

GRAM 모델을 이용한 폐탄광 지역 지하수 리바운드 현상 분석

최요순*, 백환조, 정영욱, 신승한, 김경만, 김대훈

GRAM Model Analysis of Groundwater Rebound in Abandoned Coal Mines

Yosoon Choi*, Hwanjo Baek, Young-Wook Cheong, Seung-Han Shin,
Gyoung-Man Kim, Dae-Hoon Kim

Abstract Cessation of dewatering usually results in groundwater rebound after closing an underground coal mine because the mine voids and surrounding strata flood up to the levels of decant points such as shafts and drifts. Several numerical models have been developed to predict the timing, magnitude and location of discharges resulting from groundwater rebound. This study reviews the numerical models such as VSS-NET, GRAM and MODFLOW, and compares their scopes of assessment at different spatial and time scales. In particular, the GRAM model was reviewed in details to implement it. This paper describes the implementation of GRAM model and its application to the Dongwon coal mine in Korea. The application showed that the groundwater level modeled at the shaft of Dongwon coal mine using the GRAM model is similar to the observed one in the field.

Key words Acid mine drainage, Abandoned mines, Groundwater rebound, Dongwon coal mine

초 록 폐광된 광산에서는 채광장으로 유입되는 지하수의 펌핑 작업을 더 이상 수행하지 않기 때문에, 채광 공동이나 채광장 주변 지층에서 지하수위가 점진적으로 상승하는 지하수 리바운드 현상이 발생한다. 그동안 폐광산 지역의 지하수 리바운드 현상을 분석할 수 있는 다양한 수치모델들이 개발되었다. 본 논문에서는 폐탄광 지역의 지하수 리바운드 현상 분석시 활용할 수 있는 VSS-NET, GRAM, MODFLOW 모델에 대해 조사하고, 공간적/시간적 규모에서 각 모델의 적용 범위에 대해 소개하였다. 특히, GRAM 모델에 대해서는 상세한 분석을 수행하였으며 포트란 언어를 이용하여 프로그램을 구현하였다. GRAM 모델을 이용하여 국내 동원탄광 수갱의 지하수 리바운드 현상을 분석하였으며, 현장의 지하수위 계측 결과와 GRAM 모델의 분석 결과가 유사한 것으로 나타났다.

핵심어 산성광산배수, 폐광산, 지하수 리바운드 현상, 동원탄광

1. 서 론

가행중인 갱내 채광장에서는 일반적으로 펌핑(pumping) 작업을 수행하여 작업장이 지하수로 인해 침수되는 것

을 방지한다. 그러나 광산이 폐광된 이후에는 펌핑 작업을 더 이상 수행하지 않기 때문에, 채광장 내의 지하수위가 다시 상승하는 현상이 발생하는데 이를 지하수 리바운드(groundwater rebound)라고 한다. 지하수 리바운드 현상이 발생하면 채광 활동으로 인해 생성된 지하 공동이나 채광장 주변 지층으로 지하수가 점진적으로 유입되며, 그 결과 지하수위가 지하수 유출지점(discharge point)의 높이까지 상승한다. 지하수 유출지점은 채광장에 유입된 지하수들이 지표면이나 주변 대수층으로 빠져나가는 지점을 의미하며, 일반적으로 갱내 채광장에 서는 수갱(shaft)이나 수평갱(drift)과 같이 채광 활동을

Received: Nov. 26, 2012

Revised: Dec. 12, 2012

Accepted: Dec. 12, 2012

***Corresponding Author:** Yosoon Choi
Tel) +82516296562, Fax) +82516296553
E-Mail) energy@pknu.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

위해 만들어진 인공 구조물에 유출지점이 형성된다.

광산지역에서 지하수 리바운드 현상을 예측하는 것은 두 가지 측면에서 중요하다. 첫째, 가행중인 갱내 채광장에서는 지하수 리바운드 현상의 예측을 통해 갱내로 유입되는 지하수를 배수하기 위한 계획을 수립할 수 있다. 둘째, 폐광된 갱내 채광장에서는 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)의 유출로 인한 주변 수질 및 토양 환경의 오염을 방지하기 위해 지하수 리바운드 예측 결과가 활용될 수 있다. 구체적으로는 지하수 리바운드 현상의 예측을 통해 폐광 후 채굴공동으로 유입된 지하수가 언제, 어느 지점에서 유출될 것인지를 예상할 수 있으며, 광산배수 수질 예측 기술과 함께 사용될 경우 광산배수의 발생 위치와 시기, 수질 변화를 종합적으로 판단하는데 유용하게 활용될 수 있다(Adams and Younger, 2001).

광산 지하수 리바운드 예측 기술은 갱내수의 유출 지점과 시기, 유출량에 대한 정량적인 정보를 제공할 수 있기 때문에 폐광산 지역의 광해방지를 위해 매우 중요한 기술 중의 하나이다. 최근까지 지하수 리바운드 예측을 위한 모델 개발과 현장적용과 관련한 연구사례들이 다수 보고되었다. Toran and Bradbury(1988)은 Darcian 지하수 유동 방정식에 근거한 대표적인 유한차분 지하수 유동 모델인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)을 이용하여 폐광된 연이연 광산 주변에서의 지하수 리바운드 현상을 분석하였다. 이와 유사하게 Sherwood (1997)는 영국의 대규모 탄전 지대에 지하수 리바운드를 예측하기 위해 MODFLOW를 적용하였다. 그러나 갱내 채광장의 지하수 환경은 일반적인 지하수 환경과 물리적, 수리적으로 큰 차이가 있기 때문에, MODFLOW와 같은 전통적인 지하수 유동 모델을 이용해 광산 지하수 리바운드 현상을 분석하는 것은 많은 문제점을 내포한다(Adams and Younger, 2001). Younger and Adams (1999)는 VSS-NET 모델을 이용하여 영국 Whittle과 Shilbottle 탄전지대의 광산 리바운드 현상을 예측하였다. 해당지역의 경우 상세한 광산 갱내도 도면과 다수의 지점에 대한 지하수위 계측 자료의 활용이 가능했기 때문에 VSS-NET 모델을 이용하여 2시간 간격으로 지하수위의 변화와 지표 유출량의 변화를 효과적으로 예측할 수 있었다. 또한, Adams and Younger(2002)는 영국 South Crofty 주석 광산의 지하수 리바운드 현상 예측을 위해 VSS-NET 모델을 활용하였다. 그 외에도 Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings (GRAM) 모델을 이용하여 영국의 South Yorkshire 탄전 지대의 광산 지하수 리바운드 현상을 분석한 연구들이 다수 수행되었다(Burke and Younger, 2000, Gandy

and Younger, 2007, Kortas and Younger, 2007). 국내의 경우 갱도 주변 암반에서의 지하수 유동 평가(Yoon, 2011)와 대규모 석탄 노천광산에서의 지하수 유동 체계 분석(Ryu et al., 2009)에 관한 연구가 수행되었으나 폐광산 지역 지하수 리바운드 현상에 대한 연구가 미흡한 실정이며, VSS-NET, GRAM 등과 같은 수치 모델들의 국내 적용성에 대한 검토도 이루어지지 않았다.

본 논문의 목적은 폐탄광 지역의 지하수 리바운드 현상의 예측을 위해 활용할 수 있는 VSS-NET, GRAM, MODFLOW 모델들에 대해 조사하고, 각 모델들의 공간적, 시간적 적용 범위에 대해 소개하는 것이다. 또한, GRAM 모델에 대해서는 상세하게 분석하여 포트란(FORTRAN)언어를 이용한 프로그램 구현을 가능하게 하며, 국내 동원탄광 수갱을 대상으로 지하수 리바운드 예측을 수행하고자 한다.

2. 갱내 채광장의 수리 특성

갱내 채광장에는 채광 공동, 수갱, 수평갱과 같이 채광 활동을 위해 형성된 인공 구조물들이 다수 존재한다. 이러한 인공 구조물들은 채광장 내의 지하수 수리 환경에 큰 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 채광 공동은 지하수의 이동 흐름을 바꾸거나 추가적인 경로를 생성할 수 있으며, 주변 암반의 수리지질학적 특성에도 영향을 줄 수 있다. 또한, 채광장 내의 수갱, 수평갱과 같은 인공 구조물들은 채광장을 둘러싸고 있는 인접 지층을 통해 더 많은 지하수가 이동할 수 있도록 한다. Fig. 1은 갱내 채광장에서 일반적으로 볼 수 있는 지하수 유동 시스템의 특징을 보여준다. 채광 공동 주변 지층에서의 지하수 흐름은 층류(laminar groundwater flow)로 가정할 수 있으나, 채광 공동에서는 난류(turbulent groundwater flow)의 지하수 흐름이 발생한다. 즉, 갱내 채광

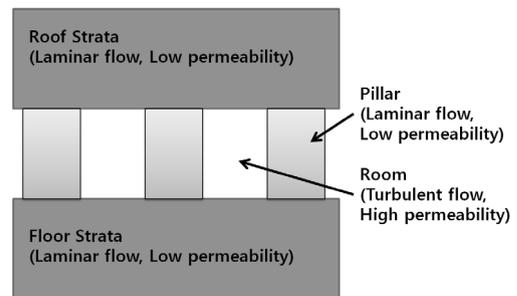


Fig. 1. Hydrogeological characteristics of room and pillar mine-workings

Table 1. Classification of the models for predicting groundwater rebound in underground mine-workings

Type	Spatial scale	Temporal scale	Example
Physically-based, fully 3D model for detailed analyses	$\leq 100 \text{ km}^2$	\leq a few years	VSS-NET (Younger and Adams, 1999)
Semi-distributed model for large systems	$\leq 1000 \text{ km}^2$	\leq a few decades	GRAM (Sherwood, 1997)
Convective Darcian groundwater model for large systems	$\leq 10000 \text{ km}^2$	\leq a few centuries	MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)

장의 지하수 유동 시스템에는 층류와 난류의 지하수 흐름이 혼재되어 있다. 따라서 광산 지하수 리바운드 현상의 예측을 위해 층류의 흐름을 가정한 기존의 지하수 유동 모델을 사용하는 것은 갱내 채광장의 수리 특성을 고려할 때 적합하지 않다. 특히, 석탄광산의 경우 불규칙한 지층 구성으로 인해 지하수 리바운드 현상이 더욱 복잡하게 발생하기 때문에, 전통적인 Darcian 지하수 유동 방정식에 근거한 모델을 이용해 갱내 채광장에서의 지하수 리바운드를 예측하는 것은 비합리적이다(Henton, 1981). 따라서 수갱, 수평갱과 같은 인공 구조물이 포함되어 있는 갱내 채광장의 수리 특성을 반영하여 지하수 리바운드 현상을 예측할 수 있는 방법이 요구된다.

3. 광산 지하수 리바운드 현상의 예측을 위한 모델의 분류

갱내 채광장의 규모는 작게는 수백 m^2 (소규모 채광장)에서 크게는 수천 km^2 (지역적으로 연결된 광산지대)까지 매우 다양하다. 또한, 채광장의 지하수 리바운드 현상을 고려하기 위한 시간 규모도 수개월(소규모 채광장)에서 수십년(지역적으로 연결된 광산지대)에 이르기까지 다양하다. 따라서 광산 지하수 리바운드 예측을 위해서는 채광장의 공간적 규모와 예측 시기의 시간적 규모에 따라 적합한 지하수 유동 모델을 선정하는 것이 중요하다. 한 가지 지하수 유동 모델이 모든 공간적/시간적 규모의 조건에 대하여 신뢰할 수 있는 지하수 리바운드 예측 결과를 제공하는 것은 어렵기 때문이다.

광산 지하수 리바운드 예측을 위해 사용될 수 있는 지하수 유동 모델은 다음과 같이 크게 세 가지 유형으로 분류할 수 있다(Table 1). 첫 번째 유형(physically-based, fully 3D model for detailed analyses)은 100 km^2 이하의 공간적 규모에서 수년 이내의 시뮬레이션 기간에 대해 지하수 리바운드를 예측할 때 효과적인 지하수 유동 모델이다. Younger and Adams(1999)가 사용한 VSS-NET 모델이 첫 번째 유형에 해당한다. 이러한 유형의 지하수 유동 모델은 소규모 지역에 대한 정

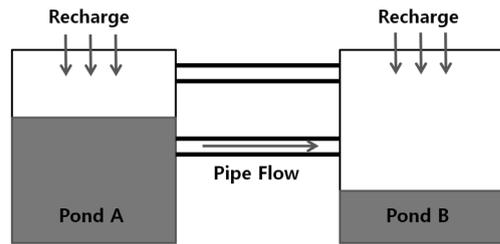


Fig. 2. Concepts of ponds and pipes in the GRAM model (modified from Sherwood, 1997)

밀한 분석이 가능한 대신 모델링을 수행하기 위해 다수의 입력 자료들을 요구하기 때문에 수백 km^2 이상 공간 규모와 수년 이상의 시간 규모에서는 시뮬레이션의 효율성이 급격하게 떨어진다(Adams and Younger, 2001).

두 번째 유형(semi-distributed model for large systems)은 첫 번째 유형의 지하수 유동 모델에서 공간적으로 분포하는 채광장 간의 연결 구조를 제외한 나머지 부분들을 단순화하여 생성된 모델이다. Sherwood(1997)가 개발한 GRAM 모델이 두 번째 유형에 해당한다. GRAM 모델은 광산 지역을 폰드(pond)와 파이프(pipe)가 연결된 형태로 추상화하는 집중매개변수(lumped parameter) 모델로서 수 천 km^2 이하의 공간적 규모와 수십 년 이하의 시간적 규모에 대한 지하수 리바운드 현상의 예측을 위해 활용할 수 있다(Adams and Younger, 2001). Fig. 2는 파이프에 연결되어 있는 두 개의 폰드를 개념적으로 나타낸 것이다. 실세계에서 폰드는 불투수층으로 둘러 쌓여있는 채광장을 의미하며, 파이프는 채광장 사이의 연결 갱도를 의미한다. 채광장은 다양한 기하학적 형태들이 고려될 수 있다. GRAM 모델에서 폰드의 수리 전도도는 충분히 큰 것으로 가정하므로 폰드 내에서의 동수구배(hydraulic gradient)는 무시할 수 있다. 폰드 사이의 물의 흐름이나 지표면으로의 물의 유출을 모델링 하기위해 파이프에서의 유체 유동 방정식이 사용된다.

세 번째 유형(convective Darcian groundwater model

for large systems)은 MODFLOW와 같은 전통적인 Darcian 지하수 유동 방정식에 근거한 모델이다. 이러한 유형의 지하수 유동 모델은 가장 큰 공간적 규모와 가장 긴 시간적 규모를 고려해야할 때 주로 사용된다. 광역적인 범위에서는 물수지(water balance) 평형 조건

이 전체 모델링 영역을 지배하기 때문에, 전통적인 지하수 유동 모델을 이용해도 지하수 리바운드 현상을 근사적으로 분석할 수 있다. Fig. 3은 세 가지 지하수 유동 모델의 분류에 대하여 적용 가능한 관심영역의 공간적 규모와 예측 시기의 시간적 규모를 도식화한 것이다.

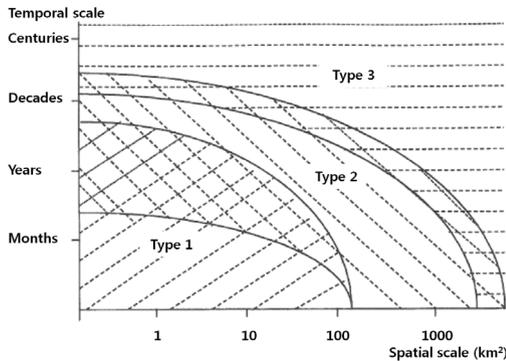


Fig. 3. Spatial and temporal scales of different models for predicting groundwater rebound in underground mine-workings(modified from Adams and Younger, 2001). Type 1: Physically-based, fully 3D model for detailed analyses. Type 2: Semi-distributed model for large systems. Type 3: Convictional Darcian groundwater model for large systems

4. GRAM 모델의 상세 분석

본 연구에서는 앞장에서 분류한 세 가지 유형의 모델 중 두 번째 유형에 해당하는 GRAM 모델에 대한 상세한 분석을 수행하였다. GRAM 모델은 광산 지하수 리바운드 현상의 모델링을 위해 필요한 입력 자료의 구성이 상대적으로 단순하며, 적용 가능한 공간적 규모와 시간적 규모를 고려할 때 국내 폐탄광 지역에 대한 적용이 용이하다고 판단했기 때문이다.

4.1 GRAM 모델의 입출력 자료 분석

GRAM 모델에 필요한 입력 자료와 시뮬레이션 결과로 생성되는 출력 자료는 Table 2와 같다. GRAM 모델에 필요한 입력 자료들은 다른 지하수 유동 모델과 비교할 때 상대적으로 단순하다. 특히, 폰드 내의 동수구배를 무시하며 지하수의 유동량을 파이프 유동 방정식을 사용해서 계산하기 때문에, GRAM 모델에서는 전통

Table 2. Input and output data of the GRAM model

Type	Data
Input	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitation (mm) • Evaporation (mm/year) • Attenuation of recharge over time • Area of each pond (m²) • Area of surface catchment of each pond (m²) • Storage coefficient • Original water level (m) • Percentage run-off (%) • Abstractions (m³/timestep) • Marine inflow (m³/timestep) • Inflow from adjacent mines or aquifers (m³/timestep) • Number of pond connections, and for each their: height (m), roughness coefficient (mm), diameter (m), length (m), kinematic viscosity (m²/s) • Number of surface discharge points and for each their: height (m), roughness coefficient (mm), diameter (m), length (m), kinematic viscosity (m²/s) • Which parameters will have Monte Carlo simulation applied to them and for each a probability distribution
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Water balance consisting of a comparison of the change in storage volume and the difference between the volume of water entering and leaving the system • Water level data for each pond • Time of first flow from each surface discharge point • Volume of each surface discharge over time • Average volume of flow from each surface discharge point

적인 지하수 유동 모델과 달리 모델링 대상 지역에 대한 수리 전도도, 공극률 등의 값을 입력할 필요가 없다. 일반적으로 폐탄광 현장에서 수집할 수 있는 자료는 매우 제한적이기 때문에, GRAM 모델의 입력 자료가 단순하다는 점은 현장적용을 보다 용이하게 할 수 있는 장점이라고 판단된다. GRAM 코드의 입력자료 구성 중 두드러진 특징은 연결된 각각의 파이프와 유출 지점에 대한 자료들이다. 이러한 자료들은 파이프 유동 방정식을 풀기 위해 필요하기 때문에 GRAM 코드에 반드시 입력해 주어야 한다.

GRAM 모델에서 각각의 폰드로 재충전(recharge)되는 빗물의 양은 각각의 폰드의 집수구역에 도달하는 강수량을 고려하여 산정한다. 이를 위해 먼저 관심기간 동안의 유효 우량(effective rainfall)을 결정하는데, 유효 우량은 지표면에 도달하는 빗물의 양에서 증발량을 뺀 값으로 결정된다. 만약 증발량이 강수량 보다 더 많다면 유효 우량을 0으로 산정한다. 증발량 값은 연평균 값으로 입력된다. 따라서 여름철에는 증발량 값이 과소 평가되며, 겨울철에는 과대평가되는 경향이 있다. 그러나 지하수 리바운드 현상의 예측은 일반적으로 수년간의 기간에 대해 시뮬레이션이 이루어지기 때문에, 전체적인 물 수지 평형에 계절적인 변화가 미치는 영향은 무시할 수 있다고 판단된다. 빗물이 재충전 되는 양은 전체 유효 강수량에서 지표 유출량을 뺀 나머지와 같다. 지표 유출량의 비중은 물수지 분석이나 하천 유량의 예측을 통해 산정할 수 있으며, Ward and Robinson (1990)은 일반적으로 전체 유효 강수량에서 약 34%가 지표 유출에 기여하는 것으로 보고하였다. 재충전은 각 폰드의 전체 지역에 대해 적용된다.

저류계수(storage coefficient)의 경우 대수층 시험을 통해 결정하는 것이 일반적이지만 GRAM 모델에서는 몬테카를로 시뮬레이션과 폰드의 수위 계측 자료를 이용한 입력 변수의 보정(calibration) 과정을 통해 저류계수 값을 결정한다. 따라서 저류계수 값의 보정을 위해서는 기존의 수위 계측 자료가 필요하다. GRAM 모델에서 폰드는 수직 방향으로 수리적 특성이 균질(homogeneous)하다고 가정된다. 그러나 실제 광산 현장에서는 이러한 가정이 항상 성립하지는 않는다. 채광작업의 결과로 천반 붕락이 발생하여 채굴적이 파쇄압으로 가득차 있는 경우에는 주변의 지층에 비해 더 높은 저류계수를 가질 수 있기 때문이다. GRAM 모델에서는 이러한 수직 방향의 불균질성을 반영하기 위하여 하나의 폰드를 수직 방향의 멀티 레이어로 구분하고, 레이어별로 높이와 저류계수를 각각 입력할 수 있도록 한다. 따라서 폰드에서 지하수위가 상승함에 따라 지하

수위에 대응하는 높이의 레이어가 활성화되어 저류계수의 수직적 변화를 고려할 수 있다. 한 광산 내에 여러 개의 채굴적이 존재하는 경우에도 각각의 채굴적을 폰드로 가정하고, 채굴적 간의 운반 경도를 파이프로 가정하여 GRAM 모델에 입력하면 각각의 채굴적에서의 지하수 리바운드 특성을 분석할 수 있다.

4.2 GRAM 모델의 계산 절차 및 방법

Fig. 4는 광산 지하수 리바운드 현상의 예측을 위해 GRAM 모델에 사용되는 다섯 단계의 계산 절차를 보여준다. 첫째, 채광장을 표현하는 각각의 폰드에 대하여 유입되는 빗물의 양을 계산한다. 둘째, 채광장에 펌핑 작업이 진행되고 있는 경우 각각의 폰드로부터 외부로 배출되는 지하수의 양을 계산하여 차감한다. 셋째, 바다, 인접 광산, 인접 대수층에서 채광장으로 지하수가 유입되는 경우, 각각의 폰드로 유입되는 지하수의 양을 산정하여 합산한다. 세 번째 단계까지의 계산을 통해 각 폰드에 존재하는 지하수의 양이 산정되면, 네 번째 단계에서는 파이프 유동 방정식을 이용하여 연결되어 있는 폰드 간의 지하수 이동량을 산정한다. 그리고 이동한 지하수의 양까지 모두 고려하여 각 폰드에서의 지하수위를 계산한다. 폰드의 지하수위가 상승하여 범람할 경우 다섯 번째 단계에서 파이프 유동 방정식을 이용하여 지표면으로 유출되는 지하수의 양을 계산한다. 정해진 시뮬레이션 기간 동안 각각의 폰드에 대하여 첫

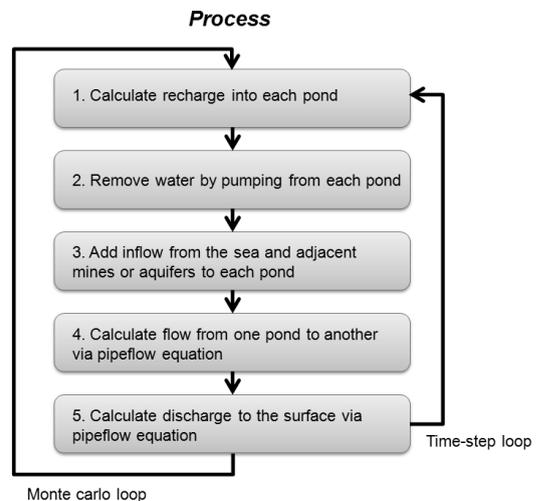


Fig. 4. Process of the GRAM model for predicting groundwater rebound in underground mine-workings(modified from Sherwood, 1997)

번째 단계부터 다섯 번째 단계까지의 계산을 반복적으로 수행하며, 각각의 루프에서 계산된 결과를 출력 자료로 저장한다. GRAM 모델에 입력되는 폰드의 저류계수, 빗물의 유출비율(the percentage run-off), 파이프 표면의 거칠기 계수(the roughness of pipe) 등의 자료 값은 특정 값이 아닌 확률 분포의 형식으로 표현될 수도 있다. 입력된 자료의 값이 확률 분포의 형태로 표현된 경우에는 각 루프마다 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 모델에 입력되는 자료의 값을 확률적으로 생성할 수 있다.

4.3 파이프 유동 방정식

GRAM 모델은 폰드 사이의 지하수의 이동과 지표면으로의 광산배수의 유출 현상을 모델링하기 위하여 파이프로 연결된 각각의 폰드에 대한 수두 손실(head loss)을 계산한다. 이때 수두 손실을 계산하기 위해 식 (1)이 사용된다. GRAM 모델에서 파이프를 따라 지하수가 유동한다는 것은 파이프가 연결된 지점의 높이가 연결된 폰드 중 적어도 하나의 폰드의 지하수위보다 낮아 완전히 침수되어 있다는 것을 의미한다. 식 (1)에서 폰드의 전체 수두 손실은 마찰(friction) 수두 손실과 유입/유출시 발생하는 경미한(minor) 수두 손실의 합으로 계산된다. 마찰 수두 손실의 경우 Darcy-Weisbach 방정식을 이용하여 계산한다(Chadwick and Morfett, 2004).

$$\Delta H = \frac{0.5V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + \frac{\lambda LV^2}{2gD} \quad (1)$$

여기서 ΔH 는 폰드의 전체 수두 손실, V 는 파이프에서 지하수의 유속(m/sec), λ 는 파이프의 표면 거칠기와 직경에 의해 결정되는 마찰손실계수, L 은 파이프의 길이(m), D 는 파이프의 직경(m)을 의미한다. 식 (1)을 각 항별로 살펴보면, $0.5V^2/2g$ 는 폰드의 지하수가 파이프에 유입될 때 발생하는 수두 손실(입구손실), $V^2/2g$ 는 파이프에서 지하수가 유출될 때 발생하는 수두 손실(출구손실), $\lambda LV^2/2gD$ 는 파이프에서 발생하는 마찰 수두 손실을 나타낸다.

식 (1)에 입력되는 λ 값은 Prandtl-Nikuradse 방정식이나 Colebrook-White 방정식을 이용하여 결정할 수 있다. 먼저 Prandtl-Nikuradse 방정식은 유체의 흐름을 거친 난류로 가정한다(Chadwick and Morfett, 2004). 거친 난류(rough turbulent)에서는 λ 값이 파이프 직경에 대한 상대적인 거칠기 정도(k/D)에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \left(\frac{1}{2 \log \frac{3.7D}{k}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 k 는 파이프 표면의 조도계수(m)를 의미한다. Prandtl-Nikuradse 방정식은 해를 찾기 위해서 반복(iteration) 절차가 필요 없다는 특징이 있다. 따라서 Prandtl-Nikuradse 방정식을 풀기 위한 코드는 매우 간단하며 연산시간도 매우 짧다. 그러나 유체의 흐름이 거친 난류가 아닌 경우에는 적용할 수 없는 한계가 있다.

Colebrook-White 방정식은 난류 형태의 파이프 유체 흐름을 계산하는데 일반적으로 사용되고 있는 방정식이다. Colebrook-White 방정식은 식 (3)와 같이 거친 난류와 부드러운 난류(smooth turbulent)를 함께 고려하여 λ 값을 계산한다.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51\nu}{VD\sqrt{\lambda}} \right] \quad (3)$$

여기서 지하수의 ν 는 동점성도(kinematic viscosity, m^2/sec)를 의미하며, 유체의 점성도(μ)와 단위중량(ρ)의 비율이다. 대부분의 지하수 환경의 온도 및 압력 조건에서 동점성도의 변화는 매우 작다. 따라서 동점성도는 상수로 사용될 수도 있다. Freeze and Cherry (1979)는 15.5도의 온도, $1000kg/m^3$ 의 밀도, $1.146 \times 10^{-4} kgf \cdot s/m^2$ 의 점성도 조건에서 유체의 동점성도를 $1.124 \times 10^{-6} (m^2/sec)$ 로 보고하였다.

만약 층류 형태의 파이프 유체 흐름이 나타날 경우에는 다음의 식을 이용하여 λ 값을 계산한다.

$$\lambda = \frac{64}{\rho} \frac{\mu g}{VD} \quad (4)$$

5. GRAM 모델의 프로그램 구현

GRAM 모델을 이용하여 폐탄광 지역의 지하수 리바운드 현상을 예측하기 위해 포트란 언어를 이용하여 프로그램을 구현하였다. 프로그램 개발환경으로는 Intel Parallel Studio XE 2013(<http://software.intel.com/>)을 이용하였다. 프로그램 구현의 목적이 GRAM 모델을 간단하게 테스트하기 위한 것이기 때문에 프로그램 구조가 가장 단순한 단일창 형식(FORTRAN Console Application)으로 프로그램을 구현하였다. 따라서 그래픽 사용자 인터페이스를 통해 자료를 입력하거나 모델링 결과를 그래프로 출력하는 등의 기능들은 포함하지 않는다.

6. GRAM 모델을 이용한 동원탄광 수갱의 지하수 리바운드 예측

동원탄광은 강원도 고한·사북지역에 위치하고 있으며 1963년 12월 동원탄좌개발주식회사로 개광한 이래 2004년까지 약 2백만 톤의 석탄을 생산하였다. 채광법으로는 위경사 봉락채탄법이 사용되었으며 편간 수직 간격은 50 m로 개발되었다. 채광작업은 지표면(0편)인 650 ML에서 13편인 50 ML까지 진행되었다. 가행 당시에는 채광장을 유지하기 위하여 평균 5,250 m³/day의 지하수를 펌프를 이용하여 배수하였으며, 폐광 이후에는 2005년 2월부터 펌핑 작업을 중단하여 채광장의 지하수위가 다시 상승하기 시작하였다.

동원탄광의 주변에는 삼탄, 함태, 어룡, 동해, 정동, 장원, 경일, 세원 등의 탄광이 가행되었으나 모두 동원탄광보다 앞서 폐광되었다. 석탄합리화사업단(2004)는 고한·사북지역의 탄광들 간의 연결성을 분석하였으며, 지리적으로 근접해 있는 동원-삼탄-세원-정동-함태 탄광의 경우 채광 갱도의 관통 등의 이유로 채광장이 서로 연결되어 폐광 이후 지하수가 이동할 수 있는 가능성을 제시하였다. 본 연구에서는 국내 폐탄광 현장에 대한 GRAM 모델의 적용 가능성을 테스트해보기 위하여 고한·사북지역에 위치한 동원, 삼탄, 세원, 정동, 함태 탄광 지역을 연구지역으로 설정하고(Fig. 5) 동원탄광 수갱의 지하수 리바운드 현상을 분석하였다. 동원탄광 수갱의 경우 2005년부터 갱내 지하수의 수위 변화와 수질에 대한 모니터링이 수행되었으며 그 결과는 Cheong et al.(2012)에 의해 보고되었다.

GRAM 모델에 입력된 자료를 구성하기 위하여 동원탄광을 폰드 1로 설정하고, 삼탄-세원-정동-함태 탄광

을 폰드 2로 설정하였다. 따라서 GRAM 모델에는 두 개의 폰드와 두 폰드를 연결하는 하나의 파이프에 관한 정보들이 Table 3와 같이 입력되었다. 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용한 수문분석을 통해 연구지역의 집수구역 면적을 대략적으로 산출하였다. GIS를 이용한 광산지역의 수문분석 방법은 Choi et al.(2006), Sunwoo et al.(2007), Choi and Park(2011), Kim et al.(2011), Choi et al.(2011)에 상세하게 기술되어 있다. 폰드 1에 입력된 최초 수위는 2005년 7월 2일 현장 관측 값인 221.5 ML을 기준으로 하였으며, 폰드 2에는 동원탄광의 폐광 당시의 삼탄 정암광업소의 지하수 수위인 750 ML을 기준으로 입력하였다. 기상청(www.kma.go.kr)에서 제공하는 태백 지역의 일강수량(mm/day) 자료와 연간 증발량(1200 mm/year) 값을 GRAM 모델에 입력하였으며, 폐광산이므로 펌핑 작업을 통한 지하수의 배수는 없는 것으로 설정하였다.

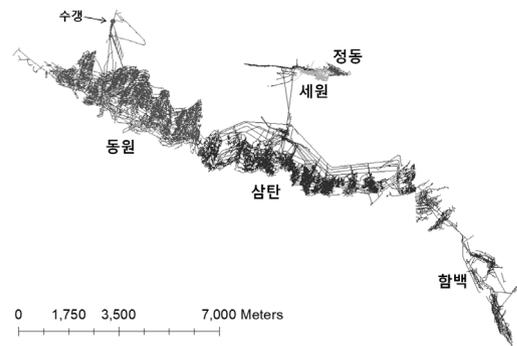


Fig. 5. Mine maps of the study area

Table 3. Input values of the GRAM model for predicting groundwater rebound in the Dongwon mine

Entity	Input values
Pond 1	Area of each pond: 36 km ² Area of surface catchment of each pond: 50 km ² Storage coefficient: 0.45 Original water level: 221.5 ML Level of surface discharge point: 639 ML (fractures)
Pond 2	Area of each pond: 150 km ² Area of surface catchment of each pond: 200 km ² Storage coefficient: 0.45 Original water level: 750 ML
Pipe	Height: 570 ML Roughness coefficient: 20 mm Diameter: 2 m Length: 50 m Kinematic viscosity: 1.124×10 ⁻⁶ m ² /sec

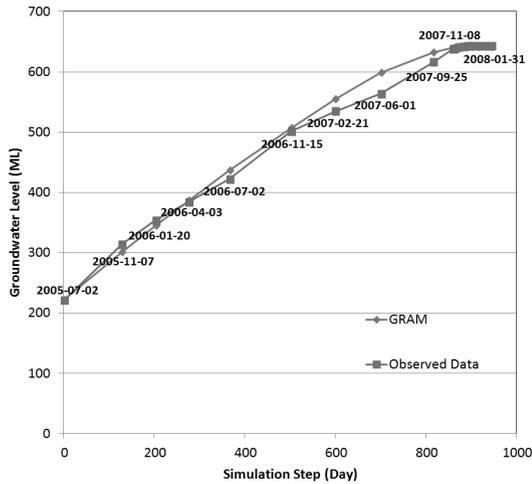


Fig. 6. Simulated and observed groundwater levels at the shaft in the Dongwon mine

또한, 인근 대수층으로부터의 지하수 유입도 없다고 가정하였다. 시뮬레이션은 하루 간격으로 2005년 7월 2일(Day 0)부터 2008년 1월 31일(Day 943)까지 수행하였으며, 파이프 유동 방정식에 입력되는 λ 값은 Prandtl-Nikuradse 방정식을 이용하여 계산하였다. 시뮬레이션 기간을 2005년 7월 2일부터 2008년 1월 31일까지로 설정한 이유는 해당 기간 동안의 동원탄광 수갱의 지하수위 모니터링 결과가 Cheong et al.(2012)에 제시되어 있어 GRAM 모델의 지하수위 예측 결과와의 비교가 가능하기 때문이다. 일부 현장 모니터링 자료와 GRAM 모델의 예측 결과를 비교하여 폰드 1과 2의 저류계수 값을 0.45로 보정하였다.

Fig. 6은 동원탄광 수갱의 지하수위를 GRAM 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과와 현장에서 모니터링 한 결과를 보여준다. GRAM 모델의 시뮬레이션 결과는 현장 모니터링 결과와 비교할 때 2005년 7월부터 2006년 4월까지 다소 낮게 나타났으며, 2006년 7월부터 2007년 11월까지 다소 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 2007년 11월 지하수위가 639 ML에 도달한 이후에는 지하수위 상승폭이 작아진 것을 볼 수 있다. 639 ML 지점에서 지층 균열을 통해 지표면으로의 지하수 유출이 발생하고 있기 때문이며(Cheong et al., 2012), 이는 현장 모니터링 자료에도 나타나고 있다. 동원탄광에 대한 사례연구를 통해 GRAM 모델을 국내 폐탄광 지역의 지하수 리바운드 예측을 위해 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 폐탄광 지역의 지하수 리바운드 예측을 위해 활용되는 VSS-NET, GRAM, MODFLOW 모델에 대해 조사하고, 각 모델들의 공간적, 시간적 적용 범위에 따라 그 특징을 비교하였다. 특히, 광산 지하수 리바운드 현상의 모델링을 위해 필요한 입력 자료의 구성이 상대적으로 단순하며, 적용 가능한 공간적 규모와 시간적 규모를 고려할 때 국내 폐탄광 지역에 대한 적용이 용이하다고 판단되는 GRAM 모델에 대해 입력력 자료 구성, 계산 절차, 사용되는 파이프 유동 방정식에 관한 상세한 분석을 수행하였다. 분석 결과를 바탕으로 포트란 언어를 이용하여 GRAM 모델을 프로그램으로 구현하였으며, 구현된 프로그램을 이용하여 강원도 고한·사북지역에 위치한 동원탄광에 대한 2005년 7월 2일부터 2008년 1월 31일까지의 지하수 리바운드 현상을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과와 현장 지하수위 모니터링 결과를 비교한 결과 지하수위의 변화가 매우 유사하게 나타났으며, GRAM 모델을 국내 폐탄광 지역에도 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

GRAM 모델을 국내 현장에 적용시 필요한 대부분의 입력 자료들은 기상청 자료와 수치지형도 등의 자료를 GIS 공간분석을 통해 가공하여 생성할 수 있다. 그러나 폰드의 저류계수, 파이프 표면의 거칠기 계수 등의 자료들은 현장 실험이 필요한 부분이기 때문에 자료를 확보하는 것이 쉽지 않으며, 이는 GRAM 모델이 주로 적용되었던 영국의 광산지역 여건과 유사하다. 따라서 기존의 연구들에서 사용되었던 폰드의 저류계수, 파이프 표면의 거칠기 계수 등의 자료 값을 GRAM 모델에 우선 입력하여 지하수위 모델링을 수행한 후, 현장 지하수위 모니터링 자료와의 비교를 통해 값을 보정하는 과정이 필요하다.

GRAM 모델은 입력 자료의 구성이 비교적 단순하여 현장 조사 자료의 확보가 어려운 폐탄광 지역에 적용하기 용이하지만 다음과 같은 한계점들을 가진다. 첫째, 모델에 입력되는 자료 중 폰드의 저류계수에 따라 지하수 리바운드 예측 결과가 민감하게 변화한다. 그러나 실제 광산 현장에서 채광장의 저류계수를 정확하게 결정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 입력되는 저류계수 값의 정확도에 따라 지하수 리바운드 예측 결과의 정확도로 크게 달라질 수 있는 단점이 있다. 둘째, GRAM 모델은 토양의 비포화 영역에 대한 모델링을 수행할 수 없다. 셋째, GRAM 모델은 주변의 하천과 같은 지하수 공급원을 고려하지 않는다. 하천으로부터 유입되는 지하수를 고려하지 않으며, 반대로 지하수가 하천으로 유

출되는 것도 허용하지 않는다. 대부분의 갱내 채광장에서는 주변 하천으로부터 지하수가 유입/유출되는 것을 막기 위한 인공 시설물을 설치하기 때문에, 주변 하천에 의한 영향은 무시할 수 있으나 현장 조건에 따라 주변 하천의 영향을 고려해야할 경우도 있다. 넷째, GRAM 모델은 하나의 채광장 내에서는 동수구배가 없다고 가정한다. 그러나 실제 현장에서는 동수구배가 존재할 수 있으며 그 결과 지하수 리바운드 예측 결과가 실제 관측 결과와 차이를 보일 수 있다. 마지막으로 GRAM 모델은 원형의 연결 갱도만을 가정하여 유체의 마찰 손실을 계산한다. 그러나 실제 현장에서의 갱도 형태는 원형이 아닌 사각형에 가까운 경우도 있다. 따라서 향후 연구에는 이러한 한계점들을 보완하고 국내 탄광의 복잡한 지질구조와 채탄방법을 반영할 수 있도록 GRAM 모델을 개선해야 할 것으로 판단된다. 또한, GRAM 모델을 편리하게 사용할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스 기반의 프로그램 개발이 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 한국광해관리공단의 “광산배수 제어를 위한 채굴적 산화 억제 기술개발” 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. 석탄합리화사업단, 2004, (주) 동원 사복광업소 폐광에 대비한 광해대책 연구, 석탄산업합리화사업단 기술총서, pp. 29-37.
2. Adams, R. and Younger, P.L., 2001, A strategy for modeling ground water rebound in abandoned deep mine systems, *Ground Water*, Vol. 39, No. 2, pp. 249-261.
3. Adams, R. and Younger, P.L., 2002, A physically based model of rebound in South Crofty tin mine, Cornwall, *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*, Vol. 198, pp. 89-97.
4. Burke, S.P. and Younger, P.L., 2000, Groundwater rebound in the South Yorkshire coalfield: a first approximation using the GRAM model, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 33, pp. 149-160.
5. Chadwick, A.J. and Morfett, J.C., 2004, *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*, (4th Edn.), Spon Press, London, UK, 600 p.
6. Cheong, Y.W., Yim, G.J., Ji, S.W., Kang, S.S. and Skousen, J., 2012, Water quality changes of a closed underground coal mine in Korea, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 184, No. 1, pp. 503-513.
7. Choi, Y. and Park, H.D., 2011, GIS Modeling for Design of In-pit Stormwater Ponds in Large Scale Open-pit Mines, *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp. 165-177. [In Korean with English abstract].
8. Choi, Y., Park, H.D. and Kwon, H.H., 2011, Software for Hydrological Analysis of Tailings Dam Using GIS and ASI Algorithm, *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 5, pp. 549-559. [In Korean with English abstract].
9. Choi, Y., Sunwoo, C. and Park, H.D., 2006, Control of open-pit mine drainage for mine reclamation using Geographic Information Systems, *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 43, No. 5, pp. 429-438. [In Korean with English abstract].
10. Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 604 p.
11. Gandy, C.J. and Younger, P.L., 2007, Predicting Groundwater Rebound in the South Yorkshire Coalfield, UK, *Mine Water and the Environment*, Vol. 26, No. 2, pp. 70-78.
12. Henton, M.P., 1981, The problem of water table rebound after mining activity and its effects on ground and surface water quality, In: W. van Duijvenbooden, P. Glasbergen and H. van Lelyveld, eds., *Quality of Groundwater*, Elsevier, New York, USA, pp. 111-116.
13. Kim, S.M., Choi, Y., Park, H.D., Kwon, H.H., Yoon, S.H. and Go, W.R., 2011, Analysis of Mine Leachate Transport Pathway on the Surface Using GIS, *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 560-572. [In Korean with English abstract].
14. Kortas, L. and Younger, P.L., 2007, Using the GRAM Model to Reconstruct the Important Factors in Historic Groundwater Rebound in Part of the Durham Coalfield, UK, *Mine Water and the Environment*, Vol. 26, No. 2, pp. 60-69.
15. McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, United States Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations Report O6-A1. 273 p.
16. Ryu, D.W., Kim, H.M., Oh, J.H., Sunwoo, C. and Jung, Y.B., 2009, Field Tests and Analysis of Groundwater System for Stabilization of Slope in Large Open-Pit Coal Mine, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 19, No. 3, pp. 248-260. [In Korean with English abstract].
17. Sherwood, J.M., 1997, *Modelling minewater flow and quality changes after coalfield closure*, Unpublished Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle, UK, 241 p.
18. Sunwoo, C., Choi, Y., Park, H.D. and Jung, Y.B., 2007, Drainage Control and Prediction of Slope Stability by GIS-based Hydrological Modeling at the Large Scale Open Pit Mine, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 17, No. 5, pp. 360-371. [In Korean with English abstract].
19. Toran, L. and Bradbury, K.R., 1988, Groundwater flow

- model of drawdown and recovery near an underground mine, *Ground Water*, Vol. 26, No. 6, pp. 724-733.
20. Ward, R.C. and Robinson, N., 1990, *Principles of Hydrology*, (3rd Edn.), McGraw-Hill, London, UK, 365 p.
21. Yoon, Y.K., 2011, Evaluation of Groundwater Flow through Rock Mass around Development Openings of Mine, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 21, No. 5, pp. 370-376. [In Korean with English abstract].
22. Younger, P.L. and Adams, R., 1999, *Predicting mine water rebound*. Environment Agency R&D Technical Report W179. Bristol, UK, 120 p.

최요순



2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2009년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 공학박사
2010년 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과 Post-Doc
Tel: 051-629-6562
E-mail: energy@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 조교수

백환조



1984년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 University of Texas at Austin 토목공학과 공학박사
Tel: 033-250-6257
E-mail: hwanjo@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수

정영욱



1984년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 010-2835-6113
E-mail: ywc@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지질재해연구실 책임연구원

신승한



2009년 조선대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사
2011년 조선대학교 대학원 에너지·자원공학과 공학석사
Tel: 010-7929-1629
E-mail: shshin@mireco.or.kr
현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 수질환경연구팀 연구원

김경만



2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2008년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사
Tel: 043-868-3319
E-mail: yaong011@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 박사과정

김대훈



2008년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2010년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사
Tel: 033-255-6257
E-mail: ggadae@yahoo.co.kr
현재 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 박사과정