

# 산성암반배수에 의한 절취사면 구조물의 피해 현황과 평가

## Damage Conditions and Assessment for Cut Slope Structures due to Acid Rock Drainage

이 규 호<sup>1</sup> Lee, Gyoo Ho

김 재 곤<sup>2</sup> Kim, Jae Gon

박 삼 규<sup>3</sup> Park, Sam-Gyu

이 진 수<sup>4</sup> Lee, Jin-Soo

전 철 민<sup>5</sup> Chon, Chul-Min

김 탁 현<sup>6</sup> Kim, Tack Hyun

### Abstract

The aim of this study was to investigate damage conditions of cut slope structures due to acid rock drainage (ARD) and to assess the acid production potential of various rocks. Acid rock drainage is produced by the oxidation of sulfide minerals contained in coal mine zone and mineralization belt of Pyeongan supergroup and Ogcheon group, pyrite-bearing andesite, and Tertiary acid sulfate soils in Korea. Most of cut slopes producing ARD have been treated with shotcrete to reduce ARD. According to the field observations, ARD had an adverse effect on slope structures. The corrosion of shotcrete, anchors and rock bolts and the bad germination and growth diseases of covering plants due to ARD were observed in the field. The concentration of heavy metals and pH of ARD from cut slope exceeded the environmental standard, indicating a high potential of environmental pollution of surrounding soil, surface water and groundwater by the ARD. According to acid base accounting (ABA) of the studied samples, hydrothermally altered volcanic rocks, tuffs, coaly shales, tailings of metallic mine had a relatively high potential of acid production but gneiss and granite had no or less acid production potential. It is expected that the number of cut slopes will increase hereafter considering the present construction trend. In order to reduce the adverse effect of ARD in construction sites, we need to secure the data base for potential ARD producing area and to develop the ARD reduction technologies suitable.

### 요 지

산성암반배수가 발생하는 지역을 중심으로 사면구조물의 피해현황과 환경오염 실태를 파악한 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 산성암반배수가 발생하는 절취사면은 대부분 슛크리트공법으로 처리하고 있으며, 산성암반배수가 사면구조물의 안정성에 악영향을 미치고 있다. 둘째, 슛크리트는 산성암반배수에 의해서 현저하게 열화되어 가고 있으며, 용수발생량이 많은 곳은 배면공동이 발견되는 경우도 있다. 셋째, 절취사면에서 산성암반배수가 발생하는 곳은 국부적으로 불안정하고, 이를 보강하기 위하여 앵커와 록볼트를 사용하고 있으나 강산성암반배수에 의해 부식될 우려가 크다. 넷째, 식생공의 경우 산성암반배수가 잔디 씨앗의 발아 및 성장에 악영향을 미치고 있어 일부 지역에서는 생석회를 사용하여 산성암반배수를 중화시키고 있으나 근본적인 대책은 되지 못하고 있다. 다섯째, 황철석의 풍화로 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하여 부근 토양, 지하수와 하천수를 오염시킬 개연성이 매우 크다. 산성암반배수의 발생 가능성을 암석유형별로 평가한 결과 편마암, 화강암의

1 정희원, 한국지질자원연구원, 지질환경재해연구부 박사후연구원 (Member, Geological & Environmental Hazards, KIGAM)

2 한국지질자원연구원, 지질환경재해연구부 선임연구원 (Geological & Environmental Hazards, KIGAM, jgkim@kigam.re.kr)

3 정희원, 한국지질자원연구원, 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Geotechnical Engrg., KIGAM)

4 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 책임연구원 (Geological & Environmental Hazards, KIGAM)

5 한국지질자원연구원, 지하수지열연구부 선임연구원 (Groundwater & Geothermal Resources, KIGAM)

6 충남대학교 지구환경과학부 석사과정 (Dept. of Geology & Earth Environmental Sciences, Chungnam Univ.)

경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변질을 받은 화산암, 응회암, 탄질셰일, 금속광산 폐석시료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다. 따라서 토목건설공사과정에서 빈번히 발생될 것으로 예상되는 사면절취에 의한 암반산성배수에 대비하여 발생개연성이 있는 지역에 대한 지반정보의 확보 및 대책기술의 개발이 요구되고 있다.

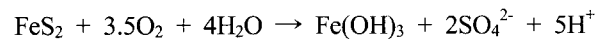
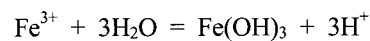
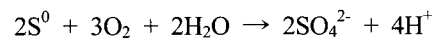
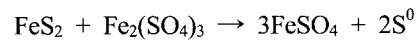
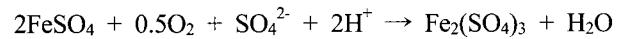
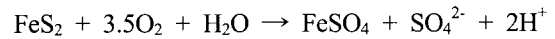
**Keywords :** Acid rock drainage (ARD), Acid sulfate soil, Cut slope, Damage, Pyrite, Slope structure

## 1. 서론

산성배수는 발생하는 매체에 따라 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)와 산성암반배수(Acid Rock Drainage, ARD)로 대별된다. 우리나라의 경우 AMD는 탄화대 및 광화대가 분포하는 탄광(유재영과 Coleman 2000; 김정진과 김수진 2002; 정영욱 2004), 금속(최선규 등 2004; 추창오 등 2004) 및 비금속 광산(박맹언 등 2000; 염승준 등 2002)지역에서 주로 발생하고 있으나, ARD는 황화광물을 함유한 전국의 화산암 지역, 제3기층의 특이 산성토 지역 등에 걸쳐 널리 발생되고 있다. 국내에서 산성배수에 대한 인식은 1980년대부터 많은 광산들이 폐쇄되면서 폐갱으로부터 산성광산배수가 유출되어 주변 하천을 심각하게 오염시키기 시작하면서 사회적인 관심과 염려가 높아져왔다. 이에 따라 AMD와 관련된 연구가 본격적으로 수행되었으며, 현재 AMD 처리기술 등이 개발되어 실용화되고 있다. 한편, 최근 들어 사회기반시설의 확충으로 국토의 동서 및 남북방향으로 도로 및 철도건설이 활발해 지면서 황화광물을 포함하고 있는 지층을 빈번하게 절토하게 되고, 이로 인하여 ARD가 발생하는 건설현장이 증가하고 있다.

암석 내에 존재하는 황화광물의 기원은 퇴적물의 속성작용, 유황을 많이 함유한 열수와 암석과의 반응, 열수로부터 직접침전 등 다양한 지질작용으로부터 유래된다. 황화광물은 생성조건에 따라 다양한 광물종이 있으며, 주 구성 성분은 황과 여기에 결합된 금속 원소들이다. 이 중 황은 주로 -2 또는 -1가, 금속 원소는 주로 +1 또는 +2가를 갖는다. 이와 같은 황화광물 구성 원소의 산화수는 외부와의 물질 교류가 차단되고, 온도와 압력 등의 조건에 큰 변화가 없는 한 안정된 상태로 유지된다. 그러나 토목건설, 광업활동 등에 의하여 지층을 절토하거나 경도를 굴착하게 되면 지표에 노출된 황화광물은 산소를 포함하는 대기 및 용존 산소를 함유하는 물과 접촉하게 되면서 산화 및 용해된다. 우리나라에서

가장 흔한 황화광물은 황철석(pyrite, FeS<sub>2</sub>)으로서 퇴적암과 화산암류에 많이 분포하며, 대부분의 열수광화대에서 흔히 관찰될 뿐만 아니라 평안층군 및 옥천층군의 탄층과 안산암 등의 화산암 내에도 상당량 포함되어 있다. 황철석은 건설현장의 절취사면에 있어서 ARD를 발생시키는 주 원인으로, 다른 황화광물에 비해 산화과정에서 많은 양의 황산을 생성한다. 또한 미량원소로 함유된 중금속이 황철석의 산화과정에서 용출되어 주변지역의 토양, 지표수, 지하수 오염의 원인이 되기도 한다. 황철석의 세부적인 산화 반응은 다음과 같다.



위의 반응 중, (a), (b) 및 (c)는 미생물이 관여하는 반응이고, (d)와 (e)는 순수 무기적인 반응으로 황철석의 산화 반응은 미생물의 작용과 순수 무기적인 반응의 복합과정이다. 황철석의 산화에는 황을 산화시키는 것과 철을 산화시키는 미생물들이 모두 기여할 수 있는데, 이러한 미생물로는 여러 종류가 있으나, 그 중에서 *Thiobacillus ferrooxidans*는 황과 철을 모두 산화시킬 수 있을 뿐만 아니라 비교적 다른 미생물들에 비해 번식력이 강해 배수의 산성화에 가장 크게 기여하는 것으로 잘 알려져 있다(유재영 1995).

절취사면에서 발생된 ARD는 주변지역의 환경오염 뿐만 아니라 쏫크리트(shotcrete), 앵커(anchor) 등 사면구조물의 안정성에도 악영향을 미치고 있어 친환경적인 건설사업에 문제를 야기시키고 있다. 그러나 대부분의 토목 및 택지개발 건설현장에서 ARD에 대한 주변 환경오염 및 사면구조물의 안정성에 미치는 영향에 대

해서 인식이 부족하고, 근본적으로 ARD 발생을 저감시킬 수 있는 적절한 대책공법이 마련되어 있지 않아 주로 절취사면에 물의 접촉을 최소화하기 위한 슛크리트나 배수구를 설치하여 ARD의 발생을 최소화하고 있는 실정이다(김진환 등 2003). 슛크리트공법은 암반사면을 대기와 강우로부터 차단하여 침식을 방지할 목적으로 시공하는 것으로 암반에 균열이 적고 용수가 거의 없는 곳에 적합한 공법이다(全國治水砂防協會 2000). 그러나 국내의 경우 ARD가 발생하는 사면은 대부분 슛크리트 공법으로 시공하고 있으며, 강산성 배수에 의한 사면구조물의 부식 등 심각한 영향을 미치고 있어 ARD를 저감시킬 수 있는 적절한 대책공법 개발이 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 도로건설현장의 절취사면에서 발생하고 있는 ARD의 실태와 이로 인한 사면구조물의 피해현황을 파악하고, 암석 유형에 따라 장차 ARD가 발생할 가능성이 높거나 낮은 지역을 평가하였다. 이를 바탕으로 절취사면에서 발생하는 ARD를 저감시킬 수 있는 대책공법 개발의 연구방향을 설정하고자 하였다.

## 2. 사면구조물의 피해 및 환경 오염 현황

ARD는 강산성(pH<3)이며 높은 농도의 중금속을 함유하고 있다. 그 이유는 절취사면에 흘러나오는 지하수가 황철석과 반응하는데 필요한 산소를 꾸준히 공급해주고 있으며, 산화반응에 요구되는 시간도 충분히 주어지기 때문이다. 따라서 절취사면에서 발생된 강산성 배수는 부식성이 강해 사면구조물의 슛크리트, 그라우팅 주입제, 앵커 및 록볼트의 보강재 등을 부식시켜 노후화를 촉진시키고 있으며, 사면녹화공법에서 사용되는 피복 식물의 발아 및 성장에도 부정적인 영향을 미치고 있다. 그 외에도 ARD가 주변 생태계 및 경작지에 유출됨으로서 철수산화물의 침전에 의한 경작토양의 오염, 경관 훼손, 수질 악화 등 각종 환경오염 문제를 야기하고 있다.

전국적으로 ARD의 발생원인이 되는 황철석은 고생대 평안충군과 옥천충군 지층, 중생대 백악기 화산암, 신생대 제3기 퇴적암과 화산암 등에서 많이 산출된다(그림 1). 평안충군 지층은 영월, 태백 등지에서 탄질세

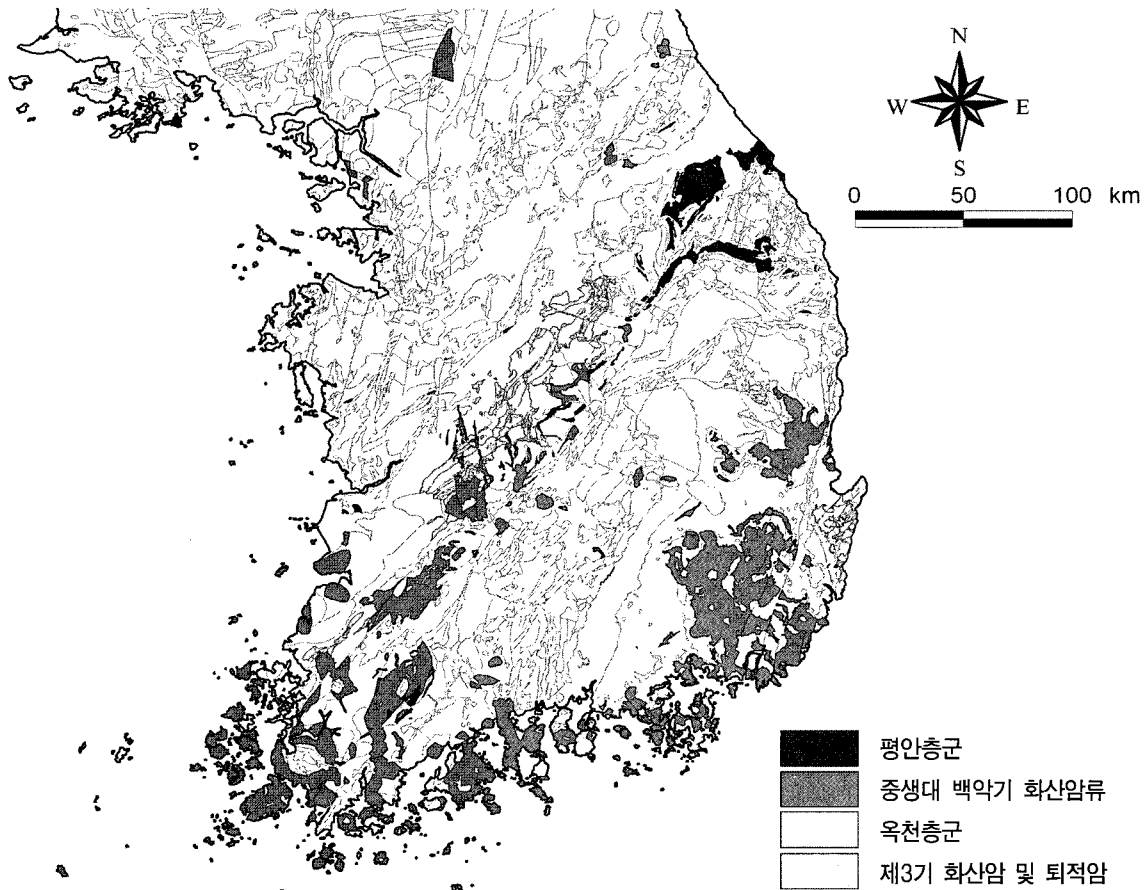


그림 1. 황철석을 포함하는 암석의 분포도

일, 무연탄층과 같은 함탄층에서 숙성작용으로 생성된 황철석을 다량함유하고 있다. 옥천층군 지층은 영동, 괴산, 금산, 추부 등지에서 이질암 기원의 천매암질암과 부분적으로 점판암, 탄질셰일에 황철석을 포함하고 있으며, 신생대 제3기의 화산암과 해성퇴적암에서도 미립의 황철석이 관찰된다. 그 외에도 선캄브리아기의 경기육괴에 해당하는 퇴적기원의 혼성 편마암 지역에서 여러 시기의 조구조운동으로 형성된 단층을 통해 열수작용에 의해서 황철석 광화대가 생성된 곳도 있다. 산성암 반배수에 의한 사면구조물의 피해 현황을 요약하면 다음과 같다.

## 2.1 절취사면의 불안정성

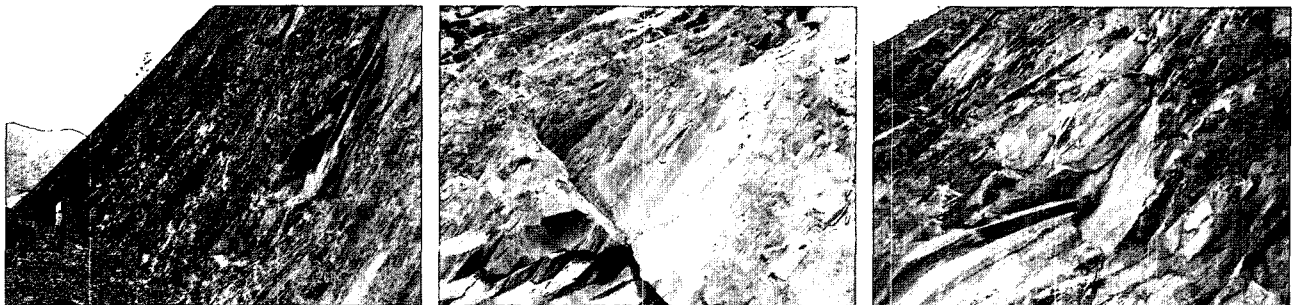
황철석을 다량 함유하고 있는 지층을 절취할 경우 파쇄대나 절리면을 따라 황철석이 쉽게 산화되어 슬라이드면을 형성하게 되고 이로 인하여 절취사면이 불안정하게 된다. 사진 1은 옥천층군 지층인 천매암질암의 절취사면을 보여주고 있다. 사진 1(a)는 절취사면의 전경을 나타내고 있으며, (b)는 지층에 발달되어 있는 절리면을 따라 황철석의 산화작용으로 슬라이드면이 형성되어 있음을 보여주며, (c)는 황철석의 산화작용으로 불

안정한 암편들이 쉽게 흘러내리고 있어 사면안정성에 악영향을 미치고 있다.

사진 2는 각 암종에 포함된 황철석의 산화작용에 의해 절취사면의 표면이 붕괴되고, 국부적으로 풍화가 진행되고 있는 상태를 보여주고 있다. 사진 2(a)는 국도 사면에 노출된 옥천층군 천매암질암으로 표면이 황철석의 산화작용에 의하여 황색으로 변하여 경관을 훼손하고 있으며, 부분적으로 현저하게 풍화가 진행되고 있음을 보여주고 있다. (b)는 경기육괴의 혼성 편마암으로 구성된 절취사면으로 단층대를 따라 열수작용에 의해 생성된 황철석 광화대가 발달되어 국부적으로 ARD가 생성되고 있으며, 이로 인한 풍화작용으로 사면의 안정성에 영향을 미치고 있다. 또 (c)는 옥천층군의 변성퇴적암으로 사면의 안정성에는 큰 문제가 없지만, 황철석을 포함하고 있는 암반이 상대적으로 현저하게 풍화되고 있음을 보여주고 있다.

## 2.2 슛크리트 및 앵커의 부식

절취사면에서 ARD가 발생하는 암석은 탄질셰일, 천매암질암 등의 변성암으로 구성되어 있으며, 일반적으로 절리 및 균열이 발달되어 있어 사면의 침식을 방지하



(a) 절취사면 전경

(b) 천매암의 절리면

(c) 불안정한 사면

사진 1. 천매암질 암석에 있어서 황철석의 산화작용으로 불안정한 절취사면



(a) 옥천층군 천매암

(b) 경기육괴 혼성편마암

(c) 옥천층군의 변성퇴적암

사진 2. 황철석에 의한 절취사면의 국부적인 풍화작용

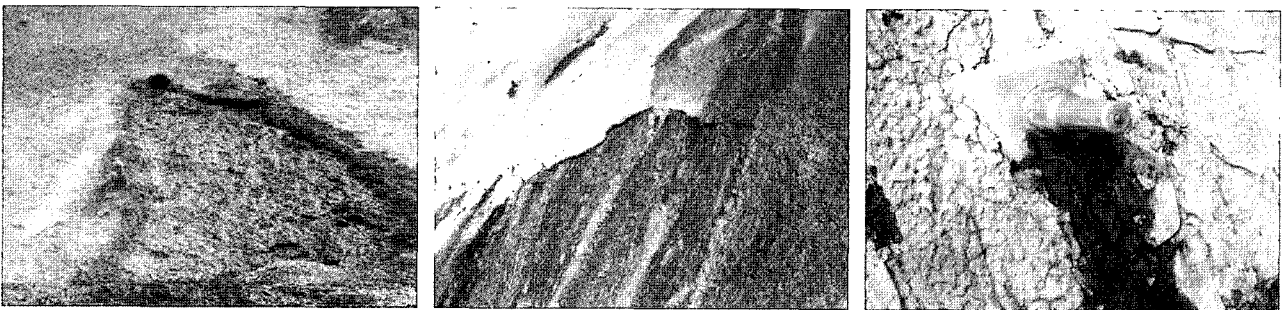
고, 사면을 형성하고 있는 암반의 강도 저하를 막기 위해서 슛크리트공법이 널리 적용되고 있다. 특히 ARD가 발생하는 절취사면에 알칼리성 시멘트 모르타르로 함황철석 암석을 피복하고 대기노출을 차단하여 황철석의 산화에 의한 ARD의 발생을 저감하기 위하여 슛크리트공법을 시공하고 있다. 그러나 이 공법은 용수가 발생하고 균열이 발달한 절취사면에는 콘크리트층과 암반이 밀착되어 일체화되기 어렵기 때문에 미세공간이 발생하게 되고 지하수와 공기로부터 유입된 용존 산소가 피복되지 않은 황철석과 반응하여 사면처리 후에도 ARD가 지속적으로 발생하는 문제점이 있다. 사진 3은 절취사면의 ARD에 의해 슛크리트공 열화와 앵커의 부식을 보여주고 있다.

사진 3(a)는 사면 배수구로부터 흘러나오는 ARD에 의해서 시멘트 모르타르가 부식되고 있는 현상을 보여주고 있으며, (b)는 사면처리 후 일정시간의 경과에 따라 암반과 콘크리트피막이 이완되고 경계면에서 배면공동이 형성된 것을 보여주고, (c)는 절취사면에 시공된 앵커부에 ARD가 발생하고 있으며, 이로 인하여 콘크리트 및 앵커가 부식되면 역지력이 감소될 우려가 있음을 보여주고 있다.

### 2.3 식생공의 식생불량

식생공은 잔디 등의 식물로 피복하여 우수에 의한 침식 및 토사의 유실을 방지하고, 지표면의 온도를 완화하며 식물뿌리가 표토를 결박하여 동결에 의한 붕괴를 억제시키는 작용을 한다. 그러나 무엇보다도 사면녹화로 주변의 자연환경과 조화를 이룰 수 있고, 경제성이 우수하여 흙 사면뿐만 아니라 암반사면에서도 시공하고 있다.

식생공에 의한 사면녹화는 무엇보다도 식물이 잘 자랄 수 있어야 하는데 ARD가 발생하게 되면 씨앗의 발아가 부진하고, 발아가 되더라도 성장이 부진하여 결국은 실패하는 경우가 많다. 사진 4(a)는 절취사면에서 발생하는 ARD로 인하여 식생의 발아 및 성장부진을 보여주고 있다. 사진 4(b)는 신성대 제3기 치층으로 사면에서 발생하는 ARD를 중화시키기 위해서 생석회를 사면위에 뿌리고 식생공을 시공하고 있는 현장을 보여주고 있다. 또 (b)와 (c)는 사면의 ARD로 인한 식생공의 잔디의 씨앗이 발아되지 않거나 성장이 부진한 사례를 보여주고 있으며, 특히 (a)와 (b)는 같은 현장으로서 많은 량의 ARD가 발생하여 생석회에 의한 중화효과가 나타나지 않아 식생의 발아부진으로 인한 식생공의 원활한 적용이 이루어지지 않고 있다. 국내의 많은 현장에서 ARD



(a) 슛크리트 부식

(b) 배면공동 형성

(c) 앵커 부식

사진 3. ARD에 의한 사면구조물의 피해사례



(a) 사면위 생석회 살포현장

(b) 식생의 성장 부진

(c) 식생의 발아 부진

사진 4. 산성암반배수에 의한 식생공의 피해사례

의 발생원인과 인식이 부족하여 사면안정 대책공법을 채택함에 있어 문제점을 가지고 있다.

## 2.4 수질 환경 오염

산성암반배수가 배출되고 있는 6개 지점에서 배수 시료를 채취하여 화학분석을 실시하였다. 시료는 현장에서 온도, pH, EC를 측정하고 PE(polyethylene) 용기에 저장하였으며, 양이온 분석용 시료는 별도로 농질산을 수 방울 첨가하여 pH를 낮춘 후 분석 전까지 보관하였다. 물시료의 음이온은 DX-100(DIONEX Co.)모델 Ion Chromatography로, 중금속을 포함한 양이온은 ICP-AES (JY70PLUS, Jobin Yvon Co.)를 이용하여 분석하였다. 표 1은 배수 시료의 분석 결과로 지하수의 생활용수 이용시 수질기준인 pH 5.8-8.6 범위를 모두 벗어났다. pH가 3.5 이하로 가장 낮은 값을 보이는 SR, CHG, YS 시료의 경우  $SO_4^{2-}$  농도가 947-2753mg/ℓ, Fe는 5710-48500μg/ℓ로 가장 높은 값을 보이는데, 이는 주로 황철석의 산화가 산성배수 발생의 주원인임을 보여준다. 세 시료의 Zn의 농도도 가장 높은 값인 1150-3450μg/ℓ로 Fe와 밀접한 상관관계를 보이는데 이는 황철석 내부에 포함되어 있거나 흔히 공존하는 황화광물인 침아연석(ZnS)이 풍화될 때 용출된 것으로 생각 된다. Al은 최대 1620μg/ℓ

로 생활용수 수질기준의 5배, Fe는 최대 160배, Mn은 YS시료의 경우 26200μg/ℓ로 최대 80배 이상까지 기준치를 초과하기도 한다. 기준치를 초과하는 중금속은 황철석의 풍화로 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하기 때문이다. 따라서 고농도의 중금속을 함유한 산성배수가 계속 생산, 유입될 경우 연구대상 지역 부근 지하수와 하천수의 수질을 오염시킬 개연성이 매우 크다.

## 3. 산성암반배수 발생 가능성 평가

### 3.1 평가 방법

전국에 걸쳐 절취사면에서 산성배수의 발생현황을 조사하고 산성배수의 발생정도에 따라 유형별로 21개의 암석시료를 채취하여 ARD 발생 가능성을 산발생능평가(acid base accounting, ABA)방법에 의해 평가였다(이규호 등 2005). 산발생능평가는 1) 산발생능(acid production potential, AP), 2) 산중화능(neutralization potential, NP)을 구한 후, 두 값의 차이인 3) 순산발생능(net acid production potential, NAP)을 구하거나(NAP = AP - NP), 4) 두 값의 비(NP/AP ratio)를 계산함으로써 이루어진다

표 1. 배수 시료의 화학분석 결과

시료명	온도 (°C)	pH	EC (μs/cm)	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca	K	Mg	Na
				(mg/ℓ)							
SR	15.8	2.83	1618.0	0.802	4.674	3.298	947.26	70.8	2.15	29.20	4.34
CHG	19.1	3.12	2640.0	5.820	12.160	0	2752.88	175.0	18.70	140.00	39.20
YS	10.2	3.21	2040.0	17.268	7.888	2.636	1611.83	129.0	6.92	53.60	12.40
HK	24.7	3.68	161.5	0.093	2.521	2.416	67.46	2.06	0.47	3.71	2.89
KB	24.7	3.73	593.0	1.010	7.948	0.687	384.22	38.7	3.46	20.10	6.84
IW	24.5	6.68	699.0	0.189	2.823	0	133.30	12.7	3.89	33.00	6.45
Std.*		5.8-8.5			250						

시료명	Si	Al	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	(μg/ℓ)									
SR	26.10	741.0	4.14	567.0	489.00	5710.0	2970.0	1550.0	115.00	1270.0
CHG	44.10	0	0	320.0	10.50	26500.0	7550.0	1260.0	40.80	3450.0
YS	31.50	969.0	14.1	403.0	35.70	48500.0	26200.0	110.0	74.50	1150.0
HK	7.04	1110.0	10.1	35.7	16.20	671.0	36.2	93.3	5.58	30.5
KB	21.40	1620.0	25.0	235.0	66.50	373.0	1310.0	688.0	44.80	956.0
IW	9.14	4.9	32.0	2.8	2.03	425.0	1450.0	4.6	7.45	7.6
Std.*		300				300	300		100	1500

\*Std. : 지하수의 생활용수 이용시 수질기준(환경부, 2003)

(Sobek *et al.* 1978). 5) 순산발생량(net acid generation, NAG)은 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 이용하여 암석내 황철석을 실제로 모두 산화시켰을 때 발생하는 황산 동량(equivalent kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t)을 구한 값이다.

### 3.2 평가 결과

표 2에 산성암반배수 발생 가능성 평가결과를 제시하였다(이규호 등 2005). 평가 결과 AP은 0.03~351.77(kg CaCO<sub>3</sub>/t)으로 나타났으며 NP은 -14.85~86.25(kg CaCO<sub>3</sub>/t)이었다(이하 단위 생략). NAP가 0 이상의 값을 갖는 시료들은 최대산발생능이 산중화능을 초과하여 ARD의 발생 개연성을 갖고 있다. 이는 다시 AP에 비해서 NP가 현저하게 작은 경우(NAP>100)와 NAP가 100이하인 경우로 나눌 수 있다. 표 2에서 전자를 I군, 후자를 II군으로 세분하였다. NAP가 0 이하의 값을 갖는 시료들은 ARD 발생 개연성이 없는 III군으로 분류하였다. 이를 상세하게 설명하면 다음과 같다.

#### 3.2.1 I군(NAP>100, 대책요구군)

I군은 ARD발생 개연성이 가장 높은 군으로 실험을 통해 구한 NAG값 역시 가장 높았다(62.1-142). 본 연구에서는 암석이 I군에 해당할 경우 현장에서 사면절취 당시에 대책이 요구되는 군으로 분류하였다. KR시료의 경우는 예외인데, 본 연구의 대상 시료 중 가장 높은 NP(86.25)을 갖고 있어 실제 NAG는 3.35의 매우 낮은 값을 보여주었다. 이는 AP 또는 NAP 값이 높은 경우라 하더라도 일정한 값 이상의 NP를 보유하는 경우에는 ARD의 발생이 억제되는 가능성을 암시 한다. 다만 정량적인 기준을 정하기 위해서는 더 많은 시료를 통한 검증이 요구된다. 암석 내에 포함되어 있는 황철석의 산출상태도 중요한 요인으로, KR시료는 육안 관찰시 황철석이 대부분 자형으로 산출되며 입도가 상대적으로 크다(최대 >5mm). 따라서 같은 양의 황철석을 포함하고 있다고 하더라도 미세한 입자가 산점상으로 분포하는 시료에 비해, 공기에 노출되어 산화반응이 일어나는 표면적이 상대적으로 적기 때문에 반응이 더 빨리 종료될 수 있다. YS 시료는 AP가 183.4로 I군 시료 중 낮은

표 2. 산성암반배수 발생가능성 평가 결과

분류	시료명	황 (%)	황철석 (%)	AP	NP	NAP	NP/AP	NAG	암상
				(kg CaCO <sub>3</sub> /t)				(kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t)	
I (NAP>100)	KB	8.89	16.64	277.55	4.3	273.25	0.02	104.891	천매암
	KR	11.27	21.08	351.77	86.25	265.52	0.25	3.348	광미
	YH	6.80	12.73	212.31	-8.85	221.16	-0.04	107.839	천매암
	YS	5.88	10.99	183.38	-6.4	189.78	-0.03	142.139	화강암
	YW	3.23	6.03	100.66	-4.8	105.46	-0.05	62.093	탄질세일
II (100≥NAP≥0)	YJ	4.70	8.80	146.79	62.1	84.69	0.42	75.550	퇴적암
	DK	1.73	3.24	54.10	2.5	51.60	0.05	25.615	천매암
	HB	1.73	3.23	53.89	13.8	40.09	0.26	19.467	점판암
	BK	1.33	2.49	41.62	9.2	32.42	0.22	13.671	화강암
	CH	1.32	2.47	41.20	10.9	30.30	0.26	12.370	이암
	CH4	0.42	0.78	12.95	-11.95	24.90	-0.92	3.359	이암
	HK	0.71	1.33	22.27	-1.6	23.87	-0.07	10.686	천매암
	KK	0.50	0.94	15.69	-7.2	22.89	-0.46	16.844	갈탄층
	YA	0.09	0.16	2.69	-14.85	17.54	-5.53	1.893	갈탄층
	CH3	1.36	2.54	42.45	29.8	12.65	0.70	10.004	이암
	DE	0.28	0.52	8.66	3.45	5.21	0.40	1.068	광미
	CHG	0.03	0.05	0.82	-1.7	2.52	-2.08	0.000	응회암
III (NAP<0)	TB	0.06	0.11	1.87	0.4	1.47	0.21	0.000	탄질세일
	BS	0.90	1.68	28.06	33.4	-5.34	1.19	4.000	흑색세일
	SR	0.07	0.13	2.22	11.15	-8.93	5.03	0.000	화강암
	CP	0.00	0.00	0.03	9.15	-9.12	312.97	0.000	화강암
	KP	0.31	0.57	9.54	26.8	-17.26	2.81	0.000	편마암
IW	0.08	0.14	2.38	24.1	-21.72	10.14	0.000	천매암	

편에 속하나 NAG가 142.1로 본 연구의 대상 시료 중 가장 높은 값을 보인다. YS는 열수변질을 받은 화산암인 안산암 시료로서 육안으로는 쉽게 확인하기 어려울 정도의 미세한 황철석 입자가 산출된다. 따라서 ARD의 생성과 배출이 지속적으로 이루어질 가능성이 매우 높다. 이와 같이 실험실에서 구한 NAP 또는 NAG값만으로 ARD발생 가능성을 평가할 경우 실제 현장에 그 기준을 적용하기에는 문제점이 있다. 따라서 면밀한 지질 조사와 체계적인 시료의 선정이 매우 중요하다.

### 3.2.2 II군( $100 \geq \text{NAP} > 0$ , 사후관리군)

II군은 ARD발생 개연성이 있는 군으로 NAG가 0-75.6의 넓은 범위를 나타낸다. 본 연구에서는 사면절취 후 ARD의 발생 양상에 따라 사후관리가 요구되는 경우로 분류하였다. YJ시료는 야외 관찰시 구조선을 따라 열수 변질작용에 의해 불규칙적인 석영맥이 발달하고 있으며, 일부지역에서는 고품위의 황철석을 수반하고 있다. NAP는 84.7로 II군 시료중 가장 높은 값을 보이며 NAG(75.6)을 통해서도 확인된다. CHG, TB시료는 NAP가 양(+)<sup>1)</sup>의 값을 가지나 현저하게 낮은 AP로 인하여 NAG는 0이었다. 이 경우 ARD가 생성될 가능성은 거의 없다.

### 3.2.3 III군( $\text{NAP} \leq 0$ , 비위험군)

III군은 NP가 NAP보다 커서 ARD발생 가능성이 없는 군이다. BS시료는  $\text{AP} < \text{NP}$ 로서 이론상으로는 ARD 발생가능성이 없으나 AP가 III군 시료 중 상대적으로 높은 값(28.1)을 보이며 실험 결과 NAG가 4의 값을 나타내었다. BS는 상부 함탄층 분포지역에서 산출되었으며, 박층의 세일층과 실트암이 교호하여 서로 호층을 이루며 분포하고 있는 것이 특징이다. 따라서 주로 구조선을 따라 발달한 열극을 통해 물의 침투가 이루어지고 산중화물질의 분포가 국부적으로 제한을 받기 때문에 해석 된다.

### 3.2.4 NP/AP 비에 의한 ARD발생 가능성 평가

일반적으로 NP/AP 비에 따라서 산성배수 발생 가능성을 평가하기도 하는데, 1)  $\text{NP/AP} < 1$  이면 산성배수 발생, 2)  $1 < \text{NP/AP} < 2$  범위이면 발생 가능, 3)  $\text{NP/AP} > 2$  이면 발생 가능성 희박, 4)  $\text{NP/AP} > 4$  이상이면 염기성배수(alkaline drainage) 발생 가능으로 판단한다(Price *et al.* 1997). 총 23개 시료중 18개의 시료가  $\text{NP/AP} < 1$ 에 해당

하여 산성배수 발생 가능성이 높은 위험군에 해당한다. 4개의 시료는  $\text{NP/AP} > 2$ 에 해당하는데 NAG test 결과 모두 0의 값을 보여서 산성배수 발생 가능성이 거의 없는 것으로 확인되었다.

산발생능력 평가 결과와 암석의 종류는 명확한 상관관계를 보여주지 못하므로, 본 연구결과를 가지고 단순히 암석의 종류만으로 잠재적 산발생능력을 분류하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서 조사한 시료만으로 볼 때, 전반적으로 편마암, 화강암의 경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변질을 받은 화산암, 응회암, 탄질세일, 금속광산 광미시료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다.

## 4. 향후 연구 방향

폐광산의 AMD는 절취사면의 ARD와 동일한 기작에 의하여 생성된다. 산성광산배수의 처리에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 산성광산배수의 일부의 사후처리기술과 발생억제기술은 실용화 되어 있다. 산성광산배수의 발생억제공법은 주로 산성광산배수 생성에 관여하는 미생물의 조절과 광미를 대기로부터 격리시키는 매립 혹은 복토공법이 적용되고, 사후처리 기술은 발생된 산성광산배수를 중화제를 이용하여 처리·방류하는 폐수처리공법을 적용하고 있다. 이러한 공법은 절취사면의 특수성 때문에 ARD가 발생하는 절취사면에 직접 적용하기는 어렵다.

따라서 향후 연구는 황철석을 함유한 암석의 표면을 처리하여 표면에 얇은 피막을 형성시켜 산소의 표면접촉을 차단 혹은 저감하여 ARD의 원인이 되는 황철석의 산화를 저감하는 기법의 개발에 주력하고자 한다. 피막형성기법은 전통적인 금속 표면처리기법인 인산 표면코팅기법을 도입·응용한 것으로 부식방지에 탁월한 효능이 입증되었으며, 표면에 철인산염 화합물로 코팅하여 표면의 대기 접촉을 차단함으로써 산화에 의한 부식을 방지하는 기법이다. 황철석( $\text{FeS}_2$ )의 산화는 철의 산화(+2가  $\rightarrow$  +3가)와 유황의 산화(-1가  $\rightarrow$  +6가)로 구별된다. 황철석의 산화는 용존 산소와 표면의 직접 접촉에 의하여 이루어진다. 황철석 표면에서 산화반응은 Fe-site가 S-site 보다 먼저 산화되어 철이 용출되고 다음으로 유황이 산화되어 용출된다. 산화과정에 있는 황철석 표면을 인산염으로 처리하면 표면에 철인산염 화합물이 침전되어 다음과 같은 두 가지 형태의 피막을 형성하게



된다.

표면 Fe-site와 인산의 반응 : 황철석 +  $Fe^{+2} + PO_4^{3-} + H_2O \rightarrow$  황철석 + vivianite coating

용출된 철과 인산의 반응 : 황철석 +  $Fe^{+3} + PO_4^{3-} + H_2O \rightarrow$  황철석 + strengite coating

인산염처리에 의해 생성된 피막은 용존 산소의 황철석 표면 접촉을 차단하여 ARD의 원인이 되는 황철석의 산화를 억제한다. 인산염(Phosphate,  $PO_4^{3-}$ )은 철과 반응하여 용해도가 낮고 안정된 화합물(vivianite,  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ ; strengite,  $FePO_4 \cdot 2H_2O$ )을 형성하는 것으로 알려져 있다(Nriagu, 1972). 피막을 구성하고 있는 Vivianite와 Strengite는 화학적 환경변화에 안정하며 내구성이 있는 철인산염 화합물의 피막을 형성할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

(1) 우리나라에서 발생하는 ARD는 주로 평안층군 및 옥천층군의 탄화대와 광화대, 함황철석 안산암, 제3기층의 해성퇴적암 등으로 국한되어 있다. 이번조사에서 ARD가 발생하는 지역을 중심으로 사면구조물의 피해현황을 파악한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① ARD가 발생하는 절취사면은 대부분 슛크리트와 식생공으로 사면보호공을 처리하고 있으며, ARD가 사면구조물의 안정성에 악영향을 미치고 있다.
- ② 슛크리트는 ARD에 의해서 현저하게 노후화되어 가고 있으며, 용수발생량이 많은 곳은 배면공동이 발견되는 경우도 있다.
- ③ 절취사면에서 ARD가 발생하는 곳은 국부적으로 불안정하고, 이를 보강하기 위하여 앵커와 록볼트를 사용하고 있으나 ARD에 의해 부식될 우려가 크다.
- ④ 식생공의 경우 ARD가 잔디 씨앗의 발아 및 성장에 큰 영향을 미치고 있어 일부 지역에서는 생석회를 사용하여 ARD를 중화시키고 있으나 근본적인 대책은 되지 못하고 있다.

(2) NP/MPA 비에 따라서 산성배수 발생 가능성을 평가한 결과 18개의 시료가 산성배수 발생 가능성이 높은 군에, 4개의 시료는 산성배수 발생 가능성이 낮은 군에 해당하였으며, 암석의 종류와 산발생능력

평가 결과는 상관관계는 뚜렷하지 않았다. 본 연구에서 대상으로 한 시료만으로 볼 때, 편마암, 화강암의 경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변질을 받은 화산암, 응회암, 탄질세일, 금속광산 폐석시료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다. 그러나 시료의 개수가 제한적이기 때문에, 산발생의 위험도를 보다 신빙성 있게 평가하기 위해서는 사면의 정밀한 지질조사를 통해 대표성을 갖는 시료를 채취하여야 한다.

- (3) ARD가 발생하는 절취사면의 배수 시료의 분석 결과 일부 항목이 생활용수의 수질기준을 초과하였다. 이는 주로 황철석의 산화로 인하여 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하기 때문이며, 고농도의 중금속을 함유한 산성배수가 계속 생산, 유입될 경우 주변지역의 토양, 지하수와 하천수의 오염이 우려된다.
- (4) 본 연구는 산성배수 발생저감을 위한 기술개발의 첫 단계로서 산성배수의 암석별 발생 특성을 파악하고 평가하는데 주 목적이 있었다. 향후 연구는 황철석을 함유한 암석의 표면을 처리하여 산성배수 발생의 원인인 황철석의 산화를 근본적으로 저감하는 기법을 개발하는데 주력할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2004년 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술, A 02-07; 도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성기술 개발)에 의하여 실시된 연구의 일부임을 밝히며, 동기관에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

### 참 고 문 헌

1. 김정진, 김수진 (2002), "태백 동해광산일대의 물-광물 반응에 의한 산성광산배수의 지구화학적 특성 변화", *자원환경지질*, 제35권, 제1호, pp.55-66.
2. 김진환, 이종현, 구호분, 박미선 (2003), "산성배수 영향에 의한 도로절토사면 안정성변화 및 환경오염에 대한 연구", *대한지질학회 추계학술발표회 초록집*, p.144.
3. 박맹연, 성규열, 고용권 (2000), "비금속광상의 황화광염대에 수반되는 산성광산배수의 형성과 지질환경의 오염: 동래납석광산 산성광산배수의 형성에 관한 반응경로 모델링", *자원환경지질*, 제33권, 제5호, pp.405-415.
4. 염승준, 윤성택, 김주환, 박맹연 (2002), "동래 납석광산 산성 광

- 석배수의 중화실험: 중금속 거동 특성 규명”, *한국지하수토양환경학회지*, 제7권, 제4호, pp.68-76.
5. 유재영 (1995), “광산 배수의 산성화 및 그에 따른 환경문제”, *대한지질학회지*, 제11회 공동학술발표회, pp.32-55.
  6. 유재영, Coleman, M. (2000), “산성 배수 내 용존 황의 동위 원소 조성: 영동 및 강릉 탄광 사례 연구”, *지질학회지*, 제36권, 제1호, pp.1-10.
  7. 이규호, 김재곤, 이진수, 전철민, 박삼규, 김택현, 고정석, 김통권 (2005), “건설현장 절취사면의 산성암반배수 발생특성과 잠재적 산발생능력 평가”, *자원환경지질*, 제38권, 제1호, pp.91-99.
  8. 정영욱 (2004), “석탄광의 광산배수처리기술 현황 및 전망”, *자원환경지질*, 제37권, 제1호, pp.107-111.
  9. 최석원, 이찬희, 원경식, 김일석 (2001) “청주-상주간 고속도로 예정구간의 회복지역에 대한 지질학적 및 수리지구화학적 특성”, *지질학회지*, 제37권, 제1호, pp.83-106.
  10. 최선규, 박상준, 이평규, 김창성 (2004), “한반도 광상 성인유형에 따른 환경 특성”, *자원환경지질*, 제37권, 제1호, pp.1-19.
  11. 추창오, 이진국, 조현구 (2004), “산화환경하에서 명반석, 슈베르트마나이트의 형성특징과 환경지구화학적 의미: 달성광산”, *한국광물학회지*, 제17권, pp.37-47.
  12. 환경부 (2003), “지하수의 수질보전 등에 관한 규칙”.
  13. 全國治水砂防協會 (2000), “新·斜面崩壊防止工事の設計と實例 - 急傾斜地崩壊防止工事技術指針”. p.302.
  14. Nriagu, J. O. (1972), “Solubility equilibrium constant of strengite”, *Am. J. Sci.* 272, pp.476-484.
  15. Price, W. A., Morin, K., and Hutt, N. (1997) Guidelines for the Prediction of Acid Rock Drainage and Metal Leaching for Mines in British Columbia: Part II - Recommended Procedures for Static and Kinetic Testing. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, pp.15-30.
  16. Sobek, A. A., Schuller, W. A., Feeman, J. R., and Smith, R.M. (1978), *Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils*, EPA report No. 600/2-78-054, pp.47-50.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)