

부산임기광산 폐석적치장에서의 순간충격시험 적용성 연구

박학윤¹ · 주정웅¹ · 정영욱² · 여인욱^{1*}

¹전남대학교 지구환경과학부, ²한국지질자원연구원

Feasibility Study of Slug Test in Unsaturated Mine Tailings Pile of the Imgi Abandoned Mine in Busan

Hak-Yun Park¹ · Jeong-Woung Ju¹ · Young-Wook Cheong² · In Wook Yeo^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

The slug test by adding water to well and measuring falling head was conducted to investigate the hydrogeological property of unsaturated or partially saturated mine tailings in the Imgi abandoned mine in Busan. In case that wells were installed with a full screen through two layers with different hydraulic properties, Bouwer and Rice method was useful to estimate the hydraulic conductivity and the depth of mine tailings. In particular, when groundwater dried out in the dry season, the slug test performed by adding water into well to form artificial water table and then conducting falling head test produced the reasonable hydraulic conductivity values. The slug test using falling head test can be an alternative to investigate the hydrogeological property of abandoned mine tailings.

key word : abandoned mine, mine tailings pile, slug test, falling head test

요 약 문

불포화대 및 포화대에 걸쳐 존재하는 폐석더미의 수리적 특성을 조사하기 위해 물을 주입한 후 수두강하를 측정하는 순간충격시험을 실시하였다. 본 연구지역과 같이 관정이 수리적 특성이 크게 다른 두 지층에 걸쳐 설치된 경우, Bower and Rice 해석 방법을 이용하여 두 대수층 각 각의 수리전도도를 산출할 수 있었으며, 하강하는 지하수위의 변곡점을 이용하여 폐석더미의 두께를 추정할 수 있었다. 갈수기 시 관정 내 낮은 지하수위 때문에 인위적인 지하수위를 형성시킨 후 순간충격시험을 실시한 결과, 그 결과는 풍수기 시험 결과와 차이가 크지 않았다. 이와 같은 순간충격시험은 폐석적치장과 같은 곳의 수리적 특성을 파악할 수 있는 유효한 방법으로 판단된다.

주제어 : 폐광산, 폐석더미, 순간충격시험, 수두강하시험

1. 서 론

폐광지역 오염문제에 대한 관심이 증대되면서 국내외에도 폐 광산 또는 광산 지역에서 오염원이 되는 원소들을 대상으로 많은 조사연구들이 수행되고 있으나, 대부분 지구화학적 연구에 국한되어 왔다(강민주 외, 2006; 정영욱

외, 2005; 지상우 · 정영욱, 2005; 김정진 외, 2003; Collon et al., 2006; Hangen et al., 2005). 폐 광산지역의 산성 광산배수 유출탐지와 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지화학적 연구도 진행되었으며(박권규 외, 2006; 김지수 외, 2003; 김지수 외, 2002; 박영석 외, 2002), 산성광산배수의 지화학적 특징과 증발잔류물에 대한 광물학적인 연구

*Corresponding author : iwyeo@chonnam.ac.kr

원고접수일 : 2007. 1. 18 게재승인일 : 2007. 5. 23

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

와 폐금속광산 수계에서 미량원소의 지구화학적 거동특성에 대한 연구도 수행된 바 있다(강민주 외, 2006; 김정진 외, 2003). 이외에 Winters and Capo(2004)가 석탄광산 지역에서의 지하수 유동에 대한 연구를 수행하였으나, 계절에 따른 강우 변화나 지형 구배는 고려하지 않고 단순히 양수효과에 의한 지하수 유동 모델링에 관한 연구를 수행하였으며, Schemel et al. (2006)등은 산성광산배수에 의한 시냇물의 영향을 조사하기 위해 추적자시험을 수행하였다. 그러나 이러한 연구들에 반해 오염물질을 배출하는 폐석적치장에서 침출수의 양과 유동방향에 중요한 요인이 되는 수리지질학적 연구사례는 매우 부족하다.

본 연구지역인 부산광역시 임기납석광산은 기장군 철마면 임기리에 위치하며, 1980년대까지 가행되다가 1992년 폐광 되었다. 그 이후 특별한 광해 방지대책 없이 현재까지 방치되고 있다. 연구지역은 부산광역시의 상수원으로 이용되고 있는 화동저수지의 상류지역으로서, 폐석더미를 통해 흘러나오는 침출수가 어떤 정화매체도 거치지 않고 폐석더미 옆 계곡으로 유입 되고 있다. 이 지역의 pH를 측정 해 본 결과 폐석더미에서 흘러나오는 침출수의 pH가 3이하로 강산성을 띄고 있으며, 끊임없이 유출되는 황(S), 철(Fe) 등 여러 중금속을 함유한 지하수가 계곡으로 유출되어 수영강으로 합류하고 최종적으로 화동저수지로 유입되고 있다(정영욱 외, 2005). 연구지역의 폐석적치장에는 6~9 m의 심도로 3개의 지하수 관정이 폐석더미와 기반암에 걸쳐 설치되었으며, 전 구간에 걸쳐 스크린이 설치되었다(박권규 외, 2006).

관정은 침출수의 지구화학적 분석을 위해 설치된 것으로, 스크린이 불포화대를 포함하여 전 구간에 걸쳐 설치되어 있고, 관정의 깊이 또한 깊지 않아 관정 하부에 지하수가 일부 존재하여 일반적인 대수층시험이 불가능하였다. 본 연구지역의 관정이 불포화대까지 스크린이 설치되어 있음을 고려하여, 일정부피의 물을 주입하여 하강하는 지하수위를 측정(falling head test)하는 순간충격시험방법을 이용하였다. 이때 얻어지는 자료를 Bouwer and Rice 해석법을 적용하여 폐석더미와 기반암 각 각의 수리전도도를 산출하고, 폐석더미의 두께를 추정하였다.

2. 지질 및 수질의 지화학적 특징

본 연구 지역은 경상 누층군의 하양층군에 속하는 대양동층과 이를 피복 또는 관입하는 유천층군의 화산암류 및 백악기 불국사 심성 관입암이 분포한다. 또한 안산암질암이 열수변질작용을 받아 생성된 혼합형 납석광상이다. 주

요 구성광물은 석영, 견운모, 납석, 고령토 및 황철석이다(이민성 강필중, 1964; 손치무 외, 1978).

정영욱 외(2005)의 조사결과에 의하면, 본 연구 지역 수질의 지화학적 특징은 Al의 오염 부하량이 3.6~16.9 kg/d로 매우 높고 pH는 3정도의 낮은 특징을 보인다. Fe(III)의 오염부하 역시 0.4~2.8 kg/d로 높고, 기타 Fe(II)는 0.1~0.4 kg/d, Mn은 0.4~1.8kg/d, SO₄²⁻는 33.9~161.6 kg/d로 존재한다. 침출수는 평균 34.73(kg CaCO₃/d)의 산도 부하량을 가진다. 또한 표면 및 폐석적치장 경계부에서 지속적인 산소의 유입이 확인되어 폐석적치장내 황화광물이 산화환경에 놓여있다. 황화광물의 산화작용 결과로 현재 산성침출수가 폐석적치장 경계부에서 확인되며, 침출수는 약 30 m³/day의 많은 유량으로 인근 토양 및 수질에 크게 영향을 끼칠 우려가 있다(정영욱 외, 2004).

3. 연구방법

본 연구의 현장 시험은 폐광산의 폐석더미에 설치된 세 개의 관정을 중심으로 실시하였다. Fig. 1에서와 같이 각 관정은 삼각형 모양으로 설치 되어있으며, 각 관정간의 거리는 16~25 m의 거리를 두고 있다. 관정의 직경은 모두 6 cm로 동일하며, 각 관정들은 전 구간에 걸쳐 스크린이 설치되어있다. 시추 주상도에 의하면 각 관정의 상부에서 관정 바닥까지의 깊이는 1번 관정은 6 m, 2번관정은 8.50 m, 3번은 8.10 m이다(박권규 외, 2006). 그러나 2004년 10월에 설치된 관정 하부에는 폐광석이 쌓이기 시작하여 2006년 8월에는 지표면으로부터 1번 관정 4.90 m, 2번 관정은 7.62 m, 3번 관정은 7.20 m 하부에 바다가 존재하였다. 2번 관정을 제외한 1번과 3번 관정은 모두 광산 폐석더미로 이루어진 상부층과 기반암으로 이루어진 하부층에 걸쳐서 설치 되어있다(박권규 외, 2006).

폐석적치장의 수리학적 특성을 고찰하기 위해 수리전도

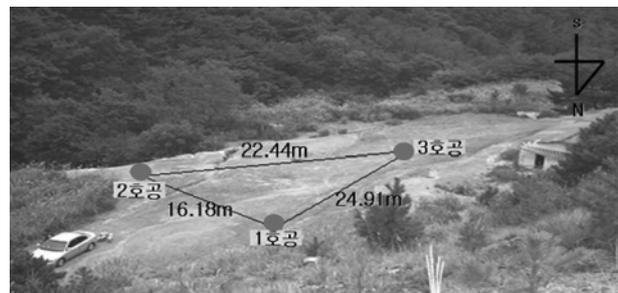


Fig. 1. View of boreholes installed through mine tailings pile at the Imgi abandoned mine.

도를 산출하였다. 대수층의 수리전도도 측정 방법으로는 크게 양수시험(pumping test)과 순간충격시험(slug test)으로 나눌 수 있으며, 양수시험은 지하수 관정에서 양수하는 동안 시간에 따른 수위변화를 측정함으로써 결과 도출이 가능하다. 이 방법은 관정에서의 지하수위가 양수에 의한 지하수위 강하량보다 훨씬 여유가 있어야만 가능한 방법이다. 그러나 풍수기에 지하수면부터 관정바닥까지의 거리는 불과 0.5 m에서 1.6 m에 불과했고, 갈수기에는 1번 관정과 3번 관정에서는 지하수가 존재하지 않았다. 이는 양수시험을 할 수 있는 충분한 수위가 아니기 때문에, 본 연구지역에서는 순간충격시험을 수행하였다. 관정 내의 지하수 깊이 역시 작아 고체 슬러그(slug)를 투입할 수 있는 조건이 아니므로, 일정부피의 물을 순간적으로 주입하여 상승한 지하수위가 강하하는 비율을 측정하는 수두강하시험방법(falling head test)을 채택하였다.

본 연구지역처럼 관정 내 스크린이 불포화대까지 설치되어 있어 상승된 지하수위가 불포화대 및 포화대로 유출되는 경우, Bouwer and Rice방법으로 산출되는 수리전도도가 과대평가될 가능성이 있다고 언급하였다(Bouwer, 1989). 폐광산에 방치된 폐석더미의 경우 대부분의 폐석더미가 불포화대에 위치하여 다른 대수층시험이 불가능하다. 따라서 연구지역과 같이 포화대와 불포화대에 위치한 폐석더미에서 수두강하를 이용한 순간충격시험을 실시하여 순간충격시험 방법의 적용가능성을 검토하고자 하였다.

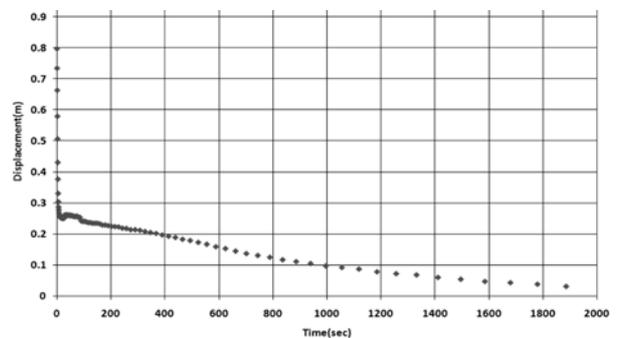
순간충격시험은 풍수기와 갈수기 두 시기에 실시하였고, 각 관정에 대해서 각 시기마다 2회씩 시험을 실시하였다. 풍수기에서는 자연 지하수위에 5L의 물을 주입하여 순간충격시험을 실시하였다. 갈수기에는 1번과 3번 관정에서 지하수가 존재하지 않아 인위적으로 지하수위를 형성시킨 후 순간충격시험을 실시하였다. 지하수가 존재하지 않은 관정에 20L 이상의 물을 충분히 주입한 후, 지하수의 하강속도가 비교적 안정된 시점을 기준으로 5L의 물을 추가적으로 주입하여 수위상승 후 하강하는 지하수위를 측정하였다. 실제로 인위적으로 형성시킨 지하수위는 서서히 하강하고 있겠지만, 순간충격시험을 위해 상승시킨 물기둥의 하강속도에 비해 상대적으로 아주 작기 때문에 위와 같은 실험을 수행하였고, 풍수기의 결과와 비교하여 그 적용성을 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

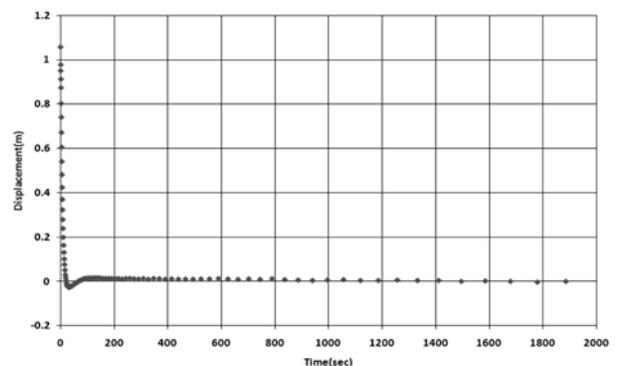
4.1. 수리전도도 산출

풍수기와 갈수기에 수두강하시험을 통해 얻은 자료를

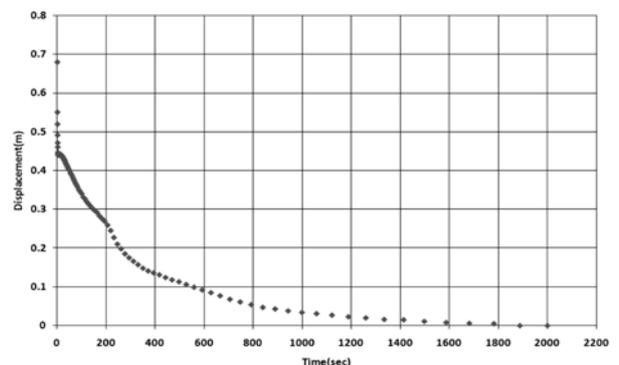
비탕으로 Bouwer and Rice(1976)의 방법에 따라 AQTESOLV 프로그램을 이용하여 수리전도도를 산출하였다. Fig. 2는 풍수기, 그리고 Fig. 3은 갈수기에 실시한 순간충격시험에 대한 시간-수위강하 그래프이다. 본 연구지역은 스크린 주변에 자갈과 같은 어떠한 충전물이 설치되어 있지 않음에도 불구하고, 초기에 1번 및 3번 관정에서 수위가 급격하게 줄어들고 시간이 지남에 따라 완만하게 줄어드는 양상을 보여주었다. 이러한 초기의 급격한 수위변화의 원인은 두 가능성이 있을 수 있다. 첫째, 관정 설치 시 교란으로 인한 고투수성대가 생겼을 가능성, 둘



(a) well 1



(b) well 2



(c) well 3

Fig. 2. Measured head displacement of (a) well 1, (b) well 2, and (c) well 3 with time in the rainy season.

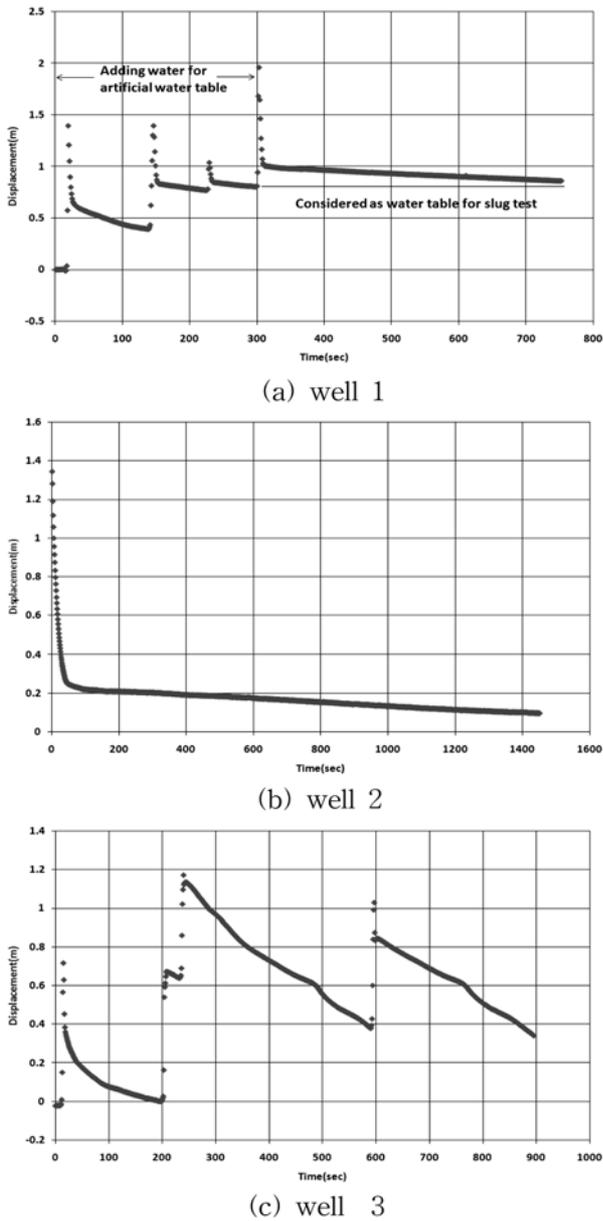


Fig. 3. Measured head displacement of (a) well 1, (b) well 2, and (c) well 3 with time in the dry season.

제 수리전도도의 차이가 큰 두개의 층이 존재하는 경우이다. 시추자료에 의하면 스크린 구간에 2번은 폐석더미만 존재하며, 1번과 3번 관정은 상부에는 폐석더미, 하부에는 기반암이 존재한다(박권규 외, 2006). 풍수기에 실시한 순간충격시험 결과 역시, 1번과 3번 관정에서는 지하수위 변화에 있어 변곡점이 존재하지만, 2번 관정은 그러한 변곡점이 존재하지 않았다(Fig. 2). 이는 1번과 3번 관정에서 관찰되는 지하수위의 변곡점이 고투성대에 의한 것이 아니라 서로 다른 두 지층의 수리적 특성에 의한 것이라 판단된다. 이에 수두강하 그래프의 첫 번째 직선은 폐석더미, 두 번째 직선은 기반암의 수리전도도를 측정하는데 사용하였다.

풍수기에 폐석더미의 수리전도도는 1번 관정에서 $2.23\sim 2.47 \times 10^{-4}$ m/sec, 2번 관정은 $7.76 \times 10^{-5}\sim 1.04 \times 10^{-4}$ m/sec, 3번 관정은 $1.31\sim 2.09 \times 10^{-4}$ m/sec의 범위를 갖는다(Table 1). 기반암인 하부층은 1번 관정에서 $4.4\sim 4.57 \times 10^{-6}$ m/sec, 3번 관정은 $4.53\sim 7.4 \times 10^{-6}$ m/sec의 범위를 갖는다. 2번 관정의 경우 상승된 지하수위가 폐석더미에만 존재하기 때문에 수리전도도를 산출할 수 없었다. 순간충격시험의 경우 가능한 많은 횟수의 실험을 반복 수행하여 오차를 줄여야 한다(이진용 외, 1999). 그러나 본 연구지역에서 순간충격시험을 수행한 후 현장에서 바로 수리전도도를 계산한 결과 그 차이가 비교적 작다고 판단하여, 각 관정에 대해 순간충격시험을 각각 2회 실시하였다.

Fig. 3의 (a)와 (c)의 그래프는 인위적인 지하수위를 형성하기 위한 과정을 보여주며, 수리전도도 계산에는 마지막으로 상승된 지하수위 자료를 사용하였다. 1번 관정의 경우 두 번, 세 번 연속으로 물을 주입함에 따라 지하수위 강하가 점점 완만해지는 것을 확인할 수 있다. 수리전도도 해석에 사용된 네 번째 그래프와 그 전의 세 번째 그래프의 기울기는 거의 차이가 없다. 이는 네 번째 지하수위 상승이 일어나기 전, 지하수위가 어느 정도 안정되었다고 볼 수 있는 자료이다. 그러나 3번 관정의 경우 연속적으로 물을 주입했음에도 불구하고, 지하수위는 안정

Table 1. Hydraulic conductivities measured by the slug test (unit in m/sec)

Well	Test	Mine Tailings		Bedrock	
		Aug. 2005	Feb. 2006	Aug. 2005	Feb. 2006
1	1	2.23×10^{-4}	2.89×10^{-4}	4.40×10^{-6}	2.00×10^{-6}
	2	2.47×10^{-4}	4.64×10^{-4}	4.57×10^{-6}	3.68×10^{-6}
2	1	7.76×10^{-5}	7.30×10^{-5}	-	6.98×10^{-7}
	2	1.04×10^{-4}	1.00×10^{-4}	-	7.94×10^{-7}
3	1	1.31×10^{-4}	1.98×10^{-4}	4.53×10^{-6}	8.01×10^{-6}
	2	2.09×10^{-4}	6.42×10^{-4}	7.40×10^{-6}	9.40×10^{-6}

되지 않았다. 따라서 3번 관정은 마지막 수위강하를 초기 수위로 가정하고 수리전도도를 산출하였다. 갈수기에 폐석더미의 수리전도도는 1번 관정에서 $2.89\sim 4.64 \times 10^{-4}$ m/sec, 2번 관정은 $7.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ m/sec, 3번 관정은 $1.98 \sim 6.42 \times 10^{-4}$ m/sec의 범위를 보였다. 허부층인 기반암의 수리전도도는 1번 관정에서 $2\sim 3.68 \times 10^{-6}$ m/sec, 3번 관정에서는 $8.01\sim 9.4 \times 10^{-6}$ m/sec이다. 폐석더미의 수리전도도가 기반암층의 수리전도도 보다 매우 크게 나타났다. 따라서 풍수기에는 강우에 의한 지하수위상승과 폐석더미의 높은 수리전도도 때문에, 갈수기에 비해 더 많은 산성 침출수가 폐석더미를 통해 유출될 가능성이 있다.

갈수기의 순간충격시험의 경우, 인위적인 안정 지하수위를 형성시킨 후 시험을 시행하였음에도 불구하고, 풍수기의 시험결과와 비교 시 수리전도도는 같은 차수(order)였다(Table 1). 인위적인 지하수위가 잘 형성된 1번 관정의 경우에는 거의 같은 값이 산출 되었다. 갈수기 3번 관정은 인위적인 지하수위가 형성되지 않았고, 그 결과 풍수기 결과와는 가장 큰 차이가 발생하였다. 그러나 3번 관정 폐석더미의 경우에도 그 차이가 3배가 넘지 않았다. 순간충격시험을 통한 수리상수 추정은 같은 대수층에서도 실험 방법과 해석방법에 따라 많게는 4배까지도 결과 값이 달라진다(이진용 외, 1999). 따라서 본 연구에서 풍수기와 갈수기의 시험 결과 차이는 비교적 크지 않다고 볼 수 있어, 지하수위가 지하수관정 아래로 내려갔을 경우 인위적인 지하수위를 형성한 후 시행하는 순간충격시험 방법이 효과적일 수 있을 것으로 판단된다.

풍수기 1번 관정과 3번 관정 내에서 존재하는 포화대의 두께는 약 0.4 m 정도이지만, 이에 반해 2번 관정에서 포화대의 두께는 1.7 m정도로 더 두꺼웠다. 따라서 순간충격시험 시 상승한 지하수(1 m정도 수위상승)가 1번 및 3번 관정보다는 2번 관정에서 더 많은 물이 포화대로 유출된다. 측정된 수리전도도의 결과는 1번 관정과 3번 관정의 값이 2번 관정보다 약 2~3배정도 크게 나타났다(Table 1). 이는 불포화대를 통해 유출되는 양이 많을 경우 Bouwer (1989)가 언급한대로 산출된 수리전도도가 과

대평가되었다. 그러나 불포화대로의 유출이 많은 1번, 3번 관정과 포화대로의 유출이 상대적으로 많은 2번 관정 간의 차이가 많지 않아, 우리나라의 폐석더미와 같은 수리적 조건에서 이 연구의 시험방법이 유용한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

4.2. 폐석두께 추정

본 연구지역은 수리적 특성이 크게 다른 두개의 층으로 구성되어 있으며, Bouwer and Rice방법으로 순간충격시험자료 해석 시 첫 번째 직선은 폐석더미의 수리적 특징 반영의 결과라고 위에서 기술한 바 있다. 이를 바탕으로 순간충격시험 시 관정에서 측정된 초기 자연지하수위와 자동수위측정기(miniTROLL)의 위치, 하강하는 지하수위의 변곡점 위치를 이용하여 폐석더미의 경계층을 추정하였다(Fig. 4). 1번, 3번 관정의 폐석더미 두께 추정에는 갈수기 자료대신 풍수기의 자료를 사용하였다. 이는 풍수기와 달리 갈수기의 경우 인위적인 지하수위를 만들기 위해 연속적으로 주입된 물로 인해 불포화대의 자연적인 특성을 반영하지 않으며, 또한 이로 인해 지하수위 변곡점이 불규칙하게 나타나기 때문이다. 순간충격시험에 의한 폐석더미의 두께는 1번 관정에서 4.12 m, 3번 관정에서 6.41 m로 추정되었다(Table 2). 2번 관정의 경우 갈수기에 자연지하수위가 하강함에 따라 풍수기에는 발생하지

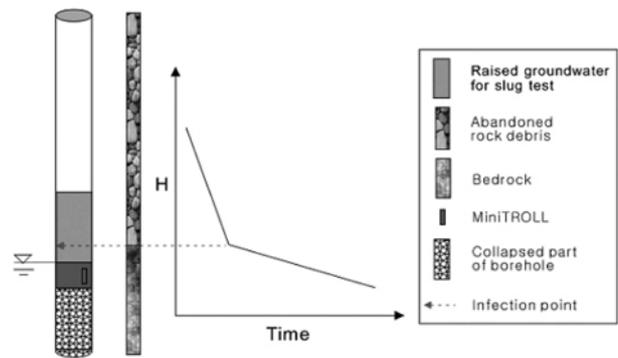


Fig. 4. Estimation of boundary between upper mine tailings and lower bedrock.

Table 2. Estimated depth of mine tailings pile (unit in m)

Well	This study	Core log	By electrical resistivity (Park et al., 2006)
well 1	4.12*	3.5	
well 2	6.4**	mine tailings only	4~7
well 3	6.41*	6.3	

* estimated by the slug test conducted in the rainy season
 ** estimated by the slug test conducted in the dry season

않았던 변곡점이 발생하였다(Fig. 3b). 이는 풍수기에 2번 관정에서의 자연 지하수위가 폐석더미와 기반암의 경계면 위쪽에 존재하였으나, 갈수기에 자연지하수위가 두 층의 경계면 아래로 내려왔기 때문이다. 2번 관정 폐석더미의 두께는 6.4 m 로 추정되었다.

박권규 외(2006)의 연구에 의하면 관정이 설치된 구간의 전기비저항탐사 결과 폐석더미의 두께는 4~8 m라고 추정하였으며, 제시된 시추 결과는 1번 관정은 3.5 m, 3번 관정은 6.3 m이고, 본 연구 결과와는 다르게 2번 관정은 전 구간이 폐석이다. 순간충격시험을 통해 추정한 폐석더미두께 추정 결과는 전기비저항 탐사 결과와 일치하며, 시추자료와는 1번 관정에서 0.6 m 차이가 있으며, 2번 관정의 경우에는 폐석의 경계층을 찾을 수 있었으며, 3번 관정은 결과가 거의 동일하였다(Table 2). 폐석더미에 입자가 큰 층과 입자가 작은 층이 교호로 나타나는데, 이는 폐석을 적치할 때 중력에 의해 분급이 일어나기 때문이다(정영욱 외, 2005). 시추결과에는 이러한 폐석더미 내에서의 분급에 대한 기술은 없으며 단순히 폐석과 기반암으로 분류하고 있다. 따라서 1번과 2번 관정에서의 폐석두께의 차이는 교호로 나타나는 폐석더미의 특성 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

우리나라의 폐광산지역의 폐석적치장은 본 연구지역처럼 불포화대 또는 부분적으로 포화대에 존재하는 경우가 매우 대부분이다. 이러한 경우 폐석더미의 수리시험은 매우 제한적일 수밖에 없어, 이 연구에서는 이러한 수리조건을 갖는 폐석더미를 대상으로 하여 순간충격시험의 적용성을 검토하였다.

연구지역의 수리지질학적 특성을 조사하기 위해 풍수기, 갈수기 두 시기에 순간충격시험을 실시하였다. 순간충격시험 결과, 상부 폐석더미의 수리전도도는 $7.76 \times 10^{-5} \sim 2.47 \times 10^{-4}$ m/sec, 하부 기반암층의 수리전도도는 $4.40 \sim 7.4 \times 10^{-6}$ m/sec로 나타났다. 그러나 폐석더미의 수리전도도는 순간충격시험 시 상승된 지하수위가 불포화대 및 포화대를 통해 동시에 유출되기 때문에 수리전도도가 다소 과대평가되는 경향이 나타났다. 그러나 포화대로의 유출이 많은 2번 관정과 불포화대로의 유출이 많은 1번, 3번 관정간의 수리전도도에 있어 그 차이가 2~3배 정도로 나타났다. 이러한 차이는 비교적 크지 않아, 포화대와 불포화대에 걸쳐 존재하는 폐석더미와 같이 수리시험이 제한되는 경우 유용한 수리시험방법이 될 수 있음을 시사하였다.

갈수기에 자연 지하수위가 관정비대 아래로 하강하기에, 관정에 물을 주입하여 인위적인 지하수위를 형성시킨 후 순간충격시험방법을 실시하였다. 그 결과 풍수기에 실시한 기존의 순간충격시험 방법을 사용한 수리전도도 결과와 유사하였다. 따라서 인위적인 지하수위를 형성시킨 후 순간충격시험을 실시하는 방법이, 불포화대에 위치한 폐석더미의 수리적 특성을 파악하는데 유용한 수리시험방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

수두강하시험 시 지하수위 하강 중에 발생하는 변곡점을 이용하여 폐석더미의 두께를 추정하였다. 폐석더미의 두께는 1번 관정에서 4.12 m, 2번은 6.4 m, 3번 관정은 6.3 m로 예측되었다. 이는 시추결과 및 전기비저항탐사에 의한 폐석두께추정 연구와 비교하였을 때, 비교적 유사하였다. 변곡점을 이용한 경계층 추정은 물리검층과 같이 시추자료의 보조적 검증자료로서 활용가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행된 시험법은 폐석더미가 지하수면 경계 또는 상부에 위치하여, 제한적인 지하수 시험을 수행하여야 하는 경우에 유용할 것으로 판단된다. 또한 시간에 따른 지하수위 하강자료의 변곡점을 활용하여 폐석더미의 두께를 추정하는 방법은 수리전도도 차이가 큰 두 대수층으로 구성된 지역, 특히 폐석적치장과 같이 수리전도도가 큰 지층이 상부에 놓여 있을 경우에만 제한적으로 사용 가능할 것으로 판단된다. 이 연구는 순간충격시험을 불포화대에 위치한 폐석더미에 적용한 초기 수리적 특성 연구로서, 이 방법을 이용하여 폐석더미의 수리적 조사를 수행하기 위해서는 향후 더 많은 적용성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업자원부의 "폐금속광산 토양 및 수질오염 방지대책 연구"의 일환으로 수행되었습니다. 논문에 대해 매우 유익한 심사의견을 주신 익명의 두 분 심사위원들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강민주, 이평구, 염승준, 2006, 세창 폐금속광산 수계에서 미량원소의 지구화학적 거동특성 규명, 자원환경지질, 39(3), 213-227.
- 김정진, 김수진, 김윤영, 2003, 동해탄광 일대 산성광산배수의 지화학적 특성 및 증발잔류물에 대한 광물학적 연구, 자원환경지질, 36(2), 103-109.
- 김지수, 한수형, 윤왕중, 김대화, 이경주, 최상훈, 이평구, 2003,

광양 폐광산의 산성광산배수의 유동경로 및 폐광석 탐지를 위한 지구물리탐사, *자원환경지질*, **38**(3), 123-131.

김지수, 한수형, 최상훈, 이경주, 이인경, 이평구, 2002, 장풍 폐광산의 산성광산배수에 의한 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지하학탐사자료의 상관해석, *지구물리*, **5**(1), 19-27.

박권규, 박인화, 황세호, 신제현, 박윤성, 2006, 폐광산 지역 산성광산 배수 유출탐지를 위한 지구물리탐사: 부산 임기 광산, *한국 지구시스템공학회지*, **43**(1), 35.

박영석, 김종균, 김 진, 장우석, 이기형, 한민수, 2002, 호남탄전지역 폐탄광의 산성광산배수와 하상퇴적물의 환경지구화학적 특성, *자원환경지질*, **35**(3), 241-255.

손치무, 이상만, 김영기, 김상우, 김형석, 1978, 한국지질도 동래-월래도폭(1 : 50,000) 및 설명서, 자원개발연구소.

이민성, 강필중, 1964, 한국지질도 양산도폭(1 : 50,000) 및 설명서, 국립지질조사소.

이진용, 이강근, 정형재, 배광욱, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정 및 문제점 분석, *한국지하수환경학회*, **6**(1), 14-22

정영욱, 고정석, 김재곤, 김통권, 김한승, 민정식, 박권규, 박성원, 신성천, 신제현, 안주성, 염승준, 이정화, 이진수, 이평구, 임길재, 전치완, 지상우, 최용석, 홍성규, 홍영국, 2005, 대도시 지질환경오염개선 관리기술 연구(부산지역), *한국지질자원연구원*, p. 141-143.

정영욱, 김통권, 박성원, 김재곤, 이평구, 염승준, 황세호, 박권규, 임길재, 고정석, 김유숙, 민정식, 신성천, 신제현, 이정화, 이진수,

전치완, 최용석, 홍성규, 홍영국, 조호영, 진명식, 지상우, 2004, 대도시 지질환경오염개선 관리기술 연구(부산지역), *한국지질자원연구원*, p. 185-204.

지상우, 정영욱, 2005, 산성광산배수로 오염된 지하수 정화용 투수성 반응벽체 반응매질 선정 기초실험, *자원환경지질*, **38**(3), 237-245.

Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity penetrating wells, *Water Resources Research*, **12**, 423-428.

Bouwer, H., 1989, The bouwer and rice slug test - an update, *Ground Water*, **27**(3), 304-309

Collon, C., Fabriol, R., and Bues, M., 2006, Modeling the evolution of water quality in abandoned mines of theLorraine Iron Basin, *Journal of Hydrology*, **328**, 620-634.

Hangen, E., Gerke, H.H., Schaaf, W., and Hutt, R.F.. 2005, Assessment of preferential flow processes in a forest-reclaimedLignitic mine soil by multicell sampling of drainage water and three tracers, *Journal of Hydrology*, **303**, 16-37.

Schemel, L.E., Cox, M.H., Runkel, R.L., and Kimball, B.A., 2006, Multiple injected and natural conservative tracers quantify mixing in a stream confluence affected by acid mine drainage near Siverton, Colorado, *Hydrol. Process*, **20**, 2727-2743.

Winters, W.R. and Capo, R.C., 2004, Ground water flow parameterization of an Applalchian Coal Mine Complex, *Ground Water*, **42**(5), 700-710.