

## 암석의 산성배수 발생개연성 평가 및 피해저감대책: 터널건설예정구간 사례

김재곤\* · 이진수 · 김통권

한국지질자원연구원

### Assessment of Acid Rock Drainage Production Potential and Damage Reduction Strategy: A Case Study of Tunnel Construction Area

Jae Gon Kim\*, Jin Soo Lee and Tong Kwon Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The acid rock drainage (ARD) production potential of rock was assessed for a tunnel construction area, Kimhae and the damage reduction strategy was discussed based on the ARD risk evaluation. The geology of the studied area consisted of Mesozoic quartz porphyry, sandstone, tuff and granite. Sulfides occurred as a disseminated type in quartz porphyry and granite, and a vein type in sandstone. Quartz porphyry and sandstone with a high content of sulfide were classified as a potentially ARD forming rock. The drainage originated from those rocks may acidify and contaminate the surrounding area during the tunnel construction. Therefore, the drainage should be treated before it is discharged. A slope stability problem due to the ARD was also expected and the coating technology was recommended for the reduction of ARD generation before the application of supplementary work for enhancing slope stability such as shotcrete and anchor. From the ARD risk analysis, those rocks should not be used as aggregate and be used as bank fill material with the system for the minimum contact with rain water and groundwater.

**Key words** : Tunnel construction, Acid rock drainage, Damage reduction strategy, Coating technology

경상남도 김해시 국가지원 지방도60호선 터널건설예정구간의 암석에 대하여 산성배수 발생개연성을 평가하고 피해저감대책을 검토하였다. 건설예정구간의 지반은 석영반암, 사암, 응회암, 화강암으로 구성되어 있으며 황화광물은 석영반암과 화강암에 산점상으로 사암에 맥상으로 산출되었다. 황화광물의 함량이 높은 석영반암과 사암은 산성배수 발생개연성이 높고 중금속(Zn, Pb, As)를 많이 함유한 산성배수가 주변지역으로 유출되어 환경오염을 유발할 개연성이 높은 것으로 나타났다. 건설공사과정에서 산성배수가 발생할 개연성이 높은 구역에서 배출되는 배수는 중화 및 중금속 제거처리 후 배수가 이루어져야 하며, 절취면의 안정성 확보를 위하여 산성배수의 발생을 근원적으로 억제할 수 있는 코팅처리기술을 적용한 후 슛크리트, 앵커 등 사면보강공법이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 석영반암과 사암은 골재로서 활용이 어려우며 지반성토재로 사용할 경우 지하수와 우수의 접촉을 최소화할 수 있는 성토층의 구조를 갖춘 후 활용하여야 한다.

**주요어** : 터널건설, 산성배수, 피해저감대책, 코팅기술

### 1. 서 론

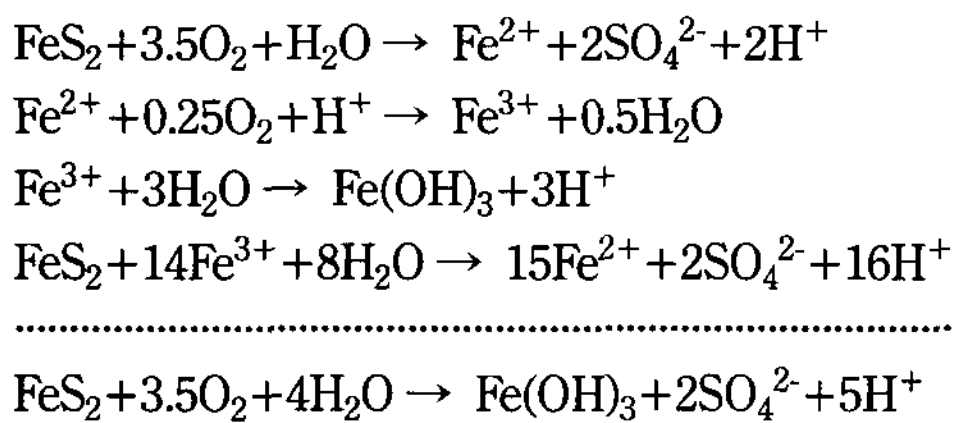
최근 국민들의 환경문제에 대한 인식변화와 지속가능한 국토개발에 대한 사회적 요구가 증대되고 있다. 사회기반시설의 확충으로 건설현장에서 대규모 지반굴

착이 빈번히 이루어지고 있으며 이에 수반되어 발생한 산성배수로 인한 환경오염, 안전사고가 발생되고 있어 건설현장에서 산성배수에 대한 대책수립이 요구되고 있다. 황화광물은 암석과 퇴적물에 흔히 산출되는 광물로서 산성배수 발생의 근원물질이며 열수로부터 침전,

\*Corresponding author: jgkim@kigam.re.kr

열수와 암석의 반응, 퇴적물의 속성작용에 의하여 생성된다. 생성조건에 따라 argentite(Ag<sub>2</sub>S), chalcocite(CuS), galena(PbS), sphalerite[(Zn,Fe)S], chalcopyrite(CuFeS<sub>2</sub>), covellite(CuS), cinnabar(HgS), pyrite(FeS<sub>2</sub>), arsenopyrite(FeAsS) 등 다양한 황화광물이 있다. 우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 대표적인 암석은 중생대 화산암류, 고생대 옥천층군, 고생대 평안층군, 제3기 퇴적암 및 화산암, 제4기 퇴적층으로 파악되고 있다. 또한 전국에 산재해있는 국부적으로 열수에 의하여 광화작용을 받은 암석이 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 것으로 추정된다.

황화광물은 공기접촉이 차단된 지하에 존재할 때는 안정하나 건설공사 및 광업활동 과정의 지반굴착으로 지표에 노출되면 공기 중의 산소 및 물에 녹아 있는 산소와 반응하여 산화되고 산성배수를 생성시킨다. 가장 흔한 황화광물인 황철석의 산화과정은 다음과 같다(Stum and Morgan, 1995).



산성배수는 황화광물의 산화과정과 주변광물과 반응에 의하여 생성된 H<sup>+</sup>, 중금속, Al, Mn을 많이 함유하고 있다. 산성배수가 주변지역으로 유입되어 토양, 지표수, 지하수를 산성화 및 중금속으로 오염시킨다(Kalin *et al.*, 2006; Koryak *et al.*, 1972). 산성배수는 주변 암석을 용해시키고 암석의 풍화를 가속화하여 사면의 안정성을 저해한다. 산성배수가 절리를 따라 흐르게 되면 절리면의 간격을 넓혀 암괴의 이완을 촉진시키고 사면의 불안정을 초래한다(Kim, 2007). 우기에 암석의 틈에서 생성된 산성배수가 건기에 증발되면서 다양한 침전물을 생성한다. 건기에 생성된 침전물은 암석의 틈에서 쇄기작용을 하여 물리적 풍화를 촉진시키는 것으로 알려져 있다.

산성배수는 부식성이 강해서 산성에 약한 콘크리트, 철재 구조물의 부식을 촉진시킨다. 숯크리트가 시공된 사면에서는 산성배수는 콘크리트피막의 표면뿐만 아니라 피막과 암반사이에 존재하는 미세한 틈을 따라 흐르게 된다. 따라서 산성배수는 콘크리트의 표면부식과 피막과 암반사이에 배면공동을 형성시킨다. 사면 안정성을 증진시키기 위하여 설치된 철재 및 콘크리트

구조물의 부식은 사면안정성을 저해한다. 산성배수에 의한 토양의 산성화 및 중금속 오염은 식생의 발아, 뿌리의 활착과 성장에 장애를 유발하여 지표면 식생의 피복을 저해한다. 최근 환경친화적인 건설사업의 일환으로 사면녹화가 일반화되어 있다. 산성배수가 발생되는 사면에서 적절한 대책이 없이 적용되는 사면녹화의 실패가 빈번히 발생되고 있다. 산성배수에 함유된 철과 알루미늄은 산성배수가 주변의 암석과 콘크리트 등과 반응하여 중화되면서 생성된 붉은색 혹은 흰색의 산화철, 수산화알루미늄, 황산알루미늄 등 침전물은 주변의 경관을 훼손한다.

건설현장에서 절토된 대부분의 암석과 토사는 성토재 혹은 골재로서 재활용되고 있다. 콘크리트에 함유된 황화광물은 표면과 내면으로 연결된 미세한 틈을 따라 산소와 접촉하여 산화되고 산화과정에서 산성배수를 생성한다. 산성배수는 콘크리트를 부식시켜 표면과 내면에 틈을 확장시킨다. 산성배수에 함유된 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 콘크리트에 함유된 Ca, Na, Al, Fe 등 양이온과 반응하여 2차 광물을 생성한다. 대표적인 2차 광물은 thaumasite {Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>·12H<sub>2</sub>O]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>}, ettringite{Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>·12H<sub>2</sub>O]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>}, Gypsum(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), glauberite[Na<sub>2</sub>Ca(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>], halotrichite [(Fe,Mg)Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·22H<sub>2</sub>O], jarosite [KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>]이 있으며 이러한 광물은 시멘트의 입자결속력을 저감시키고 원래 콘크리트에 함유된 광물에 비해 부피가 큰 경향이 있다(Lee *et al.*, 2005). 내부 및 표면 틈의 확장과 2차 광물의 생성에 의한 팽창(blistering)은 콘크리트의 수명단축을 초래한다. 또한 성토재로 활용된 황화광물을 많이 함유한 암석 혹은 토사는 우수 및 지하수와 반응하여 산성배수를 발생시키고 주변지역으로 유입되어 환경문제를 야기시키고 있다.

산성배수에 대한 적절한 평가와 피해저감대책이 수립되지 않은 상태에서 시행한 건설현장에서 산성배수에 의한 피해가 발생되어 막대한 복원비용을 지출하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 건설현장에서 산성배수에 의한 피해를 저감하기 위하여 조사 및 설계 단계에서 건설예정구간의 지반에 대하여 산성배수 발생개연성 평가하고 적절한 피해저감대책의 수립 및 시행이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 경상남도 김해시 국가지원지방도60호선의 장재, 봉림1, 봉림2 터널 계획구간의 암석에 대한 산성배수의 발생개연성을 평가하고 산성배수에 의한 피해를 방지대책을 검토하였다.

2. 연구방법

2.1. 지표지질 및 시추코어 조사

경상남도 김해시 한림면 장재리와 생림면 봉림리를 연결하는 장재, 봉림1, 봉림2 터널 계획구간에서 지표 지질 및 시추코어 조사를 통하여 암석의 분포, 황화광물의 산출상태와 지질구조를 파악하였다. 지표지질조사 및 시추코어 조사결과를 검토하여 건설계획구간의 지질구조단면도와 황화광물의 분포도를 작성하였다.

2.2. 산성배수 발생 개연성 평가 및 피해저감대책 검토

터널 계획구간에서 채취한 시추코어(Table 1) 중 굴착예상 심도의 시료를 대상으로 황화광물의 존재여부를 육안으로 조사하고, 황화광물을 함유하고 있는 암석과 황화광물을 함유하지 않은 대표 암석(Table 2)을 선정하여 분석하였다. 분석 대상 시료는 파쇄기(crusher)를 이용하여 수cm 이하로 잘게 부수고 고르게 섞은 후 미분기(pulverizer)로 200mesh 이하로 분말화하였다. 분말 시료를 대상으로 1) 최대산발생능력(Maximum Potential Acidity, MPA), 2) 산중화능력(Neutralization Potential, NP), 3) 순산발생량(Net Acid Generation, NAG)을 측

정하였다(Jennings and Dollhopf, 1995; Jennings *et al.*, 2000; Siddharth *et al.*, 2002).

1) 최대산발생능력(MPA): 분말시료의 유황함량을 LECO사의 유황분석기를 이용하여 측정하고  $MAP (kgCaCO_3/t) = total S(\%) * 31.213$ 을 이용하여 MPA를 계산하였다. 2) 산중화능력(NP): 표준 1N HCl을 이용하여 시료 내에 함유된 산 중화물질을 모두 소모시킨 후 0.1N 혹은 0.5N NaOH로 적정하여 NP를 측정하였다. 3) 순산발생량(NAG): 분말시료에 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 조금씩 가하여 암석의 황화광물을 산화시키고 산화반응이 완료된 후 일정 부피로 용액의 양을 조절한다. 0.1N 혹은 0.5N NaOH를 이용하여 산화에 의하여 발생된 산(H<sup>+</sup>)의 양을 적정하여 측정하였다. 4) 순산발생능력(NAPP)은  $NAPP = MPA - NP$ 를 이용하여 계산하였다. 모든 측정은 2반복 시료를 이용하였으며, 순산발생량 측정 시에 3반복 시료를 이용하여 2개의 시료는 NAG측정에 이용하고 1개의 시료는 0.45 μm membrane filter를 이용하여 고체와 액체를 분리하였다. 용액의 전기전도도(EC), 양이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)과 음이온(F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 농도, 중금속의 농도를 측정하였다.

암석의 산성배수 발생개연성 및 위해도, 재활용, 사

Table 1. Core sample and location.

Area		Sample	Area		Sample
Jangjae Tunnel	Entrance	TB1	Bonglim 1 tunnel	Middle	TB13-1
		TB2			TB13-2
		TB3		Exit	TB14
	Middle	TB4			TB15
		TB5			Tb16
		TB6			Tb17
	Exit	TB7		Between Bonglim1 and 2 tunnel	
Bonglim 1 tunnel	Entrance	TB9			TB19
		TB10			TB20
		TB11	Bonglim 2 tunnel	Exit	Tb22
		TB12			TB23
		TB13			TB24
					TB25

Table 2. The selected core samples for the acid base accounting test.

Sample	Remark	Sample	Remark
TB-1	· Quartz porphyry · Disseminated pyrite	TB-13-2	· Sandstone · Vein type of pyrite, sphalerite and galena
TB-6	· Andesitic tuff	TB-15	· Sandstone
TB-9	· Volcanoclastic sandstone · Thin vein of pyrite	TB-20	· Sandstone · Vein type of pyrite, sphalerite and galena
TB-12	· Sandstone · Thin vein of calcite	TB-22	· Granite · Disseminated pyrite

후관리 등을 고려하여 산성배수에 대한 피해저감대책을 발생억제, 산성배수 처리, 암석 재활용으로 구별하여 검토하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 지표지질 및 시추코어

기존 지질도폭의 자료(Lee and Kim, 1964)에 의하면 연구지역은 화산암류와 화강암으로 구성되어있다. 야외조사 결과 이 지역에 분포하는 암석은 백악기 경상누층군의 유천층군에 해당하는 화산암과 퇴적암이 분포되어 있으며, 이들을 관입한 불국사 화강암이 관찰되었다.

장재터널구간은 회류응회암(ash flow tuff)으로 이루어진 화산암이 분포하고 있다. 터널입구에 분포하는 암석은 라피리응회암에 해당되며 동질의 암편을 많이 함유하고 있다. 터널입구의 북측에 응회암을 관입한 폭약 60m 석영반암이 분포하며, 풍화면에는 풍화에 강한 석영이 돌출되어 있는 특징을 보인다. 응회암은 열수변질작용에 의하여 납석화된 부분이 관찰되었다.

봉림1터널 구간의 암석은 주로 셰일과 이암이 협재한 사암으로 이루어져 있다. 사암과 이암은 응회질이며 층리의 발달이 미약한 반면 셰일에서는 층리의 발달이 양호한 편이다. 부분적으로 주변의 화강암의 관입으로 접촉변성작용을 받아 규화작용에 의해 혼펠스화된 부분도 관찰된다. 터널구간 동측부에서는 역질 사암이 분포되어 있는 것이 확인되며, 사암 내에 생긴 건열(sun crack)이 관찰된다.

봉림2터널 구간의 암석은 퇴적암과 이를 관입한 세립질 미분상 화강암으로 구성되어있다. 퇴적암은 이암, 사암, 역암으로 이루어져 있으며, 화강암의 관입에 의한 접촉변성작용으로 혼펠스화되어 있다. 화강암과 경계를 이루는 접촉부의 퇴적암은 강한 열변성작용으로 심하게 혼펠스화되어 있는 것이 확인된다.

장재터널구간에서는 8개의 시추코어 시료를 검토하였다. 지하에 분포하는 암상들은 지표에서 확인한 암상보다 더 많은 변화를 보여주며, 이는 층리가 잘 보이고 암상 특성의 연속성이 좋은 퇴적암보다 화산암이 공간적으로 변화가 심하다. 터널 시점 북측의 TB-1에서는 야외에서 관찰된 석영반암의 분포가 시추코어에서 확인 되었으며, 전반적으로 황철석이 산점상으로 전구간에 산출되고 있으며 섬아연석이 관찰되었다(Fig. 1A). TB-2과 TB-3에서 석영안산암질 내지 안산암질 래피리 응회암의 분포가 확인된다. 장재터널 본선지역

의 지하 암상 분포는 상부에서는 회류응회암의 유동구조를 보여주며, 래피리의 함량이 적은 세립질 응회암이 주이나, 하부에서는 구간별로 래피리의 각력이 많은 부분과 각력의 비율이 낮은 세립질 응회암 등 변화가 심하다. 또한 일부 구간에서는 안산암 lava flow의 양상을 보이는 곳도 관찰되며, 심도가 깊은 곳에서는 래피리 각력이 증가하는 경향이 있다. TB-6 지점부터 종점 부근인 TB-7까지는 ignimbritic phenocrysts인 사장석 반정을 포함하는 pyroclastic flow가 분포되어 있는 것이 확인된다.

봉림1터널 구간의 시점에서 확인된 암석들은 TB-8에서 상부에는 퇴적암이고 하부에는 화산암이 확인되는 것으로 보아 경계부일 가능성이 높다. 특히 이 지역은 열극 충전형과 그 주변에 산점상으로 산출되는 광화대가 확인되었다. TB-9-13에서는 사암과 역질 사암이 분포하고 있는 것이 확인되며, 간혹 적색 셰일 층이 협재되기도 한다. 그러나 TB-14과 TB-13-2 시료에서는 열극충진형 황화광물인 섬아연석, 황철석과 방연석이 맥상으로 발달하여 있으며 그 주변으로는 열수 변질작용인 녹염석화작용이 확인되며, 변질대내에 황철석이 산점상으로 산출되어 있는 것이 확인되었다(Fig. 1B).

봉림1터널과 봉림2터널 중간부분의 시추공(TB-20)에서 사암 내에 열극충진형 황철석, 섬아연석과 방연석이 관찰된다(Fig. 1C). 봉림2터널 종점부근의 시추공(TB-22)에서는 화강암이 분포하고 있는 것이 확인되며 절리면을 따라 황철석이 농집되어 있고 절리면 주변으로는 황철석이 산점상으로 산출되는 것이 확인된다.

터널건설계획구간의 지질단면과 황화광물의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 장재터널은 입구에 산점상의 황철석을 함유한 석영반암이 분포하며 터널 본선 및 출구에는 응회암이 분포하고 있다. 봉림1터널 구간의 지반은 사암으로 구성되어 있으며 입구와 본선 부분에 황철석, 섬아연석, 방연석 맥이 분포하고 있다. 봉림2터널의 지반은 사암과 산점상 및 맥상의 황철석을 함유한 화강암으로 구성되어 있다. 봉림1터널과 2터널의 중간부분은 봉림1터널과 같은 암상인 사암이 분포하고 있으며 맥상의 황철석, 섬아연석, 방연석이 관찰되었다.

#### 3.2. 암석의 산성배수 발생 개연성 및 오염물질 부하

시료의 최대산발생능력(MPA), 산중화능력(NP), 순산발생능력(NAPP), 순산발생량(NAG)을 Table 3에 나타내었다. 순산발생량(NAG)과 순산발생능력(NAPP)을 이용하여 암석을 산성배수 발생시키는 것과 산성배수를 발생 시키지 않는 것으로 분류하였다(Fig. 3). TB-1, TB-

9, TB-13-2 vein, TB-20 암석은 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 암석으로 분류되었다. 반면 다른 암석들

은 산성배수를 발생시킬 개연성이 낮은 암석으로 분류되었다. 육안관찰결과 화강암(TB-22)과 TB-13-2는 산

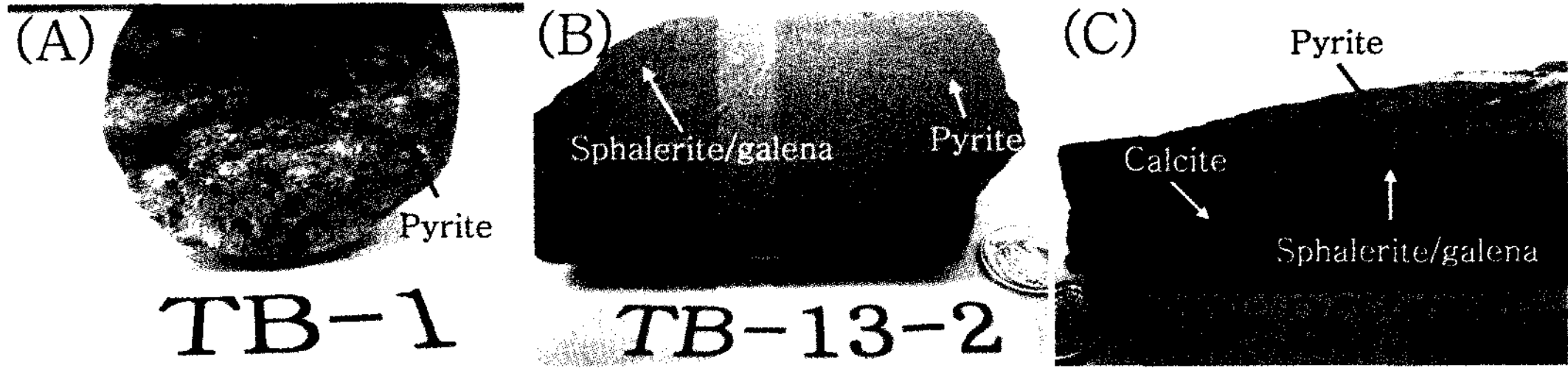


Fig. 1. Occurrence of sulfide in the selected core samples.

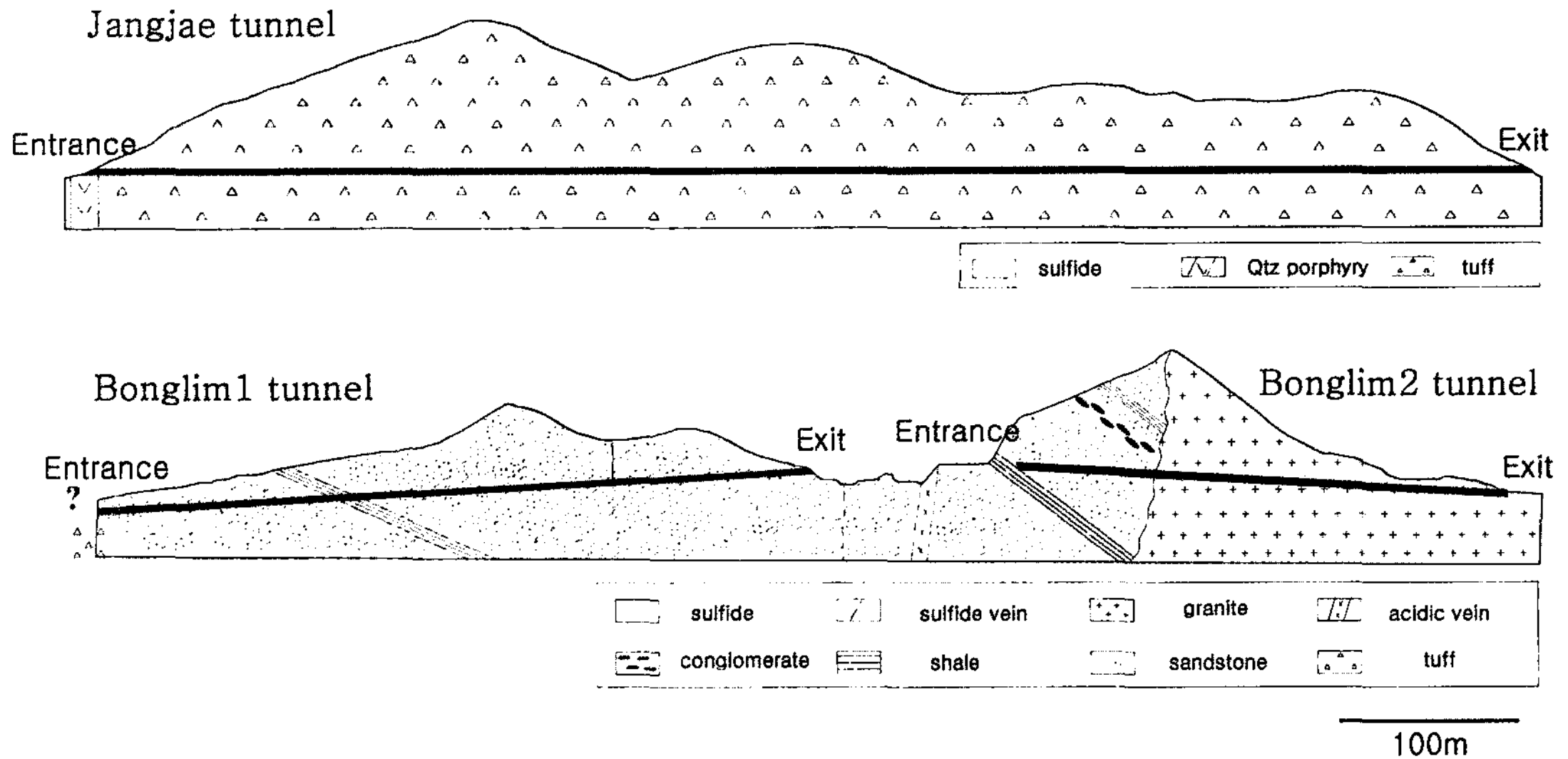


Fig. 2. Geological cross sections of the tunnel construction area.

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

Sample	Remark	Total S (%)	MPA (KgCaCO <sub>3</sub> /t)	NP (KgCaCO <sub>3</sub> /t)	NAPP (KgCaCO <sub>3</sub> /t)	NAG (KgH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t)	NP/MPA	NAG (pH)
TB-1*	Jangjae entrance, 9 m in depth	0.023	0.712	-0.037	0.749	0.521	-0.053	3.56
TB-1**	Jangjae entrance, 16 m in depth	0.079	2.477	-0.200	2.677	3.060	-0.081	2.77
TB-1***	Jangjae entrance, 22 m in depth	0.173	5.400	-0.162	5.562	2.450	-0.030	2.56
TB-6	Jangjae middle, 93 m in depth	0.001	0.027	19.338	-19.311	0.000	728.863	6.78
TB-9	Bonglim1 entrance	3.710	115.800	1.988	113.813	46.062	0.017	1.97
TB-12	Bonglim1 entrance	0.013	0.406	36.725	-36.319	0.000	90.542	6.91
TB-13-2	Bonglim1, 39 m in depth	0.208	6.492	18.225	-11.733	0.000	2.807	7.24
TB-15	Bonglim1 exit, 22 m in depth	0.001	0.025	1.975	-1.950	0.000	79.591	5.02
TB-20*	Between Bonglim1 and 2, 16 m in depth	6.630	206.942	33.400	173.542	98.147	0.161	1.65
TB-20**	Between Bonglim1 and 2, 16 m in depth	0.000	0.052	2.338	-2.338	0.000	45.387	5.22
TB-22	Bonglim2 exit	0.027	0.844	14.850	-14.006	0.000	17.598	6.49

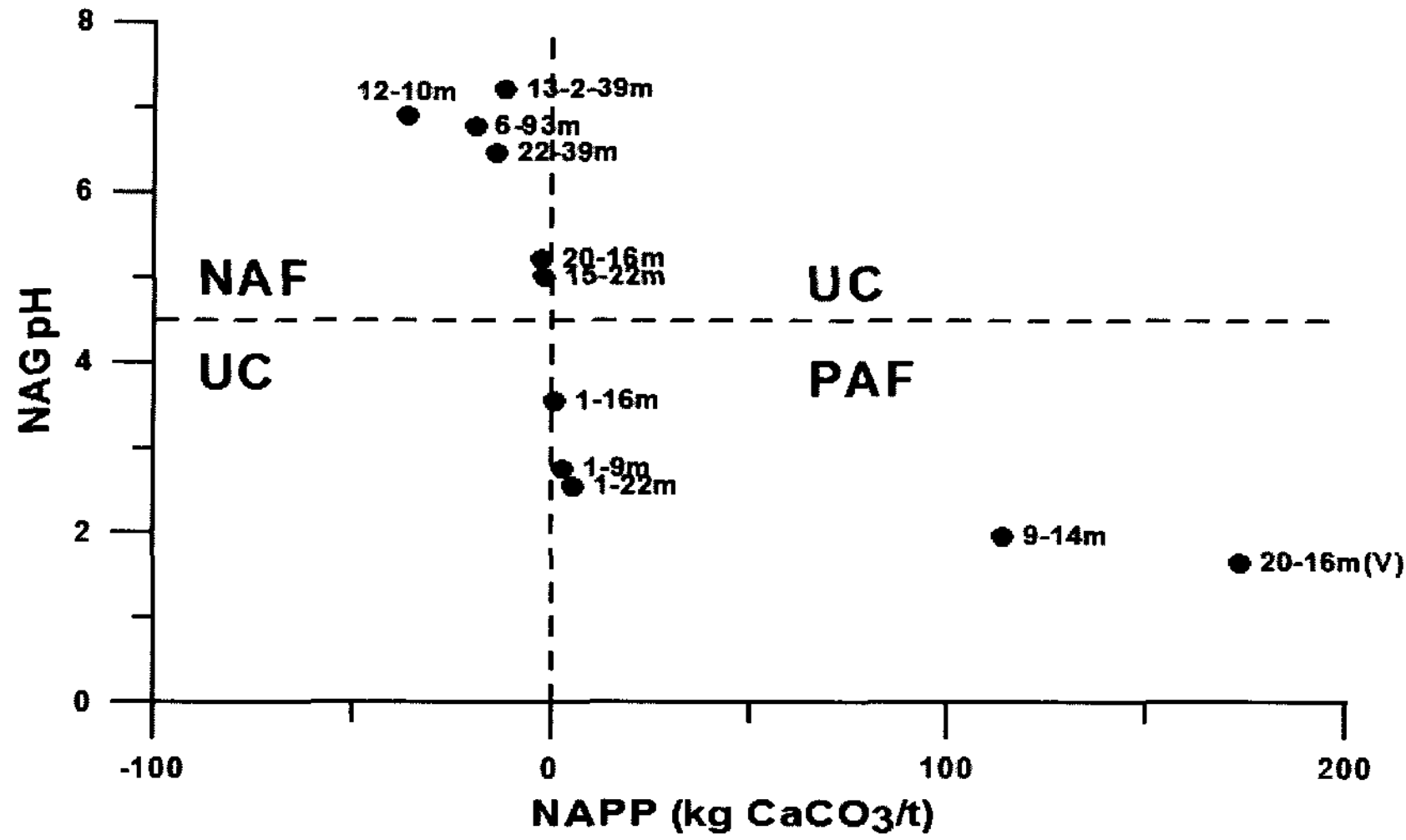


Fig. 3. The result of the acid base accounting test. NAF : nonacid drainage forming, PAF : Potentially acid drainage forming, UC: uncertain.

Table 4. Classification and utilization of rocks based on ARD risk level.

Risk level	NP/MPA	Sample	Remark
I	>2	TB-6, TB-12, TB-20, TB-22	· No ARD production
II	1-2	TB-13-2	· High ARD production potential and buffer capacity · Handle with caution
III	<1	TB-1, TB-9, TB-20 vein	· High ARD production potential · ARD damage reduction strategy required · Restricted utilization of excavated rock

Table 5. Concentrations of major cations and metals in the solution after the reaction of sample and 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1:100). \*9 m in depth, \*\*16 m in depth, \*\*\*22 m in depth. STD stands for Environmental standard for discharge water.

Sample	Mg	Ca	Na	K	Al	Mn	Fe	As	Cd	Ni	Zn	Pb	Cr	Co	Cu
	mg/L(ppm)					μg/L(ppb)									
TB-1*	0.17	2.24	0.96	2.84	568	1230	190	8	25	12	3070	1250	5	7	218
TB-1**	0.15	1.11	1.21	2.49	1520	40.0	492	1	65	11	1490	208	6	8	42
TB-1***	0.21	1.93	1.23	2.58	1700	38.0	477	1	6	12	56	56	7	7	15
TB-6	0.64	54.5	0.96	1.93	83	128.0	6	7	5	11	4	2	7	6	10
TB-9	6.16	10.1	2.35	4.01	9190	1220	33000	92	14	38	14	114	11	212	84
TB-12	0.84	52.0	1.13	0.21	102	129.0	8	7	5	11	5	4	5	11	13
TB-13-2	0.59	39.0	1.06	0.20	101	86.0	6	6	5	10	5	4	5	5	17
TB-15	1.11	2.64	1.13	0.17	73	88.0	67	28	2	5	2	2	10	6	6
TB-20	1.20	5.06	1.30	0.21	58	248.0	47	7	5	12	5	5	7	6	8
TB-20V	27.40	135.8	1.50	0.61	24304	3640	136350	256	43	173	43	43	10	429	83
TB-22	0.41	52.8	0.90	0.63	44	34.0	35	51	2	5	2	2	8	5	4
STD					300	2000	200	100	20		1000	200	500		500

성배수를 발생시킬 개연성이 있는 것으로 판단되었으나 ABA test 결과 산성배수를 발생시킬 개연성이 낮은 것으로 나타났다. 산중화능력(NP)/최대산발생능력

(MPA)를 이용하여 산성배수의 위해도에 따라 암석을 3등급으로 분류하였다(Table 4). TB-1, TB-9, TB-20-vein은 산성배수에 의하여 피해를 나타낼 개연성이 높

**Table 6.** Concentrations of anions in the solution after the reaction of the sample and 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1:100). \*9 m in depth, \*\*16 m in depth, \*\*\*22 m in depth.

Sample	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	----- mg/L -----			
TB-1*	0.178	0.589	0.552	9.896
TB-1**	0.183	0.600	0.406	1.211
TB-1***	0.183	0.388	0.000	0.730
TB-6	0.197	0.374	0.411	0.518
TB-9	0.214	1.045	0.348	11.823
TB-12	0.274	0.464	0.412	0.554
TB-13-2	0.212	0.459	0.000	1.021
TB-15	0.198	0.554	0.000	0.000
TB-20	1.245	0.686	0.000	1.455
TB-20V	0.679	0.620	0.000	14.505
TB-22	0.230	1.194	0.000	2.554

은 III등급 암석이며 TB-13-2는 주의가 요구되는 II등급 암석으로 분류되었다.

암석 분말시료와 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>용액(1:100)을 반응 시킨 후 용액의 주 양이온과 중금속의 농도를 Table 5에 도시하였다. 황화광물의 산화시험결과 TB-1, TB-9과 TB-20V 암석으로부터 발생하는 산성배수는 중금속(Zn, Pb, As), 철, 망간, 알루미늄이 높을 것으로 판단된다. 따라서 터널공사에 의하여 발생하는 산성배수의 중화뿐만 아니라 중금속 제거에 필요한 대책이 적용되어야 할 것으로 판단된다. 시료와 과산화수소용액의 반응 후 음이온(F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 농도는 암석의 산화와 용해과정의 반응을 유추할 수 있다(Table 6). 특히 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 대부분 황화광물의 산화에 의하여 생성된 산물로 판단된다. 육안관찰에서 황화광물의 존재가 확인된 TB-1, TB-9, TB-13-2, TB-20, TB-20V, TB-22 시료에서 상대적으로 높은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도를 나타내었다. 높은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도를 가지는 TB-1, TB-9, TB-20V 시료는 산성암반배수를 발생 시킬 개연성이 높음을 의미한다(Stum and Morgan, 1995). TB-13-2와 TB-22시료는 상당량의 황화광물을 함유하고 있어 황화광물의 산화에 의하여 황산이 발생되나 산(H<sup>+</sup>)에 대한 중화능력이 높은 광물을 함유하고 있어 산성배수를 발생시킬 개연성이 낮은 것으로 나타났다.

장재터널 입구, 봉림1터널 입구, 봉림1과 2터널 사이에 분포하는 암석은 향후 터널공사과정에서 지반굴착에 의하여 산성배수가 발생될 개연성이 높은 것으로 판단된다. 봉림2터널구간에 분포하는 화강암은 황철석을 많이 함유하고 있으나 암석의 조직이 치밀하여 황철석의 산화가 느리게 진행되어 산성배수에 의한 피해가 미약할 것으로 판단된다.

#### 4. 산성배수에 대한 대책공법 검토

##### 4.1. 산성암반배수의 발생억제

산성배수는 황화광물의 무생물학적 및 생물학적 반응에 의하여 발생된다. 암석으로부터 산성배수의 발생을 근원적으로 억제하거나 저감하는 것은 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). 황철석 표면의 피막형성을 위한 처리제로 인산염, 규산염, KMnO<sub>4</sub> 용액이 있으며 피막형성기술은 현장에서 그 효능이 입증되었으며 비교적 저비용의 대책공법으로 알려져 있다.

휴폐광산 복원에서 산성배수를 발생시키는 광산폐기물을 대기과 용존산소를 함유한 물과의 접촉을 물리적으로 차단하는 공법이 많이 활용되고 있다. 차단공법은 지중매립과 수중매립이 활용되고 있다. 지중매립은 산성배수 발생물질을 점토, high density polyethylene 등을 이용하여 대기, 우수, 지하수와 접촉을 차단시키고 매립하는 방법이다. 수중매립은 인공습지를 조성하여 호수 바닥에 산성배수를 발생시키는 물질을 충전하고 산성배수 발생물질의 상부에 일정 두께의 불투수성 토양으로 덮은 후에 호수에 담수하는 것으로서 토양과 물에 의하여 산소의 접촉을 차단하는 공법이다(Blowes *et al.*, 1991; Nicholson *et al.*, 1989).

미생물은 황화광물을 직접 산화시키거나 산화반응을

촉진시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 황화광물의 산화에 관여하는 미생물의 활동을 억제함으로써 산성배수의 발생을 저감할 수 있다. 미생물의 활동억제를 위하여 sodium lauryl sulfate, sodium benzoate와 같은 살균제를 현장에서 사용하고 있으나 살균제에 의한 환경오염문제로 사용이 제한되고 있는 실정이다(Sobek *et al.*, 1990).

#### 4.2. 산성배수의 처리

산성배수의 처리는 적극적 처리(active treatment)와 소극적 처리(passive treatment)로 구별된다(Johnson and Hallberg, 2005). 적극적 처리는 화학적 중화제인 NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub> 등을 이용하여 산성배수를 중화시키고 동시에 중금속을 침전시켜 정화시키는 공법이다. 지속적인 중화제의 투입, 침전물의 제거 등 관리가 어렵고 고비용의 처리공법으로 알려져 있다. 소극적 처리는 적극적 처리와 달리 지속적인 처리제의 투입을 지양하고 자연적인 생물학적 및 화학적 작용을 이용하여 산성배수를 중화하고 중금속을 제거하는 처리방법이다. 대표적인 소극적 처리방법은 constructed aerobic or anaerobic wetland, successive alkalinity producing systems(SAPS), anoxic limestone drains(ALD), limestone pond, open limestone channel(OPC)가 있다. 단일 종류의 처리방법 혹은 2가지 이상의 처리방법을 조합하여 현장에 적용한다. 처리방법의 선정은 산성배수의 pH, 용존산소농도, Fe와 Al 농도, Fe<sup>2+</sup>와 Fe<sup>3+</sup>의 비율 등에 의하여 결정된다(Hedin *et al.*, 1994).

#### 4.3. 터널건설 예정구간의 산성배수 피해저감대책

장재터널 시점, 봉림1터널 시점, 봉림1터널 본선에서 사면절취와 터널굴착은 황화광물을 함유한 암석의 노출로 산성배수가 발생될 개연성이 높다. 따라서 터널 내외부의 사면에서 산성배수가 발생되어 환경오염과 사면의 안정성을 저해할 것으로 판단되며 산성배수의 발생을 근본적으로 저감시킬 대책수립 및 시행이 필요하다. 장재터널 시점과 봉림1터널 시점은 사면 절취 후 산성배수 발생억제 대책인 규산염 혹은 인산염 코팅기술이 적용되어야할 것으로 판단된다. 코팅기술의 적용 후 인공토양을 이용한 식생피복을 실시하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 사면에서 식생피복은 경관회복뿐만 아니라 식물뿌리가 암석을 결박하여 사면안정성을 증진시킬 수 있다. 또한 인공토양을 이용한 식생피복은 인공토양과 식생에 의하여 공급되는 유기물에 의하여 사면으로 침투하는 우수의 용존산소를 제거할 수

있어 사면에서 산성배수의 발생을 저감시키는 효과가 있을 것으로 기대된다(Shamshuddin *et al.*, 2004). 산성배수가 발생되는 봉림1터널 내부 굴착면은 코팅기술을 적용하고 산성에 강한 몰타르를 사용하여 처리하면 산성배수의 발생을 억제하고 굴착면의 안정성을 증진시킬 것으로 판단된다.

장재터널 시점과 봉림1터널 시점의 사면절취와 봉림1터널 굴착공사기간 중에 터널과 사면으로부터 산성배수가 발생될 개연성이 높다. 공사기간 중에 발생하는 산성배수의 중화 및 중금속 제거 처리를 위한 시설의 설치 및 운영이 필요하다. 굴착암석의 임시적치장은 산성배수 발생 및 유출 억제를 위한 차수대책이 필요하며 적치장의 배수는 터널수와 사면배수 처리시설과 연결하여 처리하면 된다. 준공 후에 발생될 개연성이 있는 산성배수의 처리는 소규모 인공습지와 석회암수로의 병합형태가 적절할 것으로 판단된다.

#### 4.4. 굴착암석의 처리 및 재활용

##### 4.4.1. 석영반암

장재터널 시점에 분포하는 암석으로서 황철석을 많이 함유하고 있으며 굴착에 의하여 산성배수가 발생될 개연성이 높은 암석으로 분류되었다. 골재로서의 재활용은 불가능할 것으로 판단되며 노반 성토재로서 활용에는 주의가 필요하다. 성토재로 재활용 시에는 우수 및 지하수와 접촉을 피할 수 있는 성토층의 구조를 가지며 산성배수의 발생에 대비하여 중화제를 첨가하여 활용하여야할 것으로 판단된다.

##### 4.4.2. 응회암

장재터널 본선구간에 분포하는 암석으로서 산성배수가 발생될 개연성이 없는 암석으로 판명되었다. 따라서 암석의 물성이 활용대상의 조건에 적합하면 활용에 제약이 없을 것으로 판단되나 주변에 납석광산과 산점상 내지 맥상의 황철석이 산출되는 것이 확인되고 있으며 시추조사에서 누락된 위험구간이 있을 개연성이 높다. 시공과정에서 황화광물의 산출이 확인되면 골재로서 사용배제, 사면처리, 굴착암석의 처리는 산성배수가 발생되는 암석의 처리에 준용한다.

##### 4.4.3. 사암

봉림1터널과 봉림2터널 계획구간에 분포하는 암석으로서 맥상의 황화광물이 협재한다. 황화광물을 함유하고 있으나 중화능력이 높은 석회석을 많이 함유하고 있어 산성배수에 의한 피해가 크지 않을 것으로 판단



된다. 따라서 노반 성토재로서 활용에 제약이 없을 것으로 판단되나 일부 구간에서 황화광물이 맥상으로 산출되고 있어 골재로서의 사용에 주의가 필요하다.

#### 4.4.4. 화강암

봉림2터널 계획구간의 종점과 본선구간에 분포하는 암석으로서 ABA test결과 산성암반배수가 발생될 개연성이 높지 않는 것으로 밝혀졌으나 육안관찰결과 상당량의 황철석이 함유되어 있다. 화강암은 암석의 조직이 치밀하여 다른 암석에 비하여 암석내부로 물의 침투가 어렵다. 따라서 황철석의 함량이 동일한 다른 암석에 비하여 산성암반배수의 발생량이 상대적으로 낮다. 노반 성토재로서 활용에는 제약이 없으나 골재로의 활용은 부적합할 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

경상남도 김해시 국가지원지방도60호선 터널건설예정구간의 암석에 대한 산성배수 발생개연성과 위해도를 평가하고 이를 바탕으로 산성배수에 의한 피해저감대책을 검토하였다. 터널건설예정구간의 암석은 석영반암, 세일, 이암과 역암이 협재한 사암, 응회암, 화강암으로 구성되어 있다. 석영반암과 화강암은 분산형태의 황철석을 함유하고 있으며 일부구간의 사암은 맥상의 황철석, 방연석, 섬아연석을 함유하고 있다. 석영반암과 황화광물이 맥상으로 산출되는 암석은 산성배수의 발생개연성이 매우 높고 건설공사과정에서 산성배수에 의한 피해가 예상된다. 화강암은 암석의 조직이 치밀하여 함유된 황철석의 산화가 느리게 진행되어 산성배수에 의한 피해가 나타나지 않을 것으로 판단하였다. 산성배수가 발생될 개연성이 높은 굴착면은 코팅기술 등을 이용하여 산성배수의 발생을 억제시키는 공법을 적용한 후 숏크리트, 식생녹화 등의 공법이 적용되어야 한다. 또한 산성배수에 의한 피해가 우려되는 암석은 골재로서 활용이 어려우며 성토재로서 활용 시에 지하수 및 지표수와 접촉을 최소화할 수 있는 성토층 구조를 조성하여야 할 것으로 판단된다.

### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기관고유사업인 지질재해피해평가 및 대응기술 실용화사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Lee, H.Y. and Kim, S.W. (1964) Geological map of Kumhae sheet. Geological Survey of Korea, 28p.
- 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.
- Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J.L. and Cherry, J. (1991) The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v. 55, p. 965-978.
- 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.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W. and Kleinmann, R.L. (1994) Passive treatment of coal mine drainage. US Bureau of Mines. Information Circular 9389.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lee, H., Cody, R.D., Cody, A.M. and Spry, P.G. (2005) The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 332-343.
- Lee, H.Y. and Kim, S.W. (1964) Geological map of Kumhae sheet. Geological Survey of Korea. 28p.
- 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.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A. and Reardon,

- E.J. (1989) Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barrier. *Can. Geotech. J.*, v. 26, p. 1-8.
- 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 materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Science of the Total Environment*, v. 323, p. 33-45.
- Siddharth, S., Jamal, A., Dhar, B.B. and R. Shukla, (2002) Acid-base accounting: a geochemical tool for management of acid drainage in coal mines. *Mine Water and the Environment*, v. 21, p. 106-110.
- Sobek, A.A., Rastogi, V. and Bendetti, D.A. (1990) Prevention of water pollution problems in mining: the bactericide technology. *Mine Water and the Environment*, v. 9, p. 133-148.
- Stum, W. and Morgan, J.J. (1995) *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*, 3rd 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.

---

2008년 5월 2일 원고접수, 2008년 6월 12일 게재승인.