고속도로 건설현장의 산성배수 발생개연성평가 및 피해저감대책: OO고속도로건설현장

이진수¹ · 김재곤^{1*} · 박정식² · 전철민¹ · 남인현¹

¹한국지질자원연구원, ²한국광해관리공단

Assessment and Damage Reduction Strategy of Acid Rock Drainage in Highway Construction Site: OO Highway Construction Site

Jin-Soo Lee¹, Jae Gon Kim^{1*}, Jeong-Sik Park², Chul-Min Chon¹ and In-Hyun Nam¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Korea Mine Reclamation Corporation

Assessment and damage reduction strategy of acidic rock drainage were conducted in a section of OO highway construction site. The geology of the studied section consists of Icheonri sandstone and intermediate to acidic volcanic rocks. Sulfides occur as a disseminated type in sandstone and volcanics which were altered by the hydrothermal solution of granite intrusion. Volcanics and sandstone with a high content of sulfide were classified as a potentially acid rock drainage(ARD) forming rock. The drainage originated from those rocks may acidify and contaminate the surrounding area during the highway construction. Therefore, the drainage should be treated before it is discharged. A slope landslide hazard due to the ARD was also expected and the coating technology was recommended for the reduction of ARD generation as a preemptive measure before reinforcement work for enhancing slope stability such as shotcrete and anchor. According to the ARD risk analysis, those rocks should not be used as cement aggregate, but only to be used as a bank fill material of a filling-up system that allows minimal contact with rainfall and groundwater.

Key words : highway construction, acid rock drainage, damage reduction strategy, coating technology

OO고속도로 건설현장 O공구에 분포하는 암석에 대하여 산성배수 발생개연성을 평가하고 피해 저감대책을 검토하였다. 고속도로건설구간의 지반은 이천리층에 해당하는 사암과 중성내지 산성 화산암으로 구성되어 있으며 이들은 주변의 화강암관입에 수반된 열수 용액에 의해 황화광물을 산점상으로 함유하고 있다. 황화광물의 함량이 높은 화산암과 사암은 산성배수 발생개연성이 높고 중금속(Zn, Pb, As)을 많이 함유한 산성배수가 주변지역으로 유출되어 환경오염을 유발할 개연성이 높은 것으로 나타났다. 건설공사과정중 산성배수가 발생될 개연성이 높은 구역에서 배출되는 배수는 중화 및 중금속 제거처리 후 배수가 이루어져야 하며, 절취면의 안정성 확보를 위하여 산성배수의 발생을 근본적으로 억제할 수 있는 코팅처리기술을 적용한 후 슛크리트, 앵커 등 사면보강공법이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 화산암과 사암은 골재로서 활용이 어려우며 지반성토재로 사용할 경우 지하수와 우수의 접촉을 최소화할 수 있는 성토층의 구조를 갖춘 후 활용하여야 한다.

주요어 : 고속도로건설, 산성배수, 피해저감대책, 코팅기술

1. 서 론

연구대상인 OO 고속도로 O공구의 암석은 황화광물

을 많이 함유한 중생대 백악기 안산암과 퇴적암으로 구성되어 있어 고속도로 건설과정의 지반굴착에 의하여 산성배수가 많이 발생하였던 지역이다. 건설이 진

*Corresponding author: jgkim@kigam.re.kr

행되는 기간 중 공사 일부구간에서 산성배수가 발생하였다. 절토사면과 성토사면을 대상으로 산성배수 발생 개연성 및 현황, 식생성장 상태를 파악함으로써 앞으로의 유사한 건설공사에서 우려되는 산성배수에 대한 피해에 대비하는 방안을 찾고자 한다.

황화광물(sulfides)은 퇴적암, 화성암과 변성암을 포함하는 모든 암석과 현생 퇴적물에 흔히 산출되는 광물로서 퇴적물의 숙성작용에 의하여 만들어지기도 하고, 광화작용 중 열수로부터 침전, 열수와 암석의 반응, 변성작용 등 다양한 지질작용에 의하여 생성된다. 야외에서 관찰되는 황화광물은 방연석(PbS), 섬아연석(ZnS), 황동석(CuFeS₂), 황철석(FeS₂), 유비철석(FeAsS), 자류철석(Fe_{1-x}S) 등이 대부분이다. 이들 중 철과 유황의 화합물인 황철석(pyrite)은 가장 흔한 광물로서 대기와 차단된 상태로 존재하면 안정하나 도로 건설을 위한 암반굴착과 채굴, 퇴적물 준설 등에 의하여 대기에 노출되면 산소와 반응하여 산성배수(acid drainage)를 발생시킨다. 황철석의 산화과정은 다음과 같다(Stum and Morgan, 1995).

황철석의 초기 산화는 반응(1), (2), (3)으로 진행되지만 일정농도 이상의 수소이온(H⁺)이 생성되면 반응(3)이 발생하지 않고 Fe³⁺는 산화제로 작용하여 많은 양의 황철석을 소모시키며 황산을 생성한다[반응 (4)].

황철석의 산화반응에는 산소뿐만 아니라 철의 산화에 관여하는 미생물의 작용이 중요한 것으로 알려져 있다. 미생물들은 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus acidophilus*, *Sulfurlobus acidocaldarius*, *Leptospirillum ferrooxidans* 등이 있다. 미생물작용에 의한 Fe²⁺의 산화는 용존산소에 의한 반응보다 수만에서 수십만 배 높은 것으로 알려져 있다(Kirby *et al.*, 1999; Kock and Schippers, 2006; Nordstrom, 1982).

황철석의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 중화되면서 조암광물중 주로 장석류의 용해도를 증가시킨다.

Fig. 1. Distribution of rocks with high potential of acid drainage(Kim, 2007).

따라서 산성배수는 황화광물로부터 용출된 Fe, 중금속, SO₄²⁻뿐만 아니라 조암광물의 용해과정에서 용출된 다양한 종류의 이온을 함유한다. 일반적으로 산성배수는 높은 농도의 Fe, Al, Mn, 중금속, SO₄²⁻를 함유하는 특성을 가진다(Kim, 2007).

우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석은 평안층군 탄층, 육천층군 변성퇴적암, 중생대 화산암류, 제3기 퇴적암 및 화산암류, 광화대지역 암석이다(Fig. 1).

과거에는 휴폐광산지역의 산성광산배수(acid mine drainage, AMD)가 대표적인 환경오염으로 인식되어 왔으나 최근에는 중장비의 발달로 도로건설이나 택지조성을 위하여 대규모 굴착과 터널공사가 빈번하게 이루어져 이들 건설현장에서 발생하는 산성암반배수(acid rock drainage, ARD)에 의한 피해가 나타나고 있다(Kim, 2007). 산성배수는 다량의 H⁺, Fe, Al, Mn, As 및 유해 중금속 등을 함유하고 있어 토양, 하천 및 지하수의 수질오염뿐만 아니라 강한 산성으로 인해 구조물부식, 식생고사, 암석풍화촉진, 사면안정성 저해 등 다양한 환경적인 문제를 일으킨다(Kalin *et al.*, 2006; Koryak *et al.*, 1972). 산성배수가 주변지역으로 유입되어 중화되면서 산성배수 내에 용해되어 있던 다량의 중금속을 함유한 산화철, 알루미늄화합물 등을 침전시킨다. 특히 하상에 생성된 침전물은 저서생물의 서식공간을 파괴하고 어류의 아가미에 부착되어 질식사시켜 생태계의 교란을 야기한다.

암석이 부식성이 강한 산성배수에 노출되면 조암광물의 용해도가 증가하여 풍화가 촉진된다. 암석의 풍

화는 산을 소모하는 과정으로 산성배수에 노출된 암석은 산성배수를 중화시키면서 용해가 가속화된다(Kim, 2007).

강우 혹은 유출 지하수에 의하여 생성된 산성배수는 건기에 용존 이온의 농도가 증가하면서 암석의 틈과 표면에 수용성 광물을 생성시키고 특히 암석의 틈에 생성된 광물은 켈기로 작용하여 암석의 물리적 풍화를 촉진시킨다. 이러한 산성배수에 의한 암석의 풍화 촉진은 암괴를 이완시켜 사면이 붕괴되는 사고를 유발한다.

또한 산성배수의 영향을 받은 토양은 산성화되고, 식물가용성 중금속, Fe, Mn 및 Al의 농도의 증가로 인해 식물에 독성을 나타내게 되며(Golez and Kyuma, 1997; Hillwood *et al.*, 2006; Muhrizal *et al.*, 2006), 토양의 물리화학적 특성의 변화에 의하여 식생의 성장이 부진하고 고사하게 된다. 산성배수가 발생하는 사면에서 산성배수에 대한 피해저감대책을 수립하지 않고 식생녹화를 실시하는 경우 실패하는 사례가 빈번히 발생한다.

2. 연구방법

2.1. 현장조사 및 시료채취

OO고속도로 O공구의 지반은 중생대 백악기 퇴적암인 이천리층과 안산암으로 구성되어 있다(Son *et al.*, 1978). 이들 퇴적암과 안산암은 불국사 화강암류의 관입에 의한 열수변질작용으로 생성된 황화광물을 많이 함유하고 있다. 따라서 도로건설과정의 지반굴착에 의하여 지표에 노출된 황화광물의 산화에 의하여 건설과정에 산성배수가 발생되어 환경오염, 사면안정성 저해, 식생고사 등의 문제가 야기되어 민원문제가 발생하였다. O공구 내 건설구간은 절토와 절토된 암석의 성토가 반복적으로 이루어졌으며 산성배수에 의한 피해가 발생하였다. 따라서 7개 구역으로 나누어 리트머스시험지를 이용한 배수 pH, 황화광물의 산출, 산성배수의 발생, 식생성장상태를 조사하고 암석 13점과 토양시료 9점을 채취하였다(Table 1).

2.2. 토양특성 분석

채취된 토양시료는 60°C 오븐에서 건조한 후 2 mm 표준망체를 이용하여 2 mm 이하의 입도를 가지는 시

Table 1. Sample list of the studied area

Section	Sample ID	Description
1	1E1-R	Cut slope, rock
	2E1-S	East side embankment slope, soil
2	2E1-R	East side embankment slope, rock
	2E2-S	East side embankment slope, soil
	2E2-R	East side embankment slope, rock
	2W1-S	West side embankment slope, soil
	2W1-R	West side embankment slope, rock
3	3E1-S	East side cut slope, soil
	3W1-S	West side embankment slope, soil
	3W1-R	West side cut slope, rock
4	4E1-S	East side embankment slope, soil
	5E1-R	East side cut slope, rock
	5E2-R1	East side cut slope(lower part), rock
	5E2-R2	East side cut slope(higher part), rock
	5W1-S	West side cut slope, soil
5	5W2-R1	West side cut slope(lower part), rock
	5W2-R2	West side cut slope(higher part), rock
	5W3-R	East side cut slope, weathered rock
6	6E1-S	East side embankment slope, soil
	6W1-S	West side cut slope, soil
	6W2-R	West side cut slope, rock
7	7W1-R	West side cut slope, rock

료를 회수하여 토양특성분석에 이용하였다. 토양 20 g 과 증류수 40 ml(1:2)를 6시간 동안 교반하면서 반응시킨 후 0.45 µm membrane filter로 여과하였다. 여과된 용액의 pH와 EC는 pH-EC meter(Horiba Ltd., D-25)로 측정하였다. 용액의 K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, 중금속의 농도는 ICP-AES(Jobin Yvon, GEOPLASMA JY-70plus)를 이용하여 측정하였으며, NO₃⁻, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻의 농도는 IC(Ion Chromatograph, Dionex DX-120)를 이용하여 측정하였다.

산성배수의 영향을 받은 토양 및 황철석을 많이 함유한 암석기원 토양은 식물가용 Al과 Mn의 함량이 높고 Al과 Mn의 독성에 의하여 식생의 성장이 부진한 경우가 많다. 따라서 성토사면과 절토사면의 식생피복률과 토양의 식물가용 Al과 Mn 함량의 상관관계를 파악하기 위하여 식물가용 Al과 Mn을 분석하였다. 토양의 식물가용 Al함량측정을 위하여 건조토양 5 g과 1 M KCl 25 ml를 원심분리튜브에서 6시간 동안 반응시킨 후 원심분리와 0.45 µm membrane filtration을 이용하여 반응용액을 분리하였다.

토양의 식물가용 Mn함량을 측정하기 위하여 건조토양 1g과 pH5_1N ammonium acetate 25 ml를 원심분리튜브에서 6시간 동안 반응시킨 후 원심분리와 0.45 µm membrane filtration을 이용하여 반응용액을 분리하였다. 반응용액의 Al과 Mn의 농도는 UV-Visible spectrophotometer (Hatch, DR4000)를 이용하여 측정하였다.

토양의 산화망간형태의 망간함량은 dithionite-citrate-bicarbonate 추출용액을 이용하여 토양으로부터 Mn을 추출하고 용액의 Mn농도를 UV-Visible spectrophotometer를 이용하여 측정하였다.

2.3. 암석의 산성배수 발생개연성 평가

채취된 암석시료의 산성배수 발생개연성과 중금속 용출특성을 평가하기 위하여 파쇄기(crusher)와 미분기(pulverizer)를 사용하여 200 mesh 이하로 분말화하였다. 산성배수 발생개연성을 평가하기 위하여 acid base accounting(ABA) test를 실시하였다. ABA test는 최대 산발생능력(Maximum Potential Acidity, MPA), 산중화능력(Neutralization Potential, NP), 순산발생량(Net Acid Generation, NAG), 순산발생능력(Net Acid Production Potential, NAPP)을 측정하였다(Jennings and Dollhopf, 1995; Jennings *et al.*, 2000; Siddharth *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2005).

MPA는 분말시료의 유황함량을 LECO사의 유황분석기를 이용하여 측정하고 $MPA(kgCaCO_3/t) = total\ S(\%) \times 31.213$ 식을 이용하여 계산하였다. NP는 1N HCl을 첨가하여 시료 내에 함유된 산 중화물질을 모두 소모시킨 후 0.1N 혹은 0.5N NaOH로 적정하고 $NP(Kg\ CaCO_3/t) = \{(N \times HCl\ 양(ml) - N \times NaOH\ 양(ml)) \times 50\} / 시료무게(g)$ 식을 이용하여 계산하였다(Sobek *et al.*, 1990; Lawrence and Wang, 1997a, 1997b).

NAG측정을 위하여 시료에 15% 과산화수소(H_2O_2)를 조금씩 가하여 암석의 황화광물을 산화시키고 산화반응이 완료된 후 일정 부피로 용액의량을 조절한다. 0.1N 혹은 0.5N NaOH를 이용하여 산화에 의하여 발생된 산(H^+)의량을 적정하였다. $NAG(kg\ H_2SO_4/t) = (49 \times V \times M) / W$ [V: NaOH 양(ml), M: NaOH 농도(mole/L), W: 시료의 무게(g)] 식을 이용하여 NAG를 이용하여 계산하였다(Lawrence *et al.*, 1988).

NAPP는 MPA와 NP의 차를 이용하여 계산하였다. 암석분말시료 2.5g과 15% 과산화수소 250 ml를 반응시키고 반응 후 용액의 양이온 농도를 측정하여 암석으로부터 중금속, Al, Fe 용출 특성을 평가하였다.

3. 현장조사 및 시료분석 결과

3.1. 현장조사 결과

(1구역) 절토구역으로서 동측 사면은 절토가 진행되고 있으며 서측 사면은 절토와 식생피복이 완료된 상태이다. 서측사면의 식생피복은 대체로 원활한 상태이나 일부 암석구간에서 식생피복이 미진하다. 또한 서측 사면암석에서 황철석 산출과 산성배수 발생이 관찰되지 않았다. 반면 동측 사면의 암석에서 다량의 황철석이 산출되는 것을 관찰하였다(Fig. 2). 동측 사면은 향후 사면에서 산성배수가 발생되어 일반 식생피복공법을 이용한 식생피복에 어려움이 있으며 산성배수에 의하여 암석의 풍화가 촉진되어 사면안정성 확보에 문제가 발생될 것으로 판단된다.

(2구역) 성토구역으로서 양측 사면에 식생피복이 실시된 지역이다. 성토재로 사용된 암석은 황철석을 많이 함유하고 있으며 성토암석으로부터 산성배수가 발생되어 사면 토양 및 배수의 산성화를 야기하고 있다. 동측 사면은 성토층으로부터 발생한 산성배수의 영향으로 많은 부분의 식생이 고사되었으며 우수에 의한 세굴적이 관찰되었다. 서측 사면의 식생피복은 대체적으로 양호한 상태이나 식생성장이 불량한 부분이 관찰되었다.

동측 사면 하단의 배수로에서 산성배수 유출과 산화철(붉은색)과 알루미늄화합물(흰색)이 관찰되었다. 배수로와 옹벽상단에서 배출되는 사면배수는 pH 3의 산성배수로 확인되었다. 산성배수 일부가 인근 논으로 유입되어 흰색과 붉은색의 침전물이 생성되었으며 농작물 피해와 농경지 오염이 우려되고 있다(Fig. 3).

Fig. 2. Rock sample collected at section 1. Arrows indicate pyrite.

Fig. 3. Acid drainage inflow into farmland in section 2.

Fig. 5. Yellowbo on the cut slope in section 5.

Fig. 4. A drainage conduit in section 4.

Fig. 6. Water soluble precipitates on cut slope.

(3구역) 소규모 절토지역으로서 동서양측 사면은 대부분 토양과 풍화토로 구성되어 있으며 식생피복이 시도되었으나 식생피복이 극히 불량하고 우수에 의한 세굴적이 많이 관찰되었다. 서측 사면 중앙부 하단에 암석이 노출되어 있거나 황철석의 산출과 산성배수의 발생은 관찰되지 않았다.

(4구역) 성토지역으로서 동측 사면은 대부분 성토사면으로 이루어져 있으며 북측 끝부분에 성토사면과 절토사면이 혼재한다. 양측 성토사면의 식생피복은 양호하나 동측 성토사면 일부분이 산성배수의 영향에 의하여 식생피복이 불량한 상태이다. 동측 절토사면은 식생피복이 극히 불량하다. 동측 사면 하단의 배수로에서 산성배수에 의하여 생성된 산화철과 알루미늄화합물의 침전이 관찰되었다(Fig. 4). 동측 사면 남쪽 끝부분의 배수로에서 소량의 사면배수 유출이 확인되었으며 pH 5로 산성을 나타내었다. 동측으로 유출되고 있는 배수는 산성이나 소량으로 주변 환경에 대한 영향

은 미약할 것으로 판단된다.

(5구역) 동서양측 사면은 남쪽의 작은 절토사면과 북쪽의 큰 절토사면으로 구성된 절토지역이다. 동측 남쪽 끝부분에 암거배수로가 있으며 배수는 산성배수의 영향이 없는 pH 7로 중성을 나타내었다. 동측의 남쪽 작은 절토사면의 암석은 다량의 황철석을 함유하고 있으며 배수는 pH 3으로 산성을 나타내었다. 사면배수 유출에 의하여 생성된 붉은색 혹은 흰색 침전물이 관찰되었다(Fig. 5). 또한 사면암석의 미세한 절리면을 따라 수용성 침전물이 생성되고 있으며 수용성 광물의 켈기작용에 의하여 물리적 풍화가 가속화 되고 있음이 관찰되었다(Fig. 6).

동측 남쪽 작은 절토사면과 북측 큰 절토사면 사이의 암거배수로에서 붉은 색 침전물이 많이 생성되어 있으며 pH 5의 산성을 나타내었다. 많은 양의 산성배수가 하류부로 유출되고 있어 환경오염이 우려되며 대책수립이 필요하다. 북측 큰 절토사면 암석에서 다량의 황철석이 산출되었으며 상부 암석은 산성배수의 발

Fig. 7. Drainage conduit in section 5.

Fig. 9. Drainage by a culvert in section 5.

Fig. 8. Cut slope of section 5.

Fig. 10. Rock sample collected from section 5. Arrows indicate pyrite.

생으로 풍화가 많이 진행되어 사면 안정성이 급속히 저해되고 있는 것으로 관찰되었다(Fig. 7). 하부에는 최근에 굴착된 것으로 추정되는 신선한 암석이 노출되어 있으며 상부와 동일한 암석으로 상부 암석과 마찬가지로 향후 풍화가 급속히 진행될 것으로 판단된다. 지하수 수량이 많아 사면배수가 많이 유출되고 있으며 사면배수는 pH 2의 강산성을 나타내었다. 사면에 산화철, 알루미늄화합물, 수용성 광물의 침전이 관찰되었다(Fig. 8).

서측은 남쪽 작은 절토사면과 북쪽 큰 절토사면으로 구성되어 있으며 큰 사면과 작은 사면 사이에 도로를 통과하여 동측으로 배수되는 암거배수로가 있다(Fig. 9). 암거배수로는 동측의 작은 사면과 큰 사면 중간에 위치한 배수로와 연결되어 있다. 남쪽 작은 사면의 풍화토와 토양부분은 식생피복이 시도되었으나 식생피복이 불량하고 일부 구간은 사면이 불안정하여 보강공법이 적용되었다. 또한 토양과 풍화토 사면부분은 우수에 의한 세굴적이 많이 관찰되었다. 작은 사면 하부에

노출된 암석은 동측 사면의 암석과 동일한 종류이며 다량의 황철석을 함유하고 있다(Fig. 10). 또한 암석사면에 pH 3의 산성배수가 유출되고 있으며 붉은색 침전물과 수용성 광물이 관찰되었다.

서측 큰 절토사면은 서측 작은 사면 및 동측 사면과 동일한 암석으로 구성되어 있다. 상부 암석은 절토 후 시간이 상대적으로 많이 경과하여 산성배수에 의하여 풍화가 많이 진행되어 있으며 신선한 하부 암석도 시간의 경과에 따라 상부 암석과 같이 풍화가 급격히 진행될 것으로 판단된다(Fig. 11). 큰 사면 남쪽 부분에 지각구조운동에 의하여 생성된 2개의 파쇄연약대가 발달하고 있다. 사면에서 pH 3의 산성배수 유출, 붉은색 침전물, 수용성 광물의 침전이 관찰되었다. 사면 상부 소단에 조성된 콘크리트포장 통로는 산성배수에 의하여 부식이 진행되고 있으며 상부 암석의 풍화에 의하여 붕락한 암석을 관찰할 수 있다(Fig. 12). 시간이 경과할수록 산성배수에 의하여 암석의 풍화가 가속화되며 사면붕괴가 지속적으로 발생할 것으로 예측된다. 하부의 신선한 암석에서 맥상의 석회석 산출이 관찰되었

Fig. 11. Cut slope in section 5.

Fig. 12. Physical weathering of cut slope in section 5.

다. 석회석은 산성배수에 의하여 쉽게 용해되며 상부 혹은 주변에서 생성된 산성배수에 의하여 석회석의 용해가 발생할 것으로 추정된다. 산성배수에 의한 석회석의 용해는 사면붕괴를 유도하며 사면안정성을 급속히 저해할 것으로 판단된다.

(6구역) 동측은 큰 성토사면으로 구성되어 있으며 서측은 작은 성토사면과 절토사면이 반복되는 지역이다. 동측 성토사면의 식생피복은 비교적 양호하나 하부에 식생피복이 불량한 부분이 관찰되었다. 배수로에 pH 3 산성배수의 유출과 사면 옹벽에 산성배수에 의한 붉은색 침전물이 관찰되었다. 특히 북쪽 하류부에 위치한 농경지로 산성배수가 유입되고 있어 농작물의 피해가 우려되며 적절한 대책이 요구되고 있다.

절토와 성토가 반복되는 서측 사면은 식생피복이 양호하며 산성배수의 발생흔적이 관찰되지 않았다. 그러나 북쪽 절토2사면에 노출된 암석은 5구역 암석과 동

Fig. 13. Rock sample collected from section 7. Arrows indicate pyrite.

Fig. 14. Rock sample containing pyrite and Mn-oxide. Red arrows indicate pyrite and blue arrows indicate Mn-oxide.

일하며 황철석을 많이 함유하고 있어 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 것으로 판단된다.

(7구역) 동측에 작은 절토사면 3개와 서측에 남쪽 작은 절토사면과 진출입로 조성을 위한 큰 절토사면이 있는 지역이다. 동측의 3개 절토사면에 노출된 암석은 풍화가 많이 진행되어 있으며 사면 하부에 신선한 암석이 노출되어 있다. 사면 하부의 신선한 암석에서 다량의 황철석이 관찰되었다. 서측 남쪽 작은 절토사면과 진출입로 조성을 위한 큰 절토사면에 노출된 암석은 동측 사면의 암석과 동일하며 다량의 황철석이 함유되어 있다(Fig. 13). 7구역의 암석은 1구역과 5구역의 암석과 동일한 것으로 관찰되었으며 암석의 절리면에는 다량의 산화망간이 관찰되었다(Fig. 14). 7구역 절토사면의 암석은 산성배수를 발생시킬 개연성이 매우 높으며 산성배수에 대한 적절한 대책수립이 필요하다.

Table 2. Chemical characteristics of the soil samples.

Sample ID	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Plant available Al	Plant available Mn	DCB extractable Mn	Water soluble cation					Water soluble anion			
						K	Na	Ca	Mg	Mn	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	F ⁻
						----- mg kg ⁻¹ -----								
2E1-S	4.23	173.4	548.6	54.0	266.6	8.3	4.5	14.8	6.3	1.8	483.3	8.5	103.9	ND
2E2-S	4.05	332.0	244.4	25.4	137.4	11.0	5.6	62.7	15.0	5.2	1927.4	13.1	34.5	6.3
2W1-S	3.86	109.0	467.2	19.3	547.4	5.6	2.9	5.4	1.3	3.6	310.9	15.1	28.3	5.3
3E1-S	5.47	75.8	23.7	46.5	490.9	8.4	9.1	4.3	1.8	ND	158.5	5.4	75.3	ND
3W1-S	6.11	90.9	11.9	8.5	183.8	2.5	21.1	5.7	2.5	ND	147.4	6.2	174.3	5.9
4E1-S	5.10	57.0	200.2	24.2	480.8	4.0	10.3	4.2	1.1	0.1	172.7	7.0	47.8	ND
5W1-S	4.72	94.8	73.7	28.6	242.4	7.5	3.8	13.0	2.4	0.8	319.4	73.6	28.3	ND
6E1-S	4.81	51.0	172.0	17.5	48.5	8.2	3.9	4.1	1.1	0.3	144.7	14.0	34.8	ND
6W1-S	6.21	291.0	ND	27.8	260.6	3.9	30.2	41.6	16.3	MD	1623.4	5.0	54.8	7.6

DCB extractable Mn: content of Mn-oxide. ND : not detected.

3.2. 토양특성

평가대상지역의 식생성장이 부진하거나 고사한 사면에서 채취한 토양은 산성(pH 3.86 – 6.21)이며 일반 토양에 비해 식물가용 Al(0.0 – 548.6 mg/kg)과 Mn의 농도(8.5 – 28.6 mg/kg)가 높은 것으로 나타났다(Table 2). 또한 성토면 토양과 절토면 토양은 일반 토양의 수식 mg/kg 수용성 SO_4^{2-} 함량에 비해 수식에서 수백 배(144.7 – 1927.4 mg/kg) 높은 것으로 나타났다. 토양의 산화망간 함량(DCB 추출 Mn, 48.5 – 547.4 mg/kg)은 일반 토양의 수식 mg/kg에 비해 수십 배가 높은 것으로 나타났다. 이러한 특성은 토양이 망간광물과 황철석을 많이 함유한 암석에서 기원하였거나 고농도의 Al, Mn, SO_4^{2-} 를 함유한 산성배수의 영향을 받았음을 지시한다.

식생은 토양 pH가 6 이하, 식물가용 Al함량이 5 mg/kg 이상 혹은 식물가용 Mn함량이 10 mg/kg 이상에서 식물은 H^+ , Al 혹은 Mn의 독성에 의하여 성장이 부진하거나 고사하는 것으로 알려져 있다(Shamshuddin *et al.*, 2004). 평가대상사면에서 식생성장의 부진과 고사는 산성(H^+), Al 독성 혹은 Mn 독성에 기인하는 것으로 판단된다. 산성 토양의 고농도 H^+ 는 식물의 뿌리를 상하게 하고 병충해에 약하게 한다. 또한 고농도의 H^+ 는 토양의 구성광물의 용해도를 증가시켜 다양한 이온을 토양 공극수로 용출시키고 식물가용도를 증가시킨다. 특히 고농도의 H^+ 는 식물에 독성을 나타내는 수용성 Al과 Mn의 농도를 증가시킨다. 높은 농도의 식물가용 Al은 식물뿌리의 Ca, Mg, K 등 이온 흡수를 방해하고 뿌리의 성장을 저해한다. Mn은 식물의 탄소동화작용을 방해하여 성장부진 및 고사를 초래한

다. 토양의 식물가용 Mn농도는 토양 산화망간의 함량, pH, 산화환원상태에 의하여 좌우된다. 평가대상지역의 토양은 일반 토양에 비해 높은 산화망간함량과 산성을 나타내고 있어 식물가용 Mn함량이 높은 것으로 판단된다. 또한 산화망간은 환원상태에서 환원용해반응에 의하여 쉽게 용해된다. 장마와 같은 강우 시에 토양은 장기간 물로 포화되고 환원상태가 조성되어 산화망간의 용해가 유발되어 식물에 Mn독성을 나타낸다.

3.3. 암석의 산성배수 발생개연성

암석의 ABA test 결과(Table 3, Fig. 15)에 의하면 3구역 서측 절토사면 하부에 노출된 암석시료(3W1-R)를 제외한 모든 사료는 산성배수의 발생개연성이 매우 높으며 다량의 산성배수를 발생시킬 것으로 밝혀졌다. 풍화암(5W3-R)은 암석의 풍화과정에 황철석이 산화·용탈되어 산성배수 발생능력이 낮은 것으로 나타났다

Fig. 15. The result of the acid base accounting test. NAF : nonacid drainage forming, PAF : potentially drainage forming, UC : uncertain.

Table 3. The results of acid base accounting test of the samples

Sample ID	Total S (%)	MPA	NP	NAPP	NAG	NP/MPA	NAG (pH)
		----- (kg CaCO ₃ /t) -----	----- (kg CaCO ₃ /t) -----	----- (kg CaCO ₃ /t) -----	----- (kg H ₂ SO ₄ /t) -----		
1E1-R	3.34	104.25	11.56	92.69	50.74	0.11	2.61
2E1-R	2.02	63.05	2.48	60.57	33.44	0.04	2.58
2E2-R	4.27	133.12	-6.46	139.59	77.06	-0.05	2.30
2W1-R	2.88	89.74	-7.90	97.64	54.93	-0.09	2.38
3W1-R	0.00	0.02	9.73	-9.70	0.00	409.56	7.73
5E1-R	0.30	9.41	15.56	-6.15	1.83	1.66	4.02
5E2-R1	2.18	68.04	1.31	66.73	38.09	0.02	2.45
5E2-R2	2.46	76.63	0.61	76.02	42.91	0.01	2.43
5W2-R1	2.13	66.33	1.89	64.44	36.96	0.03	2.54
5W2-R2	0.68	21.30	13.83	7.47	5.19	0.66	2.35
5W3-R	0.00	0.06	-1.77	1.83	0.00	-33.28	5.36
6W2-R	6.93	216.31	5.66	210.64	91.74	0.03	2.35
7W1-R	1.23	38.24	-6.61	44.85	21.60	-0.17	2.60

Table 4. Concentrations of Fe, Al, heavy metals and major cations in the solution after the reaction of 2.5 g rock powder and 250 ml 15% H₂O₂.

Sample ID	Fe	Al	As	Cr	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Mg	Ca	Na	K
	----- mg/L -----												
1E1-R	46.0	95.2	ND	0.03	0.19	0.04	0.04	0.16	0.41	3.5	44.0	7.8	3.3
2E1-R	34.4	39.1	ND	0.05	0.13	0.05	0.03	0.46	0.32	3.4	4.7	3.4	10.8
2E2-R	170.0	77.7	0.09	0.02	0.59	0.04	0.15	0.29	0.43	1.4	0.8	1.2	0.1
2W1-R	109.0	142.3	0.02	0.15	0.07	0.02	0.09	0.42	2.20	3.9	2.7	1.6	0.1
3W1-R	0.1	1.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.7	1.0	1.3	2.3
5E1-R	ND	26.1	ND	0.02	0.41	ND	ND	0.09	0.15	5.5	11.8	1.6	10.8
5E2-R1	70.2	40.2	ND	0.04	0.07	0.06	0.06	0.45	0.66	1.0	1.5	1.5	4.7
5E2-R2	91.9	16.0	0.02	0.04	0.33	0.07	0.07	0.51	1.60	2.7	1.0	1.4	4.3
5W2-R1	82.1	45.56	ND	0.05	0.14	0.07	0.07	0.29	0.31	1.1	5.4	1.9	4.7
5W2-R2	1.2	40.89	ND	0.02	0.88	ND	0.01	0.19	1.18	4.1	42.8	2.1	2.4
5W3-R	ND	0.1	ND	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	0.1	0.3	0.5	1.4
6W2-R	255.0	21.4	0.02	ND	0.26	0.06	0.26	1.20	5.44	4.0	7.2	0.7	0.8
7W1-R	15.3	50.6	ND	0.10	3.02	ND	0.02	0.60	0.28	6.9	1.5	0.8	0.6

ND: not detected.

나 과산화수소용액과 반응 후 용액은 pH 5.36의 산성을 나타내었다. 이는 황화광물을 함유 암석기원의 풍화암은 여전히 산성배수를 발생시킬 개연성이 있음을 의미한다. 5E1-R 암석은 산성배수를 발생시키는 황철석과 산성배수를 중화시키는 석회석을 모두 함유하고 있다. 상당량의 산성배수가 석회석에 의하여 중화되나 과산화수소용액과 반응 후 용액은 pH 4.02의 산성을 나타내었다. 이는 5E1-R 암석은 석회석에 의한 중화에도 불구하고 상당량의 산성배수를 발생시킬 능력이 있음을 의미한다. 또한 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석이 석회석을 함유할 경우 산성배수에 의하여 석회석이 쉽게 용해됨을 의미한다. 특히 평가대상지역

의 사면암석에 산성배수에 쉽게 용해되는 석회석(calcite, CaCO₃)이 맥상으로 산출되고 있다. 산성배수에 의한 맥상의 석회석 용해는 사면안정성 저해와 사면붕괴를 급속히 진행시킬 것으로 판단된다. 암석의 산성배수 발생개연성 시험(ABA test)과 현장조사 결과 1구역 서측 절토사면과 3구역 서측 절토사면 하부에 노출된 암석을 제외하면 모든 암석은 산성배수를 발생시킬 개연성이 높으며 산성배수에 의한 피해가 예상된다.

2.5 g 암석분말시료와 250 ml 15% H₂O₂ 용액을 반응시킨 후 3구역 서측 절토사면 암석(3W1-R)과 5구역 서측 사면 풍화암(5W3-R)을 제외한 용액의 Al, Fe, 일부 중금속의 농도는 일반 지표수의 평균농도보

다 훨씬 높게 나타났다(Table 4). 산성배수 발생개연성이 높은 암석일수록 보다 많은 량의 중금속이 용출되었다. 일반적으로 산성배수에 Mn농도가 높게 나타나는 경향이 있으나 본 실험에서 황철석을 산화시키기 위하여 사용한 H_2O_2 에 의하여 산화망간 형태로 침전됨으로 용액의 Mn농도는 산성배수 수질과 연계된 의미가 없음으로 Mn농도 자료는 참고하지 않았다. 반응 용액의 화학적 특성은 산성배수에 의하여 주변지역 지표수, 지하수, 토양의 산성화될 뿐만 아니라 Al, Fe, 중금속으로 오염될 개연성이 높음을 의미한다. 또한 산

성배수가 발생되고 있거나 발생될 개연성이 높은 암석 사면을 대상으로 일반적인 공법을 적용하여 식생피복을 실시할 경우 산성배수의 영향(H^+ , Al, Mn, Fe, 중금속)으로 식생의 성장이 부진하거나 고사할 개연성이 높음을 의미한다.

4. 평가대상 지역의 산성배수 발생 및 피해 현황 요약

현장조사와 시료분석 자료를 바탕으로 구역별 사면

Table 5. Acid drainage and environmental situation in each section

Section	East/west	Cut or embankment slope	Pyrite occurrence/soil pH and content of plant available Al and Mn	Acid drainage and status
1	E	Cut(rock)	○ Pyrite	○ Acid drainage expected
	W	Cut(rock)	○ No pyrite	○ Withered plant in some area
2	E	Embankment	○ Pyrite in embankment rock ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Inflow of acid drainage to surrounding farmland ○ Withered plant in some area
	W	Embankment	○ Pyrite in embankment rock ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Withered plant in some area
3	E	Cut(soil)	○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Inflow of acid drainage to surrounding area ○ Withered plant
	W	Cut(soil)	○ High contents of Al and Mn	○ Withered plant
4	E	Embankment	○ Pyrite in embankment rock ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Inflow of acid drainage to surrounding area ○ Withered plant
		Cut(soil)	○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Withered plant
	W	Embankment	○ Pyrite in embankment rock ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Withered plant in some area
5	E	Cut1(rock)	○ Pyrite	○ Inflow of acid drainage to surrounding area
		Drainage conduit	○ Acidic drainage	○ Inflow of acid drainage to surrounding area
		Cut2(rock)	○ Pyrite	○ Acid drainage expected
	W	Cut1(rock & soil)	○ Pyrite ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Acid drainage expected ○ Withered plant
		Cut2	○ Pyrite	○ Acid drainage expected
6	E	Embankment	○ Pyrite in embankment rock ○ Acidic and high contents of Al and Mn	○ Inflow of acid drainage to surrounding farmland ○ Withered plant in some area
	W	Cut/embankment	○ Pyrite ○ High contents of Al and Mn	○ Embankment : good condition of plant growth ○ Cut slope : acid drainage expected
7	E	Cut	○ Pyrite	○ Acid drainage expected
	W	Cut	○ Pyrite	○ Acid drainage expected

의 산성배수 발생 및 피해현황을 Table 5에 요약·정리하였다. 1구역 서측 절토사면과 3구역 서측 절토사면을 제외한 모든 암석절토사면에서 황철석의 산출이 관찰되었으며 산성배수가 발생되고 있거나 발생개연성이 매우 높은 것으로 확인되었다. 절토 후 대기에 노출된 암석은 풍화가 급속하게 진행되고 있으며 사면암석의 붕락이 관찰되었다. 산성배수에 의하여 사면안정성이 급속히 저해될 것으로 추정되며 산성배수의 발생저감과 사면보호대책의 수립이 요구되고 있다. 토양과 풍화토로 구성된 대부분의 절토사면은 식생피복이 시도되었으나 높은 산도(acidity, H^+)와 고농도의 식물가용 Al 및 Mn에 의하여 식생성장이 부진하거나 고사한 상태이며 세굴적이 많이 관찰되었다. 성토사면은 성토암석으로부터 산성배수가 발생되고 있으며 식생성장은 대체로 양한편이나 일부지역에서 산성배수의 영향으로 식생성장이 불량하거나 고사한 상태이다. 식생피복이 불량한 지역을 대상으로 식생성장 촉진을 위한 중화, Al과 Mn 독성저감대책의 적용이 필요하다. 2, 4, 6구역에서 성토층 혹은 절토사면에서 발생한 많은 양의 산성배수가 하류부로 배출되고 있으며 주변지역 환경오염이 우려되고 있다. 따라서 산성배수의 배출유량이 많은 지점에 산성배수 처리시설의 설치 및 운용이 필요하다.

5. 피해저감대책

평가대상지역의 산성배수 피해저감대책은 환경오염 방지, 사면안정성 확보, 생태복원을 고려하여 검토하였다. 산성배수 발생 암석사면, 식생성장 부진 토양-풍화토 절토사면, 식생성장부진 성토사면, 산성배수의 다량배출지역으로 구분하여 대책공법을 검토·선정하였다.

지역특성별 대책공법은 Table 6에 정리하였다.

5.1. 산성배수 발생 암석사면

절취사면을 대상으로 사면안정성확보, 경관회복, 생태계복원을 위하여 슛크리트, 앙카, 락볼트, 옹벽, 식생피복 등 다양한 공법이 적용된다. 산성배수가 발생하는 사면을 대상으로 산성배수에 대한 피해저감대책이 시행되지 않은 상태에서 이러한 공법을 적용하면 기능의 급속한 저하 혹은 적용상의 어려움이 발생된다. 따라서 산성배수 발생사면에 적용되는 공법은 산성배수에 대한 피해저감대책의 병행이 필수적이다.

산성배수가 발생되고 있는 사면은 절취 후 암석의 급속한 풍화로 인하여 사면안정성 확보가 매우 어렵다. 또한 산성배수의 유출로 인한 주변 지역의 환경오염이 우려된다. 산성배수에 대한 대책이 부재한 슛크리트, 앙카, 락볼트, 옹벽 등은 산성배수에 의하여 쉽게 부식되고 기능이 급속히 저하된다. 또한 이러한 공법을 사면 전부분에 적용하기에는 경제적인 측면에서 불리하다. 사면안정성과 생태계복원을 동시에 달성할 수 있는 공법은 산성배수에 대한 대책을 병행한 식생피복으로 판단된다.

절취사면의 산성배수 발생억제는 산소와 황화광물의 접촉차단, 황화광물의 산화에 관여하는 미생물 활동의 조절을 통하여 가능하다. 최근에 황철석 표면에 nano-scale의 얇은 피막을 형성시켜 산소와 황철석의 접촉을 차단하여 황철석의 산화를 방지하는 기술이 개발되었다(Belzile *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 2006; Evangelou, 2001; Jiang *et al.*, 2000; Lan *et al.*, 2002; Matlock *et al.*, 2003; Nyavor *et al.*, 1996; Zhang and Evangelou, 1998).

산성배수의 억제와 중화처리는 산성배수 발생억제를

Table 6. Damage reduction strategy

	Objective	Count measurement
Acid drainage generating rock cut slope	<ul style="list-style-type: none"> Secure slope stability Reduction of acid drainage Restoration of ecosystem 	<ul style="list-style-type: none"> Reduction of acid drainage/neutralization/revegetation Neutralization treatment I* Installation of fence for falling rock
Soil cut slope with withered plant	<ul style="list-style-type: none"> Secure slope stability Restoration of ecosystem 	<ul style="list-style-type: none"> Soil amendment/revegetation
Embankment slope with withered plant	<ul style="list-style-type: none"> Secure slope stability Reduction of acid drainage Restoration of ecosystem 	<ul style="list-style-type: none"> Reduction of acid drainage/neutralization/revegetation Neutralization treatment I*
Acid drainage outflow area	<ul style="list-style-type: none"> Prevention of environmental contamination 	<ul style="list-style-type: none"> Neutralization treatment II**

*Neutralization with limestone. **Active chemical treatment.

Fig. 16. Treatment with limestone pebbles. A: cut slope, B: embankment slope.

위한 인산염용액의 암석표면살포와 중화능력이 높은 식생기반재인 기능층의 조성으로 구성되어 있다. 사면에 인산염용액을 살포하면 사면의 물리적 형태, 지하수 유동, 안정성은 유지되면서 인산염과 황철석이 반응하여 황철석 표면에만 두께가 수 Å인 안정한 철인산염의 코팅이 생성된다(Kim, 2007). 표면에 형성된 코팅은 황철석과 용존산소의 접촉을 방지하여 산성배수 발생을 억제한다. 암석표면에 미세한 질리가 많은 경우 처리효율의 저하로 산성배수의 발생을 완벽하게 억제하기가 어렵다. 따라서 질리가 많은 사면은 우수의 용존산소 제거와 산성배수의 중화처리가 가능한 보완대책이 필요하다. 코팅처리한 암석표면에 유기물, 석회고토 $[(Ca,Mg)CO_3]$, 정수장 슬러지를 많이 함유한 물질을 취부하여 기능층을 조성하면 기능층의 유기물에 의하여 우수의 용존산소가 제거되고 석회고토와 정수장 슬러지에 의하여 산성배수가 중화된다(Johnson and Hallberg, 2005). 코팅처리과 기능층의 조성 후 산성배수에 대한 중화능력이 높으며 중자를 함유한 식생기반재를 취부하면 원활한 식생피복이 가능할 것으로 판단된다. 기능층과 식생기반재의 두께는 현장(신선암, 풍화암)의 여건에 따라 기능층은 2~5 cm, 식생기반재는 5~10 cm 정도로 취부하면 될 것으로 판단되며 현장여건에 따라 조정이 가능하다.

5구역 동측 큰 절토사면은 지하수 유출수량이 많아 사면에서 다량의 산성배수가 사면을 따라 흐르고 있다. 따라서 산성배수의 식생접촉에 의한 피해를 저감하기 위한 배수시스템의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

식생피복에 의하여 산성배수의 발생은 현저히 감소될 것으로 예상되나 사면으로부터 산성배수의 외부유출을 차단하고 구조물을 보호하기 위하여 사면과 도로 경계부에서 추가적인 중화처리가 필요하다. 경계부에 석회석 자갈을 투입하면 사면으로부터 유출되는 산성배수는 중화되어 유출된다(Fig. 16). 1구역, 5구역, 7구

역의 큰 절토사면은 산성배수에 의하여 암석풍화촉진과 낙석에 의한 안전사고가 우려된다. 낙석의 도로유입 차단을 위한 fence를 설치하면 낙석의 도로유입에 의한 안전사고를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2. 식생성장부진 토양 절토사면

절토사면의 토양과 풍화토는 산성배수 발생암석에서 발달된 것으로서 산성이며 식물가용 Al과 Mn의 농도가 높아 식생 성장에 불리한 특성을 가지고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 일반적으로 토양과 풍화토 사면에 적용되는 종자뿌어붙이기를 활용한 식생피복은 실패할 확률이 높다. 종자뿌어붙이공법을 적용하여 식생이 고사한 사례는 2구역과 3구역 절토사면에서 확인되었다. 식물가용 Al과 Mn은 토양의 pH와 존재형태에 좌우되며 토양 pH가 6.5 이상이면 Al과 Mn 식물독성이 없어지는 것으로 알려져 있다. 또한 토양에 인산염용액을 투입하면 인산염(PO_4^{3-})은 Al과 반응하여 알루미늄인산염 광물로 침전되고, Mn과 complex를 형성하여 Mn의 독성을 저감시킨다. 농업분야에서 산성토양의 중화에 널리 사용되는 석회고토 $[(Ca,Mg)CO_3]$ 를 토양에 투입하면 토양의 pH가 상승하여 산성화된 토양은 중화되고 및 석회고토로부터 용출되는 Ca와 Mg에 의하여 Al과 Mn 식물독성이 저감된다.

절토사면에서 식생의 뿌리가 발달되는 깊이까지 석회고토분말을 투입하는 것은 사면안정성 확보에 많은 문제를 야기할 수 있다. 따라서 토양의 중화 및 Al과 Mn 독성저감 처리를 위하여 인산염용액·석회고토 분말 슬러리를 표면에 살포하여 토양표면의 석회고토로부터 용출되는 중화물질과 인산염이 토양의 식생뿌리 깊이 까지 투입되도록 하는 방법이 적절하다고 판단된다. 또한 황철석을 함유한 암석기원의 토양과 풍화토는 식생성장이 불리한 물리화학적 특성을 가지고 있어 산에 대한 중화능력이 높은 식생기반재를 현장조건에

따라 1~5 cm 취부하면 식생피복이 원활히 이루어질 것으로 판단된다. 절토사면의 식생성장이 부진한 토양은 평균 pH는 5.1로 조사되었다. pH가 5인 토양을 H^+ , Al, Mn의 독성이 나타나지 않는 pH 6.5로 중화시키는데 필요한 석회고토의 투입량은 미국 농무성 석회고토 투입량 산출 기준표를 활용하여 계산하였다. 깊이 10 cm × 넓이 1 m²의 토양을 처리하는데 소요되는 분말 석회고토의량은 450 g이 소요된다.

5.3. 식생성장부진 성토사면

황철석을 함유한 암석으로 성토된 구역은 암석으로부터 산성배수가 발생되고 있으며 사면의 일부는 산성배수의 영향으로 토양이 산성화되고 식물가용 Al과 Mn의 농도가 높게 나타났다. 산성배수 영향을 많이 받은 사면은 식생의 성장이 부진하거나 고사한 상태이며 식생피복부진으로 세굴적이 관찰되고 있다. 또한 사면하부에서 산성배수가 외부로 유출되고 있어 주변 지역의 환경오염이 우려되고 있다. 식생피복이 부진한 부분에 대한 식생피복과 배수의 수질개선방안이 수립되어야 한다.

산성배수의 영향을 받은 사면의 식생피복은 산성배수 발생억제, 토양의 중화 및 Al과 Mn 독성저감처리, 종자뿌어붙이기가 병행되어야 할 것으로 판단된다. 암석으로부터 산성배수 발생억제는 암석사면에 적용될 인산염용액을 살포하고 토양 중화처리는 석회고토분말을 투입하면 될 것으로 판단된다. 식생성장이 부진한 사면 토양에 깊이 10 cm 정도에 석회고토분말과 인산염용액을 투입하고 교반처리하면 산성배수의 발생이 억제되고, 토양의 중화와 Al 및 Mn의 독성이 저감된다. 성토사면에서 식생성장이 부진한 토양의 평균 pH 4인 토양의 처리에는 500 g/m²의 석회고토 분말을 투입하면 된다.

사면하단 경계부에 석회석 자갈을 투입하면 하류부로 유출되는 산성배수가 중화·처리되어 수질이 개선될 것으로 판단된다. 사면배수의 수량이 많아 석회석 자갈투입으로 수질개선이 미진할 것으로 판단되는 4구역과 6구역의 하류부에는 폐수처리시설의 설치 및 운용이 필요하다.

5.4. 산성배수 다량 유출지역

4구역 동측 사면, 5구역 동측 배수로, 6구역 동측 사면에서 다량의 산성배수가 하류부로 유출되고 있으며 주변지역의 지표수와 농경지 오염이 우려되고 있다. 이러한 지역은 산성배수의 수량이 많아 석회석 자갈을

이용한 처리에 한계가 있을 것으로 판단되며 폐수처리시설의 설치 및 운용이 요구되고 있다.

6. 결 론

OO고속도로 O공구 건설현장에 분포하는 암석에 대하여 산성배수 발생개연성을 평가하고 피해 저감대책을 검토하였다. 고속도로건설구간의 지반은 이천리층에 해당하는 사암과 중성내지 산성 화산암으로 구성되어 있으며 이들은 주변의 화강암관입에 수반된 열수 용액에 의해 황화광물을 산점상으로 함유하고 있다. 황화광물의 함량이 높은 화산암과 사암은 산성배수 발생개연성이 높고 중금속(Zn, Pb, As)을 많이 함유한 산성배수가 주변지역으로 유출되어 환경오염을 유발할 개연성이 높은 것으로 나타났다. 도로건설공사과정에서 필연적으로 생기는 암석 절개사면과 토양절토사면 및 성토사면에서 산성배수가 발생될 개연성이 높은 구역의 배출 배수는 중화 및 중금속 제거처리 후 배수가 이루어져야 하며, 절취면의 안정성 확보를 위하여 산성배수의 발생을 근원적으로 억제할 수 있는 코팅처리 기술을 적용한 후 슛크리트, 앵커 등 사면보강공법이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 건설 현장에서 절취된 황철석을 다량으로 함유하는 화산암과 사암은 골재로서 활용이 어려우며, 지반성토제로 사용할 경우 지하수와 우수의 접촉을 최소화할 수 있는 성토층의 구조를 갖춘 후 활용하여야 한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- Belzile, N., Maki, S., Chen, Y. and Goldsack, D. (1997) Inhibition of pyrite oxidation by surface treatment. The Science of the Total Environment, v.196, p.177-186.
- Chen Y., Li, Y., Cai, M., Belzile, N. and Dang, Z. (2006) Preventing oxidation of iron sulfide minerals by polyethylene polyamines. Minerals Engineering, v.19, p.19-27.
- Evangelou, V.P. (2001) Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential field application. Ecological Engineering, v.17, p.165-178.
- Golez, N.V. and Kyuma, K. (1997) Influence of pyrite oxidation and soil acidification on some essential nutrient elements. Aquacultural Engineering, v.15, p.107-124.

- Hillwood, A.L., Horwitz, P., Appleyard, S., Barton, C. and Wajrak, M. (2006) Acid sulfate soil distribution and metals in groundwater: implications for human exposure through grown produce. *Environ. Pollution.*, v.143, p.100-105.
- Jennings, S.R., Dollhopf, D.J. and Inskeep, W.P. (2000) Acid production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Applied Geochem.*, v.15, p.235-243.
- Jennings, S.R. and Dollhopf, D.J. (1995) Acid-base account effectiveness for determination of mine waste potential acidity. *J. of Hazardous Material*, v.41, p.161-175.
- Jiang, C.L., Wang, X.H. and Parekh, B.K. (2000) Effect of sodium oleate on inhibiting pyrite oxidation. *Int. J. Miner. Process.*, v.58, p.305-318.
- Johnson, D.B. and Hallberg, K.B. (2005) Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, v.338, p.3-14.
- Kalin, M., Wheeler, W.N. and Olaveson, M.M. (2006) Response of phytoplankton to ecological engineering remediation of a Canadian shield lake affected by acid mine drainage. *Ecological Engineering*, v.28, p.296-310.
- Kim, J.G. (2007) Acid drainage and damage reduction strategy in construction site: an introduction. *Econ. Environ. Geol.*, v.50, p.651-660.
- Kirby, C.S., Thomas, H.M., Southam, G. and Donald, R. (1999) relative contributions of abiotic and biotic factors in Fe(II) oxidation in mine drainage. *Applied Geochem.*, v.14, p.511-530.
- Kock, D. and Schippers, A. (2006) Geomicrobiological investigation of two different mine waste tailings generating acid mine drainage. *Hydrometallurgy*, v.83, p.167-175.
- Koryak, M., Shapiro, M.A. and Sykora, J.L. (1972) Riffle zoobenthos in streams receiving acid mine drainage. *Water Research*, v.6, p.1239-1274.
- Lan, Y., Huang, X. and Deng, B. (2002) Suppression of pyrite oxidation by iron 8-hydroxyquinoline. *Archives of Environmental Contamination and Technology*, v.43, p.168-174.
- Lawrence, R.W. and Scheske, M. (1997a) A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Env. Geol.*, v.32, p.100-106.
- Lawrence, R.W. and Wang, Y. (1997b) Determination of Neutralization Potential in the prediction of Acid Rock Drainage. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, p.449-464.
- Lawrence, R.W., Jaffe, S. and Broughton, L.M. (1988) In-House Development of the Net Acid Production Test Method, Coastech Research.
- Lee, G.H., Kim, J.G., Lee, J.S., Chon, C.M., Park, S.G., Kim, T.H., Ko, G.S. and Kim, T.K. (2005) Generation characteristics and prediction of acid rock drainage(ARD) of cut slope. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, p.91-99.
- Matlock, M.M., Howerton, B.S. and Atwood, D.A. (2003) Covalent coating of coal refuse to inhibit leaching. *Advances in Environmental Research*, v.7, p.495-501.
- Muhrizal, S., Shamshuddin, J., Fauziah, I. and Husmi, M.A.H. (2006) Changes in iron-poor acid sulfate soil upon submergence. *Geoderma*, v.131, p.110-122.
- National Institute of Agricultural Science and Technology(2000) Taxonomical classification of Korean soils. NIAST, Suwon, Korea.
- Nordstrom, D.K. (1982) Aqueous pyrite oxidation and the subsequently formation of secondary minerals. In Hossner, L.R., J.A. Kittrick, and D.F. Fanning (eds), *Acid sulphate weathering*, SSSA, Madison, WI. p.37-56.
- Nyavor, K., Egiebor, N.O. and Fedrak, P.M. (1996) Suppression of microbial pyrite oxidation by fatty acid amine treatment. *The Science of the Total Environment*, v.182, p.75-83.
- Shamshuddin, J., Muhrizal, S., Fauziah, I. and Husni, M.H.A. (2004) Effects of adding organic material on acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *The Science of the Total Environment*, v.323, p.33-45.
- Sobek, A.A., Rastogi, V. and Bendetti, D.A. (1990) Prevention of water pollution problems in minning: the bactericide technology. *Mine Water and the Environment*, v.9, p.133-148.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S. (1978) Geological map of Dongrae and Weolnae sheets. Geological Survey of Korea. 27p.
- Stum, W. and Morgan, J.J. (1995) *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*, 3th edition. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Zhang, Y.L. and Evangelou, V.P. (1998) Formation of ferric hydroxide-silica coatings on pyrite and its oxidation behavior. *Soil Science*, v.163, p.53-62.

2013년 8월 2일 원고접수, 2013년 9월 20일 1차수정,
2013년 10월 17일 게재승인