

백색침출수 용출지역의 수리지질학적 고찰

김만일^{1*} · 박영규¹ · 김울영¹ · 김양빈¹ · 용환호¹ · 지원현²

¹한국농어촌공사 환경지질처, ²한국광해관리공단

Hydrogeological characteristics of a seepage area of white leachate

Man-Il Kim^{1*}, Young-Gyu Park¹, Eul-Young Kim¹, Yang-Bin Kim¹, Hwan-Ho Yong¹,
and Won-Hyun Ji²

¹Office of Environmental Geology, Korea Rural Community and Agriculture Corporation

²Mine Reclamation Corporation

본 연구는 백색침출수 용출구간에 대한 수리지질학적 특성을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 지표지질조사를 통해 지질특성을 분석하였으며, 백색침출수 용출구간의 지질구조를 파악하기 위한 전기비저항탐사와 시추공 공내촬영을 통해 암반의 불연속면 분포특성을 분석하였다. 연구지역 내 백색침출수 용출지점을 중심으로 갈수기와 풍수기로 구분하여 강우사상에 따른 지하수위 변동을 시추공별로 측정하였다. 이상의 연구결과에서 백색침출수 용출구간에서의 전기비저항 특성은 비용출구간에 비해 상대적으로 낮은 값으로 나타났으며, 이는 심부에 파쇄대 내지 석회암 공동대의 존재를 확인하였다. 이들 지역에서의 강우사상에 따른 지하수위 변동을 지하수 유형분석을 통해 분석한 결과, 강우가 직접적으로 지하수 함양에 영향을 주는 것으로 파악되었다. 또한 일평균 유출량과 강우량의 상관관계 분석에서 0.83~0.97로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

주요어 : 백색침출수, 전기비저항, 불연속면, 지하수위 변동

This study assessed the hydrogeological characteristics of a seepage area of white leachate. The geological characteristics of the leachate were determined by a surface survey, and an electrical resistivity survey and borehole image processing system (BIPS) were applied to estimate the distribution of discontinuities, to assess the geological structure of the seepage areas. Fluctuations in groundwater level within boreholes were measured during periods of precipitation in the dry and wet seasons. The results show that electrical resistivity is lower in the seepage section than in non-seepage sections. The distribution of fracture zones and limestone cavities was inferred from the logging data and BIPS data. Variations in groundwater level and groundwater recharge, related to rainfall events, show the direct effect of rainfall events during the rainy season. We obtained a strong relationship between seepage amount and rainfall (correlation coefficients of 0.83-0.97).

Key words : White leachate, Electrical resistivity, Discontinuity, Fluctuations in groundwater level

서 론

국내의 광산개발은 1960년대부터 1980년대 후반까지 석탄 및 금속 광산개발이 활발히 진행되어 왔으나 1990년대부터는 사회적 인식, 경제구조의 변화, 환경오염정화 정책 추진 등으로 인해 지속적으로 휴폐광산이 증가하는 추세이다(박용하와 서경원, 2005). 대부분의 휴폐광산의

경우 특별한 광해방지대책의 수립이 이루어지지 않은 상태로 방치됨에 따라 갱도와 채굴갱 내에서 황철석(FeS_2)과 같은 황화광물이 산소와 물이 반응하여 pH가 4이하로 낮아지면서 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)가 생성되어 광산지역의 주요 환경오염 발생 원인으로 작용하고 있다. 주요 오염현황은 산성광산배수가 중금속을 용해하고 그 유동성을 원활하게 하여 휴폐광산 하부부에

*Corresponding author: mikim916@paran.com

위치한 토양, 지표수와 지하수를 오염시키는 것으로 알려져 있다(지상우 등, 2003; 이평구 등, 2004; 강미아, 2007; 안주성 등, 2009; 강동환 등, 2010; Lindsay, 1979; Shelp et al., 1995; Brugam et al., 1996).

이러한 현실적 상황을 고려하여 휴폐광산 주변지역을 대상으로 한 산성광산배수 저감 및 정화를 위한 연구들이 다수의 연구자들에 의해 실내와 현장에서 다각도로 진행 중에 있다(정명체, 2004; 양성일 등, 2008; 이민희 등, 2009; 최승원 등, 2010; 용보영 등, 2010; Waybrant et al., 1998; Fiset et al., 2003; Kevin et al., 2005). 일반적으로 광산배수처리에는 물리화학적 처리법과 기계적 처리법인 적극적인 처리법(active treatment)과 자연친화적 처리법인 수동적 처리법(passive treatment)으로 구분하여 적용되고 있다(김경만 등, 2008; Gazza et al., 1996; Shelp et al., 1995, 1996; Neculita and Zagury, 2008). 이러한 처리법들은 이미 발생된 광산배수를 정화하기 위한 목적으로 현재 적극적으로 적용되고 있다.

광산배수 발생의 근본적인 원인이 갯내수와 대기에 노출된 암석의 지하화학적 반응에 의해 발생되기 때문에 산성 광산배수 뿐만 아니라 황화현상(yellow-boy)과 백화현상(chlorosis)도 휴폐광산 주변 지역에서 다수 발생되고 있다. 이와 같이 오염원이 갯도 외부로 유출되어 하천으로 유입되면서 문제를 발생시키고 있으며, 휴폐광산 주변의 지질학적 불연속면인 단층, 파쇄대 등지에서도 천부 지하수 유출의 영향으로 극부적인 황화 내지 백화현상이 발생되고 있다.

많은 폐광산 지역에서 과거에는 없었던 갯내수가 유출되는 현상을 보이거나, 광산에 의한 원인이라고 단정하기 어려운 원인 불명의 백화현상들이 많이 발생되고 있다. 이에 대한 원인을 파악하고 예측하여 제어함으로써 오염 발생 및 확산의 사전 예방기술개발이 필요하다.

이러한 지하수에 기인한 황화 내지 백화현상은 지하수가 지표로 유출되면서 주변 암석과 장기간 화학적으로 반응하여 생성되는 것으로 토양 및 수질오염 방지대책 수립이 필요하다. 일반적으로 대상지역의 지질구조와 지하수가 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 수리지질학적 측면에서의 해석방법이 요구된다.

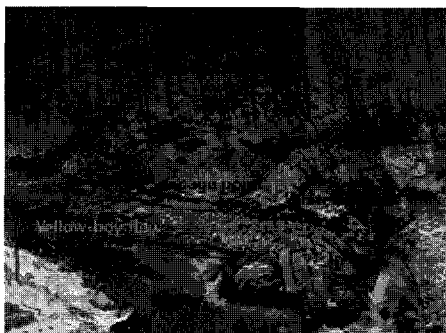
휴폐광산 지역에서 발생되고 있는 산성광산배수의 메커니즘과 효율적 처리방법에 대한 연구는 상당한 수준까지 정립이 되어 활용되고 있으나 지질과 지하수 등과 같이 수리지질학적 측면에서 폐광산의 오염발생 메커니즘에 관한 연구는 다소 미흡한 수준이다.

본 연구는 광산지역 하류부에서 발생되고 있는 백색 침출수 용출현상을 수리지질학적 특성을 고려하여 분석하고자 한다. 이를 위해 전기비저항탐사와 시추공 공내촬영(BIPS)을 수행하여 백색침출수 용출구간 내에서의 지질학적 불연속면의 분포 특성을 파악하고, 백화현상이 지하수 용출에 기인한다는 점을 고려하여 연구지역의 강우상상과 지하수위 변동과의 관계에 대한 상호연관성 분석하였다. 또한 백색침출수 용출에 따른 백화현상 발생구간에 대한 수리지질학적 특성도 함께 분석하였다.

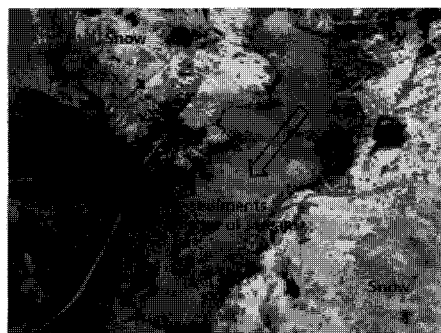
지형 및 지질특성 분석

지표지질조사

연구지역은 강원도 태백시 소릿골 지역으로 상류부에 동해탄광(1989년 폐광), 하류부에 함태탄광(1993년 폐광)이 위치해 있으며 이들 폐탄광을 곡류하는 하천 주변으로 백화현상이 지속적으로 발생되었던 지역이다(Fig. 1). 백색침출수의 용출은 동절기보다는 하절기에 집중적으로 발생하는 것으로 조사되었다. 이로 미루어보아 백색침출수



(a) Groundwater seepage of white leachate around the ground surface



(b) White sediment in stream water and on the stream bed

Fig. 1. Overview of chlorosis in stream water in the study area.

용출에 크게 영향을 주는 요인으로 강우량과 밀접한 관계를 갖는 것으로 추정된다.

연구지역의 지질은 고생대의 대석회암층군과 평안계 및 중생대 백악기의 지층으로 이루어져 있다. 평안계 지층은 석탄기의 만항층과 금천층, 페름기의 장성층, 함백산층, 도사곡층, 고한층, 트라이아스기의 동고층의 순으로 구분되며, 평안계 장성층이 주요 함탄층으로 2-3배의 탄층이 협재되어 있다(국립지질조사소, 1965). 연구지역인 소릿골 주변은 대석회암층의 노두가 발달되어 있는 것으로 조사되었다.

이 지역에 발생하는 백화현상의 원인 및 백색침출수의 유동통로 특성을 규명하기 위하여 지형특성, 선형구조, 광역지질 특성을 분석하였다.

이 지역은 전형적인 산악지형으로 함백산(1,572.9 m), 된봉(963.3 m)등의 고봉이 다수 발달하며, 북서-남동 방향의 주 능선을 중심으로 동서, 남북 방향의 가지 능선들이 분기되어 있는 양상을 보인다. 수계는 소도천과 황지천이 합류하여 1차 수계를 이루며, 이를 중심으로 수지상의 계곡이 발달되어 있다(Fig. 2).

선구조 분석

지질구조는 북북서-남남동의 대규모 우수향 주향이동

단층인 함백산 대단층이 소릿골과 인접하여 발달하고 있으며, 유사한 운동학적 특성을 보이는 북동-남서 방향으로 일련의 단층 역시 소릿골 북쪽을 중심으로 발달해 있다. 이러한 지질구조 특성을 명확히 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 음영기복도를 작성하여 비교 분석하였다.

이 결과, 북북서-남남동(Set 1), 북동-남서(Set 2), 서북서-동남동(Set 3) 방향의 선형구조가 우세하게 발달되어 있는 것으로 나타났다. Set 1 선형구조는 연구지역에 발달하는 대규모 주향이동 단층인 함백산 대단층과 일치 내지 아평행하게 나타났으며, 빈도수에 비해 연장성이 양호한 특성을 보였다. Set 2 선형구조는 빈도수와 연장성 모두 우수한 편이며 지층 방향 및 주 절리 방향과 아평행하는 것으로 나타났다.

이러한 분석결과로 볼 때 Set 2 선형구조는 암중 경계 내지 함백산 대단층의 2차 파쇄 또는 가지단층과 관련되어 발달했을 가능성이 높을 것으로 추정된다. 이에 반하여 Set 3 선형구조는 빈도수 및 연장성이 모두 불량하며 지질요소와의 뚜렷한 연관성은 갖지 않는 것으로 나타났다.

불연속면 분석

소릿골에 나타나는 백색침출수 용출현상과 지질학적

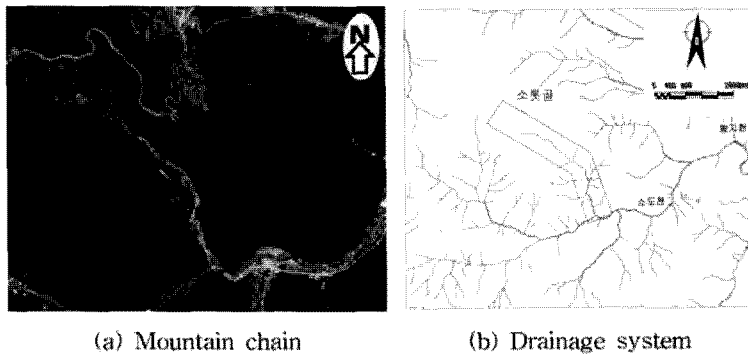


Fig. 2. Characteristics of mountain areas and the drainage system in the study area.

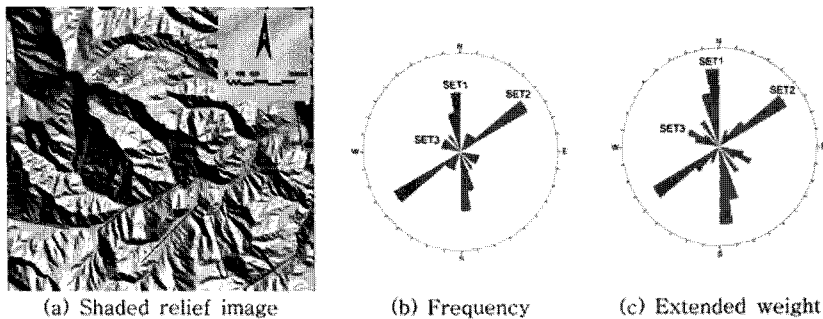


Fig. 3. Characteristics of lineaments in the study area.

특성과의 연관성을 규명하기 위해 구성 암종, 단층, 층리, 절리 등과 같은 지질요소에 대한 구체적인 자료를 분석하였다.

불연속면의 특성 분석을 위해 획득한 층리, 절리, 단층 등의 구조요소 자료에 대한 평사투영해석을 수행하여 연구지역에 발달한 지질구조의 기하학적 특성을 파악하였다. 조사된 층리자료에 대해 평사투영해석을 수행한 결과, 극점이 공간적으로 산재하고 있으나 평균적으로 N59°E/36°NW의 방향성을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 4).

여기서 극점의 변화 양상이 부분적으로 일정한 경향성을 갖는 것으로 나타났으며, 이는 층리면이 습곡에 의해 교란되어 있음을 의미하는 것으로써 π -pole 해석을 통해 구한 광역적인 습곡축의 방향이 26°/012°인 것으로 나타났다. 이러한 습곡축의 방향은 지표지질조사 시 관찰된 소 습곡의 습곡축과 비교적 일치하는 것을 인지할 수 있었다.

측정된 절리자료를 이용하여 평사투영을 수행한 결과에서는 절리의 기하학적 분포가 비교적 다양한 방향성을 갖고 있는 것으로 분석되었다. 이들 절리 중 유사한 방향을 보이는 절리양상을 정리해 보면 N50°E/69°SE(J1), N52°W/68°SE(J2), N81°E/66°SE (J3)와 같이 3조의 주요 절리양상을 확인하였다(Fig. 5).

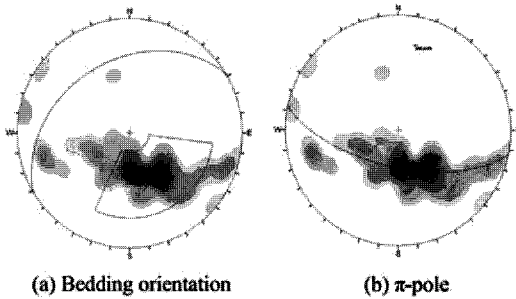


Fig. 4. Result of a stereographic analysis of bedding structures in the study area.

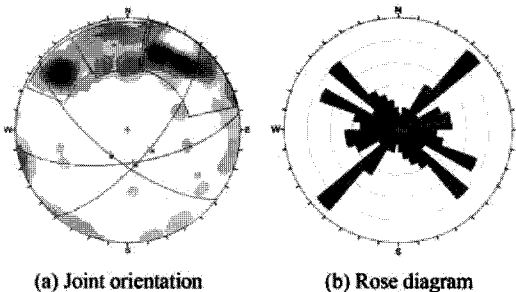


Fig. 5. Result of a stereographic analysis of joint sets in the study area.

지질구조 및 수리지질 특성 분석

전기비저항탐사

연구지역 내에서 광산배수 유동은 고생대 대석회암층 군에 발달한 석회공동을 따라 유동하는 것으로 추정되어 석회공동을 따라 유동하는 지하수 흐름방향에 대해 직각이 되도록 전기비저항탐사 측선을 배열하여 이들 공동의 발달 양상을 파악하였다. 또한 시추공을 통한 시추공 공내촬영(BIPS)과 수압시험을 함께 실시하여 백색침출수 유동경로 및 지하수 유동특성을 함께 파악하였다.

이를 위해 탐사장비는 미국 AGI사의 STING R1과 자동측정 장비인 SWIFT 장비를 사용하였다. 측선의 전극간격을 5m로 하여 총 28개인 140m를 기본 측선으로 하였으며, 측선과 연속하는 roll along 방식의 측정으로 총 280 m를 측정하였다. 시추공 공내촬영 장치는 미국 Mount-Sopris사의 MGX-II 장치이며, 검층기는 가시광선을 시추공 내벽에 주사하여 취득된 시추공 벽체의 광학영상(optical image)을 토대로 암반의 제반 상태를 파악할 수 있는 록셈부르크 ALT사에서 개발된 OBI-40 Probe를 사용하였다.

조사 측선범위는 전기비저항 분포양상을 파악하기 위하여 지하수 예상 유동경로와 백색침출수 용출현상이 발생하는 구간을 고려하여 4개의 측선을 설치하여 측정하였다(Fig. 6). 특히 지반의 저항을 측정하여 전극 설치에 따른 오차요인을 제거함으로써 현장에 측정된 전기비저항값의 신뢰도를 확보할 수 있도록 하였다.

4개의 측선 중 Line #1과 Line #4 측선에 대한 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 이 전기비저항 탐사결과에서 연구지역 전반적으로 낮은 전기비저항대와 높은 전기비저항대가 교대로 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 이중 낮은 전기

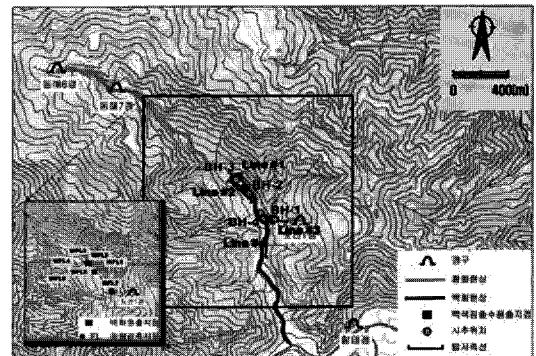
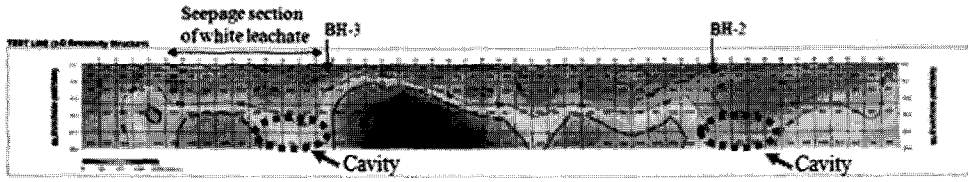
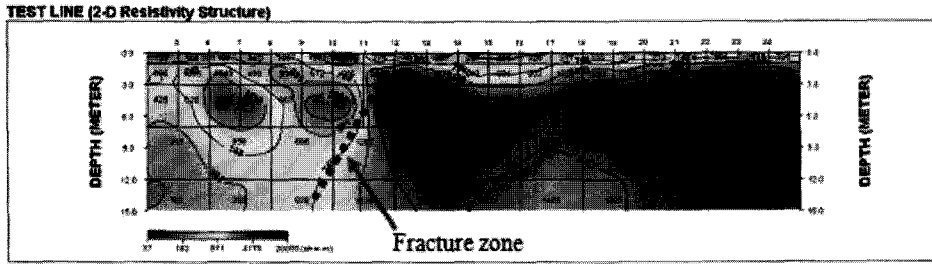


Fig. 6. Location map of electrical resistivity lines, boreholes, and outflow measurement points.



(a) Survey result for Line #1



(b) Survey result for Line #4

Fig. 7. Distribution of electrical resistivity at the seepage point (Line #1) and non-seepage (Line #4) point of white leachate.

비저항대는 석회암 공동대 내지 사질층과 같은 미고결층의 특성을 반영하는 것으로 추정된다. 특히 Fig. 7(a)에서 백색침출수 용출이 발생하는 구간은 상부 15m 구간까지 낮은 전기비저항 분포를 보이고 있으며, 이 구간은 BH-2 시추공이 위치한 주변 지역으로 시추코아 분석에서 14.1m 부근까지 토사, 자갈 및 전석으로 이루어진 사질층이 깊게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한 석회암 공동대가 나타난 구간인 BH-3 시추공 주변 지역에서는 심도 25m까지 연장된 낮은 전기비저항대를 확인되었으며, 시추공 공내촬영 결과와도 비교해 보았을 때 파쇄대가 22~28m 부근에 분포하는 것으로 파악되었다.

또한 Fig. 7(b)에서와 같이 백색침출수 용출지점에서 떨어진 Line #4 지점은 석회암이 치밀하게 분포하는 지점에서 전기비저항 분포가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 신선한 석회암이 넓게 분포해 있어 백색침출수 용출이 발생할 수 있는 연약대가 존재하지 않는 것으로 판단되지만 일부 구간에서 전기비저항의 경계부를 형성하고 있는 것으로 보아 파쇄대의 존재 가능성이 있으며, 이를 통해 백색침출수의 용출이 가능할 것으로 추정된다. 대상 축선을 중심으로 주변지역의 지표지질조사를 수행 결과, 백색침출수의 용출 현상은 발견되지 않은 점이 특징이다.

Line #1 축선구간 중 백색침출수 용출 구간에 BH-3 시추공을 35m 심도까지 굴착하였다. 시추공 공내촬영 결과, 지층상태는 시추심도 3m까지는 층층적이 분포하며, 3.0~9.2m 구간은 공동이 발달한 석회암층이 발달되어 있는

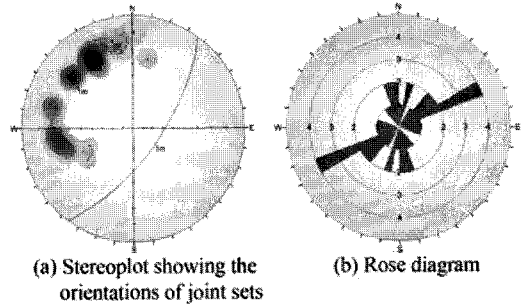


Fig. 8. Result of stereographic analysis of discontinuities in the BH-3 borehole.

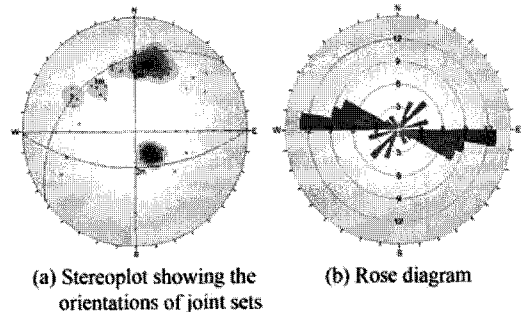


Fig. 9. Result of stereographic analysis of discontinuities in the BH-4 borehole.

것으로 나타났다. 석회암 용식지층이 뚜렷하게 나타나는 구간은 4.4~4.7m, 8.2~9.2m 구간으로 나타났다. 시추공

공내촬영 구간 내에서 인지된 불연속면의 개수는 총 22개로, 평균적인 방향은 63°/126°으로 분석되었다.

Line #4 측선구간 주변의 BH-4 시추공은 심도 25.0m 까지 굴착 설치하였으며, 시추공 공내촬영은 1.6~24.7m 구간에서 실시하였다. 이 구간 내에서 인지된 불연속면의 개수는 총 88개로 이에 대한 방향성 분석 결과, 2조의 불연속면군이 확인되었다. Set 1과 Set 2의 평균방향은 각기 29°/323°과 57°/179°이며, 불연속면의 집중도를 나타내는 Fisher K값은 Set 1이 63.93, Set 2가 6.07로 해석되었다. 시추 코아 분석을 통해 지층상태를 살펴보면 시추심도 5.8m까지는 층적층이 나타나며, 5.8~24.7m 구간은 비교적 신선한 연암층이 발달되어 있다. 시추공 공내촬영에서 인지된 것과 같이 뚜렷한 대규모 공동대는 관찰되지 않았다. 이는 전기비저항 탐사의 결과 중 Line #4 측선과 비교적 유사한 결과를 갖는 것을 파악할 수 있었다.

결과 및 토의

지질구조에 따른 백색침출수 용출 평가

백색침출수 용출지점은 석회암층인 막골층 주변부에서 다수 발생되었다. 이들의 전반적인 층리방향은 북동 주향에 북서 방향으로 경사지는 양상을 보이고 있다. 하지만 용출지점 부근에서 북서 주향에 북동 방향으로 경사지는 양상으로 변하고 있어 습곡구조가 발달하고 있음을 보여주었다. 층리면의 평사투영해석 결과와 추정된 소습곡축을 비교해 볼 때, 습곡축은 북북동 방향으로 기울어져 있는 것으로 해석되었다.

백색침출수 용출지점 주변에 발달한 절리의 방향은 북동-남서 방향과 북서-남동 방향이 우세하며, 이중 일부 절리를 따라 용식작용이 발생된 흔적이 부분적으로 관찰

되었다. 특히 백색침출수 용출지점과 인접해 있는 Fault 1, Fault 2, Fault 3, Fault 4가 발달하고 있으며, 이중 Fault 2와 Fault 4의 단층면을 따라서 지하수가 유출되고 있는 양상을 확인하였다(Fig. 10).

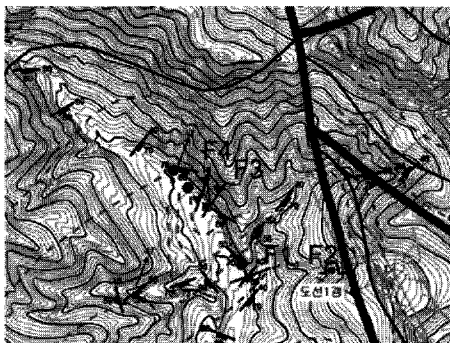
본 연구지역에서 조사된 불연속면 분석결과인 Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 대표 층리 및 절리방향이 북동 및 남동 방향이 우세한 결과와 일치하였다. 이는 백색침출수의 용출지점이 단층의 존재, 지하수 유동경로와 상관성이 높은 것으로 추정되며, 전기비저항탐사 결과에서도 백색침출수 용출지점이 위치한 주변의 전기비저항값이 상대적으로 낮게 나타나 사질층, 파쇄대 내지 석회암 공동대 등과 같이 지질 연약대의 분포와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 지표지질조사에서도 절리에 의한 용식작용의 흔적이 관찰된 점과 백색침출수 용출현상이 대규모인 점을 고려해 볼 때 이러한 연약대 존재는 지하수의 유동 및 지하수의 용출 등을 지배하는 수리적 원인으로 작용하기 때문에 백색침출수의 용출이 가능할 것으로 판단된다.

수리학적 파쇄대 특성 평가

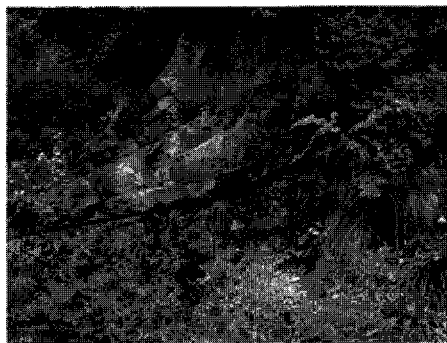
암반 파쇄대 내에서의 수리전도도 산정을 위한 수압시험을 통해 시추공에 대한 수리전도도를 측정된 결과, 평균

Table 1. Hydraulic conductivity estimated by a water pressure test for each borehole.

Borehole	Hydraulic conductivity (cm/sec)	
	Range	Average
BH-1	$4.71 \times 10^{-5} \sim 8.26 \times 10^{-5}$	6.59×10^{-5}
BH-2	$7.41 \times 10^{-4} \sim 1.69 \times 10^{-3}$	1.22×10^{-3}
BH-3	$6.45 \times 10^{-5} \sim 1.82 \times 10^{-3}$	6.59×10^{-5}
BH-4	$3.57 \times 10^{-5} \sim 6.09 \times 10^{-4}$	1.96×10^{-4}



(a) Seepage point of white leachate



(b) White leachate seepage around fault 4

Fig. 10. Seepage point of white leachate along a fault plane.

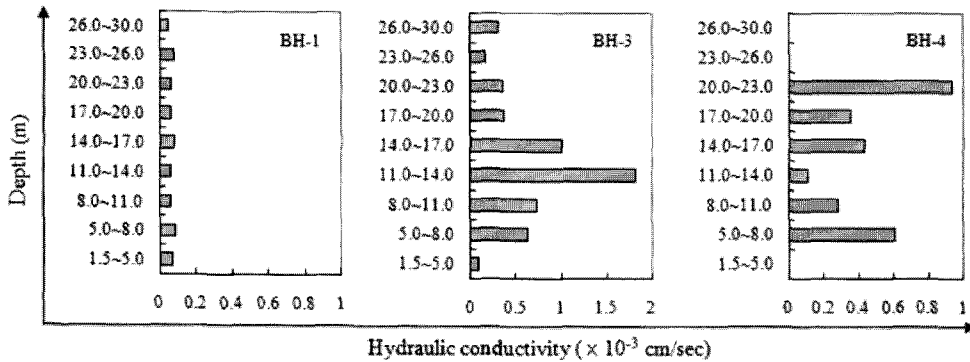


Fig. 11. Variations in hydraulic conductivity with depth, as measured in water pressure tests.

수리전도도는 Table 1과 같다.

Fig. 11에서 석회암 공동대가 발달된 것으로 확인된 BH-3 시추공의 경우 3~12 m, 28~32 m 구간의 수리전도도가 $8.86 \times 10^{-5} \sim 7.38 \times 10^{-4}$ cm/sec로 예상보다 낮게 산출되었다. 이는 공동대가 전반적으로 토사 등의 사질토에 의해 충전되어 있고, 인지된 석회암 공동의 연장성 및 연결성이 양호하지 않기 때문으로 추정된다.

시추공 공내촬영 결과에서 BH-3 시추공의 공동대 구간은 3.0~9.2 m, BH-4 시추공은 전구간에 걸쳐 전반적으로 연암층으로 관찰되었으나 평균 수리전도도의 경우 BH-3 시추공보다 크게 나타났다(Table 1). 시추코아 분석 및 시추공 공내촬영 분석 결과를 토대로 볼 때 주된 지하수 흐름을 지배하는 파쇄대 내지 석회암 공동대 유무가 지하수의 흐름을 지배하겠지만, 대상 연구지역의 지질이 석회암 등의 다공질의 매질로 구성되어 있는 것을 감안할 때, BH-4 시추공과 같이 공극이 큰 연암층이 존재할 경우 지하수의 흐름을 크게 좌우할 것으로 판단된다. 즉 시추코아 및 시추공 공내촬영 분석의 경우 육안에 의한 분석이기 때문에 지하수 흐름과 같이 macro 내지 micro scale의 공극 연결성을 고려할 경우 대수층의 수리전도도는 큰 차이를 갖는 것으로 볼 수 있다.

이와 같이 Fig. 7(a)의 전기비저항탐사 결과를 토대로 볼 때, BH-3 시추공이 위치한 주변구간은 백색침출수 용출이 발생하는 지점으로 이 구간에 대한 전기비저항값은 주변 지역보다 낮은 값을 보였다. 이는 지질구조가 지하수의 함양 및 유동경로의 역할을 할 수 있는 사질층 내지 석회암 공동대가 존재해 있기 때문인 것으로 파악되었다.

강우 침투수에 따른 백색침출수 용출특성을 파악하기 위하여 2008년 6월부터 10월까지 시추공에 자동수위계(DIVER, Schulumberger Water Service)를 설치하여 조사

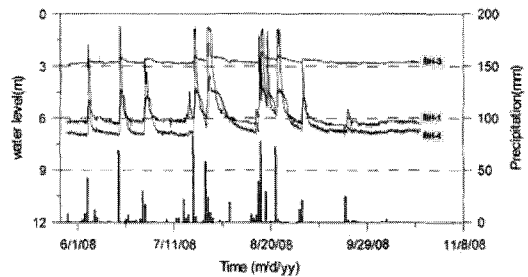
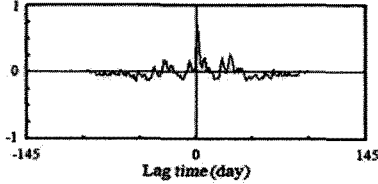
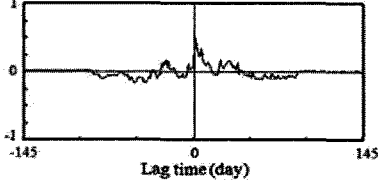
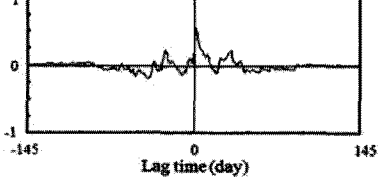


Fig. 12. Variations in groundwater level induced by precipitation in the study area.

기간 동안의 강우사상에 따른 지하수위 변동을 분석하였다(Fig. 12). 시추공에서 측정된 지하수위 변동은 BH-1과 BH-4 시추공이 강우발생시점을 기준으로 약 2.5~4.3 m의 지하수위의 변화를 확인하였으나, BH-3 시추공의 지하수위는 강우에 의한 영향이 작은 것을 알 수 있다. 이러한 지하수위 변동에 차이를 갖는 원인으로는 시추공의 지형 고도 차이와 지하수 시스템의 연결성과 관련된 것으로 볼 수 있다. BH-1과 BH-4 시추공이 위치한 지점의 지질구조와 BH-3 시추공이 위치한 지질구조가 단층 내지 파쇄대로 단절되어 서로 다른 지하수 시스템을 이루고 있어 동일한 강우사상에서도 지하수위 변동의 차이를 갖는 것으로 판단된다.

이러한 지하수와 강우사상의 상호연관성을 파악하기 위하여 Table 2와 같이 지하수위와 강우량의 교차상관관계 분석하였다. 이 결과에서 BH-1, BH-3, BH-4 시추공의 교차상관계수는 0.714, 0.552, 0.552로 높게 나타났으며 지연시간은 시추공 모두 1일로 산정되었다. 이와 같은 분석결과를 바탕으로 지하수위 변동유형(한국수자원공사, 2004)을 분류해 보면, 연구지역의 지하수 변동유형은 1-B

Table 2. Classification of groundwater variation type using a cross-correlation analysis of groundwater level and precipitation.

No.	Cross-correlation diagram	Variation type of groundwater level		
BH-1		1-B		
			Time-lag (day)	1
			Maximum	0.714
			Start time	May 28, 2008
BH-3		1-B		
			Time-lag (day)	1
			Maximum	0.552
			Start time	May 28, 2008
BH-4		1-B		
			Time-lag (day)	1
			Maximum	0.552
			Start time	May 28, 2008
	Final time	Oct. 20, 2008		

유형에 속한다.

I-B 지하수 변동유형은 연구지역의 지하수위가 강우에 대해 매우 민감한 반응을 가지고 있으나, 인위적인 양수의 영향은 거의 받지 않는다는 것을 의미하는 것이다. 지표지 질조사에서 설명한 바와 같이 백색침출수의 용출은 동절기에는 발생하지 않았으며, 강우가 발생하는 하절기에 백색침출수가 용출되는 것으로 조사되었다. 이와 같이 백색침출수의 용출이 지하수에 의한 영향보다는 직접적인 강우에 지배를 받는 것으로 판단되며, 지하수 변동유형과 유사한 결과를 갖는 것으로 나타났다.

강우사상과 백색침출수 용출 관계

Fig. 6에서 보는 바와 같이 백색침출수의 용출양상을 정확히 파악하기 위해 용출지점에서의 유량관측을 목적으로 웨어(weir)를 사용하여 2007년 8월부터 2008년 10월까지 총 7회에 걸쳐 백색침출수 유출지점 주변을 중심으로 7개 지점에 대하여 유출량을 측정하였으며, 이들 측정 결과를 토대로 강수량과 유출량의 관계를 Fig. 13에 도시하였다.

연구지역에서 7개 관측지점에서의 일평균 유출량의 총합은 갈수기인 3월~5월에 2,000 m³/day 미만, 풍수기인 6월~9월에 3,000 m³/day 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 관측기간 중 최대 갈수기인 5월말의 갭내수 유출량은 동해6갱과 동해7갱 915 m³/day, 함백갱 2,813 m³/day

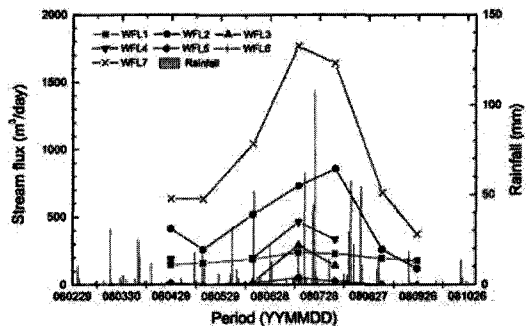


Fig. 13. Variations in the seepage amount of white leachate induced by rainfall.

Table 3. Relationship between seepage amount and rainfall.

Observation point	WFL-1	WFL-2	WFL-3	WFL-4	WFL-5	WFL-6	WFL-7
Correlation coefficient	0.83	0.91	0.91	0.95	0.94	0.97	0.85

이며, 풍수기 중 8월말의 유출량은 동해6갱과 동해7갱 1,249 m³/day, 함백갱 4,302 m³/day로 측정되었다.

일평균 유출량과 강우량의 상관성을 분석해 본 결과, Table 3과 같이 상관계수가 0.83~0.97로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 갭내수 및 백색침출수 용출량이 시기에 따라 증가 내지 감소하는 것은 풍수기와 갈수기를

반영하는 강수사상에 의한 계절적인 영향에 크게 지배를 받는 것으로 판단된다.

결 론

연구지역은 고생대 대석회암층군과 평안계 및 중생대 백악기의 지층으로 이루어져 있으며, 백색침출수 용출지점은 대석회암층의 습곡부에 위치해 있다. 이들 지역은 북동-남서 방향의 절리가 우세하며 절리면을 따라 용식지형이 발달되어 있다. 특히 북북서-남남동 방향 대규모 주향이동단층과 이에 분기되는 북동-남서, 북서-남동방향의 가지단층이 넓게 발달되어 있어, 이러한 지층 습곡부와 단층 인접구간인 지질학적 약대구간에서 백색침출수의 용출이 발생되고 있는 것으로 파악되었다.

백색침출수 용출구간의 지질구조를 파악하기 위하여 전기비저항탐사 및 시추공 공내촬영을 통해 파쇄대 및 석회암 공동대의 존재를 확인하였으며, 이를 통한 지하수의 유동 및 백색침출수 용출특성은 강우사상과 연관시켜 분석하였다. 지질학적 약대 구간에서 백색침출수의 용출은 갈수기(3월~5월)보다는 풍수기(6월~9월)에 우세하게 발생되었으며, 이는 강우의 침투로 인한 지하수 함양과 백색 침출수 용출현상이 밀접한 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

이러한 연구결과를 토대로 볼 때, 백색침출수 용출 저감을 위해서는 지하 용식지형으로 유입되는 광산배수를 대규모 관정 등을 통해 양수하여 처리하는 방안, 석회석 등을 백색침출수 유동경로에 충전하는 방안 등을 고려해 볼 수 있다. 또한 백화현상을 발생하는 광산배수를 용출지점에서 모아 처리하는 방안도 함께 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문에 대한 검토의견과 세밀한 부분까지 수정사항을 제시하여 주신 익명의 심사위원분들에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

강동환, 권병혁, 유훈선, 김선옥, 2010, 일광 폐광산 갱내에서 유래된 산성광산배수의 중금속 유출특성, 지질공학, 20(1), 79-87.
 강미아, 2007, 산성광산배수로 인한 환경오염도 조사, 지질공학, 17(1), 143-150.
 국립지질조사소, 1965, 서벽리 지질도폭 설명서 1:50,000, 25p.

김경만, 허원, 백환조, 2008, 황산염환원균 고정화 담체를 이용한 산성광산배수 처리, 자원환경지질, 41(1), 57-62.
 박용하, 서경원, 2005, 휴폐금속광산지역의 토양오염관리 방안, 한국환경정책평가연구원, 정책보고서, KEI 2005 WO-03, 89p.
 안주성, 임길재, 정영욱, 2009, 거풍 폐광산 폐기물 적치장 지하수 및 침출수 수질의 시기별 변화, 자원환경지질, 42(3), 207-216.
 양성일, 강동환, 김태영, 정상용, 김민철, 2008, 달천 폐광산 지역에서 광미적재지와 기반암 지하수의 수질특성 연구, 자원환경지질, 41(1), 47-56.
 용보영, 조동완, 정진웅, 임길재, 지상우, 안주성, 송호철, 2010, 광산배수 자연정화시설 내 버섯퇴비의 중금속 흡착능력 평가, 자원환경지질, 43(1), 13-20.
 이민희, 이예선, 양민준, 김종성, 왕수균, 2009, 폐광산 주변 중금속 오염 농경지 토양 복원을 위한 석회(CaO)와 석회암(CaCO3)의 안정화 효율 규명, 자원환경지질학회지, 41(2), 201-210.
 이평구, 조호영, 염승준, 2004, 폐광산지역의 오염특성 조사와 평가를 위한 지구화학적 접근방법, 자원환경지질학회지, 37(1), 35-48.
 정명채, 2004, Successive Alkalinity Producing System (SAPS)을 이용한 폐 석탄광의 산성광산배수 처리, 대한환경공학회지, 26(11), 1204-1210.
 지상우, 고주인, 강희태, 김재욱, 김선준, 2003, 광산배수 오염평가기준 도출에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 382-385.
 최승원, 장윤득, 김영훈, 김정진, 2010, 산화제 NaOCl와 H2O2를 이용한 광산배수 정화에 관한 연구, 자원환경지질, 43(1), 21-31.
 한국수자원공사, 2004, 국가 지하수관측망 운영관리 최적화 방안 수립 연구, 266p.
 Brugam, R.B., Gastineau, J. and Ratcliff, E., 1996, The neutralization of acidic coal mine lakes by additions of natural organic matter: a mesocosm test, International Journal of Rock Mechanics and Mining, Science & Geomechanics Abstracts, 33, 324-352.
 Fiset, J.F., Zinck, J.M. and Nkinamubanzi, P.C., 2003, Chemical stabilization of metal hydroxide sludge, Proceeding of the X International Conference of Tailings and Mine Waste, Vail, CO, USA, AA Balkema, 329-332.
 Gazea, B., Adam, K. and Kontopoulos, A., 1996, A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage, Minerals Engineering, 9, 23-42.
 Kevina B., Hallberg, D. and Johnson, B., 2005, Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine, Science of Total Environment, 338, 53-66.
 Lindsay, W. L., 1979, Chemical equilibria in soils, John Wiley and Sons, New York, Chichester, 449p.
 Neculita, C.M. and Zagury, G.J., 2008, Biological treatment of highly contaminated acid mine drainage in batch reactors: long-term treatment and reactive mixture characterization, Journal of Hazardous Materials, 157, 358-366.
 Shelp, G. S., Chesworth, W. and Spiers, G., 1995, The amelioration of acid mine drainage by an in situ electrochemical method; Part 1: Employing scrap iron as the sacrificial anode. Applied Geochemistry, 10, 705-713.
 Shelp, G.S., Chesworth, W. and Spiers, G., 1996, The

amelioration of acid mine drainage by an in situ electrochemical method; Part 2: Employing aluminium and zinc as sacrificial anodes, *Applied Geochemistry*, 11, 425-432.

Waybrant, K.R., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J., 1998, Selection of reactive mixtures for use in permeable reactive walls for treatment on mine drainage, *Environmental Science and Technology*, 32, 1972-1979.

2010년 9월 27일 원고접수, 2010년 12월 7일 게재승인

김만일

한국농어촌공사 환경지질처
437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 30
Tel: 031-420-3740
Fax: 031-421-4814
E-mail: mikim916@paran.com

박영규

한국농어촌공사 환경지질처
437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 30
Tel: 031-420-3728
Fax: 031-421-4814
E-mail: pygms@ekr.or.kr

김을영

한국농어촌공사 환경지질처
437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 30
Tel: 031-420-3738
Fax: 031-421-4814
E-mail: eykim@ekr.or.kr

김양빈

한국농어촌공사 환경지질처
437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 30
Tel: 031-420-3721
Fax: 031-421-4814
E-mail: ybkim@ekr.or.kr

용환호

한국농어촌공사 환경지질처
437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 30
Tel: 031-420-3726
Fax: 031-421-4814
E-mail: yonghwanho@ekr.or.kr

지원현

한국광해관리공단
110-727, 서울시 종로구 청진동길 30 석탄회관빌딩
Tel: 02-3702-6564
Fax: 02-3702-6599
E-mail: won-hyun@hanmail.net