (6)$$

$$Q_2 = XR_2 \text{ or } YR_2 \quad (7)$$

여기서, H_1 , H_2 는 우물의 일정수두 높이, r 은 우물의 반지름(3.0cm), C_1 과 C_2 는 우물의 일정수두에 대한 장비 고유의 C-factor(우물형상계수)로서 우물의 일정수두 높이를 얼마로 하느냐에 따라 결정되는 상수값이다.

Guelph 투수계의 현장투수 시험은 Fig. 3(a)-(d)와 같이 측정 지점의 지반 아래에 깊이 20cm-60cm의 오거홀을 만들어 현장 포화투수계수(K_{sat})를 측정하였다. 본 현장 실험에서는 일반적인 방식으로 정수두를 5cm와 10cm로 각 설정하여 유량변화량을 일정 시간간격별로 기록한다.

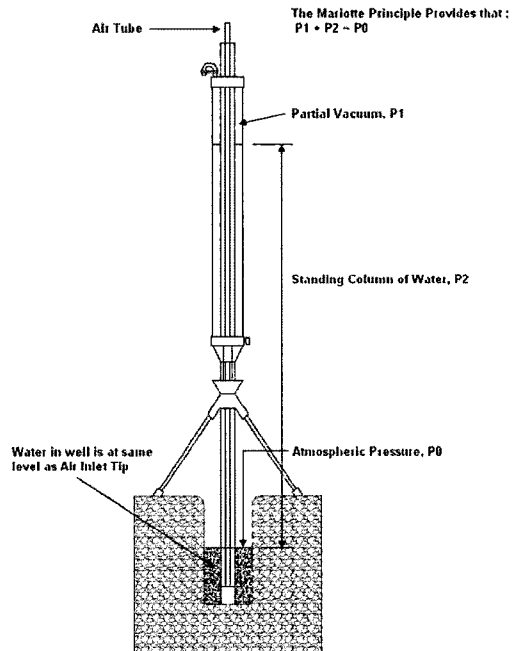


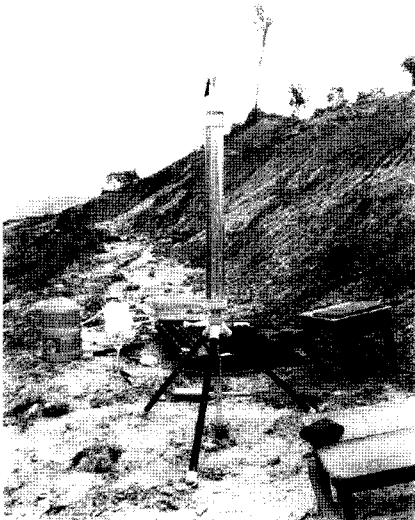
Fig. 2. An illustration of the Guelph permeameter used in this study (정재훈 외 2008)



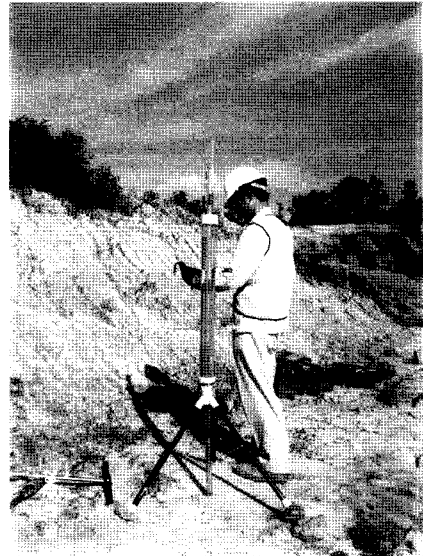
(a) augering



(b) placement and water-filling of permeameter



(c) set-up of permeameter



(d) making a reading

Fig. 3. Procedure of field hydraulic conductivity test by Guelph permeameter.

3.2. 현장투수실험 결과 분석

Guelph 투수계를 이용한 현장 투수시험의 결과는 Table 1과 같다. Guelph 투수계의 측정범위가 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 임을 감안할 때, 다수의 이암층의 경우 신뢰성을 가지는 범위를 벗어나는 낮은 투수계수 값을 가지는 것으로 파악되었으며, 층적층의 경우도 일부에서 낮은 투수성을 보였다. 또한, 석탄층의 경우 비교적 미고결층의 사암이나 이암층과는 달리 오거링시 탄층에 균열을 양산하여 정상류 발생이 힘들고, 이로 인해 본 적용 방식의 투수시험으로는 석탄층의 투수계수 측정이 불가능하였다. 따라서 이암층과 석탄층의 투수계수의 추정치로는 실내실험을 통해 얻은 값과 문헌상의 값을 활용 방안을 고려해야 할 것이다.

주된 측정 대상은 사암층으로, 주로 10^{-4} cm/sec 대의 값으로 이는 입자가 고른 미립질 모래(uniform fine sand or fine sand)와 유사한 투수성을 보인 것으로 나타났다. 일부 10^{-5} cm/sec 의 값을 보이는 층은 이암층과의 경계부에 위치하며 오거링후 관찰된 입자들은 실트질이 섞여있는 층인 것으로 확인되었다. 이는 보편적으로 관찰할 수 있는 사암층보다 낮은 투수성을 가지는 층으로 실트질 사암층으로 구분해야 할 것이다.

현장투수실험의 결과로부터 지하수 유동이 주로 발생하는 층은 사암층일 것으로 추정할 수 있다. 한편 암층 경계부, 특히 석탄층과 이암층, 혹은 석탄층과 사암층의 경계에서 관찰되는 지하수 용출은 이들 경계부가 중요한 지하수 유동 채널의 역할을 하고 있음을 확인시켜준다.

Table 1. Results of the field hydraulic conductivity tests.

| | Alluvium | Sandstone | | | | | Mudstone |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Saturated hydraulic conductivity (cm/sec) | 2.4×10^{-5} | 3.0×10^{-5} | 3.0×10^{-4} | 1.7×10^{-4} | 6.9×10^{-4} | 1.1×10^{-4} | 5.1×10^{-6} |

4. 지하수위 모니터링

지하수위 변화를 측정하기 위해 중부지역 상부 운송로 주변에 다수의 지하수 관정을 시추하였다(Table 2와 Fig. 4). 검층을 통해 얻은 층서 구조는 이암, 사암이 교호하며 탄층이 부분적으로 협재하여 나타나고 있다. 이들 다수의 지하수 관정으로부터 일일 수위 계측을 통해 지하수위 변화를 관찰하였다. 초기에는 시추 이후의 영향을 받아 수일 후 지하수위가 안정화를 보이며 이를

최종 지하수위로 간주하였다. 대체로 지하수위는 지표의 높이에 따라 다르지만, 지표로부터 10m 혹은 30~40m까지 낮게 형성되어 있었다. 관정이 주로 위치하는 곳은 SM강 남쪽 인접지역임에도 불구하고 GWM7과 8를 제외한 나머지 관정은 SM강의 수위인 61~62m보다 상당히 낮은 지하수위를 보이는 공들이 존재하며, 이 구간에서는 SM강이 손실하천으로서의 역할을 하는 것으로 판단되나 지하수위와 강바닥의 표고와의 큰 차이는 강으로부터의 낮은 함양률을 의미하는 것으로 해석

Table 2. Specification of observation wells.

| Hole Name | Date | Time | Location (Actual) | | | Hole Depth(m) | Hole Size | PVC Height(m) |
|-----------|-----------|-------|-------------------|---------|------|---------------|-----------|---------------|
| | | | N | E | Z | | | |
| GWM01 | '08/08/18 | 0:00 | 1,478.9 | 2,024.2 | 75.4 | 68.2 | NQ | 0.6 |
| GWM02 | '08/08/20 | 17:00 | 1,491.4 | 2,066.1 | 78.4 | 70.2 | NQ | 0.6 |
| GWM03 | '08/08/23 | 21:00 | 1,444.4 | 1,743.0 | 50.3 | 70.2 | NQ | 0.6 |
| GWM04 | '08/08/27 | 3:00 | 1,537.5 | 1,773.6 | 58.9 | 70.2 | NQ | 0.3 |
| GWM05 | '08/09/08 | 3:00 | 1,362.7 | 2,095.4 | 80.3 | 70.2 | NQ | 0.3 |
| GWM06 | '08/09/10 | 10:30 | 1,385.8 | 2,137.3 | 81.1 | 70.2 | NQ | 0.3 |
| GWM07 | '08/09/11 | 19:30 | 1,281.7 | 2,157.5 | 80.2 | 72.0 | NQ | 0.3 |
| GWM08 | '08/09/12 | 22:00 | 1,291.5 | 2,204.1 | 80.0 | 70.0 | NQ | 0.3 |
| GWM09 | '08/09/23 | 21:30 | 1,150.2 | 2,206.1 | 75.5 | 63.0 | NQ | 0.3 |
| GWM10 | '08/09/20 | 2:40 | 1,152.0 | 2,243.1 | 74.2 | 70.0 | NQ | 0.3 |

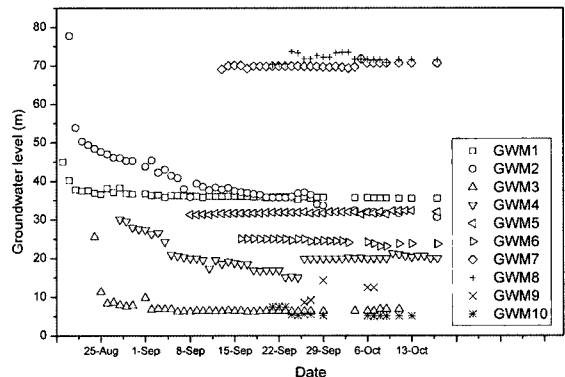
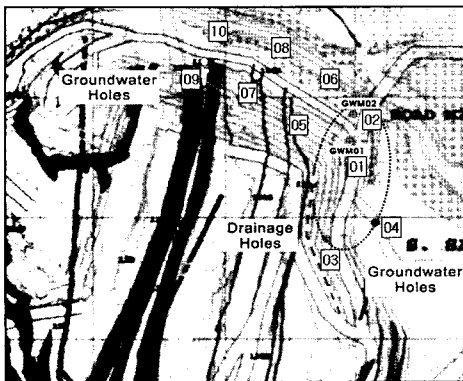


Fig. 4. Variations of groundwater level in each observation well.

할 수 있다.

일반적으로 사면이 형성되어 있는 방향으로 지하수 수위 구배가 형성되어야 하나 GWM9과 GWM10의 경우는 그 반대 현상이 관찰되었으며 지하수위 또한 상당히 낮게 형성되어 있다(Fig. 4). 이는 하부에 위치하는 주 탄층(coal seam)과 관련이 있는 것으로 탄층 자체는 낮은 투수계수를 보이기 때문인 것으로 여겨진다. GWM7과 GWM8은 인접 관정에 비해 상당히 높은 지하수 수위를 보여준다. 이는 하부에 존재하는 두꺼운 사암층이 많은 지하수를 함양하고 있으며 좁은 폭을 가진 탄층과 교호하면서 형성된 경계부와 균열들이 지하수 함양의 주된 경로일 가능성이 높기 때문이다.

따라서, SM강은 강바닥을 형성하는 지층에 따라 손실 하천 혹은 이득하천의 성격을 가질 수 있으며, 또한, 이암층이나 주 탄층이 존재할 경우 비교적 낮은 conductance로 인하여 연계성이 낮은 것으로 판단할 수 있다. 반면, 사암층 및 폭이 좁은 탄층이 협대되어 있는 경우 비교적 높은 투수성으로 인해 연계성이 높기 때문에 하부 존재하는 층서구조의 파악이 가장 중요한 인자일 가능성이 높은 것으로 판단된다.

5. 형광 추적자 실험

5.1. 형광 추적자 실험

추적자 시험의 목적은 지하 매질의 관심 있는 두 지점 사이의 연결성을 확인하거나 대수층에서 용질의 이동특성을 반영하는 물리·화학·생물학적 매개변수를 추정하고자 하는 것이다.

지하수내 추적자의 이동은 이송(advection)과 분산(dispersion)에 의해 일어난다. 이송에 의한 추적자의 이동은 지하수내 오염물질 이동에 가장 큰 부분을 차지하는 현상으로서 매질의 수리전도도, 유효공극률, 수두구배에 의해 지배된다. 분산은 지하수 흐름 속도와 분산지수(dispersivity)에 의해 결정되어지는 기계적 확산과 오염물질의 농도구배에 의해 이동하는 분자확산이 있다. 그러나 분자확산은 기계적 확산과 비교하였을 때 상대적으로 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 추적자 시험은 2개 이상의 관정을 사용하는 다공 추적자 시험(multi well tracer tests)과 오직 1개의 관정을 사용하는 단공 추적자 시험(single well tracer tests)으로 구분된다.

추적자는 일반적으로 크게 반응성 추적자와 비반응성 추적자로 나뉜다. 반응성 추적자의 경우, 지하 매질의 화학적·생물학적 반응상태를 측정하기 위한 것으로 NH_4^+ , Mg^{++} , 포도당, 젖산 등이 있다. 비반응성 추적자의 경우, 지하 매질의 수리 물리학적 특성을 특정하기 위해

사용되는 추적자로서 대표적인 물질로는 H_3^+ , Cl^- , Br^- , I^- , 및 NO_3^{2-} 등의 무색 추적자가 있으며, 저렴하고 사용하기에 단순하면서 효과적인 염료(dye) 추적자가 있다. 이러한 추적자들은 이류에 의해 지하수의 공극 유속과 비슷한 상태로 움직이거나 미시적 규모에서 비 반응용질은 매체의 불규칙성과 공극크기의 차이에 의해 발생하는 역학적인 분산과 농도구배 및 지하수의 이류현상이 동시에 발생하는, 즉 이류와 수리분산이 지배되는 조건 하에서 움직이게 된다. 본 시험에서는 염료 추적자인 플루어레시언(Fluorescein) 형광 추적자를 이용하였다.

플루어레시언의 경우, 녹색 형광물질로 광분해는 비교적 큰 편이나, 지하수 추적자 시험에는 거의 문제가 되지 않는다. 염료 중 생물학적으로 안전한 물질로 알려져 있으며, 배경농도에 대한 조사가 충분히 이루어져야 한다는 것이 특징이다. 플루어레시언 용액은 희석해도 눈으로 볼 수 있을 정도의 선명한 녹색 형광을 띠고 있어 플루어레시언이라고 명명했다. 플루어레시언의 나트륨 염인 우라닌(uranine)은 물을 추적하거나 표시할 때 쓰인다.

5.2. 추적자 실험 결과 분석

관심 대상 지역인 중부지역에서 상부에 위치한 소규모 하천(SM강)과 사면과이 연계성을 확인하기 위해 단공 추적자 시험을 수행하였다. 지하수 흐름이 사면쪽 방향, 즉 남측방향으로 형성되고 있는지를 확인하기 위한 목적으로 주입공으로부터 동쪽 방향에 인접한 GWM01, GWM02 시추공과 남측 사면 하단부에 설치한 수평 배수공 DHM02과 DHM03에서 취수하였다(Fig. 5). 현장 실험은 수조 내에 우라닌 500g와 2000리터를 희석하여 250ppm 농도의 주입용액을 이용하였다. 보다 정밀한 추적자 실험을 통해 오염원의 분석과 이동 모델링을 목적을 할 경우에는 주입공의 체원(공경, 심도, 지하수위) 등을 기록하고, 주입공 하부, 중간부, 상부로 구분하여 호스를 통해 일정한 유량으로 주입해야 한다. 나공상태로 공이 유지하기 어려운 상황이었으며, 낮은 투수성으로 인하여 일정 유량으로 주입이 곤란하였으나, SM강이 지하수 함양 혹은 사면방향으로 지하수 흐름을 유발하는지를 확인하는데 1차적인 목적이 있었기 때문에 농도의 정량적 변화에 대한 검토는 필요하지 않았다.

본 시험에서 시료의 농도 분석에 사용된 장비는 Turner Designs사의 형광광도계(모델명: 10-AU-005-CE Field Fluorometer)이며, Fluorescein(우라닌)의 분석에 0.01 $\mu\text{g/L}$ 검출능을 가지고 있다(Fig. 6). 이 광도계는 휴대가 간편하며 현장에서 직접 형광추적자의 농도를 측정할 수 있다. 외부에서 단파장 혹은 고 에너지의 빛이 주

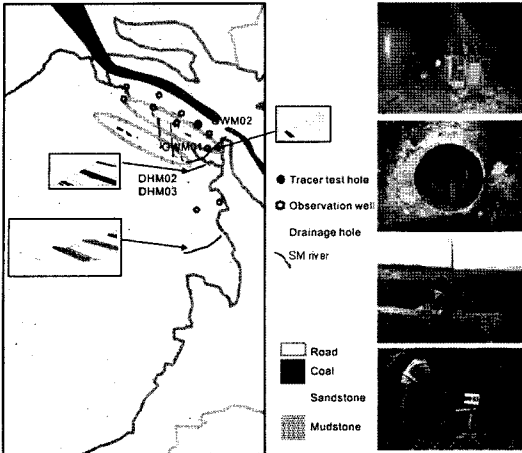


Fig. 5. Field tracer tests and sampling.

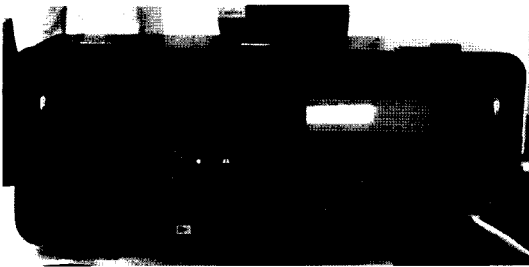


Fig. 6. 10-AU-005-CE Field Fluorometer

사되면 Fluorescein과 같은 형광물질은 여기(excitation) 되어 발색을 하며 저에너지 혹은 장파장의 방사선을 방출하게 된다. 각각의 형광물질은 특정 여기 및 방출 스펙트럼을 가지므로 적절한 필터를 이용하여 여기 및 방출파장을 조절함으로써 플루오레시언 뿐만 아니라 엽록소(chlorophyll), 원유(crude oil) 및 로다민 WT 등을 검출할 수 있다. Fluorescein의 농도는 형광강도와 직접적으로 비례관계에 있다. 본 형광 광도계를 이용하여 지하수 및 지표수 시료의 추적자 농도를 측정하는 방식에는 내장된 펌프가 작동하여 연속적으로 시료가 주입되는 방식과 독립적인 curvette holder(13×100mm 및 25×100mm)를 이용하는 방식이 있다. 전자의 경우는 내장 펌프가 작동하므로 이로 인한 거품이나 일부 탁도 증가현상이 수반되어 방출 스펙트럼의 교란이 유발되며, 초기에 공급 호스 내 시료가 완전히 채워진 상태에서 주입되지 않을 경우 누수 등으로 인하여 분석 물시료의 양이 증가할 수 있다. 그러나 연속적으로 시료를 분석할 수 있는 장점이 있다. 반면 holder를 이용할 경우 물시료를 형광광도계 내에 그대로 적재함으로써 적은 양의 시료만으로도 측정이 가능하며 추가적인 탁도의 증

가를 회피할 수 있는 장점이 있다. 이 경우 분석시간도 절약되는 것으로 보고되었다(<http://www.turnerdesigns.com>). 13mm holder는 고농도, 25mm holder는 저농도의 측정에 이용하도록 추천되었다. 본 시험에서는 채취한 시료를 holder를 이용하여 분석하였다.

파시르탄광의 중부지역에서 수행한 추적자 실험의 샘플들을 대상으로 한 분석결과는 Fig. 7과 같다. 분석결과는 인접한 위치에 있는 지하수 관정 GWM01과 GWM02는 일정한 시차를 두고 플루오레시언이 검출된 반면, 동측 사면의 수평 배수공에서 취수된 샘플에서는 검출되지 않았다. 형광추적자를 주입한 주입공에서 가까운 GWM02에서 먼저 검출되었으며, GWM01에서 시차를 두고 검출되었다. 추적자는 비교적 느린 속도로 이동되어 각 관정에서 검출되었으며 농도는 최고치 도달 후 희석되고 흡착되어 점차 낮아짐을 확인할 수 있었다. 수평 배수공에서의 추적자 미검출과 관련하여 전체적인 지하수 유동 방향이 서쪽에서 동쪽 방향으로 일어나고 있거나 하부 이암층으로 인하여 수평 배수공이 있는 층과 연계성이 떨어지는 두 가지 가능성을 검토할 수 있다. 따라서 형광 추적자 실험의 목적이었던 SM강과 중부지역의 북측 사면과의 연계성과 관련하여, SM강은 사면에서의 용출수와 연관성이 낮은 것으로 판단된다.

6. 2-D 지하수 유동해석

본 연구에서는 사면 상단에 위치하고 있는 집수지가 사면 주변의 지하수 유동에 미치는 영향과 최종 범면 형성시 사면 안정대책의 일환으로 고려중인 배수공의 효과에 대한 평가를 위해 2차원 지하수 유동해석을 수행하였다. 특히 수평 배수공이 위치하는 동측사면은 층서구조의 주향과 유사한 방향으로 형성되어 있기 때문에 2차원 해석이 유효한 것으로 판단하였다.

6.1. 지하수 유동 해석 개요

연속체 해석에 사용된 프로그램은 미국의 GEOSLOPE사가 개발한 GEOSTUDIO 2004의 모듈 중 침투류 해석을 위한 SEEP/W로서 유한요소법을 이용한 2차원 상용프로그램이다. SEEP/W는 해석과정에서 물의 흐름이 포화도와 불포화도를 통과할 때 모두 Darcy의 법칙을 따른다고 가정한다. Darcy의 법칙은 본래 포화상태의 매질에서 유도되었으나 이후의 학자들에 의해 불포화상태의 매질에서도 적용될 수 있음이 보고되었다. 불포화상태 하에서의 매질의 수리전도도는 포화상태에서와 달리 함수량에 의해 변화하며, 간접적으로는 간극수압의 함수가 된다.

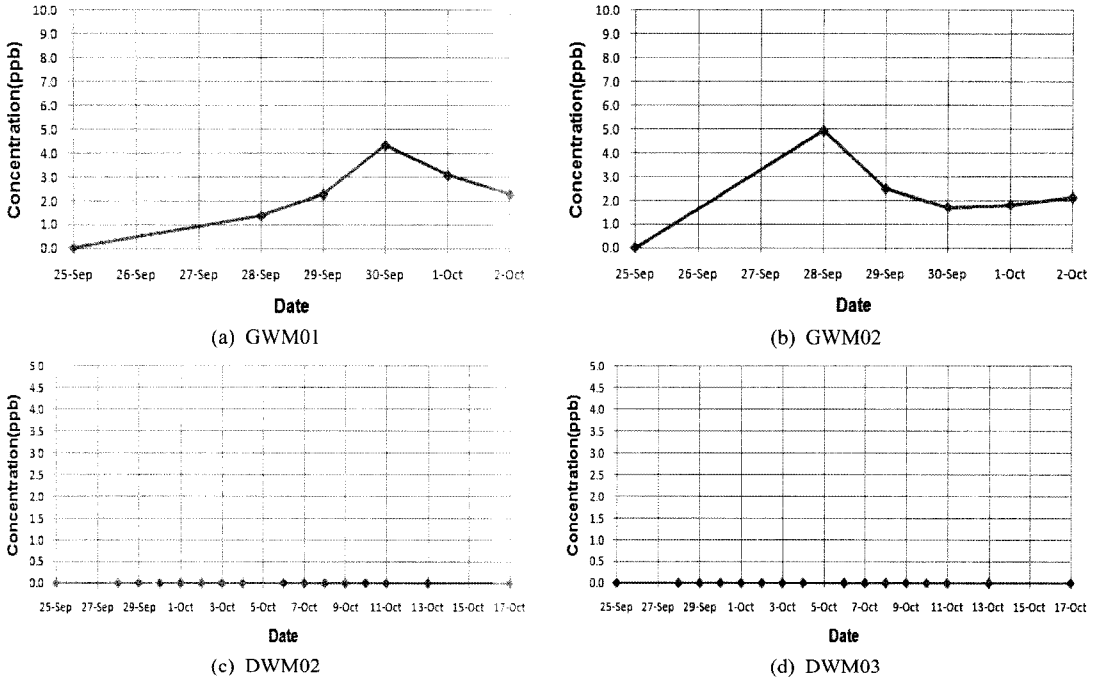


Fig. 7. Variations of tracer concentration.

2차원 평면상에서 유체의 이동 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

여기서, H =전수두(total head), K_x = x 방향 수리전도도, K_y = y 방향 수리전도도, Q =경계로부터의 유입량, θ =체적함수율 그리고 t =시간이다.

위 방정식은 임의의 시간에 임의의 단위요소로의 유입량과 유출량의 차이는 체적 함수율의 변화와 같다는 것을 의미한다. 즉, x 방향으로의 유량의 변화율과 y 방향으로의 유량의 변화율, 경계에서 단위체적내로 유입되는 유량의 합은 시간 체적 함수율의 시간에 따른 변화율과 같은 값이 된다.

정상류해석의 경우에는 유입량과 유출량이 시간에 관계없이 같은 값을 가지게 되므로, 위 식에서의 우변은 0이 되며, 다음과 같이 간략한 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = 0 \quad (9)$$

체적 함수율의 변화는 응력상태의 변화와 매질의 물성에 크게 의존한다. 매질의 포화여부에 관계없이 응력

조건은 두 가지의 변수에 의해 정의된다. 이는 각각 $(\sigma - u_a)$ 와 $(u_a - u_w)$ 이다. 여기에서 σ 는 전응력, u_a 는 간극기압(pore-air pressure)과 간극수압(pore-water pressure)이다.

SEEP/W는 일정한 전응력 조건 하에서 수치해석을 실행하기 때문에 매질에 가해지는 하중의 변화는 고려하지 않는다. 그리고 부정류 해석 수행시 간극기압은 대기압과 같은 것으로 가정하므로 $(\sigma - u_a)$ 는 체적 함수율에 영향을 미치지 않는다. 따라서 체적함수율의 변화는 $(u_a - u_w)$ 의 응력상태에만 의존하게 되며 u_a 가 대기압이므로 함수율은 간극수압에만 의존하게 된다. 간극수압에 따른 함수율의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (10)$$

여기서 m_w = 체적함수율 함수의 기울기(the slope of the storage curve)이다.

전수두 H 는 다음과 같이 정의된다.

$$H = \frac{U_w}{\gamma_w} + y \quad (11)$$

여기서, u_w = 간극수압(pore-water pressure), γ_w = 물의

단위중량(unit weight of water), y =위치수두(elevation head)이다.

상기 두 식을 결합하면,

$$\partial\theta = m_w \gamma_w \partial(H-y) \quad (12)$$

그리고 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial(H-y)}{\partial t} \quad (13)$$

위치수두는 항상 일정하므로 시간에 대한 y 항은 없 어지고 다음의 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (14)$$

6.2. 개념 모델 설정

집수지가 사면 상부에 인접하여 위치하고 있는 경우 와 아닌 경우, 배수공이 주된 유동경로인 탄층까지 도 달한 경우와 아닌 경우로 구분하여 각 굴착단계별로 중 부 지역의 층서구조를 고려한 배수공 역할을 파악하기 위해 개념모델을 구성하였다. 일반적으로 집수지에서 하부로 유입되는 침출수가 인접 사면의 법면으로 지하 수 유동을 발생시킴으로써 사면 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 이에 각 굴착단계를 6단계로 설 정하고 집수지는 굴착이 시작되면서 사면 상단에 존재 하는 경우와 존재하지 않는 경우로 구분하였다. 또한 층서구조를 고려하여 이암층과 사암층 그리고 주된 유 동 경로로 파악되고 있는 협재된 탄층을 모두 조사 결 과를 토대로 모델링하였다. 배수공의 시공 방안을 제시 하기 위해 현재 상태인 6단계 굴착이 종료된 시점에서 배수공 시공을 하여 탄층경계까지만 배수공이 시공된 경우와 탄층내까지 도달하도록 시공된 배수공을 각각 고려하여 모델링하였다.

해석의 개념 모델은 총 4개 모델로, 상부 집수지의 존 재 유무에 따른 2개 모델 그리고 각 경우에 대해 배수 공 시공 방식에 따른 2개 모델을 설정하여 Fig. 8과 같 이 경계조건을 설정하였다.

6.3. 해석 결과

사면 상부 집수지가 없는 경우인 Fig. 9 (c)와 (d)는 각각 각 수평 배수공의 연장이 50m로 탄층경계에서 끝 났을 경우와 연장 60m로 탄층까지 시공하였을 경우이 다. 전체적인 지하수 흐름은 우측 경계에서 사면 법면 방향으로 형성되고 있으며 각 층서별 수리전도도의 차

이로 인하여 층서경계에서 수두분포의 불연속성을 보 여주고 있다. 현재의 사면이 형성된 6단계 굴착후 수평 배수공을 시공한 경우를 살펴보면, 탄층경계까지 시공 된 경우 탄층으로부터 나오는 용출수를 충분히 배수시 키지 못하기 때문에 배수공의 효과가 다소 미흡한 반면, 탄층 내가지 수평 배수공이 시공된 경우 지하수 수두 분포를 연직방향으로 변환시킬 정도의 충분한 효과를 발휘하는 것으로 판단된다.

상부 집수지를 고려한 해석 결과는 Fig. 9 (e)와 (f)와 같다. 상부 집수지는 전체 지하수위를 높게 유지시키는 공급원의 역할을 하고 있으며, 등수두선은 지하수 유동 방향이 사면의 법면 방향으로 형성되도록 분포하고 있 다. 유체의 유동방향은 등수두선의 법선방향으로 형성 된다. 전체적인 분포 양상은 상부 집수지가 없는 경우 와 유사하나 지하수 수위 분포에 있어서 다소 차이를 보인다. 그러나 우측 경계조건이 충분한 공급원을 하고 있기 때문에 큰 차이를 보이지는 않는다. 집수지가 존 재하는 경우 역시 수평 배수공은 주된 유동 경로인 탄 층까지 시공이 되어야 함을 확인할 수 있다. 상부 사면 법면까지 지하수가 포화될 수 있는 것으로 나타났으며, 하부 소단으로 내려갈수록 유동 방향은 사면 법면의 방 향에 가깝게 형성되며, 이는 사면의 안정성을 저하시키 는 외력으로 작용할 수 있다. 따라서 집수지의 매립과 탄층을 통과하도록 수평 배수공을 시공하는 것이 타당 하다는 것을 확인할 수 있다.

7. 결론

Pasir 석탄광산을 대상으로 대규모 노천광산의 사면 안정화를 위한 지하수 문제의 공학적 해결책을 찾기 위 한 현장 실험과 이에 대한 분석 그리고 보강공으로 제 안한 수평 배수공의 시공방향 제안을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Pasir 석탄광산을 이루고 있는 주된 암종인 이암, 사 암, 석탄에 대한 투수계수를 산정하기 위해 현장 실험이 용이한 Guelph 투수계를 이용한 투수시험을 수 행한 결과, 이암층과 석탄층은 낮은 투수성으로 인해 측정가능 범위를 벗어난 반면, 사암층의 경우 10^{-4} cm/sec의 높은 투수성을 가지는 것으로 측정되었다.
2. 10개의 관정을 통해 측정한 지하수를 토대로 SM강 과의 연계성 분석 결과, 투수성이 높은 사암층이 대 수층을 형성하는 주된 암종으로 파악되었으며, 투수 성이 낮은 주 석탄층과 이암층이 위치하는 지역은 반 대수층 혹은 SM강과의 낮은 연계성을 확인하였다.

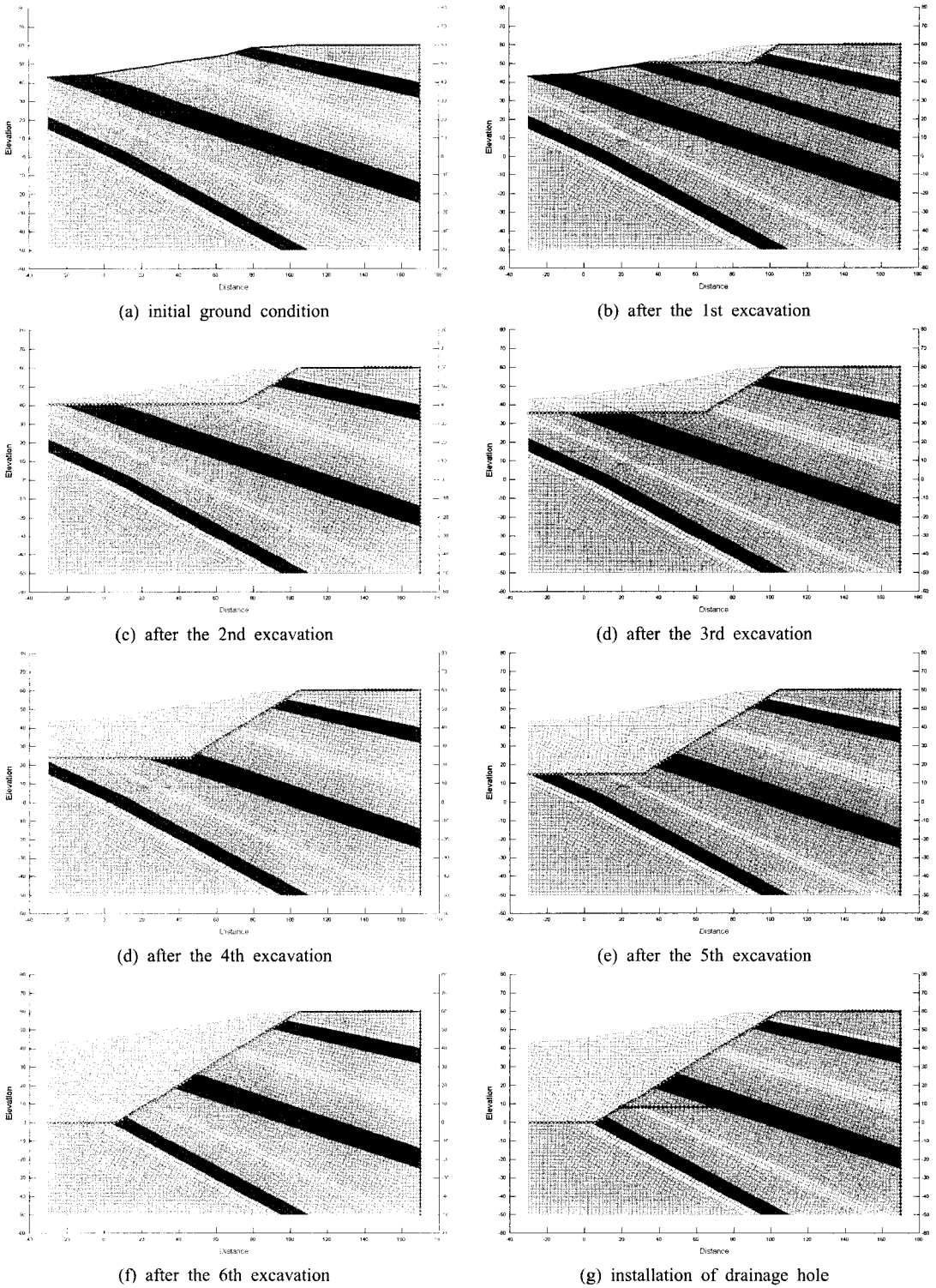


Fig. 8. Geological setting and boundary condition.

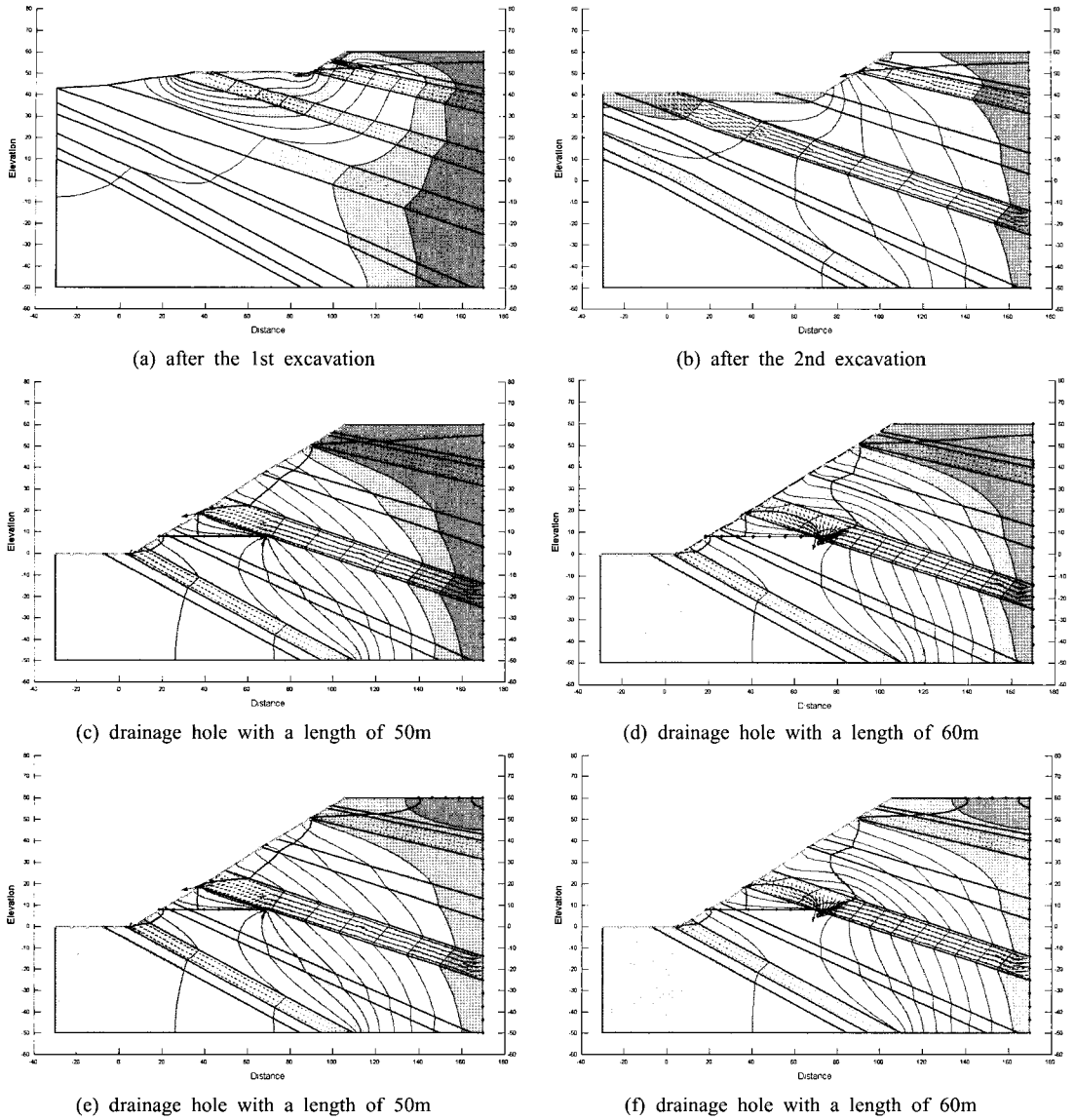


Fig. 9. Results of 2-D groundwater modeling for the effect of drainage hole and pond.

그러나, 폭이 좁은 탄층이 협재되어 나타나는 지역에서는 발달된 균열로 인한 대수층 및 SM강과의 높은 연계성을 확인시켜 주었다. 따라서 사암층과 함께 폭이 좁은 탄층이 협재되어 나타나는 지역에서는 지하수가 사면 안정성에 영향을 미칠 가능성이 높기 때문에 적절한 수평배수공으로 지하수 조절이 요구된다.

3. 지하수 유동 방향을 파악하기 위한 형광 추적자 시험의 결과로부터, 중부지역의 북쪽에 위치하는 SM강으로부터 대수층으로 유출되는 유동 방향이 북측 사면으로 형성되기 보다는 동서방향으로 이루어지고 있거나

혹은 하부 이암층이 불투수층으로 역할을 하여 하부 수평 배수공에서는 검출되지 않는 것으로 분석되었다.

4. 수평 배수공의 시공과 관련하여 2차원 지하수 유동 해석을 각 시공 심도와 상부 집수지 유무에 따라 수행한 결과, 높은 투수성을 지닌 협재된 탄층의 영향을 감소시키기 위해 수평 배수공의 길이를 조절할 필요가 있다. 또한, 집수지는 바닥면의 투수성에 따라 차이가 있을 수 있으나, 사면 주변 지하수의 공급원 역할을 할 가능성이 높기 때문에 다른 곳으로 이동 혹은 매립의 검토가 요구된다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 지식경제부 출연사업인 ‘대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 또한 현장 조사와 실험을 지원해주신 KIDECO 임직원 여러분에게도 감사드립니다.

참고문헌

1. 박승기, 김태철, 안병기, 1999, 현장투수계를 이용한 유역의 평균침투계수 산정, 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 506-511.
2. 정소걸, 선우춘, 한공창, 신희순, 박연준, 2000, 인도네시아 Pasir 탄전에서의 노천채탄장 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제10권, pp 430-440.
3. 최병희, 류창하, 선우춘, 정용복, 2008, 파시르탄광의 사면안정을 위한 발파지침 수립 연구, 터널과 지하공간, 제 18권 6호, pp. 418-426.
4. 정용복, 선우춘, 이종범, 2008, 대규모 노천 석탄광산의 한계사면높이 결정과 사면파괴 예측을 위한 계측자료 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제18권 6호, pp. 447-456.
5. 최요순, 서장원, 박형동, 선우춘, 2008, 노천광산의 관측점 선정과 운반도로 가시거리 안정성 평가를 위한 GIS 기반 가시구역 분석 기법의 적용, 한국지구시스템공학회지, 제45권 4호, pp 265-275.
6. 정재훈, 김형수, 2008, Guelph 투수계를 이용한 김해시 탄성 강변여과수 지역의 지표 수리전도도 분포 조사, 한국지하수토양환경학회지, 제13권 2호, pp. 36-43.
7. KIGAM, 2003, Geotechnical study on the stabilization for the slopes of the Pasir coal mine, KIGAM Report No. KJA/02P/XII/01, Daejeon, Korea, 167p.
8. Reynolds, W. D. and Elrick, D. E., 1987, A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method, Soil Science, 144(4), pp. 282-299.
9. Soil Moisture Corp., 1991, Model 2800K1 Guelph permeameter: Operating instructions, Santa Barbara, CA 93105, USA.
10. Sunwoo, C., Choi Y. S., Park, H. D. and Jung, Y. B., 2008, Drainage control and slope stability at an open pit mine: A GIS-based hydrological modeling, Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds), pp. 1633-1638.

류 동 우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사
Tel: 042-868-3099
E-mail: dwryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 선임연구원

오 준 호

2004년 충남대학교 자연과학대학 지질학과
이학사
2006년 충남대학교 대학원 지질학과 이학
석사
Tel: 042-868-3911
E-mail: ksn25@paran.com
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 인턴연구원

정 용 복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사
Tel: 042-868-3097
E-mail: ybjung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 선임연구원

김 형 목

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과
공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 선임연구원

선 우 춘

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1985년 Paris VI 대학(France) DEA
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과 (France)
공학박사
Tel: 042-868-3235
E-mail: sunwoo@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원